

การศึกษาผลของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
และฮับซิงโครไนส์เรโซแนนซ์



นายบัณฑิต โกศลพิศิษฐ์

สถาบันวิทยบริการ

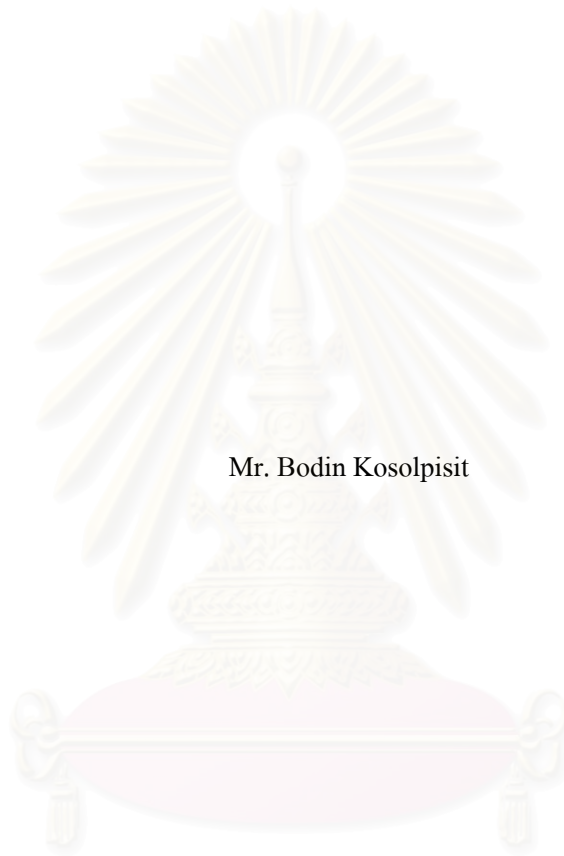
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5401-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF SERIES CAPACITOR EFFECTS ON TOTAL TRANSFER CAPABILITY
AND SUBSYNCHRONOUS RESONANCE



Mr. Bodin Kosolpisit

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 2003

ISBN 974-17-5401-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและช่วงชิงโครนัสเรโซแนนซ์
โดย	นายบัณฑิต โกศลพิศิษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

..... กรรมการ
(ดร.สุเทพ นิมคล้าย)

บดินทร์ โกศลพิศิษฐ์ : การศึกษาผลของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อสมรรถนะการส่งจ่าย
กำลังไฟฟ้าและซับซิงโครนัสเรโซแนนซ์ (A STUDY OF SERIES CAPACITOR
EFFECTS ON TOTAL TRANSFER CAPABILITY AND SUBSYNCHRONOUS
RESONANCE)

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.ดร.ทรงศักดิ์
ชุษณพิพัฒน์ และ อ.ดร.แนบบุญ หุนเจริญ 90 หน้า ISBN 974-17-5401-9

พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีพของมนุษย์ การผลิตพลังงานไฟฟ้าให้
เพียงพอต่อความต้องการ และการส่งจ่ายพลังงานเหล่านั้นไปยังผู้บริโภคจึงเป็นสิ่งจำเป็น ปัจจุบัน
การสร้างโรงไฟฟ้าใหม่หรือการสร้างสายส่งไฟฟ้าเพิ่มเติมเป็นไปได้ยาก เนื่องจากมีข้อจำกัดหลาย
ประการ ดังนั้นการใช้งานระบบผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างเต็มประสิทธิภาพจึงน่าจะเป็น
ทางออกที่ดีทางหนึ่งสำหรับปัญหาความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการใช้ตัวเก็บประจุอนุกรม ในการเพิ่มขีดความสามารถในการส่ง
จ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบส่ง โดยอาศัยหลักและวิธีการคำนวณค่าความสามารถในการส่งจ่าย
กำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีที่รวดเร็ว นอกจากนี้ยังได้พิจารณาถึงปัญหาซับซิงโครนัสเรโซแนนซ์ที่อาจ
เกิดขึ้น เนื่องจากการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ได้รับการตรวจสอบ
ความถูกต้องก่อนนำไปใช้ศึกษาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้
เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยต่อไป อีกทั้งหากในอนาคตข้างหน้า
ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางระบบส่งไฟฟ้าของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การเพิ่มสมรรถนะ
ให้กับระบบส่งในบริเวณดังกล่าว จะยังมีความจำเป็นและสำคัญมากขึ้นเพื่อให้สามารถทำงานได้
อย่างเต็มประสิทธิภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา _____ 2546 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

4370369521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : SERIES CAPACITOR / THYRISTER CONTROLLED SERIES CAPACITOR /
SUBSYNCHRONOUS RESONANCE / TOTAL TRANSFER CAPABILITY

BODIN KOSOLPISIT : A STUDY OF SERIES CAPACITOR EFFECTS ON TOTAL
TRANSFER CAPABILITY AND SUBSYNCHRONOUS RESONANCE

ADVISOR : ASSOC. PROF. SUKUMVITH PHOOMVUTHISARN, Ph.D.

COADVISOR : Mr. SONGSAK CHUNSANAPITAK, Ph.D. and Mr. NAEBBOON
HOONCHAREON, Ph.D., 90 pp. ISBN 974-17-5401-9

Electrical energy is one of the main factors for daily livings. It is necessary that electricity generation meets its demand and that the electric power is successfully transmitted to the consumers. Construction of the new power plants or transmission lines to cope with continually increasing demand has recently shown to be extremely difficult due to various limitations. To that end, a sensible alternative solution would be to utilize the existing generation and transmission at their most efficiency.

This thesis studies the use of series capacitor to increase total transfer capability (TTC) of the transmission network. An efficient algorithm to calculate TTC has been employed. Subsynchronous resonance (SSR) which could possibly occur as a result of using series capacitor has also been taken into account. The developed program has been verified before being used to study the effects of series capacitor on TTC and SSR in the transmission network which links between the central and southern regions of Thailand. Test results provide a basis for further study to improve the transmission network in this area as it will be one of the critical success factors for the ASEAN Power Grid project in the future.

Department Electrical Engineering Student's signature _____.

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature _____.

Academic year 2003 Co-Advisor's signature _____.

Co-Advisor's signature _____.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่านด้วยกัน ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุกท่านที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นอย่างสูง รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร ที่ให้แนวความคิด ให้คำปรึกษาที่ดี รวมทั้งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วิชย์ ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำเรื่องเครื่องจักร แบบซิงโครนัส ดร.ทรงศักดิ์ ชุณพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และเป็นผู้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับเรื่องของซิงโครนัสเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ดร.สุเทพ ฉิมคล้าย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับโปรแกรมของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่เขียนขึ้นมา คุณพิพัฒน์ จิตรนาทรัพย์ วิศวกรไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ที่สนับสนุนข้อมูลเบื้องต้น เป็นที่ปรึกษาในการเขียนโปรแกรมและหนังสือที่เกี่ยวกับเรื่องที่ศึกษา และคุณบุญส่ง กุลศิริพฤกษ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลระบบส่งไฟฟ้า เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ใช้ในการวิเคราะห์ คุณกฤษศ อุดมวงศ์เสรี นิสิตปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยโตเกียว ที่ให้แนวความคิดและอธิบาย หลักการ Two-Step นอกจากนี้ขอขอบคุณ อ.ดร.แนบบุญ หุนเจริญ เป็นอย่างสูง ที่ช่วยดูแล ศึกษา ตรวจสอบและให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่มีประโยชน์อย่างมากในการเขียนทั้งโปรแกรมและวิทยานิพนธ์ และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ท้ายสุดนี้ต้องขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่เป็นกำลังใจในการทำงาน และการจัดทำ วิทยานิพนธ์เล่มนี้ตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
2. สมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	4
2.1 นิยามของ TTC	4
2.2 การคำนวณค่า TTC	5
2.3 การเพิ่มความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรม.....	7
3. ชับซิงโครนัสเรโซแนนซ์	10
3.1 การเกิดสถานะ SSR	10
3.2 การวิเคราะห์ SSR	11
3.2.1 การวิเคราะห์เชิงความถี่.....	11
3.2.2 การวิเคราะห์ด้วยค่าเจาะจง.....	11
3.2.3 การวิเคราะห์ด้วยการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ	12
3.3 แบบจำลองในการศึกษา SSR.....	12
3.3.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	13
3.3.1.1 สมการฟลักซ์คัลล์องขดลวด	14
3.3.1.2 สมการแรงดัน.....	17

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3.1.3 การเปลี่ยนกรอบอ้างอิงโดยปาร์ก	19
3.3.1.4 การทำให้เป็นระบบต่อหน่วย	23
3.3.1.5 การทำให้เป็นเชิงเส้น	26
3.3.2 แบบจำลองของเฟลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกึ่งตัน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	28
3.3.2.1 สมการแรงบิดของแกนหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	29
4. สมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้า	35
4.1 อินซิทเจนซ์เมตริกซ์ของระบบส่งไฟฟ้า.....	35
4.2 สมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้า.....	38
4.3 การเปลี่ยนกรอบอ้างอิงโดยปาร์ก	41
4.4 การทำให้เป็นระบบต่อหน่วย	43
4.5 การทำให้เป็นเชิงเส้น	44
5. การพัฒนาโปรแกรมสำหรับหาค่า TTC และวิเคราะห์ SSR	45
5.1 องค์ประกอบและการทำงานของโปรแกรม.....	45
5.2 การคำนวณค่า TTC ด้วยวิธี Two-Step	48
5.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม	54
5.3.1 การทดสอบความถูกต้องของค่า TTC	54
5.3.2 การทดสอบความถูกต้องของค่าเงาเง	56
5.4 ผลของตัวเก็บประจุอนุกรมในระบบทดสอบ 4 บัส	59
6. การเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรม.....	63
6.1 ระบบส่งไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้.....	63
6.2 หัวข้อการศึกษา.....	66
6.3 ผลการศึกษา.....	67
6.3.1 ผลการศึกษาค่า TTC ของระบบ ในกรณีปกติและกรณีที่มีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง.....	67

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6.3.2 ผลการศึกษา SSR ของระบบ ที่เป็นผลมาจากการตัวเก็บประจุอนุกรม.....	73
6.3.3 ผลการศึกษาค่า TTC ของระบบ หากสนใจข้อจำกัดด้านเสถียรภาพ SSR.....	77
7. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	80
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลของการใส่ TCSC ในระบบทดสอบ 4 บัส.....	8
3.1 ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการแรงบิด	30
5.1 การเปรียบเทียบผลของค่า TTC ในระบบทดสอบ 4 บัส	55
5.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในแบบจำลอง FBM	56
5.3 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	57
5.4 ค่าคงที่ความเฉื่อยและค่าคงที่สปริงของแกนหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	57
5.5 การเปรียบเทียบค่าเจาะจงของแบบจำลอง FBM	58
5.6 ผลของค่า TTC ในระบบทดสอบ 4 บัสเมื่อใส่ TCSC ในสายส่งเส้นต่าง ๆ	59
5.7 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 1 กับ บัส 2.....	60
5.8 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2 กับ บัส 4.....	61
5.9 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 1 กับ บัส 3.....	61
5.10 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 3 กับ บัส 4.....	62
6.1 ข้อมูลบัส ณ จุดทำงานกรณีฐาน	65
6.2 ข้อมูลกำลังการผลิตที่ป้อนเข้าสู่ระบบในกรณีฐาน และขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	65
6.3 ค่าพารามิเตอร์และขีดจำกัดของสายส่งในรูปแบบที่ 6.1	66
6.4 ค่า TTC (MW) กรณีที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 (ขนอม) จ่ายกำลังให้ระบบ 730 MW	67
6.5 ค่า TTC (MW) กรณีที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 (ขนอม) จ่ายกำลังให้ระบบ 712 MW	68
6.6 ค่า TTC (MW) กรณีที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 (ขนอม) จ่ายกำลังให้ระบบ 600 MW	68
6.7 ค่า TTC (MW) กรณีที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 (ขนอม) จ่ายกำลังให้ระบบ 525 MW	69
6.8 ค่า TTC (%) กรณีที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 (ขนอม) จ่ายกำลังให้ระบบ 730 MW	69
6.9 ค่า TTC (%) กรณีที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 (ขนอม) จ่ายกำลังให้ระบบ 712 MW	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
6.10	ค่า TTC (%) กรณีที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 (ขนอม) จ่ายกำลังให้ระบบ 600 MW	70
6.11	ค่า TTC (%) กรณีที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 (ขนอม) จ่ายกำลังให้ระบบ 525 MW	71
6.12	ค่า TTC (MW) สำหรับการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่ 3 และ 17...	72
6.13	ค่า TTC (MW) เปรียบเทียบระหว่างการต่อตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำ ในสายส่งเส้นที่ 13 และ 16	73
6.14	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	74
6.15	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	74
6.16	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	74
6.17	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	74
6.18	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	75
6.19	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	75
6.20	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	75
6.21	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	75
6.22	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	76
6.23	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
6.24	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	76
6.25	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 ด้วยขนาดที่ต่างกัน	76



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณค่า TTC	6
2.2 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2.....	7
2.3 ระบบทดสอบ 4 บัส.....	8
3.1 ภาพตัดขวางของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ในเครื่องจักรแบบซิงโครนัส	1 3
3.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ในกรอบอ้างอิง abc	1 7
3.3 แบบจำลองเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	2 9
3.4 ตัวอย่างของแบบจำลองของเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหัน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	3 3
4.1 วงจรตัวอย่าง.....	3 6
4.2 แบบจำลองของกังหัน.....	3 8
5.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณค่า TTC และหาค่าเจาะจง.....	4 7
5.2 ขั้นตอนการหาค่า TTC ด้วยวิธี Two-Step	4 9
5.3 ระบบทดสอบ 4 บัส.....	5 5
5.4 แบบจำลอง First Benchmark Model	5 6
5.5 เพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	5 6
6.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้	6 4
6.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากบัส 1 ไปยังบัส 9 ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขนอม จ่ายกำลังไฟฟ้า 525 MW และไม่ต่อตัวเก็บประจุอนุกรม.....	78
6.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากบัส 1 ไปยังบัส 9 ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขนอม จ่ายกำลังไฟฟ้า 525 MW และต่อตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 50% ของค่ารีแอกแตนซ์ ในสายส่งเส้นที่ 3.....	7 9

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งวัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการทำงาน และประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้เพื่อความเข้าใจในการเรียงลำดับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ ในหัวข้อย่อยสุดท้ายจะกล่าวถึงเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นความต้องการของผู้บริโภคทุกคน และความต้องการเหล่านั้นก็เพิ่มขึ้นทุกขณะ การทำให้พลังงานเพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภคจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งกระบวนการสร้างพลังงานให้เพียงพอ นั้น นอกจากจะต้องพิจารณาเรื่องของการผลิตพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการแล้ว เรื่องของการส่งจ่ายพลังงานเหล่านั้นให้ไปถึงผู้บริโภคก็เป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ต้องให้ความสนใจด้วยเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นเรื่องที่ยากด้วยเหตุผลหลายประการ โดยเฉพาะเหตุผลด้านสิ่งแวดล้อมและสังคมเป็นหลัก ดังนั้นการใช้สิ่งที่มีอยู่ให้คุ้มค่าจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญด้วยเช่นกัน

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงขีดความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้ากำลัง (Total Transfer Capability, TTC) โดยพิจารณาการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งผ่านทางระบบสายส่งใด ๆ ว่าสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้มากที่สุดเท่าใดจากจุดทำงานแบบสมมูลของระบบที่พิจารณา โดยไม่ฝ่าฝืนข้อจำกัดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า ได้แก่ ข้อจำกัดแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของบัส (Voltage Limits) ข้อจำกัดอุณหภูมิสูงสุดที่สายส่งแต่ละเส้นจะรับได้ (Thermal Limits) และความสามารถในการผลิตกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generation Limit) เป็นหลัก

จากนั้นจะทำการวิเคราะห์การเพิ่มสมรรถนะของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (Series Capacitor) เข้าไปในสายส่งแต่ละเส้น เพื่อศึกษาผลของ TTC ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง อาจทำให้เกิดปัญหาการเรโซแนนซ์ของระบบไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ซิงโครนัส (Subsynchronous Resonance, SSR) ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการวิเคราะห์เพื่อให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยค่าเฉพาะ (Eigenvalues Analysis) ของระบบที่พิจารณา

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและวิเคราะห์การเพิ่มสมรรถนะในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ของประเทศไทย โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรม
2. ศึกษาผลจากการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง ที่มีต่อการเกิดซบซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. การคำนวณค่า TTC ของระบบ จะพิจารณาโดยใช้เงื่อนไขในสภาวะอยู่ตัว ได้แก่ จีดจำกัดทางด้านความร้อนของสายส่ง จีดจำกัดแรงดันขนาดของบัส และจีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลัก
2. พิจารณา ค่า TTC ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสขนอม จ่ายกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ค่าสูงสุด จนถึงปริมาณต่ำสุดของการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ยังคงทำให้ระบบไฟฟ้าสามารถทำงานได้อยู่
3. แบบจำลองของตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง แทนด้วยตัวเก็บประจุที่สามารถเปลี่ยนค่าได้ โดยมีขอบเขตไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ ของค่า รีเอกแตนซ์ ของสายส่งเส้นนั้น ๆ ($0.5 \cdot |X_L| \geq |X_C| \geq 0$) และจะละเลยผลของอุปกรณ์ควบคุมการเปลี่ยนค่าของตัวเก็บประจุ
4. วิเคราะห์ SSR โดยใช้วิธีการหาค่าเจาะจง เพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมในสายส่ง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษานิยามและหลักการคำนวณค่า TTC
2. ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง
3. ศึกษาปัญหาการเกิด SSR ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า รวมถึงวิธีการวิเคราะห์
4. เขียน โปรแกรมการคำนวณค่า TTC และ การวิเคราะห์ปัญหา SSR
5. ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น
6. นำโปรแกรมไปใช้ศึกษาระบบส่งไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้
7. สรุปผลการศึกษา และนำเสนอในรูปแบบของวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. สามารถคำนวณค่า TTC ของระบบส่งไฟฟ้าใด ๆ และรู้ถึงความสามารถที่เพิ่มขึ้นของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อทำการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมในสายส่ง
2. สามารถวิเคราะห์ปัญหา SSR ของระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดขึ้นจากการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม
3. นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์เพื่อการเพิ่มความสามารถของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบส่งไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทย
4. นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ SSR ไปทำการศึกษา และปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลังให้มีเสถียรภาพต่อไป

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ในบทที่ 2 กล่าวถึงนิยามและหลักการของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งผ่านทางระบบสายส่งใด ๆ และการเพิ่มสมรรถนะของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมในสายส่ง

การต่อตัวเก็บประจุอนุกรมอาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ในด้านการเกิดปัญหาฮับซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ ซึ่งในบทที่ 3 จะกล่าวถึงนิยามและการวิเคราะห์ SSR รวมทั้งแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ ทั้งแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครไนส์ แบบจำลองของเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บทที่ 4 นำเสนอวิธีการสร้างสมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้า ซึ่งจะถูกรวมเข้ากับสมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ใช้หาค่าเจาะจงของระบบ เพื่อวิเคราะห์ปัญหา SSR

ในบทที่ 5 กล่าวถึงการเขียนโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์การหาค่า TTC ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธี Two-step รวมไปถึงการวิเคราะห์ค่า TTC ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นต่าง ๆ ในระบบ และโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ SSR ซึ่งใช้วิธีการหาค่าเจาะจง จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในส่วนต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องแล้ว จะนำโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้น ไปใช้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทย โดยมีรายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 6

บทที่ 7 นำเสนอบทสรุปของการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางการนำผลที่ได้จากการศึกษาไปพัฒนาต่อไปเพื่อประโยชน์ในอนาคต

บทที่ 2

สมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ในการออกแบบการทำงานของระบบไฟฟ้าใด ๆ ย่อมต้องการให้ระบบไฟฟ้า สามารถใช้งานได้อย่างเต็มที่ หรือมีสมรรถนะสูงสุด และอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งหากเป็นเช่นนั้น ก็จะทำให้ได้รับประโยชน์และคุ้มค่าสำหรับการลงทุน ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำงานของระบบที่สำคัญ คือ ความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Total Transfer Capability, TTC)

2.1 นิยามของ TTC

TTC คือ ค่าความสามารถสูงสุดในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากบัสต้นทางหรือแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Source bus) ไปยังบัสปลายทางที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้า (Sink bus) ผ่านทางระบบสายส่งที่เชื่อมโยงถึงกัน ที่สามารถเพิ่มขึ้นได้จากจุดทำงานในสภาวะปกติใด ๆ ซึ่งกำหนดให้เป็นกรณีฐาน โดยการทำงานของระบบจะต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ ได้แก่ ข้อจำกัดทางด้านแรงดัน ซึ่งกำหนดให้ขนาดของแรงดันในแต่ละบัส จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง ค่าสูงสุด กับ ค่าต่ำสุด ที่ยอมรับได้ (Voltage Limit) นอกจากนี้สายส่งแต่ละเส้นจะต้องส่งกำลังไฟฟ้าไม่เกินค่าพิกัดสูงสุดของสายส่งเส้นนั้น ๆ ที่จะสามารถรับได้ (Thermal Limit) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าไม่เกินค่าสูงสุดที่สามารถผลิตได้ และ ไม่ต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่จะทำงานได้ (Generation Limit) และ ระบบไฟฟ้าต้องสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ (Stability Limit) [1]

ในการกำหนดค่า TTC ของระบบไฟฟ้าใดก็ตาม จะต้องระบุต้นทางการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และปลายทางรับกำลังไฟฟ้า โดยสามารถกำหนดได้ใน 2 ลักษณะ คือ การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากบัสหนึ่งไปยังอีกบัสหนึ่ง (Bus-to-bus) และการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากพื้นที่หนึ่งไปยังอีกพื้นที่หนึ่ง (Area-to-area) โดยที่แต่ละพื้นที่อาจประกอบไปด้วยบัสต้นทาง หรือบัสปลายทางได้มากกว่าหนึ่งบัส

การคำนวณหาค่า TTC ของระบบไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น จะต้องคำนึงถึงทั้งในกรณีที่ระบบทำงานในสภาวะปกติ และ ในกรณีที่เกิดสภาวะคอนติเจนซี (Contingency) ขึ้นในระบบ เช่น กรณีที่สายส่งไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ หรือ กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขัดข้องไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยค่า TTC ที่คำนวณได้นั้นจะต้องเป็นค่าความสามารถสูงสุดของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นได้ในทุกสภาวะการทำงานที่พิจารณา

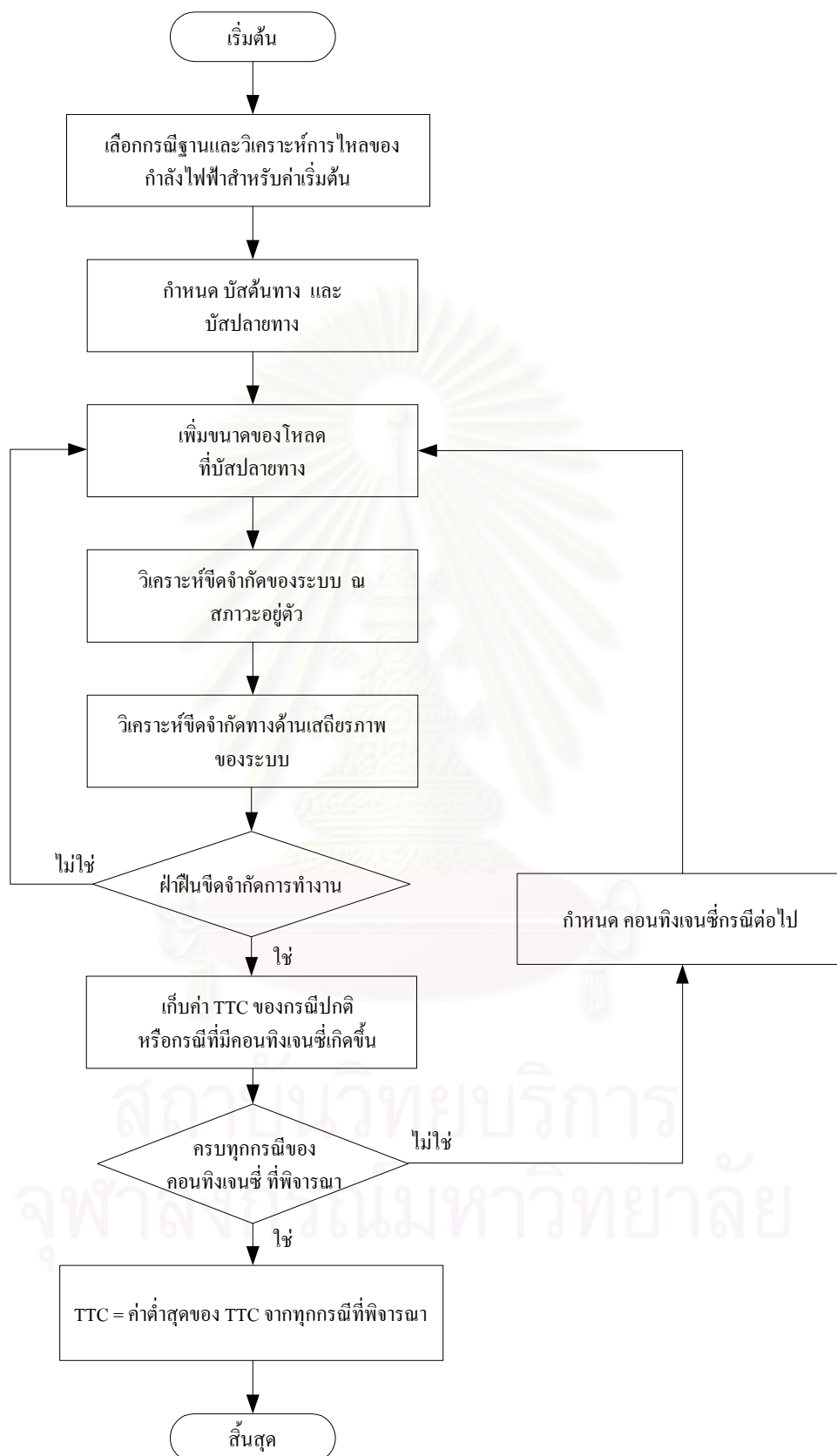
ค่า TTC เป็นดัชนีที่นิยามขึ้นมาเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการซื้อขายไฟฟ้าแบบเสรีในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Power Pool) หรือการซื้อขายไฟฟ้าแบบสัญญาระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย (Bilateral Contract) โดยในการคำนวณความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบว่ายังสามารถรองรับปริมาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้สูงสุดอีกเท่าไรนั้น จะต้องพิจารณาความมั่นคงและเสถียรภาพของระบบเป็นสำคัญ

นอกจากนี้ในทางเทคนิค ยังสามารถนำค่า TTC ไปใช้เพื่อศึกษาถึงความสามารถของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการใส่อุปกรณ์ควบคุมประเภทต่าง ๆ ในระบบส่ง เช่น การใช้ Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) และ Static Var Compensator (SVC) เป็นต้น [2]

2.2 การคำนวณค่า TTC

หลักการโดยทั่วไปในการคำนวณค่า TTC ของระบบไฟฟ้าตามนิยามข้างต้นสามารถแสดงเป็นขั้นตอนได้ดังในรูปที่ 2.1 ซึ่งอธิบายโดยสรุปได้ดังนี้

- 1) กำหนดจุดทำงานของระบบไฟฟ้าที่สนใจเพื่อใช้เป็นกรณีฐาน โดยจุดทำงานที่จะใช้เป็นกรณีฐานนั้นจะต้องเป็นจุดทำงานที่ระบบสามารถทำงานได้ โดยไม่ฝ่าฝืนข้อจำกัดต่าง ๆ อาทิ ข้อจำกัดด้านแรงดันในแต่ละบัส ข้อจำกัดด้านความร้อนของสายส่ง ข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อจำกัดด้านเสถียรภาพของระบบ
- 2) กำหนดบัสต้นทางและบัสปลายทาง ที่จะใช้ในการวิเคราะห์หาค่า TTC ซึ่งบัสต้นทางจะต้องเป็นบัสที่จ่ายกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นไปยังบัสปลายทาง เมื่อบัสปลายทางมีโหลดเพิ่มมากขึ้น โดยให้บัสอื่น ๆ ในระบบมีกำลังการผลิตไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้าคงที่ทั้งในส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ
- 3) เพิ่มขนาดของโหลดที่บัสปลายทางและวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ เพื่อวิเคราะห์ข้อจำกัดของระบบในสถานะอยู่ตัว และข้อจำกัดด้านเสถียรภาพของระบบ
- 4) ตรวจสอบข้อจำกัดต่าง ๆ ของระบบ หากระบบยังคงทำงานอยู่ได้โดยไม่ฝ่าฝืนข้อจำกัดการทำงาน ให้กลับไปยังข้อ 3 แต่หากตรวจสอบแล้วฝ่าฝืนข้อจำกัดแสดงว่าโหลดของบัสปลายทางเพิ่มขึ้นสูงสุดแล้ว
- 5) บันทึกค่า TTC ของระบบ ณ สถานะการทำงานนี้
- 6) เลือกคอนติงเจนซ์ถัดไปสำหรับระบบไฟฟ้าที่สนใจจะพิจารณา เช่น สายส่งบางเส้นหลุดออกจากระบบ หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวไม่ทำงาน
- 7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 จนถึงขั้นตอนที่ 5 ข้างต้นจนครบทุกสถานะการทำงานที่สนใจ
- 8) ค่า TTC ของระบบ ณ จุดทำงานที่พิจารณา คือค่า TTC ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ได้บันทึกไว้ในทุกสถานะการทำงาน



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณค่า TTC

2.3 การเพิ่มความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรม

วิธีที่ใช้เพิ่มความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของสายส่ง วิธีหนึ่งคือการชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้วยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรม เพื่อลดค่ารีแอกแตนซ์สุทธิของสายส่งบางเส้น มีผลทำให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการพื้นฐานดังนี้

พิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างง่าย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2

หากละเลยกำลังสูญเสียในสายส่ง ปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 จะเป็นไปตามสมการที่ (2.1)

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.1)$$

โดยที่ P_{12} คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2

V_1 คือ ขนาดของแรงดันที่จุด 1

V_2 คือ ขนาดของแรงดันที่จุด 2

X_{12} คือ ค่ารีแอกแตนซ์สุทธิในสายส่ง

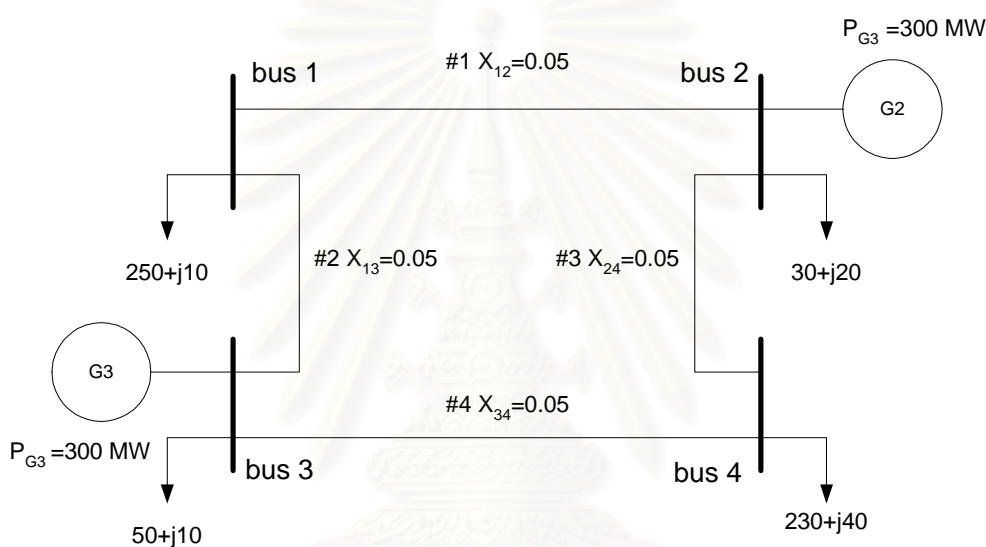
δ_1 คือ มุมเฟสของแรงดันที่จุด 1

δ_2 คือ มุมเฟสของแรงดันที่จุด 2

จากสมการที่ (2.1) จะสังเกตได้ว่า หากควบคุมให้ระดับแรงดันในแต่ละจุดมีค่าคงที่ การเพิ่มการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 สามารถทำได้โดยการลดค่ารีแอกแตนซ์สุทธิในสายส่งลง ซึ่งค่า รีแอกแตนซ์ ในสายส่งโดยทั่วไป จะมีองค์ประกอบที่เป็นตัวเหนี่ยวนำเป็นหลัก ดังนั้นการลดค่า X_{12} จึง สามารถทำได้โดยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง ซึ่งจากความสัมพันธ์ตามสมการ (2.1) ทำให้ปริมาณการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จากบัสที่ 1 ไปยังบัสที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น

ในทางปฏิบัติ การชดเชยค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่ง สามารถทำได้โดยใช้ TCSC ซึ่งสามารถปรับค่ารีแอกแตนซ์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีหลักการทำงาน คือ การควบคุมจังหวะการจูดชนวนของ ไทริสเตอร์ ทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC แปรค่าได้ทั้งค่าบวก (inductance) และค่าลบ (capacitance) ซึ่งมีตัวอย่างการติดตั้งใช้งานจริงของ TCSC เช่น ที่สถานีไฟฟ้า BPA's Slatt Station ในมลรัฐโอเรกอน สหรัฐอเมริกา [3]

ในระบบไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่จริง จะประกอบด้วยจำนวนบัสและสายส่งจำนวนมาก การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุอนุกรม หรือ TCSC ในสายส่งแต่ละเส้น หรือ ชดเชยด้วยตัวเก็บประจุที่มีขนาดแตกต่างกัน อาจส่งผลต่อการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังตัวอย่างต่อไปนี้ [2]



รูปที่ 2.3 ระบบทดสอบ 4 บัส

จากระบบทดสอบในรูปที่ 2.3 หากกำหนดให้บัสที่ 3 เป็นบัสต้นทาง และให้บัสที่ 2 และ 4 เป็นบัสปลายทาง (กำหนดให้บัสปลายทางเป็นกลุ่ม) จากการศึกษา [2] ดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า การใช้ TCSC มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า TTC นอกจากนี้ยังสามารถบอกได้ว่า ตำแหน่งของการต่อ TCSC มีผลสำหรับการเพิ่มขึ้นของค่า TTC ด้วย

ตารางที่ 2.1 ผลของการใส่ TCSC ในระบบทดสอบ 4 บัส [2]

	ไม่มี TCSC	มี TCSC ที่สายส่ง 1	มี TCSC ที่สายส่ง 2	มี TCSC ที่สายส่ง 3	มี TCSC ที่สายส่ง 4
TTC (MW.)	169	182	208	195	221
การเพิ่มขึ้นของ TTC	-	7.69%	23.08%	15.38%	30.77%

อย่างไรก็ตามการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง อาจมีผลทำให้เกิดการแกว่งของกระแสและแรงดัน ที่ความถี่เรโซแนนซ์ อันเป็นผลมาจากตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ในระบบ ซึ่งความถี่ของการแกว่งดังกล่าว อาจมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของระบบขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลทำให้เกิดปัญหาซบซิงโครนัสเรโซแนนซ์ (Subsynchronous Resonance, SSR) ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจได้รับความเสียหายได้ รายละเอียดของการวิเคราะห์ SSR จะกล่าวถึงในบทต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ซับซิงโครนัสเรโซแนนซ์

ในบทนี้จะอธิบายถึงลักษณะของการเกิดปัญหาซับซิงโครนัสเรโซแนนซ์ (Subsynchronous Resonance, SSR) วิธีการที่ใช้วิเคราะห์ SSR รวมถึงการสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสและแบบจำลองของเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ใช้ในการสร้างสมการสถานะเพื่อวิเคราะห์ปัญหา SSR ต่อไป

3.1 การเกิดสถานะ SSR

SSR คือปรากฏการณ์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานกัน ระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากับชุดกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยที่ความถี่นั้นมีค่าต่ำกว่าความถี่ซิงโครนัส [4] ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสในระบบที่มีความถี่นอกเหนือจากความถี่มูลฐาน

กระแสที่ไหลในระบบขณะที่เกิด SSR สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 3.1

$$i(t) = K \left[A \sin(\omega_1 t + \psi_1) + B e^{-\zeta \omega_2 t} \sin(\omega_2 t + \psi_2) \right] \quad (3.1)$$

กระแสในส่วนแรก คือกระแสที่ความถี่มูลฐาน (ω_1) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนที่สองคือกระแสที่มีความถี่อื่น (ω_2) ซึ่งอาจมีค่าได้ทั้งต่ำและสูงกว่า ω_1 ขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบ โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสมการนั้นเป็นไปตามส่วนประกอบในระบบไฟฟ้ากำลังและ ω_1 เป็นความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสในสมการที่ (3.1) ที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อทำการแปลงโดยใช้การแปลงของปาร์ก (Park's Transformation) จะได้ว่า กระแสในส่วนของความถี่ปกติ ω_1 เมื่อมองจากทางด้านโรเตอร์จะเห็นเป็นส่วนของกระแสตรงในสถานะอยู่ตัว ส่วนกระแสที่ความถี่ ω_2 จะแยกออกเป็นส่วนประกอบของกระแสสลับ ที่ค่าความถี่ผลบวกและความถี่ผลลบ กล่าวคือ $\omega_1 + \omega_2$ และ $\omega_1 - \omega_2$ ตามลำดับ จะเรียกความถี่ผลบวกว่าความถี่ซูเปอร์ซิงโครนัส (Supersynchronous Frequency) และเรียกความถี่ผลลบว่าความถี่ซับซิงโครนัส (Subsynchronous Frequency) โดยส่วนประกอบของกระแสสลับดังกล่าว จะก่อให้เกิดแรงบิดแบบกลับไปกลับมา

(Pulsating Torque) ขึ้นที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสั่นของโรเตอร์ที่ความถี่ดังกล่าว

โดยปกติแล้วเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีความถี่ธรรมชาติอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าความถี่ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ซบซิงโครนัส อาจทำให้เกิดการสอดคล้องของความถี่และทำให้เกิดการสั่นอย่างต่อเนื่อง โดยขนาดของการสั่นอาจมีค่าสูงขึ้นได้ ซึ่งเป็นต้นเหตุที่นำไปสู่ความเสียหายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า SSR

3.2 การวิเคราะห์ SSR

หลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์ SSR นั้น โดยทั่วไปมีด้วยกัน 3 วิธีดังนี้

3.2.1 การวิเคราะห์เชิงความถี่

การวิเคราะห์เชิงความถี่ (Frequency Scanning) เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ปัญหา SSR ซึ่งจะทำการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบ โดยพิจารณาจากตำแหน่งสเตเตอร์ เข้าไปยังโครงข่ายในแต่ละความถี่ หากค่าของอินดักแตนซ์ที่ความถี่นั้น มีค่าเป็นศูนย์และความต้านทานมีค่าเป็นลบ จะบ่งบอกถึงการเกิดการสั่นภายในตัวเองได้

ข้อจำกัดของวิธีวิเคราะห์เชิงความถี่ คือ ตำแหน่งที่มองออกจากขดลวดสเตเตอร์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบ จะเปลี่ยนไปตามเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องการพิจารณาการเกิดปัญหา SSR

3.2.2 การวิเคราะห์ด้วยค่าเจาะจง

การวิเคราะห์ค่าเจาะจง (Eigenvalues Analysis) สามารถใช้วิเคราะห์ระบบโครงข่ายและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมกันอยู่ โดยหาค่าเจาะจงของสมการอนุพันธ์เชิงเส้นที่ใช้แทนระบบดังกล่าว ซึ่งผลที่ได้จะบอกถึงค่าความถี่ของการสั่นและค่าการหน่วงในแต่ละความถี่

วิธีนี้ใช้ได้กับระบบที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น โดยทั่วไปสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังสมการที่ (3.2) และหาค่าเจาะจงของระบบได้จากสมการที่ (3.3)

$$\dot{X} = AX + BU \quad (3.2)$$

โดยที่ X คือตัวแปรสถานะ และ U คือสัญญาณขาเข้าของระบบที่พิจารณา

$$\det[\lambda I - A] = 0 \quad (3.3)$$

โดยที่ λ คือ ค่าเฉพาะของระบบ ซึ่งมีจำนวนเท่ากับขนาดของเมทริกซ์ A

I คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ที่มีขนาดเท่ากับเมทริกซ์ A

ข้อดีของวิธีวิเคราะห์แบบค่าเฉพาะ คือสามารถหาค่าทั้งความถี่ของการสั่นและการหน่วงในแต่ละความถี่ได้ แต่มีข้อเสียคือ วิธีนี้จะใช้ได้กับระบบที่มีการทำให้เป็นเชิงเส้นเท่านั้น

3.2.3 การวิเคราะห์ด้วยการจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ

การจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ (Time-domain simulation) สามารถทำได้โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transient Program) ซึ่งจะทำการแก้ปัญหาสมการอนุพันธ์ด้วยวิธีเชิงเลข

การวิเคราะห์ปัญหา SSR โดยใช้วิธีจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ สามารถใช้กับแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาาระบบขนาดใหญ่หรือการวิเคราะห์อย่างละเอียด และสามารถบอกรายละเอียดของปัญหาได้ดีที่สุด แต่มีข้อเสียคือต้องใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์ที่มากและเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ต้องมีความสามารถในการคำนวณสูง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการหาค่าเฉพาะ เพื่อศึกษาปัญหา SSR ของระบบ ต่อการรบกวนของสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Stability) ที่เกิดขึ้นรอบจุดทำงานสมดุลใด ๆ

3.3 แบบจำลองในการศึกษา SSR

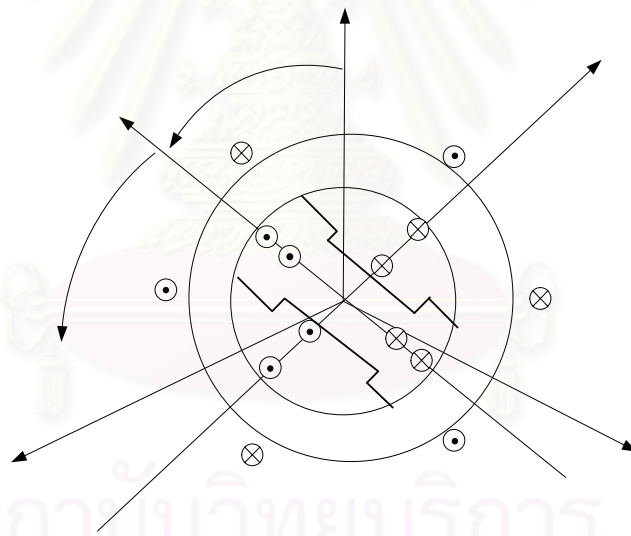
การศึกษา SSR โดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยการหาค่าเฉพาะ จำต้องอาศัยแบบจำลองเชิงเส้นของระบบ ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และส่วนของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ซึ่งในส่วนนี้จะรวมไปถึงการต่ออนุกรมของตัวเก็บประจุด้วย ซึ่งอาจจะทำให้เกิดปัญหา SSR ดังที่กล่าวถึงข้างต้น

ในบทนี้จะนำเสนอการสร้างแบบจำลองเชิงเส้นใน 2 ส่วนแรกก่อน คือ แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส และแบบจำลองเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมถึงการสร้างสมการสถานะเพื่อใช้ในการคำนวณค่าเฉพาะ ในส่วนของแบบจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะนำเสนอในบทต่อไป

3.3.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์

แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ SSR ในที่นี้จะกำหนดให้เป็นแบบขั้วขึ้น จำนวนวงจรถูกอยู่บนโรเตอร์แกนละ 2 วงจร ทั้งในแกน d และแกน q และใช้การแปลงของปาร์กแปลงค่าตัวแปรด้านสเตเตอร์ จากกรอบอ้างอิง abc ไปเป็นกรอบอ้างอิง 0dq โดยมีข้อสมมติฐานดังนี้

- 1) ความหนาแน่นของฟลักซ์บนขดลวดด้านสเตเตอร์ เป็นคลื่นรูปไซน์
- 2) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced emf) ในแต่ละเฟสสามารถแทนด้วยวงจรมุมของขดลวดชุดเดียว เนื่องจากเป็นระบบ 3 เฟสสมดุล
- 3) วงจรไฟฟ้าสมมูลทั้ง 2 ของโรเตอร์จะแทนด้วยแกน d และแกน q
- 4) ทิศทางการหมุนของโรเตอร์ที่เป็นบวกและทิศแกน d และ q เป็นไปตามมาตรฐาน IEC ตามที่แสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางของขดลวดบนสเตเตอร์และโรเตอร์ในเครื่องจักรแบบเชิงโรตอร์

ขดลวดในรูปที่ 3.1 มีจำนวน 7 ชุด แบ่งเป็นขดลวดในส่วนของสเตเตอร์ 3 ชุดในเฟส a, b, c ตามลำดับ และขดลวดในส่วนของโรเตอร์อีก 4 ชุดคือ D, F, G, Q ซึ่งขดลวด D, F พันอยู่รอบ d และขดลวด G, Q พันอยู่รอบ q โดยที่ θ คือตำแหน่งอ้างอิงของโรเตอร์มีหน่วยเป็นเรเดียน

3.3.1.1 สมการฟลักซ์ค้ำองขดลวด

สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับค่ากระแสในขดลวดได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_F \\ \Psi_D \\ \Psi_G \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aG} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bG} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cG} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FG} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DG} & L_{DQ} \\ L_{Ga} & L_{Gb} & L_{Gc} & L_{GF} & L_{GD} & L_{GG} & L_{GQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QG} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

โดยค่าความเหนี่ยวนำ ในสมการที่ (3.4) สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดบนสเตเตอร์ (Stator self-inductances)

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_s + L_m \cos 2\theta \\ L_{bb} &= L_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{cc} &= L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

L_s และ L_m เป็นค่าคงที่

ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์ (Stator mutual inductances)

ค่าความเหนี่ยวนำร่วม ระหว่างขดลวดต่าง ๆ ที่อยู่บนสเตเตอร์ เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของโรเตอร์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 L_{ab} = L_{ba} &= -M_s - L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \\
 L_{bc} = L_{cb} &= -M_s - L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \\
 L_{ca} = L_{ac} &= -M_s - L_m \cos 2\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

M_s คือค่า ความเหนี่ยวนำร่วม ที่เป็นค่าคงที่

ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดบนโรเตอร์ (Rotor self inductances)

ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง ของขดลวดบนโรเตอร์แต่ละชุดมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับตำแหน่งของโรเตอร์

$$\begin{aligned}
 L_{FF} &= L_F \\
 L_{DD} &= L_D \\
 L_{GG} &= L_G \\
 L_{QQ} &= L_Q
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดบนโรเตอร์ (Rotor mutual inductances)

ค่าความเหนี่ยวนำร่วม ระหว่างขดลวดแต่ละชุดบนโรเตอร์มีค่าคงที่สำหรับขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเดียวกัน และมีค่าเป็นศูนย์สำหรับขดลวดที่พันอยู่ต่างแกนกัน เนื่องจากแกนทั้ง 2 ทำมุมกัน 90 องศา ดังนี้

$$\begin{aligned}
 L_{FD} &= L_{DF} = M_X \\
 L_{GQ} &= L_{QG} = M_Y \\
 L_{FG} &= L_{GF} = L_{FQ} = L_{QF} = 0 \\
 L_{DG} &= L_{GD} = L_{DQ} = L_{QD} = 0
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

โดยที่ M_X และ M_Y เป็นค่าคงที่บวก

ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดบนสเตเตอร์กับขดลวดบนโรเตอร์ (Stator-to-Rotor mutual inductances)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ ความเหนี่ยวนำร่วมกับขดลวดบนแกน d และความเหนี่ยวนำร่วมกับขดลวดบนแกน q

1) ความเหนี่ยวนำร่วมกับขดลวดบนแกน d

$$L_{aF} = L_{Fa} = M_F \cos \theta$$

$$L_{bF} = L_{Fb} = M_F \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{cF} = L_{Fc} = M_F \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$
(3.9)

$$L_{aD} = L_{Da} = M_D \cos \theta$$

$$L_{bD} = L_{Db} = M_D \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{cD} = L_{Dc} = M_D \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$
(3.10)

โดยที่ M_F และ M_D เป็นค่าคงที่บวก

2) ความเหนี่ยวนำร่วมกับขดลวดบนแกน q

$$L_{aG} = L_{Ga} = M_G \sin \theta$$

$$L_{bG} = L_{Gb} = M_G \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{cG} = L_{Gc} = M_G \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$
(3.11)

$$L_{aQ} = L_{Qa} = M_Q \sin \theta$$

$$L_{bQ} = L_{Qb} = M_Q \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{cQ} = L_{Qc} = M_Q \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$
(3.12)

โดยที่ M_G และ M_Q เป็นค่าคงที่บวก

แทนค่าสมการที่ (3.5) ถึง (3.12) ลงในสมการที่ (3.4) และจัดให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์แบบแยกส่วน ได้ดังนี้

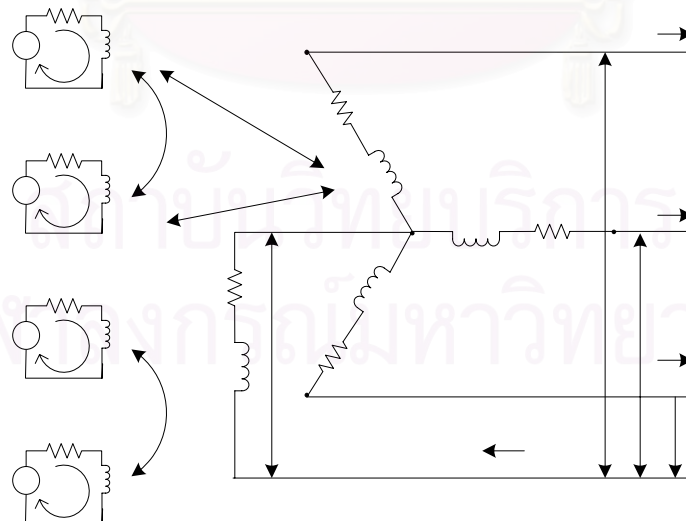
$$\begin{bmatrix} \underline{\psi}_{abc} \\ \underline{\psi}_{FD} \\ \underline{\psi}_{GQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{SS}(\theta) & L_{SD}(\theta) & L_{SQ}(\theta) \\ L_{SD}^T(\theta) & L_{DD} & 0 \\ L_{SQ}^T(\theta) & 0 & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FD} \\ i_{GQ} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

ข้อสังเกต

- 1) ค่าความเหนี่ยวนำ ในสเตเตอร์เป็นฟังก์ชันของมุม θ
- 2) ค่าความเหนี่ยวนำ ในโรเตอร์เป็นค่าคงที่
- 3) ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างแกน d กับ q มีค่าเป็นศูนย์

3.3.1.2 สมการแรงดัน

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส สามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ในกรอบอ้างอิง abc

สมการแรงดันที่ขั้วของขดลวดแต่ละชุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถเขียนตามรูปที่ 3.2 ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ -v_F \\ -v_D \\ -v_G \\ -v_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_a & & & \\ & r_b & & \\ & & r_c & \\ \hline & & & r_F \\ & & & & r_D \\ \hline & & & & & r_G \\ & & & & & & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s\psi_a \\ s\psi_b \\ s\psi_c \\ s\psi_F \\ s\psi_D \\ s\psi_G \\ s\psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_n \\ v_n \\ v_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

โดยสัญลักษณ์ s แทนอนุพันธ์ของตัวแปรเทียบกับเวลา หรือ $s=d/dt$

จากสมการที่ (3.14) ถ้าแยกวงจรด้านสเตเตอร์ กับ โรเตอร์ ออกจากกัน โดยให้ส่วนที่เกี่ยวข้องกับโรเตอร์ ใช้ตัวห้อยเป็น “R” และทางฝั่งสเตเตอร์ใช้ตัวห้อยเป็น “S” หรือ abc โดยกำหนดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ทุกชุดมีค่าเท่ากัน กล่าวคือ $r_a = r_b = r_c$ แล้วเราสามารถเขียนสมการแรงดันที่ขั้วของขดลวดในรูปแบบย่อ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_R \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s\psi_{abc} \\ s\psi_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_n \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

โดยที่

$$v_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad v_R = \begin{bmatrix} -v_F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \psi_{abc} = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}, \quad \psi_R = \begin{bmatrix} \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_G \\ \psi_Q \end{bmatrix}, \quad v_n = \begin{bmatrix} v_n \\ v_n \\ v_n \end{bmatrix}$$

$$R_S = r_a U_3, \quad R_R = \begin{bmatrix} R_F & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix}$$

และ U_n คือเมตริกซ์เอกลักษณ์ขนาด $n \times n$

3.3.1.3 การเปลี่ยนกรอบอ้างอิงโดยปาร์ก

เพื่อให้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสต่อการวิเคราะห์ จะทำการเปลี่ยนกรอบอ้างอิงจาก abc ของขดลวดสเตเตอร์เป็นกรอบ 0dq โดยการใช้การแปลงของปาร์ก ตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$f_{odq} = Pf_{abc} \quad (3.16)$$

โดยที่

$$f_{abc} = \begin{bmatrix} f_a & f_b & f_c \end{bmatrix}^T \text{ เป็นตัวแปรใด ๆ ในกรอบอ้างอิง abc และ}$$

$$f_{odq} = \begin{bmatrix} f_0 & f_d & f_q \end{bmatrix}^T \text{ เป็นตัวแปรที่สอดคล้องกันในกรอบอ้างอิง odq}$$

เมตริกซ์ P ในสมการที่ (3.16) มีค่าดังนี้

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta & \sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

จะสังเกตเห็นว่าเมตริกซ์ P มีคุณสมบัติเป็น Orthonormal Matrix กล่าวคือ $P^T = P^{-1}$

จากสมการฟลักซ์ค้ำของขดลวด สมการที่ (3.13) ทำการแปลงค่าฟลักซ์และกระแสในขดลวดฝั่งสเตเตอร์ จากกรอบอ้างอิง abc เป็น odq โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.16) และการคูณด้วยเมตริกซ์ T ทางด้านหน้าของทั้ง 2 ฝั่งของสมการ ซึ่งเมตริกซ์ T มีค่าดังนี้

$$T = \begin{bmatrix} P & 0 & 0 \\ 0 & U_2 & 0 \\ 0 & 0 & U_2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \Psi_{0dq} \\ \Psi_{FD} \\ \Psi_{GQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} PL_{SS}P^{-1} & PL_{SD} & PL_{SQ} \\ (PL_{SD})^T & L_{DD} & 0 \\ (PL_{SQ})^T & 0 & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FD} \\ i_{GQ} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

เมื่อทำการคำนวณค่าเมตริกซ์ย่อยในสมการที่ (3.19) จะได้ว่า

$$PL_{SS}P^{-1} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$PL_{SD} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ kM_F & kM_D \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$PL_{SQ} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ kM_G & kM_Q \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

โดยที่

$$L_0 = L_s - 2M_s$$

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2}L_m \quad \text{และ} \quad k = \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2}L_m$$

แทนค่าสมการที่ (3.20) ถึง (3.22) ลงในสมการที่ (3.19) และทำการจัดรูปใหม่โดยแยกองค์ประกอบในส่วนของแต่ละแกน 0 แกน d และแกน q ออกจากกัน จะได้สมการพลาซมัลส์คัลล์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \psi_0 \\ \psi_d \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_q \\ \psi_G \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & & & & & & \\ & L_d & kM_F & kM_D & & & \\ & kM_F & L_F & M_X & & & \\ & kM_D & M_X & L_D & & & \\ & & & & L_q & kM_G & kM_Q \\ & & & & kM_G & L_G & M_Y \\ & & & & kM_Q & M_Y & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

สมการที่ (3.23) มีข้อสังเกตดังนี้

- 1) เมตริกซ์ความเหนี่ยวนำที่ได้จากการแปลงมีลักษณะสมมาตร
- 2) ค่าความเหนี่ยวนำ ในเมตริกซ์ไม่ขึ้นกับตำแหน่งของโรเตอร์ (θ)
- 3) ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดที่อยู่บนแกนที่ต่างกัน ถูกกำจัดออกไป เนื่องจากการแปลงของการแปลง

ในทำนองเดียวกัน สามารถแปลงสมการแรงดันที่ (3.15) ในส่วนของแรงดัน กระแส และ ฟลักซ์คัลล์องทางฝั่งสเตเตอร์จากรอบ abc ไปเป็นกรอบ 0dq ได้ดังสมการที่ (3.24)

$$T = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_4 \end{bmatrix}$$

จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} v_{odq} \\ v_R \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Ps \psi_{abc} \\ s \psi_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P v_n \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

เมื่อทำการคำนวณเมตริกซ์ย่อยในสมการที่ (3.24) จะได้ว่า

$$P(s \psi_{abc}) = s \psi_{0dq} - (sP)P^{-1} \psi_{0dq} \quad (3.25)$$

$$(sP)P^{-1} \psi_{0dq} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega \psi_q \\ +\omega \psi_d \end{bmatrix} = v_\omega \quad (3.26)$$

$$Pv_n = \begin{bmatrix} v_{n0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, v_{n0} = 3r_n i_0 + 3L_n s i_0 \quad (3.27)$$

โดยที่ $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ ซึ่งก็คือค่าความเร็วของโรเตอร์ (rotor speed)

แทนค่าสมการที่ (3.25) และ (3.27) ลงในสมการที่ (3.24) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} v_{odq} \\ v_R \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s\psi_{0dq} \\ s\psi_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v\omega \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{n0} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

หากจัดเรียงสมการที่ (3.28) โดยแยกปริมาณในแกน d และแกน q ออกจากกันจะได้ผลดังนี้

$$\begin{bmatrix} +v_0 \\ +v_d \\ -v_F \\ 0 \\ +v_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_a + 3r_n & & & & & & \\ & r_a & & & & & \\ & & r_F & & & & \\ & & & r_D & & & \\ & & & & r_a & & \\ & & & & & r_G & \\ & & & & & & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega\psi_q \\ 0 \\ 0 \\ +\omega\psi_d \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} L_0 + 3L_n & & & & & & \\ & L_d & kM_F & kM_D & & & \\ & kM_F & L_F & M_X & & & \\ & kM_D & M_X & L_D & & & \\ & & & & L_q & kM_G & kM_Q \\ & & & & kM_G & L_G & M_Y \\ & & & & kM_Q & M_Y & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} si_0 \\ si_d \\ si_F \\ si_D \\ si_q \\ si_G \\ si_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega\psi_q \\ 0 \\ 0 \\ +\omega\psi_d \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

สมการที่ (3.29) แสดงสมการแรงดันในกรอบอ้างอิง 0dq ซึ่งจะเห็นว่าสามารถแยกส่วนการพิจารณาในแต่ละแกนออกจากกันได้

3.3.1.4 การทำเป็นระบบต่อหน่วย

การแปลงให้เป็นระบบต่อหน่วย คือ การหารด้วยค่าฐานที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ในระบบ และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ เป็นไปได้โดยสะดวก โดยค่าฐานของปริมาณต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบต่อหน่วยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับกระแสทำให้ได้

$$\Psi_{base} = L_{base} I_{base} \quad (3.30)$$

และความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$v_{base} = Z_{base} I_{base} \quad (3.31)$$

จากความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ และค่าอินดักแตนซ์ ในสมการที่ (3.30) และ (3.31) สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$v_{base} = \omega_{base} \Psi_{base} \quad (3.32)$$

ในการวิเคราะห์นี้จะเลือกค่าฐานของตัวเหนี่ยวนำในแต่ละวงจร เพื่อให้ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดแต่ละชุดในแกนเดียวกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน จากสมการที่ (3.21) หากละเลยวงจร 0 ออกเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานภายใต้สภาวะสามเฟสแบบสมดุล สมการฟลักซ์คัลล์ในระบบต่อหน่วย เขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_F \\ \Psi_D \\ \Psi_q \\ \Psi_G \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & L_{AD} & L_{AD} & & & \\ L_{AD} & L_F & L_{AD} & & & \\ L_{AD} & L_{AD} & L_D & & & \\ & & & L_q & L_{AQ} & L_{AQ} \\ & & & L_{AQ} & L_G & L_{AQ} \\ & & & L_{AQ} & L_{AQ} & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

หากกำหนดให้ L_{AD} คือ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดในแนวแกน d
 L_{AQ} คือ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดในแนวแกน q
 l_i คือ ความเหนี่ยวนำรั่วของขดลวด i

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} L_{AD} &= kM_F = kM_D = M_X \quad ; \quad L_{AQ} = kM_G = kM_Q = M_Y \quad pu \\ L_d &= l_a + L_{AD} & L_q &= l_a + L_{AQ} \quad pu \\ L_F &= l_F + L_{AD} & L_G &= l_G + L_{AQ} \quad pu \\ L_D &= l_D + L_{AD} & L_Q &= l_Q + L_{AQ} \quad pu \end{aligned}$$

ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าแนวแกนหลักของเมตริกซ์ย่อย มีค่าเท่ากันหมดในแต่ละแกน

ในส่วนของสมการแรงดันก็เช่นเดียวกัน เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ จะทำให้อยู่ในรูปของค่าต่อหน่วย โดยที่สมการที่ (3.29) จะละเลยวงจร 0 ออก ซึ่งสมการที่ทำให้เป็นค่าต่อหน่วย เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ 0 \\ v_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_a & & & & & \\ & r_F & & & & \\ & & r_D & & & \\ & & & r_a & & \\ & & & & r_G & \\ & & & & & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{1}{\omega_B} \begin{bmatrix} s\psi_d \\ s\psi_F \\ s\psi_D \\ s\psi_q \\ s\psi_G \\ s\psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_q \\ 0 \\ 0 \\ +\omega\psi_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

โดยตัวแปรและพารามิเตอร์ของระบบทุกตัวในสมการที่ (3.34) มีค่าเป็น pu. ยกเว้นเวลาที่ยังคงมีหน่วยเป็นวินาที และ ω_B เป็นค่าคงที่เท่ากับค่าฐานความเร็วของโรเตอร์

นอกจากนั้นสามารถเขียนสมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Torque) ในทิศทางด้านการหมุนของโรเตอร์ได้ดังนี้

$$T_{eg} = (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3.35)$$

จากสมการที่ (3.33) สามารถกำหนดความสัมพันธ์ของกระแส ในรูปของฟลักซ์ค้ำต้องขดลวดได้ดังสมการที่ (3.36)

$$\psi = Li \implies i = L^{-1}\psi = \Gamma\psi \quad (3.36)$$

โดยที่

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_{dd} & \Gamma_{dF} & \Gamma_{dD} & & & \\ \Gamma_{Fd} & \Gamma_{FF} & \Gamma_{FD} & & & \\ \Gamma_{Dd} & \Gamma_{DF} & \Gamma_{DD} & & & \\ \hline & & & \Gamma_{qq} & \Gamma_{qG} & \Gamma_{qQ} \\ & & & \Gamma_{Gq} & \Gamma_{GG} & \Gamma_{GQ} \\ & & & \Gamma_{Qq} & \Gamma_{QG} & \Gamma_{QQ} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

จากสมการที่ (3.33) แทนค่าลงในสมการที่ (3.34) เราจะสามารถแสดงแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสในรูปของสมการสถานะเชิงเส้น (Linear State-Space Equation) โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะคือ ฟลักซ์ค้ำต้องขดลวด (ψ) สัญญาณขาเข้าคือแรงดัน (v) และสัญญาณขาออกคือกระแส (i) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_F \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_q \\ \dot{\psi}_G \\ \dot{\psi}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{dd} & h_{dF} & h_{dD} & & & \\ h_{Fd} & h_{FF} & h_{FD} & & & \\ h_{Dd} & h_{DF} & h_{DD} & & & \\ \hline & & & h_{qq} & h_{qG} & h_{qQ} \\ & & & h_{Gq} & h_{GG} & h_{GQ} \\ & & & h_{Qq} & h_{QG} & h_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_q \\ \psi_G \\ \psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_B \omega \psi_q \\ 0 \\ 0 \\ \omega_B \omega \psi_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_B v_d \\ \omega_B v_F \\ 0 \\ -\omega_B v_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

โดยที่ $h_{ik} = -\omega_B r_i \Gamma_{ik}$ ตัวห้อย i คือตัวอ้างอิงถึงตำแหน่งของแถว k คือตัวอ้างอิงถึงตำแหน่งของหลัก

นอกจากนี้ความเร็วของโรเตอร์ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แทนได้ด้วยสมการการแกว่ง (Swing Equation)

$$2Hs\omega = T_m - T_e - D\Delta\omega \quad (3.39)$$

3.3.1.5 การทำให้เป็นเชิงเส้น

แบบจำลองเชิงเส้นในรูปของสมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถแสดงได้โดยการรวมสมการที่ (3.38) เข้ากับ (3.39) และทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearlization) รอบจุดทำงานสมดุลใด ๆ $(\psi_{do}, \psi_{qo}, i_{do}, i_{qo}, \omega_o)$ ของส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3.34) และ (3.35) เป็นสมการเชิงเส้น ซึ่งได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta v_d &= -r_a \Delta i_d - \frac{1}{\omega_B} \frac{d\Delta\psi_d}{dt} - \omega_o \Delta\psi_q - \psi_{qo} \Delta\omega \\ \Delta v_q &= -r_a \Delta i_q - \frac{1}{\omega_B} \frac{d\Delta\psi_q}{dt} + \omega_o \Delta\psi_d + \psi_{do} \Delta\omega \\ \Delta T_{eg} &= \psi_{do} \Delta i_q + i_{qo} \Delta\psi_d - \psi_{qo} \Delta i_d - i_{do} \Delta\psi_q \end{aligned} \quad (3.40)$$

จากสมการที่ (3.40) จะละเลย Δ และเพื่อความสะดวกจะจัดรูปสมการใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned} s\psi_d &= -\omega_B v_d - \omega_B r_a i_d - \omega_B \omega_o \psi_q - \omega_B \psi_{qo} \omega \\ s\psi_q &= -\omega_B v_q - \omega_B r_a i_q + \omega_B \omega_o \psi_d + \omega_B \psi_{do} \omega \\ T_{eg} &= \psi_{do} i_q + i_{qo} \psi_d - \psi_{qo} i_d - i_{do} \psi_q \end{aligned} \quad (3.41)$$

จากสมการที่ (3.36) และ (3.37) จะได้

$$\begin{aligned} i_d &= \Gamma_{dd} \psi_d + \Gamma_{dF} \psi_F + \Gamma_{dD} \psi_D \\ i_q &= \Gamma_{qq} \psi_q + \Gamma_{qG} \psi_G + \Gamma_{qQ} \psi_Q \end{aligned} \quad (3.42)$$

แทนค่ากระแสจากสมการที่ (3.42) ลงในสมการที่ (3.41) จะได้

$$T_{eg} = (\psi_{do} \Gamma_{qq} - i_{do}) \psi_q + \psi_{do} \Gamma_{qG} \psi_G + \psi_{do} \Gamma_{qQ} \psi_Q - (\psi_{qo} \Gamma_{dd} - i_{qo}) \psi_d - \psi_{qo} \Gamma_{dF} \psi_F - \psi_{qo} \Gamma_{dD} \psi_D \quad (3.43)$$

และเพื่อความชัดเจน จะจัดรูปสมการแรงบิดที่ได้ดังนี้

$$T_{eg} = I_{qq} \psi_q + I_{qG} \psi_G + I_{qQ} \psi_Q - I_{dd} \psi_d - I_{dF} \psi_F - I_{dD} \psi_D \quad (3.44)$$

โดยที่

$$I_{dd} = (\psi_{qo} \Gamma_{dd} - i_{qo}) ; I_{dF} = \psi_{qo} \Gamma_{dF} ; I_{dD} = \psi_{qo} \Gamma_{dD}$$

$$I_{qq} = (\psi_{do} \Gamma_{qq} - i_{do}) ; I_{qG} = \psi_{do} \Gamma_{qG} ; I_{qQ} = \psi_{do} \Gamma_{qQ}$$

จากที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแบบจำลองเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เขียนในรูปของสมการสถานะ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_F \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_q \\ \dot{\psi}_G \\ \dot{\psi}_Q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{dd} & h_{dF} & h_{dD} & -\omega_B \omega_o & & & \\ h_{Fd} & h_{FF} & h_{FD} & & & & \\ h_{Dd} & h_{DF} & h_{DD} & & & & \\ \omega_B \omega_o & h_{qq} & h_{qG} & h_{qQ} & \omega_B \psi_{do} & & \\ & h_{Gq} & h_{GG} & h_{GQ} & & & \\ & h_{Qq} & h_{QG} & h_{QQ} & & & \\ \frac{I_{dd}}{2H} & \frac{I_{dF}}{2H} & \frac{I_{dD}}{2H} & -\frac{I_{qq}}{2H} & -\frac{I_{qG}}{2H} & -\frac{I_{qQ}}{2H} & -\frac{D}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_q \\ \psi_G \\ \psi_Q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_B v_d \\ \omega_B v_F \\ 0 \\ -\omega_B v_q \\ 0 \\ 0 \\ \frac{T_m}{2H} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

โดยทุกปริมาณในสมการที่ (3.45) เป็นค่าต่อหน่วยทั้งหมด ยกเว้นเวลา ซึ่งยังคงมีหน่วยเป็นวินาที

ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะใช้ในการวิเคราะห์ สามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์มาตรฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไป จะถูกกำหนดมาในรูปของค่าความเหนี่ยวนำ และค่าคงที่ทางเวลาดังต่อไปนี้

- 1) ค่าความเหนี่ยวนำ $l_a, L_d, L_d', L_d'', L_q, L_q', L_q'', r_a$ ในหน่วย per unit
- 2) ค่าคงที่ทางเวลา $t'_{do}, t''_{do}, t'_{qo}, t''_{qo}$ ในหน่วยวินาที

โดยพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าในแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ได้แก่ $L_{AD}, L_{AQ}, l_F, l_D, l_G, l_Q, r_F, r_D, r_G, r_Q$ ในหน่วย per unit ซึ่งจะสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

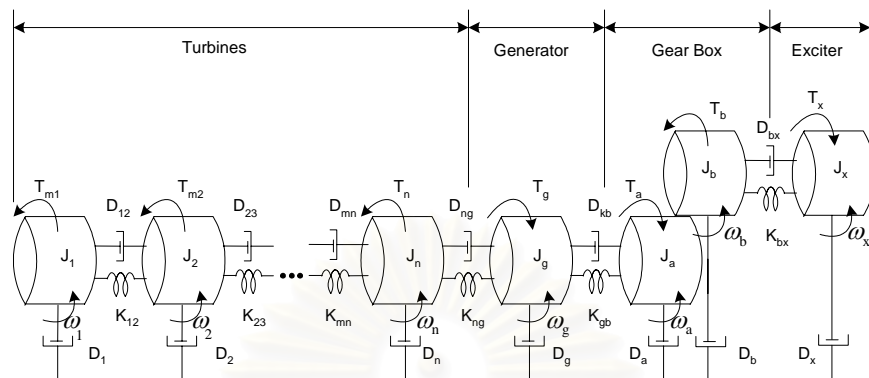
$$\begin{aligned}
 L_{AD} &= L_d - l_a, & L_{AQ} &= L_q - l_a \\
 l_F &= 1 / \left(\frac{1}{L_d' - l_a} - \frac{1}{L_{AD}} \right), & l_D &= 1 / \left(\frac{1}{L_d'' - l_a} - \frac{1}{L_d' - L_{AD}} \right) \\
 l_G &= 1 / \left(\frac{1}{L_q' - l_a} - \frac{1}{L_{AQ}} \right), & l_Q &= 1 / \left(\frac{1}{L_q'' - l_a} - \frac{1}{L_q' - L_{AQ}} \right) \\
 r_F &= \left(\frac{l_F + L_{AD}}{\omega_B t'_{do}} \right), & r_D &= \left(\frac{l_D L_{AD} + l_D l_F + l_F L_{AD}}{\omega_B t''_{do} (L_{AD} + l_F)} \right) \\
 r_G &= \left(\frac{l_G + L_{AQ}}{\omega_B t'_{qo}} \right), & r_Q &= \left(\frac{l_Q L_{AQ} + l_Q l_G + l_G L_{AQ}}{\omega_B t''_{qo} (L_{AQ} + l_G)} \right)
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องทราบค่าเริ่มต้น (Initial conditions) ของตัวแปรสถานะในระบบทุกตัว ซึ่งโดยทั่วไปสามารถคำนวณได้จากค่ากำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P) ขนาดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Va) และค่าตัวประกอบกำลัง (Pf) ที่กำหนดให้ ณ สภาวะอยู่ตัวนั้น

3.3.2 แบบจำลองของเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองของเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Turbine-Generator Shaft Model) ที่ใช้ในการศึกษาเรื่อง SSR จะสมมติให้แทนด้วยแบบจำลอง lumped spring-mass ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 3.3 โดยสมมติให้จำนวนของกังหันมีจำนวนเท่ากับ “n” ชุดต่อเข้าด้วยกันโดยมีค่าคงที่สปริงเท่ากับ K_{ij} และมีตัวช่วยในการหมุน ทั้งการหมุนของตัวเอง D_i และการหมุนระหว่างส่วนที่อยู่ติดกัน D_{ij} กำหนดให้ค่าแรงบิดของกังหันแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ T_i มีค่าเป็น

บวกเมื่อหมุนทวนเข็มนาฬิกา (มองเข้าทางด้านซ้ายมือของรูป) และให้ค่าความเร็วเชิงมุมเป็น ω_i ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบจำลองเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [4]

จากรูปที่ 3.3 Gear Box จะทำหน้าที่ในการปรับสัดส่วนความเร็วเชิงมุม ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ω_g) และส่วนของตัวกระตุ้น (ω_x) โดยใช้ตัวห้อยเป็นตัว g เป็นตัวบอกถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และที่มีตัวห้อยเป็น x บ่งบอกถึงส่วนของเครื่องกระตุ้น ซึ่งในระบบต่อหน่วยจะละเลยผลของ Gear Box ได้เนื่องจากความเร็วเชิงมุมพิกัดของทั้ง 2 ส่วนมีค่าเท่ากันกล่าวคือ $\omega_g = \omega_x$

3.3.2.1 สมการแรงบิดของแกนหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตามกฎของนิวตัน สมการแรงบิดแสดงได้ดังนี้

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum Torque \quad (3.47)$$

จากรูปที่ 3.3 สามารถเขียนสมการของแรงบิดในแต่ละส่วนของแบบจำลองได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
J_1 s \omega_1 &= T_{m1} - D_1 \omega_1 - D_{12} (\omega_1 - \omega_2) - K_{12} (\theta_1 - \theta_2) \\
J_2 s \omega_2 &= T_{m2} - D_2 \omega_2 - D_{21} (\omega_2 - \omega_1) - K_{21} (\theta_2 - \theta_1) \\
&\quad - D_{23} (\omega_2 - \omega_3) - K_{23} (\theta_2 - \theta_3) \\
&\dots \\
J_n s \omega_n &= T_{mn} - D_n \omega_n - D_{n-1} (\omega_n - \omega_{n-1}) - K_{n-1} (\theta_n - \theta_{n-1}) \\
&\quad - D_{ng} (\omega_n - \omega_g) - K_{ng} (\theta_n - \theta_g) \\
J_g s \omega_g &= -T_e - D_g \omega_g - D_{gn} (\omega_g - \omega_n) - K_{gn} (\theta_g - \theta_n) \\
&\quad - D_{gx} (\omega_g - \omega_x) - K_{gx} (\theta_g - \theta_x) \\
J_x s \omega_x &= -T_x - D_x \omega_x - D_{xg} (\omega_x - \omega_g) - K_{xg} (\theta_x - \theta_g)
\end{aligned} \tag{3.48}$$

โดยสัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการที่ (3.48) เป็นไปตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการแรงบิด [4]

ความหมาย	สัญลักษณ์	หน่วย
โมเมนต์ความเฉื่อย	J	$kg.m^2$
แรงบิด	T	$N.m(Joules)$
สัมประสิทธิ์การหน่วง	D	$Joules.sec/rad$
ค่าคงที่สปริง	K	$Joules/rad, N.m/rad$
ความเร็วเชิงมุม	ω	rad/sec
มุม	θ	rad
เวลา	t	sec
ลาปลาซ	s	sec^{-1}

โดยทั่วไปค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มักกำหนดในรูปของค่าคงที่ทางเวลาของความเฉื่อย (Inertia time constant) H_i แทน J_i ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

$$H_i = \frac{\frac{1}{2} J_i \omega_{base}^2}{S_{base*3\phi}} \quad (3.49)$$

จากสมการที่ (3.48) และในที่นี้จะละเลยค่าการหน่วงระหว่างกันในรูปแบบจำลองของเพลลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($D_{ij}=0$) เมื่อแทนค่า H_i ในสมการที่ (3.49) ลงในสมการที่ (3.48) ทำให้ได้สมการชุดใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} 2H_1 s \omega_1 &= \frac{T_{m1} \omega_{base}^2}{S_{base}} - \frac{D_1 \omega_{base}^2}{S_{base}} \omega_1 - \frac{K_{12} \omega_{base}^2}{S_{base}} (\theta_1 - \theta_2) \\ 2H_2 s \omega_2 &= \frac{T_{m2} \omega_{base}^2}{S_{base}} - \frac{D_2 \omega_{base}^2}{S_{base}} \omega_2 - \frac{K_{21} \omega_{base}^2}{S_{base}} (\theta_2 - \theta_1) - \frac{K_{23} \omega_{base}^2}{S_{base}} (\theta_2 - \theta_3) \\ &\dots \\ 2H_n s \omega_n &= \frac{T_{mn} \omega_{base}^2}{S_{base}} - \frac{D_n \omega_{base}^2}{S_{base}} \omega_n - \frac{K_{n-1} \omega_{base}^2}{S_{base}} (\theta_n - \theta_{n-1}) - \frac{K_{ng} \omega_{base}^2}{S_{base}} (\theta_n - \theta_g) \\ 2H_g s \omega_g &= -\frac{T_e \omega_{base}^2}{S_{base}} - \frac{D_g \omega_{base}^2}{S_{base}} \omega_g - \frac{K_{gn} \omega_{base}^2}{S_{base}} (\theta_g - \theta_n) - \frac{K_{gx} \omega_{base}^2}{S_{base}} (\theta_g - \theta_x) \\ 2H_x s \omega_x &= -\frac{T_x \omega_{base}^2}{S_{base}} - \frac{D_x \omega_{base}^2}{S_{base}} \omega_x - \frac{K_{xg} \omega_{base}^2}{S_{base}} (\theta_x - \theta_g) \end{aligned} \quad (3.50)$$

ทำให้สมการที่ (3.50) ให้อยู่ในรูปค่าต่อหน่วยกเว้นตัวแปร θ_i คงไว้ในหน่วยเรเดียน และเวลาในหน่วยวินาที โดยการหารด้วยค่า ω_{base} ทั้งสองฝั่งของสมการ จะได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned}
2H_1 \frac{s\omega_1}{\omega_{base}} &= T_{um1} - D_{u1} \frac{\omega_1}{\omega_{base}} - K_{u12} (\theta_1 - \theta_2) \\
2H_2 \frac{s\omega_2}{\omega_{base}} &= T_{um2} - D_{u2} \frac{\omega_2}{\omega_{base}} - K_{u21} (\theta_2 - \theta_1) - K_{u23} (\theta_2 - \theta_3) \\
&\dots \\
2H_n \frac{s\omega_n}{\omega_{base}} &= T_{umn} - D_{un} \frac{\omega_n}{\omega_{base}} - K_{unn-1} (\theta_n - \theta_{n-1}) - K_{ung} (\theta_n - \theta_g) \\
2H_g \frac{s\omega_g}{\omega_{base}} &= -T_{ue} - D_{ug} \frac{\omega_g}{\omega_{base}} - K_{ugn} (\theta_g - \theta_n) - K_{ugx} (\theta_g - \theta_x) \\
2H_x \frac{s\omega_x}{\omega_{base}} &= -T_{ux} - D_{ux} \frac{\omega_x}{\omega_{base}} - K_{uxg} (\theta_x - \theta_g)
\end{aligned} \tag{3.51}$$

ค่าพารามิเตอร์ที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ (3.51) เป็นดังนี้

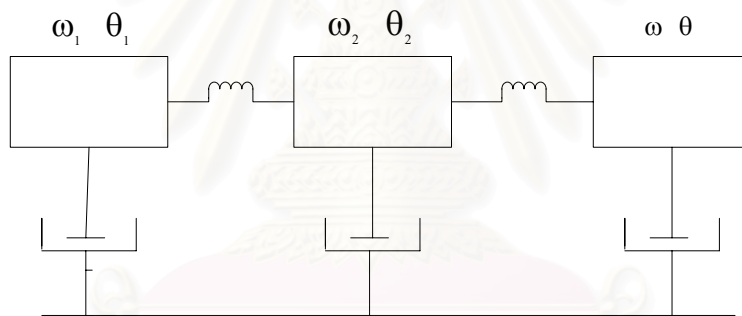
$$\begin{aligned}
H_i &= \frac{\frac{1}{2} J_i \omega_{base}^2}{S_{base}} \quad \text{sec} \\
D_{ui} &= \frac{D_i \omega_{base}^2}{S_{base}} \quad \text{pu.} \\
K_{ui} &= \frac{K_i \omega_{base}}{S_{base}} \quad \text{pu./rad} \\
P_{ui} &= \frac{P_i}{S_{base}} \quad \text{pu.}
\end{aligned} \tag{3.52}$$

ตัวห้อย u ในสมการที่ (3.51) และ (3.52) บ่งบอกถึงค่าสัมประสิทธิ์ที่สอดคล้องกับสมการแรงบิดในระบบต่อหน่วยข้างต้น ซึ่งขอละเลยเมื่อก้าวถึงสมการแรงบิดในโอกาสต่อไป เพื่อความสะดวกในการเขียนสมการ

จากสมการที่ (3.52) จะเห็นว่าต้องกำหนดให้ ค่ามุม θ ที่มีหน่วยเป็นเรเดียน เป็นตัวแปรสถานะด้วย โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรสถานะดังกล่าวกับความเร็วเชิงมุมในหน่วย per unit ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_1 &= \omega_{base} \omega_1 \\
 \dot{\theta}_2 &= \omega_{base} \omega_2 \\
 &\dots \\
 \dot{\theta}_n &= \omega_{base} \omega_n \\
 \dot{\theta}_g &= \omega_{base} \omega_g \\
 \dot{\theta}_x &= \omega_{base} \omega_x
 \end{aligned}
 \tag{3.53}$$

เมื่อรวมสมการที่ (3.51) และ (3.53) เข้าด้วยกัน และนำไปรวมกับสมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามสมการที่ (3.45) แล้วจะได้สมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเพลาเชื่อมโยง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ SSR ต่อไป



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแบบจำลองของเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างของแบบจำลองของเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยกำหนดให้มีเครื่องกังหันแบบไอน้ำ 2 เครื่อง ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบนแกนเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนสมการสถานะตามหลักการข้างต้น ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{\omega}_1 &= \frac{1}{2H_1} T_{m1} - \frac{D_1}{2H_1} \omega_1 - \frac{K_{12}}{2H_1} (\theta_1 - \theta_2) \\
\dot{\omega}_2 &= \frac{1}{2H_2} T_{m2} - \frac{D_2}{2H_2} \omega_2 + \frac{K_{12}}{2H_2} (\theta_1 - \theta_2) - \frac{K_{2g}}{2H_2} (\theta_2 - \theta_g) \\
\dot{\omega} &= -\frac{1}{2H_g} T_e - \frac{D_g}{2H_g} \omega + \frac{K_{2g}}{2H_g} (\theta_2 - \theta_g)
\end{aligned} \tag{3.54}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\theta}_1 &= \omega_1 \\
\dot{\theta}_2 &= \omega_2 \\
\dot{\theta} &= \omega
\end{aligned} \tag{3.55}$$

เมื่อทำการรวมสมการที่ (3.54) และ (3.55) เข้ากับสมการที่ (3.45) จะได้สมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อใช้หาค่าเจาะจงของระบบดังในสมการที่ (3.56)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_F \\ \dot{\psi}_G \\ \dot{\psi}_q \\ \dot{\psi}_G \\ \dot{\psi}_Q \\ \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{dd} & h_{dF} & h_{dD} & -\omega_B \omega_o & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_B \psi_{qo} & 0 & 0 & 0 \\ h_{Fd} & h_{FF} & h_{FD} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_{Dd} & h_{DF} & h_{DD} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_B \omega_o & 0 & 0 & h_{qq} & h_{qG} & h_{qQ} & 0 & 0 & \omega_B \psi_{do} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{Gq} & h_{GG} & h_{GQ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{Qq} & h_{QG} & h_{QQ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -D_1/2H_1 & 0 & 0 & A_{7-10} & A_{7-11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -D_2/2H_2 & 0 & A_{8-10} & A_{8-11} & A_{8-12} \\ I_{dd}/2H_g & I_{dF}/2H_g & I_{dD}/2H_g & -I_{qq}/2H_g & -I_{qG}/2H_g & -I_{qQ}/2H_g & 0 & 0 & -D_g/2H_g & 0 & A_{9-11} & A_{9-12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_B & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_q \\ \psi_G \\ \psi_Q \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_B v_d \\ \omega_B v_F \\ 0 \\ -\omega_B v_q \\ 0 \\ 0 \\ T_{m1}/2H_1 \\ T_{m2}/2H_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

โดยที่

$$A_{7-10} = -K_{12}/2H_1 \quad ; \quad A_{7-11} = +K_{12}/2H_1$$

$$A_{8-10} = +K_{12}/2H_2 \quad ; \quad A_{8-11} = -(K_{12} + K_{2g})/2H_2 \quad ; \quad A_{8-12} = +K_{2g}/2H_2$$

$$A_{9-11} = +K_{2g}/2H_g \quad ; \quad A_{9-12} = -K_{2g}/2H_g$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยทั่วไปแล้ว ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากผู้ผลิตจะนำมาในรูปของ ค่าคงที่ทางเวลาของความเฉื่อยของกังหันแต่ละชุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าคงที่สปริง และข้อมูลความถี่หรือโหมดของการสั่น โดยจะให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับค่าการหน่วง (σ) ในแต่ละความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (D) ของกังหันแต่ละชุดได้ โดยจะมีรายละเอียดของการประมาณค่าการหน่วง [4] แสดงในภาคผนวก ก อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์นี้ จะละเลยผลของค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงดังกล่าว ($D_i=0$) ซึ่งจะไม่ทำให้ผลของการศึกษาวิเคราะห์ปัญหา SSR มีความคลาดเคลื่อนเกินค่าที่จะยอมรับได้

นอกจากสมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในการศึกษาวิเคราะห์ปัญหา SSR ยังต้องสร้างสมการสถานะเชิงเส้นของแบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้าที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะแสดงรายละเอียดของส่วนนี้ในบทถัดไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

สมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ SSR นั้น จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้าที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อหาค่าเจาะจงของระบบ ซึ่งต้องสร้างสมการให้อยู่ในรูปของสมการสถานะ โดยให้กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ และแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นตัวแปรสถานะของระบบส่งไฟฟ้า

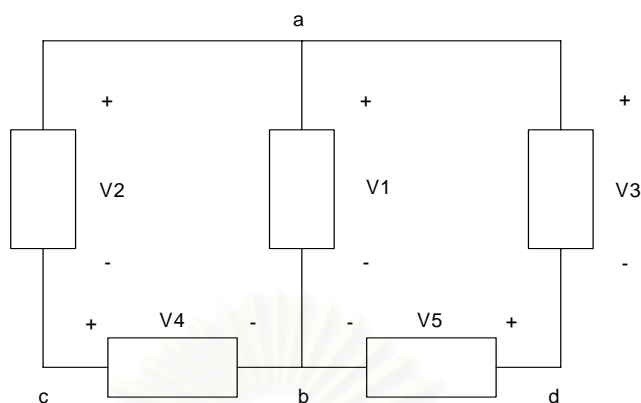
ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการสถานะ ที่สามารถใช้ได้กับระบบส่งไฟฟ้าใด ๆ [7] เพื่อนำไปรวมกับสมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสมการสถานะของเพลาเชื่อมโยงชุดกั้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบทที่ 3

การสร้างสมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้า จะมีขั้นตอนคล้ายกับในส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ สร้างสมการในกรอบอ้างอิง abc แล้วจึงแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิง $0dq$ จากนั้นทำการหารด้วยค่าฐานที่เหมาะสม เพื่อให้ได้สมการในระบบต่อหน่วย แล้วจึงทำสมการสถานะที่ได้ให้เป็นเชิงเส้นก่อนที่จะนำไปรวมกับสมการสถานะที่แสดงไว้ในบทที่ 3 เพื่อใช้ในการหาค่าเจาะจง สำหรับการวิเคราะห์ปัญหา SSR ต่อไป

4.1 อินซิเดนซ์เมตริกซ์ของระบบส่งไฟฟ้า

การสร้างสมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้าใดๆ ด้วยวิธีการที่เสนอไว้ใน [7] เริ่มจากการสร้างอินซิเดนซ์เมตริกซ์ A_a และ B_b ของระบบที่มีความสัมพันธ์กับกระแสและแรงดันของระบบส่งไฟฟ้าตามลำดับ ซึ่งสามารถหาเมตริกซ์ดังกล่าวได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

กำหนด กิ่ง และ บัส ของวงจรไฟฟ้า โดยแต่ละกิ่งจะต้องกำหนดทิศทางของแรงดันคร่อมกิ่งนั้น ๆ ทำให้การเขียน อินซิเดนซ์เมตริกซ์ A_a ในทุกๆ หลัคมองคัพประกอบที่ไม่ใช่ศูนย์อยู่ 2 ตำแหน่งคือ 1 กับ -1 โดยที่เลข 1 และ -1 จะใส่ไว้ในแถว ที่ กิ่ง j ต่ออยู่กับบัส i



รูปที่ 4.1 วงจรตัวอย่าง

จากรูปวงจรตัวอย่างที่ 4.1 สามารถสร้างอินซิดენซ์เมตริกซ์ A_a ได้ดังนี้

$$A_a = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \end{matrix} \quad (4.1)$$

ถ้ากำหนดให้ i_{br} คือเวกเตอร์กระแสที่ไหลในกิ่งใดๆ ตามกฎกระแสของเคอร์ชอฟ (Kirchoff's current law , KCL) จำได้ว่าผลรวมของกระแสที่บัสใด ๆ เท่ากับศูนย์กล่าวคือ

$$A_a * i_{br} = 0 \quad (4.2)$$

ทำการจัดรูปเมตริกซ์ A_a โดยปฏิบัติการเชิงแถว เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\tilde{A}_a = \left[\begin{array}{c|c} I_{n-1,n-1} & \hat{A}_{n-1,b-n+1} \\ \hline 0_{1,n-1} & 0_{1,b-n+1} \end{array} \right] \quad (4.3)$$

ตัวอย่างเช่นจากสมการที่ (4.1) สามารถจัดรูปตามที่แสดงไว้ในสมการที่ (4.3) ได้ดังนี้

$$A_a = \left[\begin{array}{ccc|cc} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (4.4)$$

รายละเอียดขั้นตอนการทำปฏิบัติการเชิงแถวสามารถศึกษาได้จาก [10] จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) จะได้ว่า

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

จากกฎกระแส KCL ทำให้ได้สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \tilde{A}^* i_{br} = 0 &\Rightarrow \begin{bmatrix} I & \hat{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_y \\ i_x \end{bmatrix} = 0 \\ \therefore i_y = -\hat{A}^* i_x &\Rightarrow i_{br} = \begin{bmatrix} i_y \\ i_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{A} \\ I \end{bmatrix} i_x = B_b^T i_x \quad (4.6) \end{aligned}$$

กำหนดให้ i_x คือ กระแสในกิ่งที่เป็นตัวแปรอิสระ

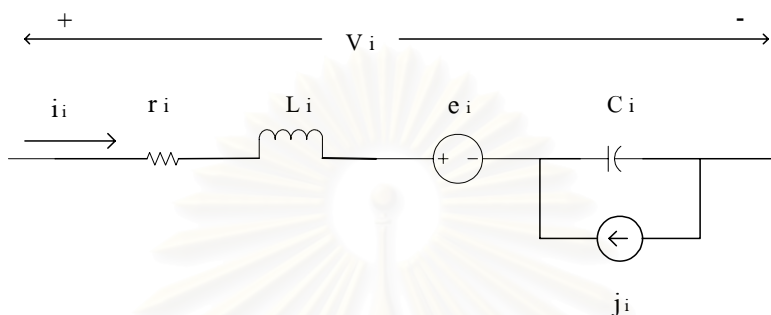
i_y คือ กระแสในกิ่งที่เป็นตัวแปรตาม

จากสมการที่ (4.6) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินซิดенซ์เมตริกซ์ B_b และเวกเตอร์แรงดันคร่อมกิ่งตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟ (KVL) ดังนี้

$$B_b^* v_{br} = 0 \quad (4.7)$$

4.2 สมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้า

ในที่นี้กำหนดให้กึ่งใด ๆ ในระบบ สามารถแทนได้ด้วยแบบจำลองมาตรฐานดังในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองของกึ่ง

สามารถเขียนสมการแรงดันในแบบจำลองของกึ่งใด ๆ ตามรูปที่ 4.2 ได้ดังนี้

$$v_i = r_i i_i + s(L_i i_i) + \frac{1}{C_i} \frac{1}{s} (i_i + j_i) + e_i \quad (4.8)$$

โดยที่ L_i คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำของกึ่ง ; C_i คือ ค่าตัวเก็บประจุของกึ่ง
 r_i คือ ค่าความต้านทานของกึ่ง ; v_i คือ แรงดันคร่อมกึ่ง
 i_i คือ กระแสที่ไหลในกึ่ง ; e_i คือ แหล่งจ่ายแรงดัน
 j_i คือ แหล่งจ่ายกระแส ; s คือ ตัวปฏิบัติการอนุพันธ์
 $\frac{1}{s}$ คือ ตัวปฏิบัติการปริพันธ์

จากสมการที่ (4.8) สามารถเขียนสมการในรูปของเมตริกซ์แทนแบบจำลองของระบบไฟฟ้าได้
 ดังนี้

$$v_{br} = r_{br} i_{br} + s(L_{br} i_{br}) + C_{br}^{-1} \frac{1}{s} (i_{br} + j_{br}) + e_{br} \quad (4.9)$$

L_{br} คือ เมตริกซ์ค่าตัวเหนี่ยวนำของกึ่ง

C_{br}^{-1} คือ อินเวอร์สของเมตริกซ์ค่าตัวเก็บประจุของกึ่ง

R_{br} คือ เมตริกซ์ค่าความต้านทานของกึ่ง (เมตริกซ์ทแยงมุม)

v_{br} คือ เวกเตอร์แรงดันคร่อมกึ่ง

i_{br} คือ เวกเตอร์กระแสกึ่ง

e_{br} คือ เวกเตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน

j_{br} คือ เวกเตอร์แหล่งจ่ายกระแส

การเขียนสมการสถานะของระบบต้องจัดให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งดังนี้

$$\dot{X} = AX + BU \quad \text{และ} \quad Y = CX + DU \quad (4.10)$$

โดยที่ X คือ ตัวแปรสถานะ

Y คือ สัญญาณขาออก

U คือ สัญญาณขาเข้า

ในที่นี้จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุและกระแสดังนี้

$$q_{br} = \frac{1}{s} (i_{br} + j_{br}) \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.11) ถ้าพิจารณาเฉพาะกึ่ง ที่มีตัวเก็บประจุ จะสามารถเขียนความสัมพันธ์โดยใช้เมตริกซ์ M โดยที่ $m_{ij}=1$ หากมีตัวเก็บประจุตัวที่ j ต่ออยู่ในกึ่งที่ i และสมาชิกตัวอื่นมีค่าเป็นศูนย์ได้ดังนี้

$$q_{br} = Mq_c \quad \text{และ} \quad q_c = M^T q_{br} \quad (4.12)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.12) รวมเข้ากับสมการที่ (4.9) ทำให้ได้สมการดังต่อไปนี้

$$v_{br} = r_{br} i_{br} + L_{br} s(i_{br}) + s(L_{br}) i_{br} + C_{br}^{-1} M q_c + e_{br} \quad (4.13)$$

คูณทั้งสองฝั่งของสมการที่ (4.13) ด้วยค่าอินทิเกรตเมตริกซ์ B_b และแทนค่า i_{br} จากสมการที่ (4.6) ลงในผลลัพธ์ที่ได้ จะทำให้ได้สมการดังต่อไปนี้

$$0 = B_b r_{br} B_b^T i_x + B_b L_{br} B_b^T s(i_x) + s(B_b L_{br} B_b^T) i_x + B_b C_{br}^{-1} M q_c + B_b e_{br} \quad (4.14)$$

โดยที่ $r_x = B_b r_{br} B_b^T$, $L_x = B_b L_{br} B_b^T$ และ $C_x^{-1} = B_b C_{br}^{-1} M$ จะได้

$$0 = r_x i_x + L_x s(i_x) + (sL_x) i_x + C_x^{-1} q_c + B_b e_{br} \quad (4.15)$$

จัดรูปสมการที่ (4.15) ใหม่ได้ดังนี้

$$s i_x = -L_x^{-1} (r_x + sL_x) i_x - L_x^{-1} C_x^{-1} q_c - L_x^{-1} B_b e_{br} \quad (4.16)$$

และจากสมการที่ (4.6) (4.11) และ (4.12) สามารถเขียนสมการสถานะของค่าประจุ ได้ดังนี้

$$s q_c = M^T B_b^T i_x + M^T j_{br} \quad (4.17)$$

รวมสมการที่ (4.16) และ (4.17) เข้าด้วยกัน จะได้สมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้าที่มีตัวแปรสถานะเป็นค่าประจุของตัวเก็บประจุในวงจร และกระแสในตัวเหนี่ยวนำที่กำหนดให้เป็นตัวแปรอิสระ โดยมีสัญญาณเข้าคือแหล่งจ่ายกระแสและแหล่งจ่ายแรงดันในกิ่งต่าง ๆ ของวงจรดังนี้

$$s \begin{bmatrix} q_c \\ i_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & M^T B_b^T \\ -L_x^{-1} C_x^{-1} & -L_x^{-1} (r_x + sL_x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_c \\ i_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M^T & 0 \\ 0 & -L_x^{-1} B_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{br} \\ e_{br} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

หากกำหนดให้ขนาดของแรงดันคร่อมกึ่งต่าง ๆ ในระบบเป็นสัญญาณขาออกที่สนใจ สามารถเขียนสมการสัญญาณขาออกได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{br} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_{br}^{-1} M - L_{br} B_b^T L_x^{-1} C_x^{-1} & (r_{br} + sL_{br}) B_b^T - L_{br} B_b^T L_x^{-1} (r_x + sL_x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_c \\ i_x \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & I - L_{br} B_b^T L_x^{-1} B_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{br} \\ e_{br} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.19)$$

4.3 การเปลี่ยนกรอบอ้างอิงโดยปาร์ก

จากสมการที่ (4.17) และ (4.19) เป็นสมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้าที่เขียนอยู่ในกรอบอ้างอิง abc แต่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ SSR จะต้องทำการแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงเดียวกันกับสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือกรอบอ้างอิง 0dq โดยใช้การแปลงโดยใช้ปาร์ก กำหนดให้สมการสถานะและสัญญาณขาออกของแบบจำลองระบบส่งไฟฟ้าเขียนได้ดังนี้

$$s \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A11 & A12 \\ A21 & A22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B11 & B12 \\ B21 & B22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$[Y] = [C1 \quad C2] \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \end{bmatrix} + [D1 \quad D2] \begin{bmatrix} U1 \\ U2 \end{bmatrix}$$

โดยที่ตัวแปรต่าง ๆ มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
X_1 &= q_c, \quad X_2 = i_x, \quad U_1 = j_{br}, \quad U_2 = e_{br}, \quad Y = v_{br} \\
A11 &= [0], \quad A12 = M^T B_b^T, \quad A21 = -L_x^{-1} C_x^{-1}, \quad A22 = -L_x^{-1} (r_x + sL_x) \\
B11 &= M^T, \quad B12 = [0], \quad B21 = [0], \quad B22 = -L_x^{-1} B_b \\
C1 &= C_{br}^{-1} M - L_{br} B_b^T L_x^{-1} C_x^{-1}, \quad C2 = (r_{br} + sL_{br}) B_b^T - L_{br} B_b^T L_x^{-1} (r_x + sL_x) \\
D1 &= [0], \quad D2 = I - L_{br} B_b^T L_x^{-1} B_b
\end{aligned}$$

ทำการกระจายสมการที่ (4.19) ออกมาในส่วนของตัวแปรสถานะ X_1 และสัญญาณออกดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{X}_{1abc} &= A11 * X_{1abc} + A12 * X_{2abc} + B11 * U_{1abc} + B12 * U_{2abc} \\
Y_{abc} &= C1 * X_{1abc} + C2 * X_{2abc} + D1 * U_{1abc} + D2 * U_{2abc}
\end{aligned} \tag{4.21}$$

ทำการแปลงสมการที่ (4.21) ให้อยู่ในกรอบอ้างอิง 0dq โดยการคูณด้วยเมทริกซ์ P ทั้งสองฝั่งของสมการจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
P\dot{X}_{1abc} &= PA11 * X_{1abc} + PA12 * X_{2abc} + PB11 * U_{1abc} + PB12 * U_{2abc} \\
\dot{X}_{10dq} - \dot{P}X_{10dq} &= PA11P^{-1} X_{10dq} + PA12P^{-1} X_{20dq} + PB11P^{-1} U_{10dq} + PB12P^{-1} U_{20dq} \\
\dot{X}_{10dq} &= (AA11 + \dot{P}) X_{10dq} + AA12 * X_{20dq} + BB11 * U_{10dq} + BB12 * U_{20dq} \\
Y_{10dq} &= CC11 * X_{10dq} + CC12 * X_{20dq} + DD11 * U_{10dq} + DD12 * U_{20dq}
\end{aligned} \tag{4.22}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
AA11 &= PA11P^{-1}, \quad AA12 = PA12P^{-1}, \quad BB11 = PB11P^{-1}, \quad BB12 = PB12P^{-1} \\
CC11 &= PC1P^{-1}, \quad CC12 = PC2P^{-1}, \quad DD11 = PD1P^{-1}, \quad DD12 = PD2P^{-1}
\end{aligned}$$

จากสมการที่ (4.22) ทำการละเลยวงจรลำดับศูนย์ (zero sequence) และจัดรูปเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{X}_{1d} \\ \dot{X}_{1q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} AA11 & -\omega \\ \omega & AA11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1d} \\ X_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} AA12 & 0 \\ 0 & AA12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{2d} \\ X_{2q} \end{bmatrix} + \\
&\quad \begin{bmatrix} BB11 & 0 \\ 0 & BB11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1d} \\ U_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BB12 & 0 \\ 0 & BB12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{2d} \\ U_{2q} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} Y_{1d} \\ Y_{1q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} CC11 & 0 \\ 0 & CC11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1d} \\ X_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} CC12 & 0 \\ 0 & CC12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{2d} \\ X_{2q} \end{bmatrix} + \\
&\quad \begin{bmatrix} DD11 & 0 \\ 0 & DD11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1d} \\ U_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DD12 & 0 \\ 0 & DD12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{2d} \\ U_{2q} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.23}$$

4.4 การทำให้เป็นระบบต่อหน่วย

ทำสมการที่ (4.23) ให้เป็นระบบต่อหน่วย เพื่อให้ทำการวิเคราะห์หั่ง่ายขึ้นและสอดคล้องกับสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กล่าวไว้ในข้างต้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\omega_B} \begin{bmatrix} \dot{X}_{1d} \\ \dot{X}_{1q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} AA11 & -\omega \\ \omega & AA11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1d} \\ X_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} AA12 & 0 \\ 0 & AA12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{2d} \\ X_{2q} \end{bmatrix} + \\
&\quad \begin{bmatrix} BB11 & 0 \\ 0 & BB11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1d} \\ U_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BB12 & 0 \\ 0 & BB12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{2d} \\ U_{2q} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} Y_{1d} \\ Y_{1q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} CC11 & 0 \\ 0 & CC11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1d} \\ X_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} CC12 & 0 \\ 0 & CC12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{2d} \\ X_{2q} \end{bmatrix} + \\
&\quad \begin{bmatrix} DD11 & 0 \\ 0 & DD11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1d} \\ U_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DD12 & 0 \\ 0 & DD12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{2d} \\ U_{2q} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.24}$$

ทุกค่าในสมการ (4.24) มีค่าเป็น per unit ทั้งหมดยกเว้น เวลาที่มีหน่วยเป็นวินาที

4.5 การทำให้เป็นสมการเชิงเส้น

ในการวิเคราะห์ปัญหา SSR ที่เกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยวิธีหาค่าเจาะจงนั้นจำเป็นต้องทำให้สมการในระบบเป็นเชิงเส้น ดังนั้นจากสมการที่ (4.24) ทำให้เป็นระบบเชิงเส้น ได้ผลของสมการเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{X}_{1d} &= \omega_B AA11 X_{1d} - \omega_B \omega_0 X_{1q} - \omega_B X_{1q0} \omega + \omega_B AA12 X_{2d} + \omega_B BB11 U_{1d} + \omega_B BB12 U_{2d} \\
 \dot{X}_{1q} &= \omega_B \omega_0 X_{1d} + \omega_B X_{1d0} \omega + \omega_B AA11 X_{1q} + \omega_B AA12 X_{2q} + \omega_B BB11 U_{1q} + \omega_B BB12 U_{2q} \\
 Y_{1d} &= CC11 X_{1d} + CC12 X_{2d} + DD11 U_{1d} + DD12 U_{2d} \\
 Y_{1q} &= CC11 X_{1q} + CC12 X_{2q} + DD11 U_{1q} + DD12 U_{2q}
 \end{aligned}
 \tag{4.25}$$

เมื่อรวมสมการสถานะเชิงเส้นทั้งหมดกล่าวคือสมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส สมการสถานะของเพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้า จะสามารถหาค่าค่าเจาะจงของระบบ เพื่อวิเคราะห์ปัญหา SSR ที่เกิดขึ้นได้

บทที่ 5

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับหาค่า TTC และวิเคราะห์ SSR

หลังจากที่ได้นำเสนอหลักการในการคำนวณค่า TTC ในบทที่ 2 และ การสร้างสมการสถานะทั้งในส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เฟลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในส่วนระบบส่งไฟฟ้า ในบทที่ 3 และ 4 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าเจาะจง ในบทนี้จะได้นำหลักการดังกล่าวมาพัฒนาเป็นโปรแกรม เพื่อใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ผลของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและซิงโครนัสเรโซแนนซ์

5.1 องค์ประกอบและการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาผลของการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมต่อสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและซิงโครนัสเรโซแนนซ์ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักคือ

— ส่วนที่ 1 คำนวณหาค่า TTC ของระบบจากบัสต้นทางไปยังบัสปลายทาง โดยใช้หลักการ Two-Step Method [8]

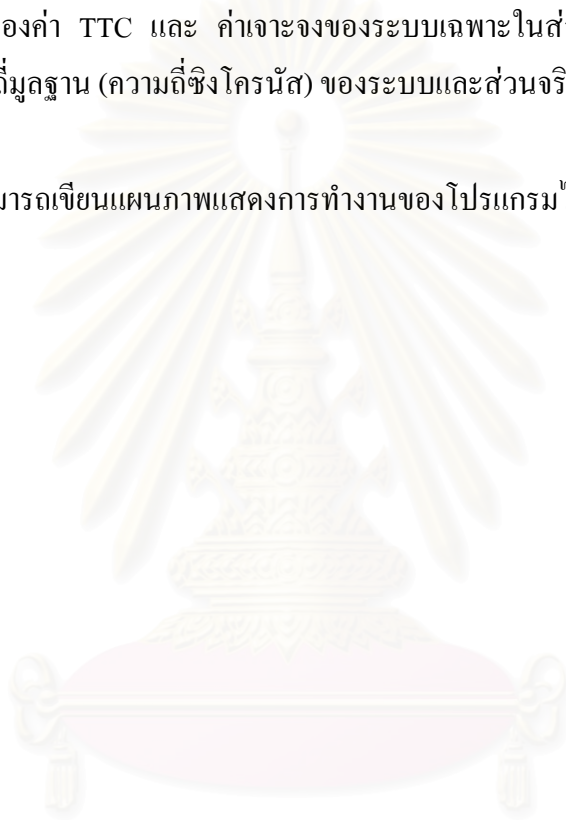
— ส่วนที่ 2 หาค่าเจาะจงของระบบ เพื่อวิเคราะห์ SSR โดยทำการสร้างสมการสถานะของระบบจากข้อมูลที่ป้อนเข้าโดยอัตโนมัติ

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเป็นดังนี้

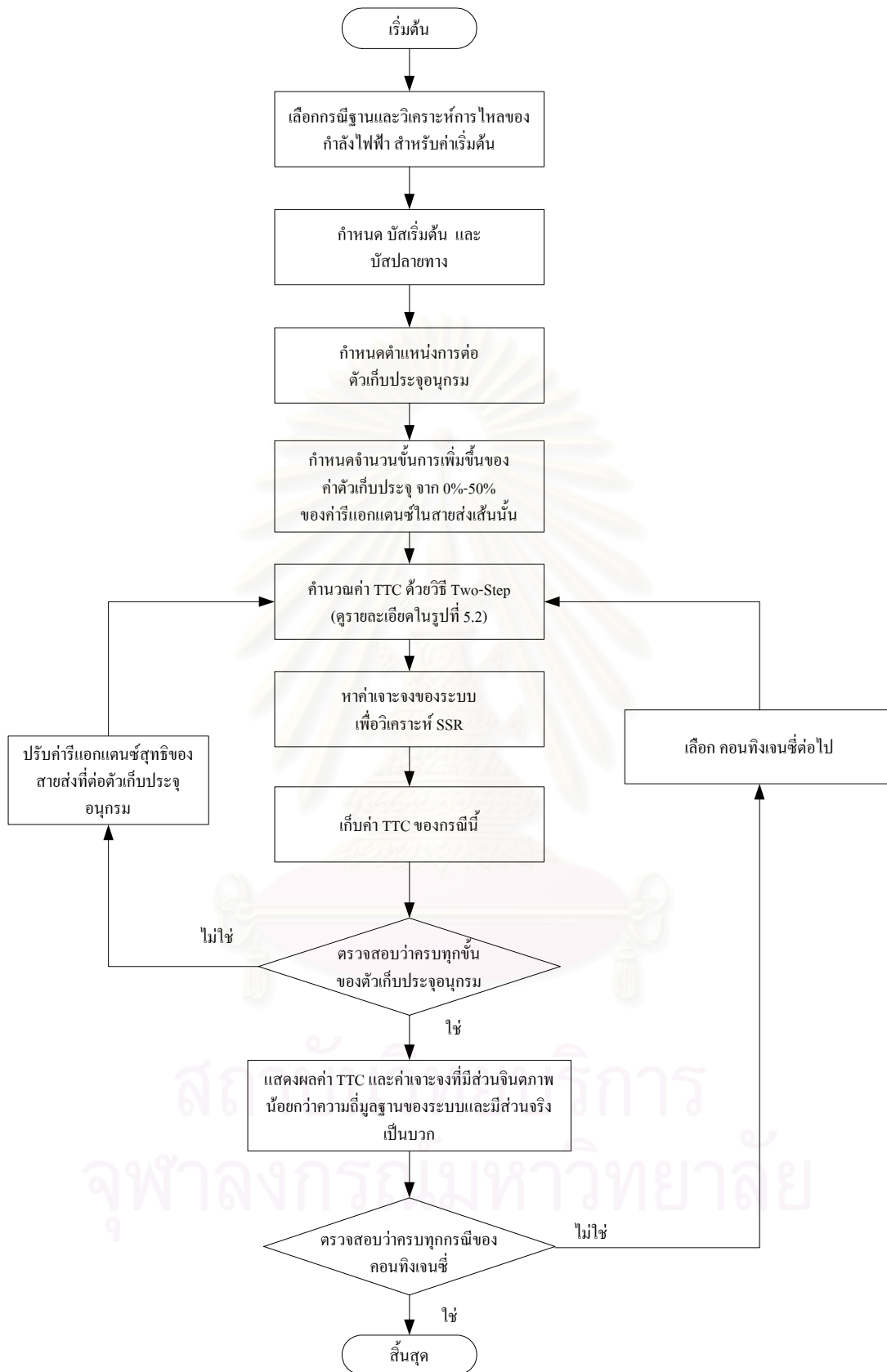
- 1) ป้อนข้อมูลกรณีฐานของระบบเพื่อใช้อ้างอิงในการหาค่า TTC โดยที่กรณีฐาน ระบบจะต้องสามารถทำงานได้โดยไม่ฝ่าฝืนขีดจำกัดการทำงานต่าง ๆ ของระบบทั้งขีดจำกัดด้านแรงดันของบัส ขีดจำกัดด้านความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของสายส่ง และขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 2) กำหนดบัสต้นทางและบัสปลายทางของการคำนวณค่า TTC
- 3) กำหนดตำแหน่งสายส่งที่ต้องการต่อตัวเก็บประจุอนุกรม เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า TTC
- 4) กำหนดจำนวนขั้นของการเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ โดยในที่นี้กำหนดให้ขนาดของตัวเก็บประจุเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่งเส้นนั้น
- 5) โปรแกรมจะทำการคำนวณค่า TTC ของระบบโดยใช้วิธี Two-Step (รายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อ 5.2) และเก็บค่า TTC ของกรณีนี้

- 6) โปรแกรมทำการสร้างสมการสถานะของระบบส่งไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์หาค่าเจาะจงของระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ SSR
- 7) ปรับลดค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่งที่มีการต่อตัวเก็บประจุ แล้วทำขั้นตอนที่ 5 และ 6 ซ้ำ เพื่อคำนวณค่า TTC ของระบบ จนกว่าจะครบจำนวนขั้นของการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุที่ระบุไว้ในข้อ 4
- 8) เปลี่ยนคอนทิงเจนซีของระบบจนครบทุกกรณีที่น่าสนใจ
- 9) แสดงผลของค่า TTC และ ค่าเจาะจงของระบบเฉพาะในส่วนที่ส่วนจินตภาพมีค่าน้อยกว่าความถี่มูลฐาน (ความถี่ซิงโครนัส) ของระบบและส่วนจริงมีค่าเป็นบวก

จากขั้นตอนข้างต้นสามารถเขียนแผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมได้ดังรูปที่ 5.1



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณค่า TTC และหาค่าเจาะจง

5.2 การคำนวณค่า TTC ด้วยวิธี Two-Step

วิธีการคำนวณหาค่า TTC ของระบบไฟฟ้าใด ๆ สามารถทำได้หลากหลายวิธีไม่ว่าจะเป็นหลักการ Transfer-based Security Constrained Optimal Power Flow (TSCOPF) หรือ Continuation Power Flow (CPF) [13, 14] หรือ Repeated Power Flow (RPF) เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้หลักการ Two-Step [8] ในการคำนวณค่า TTC เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเร็วสูงในการหาคำตอบและใช้หลักการคำนวณพื้นฐานที่ไม่ซับซ้อนมากนัก โดยปกติจะใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เพียง 2-3 รอบเท่านั้น เพื่อให้ได้ค่า TTC ในแต่ละกรณีที่พิจารณา และในที่นี้จะสนใจข้อจำกัดของระบบ เฉพาะขีดจำกัดด้านแรงดัน (Voltage Limit) ขีดจำกัดด้านความร้อน (Thermal Limit) และขีดจำกัดด้านกำลังการผลิตไฟฟ้า (Generation Limit) เท่านั้น

ขั้นตอนการคำนวณค่า TTC โดยวิธี Two-step เป็นดังนี้

- 1) วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีฐาน เพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันและปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยต้องเลือกกรณีฐานที่สามารถทำงานได้โดยไม่ฝ่าฝืนข้อจำกัดการทำงาน of ระบบ
- 2) เพิ่มการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัสปลายทาง โดยใช้สมการที่ (5.1) แล้วทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าอีกครั้งดังในข้อที่ 1

$$\begin{aligned} P_L^{\text{sink}} &= P_{L0} + k_p \lambda \\ Q_L^{\text{sink}} &= Q_{L0} + k_q \lambda \end{aligned} \quad (5.1)$$

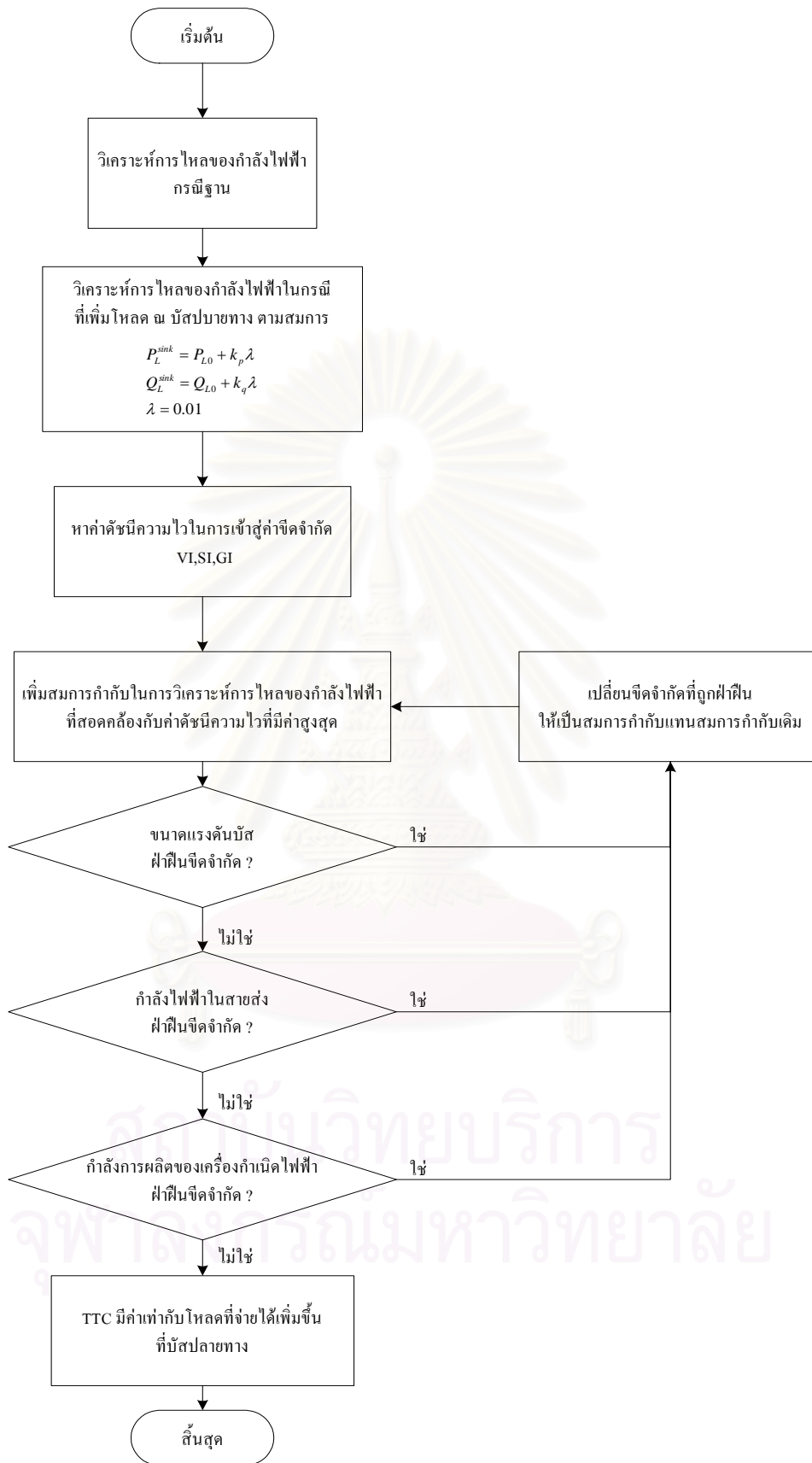
โดยที่

λ คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของโหลดที่บัสปลายทาง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้
มีค่าเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์

$P_L^{\text{sink}}, Q_L^{\text{sink}}$ คือ กำลังจริงและกำลังจินตภาพของโหลดที่บัสปลายทาง

k_p, k_q คือ ตัวคูณโหลดที่มีค่าสอดคล้องกับค่าตัวประกอบกำลังของโหลดที่บัส
ปลายทาง

- 3) หาค่าดัชนีความไวในการเข้าสู่ค่าขีดจำกัดแต่ละประเภทเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเพิ่มขึ้นของขนาดของโหลดที่บัสปลายทาง ตามนิยามที่แสดงไว้ในสมการที่ (5.2) ถึง (5.4) โดยใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจากข้อ 1 และข้อ 2 ในการคำนวณดังนี้



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการหาค่า TTC ด้วยวิธี Two-Step

ดัชนีความไวในการเข้าสู่ขีดจำกัดของแรงดัน (VI)

$$dV/d\lambda \geq 0, \quad VI = \frac{dV/d\lambda}{V_{Limit}^{Upper} - V_0}$$

$$dV/d\lambda < 0, \quad VI = \frac{dV/d\lambda}{V_{Limit}^{Lower} - V_0} \quad (5.2)$$

ทำการคำนวณทุกบัสของระบบ

ดัชนีความไวในการเข้าสู่ขีดจำกัดของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (SI)

$$dS_{ij}/d\lambda \geq 0, \quad SI = \frac{dS_{ij}/d\lambda}{S_{ij}^{Limit} - S_{ij}^0}$$

$$dS_{ij}/d\lambda < 0, \quad SI = \frac{dS_{ij}/d\lambda}{-S_{ij}^{Limit} - S_{ij}^0} \quad (5.3)$$

ทำการคำนวณสายส่งทุกเส้น

ดัชนีความไวในการเข้าสู่ขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (GI)

$$GI = \frac{dP_G/d\lambda}{P_G^{Limit} - P_G^0}$$

ทำการคำนวณเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสต้นทาง (5.4)

โดยที่ V คือ ขนาดของแรงดัน

S_{ij} คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง จากบัส i ไปยังบัส j

P_G คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสต้นทาง

- 4) ใช้ค่าดัชนีความไวในการเข้าสู่ขีดจำกัดที่มีค่ามากที่สุด เป็นตัวกำหนดสมการกำกับเพิ่มเติมในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสมการกำกับ (Augmented Power Flow) ดังนี้
- 5) วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสมการกำกับ $f = f_{Limit}$ ที่สอดคล้องกับดัชนีความไวสูงสุดที่คำนวณได้ โดยมีสมการเงื่อนไขดังนี้

$$P_i(\delta, V, \lambda) = \sum_k V_i V_k Y_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) + k_{pi} \lambda \quad (5.5)$$

$$Q_i(\delta, V, \lambda) = \sum_k V_i V_k Y_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) + k_{qi} \lambda \quad (5.6)$$

$$f(\delta, V, \lambda) = f_{Limit} \quad (5.7)$$

k_{pi} และ k_{qi} ในสมการที่ (5.5) และ (5.6) มีค่าเท่ากับศูนย์ทั้งหมด ยกเว้นที่บัสปลายทาง ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ k_p และ k_q ตามลำดับ เนื่องจากโหลดของบัสอื่น จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่า λ ยกเว้นที่บัสปลายทางเท่านั้น

จากนั้นอาศัยหลักการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ของ Newton-Raphson เพื่อหาผลลัพธ์ของปัญหา โดยมีสมการหาค่าปรับปรุงของผลตอบ ($\Delta\delta \ \Delta v \ \Delta\lambda$) ในแต่ละรอบของการวนซ้ำดังสมการที่ (5.8)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial v} & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial v} & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial f}{\partial \delta} & \frac{\partial f}{\partial v} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta v \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

โดยที่ $\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \lambda} & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \end{bmatrix}^T = 0$ ทุกบัส ยกเว้นบัสปลายทางมีค่า $\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \lambda} & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} k_p & k_q \end{bmatrix}^T$

ส่วน $\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \delta} & \frac{\partial f}{\partial v} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \end{bmatrix}$ หาได้จากสมการกำกับเพิ่มเติมในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับฟังก์ชัน f เพื่อหาค่า TTC แบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ VI ที่บัส k มีค่ามากที่สุด

$$f = V_k = V_{Limit} \quad (5.9)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \delta} & \frac{\partial f}{\partial v} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_k}{\partial \delta} & \frac{\partial V_k}{\partial v} & \frac{\partial V_k}{\partial \lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e_k & 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

โดยที่ e_k เป็นเวกเตอร์แถว ที่มีองค์ประกอบทุกหลักเป็นศูนย์ ยกเว้นหลักที่ k มีค่าเท่ากับ 1

กรณีที่ SI ในสายส่งที่เชื่อมโยงระหว่างบัส i กับ j มีค่ามากที่สุด

$$f = S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} = S_{ij}^{Limit} \quad (5.11)$$

ซึ่ง P_{ij} และ Q_{ij} สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{ij} = |V_i|^2 |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} - G_{ii} |V_i|^2 - |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5.12)$$

$$Q_{ij} = |V_i|^2 |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} - B_{ii} |V_i|^2 - |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5.13)$$

ดังนั้น
$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \delta} & \frac{\partial f}{\partial v} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial s_{ij}}{\partial v} & \frac{\partial s_{ij}}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

โดยที่องค์ประกอบต่าง ๆ ในสมการที่ (5.14) สามารถหาค่าได้ดังนี้

1) เวกเตอร์แถว $\frac{\partial s_{ij}}{\partial \delta}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s_{ij}}{\partial \delta_i} &= \frac{1}{s_{ij}} \left(P_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} + Q_{ij} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} \right) \\ \frac{\partial s_{ij}}{\partial \delta_j} &= \frac{1}{s_{ij}} \left(P_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} + Q_{ij} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} \right) \\ \frac{\partial s_{ij}}{\partial \delta_k} &= 0 \quad , \quad k \neq i, j \end{aligned} \quad (5.15)$$

จากสมการที่ (5.12) และ (5.13) จะได้ว่า

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5.19)$$

2) เวกเตอร์แถว $\frac{\partial s_{ij}}{\partial V}$ จะประกอบไปด้วยสมการที่ (5.21) และ (5.22) ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial s_{ij}}{\partial |V_i|} &= \frac{1}{s_{ij}} \left(P_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_i|} + Q_{ij} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_i|} \right) \\ \frac{\partial s_{ij}}{\partial |V_j|} &= \frac{1}{s_{ij}} \left(P_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_j|} + Q_{ij} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_j|} \right) \\ \frac{\partial s_{ij}}{\partial |V_k|} &= 0 \quad , \quad k \neq i, j\end{aligned}\tag{5.20}$$

โดยที่

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_i|} = 2|V_i| \left(|Y_{ij}| \cos \theta_{ij} - G_{ii} \right) - |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})\tag{5.21}$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_i|} = 2|V_i| \left(|Y_{ij}| \sin \theta_{ij} - B_{ii} \right) - |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})\tag{5.22}$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})\tag{5.23}$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})\tag{5.24}$$

3) $\frac{\partial s_{ij}}{\partial \lambda_i} = 0$ เนื่องจาก ฟังก์ชัน f ในสมการที่ (5.11) ไม่ขึ้นกับค่า λ

กรณีที่ GI มีค่ามากที่สุด

$$f = P_G^{Limit} = \sum_k V_{ref} V_k V_{refk} \cos(\delta_{ref} - \delta_k - \theta_{ik})\tag{5.25}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \delta} & \frac{\partial f}{\partial V} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ref}}{\partial V} & \frac{\partial P_{ref}}{\partial \lambda} \end{bmatrix}\tag{5.26}$$

โดยที่

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial \delta_k} = V_{ref} V_k V_{refk} \sin(\delta_{ref} - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_k|} = V_{ref} V_{refk} \cos(\delta_{ref} - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial \lambda} = 0 \quad (5.29)$$

- 6) ตรวจสอบผลจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในข้อ 5 ว่ายังคงมีปริมาณใดที่เกินค่าขีดจำกัดอีกหรือไม่
- หากมี แสดงว่าปริมาณนั้น ๆ เข้าสู่ขีดจำกัดเร็วกว่าปริมาณที่คาดในตอนแรก ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนฟังก์ชันในการเพิ่มสมการกำกับ เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งฟังก์ชันใหม่นั้นแทนด้วยสมการกำกับที่สอดคล้องกับปริมาณที่เกินขีดจำกัดนั้น ๆ และทำซ้ำในข้อ 5 และ 6 อีกครั้ง
 - หากไม่มี จะได้ค่า TTC ซึ่งมีค่าเท่ากับขนาดของโหลดที่บัสปลายทางที่เพิ่มขึ้น

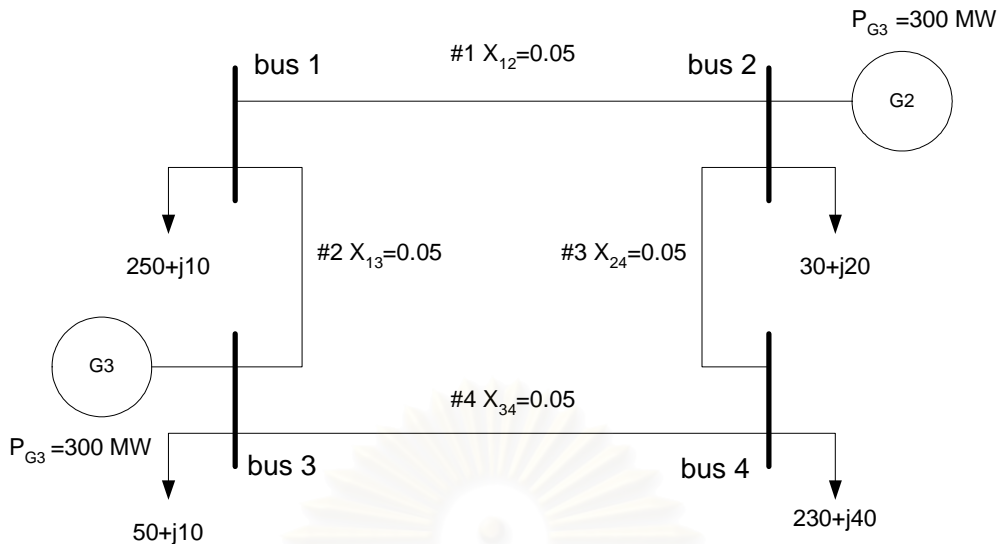
โดยทั่วไปแล้วการคำนวณค่า TTC ด้วยวิธี Two-step ต้องทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีการเพิ่มสมการกำกับซ้ำไม่เกินสองรอบ

5.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

โปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อคำนวณค่า TTC และ วิเคราะห์ผล SSR ที่กล่าวในข้างต้นสามารถตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

5.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของค่า TTC

ในส่วนนี้จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยจะเปรียบเทียบค่า TTC ของระบบทดสอบ 4 บัส ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [2] ดังนี้



รูปที่ 5.3 ระบบทดสอบ 4 บัส

ระบบทดสอบ 4 บัส ที่ใช้ในการตรวจสอบเป็นดังรูปที่ 5.3 โดยค่ารีแอกแตนซ์ที่ปรากฏเป็นค่าต่อหน่วย

ในการทดสอบกำหนดให้บัสที่ 3 เป็นบัสต้นทาง และให้บัสที่ 2 และบัสที่ 4 เป็นบัสปลายทาง โดยมีข้อจำกัดของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งแต่ละเส้น มีค่าเท่ากับ 275 MVA และกำหนดให้ข้อจำกัดของแรงดันบัสอยู่ระหว่าง 0.95-1.05 p.u. พิจารณาคอนทิงเจนซีที่ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบัสที่ 2 ลดลง 1 ใน 3 ของกำลังการผลิตเดิม ซึ่งผลการหาค่า TTC ของระบบทดสอบจากเงื่อนไขข้างต้น เปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับค่าที่นำเสนอไว้ในเอกสารอ้างอิง [2] เป็นดังตารางที่ 5.1

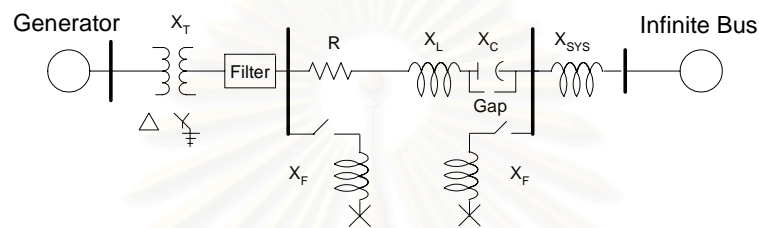
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลของค่า TTC ในระบบทดสอบ 4 บัส

ค่า TTC (MW) จากต้น 3 ไปยังบัส 2 และบัส 4		
	กรณีฐาน	คอนทิงเจนซี 1
คำนวณจากโปรแกรมที่พัฒนา	235.79	168.53
ผลจากเอกสารอ้างอิง [2]	234	169

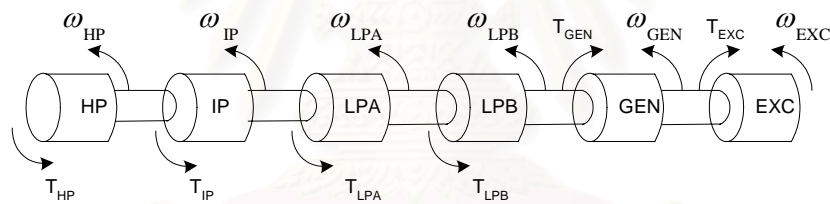
จากผลในตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าค่า TTC ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณด้วยวิธีอื่นจากเอกสารอ้างอิง [2]

5.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าเจาะจง

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในส่วนนี้ จะทำโดยการเปรียบเทียบผลของการหาค่าเจาะจงโดยใช้แบบจำลอง First Benchmark [5] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.4 โดยเปรียบเทียบค่าเจาะจงที่ได้ กับค่าเจาะจงของระบบอ้างอิงเดียวกัน ที่แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง [4] และ [11] ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 แบบจำลอง First Benchmark



รูปที่ 5.5 เพลาเชื่อมโยงระหว่างชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามี่ค่าตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 ถึง 5.4 ดังนี้

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในแบบจำลอง FBM

ตัวแปร	วงจร +	วงจร 0
R	0.02	0.5
X_T	0.14	0.14
X_L	0.5	1.56
X_{SYS}	0.06	0.06

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

สัญลักษณ์	ค่าอินดักแตนซ์ (pu.)	สัญลักษณ์	เวลา (sec.)
l_a	0.13	τ'_{d0}	4.3
L_d	1.79	τ''_{d0}	0.032
L'_d	0.169	τ'_{q0}	0.85
L''_d	0.135	τ''_{q0}	0.05
L_q	1.71		
L'_q	0.228		
L''_q	0.2		

ตารางที่ 5.4 ค่าคงที่ความเฉื่อยและค่าคงที่สปริงของแกนหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ส่วนประกอบ	ค่าคงที่ความเฉื่อย H (s)	ส่วนของเพลลา เชื่อมโยง	ค่าคงที่สปริง K (pu T/rad)
HP Turbine	0.092897	HP-IP	19.303
IP Turbine	0.155589	IP-LPA	34.929
LPA Turbine	0.85867	LPA-LPB	52.038
LPB Turbine	0.884215	LPB-GEN	70.858
Generator	0.868495	GEN-EXC	2.822
Exciter	0.0342165		

ผลของการเปรียบเทียบค่าจะจงจากทั้ง 3 กรณีที่กล่าวในข้างต้นเป็นดังเป็นดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าเจาะจงที่ของแบบจำลอง FBM

ค่าเจาะจงจาก โปรแกรมที่สร้างขึ้น	ค่าเจาะจงที่แสดงใน เอกสารอ้างอิง [11]	ค่าเจาะจงที่แสดงใน เอกสารอ้างอิง [4]
3.86E-11	-33.35	-0.78
0.20218	10.04	-0.95
-1.0075	-20.49	-25.41
-2.8505	-11.08	-41.30
-31.625	-3.80	-1.218 + 10.595i
-41.537	-0.33	-1.218 - 10.595i
0.16279 - 98.121i	0.023794 + 99.942i	0.07818 + 99.709i
0.16279 + 98.121i	0.023794 - 99.942i	0.07818 - 99.709i
-0.28971 - 126.58i	0.25613 + 127.40i	0.0785 + 127.156i
-0.28971 + 126.58i	0.25613 - 127.40i	0.0785 - 127.156i
-3.0542 - 129.46i	-3.1054 + 130.29i	-5.541 + 136.977i
-3.0542 + 129.46i	-3.1054 - 130.29i	-5.541 - 136.977i
-0.09117 - 160.78i	-0.013310 + 160.34i	0.040898 + 160.39i
-0.09117 + 160.78i	-0.013310 - 160.34i	0.040898 - 160.39i
-0.050199 - 203.07i	-0.028462 + 202.80i	0.00233 + 202.863i
-0.050199 + 203.07i	-0.028462 - 202.80i	0.00233 - 202.863i
-4.2373e-006 - 298.18i	-5.0384e-007 + 298.18i	-4.80e-007 + 298.177i
-4.2373e-006 + 298.18i	-5.0384e-007 - 298.18i	-4.80e-007 - 298.177i
-4.9618 - 625.89i	-4.7241 + 623.68i	-6.8096 + 616.532i
-4.9618 + 625.89i	-4.7241 - 623.68i	-6.8096 - 616.532i

จะเห็นว่าค่าเจาะจงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะส่วนจินตภาพ หรือค่าความถี่ของการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบ ส่วนความแตกต่างในส่วนของความถี่ 10 rad/s นั้นอาจเป็นผลมาจากการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันและความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณค่าเจาะจงของเมตริกซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติสภาวะเลว (Ill-conditioned)

5.4 ผลของตัวเก็บประจุอนุกรมในระบบทดสอบ 4 บัส

หลังจากที่ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ทั้งในส่วนของการหาค่า TTC และค่าเจาะจงของระบบทดสอบแล้ว ต่อไปจะนำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาใช้ศึกษาผลของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและซบซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ ในระบบทดสอบ 4 บัส ในรูปที่ 5.3 ที่มีเงื่อนไขการทำงานดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.3 ข้างต้น

แต่ในหัวข้อนี้จะทดสอบกับเอกสารอ้างอิง [2] ที่ต่อ TCSC ในสายส่ง เพื่อดูผลของค่า TTC ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่ง TCSC เป็นอุปกรณ์ที่จะเป็นได้ทั้งตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับการปรับมุมของทรินสเตอร์ที่ใช้ควบคุม ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลของค่า TTC สามารถเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิงดังกล่าว ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะใช้ทั้งการต่อตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมในสายส่งแต่ละเส้น

ค่า TTC ที่เปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากการใส่ TCSC ในสายส่งเส้นต่าง ๆ แสดงได้ในตารางที่ 5.6 จะเห็นว่า การใส่ TCSC ในสายส่งสามารถเพิ่มสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากบัสต้นทางไปยังบัสปลายทางได้ กล่าวคือ ค่า TTC มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การใส่ TCSC ในสายส่งเส้นต่างๆ กัน มีผลทำให้ค่า TTC ของระบบมีค่าแตกต่างกันอีกด้วย

ตารางที่ 5.6 ค่า TTC ในระบบทดสอบ 4 บัส เมื่อใส่ TCSC ในสายส่งเส้นต่าง ๆ

ค่า TTC (MW)	กรณีที่ไม่มี TCSC	ใส่ TCSC ในสายส่งระหว่างบัส 1 กับบัส 2	ใส่ TCSC ในสายส่งระหว่างบัส 2 กับบัส 4	ใส่ TCSC ในสายส่งระหว่างบัส 1 กับบัส 3	ใส่ TCSC ในสายส่งระหว่างบัส 3 กับบัส 4
โปรแกรมที่สร้างขึ้น	235.79	246.25	274.17	271.34	283.61
รายการอ้างอิง [2]	234	247	273	273	286

ในการวิเคราะห์ปัญหา SSR ของระบบทดสอบ 4 บัส เมื่อมีการใส่ TCSC ในสายส่ง ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าค่าเจาะจงของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่อขนาดของ TCSC เปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังพบว่าตำแหน่งของ TCSC มีผลต่อความถี่ของการสั่นของระบบด้วย โดยสนใจเฉพาะความถี่ที่มีค่าต่ำกว่าความถี่ซิงโครไนส์ เพราะเป็นความถี่ที่มีผลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหายได้ เนื่องจากความถี่ธรรมชาติของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกังหัน โดยมากมักมีความถี่ต่ำกว่าความถี่ซิงโครไนส์ของระบบ (ในที่นี้กำหนดให้ความถี่ซิงโครไนส์อยู่ที่ 60 Hz หรือ 377 rad/s)

ผลของค่าเจาะจงที่ได้ จะแสดงใน 4 กรณี คือ

- 1) เปรียบเทียบค่าเจาะจงของกรณีที่ไม่มี TCSC กับการใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่าง บัส 1 กับบัส 2 ดังแสดงในตารางที่ 5.7
- 2) เปรียบเทียบค่าเจาะจงของกรณีที่ไม่มี TCSC กับการใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่าง บัส 2 กับบัส 4 ดังแสดงในตารางที่ 5.8
- 3) เปรียบเทียบค่าเจาะจงของกรณีที่ไม่มี TCSC กับการใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่าง บัส 1 กับบัส 3 ดังแสดงในตารางที่ 5.9
- 4) เปรียบเทียบค่าเจาะจงของกรณีที่ไม่มี TCSC กับการใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่าง บัส 3 กับบัส 4 ดังแสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.7 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 1 กับ บัส 2

	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขนาดของ TCSC ในสายส่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง											
	0%		10%		20%		30%		40%		50%	
ค่าเจาะจง เฉพาะที่ความถี่ต่ำกว่า 377 rad/s	0.46	-98.52i	0.47	-98.52i	0.48	-98.51i	0.50	-98.49i	0.53	-98.46i	0.59	-98.41i
	0.46	98.52i	0.47	98.52i	0.48	98.51i	0.50	98.49i	0.53	98.46i	0.59	98.41i
	0.05	-126.97i	0.05	-126.97i	0.05	-126.96i	0.05	-126.96i	0.06	-126.96i	0.07	-126.95i
	0.05	126.97i	0.05	126.97i	0.05	126.96i	0.05	126.96i	0.06	126.96i	0.07	126.95i
	0.20	-160.38i	0.21	-160.37i	0.22	-160.36i	0.23	-160.34i	0.27	-160.29i	0.46	-160.02i
	0.20	160.38i	0.21	160.37i	0.22	160.36i	0.23	160.34i	0.27	160.29i	0.46	160.02i
	0.39	-202.49i	0.41	-202.46i	0.45	-202.41i	0.54	-202.28i	1.11	-200.68i	-0.06	-175.12i
	0.39	202.49i	0.41	202.46i	0.45	202.41i	0.54	202.28i	1.11	200.68i	-0.06	175.12i
	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	-0.25	-270.16i	-0.30	-238.02i	-0.88	-208.40i	0.11	-202.93i
	0.00	298.18i	0.00	298.18i	-0.25	270.16i	-0.30	238.02i	-0.88	208.40i	0.11	202.93i
			-0.25	-306.14i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i
			-0.25	306.14i	0.00	298.18i	0.00	298.18i	0.00	298.18i	0.00	298.18i

ตารางที่ 5.8 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2 กับ บัส 4

	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขนาดของ TCSC ในสายส่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง											
	0%		10%		20%		30%		40%		50%	
ค่าเจาะจง เฉพาะที่ความถี่ต่ำกว่า 377 rad/s	0.46	-98.52i	0.47	-98.52i	0.49	-98.51i	0.51	-98.50i	0.54	-98.48i	0.57	-98.47i
	0.46	98.52i	0.47	98.52i	0.49	98.51i	0.51	98.50i	0.54	98.48i	0.57	98.47i
	0.05	-126.97i	0.05	-126.97i	0.05	-126.96i	0.05	-126.96i	0.05	-126.96i	0.06	-126.96i
	0.05	126.97i	0.05	126.97i	0.05	126.96i	0.05	126.96i	0.05	126.96i	0.06	126.96i
	0.20	-160.38i	0.21	-160.37i	0.22	-160.36i	0.23	-160.35i	0.25	-160.33i	0.27	-160.31i
	0.20	160.38i	0.21	160.37i	0.22	160.36i	0.23	160.35i	0.25	160.33i	0.27	160.31i
	0.39	-202.49i	0.42	-202.46i	0.45	-202.43i	0.49	-202.37i	0.56	-202.28i	0.70	-202.08i
	0.39	202.49i	0.42	202.46i	0.45	202.43i	0.49	202.37i	0.56	202.28i	0.70	202.08i
	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	-0.28	-283.25i	-0.30	-262.20i	-0.36	-244.52i	-0.49	-229.08i
	0.00	298.18i	0.00	298.18i	-0.28	283.25i	-0.30	262.20i	-0.36	244.52i	-0.49	229.08i
			-0.27	-310.75i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i
			-0.27	310.75i	0.00	298.18i	0.00	298.18i	0.00	298.18i	0.00	298.18i

ตารางที่ 5.9 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 1 กับ บัส 3

	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขนาดของ TCSC ในสายส่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง											
	0%		10%		20%		30%		40%		50%	
ค่าเจาะจง เฉพาะที่ความถี่ต่ำกว่า 377 rad/s	0.46	-98.52i	0.47	-98.52i	0.49	-98.51i	0.51	-98.50i	0.53	-98.48i	0.56	-98.47i
	0.46	98.52i	0.47	98.52i	0.49	98.51i	0.51	98.50i	0.53	98.48i	0.56	98.47i
	0.05	-126.97i	0.05	-126.97i	0.05	-126.96i	0.05	-126.96i	0.05	-126.96i	0.06	-126.96i
	0.05	126.97i	0.05	126.97i	0.05	126.96i	0.05	126.96i	0.05	126.96i	0.06	126.96i
	0.20	-160.38i	0.21	-160.37i	0.22	-160.36i	0.23	-160.35i	0.25	-160.33i	0.27	-160.31i
	0.20	160.38i	0.21	160.37i	0.22	160.36i	0.23	160.35i	0.25	160.33i	0.27	160.31i
	0.39	-202.49i	0.42	-202.46i	0.44	-202.43i	0.49	-202.37i	0.56	-202.28i	0.69	-202.08i
	0.39	202.49i	0.42	202.46i	0.44	202.43i	0.49	202.37i	0.56	202.28i	0.69	202.08i
	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	-0.27	-283.26i	-0.30	-262.20i	-0.35	-244.52i	-0.48	-229.08i
	0.00	298.18i	0.00	298.18i	-0.27	283.26i	-0.30	262.20i	-0.35	244.52i	-0.48	229.08i
			-0.27	-310.75i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i
			-0.27	310.75i	0.00	298.18i	0.00	298.18i	0.00	298.18i	0.00	298.18i

ตารางที่ 5.10 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อใส่ TCSC ในสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 3 กับ บัส 4

	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขนาดของ TCSC ในสายส่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่ง											
	0%		10%		20%		30%		40%		50%	
ค่าเจาะจง เฉพาะที่ความถี่ต่ำกว่า 377 rad/s	0.46	-98.52i	0.48	-98.51i	0.50	-98.50i	0.53	-98.49i	0.58	-98.46i	0.65	-98.40i
	0.46	98.52i	0.48	98.51i	0.50	98.50i	0.53	98.49i	0.58	98.46i	0.65	98.40i
	0.05	-126.97i	0.05	-126.97i	0.05	-126.96i	0.05	-126.96i	0.06	-126.96i	0.07	-126.94i
	0.05	126.97i	0.05	126.97i	0.05	126.96i	0.05	126.96i	0.06	126.96i	0.07	126.94i
	0.20	-160.38i	0.21	-160.37i	0.22	-160.36i	0.25	-160.33i	0.30	-160.28i	0.51	-160.00i
	0.20	160.38i	0.21	160.37i	0.22	160.36i	0.25	160.33i	0.30	160.28i	0.51	160.00i
	0.39	-202.49i	0.42	-202.46i	0.47	-202.41i	0.57	-202.27i	1.19	-200.62i	-0.10	-175.15i
	0.39	202.49i	0.42	202.46i	0.47	202.41i	0.57	202.27i	1.19	200.62i	-0.10	175.15i
	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	-0.26	-270.16i	-0.33	-238.04i	-0.96	-208.48i	0.11	-202.94i
	0.00	298.18i	0.00	298.18i	-0.26	270.16i	-0.33	238.04i	-0.96	208.48i	0.11	202.94i
			-0.26	-306.14	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i	0.00	-298.18i
			-0.26	306.14	0.00	298.18i	0.00	298.18i	0.00	298.18i	0.00	298.18i

จากผลของค่าเจาะจงในตารางที่ 5.7-5.10 แสดงให้เห็นว่า โดยภาพรวมของการใส่ TCSC เข้าไปในสายส่ง จะทำให้ความถี่ของระบบเดิม มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในส่วนจริงของค่าเจาะจง และเปลี่ยนแปลงน้อยมากในส่วนค่าจินตภาพ แต่สิ่งที่เกิดขึ้นและเป็นผลโดยตรงจากการต่อ TCSC เพื่อเพิ่มค่า TTC คือ มีความถี่อื่นเพิ่มขึ้นมาในระบบ ซึ่งเป็นความถี่ที่เกิดจากการสั่นพ้องของ TCSC กับ ค่าอินดักแตนซ์ในสายส่ง อย่างไรก็ตาม ในระบบทดสอบ 4 บัสพบว่า ที่ความถี่เหล่านั้นจะไม่ใช่ปัญหาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากค่าส่วนจริงของค่าเจาะจงที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นลบ ดังนั้นสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือค่า TTC ของระบบได้ โดยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรม ซึ่งในกรณีนี้จะไม่เกิดปัญหา SSR ด้วย

อนึ่งในการวิเคราะห์ปัญหา SSR จะขอละเลยค่าเจาะจงที่มีส่วนจริงเป็นบวกตั้งแต่ยังไม่ใส่ TCSC ในสายส่ง เพราะไม่ใช่ผลที่เกิดจากการใส่ TCSC และการที่ค่าเจาะจงมีค่าส่วนจริงเป็นบวกอาจมาจากการใช้ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแบบจำลอง First Benchmark [5] ซึ่งอาจไม่ใช่ข้อมูลจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบนั้น ๆ

บทที่ 6

การเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรม

ในบทนี้จะนำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาจากองค์ความรู้ในเรื่องการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากบัสต้นทางไปยังบัสปลายทาง และการวิเคราะห์ผลของซบซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ มาใช้ศึกษา วิเคราะห์ระบบส่งไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ เพื่อพิจารณาผลของการใช้ตัวเก็บ ประจุต่ออนุกรม เพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้กับระบบ และผลกระทบ ด้านซบซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ที่เกิดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

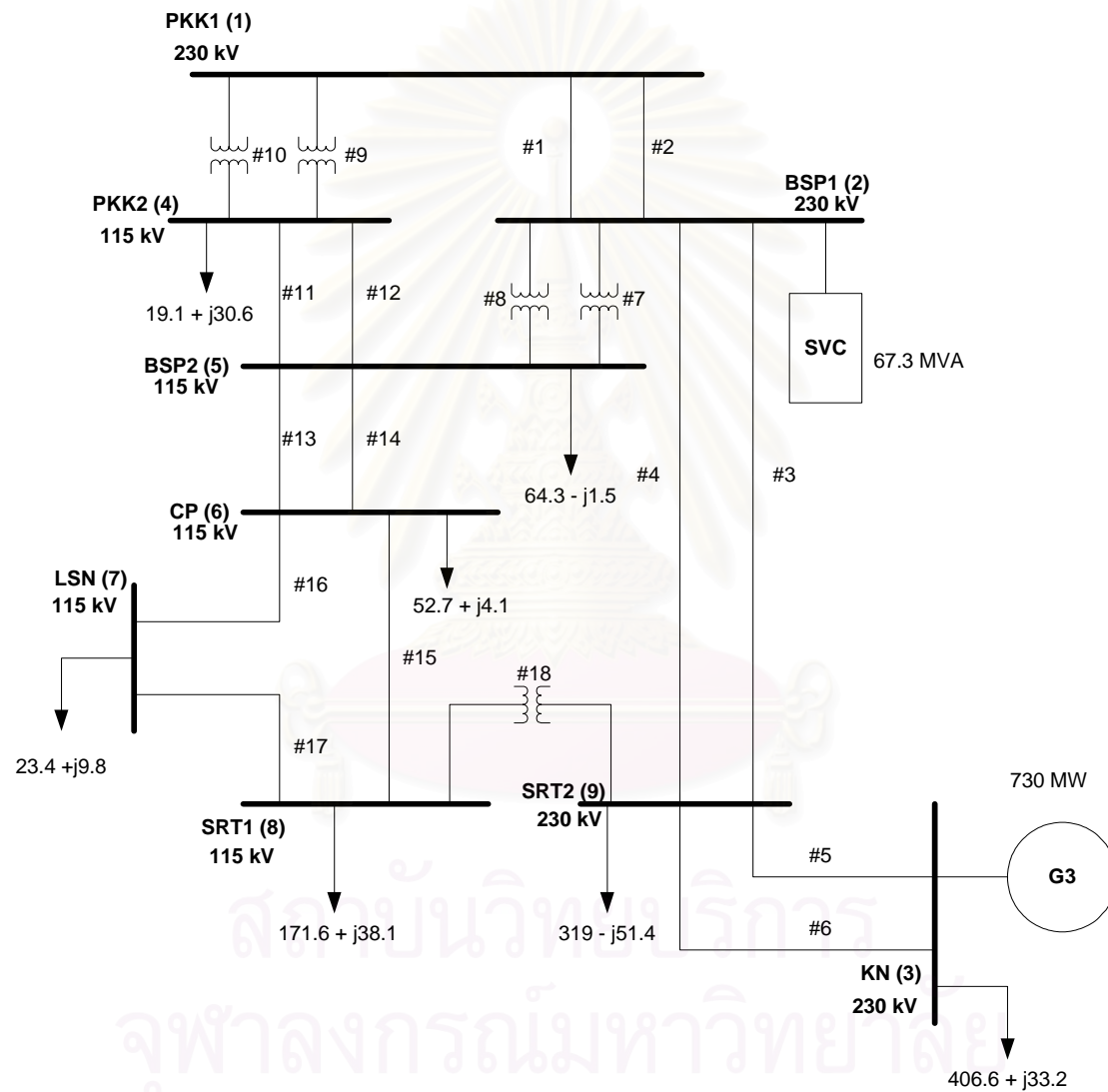
6.1 ระบบส่งไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้

การที่เลือกศึกษาระบบส่งไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ เนื่องจากเป็น ระบบที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนกำลังการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าของประเทศ ด้วยเหตุผล ด้านสภาพภูมิประเทศ และจะยิ่งมีความสำคัญหากในอนาคตประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการส่งจ่าย พลังงานไฟฟ้าของอาเซียน (ASEAN Power Grid)

องค์ประกอบของระบบส่งไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ ดังแสดงไว้ในรูป ที่ 6.1 เป็นระบบ 9 บัส 18 กิ่ง ซึ่งมี 2 ระดับแรงดันพิกัดคือ 230 และ 115 กิโลโวลต์ กำหนดให้บัสที่ 1 (บัสประจวบคีรีขันธ์) เป็นบัสอ้างอิง (Slack bus) ซึ่งสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยไม่จำกัด บัสที่ 2 (บัสบางสะพาน) มีตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (SVC) ต่ออยู่ และบัสที่ 3 (บัสขนอม) มีเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้า 730 เมกกะวัตต์ต่ออยู่ บัสที่เหลือเป็นโหลดบัส

ข้อมูลในตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.3 เป็นข้อมูลของระบบ ณ จุดทำงานกรณีฐาน โดยที่ ข้อมูลของ ตารางที่ 6.1 แสดงถึงชนิดของบัส โหลดที่บัส แรงดันบัสเป็นค่าต่อหน่วย แรงดันพิกัด และขีดจำกัดขนาดของแรงดันในแต่ละบัส ตามลำดับ ส่วนข้อมูลในตารางที่ 6.2 แสดงข้อมูลของ การจ่ายกำลังไฟฟ้าของบัสอ้างอิงและบัสที่มีการควบคุมขนาดของแรงดัน (Voltage-Controlled bus) รวมถึงขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขนาดของแรงดันตามลำดับ ส่วนข้อมูลในตารางที่ 6.3 แสดงค่าพารามิเตอร์และขีดจำกัดของสายส่งในรูปแบบที่ 6.1

สำหรับการศึกษาเรื่อง SSR ในที่นี้จะใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีค่าพารามิเตอร์ชุดเดียวกับแบบจำลอง FBM [5] (ค่าฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนจากเดิมคือ 892.4 MVA ให้เป็น 100 MVA เช่นเดียวกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้) ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการหาค่าเจาะจงเพื่อวิเคราะห์ SSR ในบทที่ 5



รูปที่ 6.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลบัส ณ จุดทำงานกรณีฐาน

ข้อมูลบัส							
บัสที่	ชนิดบัส	โพลจริง (MW)	โพลรีแอกทีฟ (MVAR)	ขนาดแรงดัน (p.u.)	แรงดันพิกัด (kV)	Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	Slack	-	-	1.027	230	1.05	0.95
2	PV	-	-	1.04	230	1.05	0.95
3	PV	406.6	33.2	1.037	230	1.05	0.95
4	PQ	19.1	30.6	1.021	115	1.05	0.95
5	PQ	64.3	-1.5	1.023	115	1.05	0.95
6	PQ	52.7	4.1	0.992	115	1.05	0.95
7	PQ	23.4	9.8	0.988	115	1.05	0.95
8	PQ	171.6	38.1	1.036	115	1.05	0.95
9	PQ	319	-51.4	1.027	230	1.05	0.95

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลกำลังการผลิตที่ป้อนเข้าสู่ระบบในกรณีฐานและขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า							
บัสที่	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิต รีแอกทีฟ (MVAR)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVAR)	Qmin (MVAR)	ขนาดแรงดัน (p.u.)
1	612.53	-99.491	3000	0	300	-300	1.027
2	0	183.27	0	0	300	-300	1.04
3	730	74.877	824	40	300	-300	1.037

ตารางที่ 6.3 ค่าพารามิเตอร์และขีดจำกัดของสายส่งในรูปแบบที่ 6.1

ข้อมูลสายส่ง						
เส้นที่	จากบัสที่	ไปบัสที่	ความต้านทาน (p.u.)	รีแอกแตนซ์ (p.u.)	ชัสเซปแตนซ์ (p.u.)	Limit (MVA)
1	1	2	0.00575	0.04419	0.09	476.9
2	1	2	0.00575	0.04419	0.09	476.9
3	2	9	0.02726	0.21279	0.44328	476.9
4	2	9	0.02726	0.21279	0.44328	476.9
5	9	3	0.00746	0.05679	0.11822	476.9
6	9	3	0.00746	0.05679	0.11822	476.9
7	2	5	0	0.05	0	200.0
8	2	5	0	0.05	0	200.0
9	1	4	0	0.05	0	200.0
10	1	4	0	0.05	0	200.0
11	4	5	0.05903	0.17196	0.02287	129.7
12	4	5	0.05903	0.17196	0.02287	129.7
13	5	6	0.11805	0.34393	0.04575	129.7
14	5	6	0.11805	0.34393	0.04575	129.7
15	6	8	0.17862	0.52517	0.06839	129.7
16	6	7	0.05954	0.17506	0.0228	129.7
17	7	8	0.11908	0.35012	0.0456	129.7
18	8	9	0	0.01667	0	600.0

6.2 หัวข้อการศึกษา

ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงค่าความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ ดังรูปที่ 6.1 ในกรณีปกติและกรณีที่ต้องตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นต่าง ๆ เพื่อดูว่า ควรต้องตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นใดที่จะทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและไม่ก่อให้เกิดปัญหา SSR กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

- 1) ศึกษาค่า TTC ของระบบในกรณีปกติและกรณีที่มีการต้องตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง
- 2) ศึกษาการเกิด SSR ที่เป็นผลมาจากการต้องตัวเก็บประจุอนุกรม
- 3) ศึกษาค่า TTC ของระบบหากสนใจเรื่องข้อจำกัดด้านเสถียรภาพ SSR

กำหนดให้บัสดันทางคือ บัสที่ 1 (บัสดึงจวบศิริจันทร์) และบัสปลายทางคือ บัสที่ 9 (บัสดุราษฎร์ธานี) ทำการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งทีละเส้น โดยเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุจาก 0% จนถึง 50% ของค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่งเส้นนั้น ๆ เพื่อพิจารณาถึงสมรรถนะที่เปลี่ยนไปในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ จากนั้นหาค่าเจาะจงของแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ SSR

ในการศึกษาจะพิจารณาทั้ง ในกรณีฐาน (Normal Operation) คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 (บัสนอม) มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 730 เมกกะวัตต์ (MW) และกรณีคอนทิงเจนซ์ ซึ่งในที่นี้จะมีทั้งหมด 3 คอนทิงเจนซ์คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังลดลงเป็น 712 600 และ 525 เมกกะวัตต์ตามลำดับ ซึ่งตัวเลขดังกล่าวมาจากการลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 ลงทีละชุด และจากการทดลองวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบพบว่า ระบบจะสามารถทำงานโดยไม่ฝ่าฝืนขีดจำกัดต่าง ๆ ได้ก็ต่อเมื่อ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 525 เมกกะวัตต์ ดังนั้นในการศึกษามีทั้งหมด 4 กรณีที่ทำการพิจารณาเพื่อหาค่า TTC

6.3 ผลการศึกษา

6.3.1 ผลการศึกษาค่า TTC ของระบบ ในกรณีปกติและกรณีที่มีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง

ผลการคำนวณค่า TTC จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เป็นไปตามตารางที่ 6.4-6.7 โดยแสดงถึงค่า TTC (MW) ที่เพิ่มขึ้นของโหลดที่บัส 9 จากโหลดค่าฐาน (319 MW) ที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 ทั้งในกรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมในสายส่ง และกรณีที่ต่อตัวเก็บประจุอนุกรมขนาดต่าง ๆ ในสายส่งแต่ละเส้น ทั้ง 4 กรณีที่พิจารณา

ตารางที่ 6.4 ค่า TTC (MW) กรณีที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังให้ระบบ 730 MW

ขนาดตัวเก็บประจุอนุกรม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ ค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่ง	0%	10%	20%	30%	40%	50%
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 1	296.13	297.17	298.32	299.59	301.00	302.55
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3	296.13	312.20	330.88	352.62	377.78	406.15
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 5	296.13	298.78	301.59	304.55	307.62	310.78
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 13	296.13	291.88	285.58	276.47	263.51	245.28
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15	296.13	301.54	308.53	317.68	329.85	346.30
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 16	296.13	290.97	285.30	279.09	272.28	264.83
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17	296.13	311.58	329.70	351.14	376.72	388.43

ตารางที่ 6.5 ค่า TTC (MW) กรณีที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังให้ระบบ 712 MW

ขนาดตัวเก็บประจุอนุกรม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง	0%	10%	20%	30%	40%	50%
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 1	279.21	280.25	281.40	282.67	284.08	285.63
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3	279.21	295.30	313.99	335.75	360.94	389.33
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 5	279.21	281.88	284.72	287.75	290.94	294.29
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 13	279.21	274.96	268.65	259.53	246.57	228.33
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15	279.21	284.62	291.62	300.78	312.95	329.40
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 16	279.21	274.04	268.36	262.14	255.32	247.85
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17	279.21	294.67	312.80	334.24	360.20	371.29

ตารางที่ 6.6 ค่า TTC (MW) กรณีที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังให้ระบบ 600 MW

ขนาดตัวเก็บประจุอนุกรม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง	0%	10%	20%	30%	40%	50%
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 1	171.97	173.01	174.16	175.44	176.85	178.40
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3	171.97	188.12	206.89	228.73	254.00	282.48
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 5	171.97	174.85	178.04	181.63	185.68	190.30
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 13	171.97	167.70	161.37	152.23	139.25	120.99
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15	171.97	177.41	184.42	193.59	205.78	222.22
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 16	171.97	166.76	161.04	154.77	147.90	140.38
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17	171.97	187.45	205.59	227.03	252.03	263.12

ตารางที่ 6.7 ค่า TTC (MW) กรณีที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังให้ระบบ 525 MW

ขนาดตัวเก็บประจุอนุกรม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง	0%	10%	20%	30%	40%	50%
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 1	98.29	99.33	100.48	101.75	103.16	104.71
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3	98.29	114.45	133.22	155.07	180.35	208.83
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 5	98.29	101.41	104.96	109.04	113.78	119.37
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 13	98.29	94.01	87.68	78.55	65.57	47.31
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15	98.29	103.72	110.73	119.90	132.08	148.50
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 16	98.29	93.07	87.35	81.07	74.20	66.67
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17	98.29	113.76	131.89	153.31	178.12	189.21

ตารางที่ 6.8-6.11 เป็นการแสดงค่า TTC คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับขนาด โหลดของบัส
ที่ 9 ในกรณีฐาน

ตารางที่ 6.8 ค่า TTC (%) กรณีที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังให้ระบบ 730 MW

ขนาดตัวเก็บประจุอนุกรม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง	0%	10%	20%	30%	40%	50%
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 1	92.83	93.16	93.52	93.92	94.36	94.84
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3	92.83	97.87	103.72	110.54	118.43	127.32
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 5	92.83	93.66	94.54	95.47	96.43	97.42
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 13	92.83	91.50	89.52	86.67	82.61	76.89
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15	92.83	94.53	96.72	99.59	103.40	108.56
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 16	92.83	91.21	89.44	87.49	85.35	83.02
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17	92.83	97.68	103.36	110.08	118.09	121.76

ตารางที่ 6.9 ค่า TTC (%) กรณีที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังให้ระบบ 712 MW

ขนาดตัวเก็บประจุอนุกรม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง	0%	10%	20%	30%	40%	50%
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 1	87.53	87.85	88.21	88.61	89.05	89.54
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3	87.53	92.57	98.43	105.25	113.15	122.05
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 5	87.53	88.36	89.25	90.20	91.21	92.25
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 13	87.53	86.19	84.22	81.36	77.29	71.58
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15	87.53	89.22	91.42	94.29	98.10	103.26
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 16	87.53	85.90	84.13	82.17	80.04	77.70
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17	87.53	92.37	98.06	104.78	112.92	116.39

ตารางที่ 6.10 ค่า TTC (%) กรณีที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังให้ระบบ 600 MW

ขนาดตัวเก็บประจุอนุกรม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง	0%	10%	20%	30%	40%	50%
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 1	53.91	54.24	54.60	55.00	55.44	55.92
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3	53.91	58.97	64.86	71.70	79.63	88.55
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 5	53.91	54.81	55.81	56.94	58.21	59.66
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 13	53.91	52.57	50.59	47.72	43.65	37.93
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15	53.91	55.61	57.81	60.69	64.51	69.66
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 16	53.91	52.28	50.48	48.52	46.36	44.01
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17	53.91	58.76	64.45	71.17	79.01	82.48

ตารางที่ 6.11 ค่า TTC (%) กรณีที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังให้ระบบ 525 MW

ขนาดตัวเก็บประจุอนุกรม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง	0%	10%	20%	30%	40%	50%
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 1	30.81	31.14	31.50	31.90	32.34	32.82
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3	30.81	35.88	41.76	48.61	56.54	65.46
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 5	30.81	31.79	32.90	34.18	35.67	37.42
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 13	30.81	29.47	27.49	24.62	20.55	14.83
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15	30.81	32.51	34.71	37.59	41.40	46.55
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 16	30.81	29.18	27.38	25.41	23.26	20.90
ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17	30.81	35.66	41.34	48.06	55.84	59.31

จากการแสดงผลของค่า TTC ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ในตารางที่ 6.4-6.11 จะเห็นว่าค่า TTC มีแนวโน้มดีขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อทำการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่ 1, 3, 5, 15 และ 17 โดย TTC มีค่าแตกต่างกันเมื่อต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งต่างเส้นกัน แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งและขนาดของการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังบัสปลายทาง

หากนำผลค่า TTC เทียบกับกรณีฐานที่ยังไม่ต่อตัวเก็บประจุอนุกรมจะพบว่า ในทุกกรณีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่ 3 และ 17 จะทำให้ TTC ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นอื่น ทั้งนี้เนื่องจาก สายส่งเส้นที่ 3 (หรือ 4) เป็นสายส่งเส้นที่ยาวที่สุดและเป็นสายส่งเส้นหลักในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากบัสที่ 1 ไปยังบัสที่ 9 เมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นนี้จะทำให้สายส่งสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นมาก ส่วนการต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 ทำให้ค่า TTC เพิ่มขึ้นมากด้วยเช่นกันเพราะ จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ระบบทดสอบถูกจำกัดการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยขีดจำกัดแรงดันต่ำที่บัสที่ 7 การใส่ตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 เป็นการช่วยทำให้บัสที่ 7 เข้าสู่ขีดจำกัดแรงดันต่ำช้าลงเมื่อมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังบัสปลายทางเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า TTC ของระบบเพิ่มขึ้นมากเช่นกัน ดังนั้น หากสนใจเฉพาะการเพิ่มขึ้นของค่า TTC ของระบบ การใส่ตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่ 3 และ 17 จะทำให้ได้ผลที่ชัดเจนที่สุดดังที่ได้แสดงสรุปผลไว้ในตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.12 ค่า TTC (MW) สำหรับการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่ 3 และ 17

ค่า TTC (MW)	ไม่ต่อตัวเก็บประจุ	ต่อตัวเก็บประจุ ในสายส่งเส้นที่ 3	ต่อตัวเก็บประจุ ในสายส่งเส้นที่ 17
บัส 3 จ่ายกำลัง 730 MW.	296.13	406.15	388.43
บัส 3 จ่ายกำลัง 712 MW.	279.21	389.33	371.29
บัส 3 จ่ายกำลัง 600 MW.	171.97	282.48	263.12
บัส 3 จ่ายกำลัง 525 MW.	98.29	208.83	189.21

นอกจากนี้ ตารางที่ 6.12 ยังแสดงให้เห็นค่ากำลังการผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 3 ว่ามีผลต่อค่า TTC หากกำลังการผลิตดังกล่าวมีค่าลดลง จะทำให้ค่า TTC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญด้วย สำหรับสายส่งเส้นที่ 13 และ 16 เมื่อต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งแล้วจะทำให้ค่า TTC ลดลงจากเดิมและยิ่งลดลงมากขึ้นเมื่อขนาดของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น ทำให้เห็นว่าการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายไม่ทำให้ค่า TTC ของระบบเพิ่มขึ้นเสมอไป

หากทดลองเปลี่ยนจากการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่ 13 และ 16 ให้เป็นการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมในสายส่งแทน จะทำให้ค่า TTC ของระบบไฟฟ้าภาคใต้ เป็นไปตามตารางที่ 6.13

ผลจากตารางที่ 6.13 แสดงให้เห็นว่าหากการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งทำให้สมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบลดลง หากเปลี่ยนมาเป็นการต่อตัวเหนี่ยวนำแทนจะทำให้สมรรถนะดีขึ้น ซึ่งอุปกรณ์ที่มีความสามารถเปลี่ยนจากตัวเก็บประจุอนุกรมมาเป็นตัวเหนี่ยวนำได้ประเภทหนึ่งก็คือ Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) นั่นเอง

การที่ต่อตัวเหนี่ยวนำในสายส่งเส้นที่ 13 และ 16 แล้วส่งผลให้ค่า TTC เพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากค่า TTC ของระบบในกรณีฐานถูกจำกัดโดยขีดจำกัดด้านแรงดันตกของบัสที่ 7 ซึ่งการต่อตัวเหนี่ยวนำในสายส่งเส้นที่ 13 หรือ 16 จะไปช่วยทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นดังกล่าวลดลง ทำให้แรงดันที่บัส 7 เข้าสู่ค่าขีดจำกัดข้างล่าง โดยที่กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจ่ายผ่านทางสายส่งเส้นอื่นเพิ่มขึ้นแทน จึงทำให้ค่า TTC ของระบบสูงขึ้นได้

ตารางที่ 6.13 ค่า TTC (MW) เปรียบเทียบระหว่างการต่อตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำ ในสายส่งเส้น
ที่ 13 และ 16

ขนาดของตัวเก็บ L และ C คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง		0%	10%	20%	30%	40%	50%
Gen บัส 3 จ่าย 730 MW	ต่อ C ในสายส่งเส้นที่ 13	296.13	291.88	285.58	276.47	263.51	245.28
	ต่อ L ในสายส่งเส้นที่ 13	296.13	298.86	300.47	301.25	301.41	301.11
	ต่อ C ในสายส่งเส้นที่ 16	296.13	290.97	285.30	279.09	272.28	264.83
	ต่อ L ในสายส่งเส้นที่ 16	296.13	300.83	305.10	308.99	312.52	315.73
Gen บัส 3 จ่าย 712 MW	ต่อ C ในสายส่งเส้นที่ 13	279.21	274.96	268.65	259.53	246.57	228.33
	ต่อ L ในสายส่งเส้นที่ 13	279.21	281.95	283.56	284.35	284.51	284.22
	ต่อ C ในสายส่งเส้นที่ 16	279.21	274.04	268.36	262.14	255.32	247.85
	ต่อ L ในสายส่งเส้นที่ 16	279.21	283.92	288.20	292.10	295.64	298.86
Gen บัส 3 จ่าย 600 MW	ต่อ C ในสายส่งเส้นที่ 13	171.97	167.70	161.37	152.23	139.25	120.99
	ต่อ L ในสายส่งเส้นที่ 13	171.97	174.73	176.38	177.19	177.38	177.11
	ต่อ C ในสายส่งเส้นที่ 16	171.97	166.76	161.04	154.77	147.90	140.38
	ต่อ L ในสายส่งเส้นที่ 16	171.97	176.72	181.05	184.98	188.56	191.81
Gen บัส 3 จ่าย 525 MW	ต่อ C ในสายส่งเส้นที่ 13	98.29	94.01	87.68	78.55	65.57	47.31
	ต่อ L ในสายส่งเส้นที่ 13	98.29	101.05	102.70	103.51	103.71	103.44
	ต่อ C ในสายส่งเส้นที่ 16	98.29	93.07	87.35	81.07	74.20	66.67
	ต่อ L ในสายส่งเส้นที่ 16	98.29	103.04	107.37	111.31	114.89	118.15

6.3.2 ผลการศึกษาการเกิด SSR ที่เป็นผลมาจากการต่อตัวเก็บประจุอนุกรม

การต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นใด ๆ ถึงแม้ว่าจะทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่อาจทำให้เกิดปัญหาเรื่องซับซิงโครไนส์เรโซแนนซ์กับระบบได้ ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงหลักเกณฑ์ในการพิจารณาผลของการหาค่าเจาะจง และวิเคราะห์ซับซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ ซึ่งจะแสดงเฉพาะกรณีของการต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ทำให้เกิดการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดกว่ากรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุคือ การต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3 เส้นที่ 15 และเส้นที่ 17 ในทุกคอนทิงเจนซี ซึ่งจะแสดงค่าเจาะจงที่มีส่วนจริงเป็นบวก และส่วนจินตภาพน้อยกว่าความถี่ซิงโครไนส์ของ (314 rad/s)

1) กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนอมจ่ายกำลังเข้าสู่ระบบ 525 MW

ตารางที่ 6.14 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.078	-2.109i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i
0.078	2.109i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i

ตารางที่ 6.15 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.078	-2.109i	0.060	-2.113i	0.041	-2.117i	0.022	-2.121i	0.004	-2.124i	0	0i
0.078	2.109i	0.060	2.113i	0.041	2.117i	0.022	2.121i	0.004	2.124i	0	0i

ตารางที่ 6.16 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.078	-2.109i	0.064	-2.114i	0.049	-2.119i	0.032	-2.124i	0.015	-2.129i	0.002	-2.131i
0.078	2.109i	0.064	2.114i	0.049	2.119i	0.032	2.124i	0.015	2.129i	0.002	2.131i

2) กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนอมจ่ายกำลังเข้าสู่ระบบ 600 MW

ตารางที่ 6.17 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.064	-2.294i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i
0.064	2.294i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i

ตารางที่ 6.18 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.064	-2.294i	0.046	-2.298i	0.028	-2.301i	0.010	-2.304i	0	0i	0	0i
0.064	2.294i	0.046	2.298i	0.028	2.301i	0.010	2.304i	0	0i	0	0i

ตารางที่ 6.19 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.064	-2.294i	0.050	-2.299i	0.035	-2.304i	0.019	-2.309i	0.003	-2.313i	0	0i
0.064	2.294i	0.050	2.299i	0.035	2.304i	0.019	2.309i	0.003	2.313i	0	0i

3) กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนอมจ่ายกำลังเข้าสู่ระบบ 712 MW

ตารางที่ 6.20 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.040	-2.578i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i
0.040	2.578i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i

ตารางที่ 6.21 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.040	-2.578i	0.023	-2.582i	0.006	-2.585i	0	0i	0	0i	0	0i
0.040	2.578i	0.023	2.582i	0.006	2.585i	0	0i	0	0i	0	0i

ตารางที่ 6.22 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.040	-2.578i	0.026	-2.583i	0.012	-2.588i	0	0i	0	0i	0	0i
0.040	2.578i	0.026	2.583i	0.012	2.588i	0	0i	0	0i	0	0i

4) กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนอมจ่ายกำลังเข้าสู่ระบบ 730 MW

ตารางที่ 6.23 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 3 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.036	-2.625i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i
0.036	2.625i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i	0	0i

ตารางที่ 6.24 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 15 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.036	-2.625i	0.019	-2.628i	0.002	-2.631i	0	0i	0	0i	0	0i
0.036	2.625i	0.019	2.628i	0.002	2.631i	0	0i	0	0i	0	0i

ตารางที่ 6.25 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อต่อตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นที่ 17 ด้วยขนาดที่ต่างกัน

ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้า แยกขนาดการชดเชยตัวเก็บประจุอนุกรมตามเปอร์เซ็นต์ของค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่ง											
0%		10%		20%		30%		40%		50%	
0.036	-2.625i	0.023	-2.630i	0.009	-2.634i	0	0i	0	0i	0	0i
0.036	2.625i	0.023	2.630i	0.009	2.634i	0	0i	0	0i	0	0i

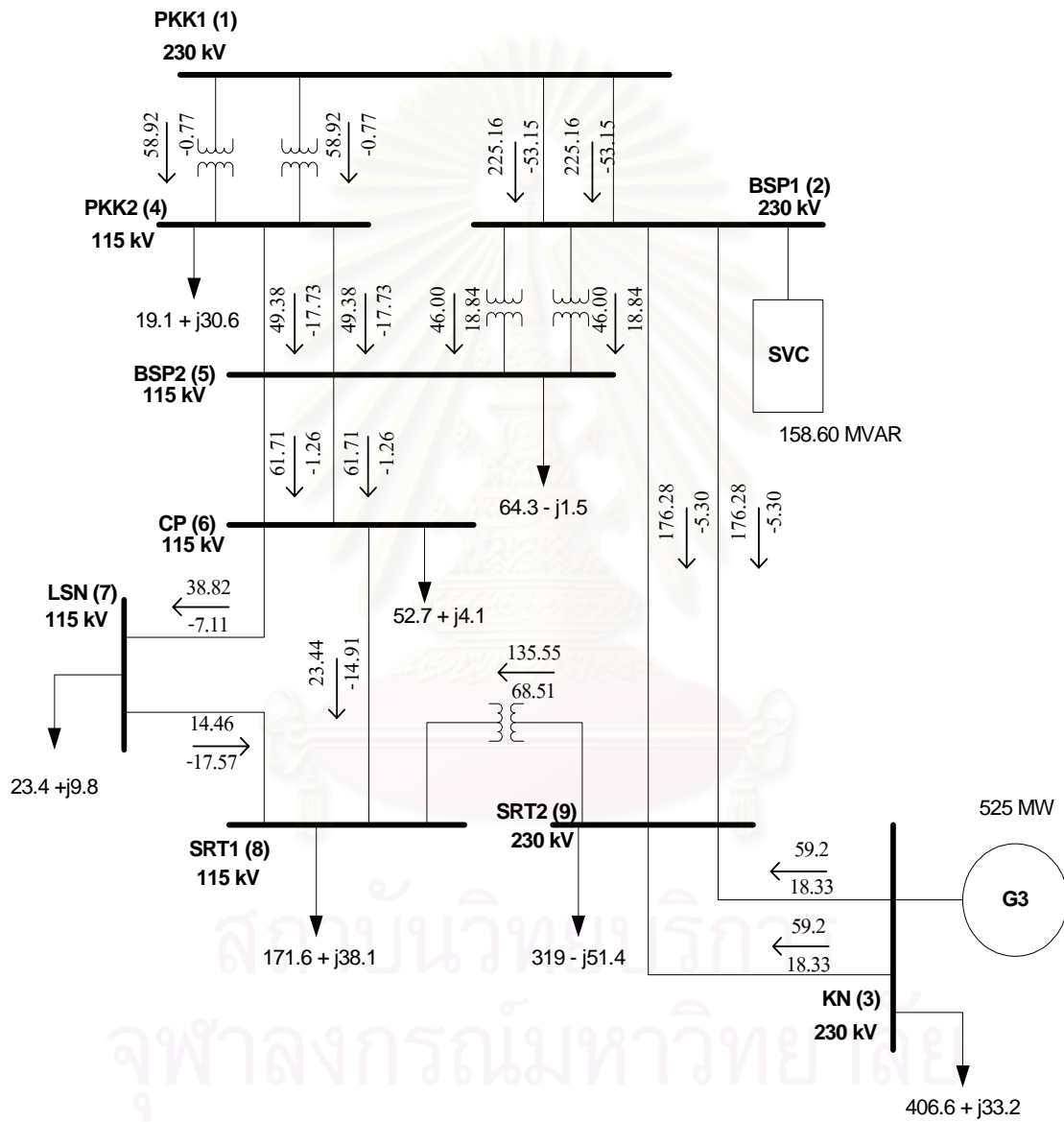
ผลในตารางที่ 6.14 ถึง 6.25 สามารถบอกได้ว่า เมื่อต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่ 3 15 และ 17 ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ นอกจากจะไม่มีค่าเจาะจงที่มีส่วนจริงเป็นบวกและส่วนจินตภาพเพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งไม่ทำให้เกิดปัญหา SSR แล้ว ยังทำให้ปัญหาความไม่มีเสถียรภาพของระบบที่เดิมเคยมีอยู่ค่อย ๆ ลดลงไปได้ด้วย

อย่างไรก็ตามข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ไม่ได้ใช้ข้อมูลจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสขนอม ผลที่ได้ออกมาจึงอาจมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป เมื่อต้องการนำตัวเก็บประจุอนุกรมมาใช้งานจริงในระบบส่งไฟฟ้า

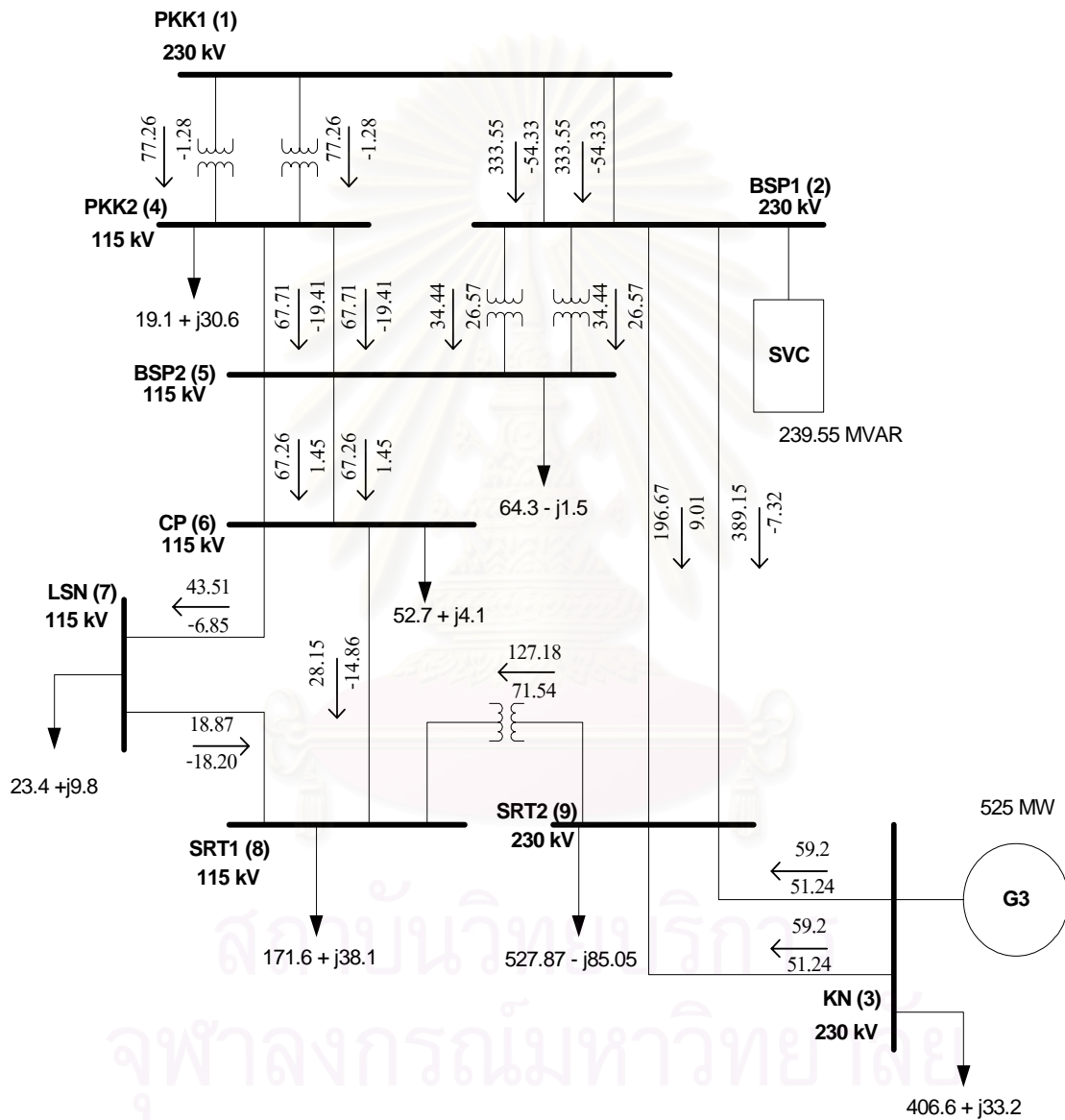
6.3.3 ผลการศึกษาค่า TTC ของระบบหากสนใจเรื่องข้อจำกัดด้านเสถียรภาพ SSR

จากผลการศึกษาผลของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในหัวข้อ 6.3.1 และต่อปัญหาซับซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ในหัวข้อ 6.3.2 หากวิเคราะห์ผลทั้ง 2 หัวข้อรวมกัน เพื่อดูถึงสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นได้ของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ จะได้ว่า ค่า TTC ของระบบเมื่อพิจารณาทุกคอนทิงเจนซ์จะมีค่าเท่ากับ 208.83 MW ซึ่งค่านี้ได้มาจากการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่ 3 ด้วยการชดเชยขนาด 50% ของค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่งเส้นดังกล่าว ซึ่งหากเปรียบเทียบกับค่า TTC ของระบบขณะที่ยังไม่ต่อตัวเก็บประจุอนุกรม จะมีค่าเพียง 98.29 MW เท่านั้น นอกจากนี้พบว่าการใช้งานตัวเก็บประจุอนุกรมที่ตำแหน่งดังกล่าวไม่ทำให้เกิดปัญหา SSR ขึ้นในระบบอีกด้วย

รูปที่ 6.2 และ 6.3 แสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจากบัสต้นทางมายังบัสปลายทางที่กรณีคอนทิงเจนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสขนอมจ่ายกำลังไฟฟ้า 525 MW โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีฐาน และกรณีที่มีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมด้วยค่าชดเชย 50 % ของค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่งเส้นที่ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 6.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าจากบัส 1 ไปยังบัส 9 ในกรณีฐาน โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 จ่ายกำลังไฟฟ้า 525 MW และไม่ต่อตัวเก็บประจุอนุกรม



รูปที่ 6.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากบัส 1 ไปยังบัส 9 ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขนอมจ่ายกำลังไฟฟ้า 525 MW และต่อตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 50% ของค่ารีแอกแตนซ์ในสายส่งเส้นที่ 3

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาผลของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและปัญหาฮับซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ โดยการสร้างโปรแกรมขึ้นเพื่อหาค่า การเพิ่มขึ้นของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสภาวะการทำงานปกติจากบัสต้นทางไปยังบัสปลายทาง และโปรแกรมหาค่าเจาะจงของระบบเพื่อวิเคราะห์ปัญหาฮับซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ (SSR) จากนั้นนำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นไปใช้ศึกษาระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ ว่าหากมีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง จะมีผลต่อการเพิ่มสมรรถนะของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และปัญหาฮับซิงโครไนส์เรโซแนนซ์ในระบบอย่างไร

จากการศึกษาผลของตัวเก็บประจุอนุกรมต่อสมรรถนะของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางไปยังภาคใต้ของประเทศไทย สรุปผลได้ดังนี้

1. การใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง โดยภาพรวมสามารถเพิ่มสมรรถนะ การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากภาคกลางไปยังภาคใต้ได้ และเพิ่มขึ้นอย่างเห็น ได้ชัดเจน
2. สมรรถนะที่เพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง ว่าอยู่ที่สายส่งเส้นใด และขึ้นอยู่กับขนาดของการชดเชยด้วยค่าตัวเก็บประจุในสายส่งเส้นนั้น
3. แนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้น
4. การต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่ง อาจไม่สามารถเพิ่มสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เสมอไป เพราะในสายส่งบางเส้นอาจมีผลทำให้สมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบลดลงได้ เนื่องจากไปทำให้ระบบถึงขีดจำกัดการทำงานเร็วขึ้น
5. ในสายส่งที่ต่อตัวเก็บประจุอนุกรมแล้วทำให้สมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าลดลง หากเปลี่ยนเป็นการชดเชยด้วยการต่อตัวเหนี่ยวนำแทน จะส่งผลทำให้สมรรถนะของระบบส่งจ่ายดีขึ้นได้ กล่าวคือไม่เพียงการต่อตัวเก็บประจุเท่านั้นที่สามารถเพิ่มสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ การต่อตัวเหนี่ยวนำในบางกรณีก็สามารถเพิ่มสมรรถนะของสายส่งได้เช่นกัน

6. การต่อตัวเก็บประจุอนุกรมที่ต่อในสายส่ง อาจส่งผลให้เกิดปัญหาซับซิง โครนัสเรโซแนนซ์กับระบบไฟฟ้าได้ในบางกรณี แต่จากการศึกษาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้พบว่าไม่เพียงแต่ไม่ทำให้เกิดปัญหา SSR ขึ้นในระบบแล้วยังทำให้ปัญหา SSR ในระบบลดลงด้วย
7. เมื่อพิจารณาผลของทั้งการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ร่วมกับปัญหาซับซิง โครนัสเรโซแนนซ์ พบว่าการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในสายส่งเส้นที่ถูกต้องและด้วยค่าที่เหมาะสม ทำให้สมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบเพิ่มขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่มีปัญหาซับซิง โครนัสเรโซแนนซ์

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาแบบจำลองโดยละเอียดของ TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) เพื่อใช้แทนตัวเก็บประจุอนุกรม ในการเพิ่มสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ เนื่องจากการทดลองเห็นว่า ไม่เพียงแต่ตัวเก็บประจุอนุกรมเท่านั้นที่สามารถเพิ่มสมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ตัวเหนี่ยวนำก็สามารถเพิ่มสมรรถนะได้เช่นกัน ซึ่ง TCSC เป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำงานเป็นได้ทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ขึ้นอยู่กับการควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์
2. นำข้อจำกัดของสภาวะการทำงานชั่วขณะ (Transient Conditions) ของระบบมาร่วมพิจารณาใช้ในการหาค่า TTC ของระบบ
3. ออกแบบระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติของ TCSC ในการปรับค่ารีแอคแตนซ์ให้เหมาะสม เพื่อให้สมรรถนะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและไม่เกิดปัญหา SSR ทั้งในสภาวะการทำงานอยู่ตัวและสภาวะการทำงานชั่วขณะ
4. ศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรม หรือ TCSC เพื่อช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ

รายการอ้างอิง

1. Transmission Transfer Capability Task Force, "Available Transfer Capability Definitions and Determination", North American Electricity Reliability Council, Princeton, New Jersey, June 1996.
2. Y. Ou, C. Singh, "Improvement of Total Transfer Capability Using TCSC and SVC, Power Engineering Society Summer Meeting", *2001.IEEE*, 2,(July 2001).
3. J.F. Hauer, W.A. Mittelstadt, R.J. Piwko, B.L. Damsky, and J.D. Eden, "Modulation and SSR Tests Performed on the BPA 500 kV Thyristor Controlled Series Capacitor Unit at Slatt Substation", *IEEE Trans. Power Systems*, 11(2),(May 1996):801-806.
4. P.M. Anderson, B.L. Agrawal, J.E. Van Ness, *Subsynchronous Resonance In Power System*, New York, IEEE Press,1990.
5. IEEE Committee Report, "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance", *IEEE Trans. Power Systems*, v.PAS-96, (Sept/Oct 1977):1565-1570.
6. H.A. Othman, L. Angquist, "Analytical Modeling of Thyristor-Controlled Series Capacitors for SSR Studies", *IEEE Trans. Power Systems*, 11,1(Feb 1996).
7. O. Wasynczuk, S. D.Sudhoff, "Automated State Model Generation Algorithm for Power Circuits and Systems", *IEEE Trans. Power Systems*, 11,4(Nov 1996):1951-1956.
8. K. Audomvongseeree, A. Yokoyama, "Capability Evaluation Using Two-Step Method, Power System Technology", *2002 Proceedings. PowerCon 2002*. International Conference on, 1,(Oct 2002).
9. P.M. Anderson, A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*, New York, IEEE Press, 1993.
10. L.O. Chua , P-M Lin , *Computer Aided Analysis Electronic Circuit : Algorithm and Computational Techniques*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1975
11. C.M. Ong, *Dynamic Simulations of Electric Machinery: Using MATLAB/ SIMULINK*, Prentice-Hall PTR, 1998.
12. P. Didsayabutra, *Determination of Real-Time Available Transfer Capability in Deregulated Power Systems*, PhD Thesis, Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, 2001.

13. H. Chiang, A.J. Flueck, K.S. Shah, N. Balu, "CPFLOW : A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations", *IEEE Trans. Power Systems*, 10,2(May 1995):623-634.
14. G.C. Ejebe, J. Tong, J.G. Waight. etc., "Available Transfer Capability Calculations", *IEEE Trans. Power Systems*, 13,4(Nov 1998):1521-1527.
15. M.R. Iravani, Abdel-Aty Edris, "Eigen Analysis of Seires Compensation Schemes Reducing The Potential of Subsynchronous Resonance", *IEEE Trans. Power Systems*, 10,2(May 1995).
16. X. Lei, B. Buchholz, E. Lerch, D. Povh, D. Retzmanm, "A Comprehensive Simulation Program for Subsynchronous Resonance Analysis", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000.IEEE, 2,(July 2000).
17. D.Y. Wong, G.J. Rogers, B. Porretta, P. Kundur, "Eigenvalue Analysis of Very Large Power Systems", *IEEE Trans. Power Systems*, 3,2(May 1988).
18. E. Katz, J. Tang, C.E.J. Bowler, B.L. Agrawal, R.G. Farmer, J.A. Demcko, D.A. Cruz, J. Sims, "Comparison of SSR Calculations and Test Results", *IEEE Trans. Power Systems*, 4,1(Feb 1995).
19. E.H. Allen, J.W. Chapman, M.D. Ilic, "Eigenvalue Analysis of The Stabilizing Effects of Feedback Linearizing Control on Subsynchronous Resonance", Control Applications, 1995., Proceedings of The 4th IEEE Conference on, (Sept 1995).
20. IEEE Committee Report, "Analysis and Control of Subsynchronous Resonance", *IEEE Pub.76*, CH1006-0-PWR, 1976.
21. IEEE Committee Report, "Proposed Tremns and Definitions for Subsynchronous Resonance Oscillations", *IEEE Trans. Power Systems*, v.PAS-99, 2(Mar/Apr 1980):506-511.
22. Lewis, A. William, *The Principles of Synchronous Machines*, 3rd Ed., Illinois Institute of Technology Bookstore, 1959.
23. Lewis, A. William, "A basic Analysis of Synchronous Machines", *Trans. AIEE*, 1, v.PAS-77, (1958):436-455.
24. Concordia, Charles, *Synchronous Machines-Theory and Performance*, John Wiley and Sons, New York, 1951.
25. Kimbark, W.Edward, *Power System Stability*, v.3, Synchronous Machines, John Wiley and Sons, New York, 1956.

26. IEC Std. 34-10-1975, Rotating Electrical Machines. Part 10: “Conventions for Description of Synchronous Machines”, *IEC*, Geneva, 1975.
27. N. Balanian, T. Bickart, *Electrical Network Theory*, J. Wiley, New York, 1969.
28. P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 1995.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

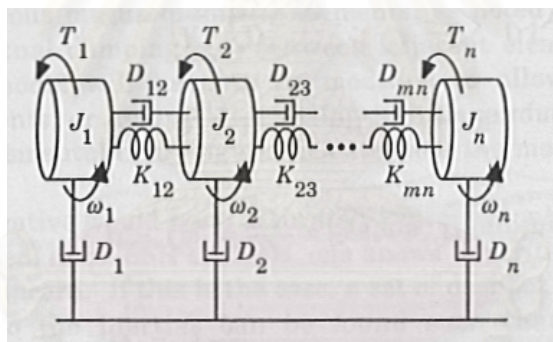
ภาคผนวก ก

การหาค่าการหน่วงของชุดกึ่งหัน

โดยทั่วไปแล้วการให้ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากผู้ผลิตจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วนคือ ค่าของ Shaft-Spring Mass Model และ Modal Model ใน Shaft-Spring Mass Model ข้อมูลที่ให้มาคือ ค่าความเฉื่อยของกึ่งหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Inertia Constant ,H) ค่าคงที่สปริง (Spring Constant ,K) และในส่วนของ Modal Model จะให้ข้อมูลที่เกี่ยวกับค่าของการหน่วง (σ) ของแต่ละความถี่ (f) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากสมการที่ (3.56) จะเห็นว่าค่าที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์เรื่อง SSR คือค่าของ H (Inertia constant) , K (Spring constant) , D (Damping Coefficient) แต่ข้อมูลมีเพียงแค่ค่าของ H , K เท่านั้น

ในส่วนนี้จะแสดงวิธีการประมาณค่า D ในการวิเคราะห์ SSR ซึ่งวิธีการประมาณสามารถทำได้ดังนี้



รูปที่ ก.1 แบบจำลองของเพลาเชื่อมโยงระหว่างกึ่งหัน n ตัว

จากรูปที่ ก.1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของเพลาได้ดังนี้

$$J_i \ddot{\theta} + D_i \dot{\theta} + K_i \theta = T_i \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่

$$J = \text{inertia matrix} = 2H$$

$$D = \text{damping matrix}$$

$$K = \text{spring constant matrix}$$

ในสมการที่ (ก.1) จะใช้ค่า J มีหน่วยเป็น sec. และให้ K มีหน่วยเป็น pu./rad เพื่อให้ค่า D pu. เนื่องจากเรากำหนดค่าของความเร็วเชิงมุมให้เป็นหน่วย pu. แต่กำหนดหน่วยของมุมเป็น rad.

จากข้อมูลทั้ง 2 ส่วนที่ได้มาจากผู้ผลิต มีความสัมพันธ์กัน โดยความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ส่วนคือค่าการแปลง Q (Q Transformation) ซึ่งสามารถหาได้จาก Mode Shapes หรือค่าเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvectors) ของระบบจากสมการที่ (ก.1) ซึ่งในการหาค่า Q เราจะกำหนดให้ $D=0$

เราจะกำหนดให้ Q เป็นเมตริกซ์การแปลง และให้ δ เป็นตัวแปรใหม่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ θ ดังนี้

$$\begin{aligned}\theta &= Q\delta \\ \dot{\theta} &= Q\dot{\delta} \\ \ddot{\theta} &= Q\ddot{\delta}\end{aligned}\tag{ก.2}$$

แทนค่าสมการ (ก.2) ลงในสมการ (ก.1) จะได้

$$(Q^T J_i Q)\ddot{\delta} + (Q^T D_i Q)\dot{\delta} + (Q^T K_i Q)\delta = Q^T T_i\tag{ก.3}$$

หรือ

$$J_{mi}\ddot{\delta} + D_{mi}\dot{\delta} + K_{mi}\delta = T_{mi}\tag{ก.4}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}J_{mi} &= Q^T J_i Q = \text{Modal inertia matrix} \\ D_{mi} &= Q^T D_i Q = \text{Modal damping matrix} \\ K_{mi} &= Q^T K_i Q = \text{Modal spring constant matrix}\end{aligned}\tag{ก.5}$$

จากสมการที่ (ก.4) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูปทั่วไปที่มีสมการดังนี้

$$\ddot{\delta} + 2\sigma_i\dot{\delta} + \omega_i^2\delta = \frac{T_{mi}}{2H_{mi}}\tag{ก.6}$$

จะได้

$$\sigma_i = \frac{D_{mi}}{2J_{mi}} = \text{Modal Damping} \quad (2.61)$$

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K_{mi}}{J_{mi}}} = \text{Modal Natural Frequency} \quad (ก.7)$$

จากสมการที่ (ก.6) สามารถหาค่า Modal Damping ได้ดังนี้

$$D_{mi} = 2J_{mi}\sigma_i \quad (ก.8)$$

และจากสมการที่ (ก.7) สามารถหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความถี่ได้สมการดังนี้

$$\omega_i^2 = \frac{K_{mi}}{J_{mi}} ; K_{mi} = J_{mi}\omega_i^2 = \text{constant} \quad (ก.9)$$

$$dK_{mi} = d(J_{mi}\omega_i^2) = 0 ; \omega_i^2 dJ_{mi} + 2\omega_i J_{mi} d\omega_i = 0 \quad (ก.10)$$

จากสมการที่ (ก.10) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta J_{mi} = -2J_{mi} \frac{\Delta \omega_i}{\omega_i} = -2J_{mi} \frac{\Delta f_i}{f_i} \quad (ก.11)$$

ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถหาได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมหรือความถี่

ขั้นตอนในการประมาณค่าการหน่วงของกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบเป็นดังนี้

1. สร้างสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (ก.1) เพื่อหาค่าเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง Q จากค่า Eigen vectors และค่าความถี่ของระบบจากค่า Eigen values ซึ่งกำหนดให้ค่าการหน่วง $D_i = 0$

2. คำนวณค่า J_{mk} จาก J_k จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (ก.4)
3. คำนวณค่า ΔJ_{mk} จาก $\Delta \omega_k$ โดยใช้สมการที่ (ก.11) ในแต่ละรอบ
4. หาค่า ΔJ_k จากสมการความสัมพันธ์ (ก.4)
5. หาค่าใหม่ของ J_k คือ $J_{k(new)} = J_{k(old)} + \Delta J_k$
6. ทำการหาค่าเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง Q ใหม่จากค่า $J_{k(new)}$ โดยยังคงค่าการหน่วง $D=0$ และทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 1-5 จนกว่าค่า ΔJ_k จะเป็นที่ยอมรับได้
7. หาค่า J_{mk} จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (ก.4)
8. คำนวณหาค่าการหน่วงของก้านและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ D_{mi} ได้จากสมการที่ (ก.10) ซึ่งจะได้ค่าใน Modal Model
9. หาค่า D_i ที่อยู่ใน Spring-Mass Model จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (ก.4) ซึ่งจะได้ค่าประมาณของการหน่วงของระบบที่จะนำไปใช้งานต่อไป

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบดินทร์ โกศลพิศิษฐ์ เกิดวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2522 เป็นบุตรของ นายวิเชษฐ์ โกศลพิศิษฐ์ และ นางครุณี โกศลพิศิษฐ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมที่โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า เมื่อปี พ.ศ. 2539 และปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2543 จากนั้นได้เข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย