

การปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง
ด้วยระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและอุปกรณ์ FACTS



นายพิทักษ์ ทางรัตนสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

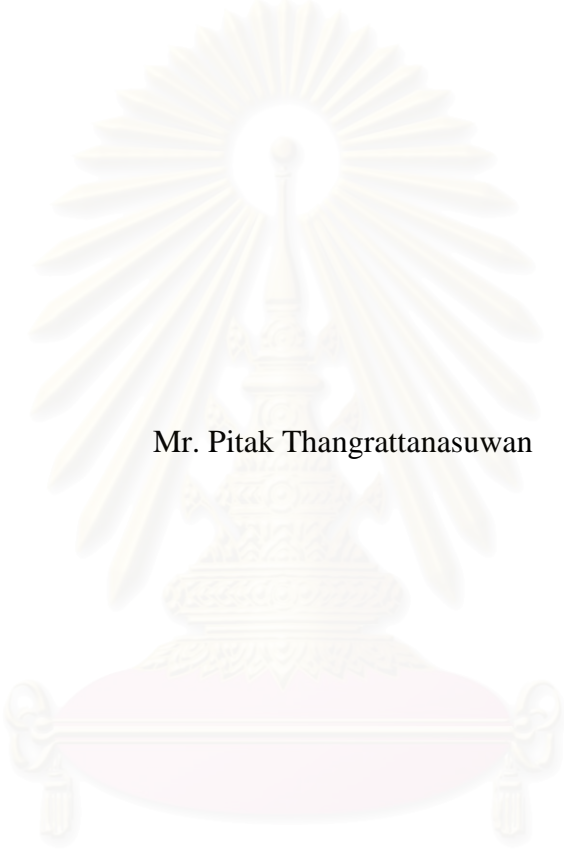
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1464-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POWER SYSTEM PERFORMANCE IMPROVEMENT
BY HVDC TRANSMISSION SYSTEMS AND FACTS DEVICES



Mr. Pitak Thangrattanasuwan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1464-3

พิทักษ์ ทางรัตนสุวรรณ : การปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยระบบส่งไฟฟ้า
กระแสตรงแรงดันสูงและอุปกรณ์ FACTS (POWER SYSTEM PERFORMANCE
IMPROVEMENT BY HVDC TRANSMISSION SYSTEMS AND FACTS DEVICES)
อ. ที่ปรึกษา รศ.ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, 167 หน้า. ISBN 974-03-1464-3

ในปัจจุบันการก่อสร้างและการขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลังให้มีปริมาณเพียงพอกับความ
ต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นมักจะถูกจำกัดโดยเงื่อนไขทางด้านสิ่งแวดล้อมและเงื่อนไข
ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ทำให้เกิดแนวความคิดในการใช้ประโยชน์จากระบบส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่
เดิมให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากนี้ การปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้าและการจัดตั้งตลาดกลางซื้อ
ขายไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณและทิศทางการไหลของ
กำลังไฟระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าและศูนย์กลางความต้องการพลังงานไฟฟ้าไปอย่างมาก
และรวดเร็ว ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการดำเนินงานควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้
ไหลผ่านโครงข่ายสายส่งอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ความก้าวหน้าในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ที่มี
ความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งได้แก่ เทคโนโลยีระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
และเทคโนโลยี FACTS ซึ่งสามารถจัดการกับปัญหาข้างต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้
ระบบไฟฟ้ากำลังมีสมรรถนะที่สูงขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังด้วย
ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและอุปกรณ์ FACTS ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การควบคุมการ
ไหลของกำลังไฟฟ้า การแก้ไขปัญหาค้างเกินในสายส่ง การเพิ่มความสามารถในการส่งผ่าน
กำลังไฟฟ้าสูงสุด และการลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า โดยอาศัยการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลว์
เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลกระทบของอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อระบบ นอกจากนั้น
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการคำนวณเพาเวอร์ฟลว์ที่เป็นระบบและมีประ
สิทธิภาพสูงโดยใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสัน สำหรับโปรแกรมการคำนวณที่ได้พัฒนาขึ้นนี้อาศัย
เทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสมเพื่อเพิ่มความเร็วในการคำนวณและลด
จำนวนหน่วยความจำที่ใช้

วิธีการที่นำเสนอทั้งหมดจะนำมาทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE ผลการ
ทดสอบแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและอุปกรณ์ FACTS เพิ่มเข้า
ไปในระบบไฟฟ้ากำลังจะช่วยปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังให้สูงขึ้นเป็นอย่างมาก

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา _____ 2544 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

437-04220-21 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD : POWER FLOW / HVDC / FACTS DEVICES / LINE OVERLOAD
TOTAL TRANSFER CAPABILITY / ECONOMIC DISPATCH
PITAK THANGRATTANASUWAN : POWER SYSTEM
PERFORMANCE IMPROVEMENT BY HVDC TRANSMISSION
SYSTEMS AND FACTS DEVICES
ADVISOR : ASSOC. PROF BUNDHIT EUA-ARPORN, Ph. D
167 pp. ISBN 974-03-1464-3

In recent years, the construction and expansion of new transmission systems to serve the increased electricity demand has been limited by environmental and economic constraints. Therefore, it is necessary to efficiently utilize the existing transmission system capabilities. However, the locations of generation and the load centers can change dramatically and rapidly in deregulated and power pool market. So, it becomes more important to control the power flow along the transmission network efficiently.

The fast development of power electronic devices has led to innovative technologies such as High Voltage Direct Current (HVDC) transmission systems and Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) which provide better impact to electric power system considerably. Using these technologies, the entire problems described above can be handled efficiently.

This thesis presents an alternative approach to improve the electric power system performance with HVDC transmission systems and FACTS devices. The system performance improvement consists of controlling the power flow, relieving the line overload, increasing the power transfer capability and decreasing generation costs. Since HVDC transmission systems and FACTS devices are new control devices employed within the electric power systems, there is a need for developing tools to investigate their impacts on the systems. Using power flow analysis as a tool, this thesis presents a systematic and efficient algorithm for performing power flow calculation of a generalised power system configuration. The proposed power flow program is based on the Newton-Raphson method, complemented with sparsity and optimal bus ordering techniques. Using these programming techniques, the proposed program has become faster and uses the storage requirements lower than the conventional program.

The proposed methods have been tested with the standard IEEE test systems. The obtained results demonstrate that the proposed methods can be used to verify the effects of HVDC transmission systems and FACTS devices on the power system and we can use these control devices to improve the power system performance with satisfied results.

Department Electrical Engineering Student's signature _____
Field of study Electrical Engineering Advisor's signature _____
Academic year 2001 Co-Advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีมาตลอด รวมทั้งได้กรุณา ตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ดร.แนบบุญ หุนเจริญ และคุณอมรเดช วิรัชศิริ ที่ได้ เสียสละเวลาในการตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นายพิทักษ์ ทางรัตนสุวรรณ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์.....	6
2.1 แบบจำลองขององค์ประกอบพื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	6
2.2 สมการเพาเวอร์โฟลว์.....	8
2.3 ประเภทของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง	12
2.4 การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน.....	13
2.5 การหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โฟลว์ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน.....	14
2.6 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งไฟฟ้าและกำลังสูญเสีย.....	19
2.7 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าและกำลังสูญเสีย.....	19
2.8 การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม.....	20
2.8.1 หม้อแปลงชนิดปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลด.....	20
2.8.2 หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส.....	22
2.8.3 หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ป.....	23
2.8.4 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ.....	24
2.8.5 อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมชนิดปรับค่าได้.....	25
2.8.6 อุปกรณ์ชดเชยแบบขนานชนิดปรับค่าได้.....	26
2.9 ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	28
2.9.1 ส่วนประกอบของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	30
2.9.2 แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	32
2.9.3 สมการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์.....	33
2.9.4 การวิเคราะห์เอซี-ดีซีเพาเวอร์โฟลว์	33

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.10 เทคโนโลยี FACTS	37
2.10.1 การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	38
2.10.2 การเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่ง.....	41
2.10.3 การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลว์เมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ FACTS.....	41
2.10.3.1 อุปกรณ์ Static VAR Compensator.....	41
2.10.3.2 อุปกรณ์ Thyristor Controlled Series Compensator.....	44
2.10.3.3 อุปกรณ์ Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.....	46
2.10.3.4 อุปกรณ์ Unified Power Flow Controller.....	49
3. การปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	54
3.1 การเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	55
3.2 การแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง.....	56
3.3 การเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	72
3.4 การลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า.....	76
4. เทคนิคในการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	91
4.1 เทคนิค SPARSE	91
4.2 เทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม.....	95
5. ตัวอย่างการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	98
5.1 การทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์ฟลว์.....	98
5.2 การเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	105
5.3 การแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง.....	130
5.4 การเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	135
5.5 การลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า.....	139
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	143
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	143
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	146
รายการอ้างอิง.....	147
ภาคผนวก.....	150
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	167

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์.....	98
5.2 ตารางแสดงจำนวนสมาชิกเมตริกซ์จาร์โคเบียนและปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลก่อนการกำจัดแบบเกาส์.....	102
5.3 ตารางแสดงจำนวนสมาชิกเมตริกซ์จาร์โคเบียนและปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลหลังการกำจัดแบบเกาส์.....	102
5.4 ตารางแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่บัส.....	105
5.5 ตารางแสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งและกำลังสูญเสีย.....	105
5.6 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อปรับขนาดของแท็ปหม้อแปลงTCUL...	106
5.7 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ (หรือปรับค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ) ของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน.....	107
5.8 ตารางแสดงผลกระทบของขีดจำกัดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่มีผลต่อความสามารถในการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เจนเนอเรเตอร์บัส.....	111
5.9 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมกรณีที่ 1	113
5.10 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมกรณีที่ 2	114
5.11 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อทำการปรับมุมเฟสของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส.....	115
5.12 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อทำการปรับขนาดแท็ปของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ป.....	120
5.13 ตารางแสดงคุณลักษณะของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	122
5.14 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	122
5.15 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	123
5.16 ตารางแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่บัสเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ UPFC.....	126
5.17 ตารางแสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ UPFC	126
5.18 ตารางแสดงผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC.....	127
5.19 ตารางแสดงคุณลักษณะของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	127

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.20 ตารางแสดงผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	127
5.21 ตารางแสดงผลการคำนวณเพาเวอร์โพล์ในกรณีพื้นฐาน ของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส.....	128
5.22 ตารางแสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการควบคุมและอุปกรณ์ควบคุม	128
5.23 ตารางแสดงผลการคำนวณเพาเวอร์โพล์ของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส.....	129
5.24 ตารางแสดงผลการคำนวณเพาเวอร์โพล์ของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส.....	129
5.25 ตารางแสดงเงื่อนไขการเกิดเหตุขัดข้องและกำลังเกินในสายส่ง.....	130
5.26 ตารางแสดงดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของอุปกรณ์ TCSC.....	131
5.27 ตารางแสดงดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของอุปกรณ์ TCPAR.....	131
5.28 ตารางแสดงดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของอุปกรณ์ UPFC.....	131
5.29 ตารางแสดงผลการคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์และผลการแก้ไขปัญหา กำลังเกินในสายส่งของอุปกรณ์ TCSC.....	133
5.30 ตารางแสดงผลการคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์และผลการแก้ไขปัญหา กำลังเกินในสายส่งของอุปกรณ์ TCPAR.....	133
5.31 ตารางแสดงผลการคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์และผลการแก้ไขปัญหา กำลังเกินในสายส่งของอุปกรณ์ UPFC.....	133
5.32 ตารางแสดงผลการคำนวณค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด กรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2.....	137
5.33 ตารางแสดงผลการคำนวณค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด กรณีที่ 3 และ กรณีที่ 4.....	137
5.34 ตารางแสดงผลการคำนวณค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด กรณีที่ 5 และ กรณีที่ 6.....	137
5.35 ตารางแสดงค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3.....	138
5.36 ตารางแสดงค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีที่ 4 และกรณีที่ 5.....	138
5.37 ตารางแสดงค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีที่ 6.....	138
5.38 ตารางแสดงผลการจัดสรรกำลังผลิตและราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า.....	140
5.39 ตารางแสดงผลการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCSC.....	140
5.40 ตารางแสดงผลการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCPAR....	140
5.41 ตารางแสดงผลการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ UPFC.....	140

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน STAGG 5 บัส.....	151
ก.2 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน STAGG 5 บัส.....	152
ก.3 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส.....	153
ก.4 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส.....	153
ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	155
ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	156
ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส.....	157
ก.8 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส.....	159

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	6
2.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	7
2.3 แบบจำลองสมมูลแบบไพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	7
2.4 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า.....	8
2.5 แบบจำลองของโหลด.....	8
2.6 ความสมดุลของกำลังไฟฟ้า.....	8
2.7 แบบจำลองของหม้อแปลงชนิดปรับแก้ไปได้ในขณะมีโหลด.....	20
2.8 แบบจำลองของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส.....	22
2.9 แบบจำลองของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแก้ไป.....	23
2.10 แบบจำลองของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	24
2.11 แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมชนิดปรับค่าได้.....	25
2.12 แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานชนิดปรับค่าได้.....	26
2.13 ส่วนประกอบของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	30
2.14 แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	32
2.15 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่ต่อขนานกัน.....	38
2.16 การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบโครงข่าย.....	39
2.17 แบบจำลองของอุปกรณ์ SVC	42
2.18 แบบจำลองของอุปกรณ์ TCSC.....	44
2.19 แผนภาพไดอะแกรมของอุปกรณ์ TCPAR.....	46
2.20 แบบจำลองของอุปกรณ์ TCPAR.....	47
2.21 แผนภาพไดอะแกรมของอุปกรณ์ UPFC.....	49
2.22 แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC.....	49
2.23 โหมดการทำงานของอุปกรณ์ UPFC.....	51
2.24 แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC ที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์ฟลิว.....	51
3.1 แบบจำลองของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC.....	58
3.2 แบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC.....	58
3.3 แบบจำลองของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR	59
3.4 แบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR	60

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แบบจำลองของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC.....	60
3.6 แบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC.....	61
3.7 การวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง.....	63
3.8 อัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์.....	71
3.9 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	73
3.10 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบ ไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS	75
3.11 ขั้นตอนในการคำนวณหาสมาชิกของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์-B.....	84
3.12 ขั้นตอนในการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์.....	85
3.13 ขั้นตอนในการจัดสรรกำลังผลิตใหม่.....	88
3.14 ขั้นตอนของการแก้ไขปัญหากำลังเกินโดยใช้อุปกรณ์ FACTS.....	90
4.1 โครงสร้างข้อมูลประเภทลิ่งคัลลิสต์.....	92
4.2 โครงสร้างข้อมูลแบบมัลติลิ่งคัลลิสต์.....	93
4.3 ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างขนาด 3 บัส.....	94
4.4 การจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลบัส.....	94
4.5 การจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลบรานซ์.....	95
4.6 ระบบตัวอย่างขนาด 5 บัส.....	96
5.1 เวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์.....	100
5.2 ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสมาชิกเมตริกซ์จาร์โคเบียน.....	103
5.3 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับขนาดของแท็ปหม้อแปลง TCUL.....	106
5.4 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์หรือปรับค่า กำลังไฟฟารีแอกทีฟของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน.....	108
5.5 คุณลักษณะของค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC.....	109
5.6 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับมุมจุดชนวนเกิดของอุปกรณ์ SVC....	110
5.7 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชย แบบอนุกรมที่ติดตั้งบนสายส่ง 3-4.....	113
5.8 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชย แบบอนุกรมที่ติดตั้งบนสายส่ง 2-4.....	114

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อทำการปรับมุมเฟสของหม้อแปลงควบคุม ชนิดปรับเฟสที่ติดตั้งบนสายส่ง 3-4.....	116
5.10 คุณลักษณะของค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC.....	117
5.11 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อทำการปรับมุมจุดชนวนเกิดของอุปกรณ์ TCSC..	118
5.12 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อทำการปรับมุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป ของอุปกรณ์ TCPAR ที่ติดตั้งบนสายส่ง 3-4.....	119
5.13 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เมื่อทำการปรับขนาดของแท็ปหม้อแปลงควบคุม ชนิดปรับแท็ป.....	121
5.14 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์กรณีติดตั้งอุปกรณ์ UPFC.....	124
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับ V_B และ δ_B	125
ก.1 ระบบทดสอบ STAGG 5 บัส.....	151
ก.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส.....	152
ก.3 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	154
ข.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์.....	163
ข.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์.....	165

บทที่ 1

บทนำ

ความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง ในอดีตจุดศูนย์กลางของความต้องการพลังงานไฟฟ้า (Load center) มักจะกระจุกตัวอยู่เป็นกลุ่มใกล้ๆ กับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ทำให้การจัดหาพลังงานไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นไปอย่างสะดวกรวดเร็ว และไม่ซับซ้อน ปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ก็สามารถแก้ไขให้คล่องไปได้โดยการใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ซึ่งได้แก่ หม้อแปลงชนิดปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลด (Tap Changing Under Load Transformer: TCUL) หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ป (Tap changing transformer) หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส (Phase shifting transformer) อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม (Series Compensator) อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน (Shunt Compensator) เป็นต้น ต่อมา จำนวนกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น และได้ขยายตัวออกไปจนครอบคลุมทั่วทั้งประเทศ ทำให้จุดศูนย์กลางของความต้องการพลังงานไฟฟ้ากระจายออกไป และเริ่มอยู่ห่างไกลจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อยๆ เช่น อยู่ในชนบทที่ห่างไกล หรืออยู่บนเกาะที่ห่างจากฝั่ง ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมาเช่น ปัญหาทางด้านเสถียรภาพ ปัญหาเกี่ยวกับขนาดของแรงดัน และที่สำคัญที่สุดคือ ปัญหาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากการส่งพลังงานไฟฟ้าไปในระยะทางไกลๆ จะต้องส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยขนาดแรงดันที่สูง งบประมาณและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงมีราคาแพงมาก ดังนั้น จึงมีการนำระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าไปในระยะทางไกลๆ ในกรณีที่มีเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่ดีกว่า

ความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้น อาจทำให้เกิดความไม่พอเพียงในการจัดหาพลังงานไฟฟ้าโดยเฉพาะในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ขัดข้องขึ้นในระบบ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากำลัง (Interconnected systems) เข้าด้วยกัน ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความเชื่อถือได้สูงขึ้นอีกทั้งสามารถลดกำลังผลิตสำรองให้ต่ำลง และช่วยลดต้นทุนการผลิตให้แก่ระบบ

การพัฒนาบบไฟฟ้ากำลังที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากและมีแนวโน้มว่าจะแพร่หลายไปทั่วโลกก็คือ การปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้า (Deregulation) และ การจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Power Pool) ซึ่งเป็นการเปิดโอกาสให้มีการซื้อขายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเสรีภายใต้กฎกติกาที่กำหนดขึ้นซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการใช้โครงข่ายสายส่ง (Transmission Network) ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่ เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ไหลผ่านโครงข่ายสายส่งจะมีการเปลี่ยนแปลงมากและเป็นไปอย่างรวดเร็วในแต่ละช่วงเวลาที่มีการซื้อขายพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น จึงต้องมีการออกแบบและวางแผนการใช้งานโครงข่ายสายส่งเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากนี้

ในการดำเนินงานควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านโครงข่ายสายส่งให้เป็นไปอย่างปกติ จะต้องมียุทธศาสตร์ระบบควบคุมซึ่งทำหน้าที่ ควบคุมความถี่ ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า รักษาเสถียรภาพกำลังไฟฟ้า รักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และดูแลความมั่นคงให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเพิ่มเติมเข้าไปในโครงข่ายสายส่ง ทั้งนี้ อุปกรณ์ควบคุมดังกล่าวจะต้องมีคุณสมบัติในการทำงานที่รวดเร็วและมีความเชื่อถือได้สูง อุปกรณ์ FACTS (Flexible AC Transmission System) เป็นทางเลือกหนึ่งที่อาศัยเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทำให้มีความรวดเร็วในการทำงาน และมีความเชื่อถือได้สูง

แม้ว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS จะทำให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก แต่ก็ส่งผลทำให้เกิดการทำงานที่ซับซ้อนเพิ่มขึ้นในระบบ ทำให้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังมีความยากและซับซ้อนขึ้น วิศวกรระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีหน้าที่รับผิดชอบในการออกแบบ วางแผนดำเนินงาน และควบคุมให้ระบบไฟฟ้ากำลังทำงานได้อย่างถูกต้อง ปลอดภัย และมีความเชื่อถือได้ จะต้องทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและนำผลที่ได้มาทำการตรวจสอบ การออกแบบ การดำเนินงาน และการควบคุมระบบเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ต้องการ การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวเป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะการทำงานปกติที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากผลของการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวจะเป็นข้อมูลที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและวางแผนการดำเนินงานในระบบไฟฟ้ากำลัง และยังเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในแขนงอื่นๆ

ในอดีตการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวทำได้โดยการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังด้วยแผงวงจรที่มีการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้าและแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดเล็ก ในระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้น การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวกระทำได้ยากและใช้เวลานาน ต่อมา มีการพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูง ทำให้มีการนำเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิว ซึ่งสามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับมาจนถึงปัจจุบัน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณเพาเวอร์ฟลิวในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS ได้นั้น ส่วนใหญ่จะเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ซึ่งมีราคาแพง ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในสถาบันการศึกษา สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการศึกษาที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักจะมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายอย่าง เช่น ไม่มีการพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS ในกรณีระบบมีขนาดใหญ่จะมีความล่าช้าในการคำนวณสูง จำกัดขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง (จำกัดจำนวนบัสและ/หรือจำกัดจำนวนบรานซ์) การปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้เหมาะสมกับงานทำได้ยาก เป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการออกแบบ

และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งในด้านความเร็วในการคำนวณและจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมภาษาซี โดยใช้เทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม ทำให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและใช้หน่วยความจำน้อย สามารถนำไปใช้ทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะการทำงานอยู่ตัว (Steady-state) โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ กัน ดังนี้

- 1) การเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งได้แก่
 - 1.1 การควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า
 - 1.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง
 - 1.3 การควบคุมกำลังไฟรีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง
 - 1.4 การควบคุมตัวแปรทางไฟฟ้ารวม ซึ่งได้แก่ การควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า และ/หรือ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง และ/หรือ การควบคุมกำลังไฟรีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง เป็นต้น
- 2) การแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง
- 3) การเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 4) การลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาวิธีการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ F A C T S
- 2) ศึกษาวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังโดยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ เข้าไปในระบบ
- 3) ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS โดยใช้เทคนิค SPARSE และ เทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม

ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังแบบสมดุล 3 เฟสในสภาวะการทำงานอยู่ตัว (Steady-state)
- 2) ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่นำมาพิจารณาใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังได้แก่ ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบ 2 เทอมินอลซึ่งเป็นระบบที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุดในปัจจุบัน
- 3) อุปกรณ์ FACTS ที่นำมาพิจารณาใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังได้แก่ อุปกรณ์ SVC อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC ซึ่งเป็นอุปกรณ์ FACTS ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน

ขั้นตอนศึกษาและวิธีดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์ในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและอุปกรณ์ FACTS
- 3) ศึกษาเทคนิคการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 4) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบที่จะนำมาใช้ทดสอบ
- 5) ทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 6) เปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอกับผลที่ได้จากวิธีการอื่นๆ
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
- 8) เรียบเรียงผลงานการวิจัย พิมพ์ผลงานการวิจัย และจัดเข้ารูปเล่มเพื่อทำการนำเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณเพาเวอร์โพลว์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS
- 2) สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ในการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่ในปัจจุบันให้สูงขึ้น

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์มีรายละเอียดแสดงดังนี้

บทที่ 2 นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองขององค์ประกอบพื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลัง สมการเพาเวอร์โฟลว์ การหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โฟลว์ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน แบบจำลองของอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง แบบจำลองของอุปกรณ์ FACTS การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

บทที่ 3 นำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งได้แก่ การเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า การแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง การเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด และการลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า โดยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 4 นำเสนอเทคนิคในการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งได้แก่ เทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม

บทที่ 5 นำเสนอกรณีตัวอย่างสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS และนำเสนอผลการทดสอบ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น

บทที่ 6 บทสรุปของการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

การวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์

การวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะการทำงานปกติเพื่อหาจุดทำงานที่เหมาะสมให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังโดยการจำลองการทำงานจากระบบและให้ระบบดำเนินการผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง หลังจากนั้น ทำการเปลี่ยนแปลงหรือควบคุมสภาวะการทำงานบางอย่างในระบบ แล้วทำการตรวจสอบว่า ระบบจะยังคงทำงานในสภาวะปกติได้อีกหรือไม่ และระบบมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเช่นไร การตรวจสอบสามารถทำได้โดยการหาค่าตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม และทำการวิเคราะห์ตัวแปรดังกล่าว ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จะสะท้อนให้เห็นลักษณะการทำงานของระบบที่เกิดขึ้น

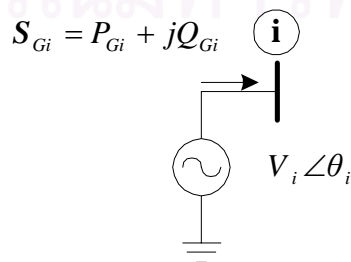
ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์ประกอบด้วย ขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่บัสกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ รวมทั้งข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์ จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญยิ่งสำหรับวิศวกรในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง[1] เราจึงพอสรุปได้ว่าประโยชน์ของการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์มีดังนี้

- 1) ใช้ในการออกแบบและวางแผนการดำเนินงานของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) ใช้ในการหาจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 3) ใช้ในการควบคุมการดำเนินงานของระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 แบบจำลองขององค์ประกอบพื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลัง [2,3]

2.1.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

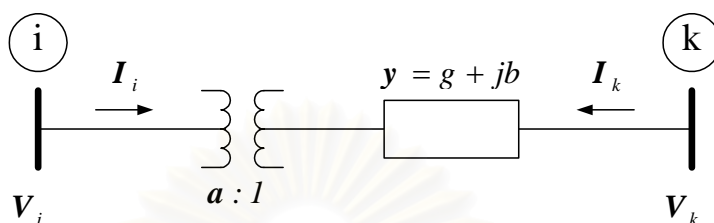
สามารถแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตเท่ากับ $S_G = P_G + jQ_G$ ได้ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดคงที่ แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

สามารถแทนหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงอุดมคติที่มีอัตราส่วนของแท็บเป็น $a : 1$ (a เป็นจำนวนเชิงซ้อน) ต่ออนุกรมกับแอดมิตแตนซ์ $y = g + jb$ แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.2

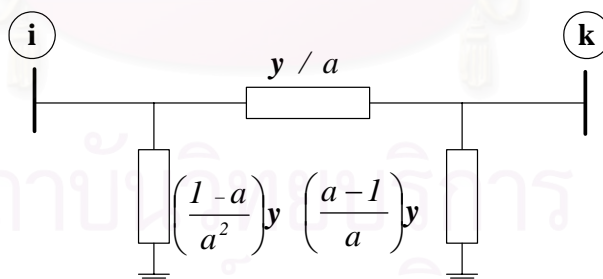


รูปที่ 2.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

สมการบัสแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2.1)

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y}{|a|^2} & -\frac{y}{a^*} \\ -\frac{y}{a} & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

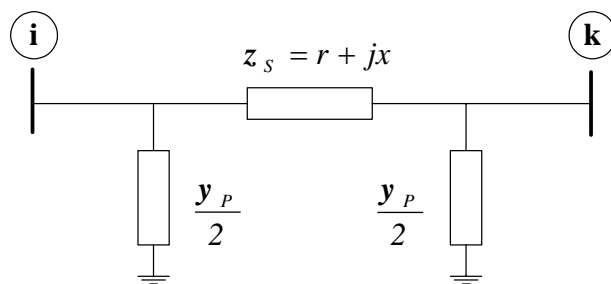
ในกรณีที่ a เป็นจำนวนจริง ($a = a$) สามารถแทนหม้อแปลงไฟฟ้าได้ด้วยแบบจำลองสมมูลแบบ π ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงไฟฟ้า กรณีที่ a เป็นจำนวนจริง ($a = a$)

2.1.3 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า

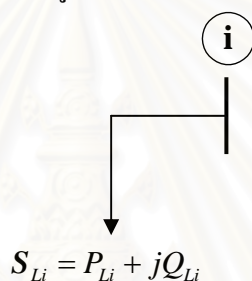
สามารถแทนสายส่งไฟฟ้าได้ด้วยแบบจำลองสมมูลแบบ π ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $z_s = r + jx$ และมีค่าชั้ท์แอดมิตแตนซ์เท่ากับครึ่งหนึ่งของไลน์ชาร์จิจึงแอดมิตแตนซ์ $y_p = g + jb$ แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า

2.1.4 แบบจำลองของโหลด

สามารถแทนโหลดได้ด้วยแบบจำลองของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีขนาดคงที่ แบบจำลองของโหลดแสดงดังรูปที่ 2.5

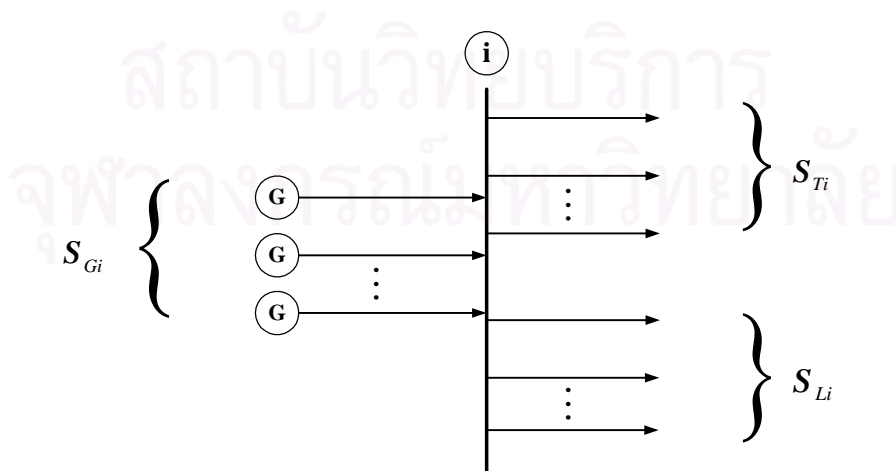


รูปที่ 2.5 แบบจำลองของโหลด

2.2 สมการเพาเวอร์โฟลว์

สมการเพาเวอร์โฟลว์ สร้างขึ้นจากการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของ 2 สมการหลักซึ่งได้แก่

2.2.1 สมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้า (Power Balance Equations) [4]



รูปที่ 2.6 ความสมดุลของกำลังไฟฟ้า

พิจารณารูปที่ 2.6 และอาศัยหลักการของความสมดุลของกำลังไฟฟ้าจะได้ว่า กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัสที่ i มีค่าเท่ากับ กำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัสที่ i สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ (2.2)

$$S_{Gi} = S_{Ti} + S_{Li} \quad (2.2)$$

โดยที่ S_{Gi} คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ บัส i
 S_{Ti} คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลออกจากบัส i ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ
 S_{Li} คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนของโหลดที่ติดตั้ง ณ บัส i

เรียกสมการที่ (2.2) ว่า สมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้า เมื่อแยกพิจารณาส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการที่ (2.2) จะได้

$$P_{Gi} = P_{Ti} + P_{Li} \quad (2.3)$$

$$Q_{Gi} = Q_{Ti} + Q_{Li} \quad (2.4)$$

โดยที่ P_{Gi} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ บัส i
 P_{Ti} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากบัส i ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ
 P_{Li} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่ติดตั้ง ณ บัส i
 Q_{Gi} คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ บัส i
 Q_{Ti} คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลออกจากบัส i ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ
 Q_{Li} คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟของโหลดที่ติดตั้ง ณ บัส i

2.2.2 สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง (Network Performance Equations) [5]

เมื่อพิจารณาในกรอบอ้างอิงบัส (Bus frame of reference) สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วยบัสที่ไม่ใช่บัสอ้างอิงจำนวน n บัส เป็นสมการที่สร้างขึ้นจากการนำเอาสมการโหนด (Nodal equations) จำนวน n สมการมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ ดังนั้นสมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังที่แสดงในรูปบัสแอดมิตแตนซ์จะมีลักษณะดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

เขียนสมการที่ (2.5) ให้อยู่ในรูปกระทัดรัดได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\mathbf{I}_{BUS} = \mathbf{Y}_{BUS} \mathbf{V}_{BUS} \quad (2.6)$$

โดยที่ \mathbf{I}_{BUS} คือ เวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส

\mathbf{V}_{BUS} คือ เวกเตอร์ของกลุ่มแรงดันบัส

\mathbf{Y}_{BUS} คือ บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

จากสมการที่ (2.5) สามารถเขียนสมการของกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส i ได้ดังนี้

$$\mathbf{I}_i = \sum_{k=1}^n \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{V}_k \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.7)$$

กระแสที่ไหลเข้าสู่บัส i จะเท่ากับ กระแสที่ไหลออกจากบัส i ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ

$$\mathbf{I}_{Ti} = \mathbf{I}_i = \sum_{k=1}^n \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{V}_k \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) สามารถเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลออกจากบัส i ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ ได้ดังนี้

$$\mathbf{S}_{Ti} = \mathbf{V}_i \mathbf{I}_{Ti}^* = \mathbf{V}_i \left(\sum_{k=1}^n \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{V}_k \right)^* \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.9)$$

แทนค่า \mathbf{S}_{Ti} ในสมการที่ (2.9) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้

$$\mathbf{S}_{Gi} - \mathbf{S}_{Li} = \mathbf{V}_i \left(\sum_{k=1}^n \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{V}_k \right)^* \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.10)$$

กำหนดให้ \mathbf{S}_i คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัส i

โดยที่ $\mathbf{S}_i = \mathbf{S}_{Gi} - \mathbf{S}_{Li}$ ดังนั้น สมการที่ (2.10) สามารถเขียนได้ใหม่เป็นดังสมการที่ (2.11)

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{V}_i \left(\sum_{k=1}^n \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{V}_k \right)^* \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

เรียกสมการที่ (2.11) ว่า สมการเพาเวอร์โพล์ ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการไม่เชิงเส้นและเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อน เนื่องจากสมการเพาเวอร์โพล์มีลักษณะเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นจะต้องใช้วิธีการแก้สมการไม่เชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยของสมการ วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแก้สมการไม่เชิงเส้นโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ คือ วิธีการวิเคราะห์เชิงเลข (Numerical analysis method) ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีการทำซ้ำแบบเกาส์ (Gauss iterative method) วิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel iterative method) วิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) เป็นต้น วิธีที่นิยมนำมาใช้ในการหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพล์มากที่สุด คือ วิธีของนิวตัน-ราฟสัน เนื่องจากมีคุณสมบัติการลู่เข้าหาคำตอบที่รวดเร็วและจำนวนรอบของการทำซ้ำไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสันในการหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพล์ การหาผลเฉลยของสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสันจะเกี่ยวข้องกับการหาค่าอนุพันธ์ย่อย (Partial derivative) ซึ่งในบางครั้งการหาค่าอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันเชิงซ้อนอาจหาไม่ได้ เพื่อหลีกเลี่ยงกับปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการแยกพิจารณาส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการเพาเวอร์โพล์ [6] ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังนี้

กำหนดให้

$$V_i = V \angle \theta_i, V_k = V \angle \theta_k, \theta_{ik} = \theta_i - \theta_k, Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$$

แทนค่า V_i, V_k และ Y_{ik} ลงในสมการที่ (2.11) จะได้

$$S_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k (\cos \theta_{ik} + j \sin \theta_{ik}) (G_{ik} - jB_{ik}) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.12)$$

เมื่อแยกพิจารณาส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการเพาเวอร์โพล์ จะได้

$$P_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัส i

Q_i คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัส i

เราจะใช้สมการที่ (2.13) และ (2.14) ซึ่งเป็นสมการไม่เชิงเส้นของฟังก์ชันค่าจริงในการหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพล์ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

2.3 ประเภทของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง [2]

สมการเพาเวอร์โพลาร์ในแต่ละบัสจะมีจำนวน 2 สมการ ประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด 4 ตัวได้แก่ ขนาดของแรงดันที่บัส (V) มุมเฟสของแรงดันที่บัส (θ) กำลังผลิตไฟฟ้าจริง (P_G) และกำลังผลิตไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q_G) ดังนั้น ในแต่ละบัสจะต้องกำหนดค่าตัวแปร 2 ตัวเพื่อที่จะทำให้ผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพลาร์มีเพียงคำตอบเดียว สำหรับตัวแปรที่จะกำหนดค่านั้น เราจะเลือกจากตัวแปรที่สามารถควบคุมค่าได้เท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งขององค์ประกอบที่อยู่กับบัสดังกล่าว โดยทั่วไปแล้วเราสามารถแบ่งประเภทของบัสในระบบไฟฟ้ากำลังได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ (Generator bus) และบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ซึ่งนิยมเรียกว่า โหลดบัส (Load bus) สำหรับบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่นั้น เราจะกำหนดให้กำลังผลิตไฟฟ้าจริงและขนาดของแรงดันที่บัสมีค่าคงที่ บัสประเภทนี้จึงถูกเรียกว่า บัสควบคุมขนาดแรงดัน (Voltage controlled bus) เนื่องจากเราไม่สามารถทราบค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบก่อนการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถกำหนดค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ทุกตัว จึงต้องมีการกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใดบัสหนึ่งในจำนวนบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ทั้งหมดทำหน้าที่ชดเชยกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่แล้วจะเลือกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิตสูงสุดเพื่อที่จะสามารถชดเชยกำลังสูญเสียได้อย่างเพียงพอ และกำหนดให้มุมเฟสของแรงดันที่บัสมีค่าคงที่แทนการกำหนดกำลังผลิตไฟฟ้าจริง มุมเฟสของแรงดันที่บัสนี้จะป็นมุมเฟสอ้างอิงสำหรับบัสอื่นๆทั้งหมดในระบบ บัสประเภทนี้จึงถูกเรียกว่า บัสอ้างอิง (Reference bus) โดยส่วนใหญ่แล้วจะกำหนดให้มุมเฟสของแรงดันที่บัสอ้างอิงมีค่าเท่ากับศูนย์ ในกรณีของโหลดบัส เนื่องจากไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ จึงทำให้สามารถกำหนดค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจริงและกำลังผลิตไฟฟ้ารีแอกทีฟได้

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น เราสามารถจำแนกประเภทของบัสในระบบไฟฟ้ากำลังตามลักษณะการควบคุมค่าตัวแปรที่บัสได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1) บัสอ้างอิง (Reference Bus)

ตัวแปรที่ควบคุมค่า คือ ขนาดของแรงดันที่บัส (V) และ มุมเฟสของแรงดันที่บัส (θ)

ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมค่า คือ กำลังผลิตไฟฟ้าจริง (P_G) และกำลังผลิตไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q_G)

2) บัสควบคุมขนาดแรงดัน (Voltage Controlled Bus)

ตัวแปรที่ควบคุมค่า คือ กำลังผลิตไฟฟ้าจริง (P_G) และ ขนาดของแรงดันที่บัส (V)

ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมค่า คือ กำลังผลิตไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q_G) และ มุมเฟสของแรงดันที่บัส (θ)

3) โหลดบัส (Load Bus)

ตัวแปรที่ควบคุมค่า คือ กำลังผลิตไฟฟ้าจริง (P_G) และ กำลังผลิตไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q_G)

ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมค่า คือ ขนาดของแรงดันที่บัส (V) และ มุมเฟสของแรงดันที่บัส (θ)

2.4 การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน [7]

พิจารณาระบบสมการไม่เชิงเส้นจำนวน N สมการ และจำนวน N ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ดังสมการที่ (2.15)

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_N) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_N) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_N(x_1, x_2, \dots, x_N) &= y_N \end{aligned} \quad (2.15)$$

โดยที่ x_1, x_2, \dots, x_N คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

y_1, y_2, \dots, y_N คือ ตัวแปรที่ทราบค่า

ใช้ออนุกรมเทย์เลอร์ประมาณฟังก์ชันในสมการที่ (2.15) โดยกำจัดพจน์ที่มีอันดับอนุพันธ์สูงกว่าหนึ่งทิ้งไป จะได้

$$\begin{aligned} y_1 &\approx f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_N^{(0)} + \Delta x_N) \\ &= f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) + \Delta x_1 \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_N \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_N} \\ y_2 &\approx f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_N^{(0)} + \Delta x_N) \\ &= f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) + \Delta x_1 \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_N \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_N} \\ &\vdots \\ y_N &\approx f_N(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_N^{(0)} + \Delta x_N) \\ &= f_N(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) + \Delta x_1 \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_N \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial x_N} \end{aligned} \quad (2.16)$$

สมการที่ (2.16) สามารถเขียนในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial x_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_N^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \\ \vdots \\ f_N(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \\ \vdots \\ y_N - f_N(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_N^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

โดยที่ $[J]$ คือ เมทริกซ์ของอนุพันธ์ย่อยซึ่งเรียกว่า เมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix)

การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสันจะอาศัยวิธีการทำซ้ำ (Iterative method) โดยการสมมติค่าคำตอบในตอนเริ่มต้น แล้วคำนวณหาค่าปรับแต่ง (Correction) เพื่อนำไปปรับค่าคำตอบในรอบถัดไป สูตรการปรับค่าแสดงดังสมการที่ (2.19) และ (2.20)

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \Delta \mathbf{X}^{(k)} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + [J^{(k)}]^{-1} [\mathbf{Y}_{spec} - \mathbf{Y}^{(k)}] \quad (2.20)$$

โดยที่

$$\mathbf{X}^{(k)} = \begin{bmatrix} x_1^{(k)} \\ x_2^{(k)} \\ \vdots \\ x_N^{(k)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{spec} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}^{(k)} = \begin{bmatrix} f_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_N^{(k)}) \\ f_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_N^{(k)}) \\ \vdots \\ f_N(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_N^{(k)}) \end{bmatrix}$$

2.5 การหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพล์ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน [8]

กำหนดให้

$$P_{i,calc}(V_i, \theta_i) = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})$$

$$Q_{i,calc}(V_i, \theta_i) = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})$$

$$P_{i,spec} = P_i = P_{Gi} - P_{Li}$$

$$Q_{i,spec} = Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$$

และ กำหนดให้ บัสที่ 1 เป็นบัสอ้างอิง

สมการเพาเวอร์โพลาร์ที่แสดงดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{2,calc}(V_2, \theta_2) &= P_{2,spec} \\
 P_{3,calc}(V_3, \theta_3) &= P_{3,spec} \\
 &\vdots \\
 P_{n,calc}(V_n, \theta_n) &= P_{n,spec} \\
 Q_{2,calc}(V_2, \theta_2) &= Q_{2,spec} \\
 Q_{3,calc}(V_3, \theta_3) &= Q_{3,spec} \\
 &\vdots \\
 Q_{n,calc}(V_n, \theta_n) &= Q_{n,spec}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

สมการที่ (2.21) มีลักษณะเหมือนกันกับสมการที่ (2.15) ดังนั้นเราสามารถหาผลเฉลยของสมการที่ (2.21) ได้ในลักษณะเดียวกันกับการหาผลเฉลยของสมการที่ (2.15) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังสมการที่ (2.22)

$$\begin{bmatrix} P_{2,spec} - P_{2,calc} \\ P_{3,spec} - P_{3,calc} \\ \vdots \\ P_{n,spec} - P_{n,calc} \\ Q_{2,spec} - Q_{2,calc} \\ Q_{3,spec} - Q_{3,calc} \\ \vdots \\ Q_{n,spec} - Q_{n,calc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1^{(k)} & \mathbf{J}_2^{(k)} \\ \mathbf{J}_3^{(k)} & \mathbf{J}_4^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_2^{(k)} \\ \Delta\theta_3^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta\theta_n^{(k)} \\ \Delta V_2^{(k)} \\ \Delta V_3^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(k)} \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_1^{(k)} & \mathbf{J}_2^{(k)} \\ \mathbf{J}_3^{(k)} & \mathbf{J}_4^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial V_n} \\ \frac{\partial P_3^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3^{(k)}}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial P_3^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_3^{(k)}}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3^{(k)}}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial P_3^{(k)}}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial V_2} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_3^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3^{(k)}}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial Q_3^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_3^{(k)}}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_3^{(k)}}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial Q_3^{(k)}}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_n} \end{bmatrix}$$

สมการที่ (2.22) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปกระดัดครัดได้ดังสมการที่ (2.23) และ (2.24)

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^{(k)} & J_2^{(k)} \\ J_3^{(k)} & J_4^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(k)} \\ \Delta V^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\Delta F^{(k)} = J^{(k)} \Delta X^{(k)} \quad (2.24)$$

โดยที่

$$\Delta F^{(k)} = \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2,spec} - P_{2,calc} \\ P_{3,spec} - P_{3,calc} \\ \vdots \\ P_{n,spec} - P_{n,calc} \\ Q_{2,spec} - Q_{2,calc} \\ Q_{3,spec} - Q_{3,calc} \\ \vdots \\ Q_{n,spec} - Q_{n,calc} \end{bmatrix}, \quad \Delta X^{(k)} = \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(k)} \\ \Delta V^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_2^{(k)} \\ \Delta \theta_3^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \theta_n^{(k)} \\ \Delta V_2^{(k)} \\ \Delta V_3^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(k)} \end{bmatrix}$$

เรียกสมการที่ (2.22), (2.23) และ (2.24) ว่า สมการเพาเวอร์โฟลว์เชิงเส้น (The linearized power flow equations) สูตรสำหรับปรับค่าเวกเตอร์ X แสดงได้ดังสมการที่ (2.25)

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + J^{-1(k)} \Delta F^k \quad (2.25)$$

ในทางปฏิบัติ เราจะหลีกเลี่ยงการหาค่าเมตริกซ์อินเวอร์ส J^{-1} เนื่องจากการหาค่าเมตริกซ์อินเวอร์ส J^{-1} จะใช้จำนวนครั้งของการดำเนินการทางคณิตศาสตร์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเราจึงหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวโดยใช้การแก้ระบบสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าเวกเตอร์ ΔX ในสมการที่ (2.24) ด้วยวิธีการกำจัดแบบเกาส์หรือวิธีแยกตัวประกอบ LU แทนการหาค่าเมตริกซ์อินเวอร์ส หลังจากนั้นจะทำการปรับค่าเวกเตอร์ X โดยใช้สมการที่ (2.26)

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)} \quad (2.26)$$

สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนแสดงได้ดังสมการที่ (2.27) และ (2.28)

สมาชิกนอกแนวทแยงมุม

$$\begin{aligned}
 J_1^{ik} &= \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \\
 J_2^{ik} &= \frac{\partial P_i}{\partial V_k} = V_i (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\
 J_3^{ik} &= \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = -V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\
 J_4^{ik} &= \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} = V_i (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

สมาชิกในแนวทแยงมุม

$$\begin{aligned}
 J_1^{ii} &= \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - B_{ii} V_i^2 \\
 J_2^{ii} &= \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \frac{P_i}{V_i} + G_{ii} V_i \\
 J_3^{ii} &= \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - G_{ii} V_i^2 \\
 J_4^{ii} &= \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \frac{Q_i}{V_i} - B_{ii} V_i
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

ในทางปฏิบัติ จะอาศัยคุณสมบัติการสมมาตรของสมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียนเพื่อลดจำนวนหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลของสมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียน ดังนั้นจึงปรับปรุงสมการที่ (2.23) เป็นดังสมการที่ (2.29)

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^{(k)} \\ \Delta \mathbf{Q}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{(k)} & \mathbf{N}^{(k)} \\ \mathbf{J}^{(k)} & \mathbf{L}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^{(k)} \\ \Delta \mathbf{V}^{(k)} / \mathbf{V}^{(k)} \end{bmatrix} \tag{2.29}$$

สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนแสดงได้ดังสมการที่ (2.30) และ (2.31)

สมาชิกนอกแนวทแยงมุม

$$\begin{aligned}
 H_{ik} &= \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \\
 N_{ik} &= V_k \frac{\partial P_i}{\partial V_k} = V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\
 J_{ik} &= \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = -V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\
 L_{ik} &= V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} = V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

สมาชิกในแนวทแยงมุม

$$\begin{aligned}
 H_{ii} &= \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - B_{ii} V_i^2 \\
 N_{ii} &= V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = P_i + G_{ii} V_i^2 \\
 J_{ii} &= \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - G_{ii} V_i^2 \\
 L_{ii} &= V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = Q_i - B_{ii} V_i^2
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

เมื่อพิจารณาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนที่ได้แสดงดังสมการที่ (2.30) พบว่า $H_{ik} = L_{ik}$ และ $N_{ik} = -J_{ik}$ ทำให้สามารถลดจำนวนหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลของสมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียนลงได้เป็นจำนวนมาก สำหรับสูตรการปรับค่าของ θ และ V แสดงดังสมการที่ (2.32)

$$\begin{aligned}
 \theta^{(k+1)} &= \theta^{(k)} + \Delta \theta^{(k)} \\
 \mathbf{V}^{(k+1)} &= \mathbf{V}^{(k)} \left(1 + \frac{\Delta \mathbf{V}^{(k)}}{\mathbf{V}} \right)
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

2.6 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งไฟฟ้าและกำลังสูญเสีย

พิจารณาแบบจำลองของสายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i และบัส k ดังรูปที่ 2.4
กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งจากบัส i ไปยังบัส k แสดงได้ดังสมการที่ (2.33)

$$P_{ik} - jQ_{ik} = \mathbf{V}_i^* (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_k) \mathbf{y}_S + V_i^2 \frac{\mathbf{y}_P}{2} \quad (2.33)$$

กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งจากบัส k ไปยังบัส i แสดงได้ดังสมการที่ (2.34)

$$P_{ki} - jQ_{ki} = \mathbf{V}_k^* (\mathbf{V}_k - \mathbf{V}_i) \mathbf{y}_S + V_k^2 \frac{\mathbf{y}_P}{2} \quad (2.34)$$

กำลังสูญเสียในสายส่งมีค่าเท่ากับผลรวมทางพีชคณิตของกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส k และกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส k ไปยังบัส i แสดงดังสมการที่ (2.35)

$$P_{Loss}^{ik} = P_{ik} + P_{ki} \quad (2.35)$$

2.7 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าและกำลังสูญเสีย

พิจารณาแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i และบัส k ดังรูปที่ 2.2
กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส k แสดงได้ดังสมการที่ (2.36)

$$P_{ik} - jQ_{ik} = \frac{1}{\mathbf{a}^*} \mathbf{V}_i^* \left(\frac{1}{\mathbf{a}} \mathbf{V}_i - \mathbf{V}_k \right) \mathbf{y} \quad (2.36)$$

กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าจากบัส k ไปยังบัส i แสดงได้ดังสมการที่ (2.37)

$$P_{ki} - jQ_{ki} = \mathbf{V}_k^* \left(\mathbf{V}_k - \frac{\mathbf{V}_i}{\mathbf{a}} \right) \mathbf{y} \quad (2.37)$$

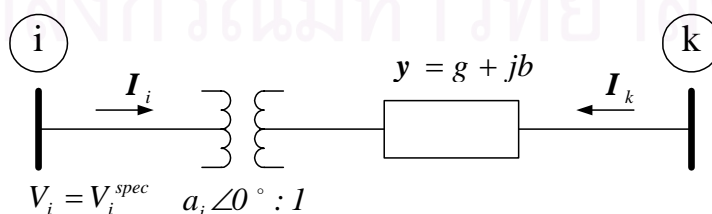
กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากับผลรวมทางพีชคณิตของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส k และกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าจากบัส k ไปยังบัส i แสดงดังสมการที่ (2.38)

$$P_{Loss}^{ik} = P_{ik} + P_{ki} \quad (2.38)$$

2.8 การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม

ในระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเพิ่มเติมเข้าไปในระบบเพื่อทำหน้าที่ควบคุมค่าตัวแปรทางไฟฟ้าให้มีค่าเป็นไปตามที่ต้องการ ส่งผลทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีสมรรถนะสูงขึ้น ตัวแปรทางไฟฟ้าที่ถูกควบคุมค่าได้แก่ ขนาดแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง เป็นต้น อุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม (conventional control devices) เป็นชื่อที่ใช้เรียกอุปกรณ์ควบคุมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในอดีตซึ่งยังไม่มีให้นำเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ ตัวอย่างของอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิมได้แก่ หม้อแปลงชนิดปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลด หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ป หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส แหล่งจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟ อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน เป็นต้น การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิมจะเริ่มต้นจากการกำหนดวัตถุประสงค์ของการควบคุม (control objectives) ซึ่งได้แก่ การควบคุมขนาดแรงดันที่บัส ($V_i = V_i^{spec}$) การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ($P_{ik} = P_{ik}^{spec}$) การควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง ($Q_{ik} = Q_{ik}^{spec}$) เป็นต้น หลังจากนั้นจะทำการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม ในแต่ละรอบของกระบวนการทำซ้ำตามขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ หากผลลัพธ์ของตัวแปรทางไฟฟ้ามีค่าไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมเพื่อควบคุมตัวแปรทางไฟฟ้าที่ต้องการควบคุมให้มีค่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการควบคุม อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมจะต้องมีค่าอยู่ในขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมเท่านั้น ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์จะต้องพิจารณาผลของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ อย่างครบถ้วน สำหรับลักษณะของการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแต่ละตัวในขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์นั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของอุปกรณ์ควบคุมและวัตถุประสงค์ของการควบคุม ซึ่งมีด้วยกันหลายประเภทแสดงได้ดังนี้ [9,10,11,12]

2.8.1 หม้อแปลงชนิดปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลด (Tap Changing Under Load Transformer)



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของหม้อแปลงชนิดปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลด

แบบจำลองของหม้อแปลงชนิดปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลดแสดงดังรูปที่ 2.7 หม้อแปลงชนิดนี้ใช้สำหรับควบคุมขนาดแรงดันที่บัส (V_i) ให้มีค่าเท่ากับขนาดแรงดันที่ระบุ (V_i^{spec}) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งก็คือ การปรับขนาดของแท็ป (a_i) วิธีการปรับขนาดของแท็ป (a_i) ในขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ มีดังนี้

1) การปรับขนาดของแท็ป (a_i) แบบป้อนกลับด้วยค่าความคลาดเคลื่อน (error feedback adjustment)

หลังจากการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ด้วยวิธีการทำซ้ำเสร็จในแต่ละรอบ จะทำการปรับขนาดของแท็ป (a_i) ดังสมการที่ (2.39)

$$a^{(k+1)} = a^{(k)} + \lambda(V_i^{spec} - V_i) \quad (2.39)$$

2) การปรับขนาดของแท็ป (a_i) แบบอัตโนมัติ (Automatic adjustment)

ในการควบคุมขนาดแรงดันที่บัสด้วยหม้อแปลงชนิดปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลดจะกำหนดให้บัสที่ถูกควบคุมขนาดแรงดัน (บัส i) เป็นบัสชนิด PVa ซึ่งมีตัวแปรสถานะคือ มุมเฟสของแรงดัน (θ_i) และขนาดของแท็ป (a_i) เนื่องจาก ขนาดของแท็ป (a_i) เป็นตัวแปรสถานะทำให้สามารถคำนวณหาขนาดของแท็ป (a_i) ได้อัตโนมัติในขั้นตอนของการแก้สมการเพาเวอร์โฟลว์ด้วยวิธีการทำซ้ำ สมการเพาเวอร์โฟลว์เชิงเส้นของบัส i และบัส k แสดงดังสมการที่ (2.40)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} & a_i \frac{\partial P_i}{\partial a_i} & V_k \frac{\partial P_i}{\partial V_k} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & a_i \frac{\partial P_k}{\partial a_i} & V_k \frac{\partial P_k}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & a_i \frac{\partial Q_i}{\partial a_i} & V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & a_i \frac{\partial Q_k}{\partial a_i} & V_k \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_k \\ \Delta a_i \\ \Delta V_k \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

บัสที่ถูกควบคุมขนาดแรงดันด้วยหม้อแปลงชนิดปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลดจะถูกกำหนดให้เป็นบัสชนิด PVa

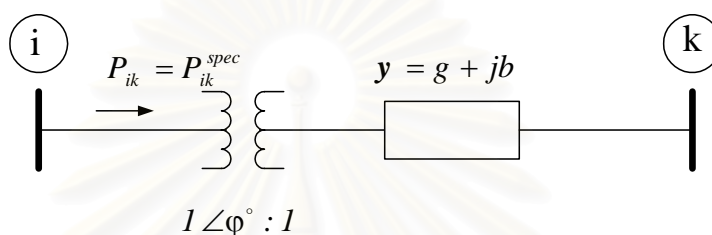
โดยที่ บัสชนิด PVa คือ บัสที่ควบคุมขนาดแรงดันด้วยขนาดของแท็ป (a)
เมื่อ a ทำงานอยู่ภายในขอบเขตความสามารถ

ในแต่ละรอบของการทำซ้ำ เมื่อใดก็ตามที่ a ทำงานออกนอกขอบเขตความสามารถ ให้ทำการเปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PVa ไปเป็นบัสชนิด PQ และจะควบคุมให้ $a = a^{limit}$

บัสชนิด PQ ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นบัสชนิด PVa ได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังนี้

- 1) เมื่อ $a = a_{max}$ และ $V_i > V_i^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด PVa
และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_i = V_i^{spec}$
- 2) เมื่อ $a = a_{min}$ และ $V_i < V_i^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด PVa
และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_i = V_i^{spec}$

2.8.2 หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส (Regulating Transformer : Phase Shifting Transformer)



รูปที่ 2.8 แบบจำลองของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส

แบบจำลองของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 หม้อแปลงชนิดนี้ใช้สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง (P_{ik}) ให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ (P_{ik}^{spec}) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งก็คือ การปรับมุมเฟสของแท็ปหม้อแปลงควบคุม (φ)

วิธีการปรับมุมเฟสของแท็ปหม้อแปลงควบคุม (φ) ในขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ มีดังนี้

- 1) การปรับมุมเฟสของแท็ปหม้อแปลงควบคุม (φ) แบบป้อนกลับด้วยค่าความคลาดเคลื่อน

หลังจากการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ด้วยวิธีการทำซ้ำเสร็จในแต่ละรอบ จะทำการปรับมุมเฟสของแท็ปหม้อแปลงควบคุม (φ) ดังสมการที่ (2.41)

$$\varphi^{(k+1)} = \varphi^{(k)} + \lambda (P_{ik} - P_{ik}^{spec}) \quad (2.41)$$

- 2) การปรับมุมเฟสของแท็ปหม้อแปลงควบคุม (φ) แบบอัตโนมัติ

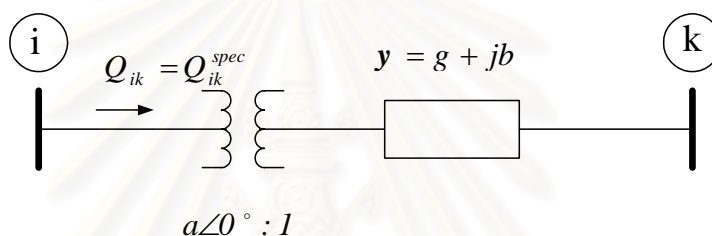
ทำการปรับปรุงสมการเพาเวอร์โฟลว์ โดยการเพิ่มสมการบังคับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ดังสมการที่ (2.42) รวมเข้ากับสมการเพาเวอร์โฟลว์ที่มีอยู่เดิม และ กำหนดให้มุมเฟสของแท็ปหม้อแปลงควบคุม (φ) เป็นตัวแปรสถานะ

$$P_{ik} - P_{ik}^{spec} = 0 \quad (2.42)$$

สมการบังคับจะทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง (P_{ik}) ให้มีค่าเท่ากับ กำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ (P_{ik}^{spec}) สมการเพาเวอร์โพล์เชิงเส้นที่ได้รับการปรับปรุงแล้วแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_{ik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & V \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \phi} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & V \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \phi} \\ \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta} & V \frac{\partial P_{ik}}{\partial V} & \frac{\partial P_{ik}}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \\ \Delta \phi \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

2.8.3 หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท๊ป (Regulating Transformer : Tap Changing Transformer)



รูปที่ 2.9 แบบจำลองของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท๊ป

แบบจำลองของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท๊ปแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 หม้อแปลงชนิดนี้ ใช้สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง (Q_{ik}) ให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ระบุ (Q_{ik}^{spec}) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งก็คือ การปรับขนาดของแท๊ปหม้อแปลงควบคุม (a)

วิธีการปรับขนาดของแท๊ปหม้อแปลงควบคุม (a) ในขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โพล์ มีดังนี้

1) การปรับขนาดของแท๊ปหม้อแปลงควบคุม (a) แบบป้อนกลับด้วยค่าความคลาดเคลื่อน

หลังจากการคำนวณเพาเวอร์โพล์ด้วยวิธีการทำซ้ำเสร็จในแต่ละรอบ จะทำการปรับขนาดของแท๊ปหม้อแปลงควบคุม (a) ดังสมการที่ (2.44)

$$a^{(k+1)} = a^{(k)} + \lambda(Q_{ik} - Q_{ik}^{spec}) \quad (2.44)$$

2) การปรับขนาดของแท๊ปหม้อแปลงควบคุม (a) แบบอัตโนมัติ

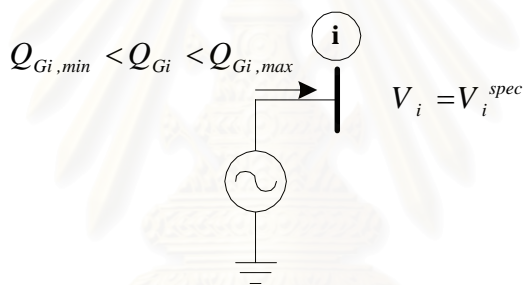
ทำการปรับปรุงสมการเพาเวอร์โพล์ โดยการเพิ่มสมการบังคับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง ดังสมการที่ (2.45) รวมเข้ากับสมการเพาเวอร์โพล์ที่มีอยู่เดิม และกำหนดให้ขนาดของแท๊ปหม้อแปลงควบคุม (a) เป็นตัวแปรสถานะ

$$Q_{ik} - Q_{ik}^{spec} = 0 \quad (2.45)$$

สมการบังคับจะทำการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง (Q_{ik}) ให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ระบุ (Q_{ik}^{spec}) สมการเพาเวอร์โพล์เชิงเส้นที่ได้รับการปรับปรุงแล้วแสดงดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta Q_{ik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & V \frac{\partial P}{\partial V} & a \frac{\partial P}{\partial a} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & V \frac{\partial Q}{\partial V} & a \frac{\partial Q}{\partial a} \\ \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta} & V \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V} & a \frac{\partial Q_{ik}}{\partial a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta a \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2.8.4 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Reactive Generator)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

แบบจำลองของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 2.10 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟใช้สำหรับควบคุมขนาดแรงดันที่บัส (V_i) ให้มีค่าเท่ากับขนาดแรงดันที่ระบุ (V_i^{spec}) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งก็คือ การปรับเพิ่มหรือลดกำลังผลิตไฟฟ้รีแอกทีฟ

ในแต่ละรอบของการคำนวณเพาเวอร์โพล์ด้วยวิธีการทำซ้ำ จะต้องตรวจสอบค่ากำลังผลิตไฟฟ้รีแอกทีฟ ว่าอยู่ภายในขอบเขตความสามารถในการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟหรือไม่ ถ้ายังอยู่ในขอบเขตความสามารถ ($Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$) ก็ให้ทำการคำนวณซ้ำในรอบถัดไป แต่ถ้าไม่อยู่ในขอบเขตความสามารถให้ดำเนินการตามวิธีการดังนี้

1) วิธีการปรับขนาดแรงดันที่ควบคุม

กรณี $Q_{Gi} > Q_{Gi}^{max}$ หรือ $Q_{Gi} < Q_{Gi}^{min}$ ให้ปรับขนาดแรงดันที่ควบคุมตามสมการที่ (2.47)

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \lambda(Q_{Gi}^{limit} - Q_{Gi}) \quad (2.47)$$

2)วิธีการเปลี่ยนชนิดของบัส

กรณี $Q_{Gi} > Q_{Gi}^{max}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัส จากบัสชนิด PV เป็นบัสชนิด PQ
และกำหนดให้ $Q_{Gi} = Q_{Gi}^{max}$

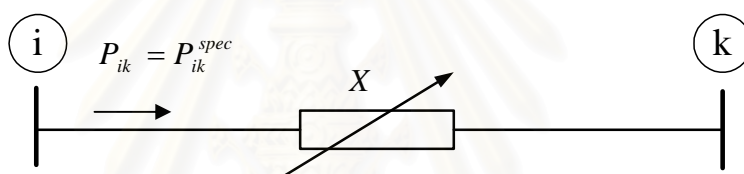
กรณี $Q_{Gi} < Q_{Gi}^{min}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัส จากบัสชนิด PV เป็นบัสชนิด PQ
และกำหนดให้ $Q_{Gi} = Q_{Gi}^{min}$

บัสชนิด PQ สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นบัสชนิด PV ได้หากเกิดเหตุการณ์ต่อไปนี้

1)เมื่อ $Q_{Gi} = Q_{Gi}^{max}$ และ $V_i > V_i^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัส จากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด PV
และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_i = V_i^{spec}$

2)เมื่อ $Q_{Gi} = Q_{Gi}^{min}$ และ $V_i < V_i^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัส จากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด PV
และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_i = V_i^{spec}$

2.8.5 อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมชนิดปรับค่าได้ (Variable Series Compensator)



รูปที่ 2.11 แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมชนิดปรับค่าได้

แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมชนิดปรับค่าได้แสดงดังรูปที่ 2.11 อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมชนิดปรับค่าได้สามารถทำงานในลักษณะที่เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มหรือลดความยาวของสายส่ง โดยการปรับค่ารีแอคแตนซ์ ดังนั้นเราจึงสามารถนำอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมมาใช้สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง (P_{ik}) ให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ (P_{ik}^{spec}) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งก็คือ การปรับค่ารีแอคแตนซ์ (X) นั้นเอง

วิธีการปรับค่ารีแอคแตนซ์ (X) ในขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ มีดังนี้

1)การปรับค่ารีแอคแตนซ์ (X) แบบป้อนกลับด้วยค่าความคลาดเคลื่อน

หลังจากการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ด้วยวิธีการทำซ้ำเสร็จในแต่ละรอบ จะทำการปรับค่ารีแอคแตนซ์ (X) ดังสมการที่ (2.48)

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \lambda(P_{ik} - P_{ik}^{spec}) \quad (2.48)$$

2) การปรับค่ารีแอกแตนซ์ (X) แบบอัตโนมัติ

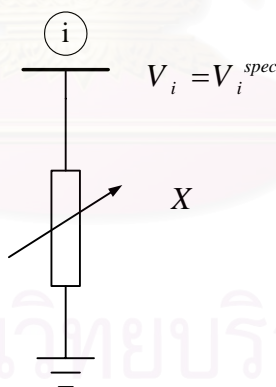
ทำการปรับปรุงสมการเพาเวอร์โพลาร์ โดยการเพิ่มสมการบังคับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ดังสมการที่ (2.49) รวมเข้ากับสมการเพาเวอร์โพลาร์ที่มีอยู่เดิม และ กำหนดให้ค่ารีแอกแตนซ์ (X) เป็นตัวแปรสถานะ

$$P_{ik} - P_{ik}^{spec} = 0 \quad (2.49)$$

สมการบังคับจะทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง (P_{ik}) ให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ (P_{ik}^{spec}) สมการเพาเวอร์โพลาร์เชิงเส้นที่ได้รับการปรับปรุงแล้วแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_{ik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & V \frac{\partial P}{\partial V} & X \frac{\partial P}{\partial X} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & V \frac{\partial Q}{\partial V} & X \frac{\partial Q}{\partial X} \\ \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta} & V \frac{\partial P_{ik}}{\partial V} & X \frac{\partial P_{ik}}{\partial X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta X \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

2.8.6 อุปกรณ์ชดเชยแบบขนานชนิดปรับค่าได้ (Variable Shunt Compensator)



รูปที่ 2.12 แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานชนิดปรับค่าได้

แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานชนิดปรับค่าได้แสดงดังรูปที่ 2.12 อุปกรณ์ชดเชยแบบขนานชนิดปรับค่าได้ใช้สำหรับควบคุมขนาดแรงดันที่บัส (V_i) ให้มีค่าเท่ากับขนาดแรงดันที่ระบุ (V_i^{spec}) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งก็คือ การปรับค่ารีแอกแตนซ์ (X) วิธีการปรับค่ารีแอกแตนซ์ (X) ในขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ มีดังนี้

1) การปรับค่ารีแอกแตนซ์ (X) แบบป้อนกลับด้วยค่าความคลาดเคลื่อน

หลังจากการคำนวณเพาเวอร์โพล์ด้วยวิธีการทำซ้ำเสร็จในแต่ละรอบ จะทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ (X) ดังสมการที่ (2.51)

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \lambda(V_i^{spec} - V_i) \quad (2.51)$$

2) การปรับค่ารีแอกแตนซ์ (X) แบบอัตโนมัติ

ในการควบคุมขนาดแรงดันที่บัสด้วยการปรับค่ารีแอกแตนซ์ (X) แบบอัตโนมัติจะกำหนดให้บัสที่ถูกควบคุมขนาดแรงดัน (บัส i) เป็นบัสชนิด PVX ซึ่งมีตัวแปรสถานะคือ มุมเฟสของแรงดัน (θ_i) และค่ารีแอกแตนซ์ (X) เนื่องจาก ค่ารีแอกแตนซ์ (X) เป็นตัวแปรสถานะ ทำให้สามารถคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ (X) ได้อัตโนมัติในขั้นตอนของการแก้สมการเพาเวอร์โพล์ด้วยวิธีการทำซ้ำ สมการเพาเวอร์โพล์เชิงเส้นของบัส i และบัส k แสดงดังสมการที่ (2.52)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} & X \frac{\partial P_i}{\partial X} & V_k \frac{\partial P_i}{\partial V_k} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & X \frac{\partial P_k}{\partial X} & V_k \frac{\partial P_k}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & X \frac{\partial Q_i}{\partial X} & V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & X \frac{\partial Q_k}{\partial X} & V_k \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_k \\ \Delta X \\ \frac{X}{V_k} \Delta V_k \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

บัสที่ถูกควบคุมขนาดแรงดันด้วยการปรับค่ารีแอกแตนซ์ (X) แบบอัตโนมัติจะถูกกำหนดให้เป็นบัสชนิด PVX

โดยที่ บัสชนิด PVX คือ บัสที่ควบคุมขนาดแรงดันด้วยการปรับค่ารีแอกแตนซ์ (X)
เมื่อ X ทำงานอยู่ในขอบเขตความสามารถ

ในแต่ละรอบของการทำซ้ำ เมื่อใดก็ตามที่ X ทำงานนอกขอบเขตความสามารถ ให้ทำการเปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PVX ไปเป็นบัสชนิด PQ และจะควบคุมให้ $X = X^{limit}$

บัสชนิด PQ ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นบัสชนิด PVX ได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังนี้

1) เมื่อ $X = X_{max}$ และ $V_i > V_i^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด PVX

และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_i = V_i^{spec}$

2) เมื่อ $X = X_{min}$ และ $V_i < V_i^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด PVX

และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_i = V_i^{spec}$

2.9 ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC transmission Systems) [13]

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขึ้นครั้งแรกจากการคิดค้นของโทมัส อัลวา เอดิสัน เป็นการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า ภายหลังจากการประดิษฐ์หม้อแปลงไฟฟ้ารวมถึงการพัฒนาและปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำในต้นศตวรรษที่ 20 ทำให้เกิดการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นเพื่อแทนที่การส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเดิม เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับแรงดันต่ำไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปในระยะทางไกลๆได้ อย่างไรก็ตาม หลังจากการพัฒนาวัลว์แรงดันสูง (high voltage valve) ขึ้นในปีค.ศ.1929 ทำให้เกิดการทดลองนำวัลว์แรงดันสูงมาใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับแรงดันสูง ในปีค.ศ.1936 ได้มีการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาด 5.25 เมกกะวัตต์ ผ่านสายส่งความยาว 27 กิโลเมตร ที่ระดับแรงดัน 30 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาเทคโนโลยีระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สำหรับระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เกิดขึ้นครั้งแรกในปีค.ศ.1954 เป็นการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจากแผ่นดินของประเทศสวีเดนไปยังเกาะก๊อทแลนด์ (Gotland) โดยผ่านสายส่งเคเบิลใต้น้ำด้วยขนาดกำลังไฟฟ้า 20 เมกกะวัตต์ ที่ระดับแรงดัน 100 กิโลโวลต์ ในปัจจุบันได้มีการนำระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก ด้วยเหตุผลที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

-Itaipu ในประเทศบราซิล ใช้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความถี่ต่างกันและช่วยลดต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าให้ต่ำลง โดยส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 6300 เมกกะวัตต์ผ่านสายส่งระยะทาง 800 กิโลเมตรที่ระดับแรงดัน 600 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่สูงสุดในปัจจุบัน

-Leyte-Luzon ในประเทศฟิลิปปินส์ ใช้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบส่งและส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมระหว่างเกาะ Leyte และเกาะ Luzon โดยส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 440 เมกกะวัตต์ที่ระดับแรงดัน 350 กิโลโวลต์

-Rihand-Delhi ในประเทศอินเดีย ใช้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อเพิ่มเสถียรภาพในระบบส่ง เพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า และ ลดกำลังสูญเสียในสายส่ง โดยส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 1500 เมกกะวัตต์จากเมือง Rihand ไปยังเมือง Delhi ที่ระดับแรงดัน 500 กิโลโวลต์

จากตัวอย่างดังกล่าวข้างต้น พบว่า ได้มีการนำระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงไปใช้งานในหลายรูปแบบ ด้วยเหตุผลที่แตกต่างกัน การนำระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงไปใช้งานในด้านต่างๆ สามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภทด้วยกันดังนี้ [14,15]

1) การส่งกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกล

ในกรณีที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ห่างไกลจากศูนย์กลางความต้องการพลังงานไฟฟ้า การส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจะต้องส่งในระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงมาก และอาจจะต้องมีหลายวงจรจึงจะเพียงพอต่อความต้องการ การติดตั้งสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับในระยะทางไกล ๆ ในระดับแรงดันสูง ๆ มีค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายที่แพงมาก และถ้ามีหลายวงจรก็จะต้องใช้เงินลงทุนเพิ่มขึ้นอีกมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ต้องการสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพียง 2 ชุด (แทนที่จะเป็น 3 ชุด เหมือนกรณีสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ) ทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้น การส่งกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกล จึงนิยมใช้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

2) การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความถี่ต่างกัน

ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความถี่ต่างกัน เช่น ระบบหนึ่งมีความถี่ 50 เฮิร์ต และอีกระบบมีความถี่ 60 เฮิร์ต เป็นต้น จะสามารถเชื่อมโยงถึงกันได้ โดยการใช้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเป็นตัวเชื่อมโยงระบบ

3) การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายเคเบิลใต้น้ำระยะไกล

การส่งกำลังไฟฟ้าไปยังเกาะหรือข้ามช่องแคบที่มีระยะทางไกล เช่น เกินกว่า 25 กิโลเมตร มักจะนิยมใช้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงผ่านสายเคเบิลใต้น้ำ เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับผ่านสายเคเบิลใต้น้ำระยะไกลจะเกิดปัญหาอย่างมากเกี่ยวกับค่ารีแอกแตนซ์แบบคาปาซิทีฟ นอกจากนี้ การใช้สายเคเบิลแบบที่ใช้น้ำมันหล่อ (Oil-filled) สำหรับการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับในระยะไกล ก็มักจะมีปัญหาในเรื่องของการควบคุมการไหลของน้ำมัน หากใช้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะไม่เกิดปัญหาดังกล่าว

4) การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายเคเบิลใต้ดิน

การส่งกำลังไฟฟ้าเข้าไปในเมืองใหญ่ ๆ ที่มีผู้คนอยู่มากมายนั้นจะเกิดปัญหาอย่างมากในการติดตั้งสายไฟฟ้าแรงสูง เพราะว่าในเมืองใหญ่ ๆ จะมีเนื้อที่ในการปฏิบัติงานน้อยเนื่องจากที่ดินมีราคาแพงและทำให้สูญเสียทัศนียภาพ ดังนั้นจึงมีการใช้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงผ่านสายเคเบิลใต้ดินเนื่องจากไม่มีปัญหาเกี่ยวกับค่ารีแอกแตนซ์แบบคาปาซิทีฟ ไม่เกิดปัญหาเรื่องการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน และยังสามารถใช้สายเคเบิลจำนวนหลายๆ สายจัดรวมเป็นกลุ่มได้

ข้อดีของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

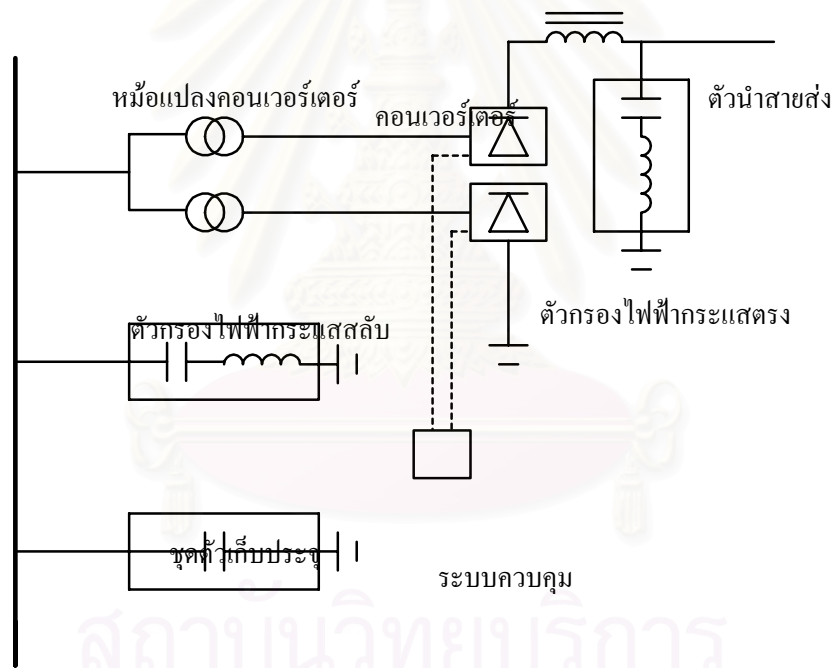
- 1) สามารถเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ต่างกันได้
- 2) สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 3) การส่งกำลังไฟฟ้าในระยะไกลมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ
- 4) ต้องการเนื้อที่สำหรับแนวเขตเดินสายน้อยกว่าระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ
- 5) ไม่เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพ

- 6) ไม่เกิดปรากฏการณ์สกิน ทำให้สายส่งมีความต้านทานต่ำกว่าระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ
- 7) สามารถใช้กราวด์เป็นเส้นทางให้กระแสไหลกลับได้
- 8) ส่งผลกระทบต่อสัญญาณวิทยุต่ำกว่าระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ
- 9) เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น จะไม่ส่งผ่านกระแสลัดวงจรข้าม ไปยังระบบอื่น

ข้อเสียของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

- 1) คอนเวอร์เตอร์มีราคาแพง
- 2) คอนเวอร์เตอร์ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ทั้งทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง
- 3) คอนเวอร์เตอร์ต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูง
- 4) คอนเวอร์เตอร์มีความสามารถในการรองรับสภาวะโหลดเกินค่อนข้างต่ำ

2.9.1 ส่วนประกอบของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [13]



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

- a) ส่วนประกอบของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งประกอบด้วย

1) สถานีแปลงผันกำลังไฟฟ้า

ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (เรกติไฟเออร์) ที่สถานีส่งและแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (อินเวอร์เตอร์) ที่สถานีรับ อุปกรณ์หลักของสถานีแปลงผันกำลังไฟฟ้ามีดังนี้

1.1) คอนเวอร์เตอร์

คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงส่วนใหญ่จะใช้เป็นวงจรถักคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสจำนวน 2 ตัวต่ออนุกรมกัน เพื่อสร้างสัญญาณเอาต์พุตแบบ 12 พัลส์ จะต้องใช้วาล์วจำนวน 12 ตัวทำหน้าที่เป็นสวิตช์สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

1.2) หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

ทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดคอมมิวเตชันรีแอกแตนซ์ นิยมใช้หม้อแปลงชนิดหนึ่งเฟสสามขดลวด

1.3) ตัวกรองไฟฟ้ากระแสสลับ

เนื่องจากทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับของคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์จะเกิดกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 11, 13, 23, 25 และลำดับสูงกว่า กระแสฮาร์โมนิกเหล่านี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวเก็บประจุและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ยังรบกวนระบบสื่อสารที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงต้องมีตัวกรองเพื่อทำหน้าที่กำจัดกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น

1.4) ตัวกรองไฟฟ้ากระแสตรง

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์จะสร้างกระแสฮาร์โมนิกทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงในทุกโหมดการทำงาน ซึ่งกระแสฮาร์โมนิกจะไปรบกวนระบบสื่อสารที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงต้องมีตัวกรองเพื่อทำหน้าที่กำจัดกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น

1.5) ชุดตัวเก็บประจุ

ในกระบวนการแปลงผันกำลังไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าไปประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟดังกล่าว ซึ่งอาจติดตั้งในรูปแบบของตัวเก็บประจุแบบขนาน ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ หรือ SVC (Static Var Compensator)

1.6) สมูทติ้งรีแอกเตอร์ (Smoothing reactor)

เป็นรีแอกเตอร์ขนาดใหญ่ที่ต่ออนุกรมเข้ากับขั้วของสถานีคอนเวอร์เตอร์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้กระแสไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงมีความราบเรียบ

2) ตัวนำสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง (Transmission Medium)

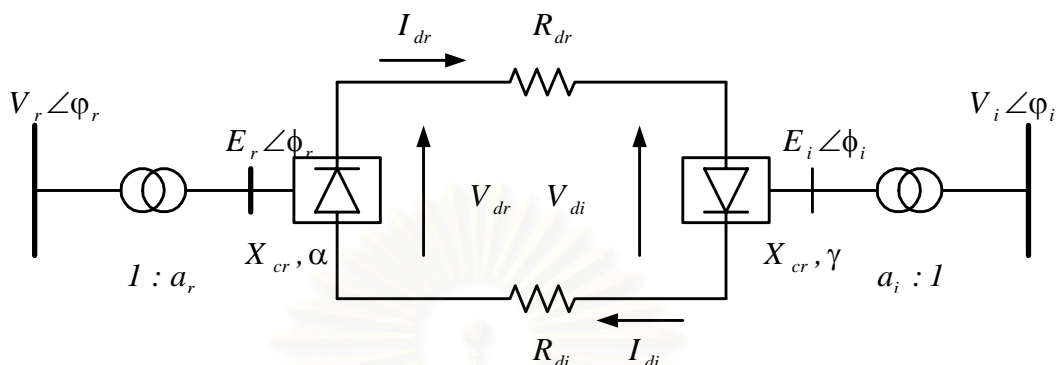
สำหรับสายส่งเหนือศีรษะ (over head) ส่วนใหญ่จะใช้สายเปลือยเป็นตัวนำในการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับสายส่งใต้น้ำ (submarine) จะใช้สายเคเบิลเป็นตัวนำในการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งอาจจะเป็นสายเคเบิลแบบโซลิดหรือสายเคเบิลแบบที่ใช้น้ำมันหล่อ

3) ระบบควบคุม (Control system)

ใช้ในการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยจะควบคุมคอนเวอร์เตอร์ที่สถานีส่งหรือสถานีรับให้ทำงานได้ถูกต้องตามโหมดการทำงานที่ระบุไว้

2.9.2 แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [6,14,15]

(1) แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

(a) โดยที่

- $V \angle \phi$ คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เทอมินัลบัสของคอนเวอร์เตอร์ โดยมีมุมเฟสเทียบกับจุดอ้างอิงของคอนเวอร์เตอร์
- $E \angle \phi$ คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์
- a คือ แท้ปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์
- V_d คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ย
- I_d คือ กระแสไฟฟ้าตรงที่ไหลผ่านสายส่ง
- R_d คือ ความต้านทานของสายส่ง
- X_c คือ คอมมิวเตชันรีแอกแตนซ์ (commutation reactance)
- α คือ มุมจุดชนวนเกด (firing delay angle)
- γ คือ มุมหยุดนำกระแส (extinction angle)
- r แทน เรกติไฟเออร์
- i แทน อินเวอร์เตอร์

ตัวแปรสถานะของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (X_{dc}) แสดงได้ดังนี้

ตัวแปรสถานะของเรกติไฟเออร์ คือ $X_r = [V_{dr}, I_{dr}, a_r, \cos \alpha, \phi_r]^T$

ตัวแปรสถานะของอินเวอร์เตอร์ คือ $X_i = [V_{di}, I_{di}, a_i, \cos \gamma, \phi_i]^T$

โดยทั่วไประบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงหนึ่งระบบจะประกอบด้วยตัวแปรสถานะทั้งหมด 10 ค่า ดังนั้นในการคำนวณหาจุดทำงานของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจำเป็นต้องใช้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรสถานะทั้งหมด 10 สมการ ดังแสดงต่อไปนี้

สมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีดังนี้

$$R(1) = V_{dr} - k_I a_r V_r \cos \varphi_r = 0$$

$$R(2) = V_{dr} - k_I a_r V_r \cos \alpha + \frac{3}{\pi} I_{dr} X_{cr} = 0$$

$$R(3) = \text{สมการควบคุมเรกติไฟเออร์}$$

$$R(4) = \text{สมการควบคุมเรกติไฟเออร์}$$

$$I(1) = V_{di} - k_I a_i V_i \cos \varphi_i = 0$$

(2.53)

$$I(2) = V_{di} - k_I a_i V_i \cos \gamma + \frac{3}{\pi} I_{di} X_{ci} = 0$$

$$I(3) = \text{สมการควบคุมอินเวอร์เตอร์}$$

$$I(4) = \text{สมการควบคุมอินเวอร์เตอร์}$$

$$C(1) = V_{dr} - V_{di} - R_{dr} I_{dr} - R_{di} I_{di} = 0$$

$$C(2) = I_{dr} - I_{di} = 0$$

$$\text{เมื่อ } k_I = 0.995 \times \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.53) ให้อยู่ในรูปแบบกระแทกได้ดังสมการที่ (2.54)

$$F(V_r, V_i, X_{dc}) = 0 \quad (2.54)$$

2.9.3 สมการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์

ในทางปฏิบัติ คอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวจะมีแผนการดำเนินงานควบคุมตัวแปรต่างๆ เพื่อควบคุมการทำงานของระบบให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามลักษณะที่ต้องการ ลักษณะการควบคุมตัวแปรที่สำคัญมีดังนี้

- 1) ควบคุมเทปหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ สมการควบคุมคือ $a - a^{spec} = 0$
- 2) ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สมการควบคุมคือ $V_d - V_d^{spec} = 0$
- 3) ควบคุมกระแสไฟฟ้าตรง สมการควบคุมคือ $I_d - I_d^{spec} = 0$
- 4) ควบคุมมุมจุดชนวนหรือมุมหยุดนำกระแส

$$\text{สมการควบคุมคือ } \cos \alpha - \cos \alpha^{min} = 0 \text{ หรือ } \cos \gamma - \cos \gamma^{min} = 0$$

- 5) ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง สมการควบคุมคือ $V_d I_d - P_d^{spec} = 0$

2.9.4 การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลว์เมื่อมีการพิจารณาระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงหรือ

การวิเคราะห์เอซี-ดีซีเพาเวอร์ฟลว์ (AC-DC Power flow) [6,15]

เมื่อนำระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเข้ามาติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลัง สมการเพาเวอร์ฟลว์ที่แต่ละบัสจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเฉพาะบัสที่มีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเท่านั้น ดังนั้นเราสามารถสร้างสมการเพาเวอร์ฟลว์ที่มีการพิจารณาระบบส่ง

ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงหรือสมการเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลาร์ได้โดยการปรับปรุงสมการเอชเพาเวอร์โพลาร์ ณ ตำแหน่งบัสที่เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ ดังสมการที่ (2.55)

$$\begin{aligned}\Delta P_r &= P_r^{spec} - P_r^{ac}(\theta, \mathbf{V}) - P_{dr}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) = 0 \\ \Delta P_i &= P_i^{spec} - P_i^{ac}(\theta, \mathbf{V}) + P_{di}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) = 0 \\ \Delta Q_r &= Q_r^{spec} - Q_r^{ac}(\theta, \mathbf{V}) - Q_{dr}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_i^{spec} - Q_i^{ac}(\theta, \mathbf{V}) - Q_{di}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) = 0\end{aligned}\quad (2.55)$$

โดยที่	ΔP_r	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัสที่เชื่อมต่อกับเรกติไฟเออร์
	ΔQ_r	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟารีแอกทิฟรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัสที่เชื่อมต่อกับเรกติไฟเออร์
	ΔP_i	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัสที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์
	ΔQ_i	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟารีแอกทิฟรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัสที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์
	P_{dr}	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากบัสไปยังเรกติไฟเออร์
	Q_{dr}	คือ	กำลังไฟฟารีแอกทิฟที่ไหลออกจากบัสไปยังเรกติไฟเออร์
	P_{di}	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากบัสไปยังอินเวอร์เตอร์
	Q_{di}	คือ	กำลังไฟฟารีแอกทิฟที่ไหลออกจากบัสไปยังอินเวอร์เตอร์

โดยที่

$$\begin{aligned}P_{dr}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) &= V_{dr} I_d = k_1 a_r V_r \cos \varphi_r I_d \\ P_{di}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) &= V_{di} I_d = k_1 a_i V_i \cos \varphi_i I_d \\ Q_{dr}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) &= k_1 a_r V_r \sin \varphi_r I_d \\ Q_{di}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) &= k_1 a_i V_i \sin \varphi_i I_d\end{aligned}\quad (2.56)$$

เมื่อ $I_d = I_{dr} = I_{di}$ และ \mathbf{X}_{dc} สอดคล้องกับสมการที่ (2.54)

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปรับปรุงวิธีการคำนวณเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลาร์ที่ได้แสดงข้างต้น โดยทำการลดจำนวนตัวแปรสถานะของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้เหลือเพียง 7 ค่า ดังนี้ $\mathbf{X}_{dc} = [V_{dr}, V_{di}, a_r, a_i, \cos \alpha, \cos \gamma, I_d]^T$ ทำให้ต้องการสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพียง 7 สมการดังนี้

$$\begin{aligned}
R(1) &= V_{dr} - k_1 a_r V_r \cos \alpha + \frac{3}{\pi} I_d X_{cr} = 0 \\
R(2) &= V_{di} - k_1 a_i V_i \cos \gamma + \frac{3}{\pi} I_d X_{ci} = 0 \\
R(3) &= V_{dr} - V_{di} - R_{dc} I_d = 0 \\
R(4) &= \text{สมการควบคุมแรงคืไฟเออร์} \\
R(5) &= \text{สมการควบคุมแรงคืไฟเออร์} \\
R(6) &= \text{สมการควบคุมอินเวอร์เตอร์} \\
R(7) &= \text{สมการควบคุมอินเวอร์เตอร์}
\end{aligned} \tag{2.57}$$

โดยที่ $I_d = I_{dr} = I_{di}$, $R_{dc} = R_{dr} + R_{di}$

สามารถเขียนสมการที่ (2.57) ให้อยู่ในรูปแบบกระทัดรัดได้ดังสมการที่ (2.58)

$$\mathbf{R}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) = 0 \tag{2.58}$$

สำหรับ $P_{dr}, P_{di}, Q_{dr}, Q_{di}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.59)

$$\begin{aligned}
P_{dr}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) &= V_{dr} I_d \\
P_{di}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) &= V_{di} I_d \\
Q_{dr}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) &= \sqrt{S_{dr}^2 - P_{dr}^2} \\
Q_{di}(V_r, V_i, \mathbf{X}_{dc}) &= \sqrt{S_{di}^2 - P_{di}^2} \\
S_{dr} &= k_1 a_r V_r I_d \\
S_{di} &= k_1 a_i V_i I_d
\end{aligned} \tag{2.59}$$

วิธีการคำนวณเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลว์

การคำนวณเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลว์สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

1) วิธีคำนวณเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลว์ตามลำดับ (Sequential method) มีขั้นตอนดังนี้

1.1) สมมติค่าตอบเริ่มต้นให้กับตัวแปรสถานะ ($\theta^{(0)}, \mathbf{V}^{(0)}, \mathbf{X}_{dc}^{(0)}$)

1.2) ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อน ($\Delta P, \Delta Q, \Delta R$)

กรณีค่าความคลาดเคลื่อน มีค่าน้อยกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ทำขั้นตอนที่ (1.6)

กรณีค่าความคลาดเคลื่อน มีค่ามากกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ทำขั้นตอนที่ (1.3)

1.3) แก้สมการเพาเวอร์โพลว์

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}$$

1.4)แก้สมการแสดงความสัมพันธ์ของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง $R(V_r, V_i, X_{dc}) = 0$

1.5)กลับไปทำขั้นตอนที่ (1.2)

1.6)แสดงผลและจบการทำงาน

2)วิธีคำนวณเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลาร์รวม (Unified method) มีขั้นตอนดังนี้

2.1)สมมติค่าตอบเริ่มต้นให้กับตัวแปรสถานะ $(\theta^{(0)}, V^{(0)}, X_{dc}^{(0)})$

2.2)ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อน $(\Delta P, \Delta Q, \Delta R)$

กรณีค่าความคลาดเคลื่อน มีค่าน้อยกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ทำขั้นตอนที่ (2.5)

กรณีค่าความคลาดเคลื่อน มีค่ามากกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ทำขั้นตอนที่ (2.3)

2.3)แก้สมการเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลาร์รวม

สมการเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลาร์รวมเชิงเส้นแสดงดังสมการที่ (2.60)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_r \\ \Delta P_i \\ \Delta Q \\ \Delta Q_r \\ \Delta Q_i \\ \Delta R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} & 0 \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} & A_r \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} & A_i \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} & 0 \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} & C_r \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} & C_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_r & D_i & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \theta_r \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V/V \\ \Delta V_r/V_r \\ \Delta V_i/V_i \\ \Delta X_{dc} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} = H \quad \begin{bmatrix} J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{34} & J_{35} & J_{36} \end{bmatrix} = N$$

$$\begin{bmatrix} J_{41} & J_{42} & J_{43} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} \end{bmatrix} = J \quad \begin{bmatrix} J_{44} & J_{45} & J_{46} \\ J_{54} & J_{55} & J_{56} \\ J_{64} & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix} = L$$

$$A_r = \frac{\partial P_r}{\partial X_{dc}} \quad A_i = \frac{\partial P_i}{\partial X_{dc}} \quad C_i = \frac{\partial Q_i}{\partial X_{dc}} \quad C_r = \frac{\partial Q_r}{\partial X_{dc}}$$

$$D_r = V_r \frac{\partial R}{\partial V_r} \quad D_i = V_i \frac{\partial R}{\partial V_i} \quad E = \frac{\partial R}{\partial X_{dc}}$$

2.4)กลับไปทำขั้นตอนที่ (2.2)

2.5)แสดงผลและจบการทำงาน

2.10 เทคโนโลยี FACTS (Flexible AC Transmission System:FACTS Technology) [16,17,18]

ในอดีตที่ผ่านมา อุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ที่นำมาติดตั้งในระบบส่งไฟฟ้ากำลังไม่สามารถควบคุมให้มีความเร็วเพียงพอที่จะสามารถจัดการกับเงื่อนไขของระบบแบบพลวัตได้ อุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิมซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน ทั้งที่เป็นแบบคงที่ (fixed) และ แบบสวิตช์ทางกล (mechanically-switched) หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท๊ป จะใช้สำหรับควบคุมอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ควบคุมขนาดแรงดันที่บัส และควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขการทำงานปกติ (steady state) หรือเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างช้าๆ เท่านั้น สำหรับปัญหาของระบบที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขทางพลวัต จะได้รับการแก้ไขโดยการออกแบบเกิน (overdesign) กล่าวคือ ระบบส่งไฟฟ้ากำลังจะถูกออกแบบให้มี stability margin ในปริมาณมาก เพื่อที่จะทำให้ระบบสามารถกลับคืนสู่สภาวะการทำงานปกติได้หลังจากการเกิดเหตุขัดข้องขึ้นในระบบอันเนื่องมาจาก การเกิดฟอลต์ (fault) การปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการปลดสายส่ง (generator and line outage) อุปกรณ์ในระบบเกิดความเสียหาย เป็นต้น การออกแบบเกินดังกล่าวนี้เอง ทำให้เกิดการใช้งานของสายส่งได้ไม่เต็มขีดจำกัดความสามารถของสายส่ง

ในปัจจุบัน ปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้า ปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม ปัญหาเกี่ยวกับเขตแดนดินสาย และปัญหาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นอุปสรรคสำคัญที่ทำให้ไม่สามารถก่อสร้างหรือขยายระบบส่งไฟฟ้ากำลังให้มีปริมาณเพียงพอกับความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มีสูงขึ้นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้เอง ทำให้เกิดการทบทวนแนวคิดดั้งเดิมของระบบไฟฟ้ากำลัง และทำการปรับปรุงแนวคิดดังกล่าวเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่ให้ได้มากที่สุดและทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำงานได้อย่างยืดหยุ่น (flexible) มากขึ้น

การพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้เกิดการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆของสายส่ง ด้วยคุณสมบัติพิเศษของการทำงานที่รวดเร็ว ทำให้เกิดเป็นเทคโนโลยีใหม่ขึ้นมาซึ่งเรียกว่า เทคโนโลยี FACTS

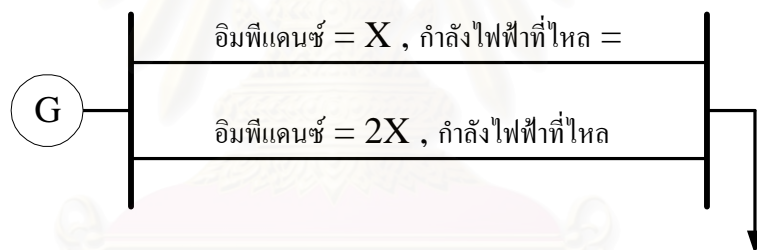
แนวคิดของเทคโนโลยี FACTS เกิดขึ้นครั้งแรกโดยการนำเสนอของ N.Hingorani จากสถาบันวิจัย Electric Power Research Institute (EPRI) ตั้งแต่ ค.ศ. 1988 ซึ่งได้อธิบายแนวคิดของเทคโนโลยี FACTS ว่า เป็นการนำอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลังให้มีความสามารถ

- 1) ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าไปในปริมาณและทิศทางที่ต้องการ
- 2) เพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่ง โดยการทำให้ขีดจำกัดความสามารถของสายส่งมีค่าเท่ากับขีดจำกัดความสามารถในการทนต่อความร้อนสูงสุด

2.10.1 การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

1) การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่ต่อขนานกัน (Power flow in Parallel Paths)

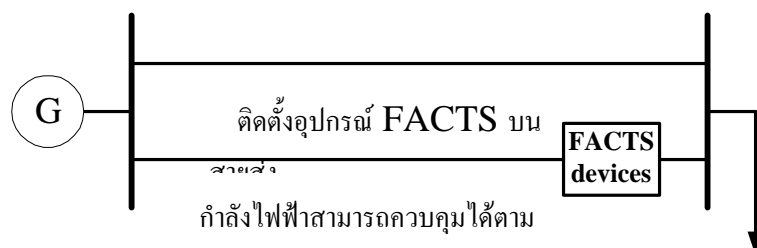
พิจารณารูปที่ 2.15ก สายส่ง 2 เส้นมีขีดจำกัดความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าเท่ากันและต่อขนานกันเพื่อรับส่งกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลด สายส่งที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าจะเกิดกำลังเกินในสายส่ง (Line overload) ขึ้นก่อนสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่า แม้ว่าสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่าจะยังสามารถรับกำลังไฟฟ้าได้อีกก็ตาม ทำให้สายส่งที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่าไม่สามารถใช้งานได้เต็มขีดจำกัดความสามารถ การแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการติดตั้งระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงดังรูปที่ 2.15ข เนื่องจากระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งได้ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าให้ไหลผ่านสายส่งได้เต็มขีดจำกัดความสามารถของสายส่ง นอกจากนี้ระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีการทำงานที่รวดเร็วทำให้สามารถเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ระบบส่งให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การลงทุนก่อสร้างระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีราคาแพงมาก ทำให้ไม่คุ้มค่าในการลงทุนสำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าในระยะทางไม่ไกลมากนัก ดังนั้นจึงได้มีการนำอุปกรณ์ FACTS มาติดตั้งในระบบส่งไฟฟ้ากำลังเพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้ไหลผ่านสายส่งได้เต็มขีดจำกัดความสามารถของสายส่งแสดงดังรูปที่ 2.15ค



รูปที่ 2.15.ก การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่ต่อขนานกัน



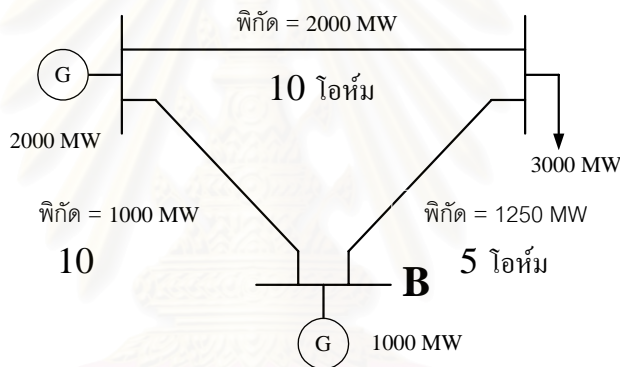
รูปที่ 2.15.ข การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่ต่อขนานกัน



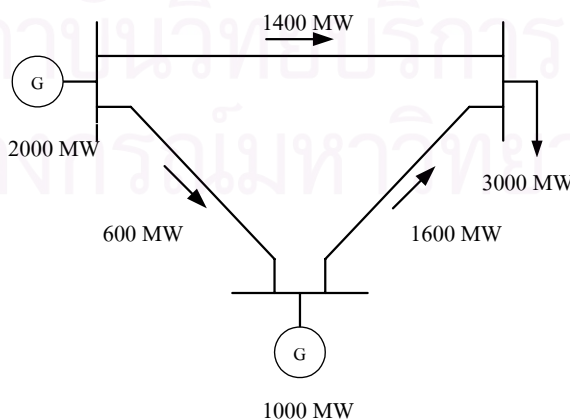
รูปที่ 2.15.ค การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่ต่อขนานกัน

2)การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบโครงข่าย (Power Flow in a Meshed System)

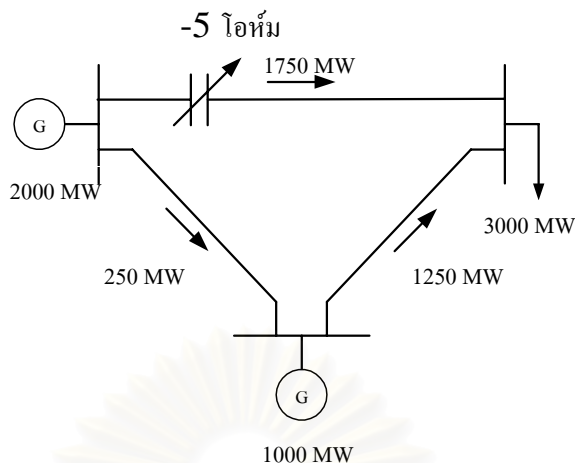
พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังแบบโครงข่ายตัวอย่างดังรูปที่ 2.16ก เมื่อไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมใดๆ การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างอิสระ (free flow) แสดงได้ดังรูปที่ 2.16ข ซึ่งพบว่าสายส่ง BC เกิดกำลังเกินในสายส่ง ดังนั้นจะต้องทำการจัดสรรกำลังผลิตใหม่ ซึ่งจะทำให้ราคาของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการจัดสรรกำลังผลิตใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ซึ่งทำหน้าที่ปรับค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่ง AC ของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.16ก หรือติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ซึ่งทำหน้าที่ปรับค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่ง BC ของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.16ข หรือติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ซึ่งทำหน้าที่ปรับมุมเฟสของแรงดันในสายส่ง AC ของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.16ก ซึ่งจะทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างปกติโดยไม่เกิดกำลังเกินในสายส่งขึ้น และทำให้สายส่งแต่ละเส้นสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้เต็มขีดจำกัดความสามารถของสายส่ง



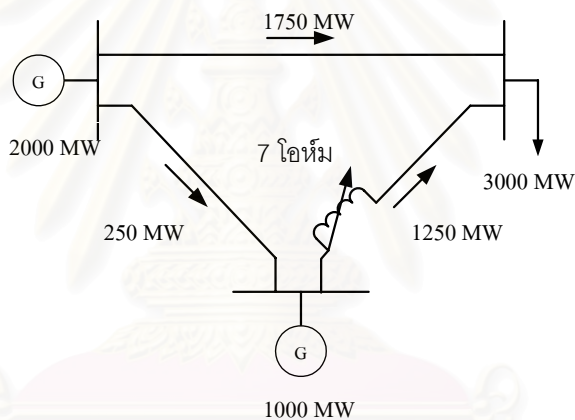
รูปที่ 2.16ก ระบบแบบโครงข่ายตัวอย่าง



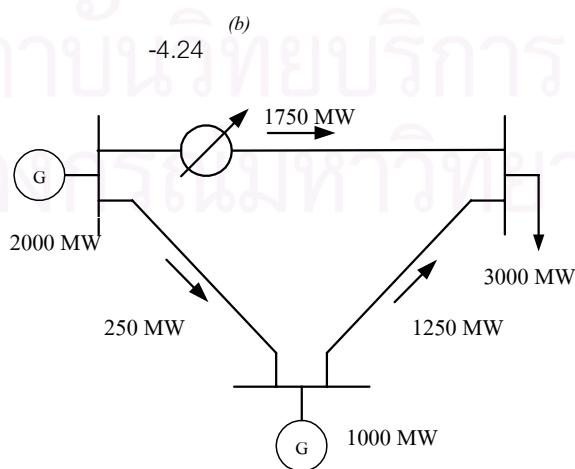
รูปที่ 2.16ข การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบโครงข่ายตัวอย่าง



รูปที่ 2.16ค การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบโครงข่ายตัวอย่างเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ FACTS



รูปที่ 2.16ง การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบโครงข่ายตัวอย่างเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ FACTS



รูปที่ 2.16จ การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบแบบโครงข่ายตัวอย่างเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ FACTS

2.10.2 การเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่ง

การเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยการทำให้ขีดจำกัดความสามารถของสายส่งมีค่าเท่ากับขีดจำกัดความสามารถในการทนต่อความร้อนสูงสุด ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดขีดจำกัดความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่งมีดังนี้

1. ความร้อน (Thermal)
2. สารไดอิเล็กตริก (Dielectric)
3. เสถียรภาพ (Stability)

เนื่องจากอุปกรณ์ FACTS มีการทำงานที่รวดเร็วมาก ดังนั้นจึงสามารถควบคุมพารามิเตอร์ของสายส่งได้ในเวลาปฏิบัติงานจริง (Real time) ทำให้สามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งได้อย่างทันทีทันใดเพื่อทำให้ระบบสามารถทำงานได้ในสภาวะการทำงานปกติ ความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วนี้เองที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสูงขึ้น นั่นคือสามารถเพิ่มขีดจำกัดความสามารถทางด้านเสถียรภาพให้มากขึ้นนั่นเอง ส่งผลทำให้ขีดจำกัดความสามารถของสายส่งมีค่าเท่ากับขีดจำกัดความสามารถในการทนต่อความร้อนสูงสุด

2.10.3 การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวเมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ FACTS[19-21]

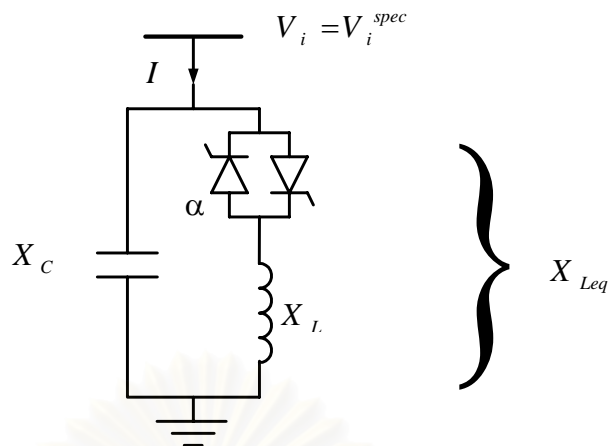
2.10.3.1 อุปกรณ์ Static VAR Compensator (SVC)

ในระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่ ปัญหาเกี่ยวกับแรงดันเป็นปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญและเกิดขึ้นบ่อยครั้งเมื่อใดก็ตามที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าในปริมาณที่สูง สายส่งจะต้องรับภาระในการรับโหลดมาก ทำให้เกิดปัญหาแรงดันตกที่ปลายทาง หากถึงขั้นรุนแรงมากอาจทำให้เกิดการพังทลายของแรงดันได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้า ในทางตรงกันข้าม ในบางครั้ง

ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามิน้อย ก็เป็นสาเหตุทำให้เกิดแรงดันเกินที่ปลายทางอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ Ferranti Effect ซึ่งมีผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความเสียหาย หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการอิ่มตัว หรือ ทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิก ดังนั้นหากไม่มีการดำเนินงานควบคุมที่มีประสิทธิภาพและมีความเชื่อถือได้แล้ว ก็จะไม่สามารถควบคุมระดับแรงดันให้มีค่าใกล้เคียงกับระดับแรงดันนอมิแนลได้เลย การควบคุมขนาดแรงดันที่บัสสามารถทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ SVC ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมขนาดแรงดันที่บัสได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความเชื่อถือได้

แบบจำลองของอุปกรณ์ SVC ในสภาวะการทำงานปกติ

โครงสร้างของอุปกรณ์ SVC มีด้วยกันหลายประเภท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการควบคุมของไทรสเตอร์ โครงสร้างที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดคือ โครงสร้างคาปาซิเตอร์ขนาดคงที่ต่อขนานกับรีแอคเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Fixed Capacitor and Thyristor-Controlled Reactor) เรียกอุปกรณ์ SVC ประเภทนี้ว่าอุปกรณ์ SVC ชนิด FC-TCR



รูปที่ 2.17 แบบจำลองของอุปกรณ์ SVC ชนิด FC-TCR

แบบจำลองของอุปกรณ์ SVC ชนิด FC-TCR ในสภาวะการทำงานปกติแสดงดังรูปที่ 2.17

โดยที่ X_L คือ อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของ TCR
 X_C คือ คาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของ FC

รีแอกแตนซ์สมมูลของ TCR (X_{Leq}) ที่ความถี่มูลฐาน แสดงดังสมการที่ (2.61)

$$X_{Leq} = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)} \quad (2.61)$$

โดยที่ α คือ มุมจุดชนวนเกด (firing delay angle)

รีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC (X_{SVC}) ที่ความถี่มูลฐาน แสดงดังสมการที่ (2.62)

$$X_{SVC} = \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)] - X_L} \quad (2.62)$$

การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ SVC

การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ SVC สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันดังนี้

1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ SVC ซึ่งได้แก่ มุมจุดชนวนเกด ($\alpha_i = \alpha_i^{spec}$) แล้วทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ในระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ประเภทนี้ สามารถทำได้

โดยการแทนค่ามุมจุดชนวนเกิดลงในสมการที่ (2.62) จะได้รีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC แล้วทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์เหมือนกับในกรณีที่ไม่มีกรพิจารณาอุปกรณ์ SVC โดยแทนอุปกรณ์ SVC ด้วยรีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC ที่หาได้

2) กำหนดวัตถุประสงค์ของการควบคุม (Control objective) ซึ่งได้แก่ การควบคุมขนาดแรงดันที่บัส ($V_i = V_i^{spec}$) หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์และคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ SVC ที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม และนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการวิเคราะห์ รายละเอียดของการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์แสดงได้ดังนี้

ในบทความที่เผยแพร่ส่วนใหญ่จะใช้รีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC (X_{SVC}) เป็นตัวแปรสถานะ ซึ่งพบว่ามีข้อเสียคือ หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการทำซ้ำในการคำนวณเพาเวอร์โพล์ จะต้องนำค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC (X_{SVC}) ไปหาค่ามุมจุดชนวนเกิด (α) โดยใช้สมการที่ (2.62) ซึ่งพบว่าเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นจะต้องใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อหาค่ามุมจุดชนวนเกิด (α) ทำให้เสียเวลาในการคำนวณเพิ่มมากขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงขั้นตอนดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้มุมจุดชนวนเกิด (α) เป็นตัวแปรสถานะ ซึ่งพบว่า หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการทำซ้ำในการคำนวณเพาเวอร์โพล์ เพียงนำค่ามุมจุดชนวนเกิด (α) ที่ได้มา แทนลงในสมการที่ (2.62) ก็จะได้ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC (X_{SVC}) อย่างง่ายดาย โดยไม่จำเป็นต้องแก้สมการที่ยุ่งยากและซับซ้อนเหมือนเช่นกรณีที่ใช้รีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC (X_{SVC}) เป็นตัวแปรสถานะ

เมื่อนำอุปกรณ์ SVC มาควบคุมขนาดแรงดันที่บัส ($V_i = V_i^{spec}$) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 สมการเพาเวอร์โพล์เชิงเส้นสำหรับบัสที่ควบคุมขนาดแรงดันสามารถแสดงดังสมการที่ (2.63)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q_i}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \alpha_i \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \alpha_i} = \frac{2V_i^2}{\pi X_L} (\cos(2\alpha_i) - 1) \quad (2.64)$$

บัสที่ถูกควบคุมขนาดแรงดันจากอุปกรณ์ SVC ข้างต้นจะถูกกำหนดให้เป็นบัสชนิด $PV\alpha$ โดยที่ บัสชนิด $PV\alpha$ คือ บัสที่ควบคุมขนาดแรงดันด้วยมุมจุดชนวนเกิดของทรินสเตอร์ เมื่อ α ทำงานอยู่ภายในขอบเขตความสามารถ

ในแต่ละรอบของการทำซ้ำ เมื่อใดก็ตามที่ α ทำงานออกนอกขอบเขตความสามารถ ให้ทำการเปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด $PV\alpha$ ไปเป็นบัสชนิด PQ และจะควบคุมให้ $\alpha = \alpha^{limit}$

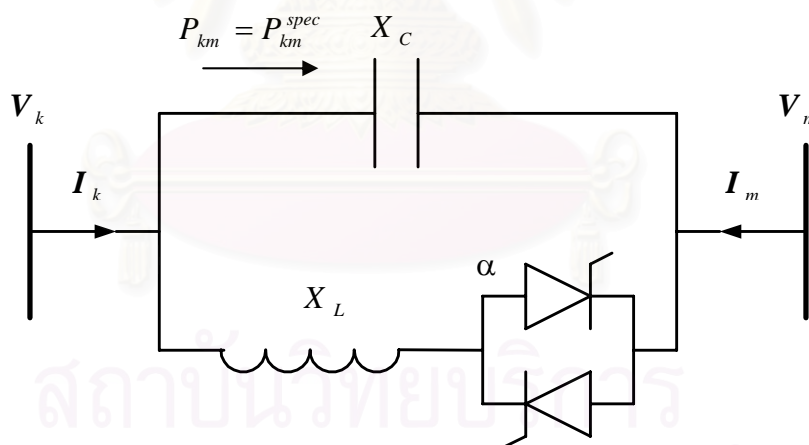
บัสชนิด PQ ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นบัสชนิด $PV\alpha$ ได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังนี้

- 1) เมื่อ $\alpha = \alpha_{max}$ และ $V_i > V_i^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด $PV\alpha$ และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_i = V_i^{spec}$
- 2) เมื่อ $\alpha = \alpha_{min}$ และ $V_i < V_i^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด $PV\alpha$ และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_i = V_i^{spec}$

2.10.3.2 อุปกรณ์ Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)

TCSC เป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ อุปกรณ์ TCSC สามารถทำหน้าที่ที่เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มหรือลดความยาวของสายส่งได้โดยการปรับเพิ่มหรือลดค่ารีแอกแตนซ์ซึ่งทำได้โดยการควบคุมด้วยไทรสเตอร์ซึ่งมีความรวดเร็วในการสวิตช์ที่สูงมาก เมื่อรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้น เราจึงสามารถใช้อุปกรณ์ TCSC ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าให้ไหลผ่านสายส่งตามที่ต้องการได้

แบบจำลองของอุปกรณ์ TCSC ในสภาวะการทำงานปกติ



รูปที่ 2.18 แบบจำลองของอุปกรณ์ TCSC

แบบจำลองของอุปกรณ์ TCSC ในสภาวะการทำงานปกติแสดงดังรูปที่ 2.18

- โดยที่ X_L คือ อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของ TCR
 X_C คือ คาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของ FC

รีแอกแตนซ์สมมูลของ TCR (X_{Leq}) แสดงดังสมการที่ (2.65)

$$X_{Leq} = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)} \quad (2.65)$$

โดยที่ α คือ มุมชดชนวนเกต (firing delay angle)

รีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC (X_{SVC}) แสดงดังสมการที่ (2.66)

$$X_{TCSC} = \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)] - X_L} \quad (2.66)$$

การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ TCSC

การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ TCSC สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันดังนี้

1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ TCSC ซึ่งได้แก่ มุมชดชนวนเกต ($\alpha_i = \alpha_i^{spec}$) แล้วทำการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวในระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวประเภทนี้ สามารถทำได้โดยการแทนค่ามุมชดชนวนเกตลงในสมการที่ (2.66) จะได้รีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC แล้วทำการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวเหมือนกับในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาอุปกรณ์ TCSC โดยแทนอุปกรณ์ TCSC ด้วยรีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC ที่หาได้

2) กำหนดวัตถุประสงค์ของการควบคุม (Control objective) ซึ่งได้แก่ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ ($P_{km} = P_{km}^{spec}$) หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวและคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ TCSC ที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม และนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการวิเคราะห์ รายละเอียดของการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวแสดงได้ดังนี้

อุปกรณ์ TCSC ที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง (P_{km}) ให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ (P_{km}^{spec}) สามารถทำได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งก็คือ การปรับมุมชดชนวนเกต (α) ในการคำนวณเพาเวอร์ฟลิวเมื่อพิจารณาอุปกรณ์ TCSC สามารถทำได้โดยการปรับปรุงสมการเพาเวอร์ฟลิว โดยเพิ่มสมการบังคับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ดังสมการที่ (2.67) รวมเข้ากับสมการเพาเวอร์ฟลิวที่มีอยู่เดิมและกำหนดให้มุมชดชนวนเกต (α) เป็นตัวแปรสถานะ

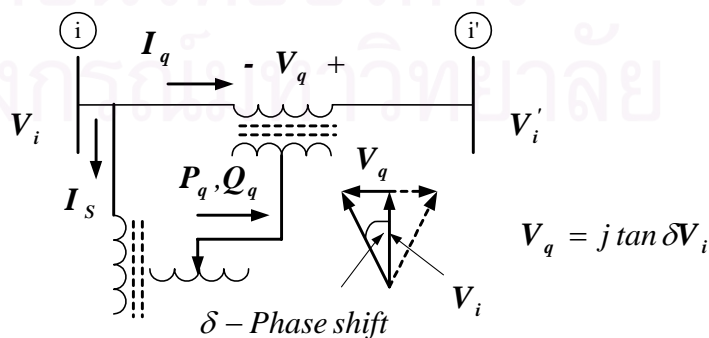
$$P_{km} - P_{km}^{spec} = 0 \quad (2.67)$$

สมการบังคับจะทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง (P_{km}) ให้มีค่าเท่ากับ กำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ (P_{km}^{spec}) สมการเพาเวอร์โพล์เชิงเส้นที่ได้รับการปรับปรุงแล้วแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{km} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_k \\ \Delta V_m \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

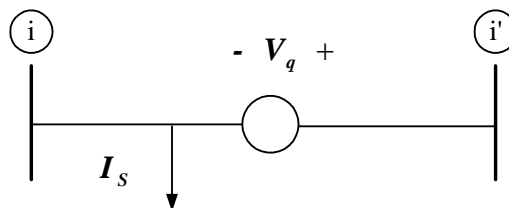
2.10.3.3 อุปกรณ์ Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR)

TCPAR เป็นอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับเฟสได้ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ แผนภาพไดอะแกรม (Schematic diagram) ของอุปกรณ์ TCPAR แสดงดังรูปที่ 2.19 ประกอบด้วย หม้อแปลงกระตุ้นที่ต่อขนาน (Shunt-connected excitation transformer) และหม้อแปลงบูสต์ที่ต่ออนุกรม (Series-connected boosting transformer) หลักการทำงานของอุปกรณ์ TCPAR ก็คือการเพิ่มแรงดันแบบควอดเรเจอร์ (Quadrature voltage) เข้าไปในสายส่งเพื่อปรับมุมเฟสของแรงดันทางด้านส่ง ทำให้ผลลัพธ์มุมเฟสของแรงดันทางด้านส่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามที่ต้องการ ซึ่งส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นเราจึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งได้โดยการควบคุมแรงดันแบบควอดเรเจอร์ที่เพิ่มเข้าไปหรือควบคุมมุมเฟสของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง



รูปที่ 2.19 แผนภาพไดอะแกรมของอุปกรณ์ TCPAR

แบบจำลองของอุปกรณ์ TCPAR ในสภาวะการทำงานปกติ



รูปที่ 2.20 แบบจำลองของอุปกรณ์ TCPAR

แบบจำลองของอุปกรณ์ TCPAR ในสภาวะการทำงานปกติแสดงดังรูปที่ 2.20 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอุดมคติซึ่งแทนส่วนประกอบความถี่มูลฐานของแรงดันไฟฟ้าแบบควอดเรเจอร์ที่เพิ่มเข้าไปในสายส่ง (V_q) และกระแสไฟฟ้าที่ถูกเทปไปยังหม้อแปลงกระตุ้น (I_s)

เมื่อพิจารณาเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.19 และอาศัยหลักการของความสมดุลของกำลังไฟฟ้า เราสามารถแสดงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ TCPAR ให้อยู่ในรูปของมุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป (Phase shift) ได้ดังสมการที่ (2.69) และ (2.70) ดังนั้นในการวิเคราะห์อุปกรณ์ TCPAR เราจึงสามารถใช้มุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ได้ หลังจากทราบค่ามุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปแล้ว สามารถนำมาหาค่าของแรงดันไฟฟ้าแบบควอดเรเจอร์ที่เพิ่มเข้าไปในสายส่ง (V_q) และกระแสไฟฟ้าที่ถูกเทปไปยังหม้อแปลงกระตุ้น (I_s) ได้ตามสมการที่ (2.69) และ (2.70)

$$V_q = j \tan \delta V_i \quad (2.69)$$

$$I_s = -j \tan \delta I_q \quad (2.70)$$

โดยที่	V_q	คือ	แรงดันไฟฟ้าแบบควอดเรเจอร์ที่เพิ่มเข้าไปในสายส่ง
	I_s	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ถูกเทปไปยังหม้อแปลงกระตุ้น
	δ	คือ	มุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป
	V_i	คือ	แรงดันไฟฟ้าทางด้านส่ง
	I_q	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง

การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ TCPAR

การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ TCPAR สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันดังนี้

1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ TCPAR ซึ่งได้แก่ แรงดันไฟฟ้าแบบควอดเรเจอร์ที่เพิ่มเข้าไปในสายส่ง (V_q) และกระแสไฟฟ้าที่ถูกเทปไปยังหม้อแปลงกระตุ้น (I_s) หรือมุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป ($\delta = \delta^{spec}$) แล้วทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ในระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ประเภทนี้ สามารถทำได้เช่นเดียวกับในกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเทปคงที่ (fixed tap)

2) กำหนดวัตถุประสงค์ของการควบคุม (Control objective) ซึ่งได้แก่ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ ($P_{km} = P_{km}^{spec}$) หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์และคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ TCPAR ที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม และนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการวิเคราะห์ รายละเอียดของการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์แสดงได้ดังนี้

อุปกรณ์ TCPAR ที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง (P_{km}) ให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ (P_{km}^{spec}) สามารถทำได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งก็คือ การปรับมุมเฟสที่เปลี่ยนแปลง (δ) ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์เมื่อพิจารณาอุปกรณ์ TCPAR สามารถทำได้โดยการปรับปรุงสมการเพาเวอร์โฟลว์ โดยเพิ่มสมการบังคับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ดังสมการที่ (2.71) รวมเข้ากับสมการเพาเวอร์โฟลว์ที่มีอยู่เดิมและกำหนดให้มุมเฟสที่เปลี่ยนแปลง (δ) เป็นตัวแปรสถานะ

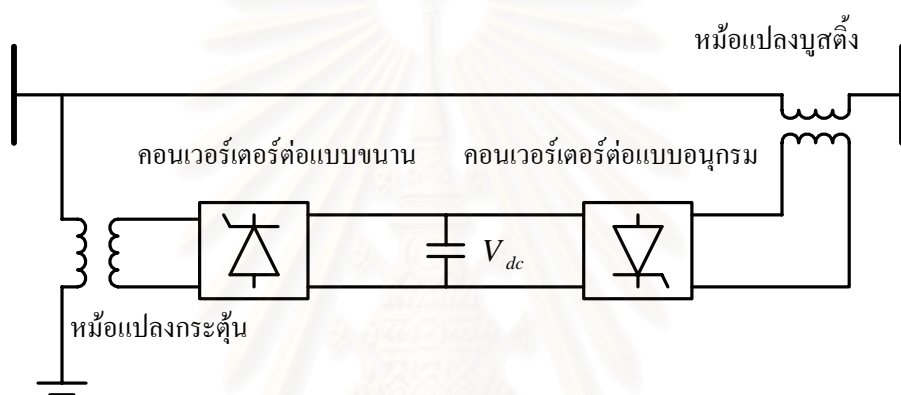
$$P_{km} - P_{km}^{spec} = 0 \quad (2.71)$$

สมการบังคับจะทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง (P_{km}) ให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ (P_{km}^{spec}) สมการเพาเวอร์โฟลว์เชิงเส้นที่ได้รับการปรับปรุงแล้วแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{km} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \delta} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & V_k \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} & V_m \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_k \\ V_k \\ \Delta V_m \\ V_m \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

2.10.3.4 อุปกรณ์ Unified Power Flow Controller (UPFC)

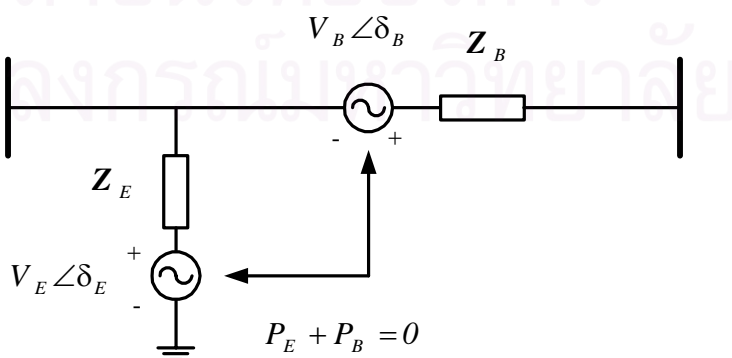
UPFC เป็นอุปกรณ์ FACTS ที่สามารถควบคุมพารามิเตอร์พื้นฐานของการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ทั้งหมด อันได้แก่ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส และผลต่างมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส ดังนั้น เราจึงสามารถนำอุปกรณ์ UPFC มาใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ควบคุมขนาดแรงดันที่บัส หรือควบคุมตัวแปรทั้งสามอย่างพร้อมกันในเวลาเดียวกัน หากมองในอีกมุมมองหนึ่งก็คือ เราสามารถนำ อุปกรณ์ UPFC มาใช้เพื่อให้ทำงานเป็น อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับมุมเฟส หรือทำงานเป็นทั้งสามอุปกรณ์พร้อมๆ กัน แผนภาพไคอะแกรม (Schematic diagram) ของอุปกรณ์ UPFC แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แผนภาพไคอะแกรมของอุปกรณ์ UPFC

อุปกรณ์ UPFC ประกอบด้วย คอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter:VSC) จำนวน 2 ตัว ต่อแบบขนาน 1 ตัวและต่อแบบอนุกรม 1 ตัว หม้อแปลงกระตุ้น (Excitation transformer : ET) หม้อแปลงบูสต์ (Boosting transformer :BT) และตัวเก็บประจุ

แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC ในสภาวะการทำงานปกติ



รูปที่ 2.22 แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC

แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC ในสภาวะการทำงานปกติแสดงดังรูปที่ 2.22 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอุดมคติจำนวน 2 แหล่งจ่าย ซึ่งแทนส่วนประกอบความถี่มูลฐานของ แรงดันไฟฟ้าที่ถูกสวิตช์ที่เทอมินอลบัสของคอนเวอร์เตอร์และอิมพีแดนซ์ของคอนเวอร์เตอร์ต่อ อนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

โดยที่ V_E และ δ_E คือ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ซึ่งแทน คอนเวอร์เตอร์ที่ต่อแบบขนาน

V_B และ δ_B คือ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ซึ่งแทน คอนเวอร์เตอร์ที่ต่อแบบอนุกรม

Z_E และ Z_B คือ อิมพีแดนซ์ของคอนเวอร์เตอร์แบบขนานและแบบอนุกรม

สมมติว่า ไม่มีกำลังสูญเสียเกิดขึ้นในอุปกรณ์ UPFC และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) มี ค่าคงที่ ดังนั้น อุปกรณ์ UPFC จะไม่มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าจริงให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง นั่นคือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบไฟฟ้ากำลังจ่ายให้กับคอนเวอร์เตอร์แบบขนานจะต้องมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้า จริงที่ระบบไฟฟ้ากำลังได้รับจากคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม ดังสมการที่ (2.73)

$$P_E + P_B = 0 \quad (2.73)$$

การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ UPFC

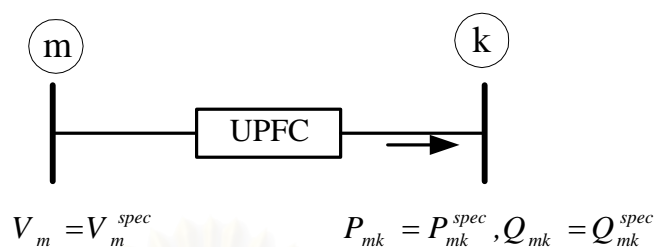
การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการพิจารณาอุปกรณ์ UPFC สามารถ แบ่งได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันดังนี้

1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC ซึ่งได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ต่อแบบ อนุกรม ($V_B = V_B^{spec}, \delta_B = \delta_B^{spec}$) ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ต่อแบบ ขนาน ($V_E = V_E^{spec}, \delta_E = \delta_E^{spec}$) โดยค่าที่กำหนดจะต้องสอดคล้องกับหลักความสมดุลของ กำลังไฟฟ้าในสมการที่ (2.73) แล้วทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ในระบบไฟฟ้ากำลังโฟลว์ เหมือนกับในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาอุปกรณ์ UPFC

2) กำหนดวัตถุประสงค์ของการควบคุม (Control objective) ซึ่งได้แก่ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ ไหลผ่านสายส่งให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบุ ($P_{mk} = P_{mk}^{spec}$) การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอก ทิฟที่ไหลผ่านสายส่งให้มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้ารีแอกทิฟที่ระบุ ($Q_{mk} = Q_{mk}^{spec}$) การควบคุมขนาด ของแรงดันที่บัส ($V_m = V_m^{spec}$) เป็นต้น หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์และ คำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC ที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการ ควบคุม และทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้มา รายละเอียดของการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์แสดงได้ ดังนี้

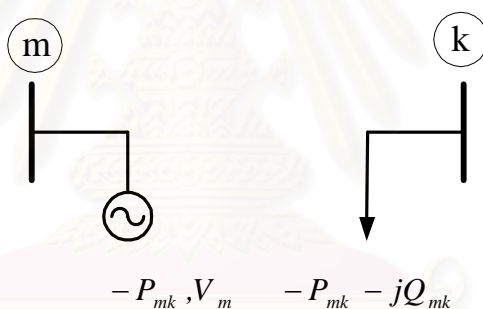
โหมดการทำงานของอุปกรณ์ UPFC มีหลายโหมดการทำงานด้วยกัน แต่โหมดการทำงาน ที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติมากที่สุดก็คือ การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอก

ที่ฟที่ควบคุมโดยคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อแบบอนุกรม และการควบคุมขนาดของแรงดันที่บัสซึ่งควบคุมโดยคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อแบบขนาน แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โหมดการทำงานของอุปกรณ์ UPFC

วิธีการคำนวณเพาเวอร์โพล์ที่จะนำเสนอวิธีแรก จะใช้วิธีการจำลองอุปกรณ์ UPFC ด้วยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขนาดคงที่ฉีดเข้า-ออกจากบัสที่ต่อกับอุปกรณ์ UPFC และกำหนดให้บัสที่ควบคุมขนาดแรงดันเป็นบัสชนิด PV แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC ที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพล์

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายและสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื่องจากสามารถนำโปรแกรมเพาเวอร์โพล์ที่มีอยู่เดิมมาปรับปรุงได้ง่ายแต่มีข้อเสียดังนี้

1. วิธีการนี้จะต้องใช้อุปกรณ์ UPFC ในการควบคุมตัวแปรทั้ง 3 ตัว (P_{mk}, Q_{mk}, V_m) ไปพร้อมๆ กัน หากเราต้องการควบคุมตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพียง 1-2 ตัว วิธีการนี้จะไม่สามารถนำมาใช้ได้
2. เนื่องจากจะต้องคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC ภายหลังจากการคำนวณเพาเวอร์โพล์ด้วยวิธีการทำซ้ำเสร็จสิ้น ทำให้ไม่สามารถทราบได้เลยว่า ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC จะอยู่ในขอบเขตความสามารถของอุปกรณ์ UPFC หรือไม่ หากค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC ออกนอกขอบเขตความสามารถของอุปกรณ์ UPFC แล้วจะต้องกลับไปคำนวณเพาเวอร์โพล์ใหม่อีกครั้ง ซึ่งจะทำให้สูญเสียคุณสมบัติการลู่เข้าหาคำตอบของวิธีนิวตัน-ราฟสัน

วิธีการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์วิธีที่สองที่จะนำเสนอ จะทำการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ไปพร้อมๆ กันกับการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC ทำให้สามารถรักษาคุณสมบัติการคู่เข้าหาคำตอบของวิธีนิวตัน-ราฟสัน และยังสามารถเลือกตัวแปรในการควบคุมได้ตามต้องการ

สมการเพาเวอร์โพลาร์เมื่อพิจารณาอุปกรณ์ UPFC โดยใช้อุปกรณ์ UPFC ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ($P_{mk} = P_{mk}^{spec}$) ควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง ($Q_{mk} = Q_{mk}^{spec}$) และควบคุมขนาดแรงดันที่บัส ($V_m = V_m^{spec}$) สามารถสร้างขึ้นจากการปรับปรุงสมการเพาเวอร์โพลาร์เดิม โดยการเพิ่มสมการบังคับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง สมการบังคับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง และสมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้าจริงในสมการที่ (2.73) และกำหนดให้ V_E, δ_E, V_B และ δ_B เป็นตัวแปรสถานะและให้บัสที่ควบคุมขนาดแรงดันเป็นบัสชนิด PVV_E

สมการเพาเวอร์โพลาร์เชิงเส้นแสดงดังสมการที่ (2.74)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{mk} \\ \Delta Q_{mk} \\ \Delta P_{BE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & V_E \frac{\partial P_m}{\partial V_E} & V_k \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_B} & V_B \frac{\partial P_m}{\partial V_B} & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_E} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & 0 & V_k \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_B} & V_B \frac{\partial P_k}{\partial V_B} & 0 \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & V_E \frac{\partial Q_m}{\partial V_E} & V_k \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_B} & V_B \frac{\partial Q_m}{\partial V_B} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_E} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & 0 & V_k \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_B} & V_B \frac{\partial Q_k}{\partial V_B} & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & 0 & V_k \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_B} & V_B \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_B} & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} & 0 & V_k \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_B} & V_B \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_B} & 0 \\ \frac{\partial P_{BE}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{BE}}{\partial \theta_k} & V_E \frac{\partial P_{BE}}{\partial V_E} & V_k \frac{\partial P_{BE}}{\partial V_k} & \frac{\partial P_{BE}}{\partial \delta_B} & V_B \frac{\partial P_{BE}}{\partial V_B} & \frac{\partial P_{BE}}{\partial \delta_E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_m \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_E \\ \Delta V_k \\ \delta_B \\ \Delta V_B \\ \delta_E \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

โดยที่ บัสชนิด PVV_E คือบัสที่ควบคุมขนาดแรงดันด้วยการปรับขนาดของแหล่งจ่ายแรงดัน (V_E) เมื่อขนาดของแหล่งจ่ายแรงดัน (V_E) ทำงานอยู่ภายในขอบเขตความสามารถ

ในแต่ละรอบของการทำซ้ำ เมื่อใดก็ตามที่ V_E ทำงานออกนอกขอบเขตความสามารถให้ทำการเปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PVV_E ไปเป็นบัสชนิด PQ และจะควบคุมให้ $V_E = V_E^{limit}$

บัสชนิด PQ ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นบัสชนิด PVV_E ได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังนี้

1) เมื่อ $V_E = V_{E_{max}}$ และ $V_m > V_m^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด PVV_E

และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_m = V_m^{spec}$

2) เมื่อ $V_E = V_{E_{max}}$ และ $V_m < V_m^{spec}$ ให้เปลี่ยนชนิดของบัสจากบัสชนิด PQ เป็นบัสชนิด PVV_E

และควบคุมขนาดของแรงดันที่บัส $V_m = V_m^{spec}$

กรณีไม่ควบคุมค่า P_{mk} ให้นำสมการบังคับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งและตัวแปร δ_B ออกจากสมการเพาเวอร์โฟลว์ในสมการที่ (2.74) และกำหนดค่าให้กับตัวแปร δ_B

กรณีไม่ควบคุมค่า Q_{mk} ให้นำสมการบังคับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่งและตัวแปร V_B ออกจากสมการเพาเวอร์โฟลว์ในสมการที่ (2.74) และกำหนดค่าให้กับตัวแปร V_B

กรณีไม่ควบคุมค่า V_m ให้นำตัวแปร V_E ออกจากเวกเตอร์ตัวแปรสถานะของสมการเพาเวอร์โฟลว์ในสมการที่ (2.74) และกำหนดให้ V_m เป็นตัวแปรสถานะแทน

บทที่ 3

การปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะการทำงานอยู่ตัว (Steady-state) โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ กันดังนี้

- 1) การเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งได้แก่
 - 1.1 การควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า
 - 1.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง
 - 1.3 การควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง
 - 1.4 การควบคุมตัวแปรทางไฟฟ้ารวม ซึ่งได้แก่ การควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า และ/หรือ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง และ/หรือ การควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง เป็นต้น
- 2) การแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง
- 3) การเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 4) การลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า

ในขั้นตอนของการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องพิจารณาถึงหัวข้อสำคัญ 3 ประการหลักดังต่อไปนี้

- 1) ประเภทของอุปกรณ์ควบคุม
- 2) ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม
- 3) ค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม

โดยทั่วไปแล้ว การเลือกประเภทของอุปกรณ์ควบคุมจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการควบคุมเป็นหลัก เราสามารถจัดแบ่งประเภทของอุปกรณ์ควบคุมตามลักษณะของวัตถุประสงค์ของการควบคุมได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

- 1) อุปกรณ์ควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า ได้แก่
 - 1.1 หม้อแปลงชนิดปรับแก้ได้ในขณะมีโหลด
 - 1.2 อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน
 - 1.3 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟ
 - 1.4 อุปกรณ์ SVC

2) อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ได้แก่

- 2.1 หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส
- 2.2 อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม
- 2.3 ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
- 2.4 อุปกรณ์ TCSC
- 2.5 อุปกรณ์ TCPAR

3) อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง ได้แก่ หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ป

4) อุปกรณ์ควบคุมตัวแปรทางไฟฟ้ารวม ได้แก่ อุปกรณ์ UPFC

ในการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมนั้น ในงานวิจัย[22]ได้นำเสนอไว้ว่า ให้ทำการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆทุกตำแหน่งแล้วนำผลของการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวซ์มาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด วิธีการดังกล่าวนี้เป็นวิธีการที่ง่ายแต่ใช้เวลาค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่ระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมตามลักษณะวัตถุประสงค์ของการควบคุม นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมซึ่งมีรายละเอียดแสดงได้ดังนี้

3.1 การเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

3.1.1 การควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ณ ตำแหน่งของบัสที่ต้องการควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าสำหรับวิธีการคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมสามารถคำนวณได้ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 2.8-2.10

3.1.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ณ ตำแหน่งของสายส่งที่ต้องการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงสำหรับวิธีการคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมสามารถคำนวณได้ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 2.8-2.10

3.1.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ณ ตำแหน่งของสายส่งที่ต้องการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสำหรับวิธีการคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมสามารถคำนวณได้ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 2.8-2.10

3.1.4 การควบคุมตัวแปรทางไฟฟ้ารวม

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ณ ตำแหน่งของสายส่งที่ต้องการควบคุมกำลังไฟฟ้าและ/หรือ ณ ตำแหน่งของบัสที่ต้องการควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า สำหรับวิธีการคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมสามารถคำนวณได้ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 2.8-2.10

3.2 การแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง

ปัญหา กำลังเกินในสายส่งเป็นปัญหาหนึ่งที่มีสำคัญอย่างยิ่งในขั้นตอนของการดำเนินงาน ออกแบบและวางแผนระบบไฟฟ้ากำลังทั้งในเงื่อนไขการทำงานปกติ (Normal condition) และ เงื่อนไขการเกิดเหตุขัดข้อง (Contingency condition) เมื่อมีเหตุการณ์กำลังเกินในสายส่งเกิดขึ้น จะต้องมีการดำเนินการแก้ไข (Remedial action) อย่างเหมาะสมภายในระยะเวลาอันรวดเร็วเพื่อ ป้องกันมิให้เกิดผลกระทบที่รุนแรงตามมา เช่น ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์กำลังเกินในสายส่งขึ้นเป็น ระยะเวลาาน อาจทำให้เกิดเหตุการณ์กำลังเกินในสายส่งอย่างต่อเนื่อง (Cascading overload) เกิดขึ้นตามมาและในท้ายที่สุด อาจทำให้เกิดสภาวะเลวร้ายสุดขีด (Extremis state) นั่นก็คือ เกิด เหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั้งระบบ (Black out) ในการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งโดยส่วนใหญ่แล้ว จะอาศัยการจัดสรรกำลังผลิตใหม่ (Generation reschedule) และ/หรือ การตัดโหลด (Load curtailment) ซึ่งมีข้อเสียคือ ในกรณีของการจัดสรรกำลังผลิตใหม่จะทำให้ราคาของกำลังไฟฟ้าที่ได้ มีค่าสูงขึ้นจากราคาเดิม และต้องใช้เวลาานในการจัดสรรกำลังผลิตใหม่เนื่องจากการทำงานใน ลักษณะเชิงกลไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนในกรณีของการตัดโหลดนั้นอาจทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้า เกิดความเสียหาย ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง โดยการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ที่มีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ FACTS ที่ได้ติดตั้งเข้าไปจะทำการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว เนื่องจากคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีลักษณะการทำงานที่รวดเร็วและ มีความเชื่อถือได้สูง

ขั้นตอนในการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งโดยการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS สามารถแสดงได้ดังนี้

1. การเลือกประเภทของอุปกรณ์ควบคุม

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าหลักในสายส่งได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริง ดังนั้นในการวิเคราะห์ปัญหาจะ พิจารณาการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งในส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงเป็นหลัก อุปกรณ์ FACTS ที่มีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง ได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC ดังนั้นเราจึงเลือกอุปกรณ์ดังกล่าวนี้สำหรับแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง

2. การเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

ในงานวิจัย[23,24]จะอาศัยคุณสมบัติทางพลวัตเป็นพื้นฐานในการพิจารณาเลือกตำแหน่งที่ เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม เนื่องจากมีการใช้งานอุปกรณ์ FACTS ในลักษณะของ

การปรับปรุงเสถียรภาพเป็นหลัก สำหรับการแก้ไขปัญหาค่าล้นเกินในสายส่งซึ่งนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมโดยอาศัยคุณสมบัติทางสถิติศาสตร์เป็นพื้นฐานหลักในการพิจารณาเลือกตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) โดยอาศัยการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมจะสามารถนำมาสร้างเป็นดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม เมื่อนำดัชนีของแต่ละตำแหน่งมาทำการเปรียบเทียบกันก็จะได้อันดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

3. การคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม

ถึงแม้ว่าการใช้เทคนิคของการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมไปเรื่อยๆ จนกว่าจะสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมจะเป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่ก็เหมาะสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดเล็กเท่านั้น หากระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่จะทำให้การใช้เทคนิคของการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมมีความยากและซับซ้อนมาก อีกทั้งยังใช้เวลานาน โดยเฉพาะในขั้นตอนของการหาทิศทางและขนาดของการปรับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมเพื่อลดกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งเส้นที่เกิดค่าล้นเกิน (Overloaded lines) ในขณะเดียวกันจะต้องคอยป้องกันไม่ให้เกิดค่าล้นเกินเพิ่มขึ้นในสายส่งเส้นอื่น ๆ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับการแก้ไขปัญหาค่าล้นเกินในสายส่ง โดยอาศัยพื้นฐานของการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุม และวิธีการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสม (Optimization) ที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งจะสามารถคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับการแก้ไขปัญหาค่าล้นเกินในสายส่งได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

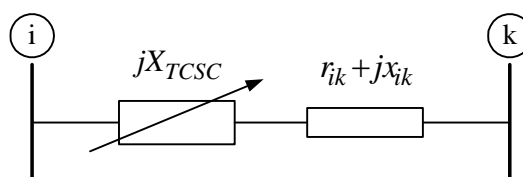
รายละเอียดของการแก้ไขปัญหาค่าล้นเกินในสายส่งโดยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC สามารถแสดงได้ดังนี้

3.2.1 แบบจำลอง PIM ของอุปกรณ์ควบคุม

เนื่องจากการแก้ไขปัญหาค่าล้นเกินในสายส่งโดยการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง จะต้องอาศัยพื้นฐานของการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความไวนี้จะมีลักษณะเป็นแบบจำลองที่แทนอุปกรณ์ FACTS ด้วยกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าสู่บัส ซึ่งจะเรียกแบบจำลองแบบนี้ว่าแบบจำลอง PIM (Power Injection Model) ดังนั้นในหัวข้อนี้เราจะทำการพิสูจน์และสร้างแบบจำลอง PIM ของอุปกรณ์ FACTS ที่นำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาค่าล้นเกินในสายส่ง

3.2.1.1 แบบจำลอง PIM ของอุปกรณ์ TCSC

แบบจำลองของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC สามารถแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ในรูปที่ 3.1 สามารถแสดงดังสมการที่ (3.1)-(3.4)

$$P_{ik}^{sc} = g_{ik}^{sc} V_i^2 - V_i V_k (g_{ik}^{sc} \cos \theta_{ik} + b_{ik}^{sc} \sin \theta_{ik}) \quad (3.1)$$

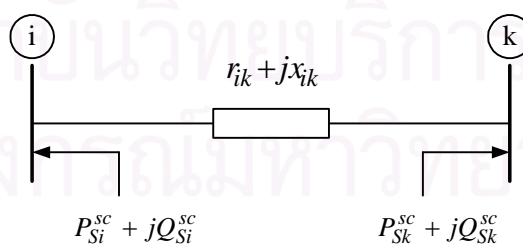
$$Q_{ik}^{sc} = -b_{ik}^{sc} V_i^2 - V_i V_k (g_{ik}^{sc} \sin \theta_{ik} - b_{ik}^{sc} \cos \theta_{ik}) \quad (3.2)$$

$$P_{ki}^{sc} = g_{ik}^{sc} V_k^2 - V_k V_i (g_{ik}^{sc} \cos \theta_{ki} + b_{ik}^{sc} \sin \theta_{ki}) \quad (3.3)$$

$$Q_{ki}^{sc} = -b_{ik}^{sc} V_k^2 - V_k V_i (g_{ik}^{sc} \sin \theta_{ki} - b_{ik}^{sc} \cos \theta_{ki}) \quad (3.4)$$

โดยที่ $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$ และ $g_{ik}^{sc} + jb_{ik}^{sc} = \frac{1}{r_{ik} + j(x_{ik} + X_{TCSC})}$

แบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC สามารถแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ฉีดเข้าสู่บัสของแบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ในรูปที่ 3.2 สามารถแสดงดังสมการที่ (3.5)-(3.8)

$$P_{Si}^{sc} = (g_{ik} - g_{ik}^{sc})V_i^2 - V_i V_k [(g_{ik} - g_{ik}^{sc})\cos \theta_{ik} + (b_{ik} - b_{ik}^{sc})\sin \theta_{ik}] \quad (3.5)$$

$$Q_{Si}^{sc} = -(b_{ik} - b_{ik}^{sc})V_i^2 - V_i V_k [(g_{ik} - g_{ik}^{sc})\sin \theta_{ik} - (b_{ik} - b_{ik}^{sc})\cos \theta_{ik}] \quad (3.6)$$

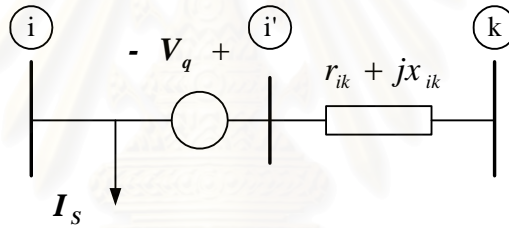
$$P_{Sk}^{sc} = (g_{ik} - g_{ik}^{sc})V_k^2 - V_k V_i [(g_{ik} - g_{ik}^{sc})\cos \theta_{ki} + (b_{ik} - b_{ik}^{sc})\sin \theta_{ki}] \quad (3.7)$$

$$Q_{Sk}^{sc} = -(b_{ik} - b_{ik}^{sc})V_k^2 - V_k V_i [(g_{ik} - g_{ik}^{sc})\sin \theta_{ki} - (b_{ik} - b_{ik}^{sc})\cos \theta_{ki}] \quad (3.8)$$

โดยที่ $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$, $g_{ik} + jb_{ik} = \frac{I}{r_{ik} + jx_{ik}}$ และ $g_{ik}^{sc} + jb_{ik}^{sc} = \frac{I}{r_{ik} + j(x_{ik} + X_{TCSC})}$

3.2.1.2 แบบจำลอง PIM ของอุปกรณ์ TCPAR

แบบจำลองของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR สามารถแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบจำลองของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR ในรูปที่ 3.1 สามารถแสดงดังสมการที่ (3.9)-(3.12)

$$P_{ik}^{PS} = g_{ik}T^2V_i^2 - TV_iV_k [g_{ik}\cos(\theta_{ik} + \delta) + b_{ik}\sin(\theta_{ik} + \delta)] \quad (3.9)$$

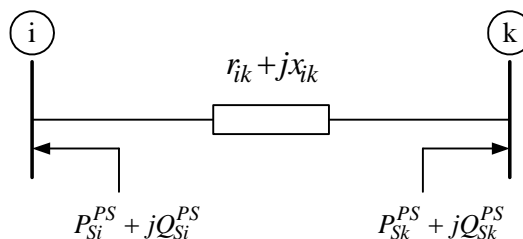
$$Q_{ik}^{PS} = -b_{ik}T^2V_i^2 - TV_iV_k [g_{ik}\sin(\theta_{ik} + \delta) - b_{ik}\cos(\theta_{ik} + \delta)] \quad (3.10)$$

$$P_{ki}^{PS} = g_{ik}V_k^2 - TV_kV_i [g_{ik}\cos(\theta_{ik} + \delta) - b_{ik}\sin(\theta_{ik} + \delta)] \quad (3.11)$$

$$Q_{ki}^{PS} = -b_{ik}V_k^2 + TV_kV_i [g_{ik}\sin(\theta_{ik} + \delta) + b_{ik}\cos(\theta_{ik} + \delta)] \quad (3.12)$$

โดยที่ $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$, $g_{ik} + jb_{ik} = \frac{I}{r_{ik} + jx_{ik}}$ และ $T = \sec \delta$

แบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR สามารถแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ฉีดเข้าสู่บัสของแบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR ในรูปที่ 3.4 สามารถแสดงดังสมการที่ (3.13)-(3.16)

$$P_{Si}^{PS} = -g_{ik} K^2 V_i^2 - KV_i V_k [g_{ik} \sin \theta_{ik} - b_{ik} \cos \theta_{ik}] \quad (3.13)$$

$$Q_{Si}^{PS} = b_{ik} K^2 V_i^2 + KV_i V_k [g_{ik} \cos \theta_{ik} + b_{ik} \sin \theta_{ik}] \quad (3.14)$$

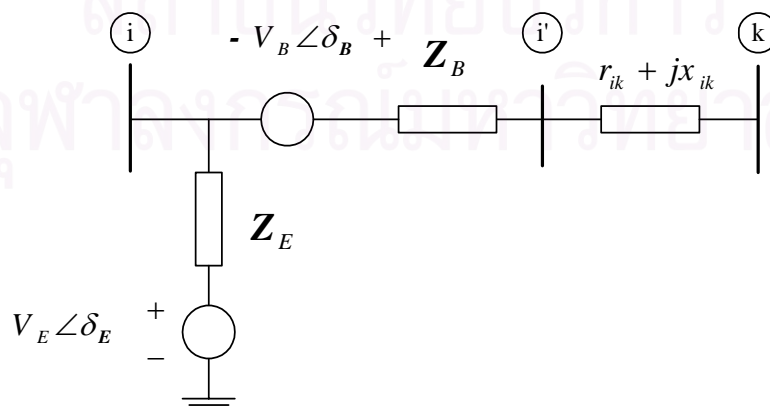
$$P_{Sk}^{PS} = -KV_i V_k [g_{ik} \sin \theta_{ik} + b_{ik} \cos \theta_{ik}] \quad (3.15)$$

$$Q_{Sk}^{PS} = -KV_i V_k [g_{ik} \cos \theta_{ik} - b_{ik} \sin \theta_{ik}] \quad (3.16)$$

โดยที่ $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$, $g_{ik} + jb_{ik} = \frac{1}{r_{ik} + jx_{ik}}$ และ $K = \tan \alpha$

3.2.1.3 แบบจำลอง PIM ของอุปกรณ์ UPFC

แบบจำลองของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC สามารถแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

โดยทั่วไปแล้ว $Z_B \ll r_{ik} + jx_{ik}$ ดังนั้นในการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งในกรณีของการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC เราจึงสามารถละเลย Z_B ได้

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ในรูปที่ 3.5 (กรณีละเลย Z_B) สามารถแสดงดังสมการที่ (3.17)-(3.20)

$$P_{ik}^U = (g_E + g_{ik})V_i^2 - V_i V_k [g_{ik} \cos \theta_{ik} + b_{ik} \sin \theta_{ik}] - V_i V_E [g_E \cos \theta_{iE} + b_E \sin \theta_{iE}] + V_i V_B [g_{ik} \cos \theta_{iB} + b_{ik} \sin \theta_{iB}] \quad (3.17)$$

$$Q_{ik}^U = -(b_E + b_{ik})V_i^2 - V_i V_k [g_{ik} \sin \theta_{ik} - b_{ik} \cos \theta_{ik}] - V_i V_E [g_E \sin \theta_{iE} - b_E \cos \theta_{iE}] + V_i V_B [g_{ik} \sin \theta_{iB} - b_{ik} \cos \theta_{iB}] \quad (3.18)$$

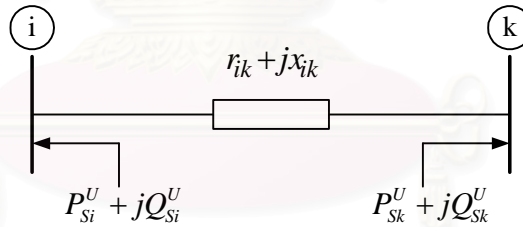
$$P_{ki}^U = g_{ik}V_k^2 - V_k V_i [g_{ik} \cos \theta_{ki} + b_{ik} \sin \theta_{ki}] - V_k V_B [g_{ik} \cos \theta_{kB} + b_{ik} \sin \theta_{kB}] \quad (3.19)$$

$$Q_{ki}^U = -b_{ik}V_k^2 - V_k V_i [g_{ik} \sin \theta_{ki} - b_{ik} \cos \theta_{ki}] - V_k V_B [g_{ik} \sin \theta_{kB} - b_{ik} \cos \theta_{kB}] \quad (3.20)$$

$$\text{โดยที่ } \theta_{ik} = \theta_i - \theta_k, \quad \theta_{iB} = \theta_i - \delta_B, \quad \theta_{iE} = \theta_i - \delta_E$$

$$g_B + jb_B = \frac{1}{Z_B}, \quad g_E + jb_E = \frac{1}{Z_E}$$

แบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC สามารถแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัสของแบบจำลอง PIM ของสายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ในรูปที่ 3.6 สามารถแสดงดังสมการที่ (3.21)-(3.24)

$$P_{Si}^U = -g_E V_i^2 + V_i V_E [g_E \cos \theta_{iE} + b_E \sin \theta_{iE}] - V_i V_B [g_{ik} \cos \theta_{iB} + b_{ik} \sin \theta_{iB}] \quad (3.21)$$

$$Q_{Si}^U = b_E V_i^2 + V_i V_E [g_E \sin \theta_{iE} - b_E \cos \theta_{iE}] - V_i V_B [g_{ik} \sin \theta_{iB} - b_{ik} \cos \theta_{iB}] \quad (3.22)$$

$$P_{Sk}^U = V_k V_B [g_{ik} \cos \theta_{kB} + b_{ik} \sin \theta_{kB}] \quad (3.23)$$

$$Q_{Sk}^U = V_k V_B [g_{ik} \sin \theta_{kB} - b_{ik} \cos \theta_{kB}] \quad (3.24)$$

3.2.2 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis)

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS โดยจะอาศัยพื้นฐานของหลักการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์แบบดีซี (DC Power Flow) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับว่ามีความถูกต้องเหมาะสมเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง[25] เนื่องจากการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่จะใช้เวลาานานมาก ดังนั้นการใช้แบบจำลองสมการเพาเวอร์โฟลว์แบบดีซีจะช่วยลดเวลาการคำนวณให้น้อยลง และช่วยให้สามารถพิสูจน์หาสมการทั่วไปของความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS ได้โดยสะดวกและอยู่ในรูปของสมการที่ไม่ซับซ้อน การพิสูจน์หาสมการทั่วไปของความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS สามารถแสดงได้ดังนี้

สมการเพาเวอร์โฟลว์แบบดีซีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.25)

u

$$[\theta] = [X][P] \quad (3.25)$$

โดยที่ $[\theta]$ คือ เวกเตอร์ของมุมเฟสของแรงดันที่บัส
 $[P]$ คือ เวกเตอร์ของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส
 $[X]$ คือ รีแอกแตนซ์เมตริกซ์

จากสมการที่ (3.25) เราสามารถเขียนสมการมุมเฟสของแรงดันที่บัส i ใดๆ ได้ดังสมการที่ (3.26)

$$\theta_i = \sum_{k=1}^n X_{ik} P_k \quad (3.26)$$

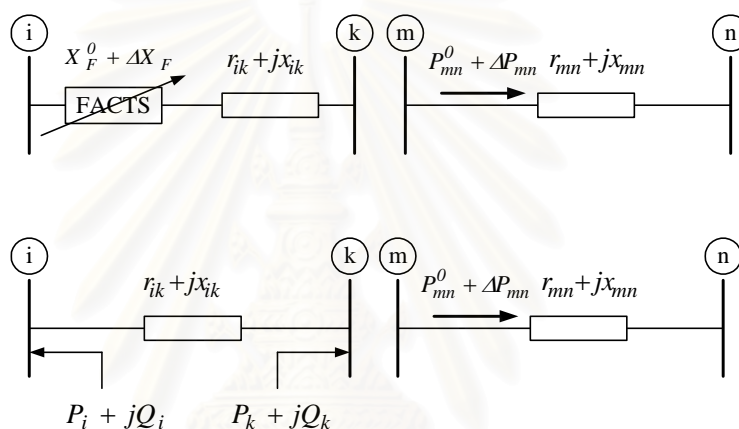
โดยอาศัยพื้นฐานของแบบจำลองสมการเพาเวอร์โฟลว์แบบดีซี เราสามารถเขียนสมการกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$ ได้ดังสมการที่ (3.27)

$$P_{mn} = \frac{(\theta_m - \theta_n)}{x_{mn}} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ (3.26) และ (3.27) สามารถเขียนสมการกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$ ให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัสได้ดังสมการที่ (3.28)

$$P_{mn} = \frac{I}{x_{mn}} \sum_{k=1}^n (X_{mk} - X_{nk}) P_k \quad (3.28)$$

โดยที่ x_{mn} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง $m - n$
 X คือ สมาชิกของเมตริกซ์รีแอกแตนซ์
 P_k คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส k
 P_{mn} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$



รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง

รูปที่ 3.7 แสดงการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$ ใดๆ เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ (X_F) ของอุปกรณ์ FACTS ที่ติดตั้งบนสายส่ง $i - k$ สามารถนิยามได้ดังสมการที่ (3.29)

$$S_{mn,ik}^F = \frac{\Delta P_{mn}}{\Delta X_F} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_F} + \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial X_F} \quad (3.29)$$

ดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $i - k$ เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ (X_F) ของอุปกรณ์ FACTS ที่ติดตั้งบนสายส่ง $i - k$ สามารถนิยามได้ดังสมการที่ (3.30)

$$S_{ik,ik}^F = \frac{\Delta P_{ik}}{\Delta X_F} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_F} + \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial X_F} - \frac{\partial P_i}{\partial X_F} \quad (3.30)$$

3.2.2.1 การวิเคราะห์ความไวในกรณีของการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC

พารามิเตอร์ควบคุมของอุปกรณ์ TCSC ได้แก่ มุมจุดชนวนเกต (α)

เนื่องจากการคำนวณหาค่าดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS จะเกี่ยวข้องกับการหาเทอมของอนุพันธ์ย่อยเทอมต่างๆ หากเราเลือกกรีแอกแตนซ์สมมูล (X_{TCSC}) เป็นพารามิเตอร์ควบคุมที่ใช้เทียบแล้ว จะทำให้การหาเทอมของอนุพันธ์ย่อยง่ายขึ้นกว่าการเลือกมุมจุดชนวนเกต (α) เป็นพารามิเตอร์ควบคุมที่ใช้เทียบโดยตรง หลังจากทราบค่ากรีแอกแตนซ์สมมูลที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมแล้วสามารถนำมาคำนวณหามุมจุดชนวนเกตได้ในภายหลังโดยใช้สมการที่ (2.66)

จากนิยามของดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งที่ได้แสดงข้างต้นในสมการที่ (3.29) และ (3.30) เราสามารถหาดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$ ใด ๆ เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ (X_{TCSC}) ของอุปกรณ์ TCSC ที่ติดตั้งบนสายส่ง $i - k$ ได้ดังสมการที่ (3.31) และหาดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $i - k$ เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ (X_{TCSC}) ของอุปกรณ์ TCSC ที่ติดตั้งบนสายส่ง $i - k$ ได้ดังสมการที่ (3.32) ตามลำดับ

$$S_{mn,ik}^{sc} = \frac{\Delta P_{mn}}{\Delta X_{TCSC}} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_{TCSC}} + \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial X_{TCSC}} \quad (3.31)$$

$$S_{ik,ik}^{sc} = \frac{\Delta P_{ik}}{\Delta X_{TCSC}} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_{TCSC}} + \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial X_{TCSC}} - \frac{\partial P_i}{\partial X_{TCSC}} \quad (3.32)$$

โดยที่

$$\frac{\partial P_{mn}}{\partial P_i} = \frac{1}{x_{mn}} (X_{mi} - X_{ni}) \quad , \quad \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_k} = \frac{1}{x_{mn}} (X_{mk} - X_{nk})$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial P_i} = \frac{1}{x_{ik}} (X_{ii} - X_{ki}) \quad , \quad \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_k} = \frac{1}{x_{ik}} (X_{ik} - X_{kk})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial X_{TCSC}} = \frac{\partial P_{Si}^{sc}}{\partial X_{TCSC}} = \frac{2(x_{ik} + X_{TCSC}) r_{ik} V_i^2}{[r_{ik}^2 + (x_{ik} + X_{TCSC})^2]^2}$$

$$- \frac{V_i V_k}{[r_{ik}^2 + (x_{ik} + X_{TCSC})^2]^2} \left\{ 2(x_{ik} + X_{TCSC}) r_{ik} \cos \theta_{ik} \right. \\ \left. + (r_{ik}^2 - (x_{ik} + X_{TCSC})^2) \sin \theta_{ik} \right\}$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial X_{TCSC}} = \frac{\partial P_{Sk}^{sc}}{\partial X_{TCSC}} = \frac{2(x_{ik} + X_{TCSC}) r_{ik} V_k^2}{[r_{ik}^2 + (x_{ik} + X_{TCSC})^2]^2}$$

$$- \frac{V_k V_i}{[r_{ik}^2 + (x_{ik} + X_{TCSC})^2]^2} \left\{ 2(x_{ik} + X_{TCSC}) r_{ik} \cos \theta_{ki} \right. \\ \left. + (r_{ik}^2 - (x_{ik} + X_{TCSC})^2) \sin \theta_{ki} \right\}$$

3.2.2.2 การวิเคราะห์ความไวในกรณีของการติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR

พารามิเตอร์ควบคุมของอุปกรณ์ TCPAR ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าแบบควอดเรเจอร์ที่เพิ่มเข้าไปในสายส่ง (V_q) และกระแสไฟฟ้าที่ถูกเทปไปยังหม้อแปลงกระตุ้น (I_s)

เนื่องจากการคำนวณหาค่าของดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS จะเกี่ยวข้องกับการหาเทอมของอนุพันธ์ย่อยเทอมต่างๆ หากเราเลือกค่ามุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป (δ) เป็นพารามิเตอร์ควบคุมที่ใช้เทียบแล้ว จะทำให้การหาเทอมของอนุพันธ์ย่อยง่ายขึ้นกว่าการเลือกแรงดันไฟฟ้าแบบควอดเรเจอร์ที่เพิ่มเข้าไปในสายส่ง (V_q) และกระแสไฟฟ้าที่ถูกเทปไปยังหม้อแปลงกระตุ้น (I_s) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เทียบโดยตรง หลังจากทราบค่ามุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมแล้วสามารถนำมาคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าแบบควอดเรเจอร์ที่เพิ่มเข้าไปในสายส่งและกระแสไฟฟ้าที่ถูกเทปไปยังหม้อแปลงกระตุ้นได้ในภายหลังโดยใช้สมการที่ (2.69) และ (2.70) ตามลำดับ

จากนิยามของดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งที่ได้แสดงข้างต้นในสมการที่ (3.29) และ (3.30) เราสามารถหาดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$ ใด ๆ เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ (δ) ของอุปกรณ์ TCPAR ที่ติดตั้งบนสายส่ง $i - k$ ได้ดังสมการที่ (3.33) และหาดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $i - k$ เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ (δ) ของอุปกรณ์ TCPAR ที่ติดตั้งบนสายส่ง $i - k$ ได้ดังสมการที่ (3.34) ตามลำดับ

$$S_{mn,ik}^{PS} = \frac{\Delta P_{mn}}{\Delta \delta} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial \delta} + \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial \delta} \quad (3.33)$$

$$S_{ik,ik}^{PS} = \frac{\Delta P_{ik}}{\Delta \delta} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial \delta} + \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial \delta} - \frac{\partial P_i}{\partial \delta} \quad (3.34)$$

$$\text{โดยที่ } \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_i} = \frac{1}{x_{mn}} (X_{mi} - X_{ni}) \quad , \quad \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_k} = \frac{1}{x_{mn}} (X_{mk} - X_{nk})$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial P_i} = \frac{1}{x_{ik}} (X_{ii} - X_{ki}) \quad , \quad \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_k} = \frac{1}{x_{ik}} (X_{ik} - X_{kk})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta} = \frac{\partial P_{Si}^{PS}}{\partial \delta} = -2g_{ik}V_i^2 \tan \delta \sec^2 \delta - \sec^2 \delta V_i V_k (g_{ik} \sin \theta_{ik} - b_{ik} \cos \theta_{ik})$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta} = \frac{\partial P_{Sk}^{PS}}{\partial \delta} = -\sec^2 \delta V_k V_i (g_{ik} \sin \theta_{ik} + b_{ik} \cos \theta_{ik})$$

3.2.2.3 การวิเคราะห์ความไวในกรณีของการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

พารามิเตอร์ควบคุมของอุปกรณ์ UPFC ได้แก่ V_B , δ_B , V_E และ δ_E แต่เนื่องจากองค์ประกอบหลักที่ใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงได้แก่ องค์ประกอบที่ต่อแบบอนุกรม ดังนั้นในการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งจะทำการพิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์ขององค์ประกอบที่ต่อแบบอนุกรมซึ่งได้แก่ V_B และ δ_B เป็นหลัก

จากนิยามของดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งที่ได้แสดงข้างต้นในสมการที่ (3.29) และ (3.30) เราสามารถหาดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$ ใด ๆ เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC ที่ติดตั้งบนสายส่ง $i - k$ ได้ดังสมการที่ (3.35)-(3.36) และหาดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $i - k$ เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC ที่ติดตั้งบนสายส่ง $i - k$ ได้ดังสมการที่ (3.37)-(3.38) ตามลำดับ

$$S_{mn,ik}^{U1} = \frac{\Delta P_{mn}}{\Delta V_B} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial V_B} + \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial V_B} \quad (3.35)$$

$$S_{mn,ik}^{U2} = \frac{\Delta P_{mn}}{\Delta \delta_B} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_B} + \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial \delta_B} \quad (3.36)$$

$$S_{ik,ik}^{U1} = \frac{\Delta P_{ik}}{\Delta V_B} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial V_B} + \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial V_B} - \frac{\partial P_i}{\partial V_B} \quad (3.37)$$

$$S_{ik,ik}^{U2} = \frac{\Delta P_{ik}}{\Delta \delta_B} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_B} + \frac{\partial P_{ik}}{\partial P_k} \frac{\partial P_k}{\partial \delta_B} - \frac{\partial P_i}{\partial \delta_B} \quad (3.38)$$

โดยที่ $\frac{\partial P_{mn}}{\partial P_i} = \frac{1}{x_{mn}} (X_{mi} - X_{ni})$, $\frac{\partial P_{mn}}{\partial P_k} = \frac{1}{x_{mn}} (X_{mk} - X_{nk})$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial P_i} = \frac{1}{x_{ik}} (X_{ii} - X_{ki})$$
 , $\frac{\partial P_{ik}}{\partial P_k} = \frac{1}{x_{ik}} (X_{ik} - X_{kk})$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_B} = \frac{\partial P_{Si}^U}{\partial V_B} = -V_i (g_{ik} \cos \theta_{iB} + b_{ik} \sin \theta_{iB})$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_B} = \frac{\partial P_{Sk}^U}{\partial V_B} = V_k (g_{ik} \cos \theta_{kB} + b_{ik} \sin \theta_{kB})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_B} = \frac{\partial P_{Si}^U}{\partial \delta_B} = V_i V_B (-g_{ik} \sin \theta_{iB} + b_{ik} \cos \theta_{iB})$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_B} = \frac{\partial P_{Sk}^U}{\partial \delta_B} = V_k V_B (g_{ik} \sin \theta_{kB} - b_{ik} \cos \theta_{kB})$$

3.2.3 การเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

ในหัวข้อนี้จะอธิบายขั้นตอนของการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเพื่อใช้ในแก้ไขปัญหาค่าล้นเกินในสายส่ง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการคำนวณหาดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$ เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่ติดตั้งบนสายส่ง $i - k$ ทั้งในเงื่อนไขการทำงานปกติและเงื่อนไขการเกิดเหตุขัดข้อง สำหรับเงื่อนไขการเกิดเหตุขัดข้องจะพิจารณาเหตุขัดข้องที่มีความสำคัญแบบ (N-1) เป็นหลัก

โดยที่ สายส่ง $m - n$ คือ สายส่งที่เกิดสถานะค่าล้นเกินหรือใกล้จะเกิดสถานะค่าล้นเกิน

สายส่ง $i - k$ คือ สายส่งที่ถูกนำมาพิจารณาสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

สมการของดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในสถานะเริ่มต้นนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$S_{mn,ik}^{sc} = \frac{(X_{mi} - X_{ni})}{x_{mn}(r_{ik}^2 + x_{ik}^2)^2} [2x_{ik}r_{ik}V_i^2 - V_iV_k(2x_{ik}r_{ik}\cos\theta_{ik} + (r_{ik}^2 - x_{ik}^2)\sin\theta_{ik})] \\ + \frac{(X_{mk} - X_{nk})}{x_{mn}(r_{ik}^2 + x_{ik}^2)^2} [2x_{ik}r_{ik}V_k^2 - V_kV_i(2x_{ik}r_{ik}\cos\theta_{ki} + (r_{ik}^2 - x_{ik}^2)\sin\theta_{ki})] \quad (3.39)$$

$$S_{ik,ik}^{sc} = \frac{(X_{ii} - X_{ki})}{x_{ik}(r_{ik}^2 + x_{ik}^2)^2} [2x_{ik}r_{ik}V_i^2 - V_iV_k(2x_{ik}r_{ik}\cos\theta_{ik} + (r_{ik}^2 - x_{ik}^2)\sin\theta_{ik})] \\ + \frac{(X_{ik} - X_{kk})}{x_{ik}(r_{ik}^2 + x_{ik}^2)^2} [2x_{ik}r_{ik}V_k^2 - V_kV_i(2x_{ik}r_{ik}\cos\theta_{ki} + (r_{ik}^2 - x_{ik}^2)\sin\theta_{ki})] \\ - \frac{I}{(r_{ik}^2 + x_{ik}^2)^2} [2x_{ik}r_{ik}V_i^2 - V_iV_k(2x_{ik}r_{ik}\cos\theta_{ik} + (r_{ik}^2 - x_{ik}^2)\sin\theta_{ik})] \quad (3.40)$$

$$S_{mn,ik}^{PS} = \frac{(X_{mi} - X_{ni})}{x_{mn}} [-V_iV_k(g_{ik}\sin\theta_{ik} - b_{ik}\cos\theta_{ik})] \\ + \frac{(X_{mk} - X_{nk})}{x_{mn}} [-V_iV_k(g_{ik}\sin\theta_{ik} + b_{ik}\cos\theta_{ik})] \quad (3.41)$$

$$S_{ik,ik}^{PS} = \frac{(X_{ii} - X_{ki})}{x_{ik}} [-V_iV_k(g_{ik}\sin\theta_{ik} - b_{ik}\cos\theta_{ik})] \\ + \frac{(X_{ik} - X_{kk})}{x_{ik}} [-V_iV_k(g_{ik}\sin\theta_{ik} + b_{ik}\cos\theta_{ik})] \\ + [V_iV_k(g_{ik}\sin\theta_{ik} - b_{ik}\cos\theta_{ik})] \quad (3.42)$$

$$S_{mn,ik}^{UI} = \frac{(X_{mi} - X_{ni})}{x_{mn}} [-V_i(g_{ik}\cos\theta_i + b_{ik}\sin\theta_i)] \\ + \frac{(X_{mk} - X_{nk})}{x_{mn}} [V_k(g_{ik}\cos\theta_k + b_{ik}\sin\theta_k)] \quad (3.43)$$

$$S_{ik,ik}^{U1} = \frac{(X_{ii} - X_{ki})}{x_{ik}} [-V_i (g_{ik} \cos \theta_i + b_{ik} \sin \theta_i)] \\ + \frac{(X_{ik} - X_{kk})}{x_{ik}} [V_k (g_{ik} \cos \theta_k + b_{ik} \sin \theta_k)] \quad (3.44)$$

$$S_{mn,ik}^{U2} = \frac{(X_{mi} - X_{ni})}{x_{mn}} [V_i V_B (-g_{ik} \sin \theta_i + b_{ik} \cos \theta_i)] \\ + \frac{(X_{mk} - X_{nk})}{x_{mn}} [V_k V_B (g_{ik} \sin \theta_k - b_{ik} \cos \theta_k)] \quad (3.45)$$

$$S_{ik,ik}^{U2} = \frac{(X_{ii} - X_{ki})}{x_{ik}} [V_i V_B (-g_{ik} \sin \theta_i + b_{ik} \cos \theta_i)] \\ + \frac{(X_{ik} - X_{kk})}{x_{ik}} [V_k V_B (g_{ik} \sin \theta_k - b_{ik} \cos \theta_k)] \\ - V_i V_B (-g_{ik} \sin \theta_i + b_{ik} \cos \theta_i) \quad (3.46)$$

โดยอาศัยพื้นฐานของแบบจำลองสมการเพาเวอร์โพลาร์แบบดิซี

- สมมติให้ $r_{ik} \ll x_{ik}$ หรือ $g_{ik} \ll b_{ik}$
- สมมติให้ ขนาดของแรงดันที่บัส $V \approx 1$
- สมมติให้ $\theta_i - \theta_k$ มีค่าน้อยมาก

สมการที่ (3.39)-(3.46) สามารถแทนได้ด้วยสมการที่ (3.47)-(3.54)

$$S_{mn,ik}^{sc} = \frac{(\theta_i - \theta_k)}{x_{mn} x_{ik}^2} [X_{mi} - X_{ni} - X_{mk} + X_{nk}] \quad (3.47)$$

$$S_{ik,ik}^{sc} = \frac{(\theta_i - \theta_k)}{x_{ik}^3} [X_{mi} - X_{ni} - X_{mk} + X_{nk}] - \frac{(\theta_i - \theta_k)}{x_{ik}^2} \quad (3.48)$$

$$S_{mn,ik}^{PS} = \frac{-1}{x_{mn} x_{ik}} [X_{mi} - X_{ni} - X_{mk} + X_{nk}] \quad (3.49)$$

$$S_{ik,ik}^{PS} = \frac{-1}{x_{ik}^2} [X_{ii} - X_{ki} - X_{ik} + X_{kk}] + \frac{1}{x_{ik}} \quad (3.50)$$

$$S_{mn,ik}^{U1} = -\frac{(X_{mi} - X_{ni})}{x_{mn}} (g_{ik} \cos \theta_i + b_{ik} \sin \theta_i) \\ + \frac{(X_{mk} - X_{nk})}{x_{mn}} (g_{ik} \cos \theta_k + b_{ik} \sin \theta_k) \quad (3.51)$$

$$S_{ik,ik}^{U1} = -\frac{(X_{ii} - X_{ki})}{x_{ik}} (g_{ik} \cos \theta_i + b_{ik} \sin \theta_i) \\ + \frac{(X_{ik} - X_{kk})}{x_{ik}} (g_{ik} \cos \theta_k + b_{ik} \sin \theta_k) \\ + (g_{ik} \cos \theta_i + b_{ik} \sin \theta_i) \quad (3.52)$$

$$S_{mm,ik}^{U2} = \frac{-V_B}{x_{mm}x_{ik}} [X_{mi} \cos \theta_i - X_{ni} \cos \theta_i - X_{mk} \cos \theta_k + X_{nk} \cos \theta_k] \quad (3.53)$$

$$S_{ik,ik}^{U2} = \frac{-V_B}{x_{ik}^2} [X_{ii} \cos \theta_i - X_{ki} \cos \theta_i - X_{ik} \cos \theta_k + X_{kk} \cos \theta_k] + \frac{V_B \cos \theta_i}{x_{ik}} \quad (3.54)$$

2. หลังจากทำการคำนวณหาดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งทั้งในเงื่อนไขการทำงานปกติและเงื่อนไขการเกิดเหตุขัดข้องเสร็จสิ้น ขั้นตอนต่อไปจะคำนวณหาดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งมีนิยามดังสมการที่ (3.55)

$$d_i = \sum_L \sum_l \frac{|S_{l,i}^L|}{M_l^L} \Delta X_F^{limit} \quad (3.55)$$

- เมื่อ i คือ สายส่งที่นำมาพิจารณาสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม (Candidate lines)
 l คือ สายส่งที่เกิดกำลังเกินหรือใกล้จะเกิดกำลังเกิน (Objective lines)
 L คือ เหตุการณ์หรือเงื่อนไขที่เกิดกำลังเกินในสายส่ง (Critical conditions)
 $S_{l,i}^L$ คือ ดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งที่เกิดสถานะกำลังเกินหรือใกล้จะเกิดสถานะกำลังเกิน- l เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งติดตั้งในสายส่งที่นำมาพิจารณาสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม- i สำหรับเหตุการณ์หรือเงื่อนไขที่เกิดกำลังเกินในสายส่ง- L
 M_l^L คือ $MAX \{ |S_{l,i}^L| \}$
 ΔX_F^{limit} คือ ขอบเขตจำกัดของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุม

ดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมที่ได้แสดงในสมการที่ (3.55) เป็นดัชนีที่แสดงผลรวมของปริมาณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งที่เกิดกำลังเกินและสายส่งที่ใกล้จะเกิดกำลังเกินเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในเหตุการณ์ที่ทำให้เกิดปัญหากำลังเกินในสายส่งทั้งหมด

3. ทำการเปรียบเทียบและเรียงลำดับดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมจะถูกกำหนดโดยดัชนีของตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดและจะใช้ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตัวเลือกลำดับแรกสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเพื่อแก้ไขปัญหา กำลังเกินในสายส่ง

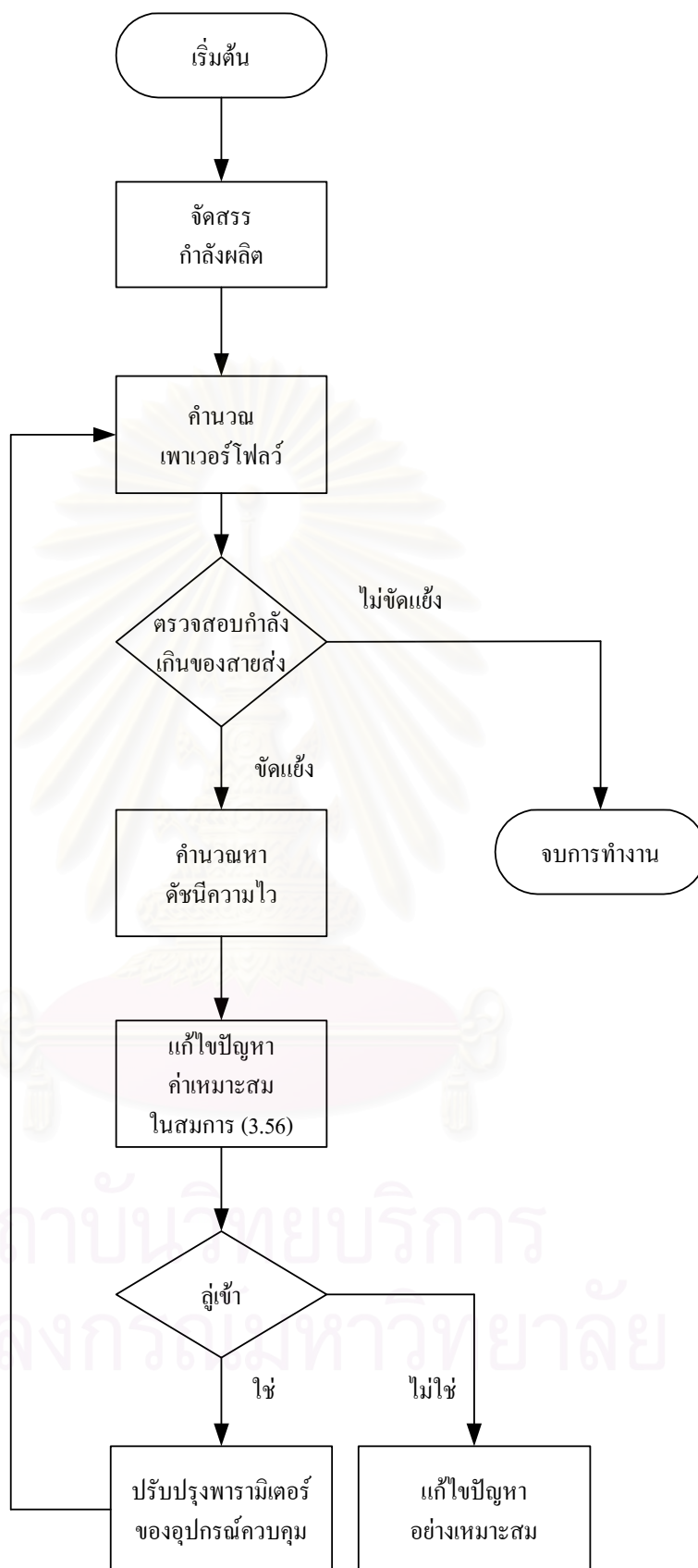
3.2.4 อัลกอริทึมสำหรับการคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุม

การคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยพื้นฐานของดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมและวิธีการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสม การคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแสดงได้ดังสมการที่ (3.56)

$$\begin{aligned} \text{Min} : & \sum_i \Delta X_i^2 \\ \text{s.t.} : & P_l^L + \sum_i S_{l,i}^L \Delta X_i \leq \mu P_l^{\text{limit}} \end{aligned} \quad (3.56)$$

- เมื่อ i คือ สายส่งที่นำมาพิจารณาสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม (Candidate lines)
 l คือ สายส่งที่เกิดกำลังเกินหรือใกล้จะเกิดกำลังเกิน (Objective lines)
 L คือ เหตุการณ์หรือเงื่อนไขที่เกิดกำลังเกินในสายส่ง (Critical conditions)
 $S_{l,i}^L$ คือ ดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งที่เกิดสถานะกำลังเกินหรือใกล้จะเกิดสถานะกำลังเกิน- l เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งติดตั้งในสายส่งที่นำมาพิจารณาสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม- i สำหรับเหตุการณ์หรือเงื่อนไขที่เกิดกำลังเกินในสายส่ง- L
 P_l^L คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง l
 P_l^{limit} คือ ขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง l
 μ คือ ส่วนเผื่อความปลอดภัย (Safety factor margin)
 ΔX_i คือ พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมตัวที่ i

โดยอาศัยสมการที่ (3.56) จะสามารถคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สามารถแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งเส้นที่เกิดกำลังเกินและยังป้องกันไม่ให้เกิดกำลังเกินเพิ่มขึ้นในสายส่งเส้นอื่นๆ อีกด้วย เนื่องจากการคำนวณหาดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมอาศัยหลักการของการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลว์ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของการประมาณเชิงเส้น (Linearization) ของอนุกรมเทเลอร์โดยการกำจัดเทอมที่มีอนุพันธ์มากกว่าหรือเท่ากับสองทิ้งไป ทำให้คำตอบหรือผลลัพธ์ของค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ที่ได้จากสมการที่ (3.56) ในการคำนวณครั้งแรกอาจมีค่าแตกต่างจากผลลัพธ์ที่ถูกต้องเนื่องจากความผิดพลาดจากการประมาณเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มกระบวนการหาคำตอบที่ถูกต้อง (Correction process) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยเทคนิคของการทำซ้ำมาใช้ในการปรับค่าของพารามิเตอร์เพื่อทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น อัลกอริทึมสำหรับการคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ (3.8) การแก้ไขปัญหาอย่างเหมาะสมได้แก่ การเพิ่มอุปกรณ์ควบคุม การจัดสรรกำลังผลิตใหม่ การตัดโหลด เป็นต้น



รูปที่ 3.8 อัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์

3.3 การเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Total Transfer Capability: TTC) หมายถึงความสามารถของระบบที่จะสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากจุดหนึ่ง(บริเวณหนึ่ง)ไปยังอีกจุดหนึ่ง(อีกบริเวณหนึ่ง)ได้สูงสุดภายใต้สภาวะการทำงานที่เชื่อถือได้[26,27] ความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขบังคับทางกายภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังต่อไปนี้

1) เงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อน (Thermal limit)

กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องมีค่าไม่เกินขีดจำกัดการทนต่อความร้อนสูงสุดของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า

2) เงื่อนไขบังคับของระดับแรงดัน (Voltage limit)

ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะต้องมีค่าอยู่ในระดับแรงดันที่ยอมรับได้

3) เงื่อนไขบังคับทางด้านเสถียรภาพ (Stability limit)

ระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องมีความสามารถในการทนต่อสิ่งรบกวนภายในช่วงชั่วคราว (Transient) และช่วงพลวัต (Dynamic) ได้

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้าในสภาวะการทำงานอยู่ตัว ดังนั้นในการวิเคราะห์จะละเลยการพิจารณาเงื่อนไขบังคับทางด้านเสถียรภาพ และเนื่องจากการชำรุดขององค์ประกอบต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาโดยไม่คาดคิด ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาเหตุขัดข้องที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการพิจารณาเหตุขัดข้องแบบ N-1 ขึ้นตอนการคำนวณหาความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยอาศัยพื้นฐานของการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวแสดงได้ดังนี้

- 1) รับข้อมูลโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง และข้อมูลการจัดสรรกำลังผลิต
- 2) กำหนดบัสผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า (Source bus) และบัสผู้ใช้กำลังไฟฟ้า (Sink bus)
- 3) คำนวณเพาเวอร์ฟลิวของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 4) ตรวจสอบเงื่อนไขบังคับ

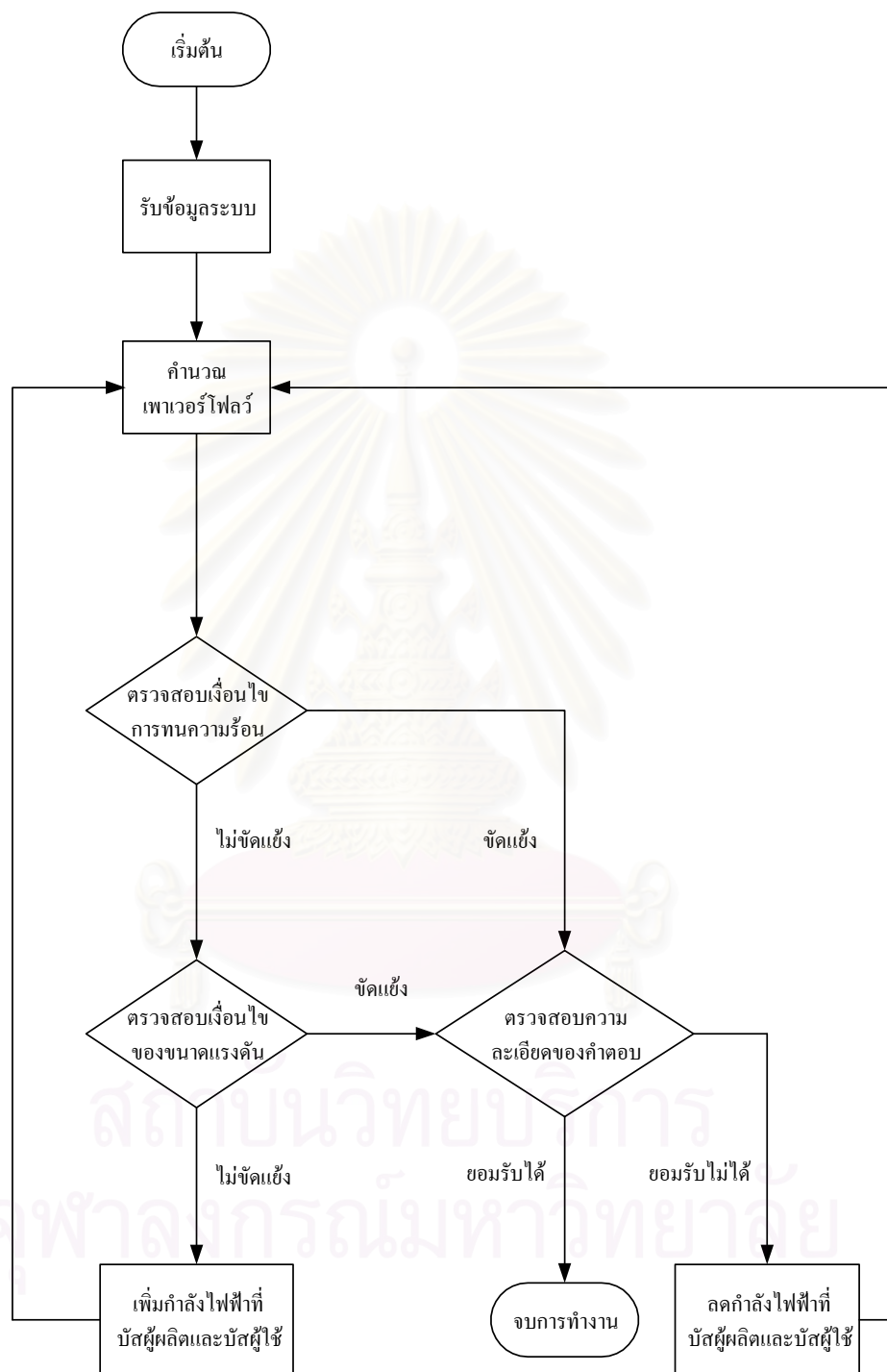
4.1 เงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อน

4.2 เงื่อนไขบังคับของระดับแรงดัน

- หากขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับ จะทำการลดกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านระหว่างบัสผู้ผลิตและบัสผู้ใช้ โดยการลดกำลังไฟฟ้าของบัสผู้ผลิตและบัสผู้ใช้ในลักษณะตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคงที่
- หากไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับ จะทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านระหว่างบัสผู้ผลิตและบัสผู้ใช้ โดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของบัสผู้ผลิตและบัสผู้ใช้ในลักษณะตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคงที่ แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 3

- 5) ตรวจสอบความละเอียดของคำตอบ

หากยอมรับได้จะสิ้นสุดการคำนวณ หากยอมรับไม่ได้ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3 จากขั้นตอนที่ได้นำเสนอข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพแสดงดังรูปที่ (3.9)

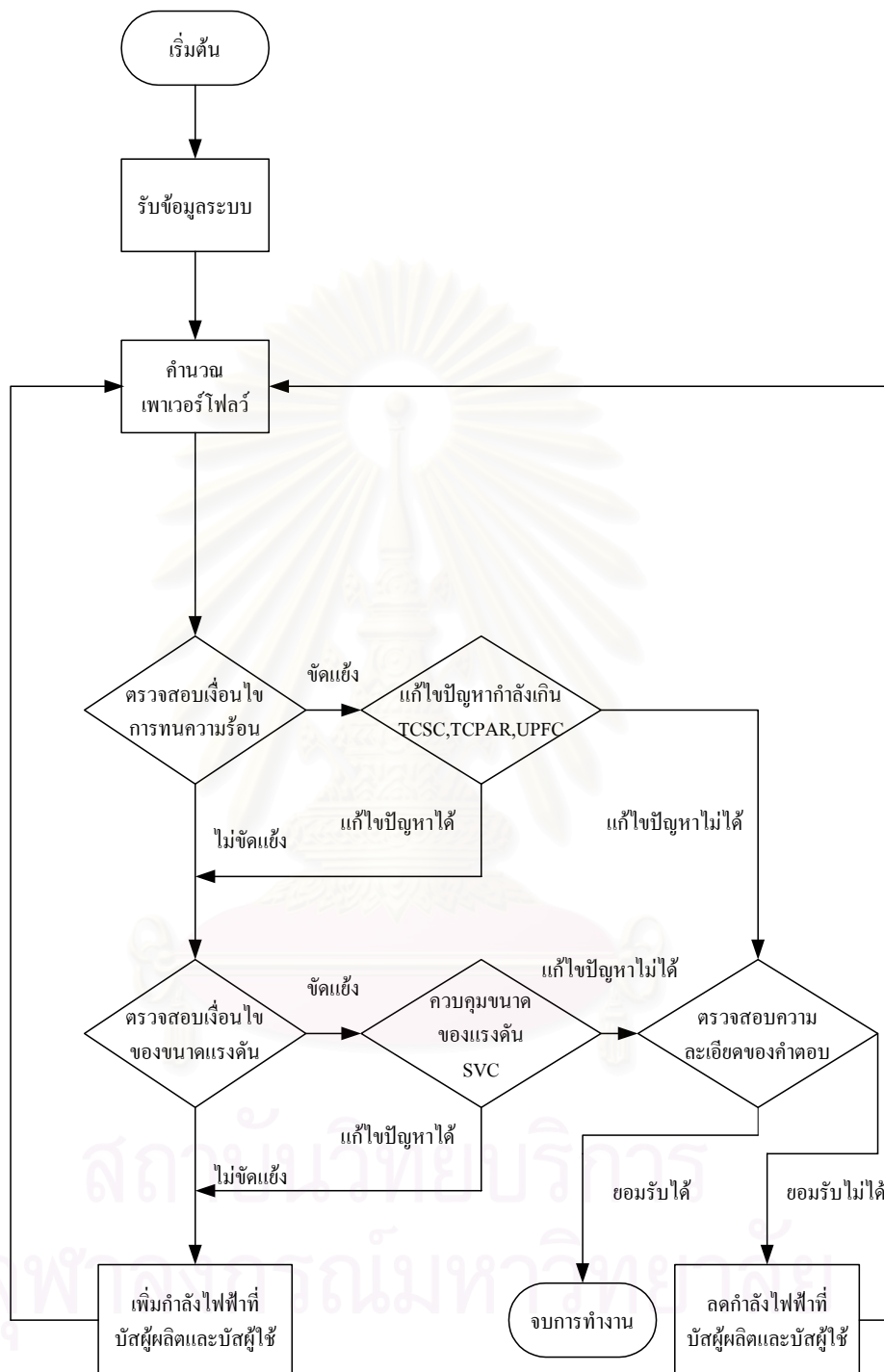


รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังโดยการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ SVC อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้น สามารถทำได้โดยการแก้ไขปัญหากล้าเกินในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีที่เงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อนเป็นตัวกำหนดความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด และทำการควบคุมขนาดแรงดันให้อยู่ในระดับแรงดันที่ยอมรับได้ในกรณีที่เงื่อนไขบังคับของระดับแรงดันเป็นตัวกำหนดความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด เราจะใช้อุปกรณ์ FACTS ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC สำหรับแก้ไขกำลังเกินในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้าโดยดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.2 และจะใช้อุปกรณ์ SVC ในการควบคุมขนาดแรงดันที่บัสโดยดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.10.3.1 ขั้นตอนในการคำนวณหาความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดในกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS สามารถแสดงได้ดังนี้

- 1) รับข้อมูลโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง และข้อมูลการจัดสรรกำลังผลิต
- 2) กำหนดบัสผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า (Source bus) และบัสผู้ใช้กำลังไฟฟ้า (Sink bus)
- 3) กำหนดเพาเวอร์ฟลักซ์ของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 4) ตรวจสอบเงื่อนไขบังคับ
 - 4.1 เงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อน
 - 4.2 เงื่อนไขบังคับของระดับแรงดัน
 - หากขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อน จะทำการแก้ไขปัญหากล้าเกินของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ FACTS ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC เพื่อแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นตามวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.2
 - หากขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของระดับแรงดัน จะทำการควบคุมขนาดของแรงดันที่บัสที่เกิดปัญหาโดยการติดตั้งอุปกรณ์ SVC แล้วทำการควบคุมขนาดแรงดันให้อยู่ในระดับแรงดันที่ยอมรับได้ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.10.3.1
 - หากขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับและไม่สามารถแก้ไขปัญหาก็ จะทำการลดกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านระหว่างบัสผู้ผลิตและบัสผู้ใช้ โดยการลดกำลังไฟฟ้าของบัสผู้ผลิตและบัสผู้ใช้ในลักษณะตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคงที่
 - หากไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับ จะทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านระหว่างบัสผู้ผลิตและบัสผู้ใช้ โดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของบัสผู้ผลิตและบัสผู้ใช้ในลักษณะตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคงที่แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 3
- 5) ตรวจสอบความละเอียดของคำตอบ
 - หากยอมรับได้จะสิ้นสุดการคำนวณ หากยอมรับไม่ได้ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3

จากขั้นตอนที่ได้นำเสนอข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพแสดงดังรูปที่ (3.10)



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบ

3.4 การลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า

3.4.1 การจัดสรรกำลังการผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ (Economic dispatch)

การจัดสรรกำลังการผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์เป็นการจัดสรรกำลังผลิตให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตมีค่าต่ำสุด ปัญหาของการจัดสรรกำลังการผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์สามารถเขียนแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (3.57)

$$\begin{aligned} \text{Min} : F_T &= \sum_i F_i(P_{Gi}) \\ \text{s.t.} : \sum_i P_{Gi} &= P_L + P_D \end{aligned} \quad (3.57)$$

โดยที่	F_i	คือ	ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ i
	P_{Gi}	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ i
	P_L	คือ	กำลังสูญเสียของระบบ
	P_D	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด

จากสมการที่ (3.57) เราสามารถสร้างฟังก์ชันลากรองจ์ (Lagrange function) ได้ดังสมการ

$$L = F_T + \lambda (P_L + P_D - \sum_i P_{Gi}) \quad (3.58)$$

ณ จุดที่มีราคาต่ำสุด อนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันลากรองจ์เทียบกับตัวแปรจะมีค่าเป็นศูนย์

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial F_T}{\partial P_{Gi}} + \lambda \left(\frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}} - 1 \right) = 0 \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = P_L + P_D - \sum_i P_{Gi} = 0 \quad (3.60)$$

เราสามารถหาผลเฉลยของชุดสมการที่ (3.59) และ (3.60) ด้วยวิธีการเชิงเลข (Numerical method) ก็จะได้คำตอบของกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยที่ทำให้ราคาการผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด ในกรณีที่กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเกินขอบเขตของกำลังผลิตต่ำสุดหรือสูงสุด จะกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยนั้นมีกำลังผลิตเท่ากับค่าขอบเขตดังกล่าว

3.4.2 การหาสมการกำลังสูญเสียในระบบ

ในการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์จะต้องกำหนดหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังสูญเสียในระบบเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งในการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ก็คือการหาสมการกำลังสูญเสียในระบบให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการหาเมตริกซ์สัมประสิทธิ์-B (B-coefficients matrix) เพื่อแทนกำลังสูญเสียในระบบให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดังแสดงในสมการที่ (3.61)

$$P_L = \mathbf{P}^T [\mathbf{B}] \mathbf{P} + B_0^T \mathbf{P} + B_{00} \quad (3.61)$$

สมการที่ (3.61) สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งดังสมการที่ (3.62)

$$P_L = \sum_{i=1}^{Ng} \sum_{j=1}^{Ng} P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^{Ng} B_{0i} P_{Gi} + B_{00} \quad (3.62)$$

สำหรับที่มาของสมการกำลังสูญเสียในระบบสามารถแสดงได้ดังนี้

กำลังสูญเสียเชิงซ้อนในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลเข้าสู่ทุกบัสในระบบไฟฟ้ากำลังดังสมการที่ (3.63)

$$P_L + jQ_L = \sum_{i=1}^n \mathbf{V}_i \mathbf{I}_i^* = \mathbf{V}_{BUS}^T \mathbf{I}_{BUS}^* \quad (3.63)$$

สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังแสดงดังสมการที่ (3.64)

$$\mathbf{V}_{BUS} = \mathbf{Z}_{BUS} \mathbf{I}_{BUS} \quad (3.64)$$

แทนสมการที่ (3.64) ลงในสมการที่ (3.63) จะได้

$$P_L + jQ_L = \mathbf{I}_{BUS}^T \mathbf{Z}_{BUS} \mathbf{I}_{BUS}^* \quad (3.65)$$

$$P_L + jQ_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{I}_i \mathbf{Z}_{ij} \mathbf{I}_j^* \quad (3.66)$$

เนื่องจากบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์มีลักษณะสมมาตร $Z_{ij} = Z_{ji}$ สมการที่ (3.67) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$P_L + jQ_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Z_{ij} (\mathbf{I}_i \mathbf{I}_j^* + \mathbf{I}_j \mathbf{I}_i^*) \quad (3.68)$$

แยกพิจารณาส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการที่ (3.68) จะได้

$$P_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} (\mathbf{I}_i \mathbf{I}_j^* + \mathbf{I}_j \mathbf{I}_i^*) \quad (3.69)$$

$$Q_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij} (\mathbf{I}_i \mathbf{I}_j^* + \mathbf{I}_j \mathbf{I}_i^*) \quad (3.70)$$

เนื่องจาก $R_{ij} = R_{ji}$ ดังนั้นกำลังสูญเสียในระบบสามารถแสดงดังสมการที่ (3.71)

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{I}_i R_{ij} \mathbf{I}_j^* \quad (3.71)$$

$$P_L = \mathbf{I}_{BUS}^T \mathbf{R}_{BUS} \mathbf{I}_{BUS} \quad (3.72)$$

โดยที่ \mathbf{I}_{BUS} คือ เวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส
 \mathbf{R}_{BUS} คือ ส่วนจริงของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

ขั้นตอนในการพิสูจน์ที่มาของสมการกำลังสูญเสียในระบบที่อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. ทำการแปลงเวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส (\mathbf{I}_{BUS}) ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์บัส (\mathbf{I}_{GEN}) เท่านั้น
2. ทำการแปลงเวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์บัส (\mathbf{I}_{GEN}) ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ของกลุ่มกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (\mathbf{P}_G)

แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

กำหนดให้

กระแสไหลรวมมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสจากไหลดบั๊ตทั้งหมดดังสมการ

$$\sum_{i=1}^{n_d} \mathbf{I}_{Lk} = \mathbf{I}_D \quad (3.73)$$

โดยที่	n_d	คือ	จำนวนของไหลดบั๊ต
	\mathbf{I}_D	คือ	กระแสไหลรวม
	\mathbf{I}_{Lk}	คือ	กระแสจากไหลดบั๊ต

กำหนดให้

กระแสจากไหลดบั๊ตเป็นสัดส่วนเชิงซ้อนคงที่กับกระแสไหลรวมดังสมการ

$$\mathbf{I}_{Lk} = l_k \mathbf{I}_D \quad (3.74)$$

เมื่อบั๊ตที่ 1 เป็นบั๊ตอ้างอิง แลวที่ 1 ของสมการสมรรถนะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.75)

$$\mathbf{V}_1 = \sum_{i=1}^{n_g} \mathbf{Z}_{1i} \mathbf{I}_{gi} + \sum_{k=1}^{n_d} \mathbf{Z}_{1k} \mathbf{I}_{Lk} \quad (3.75)$$

โดยที่	n_g	คือ	จำนวนของเงินเนอเรเตอร์บั๊ต
	n_d	คือ	จำนวนของไหลดบั๊ต
	\mathbf{I}_{gi}	คือ	กระแสจากเงินเนอเรเตอร์บั๊ต i
	\mathbf{I}_{Lk}	คือ	กระแสจากไหลดบั๊ต k

แทนค่า \mathbf{I}_{Lk} ในสมการที่ (3.74) ลงในสมการที่ (3.75)

$$\mathbf{V}_1 = \sum_{i=1}^{n_g} \mathbf{Z}_{1i} \mathbf{I}_{gi} + \mathbf{I}_D \sum_{k=1}^{n_d} l_k \mathbf{Z}_{1k} \quad (3.76)$$

กำหนดให้

$$\mathbf{T} = \sum_{k=1}^{n_d} l_k \mathbf{Z}_{1k} \quad (3.77)$$

แทนสมการที่ (3.77) ลงในสมการที่ (3.76) จะได้

$$\mathbf{V}_I = \sum_{i=1}^{n_g} \mathbf{Z}_{Ii} \mathbf{I}_{gi} + \mathbf{I}_D \mathbf{T} \quad (3.78)$$

กำหนดให้ \mathbf{I}_0 เป็นกระแสที่ไหลออกจากบัสที่ 1 เมื่อกระแสจากโหนดบัสอื่นๆ ทุกตัวมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$\mathbf{V}_I = -\mathbf{Z}_{I1} \mathbf{I}_0 \quad (3.79)$$

แทนค่า \mathbf{V}_I ในสมการที่ (3.76) ลงในสมการที่ (3.79) จะได้

$$\mathbf{I}_D = -\frac{1}{\mathbf{T}} \sum_{i=1}^{n_g} \mathbf{Z}_{Ii} \mathbf{I}_{gi} - \frac{1}{\mathbf{T}} \mathbf{Z}_{I1} \mathbf{I}_0 \quad (3.80)$$

แทนค่า \mathbf{I}_D ในสมการที่ (3.80) ลงในสมการที่ (3.74)

$$\mathbf{I}_{Lk} = -\frac{l_k}{\mathbf{T}} \sum_{i=1}^{n_g} \mathbf{Z}_{Ii} \mathbf{I}_{gi} - \frac{l_k}{\mathbf{T}} \mathbf{Z}_{I1} \mathbf{I}_0 \quad (3.81)$$

กำหนดให้

$$\rho_k = -\frac{l_k}{\mathbf{T}} \quad (3.82)$$

สามารถเขียนสมการที่ (3.81) ใหม่ได้ดังสมการที่ (3.83)

$$\mathbf{I}_{Lk} = \rho_k \sum_{i=1}^{n_g} \mathbf{Z}_{Ii} \mathbf{I}_{gi} + \rho_k \mathbf{Z}_{I1} \mathbf{I}_0 \quad (3.83)$$

เมื่อเพิ่มกระแสจากเจนเนอเรเตอร์บัสเข้าไปในสมการที่ (3.83) และจัดรูปแบบสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.84)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{g1} \\ \mathbf{I}_{g2} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{gn_g} \\ \mathbf{I}_{L1} \\ \mathbf{I}_{L2} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{Lnd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \rho_1 \mathbf{Z}_{11} & \rho_1 \mathbf{Z}_{12} & \cdots & \rho_1 \mathbf{Z}_{1ng} & \rho_1 \mathbf{Z}_{11} \\ \rho_2 \mathbf{Z}_{11} & \rho_2 \mathbf{Z}_{12} & \cdots & \rho_2 \mathbf{Z}_{1ng} & \rho_2 \mathbf{Z}_{11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho_k \mathbf{Z}_{11} & \rho_k \mathbf{Z}_{12} & \cdots & \rho_k \mathbf{Z}_{1ng} & \rho_k \mathbf{Z}_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{g1} \\ \mathbf{I}_{g2} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{gn_g} \\ \mathbf{I}_o \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

$$\mathbf{I}_{BUS} = \mathbf{C} \mathbf{I}_{GEN} \quad (3.85)$$

สมการที่ (3.85) เป็นการแปลงเวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส (\mathbf{I}_{BUS}) ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์บัส (\mathbf{I}_{GEN}) โดยเมทริกซ์ \mathbf{C} เป็นเมทริกซ์การแปลง

แทนสมการที่ (3.85) ลงในสมการที่ (3.72) จะได้

$$P_L = \mathbf{I}_{GEN}^T \mathbf{C}^T \mathbf{R}_{BUS} \mathbf{C} \mathbf{I}_{GEN}^* \quad (3.86)$$

สามารถเขียนกระแสจากเจนเนอเรเตอร์บัสให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$\mathbf{I}_{gi} = \frac{\mathbf{S}_{gi}^*}{\mathbf{V}_i^*} = \frac{P_{gi} - jQ_{gi}}{\mathbf{V}_i^*} = \frac{1 - j \frac{Q_{gi}}{P_{gi}}}{\mathbf{V}_i^*} P_{gi} \quad (3.87)$$

กำหนดให้

$$\boldsymbol{\Psi}_i = \frac{1 - j \frac{Q_{gi}}{P_{gi}}}{\mathbf{V}_i^*} \quad (3.88)$$

สามารถเขียนสมการที่ (3.87) ได้ใหม่ดังสมการที่ (3.89)

$$\mathbf{I}_{gi} = \boldsymbol{\Psi}_i P_{gi} \quad (3.89)$$

เมื่อเพิ่มกระแส \mathbf{I}_o เข้าไปในสมการที่ (3.89) และจัดรูปแบบสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.90)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{g1} \\ \mathbf{I}_{g2} \\ \vdots \\ \mathbf{I}^{gn_g} \\ \mathbf{I}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\Psi}_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & & \boldsymbol{\Psi}_{ng} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \mathbf{I}_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P^{gn_g} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

$$\mathbf{I}_{GEN} = \boldsymbol{\Psi} \mathbf{P}_G \quad (3.91)$$

สมการที่ (3.91) เป็นการแปลงเวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์บัส (\mathbf{I}_{GEN}) ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ของกลุ่มกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (\mathbf{P}_G) โดยเมตริกซ์ $\boldsymbol{\Psi}$ เป็นเมตริกซ์การแปลง

แทนสมการที่ (3.91) ลงในสมการที่ (3.86) จะได้

$$P_L = \mathbf{P}_G^T \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{C}^T \mathbf{R}_{BUS} \mathbf{C}^* \boldsymbol{\Psi}^* \mathbf{P}_G^* \quad (3.92)$$

$$\text{กำหนดให้} \quad \mathbf{H} = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{C}^T \mathbf{R}_{BUS} \mathbf{C}^* \boldsymbol{\Psi}^* \quad (3.93)$$

เนื่องจากกำลังสูญเสียในระบบเป็นฟังก์ชันกำลังจริง ดังนั้นส่วนจริงของสมการที่ (3.92) แสดงได้ดังสมการที่ (3.94)

$$P_L = \mathbf{P}_G^T \Re[\mathbf{H}] \mathbf{P}_G^* \quad (3.94)$$

เมตริกซ์ \mathbf{H} เป็นเมตริกซ์เฮอร์มิเทียน (Hermitian) ซึ่งมีคุณสมบัติของการสมมาตรและ $\mathbf{H} = \mathbf{H}^*$ ดังนั้นส่วนจริงของเมตริกซ์ \mathbf{H} มีค่าเท่ากับ

$$\Re[\mathbf{H}] = \frac{\mathbf{H} + \mathbf{H}^*}{2} \quad (3.95)$$

กำหนดให้

$$\Re[\mathbf{H}] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n_g} & B_{01}/2 \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n_g} & B_{02}/2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_{n_g 1} & B_{n_g 2} & \cdots & B_{n_g n_g} & B_{0n_g}/2 \\ B_{01}/2 & B_{02}/2 & \cdots & B_{0n_g}/2 & B_{00} \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

เป็นเมตริกซ์สัมประสิทธิ์-B

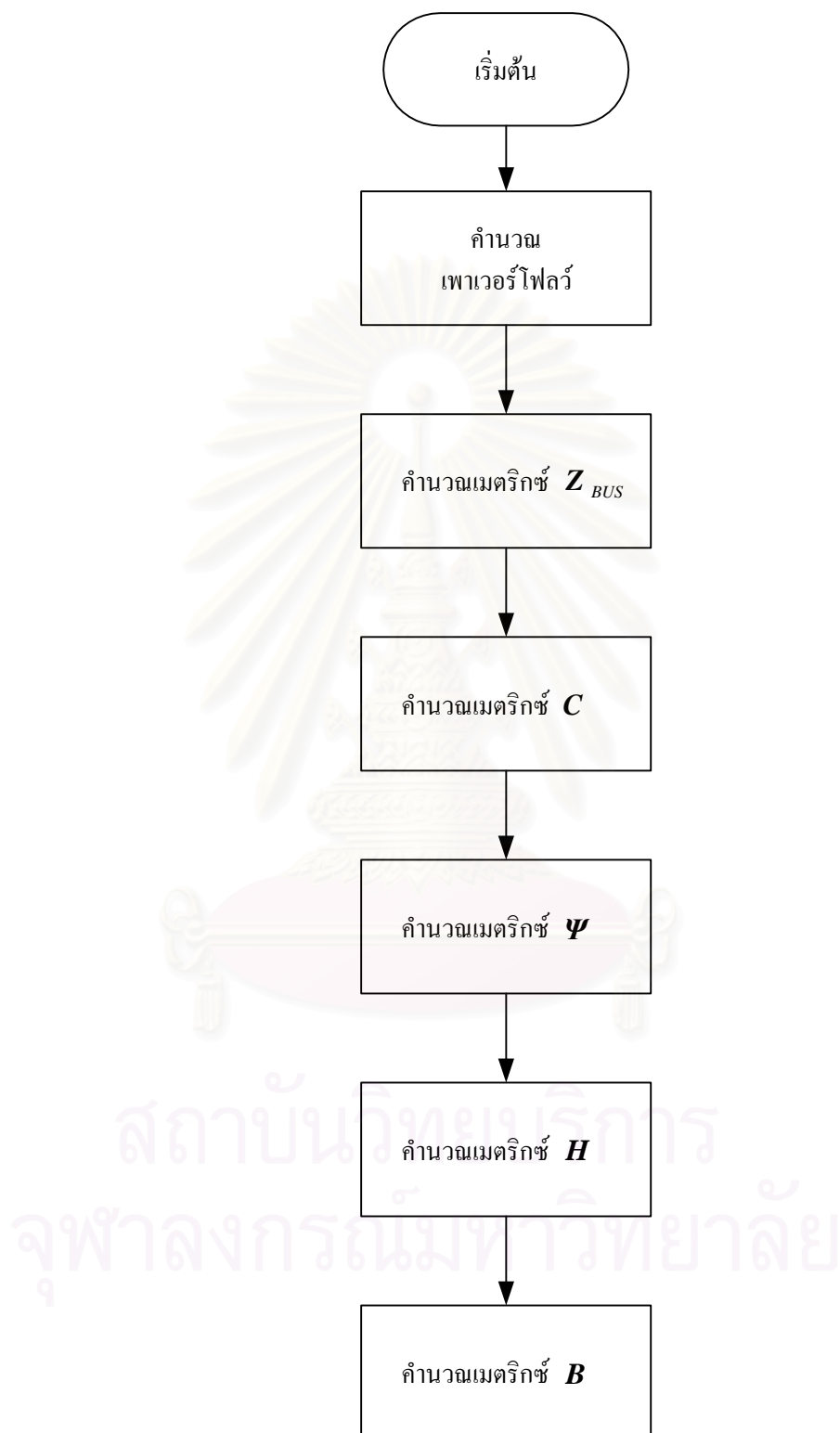
ดังนั้นสมการกำลังสูญเสียในระบบในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแสดงดังสมการที่ (3.97)

$$P_L = \begin{bmatrix} P_{g1} & P_{g2} & \cdots & P_{gn_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n_g} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n_g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n_g 1} & B_{n_g 2} & \cdots & B_{n_g n_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gn_g} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{g1} & P_{g2} & \cdots & P_{gn_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{01}/2 \\ B_{02}/2 \\ \vdots \\ B_{0n_g}/2 \end{bmatrix} + B_{00} \quad (3.97)$$

ขั้นตอนในการคำนวณหาสมาชิกของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์-B แสดงดังนี้

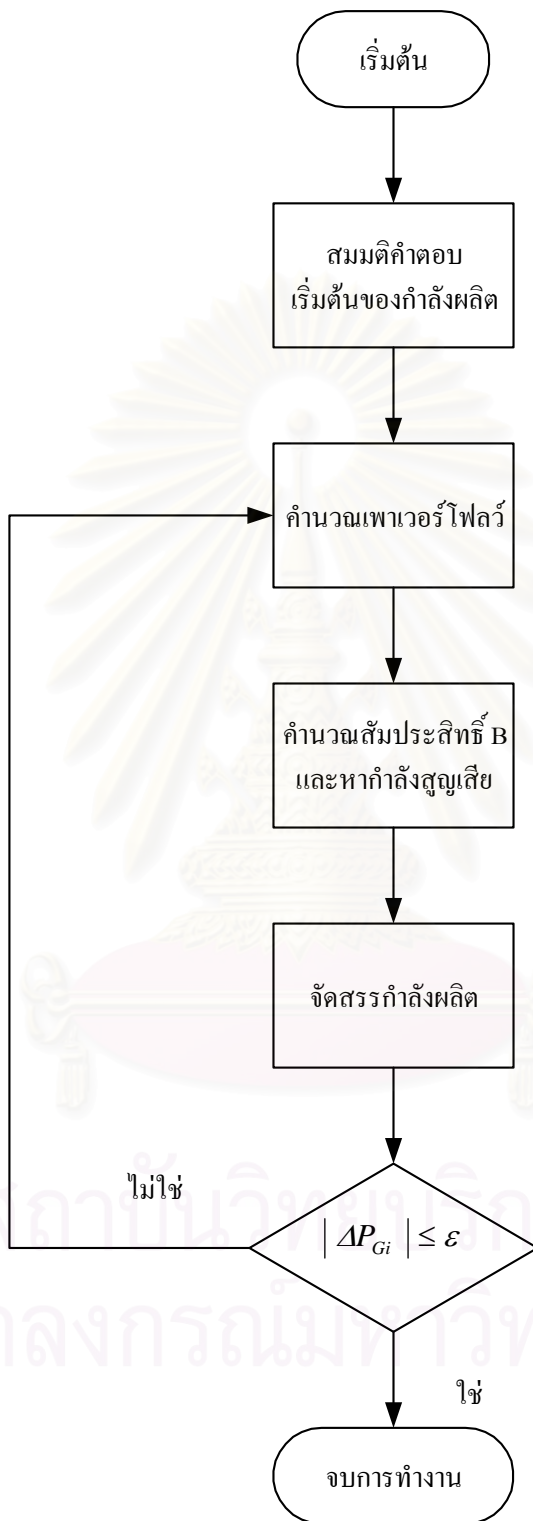
1. คำนวณเพาเวอร์โพล์ของระบบไฟฟ้ากำลัง
2. คำนวณหากระแสจากโหลด (\mathbf{I}_{Lk}) กระแสโหลดรวม (\mathbf{I}_D) และสัดส่วนเชิงซ้อนของกระแส (\mathbf{I}_k) จากผลของการคำนวณเพาเวอร์โพล์
3. คำนวณหาบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (\mathbf{Z}_{BUS})
4. คำนวณหาเมตริกซ์การแปลง \mathbf{C} โดยใช้สมการที่ (3.77) , (3.82) และ (3.84)
5. คำนวณหาเมตริกซ์การแปลง $\mathbf{\Psi}$ โดยใช้สมการที่ (3.88) และ (3.90)
6. คำนวณหาเมตริกซ์เฮอริมีเทียน \mathbf{H} โดยใช้สมการที่ (3.93)
7. คำนวณหาเมตริกซ์สัมประสิทธิ์-B โดยใช้สมการที่ (3.96)

ขั้นตอนในการคำนวณหาสมาชิกของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์-B แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนในการคำนวณหาสมาชิกของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์-B

ขั้นตอนในการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์สามารถแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนในการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์

3.4.3 การแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้อง

เนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังต่างมีข้อจำกัดในการทำงาน เช่น สายส่งสามารถรับกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกินค่าที่กำหนด หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดใน การจ่ายกำลังไฟฟ้า ค่ากำหนดต่าง ๆ เหล่านี้ถือเป็นเงื่อนไขบังคับของระบบ ดังนั้น หลังจากทำการ จัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์เสร็จสิ้นจะต้องทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์เพื่อ ตรวจสอบสมรรถนะของระบบว่ามีความสามารถเพียงพอในการผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยัง ผู้บริโภคได้อย่างปลอดภัยและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับหรือไม่ หากสถานะของระบบไม่ สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับแล้วจะต้องมีการแก้ไขปัญหาอย่างเหมาะสม ซึ่งได้แก่ การจัดสรรกำลัง ผลิตใหม่ และ/หรือ การตัดโหลด และ/หรือ การใช้อุปกรณ์ FACTS ในการแก้ไขปัญหากำลังเกิน เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการเปรียบเทียบผลของการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องซึ่ง ได้แก่ ปัญหากำลังเกินในสายส่ง ระหว่างการจัดสรรกำลังผลิตใหม่กับการแก้ไขปัญหากำลังเกินใน สายส่งโดยใช้อุปกรณ์ FACTS รายละเอียดต่าง ๆ แสดงได้ดังนี้

3.4.3.1 การจัดสรรกำลังผลิตใหม่

การจัดสรรกำลังผลิตใหม่ที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้หลักการที่จะทำการลด กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลุ่มหนึ่ง และเพิ่มกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกกลุ่มหนึ่ง เพื่อให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่เกิดปัญหามีค่าลดลง สำหรับวิธีการจัดสรรกำลังผลิต ใหม่นี้จะอาศัยพื้นฐานของวิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะสม (Optimization method) ซึ่งสามารถ แสดงดังสมการที่ (3.98)

$$\begin{aligned}
 \text{Min} & : \sum_i \Delta P_{Gi}^2 \\
 \text{s.t.} & : \sum \Delta P_{Gi} = 0 \\
 P_l + \sum_i S_{l,i}^G \Delta P_{Gi} & \leq \mu P_l^{\text{limit}}
 \end{aligned}
 \tag{3.98}$$

โดยที่

ΔP_{Gi}	คือ	การเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตที่ i
$S_{l,i}^G$	คือ	ดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งที่เกิดกำลังเกิน l เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัส i
P_l	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง l
P_l^{limit}	คือ	ขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง l
μ	คือ	ส่วนเพื่อความปลอดภัย (Safety factor margin)

ดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัสสามารถคำนวณได้โดยอาศัยพื้นฐานของการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์ โดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าจริงเข้าไปที่บัสจำนวนหนึ่งหน่วยแล้วคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ในกรณีที่ต้องการความรวดเร็วในการคำนวณจะอาศัยแบบจำลองของการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลว์เป็นแบบดิซิจซึ่งจะสามารถหาดัชนีความไวได้ดังนี้

สมการกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$ สามารถแสดงดังสมการที่ (3.99)

$$P_{mn} = \frac{I}{x_{mn}} \sum_{k=1}^n (X_{mk} - X_{nk}) P_k \quad (3.99)$$

ดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง $m - n$ เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัส i สามารถนิยามดังสมการที่ (3.100)

$$S_{mn,i}^G = \frac{\Delta P_{mn}}{\Delta P_i} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial P_i} = \frac{I}{x_{mn}} (X_{mi} - X_{ni}) \quad (3.100)$$

การจัดสรรกำลังผลิตใหม่มีขั้นตอนดังนี้

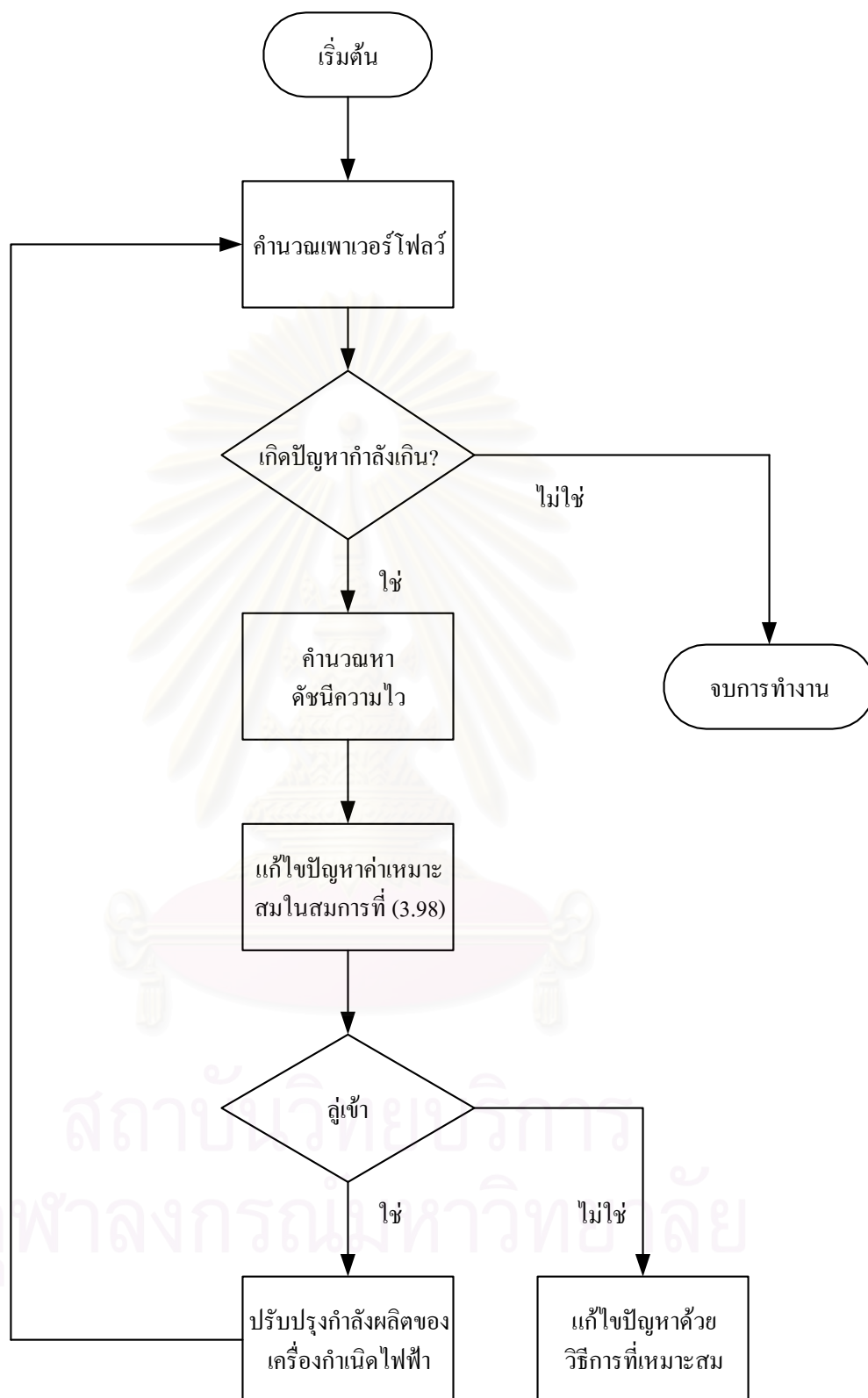
1. คำนวณเพาเวอร์โพลว์ของระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ตรวจสอบผลการคำนวณเพาเวอร์โพลว์แล้วพิจารณาว่าเกิดปัญหากำลังเกินในสายส่งหรือไม่
3. หากเกิดปัญหากำลังเกินในสายส่ง ให้ทำการแก้ไขปัญหากำลังเกินโดยใช้สมการที่ (3.98) คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละยูนิตออกมา
4. ทำการปรับปรุงกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละยูนิต
5. ตรวจสอบผลการจัดสรรกำลังผลิตใหม่โดยการคำนวณเพาเวอร์โพลว์

-หากผลการคำนวณเพาเวอร์โพลว์พบว่าไม่เกิดปัญหากำลังเกินอีกจะจบการทำงาน

-หากพบว่ายังเกิดปัญหากำลังเกินอยู่ให้ทำการจัดสรรกำลังผลิตใหม่จนกว่าจะครบกำหนดจำนวนรอบมากที่สุดที่ตั้งไว้ เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากคำตอบที่ได้ในครั้งแรกอาจจะมีค่าแตกต่างจากผลลัพธ์ที่ถูกต้องเนื่องจากความผิดพลาดจากการประมาณเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยวิธีการทำซ้ำเพื่อปรับปรุงค่ากำลังผลิตไฟฟ้าและดัชนีความไวให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

-หากพบว่ายังเกิดปัญหากำลังเกินอยู่และได้ทำการจัดสรรกำลังผลิตใหม่จนครบตามจำนวนรอบมากที่สุดที่ตั้งไว้แล้ว อาจต้องหาวิธีการอื่นเช่น การตัดโหลด เพื่อแก้ปัญหาต่อไป

ขั้นตอนของการจัดสรรกำลังผลิตใหม่เมื่อเกิดปัญหากำลังเกินสามารถแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนในการจัดสรรกำลังผลิตใหม่

3.4.3.2 การแก้ไขปัญหาคำลึงเกินโดยใช้อุปกรณ์ FACTS

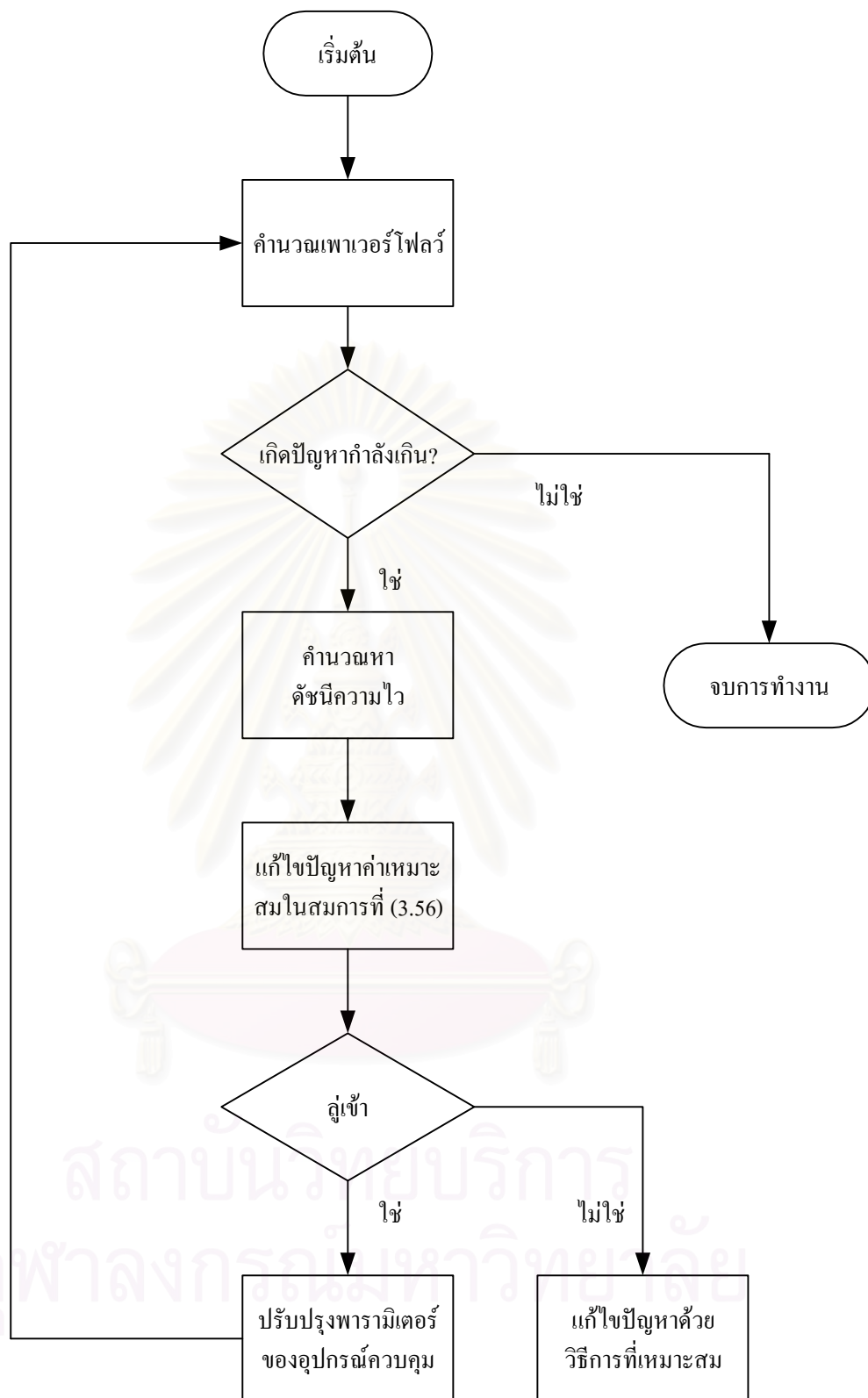
อุปกรณ์ FACTS ที่มีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC ดังนั้นเราจึงเลือกอุปกรณ์ดังกล่าวนี้สำหรับแก้ไขปัญหาคำลึงเกินในสายส่ง สำหรับเทคนิคและวิธีการแก้ไขปัญหาคำลึงเกินในสายส่งโดยใช้ อุปกรณ์ FACTS สามารถดำเนินการได้ตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 3.2

ขั้นตอนของการแก้ไขปัญหาคำลึงเกินโดยใช้อุปกรณ์ FACTS มีขั้นตอนดังนี้

- 1) คำนวณเพาเวอร์โพล์ของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) ตรวจสอบผลการคำนวณเพาเวอร์โพล์แล้วพิจารณาว่าเกิดปัญหาคำลึงเกินในสายส่งหรือไม่
- 3) หากเกิดปัญหาคำลึงเกินในสายส่ง ให้ทำการแก้ไขปัญหาคำลึงเกินโดยใช้สมการที่ (3.56) คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS
- 4) ทำการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS
- 5) ตรวจสอบผลการแก้ไขปัญหาคำลึงเกิน โดยการคำนวณเพาเวอร์โพล์
 - หากผลการคำนวณเพาเวอร์โพล์พบว่าไม่เกิดปัญหาคำลึงเกินอีกจะจบการทำงาน
 - หากพบว่ายังเกิดปัญหาคำลึงเกินอยู่ให้ทำการแก้ไขปัญหาคำลึงเกินซ้ำจนกว่าจะครบกำหนดจำนวนรอบมากที่สุดที่ตั้งไว้ เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากคำตอบที่ได้ในครั้งแรกอาจจะมีค่าแตกต่างจากผลลัพธ์ที่ถูกต้องเนื่องจากความผิดพลาดจากการประมาณเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยวิธีการทำซ้ำเพื่อปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมและดัชนีความไวให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
 - หากพบว่ายังเกิดปัญหาคำลึงเกินอยู่และได้ทำการแก้ไขปัญหาคำลึงเกินซ้ำจนครบตามจำนวนรอบมากที่สุดที่ตั้งไว้แล้ว อาจต้องหาวิธีการอื่นเช่น การตัด โหลด เพื่อแก้ปัญหาคำลึงเกินต่อไป

ขั้นตอนของการแก้ไขปัญหาคำลึงเกินโดยใช้อุปกรณ์ FACTS สามารถแสดงดังรูปที่ 3.14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนของการแก้ไขปัญหากำลังเกินโดยใช้อุปกรณ์ FACTS

เทคนิคในการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในอดีตการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์ทำได้โดยการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังด้วยแผงวงจรที่มีการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้าและแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดเล็ก ในระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้น การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวกระทำได้ยากและใช้เวลานาน ต่อมา มีการพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูง ทำให้มีการนำเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับมาจนถึงปัจจุบัน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS ได้นั้น ส่วนใหญ่จะเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ซึ่งมีราคาแพง ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในสถาบันการศึกษา สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการศึกษาที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักจะมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายอย่าง เช่น ไม่มีการพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS ในกรณีระบบมีขนาดใหญ่จะมีความล่าช้าในการคำนวณสูง จำกัดขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง (จำกัดจำนวนบัสและ/หรือจำกัดจำนวนบรานช์) การปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้เหมาะสมกับงานทำได้ยาก เป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งในด้านความเร็วในการคำนวณและจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมภาษาซี โดยใช้เทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม ทำให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและใช้หน่วยความจำน้อย สามารถนำไปใช้ทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนได้

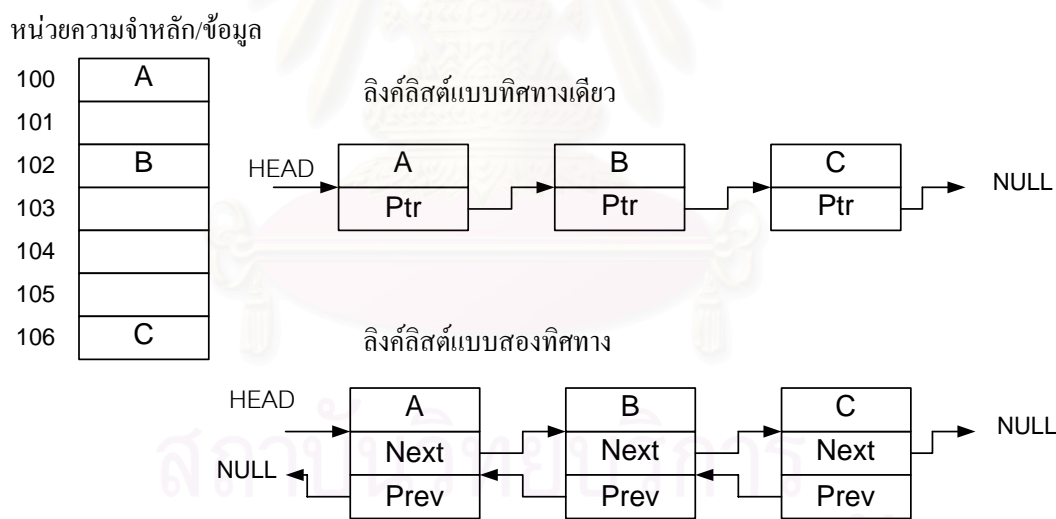
4.1 เทคนิค SPARSE (SPARSE Technique)

โดยทั่วไปแล้วเมตริกซ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังมักจะมีขนาดใหญ่และสมาชิกในเมตริกซ์ส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนก็คือ เมตริกซ์ Y_{BUS} สมาชิกของเมตริกซ์ Y_{BUS} จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เฉพาะสมาชิกที่อยู่ในแนวเส้นทะแยงมุมและสมาชิกที่สอดคล้องกับบัสที่มีสายส่งเชื่อมต่ออยู่เท่านั้น ตัวอย่างเช่น ระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 250 บัสและมี

สายส่ง 750 เส้น (สมมติว่าไม่มีสายส่งเส้นใดต่อขนานกัน) เมตริกซ์ Y_{BUS} จะมีขนาด 250×250 หรือมีสมาชิกจำนวน 62500 ตัว อย่างไรก็ตาม เมตริกซ์ Y_{BUS} จะมีสมาชิกที่ไม่เท่ากับศูนย์โดยประมาณเพียง $250 + 2(750) = 1750$ ตัว ซึ่งคิดเป็น 2.8 เปอร์เซ็นต์ของสมาชิกทั้งหมด ดังนั้นในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปจึงนิยมใช้เทคนิค SPARSE ในการเก็บข้อมูลสมาชิกที่ไม่เท่ากับศูนย์ของเมตริกซ์ที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณและลดจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ลงได้เป็นอย่างมาก

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้เทคนิค SPARSE ในการออกแบบและพัฒนาโปรแกรม โดยการประยุกต์ใช้โครงสร้างข้อมูลที่เรียกว่า ลิงค์ลิสต์ (Linked Lists) ในการจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลต่างๆ อันได้แก่ ข้อมูลบัส ข้อมูลลบรานซ์ และข้อมูลของสมาชิกในเมตริกซ์ที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

ลิงค์ลิสต์ (Linked Lists) เป็นโครงสร้างข้อมูล (Data structure) ประเภทหนึ่งซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของหน่วยเก็บข้อมูลซึ่งอาจจะอยู่ติดกันตามตำแหน่งในหน่วยความจำหลักหรืออาจจะอยู่กระจัดกระจายตามตำแหน่งต่างๆ หน่วยเก็บข้อมูลเหล่านี้จะถูกเชื่อมโยงถึงกันด้วยพอยเตอร์ (Pointer) ตัวอย่างของโครงสร้างข้อมูลประเภทลิงค์ลิสต์แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างข้อมูลประเภทลิงค์ลิสต์

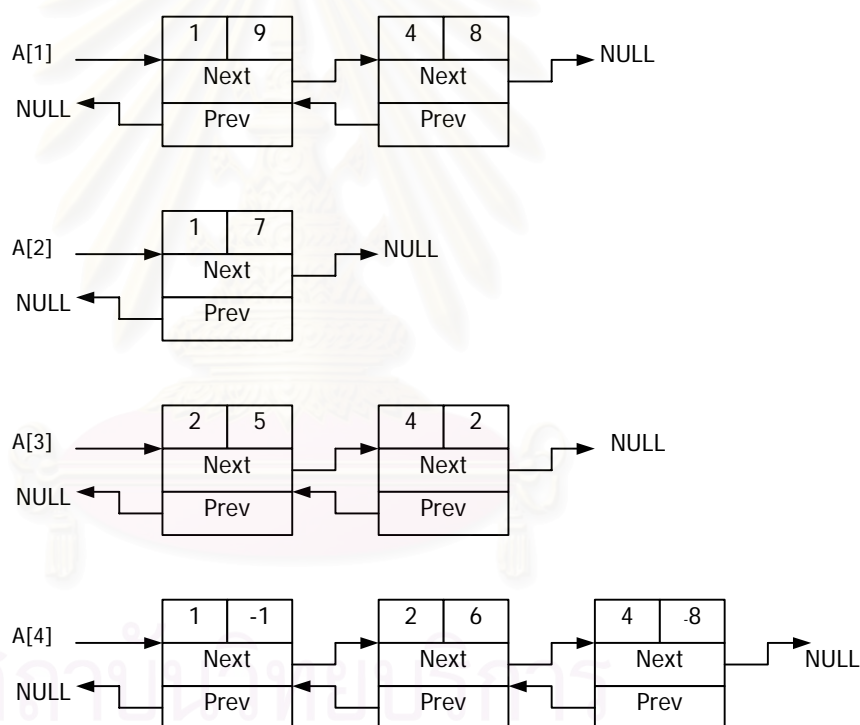
- | | | | |
|--------|----------|-----|---|
| โดยที่ | A,B,C | คือ | ข้อมูลที่เก็บในหน่วยความจำหลัก |
| | HEAD | คือ | พอยเตอร์ที่ชี้ไปยังตำแหน่งที่เก็บ โครงสร้างข้อมูลหัวแถว |
| | NULL | คือ | พอยเตอร์ที่ไม่ชี้ไปยังตำแหน่งที่เก็บ โครงสร้างข้อมูลใดๆ |
| | Ptr,Next | คือ | พอยเตอร์ที่ชี้ไปยังตำแหน่งที่เก็บ โครงสร้างข้อมูลถัดไป |
| | Prev | คือ | พอยเตอร์ที่ชี้ไปยังตำแหน่งที่เก็บ โครงสร้างข้อมูลก่อนหน้า |

การนำโครงสร้างข้อมูลแบบลิงค์ลิสต์มาใช้ในการจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลของสมาชิกในเมตริกซ์ SPARSE แสดงได้ดังนี้

กำหนดให้เมตริกซ์ A เป็นเมตริกซ์ที่ต้องการจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูล

$$A = \begin{bmatrix} 9 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 2 & 0 \\ -1 & 6 & 0 & -8 & 0 \end{bmatrix}$$

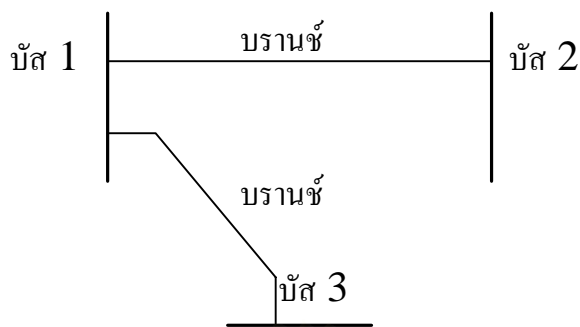
เราสามารถจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลของเมตริกซ์ A ได้โดยอาศัยโครงสร้างข้อมูลแบบมัลติลิงค์ลิสต์ หรือ อาร์เรย์ของโครงสร้างข้อมูลแบบลิงค์ลิสต์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างข้อมูลแบบมัลติลิงค์ลิสต์

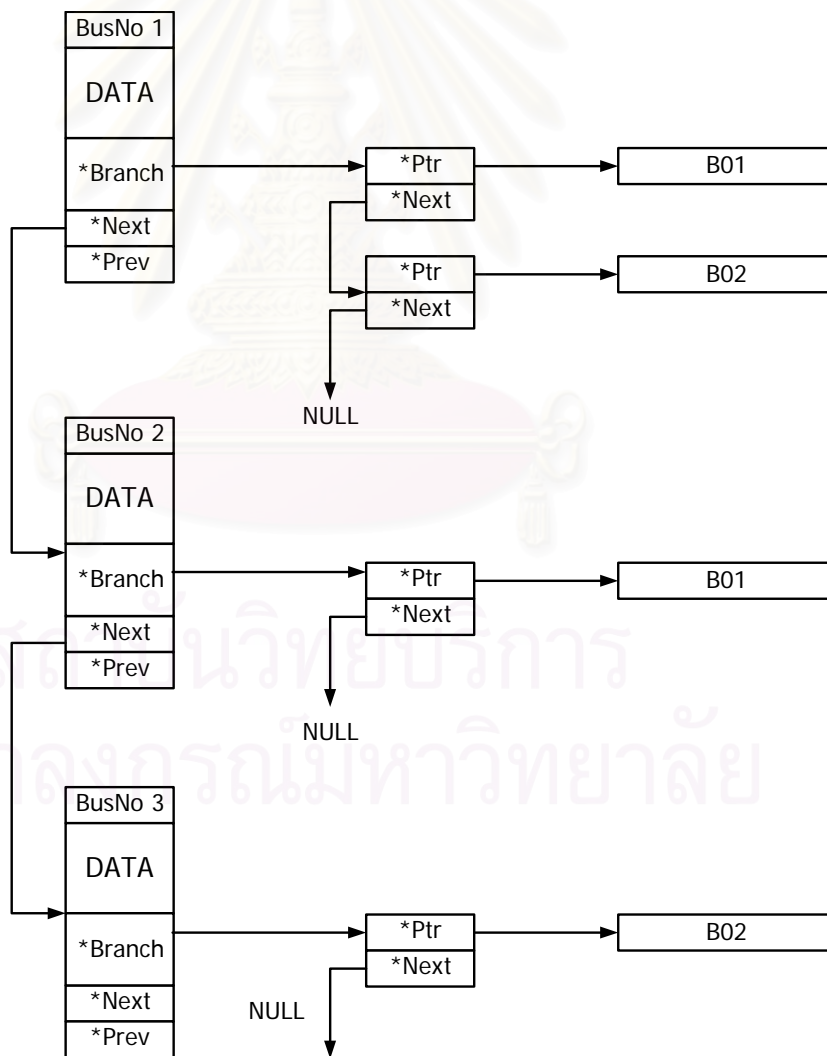
นอกจากการนำโครงสร้างข้อมูลแบบลิงค์ลิสต์มาจัดเก็บข้อมูลของเมตริกซ์แล้วเรายังสามารถนำโครงสร้างข้อมูลแบบลิงค์ลิสต์มาจัดเก็บข้อมูลบัสและข้อมูลบรานซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังนี้

สมมติว่าระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างขนาด 3 บัสแสดงดังรูปที่ 4.3

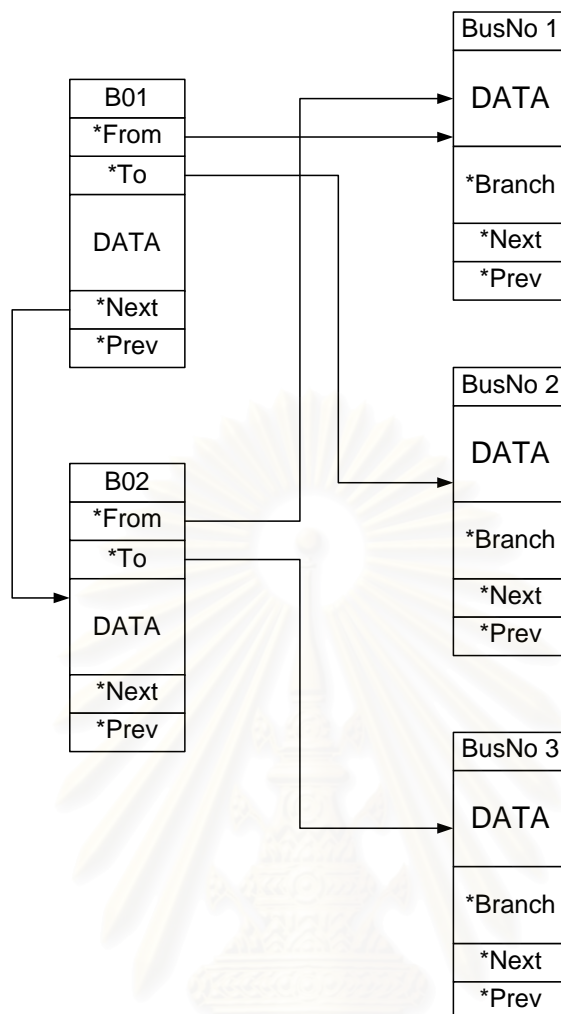


รูปที่ 4.3 ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างขนาด 3 บัส

การจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลบัสและข้อมูลบรานช์โดยอาศัยโครงสร้างข้อมูลแบบลิงค์ลิสต์แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



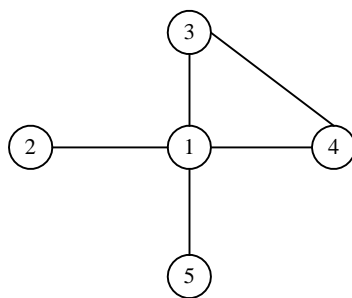
รูปที่ 4.4 การจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลบัส



รูปที่ 4.5 การจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลบรานช์

4.2 เทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม (Optimal Bus Ordering Technique)

ในการคำนวณพาวเวอร์โฟลว์จะต้องทำการแก้ระบบสมการเชิงเส้น $[J]\Delta X = \Delta F$ วิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาระบบสมการเชิงเส้น ได้แก่ วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian elimination method) และ วิธีการแยกตัวประกอบแอลยู (LU decomposition method) ซึ่งจะต้องทำการดำเนินการแบบแถว (row operation) หลายๆครั้ง หากมีการจัดเรียงบัสที่ไม่เหมาะสมแล้วจะทำให้เกิดสมาชิกใหม่ที่ไม่เป็นศูนย์ (fill-ins) เพิ่มมากขึ้นในเมตริกซ์จาโคเบียน ซึ่งเป็นการลดประสิทธิภาพของการใช้เทคนิค SPARSE ลงเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.6 ระบบตัวอย่างขนาด 5 บัส

พิจารณารูปที่ 4.6 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างขนาด 5 บัสซึ่งมีเมตริกซ์ Y_{BUS} ดังนี้

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} x & x & x & x & x \\ x & x & & & \\ x & & x & x & \\ x & & x & x & \\ x & & & & x \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการกำจัดเมตริกซ์ Y_{BUS} ด้วยวิธีการกำจัดแบบเกาส์แล้วจะได้

$$Y'_{BUS} = \begin{bmatrix} x & x & x & x & x \\ & x & \otimes & \otimes & \otimes \\ & & x & x & \otimes \\ & & & x & \otimes \\ & & & & x \end{bmatrix}$$

จะพบว่ามีสมาชิกใหม่ที่ไม่เป็นศูนย์เกิดขึ้นในเมตริกซ์ Y'_{BUS} ซึ่งแสดงด้วยสัญลักษณ์ \otimes ใดๆก็ตาม หากทำการจัดเรียงบัสใหม่โดยสลับบัสที่ 1 และบัสที่ 5 จะได้เมตริกซ์ Y_{BUS} ใหม่ดังนี้

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} x & & & & x \\ & x & & & x \\ & & x & x & x \\ & & x & x & x \\ x & x & x & x & x \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการกำจัดเมตริกซ์ Y_{BUS} ด้วยวิธีการกำจัดแบบเกาส์แล้วจะได้

$$Y'_{BUS} = \begin{bmatrix} x & & & & & x \\ & x & & & & x \\ & & x & x & x & x \\ & & & x & x & x \\ & & & & x & x \\ & & & & & x \end{bmatrix}$$

จะพบว่าไม่มีสมาชิกใหม่เกิดขึ้นในเมตริกซ์ Y'_{BUS} เลย จากตัวอย่างที่ได้แสดงข้างต้น จะเห็นได้ว่าการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสมมีความสำคัญอย่างมากในการนำมาใช้งานร่วมกับการใช้เทคนิค SPARSE เพราะว่า หากมีการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสมแล้วจะทำให้สามารถใช้เทคนิค S P A R S E ได้อย่างเต็มที่และมีประสิทธิภาพสูงสุด เทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสมสามารถจำแนกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

วิธีที่ 1 ก่อนการกำจัดแบบเกาส์ ให้ทำการจัดเรียงบัสตามจำนวนบรานซ์ที่ต่ออยู่กับบัสนั้น โดยให้บัสที่มีจำนวนบรานซ์น้อยที่สุดเรียงอยู่เป็นอันดับแรก และให้บัสที่มีจำนวนบรานซ์มากที่สุดเรียงอยู่เป็นอันดับสุดท้าย

วิธีที่ 2 ทำการจัดเรียงบัสในแต่ละรอบของการกำจัดแบบเกาส์ โดยให้บัสที่จะทำการกำจัดถัดไปเป็นบัสที่มีจำนวนบรานซ์ต่ออยู่น้อยที่สุด

วิธีที่ 3 ทำการจัดเรียงบัสในแต่ละรอบของการกำจัดแบบเกาส์ โดยให้บัสที่จะทำการกำจัดถัดไปเป็นบัสที่ทำให้เกิดสมาชิกใหม่ที่ไม่เป็นศูนย์น้อยที่สุด วิธีนี้จะต้องทำการจำลอง (Simulation) การกำจัดแบบเกาส์ของทุกบัสเพื่อหาบัสที่ทำให้เกิดสมาชิกใหม่ที่ไม่เป็นศูนย์น้อยที่สุด

วิธีที่ 1 เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด แต่ก็มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเช่นกัน ส่วนวิธีที่ 3 ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงแต่ก็ใช้เวลานานเนื่องจากจะต้องทำการจำลองการกำจัดแบบเกาส์ของทุกบัส ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาในด้านประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็คือ วิธีที่ 2 ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้เวลาในการคำนวณน้อย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการจัดเรียง บัสอย่างเหมาะสมตามแบบวิธีที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ตัวอย่างการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง

5.1 การทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยเทคนิคของการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งได้แก่ เทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม โดยจะพิจารณาประสิทธิภาพทั้งในด้านของเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์และปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ ผลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์แบบปกติที่ไม่ใช้เทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม ดังนั้นจึงได้แบ่งโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ออกเป็น 3 กรณีด้วยกันดังนี้

กรณีที่ 1 โปรแกรมที่ใช้ทั้งเทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม

กรณีที่ 2 โปรแกรมที่ใช้เทคนิค SPARSE เพียงอย่างเดียว

กรณีที่ 3 โปรแกรมที่ไม่ใช้ทั้งเทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม

ระบบทดสอบที่นำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ในหัวข้อนี้ได้แก่ ระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE 14 , 30 , 57 , 118 และ 300 บัส ตามลำดับ ข้อมูลของระบบทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก ผลการทดสอบมีรายละเอียดแสดงดังนี้

5.1.1 เวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์

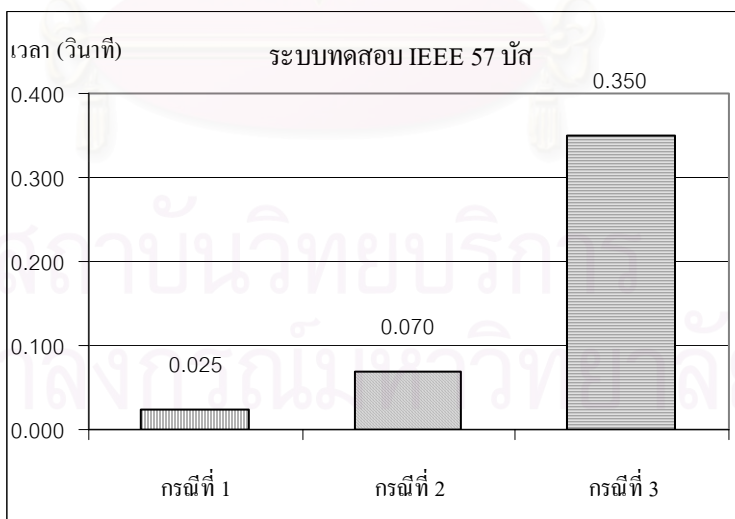
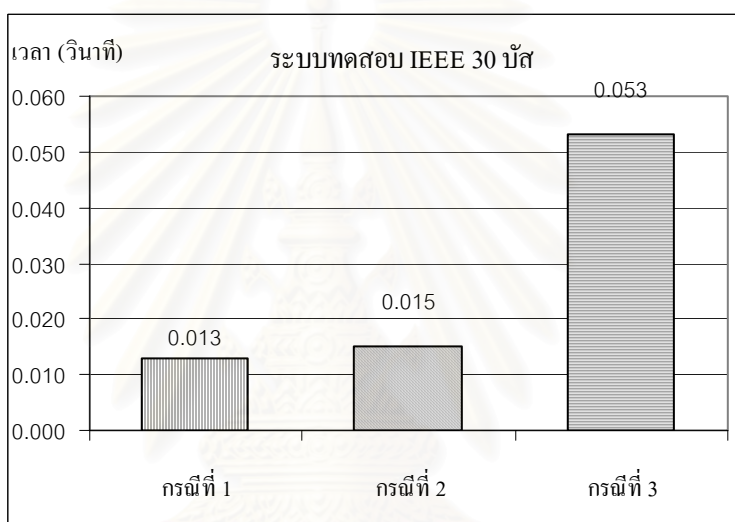
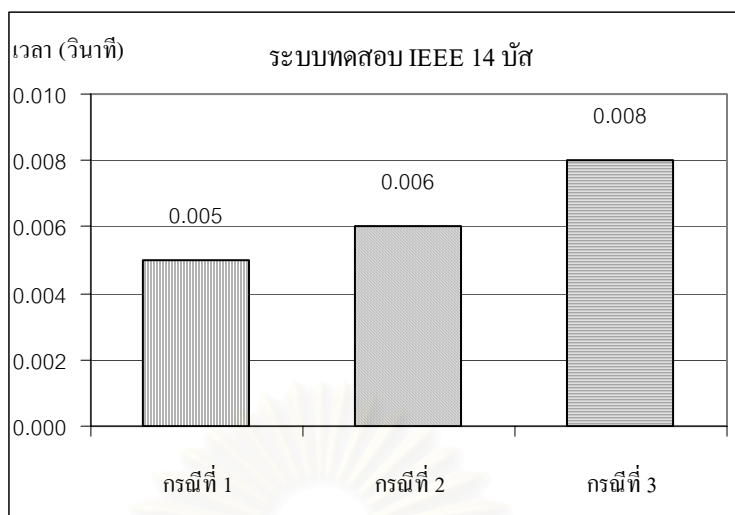
ตารางที่ 5.1 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์

ระบบทดสอบ	เวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ (วินาที)			ความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์) (Maximum Mismatches : pu)
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	
IEEE 14 บัส	0.005	0.006	0.008	3.55271 e-15
IEEE 30 บัส	0.013	0.015	0.053	8.20367 e-10
IEEE 57 บัส	0.025	0.070	0.350	1.53415 e-12
IEEE 118 บัส	0.055	0.208	2.376	1.36176 e-14
IEEE 300 บัส	0.274	5.937	73.488	6.71869 e-11

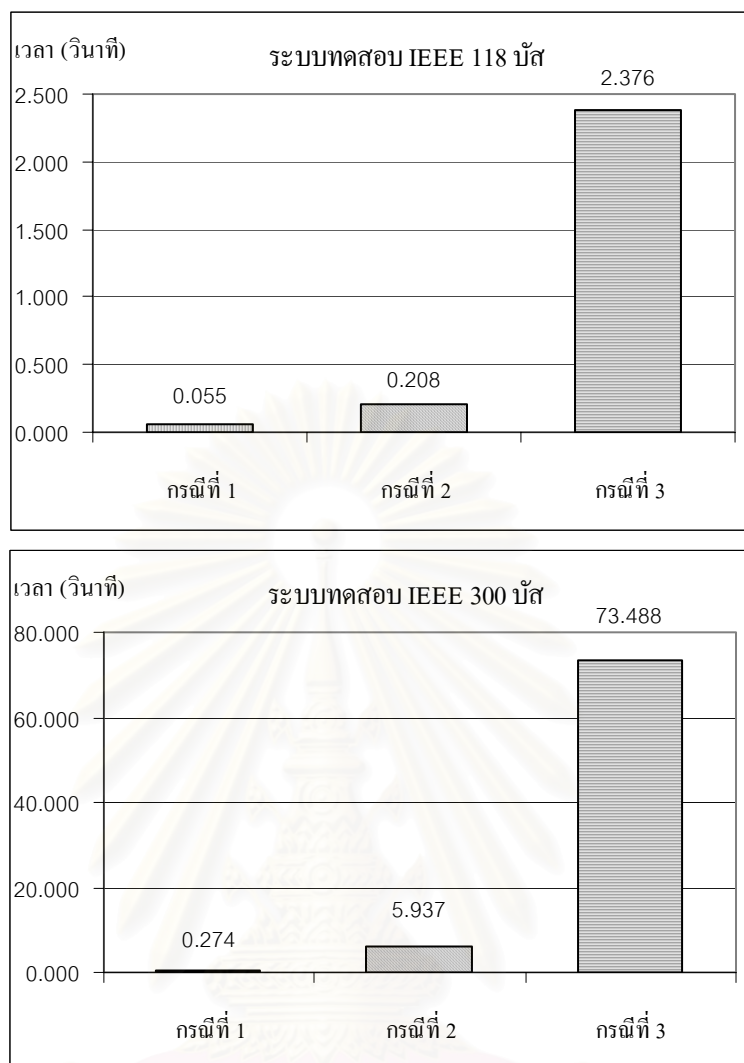
ตารางที่ 5.1 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์เมื่อทำการทดสอบกับระบบทดสอบขนาดต่าง ๆ ด้วยโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ทั้ง 3 กรณี จากผลการทดสอบพบว่า โปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในกรณีที่ 1 มีความรวดเร็วในการคำนวณสูงสุด ส่วนโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในกรณีที่ 3 มีความรวดเร็วในการคำนวณต่ำสุด ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในกรณีที่ 1 ได้ใช้เทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสมทำให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและใช้เวลาในการคำนวณที่รวดเร็วขึ้นนั่นเอง เมื่อทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมจะพบว่าในระบบทดสอบเล็ก ๆ เวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในแต่ละกรณียังไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อระบบทดสอบมีขนาดใหญ่มากขึ้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในแต่ละกรณีจะแตกต่างกันอย่างมาก เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่สมาชิกในเมตริกซ์จาร์โคเบียนส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นคือระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีแนวโน้มในการเป็นระบบ SPARSE มากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นเมื่อมีการใช้เทคนิค SPARSE กับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ก็จะทำให้เห็นผลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไมใช้เทคนิค SPARSE ในทางปฏิบัตินี้ระบบไฟฟ้ากำลังมักจะมีขนาดใหญ่และซับซ้อน ดังนั้นในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์และ/หรือการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังควรที่จะนำเทคนิค SPARSE มาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีทำงานที่รวดเร็วมากยิ่งขึ้น สำหรับโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในกรณีที่ 2 ถึงแม้ว่าการใช้เทคนิค SPARSE จะช่วยทำให้การคำนวณเพาเวอร์โพลาร์มีความรวดเร็วมากขึ้นกว่ากรณีปกติแต่การขาดเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสมไปก็จะไปลดประสิทธิภาพของการใช้เทคนิค SPARSE ลงอย่างเห็นได้ชัด เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากในการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์จะต้องมีขั้นตอนของการแก้ระบบสมการเชิงเส้นด้วยทุกครั้ง หากมีการจัดเรียงบัสที่ไม่เหมาะสมแล้ว ภายหลังจากการกำจัดแบบเกาส์ในขั้นตอนของการแก้ระบบสมการเชิงเส้นจะทำให้เมตริกซ์จาร์โคเบียนเกิดสมาชิกใหม่ที่ไม่เป็นศูนย์เพิ่มขึ้นอย่างมากทำให้ประสิทธิภาพของการใช้เทคนิค SPARSE ลดลงนั่นเอง เมื่อนำผลการทดสอบในตารางที่ 5.1 มาแสดงในรูปของกราฟสามารถแสดงได้ดังรูปที่

5.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 เวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์ฟลว์



รูปที่ 5.1 เวลาที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ (ต่อ)

5.1.2 ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์

เนื่องจากหน่วยความจำที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์โดยส่วนใหญ่จะเป็นหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียน ดังนั้นในการคำนวณหาปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ทั้ง 3 กรณีเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกันในที่นี้จะทำการพิจารณาหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนเป็นหลักสำคัญ ในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ด้วยวิธีการทำซ้ำนั้นในแต่ละรอบของการทำซ้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเมตริกซ์จาร์โคเบียนอันเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนชนิดของบัสเมื่อปริมาณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเกินขอบเขตจำกัด เป็นต้น ดังนั้นจะส่งผลทำให้สมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนในแต่ละรอบของการทำซ้ำมีจำนวนแตกต่างกันหากเกิดเหตุดังกล่าวขึ้น การแสดงปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ใน

การเก็บข้อมูลสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนในที่นี่จะขอแสดงเฉพาะปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนในรอบสุดท้ายของการทำซ้ำซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 และ 5.3 โดยตารางที่ 5.2 จะแสดงจำนวนสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนและปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลก่อนการกำจัดแบบเกาส์และตารางที่ 5.3 แสดงจำนวนสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนและปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลหลังการกำจัดแบบเกาส์ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 แสดงจำนวนสมาชิกเมตริกซ์จาร์โคเบียนและปริมาณหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลก่อนการกำจัดแบบเกาส์

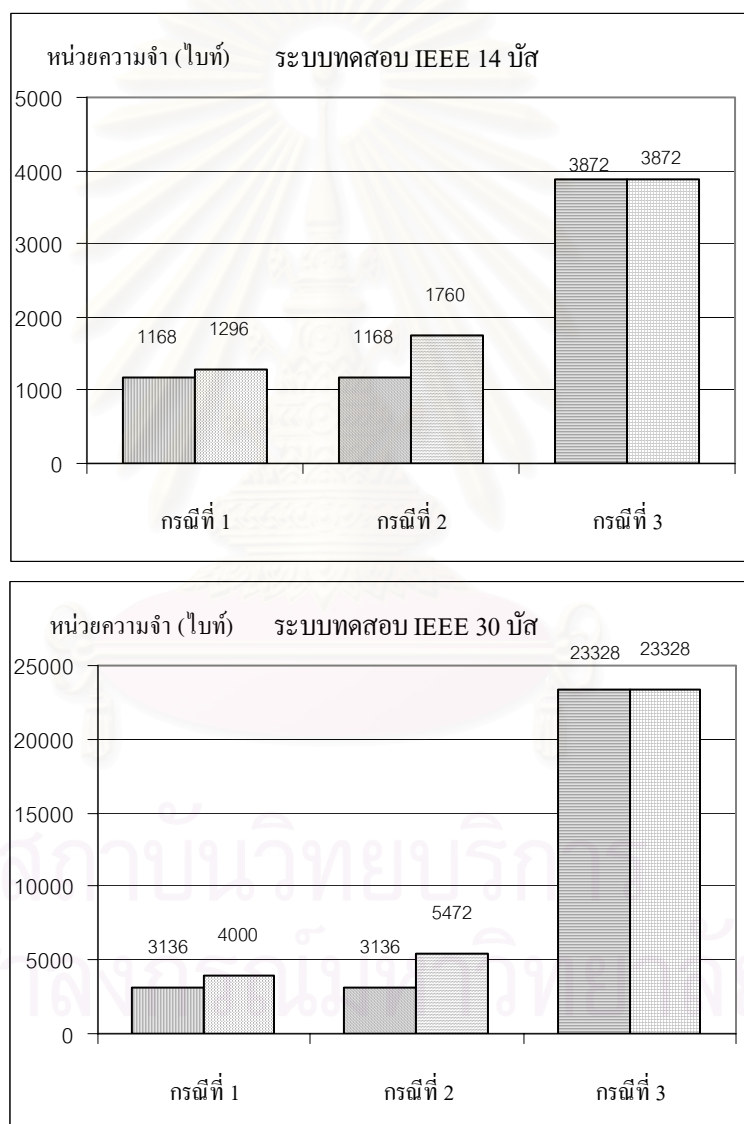
ระบบทดสอบ	จำนวนสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียน			ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ (ไบต์)		
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
IEEE 14 บั๊ส	146	146	484	1,168	1,168	3,872
IEEE 30 บั๊ส	392	392	2,916	3,136	3,136	23,328
IEEE 57 บั๊ส	718	718	11,236	5,744	5,744	89,888
IEEE 118 บั๊ส	1,149	1,149	34,969	9,192	9,192	279,752
IEEE 300 บั๊ส	3,860	3,860	293,764	30,880	30,880	2,350,112

ตารางที่ 5.3 แสดงจำนวนสมาชิกเมตริกซ์จาร์โคเบียนและปริมาณหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลหลังการกำจัดแบบเกาส์

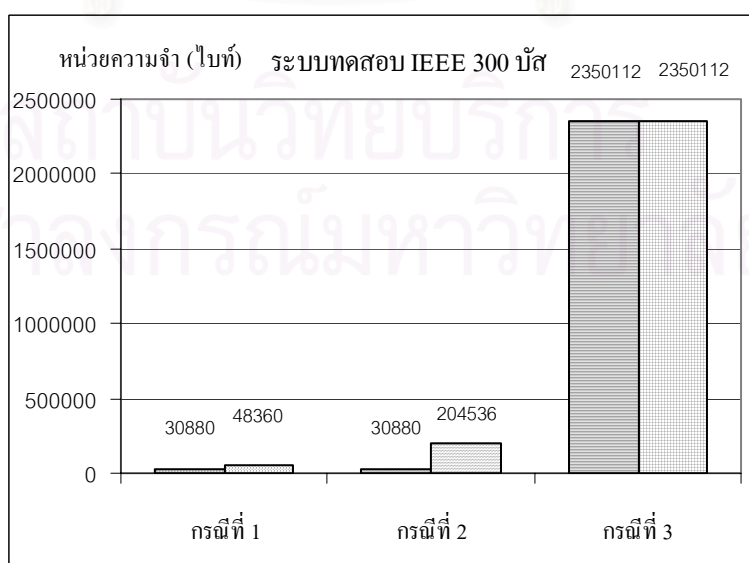
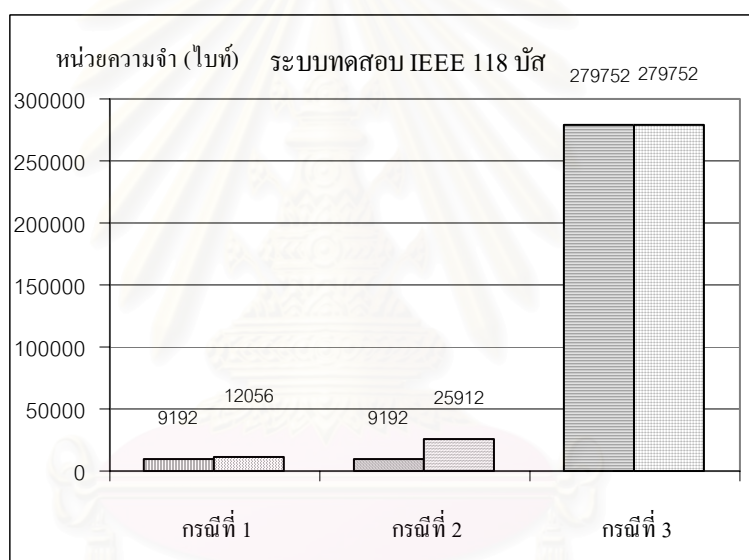
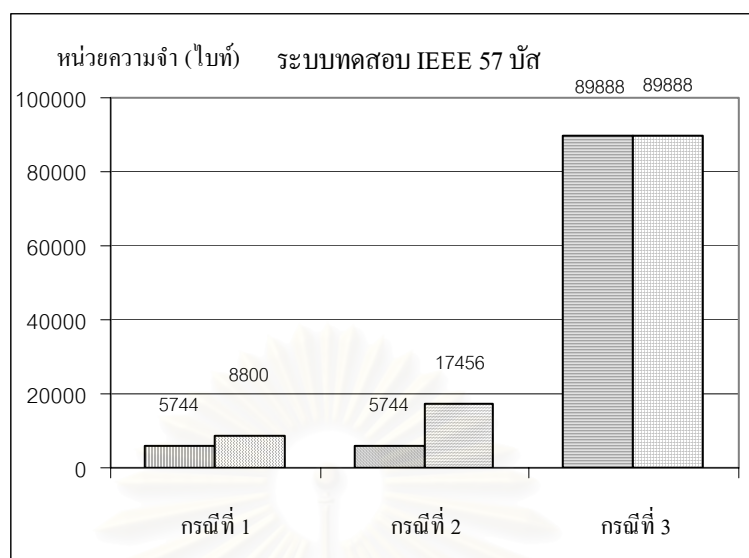
ระบบทดสอบ	จำนวนสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียน			ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ (ไบต์)		
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
IEEE 14 บั๊ส	162	220	484	1,296	1,760	3,872
IEEE 30 บั๊ส	500	684	2,916	4,000	5,472	23,328
IEEE 57 บั๊ส	1,100	2,182	11,236	8,800	17,456	89,888
IEEE 118 บั๊ส	1,507	3,239	34,969	12,056	25,912	279,752
IEEE 300 บั๊ส	6,045	25,567	293,764	48,360	204,536	2,350,112

จากตารางที่ 5.2 และ 5.3 จะพบว่า โปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ในกรณีที่ 1 ใช้หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนน้อยที่สุด ในขณะที่โปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ในกรณีที่ 3 ใช้หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนมากที่สุด เนื่องจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในกรณีที่ 1 ได้ใช้เทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสมทำให้มีความต้องการหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลสมาชิกของ

เมตริกซ์จาร์โคเบียนในปริมาณที่น้อยกว่านั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ 1 และ 2 จะพบว่า ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนก่อนการกำจัดแบบ เกาส์จะมีค่าเท่ากันก็เนื่องมาจากการใช้เทคนิค SPARSE ที่เหมือนกัน แต่ภายหลังจากการกำจัดแบบ เกาส์แล้วจะพบว่ากรณีที่ 2 มีจำนวนสมาชิกของเมตริกซ์จาร์โคเบียนที่ไม่เป็นศูนย์มากกว่ากรณีที่ 1 เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากในกรณีที่ 2 ไม่ได้ใช้เทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสมจึงทำให้เกิด สมาชิกใหม่ที่ไม่เท่ากับศูนย์เพิ่มขึ้นมากกว่าในกรณีที่ 1 ซึ่งใช้เทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม เมื่อนำผลการทดสอบในตารางที่ 5.2 และ 5.3 มาแสดงในรูปของกราฟสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสมาชิกเมตริกซ์จาร์โคเบียน



รูปที่ 5.2 ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสมาชิกเมตริกซ์จาร์โคเบียน (ต่อ)

5.2 ตัวอย่างการเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

ในส่วนแรกจะทำการศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบไฟฟ้ากำลังโดยทำการปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่ค่าต่าง ๆ กันแล้วทำการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลักซ์เพื่อหาจุดทำงานของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป ระบบทดสอบที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างในที่นี้ได้แก่ ระบบทดสอบ STAGG 5 บัส ข้อมูลของระบบทดสอบแสดงในภาคผนวก ก ผลการคำนวณเพาเวอร์ฟลักซ์ของระบบทดสอบในกรณีพื้นฐาน (Base case) แสดงดังตารางที่ 5.4 และ 5.5 ตารางที่ 5.4 แสดงผลของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่บัส

Bus No.	Voltage Magnitude	Voltage Angle	P_G (MW)	Q_G (MVAR)	P_D (MW)	Q_D (MVAR)
1	1.06	0	131.122	90.8155	0	0
2	1	-2.06123	40	-61.5929	20	10
3	0.987247	-4.63669	0	0	45	15
4	0.984132	-4.95702	0	0	40	5
5	0.971696	-5.76495	0	0	60	10

ตารางที่ 5.5 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งและกำลังสูญเสีย

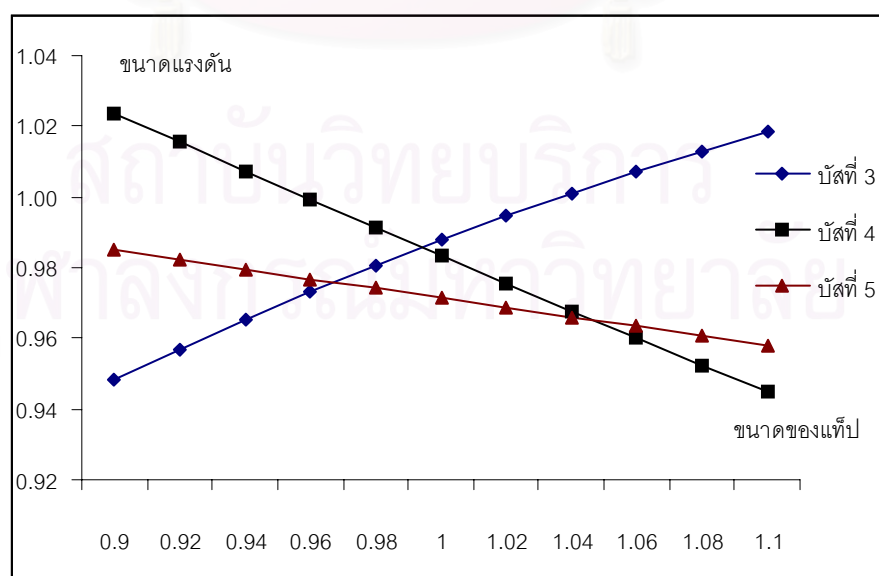
From Bus	To Bus	P_{ik} (MW)	Q_{ik} (MW)	P_{loss} (MW)	Q_{loss} (MVAR)
1	3	41.79080	16.82030	1.51783	-0.69217
1	2	89.33140	73.99520	2.48587	1.08680
2	5	54.65990	5.55794	1.21501	0.72873
2	4	27.71300	-1.72391	0.46085	-2.55448
2	3	24.47270	-2.51849	0.35951	-2.87079
2	1	-86.84550	-72.90840	2.48587	1.08680
3	4	19.38620	2.86480	0.04007	-1.82296
3	2	-24.11320	-0.35230	0.35951	-2.87079
3	1	-40.27300	-17.51250	1.51783	-0.69217
4	5	6.59825	0.51832	0.04310	-4.65247
4	3	-19.34610	-4.68775	0.04007	-1.82296
4	2	-27.25210	-0.83056	0.46085	-2.55448
5	4	-6.55515	-5.17079	0.04310	-4.65247
5	2	-53.44480	-4.82921	1.21501	0.72873

1. หม้อแปลงชนิดปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลด

ทำการติดตั้งหม้อแปลงปรับแท็ปได้ในขณะมีโหลดหรือหม้อแปลง TCUL ที่สายส่ง 3-4 โดยเชื่อมต่อหม้อแปลงเข้ากับบัสที่ 3 แล้วทำการปรับขนาดของแท็ปหม้อแปลง TCUL ที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของหม้อแปลง TCUL ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง โดยกำหนดให้หม้อแปลง TCUL มีขอบเขตของการปรับตั้งเท่ากับ $0.9 \leq a \leq 1.1$ และมีค่ารีแอกแตนซ์เท่ากับ 0.05 เปอรูยูนิิต ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับขนาดของแท็ปหม้อแปลง TCUL

ขนาดของแท็ป	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 3	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 4	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 5
0.90	0.94815	1.02386	0.98530
0.92	0.95695	1.01561	0.98246
0.94	0.96530	1.00742	0.97965
0.96	0.97324	0.99930	0.97686
0.98	0.98078	0.99125	0.97410
1.00	0.98793	0.98329	0.97136
1.02	0.99472	0.97543	0.96866
1.04	1.00117	0.96766	0.96599
1.06	1.00728	0.95999	0.96335
1.08	1.01309	0.95242	0.96075
1.10	1.01859	0.94497	0.95819



รูปที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับขนาดของแท็ปหม้อแปลง TCUL

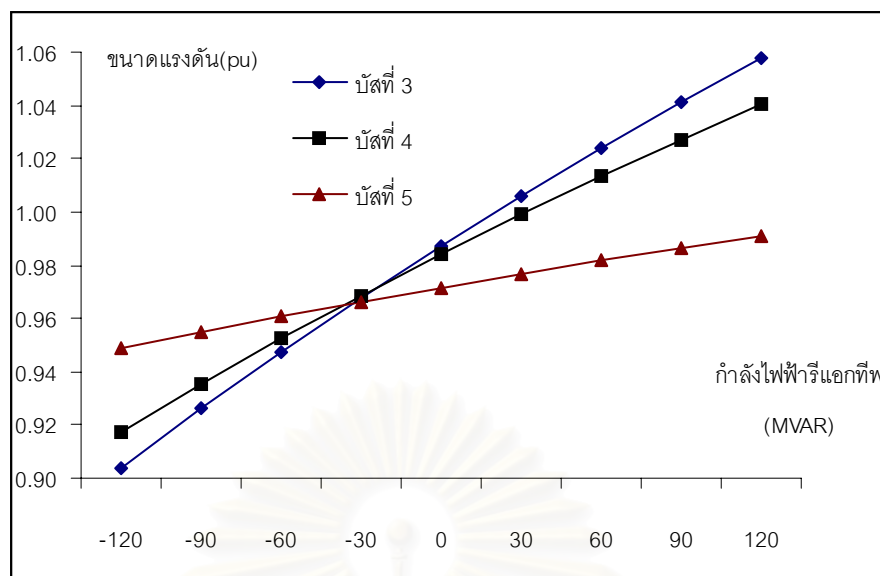
จากผลการทดสอบพบว่า การปรับขนาดของแท่งหม้อแปลง TCUL จะส่งผลกระทบต่อขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบัสที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลง TCUL ขนาดแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก กล่าวคือ เมื่อปรับขนาดของแท่งหม้อแปลง TCUL เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 4 มีค่าลดลง ในขณะที่บัสอื่นๆ ที่อยู่ห่างไกลออกไปเช่น บัสที่ 5 จะได้รับผลกระทบในปริมาณน้อยกว่า ดังนั้นเราจึงสามารถนำหม้อแปลง TCUL ไปใช้ในงานควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสโดยทำการติดตั้งหม้อแปลง TCUL ณ ตำแหน่งบัสที่ต้องการควบคุมขนาดแรงดัน สำหรับในตัวอย่างนี้จะได้แก่ การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 นั่นเอง โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้หม้อแปลง TCUL สำหรับควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าในช่วงแคบๆ เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อบัสใกล้เคียงในทิศทางตรงกันข้าม หม้อแปลง TCUL จะทำหน้าที่ในการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลงเท่านั้น โดยไม่ได้มีการผลิตกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจ่ายเข้าไปในระบบเหมือนกับในกรณีของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานซึ่งจะส่งผลกระทบต่อขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสในระบบโดยรวมได้มากกว่าและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้สามารถปรับปรุงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสของทั้งระบบให้ดีขึ้นได้มากกว่าการใช้หม้อแปลง TCUL ในขณะที่หม้อแปลง TCUL มักจะใช้ในงานควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดบัสหนึ่งเพียงบัสเดียวเท่านั้น

2. อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน ณ บัสที่ 3 แล้วทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ (หรือปรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ) ของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์เมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ (หรือปรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ) ของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน

Q_{shunt}	X_{shunt}	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 3	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 4	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 5
-120 Mvar	0.6809	0.90392	0.91703	0.94874
-90 Mvar	0.9535	0.92638	0.93513	0.95495
-60 Mvar	1.4967	0.94764	0.95226	0.96081
-30 Mvar	3.1227	0.96789	0.96856	0.96638
0 Mvar	0.0000	0.98725	0.98413	0.97170
30 Mvar	-3.3723	1.00582	0.99907	0.97679
60 Mvar	-1.7466	1.02370	1.01344	0.98168
90 Mvar	-1.2040	1.04095	1.02730	0.98639
120 Mvar	-0.9322	1.05763	1.04069	0.99094

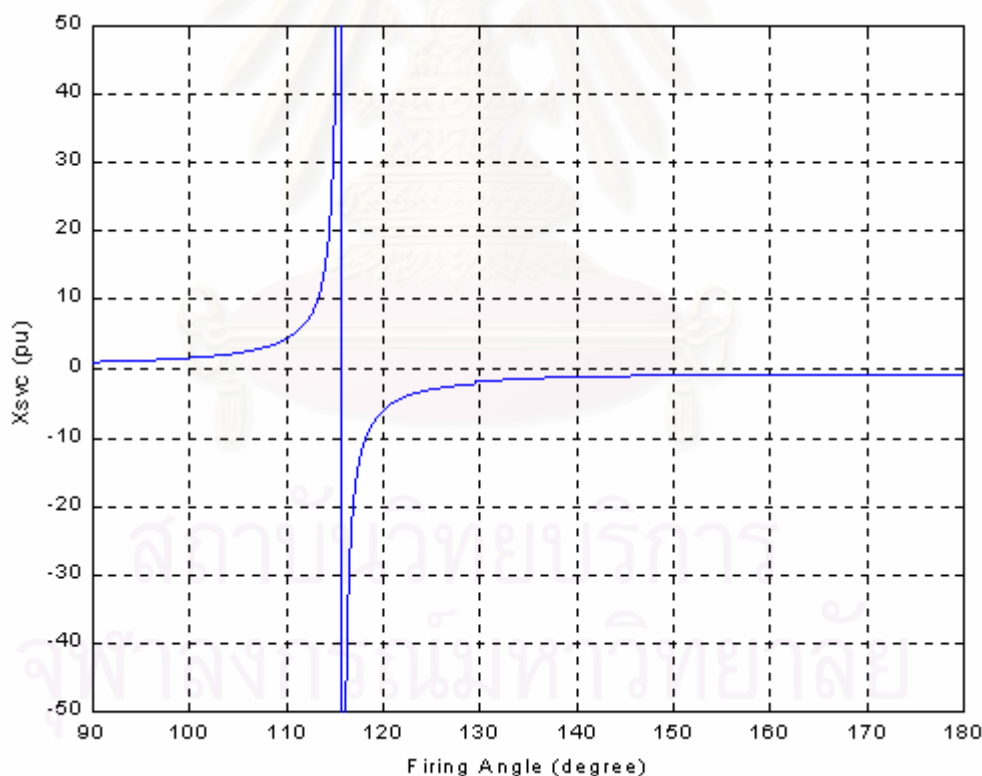


รูปที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับค่ารีแอคแตนซ์หรือปรับค่ากำลังไฟฟารีแอคทีฟของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อมีการปรับค่ารีแอคแตนซ์หรือปรับค่ากำลังไฟฟารีแอคทีฟของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานในปริมาณต่างๆ กันจะส่งผลกระทบต่ออย่างมากต่อขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสของบัสที่ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน กล่าวคือ เมื่อทำการปรับค่ารีแอคแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานเป็นแบบคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ในปริมาณที่ลดลง (ปรับเพิ่มกำลังไฟฟารีแอคทีฟแบบคาปาซิทีฟในปริมาณเพิ่มขึ้น) แล้วจะทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าสูงขึ้นและเมื่อทำการปรับค่ารีแอคแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานเป็นแบบอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ในปริมาณที่ลดลง (ปรับเพิ่มกำลังไฟฟารีแอคทีฟแบบอินดักทีฟในปริมาณเพิ่มขึ้น) แล้วจะทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าต่ำลง ในขณะที่การปรับค่ารีแอคแตนซ์หรือปรับค่ากำลังไฟฟารีแอคทีฟของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานยังส่งผลกระทบต่อไปยังขนาดแรงดันไฟฟ้าของบัสอื่นๆ ที่อยู่ห่างไกลออกไปและเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับขนาดแรงดันไฟฟ้าของบัสที่ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานถึงแม้ว่าจะได้รับผลกระทบในปริมาณที่น้อยกว่าลดหลั่นกันไปตามสัดส่วนของระยะทางจากบัสที่ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานก็ตาม ซึ่งตรงกันข้ามกับในกรณีของหม้อแปลง TCUL ที่พบว่าบางบัสอาจจะมิขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นในขณะที่อีกบางบัสมีขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำลง เนื่องจากในกรณีของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานได้มีการผลิตกำลังไฟฟารีแอคทีฟจ่ายเข้าไปในระบบ ทำให้บัสต่างๆ ได้รับการชดเชยกำลังไฟฟารีแอคทีฟในทิศทางเดียวกัน (+Q หรือ -Q) ทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ในระบบเพิ่มสูงขึ้นหรือลดต่ำลงในทิศทางเดียวกัน

3. อุปกรณ์ Static VAR Compensator (SVC)

โครงสร้างของอุปกรณ์ SVC ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ขนาดคงที่ (Fixed Capacitor : FC) ต่อขนานกับรีแอคเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor-Controlled Reactor : TCR) ดังนั้นในขั้นตอนแรกของการดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ SVC จะต้องทำการออกแบบคาปาซิเตอร์ที่ฟรีแอกแตนซ์ของ FC และอินดักทีฟฟรีแอกแตนซ์ของ TCR เมื่อพิจารณาค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC ในสมการที่ (2.62) แล้วจะพบว่าจุดทำงานของอุปกรณ์ SVC อาจเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นได้หลายจุดหากมีการออกแบบคาปาซิเตอร์ที่ฟรีแอกแตนซ์ของ FC และอินดักทีฟฟรีแอกแตนซ์ของ TCR ที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นเราควรออกแบบให้อุปกรณ์ SVC มีจุดทำงานที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์น้อยที่สุดเพียงจุดเดียว ในขอบเขตการทำงานตั้งแต่ $90^\circ \leq \alpha_{SVC} \leq 180^\circ$ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบคาปาซิเตอร์ที่ฟรีแอกแตนซ์ของ FC และอินดักทีฟฟรีแอกแตนซ์ของ TCR ให้มีค่าเท่ากับ $X_C = 0.96$ และ $X_L = 0.45$ คุณลักษณะของค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC ที่ได้ทำการออกแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 จุดทำงานที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์อยู่ที่ตำแหน่ง $\alpha_{SVC}^0 = 115.53^\circ$

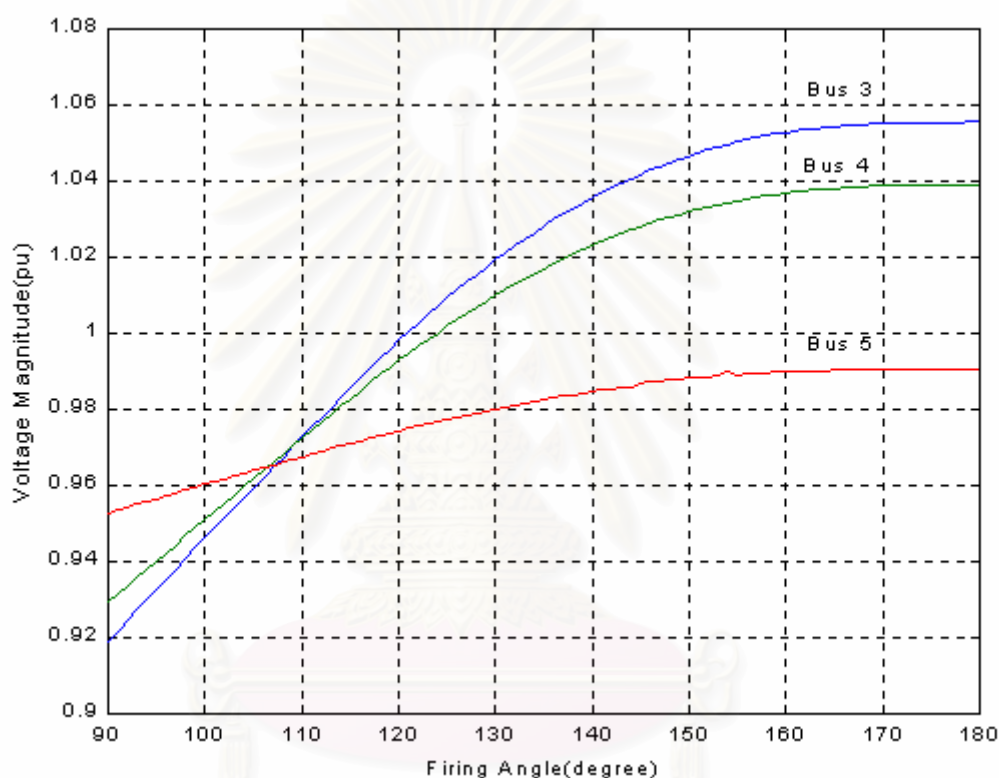


รูปที่ 5.5 คุณลักษณะของค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ SVC

จากรูปที่ 5.5 เราสามารถแบ่งพื้นที่การทำงานของอุปกรณ์ SVC ออกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่

- 1) พื้นที่การทำงานแบบอินดักทีฟ เมื่อมุมจุดชนวนเกิดอยู่ในช่วง $90^{\circ} \leq \alpha_{SVC} < \alpha_{SVC}^0$
- 2) พื้นที่การทำงานแบบคาปาซิทีฟ เมื่อมุมจุดชนวนเกิดอยู่ในช่วง $\alpha_{SVC}^0 < \alpha_{SVC} \leq 180$

หลังจากออกแบบคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของ FC และอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของ TCR เสร็จแล้ว เราจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ SVC ณ บัสที่ 3 แล้วทำการปรับค่ามุมจุดชนวนของอุปกรณ์ SVC ที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ SVC ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับมุมจุดชนวนของอุปกรณ์ SVC

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อปรับมุมจุดชนวนเกิดเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ มีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ณ บัสที่ติดตั้งอุปกรณ์ SVC จะได้รับผลกระทบมากที่สุด ดังนั้นเราสามารถควบคุมขนาดแรงดันที่บัสได้โดยการควบคุมมุมจุดชนวนเกิดของอุปกรณ์ SVC การควบคุมขนาดแรงดันที่บัสด้วยอุปกรณ์ SVC จะมีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน ส่วนที่แตกต่างกับอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานและเป็นข้อได้เปรียบของอุปกรณ์ SVC ก็คือลักษณะของการควบคุมขนาดแรงดันที่มีความต่อเนื่องอันเนื่องมาจากคุณลักษณะของรีแอคแตนซ์สมมูลที่มีความต่อเนื่องนั่นเองทำให้การทำงานมีความยืดหยุ่น (flexible) มากกว่าและมีขอบเขตในการควบคุมที่

กว้างกว่าในกรณีของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน นอกจากนี้อุปกรณ์ SVC ยังมีลักษณะการทำงานที่รวดเร็วกว่าด้วย

4. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ในตัวอย่างของกรณีพื้นฐานซึ่งต้องการรักษาขนาดแรงดันที่บัส 2 ให้มีค่าเท่ากับ 1 เอร์ยูนิตนั้น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ณ บัสที่ 2 ถูกกำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายอุดมคติซึ่งจะไม่มีขีดจำกัดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ตามต้องการ แต่ในทางปฏิบัตินั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง จะต้องมีขีดจำกัดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเสมอ ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบหาผลกระทบของขีดจำกัดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีผลต่อความสามารถในการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ทำการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าของบัสที่ 2 ให้มีค่าเท่ากับ 1.00 เอร์ยูนิต

กรณีที่ 2 ทำการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าของบัสที่ 2 ให้มีค่าเท่ากับ 1.05 เอร์ยูนิต

ตารางที่ 5.8 แสดงผลกระทบของขีดจำกัดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีผลต่อความสามารถในการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เงินเนอเรเตอร์บัส

ขีดจำกัด Q	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2	
	ขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 2	ปริมาณ Q ที่ใช้	ขนาดแรงดันของบัสที่ 2	ปริมาณ Q ที่ใช้
Q = 0	1.03242	0	1.03242	0
-10 ≤ Q ≤ 10	1.02731	-10	1.03748	10
-20 ≤ Q ≤ 20	1.02215	-20	1.04249	20
-30 ≤ Q ≤ 30	1.01692	-30	1.04744	30
-40 ≤ Q ≤ 40	1.01163	-40	1.05000	35.2141
-50 ≤ Q ≤ 50	1.00628	-50	1.05000	35.2141
-60 ≤ Q ≤ 60	1.00087	-60	1.05000	35.2141
-70 ≤ Q ≤ 70	1.00000	-61.5929	1.05000	35.2141

ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.8 พบว่า เราสามารถควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เงินเนอเรเตอร์บัสได้โดยการควบคุมปริมาณการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขีดจำกัดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันด้วย กล่าวคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขีดจำกัดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในขอบเขตที่กว้างกว่าจะสามารถควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสได้ในขอบเขตที่กว้างกว่าด้วยเช่นกัน

ในกรณีที่ 1 เป็นการควบคุมขนาดแรงดันที่บัสให้มีค่าเท่ากับ 1.00 เปรอ์ยูนิตซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดแรงดันที่บัสในกรณีที่ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (กรณี $Q = 0$) ดังนั้นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟออกจากระบบ (หรือจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีค่าเป็นลบเข้าไปในระบบ) จึงจะสามารถควบคุมขนาดแรงดันที่บัสให้มีค่าตามต้องการซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมการกระตุ้นขดลวดสนามให้มีลักษณะการกระตุ้นต่ำเกิน (Under excitation)

ในกรณีที่ 2 เป็นการควบคุมขนาดแรงดันที่บัสให้มีค่าเท่ากับ 1.05 เปรอ์ยูนิตซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดแรงดันที่บัสในกรณีที่ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (กรณี $Q = 0$) ดังนั้นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบจึงจะสามารถควบคุมขนาดแรงดันที่บัสให้มีค่าตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมการกระตุ้นขดลวดสนามให้มีลักษณะการกระตุ้นสูงเกิน (Over excitation)

เมื่อใดก็ตามที่ปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ต้องการใช้ในการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้ามีค่าเกินขีดจำกัดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแล้วจะส่งผลทำให้ไม่สามารถควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสได้ตามค่าที่ต้องการ ดังนั้นในขั้นตอนของการออกแบบและวางแผนการดำเนินงานของระบบไฟฟ้ากำลังควรออกแบบให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขีดจำกัดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในปริมาณที่เหมาะสมและเพียงพอกับความต้องการในการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้า

5. อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม

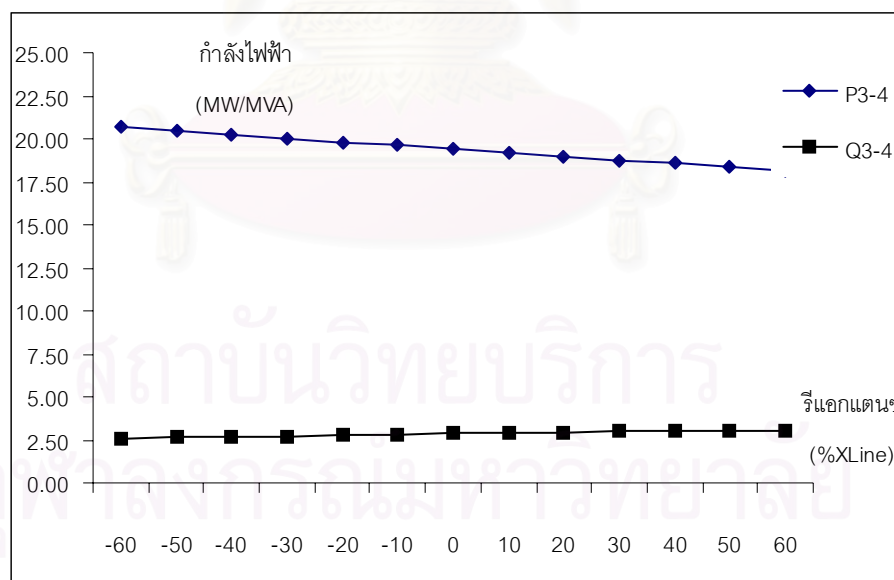
โดยทั่วไปแล้วการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมมักจะถูกจำกัดขอบเขตไว้ไม่ให้มีค่าเกิน 60 เปรอ์เซ็นต์ของค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งโดยประมาณ ทั้งนี้ก็เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิงโครไนส์เรโซแนนซ์และเพื่อจำกัดขนาดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรนั่นเอง ในหัวข้อนี้จึงได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณีด้วยกันคือการชดเชยสายส่งที่มีค่ารีแอกแตนซ์ต่ำและการชดเชยสายส่งที่มีค่ารีแอกแตนซ์สูงตามลำดับเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมที่มีต่อการไหลของกำลังไฟฟ้า

กรณีที่ 1 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยอนุกรมที่สายส่ง 3-4 โดยเชื่อมต่อหม้อแปลงเข้ากับบัสที่ 3 แล้วทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมมีขอบเขตของการปรับตั้งเท่ากับ $-60\% X_{Line} \leq X_S \leq 60\% X_{Line}$ ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.7

กรณีที่ 2 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยอนุกรมที่สายส่ง 2-4 โดยเชื่อมต่อหม้อแปลงเข้ากับบัสที่ 2 แล้วทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้อุปกรณ์ชดเชยอนุกรมมีขอบเขตของการปรับตั้งเท่ากับ $-60\% X_{Line} \leq X_S \leq 60\% X_{Line}$ ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.8

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวเมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม

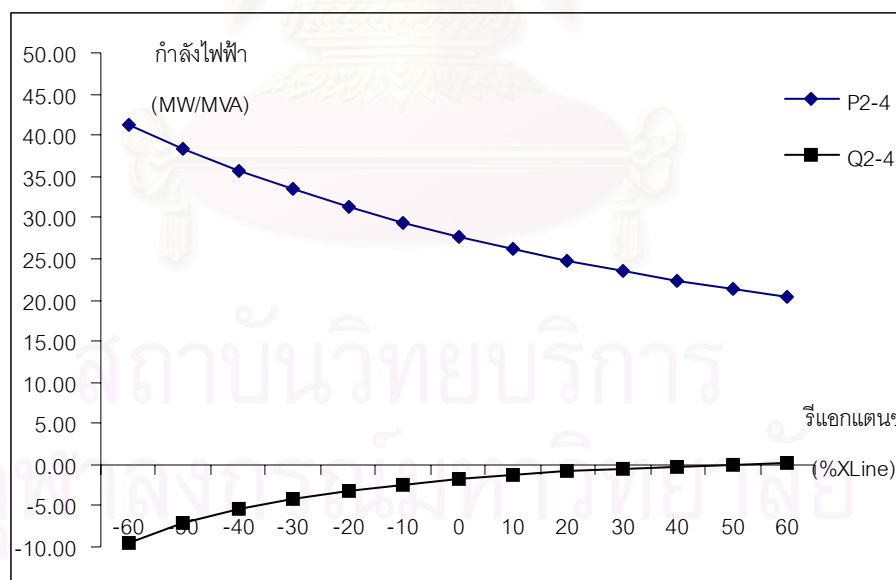
X_{series} (%)	X_{series} (pu)	กำลังไฟฟ้าจริง P3-4	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q3-4
-60 %	-0.018	20.7335	2.56568
-50 %	-0.015	20.4975	2.62352
-40 %	-0.012	20.2662	2.67794
-30 %	-0.009	20.0396	2.72912
-20 %	-0.006	19.8174	2.77722
10 %	-0.003	19.5997	2.8224
0 %	0.000	19.3862	2.8648
10 %	0.003	19.1768	2.90456
20 %	0.006	18.9716	2.94182
30 %	0.009	18.7702	2.9767
40 %	0.012	18.5728	3.00931
50 %	0.015	18.379	3.03978
60 %	0.018	18.189	3.0682



รูปที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวเมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมที่ติดตั้งบนสายส่ง 3-4

ตารางที่ 5.10 แสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวเมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม

X_{series} (%)	X_{series} (pu)	กำลังไฟฟ้าจริง P2-4	กำลังไฟฟารีแอกทีฟ Q2-4
-60 %	-0.108	41.1388	-9.42853
-50 %	-0.090	38.2741	-7.20426
-40 %	-0.072	35.6873	-5.49923
-30 %	-0.054	33.3623	-4.1823
-20 %	-0.036	31.2753	-3.15778
10 %	-0.018	29.4004	-2.35557
0 %	0.000	27.713	-1.72391
10 %	0.018	26.1903	-1.22426
20 %	0.036	24.8122	-0.82765
30 %	0.054	23.5612	-0.51214
40 %	0.072	22.4219	-0.26089
50 %	0.090	21.381	-0.06095
60 %	0.108	20.4273	0.097785



รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวเมื่อทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมที่ติดตั้งบนสายส่ง 2-4

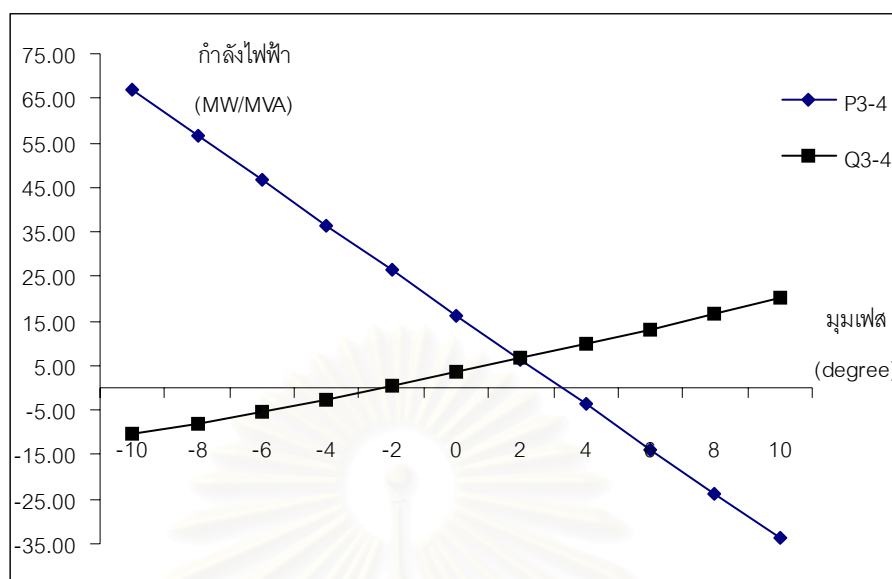
จากผลการทดสอบพบว่า การปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมากกว่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนั้นจึงนิยมใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงมากกว่าที่จะใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การชดเชยสายส่งด้วยรีแอกแตนซ์แบบคาปาซิทีฟในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การชดเชยสายส่งด้วยรีแอกแตนซ์แบบอินดักทีฟในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าลดลง ดังนั้นเราสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงได้โดยการควบคุมรีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมที่ใช้ในงานควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงมักจะมีขอบเขตในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ค่อนข้างแคบเนื่องจากดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับรีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมมีค่าไม่สูงมากนัก และ ขอบเขตของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมมักจะถูกจำกัดด้วยเปอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์ของสายส่ง

6. หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส

ทำการติดตั้งหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟสที่สายส่ง 3-4 โดยเชื่อมต่อหม้อแปลงเข้ากับบัสที่ 3 แล้วทำการปรับมุมเฟสของแท็ปหม้อแปลงที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟสที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง โดยกำหนดให้หม้อแปลงมีขอบเขตของการปรับตั้งเท่ากับ $-10^{\circ} \leq \phi \leq 10^{\circ}$ และมีค่ารีแอกแตนซ์เท่ากับ 0.05 เปรอ์ยูนิท ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.11 แสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับมุมเฟสของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส

ϕ	กำลังไฟฟ้าจริง P3-4	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q3-4
-10	66.8626	-10.4975
-8	56.8032	-7.95703
-6	46.715	-5.29221
-4	36.6105	-2.50624
-2	26.5021	0.397538
0	16.4019	3.41564
2	6.32225	6.5445
4	-3.72485	9.78043
6	-13.7274	13.1197
8	-23.6737	16.5583
10	-33.5518	20.0925



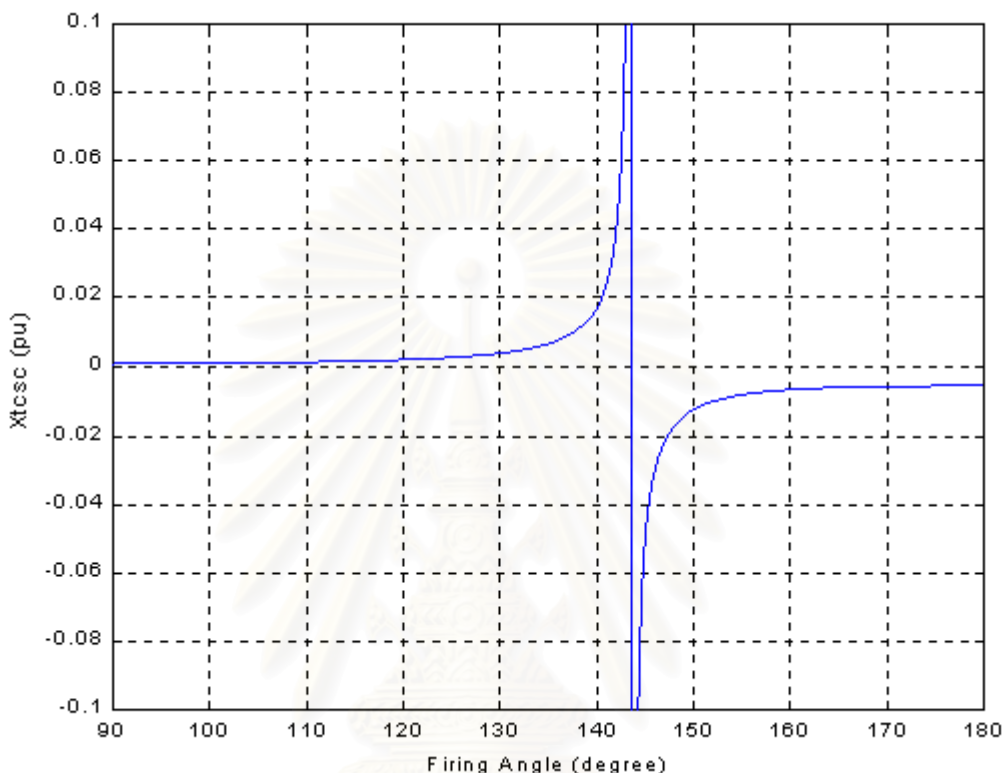
รูปที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับมุมเฟสของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟสที่ติดตั้งบนสายส่ง 3-4

จากผลการทดสอบพบว่า การปรับมุมเฟสของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟสจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมากกว่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนั้นจึงนิยมใช้หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟสในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงมากกว่าที่จะใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การปรับมุมเฟสของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าลดลง ในขณะที่การปรับมุมเฟสของหม้อแปลงลดลงจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเราสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงได้โดยการควบคุมมุมเฟสของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟสนั่นเอง หม้อแปลงชนิดนี้มีขอบเขตในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่กว้างกว่าเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมเนื่องจากหม้อแปลงชนิดนี้มีดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับมุมเฟสของหม้อแปลงที่สูงกว่าในกรณีของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมนั่นเอง

7. อุปกรณ์ Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)

โครงสร้างของอุปกรณ์ TCSC ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ขนาดคงที่ (Fixed Capacitor : FC) ต่อขนานกับรีแอกเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor-Controlled Reactor : TCR) ดังนั้นในขั้นตอนแรกของการดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC จะต้องทำการออกแบบคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของ FC และอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของ TCR เช่นเดียวกับอุปกรณ์ SVC ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของ FC และอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของ TCR ให้มีค่าเท่ากับ

$X_C = 0.00526$ และ $X_L = 0.000526$ คุณลักษณะของค่ารีแอคแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC ที่ได้ทำการออกแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 จุดทำงานที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์อยู่ที่ ตำแหน่ง $\alpha_{TCSC}^0 = 143.647^\circ$



รูปที่ 5.10 คุณลักษณะของค่ารีแอคแตนซ์สมมูลของอุปกรณ์ TCSC

จากรูปที่ 5.10 เราสามารถแบ่งพื้นที่การทำงานของอุปกรณ์ TCSC ออกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่

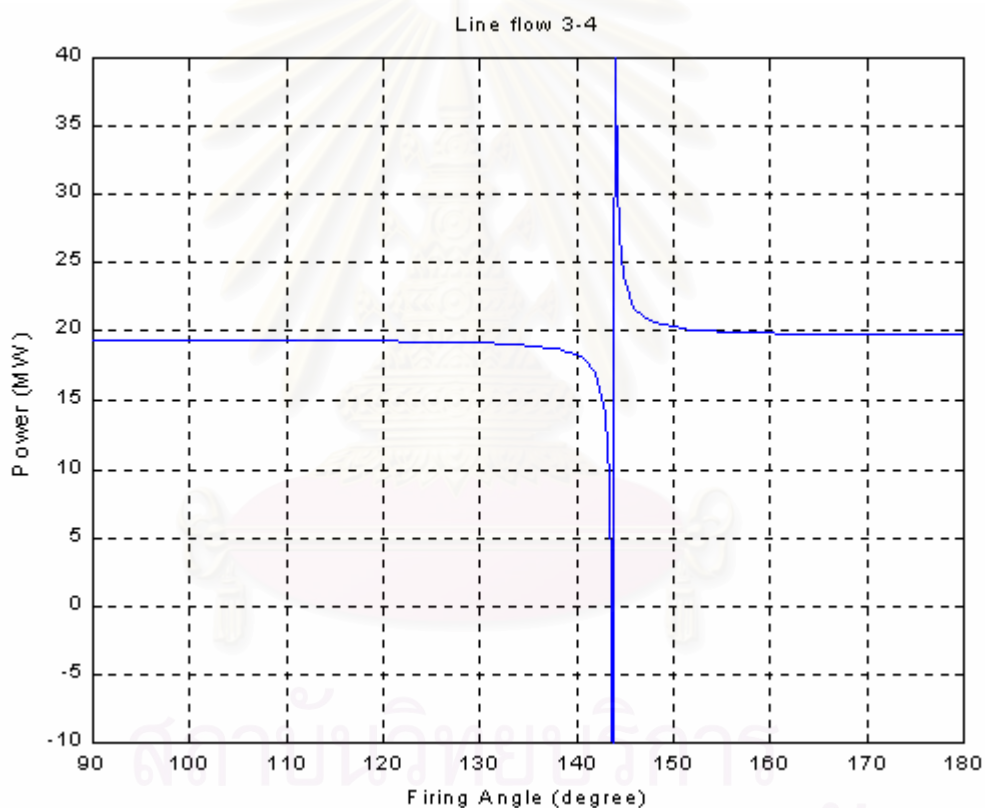
3) พื้นที่การทำงานแบบอินดักทีฟ เมื่อมุมจุดชนวนเกิดอยู่ในช่วง $90^\circ \leq \alpha_{TCSC} < \alpha_{TCSC}^0$

4) พื้นที่การทำงานแบบคาปาซิทีฟ เมื่อมุมจุดชนวนเกิดอยู่ในช่วง $\alpha_{TCSC}^0 < \alpha_{TCSC} \leq 180$

หลังจากออกแบบคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของ FC และอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของ TCR เสร็จแล้ว เราจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ที่สายส่ง 3-4 โดยเชื่อมต่ออุปกรณ์ TCSC เข้ากับบัสที่ 3 แล้วทำการปรับค่ามุมจุดชนวนเกิดของอุปกรณ์ TCSC ที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์ โฟลว์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ TCSC ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ผลการทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.11

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อปรับมุมจุดชนวนเกิดในพื้นที่การทำงานแบบคาปาซิทีฟทีฟจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้นและจะเพิ่มขึ้นอย่างมากหากมีการปรับมุมจุดชนวนเกิดให้มีค่าเข้าใกล้จุดทำงานที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ ในขณะเดียวกันหากมีการปรับมุมจุดชนวนเกิด

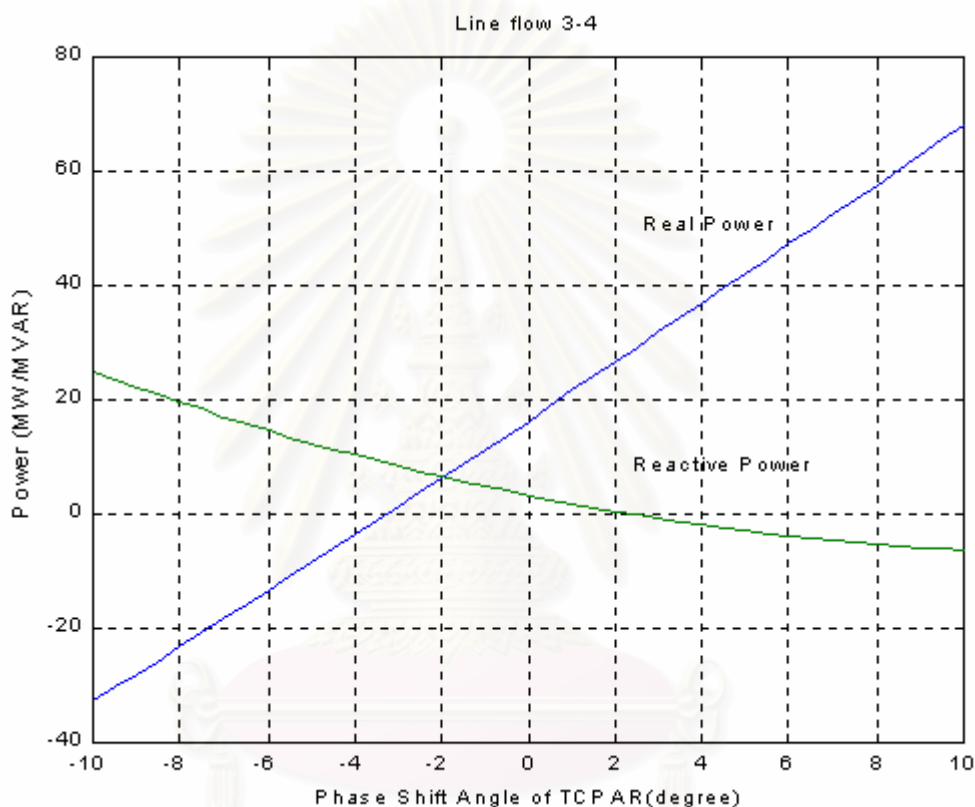
ในพื้นที่การทำงานแบบอินดักทีฟแล้วจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าลดลงและจะลดลงอย่างมากหากมีการปรับมุมจุดชนวนเกดให้มีความเข้าใกล้จุดทำงานที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ ดังนั้นเราสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งได้โดยการควบคุมมุมจุดชนวนเกดของอุปกรณ์ TCSC การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งด้วยอุปกรณ์ TCSC จะมีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม ส่วนที่แตกต่างกันและเป็นข้อได้เปรียบของอุปกรณ์ TCSC ก็คือลักษณะของการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งที่มีความต่อเนื่องอันเนื่องมาจากคุณลักษณะของรีแอคแตนซ์สมมูลที่มีความต่อเนื่องนั่นเองทำให้การทำงานมีความยืดหยุ่น (flexible) มากกว่าและมีขอบเขตในการควบคุมที่กว้างกว่าในกรณีของอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม นอกจากนี้อุปกรณ์ TCSC ยังมีลักษณะการทำงานที่รวดเร็วกว่าด้วย



รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์ โฟลว์เมื่อทำการปรับมุมจุดชนวนเกดของอุปกรณ์ TCSC ที่ติดตั้งบนสายส่ง 3-4

8. อุปกรณ์ Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR)

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR ที่สายส่ง 3-4 โดยเชื่อมต่ออุปกรณ์ TCPAR เข้ากับบัสที่ 3 แล้วทำการปรับมุมเฟสของอุปกรณ์ TCPAR ที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ TCPAR ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง โดยกำหนดให้อุปกรณ์ TCPAR มีขอบเขตของการปรับตั้งเท่ากับ $-10^{\circ} \leq \delta \leq 10^{\circ}$ และมีค่ารีแอกแตนซ์เท่ากับ 0.05 เปอรูยูนิต ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับมุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปของอุปกรณ์ TCPAR ที่ติดตั้งบนสายส่ง 3-4

จากผลการทดสอบพบว่า การปรับมุมเฟสของอุปกรณ์ TCPAR จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมากกว่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ ดังนั้นจึงนิยมใช้อุปกรณ์ TCPAR ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงมากกว่าที่จะใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ การปรับมุมเฟสของอุปกรณ์ TCPAR เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การปรับมุมเฟสของอุปกรณ์ TCPAR ลดลงจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าลดลง สาเหตุที่มีผลการทดสอบตรงกันข้ามกับกรณีของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟสก็เนื่องจากว่าแบบจำลองที่นำมาใช้มีแต่ปฏิกิริยาที่ตรงกัน การควบคุม

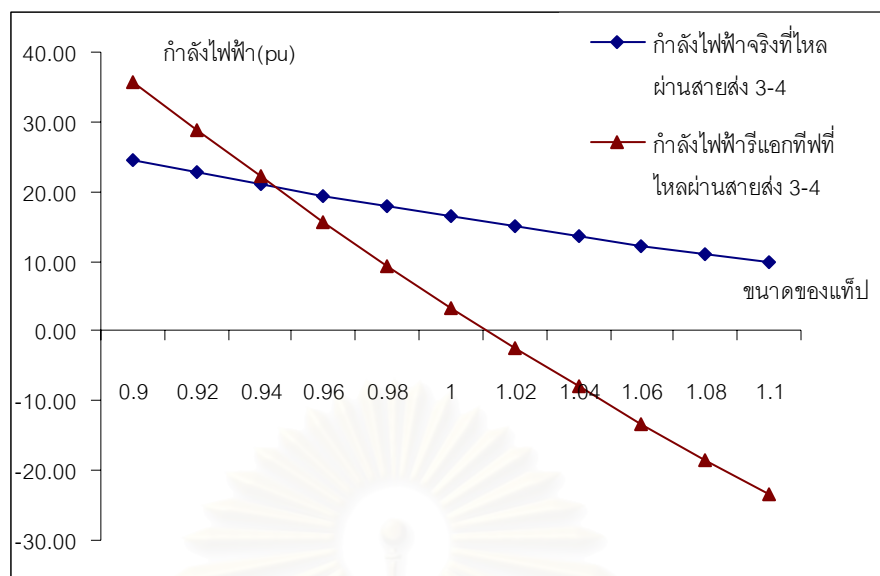
กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งด้วยอุปกรณ์ TCPAR จะมีลักษณะเหมือนกันกับหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟสเกือบทุกอย่าง ส่วนที่แตกต่างกันและเป็นข้อได้เปรียบของอุปกรณ์ TCPAR ก็คือลักษณะของการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งที่มีความต่อเนื่องอันเนื่องมาจากการที่เราสามารถควบคุมขนาดของแรงดันแบบควอดเรเจอร์ได้อย่างต่อเนื่องด้วยไทรสเตอร์ อุปกรณ์ TCPAR มีขอบเขตในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่กว้างมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงแบบอื่นๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วเนื่องจากอุปกรณ์ TCPAR มีดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับมุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปที่สูงกว่านั่นเอง

9. หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ป

ทำการติดตั้งหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ปที่สายส่ง 3-4 โดยเชื่อมต่อหม้อแปลงควบคุมเข้ากับบัสที่ 3 แล้วทำการปรับขนาดของแท็ปหม้อแปลงที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ปที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง โดยกำหนดให้หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ปมีขอบเขตของการปรับตั้งเท่ากับ $0.9 \leq a \leq 1.1$ และมีค่ารีแอกแตนซ์เท่ากับ 0.05 เปอรียูนิต ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.12 และรูปที่ 5.13

ตารางที่ 5.12 แสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับขนาดแท็ปของหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็ป

ขนาดของแท็ป	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง
0.9	24.4405	35.7142
0.92	22.7206	28.8195
0.94	21.0563	22.1396
0.96	19.4482	15.678
0.98	17.8967	9.43656
1	16.4019	3.41564
1.02	14.9634	-2.38537
1.04	13.5807	-7.96816
1.06	12.2529	-13.3353
1.08	10.9791	-18.4899
1.1	9.75818	-23.4359



รูปที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เมื่อทำการปรับขนาดของแท็บหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็บ

จากผลการทดสอบพบว่า การปรับขนาดของแท็บหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็บจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่งมากกว่ากำลังไฟฟ้าจริง ดังนั้นจึงนิยมใช้หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็บในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากกว่าที่จะใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง การปรับขนาดของแท็บหม้อแปลงเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าลดลง ในขณะที่การปรับขนาดของแท็บหม้อแปลงลดลงจะทำให้กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเราสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้โดยการควบคุมขนาดของแท็บหม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท็บนั่นเอง

10. ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ทำการปลดสายส่ง 3-4 ออกจากระบบแล้วติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีคุณลักษณะดังตารางที่ 5.13 เข้าไปแทนที่ โดยอาศัยโหมดการทำงานแบบควบคุมกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant Power) กล่าวคือ กำหนดให้มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านส่งให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่งและควบคุมขนาดแรงดันทางด้านรับให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ในขณะเดียวกันจะควบคุมมุมจุดชนวนเกตให้ทำงานที่ค่าต่ำสุดเพื่อทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในกระบวนการแปลงผันมีค่าต่ำสุด เราจะทำการทดสอบหลายๆ ครั้งเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยในแต่ละครั้งจะทำการปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านส่ง (P_{dr} ในตารางที่ 5.13) ที่เราทำการควบคุมอยู่ให้มีค่าต่าง ๆ กัน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.14-5.15

ตารางที่ 5.13 คุณลักษณะของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

Items	Converter 1	Converter 2
AC Busbar	Bus 3	Bus 4
Commutation reactance	0.126 pu	0.0728 pu
D.C. Power	Pdr MW	-
Firing Angle	7 deg	-
Extinction angle	-	10 deg
Inverter d.c. voltage	-	1.20 pu
D.C. link reactance	0.334 ohms	

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์โพลาร์เมื่อติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

No.	Pdr(MW)	Qdr(MVAR)	Vdr(pu)	ar	Pdi(MW)	Qdi(MVAR)	Vdi(pu)	ai	ld(pu)
1	5	0.767681	1.20014	0.903159	-4.99942	0.949553	1.2	0.932161	0.041662
2	7.5	1.25126	1.20021	0.906486	-7.4987	1.47269	1.2	0.932738	0.062489
3	10	1.79171	1.20028	0.90989	-9.99768	2.02607	1.2	0.933363	0.083314
4	12.5	2.38414	1.20035	0.913366	-12.4964	2.60841	1.2	0.934034	0.104136
5	15	3.02474	1.20042	0.916913	-14.9948	3.21859	1.2	0.93475	0.124957
6	17.5	3.71042	1.20049	0.92053	-17.4929	3.85559	1.2	0.93551	0.145774
7	20	4.43865	1.20056	0.924216	-19.9907	4.51849	1.2	0.936312	0.166589
8	22.5	5.20726	1.20063	0.927969	-22.4883	5.20647	1.2	0.937155	0.187402
9	25	6.0144	1.2007	0.93179	-24.9855	5.91876	1.2	0.93804	0.208213
10	27.5	6.85848	1.20076	0.93568	-27.4825	6.65469	1.2	0.938964	0.229021
11	30	7.73808	1.20083	0.939637	-29.9792	7.4136	1.2	0.939928	0.249826
12	32.5	8.65195	1.2009	0.943663	-32.4755	8.19491	1.2	0.94093	0.270629
13	35	9.59896	1.20097	0.947758	-34.9716	8.99808	1.2	0.941971	0.29143
14	37.5	10.5781	1.20104	0.951923	-37.4674	9.82259	1.2	0.943049	0.31229
15	40	11.5885	1.20111	0.95616	-39.963	10.668	1.2	0.944165	0.333025
16	50	15.9264	1.20139	0.973837	-49.9421	14.2498	1.2	0.948997	0.416185
17	60	20.7074	1.20167	0.992759	-59.9167	18.1346	1.2	0.95441	0.499306
18	70	25.8985	1.20195	1.01304	-69.8867	22.3027	1.2	0.960402	0.582389
19	80	31.4739	1.20222	1.03485	-79.8521	26.7381	1.2	0.966977	0.665434
20	90	37.4127	1.2025	1.05839	-89.8129	31.4273	1.2	0.974149	0.748441
21	100	43.6975	1.20278	1.08391	-99.7691	36.3589	1.2	0.98194	0.831409
22	110	50.3139	1.20305	1.11176	-109.721	41.5229	1.2	0.990379	0.91434

ตารางที่ 5.15 แสดงผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์เมื่อติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

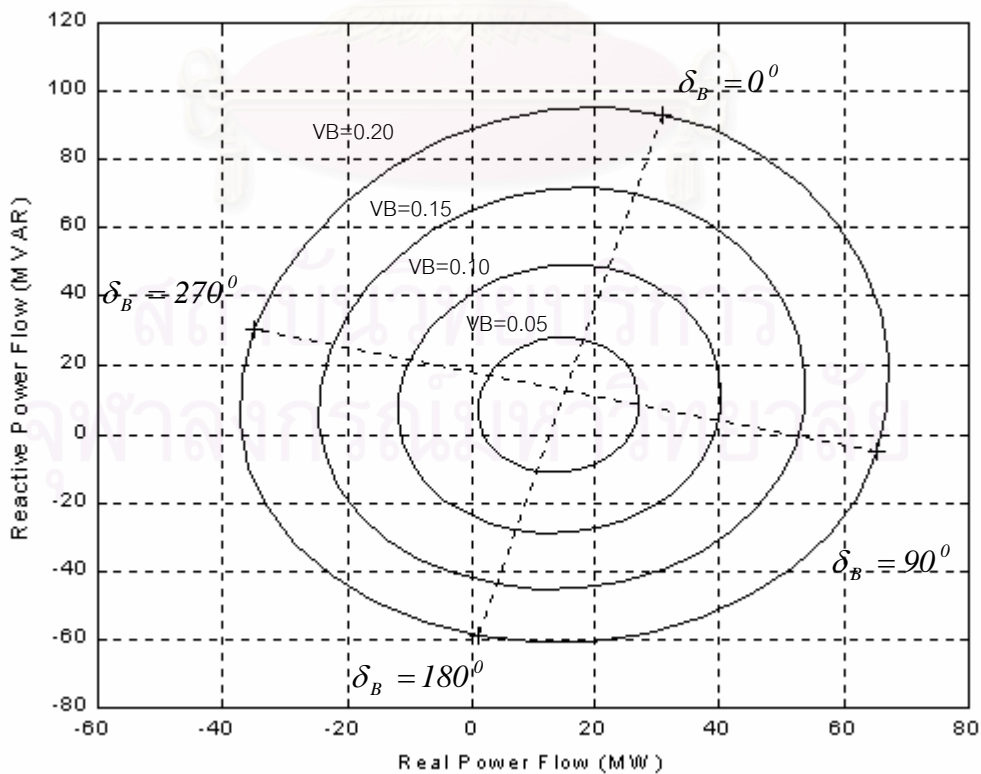
No.	Pdr(MW)	V3(pu)	V4(pu)	Ploss(MW)	Qloss(MVAR)
1	5	0.995498	0.970285	0.0006	1.717234
2	7.5	0.993964	0.970852	0.0013	2.72395
3	10	0.992358	0.971368	0.0023	3.81778
4	12.5	0.990684	0.971836	0.0036	4.99255
5	15	0.988946	0.972255	0.0052	6.24333
6	17.5	0.987147	0.972629	0.0071	7.56601
7	20	0.985288	0.972958	0.0093	8.95714
8	22.5	0.983372	0.973243	0.0117	10.41373
9	25	0.9814	0.973485	0.0145	11.93316
10	27.5	0.979372	0.973685	0.0175	13.51317
11	30	0.97729	0.973844	0.0208	15.15168
12	32.5	0.975154	0.973962	0.0245	16.84686
13	35	0.972965	0.974041	0.0284	18.59704
14	37.5	0.970724	0.97408	0.0326	20.40069
15	40	0.968429	0.97408	0.0370	22.2565
16	50	0.958728	0.9737	0.0579	30.1762
17	60	0.94818	0.97273	0.0833	38.842
18	70	0.936759	0.971184	0.1133	48.2012
19	80	0.924421	0.969069	0.1479	58.212
20	90	0.9111	0.966388	0.1871	68.84
21	100	0.896708	0.963138	0.2309	80.0564
22	110	0.881127	0.959308	0.2790	91.8368

จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.14-5.15 พบว่าเราสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงที่ส่งผ่านระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในโหมดการทำงานแบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ได้โดยการคำนวณหาค่าปรับตั้งของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า หลังจากคำนวณเสร็จแล้วก็นำมาปรับตั้งค่าให้แก่อุปกรณ์ต่าง ๆ จนครบก็จะสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ตามต้องการ จากตารางพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่สถานีด้านส่งให้สูงขึ้นจะทำให้หม้อแปลงทางด้านส่ง (เรกติไฟเออร์) ต้องปรับแก้มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเราได้ทำการควบคุมขนาดแรงดันกระแสตรงทางด้านรับให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1.2 เปอรฺยูนิต ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณกำลังไฟฟ้าให้ไหลผ่านมากขึ้นจะต้องมีการเพิ่มขนาดแรงดันกระแสตรงทางด้านส่งให้มีค่าสูงขึ้นซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับแก้เพิ่มขึ้นนั่นเอง ในกรณีที่เกิดปัญหาที่ปของหม้อแปลงมีค่าเกิน

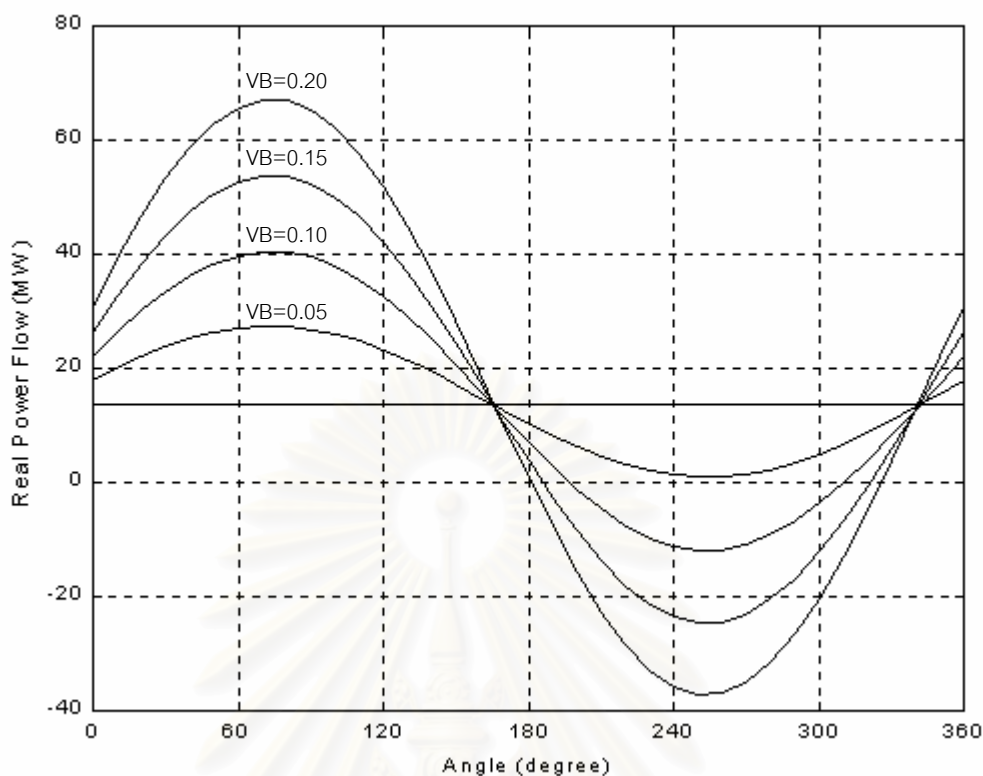
ขีดจำกัดที่ระบุดังเช่นในลำดับที่ 22 ของกรณีตัวอย่าง เราจะทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการปรับลดระดับแรงดันกระแสตรงทางด้านรับลงก็จะสามารถควบคุมให้แท๊ปของหม้อแปลงมีค่าอยู่ในขอบเขตที่ระบุได้ นอกจากนี้ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงยังต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในปริมาณที่สูงมากเพื่อใช้ในกระบวนการแปลงผันกำลังไฟฟ้าทำให้ขนาดแรงดันของบัลซึ่งติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเกิดปัญหาแรงดันตกต่ำกว่าพิกัดขึ้นได้ ดังนั้นจึงควรติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ณ บัลที่ติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อชดเชยแรงดันที่บัลให้มีระดับแรงดันที่เหมาะสม เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากรางจะพบว่ามีการสูญเสียอย่างมากเนื่องจากความต้านทานของสายส่งมีค่าต่ำนั่นเอง

11. อุปกรณ์ Unified Power Flow Controller (UPFC)

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ที่สายส่ง 3-4 โดยเชื่อมต่ออุปกรณ์ UPFC เข้ากับบัลที่ 3 แล้วทำการปรับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC ที่ค่าต่าง ๆ กันและทำการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ UPFC ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง โดยกำหนดให้อุปกรณ์ UPFC มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ $X_B = 0.1, X_E = 0.1$ pu และมีขอบเขตของการปรับตั้งเท่ากับ $0 \leq V_B \leq 0.25, 0 \leq \delta_B \leq 2\pi, 0.8 \leq V_E \leq 1.2$ และ $0 \leq \delta_E \leq 2\pi$ กำหนดให้ V_E ทำหน้าที่ควบคุมขนาดแรงดันที่บัล 3 ให้มีค่าเท่ากับ 1 pu และ δ_E ทำหน้าที่ควบคุมความสมดุลของกำลังไฟฟ้าจริง สำหรับ V_B และ δ_B จะทำการปรับตั้งที่ค่าต่าง ๆ กันเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง 3-4 ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.14 – 5.15



รูปที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวกรณีติดตั้งอุปกรณ์ UPFC



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับ V_B และ δ_B

จากผลการทดสอบพบว่า การปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC อย่างเหมาะสมจะทำให้สามารถควบคุมขนาดแรงดันที่บัส ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากรูปที่ 5.14 พบว่า ณ ตำแหน่งกำลังไฟฟ้าจริงค่าหนึ่งสามารถกำหนดให้มีกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้หลายค่าโดยอาศัยการปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวแบบนี้จะไม่สามารถพบในอุปกรณ์ TCSC หรือ TCPAR ใด ๆ เลย ทำให้อุปกรณ์ TCSC และ TCPAR ไม่สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้ หากพิจารณาขอบเขตในการควบคุมแล้วเราจะพบว่าอุปกรณ์ UPFC มีขอบเขตในการควบคุมมากที่สุดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษที่สามารถผลิตกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้ในตัวเองทำให้สามารถควบคุมขนาดแรงดันที่บัสได้อย่างเป็นอิสระจากการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ด้วยความสามารถอันหลากหลายของอุปกรณ์ UPFC ทำให้เหมาะสมสำหรับการนำไปปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันที่ต้องการอุปกรณ์ที่สามารถใช้งานได้อย่างภายในอุปกรณ์ตัวเดียว

หลังจากได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบไฟฟ้ากำลังไปแล้ว ในส่วนที่สองของหัวข้อนี้จะทำการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ โดยใช้ระบบทดสอบ 3 ระบบเป็นตัวอย่างในการศึกษาดังนี้

1. ระบบทดสอบ STAGG 5 บัส

ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ที่สายส่ง 3-4 โดยเชื่อมต่ออุปกรณ์ UPFC เข้ากับบัสที่ 3 และทำการควบคุมขนาดแรงดันที่บัส 3 ให้มีค่าเท่ากับ 1.0 เปรอริยูนิตและควบคุมขนาดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง 3-4 ให้มีค่าเท่ากับ 40 MW และ 2 MVAR ตามลำดับ ผลการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์แสดงดังตารางที่ 5.16-5.18

ตารางที่ 5.16 แสดงผลของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่บัสเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

Bus No.	Voltage Magnitude	Voltage Angle	P_G (MW)	Q_G (MVAR)	P_D (MW)	Q_D (MVAR)
1	1.06	0	131.484	85.767	0	0
2	1	-1.76926	40	-75.4874	20	10
3	1	-6.01606	0	0	45	15
4	0.991666	-3.19064	0	0	40	5
5	0.97451	-4.97412	0	0	60	10
6	0.996511	-2.51222	0	0	0	0

ตารางที่ 5.17 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งและกำลังสูญเสียเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

From Bus	To Bus	P_{ik} (MW)	Q_{ik} (MW)	P_{loss} (MW)	Q_{loss} (MVAR)
1	3	50.3406	9.34325	1.90947	0.419422
1	2	81.143	76.4237	2.30533	0.545199
2	5	47.6145	5.14047	0.924494	-0.151022
2	4	13.7391	-1.77999	0.113288	-3.62694
2	3	37.4841	-12.9693	0.915229	-1.25431
2	1	-78.8377	-75.8785	2.30533	0.545199
3	2	-36.5688	11.715	0.915229	-1.25431
3	1	-48.4312	-8.92382	1.90947	0.419422
4	6	-39.838	-3.49036	0.162024	-1.49036
4	5	13.4638	0.337314	0.153827	-4.3712
4	2	-13.6259	-1.84695	0.113288	-3.62694
5	4	-13.31	-4.70851	0.153827	-4.3712
5	2	-46.69	-5.29149	0.924494	-0.151022
6	4	40	2	0.162024	-1.49036

ตารางที่ 5.18 แสดงผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC

Iteration	V_B	δ_B	V_E	δ_E	Mismatch
0	0.01	90	1.0	0	0.6
1	0.100518	84.5005	1.01523	-5.88372	0.0462294
2	0.101130	87.282	1.01735	-6.00528	0.00129377
3	0.101256	87.2685	1.01734	-6.00549	2.96267e-07
4	0.101256	87.2685	1.01734	-6.00549	4.35207e-14

2. ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส (อ้างอิงจากรายการอ้างอิง[6])

ทำการปลดสายส่ง 4-5 ออกจากระบบแล้วติดตั้งระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีคุณลักษณะดังตารางที่ 5.19 เข้าไปแทนที่ แล้วทำการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 58.6 MW ผลการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์แสดงดังตารางที่ 5.20 (แสดงผลเฉพาะข้อมูล HVDC)

ตารางที่ 5.19 คุณลักษณะของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

Items	Converter 1	Converter 2
AC Busbar	Bus 3	Bus 4
Commutation reactance	0.126 pu	0.0728 pu
D.C. Power	58.6 MW	-
Firing Angle	7 deg	-
Extinction angle	-	10 deg
Inverter d.c. voltage	-	1.20 pu
D.C. link reactance	0.334 ohms	

หมายเหตุ ระบบทดสอบในหัวข้อนี้ได้นำมาจากรายการอ้างอิง[6]

ตารางที่ 5.20 แสดงผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

Iteration	Pdr (pu)	Qdr (pu)	Vdr (pu)	ar	Pdi (pu)	Qdi (pu)	Vdi (pu)	ai	Id (pu)	Mismatch
0	0.586	0.283813	1.2887	1	0.586	0.283813	1.2887	1	0.454722	0.921935
1	0.586	0.185987	1.29022	0.970339	0.58531	0.158102	1.2887	0.930974	0.454187	0.089130
2	0.586	0.187961	1.29022	0.972185	0.58531	0.167848	1.2887	0.935008	0.454187	0.009937
3	0.586	0.187964	1.29022	0.972323	0.58531	0.167848	1.2887	0.935589	0.454187	5.8126E-06
4	0.586	0.187965	1.29022	0.972323	0.58531	0.167849	1.2887	0.935590	0.454187	8.5368E-07
5	0.586	0.187965	1.29022	0.972323	0.58531	0.167849	1.2887	0.935590	0.454187	6.4937E-13

3. ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส

ผลการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในกรณีพื้นฐานของระบบทดสอบ IEEE 118 บัสแสดงดังตารางที่ 5.21 เราจะทำการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสและควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งตามค่าที่ระบุไว้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ เข้าไปในระบบทดสอบ IEEE 118 บัสดังแสดงในตารางที่ 5.22 กำหนดให้อุปกรณ์ควบคุมแต่ละชนิดที่ติดตั้งมีคุณลักษณะดังนี้

$$SVC 1 : X_C = 0.45 pu , X_L = 0.20 pu$$

$$SVC 2 : X_C = 0.96 pu , X_L = 0.45 pu$$

$$SVC 3 : X_C = 0.45 pu , X_L = 0.20 pu$$

$$TCSC : X_C = 0.00526 pu , X_L = 0.000526 pu$$

$$TCPAR1 : X = 0.01 pu$$

$$TCPAR2 : X = 0.01 pu$$

$$UPFC : X_B = 0.01 pu , X_E = 0.01 pu$$

ผลการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์แสดงดังตารางที่ 5.23-5.24

ตารางที่ 5.21 แสดงผลการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในกรณีพื้นฐานของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส

Bus No.	Voltage Magnitude	Line	Pik	Qik
11	0.985089	5-11	77.2055	2.9697
16	0.983911	11-13	35.0612	11.4145
53	0.945982	17-31	14.7721	11.5479
75	0.967333	30-38	62.5329	18.0841

ตารางที่ 5.22 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการควบคุมและอุปกรณ์ควบคุม

Bus No.	Voltage Magnitude	Devices	Line	Pik	Qik	Devices
11	1.00	UPFC	5-11	100.0	-	TCPAR1
16	1.00	SVC1	11-13	50.0	50	UPFC
53	1.00	SVC2	17-31	20.0	-	TCSC
75	1.00	SVC3	30-38	80.0	-	TCPAR2

ตารางที่ 5.23 แสดงผลการคำนวณเพาเวอร์โพล์ของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส

Iteration	V_B	δ_B	V_E	δ_E	Mismatch
0	0.05	0	1.0	0	5.88939
1	0.124296	9.81484	1.00915	-13.4728	3.20563
2	0.114879	-3.75339	1.01512	-19.1144	0.771175
3	0.121865	-6.28888	1.01555	-19.1773	0.472489
4	0.121948	-6.12558	1.01554	-19.1928	0.0358758
5	0.121948	-6.12617	1.01554	-19.1928	0.0002683
6	0.121948	-6.12617	1.01554	-19.1928	1.54787-08

ตารางที่ 5.24 แสดงผลการคำนวณเพาเวอร์โพล์ของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส

Iteration	α_1^{SVC}	α_2^{SVC}	α_3^{SVC}	α^{TCSC}	α_1^{TCPAR}	α_2^{TCPAR}	Mismatch
0	135	135	135	145	0	0	5.88939
1	116.018	133.329	141.229	143.369	1.52896	0.170823	3.20563
2	120.04	134.042	144.82	145.272	1.34891	2.81781	0.771175
3	120.086	134.044	122.502	144.554	1.24794	2.81875	0.472489
4	120.084	134.044	128.797	144.553	1.23921	2.82519	0.0358758
5	120.084	134.044	129.329	144.553	1.23948	2.82521	0.0002683
6	120.084	134.044	129.333	144.553	1.23948	2.82521	1.54787-08

จากผลการทดสอบทั้ง 3 ระบบพบว่าเราสามารถนำอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ไปใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงขึ้นเพราะสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ตามต้องการ สิ่งสำคัญที่สุดในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าก็คือการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โพล์ จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอมีประสิทธิภาพสูง สามารถคำนวณหาตัวแปรสถานะและตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว แม้กระทั่งเมื่อนำทดสอบกับระบบขนาดใหญ่ 118 บัสก็ยังสามารถคำนวณหาค่าตอบได้อย่างรวดเร็ว

5.3 ตัวอย่างการแก้ไขปัญหาคำลั้งเกินในสายส่ง

ระบบทดสอบที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการแสดงผลของการแก้ไขปัญหาคำลั้งเกินในสายส่งด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ได้แก่ ระบบทดสอบของ IEEE 30 บัสที่ได้รับการดัดแปลงสำหรับรายละเอียดของข้อมูลระบบทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์ของระบบทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทำงานปกติพบว่า คำลั้งไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งทุกเส้นภายในระบบมีค่าอยู่ภายในพิสัยที่กล่าวคือไม่เกิดปัญหาคำลั้งเกินในสายส่งแต่ผลการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์ของระบบทดสอบภายใต้เงื่อนไขการเกิดเหตุขัดข้องพบว่าเกิดปัญหาคำลั้งเกินในสายส่งขึ้นดังแสดงในตารางที่ 5.25

ตารางที่ 5.25 แสดงเงื่อนไขการเกิดเหตุขัดข้องและคำลั้งเกินในสายส่ง

กรณีเหตุขัดข้อง	สายส่งคำลั้งเกิน	คำลั้งเกิน(pu)
L2 (1-3)	L3 (2-4)	1.1330
L4 (3-4)	L3 (2-4)	1.1167
L5 (2-5)	L3 (2-4)	1.0217
	L7 (4-6)	1.2252
L7 (4-6)	L15 (4-12)	1.1569
	L18 (12-15)	1.2150
	L19 (12-16)	1.2039
L11 (6-9)	L15 (4-12)	0.9982
	L18 (12-15)	1.0104
	L19 (12-16)	0.9699
L14 (9-10)	L15 (4-12)	1.0122
	L18 (12-15)	1.0249
	L19 (12-16)	0.9876
L17 (12-14)	L18 (12-15)	1.1038
L25 (10-20)	L18 (12-15)	1.0392
L36 (27-28)	L18 (12-15)	1.0451
	L30 (15-23)	1.0524

ในตัวอย่างนี้จะแสดงวิธีการแก้ไขปัญหาลังเกินในสายส่งที่เกิดขึ้นโดยการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบเพื่อแก้ไขปัญหาลังเกินที่เกิดขึ้น เราสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC จำนวน 2 อุปกรณ์เข้าไปในระบบ

กรณีที่ 2 ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR จำนวน 2 อุปกรณ์เข้าไปในระบบ

กรณีที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC จำนวน 2 อุปกรณ์เข้าไปในระบบ

สำหรับตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ให้พิจารณาจากดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งมีนิยามดังสมการที่ (3.55) ดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของแต่ละกรณีแสดงได้ดังตารางที่ 5.26-5.28

ตารางที่ 5.26 แสดงดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของอุปกรณ์ TCSC

ลำดับที่	สายส่ง	ดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสม
1	L6 (2-6)	0.63970
2	L18 (12-15)	0.53933
3	L3 (2-4)	0.38426
4	L17 (12-14)	0.32804
5	L19 (12-16)	0.32240

ตารางที่ 5.27 แสดงดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของอุปกรณ์ TCPAR

ลำดับที่	สายส่ง	ดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสม
1	L18 (12-15)	1.73394
2	L7 (4-6)	1.47155
3	L19 (12-16)	1.21670
4	L26 (10-17)	1.19978
5	L21 (16-17)	1.19547

ตารางที่ 5.28 แสดงดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของอุปกรณ์ UPFC

ลำดับที่	กรณีที่ 1 เทียบกับ V_B		กรณีที่ 2 เทียบกับ δ_B	
	สายส่ง	ดัชนี	สายส่ง	ดัชนี
1	L18 (12-15)	5.25577	L18 (12-15)	$9.88294 V_B$
2	L7 (4-6)	3.86772	L7 (4-6)	$8.61002 V_B$
3	L19 (12-16)	3.69011	L19 (12-16)	$6.80294 V_B$
4	L21 (16-17)	3.62421	L21 (16-17)	$6.58572 V_B$
5	L26 (10-17)	3.54740	L26 (10-17)	$6.47406 V_B$

ผลการทดสอบการแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งของแต่ละกรณีสามารถแสดงได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC จำนวน 2 อุปกรณ์เข้าไปในระบบ

ตารางที่ 5.26 แสดงผลการจัดเรียงลำดับของดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC จากตารางพบว่า สายส่ง L6(2-6) และสายส่ง L18(12-15) มีค่าดัชนีสูงสุด ดังนั้นเราจึงพิจารณาเลือกตำแหน่งสายส่ง L6(2-6) และสายส่ง L18(12-15) สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ TCSC หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC แล้วในขั้นตอนต่อไปจะทำการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่ง ผลการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ TCSC และผลการแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งแสดงดังตารางที่ 5.29 ผลการทดสอบในตารางพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ TCSC จำนวน 2 อุปกรณ์เข้าไปในระบบสามารถแก้ปัญหาลำดับเกินในสายส่งได้หมดทุกกรณีของการเกิดเหตุขัดข้อง

กรณีที่ 2 ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR จำนวน 2 อุปกรณ์เข้าไปในระบบ

ตารางที่ 5.27 แสดงผลการจัดเรียงลำดับของดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR จากตารางพบว่า สายส่ง L18(12-15) และสายส่ง L7(4-6) มีค่าดัชนีสูงสุด ดังนั้นเราจึงพิจารณาเลือกตำแหน่งสายส่ง L18(12-15) และสายส่ง L7(4-6) สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR แล้วในขั้นตอนต่อไปจะทำการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่ง ผลการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ TCPAR และผลการแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งแสดงดังตารางที่ 5.30 จากผลการทดสอบในตารางพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR จำนวน 2 อุปกรณ์เข้าไปในระบบสามารถแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งได้หมดทุกกรณีของการเกิดเหตุขัดข้อง ในกรณีเหตุขัดข้อง L7(4-6) เราจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR ที่สายส่ง L26(10-17) ซึ่งก็จะสามารถแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งให้หมดไปได้เช่นกัน

กรณีที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC จำนวน 2 อุปกรณ์เข้าไปในระบบ

ตารางที่ 5.28 แสดงผลการจัดเรียงลำดับของดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC จากตารางพบว่า สายส่ง L18(12-15) และสายส่ง L7(4-6) มีค่าดัชนีสูงสุด ดังนั้นเราจึงพิจารณาเลือกตำแหน่งสายส่ง L18(12-15) และสายส่ง L7(4-6) สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ UPFC หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ UPFC แล้วในขั้นตอนต่อไปจะทำการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่ง ผลการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC และผลของการแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งแสดงดังตารางที่ 5.31 จากผลการทดสอบในตารางพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ UPFC จำนวน 2 อุปกรณ์เข้าไปในระบบสามารถแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งได้หมดทุกกรณีของการเกิดเหตุขัดข้อง ในกรณีเหตุขัดข้อง L7(4-6) เราจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ที่สายส่ง L26(10-17) ซึ่งก็จะสามารถแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งให้หมดไปได้เช่นกัน

ตารางที่ 5.29 ผลการคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์และผลการแก้ไขปัญหาคำลั้งเกินในสายส่ง

เหตุขัดข้อง	สายส่ง คำลั้งเกิน	X_{TCSC} (pu) (%)		คำลั้งเกิน (pu)	เปลี่ยนแปลง (%)
		TCSC ที่ L6	TCSC ที่ L18		
L2	L3	-0.0580 (-32.90%)	0	0.9836	-13.183
L4	L3	-0.05140 (-29.15%)	0	0.9875	-11.568
L5	L3	-0.08170 (-46.34%)	-0.0040 (-3.07%)	0.6486	-36.517
	L7			0.9730	-20.587
L7	L15	-0.10260 (-58.2%)	0.02194 (16.8%)	0.9998	-13.582
	L18			0.9987	-17.799
	L19			0.9368	-22.185
L11	L15	0	0.01000 (7.67%)	0.9962	-0.200
	L18			0.9882	-2.202
	L19			0.9791	0.949
L14	L15	-0.05075 (-28.8%)	0.02485 (19.1%)	0.9997	-1.230
	L18			0.9591	-6.417
	L19			0.9978	1.036
L17	L18	-0.09742 (-55.26%)	0.05245 (40.22)	0.9987	-9.520
L25	L18	-0.00400 (-2.27%)	0.02425 (18.6%)	0.9868	-5.044
L36	L18	-0.00783(-4.44%)	0.05170 (39.65%)	0.9258	-11.413
	L30			0.9995	-5.023

ตารางที่ 5.30 ผลการคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์และผลการแก้ไขปัญหาคำลั้งเกินในสายส่ง

เหตุขัดข้อง	สายส่ง คำลั้งเกิน	Phase Angle (degree)		คำลั้งเกิน (pu)	เปลี่ยนแปลง (%)
		TCPAR ที่ L7	TCPAR ที่ L18		
L2	L3	-2.189	-0.115	0.9952	-12.159
L4	L3	-1.920	-0.092	0.9960	-10.807
L5	L3	-3.200	-0.200	0.8942	-12.478
	L7			0.9970	-18.628
L7	L15	4.823 (TCPAR ที่ L26)	-5.114	0.9930	-14.170
	L18			0.5988	-50.714
	L19			0.9930	-17.517
L11	L15	0.010	-0.060	0.9969	-0.130
	L18			0.9997	-1.063
	L19			0.9736	0.382
L14	L15	0.344	-0.203	0.9977	-1.428
	L18			0.9780	-4.573
	L19			0.9817	-0.595
L17	L18	0.360	-0.780	0.9992	-9.475
L25	L18	0.060	-0.260	0.9993	-3.841
L36	L18	0.344	-0.573	0.9350	-10.533
	L30			0.9930	-5.640

ตารางที่ 5.31 ผลการคำนวณค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์และการแก้ไขปัญหาค่าลิ่งเกินในสายส่ง

เหตุ ขัดข้อง	สายส่ง กำลังเกิน	UPFC ที่ L7				UPFC ที่ L18				กำลังเกิน
		V_B	δ_B	V_E	δ_E	V_B	δ_B	V_E	δ_E	
L2	L3	0.050	195.6 ⁰	1.002	344.4 ⁰	0.005	180.1 ⁰	1.053	338.3 ⁰	0.9999
L4	L3	0.050	190.1 ⁰	1.002	344.4 ⁰	0.005	180.0 ⁰	1.053	338.5 ⁰	0.9989
L5	L3	0.055	243.2 ⁰	1.006	348.3 ⁰	0.010	178.7 ⁰	1.055	341.1 ⁰	0.8916
	L7									0.9958
L11	L15	0.0001	181.0 ⁰	1.010	350.3 ⁰	0.001	206.0 ⁰	1.059	343.1 ⁰	0.9973
	L18									0.9998
	L19									0.9741
L14	L15	0.005	40.51 ⁰	1.010	350.2 ⁰	0.005	206.1 ⁰	1.052	343.0 ⁰	0.9995
	L18									0.9630
	L19									0.9940
L17	L18	0.005	12.84 ⁰	1.012	350.3 ⁰	0.015	232.2 ⁰	1.058	345.0 ⁰	0.9947
L25	L18	0.0005	0.10 ⁰	1.012	350.3 ⁰	0.005	171.0 ⁰	1.054	344.3 ⁰	0.9986
L36	L18	0.005	13.25 ⁰	1.011	350.2 ⁰	0.010	208.9 ⁰	1.053	343.6 ⁰	0.9331
	L30									0.9993
เหตุ ขัดข้อง	สายส่ง กำลังเกิน	UPFC ที่ L26				UPFC ที่ L18				กำลังเกิน
		V_B	δ_B	V_E	δ_E	V_B	δ_B	V_E	δ_E	
L7	L15	0.150	7.50 ⁰	1.039	338.9 ⁰	0.150	186.8 ⁰	1.060	346.2 ⁰	0.9924
	L18									0.2564
	L19									0.8470

5.4 ตัวอย่างการเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ระบบทดสอบที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการแสดงผลของการเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ FACTS ได้แก่ ระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE 14 บัส สำหรับรายละเอียดของข้อมูลระบบทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

สมมติฐานหรือข้อกำหนดเบื้องต้นที่นำมาใช้ในการทดสอบมีดังนี้

1. การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสผู้ผลิตและบัสผู้ใช้กำลังไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นแบบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคงที่และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในกรณีพื้นฐาน

$$P_{Li} = \lambda P_{Li}^0 \quad (5.1)$$

$$Q_{Li} = \lambda Q_{Li}^0 \quad (5.2)$$

โดยที่	P_{Li}^0	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงของบัสผู้ใช้กำลังไฟฟ้า i ในกรณีพื้นฐาน
	Q_{Li}^0	คือ	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของบัสผู้ใช้กำลังไฟฟ้า i ในกรณีพื้นฐาน
	λ	คือ	ตัวคูณโหลด

2. ในกรณีของการเกิดเหตุขัดข้องที่มีผลทำให้เกิดการขาดแคลนกำลังผลิตไฟฟ้า จะกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ขาดแคลนดังกล่าว

3. ในการเลือกเหตุขัดข้องสำหรับการคำนวณหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะพิจารณาจากเหตุขัดข้องของสายส่งหรือหม้อแปลงเพียงอุปกรณ์เดียว และเมื่อมีเหตุขัดข้องเกิดขึ้นระบบยังคงทำงานอยู่ในสภาวะที่ปลอดภัย กล่าวคือไม่ก่อให้เกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับซึ่งได้แก่ เงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อนหรือสภาวะกำลังเกินและเงื่อนไขบังคับของแรงดัน

4. เมื่อมีการขัดแย้งเกิดขึ้นกับเงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อนให้ดำเนินการแก้ไขปัญหา กำลังเกินในสายส่งโดยการใช้อุปกรณ์ FACTS ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC เพื่อกำจัดสภาวะกำลังเกินที่เกิดขึ้น

5. เมื่อมีการขัดแย้งเกิดขึ้นกับเงื่อนไขบังคับของแรงดันให้ดำเนินการดังนี้

5.1 ในกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ SVC ณ ตำแหน่งบัสที่มีขนาดแรงดันขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของแรงดัน ให้ทำการควบคุมขนาดแรงดันที่บัสให้มีความเท่ากับ 1 เปรอ์ยูนิต

5.2 ในกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ SVC ณ ตำแหน่งบัสอื่นๆ ซึ่งไม่ใช่บัสที่ขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของแรงดัน ให้ทำการควบคุมขนาดแรงดันที่บัสให้มีความเท่ากับขีดจำกัดของเงื่อนไขบังคับของแรงดันเพื่อที่จะสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไปยังบัสอื่น ๆ ที่เกิดปัญหาได้

6. ในการคำนวณหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะพิจารณากรณีต่าง ๆ ดังนี้

กรณีที่ 1 ระบบทดสอบปกติ

กรณีที่ 2 ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC จำนวน 1 อุปกรณ์เข้าไปในระบบทดสอบ โดยที่อุปกรณ์ TCSC มีขอบเขตความสามารถในการทำงานในช่วง $-60\% X_L \leq X_{TCSC} \leq 60\% X_L$ เมื่อกำหนดให้ $X_C = 0.00526 pu$ และ $X_L = 0.000526 pu$

กรณีที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์ TCSC จำนวน 1 อุปกรณ์และอุปกรณ์ SVC จำนวน 1 อุปกรณ์เข้าไปในระบบทดสอบ โดยที่อุปกรณ์ TCSC มีขอบเขตความสามารถในการทำงานในช่วง $-60\% X_L \leq X_{TCSC} \leq 60\% X_L$ เมื่อกำหนดให้ $X_C = 0.00526 pu$ และ $X_L = 0.000526 pu$ และอุปกรณ์ SVC มีขอบเขตความสามารถในการทำงานในช่วง $90^\circ \leq \alpha_{SVC} \leq 180^\circ$ เมื่อกำหนดให้ $X_C = 0.9600 pu$ และ $X_L = 0.450 pu$

กรณีที่ 4 ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR จำนวน 1 อุปกรณ์เข้าไปในระบบทดสอบ โดยที่อุปกรณ์ TCPAR มีขอบเขตความสามารถในการทำงานในช่วง $-7.5^\circ \leq \delta \leq 7.5^\circ$

กรณีที่ 5 ติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR จำนวน 1 อุปกรณ์และอุปกรณ์ SVC จำนวน 1 อุปกรณ์เข้าไปในระบบทดสอบ โดยที่อุปกรณ์ TCPAR มีขอบเขตความสามารถในการทำงานในช่วง

$-7.5^\circ \leq \delta \leq 7.5^\circ$ และอุปกรณ์ SVC มีขอบเขตความสามารถในการทำงานอยู่ในช่วง $90^\circ \leq \alpha_{SVC} \leq 180^\circ$ เมื่อกำหนดให้ $X_C = 0.9600 pu$ และ $X_L = 0.450 pu$

กรณีที่ 6 ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC จำนวน 1 อุปกรณ์เข้าไปในระบบทดสอบ โดยที่อุปกรณ์ UPFC มีขอบเขตความสามารถในการทำงานอยู่ในช่วง $0 \leq V_B \leq 0.5$, $0^\circ \leq \delta_B \leq 360^\circ$, $0.8 \leq V_E \leq 1.2$ และ $0^\circ \leq \delta_E \leq 360^\circ$

ในตัวอย่างนี้จะแสดงผลการคำนวณหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยกำหนดให้บัสผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าคือ บัสที่ 1 และบัสผู้ใช้กำลังไฟฟ้าคือ บัสที่ 12 เนื่องจากว่าจำนวนเหตุการณ์ของการเกิดเหตุขัดข้องแบบ N-1 มีมากถึง 20 กรณี เพื่อเป็นการประหยัดเนื้อที่ เราจึงเลือกเฉพาะเหตุขัดข้องที่สำคัญในบางกรณีมาแสดงในที่นี้ ผลการคำนวณหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดในกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีพื้นฐานของระบบทดสอบปกติพบว่าเงื่อนไขบังคับที่ทำให้เกิดการขัดแย้งได้แก่ เงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อนที่ตำแหน่ง L10(5-6) ดังนั้นเราจึงเลือกตำแหน่ง L10 สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม TCSC, TCPAR และ UPFC ในการทดสอบกรณีที่ 2-6 เนื่องจากว่าดัชนีความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งหรือหม้อแปลงใดๆจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมที่ตำแหน่งสายส่งหรือหม้อแปลงดังกล่าว นั่นเอง สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ SVC นั้นเราจะทำการติดตั้ง ณ ตำแหน่งบัสที่ทำให้เกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของแรงดัน บัสที่ทำให้เกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของแรงดันได้แก่ บัสที่ 12 เนื่องจากบัสที่ 12 เป็นบัสผู้ใช้กำลังไฟฟ้าในการทดสอบตัวอย่างนี้ ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่บัสดังกล่าว ส่งผลทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกลงจนทำให้เกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับ สำหรับผลการคำนวณหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างบัสที่ 1 และบัสที่ 12 แสดงดังตารางที่ 5.32-5.34 และผลการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมสามารถแสดงดังตารางที่ 5.35-5.37 จากตารางพบว่า เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS เพิ่มเข้าไปในระบบทดสอบจะทำให้สามารถเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างมาก เนื่องจากว่าเมื่อระบบเกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อนหรือเกิดกำลังเกินขึ้นในระบบ เราสามารถใช้อุปกรณ์ FACTS ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC ในการแก้ไขปัญหากำลังเกินที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อระบบเกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของระดับแรงดัน เราก็สามารถใช้อุปกรณ์ SVC ในการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสให้มีค่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ทำให้ระบบมีค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดสูงขึ้น ในกรณีที่ 6 เป็นกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC เพียงอุปกรณ์เดียว เนื่องจากอุปกรณ์ UPFC สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้เองโดยอิสระจากองค์ประกอบที่ต่อแบบขนาน ทำให้สามารถปรับปรุงขนาดแรงดันของระบบให้ดีขึ้นได้โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ SVC เพิ่มเติม

ตารางที่ 5.32 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2

สภาวะการทำงาน	กรณีที่ 1				กรณีที่ 2			
	λ	MW	MVAR	Limit	λ	MW	MVAR	Limit
ปกติ	6.12	37.332	9.792	L10	7.72	47.092	12.352	L10 / V12
เหตุขัดข้อง L4	5.48	33.488	8.768	L10	6.72	40.992	10.752	L10 / V12
เหตุขัดข้อง L7	2.15	13.115	3.440	L10	4.58	27.938	7.328	L10
เหตุขัดข้อง L14	5.88	35.868	9.408	L10	6.58	40.138	10.528	L10 / V12
เหตุขัดข้อง L15	2.24	13.664	3.584	L10	4.06	24.766	6.496	L10
เหตุขัดข้อง L17	4.41	26.901	7.056	L10	5.12	31.232	8.192	L10 / V14
เหตุขัดข้อง L20	6.03	36.783	9.648	L10	7.42	45.262	11.872	L10 / V12

ตารางที่ 5.33 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดกรณีที่ 3 และกรณีที่ 4

สภาวะการทำงาน	กรณีที่ 3				กรณีที่ 4			
	λ	MW	MVAR	Limit	λ	MW	MVAR	Limit
ปกติ	8.80	53.680	14.080	L10	8.34	50.874	13.344	L10 / V12
เหตุขัดข้อง L4	8.10	49.410	12.960	L10	7.16	43.676	11.456	L10 / V12
เหตุขัดข้อง L7	4.58	27.938	7.328	L10	5.48	33.428	8.768	L10
เหตุขัดข้อง L14	8.41	51.301	13.456	L10	6.87	41.907	10.992	L10 / V12
เหตุขัดข้อง L15	4.06	24.766	6.496	L10	4.73	28.853	7.568	L10
เหตุขัดข้อง L17	5.46	33.306	8.736	L10	5.69	34.709	9.104	L10 / V14
เหตุขัดข้อง L20	7.92	48.312	12.672	L10	8.31	50.691	13.296	L10 / V12

ตารางที่ 5.34 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดกรณีที่ 5 และกรณีที่ 6

สภาวะการทำงาน	กรณีที่ 5				กรณีที่ 6			
	λ	MW	MVAR	Limit	λ	MW	MVAR	Limit
ปกติ	9.38	57.218	15.008	L10 / L15	9.44	57.584	15.104	L10 / L15
เหตุขัดข้อง L4	9.10	55.510	14.560	L10	9.46	57.706	15.136	L10 / L15
เหตุขัดข้อง L7	5.48	33.428	8.768	L10	9.32	56.852	14.912	L10 / L15
เหตุขัดข้อง L14	9.38	57.218	15.008	L10 / L15	9.41	57.401	15.056	L10 / L15
เหตุขัดข้อง L15	4.73	28.853	7.568	L10	7.46	45.506	11.936	L10 / L9
เหตุขัดข้อง L17	6.48	39.528	10.368	L10	8.93	54.473	14.288	L10 / L15
เหตุขัดข้อง L20	8.68	52.948	13.888	L10	9.38	57.218	15.008	L10 / L15

ตารางที่ 5.35 ค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3

สภาวะการทำงาน	กรณีที่ 2		กรณีที่ 3			
	X_{TCSC}^{L10}	α_{TCSC}^{L10}	X_{TCSC}^{L10}	α_{TCSC}^{L10}	X_{SVC}^{B12}	α_{SVC}^{B12}
ปกติ	0.07648	142.78 ⁰	0.15121	143.21 ⁰	-4.8500	120.91 ⁰
เหตุขัดข้อง L4	0.06121	142.57 ⁰	0.15121	143.21 ⁰	-1.6057	120.97 ⁰
เหตุขัดข้อง L7	0.15121	143.21 ⁰	0.15121	143.21 ⁰	-	-
เหตุขัดข้อง L14	0.03500	141.80 ⁰	0.15121	143.21 ⁰	-3.9091	122.30 ⁰
เหตุขัดข้อง L15	0.15121	143.21 ⁰	0.15121	143.21 ⁰	-	-
เหตุขัดข้อง L17	0.04798	142.29 ⁰	0.15121	143.21 ⁰	-1.9081	130.71 ⁰
เหตุขัดข้อง L20	0.09600	142.96 ⁰	0.15121	143.21 ⁰	-6.8614	119.27 ⁰

ตารางที่ 5.36 ค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีที่ 4 และกรณีที่ 5

สภาวะการทำงาน	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5		
	δ_{TCPAR}^{L10}	δ_{TCPAR}^{L10}	X_{SVC}^{B12}	α_{SVC}^{B12}
ปกติ	-4.10 ⁰	-6.48 ⁰	-5.30454	120.43 ⁰
เหตุขัดข้อง L4	-3.20 ⁰	-7.50 ⁰	-4.50189	121.35 ⁰
เหตุขัดข้อง L7	-7.50 ⁰	-7.50 ⁰	-	-
เหตุขัดข้อง L14	-1.90 ⁰	-7.45 ⁰	-3.82869	122.45 ⁰
เหตุขัดข้อง L15	-7.50 ⁰	-7.50 ⁰	-	-
เหตุขัดข้อง L17	-3.28 ⁰	-7.50 ⁰	-1.81247	131.70 ⁰
เหตุขัดข้อง L20	-6.20 ⁰	-7.50 ⁰	-7.59014	118.90 ⁰

ตารางที่ 5.37 ค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีที่ 6

สภาวะการทำงาน	กรณีที่ 6			
	V_B^{L10}	δ_B^{L10}	V_E^{L10}	δ_E^{L10}
ปกติ	0.100	219.0 ⁰	1.1782	347.1 ⁰
เหตุขัดข้อง L4	0.113	228.0 ⁰	1.1783	344.7 ⁰
เหตุขัดข้อง L7	0.319	248.6 ⁰	1.1696	350.6 ⁰
เหตุขัดข้อง L14	0.095	218.0 ⁰	1.1780	347.2 ⁰
เหตุขัดข้อง L15	0.255	224.6 ⁰	1.1762	347.8 ⁰
เหตุขัดข้อง L17	0.220	214.2 ⁰	1.1772	347.2 ⁰
เหตุขัดข้อง L20	0.145	228.0 ⁰	1.1781	347.1 ⁰

5.5 ตัวอย่างการลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า

ระบบทดสอบที่ใช้เป็นตัวอย่างในการแสดงผลของการลดต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าได้แก่ ระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE 30 บัสซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 6 เครื่อง ข้อมูลของระบบทดสอบแสดงในภาคผนวก ก ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงต่อหน่วยกำลังผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังนี้

$$C_1 = 2 P_{G1} + 0.00375 P_{G1}^2 \quad \$/\text{hr} \quad 50 \leq P_{G1} \leq 200$$

$$C_2 = 1.75 P_{G2} + 0.01750 P_{G2}^2 \quad \$/\text{hr} \quad 20 \leq P_{G2} \leq 80$$

$$C_5 = P_{G5} + 0.06250 P_{G5}^2 \quad \$/\text{hr} \quad 15 \leq P_{G5} \leq 50$$

$$C_8 = 3.25 P_{G8} + 0.00834 P_{G8}^2 \quad \$/\text{hr} \quad 10 \leq P_{G8} \leq 35$$

$$C_{11} = 3 P_{G11} + 0.02500 P_{G11}^2 \quad \$/\text{hr} \quad 10 \leq P_{G11} \leq 30$$

$$C_{13} = 3 P_{G13} + 0.02500 P_{G13}^2 \quad \$/\text{hr} \quad 12 \leq P_{G13} \leq 40$$

วิธีการที่นำมาใช้ในการจัดสรรกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 6 เครื่องดังกล่าว สามารถพิจารณาได้เป็น 6 กรณีด้วยกันดังนี้

กรณีที่ 1 การจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์โดยไม่คำนึงถึงเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่ง

กรณีที่ 2 การจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ร่วมกับการแก้ไขปัญหาเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่งโดยใช้วิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่

กรณีที่ 3 การทำออปติมัลเพาเวอร์โพลว์

กรณีที่ 4 การจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ร่วมกับการแก้ไขปัญหาเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCSC จำนวน 2 อุปกรณ์

กรณีที่ 5 การจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ร่วมกับการแก้ไขปัญหาเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCPAR จำนวน 2 อุปกรณ์

กรณีที่ 6 การจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ร่วมกับการแก้ไขปัญหาเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ UPFC จำนวน 2 อุปกรณ์

ในกรณีที่ 4-6 หากไม่สามารถแก้ปัญหากำลังเกินในสายส่งได้หมด จะนำวิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่มาใช้ในการแก้ไขปัญหาที่เหลืออยู่ สำหรับตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ให้พิจารณาจากดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งมีนิยามดังสมการที่ (3.55) ผลการจัดสรรกำลังผลิตและราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 5.38-5.41

ตารางที่ 5.38 แสดงผลการจัดสรรกำลังผลิตและราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าในแต่ละกรณี

กำลังผลิต	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6
P_{G1} (MW)	177.212	163.194	139.032	171.433	177.935	177.562
P_{G2} (MW)	48.049	34.671	37.008	42.185	48.049	48.049
P_{G5} (MW)	20.998	44.414	37.197	34.543	20.998	20.998
P_{G8} (MW)	22.250	20.063	34.173	20.160	22.250	22.250
P_{G11} (MW)	12.455	12.573	18.670	11.275	12.455	12.455
P_{G13} (MW)	12.000	16.153	23.983	12.971	12.000	12.000
กำลังผลิตรวม (MW)	292.964	291.068	290.063	292.565	293.687	293.314
กำลังสูญเสีย (MW)	9.564	7.668	6.663	9.165	10.287	9.914
ราคาต้นทุนรวม (\$/hr)	802.86	840.89	834.81	816.19	804.93	803.56

ตารางที่ 5.39 แสดงผลการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCSC

สายส่งกำลังเกิน	กำลังเกิน (pu)	ค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ควบคุม		กำลังเกิน (pu)	เปลี่ยนแปลง (%)
		X_{TCSC} ที่ L6	X_{TCSC} ที่ L7		
L5(2-5)	1.274	-0.10578 (-60.0%)	-0.02484 (-60%)	1.143	-10.283
L15(4-12)	1.090			1.015	-6.881

ตารางที่ 5.40 แสดงผลการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCPAR

สายส่งกำลังเกิน	กำลังเกิน (pu)	ค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ควบคุม		กำลังเกิน (pu)	เปลี่ยนแปลง (%)
		TCPAR ที่ L6	TCPAR ที่ L7		
L5(2-5)	1.274	$\delta_6 = 3.55^\circ$	$\delta_7 = 4.44^\circ$	0.9971	-21.735
L15(4-12)	1.090			0.7058	-35.248

ตารางที่ 5.41 แสดงผลการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ UPFC

สายส่งกำลังเกิน	กำลังเกิน (pu)	ค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ควบคุม		กำลังเกิน (pu)	เปลี่ยนแปลง (%)
		UPFC ที่ L6	UPFC ที่ L7		
L5(2-5)	1.274	$V_B = 0.045$ $\delta_B = 0.06^\circ$	$V_B = 0.190$ $\delta_B = 4.21^\circ$	0.9983	-21.641
L15(4-12)	1.090	$V_E = 1.050$ $\delta_E = -3.43^\circ$	$V_E = 1.061$ $\delta_E = -8.27^\circ$	0.6763	-37.954

กรณีที่ 1 ผลการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์โดยไม่คำนึงถึงเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่งแสดงในตารางที่ 5.38 พบว่า มีราคาต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 802.86 \$/hr และเกิดกำลังเกินในสายส่ง L5(2-5) และ L15(4-12) เป็นจำนวน 1.274 และ 1.09 เปอร์ยูนิตตามลำดับ

กรณีที่ 2 ผลการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์รวมกันกับการแก้ปัญหาเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่งโดยใช้วิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่แสดงในตารางที่ 5.38 พบว่า ถึงแม้ว่าการใช้วิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่จะช่วยแก้ไขปัญหาล้างเกินในสายส่งให้หมดไปได้แต่ก็ทำให้ราคาต้นทุนการผลิตรวมมีค่าสูงขึ้นเป็น 840.89 \$/hr เนื่องจากการแก้ไขปัญหาล้างเกินโดยใช้วิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่เป็นการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง ทำให้จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเปลี่ยนแปลงไปจากจุดทำงานเดิมที่มีราคาต่ำสุด

กรณีที่ 3 ผลการทำออปติไมซ์เพาเวอร์โพลว์แสดงดังตารางที่ 5.38 พบว่า การทำออปติไมซ์เพาเวอร์โพลว์จะอาศัยเทคนิคของการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสม (Optimization technique) ทำให้สามารถดำเนินการจัดสรรกำลังผลิตไปพร้อมๆ กับการแก้ไขปัญหาล้างเกินในสายส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มีราคาต้นทุนการผลิตรวมต่ำกว่าในกรณีที่ 2 อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ 3 ยังมีราคาที่สูงกว่ากรณีที่ 1 เนื่องมาจากแนวคิดหลักของการทำออปติไมซ์เพาเวอร์โพลว์ก็คือการจัดสรรกำลังผลิตให้มีราคาต้นทุนการผลิตต่ำสุดและระบบยังคงสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ การทำออปติไมซ์เพาเวอร์โพลว์จึงต้องมีการปรับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องไปจากจุดทำงานเดิมที่มีราคาต่ำกว่าเมื่อระบบเกิดการไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ซึ่งได้แก่ มีกำลังเกินในสายส่งเกิดขึ้น เป็นต้น

กรณีที่ 4 ผลการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์รวมกันกับการแก้ปัญหาเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCSC จำนวน 2 อุปกรณ์แสดงในตารางที่ 5.38 พบว่า เมื่อมีกำลังเกินเกิดขึ้นในสายส่ง L5(2-5) และ L15(4-12) จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ TCSC จำนวน 2 อุปกรณ์ที่ตำแหน่ง L6(2-6) และ L7(4-6) เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ผลการแก้ไขปัญหาล้างเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCSC แสดงดังตารางที่ 5.39 จากตารางพบว่าเราไม่สามารถแก้ไขปัญหาล้างเกินในสายส่งได้หมด อันเนื่องมาจากขอบเขตจำกัดของอุปกรณ์ TCSC ($-60\%X_L \leq X_{TCSC} \leq 60\%X_L$) ทำให้ต้องใช้วิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่เข้ามาช่วยเพิ่มเติมในการแก้ไขปัญหาล้างเกินที่ยังเหลืออยู่ ผลลัพธ์สุดท้ายก็คือ ทำให้มีราคาต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 816.19 \$/hr และกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับมีค่าแตกต่างจากในกรณีที่ 1 ไม่มากนักเมื่อเทียบกับกรณีที่ 2 และ 3 จึงทำให้มีราคาต้นทุนการผลิตรวมต่ำกว่าในกรณีที่ 2 และ 3

กรณีที่ 5 ผลการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ร่วมกับการแก้ปัญหาเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCPAR จำนวน 2 อุปกรณ์แสดงในตารางที่ 5.38 พบว่า เมื่อมีกำลังเกินเกิดขึ้นในสายส่ง L5(2-5) และ L15(4-12) จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ TCPAR จำนวน 2 อุปกรณ์ที่ตำแหน่ง L6(2-6) และ L7(4-6) เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ผลการแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCPAR แสดงดังตารางที่ 5.40 จากตารางพบว่าเราสามารถแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งได้หมดด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ TCPAR และจะมีราคาต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 804.93 \$/hr กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับมีเท่ากันกับในกรณีที่ 1 ทุกเครื่องยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 ซึ่งเป็นบัสอ้างอิง ดังนั้นทำให้มีราคาต้นทุนการผลิตรวมที่ใกล้เคียงกับในกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่มีราคาต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุด

กรณีที่ 6 ผลการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ร่วมกับการแก้ปัญหาเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ UPFC จำนวน 2 อุปกรณ์แสดงในตารางที่ 5.38 พบว่า เมื่อมีกำลังเกินเกิดขึ้นในสายส่ง L5(2-5) และ L15(4-12) จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC จำนวน 2 อุปกรณ์ที่ตำแหน่ง L6(2-6) และ L7(4-6) เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ผลการแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ UPFC แสดงดังตารางที่ 5.41 จากตารางพบว่าเราสามารถแก้ไขปัญหาลำดับเกินในสายส่งได้หมดด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ UPFC และทำให้มีราคาต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 803.56 \$/hr กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับมีเท่ากันกับในกรณีที่ 1 ทุกเครื่องยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 ซึ่งเป็นบัสอ้างอิง ดังนั้นจึงทำให้มีราคาต้นทุนการผลิตรวมที่ใกล้เคียงกับในกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่มีราคาต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุด

จากผลการคำนวณที่แสดงในตารางที่ 5.38-5.41 พบว่าการจัดสรรกำลังผลิตในกรณีที่ 1 จะมีราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้ารวมต่ำสุดเนื่องจากในกรณีนี้จะไม่มีการพิจารณาปัญหาเหตุขัดข้องอันเนื่องมาจากการเกิดกำลังเกินในสายส่ง และเมื่อมีการนำปัญหาเหตุขัดข้องดังกล่าวเข้ามาพิจารณาด้วยแล้ว จะพบว่าการแก้ไขปัญหาคือเหตุขัดข้องด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ FACTS จะทำให้ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้ารวมมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับวิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และวิธีการทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ เนื่องจากว่าในการแก้ปัญหาด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ FACTS จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ บัสอ้างอิงเนื่องจากปริมาณกำลังสูญเสียในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าการปรับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS เพื่อแก้ไขปัญหาลำดับเกินที่เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้ปริมาณและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้กำลังสูญเสียในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่เมื่อพิจารณากำลังสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะพบว่ากำลังสูญเสียจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากจนแทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้ารวมมากนัก

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะการทำงานอยู่ตัว โดยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ กันดังนี้

1. การเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า
2. การแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง
3. การเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด
4. การลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้แสดงข้างต้นจะอาศัยหลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวและการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมเป็นหลักสำคัญ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ดังกล่าวโดยอาศัยเทคนิคของการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งได้แก่ เทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบิตอย่างเหมาะสม ผลจากการทดสอบและการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ทำให้เราสามารถจัดแบ่งประเภทของอุปกรณ์ควบคุมตามลักษณะของวัตถุประสงค์ของการควบคุมได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

- 1) อุปกรณ์ควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า ได้แก่
 - 1.1 หม้อแปลงชนิดปรับแก้ได้ในขณะมีโหลด
 - 1.2 อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน
 - 1.3 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
 - 1.4 อุปกรณ์ SVC
- 2) อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง ได้แก่
 - 2.1 หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับเฟส
 - 2.2 อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม
 - 2.3 ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

2.4 อุปกรณ์ TCSC

2.5 อุปกรณ์ TCPAR

3) อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง ได้แก่ หม้อแปลงควบคุมชนิดปรับแท๊ป

4) อุปกรณ์ควบคุมตัวแปรทางไฟฟ้ารวม ได้แก่ อุปกรณ์ UPFC

เมื่อเราทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังตามวัตถุประสงค์ของการควบคุมที่ได้กล่าวข้างต้น อุปกรณ์ควบคุมเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีสมรรถนะสูงขึ้น สิ่งสำคัญที่สุดในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ควบคุมก็คือ การกำหนดค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม โดยอาศัยอัลกอริทึมของการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 จะสามารถคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

2. การแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง

ปัญหาการกำลังเกินในสายส่งเป็นปัญหาหนึ่งที่มีสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นเมื่อมีเหตุการณ์กำลังเกินในสายส่งเกิดขึ้นจะต้องมีการดำเนินการแก้ไขอย่างเหมาะสม โดยส่วนใหญ่แล้วจะอาศัยการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และ/หรือการตัดโหลด ซึ่งจะทำให้ราคาของกำลังผลิตที่ได้มีค่าสูงขึ้นจากราคาเดิมและอาจทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดความเสียหาย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาลำลังเกินในสายส่งโดยการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ที่มีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และ อุปกรณ์ UPFC อุปกรณ์ที่ได้ติดตั้งเข้าไปจะสามารถแก้ไขปัญหาการกำลังเกินในสายส่งได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็วเนื่องจากคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีลักษณะการทำงานที่รวดเร็วและมีความเชื่อถือได้สูง ขั้นตอนหลักในการแก้ไขปัญหาการกำลังเกินในสายส่งโดยการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS มี 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การเลือกประเภทของอุปกรณ์ควบคุม

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าหลักในสายส่งได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริง ดังนั้นในการวิเคราะห์ปัญหาจะพิจารณาการแก้ไขปัญหาการกำลังเกินในสายส่งในส่วนของการกำลังไฟฟ้าจริงเป็นหลัก อุปกรณ์ FACTS ที่มีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง ได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC ดังนั้นเราจึงเลือกอุปกรณ์ดังกล่าวนี้สำหรับแก้ไขปัญหาการกำลังเกินในสายส่ง

2) การเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมโดยใช้ดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมที่ได้นิยามดังสมการที่ (3.55) เป็นดัชนีวัดตำแหน่งที่เหมาะสม ดัชนีกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมนี้สร้างขึ้นโดย

อาศัยหลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุม เมื่อนำดัชนีของแต่ละตำแหน่งมาทำการเปรียบเทียบกัน ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมจะถูกกำหนดโดยดัชนีของตำแหน่งที่มีค่าสูงสุด เราจะใช้ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตัวเลือกลำดับแรกสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเพื่อแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งที่เกิดขึ้น

3) การคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการควบคุม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่ง โดยอาศัยพื้นฐานของการวิเคราะห์ความไวของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมและวิธีการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งจะสามารถคำนวณหาค่าปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมที่สอดคล้องกับการแก้ไขปัญหากำลังเกินในสายส่งได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

3. การเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะการทำงานอยู่ตัวจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขบังคับทางกายภาพของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งได้แก่ เงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อนและเงื่อนไขบังคับของระดับแรงดัน เมื่อระบบเกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของการทนต่อความร้อนหรือเกิดกำลังเกินขึ้นในระบบ เราสามารถใช้อุปกรณ์ FACTS ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ TCSC อุปกรณ์ TCPAR และอุปกรณ์ UPFC ในการแก้ไขปัญหากำลังเกินที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อระบบเกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับของระดับแรงดัน เราสามารถใช้อุปกรณ์ SVC ในการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสให้มีค่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังจึงช่วยเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมรรถนะของระบบที่มีอยู่เดิมให้สามารถรองรับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในปริมาณที่สูงขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องก่อสร้างเพื่อขยายระบบให้สิ้นเปลือง นับเป็นการใช้ประโยชน์จากระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่อย่างคุ้มค่ามากที่สุด

4. การลดราคาต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาจากมุมมองทางด้านเศรษฐศาสตร์จะพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังนอกจากจะปรับปรุงสมรรถนะของระบบในหลาย ๆ ด้านแล้ว ยังสามารถลดราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าลงได้ในกรณีที่มีเหตุขัดข้องเกิดขึ้น เนื่องจากว่าในการแก้ไขปัญหาเหตุขัดข้องด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ FACTS จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการจัดสรรกำลังผลิตตามหลักเศรษฐศาสตร์ แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ บัสอ้างอิงเนื่องมาจากปริมาณกำลังสูญเสียในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าการปรับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ FACTS เพื่อแก้ไขปัญหากำลังเกินที่

เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้ปริมาณและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้กำลังสูญเสียในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่เมื่อพิจารณากำลังสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะพบว่ากำลังสูญเสียจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากจนแทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้ารวมมากนัก โดยอาศัยลักษณะการทำงานที่รวดเร็วและมีความเชื่อถือได้สูงของอุปกรณ์ FACTS เราจึงสามารถใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์ FACTS ในการแก้ไขปัญหาหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่ซึ่งจะทำให้ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจากเดิม

5. การนำเทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสมมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพสูงทั้งในด้านความเร็วและปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ สามารถนำมาใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนได้เป็นอย่างดี

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

1. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยพื้นฐานจากมุมมองทางสถิติศาสตร์เป็นหลักสำคัญ สำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป ควรนำมุมมองทางพลวัตมาพิจารณาปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างเช่น การเพิ่มเสถียรภาพแบบชั่วคราวและแบบพลวัต การเพิ่มความสามารถในการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

2. อาจนำข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ของอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ เช่น ราคาของอุปกรณ์ควบคุม ค่าใช้จ่ายหรือค่าก่อสร้างในการติดตั้ง ระยะเวลาในการใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม เป็นต้น มาช่วยในการพิจารณาและตัดสินใจในการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง

รายการอ้างอิง

1. William D. Stevenson, Jr., "Elements of Power System Analysis", 4th Edition, McGraw-Hill, 1982.
2. Grainger, J.J., and Stevenson, D.W.Jr., "Power System Analysis", New York, McGraw-Hill, 1994.
3. Sullivan, R.L., "Power System Planning", McGraw-Hill, Inc., 1977.
4. Charles A. Gross, "Power System Analysis", John Wiley & Sons, 1986.
5. Glenn W. Stagg, and Ahmed H.El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw-Hill, 1968.
6. Arrillaga, J., and Arnold, C.P., "Computer Analysis of Power System", John Wiley & Sons, 1990.
7. <http://www.ece.utexas.edu/~grady>.
8. Bergen, A.R., and Vittal, V. "Power System Analysis", Prentice-Hall, Inc., 2000.
9. Tinney, W.F., and Hart, C.E., "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-86, November 1967, pp.1449-1460.
10. Stott, B., and Alsac, O., "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-93, May/June 1974, pp.859-869.
11. Peterson, N.M., and Meyer, W.S., "Automatic Adjustment of Transformer and Phase-Shifter Taps in the Newton Power Flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-90, Jan/Feb 1971, pp.103-108.
12. Chang, S.K., and Brandwajn, V., "Adjusted Solutions in Fast Decouple Load Flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.2, May 1988, pp.726-733.
13. Rudervall, R., Charpentier, J.P., and Sharma, R., "High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper", Presented at Energy Week 2000, Washington D.C., USA, March 7-8, 2000.
14. Kimbark, E.W., "Direct Current Transmission", Wiley Interscience, London, 1971.
15. Padiyar, K.R., "HVDC Power Transmission Systems", May 1992.
16. Gyugyi, L., "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems", IEE Proceedings-c, Vol.139, No.4, July 1992.

17. Hingorani, N.G., "Flexible AC Transmission", IEEE Spectrum, V.30, No.4, April 1993.
18. Hingorani, N.G., and Gyugyi, L., "Understanding FACTS", IEEE Press, 2000.
19. IEEE Special Stability Controls Working Group, "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Transaction on Power System, Vol.9, No.1, February 1994.
20. Nabavi-Niaki, A., and Iravani, M.R., "Steady-state and dynamic models of unified power flow controller (UPFC)", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No.2, April 1998.
21. Dazhong, F., Liangying, D., and Chung, T.S., "Power Flow Analysis of Power System with UPFC using commercial power flow software", IEEE Transactions on Power System, 2000.
22. Dazhong, F., Liangying, D., and Chung, T.S., "Power Flow Analysis of Power System with UPFC using commercial power flow software", IEEE Transactions on Power System, 2000.
23. L. Rouco, F.L. Pagola, "An Eigenvalue Sensitivity Approach to Location and Controller Design of Controllable Series Capacitors for Damping Power System Oscillations", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 12, No. 4, November 1997.
24. L.A.S. Pilotto, W.W. Ping, A.R. Carvalho, A. Wey, W.F. Long, F.L. Alvarado, A. Edris, "Determination of Needed FACTS Controllers that Increase Asset Utilization of Power Systems", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997, p.p. 364–370.
25. Wood, A. J., and Wollenberg, B.F. "Power Generation Operation and Control", John Wiley, 1984.
26. G.C. Ejebe, J. Tong, J.G. Waight, J.G. Frame, X. Wang, W.F. Tinney, "Available Transfer Capability Calculations", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 13, No. 4, November 1998.
27. G. Sombuttwilailert and B. Eua-Arporn, "A Novel Sensitivity Analysis for Total Transfer Capability Evaluation", International Conference on Power Industry Computer Application, May 2001.

28. Wang Feng, G.B. Shrestha, “Allocation of TCSC Devices to Optimize Total Transmission Capacity in a Competitive Power Market”, IEEE Transaction on Power Systems, July 2001.
29. Zimmerman R.D., and Gan D., “MATPOWER User Manual V.2.0”, Power Systems Engineering Research Center (PSERC) School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca, 14853.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



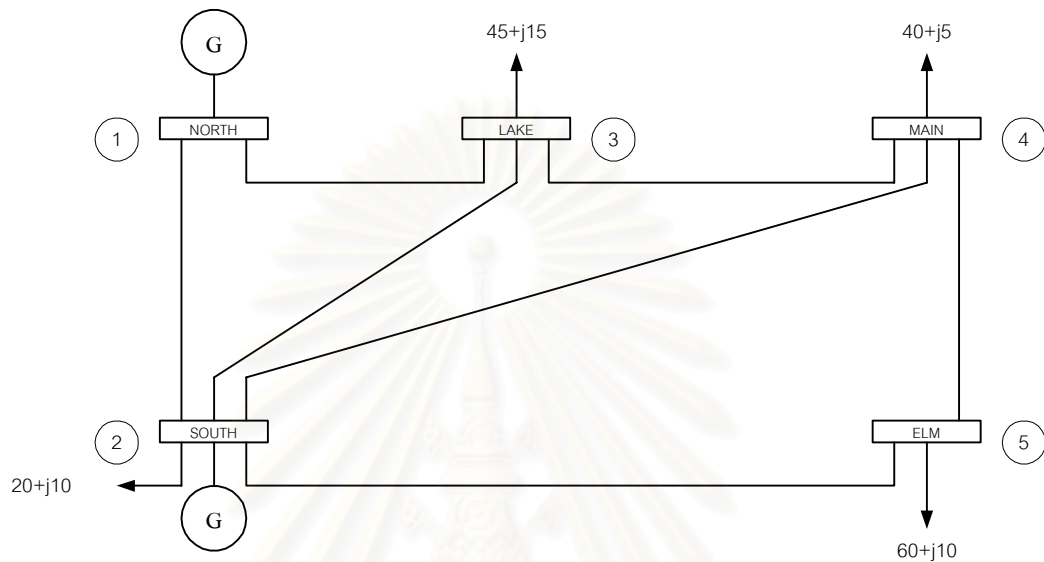
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ก.1 ระบบทดสอบ STAGG 5 บัส



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ STAGG 5 บัส

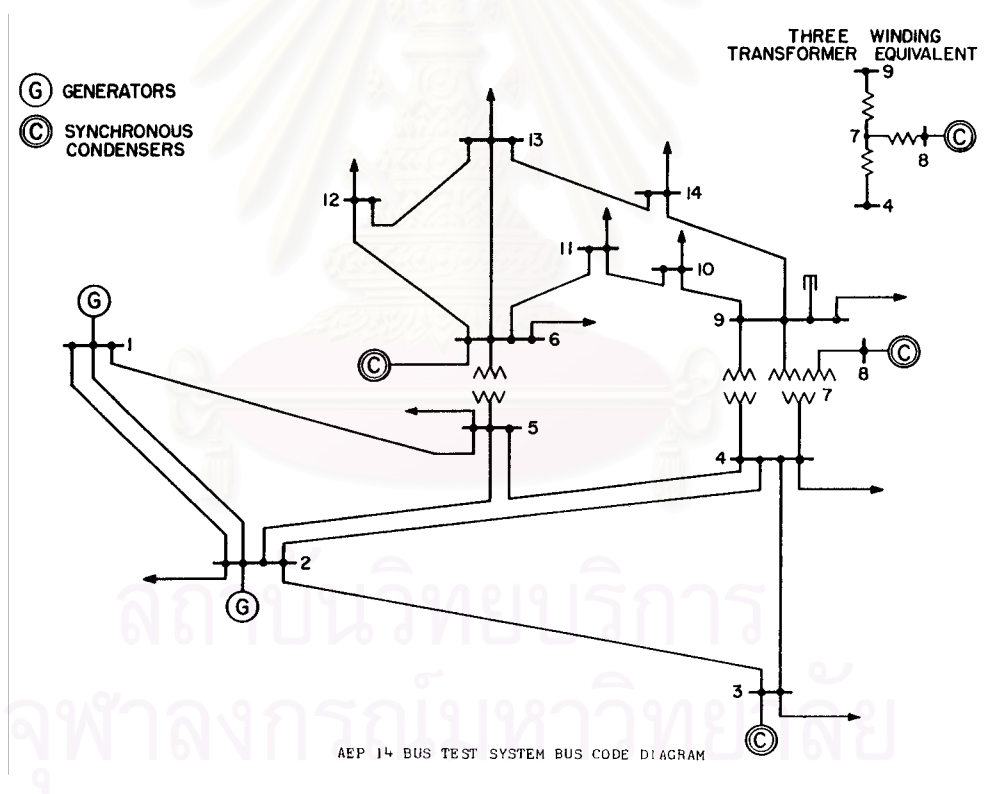
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ STAGG 5 บัส

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B (pu)
			P (MW)	Q (MVAR)	Qmax	Qmin	P (MW)	Q(MW)	
1	3	1.06	0	0	999	-999	0	0	0
2	2	1.00	40	0	999	-999	20	10	0
3	0	-	0	0	0	0	45	15	0
4	0	-	0	0	0	0	40	5	0
5	0	-	0	0	0	0	60	10	0

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน STAGG 5 บัส

Line No.	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	1	2	0.02	0.06	0.06
2	1	3	0.08	0.24	0.05
3	2	3	0.06	0.18	0.04
4	2	4	0.06	0.18	0.04
5	2	5	0.04	0.12	0.03
6	3	4	0.01	0.03	0.02
7	4	5	0.08	0.24	0.05

ก.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส



รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B (pu)
			P (MW)	Q (MVAR)	Qmax	Qmin	P (MW)	Q(MW)	
1	3	1.06	0	0	999	-999	0	0	0
2	2	1.045	40	0	50	-40	21.7	12.7	0
3	2	1.01	0	0	40	0	94.2	19	0
4	0	-	0	0	0	0	47.8	-3.9	0
5	0	-	0	0	0	0	7.6	1.6	0
6	2	1.07	0	0	24	-6	11.2	7.5	0
7	0	-	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1.09	0	0	24	-6	0	0	0
9	0	-	0	0	0	0	29.5	16.6	0.19
10	0	-	0	0	0	0	9	5.8	0
11	0	-	0	0	0	0	3.5	1.8	0
12	0	-	0	0	0	0	6.1	1.6	0
13	0	-	0	0	0	0	13.5	5.8	0
14	0	-	0	0	0	0	14.9	5	0

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

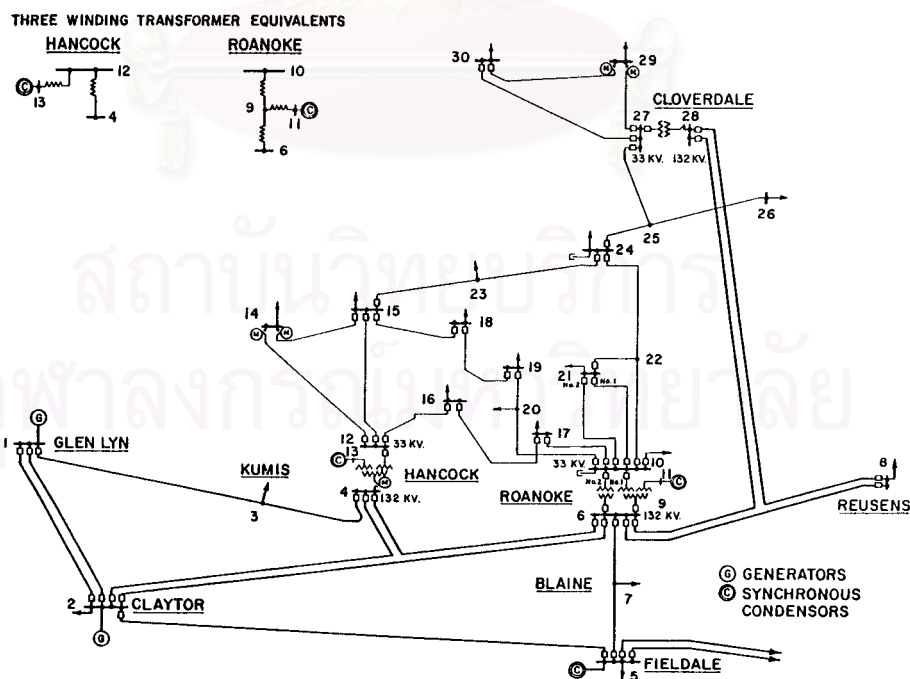
Line No.	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap	Limit (MW)
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0528	-	340
2	1	5	0.05403	0.22304	0.0492	-	170
3	2	3	0.04699	0.19797	0.0438	-	170
4	2	4	0.05811	0.17632	0.0374	-	170
5	2	5	0.05695	0.17388	0.034	-	170
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0346	-	170
7	4	5	0.01335	0.04211	0.0128	-	170
8	4	7	0	0.20912	0	0.978	65
9	4	9	0	0.55618	0	0.969	65
10	5	6	0	0.25202	0	0.932	65

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส (ต่อ)

Line No.	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap	Limit (MW)
11	6	11	0.09498	0.1989	0	-	50
12	6	12	0.12291	0.25581	0	-	50
13	6	13	0.06615	0.13027	0	-	50
14	7	8	0	0.17615	0	-	50
15	7	9	0	0.11001	0	-	50
16	9	10	0.03181	0.0845	0	-	50
17	9	14	0.12711	0.27038	0	-	50
18	10	11	0.08205	0.19207	0	-	50
19	12	13	0.22092	0.19988	0	-	50
20	13	14	0.17093	0.34802	0	-	50

หมายเหตุ เนื่องจากข้อมูลของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัสไม่ได้ระบุขีดจำกัดของสายส่งและหม้อแปลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้กำหนดขีดจำกัดของสายส่งและหม้อแปลงตามรายการอ้างอิง [28]

ก.3 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส



รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B (pu)
			P (MW)	Q (MVAR)	Qmax	Qmin	P (MW)	Q(MW)	
1	3	1.060	0	0	999	-999	0	0	0
2	2	1.045	40	0	50	-40	21.7	12.7	0
3	0	-	0	0	0	0	2.4	1.2	0
4	0	-	0	0	0	0	7.6	1.6	0
5	2	1.010	0	0	40	-40	94.2	19	0
6	0	-	0	0	0	0	0	0	0
7	0	-	0	0	0	0	22.8	10.9	0
8	2	1.010	0	0	40	-10	30	30	0
9	0	-	0	0	0	0	0	0	0
10	0	-	0	0	0	0	5.8	2	0.19
11	2	1.082	0	0	24	-6	0	0	0
12	0	-	0	0	0	0	11.2	7.5	0
13	2	1.071	0	0	24	-6	0	0	0
14	1	-	0	0	0	0	6.2	1.6	0
15	1	-	0	0	0	0	8.2	2.5	0
16	1	-	0	0	0	0	3.5	1.8	0
17	1	-	0	0	0	0	9	5.8	0
18	1	-	0	0	0	0	3.2	0.9	0
19	1	-	0	0	0	0	9.5	3.4	0
20	1	-	0	0	0	0	2.2	0.7	0
21	1	-	0	0	0	0	17.5	11.2	0
22	1	-	0	0	0	0	0	0	0
23	1	-	0	0	0	0	3.2	1.6	0
24	1	-	0	0	0	0	8.7	6.7	0.043
25	1	-	0	0	0	0	0	0	0
26	1	-	0	0	0	0	3.5	2.3	0
27	0	-	0	0	0	0	0	0	0
28	0	-	0	0	0	0	0	0	0
29	1	-	0	0	0	0	2.4	0.9	0
30	1	-	0	0	0	0	10.6	1.9	0

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

Line No.	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap	Limit (MW)
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0528	-	130
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0408	-	130
3	2	4	0.057	0.1737	0.0368	-	65
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0084	-	120
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0418	-	50
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0374	-	65
7	4	6	0.0119	0.0414	0.009	-	120
8	5	7	0.046	0.116	0.0204	-	60
9	6	7	0.0267	0.082	0.017	-	120
10	6	8	0.012	0.042	0.009	-	50
11	6	9	0	0.208	0	0.978	60
12	6	10	0	0.556	0	0.969	30
13	9	11	0	0.208	0	-	60
14	9	10	0	0.11	0	-	60
15	4	12	0	0.256	0	0.932	30
16	12	13	0	0.14	0	-	60
17	12	14	0.1231	0.2559	0	-	30
18	12	15	0.0662	0.1304	0	-	30
19	12	16	0.0945	0.1987	0	-	30
20	14	15	0.221	0.1997	0	-	20
21	16	17	0.0824	0.1923	0	-	20
22	15	18	0.1073	0.2185	0	-	20
23	18	19	0.0639	0.1292	0	-	20
24	19	20	0.034	0.068	0	-	20
25	10	20	0.0936	0.209	0	-	20
26	10	17	0.0324	0.0845	0	-	20
27	10	21	0.0348	0.0749	0	-	20
28	10	22	0.0727	0.1499	0	-	20
29	21	22	0.0116	0.0236	0	-	20
30	15	23	0.1	0.202	0	-	20

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส (ต่อ)

Line No.	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap	Limit (MW)
31	22	24	0.115	0.179	0	-	20
32	23	24	0.132	0.27	0	-	20
33	24	25	0.1885	0.3292	0	-	20
34	25	26	0.2544	0.38	0	-	20
35	25	27	0.1093	0.2087	0	-	20
36	28	27	0	0.396	0	0.968	20
37	27	29	0.2198	0.4153	0	-	20
38	27	30	0.3202	0.6027	0	-	20
39	29	30	0.2399	0.4533	0	-	20
40	8	28	0.0636	0.2	0.0428	-	30
41	6	28	0.0169	0.0599	0.013	-	30

หมายเหตุ เนื่องจากข้อมูลของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัสไม่ได้ระบุขีดจำกัดของสายส่งและหม้อแปลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้กำหนดขีดจำกัดของสายส่งและหม้อแปลงตามรายการอ้างอิง [29]

ก.4 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B (pu)
			P (MW)	Q (MVAR)	Qmax	Qmin	P (MW)	Q(MW)	
1	3	1.04	128.9	0	999	-999	55	17	0
2	2	1.01	0	0	50	-17	3	88	0
3	2	0.985	40	0	60	-10	41	21	0
4	0	-	0	0	0	0	0	0	0
5	0	-	0	0	0	0	13	4	0
6	2	0.98	0	0	25	-8	75	2	0
7	0	-	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1.005	450	0	200	-140	150	22	0
9	2	0.98	0	0	9	-3	121	26	0
10	0	-	0	0	0	0	5	2	0
11	0	-	0	0	0	0	0	0	0
12	2	1.015	310	0	155	-150	377	24	0

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B (pu)
			P (MW)	Q (MVAR)	Qmax	Qmin	P (MW)	Q(MW)	
13	0	-	0	0	0	0	18	2.3	0
14	0	-	0	0	0	0	10.5	5.3	0
15	0	-	0	0	0	0	22	5	0
16	0	-	0	0	0	0	43	3	0
17	0	-	0	0	0	0	42	8	0
18	0	-	0	0	0	0	27.2	9.8	0.1
19	0	-	0	0	0	0	3.3	0.6	0
20	0	-	0	0	0	0	2.3	1	0
21	0	-	0	0	0	0	0	0	0
22	0	-	0	0	0	0	0	0	0
23	0	-	0	0	0	0	6.3	2.1	0
24	0	-	0	0	0	0	0	0	0
25	0	-	0	0	0	0	6.3	3.2	0.059
26	0	-	0	0	0	0	0	0	0
27	0	-	0	0	0	0	9.3	0.5	0
28	0	-	0	0	0	0	4.6	2.3	0
29	0	-	0	0	0	0	17	2.6	0
30	0	-	0	0	0	0	3.6	1.8	0
31	0	-	0	0	0	0	5.8	2.9	0
32	0	-	0	0	0	0	1.6	0.8	0
33	0	-	0	0	0	0	3.8	1.9	0
34	0	-	0	0	0	0	0	0	0
35	0	-	0	0	0	0	6	3	0
36	0	-	0	0	0	0	0	0	0
37	0	-	0	0	0	0	0	0	0
38	0	-	0	0	0	0	14	7	0
39	0	-	0	0	0	0	0	0	0
40	0	-	0	0	0	0	0	0	0
41	0	-	0	0	0	0	6.3	3	0
42	0	-	0	0	0	0	7.1	4.4	0
43	0	-	0	0	0	0	2	1	0

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Bus No.	Bus Type	Voltage Magnitude	Generation				Load		Shunt B (pu)
			P (MW)	Q (MVAR)	Qmax	Qmin	P (MW)	Q(MW)	
44	0	-	0	0	0	0	12	1.8	0
45	0	-	0	0	0	0	0	0	0
46	0	-	0	0	0	0	0	0	0
47	0	-	0	0	0	0	29.7	11.6	0
48	0	-	0	0	0	0	0	0	0
49	0	-	0	0	0	0	18	8.5	0
50	0	-	0	0	0	0	21	10.5	0
51	0	-	0	0	0	0	18	5.3	0
52	0	-	0	0	0	0	4.9	2.2	0
53	0	-	0	0	0	0	20	10	0.063
54	0	-	0	0	0	0	4.1	1.4	0
55	0	-	0	0	0	0	6.8	3.4	0
56	0	-	0	0	0	0	7.6	2.2	0
57	0	-	0	0	0	0	6.7	2	0

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส

Line No.	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap
1	1	2	0.0083	0.028	0.129	-
2	2	3	0.0298	0.085	0.0818	-
3	3	4	0.0112	0.0366	0.038	-
4	4	5	0.0625	0.132	0.0258	-
5	4	6	0.043	0.148	0.0348	-
6	6	7	0.02	0.102	0.0276	-
7	6	8	0.0339	0.173	0.047	-
8	8	9	0.0099	0.0505	0.0548	-
9	9	10	0.0369	0.1679	0.044	-
10	9	11	0.0258	0.0848	0.0218	-
11	9	12	0.0648	0.295	0.0772	-
12	9	13	0.0481	0.158	0.0406	-

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Line No.	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap
13	13	14	0.0132	0.0434	0.011	-
14	13	15	0.0269	0.0869	0.023	-
15	1	15	0.0178	0.091	0.0988	-
16	1	16	0.0454	0.206	0.0546	-
17	1	17	0.0238	0.108	0.0286	-
18	3	15	0.0162	0.053	0.0544	-
19	4	18	0	0.555	0	0.970
20	4	18	0	0.43	0	0.978
21	5	6	0.0302	0.0641	0.0124	-
22	7	8	0.0139	0.0712	0.0194	-
23	10	12	0.0277	0.1262	0.0328	-
24	11	13	0.0223	0.0732	0.0188	-
25	12	13	0.0178	0.058	0.0604	-
26	12	16	0.018	0.0813	0.0216	-
27	12	17	0.0397	0.179	0.0476	-
28	14	15	0.0171	0.0547	0.0148	-
29	18	19	0.461	0.685	0	-
30	19	20	0.283	0.434	0	-
31	21	20	0	0.7767	0	1.043
32	21	22	0.0736	0.117	0	-
33	22	23	0.0099	0.0152	0	-
34	23	24	0.166	0.256	0.0084	-
35	24	25	0	1.182	0	1.000
36	24	25	0	1.23	0	1.000
37	24	26	0	0.0473	0	1.043
38	26	27	0.165	0.254	0	-
39	27	28	0.0618	0.0954	0	-
40	28	29	0.0418	0.0587	0	-
41	7	29	0	0.0648	0	0.967
42	25	30	0.135	0.202	0	-
43	30	31	0.326	0.497	0	-

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Line No.	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap
44	31	32	0.507	0.755	0	-
45	32	33	0.0392	0.036	0	-
46	34	32	0	0.953	0	0.975
47	34	35	0.052	0.078	0.0032	-
48	35	36	0.043	0.0537	0.0016	-
49	36	37	0.029	0.0366	0	-
50	37	38	0.0651	0.1009	0.002	-
51	37	39	0.0239	0.0379	0	-
52	36	40	0.03	0.0466	0	-
53	22	38	0.0192	0.0295	0	-
54	11	41	0	0.749	0	0.955
55	41	42	0.207	0.352	0	-
56	41	43	0	0.412	0	-
57	38	44	0.0289	0.0585	0.002	-
58	15	45	0	0.1042	0	0.955
59	14	46	0	0.0735	0	0.900
60	46	47	0.023	0.068	0.0032	-
61	47	48	0.0182	0.0233	0	-
62	48	49	0.0834	0.129	0.0048	-
63	49	50	0.0801	0.128	0	-
64	50	51	0.1386	0.22	0	-
65	10	51	0	0.0712	0	0.930
66	13	49	0	0.191	0	0.895
67	29	52	0.1442	0.187	0	-
68	52	53	0.0762	0.0984	0	-
69	53	54	0.1878	0.232	0	-
70	54	55	0.1732	0.2265	0	-
71	11	43	0	0.153	0	0.958
72	44	45	0.0624	0.1242	0.004	-
73	40	56	0	1.195	0	0.958
74	56	41	0.553	0.549	0	-

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 57 บัส (ต่อ)

Line No.	From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap
75	56	42	0.2125	0.354	0	-
76	39	57	0	1.355	0	0.980
77	57	56	0.174	0.26	0	-
78	38	49	0.115	0.177	0.006	-
79	38	48	0.0312	0.0482	0	-
80	9	55	0	0.1205	0	0.940



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์

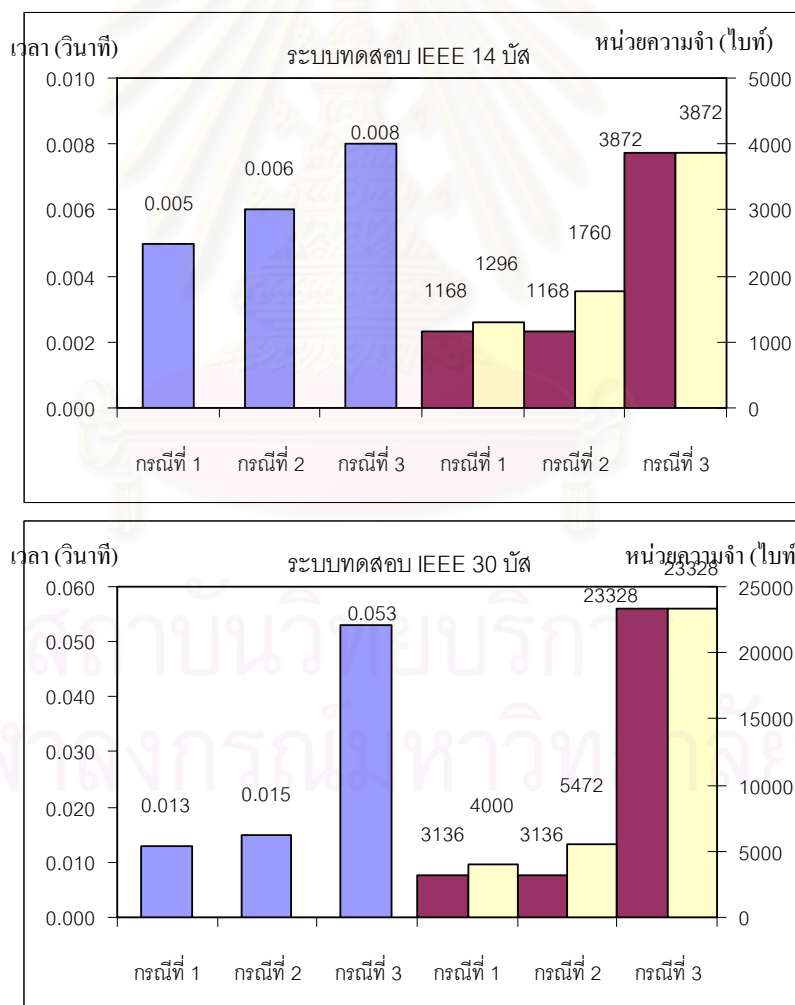
โปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์แบ่งออกเป็น 3 กรณีด้วยกันดังนี้

กรณีที่ 1 โปรแกรมที่ใช้ทั้งเทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม

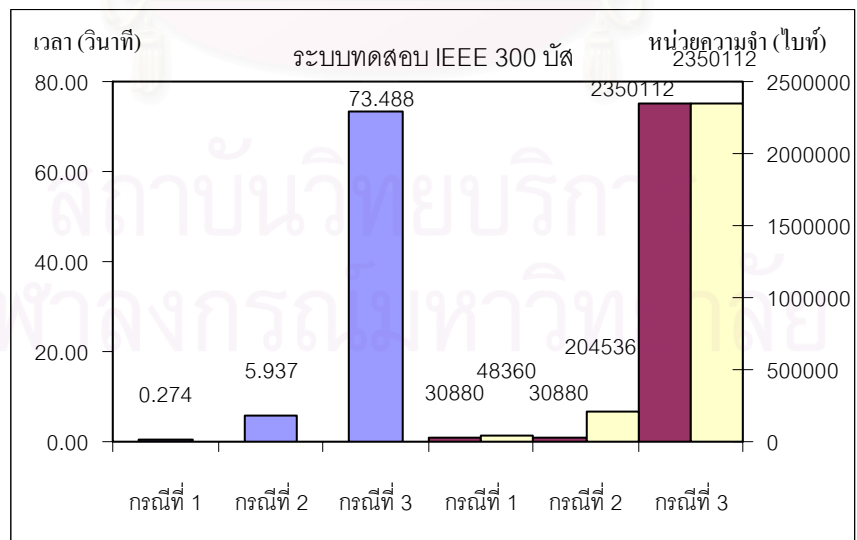
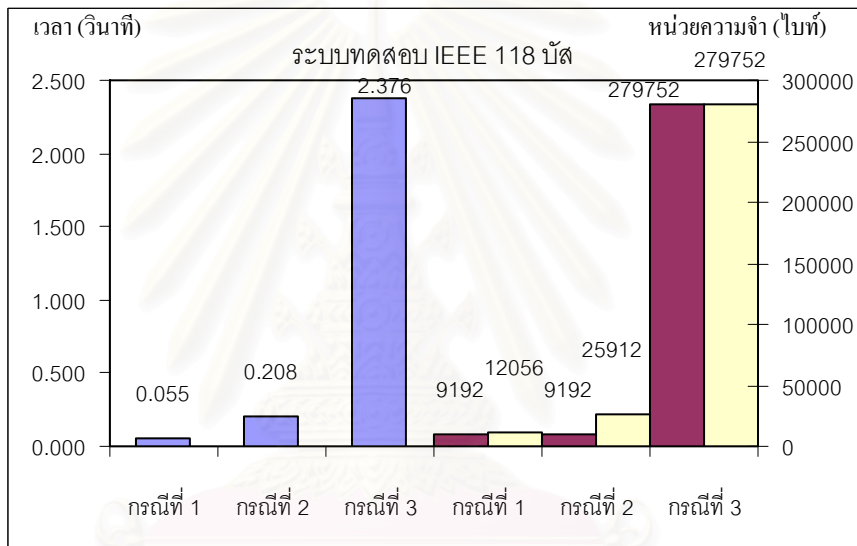
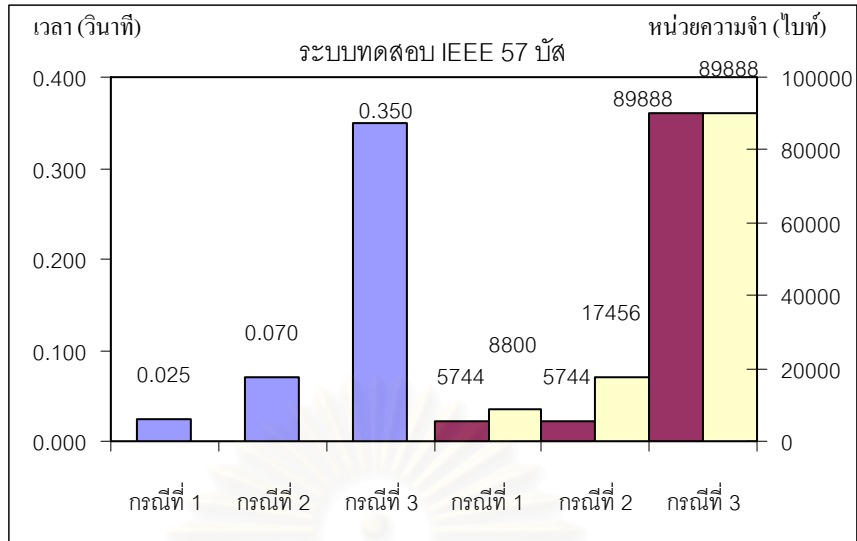
กรณีที่ 2 โปรแกรมที่ใช้เทคนิค SPARSE เพียงอย่างเดียว

กรณีที่ 3 โปรแกรมที่ไม่ใช้ทั้งเทคนิค SPARSE และเทคนิคการจัดเรียงบัสอย่างเหมาะสม

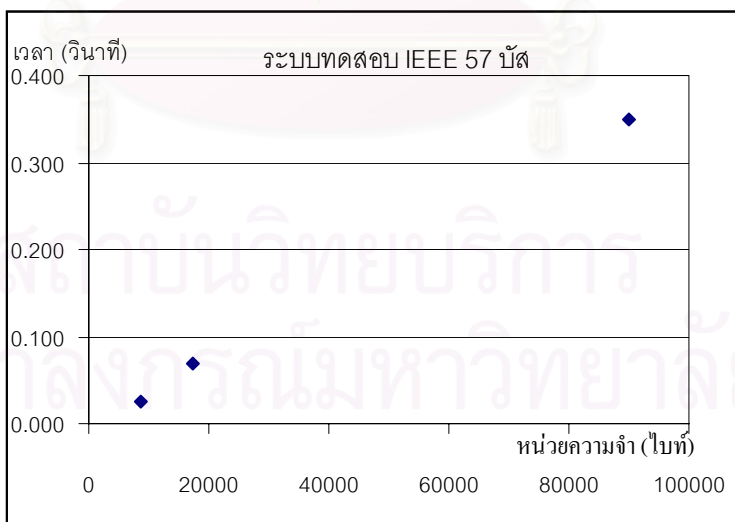
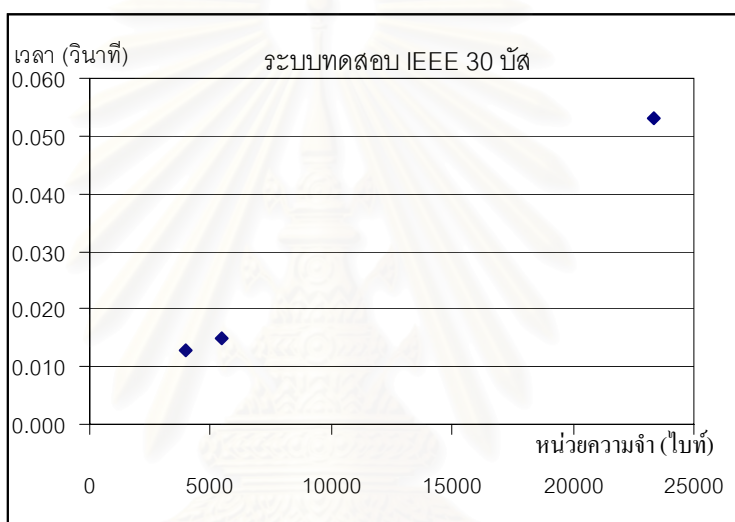
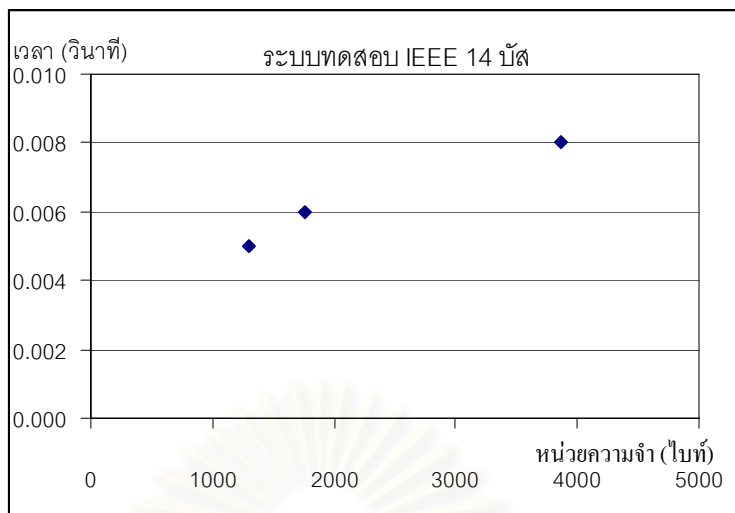
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์แสดงดังรูปที่ข.1-ข.2



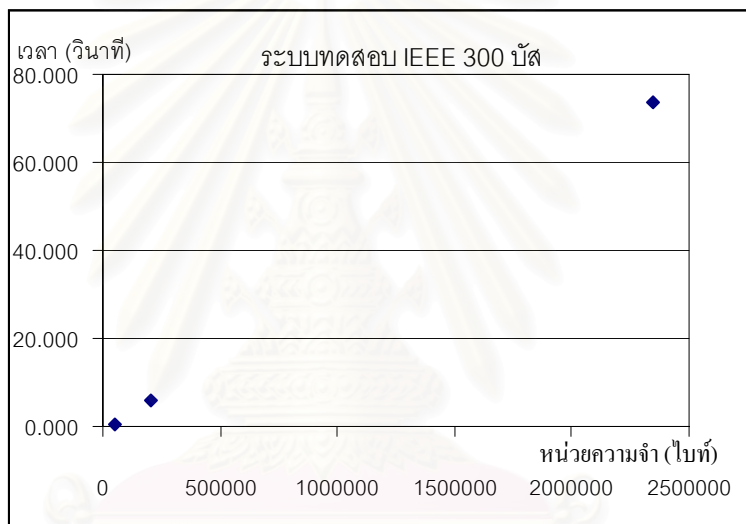
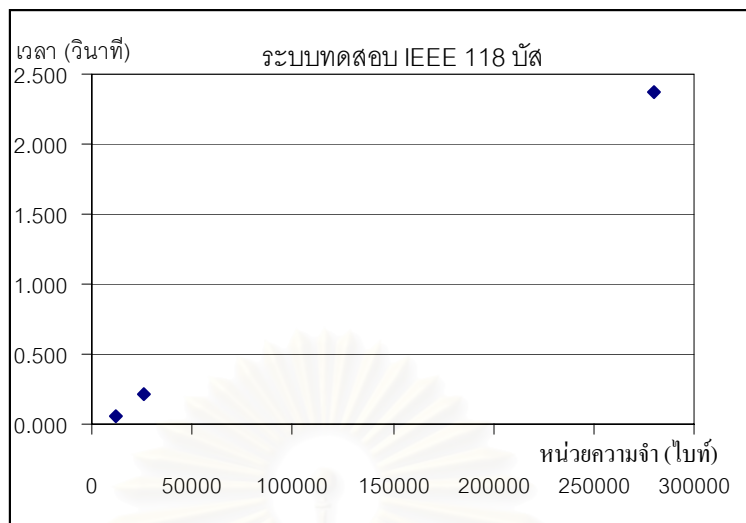
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โพลว์



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์ฟลิว (ต่อ)



รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์



รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณเพาเวอร์ฟลิว (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิทักษ์ ทางรัตนสุวรรณ เกิดวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปี พ.ศ. 2541 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย