การควบคุมเชิงประสานของตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะเชิงเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง

นายชัยฤกษ์ จักรพัฒนจิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

COORDINATIVE CONTROLS OF POWER SYSTEM STABILIZERS AND FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM DEVICES FOR ENHANCING POWER SYSTEM STABILITY PERFORMANCE

Mr. Chairerg Jakpattanjit

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมเชิงประสานของตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะเชิงเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง
โดย	นายชัยฤกษ์ จักรพัฒนจิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

……………………………………………..คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……………………………………………..ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

…………………………………………… อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

…………………………………………….. กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี)

…………………………………………….. กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)

…………………………………………….. กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. อิสระชัย งามหรู)

ชัยฤกษ์ จักรพัฒนจิต : การควบคุมเชิงประสานของตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะเชิงเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง. (COORDINATIVE CONTROLS OF POWER SYSTEM STABILIZERS AND FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM DEVICES FOR ENHANCING POWER SYSTEM STABILITY PERFORMANCE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.แนบบุญ หุนเจริญ, 118 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการเพิ่มสมรรถนะให้กับเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยการออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานทั้งในส่วนเสถียรภาพชั่วครู่โดยอาศัยหลักการของฟังก์ชันพลังงานจากทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูโนฟ และส่วนเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความไวในการทำงานของฟังก์ชันควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่การสั่น โหมดการสั่นในระบบไฟฟ้าแบบเวลาจริงประมาณโดยใช้สมการสถานะของแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวงจรกรองคาล์มานเพื่อลดผลกระทบสัญญาณรบกวนจากการวัดและสามารถประมาณโหมดการสั่นระหว่างพื้นที่ได้อย่างถูกต้อง ระบบควบคุมเชิงประสานที่นำเสนอนี้ใช้เพียงข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวัดเฟสเซอร์ที่ติดตั้งสำหรับระบบเฝ้าสังเกตแบบบริเวณกว้าง

ทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอโดยอาศัยแบบจำลองระบบไฟฟ้าทดสอบแบบสองพื้นที่และระบบทดสอบ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับทั้งแบบขนานและแบบอนุกรม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการประมาณโหมดการสั่นด้วยวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำและสามารถนำไปใช้ประมาณค่าตามเวลาจริง ระบบควบคุมแบบประสานที่นำเสนอสามารถเพิ่มเสถียรภาพชั่วครู่และเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กได้โดยไม่ต้องปรับค่าพารามิเตอร์ในระบบควบคุมท้องถิ่นแม้ว่าจุดทำงานของระบบจะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเฝ้าสังเกตควบคุมและป้องกันระบบไฟฟ้าในบริเวณกว้างต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

ปีการศึกษา 2555

5071805021 : ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS : POWER SYSTEM STABILITY/ TRANSIENT STABILITY/ SMALL SIGNAL STABILITY/ COORDINATIVE CONTROL/ POWER SYSTEM STABILIZER/ FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM

CHAIRERG JAKPATTANAJIT : COORDINATIVE CONTROLS OF POWER SYSTEM STABILIZERS AND FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM DEVICES FOR ENHANCING POWER SYSTEM STABILITY PERFORMANCE. ADVISOR : ASSIST. PROF. NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 118 pp.

This research presents the scheme for enhancing stability performance of a power system through coordinative controls. The proposed control intends to improve both the transient stability using the energy function based on Lyapunov stability theory, and the small signal stability using functional sensitivity analysis. The modes of oscillation will be identified, in real-time, by the ARMA model with Kalman Filter technique to limit the effect of noise to the measured signal, and to accurately identify the inter-area modes of oscillation. The proposed scheme uses only measured data from the phase measurement units installed for the purpose of wide area monitoring system.

In order to investigate the performance of the proposed scheme, the simulations of the two-area test system and the IEEJ West 10-machine power system have been employed, where the series and shunt FACTS devices can be installed. The results show that the mode identification can be accurately obtained in real-time. The coordinative control scheme can improve the transient and small signal stability of the test systems with no need to adjust the local control parameters when the system operating condition is changing. Therefore, the proposed scheme could be suitably applied for the design of wide area monitoring, protection, and control of a future power system.

Department : Electrical Engineering Student's Signature ____________

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature ____________

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับความช่วยเหลือและแรงกระตุ้นอย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. บันฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี ศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย และ รองศาสตราจารย์ ดร. อิสระชัย งามหรู ที่ได้เสียสละเวลา ตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติยุทธ กวีญาณ ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนตลอดมา

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ในความร่วมมือกับ ASEAN University Network / Southeast Asia Engineering Education Development Network (AUN/SEED-Net) ที่กรุณาให้ทุนการศึกษาและทุนวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัว พี่น้อง ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคนที่ช่วยสนับสนุนและอยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฌ
สารบัญรูป.....ญ
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ปัญหาและความสำคัญ.....1
1.2 วัตถุประสงค์.....2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....3
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....3
1.5 ประโยชน์ของงานวิจัย.....4
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์.....4
บทที่ 2 ปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง.....6
2.1 ปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง.....6
2.1.1 การแบ่งประเภทปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง.....6
2.1.2 ตัวอย่างปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง.....8
2.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้าสำหรับการศึกษาเสถียรภาพ.....9
2.2.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....10
2.2.2 แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้า.....16
2.2.3 แบบจำลองโหลด.....16
2.2.4 แบบจำลองอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ.....17
บทที่ 3 เสถียรภาพชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....22
3.1 ปัญหาและแนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....22
3.2 ทฤษฎีของเลียปูโนฟและฟังก์ชันพลังงาน.....23
3.2.1 ทฤษฎีของเลียปูโนฟ.....23
3.2.2 ฟังก์ชันพลังงานของระบบไฟฟ้ากำลังตามทฤษฎีของเลียปูโนฟ.....29
บทที่ 4 เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กในระบบไฟฟ้ากำลัง.....35
4.1 ปัญหาและแนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก.....35

หน้า

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงสัญญาณขนาดเล็กในระบบไฟฟ้าด้วยวิธีเชิงโหมด...... 36
4.2.1 สมการการวิเคราะห์เชิงโหมด 36
4.2.2 การคำนวณโหมดการแกว่ง 37
4.2.3 เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ 38
4.2.4 ค่าปัจจัยร่วม........ 39
4.2.5 การวัดความสามารถในการควบคุมได้และการสังเกตได้........ 39
4.3 การระบุโหมดการสั่นด้วยวิธีประมาณสมการสถานะ 40
4.4 การระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด........ 41
4.5 การวิเคราะห์ความไวของโหมด........ 49
บทที่ 5 การออกแบบระบบควบคุมเชิงประสาน........ 56
5.1 การออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานเพื่อเพิ่มเสถียรภาพชั่วครู่และเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก 56
5.2 การปรับปรุงเสถียรภาพชั่วครู่ด้วยฟังก์ชันพลังงานสำหรับอุปกรณ์ควบคุม 61
5.2.1 การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีอุปกรณ์ควบคุมแบบขนาน........ 61
5.2.2 การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรม 66
5.3 การระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน........ 72
5.4 การปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กด้วยค่าความไวเชิงฟังก์ชัน 76
บทที่ 6 การทดสอบสมรรถนะ 85
6.1 ผลการศึกษาการระบุโหมดการสั่นในระบบไฟฟ้า 85
6.2 ผลการศึกษาสมรรถนะการควบคุมเชิงประสาน........ 90
6.2.1 การทดสอบในระบบทดสอบแบบสองพื้นที่........ 92
6.2.2 การทดสอบในระบบทดสอบ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น 101
บทที่ 7 บทสรุป........ 112
7.1 สรุปผล........ 112
7.2 ข้อเสนอแนะ 113
รายการอ้างอิง 114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์........118

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 6.1 การเปลี่ยนแปลงจุดทำงานของระบบทดสอบและค่าการวิเคราะห์เชิงโหมด........... 87

ตารางที่ 6.2 ประสิทธิภาพของวิธีการระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด 88

ตารางที่ 6.3 ประสิทธิภาพของการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน .. 89

ตารางที่ 6.4 สภาวการณ์ทำงานของระบบทดสอบ 94

ตารางที่ 6.5 ตัวแปรควบคุมที่ใช้สำหรับวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม 95

ตารางที่ 6.6 ค่าโหมดการแกว่งหลังจากเกิดการลัดวงจรในระบบทดสอบ 96

ตารางที่ 6.7 ตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 103

ตารางที่ 6.8 พารามิเตอร์ของสายส่งและหม้อแปลง.. 103

ตารางที่ 6.9 สภาวะการทำงานของระบบทดสอบ.. 104

ตารางที่ 6.10 สภาวะการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 104

ตารางที่ 6.11 ตัวแปรในตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการปรับค่าอย่างเหมาะสม 105

ตารางที่ 6.12 ตัวแปรในตัวควบคุมการลดการแกว่งสำหรับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตที่มีการปรับค่าอย่างเหมาะสม.. 105

ตารางที่ 6.13 เวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่อง เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบชั่วคราวแบบ 3 เฟสลงดิน.. 106

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง 7
รูปที่ 2.2 แบบจำลองอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง.. 10
รูปที่ 2.3 แผนภาพแบบจำลองพลวัต4สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 12
รูปที่ 2.4 ระบบกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของ IEEE แบบ AC4A 13
รูปที่ 2.5 ตัวตรวจวัดแรงดันและกระแสที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 14
รูปที่ 2.6 ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด PSS1A แบบสัญญาณขาเข้าเดียว 14
รูปที่ 2.7 ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PSS2B ที่มีสัญญาณขาเข้า 2 ชุด........... 15
รูปที่ 2.8 แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 15
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ 17
รูปที่ 2.10 แผนภาพของแบบจำลองชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว 17
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต 18
รูปที่ 2.12 แบบจำลองอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต 18
รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม 19
รูปที่ 2.14 แบบจำลองอุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม 19
รูปที่ 2.15 แผนภาพวงจรสมมูลของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต 20
รูปที่ 2.16 แผนภาพการควบคุมมุมการทำงานของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต.......... 20
รูปที่ 2.17 แผนภาพการควบคุมอัตราส่วนการมอดูเลตของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัส
แบบสถิต.. 21
รูปที่ 2.18 ตัวควบคุมการลดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังของอุปกรณ์ควบคุม 21
รูปที่ 3.1 แนวความคิดเสถียรภาพของเลียปูโนฟ.. 24
รูปที่ 3.2 ทิศทางการเปลี่ยนแปลงและลำดับขั้นพลังงานของระบบ 27
รูปที่ 4.1 แผนภาพการควบคุมแบบป้อนกลับ 53
รูปที่ 4.2 การเลื่อนโหมดเพื่อปรับการโหมดการแกว่งที่มีค่าการหน่วงต่ำ 53
รูปที่ 5.1 แผนภาพส่วนควบคุมศูนย์กลางสำหรับปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง 59
รูปที่ 5.2 แผนภาพวิธีการควบคุมเชิงประสานเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง....... 60
รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลเมื่ออุปกรณ์ควบคุมแบบขนานต่อในระบบ.. 61
รูปที่ 5.4 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านการปรับ $G_{sh}(t)$ 64
รูปที่ 5.5 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านการปรับ $B_{sh}(t)$ 65
รูปที่ 5.6 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านการปรับแรงดันอ้างอิง 66

หน้า

รูปที่ 5.7 วงจรสมมูลเมื่ออุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมต่อในระบบ... 67
รูปที่ 5.8 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมผ่านการปรับ $X_C(t)$......................... 71
รูปที่ 5.9 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมผ่านการปรับกระแสอ้างอิง 71
รูปที่ 5.10 แผนภาพขั้นตอนการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและ
ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน....... 76
รูปที่ 5.11 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการควบคุมด้วยระบบกระตุ้นและติดตั้งตัว
สร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง 77
รูปที่ 5.12 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบกระตุ้น... 79
รูปที่ 5.13 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวสร้างเสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 80
รูปที่ 6.1 แผนภาพระบบทดสอบแบบสองพื้นที่สำหรับการระบุโหมดการสั่น............................. 85
รูปที่ 6.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการทดสอบสมรรถนะการระบุโหมดการสั่น......................... 86
รูปที่ 6.3 ค่าการหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นระหว่างพื้นที่สำหรับการคำนวณวิธีการ
ระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลัง
สองน้อยที่สุด.. 89
รูปที่ 6.4 ค่าการหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นระหว่างพื้นที่สำหรับการคำนวณวิธี การ
ระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดย
ประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน.................................... 90
รูปที่ 6.5 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมเชิงประสาน.. 91
รูปที่ 6.6 ระบบทดสอบแบบสองพื้นที่ที่ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต 93
รูปที่ 6.7 แผนผังตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 95
รูปที่ 6.8 แผนผังตัวควบคุมการลดการแกว่งสำหรับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต 95
รูปที่ 6.9 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 1... 97
รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 1... 97
รูปที่ 6.11 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 1 98
รูปที่ 6.12 กำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 ในกรณีศึกษาที่1 98
รูปที่ 6.13 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 2... 98
รูปที่ 6.14 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 2... 99
รูปที่ 6.15 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 2 99
รูปที่ 6.16 กำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 ในกรณีศึกษาที่ 2 99
รูปที่ 6.17 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 3.. 100

หน้า

รูปที่ 6.18 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 3 100
รูปที่ 6.19 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 3 100
รูปที่ 6.20 กำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 ในกรณีศึกษาที่3 101
รูปที่ 6.21 ระบบทดสอบ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น 102
รูปที่ 6.22 แผนภาพตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบ 102
รูปที่ 6.23 แผนภาพชุดควบคุมการหน่วงของอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบ 102
รูปที่ 6.24 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 1 107
รูปที่ 6.25 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 2 107
รูปที่ 6.26 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 3 108
รูปที่ 6.27 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 4 108
รูปที่ 6.28 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 1 108
รูปที่ 6.29 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 2 109
รูปที่ 6.30 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 3 109
รูปที่ 6.31 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 4 109
รูปที่ 6.32 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 1 110
รูปที่ 6.33 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 2 110
รูปที่ 6.34 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 3 110

หน้า

รูปที่ 6.35 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 4 111

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน ปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่น ความต้องการใช้ไฟฟ้าในทวีปอเมริกาเหนือมีปริมาณเพิ่มขึ้น 2 เท่าในทุกๆ 10 ปี ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องมีการเพิ่มกำลังผลิตและความสามารถในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในระบบส่งให้มากขึ้น และระบบส่งไฟฟ้าเกิดการเชื่อมโยงที่ซับซ้อน เมื่อระบบไฟฟ้าทำงานใกล้จุดวิกฤตทางเสถียรภาพ ทำให้การควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ามีความสำคัญ จึงจำเป็นจะต้องมีการติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer, PSS) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและใช้อุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับหรืออุปกรณ์แฟคทส์ ในงานวิจัยนี้เรียกว่า อุปกรณ์ควบคุม (Flexible AC Transmission System, FACTS) ในระบบส่งไฟฟ้าช่วยในการลดการแกว่งระบบไฟฟ้ากำลัง(Power Oscillation Damping, POD) นอกจากนี้มีการใช้สายส่งแรงดันสูงกระแสตรง (HVDC) ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ลดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power Swing Damping, PSD) เพื่อเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าหลายพื้นที่เข้าหากัน อุปกรณ์เหล่านี้มีชุดควบคุมที่สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจากการถูกรบกวน เช่น การลัดวงจร การเพิ่มหรือลดโหลดในระบบไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว การปลดออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างกะทันหัน

ในอดีตการออกแบบเพื่อปรับค่าของชุดควบคุมมีการพิจารณาแยกอิสระจากกัน และสามารถทำงานได้ดีที่สุดในบางสภาวะการทำงานของการจ่ายโหลดและการรบกวนในระบบไฟฟ้าเท่านั้น เมื่อระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจุดทำงาน ชุดควบคุมต่างๆเหล่านั้นอาจจะไม่สามารถทำงานได้ดีที่สุด หรืออาจทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสูญเสียไปได้

นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาการออกแบบพารามิเตอร์ในตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้กับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนมาก โดยอ้างอิงจากการวิเคราะห์ค่าเจาะจง (Eigenvalue analysis) (Kundur, 1994) เพื่อให้สามารถเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ในหลายสภาพการทำงานโดยใช้โดยใช้ทฤษฎีควบคุมแบบคงทน(Robust control theorem) (Rao และ Sen, 2000) และมีการศึกษาถึงการออกแบบการควบคุมเชิงประสานกันของอุปกรณ์ควบคุม เช่น อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต (Static Var Compensators, SVCs) และ อุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม (Thyristor Controlled Series Capacitors, TCSCs) โดยปรับปรุงตัวควบคุมเพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดของสายส่ง (Available Transfer Capacity, ATC) และเพิ่มเสถียรภาพในระบบ (Mohan และ Varma, 2002) ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การที่ระบบมีการติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุม จำนวน

มากในระบบโดยไม่มีการออกแบบการควบคุมเชิงประสานกันที่ดีพอ (Nelson และ Leonard, 1990) ไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพที่ดีขึ้นได้ในทุกสภาพการจ่ายโหลดและการรบกวน รวมถึงมีการติดตั้งชุดควบคุมที่มากเกินความจำเป็นในระบบ ซึ่งทำให้เกิดความสิ้นเปลืองและเพิ่มความยุ่งยากในการออกแบบระบบควบคุม โดยเมื่อระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม รวมทั้งสภาวะการจ่ายโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ระบบควบคุมของอุปกรณ์ต่างๆทุกตัวต้องมีการปรับเปลี่ยนเพื่อให้เหมาะสมกับระบบที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในทางปฏิบัติอาจทำได้ไม่สะดวก

วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวคิดที่จะพัฒนาระบบควบคุมเชิงประสานซึ่งสามารถส่งสัญญาณจากชุดควบคุมเชิงประสาน เพื่อเสริมการควบคุมให้ชุดควบคุมท้องถิ่นในระบบไฟฟ้า (Local controller) ได้แก่ ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุม ที่มีผลต่อสมรรถนะเชิงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ณ จุดทำงานและการรบกวนนั้นๆ พร้อมทั้งนำเสนอขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการปรับตั้งระบบควบคุมเชิงประสานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้สามารถเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในหลายสภาพการทำงานและการรบกวนได้ รวมถึงสามารถลดชุดควบคุมท้องถิ่นที่ไม่มีความจำเป็นในการช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ ลดการสูญเสียโอกาสในการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสำรองกำลังการผลิตไว้มากเกินความจำเป็น เพื่อรักษาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า และลดปริมาณการสำรองความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (Capacity benefit margin) เพื่อรักษาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อกำหนดตัวชี้วัดที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพจากการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อใช้ในระบบควบคุมเชิงประสาน
2. เพื่อพัฒนาโครงสร้างระบบการควบคุมเชิงประสานสำหรับ ตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังและชุดควบคุมของอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเสริมสร้างสมรรถนะเชิงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า อันเนื่องมาจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ
3. เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการปรับตั้งตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมเชิงประสานเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในหลายสภาวะการทำงานและการรบกวน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาปัญหา สาเหตุ และการวิเคราะห์เหตุการณ์รบกวน ในระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ
2. ศึกษาพฤติกรรมของตัวชี้วัดระบบและกำหนดตัวชี้วัดที่เหมาะสม สำหรับวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพจากการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อใช้ในการควบคุมเชิงประสาน
3. ทดสอบระบบควบคุมเชิงประสานที่ใช้ตัวชี้วัดที่เหมาะสม สำหรับตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ ในระบบอย่างง่ายและระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นในหลายสภาวะการทำงานและการรบกวน เปรียบเทียบกับระบบที่มีการควบคุมแบบกระจายโดยไม่มีการประสานกันในการออกแบบ
4. เหตุการณ์ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ การเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงการจ่ายโหลดในระบบไฟฟ้า และการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบอย่างกะทันหัน เพื่อทดสอบสมรรถนะของการควบคุมเชิงประสาน
5. อุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับที่พิจารณา คือ อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต และ อุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ได้ถูกเลือกตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมแล้ว

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาปัญหา สาเหตุ และปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังทั่วไป
2. ศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพจากการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังและตัวชี้วัดเสถียรภาพแบบต่าง ๆ
3. ศึกษาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการติดตั้ง ระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ
4. ศึกษาแบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต และ อุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่มีการติดตั้ง ตัวควบคุมการลดการแกว่งระบบไฟฟ้ากำลัง
5. สร้างแบบจำลองอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต แบบจำลองของอุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม

6. วิเคราะห์ผลต่อเสถียรภาพของแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง ในหลายสภาวะการทำงานและการรบกวนแบบต่างๆ

7. พัฒนาโครงสร้างและแนวคิดการควบคุมเชิงประสาน สำหรับระบบที่มีตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต และอุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรมในระบบส่งไฟฟ้า

8. วิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่มีการติดตั้งระบบควบคุมเชิงประสานต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ในหลายสภาวะการทำงานและการรบกวนแบบต่างๆ โดยอาศัยแบบจำลองของระบบสองพื้นที่และระบบภาคใต้ของประเทศไทย

9. พัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการปรับตั้งตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมเชิงประสานเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในหลายสภาวะการทำงานและการรบกวน

10. ทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเชิงประสานที่ได้ปรับตั้งตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมในแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังในหลายสภาวะการทำงานและการรบกวน

11. วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ของงานวิจัย

1. สามารถเสริมสร้างสมรรถนะเชิงเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า ด้วยการควบคุมเชิงประสานที่สามารถนำมาใช้กับ ตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ

2. ลดความซ้ำซ้อนในการใช้งานระบบควบคุมท้องถิ่นและโอกาสที่ระบบควบคุมที่ไม่ได้ประสานการทำงานจะส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบโดยรวม

3. เพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าและการตรวจวัดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าผ่านตัวชี้วัดสำหรับวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าตามเวลาจริง

4. ลดความสูญเสียในการผลิตไฟฟ้าจากการเตรียมไว้สำหรับรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้า

1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 2 เสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง: กล่าวถึง งานวิจัยที่ศึกษาปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังและวิธีการแก้ไข แบบจำลองต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเสถียรภาพ

บทที่ 3 เสถียรภาพชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง: กล่าวถึง ปัญหาและแนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ทฤษฎีของเลียปูโนฟและฟังก์ชันพลังงานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 4 เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กในระบบไฟฟ้ากำลัง: กล่าวถึง ปัญหาและแนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก วิธีการในการประเมินโหมดการสั่น และการวิเคราะห์ความไว

บทที่ 5 การออกแบบระบบควบคุมเชิงประสาน: กล่าวถึง ขั้นตอนวิธีในการออกแบบระบบควบคุมแบบรวมศูนย์เพื่อเพิ่มสมรรถนะเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กและเสถียรภาพชั่วครู่

บทที่ 6 การทดสอบสมรรถนะ: กล่าวถึง ผลและการวิเคราะห์การนำการควบคุมเชิงประสานและการระบุโหมดการสั่นที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบความสามารถในระบบไฟฟ้ากำลัง 2 ระบบ ประกอบด้วย ระบบทดสอบแบบสองพื้นที่และระบบทดสอบ10เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น

บทที่ 7 บทสรุป: สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงนิยามและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง รวมถึงการแบ่งประเภทของการเกิดปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง และแบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 ปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

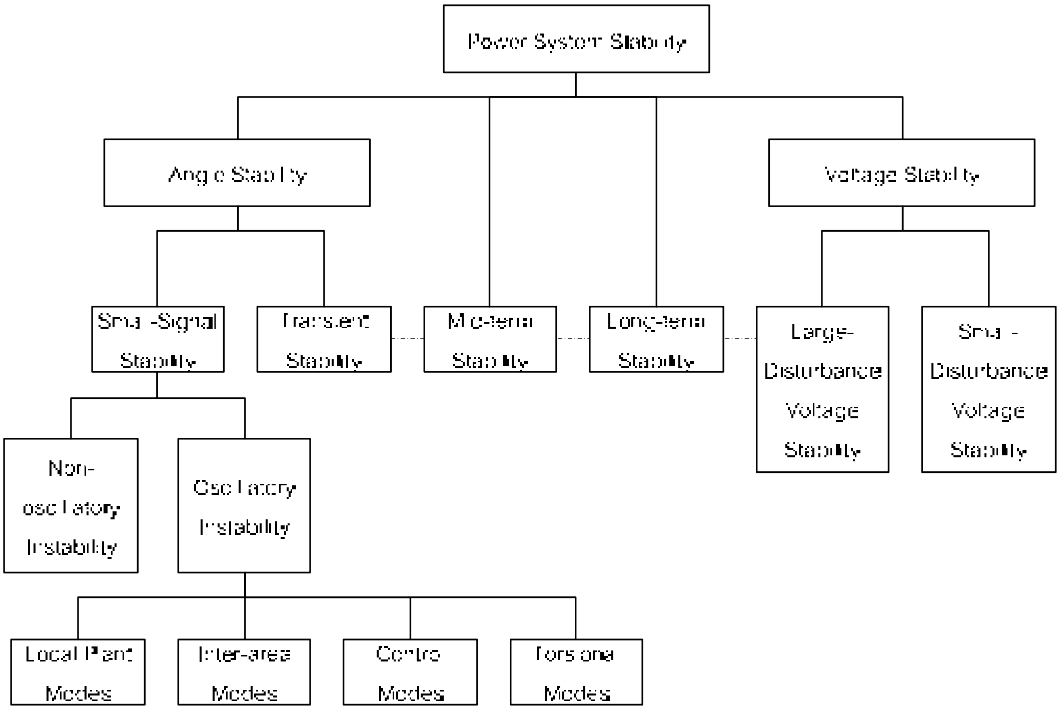
2.1.1 การแบ่งประเภทปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

ปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งประเภทได้ตามรูปที่ 2.1 (Kundur, 1994) โดยเสถียรภาพเชิงมุม (Angle stability) เป็นปัญหาเสถียรภาพที่เกี่ยวกับความสามารถในการรักษาภาวะซิงโครไนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งจะแสดงออกทางการแกว่งและการเปลี่ยนแปลงมุมโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนแล้วมุมโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่ได้ ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถปรับปรุงเสถียรภาพเชิงมุมได้ เช่น การติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง(Power System Stabilizer, PSS)ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือติดตั้งตัวควบคุมการลดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power Oscillation Damping, POD)ในอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับหรืออุปกรณ์ควบคุม (Flexible AC Transmission System, FACTS)

ปัญหาเสถียรภาพเชิงมุม แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ปัญหาเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (Small-signal stability) และ เสถียรภาพชั่วครู่ (Transient stability)

ปัญหาเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก เกิดจากการรบกวนขนาดเล็ก เช่น การเปลี่ยนแปลงโหลด หรือการเปลี่ยนแปลงการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งทำให้มุมโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีการแกว่งและแบบที่มีการแกว่ง โดยการแกว่งที่เกิดขึ้นแบ่งได้ ดังนี้ 1) โหมดการสั่นแบบท้องถิ่น (Local mode) เป็นการแกว่งของสัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดในบริเวณขนาดเล็กหรือภายในกลุ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กัน 2) โหมดการสั่นแบบระหว่างพื้นที่ (Inter-area mode) เป็นการแกว่งของสัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดระหว่างกลุ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันด้วยสายส่งไฟฟ้าที่มีความอ่อนแอ 3) โหมดการสั่นแบบควบคุม (Control mode) เป็นการแกว่งของไฟฟ้ากำลังที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ควบคุมอื่นๆในระบบที่มีการปรับตั้งระบบควบคุมไม่ดีพอ 4) โหมดการสั่นแบบเชิงแรงบิด

(Torsional mode) เป็นการแกว่งของไฟฟ้ากำลังที่เกิดในกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีผลมาจากเรโซแนนซ์กับระบบส่งไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

ปัญหาเสถียรภาพชั่วครู่ เกิดจาก การรบกวนชั่วครู่ในระบบ เช่น การลัดวงจร โดยหลังจากการรบกวนที่เกิดขึ้นทำให้มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากจุดทำงานเดิม ซึ่งถ้ามุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถกลับเข้าสู่จุดสมดุลใหม่ได้จะทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพ

สำหรับเสถียรภาพเชิงแรงดัน (Voltage stability) เป็นปัญหาเสถียรภาพที่เกี่ยวกับความสามารถในการรักษาแรงดันที่บัสต่างๆในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับสมดุลในการผลิตและการใช้กำลังรีแอกทีฟในระบบไฟฟ้า เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนหรือโหลดในระบบมีการเปลี่ยนแปลง แล้วแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆในระบบไม่สามารถถูกควบคุมให้กลับสู่ภาวะปกติได้จนทำให้แรงดันลดลง จนเกิดสภาวะที่เรียกว่าการล้มเหลวทางแรงดัน (Voltage collapse) ซึ่งสามารถปรับปรุงเสถียรภาพเชิงแรงดันได้จากการรักษาสมดุลกำลังรีแอกทีฟในระบบไฟฟ้า เช่น การควบคุมการผลิตกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมในระบบส่งไฟฟ้า

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งช่วงเวลาตามปรากฏการณ์ที่เกิดในระบบไฟฟ้าได้ ดังนี้ 1) ช่วงระยะเวลาสั้นหรือช่วงชั่วครู่ (Transient) เหตุการณ์เกิดในช่วงน้อยกว่า 10 วินาที 2) ช่วงระยะเวลาปานกลาง (Mid-term) เหตุการณ์เกิดในช่วง 10 วินาที ถึง 2-3 นาที 3) ช่วงระยะเวลานาน (Long-term) เหตุการณ์เกิดในช่วง 2-3 นาที ถึง 10 นาที

ในการศึกษาการควบคุมเชิงประสานที่นำเสนอ จะสนใจเฉพาะการเพิ่มสมรรถนะเสถียรภาพเชิงมุม สำหรับปัญหาเสถียรภาพชั่วครู่และเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก โดยมุ่งที่จะเพิ่มการหน่วงให้กับโหมดการสั่นแบบท้องถิ่นและโหมดการสั่นแบบระหว่างพื้นที่ ซึ่งเกิดขึ้นจากการรบกวนในระบบไฟฟ้า ได้แก่ การเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงการจ่ายโหลดในระบบไฟฟ้า และการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบอย่างกะทันหัน

2.1.2 ตัวอย่างปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

ความต้องการพลังงานไฟฟ้าในอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัยมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนและใหญ่ขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น โหลดในระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น และระบบสายส่งไฟฟ้ามีการเชื่อมโยงกันอย่างซับซ้อนโดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าจำนวนมากจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปสู่โหลดที่อยู่ห่างไกลกัน การออกแบบและควบคุมระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนเป็นสิ่งที่ท้าทายต่อวิศวกรและผู้ควบคุม เพราะต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ในการออกแบบระบบควบคุมที่ต้องทำงานอย่างรวดเร็วเพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีความมั่นคงและมีเสถียรภาพในการทำงานอย่างต่อเนื่อง

ระบบไฟฟ้ากำลังต้องการความมั่นคงและเสถียรภาพ เพื่อให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปโหลดในระบบไฟฟ้าต้องการแรงดันและความถี่ที่คงที่ในการใช้งาน เช่น โหลดประเภทมอเตอร์เมื่อแรงดันตก 10-15% หรือความถี่ในระบบเปลี่ยนแปลง 2-3 เฮิรตซ์ ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถทำงานและเกิดความเสียหายได้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างต่อเนื่องในทุกสภาวะการเปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้า เป็นสิ่งแรกที่มีผลต่อความมั่นคงในระบบไฟฟ้า ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูญเสียการซิงโครไนซ์ออกจากระบบ ส่งผลให้แรงดันและกระแสในระบบสายส่งไฟฟ้ามีการสั่นและเปลี่ยนแปลง อาจส่งผลให้รีเลย์ป้องกันสายส่งสั่งปลดสายส่งออกจากระบบ ทำให้ไม่มีกำลังไฟฟ้าส่งไปยังโหลดและเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง

สายส่งไฟฟ้ากำลังทำหน้าที่ส่งกำลังไฟฟ้าจำนวนมากจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลด ถ้าระบบไฟฟ้าถูกรบกวน เช่น การลัดวงจร สายส่งขาดหรือปลดวงจร ทำให้การไหลของ

กำลังไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้แรงดันและความถี่ในระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังได้

ในภาวะปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างต่อเนื่อง และรักษาแรงดัน ความถี่ในระบบไฟฟ้าได้ตามต้องการ ซึ่งเป็นจุดสมดุลที่ระบบมีความมั่นคง เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนด้วยการเปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้า เช่น การลัดวงจร การปลดสายส่งไฟฟ้า การสูญเสียซิงโครไนซ์และปลดออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของโหลดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้จุดการทำงานของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากจุดสมดุลเดิม การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้แรงดัน ความถี่ การไหลของกำลังไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงด้วย เกิดผลกระทบต่อสภาวะการทำงานของเครื่องกำเนิดฟ้าในระบบด้วย ถ้าการเปลี่ยนแปลงข้างต้นยังสามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากลับเข้าสู่สมดุลใหม่ได้อีก แสดงว่าระบบยังมีเสถียรภาพ (Stable) แต่ถ้าระบบไฟฟ้าไม่สามารถเข้าสู่สมดุลใหม่ได้นั่นคือระบบสูญเสียเสถียรภาพ (Unstable)

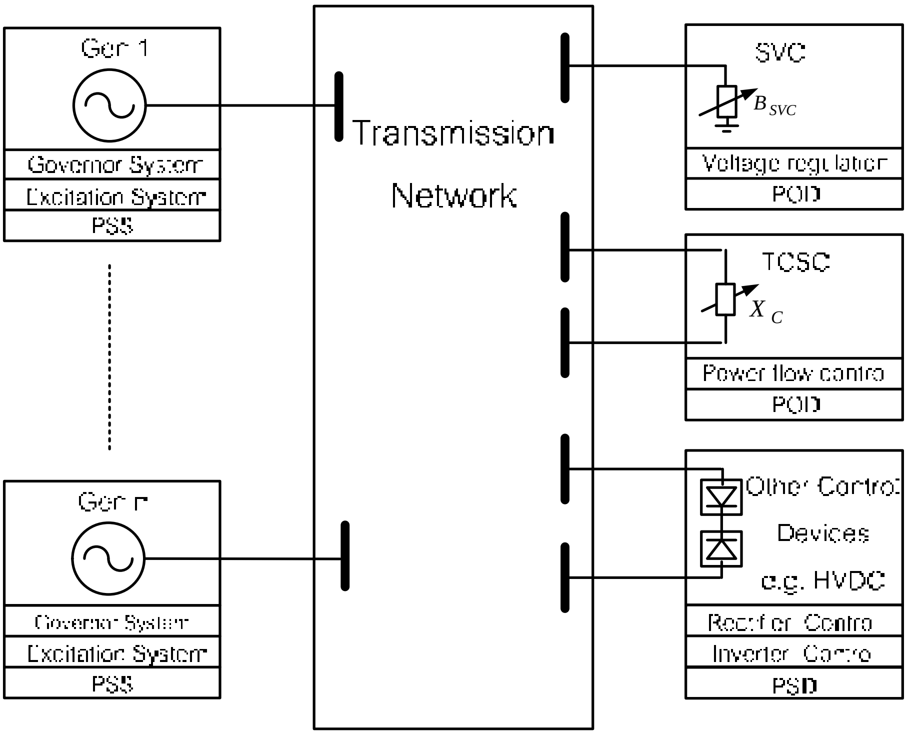
สำหรับในสายส่งไฟฟ้าใดๆ เมื่อระบบถูกรบกวนและเปลี่ยนจุดทำงานของระบบ จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงและมีการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้ากำลังไฟฟ้าที่แกว่งนี้มีค่ามากเกินขีดจำกัดของสายส่ง รีเลย์ที่ป้องกันสายส่งนั้นอาจสั่งปลดสายส่งออกจากระบบได้ ซึ่งเป็นปัญหาทางด้านความมั่นคงของสายเชื่อมโยง (Tie-line stability)

คำจำกัดความของเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า กล่าวคือ ถ้าการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วครู่ที่เกิดจากสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้าสามารถถูกหน่วงลง และเข้าสู่จุดทำงานที่มั่นคงใหม่ได้ในช่วงเวลาที่จำกัด จะเรียกว่าระบบมีเสถียรภาพ ถ้าระบบไม่มั่นคงจะเรียกว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ (Anderson และ Fouad, 2003)

2.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้าสำหรับการศึกษาเสถียรภาพ

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในเชิงพลวัตนั้นจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมในการทำงานและการตอบสนองของอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลัง แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากหากแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษามีความสอดคล้องกับการทำงานจริงของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบแล้ว ผลจากการทดสอบที่ได้ก็จะสอดคล้องกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองเชิงพลวัตของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง อาทิ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้า ภาระโหลดในระบบ อุปกรณ์ควบคุม รวมถึงอุปกรณ์ที่สามารถปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ ตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวควบคุมการลดการแกว่งระบบไฟฟ้ากำลังของอุปกรณ์ควบคุม

ซึ่งสามารถนำไปศึกษาและสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Ong, 1998) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบจำลองอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.2.1.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator model) ที่ศึกษาเป็นชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยสมการที่นิยมใช้ในการศึกษาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้าเป็นแบบจำลองพลวัต4 สถานะ (4-State dynamical model) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการสถานะใน 2 ส่วน คือ สมการสถานะในส่วนของขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสมการสถานะแสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสมการในส่วนแรกแสดงดังนี้

$$\dot{E}_q^{'} = \frac{1}{T_{do}^{'}}(-E_q^{'} - (X_d - X_d^{'})I_d + E_{fd}) \qquad 2\text{-}1$$

$$\dot{E}_d^{'} = \frac{1}{T_{qo}^{'}}(-E_d^{'} + (X_q - X_q^{'})I_q) \qquad 2\text{-}2$$

ค่า E_{fd} ในสมการที่ 2-1สามารถหาได้จาก

$$E_{fd} = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} e_{fd} \tag{2-3}$$

โดยที่

$E_d^{'}, E_q^{'}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าภายในแกน d และแกน q
I_d, I_q	คือ	กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์แกน d และแกน q
e_{fd}	คือ	แรงเคลื่อนไฟฟ้าสนาม
X_d, X_q	คือ	รีแอกแตนซ์ซิงโครนัส (Synchronous reactance) ในแกน d และแกน q
$X_d^{'}, X_q^{'}$	คือ	รีแอกแตนซ์ชั่วครู่ (Transient reactance) ในแกน d และแกน q
$T_{do}^{'}, T_{qo}^{'}$	คือ	ค่าคงตัวเวลาขณะเปิดวงจรที่ภาวะชั่วครู่ (Transient open-circuit time constant) ในแกน d และแกน q
L_{ad}	คือ	ตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual-inductance) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ในแกน d
R_{fd}	คือ	ความต้านทานบนขดลวดสนามในแกน d

สมการสถานะแสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังสมการ

$$\dot{\delta} = \omega_{base} \Delta\omega_r \tag{2-4}$$

$$\Delta\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H}(T_{mech} - T_{em} - D\Delta\omega_r) \tag{2-5}$$

โดยมีสมการแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้

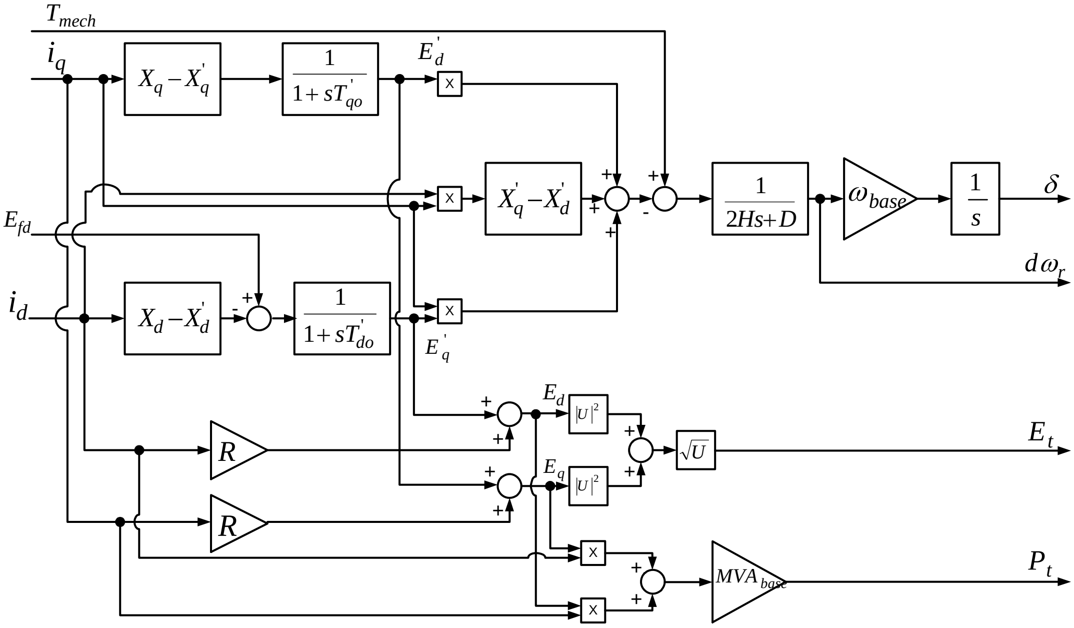
$$T_{em} = E_q^{'} i_q + E_q^{'} i_q + (X_q^{'} - X_d^{'}) i_d i_q \tag{2-6}$$

โดยที่

δ	คือ	มุมของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\Delta\omega_r$	คือ	การเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ω_{base}	คือ	ค่าฐานของความเร็วโรเตอร์
H	คือ	ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
T_{mech}	คือ	แรงบิดทางกล
T_{em}	คือ	แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า
D	คือ	ค่าคงที่การหน่วงการแกว่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากสมการที่ 2-1 ถึง 2-6 สามารถสร้างแบบจำลองพลวัต4สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้ศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ยังมีแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย (Classical model) ที่สร้างจากสมการสถานะของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสมการที่ 2-4 และ 2-5 โดยละเลยผลของรีแอกแตนซ์ชั่วครู่ และแบบจำลองพลวัต6สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (6-State dynamical model) ที่เพิ่มเติมผลการตอบสนองจากรีแอกแตนซ์ชั่วแวบ (Sub-transient reactance) และขดลวดหน่วง (Damper winding)



รูปที่ 2.3 แผนภาพแบบจำลองพลวัต4สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.2.1.2 ระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Excitation system) ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและควบคุมการจ่ายกำลังรีแอกทีฟ ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าโดยทำการควบคุมไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองที่

ใช้ศึกษาสามารถศึกษาได้จาก (IEEE Std 421.5-2005 Energy Development and Power Generaton Commitee, 2006)

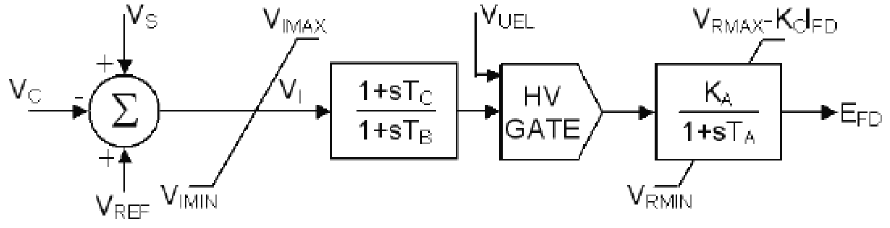
แบบจำลองระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่ายที่ใช้ในการศึกษาเป็นของ IEEE แบบAC4A ที่จำลองระบบกระตุ้นที่ทำงานด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการตอบสนองเร็ว ที่ประกอบด้วยสมการวงจรชดเชยเฟส มีค่าคงตัวเวลา T_C และ T_B อนุกรมกับสมการกำลังหนึ่ง โดย K_A แทนกำลังขยายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและ T_A แทนค่าคงตัวเวลาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีสมการดังนี้

$$E_{FD} = \frac{(1+sT_C)}{(1+sT_B)}\frac{K_A}{(1+sT_A)}(V_{REF} - V_C + V_S) \qquad 2\text{-}7$$

$$E_{FD\min} \le E_{FD} \le E_{FD_{\max}}$$

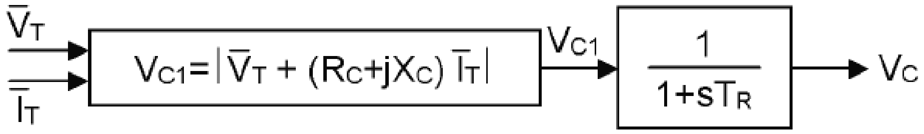
โดยที่

E_{FD}	คือ	แรงเคลื่อนไฟฟ้าสนาม
$E_{FD_{\min}}, E_{FD_{\max}}$	คือ	ขอบเขตล่างและขอบเขตบนแรงเคลื่อนไฟฟ้าสนาม
V_{REF}	คือ	ขนาดแรงดันขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิง
V_C	คือ	ขนาดแรงดันขาเข้าระบบกระตุ้นที่วัดได้
V_S	คือ	ขนาดแรงดันขาออกของตัวเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) ให้กับระบบ



รูปที่ 2.4 ระบบกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของ IEEE แบบ AC4A

โดยที่ขนาดแรงดันขาเข้าระบบกระตุ้นที่วัดได้ (V_C) ได้มาจากตัวตรวจวัดแรงดัน ($\overline{V}_T$) และกระแส ($\bar{I}_T$) ที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า T_R แทนค่าคงตัวเวลาของตัวตรวจวัด R_C, X_C แทนค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ที่ใช้ในการชดเชยในการจ่ายโหลด (Load compensation) แผนภาพตัวตรวจวัดแรงดันและกระแสที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงใน รูปที่ 2.5



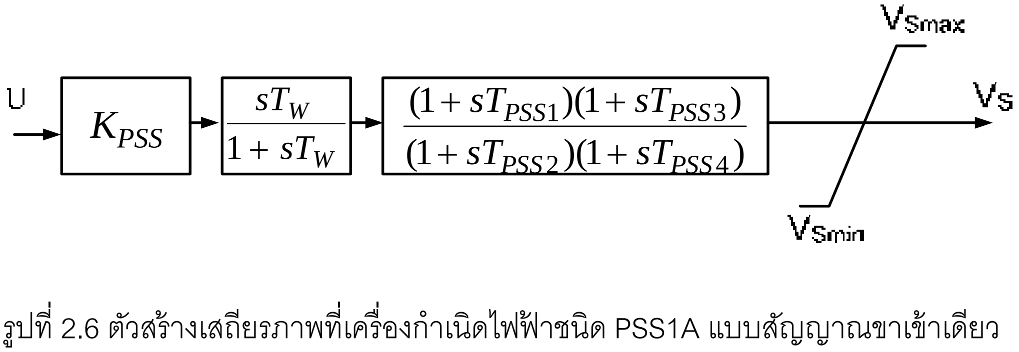
รูปที่ 2.5 ตัวตรวจวัดแรงดันและกระแสที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.2.1.3 ตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

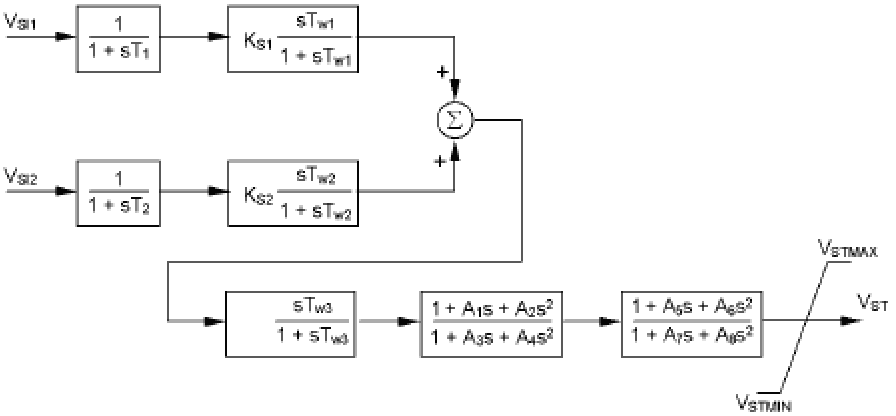
ตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (PSS) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการหน่วงของการแกว่งของระบบไฟฟ้าผ่านระบบกระตุ้น ซึ่งมักจะใช้ ความเร็วของโรเตอร์ (ω) ความถี่ที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (f) หรือกำลังไฟฟ้า (P_e) เป็นสัญญาณขาเข้าให้กับตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

แบบจำลองตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นใช้พื้นฐานจากแบบPSS1Aแบบสัญญาณขาเข้าเดียว ประกอบด้วย อัตราขยาย (K_{PSS}) วงจรหักล้าง (Washout)ที่มีค่าคงที่ทางเวลา (T_W) วงจรชดเชยเฟส (Phase compensation) ที่มีค่าคงที่ทางเวลา ($T_{PSS1}, T_{PSS2}, T_{PSS3}, T_{PSS4}$) และ ชุดจำกัดขอบเขต ดังในรูปที่ 2.6 โดยแสดงความสัมพันธ์ในสมการ 2-8 (Kundur, 1994) และรูปที่ 2.7 แสดงตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบPSS2Bที่มีสัญญาณขาเข้า2ชุด (IEEE Std 421.5-2005 Energy Development and Power Generaton Commitee, 2006)

$$V_S = K_{PSS}\frac{sT_W}{(1+sT_W)}\frac{(1+sT_{PSS1})(1+sT_{PSS3})}{(1+sT_{PSS2})(1+sT_{PSS4})}U \qquad 2\text{-}8$$



รูปที่ 2.6 ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด PSS1A แบบสัญญาณขาเข้าเดียว



รูปที่ 2.7 ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PSS2B ที่มีสัญญาณขาเข้า 2 ชุด

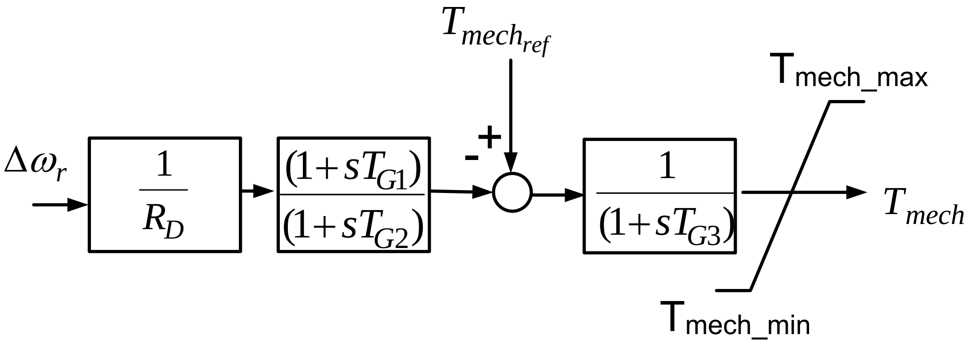
2.2.1.4 ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Turbine/Governor system) ใช้แบบจำลองอย่างง่ายที่มีสมการดังนี้ (Kundur, 1994)

$$\Delta T_m = -\frac{\Delta\omega_r}{R_D}\frac{(1+sT_{G1})}{(1+sT_{G2})} \quad \text{2-9}$$

$$T_{mech} = \frac{1}{(1+sT_{G3})}(T_{mech_{ref}} + \Delta T_m) \quad \text{2-10}$$

แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 R_D คือ ค่าคงที่คุณลักษณะดรูป (Droop) ของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า T_{G1},T_{G2},T_{G3} คือ ค่าคงตัวเวลาของชุดขับเคลื่อน (Prime mover) เมื่อ $T_{mech_{ref}}$ คือ แรงบิดทางกลอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.2.2 แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้า

แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้า (Network model) ใช้แบบจำลองที่ละเลยผลของสภาวะชั่วขณะในสายส่ง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวอยู่ในรูปของเมตริกซ์แบบผสม (Hybrid matrix) ซึ่งเขียนได้ตามสมการ

$$\begin{bmatrix} i_{d1} + ji_{q1} \\ E'_{d2} + jE'_{q2} \\ \vdots \\ i_{dn} + ji_{qn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & \ddots & & H_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{d1} + jE'_{q1} \\ i_{d2} + ji_{q2} \\ \vdots \\ E'_{dn} + jE'_{qn} \end{bmatrix} \qquad 2\text{-}11$$

แบบจำลองระบบส่งไฟฟ้าแบบนี้มีความยืดหยุ่น กล่าวคือ สัญญาณขาเข้าเป็นกระแสหรือแรงดันก็ได้ ส่วนทางด้านสัญญาณขาออกนั้นจะให้ออกมาในรูปกระแส หรือแรงดันเช่นเดียวกัน ในลักษณะดังกล่าวจะทำให้ง่ายต่อการจำลองการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระบบเข้ากับแบบจำลองระบบส่งไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ กัน

2.2.3 แบบจำลองโหลด

2.2.3.1 แบบจำลองโหลดชนิดค่าอิมพีแดนซ์คงที่

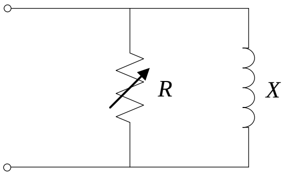
โหลดของระบบไฟฟ้าที่ใช้แบบจำลองโหลดชนิดค่าอิมพีแดนซ์คงที่ (Fixed impedance) ถูกแทนด้วยแอดมิตแตนซ์สมมูล (Y_L) โดยข้อมูลที่ต้องการคือ กำลังไฟฟ้าจริง (P_L) กำลังรีแอกทีฟ (Q_L) และ ขนาดแรงดันบัส (V_L) ที่โหลดต่ออยู่ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะจุดเริ่มต้นทำงาน สมการของแอดมิตแตนซ์สมมูลซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าอิมพีแดนซ์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_L = \frac{P_L}{V_L^2} - j\frac{Q_L}{V_L^2} \qquad 2\text{-}12$$

2.2.3.2 แบบจำลองโหลดชนิดค่าไฟฟ้ากำลังคงที่

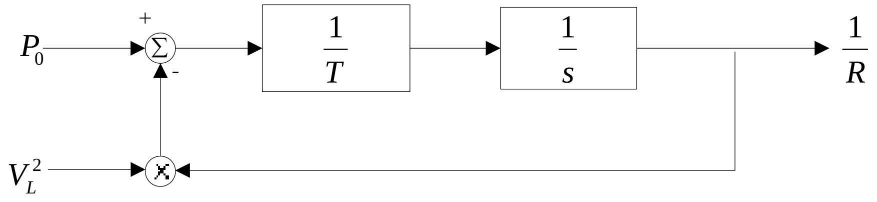
แบบจำลองโหลดชนิดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ (Fixed power) ซึ่งโหลดดังกล่าวมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงแต่จะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงมีค่าคงที่ ซึ่งวงจรสมมูลของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่แสดงในรูปที่ 2.9 และสมการที่ 2-13

$$T\frac{d\left(\frac{1}{R}\right)}{dt} = P_o - \frac{V_L^2}{R} \qquad 2\text{-}13$$



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่

แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่เป็นแบบจำลองชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว (Single time constant model) โดยแบบจำลองดังกล่าวจะทำการปรับค่าเฉพาะโหลดความต้านทาน เพื่อให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้ามีค่าคงที่ สามารถแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพของแบบจำลองชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว

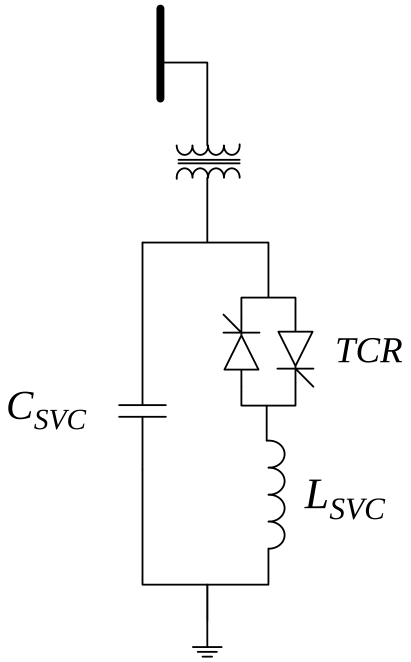
2.2.4 แบบจำลองอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ

อุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ (Flexible AC Transmission System, FACTS) หรืออุปกรณ์ควบคุม เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบส่งไฟฟ้าเพื่อช่วยปรับปรุงการไหลของกำลังไฟฟ้า ควบคุมแรงดันในระบบไฟฟ้าและควบคุมกำลังรีแอกทีฟ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการทำงาน ซึ่งตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมได้อย่างรวดเร็ว สามารถนำไปใช้งานเพื่อปรับปรุงสมรรถนะให้กับระบบส่งไฟฟ้า มีกำลังสูญเสียในอุปกรณ์ต่ำและมีความน่าเชื่อถือสูง ประโยชน์ของอุปกรณ์ควบคุม ได้แก่ ช่วยลดผลกระทบซับซิงโครนัสโซแนนซ์ รักษาระดับแรงดันให้คงที่ หน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบที่สภาวะชั่วขณะ และ ป้องกันการสูญเสียเสถียรของแรงดัน (Padirar, 2009) โดยอุปกรณ์ควบคุมที่จะใช้ในการศึกษามีดังนี้

2.2.4.1 แบบจำลองอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับแบบขนาน

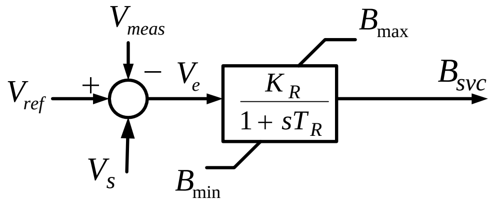
ในส่วนนี้แสดงตัวอย่างแบบจำลองอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับแบบขนาน ได้แก่ อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต (Static VAR Compensators model, SVC) เป็นอุปกรณ์ควบคุม ที่ต่อขนานกับระบบไฟฟ้าที่บัส ดังรูปที่ 2.11

ประกอบด้วยความจุไฟฟ้าต่อขนานกับความเหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมผ่านทางอุปกรณ์ไธริสเตอร์ (Thyristor Controlled Reactors, TCR) เพื่อควบคุมกำลังรีแอกทีฟ โดยการเปลี่ยนค่าซัสเซบแตนซ์ของระบบส่งไฟฟ้า (สมยศ, 2548)



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

โดยแบบจำลองอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตแสดงในรูปที่ 2.12 ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบอัตราขยาย และค่าคงที่เชิงเวลา (Gain-time constant)

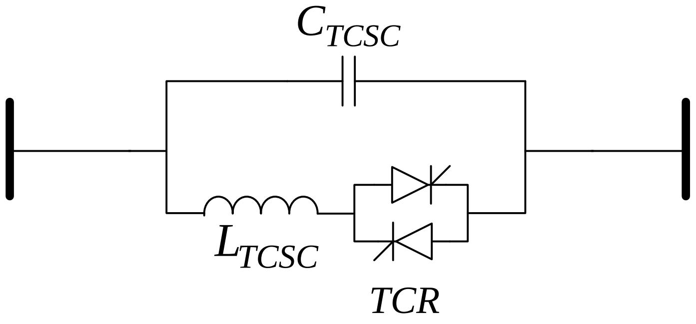


รูปที่ 2.12 แบบจำลองอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

2.2.4.2 แบบจำลองอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับแบบอนุกรม

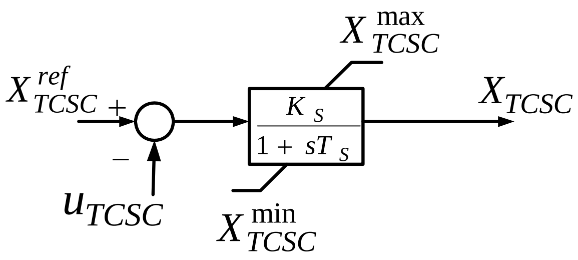
ในส่วนนี้แสดงตัวอย่างแบบจำลองอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับแบบอนุกรม ได้แก่ อุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม (Thyristor Controlled

Series Capacitor, TCSC) เป็นอุปกรณ์ควบคุม ที่ต่ออนุกรมกับสายส่งในระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2.13 ประกอบด้วยความจุไฟฟ้าต่อขนานกับความเหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมผ่านทางอุปกรณ์ไธริสเตอร์ ซึ่งสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งไฟฟ้าทำให้สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถในการส่งไฟฟ้าของสายส่งได้ (Mohan และ Varma, 2002)



รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม

แผนภาพแบบจำลองอุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรมแสดงในรูปที่ 2.14 โดย u_{TCSC} คือสัญญาณควบคุมเสริมจากตัวควบคุมการลดการแกว่ง เมื่อ X_{TCSC}^{ref} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม อ้างอิง K_S และ T_S คือ อัตราขยายและค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม



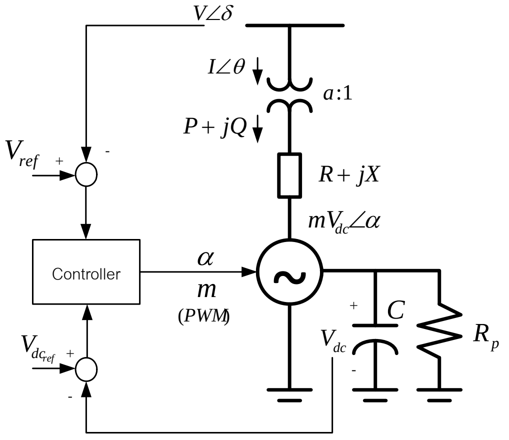
รูปที่ 2.14 แบบจำลองอุปกรณ์ชดเชยระบบส่งไฟฟ้าแบบอนุกรม

2.2.4.3 แบบจำลองของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต

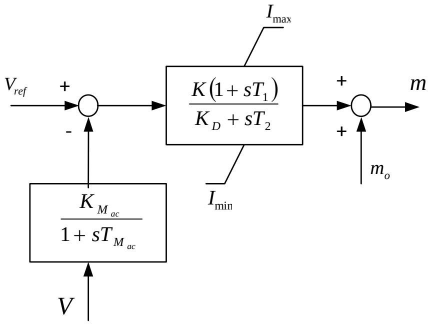
Jeong, Jyung, และ Baek, 2011 นำเสนอแบบจำลองของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต (Static synchronous compensator, STATCOM) สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิตสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพเชิงแรงดันในช่วงระยะเวลาสั้น เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนด้วยการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดอย่าง

ต่อเนื่อง โดยวงจรสมมูลการทำงานของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิตตามรูปที่ 2.15 โดยแรงดันของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิตสามารถถูกควบคุมผ่านวงจรควบคุมตามรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17 ซึ่งสามารถปรับมุมการทำงาน และอัตราส่วนการมอดูเลตของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยสมการสถานะของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสสถิตเพื่อใช้ศึกษาเสถียรภาพ แสดงดังสมการ

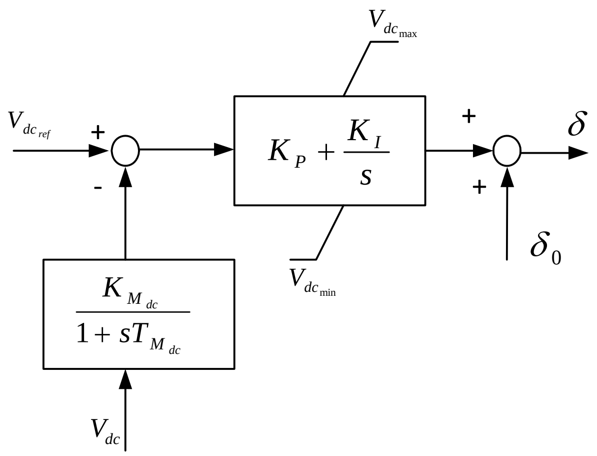
$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{i}_d \\ \Delta\dot{i}_q \\ \Delta\dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{m}{L}\cos(\delta) \\ -\omega & -\frac{R}{L} & \frac{m}{L}\sin(\delta) \\ \frac{3}{2}\frac{m}{C}\cos(\delta) & -\frac{3}{2}\frac{m}{C}\sin(\delta) & -\frac{1}{R_p C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \frac{m}{L} V_{dc_o}\sin(\delta) \\ 0 & \frac{1}{L} & \frac{m}{L} V_{dc_o}\cos(\delta) \\ 0 & 0 & -\frac{3}{2}\frac{m}{C}\left(i_{d_o}\sin\delta + i_{q_o}\cos\delta\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \\ \Delta\delta \end{bmatrix} \quad \text{2-14}$$



รูปที่ 2.15 แผนภาพวงจรสมมูลของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต



รูปที่ 2.16 แผนภาพการควบคุมมุมการทำงานของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต

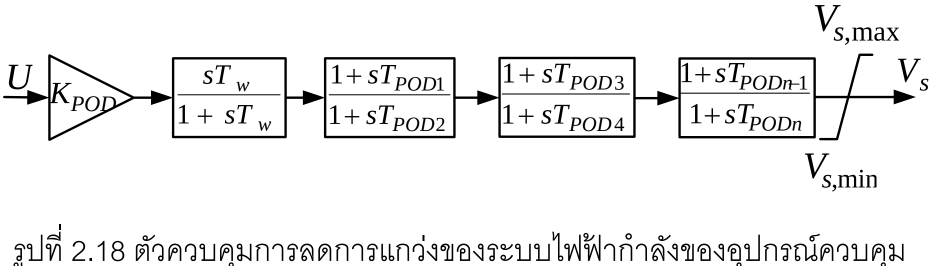


รูปที่ 2.17 แผนภาพการควบคุมอัตราส่วนการมอดูเลตของอุปกรณ์การชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต

2.2.4.4 แบบจำลองตัวควบคุมการลดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังของอุปกรณ์ควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมการลดการแกว่งระบบไฟฟ้ากำลังของอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งเป็นชุดควบคุมที่ติดตั้งเสริมให้กับอุปกรณ์ควบคุม เพื่อช่วยปรับปรุงสมรรถนะทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า โดยในปัจจุบันได้มีวิธีการออกแบบด้วยทฤษฎีควบคุมที่หลากหลายออกไป ในที่นี้จะพิจารณาถึงการออกแบบตัวควบคุมที่เป็นรูปแบบมาตรฐาน (Conventional control) โดยการใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical control) ที่มีแบบจำลองเชิงพลวัตเป็นดังรูปที่ 2.18

ตัวควบคุมการลดการแกว่งระบบไฟฟ้ากำลังของอุปกรณ์ควบคุมที่มีลักษณะเป็นตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำหน้า-ล้าหลัง (Phase-lead-phase-lag compensation) โดยค่าพารามิเตอร์ภายในจะประกอบไปด้วยอัตราขยาย (K_{POD}) และค่าเวลาคงที่ (T_1, T_2,..., T_n เมื่อ $n = 1, 2, 3,.....$) ซึ่งมีสัญญาณขาเข้า (U) ที่ป้อนให้กับตัวควบคุมการลดการแกว่งของอุปกรณ์ควบคุม ได้แก่ ขนาดของกระแสที่ไหลระหว่างสายส่ง กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลระหว่างสายส่ง กระแสส่วนจริงที่ไหลระหว่างสายส่ง ขนาดของแรงดันที่บัส การเปลี่ยนแปลงของความถี่ในระบบ สัญญาณขาออกของตัวควบคุมหรือ (V_S) เป็นขนาดแรงดันก็ถูกนำไปใช้เป็นสัญญาณขาเข้าย่อยในการควบคุมของอุปกรณ์ควบคุม



รูปที่ 2.18 ตัวควบคุมการลดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังของอุปกรณ์ควบคุม

บทที่ 3

เสถียรภาพชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในบทนี้กล่าวถึงปัญหาเสถียรภาพชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง (Transient stability) แนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วครู่ และการนำหลักการทฤษฎีของเลียปูโนฟ (Lyapunov's theory) และฟังก์ชันพลังงาน (Energy function) มาใช้ในการศึกษาปัญหาเสถียรภาพชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

3.1 ปัญหาและแนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วครู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบขนาดใหญ่ เช่น การลัดวงจร การปลดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้พลังงานในระบบมีเกิดการเปลี่ยนแปลง ในการปรับปรุงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้มีการนำเสนอการออกแบบตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวเดียวต่อกับบัสอนันต์มีความเหมาะสมกับการปรับปรุงการหน่วงสำหรับโหมดท้องถิ่น (Local modes) เท่านั้น แต่สำหรับการปรับปรุงโหมดเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ (Inter-area modes) นั้นต้องการการออกแบบเพิ่มเติม รวมถึงการเลือกตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสมของตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Tse และ Tso (1988) ได้เสนอการออกแบบตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกับระบบขนาดใหญ่ โดยใช้การระบุโหมด ค่าลักษณะเฉพาะและความไวมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งสามารถปรับพารามิเตอร์ของตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ในแต่ละจุดทำงานเท่านั้นโดยเมื่อจุดทำงานของระบบเปลี่ยนไปต้องทำการปรับพารามิเตอร์ใหม่ และในระบบขนาดใหญ่จะมีความยุ่งยากในการคำนวณ เพราะผลของการปรับพารามิเตอร์ของตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับปรับปรุงการหน่วงของโหมดเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ อาจส่งผลทำให้การหน่วงของโหมดท้องถิ่นมีค่าแย่ลง หรือการปรับพารามิเตอร์ของตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับปรับปรุงการหน่วงของโหมดท้องถิ่นอาจส่งผลทำให้การหน่วงของโหมดเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ มีค่าแย่ลง

ขั้นตอนทั่วไปในการปรับตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุม ให้ระบบมีเสถียรภาพเพียงพอ สามารถทำโดย

- เลือกตำแหน่งที่ติดตั้งตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้เหมาะสมกับโหมดการสั่นที่มีค่าการหน่วงไม่เพียงพอ โดยพิจารณาจากเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะด้านขวา (Right-eigenvector)หรือรูปร่างโหมด (Mode shape) ที่ได้จากเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ

ของสมการสถานะของระบบ (Zhou, Malik และ Hope, 1991) และเลือกตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงโหมดเช่นกัน (Rouco และ Pagola, 1997)

- ปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้ได้ค่าการหน่วงที่เพียงพอ โดยใช้หลักการปรับปรุงเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ใช้ค่าจากการวิเคราะห์ความไวจากการวิเคราะห์เชิงโหมด (Zhou, Malik และ Hope, 1992; Xu และ Ahmed-Zaid, 1995) หรือใช้หลักการโลคัสของรากในการปรับค่าพารามิเตอร์ รวมถึงมีการนำการวิเคราะห์ความไวแบบสถิติของค่าคุณสมบัติเฉพาะมาออกแบบตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าในกรณีระบบหลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Chung, Wang, Tse, Bian และ David, 2003)

ถ้าค่าการหน่วงยังไม่เพียงพอให้ดำเนินการตามขั้นตอนข้างต้นอีกครั้งจนกว่าจะได้ค่าการหน่วงที่เหมาะสม ค่าลักษณะเฉพาะของเมตริกซ์ สำหรับสมการสถานะของระบบ สามารถบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบได้ โดยถ้ามีค่าส่วนจริงของค่าลักษณะเฉพาะเป็นบวกระบบจะไม่มีเสถียรภาพ สำหรับรูปร่างโหมด ที่ได้จากเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะสำหรับแต่ละค่าของค่าลักษณะเฉพาะแสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรสถานะของระบบหรือในทางกายภาพคือตัวแปรที่เกี่ยงข้องกับเครื่องไฟฟ้าใดจะมีการสั่นต้านกันสำหรับโหมดการสั่นใดๆที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งได้มีการนำความสัมพันธ์นี้ไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมโหมดการสั่นที่ไม่มีเสถียรภาพได้

ปรีชานนท์ (2551) ได้เสนอการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วขณะของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้อุปกรณ์แฟคท์ ซึ่งมีการเสนอกลยุทธการออกแบบระบบควบคุม สำหรับ STATCOM, SSSC และ UPFC โดยนำทฤษฎีของเลียปูโนฟและฟังก์ชันพลังงานมาช่วยในการประเมินสมรรถนะของระบบที่ออกแบบ

3.2 ทฤษฎีของเลียปูโนฟและฟังก์ชันพลังงาน

ทฤษฎีของเลียปูโนฟ เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงเสถียรภาพของระบบโดยอาศัยฟังก์ชันพลังงาน โดยทฤษฎีนี้ถูกนำมาใช้ศึกษาเสถียรภาพชั่วครู่และนำไปสู่การออกแบบระบบควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง (Pai, 1981) โดยในส่วนนี้จึงได้อธิบายถึงทฤษฎีของเลียปูโนฟและฟังก์ชันพลังงานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง

3.2.1 ทฤษฎีของเลียปูโนฟ

3.2.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบไม่เชิงเส้น

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณสมบัติเป็นระบบแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear system) โดยสามารถเขียนสมการทั่วไปของระบบแบบไม่เชิงเส้นที่ไม่มีการควบคุม (Autonomous) ได้ดังนี้

$$\dot{x} = f(x) \quad 3\text{-}1$$

สำหรับระบบแบบไม่เชิงเส้นที่มีการควบคุม (Non-autonomous) แสดงดังนี้

$$\dot{x} = f(x,u) \quad 3\text{-}2$$

เมื่อ x คือ เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะของระบบและ u คือ เวกเตอร์ของตัวแปรควบคุม โดยจุดทำงานที่สมดุลของระบบแบบไม่เชิงเส้นกำหนดได้ด้วยความสัมพันธ์

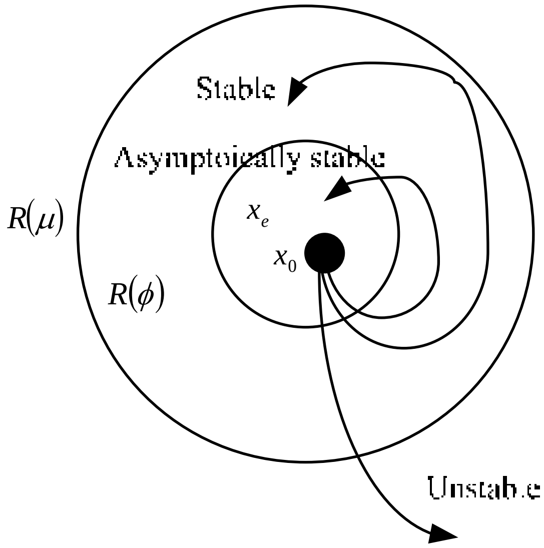
$$f(x_e) = 0 \quad 3\text{-}3$$

เมื่อ x_e คือ เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะของระบบ ณ จุดทำงานที่สมดุลในทุกช่วงเวลา

3.2.1.2 เสถียรภาพของระบบตามทฤษฎีของเลียปูโนฟ

เลียปูโนฟให้คำจำกัดความว่า ระบบทั่วไปจะมีเสถียรภาพเมื่อการเปลี่ยนของระบบมีทิศทางที่เข้าสู่จุดสมดุล x_e ตลอดช่วงเวลา t ซึ่งสามารถอธิบายแนวคิดนี้ได้ดังรูปที่ 3.1 เมื่อกำหนดให้ c คือรัศมีของทรงกลมที่มีขนาดที่สามารถล้อมรอบ x_e โดยแสดงได้ดังสมการ

$$\|x - x_e\| \le c \quad 3\text{-}4$$



รูปที่ 3.1 แนวความคิดเสถียรภาพของเลียปูโนฟ

เมื่อ $\|x - x_e\|$ เป็น Euclidean norm กำหนดได้โดย

$$\|x - x_e\| = \sqrt{(x_1 - x_{1e})^2 + \left((x_2 - x_{2e})^2 + \cdots + (x_n - x_{ne})^2\right)} \qquad 3\text{-}5$$

กำหนดให้ $R(\phi)$ ประกอบไปด้วยทุกๆจุดที่

$$\|x - x_e\| \le \phi \qquad 3\text{-}6$$

โดยที่ x_0 คือผลเฉลยสำหรับสมการของระบบ ณ เวลาใดๆ และให้ $R(\phi)$ ประกอบไปด้วยทุกๆจุดที่สามารถทำให้

$$\|x - x_e\| \le \mu \qquad t > t_o \qquad 3\text{-}7$$

เมื่อ t_0 เป็นเวลาเริ่มต้น ระบบถูกกล่าวได้ว่ามีเสถียรภาพตามแนวความคิดของเลียปูโนฟ เมื่อเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบ (Trajectory) อยู่ในบริเวณ $R(\mu)$ โดยเมื่อเวลาผ่านไป ระบบจะยังคงมีเสถียรภาพตามแนวความคิดของเลียปูโนฟ เมื่อเส้นทางเคลื่อนที่ของระบบไม่ออกจากบริเวณ $R(\mu)$ และในที่สุดระบบจะวิ่งเข้าสู่จุดสมดุลดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ระบบจะสามารถถูกกล่าวได้ว่าไม่มีเสถียรภาพ เมื่อเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบออกนอกบริเวณ $R(\phi)$ และท้ายที่สุดเข้าไปสู่บริเวณ $R(\mu)$ ซึ่งไม่มีเสถียรภาพ

3.2.1.3 ทฤษฎีแรกของเลียปูโนฟ

ผลเฉลยแรกของระบบสมการแบบไม่เชิงเส้นหาได้โดยใช้ ทฤษฎีแรกของเลียปูโนฟ ซึ่งนั่นก็คือการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงสมการที่ 3-1 ได้ในรูปแบบดังนี้

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x \qquad 3\text{-}8$$

โดยที่เมตริกซ์ A กำหนดได้โดย

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{x=x_e} \quad 3\text{-}9$$

ค่าลักษณะเฉพาะ (Eigen values, λ_i) ของเมตริกซ์ A เมื่อ $i = 1,2 \ldots n$ ถูกกำหนดโดย

$$[I\lambda_i - A] = 0 \quad 3\text{-}10$$

ถ้าส่วนประกอบจำนวนจริงของค่าลักษณะเฉพาะของเมตริกซ์ A มีค่าเป็นลบจะสรุปได้ว่า x_e มีเสถียรภาพแบบลู่เข้า ถ้าค่าลักษณะเฉพาะของเมตริกซ์ A ตัวใดตัวหนึ่ง มีส่วนประกอบจำนวนจริงเป็นบวกจะสรุปได้ว่า x_e สูญเสียเสถียรภาพ และถ้าค่าลักษณะเฉพาะของเมตริกซ์ A หนึ่งตัว หรือมากกว่านั้น มีส่วนประกอบจำนวนจริงเป็นศูนย์จะยังไม่สามารถสรุปได้ว่า x_e ไม่มีเสถียรภาพ

3.2.1.4 ทฤษฎีที่สองของเลียปูโนฟ

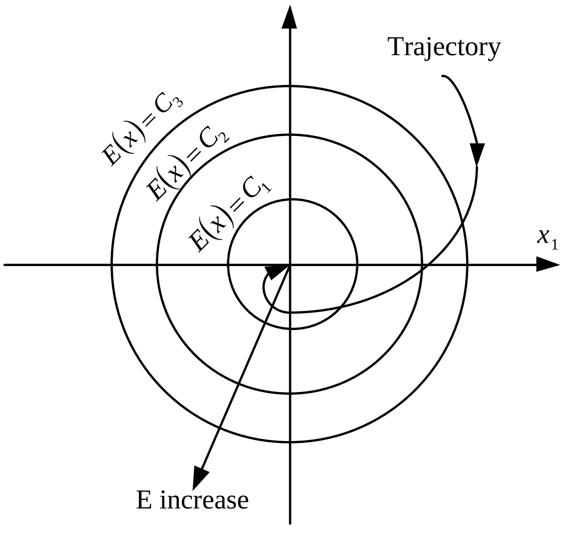
ทฤษฎีที่สองของเลียปูโนฟถูกนำมาใช้ในการอธิบายเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้นผ่านทางฟังก์ชันพลังงาน ที่มีคุณสมบัติเป็นฟังก์ชันเลียปูโนฟ ซึ่งวิธีนี้ถูกเรียกว่าวิธีตรง (Direct method) โดยวิธีนี้จะใช้ฟังก์ชันพลังงานและอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันพลังงานต่อเวลา มาใช้ประเมินเสถียรภาพของระบบ โดยค่าทั้งสองต้องเป็นไปตามทฤษฎีของเลียปูโนฟ กล่าวคือ ถ้าระบบมีเสถียรภาพเป็นแบบลู่เข้าจุดทำงานที่สมดุล พลังงานที่สะสมในระบบจะต้องลดน้อยลงเมื่อเวลาผ่านไปและท้ายที่สุดพลังงานต้องหมดไป (Pai, 1981) ความท้าทายของการประยุกต์ใช้วิธีนี้คือการหาฟังก์ชันพลังงานที่ถูกต้องและมีความเหมาะสมของระบบที่พิจารณา แต่อย่างไรก็ตามเลียปูโนฟได้ให้แนวความคิดไว้ว่าฟังก์ชันพลังงานที่มีค่าเป็นบวกใดๆของระบบสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าความถูกต้องของการประเมินเสถียรภาพของระบบอาจคาดเคลื่อนได้ และในกรณีของระบบที่มีความซับซ้อนมากหรือระบบขนาดใหญ่ ที่มีสมการอนุพันธ์หลายตัว การหาฟังก์ชันพลังงานนั้นเป็นเรื่องที่ซับซ้อนมาก

กำหนดให้ $E(x,t)$ คือ ฟังก์ชันพลังงานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และ $E(x)$ คือฟังก์ชันพลังงานที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การประเมินว่าระบบนั้นจะมีเสถียรภาพหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากเครื่องหมายของฟังก์ชันพลังงาน ($E(x)$) หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันพลังงานต่อเวลา ($\dot{E}(x) = dE(x)/dt$) ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่ต้องทำการแก้สมการอนุพันธ์ที่ซับซ้อนเพื่อหาผลเฉลย เมื่อใช้วิธีที่สองของเลียปูโนฟ กำหนดให้ฟังก์ชันพลังงาน ($E(x)$)ที่มีค่าเป็นบวกซึ่งสามารถเขียนได้โดย

$$E(x) = C \qquad 3\text{-}11$$

เมื่อ C คือค่าบวกใดๆ โดยสมมุติว่าอยู่ที่จุดกำเนิด ปริมาณของพลังงาน (C) จะมีค่ามากขึ้น เมื่อระยะทางที่ห่างจากจุดกำเนิดมากขึ้น จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าพลังงาน C_3 จะมีค่ามากที่สุด และ C_1 มีค่าพลังงานน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าฟังก์ชันพลังงาน $E(x)$ มีค่าเป็นบวกใดๆ และ $E(x)$ จะมีค่าอนันต์ในขณะที่จำนวนสมาชิก ทั้งหมดมีค่าเป็นอนันต์ จะเห็นได้ว่า $E(x) = C_1$ ตั้งอยู่ภายในทรงกลมของ $E(x) = C_2$ และ $E(x) = C_3$ ตามลำดับ

ถ้าระบบที่ต้องการพิจารณามีฟังก์ชันพลังงานที่มีค่าเป็นบวก และอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานมีค่าเป็นลบ ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปเพิ่มขึ้น ค่าของพลังงานจะลดน้อยลงจาก C_3 ไปสู่ C_2 และ C_1 ตามลำดับ โดยที่ระบบนี้จะถูกกล่าวว่ามีเสถียรภาพแบบลู่เข้าจุดสมดุล โดยที่ค่าพลังงานของระบบดังกล่าวจะลดลงจนเป็นศูนย์ในท้ายที่สุด



รูปที่ 3.2 ทิศทางการเปลี่ยนแปลงและลำดับขั้นพลังงานของระบบ

ทฤษฎีหลักทางเสถียรภาพของระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้นตามแนวความคิดของเลียปูโนฟ สามารถสรุปได้ดังนี้ ทฤษฎีแรกจะกำหนดให้ระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถอธิบายได้โดย

$$\dot{x} = f(x) \qquad 3\text{-}12$$

โดยที่ $f(0)=0$ สำหรับทุกช่วงเวลา (t) ระบบในสมการที่ 3-12 ถูกพิจารณาว่ามีเสถียรภาพตามแนวความคิดของเลียปูโนฟ ถ้าระบบนั้นมีฟังก์ชันพลังงานที่มีค่าเป็นบวกแบบต่อเนื่อง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อเวลามีค่าเป็นลบ ดังสามารถสรุปได้ดังนี้

$$E(x) > 0 \qquad 3\text{-}13$$

$$\dot{E}(x) < 0 \qquad 3\text{-}14$$

ระบบใดๆจะมีเสถียรภาพตามแนวความคิดของเลียปูโนฟ เมื่อพบว่า ค่าของพลังงานเพิ่มจาก $0, C_1, C_2, \ldots C_k$ โดยที่ชั้นพลังงาน (Boundary of energy) ที่ชั้นใดๆ (k) ที่เป็นแบบผิวปิด $E(k) = C_k$ และมีค่าน้อยกว่า $E(k+1) = C_{k+1}$ และ $E(k) = C_k$ จะอยู่ภายใน $E(k+1) = C_{k+1}$ ถ้าทิศทางการเปลี่ยนแปลงของระบบเข้าสู่จุดสมดุลก็จะหมายความว่าระยะทางระหว่างจุดใดๆกับจุดสมดุลนั้นลดน้อยลง ซึ่งทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อเวลาของระบบที่พิจารณามีค่าเป็นลบ

ทฤษฎีที่สองเมื่อกำหนดให้ระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้นเขียนเป็นสมการได้โดย

$$\dot{x} = f(x) \qquad 3\text{-}15$$

โดยที่ $f(0)=0$ สำหรับ $t \geq t_0$ ระบบในสมการที่3-15 จะถูกพิจารณาว่ามีเสถียรภาพตามแนวความคิดของเลียปูโนฟ ถ้าระบบนั้นมีฟังก์ชันพลังงานที่เป็นบวกแบบต่อเนื่อง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อเวลามีค่าเป็นแบบกึ่งลบ (Semi-negative) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

$$E(x) > 0 \qquad 3\text{-}16$$

$$\dot{E}(x) \leq 0 \qquad 3\text{-}17$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อเวลาที่มีค่าเป็นแบบกึ่งลบตลอดแนวการเคลื่อนที่ของระบบยกเว้นบางจุด อย่างในกรณีของจุดกำเนิด $E(x_0)$ คือค่าพลังงานของระบบที่เวลาเริ่มต้น t_0 นั่นคือจุดกำเนิด x_0 โดยที่นิยามดังกล่าวพิจารณาได้ว่าแนวการเคลื่อนที่ของระบบสัมผัสกับชั้นของพลังงาน ($E(x)=C$) นั้นมีเสถียรภาพถึงแม้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อเวลาจะไม่เป็นลบตลอดแนวการเคลื่อนที่ของระบบทั้งหมดแต่จะต้องไม่เป็นบวก ซึ่งก็จะสามารถกล่าวได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพได้เมื่อค่าพลังงานของระบบจะต้องมีค่าเป็นบวก และอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อเวลาต้องเป็นแบบกึ่งลบ

จากที่กล่าวมาเกี่ยวกับทฤษฎีของเลียปูโนฟทำให้สามารถสรุปได้ว่า ทฤษฎีแรกของเลียปูโนฟถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์ระบบที่อยู่บนพื้นฐานของระบบที่เป็นเชิงเส้น โดยทำการวิเคราะห์ระบบจากค่าจริงของค่าลักษณะเฉพาะ โดยที่ค่าจริงของค่าลักษณะเฉพาะมีค่าเป็นลบ ระบบจะมีเสถียรภาพแบบลู่เข้า และไม่มีเสถียรภาพเมื่อจำนวนจริงของค่าลักษณะเฉพาะมีค่าเป็นบวก ทฤษฎีที่สองของเลียปูโนฟจะใช้กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้จากเครื่องหมายของฟังก์ชันพลังงานของระบบ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อเวลา การวิเคราะห์โดยผ่านวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันพลังงานที่เหมาะสม โดยที่ค่าของฟังก์ชันพลังงานต้องมีค่าเป็นบวกและ อัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของพลังงานต้องมีค่าเป็นแบบกึ่งลบ

3.2.2 ฟังก์ชันพลังงานของระบบไฟฟ้ากำลังตามทฤษฎีของเลียปูโนฟ

การคำนวณหาฟังก์ชันพลังงานของระบบไฟฟ้ากำลังตามทฤษฎีของเลียปูโนฟ (Machowski, Bialek และ Bumby, 2008) โดยใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการใช้แบบจำลองแบบดั้งเดิม (Classical model) ด้วยสมการสวิง (Swing equation) และพิจารณาวงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ต่ออนุกรมกับรีแอกแตนซ์ชั่วครู่ (Transient reactance) โดยสมการสวิงของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังสมการ

$$
\begin{aligned}
&\frac{d\delta_i'}{dt} = \Delta\omega_i \\
&M_i \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_i(\delta') - D_i \Delta\omega_i
\end{aligned}
\qquad 3\text{-}18
$$

เมื่อ δ_i' คือมุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\Delta\omega_i$ คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

P_{mi} คือ กำลังทางกลจากชุดขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$P_i(\delta')$ คือ กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

δ' คือ เวกเตอร์ของมุมกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

D_i คือ สัมประสิทธิ์การหน่วง

M_i คือ ค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$i = 1, \ldots, N$ คือ ลำดับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ

เมื่อค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดถูกแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์คงที่ โดยค่าดังกล่าวถูกรวมเข้าในสมการของสายส่งของระบบและทำการลดรูปให้เหลือการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น ทำให้สายส่งถูกพิจารณาในรูปของ $[Y_G]$ สมการแสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังสมการ

$$\underline{I}_G = \underline{Y}_G \underline{E}_G \qquad 3\text{-}19$$

$$\underline{I}_i = \sum_{j=1}^{N} \underline{Y}_{ij} \underline{E}_j \qquad 3\text{-}20$$

โดย i และ j เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ $\underline{E}_j = E_j e^{j\delta'_j}$ เป็นแรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $\underline{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ คือ องค์ประกอบภายในเมตริกซ์ $[Y_G]$ ที่ถูกลดรูปโดยรวมผลของภาระในระบบและรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดย $\underline{Y}_{ij} = -\underline{y}_{ij}$ และ $\underline{Y}_{ii} = \sum_{j=1}^{N} y_{ij}$

$\underline{y}_{ij}$ คือ ค่าแอดมิตแตนซ์เชื่อมโยง(Transfer admittance) ระหว่างบัส i และ j

เมื่อกำหนดให้กระแสที่ไหลเข้าบัสมีค่าเป็นบวก กำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่บัสมีค่าดังสมการ

$$P_i = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1,\, j\neq i}^{N} E_i E_j G_{ij} \cos\left(\delta'_i - \delta'_j\right) + \sum_{j=1,\, j\neq i}^{N} E_i E_j B_{ij} \sin\left(\delta'_i - \delta'_j\right) \qquad 3\text{-}21$$

$$P_i = P_{0i} + \sum_{j=1}^{N} b_{ij} \sin \delta'_{ij} \qquad 3\text{-}22$$

$$P_{0i} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1,\, j\neq i}^{N} E_i E_j G_{ij} \cos\left(\delta'_i - \delta'_j\right) \qquad 3\text{-}23$$

เมื่อ $b_{ij} = E_i E_j B_{ij}$ เป็นขนาดของคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและมุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกิ่งเชื่อมโยงสมมูลระหว่างบัส i และ j ในส่วนของค่า P_{0i} จะขึ้นกับมุมกำลังไฟฟ้า δ'_i ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโดยทั่วไปมีค่าไม่คงที่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะเมื่อโรเตอร์มีการสวิง

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายชุดด้วยวิธีโดยตรงของเลียปูโนฟ จะสมมุติให้ $P_{0i} \approx P_{0i}(\hat{\delta}')$ มีค่าคงที่ นั่นคือ กำลังไฟฟ้าในส่วนนี้มีค่าคงที่ในช่วงเวลาที่พิจารณาโดยมีค่าเท่ากับที่จุดสมดุลในการทำงาน ดังสมการ

$$P_{0i}(\hat{\delta}') = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} E_i E_j G_{ij} \cos(\hat{\delta}'_i - \hat{\delta}'_j) \qquad 3\text{-}24$$

ซึ่งข้อสมมุติินี้ในทางปฏิบัติหมายถึงค่าความศูนย์เสียในสายส่งถูกสมมุติให้มีค่าคงที่และถูกเพิ่มเข้าไปในภาระโหลดที่ต่อเข้าที่โนดสมมุติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นจากสมการที่ 3-18 และ 3-22 สามารถสรุปแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \frac{d\delta'_i}{dt} &= \Delta\omega_i \\ M_i \frac{d\Delta\omega_i}{dt} &= \left(P_{mi} - P_{0i}(\hat{\delta}')\right) - \sum_{j=1}^{N} b_{ij} \sin\delta'_{ij} - D_i \Delta\omega_i \end{aligned} \qquad 3\text{-}25$$

โดยพจน์ที่สองด้านขวามือของสมการที่ 3-25 เป็นพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ระบบ โดยไม่มีคิดผลของพลังงานสูญเสียที่มีในสายส่ง เนื่องจากกำลังสูญเสียถูกเพิ่มเข้าไปในภาระโหลดสมมูลด้วยค่าคงที่แล้ว เมื่อละเลยผลของการหน่วงในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงได้สมการดังนี้

$$M_i \frac{d\Delta\omega_i}{dt} - \left(P_{mi} - P_{0i}(\hat{\delta}')\right) + \sum_{j=1}^{N} b_{ij} \sin\delta'_{ij} = 0 \qquad 3\text{-}26$$

สมการพลังงานของระบบที่เป็นไปตามคุณสมบัติของฟังก์ชันเลียปูโนฟ สามารถสร้างขึ้นได้ด้วยหลายรูปแบบ ดังนี้ (Pai, 1981)

1) สมการพลังงานที่สร้างจากสมการอินทีเกรตลำดับที่หนึ่ง (First integral)
2) สมการพลังงานที่สร้างในรูปแบบของสมการกำลังสอง (Quadratic form)
3) สมการพลังงานที่สร้างจากสมการเชิงอนุพันธ์บางส่วน (Partial differential equation)
4) สมการพลังงานที่สร้างในรูปแบบของสมการกำลังสองร่วมกับการอินทีเกรตของส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นของฟังก์ชันเลียปูโนฟ (Quadratic plus integral of non-linearity type Lyapunov function)
5) สมการพลังงานที่สร้างจากวิธีเกรเดียน (Gradient method)
6) สมการพลังงานที่สร้างจากวิธีซูโบร (Zubov method)

7) สมการพลังงานที่สร้างจากวิธีโพพาวน์ (Popov method)

8) สมการพลังงานที่สร้างด้วยวิธีอื่นๆ

ในการสร้างสมการพลังงานของระบบไฟฟ้าที่เป็นไปตามคุณสมบัติของฟังก์ชันเลียปูโนฟ ในงานวิจัยนี้ใช้สมการพลังงานที่สร้างจากสมการอินทีเกรตลำดับที่หนึ่ง ซึ่งหลักการในการสร้างเป็นดังนี้

เมื่อระบบที่พิจารณาสามารถหาค่าอินทีเกรตลำดับที่หนึ่งได้ และแสดงในรูปแบบของสมการดังนี้

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \ldots, x_n) \qquad 3\text{-}27$$

หรือแสดงในรูปของสมการเวกเตอร์ดังนี้

$$\underline{\dot{x}} = \underline{f}(\underline{x}) \qquad \underline{f}(\underline{0}) = \underline{0} \qquad 3\text{-}28$$

เมื่ออินทีเกรตลำดับที่หนึ่ง สามารถหาฟังก์ชันที่สามารถหาการอนุพันธ์ $G(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ ในโดเมน D ที่มีผลเฉลยของตัวแปรสถานะ x_i เมื่อ $G(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ มีค่าคงที่ C ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติตามฟังก์ชันเลียปูโนฟสามารถหาได้จากการอินทีเกรตลำดับที่หนึ่งดังสมการต่อไปนี้

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f_i}{\partial x_i} = 0 \qquad 3\text{-}29$$

$$V(\underline{x}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \int_{x_{0j}}^{x_j} f_i \, dx_j \qquad 3\text{-}30$$

ฟังก์ชันพลังงานของระบบไฟฟ้าจากสมการสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อละเลยผลของค่าการหน่วงสามารถแสดงดังสมการ

$$V(\delta', \Delta\omega) = E_k + E_p \qquad 3\text{-}31$$

$$E_k = \sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{\omega_i} M_i \Delta\omega_i \, d\omega_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} M_i \Delta\omega_i^2 \qquad 3\text{-}32$$

$$E_p = -\sum_{i=1}^{N} \int_{\hat{\delta}_i'}^{\delta_i'} (P_{mi} - P_{0i}) d\delta_i' + \sum_{i=1}^{N} \int_{\hat{\delta}_i'}^{\delta_i'} \left(\sum_{j=1}^{N} b_{ij} \sin \delta_{ij}' \right) d\delta_i' \qquad 3\text{-}33$$

เมื่อ E_k คือสมการพลังงานจลน์ของระบบ และ E_p คือสมการพลังงานศักย์ของระบบ โดยพจน์ที่สองของสมการพลังงานศักย์ E_p สามารถคำนวณดังสมการ

$$\sum_{i=1}^{N}\int_{\hat{\delta}_i'}^{\delta_i'}\left(\sum_{j=1}^{N} b_{ij}\sin\delta_{ij}'\right)d\delta_i' = -\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} b_{ij}\left(\cos\delta_{ij}' - \cos\hat{\delta}_{ij}'\right) \quad 3\text{-}34$$

สมการพลังงานศักย์ สามารถแสดงดังสมการ

$$E_p = -\sum_{i=1}^{N}\left(P_{mi} - P_{0i}\right)\left(\delta_i' - \hat{\delta}_i'\right) - \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} b_{ij}\left(\cos\delta_{ij}' - \cos\hat{\delta}_{ij}'\right) \quad 3\text{-}35$$

ฟังก์ชันพลังงานของระบบไฟฟ้าที่เป็นไปตามฟังก์ชันเลียปูโนฟ แสดงดังสมการ

$$V(\delta', \Delta\omega) = E_k + E_p \quad 3\text{-}36$$

$$V(\delta', \Delta\omega) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} M_i\Delta\omega_i^2 - \sum_{i=1}^{N}\left(P_{mi} - P_{0i}\right)\left(\delta_i' - \hat{\delta}_i'\right) - \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} b_{ij}\left(\cos\delta_{ij}' - \cos\hat{\delta}_{ij}'\right) \quad 3\text{-}37$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบ สามารถหาได้ดังสมการ

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{dE_k}{dt} + \frac{dE_p}{dt} \quad 3\text{-}38$$

$$\frac{dE_k}{dt} = \sum_{i=1}^{N}\frac{\partial E_k}{\partial\Delta\omega_i}\frac{d\Delta\omega_i}{dt} \quad 3\text{-}39$$

$$\frac{dE_p}{dt} = \sum_{i=1}^{N}\frac{\partial E_p}{\partial\delta_i'}\frac{d\delta_i'}{dt} = \sum_{i=1}^{N}\frac{\partial E_p}{\partial\delta_i'}\Delta\omega_i \quad 3\text{-}40$$

โดยที่

$$\frac{\partial E_k}{\partial\Delta\omega_i} = M_i\Delta\omega_i \quad 3\text{-}41$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial\delta_i'} = -\left(P_{mi} - P_{0i}\right) + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N} b_{ij}\sin\delta_{ij}' \quad 3\text{-}42$$

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์ต่อเวลา แสดงดังสมการ

$$\frac{dE_k}{dt} = \sum_{i=1}^{N}\frac{\partial E_k}{\partial\Delta\omega_i}\frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \sum_{i=1}^{N}\Delta\omega_i M_i\frac{d\Delta\omega_i}{dt} \quad 3\text{-}43$$

$$\frac{dE_k}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \Delta\omega_i \left(P_{mi} - P_{0i}\right) - \sum_{i=1}^{N} \Delta\omega \sum_{j=1}^{N} b_{ij} \sin\delta'_{ij} - \sum_{i=1}^{N} D_i \Delta\omega_i^2 \qquad \text{3-44}$$

และการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์ต่อเวลา แสดงดังสมการ

$$\frac{dE_p}{dt} = -\sum_{i=1}^{N} \Delta\omega_i \left(P_{mi} - P_{0i}\right) + \sum_{i=1}^{N} \Delta\omega \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} b_{ij} \sin\delta'_{ij} \qquad \text{3-45}$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่อเวลาของระบบ จึงสามารถแสดงดังสมการ

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{dE_k}{dt} + \frac{dE_p}{dt} = -\sum_{i=1}^{N} D_i \Delta\omega_i^2 \qquad \text{3-46}$$

จากสมการพลังงานในสมการ 3-37 และสมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่อเวลาของระบบไฟฟ้าในสมการ 3-46 เป็นไปตามคุณสมบัติของฟังก์ชันเลียปูโนฟ จึงสามารถนำไปใช้ในการศึกษาเสถียรภาพชั่วครู่ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยหลักการพิจารณาเสถียรภาพ กล่าวคือ พลังงานของระบบหลังจากถูกกระตุ้น เช่น การเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า ระบบจะมีเสถียรภาพได้เมื่อพลังงานของระบบต้องมีค่าน้อยกว่าพลังงานวิกฤติตามฟังก์ชันเลียปูโนฟของระบบ V_{cr} (Potential boundary surface) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบจะต้องมีค่าน้อยกว่าศูนย์ โดยสามารถแสดงดังสมการ

$$V\left(\delta', \Delta\omega\right) < V_{cr} \qquad \text{3-47}$$

$$\dot{V} = \frac{V\left(\delta'.\Delta\omega\right)}{dt} < 0 \qquad \text{3-48}$$

โดยการหาพลังงานวิกฤติตามฟังก์ชันเลียปูโนฟของระบบ V_{cr} ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ทำได้ยาก ซึ่งในงานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพชั่วครู่โดยการควบคุมการลดพลังงานในระบบที่ถูกกระตุ้น จึงทำการพิจารณาการเปลี่ยนพลังงานของระบบให้มีค่าน้อยกว่าศูนย์เป็นหลัก

บทที่ 4

เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กในระบบไฟฟ้ากำลัง

ปัญหาเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (Small-signal stability) เกิดจากการรบกวนขนาดเล็ก เช่น การเปลี่ยนแปลงภาระโหลด หรือการเปลี่ยนแปลงปริมาณการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะกระตุ้นโหมดการสั่นที่มีค่าการหน่วงต่ำ ส่งผลทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้ ในส่วนนี้จึงนำเสนอปัญหาเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก หลักการวิเคราะห์เชิงโหมด (Modal analysis) วิธีการระบุโหมดการสั่นจากสัญญาณที่ตรวจวัดในระบบ (Modes identification) และการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) ซึ่งเป็นความรู้ที่นำไปสู่กลยุทธ์ในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

4.1 ปัญหาและแนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก

การศึกษาปัญหาเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กมีความจำเป็นต้องทราบโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งแสดงในรูปของค่าการหน่วง (Damping) และค่าความถี่ (Frequency) ที่เกิดขึ้นซึ่งใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กในระบบไฟฟ้ากำลัง ในการระบุโหมดการสั่นด้วยวิธีโหมด เป็นวิธีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายแต่ไม่สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องถ้าไม่สามารถทราบค่าตัวพารามิเตอร์ของส่วนต่างๆในระบบไฟฟ้าอย่างครบถ้วน เช่น พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวในระบบ การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้า และเมื่อระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจุดทำงาน เช่น เปลี่ยนแปลงภาระโหลดในระบบ การเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบส่งไฟฟ้า ทำให้ต้องคำนวณโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบใหม่โดยการป้อนค่าตัวพารามิเตอร์ในระบบใหม่ ทำให้ไม่มีความต่อเนื่องในการระบุโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

การใช้สัญญาณที่วัดได้จากระบบไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการประเมินโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า (Ljung, 1999) โดยสัญญาณที่วัดได้จากระบบไฟฟ้าผ่านทางอุปกรณ์ตรวจวัดเฟส (Phasor Measurement Unit) ที่สามารถประมาณโหมดการสั่น เช่น มุมของแรงดันในระบบ กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าหรือขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสในระบบไฟฟ้า เป็นต้น โดยการตรวจวัดค่าต่างๆของระบบไฟฟ้าภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะให้มีความถูกต้องนั้นเป็นเรื่องที่ต้องพิจารณาและมีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์ตรวจวัดเฟส (Phadke และ Kasztenny, 2009) วิธีการประมาณโหมดจากสัญญาณที่วัดได้เป็นที่รู้จักกันในชื่อ วิธีไม่ใช้พารามิเตอร์ของระบบ (Non-parameter method) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีหลายวิธีดังนี้

การระบุโหมดการสั่นด้วยวิธีโพรนี (Prony method) เป็นวิเคราะห์โหมดการสั่นในระบบไฟฟ้าจากรูปคลื่นทางเวลา (Time domain) ของสัญญาณขาออกต่างๆที่สามารถวัดได้ในระบบ วิธีดังกล่าวสามารถประมาณ ค่าความถี่และค่าการหน่วง ขนาดการแกว่ง (Amplitude) และมุมเฟสการแกว่ง (Phase angle) ที่เกิดขึ้นจากการรบกวนขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้า โดยสามารถคำนวณได้ถูกต้องสำหรับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่เท่านั้นแต่เมื่อสัญญาณที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กจะไม่สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ (Hauer, Demeur และ Scharf, 1990) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยใช้สัญญาณที่วัดได้จากระบบมาประมาณโหมดการสั่นได้แก่ การระบุโหมดการสั่นด้วยวิธี Yule Walker, sub-space system identification (Trudnowski และคณะ, 2008) และ การระบุโหมดการสั่นด้วยวิธีสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เพื่อตรวจวัดโหมดการสั่นที่ความถี่ต่ำ (Wies, Pierre และ Trudnowski, 2003)

สำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กมีการนำ Interline Power-Flow Controller (IPFC) และ Unified Power-Flow Controller (UPFC) เพื่อเพิ่มการหน่วงให้กับระบบ (Jiang และคณะ, 2011) และมีการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการปรับระบบควบคุมเพื่อเพิ่มการหน่วงให้ระบบที่ศึกษาแบบหลายสัญญาณขาเข้าและหลายสัญญาณขาออก (Li และคณะ, 2010)

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงสัญญาณขนาดเล็กในระบบไฟฟ้าด้วยวิธีเชิงโหมด

4.2.1 สมการการวิเคราะห์เชิงโหมด

การวิเคราะห์เชิงโหมด สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเป็นการพิจารณาระบบไฟฟ้าโดยใช้พื้นฐานของการทำให้ระบบเป็นเชิงเส้น (Linear system) สามารถช่วยในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า และออกแบบระบบควบคุมเพื่อหน่วงการแกว่งของระบบได้ แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear system) ในการออกแบบระบบควบคุมจึงต้องทำการทดสอบระบบในหลายสภาพการทำงานและการรบกวน (Kundur, 1994; Rogers, 2000)

ระบบไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์ต่างๆสามารถแสดงในแบบปริภูมิสถานะ ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นลำดับหนึ่ง ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \qquad 4\text{-}1$$

โดยที่

x คือ เวกเตอร์ตัวแปรสถานะมีขนาดเท่ากับจำนวนสถานะ n

A คือ เมตริกซ์สถานะมีขนาดเท่ากับ $n \times n$

B คือ เมตริกซ์ขาเข้ามีขนาดเท่ากับ $n \times n_i$ โดย n_i คือจำนวนสัญญาณขาเข้า

u คือ เวกเตอร์ขาเข้ามีขนาดเท่ากับ n_i

y คือ เวกเตอร์ขาออกมีขนาดเท่ากับ n_o โดย n_o คือจำนวนสัญญาณขาออก

C คือ เมตริกซ์ขาออกมีขนาดเท่ากับ $n_o \times n$

D คือ เมตริกซ์ฟีดฟอร์เวิร์ดมีขนาดเท่ากับ $n_o \times n_i$

เมื่อระบบเป็นเชิงเส้น สมการสถานะเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous) ที่เวกเตอร์สัญญาณขาเข้ามีค่าเป็นศูนย์ ผลเฉลยของสมการ 4-2 เป็นดังนี้

$$y_o = \sum_{i=1}^{n} B_i e^{\lambda_i t} = \sum_{i=1}^{n} A_i e^{\alpha_i t} \cos(\beta_i t + \varphi_i) \qquad 4\text{-}2$$

4.2.2 การคำนวณโหมดการแกว่ง

การคำนวณโหมดการแกว่ง (Models of oscillation) พิจารณาจากสมการ 4-2 เมื่อ λ_i คือ รากของสมการที่เป็นคุณลักษณะเฉพาะ (Eigen value) ของเมตริกซ์สถานะ A ที่ได้จากสมการ 4-3 ค่า A_i และ φ_i ขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณขาเข้าที่กระตุ้นระบบ และสัญญาณขาออกที่ทำการวัดใช้ โดย $i = 1,...,n$

$$\det(A - \lambda I) = 0 \qquad 4\text{-}3$$

การเลือกตัวแปรสถานะของระบบสามารถมีได้หลากหลาย แต่ค่าผลเฉลยของสมการ4-3 ซึ่งแสดงถึงค่าลักษณะเฉพาะจะมีค่าหนึ่งเดียว โดยผลเฉลยของสมการลักษณะเฉพาะในกรณีที่เป็นเลขเชิงซ้อนจะมีค่าเป็นคู่ของจำนวนเชิงซ้อน ดังสมการ

$$\lambda_i = \alpha_i \pm j\beta_i \qquad 4\text{-}4$$

ค่าลักษณะเฉพาะ λ_i แสดงถึงโหมดการแกว่งของสัญญาณขาออก โดยค่าส่วนจริง (α_i) ของค่าลักษณะเฉพาะบ่งบอกถึงการหน่วงของระบบ เมื่อ α_i มีค่าเป็นลบแสดงถึงการลดลงของ

การแกว่งของสัญญาณขาออกหรือระบบมีการหน่วงมาก เมื่อ $\alpha_i = 0$ ขนาดของการแกว่งของสัญญาณขาออกจะคงที่ และ เมื่อ α_i มีค่าเป็นบวกการแกว่งของสัญญาณขาออกจะเพิ่มขึ้นหรือระบบไม่มีการหน่วง ส่วนความถี่ของการแกว่งในหน่วยเฮิรตซ์แสดงในส่วนจินตภาพ (β_i) ของรากของสมการที่เป็นลักษณะเฉพาะ ความถี่ของการแกว่งที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ

$$f_i = \frac{imag(\lambda_i)}{2\pi} = \frac{\beta_i}{2\pi} \qquad 4\text{-}5$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจะใช้ค่าอัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio, ξ) ตามสมการที่ 4-6 เป็นการแสดงคุณลักษณะทางเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยทั่วไประบบที่มีเสถียรภาพดีควรมีค่าอัตราส่วนการหน่วงมากกว่า 0.05 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ (Kundur, 1994) การคำนวณค่าอัตราส่วนการหน่วงแสดงดังสมการ

$$\xi_i = \frac{-\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \qquad 4\text{-}6$$

4.2.3 เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ

ค่าลักษณะเฉพาะ (λ_i) แต่ละค่า สามารถคำนวณหาเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางขวา (Right eigenvector, e_i) ได้ตามสมการ 4-7 และ สามารถคำนวณหาเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางซ้าย (Left eigenvector, f_i)ได้ตามสมการ 4-8

$$Ae_i = \lambda_i e_i \qquad 4\text{-}7$$

$$f_i A = \lambda_i f_i \qquad 4\text{-}8$$

ค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางขวาของแต่ละค่าลักษณะเฉพาะ แสดงรูปแบบความสัมพันธ์ของสถานะของระบบต่อโหมดแต่ละการแกว่งที่เกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่า รูปแบบโหมด (Mode shape) ส่วนค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางซ้ายร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์ขาเข้าแสดงถึงขนาดของโหมดที่เกิดขึ้น

4.2.4 ค่าปัจจัยร่วม

ค่าปัจจัยร่วม (Participation factors, p_{ir}) ในสมการ 4-9 แสดงถึงความไว (Sensitivity) ต่อค่าลักษณะเฉพาะในโหมด i (λ_i) กับการเปลี่ยนแปลงของสมาชิกแถวที่ r หลักที่ r ในเมตริกซ์สถานะหรือ กล่าวได้ว่า ค่าปัจจัยร่วมแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง สถานะที่ r ต่อ โหมดการแกว่งที่ i

$$p_{ir} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rr}} = e_{ir} f_{ir} \tag{4-9}$$

ค่าปัจจัยร่วมมีส่วนช่วยในการออกแบบตัวควบคุมระบบอย่างมาก เช่น ถ้าพบว่าโหมดการสั่นที่ต้องการปรับปรุงมีความสัมพันธ์กับตัวแปรสถานะตัวใดมาก หรือมีค่าปัจจัยร่วมมากนั่นเอง แสดงว่า ถ้าทำการปรับตัวควบคุมที่สัมพันธ์กับตัวแปรสถานะนั้นจะทำให้โหมดการสั่นมีการเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าการปรับจากตัวแปรสถานะอื่นๆ

4.2.5 การวัดความสามารถในการควบคุมได้และการสังเกตได้

การวัดความสามารถในการควบคุมได้และการสังเกต (Controllability and observability) มีส่วนสำคัญในการออกแบบระบบควบคุม โดยค่าความสามารถในการควบคุมบ่งบอกถึงโหมดจากค่าลักษณะเฉพาะทีเกิดขึ้นสามารถถูกควบคุมได้ด้วยสัญญาณขาเข้าใดๆได้หรือไม่ ส่วนค่าการสังเกตได้แสดงถึงโหมดจากค่าลักษณะเฉพาะสามารถวัดค่าหรือสังเกตเห็นได้จากสัญญาณขาออกใดได้หรือไม่ ซึ่งค่าทั้งสองสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีทางเรขาคณิต โดยพิจารณาจากเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางขวา $E = [e_1 \quad e_2 \quad \ldots \quad e_n]$ และเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางซ้าย $F = [f_1 \quad f_2 \quad \ldots \quad f_n]$ สำหรับความสามารถในการควบคุมได้ (m_{ci}) แสดงในสมการ 4-10 และ ความสามารถในการสังเกตได้ (m_{oi}) แสดงในสมการ 4-11 ซึ่งสัมพันธ์กับโหมดการสั่น i หรือ ค่าลักษณะเฉพาะ(λ_i)

$$m_{ci}(k) = \cos(\theta(f_i, b_k)) = \frac{\left| b_k^T f_i \right|}{\| f_i \| \| b_k \|} \tag{4-10}$$

$$m_{oi}(l) = \cos(\theta(c_l^T, e_i)) = \frac{\left| c_l e_i \right|}{\| e_i \| \| c_l \|} \tag{4-11}$$

เมื่อ b_k คือ หลักที่ k ของเมตริกซ์ขาเข้า (B) และ c_l คือ หลักที่ l ของเมตริกซ์ขาออก (C) สำหรับ $|\cdot|$ และ $\|\cdot\|$ คือ ค่าสัมบูรณ์ของเฟสเซอร์ (Modulus) และขนาดยูเคลเดียน (Euclidien Norm)

โดยค่า $m_{ci}(k)$ ที่มีค่ามากแสดงว่าโหมดที่ i สามารถถูกควบคุมจากสัญญาณขาเข้าที่ k ได้ดีกว่าสัญญาณขาออกอื่นๆ และ $m_{oi}(l)$ ที่มีค่ามากกว่าแสดงว่าโหมดที่ i สามารถถูกสังเกตได้จากสัญญาณขาออกที่ l ได้ดีกว่าสัญญาณขาออกอื่นๆ

ในการออกแบบระบบควบคุม มีการนำเสนอใช้ค่าร่วมการควบคุมได้และการสังเกต หรือ Joint controllability/observability (Heniche และ Kammwa, 2008) ดังสมการ 4-12 ซึ่งสามารถแสดงถึงการควบคุมโหมดการสั่นที่ i โดยเลือกใช้ชุดควบคุมเข้าไปที่สัญญาณขาเข้าที่ k โดยชุดควบคุมนั้นใช้สัญญาณขาออกที่ l เป็นสัญญาณขาเข้าให้ชุดควบคุมนั้น

$$m_{coi}(k,l) = m_{ci}(k)m_{oi}(l) \qquad 4\text{-}12$$

4.3 การระบุโหมดการสั่นด้วยวิธีประมาณสมการสถานะ

การประมาณแบบจำลองของระบบด้วยวิธีประมาณสมการสถานะ (Subspace methods) เป็นการประมาณค่าเมตริกซ์ A, B, C และ D สำหรับสมการสถานะแบบไม่ต่อเนื่องของระบบจากสัญญาณขาออกและขาเข้าที่วัดได้ในระบบ (Trudnowski และคณะ, 2008) ในรูปแบบสมการดังนี้

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v(t) \end{aligned} \qquad 4\text{-}13$$

โดยสมมุติว่าสัญญาณขาออก $y(t)$ มีจำนวน p สัญญาณและสัญญาณขาเข้า $u(t)$ มีจำนวน m สัญญาณ จำนวนลำดับชั้นของตัวแปรสถานะ $x(t)$ ของระบบมีจำนวนเท่ากับ n เมื่อสมมุติว่าความสัมพันธ์ของสมการสถานะของระบบมีลำดับชั้นน้อยที่สุด ความสัมพันธ์ของสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกชุดเดียวกันนี้สามารถแสดงดังสมการ

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t+1) &= T^{-1}AT\tilde{x}(t) + T^{-1}Bu(t) + \tilde{w}(t) \\ y(t) &= CT\tilde{x}(t) + Du(t) + v(t) \end{aligned} \qquad 4\text{-}14$$

เมื่อเมตริกซ์ T สามารถหาค่าผกผันได้ และ $\tilde{x}(t) = T^{-1}x(t)$ ขั้นตอนในการประมาณแบบจำลองของระบบด้วยวิธีประมาณสมการสถานะ ใช้พื้นฐานดังนี้

ถ้า $\hat{A}$ และ $\hat{C}$ เป็นเมตริกซ์ที่ทราบค่า จะทำให้สามารถประมาณค่าเมตริกซ์ B และ D ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Linear least squares) จากสมการ

$$y(t) = \hat{C}\left(qI - \hat{A}\right)^{-1} Bu(t) + Du(t) + v(t) \qquad 4\text{-}15$$

โดยที่

$$\hat{y}(t \mid B, D) = \hat{C}\left(qI - \hat{A}\right)^{-1} Bu(t) + Du(t) \qquad 4\text{-}16$$

เมื่อเมตริกซ์การสังเกตได้ของระบบสามารถทราบค่าได้ดังสมการ

$$O_r = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{r-1} \end{bmatrix} \qquad 4\text{-}17$$

ทำให้สามารถคำนวณค่า A และ C จากสมการข้างต้น เมตริกซ์การสังเกตได้สามารถประมาณได้จากสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกของระบบด้วยวิธีโดยตรงของกำลังสองน้อยที่สุด (Direct least-squares) เมื่อสามารถประมาณค่าเมตริกซ์การสังเกตได้ จะสามารถคำนวณตัวแปรสถานะ $x(t)$ ของระบบได้ และประมาณสัญญาณรบกวน $\omega(t)$ และ $v(t)$ ของระบบได้

เมื่อคำนวณค่าเมตริกซ์สถานะ A ได้จากสัญญาณที่วัดได้จากระบบ จะสามารถคำนวณหาค่าลักษณะเฉพาะ และประมาณโหมด ในรูปแบบค่าการหน่วงและความถี่ในการสั่นได้ แต่ในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าเมตริกซ์สถานะของระบบจำเป็นต้องแก้สมการเมตริกซ์ที่ซับซ้อนโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดซึ่งตัวแปรที่ต้องการหาค่ามีค่ามากกว่าสมการที่สร้างขึ้น ทำให้ขั้นตอนการคำนวณต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก จึงไม่เหมาะสมในการระบุโหมดการสั่นตามเวลาจริง

4.4 การระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด

การระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด (Ljung, 1999) มีการนำเสนอเพื่อใช้ประมาณโหมดการสั่นของระบบไฟฟ้ากำลังในขณะที่ระบบทำงาน (On-line) หรือตามเวลาจริง (Real-time) เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นในการตรวจวัดความมั่นคงของระบบไฟฟ้าและควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงออกในรูปแบบของค่าการหน่วง (Damping factor, σ) และความถี่ในการสั่น (Frequency of

oscillations, ω) ของสัญญาณที่วัดจากระบบไฟฟ้า $y(t)$ ที่มีคุณสมบัติการสังเกตได้ของโหมดการสั่นที่เกิดขึ้น สัญญาณที่วัดจากระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยโหมดการสั่นจำนวน n โหมดแสดงดังสมการ

$$y(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} + \ldots + A_n e^{\lambda_n t} \qquad 4\text{-}18$$

เมื่อ A_i คือสัมประสิทธิ์ของโหมดการสั่น และ $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$

ความสัมพันธ์ทั่วไปแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา ระหว่างสัญญาณขาออก $y(t)$ และสัญญาณขาเข้า $u((t)$ ที่กระตุ้นโหมดการสั่นของระบบแสดงในรูปแบบของสมการผลต่างเชิงเส้นโดยช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างคงที่ แสดงดังสมการ

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \ldots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \ldots + b_m u(t-m) \qquad 4\text{-}19$$

สมการข้างต้นแสดงถึงสัญญาณขาออกในช่วงการสุ่มตัวอย่างปัจจุบันมีความสัมพันธ์กับสัญญาณขาออกและสัญญาณขาเข้าในช่วงการสุ่มตัวอย่างก่อนหน้าดังสมการ

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \ldots - a_n y(t-n) + b_1 u(t-1) + \ldots + b_m u(t-m) \qquad 4\text{-}20$$

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta \qquad 4\text{-}21$$

เมื่อ

$$\theta = [a_1 \quad \ldots \quad a_n \quad b_1 \quad \ldots \quad b_n]^T \qquad 4\text{-}22$$

$$\varphi(t) = [-y(t-1) \quad \ldots \quad -y(t-n) \quad u(t-1) \quad \ldots \quad u(t-m)]^T \qquad 4\text{-}23$$

เมื่อ a_i และ b_i แสดงถึงสัมประสิทธิ์ของเทอมการถดถอย (Autoregressive, AR) และเทอมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average, MA) ของฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาระหว่างสัญญาณขาออกและสัญญาณขาเข้าดังสมการ

$$G_s(q) = \frac{B(q)}{A(q)} \qquad 4\text{-}24$$

เมื่อ

$$A(q) = 1 + \sum_{i=0}^{p} a_i q^{-i} \qquad 4\text{-}25$$

$$B(q)=\sum_{i=0}^{d} b_i q^{-i} \quad \text{4-26}$$

โดย q แสดงถึงการเลื่อนทางเวลาของสัญญาณ มีความสัมพันธ์ คือ $q^{-1}y[t]=y[t-1]$ สัญญาณขาออก $y(t)$ ที่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณการสุ่มตัวอย่างก่อนหน้าขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ θ ดังนั้นค่าสัญญาณขาออกที่คำนวณได้ $\hat{y}(t\mid\theta)$ สามารถแสดงดังสมการ

$$\hat{y}(t\mid\theta)=\varphi^{T}(t)\theta \quad \text{4-27}$$

การคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ ของสมการข้างต้นสามารถคำนวณโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจากสัญญาณขาออกและสัญญาณขาเข้า (Z^{N}) ที่บันทึกได้ในช่วงการสุ่มตัวอย่าง $1\le t\le N$

$$Z^{N}=\{u(1),y(1),\ldots,u(N),y(N)\} \quad \text{4-28}$$

ขั้นตอนวิธีกำลังสองน้อยที่สุดในการประมาณค่าพารามิเตอร์ θ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมระหว่างค่าสัญญาณขาออกที่คำนวณได้ $\hat{y}(t\mid\theta)$ และค่าสัญญาณขาออกที่วัดค่าได้ $y(t)$ เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยมีสมการวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\min_{\theta} V_N\left(\theta,Z^{N}\right) \quad \text{4-29}$$

เมื่อ

$$V_N\left(\theta,Z^{N}\right)=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\left(y(t)-\hat{y}(t\mid\theta)\right)^2=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\left(y(t)-\varphi^{T}(t)\theta\right)^2 \quad \text{4-30}$$

ค่าที่เหมาะสมสำหรับพารามิเตอร์ θ แสดงในสมการของ $\hat{\theta}_N$ ดังนี้

$$\hat{\theta}_N=\underset{\theta}{\operatorname{argmin}} V_N\left(\theta,Z^{N}\right) \quad \text{4-31}$$

เมื่อ V_N มีรูปแบบเป็นสมการกำลังสองทำให้สามารถหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ดังสมการ

$$0=\frac{d}{d\theta}V_N\left(\theta,Z^{N}\right)=\frac{2}{N}\sum_{t=1}^{N}\varphi(t)\left(y(t)-\varphi^{T}(t)\theta\right) \quad \text{4-32}$$

$$\hat{\theta}_N = \left[\sum_{t=1}^{N} \varphi(t)\varphi^T(t)\right]^{-1} \sum_{t=1}^{N} \varphi(t)y(t) \qquad 4\text{-}33$$

ดังนั้น $\hat{\theta}_N$ จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของสัมประสิทธิ์ของสัญญาณขาออกและสัญญาณขาเข้าในช่วงการสุ่มตัวอย่างก่อนหน้า ซึ่งสามารถนำไปประมาณฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาของระบบและประมาณค่าโหมดการสั่นของระบบได้

การประมาณพารามิเตอร์ของสัมประสิทธิ์ของสัญญาณขาออกและสัญญาณขาเข้า ($\hat{\theta}_N$) เพื่อประมาณฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาของระบบต้องการสัญญาณขาออกและสัญญาณขาเข้า (Z^N) จากการวัดจริงในระบบมีความเหมาะสมของข้อมูลที่เพียงพอต่อการใช้ในการประมาณค่า $\hat{\theta}_N$ โดยทั่วไปขั้นตอนข้างต้นจึงเป็นการประมาณแบบจำลองของระบบจากข้อมูลที่วัดได้ในรูปแบบดังนี้

$$Z^N \rightarrow \hat{\theta}_N \in D_{\mathrm{M}} \qquad 4\text{-}34$$

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ประมาณได้นั้น สามารถพิจารณาจากค่าความผิดพลาดในการประมาณแบบจำลองแสดงดังสมการ

$$\varepsilon(t,\theta_*) = y(t) - \hat{y}(t \mid \theta_*) \qquad 4\text{-}35$$

แบบจำลองที่ประมาณได้จากสัญญาณที่วัดจากระบบจะถูกยอมรับเมื่อค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยเพียงพอ

- ขั้นตอนการคำนวณกำลังสองน้อยที่สุดแบบวนซ้ำ

ขั้นตอนการคำนวณกำลังสองน้อยที่สุดแบบวนซ้ำ (The recursive least-squares algorithm) ถูกใช้เพื่อการประมาณแบบจำลองของระบบด้วยวิธีการประมาณแบบวนซ้ำ (Recursive identification method) จากสัญญาณขาออกและสัญญาณขาเข้าที่วัดจากระบบแบบต่อเนื่องเป็นวิธีที่สามารถประมาณโหมดการสั่นของระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีความถูกต้องและสามารถประมาณค่าในขณะที่ระบบทำงาน หรือตามเวลาจริงได้ โดยรูปแบบทั่วไปในการคำนวณจะอธิบายในส่วนนี้

ขั้นตอนทั่วไปของการประมาณแบบจำลองของระบบเป็นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่สามารถวัดได้จากระบบไปสู่ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าดังสมการ

$$\hat{\theta}_t = F\left(t, Z^t\right) \qquad \text{4-36}$$

เมื่อฟังก์ชัน F ถูกกำหนดขึ้นอย่างแน่นอน โดยทั่วไปสมการข้างต้นไม่สามารถถูกคำนวณด้วยวิธีขั้นตอนวนซ้ำ เนื่องจากฟังก์ชัน F อาจไม่เหมาะสมในบางช่วงเวลากับวิธีดังกล่าว ดังนั้นสมการข้างต้นจึงถูกแทนที่ด้วยสมการที่สามารถคำนวณด้วยวิธีขั้นตอนวนซ้ำดังสมการ

$$\begin{aligned} X(t) &= H\left(t, X(t-1), y(t), u(t)\right) \\ \hat{\theta}_t &= h\left(X(t)\right) \end{aligned} \qquad \text{4-37}$$

เมื่อ $X(t)$ คือเวกเตอร์ขนาดคงที่ซึ่งแสดงถึงข้อมูลสถานะของระบบ ฟังก์ชัน H และ h สามารถคำนวณได้จากค่าคงที่และค่าที่สามารถคำนวณได้ก่อนหน้า จากสมการข้างต้นทำให้สามารถคำนวณ $\hat{\theta}_t$ ได้ในแต่ละช่วงเวลา จากข้อมูลที่วัดได้ล่าสุด $y(t), u(t)$ และค่าที่คำนวณได้จากช่วงการสุ่มก่อนหน้า ดังนั้น $\hat{\theta}_t$ จึงสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t &= \hat{\theta}_{t-1} + \gamma_t Q_\theta\left(X(t), y(t), u(t)\right) \\ X(t) &= X(t-1) + \mu_t Q_X\left(X(t-1), y(t), u(t)\right) \end{aligned} \qquad \text{4-38}$$

เมื่อ γ และ μ เป็นค่าขนาดเล็กที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลก่อนหน้าในหัวข้อต่อไปจะพิจารณาถึงวิธีกำลังสองง่ายเบื้องต้น

- เกณฑ์น้ำหนักกำลังสองน้อยที่สุด

การคำนวณพารามิเตอร์ $\hat{\theta}_t$ ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยเกณฑ์น้ำหนักกำลังสองน้อยที่สุด (Weighted least-squares) แสดงดังสมการ

$$\hat{\theta}_t = \arg\min_{\theta} \sum_{k=1}^{t} \beta(t,k)\left[y(k) - \varphi^T(k)\theta\right]^2 \qquad \text{4-39}$$

เมื่อ

$$\hat{\theta}_t = \overline{R}^{-1}(t) f(t) \qquad \text{4-40}$$

$$\overline{R}(t) = \sum_{k=1}^{t} \beta(t,k)\varphi(k)\varphi^T(k) \qquad \text{4-41}$$

$$f(t) = \sum_{k=1}^{t} \beta(t,k)\varphi(k) y(k) \qquad \text{4-42}$$

ในการคำนวณ $\hat{\theta}_t$ สามารถคำนวณได้จากสัญญาณที่วัดได้จากระบบในช่วงเวลาการสุ่มปัจจุบันและก่อนหน้า โดยช่วงเวลาการสุ่มระหว่าง $\hat{\theta}_t$ และ $\hat{\theta}_{t-1}$ ต้องมีความสัมพันธ์กัน

- ขั้นตอนการวนซ้ำ

ค่าการถ่วงน้ำหนักของสมการเกณฑ์น้ำหนักกำลังสองน้อยที่สุดแสดงดังสมการ

$$\begin{aligned}&\beta(t,k)=\lambda(t)\beta(t-1,k), \qquad 0\le k\le t-1\\&\beta(t,t)=1\end{aligned} \tag{4-43}$$

$$\beta(t,k)=\prod_{k+1}^{t}\lambda(j) \tag{4-44}$$

โดยที่

$$\overline{R}(t)=\lambda(t)\overline{R}(t-1)+\varphi(t)\varphi^{T}(t) \tag{4-45}$$

$$f(t)=\lambda(t)f(t-1)+\varphi(t)y(t) \tag{4-46}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_t &= \overline{R}^{-1}(t)f(t)=\overline{R}^{-1}(t)\left[\lambda(t)f(t-1)+\varphi(t)y(t)\right]\\&=\overline{R}^{-1}(t)\left[\lambda(t)\overline{R}(t-1)\hat{\theta}_{t-1}+\varphi(t)y(t)\right]\\&=\overline{R}^{-1}(t)\left\{\left[\overline{R}(t)-\varphi(t)\varphi^{T}(t)\right]\hat{\theta}_{t-1}+\varphi(t)y(t)\right\}\\&=\hat{\theta}_{t-1}+\overline{R}^{-1}(t)\varphi(t)\left[y(t)-\varphi^{T}(t)\hat{\theta}_{t-1}\right]\end{aligned} \tag{4-47}$$

ดังนั้น

$$\hat{\theta}_t=\hat{\theta}_{t-1}+\overline{R}^{-1}(t)\varphi(t)\left[y(t)-\varphi^{T}(t)\hat{\theta}_{t-1}\right] \tag{4-48}$$

$$\overline{R}(t)=\lambda(t)\overline{R}(t-1)+\varphi(t)\varphi^{T}(t) \tag{4-49}$$

ขั้นตอนการคำนวณ $\hat{\theta}_t$ ด้วยวิธีวนซ้ำข้างต้น ที่เวลา $t-1$ จะเก็บข้อมูลเป็นเวกเตอร์ขนาดจำกัด $X(t-1)=\left[\hat{\theta}_{t-1},\overline{R}(t-1)\right]$ เมื่อ $\overline{R}$ เป็นเมตริกซ์สมมาตรขนาด $d+d(d+1)/2$ และที่เวลา t พารามิเตอร์ $\overline{R}$ จะถูกปรับปรุงตามสมการข้างต้น

- การคำนวณด้วยเมตริกซ์ผกผันที่มีประสิทธิ์ภาพ

กำหนดให้

$$P(t)=\overline{R}^{-1}(t) \tag{4-50}$$

และด้วยคุณสมบัติการผกผันของเมตริกซ์

$$\left[A+BCD\right]^{-1}=A^{-1}-A^{-1}B\left[DA^{-1}B+C^{-1}\right]^{-1}DA^{-1} \qquad \text{4-51}$$

เมื่อ $A=\lambda(t)\overline{R}(t-1)$, $B=D^{T}=\varphi(t)$ และ $C=1$ จะได้

$$P(t)=\frac{1}{\lambda(t)}\left[P(t-1)-\frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^{T}(t)P(t-1)}{\lambda(t)+\varphi^{T}(t)P(t-1)\varphi(t)}\right] \qquad \text{4-52}$$

และ

$$\begin{aligned}\overline{R}^{-1}(t)\varphi(t)&=\frac{1}{\lambda(t)}P(t-1)\varphi(t)-\frac{1}{\lambda(t)}\frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^{T}(t)P(t-1)\varphi(t)}{\lambda(t)+\varphi^{T}(t)P(t-1)\varphi(t)}\\&=\frac{P(t-1)\varphi(t)}{\lambda(t)+\varphi^{T}(t)P(t-1)\varphi(t)}\end{aligned} \qquad \text{4-53}$$

สรุปสมการในการคำนวณด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุดดังนี้

$$\hat{\theta}(t)=\hat{\theta}(t-1)+L(t)\left[y(t)-\varphi^{T}(t)\hat{\theta}(t-1)\right] \qquad \text{4-54}$$

$$L(t)=\frac{P(t-1)\varphi(t)}{\lambda(t)+\varphi^{T}(t)P(t-1)\varphi(t)} \qquad \text{4-55}$$

$$P(t)=\frac{1}{\lambda(t)}\left[P(t-1)-\frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^{T}(t)P(t-1)}{\lambda(t)+\varphi^{T}(t)P(t-1)\varphi(t)}\right] \qquad \text{4-56}$$

- การใช้ตัวคูณค่าปกติ

ขนาดของเมตริกซ์ $\overline{R}(t)$ ขึ้นอยู่กับ $\lambda(t)$ เพื่อปรับสมการ $\overline{R}(t)$ ให้เป็นมาตรฐาน ดังสมการ

$$R(t)=\gamma(t)\overline{R}(t), \qquad \gamma(t)=\left[\sum_{k=1}^{t}\beta(t,k)\right]^{-1} \qquad \text{4-57}$$

โดย

$$\frac{1}{\gamma(t)}=\frac{\lambda(t)}{\gamma(t-1)}+1 \qquad \text{4-58}$$

สามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$
\begin{aligned}
R(t) &= \gamma(t)\left[\lambda(t)\frac{1}{\gamma(t-1)}R(t-1)+\varphi(t)\varphi^{T}(t)\right] \\
&= R(t-1)+\gamma(t)\left[\varphi(t)\varphi^{T}(t)-R(t-1)\right]
\end{aligned}
\qquad 4\text{-}59
$$

สรุปขั้นตอนสมการขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุดมาตรฐานดังนี้

$$
\begin{aligned}
\varepsilon(t) &= y(t)-\varphi^{T}(t)\hat{\theta}(t-1) \\
\hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1)+\gamma(t)R^{-1}(t)\varphi(t)\varepsilon(t) \\
R(t) &= R(t-1)+\gamma(t)\left[\varphi(t)\varphi^{T}(t)-R(t-1)\right]
\end{aligned}
\qquad 4\text{-}60
$$

เมื่อ $\varepsilon(t)$ คือ ค่าความผิดพลาดของการประมาณ $R(t)$ เป็นเมตริกซ์ที่เป็นมาตรฐาน และ $\gamma(t)$ คือค่าตัวคูณการก้าว

- การกำหนดค่าเริ่มต้น

ในการคำนวณด้วยวิธีขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุดจะต้องการค่าเริ่มต้นในการคำนวณ ค่าเริ่มต้นที่เวลา $t = 0$ จะได้

$$
P^{-1}(t_0) = \overline{R}(t_0) = \sum_{k=1}^{t_0}\beta(t_0,k)\varphi(k)\varphi^{T}(k) \qquad 4\text{-}61
$$

$$
\hat{\theta}_{t_0} = P(t_0)\sum_{k=1}^{t_0}\beta(t_0,k)\varphi(k)y(k) \qquad 4\text{-}62
$$

กำหนดให้ $P(0) = P_0$ และ $\hat{\theta}(0) = \theta_I$ จะได้

$$
\hat{\theta}(t) = \left[\beta(t,0)P_0^{-1}+\sum_{k=1}^{t}\beta(t,k)\varphi(k)\varphi^{T}(k)\right]^{-1}\times\left[\beta(t,0)P_0^{-1}\theta_I+\sum_{k=1}^{t}\beta(t,k)\varphi(k)y(k)\right] \qquad 4\text{-}63
$$

- การคำนวณกรณีหลายตัวแปร

พิจารณากรณีหลายตัวแปรได้ดังสมการ

$$
\hat{\theta}_t = \arg\min_{\theta}\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{t}\beta(t,k)\left[y(k)-\varphi^{T}(k)\theta\right]^{T}\Lambda_k^{-1}\left[y(k)-\varphi^{T}(k)\theta\right] \qquad 4\text{-}64
$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + L(t)\left[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)\right] \\ L(t) &= P(t-1)\varphi(t)\left[\lambda(t)\Lambda_t + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)\right]^{-1} \\ P(t) &= \frac{P(t-1) - P(t-1)\varphi(t)\left[\lambda(t)\Lambda_t + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)\right]^{-1}\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda(t)}\end{aligned} \quad 4\text{-}65$$

สมการที่เป็นมาตรฐานแสดงดังนี้

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \\ \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + \gamma(t)R^{-1}(t)\varphi(t)\Lambda_t^{-1}\varepsilon(t) \\ R(t) &= R(t-1) + \gamma(t)\left[\varphi(t)\Lambda_t^{-1}\varphi^T(t) - R(t-1)\right]\end{aligned} \quad 4\text{-}66$$

โดยความสัมพันธ์ของค่าถ่วงน้ำหนักคือ

$$\beta(t,k) = \alpha_k \prod_{k+1}^{t} \lambda(j) \quad 4\text{-}67$$

ค่า α_k เป็นค่าทแยงมุมของ Λ_k^{-1}

4.5 การวิเคราะห์ความไวของโหมด

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ x ต่อค่าลักษณะเฉพาะของโหมดที่สนใจ λ_i แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial x} x \approx \frac{\Delta \lambda_i}{\Delta x / x} \quad 4\text{-}68$$

โดยค่าลักษณะเฉพาะเป็นจำนวนจินตภาพ $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ ซึ่งส่วนจริงของค่าลักษณะเฉพาะแสดงถึงการหน่วงต่อโหมดการสั่นนั้น ซึ่งเมื่อสนใจผลของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะต่อผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าการหน่วงสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$S_{\sigma_i, x} = \mathrm{Re}\left\{\frac{\partial \lambda_i}{\partial x}\right\} x \approx \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta x / x} \quad 4\text{-}69$$

โดย $S_{\sigma_i x}$ เป็นค่าความไวของการหน่วงต่อตัวแปรสถานะเมื่อ $S_{\sigma_i x}$ มีค่าบวกแสดงถึงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของตัวแปรสถานะ x ส่งผลต่อความหน่วงให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการใช้เลือกตัวแปรสถานะเพื่อให้สามารถควบคุมการหน่วงของโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นได้

ส่วนจินตภาพของค่าลักษณะเฉพาะแสดงถึงความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อสนใจผลของการเปลี่ยนแปลงของความถี่ ω_i ต่อผลของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$S_{x,\omega_i} = \left\{\frac{\partial x}{\partial \omega_i}\right\}\omega_i \approx \frac{\Delta x}{\Delta\omega_i/\omega_i} \qquad \text{4-70}$$

โดย $S_{x\omega_i}$ เป็นค่าความไวของตัวแปรสถานะ x ต่อความถี่ของโหมดการสั่น เมื่อ $S_{x\omega_i}$ มีค่าบวกแสดงถึงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความถี่ของโหมดการสั่นส่งผลต่อตัวแปรสถานะให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการใช้เลือกตัวแปรสถานะเพื่อให้สามารถสังเกตความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นได้

ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น การปรับค่าตัวตัวแปรขยาย (G_o) ของตัวสร้างเสถียรภาพในกำเนิดไฟฟ้าใดๆในระบบเพื่อปรับโหมดการสั่นท้องถิ่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการหน่วงต่อโหมดการสั่นอื่นๆด้วย ดังสามารถอธิบายในสมการ

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_I^o &= \Delta\lambda_I + \Delta\lambda_I' \approx \Delta\lambda_I + \frac{\partial\lambda_I}{\partial G_o}\Delta G_o \\ &= \Delta\lambda_I + \frac{\partial\lambda_I}{\partial G_o/G_o}\frac{\Delta G_o}{G_o} = \Delta\lambda_I + S_{IG}\frac{\Delta G_o}{G_o}\end{aligned} \qquad \text{4-71}$$

$$\Delta\lambda_L \approx -\frac{\partial\lambda_L}{\partial G_c}\Delta G_c = -\frac{\partial\lambda_L}{\partial G_c/G_c}\frac{\Delta G_c}{G_c} = -S_{LG}\frac{\Delta G_c}{G_c} \qquad \text{4-72}$$

$$\frac{\Delta G_o}{G_o} = \frac{\Delta G_c}{G_c} = -\frac{\Delta\lambda_L}{S_{LG}} \qquad \text{4-73}$$

$$\Delta\lambda_I^o = \Delta\lambda_I + \mu\Delta\lambda_L \qquad \text{4-74}$$

เมื่อ $\mu = -S_{IG}/S_{LG}$ ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงรวมของการหน่วงของโหมดการสั่นสำหรับโหมดเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ใดๆ($\Delta\lambda_I^o$) เป็นผลรวมของค่าการเปลี่ยนแปลงการหน่วงของโหมดการสั่นที่เกิดจากตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมันเอง ($\Delta\lambda_I$) กับ

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่น ($\Delta\lambda_L$) ที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ภายในตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าอื่น (ΔG_o) ซึ่งส่งผ่านมาจากอัตราส่วนระหว่างค่าความไวในการเปลี่ยนแปลงของค่าการหน่วงสำหรับโหมดเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่และการหน่วงสำหรับโหมดท้องถิ่น (μ)

การคำนวณความไวสำหรับค่าการหน่วงและกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($S_{\sigma_n P_{gm}}$)

$$S_{\sigma_n,P_{gm}} = \mathrm{Re}\left\{\frac{\partial\lambda_n}{\partial P_{gm}}\right\}P_{gm} \approx \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta P_{gm}/P_{gm}} \qquad 4\text{-}75$$

สำหรับโหมดการสั่นที่ i สามารถคำนวณความไวสำหรับค่าการหน่วงโหมดการสั่นที่ i และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังสมการ

$$S_{\sigma_i,P_{gm}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial\sigma_i}{\partial P_{g1}} \\ \dfrac{\partial\sigma_i}{\partial P_{g2}} \\ \vdots \\ \dfrac{\partial\sigma_i}{\partial P_{gm}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{g1,1}/P_{g1,1} & \Delta P_{g2,1}/P_{g2,1} & \cdots & \Delta P_{gm,1}/P_{gm,1} \\ \Delta P_{g1,2}/P_{g1,2} & \Delta P_{g2,2}/P_{g2,2} & \cdots & \Delta P_{gm,2}/P_{gm,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta P_{g1,k}/P_{g1,k} & \Delta P_{g2,k}/P_{g2,k} & \cdots & \Delta P_{gm,k}/P_{gm,k} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta\sigma_{i,1} \\ \Delta\sigma_{i,2} \\ \vdots \\ \Delta\sigma_{i,k} \end{bmatrix} \qquad 4\text{-}76$$

เมื่อ $\sigma_{i,k}$ คือการหน่วงของโหมดที่ i สำหรับ $P_{gm,k}$ คือกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ m ในส่วนของ k คือจำนวนในช่วงการสุ่มที่ k และ Δ แสดงถึงผลต่างของค่าที่ต้องการหาในระหว่างช่วงการสุ่มข้อมูล

การคำนวณความไวสำหรับมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดในระบบไฟฟ้า (S_{δ_m,ω_n})

$$S_{\delta_m,\omega_n} = \left\{\frac{\partial\delta_m}{\partial\omega_n}\right\}\omega_n \approx \frac{\Delta\delta_m}{\Delta\omega_n/\omega_n} \qquad 4\text{-}77$$

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ i สามารถคำนวณความไวสำหรับมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ i และความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดในระบบไฟฟ้าดังสมการ

$$S_{\delta_i,\omega_n} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial\delta_i}{\partial\omega_1} \\ \dfrac{\partial\delta_i}{\partial\omega_2} \\ \vdots \\ \dfrac{\partial\delta_i}{\partial\omega_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega_{1,1}/\omega_{1,1} & \Delta\omega_{1,1}/\omega_{1,1} & \cdots & \Delta\omega_{n,1}/\omega_{n,1} \\ \Delta\omega_{1,2}/\omega_{1,2} & \Delta\omega_{2,2}/\omega_{2,2} & \cdots & \Delta\omega_{n,2}/\omega_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta\omega_{1,k}/\omega_{1,k} & \Delta\omega_{2,k}/\omega_{2,k} & \cdots & \Delta\omega_{n,k}/\omega_{n,k} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta\delta_{i,1} \\ \Delta\delta_{i,2} \\ \vdots \\ \Delta\delta_{i,k} \end{bmatrix} \qquad 4\text{-}78$$

เมื่อ $\delta_{i,k}$ คือมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ i สำหรับ ω_n คือความถี่ของโหมดการสั่นที่ n ที่เกิดในระบบไฟฟ้า และ k คือจำนวนในช่วงการสุ่มที่ k

ความไวสำหรับค่าการหน่วงและกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($S_{\sigma_n P_{gm}}$) ถูกใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับส่งสัญญาณควบคุมจากระบบควบคุมเชิงประสานเข้าสู่ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยความหมายของ $S_{\sigma_n P_{gm}}$ สื่อถึงโหมดการสั่นที่ n สามารถถูกควบคุมจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชุดที่ m ดังนั้นเมื่อต้องการควบคุมโหมดการสั่นที่ n จะต้องสร้างสัญญาณควบคุมเข้าสู่ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชุดที่ m ตามขนาดที่คำนวณได้จากค่าความไวสำหรับค่าการหน่วงและกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ความไวสำหรับมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดในระบบไฟฟ้า (S_{δ_m,ω_n}) ถูกใช้เป็นตัวเลือกสำหรับสัญญาณขาเข้าให้กับระบบควบคุมเชิงประสาน โดยความหมายของ S_{δ_m,ω_n} สื่อถึงความถี่ของโหมดการสั่นที่ n สามารถถูกตรวจวัดหรือสังเกตได้จากสัญญาณมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชุดที่ m ดังนั้นเมื่อต้องการปรับปรุงการหน่วงของโหมดที่สนใจใดๆจึงสามารถใช้ค่า S_{δ_m,ω_n} ในการเลือกขนาดสัญญาณขาเข้าให้ระบบควบคุมเชิงประสานที่ออกแบบได้

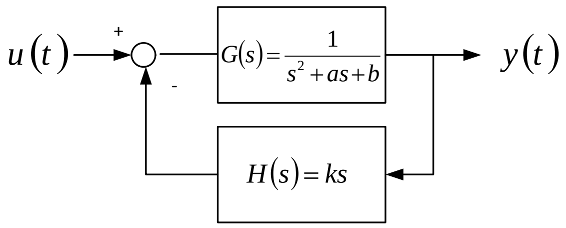
เนื่องจากค่า $S_{\sigma_n P_{gm}}$ และ S_{δ_m,ω_n} สามารถคำนวณได้ตามเวลาจริงจึงทำให้ระบบควบคุมเชิงประสานที่ออกแบบสามารถเลือกขนาดของสัญญาณขาเข้าและส่งขนาดของสัญญาณขาออกเข้าสู่ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ตามเวลาจริง ในขณะที่มีการตรวจพบว่าโหมดการสั่นใดๆในระบบมีค่าการหน่วงต่ำกว่าที่กำหนด ซึ่งเป็นการทำงานแบบที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบแบบปรับตัวได้เองโดยไม่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเมื่อจุดทำงานของระบบมีการเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์ความไวแบบมาตรฐาน$(\partial\lambda/\partial\alpha)$เป็นการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าลักษณะเฉพาะที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ α เพื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ต่อตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะ($\Delta\lambda = (\partial\lambda/\partial\alpha)\Delta\alpha$)ซึ่งมีผลต่อสมรรถนะทางพลวัตของระบบ

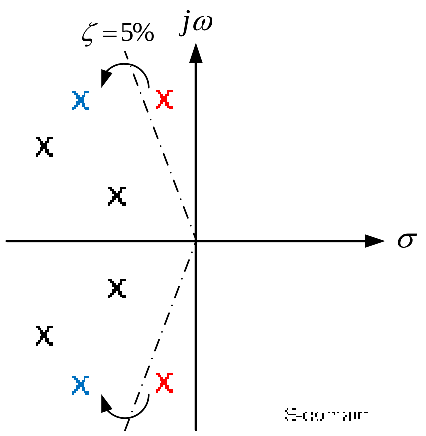
ค่าความไวของพารามิเตอร์ (Parameter sensitivity) $\partial s/\partial\alpha$ เป็นการพิจารณาความไวของค่าลักษณะเฉพาะเทียบกับพารามิเตอร์ของชุดควบคุมในระบบ

ค่าความไวเชิงฟังก์ชัน $\Delta s/\Delta G_{PSS} = -R$ เมื่อพิจารณา $\Delta G_{PSS} = G_{PSS}(s) - 0$ เป็นการพิจารณาความไวของค่าลักษณะเฉพาะเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุม

แนวคิดเกี่ยวกับค่าความไวเชิงฟังก์ชัน เพื่อใช้ในการควบคุมแบบป้อนกลับในระบบไฟฟ้าถูกนำเสนอในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนั้นค่าค่าความไวเชิงฟังก์ชันมีความเหมาะสมในการใช้พิจารณาปรับปรุงค่าการหน่วงของระบบมากกว่าค่าความไวของพารามิเตอร์ (Zhou, 1994)



รูปที่ 4.1 แผนภาพการควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 4.2 การเลื่อนโหมดเพื่อปรับการโหมดการแกว่งที่มีค่าการหน่วงต่ำ

พิจารณาระบบควบคุมแบบป้อนกลับของระบบอันดับที่สอง โดยการควบคุมแบบป้อนกลับเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับ s ดังรูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าลักษณะเฉพาะโดยการพิจารณาจากความไวของพารามิเตอร์ มีค่าเท่ากันกับการพิจารณาจากความไวเชิงฟังก์ชัน ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta s &= \frac{\partial s}{\partial k}\Delta k = \frac{-s}{2s+a+k}\Delta k \\ &= \frac{\partial s}{\partial H}\Delta H = \frac{-s}{2s+a+k}\Delta k\end{aligned} \qquad 4\text{-}79$$

แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในชุดควบคุมแบบป้อนกลับอาจจะไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าลักษณะเฉพาะโดยการพิจารณาจากความไวเชิงฟังก์ชัน จะให้ความถูกต้องในการพิจารณามากกว่า และในระบบที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับหลายชุดทำให้เมื่อพารามิเตอร์ของระบบควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของค่าลักษณะเฉพาะเป็นดังสมการ

$$\Delta s = \sum \frac{\partial s}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i \qquad 4\text{-}80$$

เมื่อ $\alpha_i (i = 1,2,...)$ คือพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในระบบ ดังนั้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าลักษณะเฉพาะในรูปแบบของความไวเชิงฟังก์ชันจะมีความเหมาะสมมากกว่า

$$\Delta s = \frac{\partial s}{\partial H} \Delta H \qquad 4\text{-}81$$

เมื่อ ΔH เป็นการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลร่วมกันของการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดควบคุมแบบป้อนกลับเองและการเปลี่ยนแปลงของชุดป้อนกลับเนื่องจากค่าลักษณะเฉพาะของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังสมการ

$$\Delta H = \Delta H(s) + H(s)' \Delta s \qquad 4\text{-}82$$

เมื่อ $\Delta H(s)$ เป็นการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบป้อนกลับเองในจุดที่ไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าลักษณะเฉพาะของระบบ และ $H(s)'$ คือการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบป้อนกลับจากผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าลักษณะเฉพาะของระบบ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงรวมของค่าลักษณะเฉพาะของระบบเมื่อพิจารณาจากความไวเชิงฟังก์ชัน เป็นดังสมการ

$$\Delta s = \frac{\partial s / \partial H}{1 - (\partial s / \partial H) H(s)'} \Delta H(s) \qquad 4\text{-}83$$

โดยมีข้อสังเกตดังนี้

1. $\partial s / \partial H$ ได้มาจากสมการคุณลักษณะของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบป้อนกลับ ส่วน $H(s)'$ เป็นการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบป้อนกลับเทียบกับค่าลักษณะเฉพาะของระบบ ซึ่งทั้งสองค่านี้จะมีค่าไม่เท่ากัน

2. ΔH เป็นการเปลี่ยนแปลงรวมของฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งเมื่อพิจารณาการควบคุมแบบป้อนกลับเชิงเส้นข้างต้น พบว่า $\Delta H = k\Delta s + s\Delta k$ และ $\Delta H(s) = s\Delta k$

ดังนั้นเมื่อมีการติดตั้งการควบคุมแบบป้อนกลับ $H(s)$ในระบบจึงทำให้ $\Delta H(s) = H(s) - 0$ เพื่อที่จะปรับปรุงการหน่วงของระบบจึงต้องเลื่อนตำแหน่งของโหมดที่ต้องการไปในทิศทาง 180 องศาของตำแหน่งเดิม ทำให้เงื่อนไขในการออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับเป็นการหา $\angle H(s)$และ$|H(s)|$ที่เหมาะสม ซึ่งในการใช้ความไวเชิงฟังก์ชัน มาช่วยในการออกแบบจึงมีความเหมาะสมมากว่าการใช้ความไวของพารามิเตอร์ ซึ่งต้องปรับพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ทีละค่า เช่น K_{PSS} , T_w , T_1 และT_2

เมื่อพิจารณาระบบที่ต้องการออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่สมการสถานะดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}(s)x + \mathbf{B}(s)u \\ y &= \mathbf{C}(s)x + \mathbf{D}(s)u \end{aligned} \qquad \text{4-84}$$

การหาค่าลักษณะเฉพาะจากสมการคุณลักษณะดังนี้

$$\begin{aligned} [\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}(s)]\mu &= 0 \\ \upsilon^T[\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}(s)] &= 0 \end{aligned} \qquad \text{4-85}$$

เมื่อ μ และ υ คือ เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางขวาและทางซ้ายของ $\mathbf{A}(s)$

สามารถทำการหาความไวเชิงฟังก์ชัน เมื่อมีการควบคุมแบบป้อนกลับ $\mathbf{H}(s)$ได้ดังนี้

$$\left[\frac{\partial s}{\partial \mathbf{H}}\mathbf{I} - \frac{\partial \mathbf{A}(s)}{\partial \mathbf{H}} - \frac{\partial \mathbf{A}(s)}{\partial s}\frac{\partial s}{\partial \mathbf{H}}\right]\mu + [s\mathbf{I} - \mathbf{A}(s)]\frac{\partial \mu}{\partial \mathbf{H}} = 0 \qquad \text{4-86}$$

$$\frac{\partial s}{\partial \mathbf{H}} = \frac{\upsilon^T \dfrac{\partial \mathbf{A}(s)}{\partial \mathbf{H}}\mu}{\upsilon^T[\mathbf{I} - \partial\mathbf{A}(s)/\partial s]\mu} \qquad \text{4-87}$$

ความไวเชิงฟังก์ชัน $\partial s/\partial \mathbf{H}$ ถูกใช้ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังและปรับค่าในพารามิเตอร์ตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อเพิ่มการหน่วงของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ที่สนใจ โดยค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางขวาจะแสดงถึงค่าตัวแปรสถานะของระบบที่มีความสัมพันธ์กับโหมดการแกว่งที่เกิดขึ้นและค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางซ้ายแสดงถึงผลของการควบคุมแบบป้อนกลับที่มีต่อโหมดการแกว่งและผลคูณของค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางขวากับค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางซ้ายแสดงถึงการควบคุมแบบป้อนกลับในที่นี้คือตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีผลต่อโหมดการแกว่งที่เกิดขึ้น $\partial s/\partial G_{PSS}$

บทที่ 5

การออกแบบระบบควบคุมเชิงประสาน

ในบทนี้กล่าวถึงกลยุทธ์และหลักการที่นำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กและเสถียรภาพชั่วครู่ โดยระบบควบคุมเชิงประสานที่นำเสนอเป็นระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ที่มีการวัดสัญญาณจากระบบไฟฟ้าและทำการสร้างสัญญาณควบคุมกลับไปสู่ชุดควบคุมแบบท้องถิ่นที่มีการติดตั้งอยู่แล้วในระบบไฟฟ้า โดยในการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วครู่ได้นำหลักการของทฤษฎีของเลียปูโนฟและฟังก์ชันพลังงานมาเป็นกลยุทธการออกแบบโดยทำการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ควบคุม ในส่วนการปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กได้นำหลักการการระบุโหมดการสั่นและการวิเคราะห์ความไวเชิงฟังก์ชัน เพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อควบคุมการทำงานของระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5.1 การออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานเพื่อเพิ่มเสถียรภาพชั่วครู่และเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก

ระเบียบวิธีในการออกแบบระบบควบคุมแบบรวมศูนย์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการหน่วงของโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ระบบควบคุมที่ออกแบบทำหน้าที่เพิ่มการหน่วงของโหมดการสั่นแบบโหมดเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ ที่เกิดขึ้นในระบบเป็นหลักโดยไม่ส่งผลต่อการลดทอนประสิทธิภาพของการรักษาการหน่วงของโหมดการสั่นแบบโหมดท้องถิ่น ซึ่งควบคุมโดยตัวรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ระบบควบคุมนี้ต่อไปจะถูกเรียกว่า ตัวควบคุมเชิงประสาน (Coordinative controller) โดยนำหลักการของการระบุโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าตามเวลาจริง (Online modal identification) และการคำนวณความไวต่อโหมดการสั่น มาใช้ในการออกแบบ ซึ่งสามารถเลือกสัญญาณขาเข้าให้กับระบบควบคุม และเลือกส่งสัญญาณขาออกให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านเป็นสัญญาณควบคุมเสริมเข้าสู่ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และส่งสัญญาณขาออกให้กับอุปกรณ์ควบคุม ผ่านเป็นสัญญาณควบคุมเสริมเข้าสู่ตัวควบคุมการลดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังของอุปกรณ์ควบคุม โดยสามารถเพิ่มการหน่วงให้กับโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบควบคุมนี้สามารถทำงานตามเวลาจริงโดยพารามิเตอร์ในระบบควบคุมจะเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับโหมดการสั่นและค่าการหน่วงที่ตรวจพบในระบบไฟฟ้า

(Jakpattanajit, Hoonchareon และ Yokoyama, 2010) รายละเอียดของระบบควบคุมแสดงรายละเอียดต่อไป

ระบบควบคุมแบบรวมศูนย์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการหน่วงของโหมดการสั่น ประกอบด้วย 3 ส่วนดังต่อไปนี้

1. การตรวจวัดสัญญาณในระบบไฟฟ้า (System measurement)

การตรวจวัดสัญญาณในระบบไฟฟ้า ใช้เป็นสัญญาณขาเข้าให้กับระบบควบคุม เพื่อใช้ในการระบุโหมดการสั่นที่สำคัญที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าและใช้ในการคำนวณความไวต่อโหมดการสั่นในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้มุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการเป็นสัญญาณขาเข้าให้กับการระบุโหมดการสั่นที่สำคัญที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นสัญญาณที่สามารถตรวจวัดได้ในระบบจริงผ่านเครื่องตรวจวัดเฟส (Phase Measurement Unit, PMU) โดยมีความเข้ากันได้ทางเวลาเนื่องจากมีการใช้สัญญาณจากระบบบอกตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (Global Positioning System, GPS) ที่มีการเข้ากันได้ทางเวลา และจากการศึกษาทดลองซึ่งได้แสดงไว้ในบทต่อไป พบว่าเป็นสัญญาณนี้สามารถนำมาประมาณโหมดการสั่นที่เกิดในระบบตามเวลาจริงแล้วให้ค่าความผิดพลาดน้อย ทั้งในส่วนของค่าการหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในช่วงที่ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงภาระในระบบขนาดเล็ก และการรบกวนขนาดใหญ่จากการผิดพร่องในระบบไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานของระบบไฟฟ้า

ในส่วนของการคำนวณความไวต่อโหมดการสั่นได้เลือกใช้สัญญาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นสัญญาณขาเข้าในการคำนวณร่วมกับค่าการหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นที่คำนวณตามเวลาจริงจากขั้นตอนการระบุโหมดการสั่นที่สำคัญ

สัญญาณทางไฟฟ้าที่ตรวจวัดจะถูกปรับปรุงคุณภาพสัญญาณก่อนนำไปคำนวณการระบุโหมดการสั่นและการคำนวณความไวต่อโหมดการสั่น ดังนี้

- ลำดับแรก ทำการปรับค่าอัตราการสุ่มของสัญญาณให้เท่ากัน (Re-sampling data) สำหรับทุกสัญญาณที่ตรวจวัดได้ ในการศึกษาพบว่า สามารถปรับอัตราการสุ่มให้เท่ากันที่ 10 เฮิรตซ์ เป็นค่าที่เหมาะสมเนื่องจากเป็นอัตราสุ่มของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดเฟสส่วนใหญ่ตั้งค่าไว้ และมีความเพียงพอต่อการระบุโหมดการสั่นทั้งในโหมดท้องถิ่นและโหมดเชื่อมต่อระหว่างพื้นที ที่เกิดขึ้นในระบบในช่วง 0.1-3 เฮิรตซ์

- ลำดับที่สอง ทำการกำจัดค่าออฟเซตกระแสตรงของสัญญาณหรือกำจัดค่าเฉลี่ยของสัญญาณ (De-trending data) ซึ่งจะทำให้สัญญาณความผิดพลาดจากการวัดถูกกำจัดไป เช่น สัญญาณที่บางช่วงเวลามีค่ามากหรือน้อยเกินไป ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ถูกต้องจากการวัดถูกกำจัดออกไป

- ลำดับที่สาม ทำการกรองสัญญาณที่วัด (Filtering data) ได้ผ่านวงจรกรองแบบช่วงความถี่ผ่านในช่วง 0.1-3 เฮิรตซ์ เพื่อกำจัดความถี่ของสัญญาณที่ไม่ต้องการพิจารณา เช่น ค่าความถี่สูงมากจากช่วงการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะของการเปลี่ยนแปลงในระบบ และเนื่องจากโหมดการสั่นที่ต้องการประมาณและศึกษาอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ 0.1-3 เฮิรตซ์ หลังจากปรับปรุงคุณภาพสัญญาณเรียบร้อยแล้วสัญญาณที่วัดได้จะถูกเก็บเข้าหน่วยความจำเพื่อเตรียมเข้าใช้ในการคำนวณขั้นต่อไป

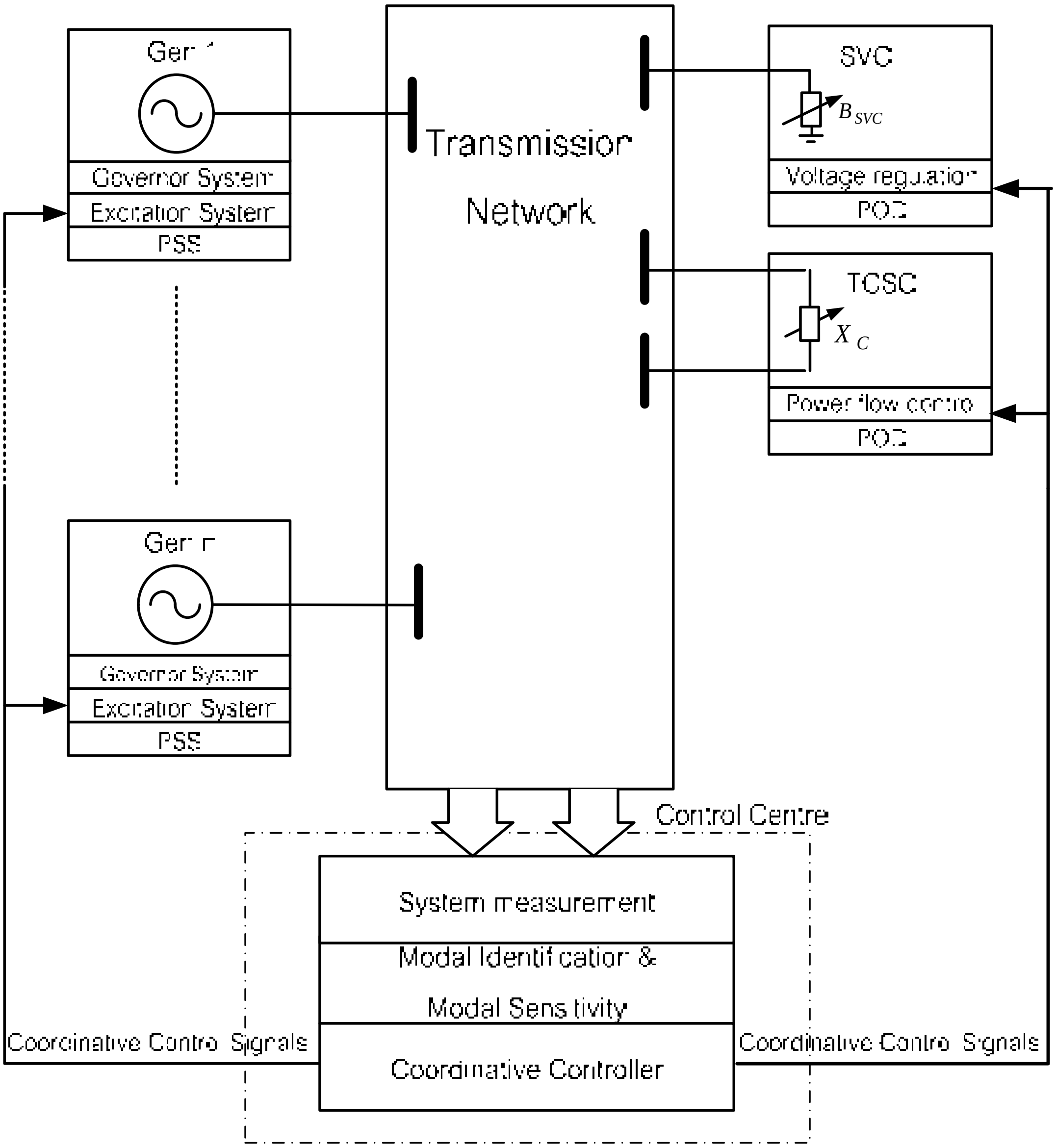
2. การระบุโหมดการสั่นที่สำคัญในระบบไฟฟ้าและการคำนวณความไวต่อโหมดการสั่น (Modal identification and modal sensitivity)

การระบุโหมดการสั่นที่สำคัญในระบบไฟฟ้าใช้สัญญาณมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการเป็นสัญญาณขาเข้าให้กับการระบุโหมดการสั่น โดยสัญญาณขาเข้านี้ถูกปรับคุณภาพแล้วตามขั้นตอนที่ผ่านมา ขั้นตอนวิธีที่เลือกใช้ในการระบุโหมดการสั่นคือ การระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่ประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน โดยรายละเอียดได้ถูกนำเสนอในส่วนต่อไป ในส่วนของการเลือกโหมดเด่นที่สำคัญใช้หลักการเลือกดังนี้ ค่าความหน่วงของโหมดที่สนใจมีค่าน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ และความถี่ของโหมดการสั่นมีค่าระหว่าง 0.1-1.5 เฮิรตซ์

ในส่วนการคำนวณความไวต่อโหมดการสั่น มีการคำนวณ 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการคำนวณหาความไวสำหรับค่าการหน่วงและกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($S_{\sigma_n P_{gm}}$) โดยใช้ข้อมูลขาเข้าที่นำมาใช้ในการคำนวณ ได้แก่ ค่าการหน่วงของโหมดเด่นที่สำคัญและกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ส่วนที่สองเป็นการคำนวณหาความไวสำหรับมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดในระบบไฟฟ้า (S_{δ_m,ω_n}) โดยใช้ข้อมูลขาเข้าที่นำมาใช้ในการคำนวณ ได้แก่ มุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความถี่ของโหมดเด่นสำคัญที่เกิดในระบบไฟฟ้า

3. การสร้างสัญญาณควบคุมเชิงประสาน (Coordinative controller)

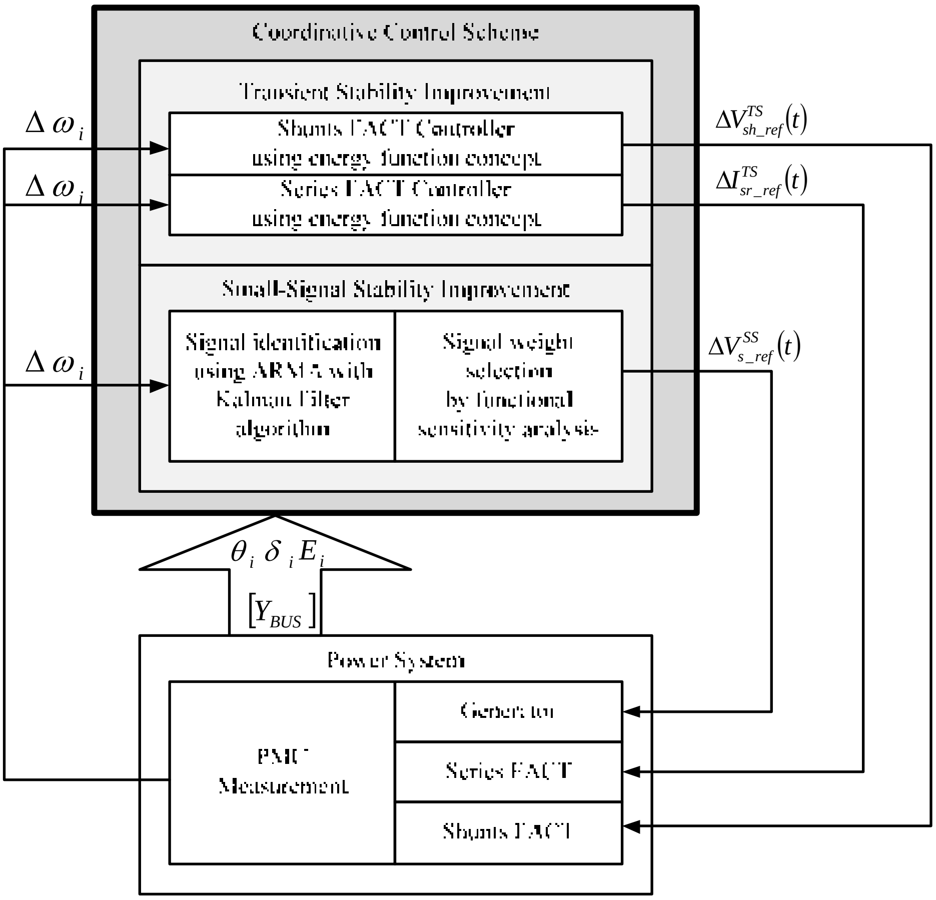
ในส่วนของการสร้างสัญญาณควบคุมโดยในการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วครู่ได้นำหลักการของทฤษฎีของเลียปูโนฟและฟังก์ชันพลังงานมาเป็นกลยุทธการออกแบบโดยทำการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ควบคุม และในส่วนการปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กได้นำหลักการการระบุโหมดการสั่นและการวิเคราะห์ความไวเชิงฟังก์ชัน เพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อควบคุมการทำงานของระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.1 แผนภาพส่วนควบคุมศูนย์กลางสำหรับปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานมีจุดประสงค์เพื่อแก้ปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า 2 ส่วนคือ เสถียรภาพชั่วครู่และเสถียรภาพรบกวนจากสัญญาณขนาดเล็ก ในการออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานที่นำเสนอใช้สัญญาณขาเข้า คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $(\Delta\omega_i)$ และการสร้างสัญญาณที่ออกจากระบบควบคุมที่นำเสนอจำเป็นต้องรู้ข้อมูลจากระบบไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (E_i) มุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (δ_i) มุมของแรงดันที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (θ_i) และพารามิเตอร์ของสายส่งผ่านทางเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ (Y_{BUS}) โดยในการออกแบบระบบควบคุมที่นำเสนอตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า ข้อมูล

สัญญาณที่ได้จากระบบไฟฟ้าถูกต้องและครบถ้วน เนื่องจากในสภาพแวดล้อมจริงไม่สามารถเก็บข้อมูลสัญญาณของระบบไฟฟ้าได้ถูกต้องและครบถ้วนทั้งหมด ตามปกติแล้วในการวัดสัญญาณในระบบไฟฟ้าจะต้องทำการประมาณค่าสัญญาณในส่วนที่ไม่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้จากการประมาณมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 5.2 แผนภาพวิธีการควบคุมเชิงประสานเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการปรับปรุงปัญหาเสถียรภาพชั่วครู่ ใช้หลักการฟังก์ชันพลังงาน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดพลังงานที่เกิดขึ้นจากการถูกกระตุ้นในระบบไฟฟ้า เช่น การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า ในการลดพลังงานดังกล่าวจะกระทำผ่านอุปกรณ์ควบคุม ที่ถูกติดตั้งอยู่แล้วในระบบ ซึ่งอุปกรณ์ควบคุม ถูกแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ อุปกรณ์ควบคุมแบบขนานและแบบอนุกรม หลักการการลดพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าทำโดย ระบบควบคุมที่นำเสนอจะทำการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ควบคุม ให้มีความเหมาะสมต่อการลดพลังงานที่เกิดขึ้น สำหรับ อุปกรณ์ควบคุม แบบขนาน

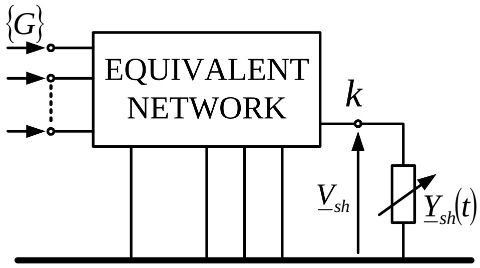
ระบบควบคุมจะส่งแรงดันอ้างอิงใหม่เข้าไปที่อุปกรณ์ควบคุม และสำหรับ อุปกรณ์ควบคุม แบบอนุกรม ระบบควบคุมจะทำการส่งกระแสอ้างอิงเข้าไปสู่อุปกรณ์ควบคุมเช่นเดียวกัน

ระบบควบคุมที่ออกแบบทำการปรับปรุงปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจากเปลี่ยนแปลงสัญญาณขนาดเล็ก โดยทำการระบุโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบด้วยแบบจำลอง ARMA ที่ประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน แล้วจึงทำการปรับปรุงโหมดการสั่นที่มีค่าต่ำให้ดีขึ้นด้วยการวิเคราะห์ความไวเชิงฟังก์ชัน สัญญาณขาออกที่ได้จากระบบควบคุมเชิงประสาน คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงที่ส่งไปสู่ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5.2 การปรับปรุงเสถียรภาพชั่วครู่ด้วยฟังก์ชันพลังงานสำหรับอุปกรณ์ควบคุม

5.2.1 การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีอุปกรณ์ควบคุมแบบขนาน

พิจารณาระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ติดตั้งในระบบ โดยวงสมมูลของสายส่งถูกแทนด้วยสมการเมตริกบัสแอตมิตแตนซ์ ที่ถูกลดรูปให้มีการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบได้ ในส่วนนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่ เมื่อมีอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานต่อในระบบ เช่น Static Var Compensator (SVC) Static Synchronous Compensator (STATCOM) Braking Resistor (BR) Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) โดยถูกแทนด้วยค่าแอดมิตแตนซ์ที่สามารถปรับค่าได้และติดตั้งที่บัส แสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลเมื่ออุปกรณ์ควบคุมแบบขนานต่อในระบบ

เมื่อ $\{G\}$ คือโนดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ k คือโนดที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแบบขนาน และ $\{L\}$ คือโนดใดๆในระบบ

สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่แต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานที่สามารถปรับค่าแอดมิตแตนซ์ $\underline{Y}_{sh}(t) = G_{sh}(t) + jB_{sh}(t)$ ในระบบ แสดงดังสมการ

$$P_i = P_{0i}^0 + \sum_{j=1}^{N} b_{ij} \sin_{ij} + \left[\sum_{j=1}^{N} \beta_{ik}\beta_{kj} \cos\delta_{ij}\right] G_{sh}(t) + \left[\sum_{j=1}^{N} \beta_{ik}\beta_{kj} \sin\delta_{ij}\right] B_{sh}(t) \qquad 5\text{-}1$$

เมื่อ P_{0i}^0 คือกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดสมมูลที่โนดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับ $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ เป็นผลต่างระหว่างมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยที่ $b_{ij} = |\underline{E}_i||\underline{E}_j|B_{ij}$ เป็นขนาดของคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าและมุมเมื่อมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่างโนด $\{i, j\}$ และสัมประสิทธิ์ β_{ik} , β_{kj} เป็นระยะทางไฟฟ้าระหว่างโนด k และโนดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $\{i, j\}$ แสดงดังสมการ

$$\beta_{ik} = X_{SHC} B_{ik} |\underline{E}_i| \qquad \beta_{kj} = X_{SHC} B_{kj} |\underline{E}_j| \qquad 5\text{-}2$$

เมื่อ B_{ik} และ B_{kj} เป็นส่วนจินตภาพของแอตมิตแตนซ์ระหว่างโนดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $\{i, j\}$ กับโนด k และ X_{SHC} เป็นรีแอกแตนซ์ลัดวงจรของระบบที่โนด k ที่อุปกรณ์ควบคุมแบบขนานติดตั้งอยู่ โดยที่อุปกรณ์ควบคุมแบบขนานสามารถปรับค่าส่วนจริง $(G_{sh}(t))$ และส่วนจินตภาพ $(B_{sh}(t))$ ของแอตมิตแตนซ์เพื่อเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สมการสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โนด i เมื่อระบบไฟฟ้ามีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานที่โนด k แสดงดังสมการ

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \Delta\omega_i \qquad 5\text{-}3$$

$$\frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \frac{1}{M_i}\left[P_{mi} - P_{0i}^0\right] - \frac{1}{M_i}\sum_{j=1}^{N} b_{ij}\sin\delta_{ij} - \frac{D_i}{M_i}\Delta\omega_i - \frac{1}{M_i}\left[\sum_{j=1}^{N}\beta_{ik}\beta_{kj}\cos\delta_{ij}\right]G_{sh}(t) - \frac{1}{M_i}\left[\sum_{j=1}^{N}\beta_{ik}\beta_{kj}\sin\delta_{ij}\right]B_{sh}(t) \qquad 5\text{-}4$$

เมื่อ มุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (δ_i) และการเปลี่ยนแปลงความเร็วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $(\Delta\omega_i)$ เป็นตัวแปรสถานะของระบบ สมการข้างต้นแสดงการตอบสนองของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแอตมิตแตนซ์ของอุปกรณ์ควบคุมแบบขนาน

ฟังก์ชันพลังงานที่เป็นไปตามฟังก์ชันเลียปูโนฟที่แสดงถึงพลังงานรวมในระบบที่ประกอบด้วยพลังงานจลน์และพลังงานศักย์แสดงดังสมการ

$$V(\delta', \Delta\omega) = E_k + E_p \qquad 5\text{-}5$$

$$V(\delta', \Delta\omega) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} M_i \Delta\omega_i^2 - \sum_{i=1}^{N}(P_{mi} - P_{0i})(\delta_i' - \hat{\delta}_i') - \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} b_{ij}\left(\cos\delta_{ij}' - \cos\hat{\delta}_{ij}'\right) \qquad 5\text{-}6$$

$$E_k = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} M_i \Delta\omega_i^2 \qquad 5\text{-}7$$

$$E_p = -\sum_{i=1}^{N}(P_{mi} - P_{0i})(\delta_i' - \hat{\delta}_i') - \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} b_{ij}\left(\cos\delta_{ij}' - \cos\hat{\delta}_{ij}'\right) \qquad 5\text{-}8$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ตามเวลาของระบบแสดงดังสมการ

$$\frac{dE_k}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\partial E_k}{\partial \Delta\omega_i} \frac{d\Delta\omega_i}{dt} \qquad 5\text{-}9$$

$$\frac{dE_k}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \Delta\omega_i M_i \frac{d\Delta\omega_i}{dt} \qquad 5\text{-}10$$

$$\begin{aligned}\frac{dE_k}{dt} &= \sum_{i=1}^{N} \Delta\omega_i \left[P_{mi} - P_{0i}^0\right] - \sum_{i=1}^{N} \Delta\omega_i \sum_{j=1}^{N} b_{ij} \sin\delta_{ij} - \sum_{i=1}^{N} D_i \Delta\omega_i^2 \\ &- \left[\sum_{i=1}^{N} \Delta\omega_i \sum_{j=1}^{N} \beta_{ik}\beta_{kj} \cos\delta_{ij}\right] G_{sh}(t) - \left[\sum_{i=1}^{N} \Delta\omega_i \sum_{j=1}^{N} \beta_{ik}\beta_{kj} \sin\delta_{ij}\right] B_{sh}(t)\end{aligned} \qquad 5\text{-}11$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ตามเวลาของระบบแสดงดังสมการ

$$\frac{dE_p}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\partial E_p}{\partial \delta_i'} \frac{d\delta_i'}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\partial E_p}{\partial \delta_i'} \Delta\omega_i \qquad 5\text{-}12$$

$$\frac{dE_p}{dt} = -\sum_{i=1}^{N} \Delta\omega_i \left(P_{mi} - P_{0i}^0\right) + \sum_{i=1}^{N} \Delta\omega_i \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N} b_{ij} \sin\delta_{ij} \qquad 5\text{-}13$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมตามเวลาของระบบมีค่าดังสมการ

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{dE_k}{dt} + \frac{dE_p}{dt} = -\sum_{i=1}^{N} D_i \Delta\omega_i^2 + \dot{V}(sh) \qquad 5\text{-}14$$

ในส่วนแรกของสมการข้างต้นเป็นแสดงให้เห็นว่าพลังงานของระบบจะลดลงได้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า D_i ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงมีค่าเป็นบวกเสมอส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมตามเวลาของระบบมีค่าลดลงหรือมีค่าเป็นลบได้

ในส่วนที่สองของสมการข้างต้นเป็นส่วนที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมตามเวลาของระบบให้มีค่าลดลงได้เร็วยิ่งขึ้น เมื่อมีอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานติดตั้งอยู่ นั่นคือการลดลงของการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมตามเวลาของระบบจะเร็วขึ้น เมื่อ $\dot{V}(sh)$ มีค่าเป็นลบแสดงดังสมการ

$$\dot{V}(sh) = -\left[\sum_{i=1}^{N}\Delta\omega_i\beta_{ik}\sum_{j=1}^{N}\beta_{kj}\cos\delta_{ij}\right]G_{sh}(t) - \left[\sum_{i=1}^{N}\Delta\omega_i\beta_{ik}\sum_{j=1}^{N}\beta_{kj}\sin\delta_{ij}\right]B_{sh}(t) \qquad 5\text{-}15$$

จากสมการข้างต้น $\dot{V}(sh)$ มีค่าเป็นลบ เมื่อ $G_{sh}(t)$ และ $B_{sh}(t)$ มีค่าดังสมการ

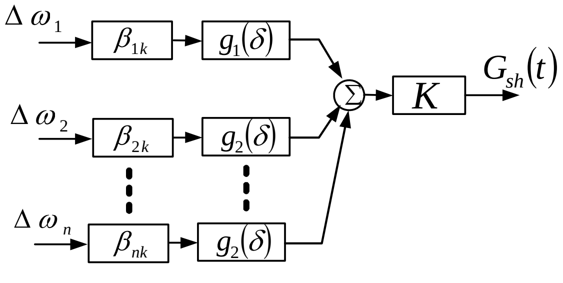
$$G_{sh}(t) = K\sum_{i=1}^{N}\Delta\omega_i\beta_{ik}g_i(\delta) \qquad 5\text{-}16$$

$$B_{sh}(t) = K\sum_{i=1}^{N}\Delta\omega_i\beta_{ik}b_i(\delta) \qquad 5\text{-}17$$

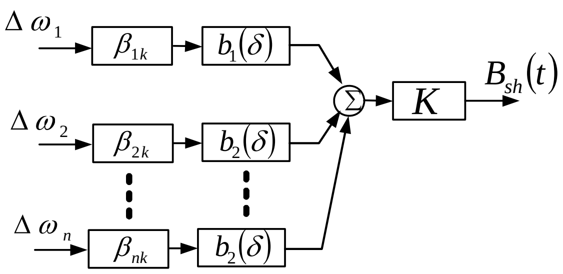
$$g_i(\delta) = \sum_{j=1}^{N}\beta_{kj}\cos\delta_{ij} \qquad 5\text{-}18$$

$$b_i(\delta) = \sum_{j=1}^{N}\beta_{kj}\sin\delta_{ij} \qquad 5\text{-}19$$

ดังนั้นกลยุทธ์ในการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วครู่ให้กับระบบไฟฟ้า ทำได้โดยการเพิ่มความเร็วในการลดลงของพลังงานของระบบผ่านทางการปรับแอดมิตแตนซ์ $\underline{Y}_{sh}(t) = G_{sh}(t) + jB_{sh}(t)$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบขนาน เมื่อ K เป็นตัวคูณควบคุม และการควบคุมทำได้ผ่านสัญญาณที่วัดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังรูปที่ 5.4 และ รูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านการปรับ $G_{sh}(t)$



รูปที่ 5.5 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านการปรับ $B_{sh}(t)$

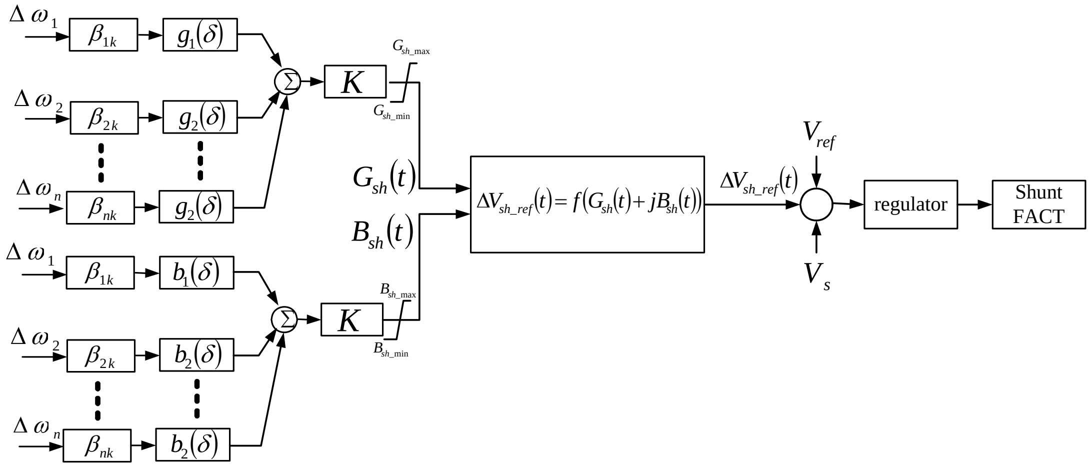
การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านทางการปรับค่า $G_{sh}(t)$ และ $B_{sh}(t)$ จะใช้การเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $(\Delta\omega)$ เป็นสัญญาณขาเข้า ค่าตัวคูณพลวัต $g_i(\delta)$ และ $b_i(\delta)$ ขึ้นอยู่กับมุมกำลังไฟฟ้า $\delta = [\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_n]$ และสัมประสิทธิ์ β_{ik} , β_{kj} เป็นระยะทางไฟฟ้าระหว่างโนด k และโนดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $\{i, j\}$ แสดงดัง5-2 โดยในรูปที่ 5.4 แสดงแผนภาพการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านการปรับ $G_{sh}(t)$ และ ในรูปที่ 5.5แสดงแผนภาพการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านการปรับ $B_{sh}(t)$

ประสิทธิภาพในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานขึ้นอยู่กับสองส่วน โดยในส่วนแรก คือ ระยะทางไฟฟ้าระหว่างโนดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i และโนดที่อุปกรณ์ควบคุมต่ออยู่ k ถ้าสัมประสิทธิ์ระยะทางไฟฟ้ามีค่ามาก (β_{ik} มีค่าสูง) สัญญาณขาเข้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i จะให้ผลต่อการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีสัมประสิทธิ์ระยะทางไฟฟ้าที่มีค่าน้อย ในส่วนที่สอง คือ ค่ามุมกำลังไฟฟ้ามีผลต่อค่าตัวคูณพลวัต $g_i(\delta)$ และ $b_i(\delta)$ กล่าวคือ ในการควบคุมผ่านทางการปรับค่า $G_{sh}(t)$ ค่าตัวคูณพลวัต $g_i(\delta)$ จะมีค่าลดลงเมื่อมุมกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และในการควบคุมผ่านทางการปรับค่า $B_{sh}(t)$ ค่าตัวคูณพลวัต $b_i(\delta)$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อมุมกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นการควบคุมผ่านทางการปรับค่า $B_{sh}(t)$ จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในกรณีที่มีการควบคุมผ่านทางการปรับค่า $G_{sh}(t)$ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อมุมกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น

ในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานโดยทั่วไปจะสามารถปรับค่าแอดมิตแตนซ์ $\underline{Y}_{sh}(t) = G_{sh}(t) + jB_{sh}(t)$ ผ่านสัญญาณควบคุมที่เป็นค่าอ้างอิงที่เป็นแรงดันไฟฟ้า $\Delta V_{sh_{ref}}(t)$ ดังสมการ

$$\Delta V_{sh_ref}(t) = f\left(G_{sh}(t) + jB_{sh}(t)\right) \qquad 5\text{-}20$$

ดังนั้นการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านค่าอ้างอิงที่เป็นแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานผ่านการปรับแรงดันอ้างอิง

สำหรับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต (SVC) ที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมแบบขนานชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถควบคุมได้เฉพาะค่าแอดมิตแตนซ์ในส่วนจินตภาพ $B_{sh}(t)$ ดังนั้นเมื่อต้องการลดพลังงานในระบบที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้น เช่น จากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า และสามารถหาค่า $B_{sh}(t)$ ที่ช่วยลดพลังงานในระบบได้ตามสมการ ซึ่งในการปรับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต ให้มีค่า $B_{sh}(t)$ ตามที่ต้องการ สามารถทำได้ผ่านชุดควบคุมอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต โดยทำการปรับแรงดันอ้างอิงตามสมการ

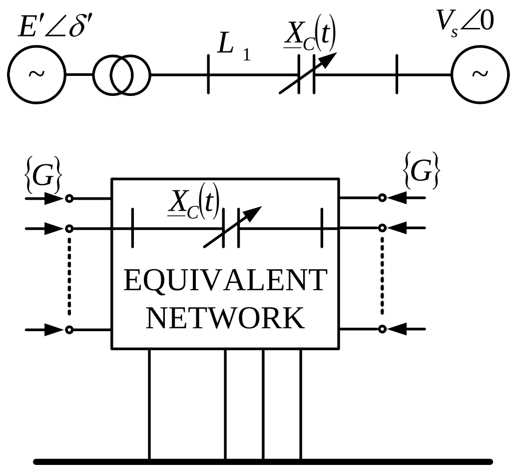
$$\Delta V_{sh_ref}(t) = \frac{\Delta B_{sh}(t)}{K_R} + V_m \qquad 5\text{-}21$$

เมื่อ $\Delta V_{sh_{ref}}(t)$ คือการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงเพื่อให้อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตมีค่าแอดมิตแตนซ์ในส่วนจินตภาพ $B_{sh}(t)$ ตามที่ต้องการ $K_R = 1/X_S$ คืออัตราขยายของการควบคุมอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต ซึ่งขึ้นกับ X_S ซึ่งคือความชันตามคุณสมบัติของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต และ V_m คือขนาดแรงดันที่วัดได้ที่บัสที่ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

5.2.2 การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรม

ในส่วนนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่เมื่อมีอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมต่อในระบบ เช่น Static Synchronous Series Compensator (SSSC) Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) พิจารณาระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $\{G\}$ ติดตั้งในระบบ โดยวง

สมมูลของสายส่งถูกแทนด้วยสมการเมตริกบัสแอดมิตแตนซ์ที่ถูกลดรูปให้มีการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.7 วงจรสมมูลเมื่ออุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมต่อในระบบ

เมื่อพิจารณาแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ที่มีวงจรสมมูลเป็นแรงดันภายในคงที่ E' ต่ออนุกรมเข้ากับรีแอกแตนซ์ชั่วครู่ X'_d โดยละเลยค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าขนานในวงจร สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงดังสมการ

$$P(\delta') = \frac{E'V_s}{X_\Sigma}\sin\delta' \qquad 5\text{-}22$$

เมื่อ V_S คือแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง และ δ' คือผลต่างมุมไฟฟ้าระหว่างแรงดัน V_S และ E' โดยรีแอกแตนซ์สมมูลของสายส่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรม แสดงดังสมการ

$$X_\Sigma = (X'_d + X_T + X_{L1} + X_s) - X_C(t) = X - X_C(t) \qquad 5\text{-}23$$

X_Σ คือรีแอกแตนซ์สมมูลที่เชื่อมต่อระหว่าง V_S และ E' ที่ประกอบด้วยรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง (X_T) รีแอกแตนซ์ของสายส่ง (X_{L1}) รีแอกแตนซ์สมมูลที่บัสอ้างอิง (X_S) และ X คือรีแอกแตนซ์สมมูลของสายส่งเชื่อมโยงระหว่าง V_S และ E' เมื่อไม่มีการชดเชยในสายส่ง ส่วน $X_C(t)$ คือรีแอกแตนซ์ที่ชดเชยในสายส่งโดยค่าเป็นบวกแสดงถึงการทำงานเป็นความจุไฟฟ้าและค่าเป็นลบแสดงถึงการทำงานเป็นความเหนี่ยวนำ

การเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ที่ชดเชยในสายส่ง $X_C(t)$ ส่งผลให้รีแอกแตนซ์สมมูล X_Σ เปลี่ยนแปลง ทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง โดยค่ารีแอกแตนซ์สมมูล X_Σ สามารถแยกสมการเป็นสองส่วนที่ประกอบด้วยรีแอกแตนซ์เมื่อไม่มีการชดเชยในสายส่งและส่วนของรีแอกแตนซ์ที่มีการชดเชยในสายส่ง ดังสมการ

$$\frac{1}{X_\Sigma} = \frac{1}{X - X_C(t)} = \frac{1}{X} + \frac{1}{X_\Sigma}\frac{X_C}{X} \qquad 5\text{-}24$$

ดังนั้นสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจึงสามารถแยกเป็นกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการชดเชยกำลังในสายส่งและกำลังไฟฟ้าจากการชดเชยในสายส่ง ดังสมการ

$$P(\delta') = \frac{E'V_s}{X}\sin\delta' + \frac{E'V_s}{X_\Sigma}\frac{X_C(t)}{X}\sin\delta' = b\sin\delta' + b_\Sigma\frac{X_C(t)}{X}\sin\delta' \qquad 5\text{-}25$$

เมื่อ

$$b_\Sigma = \frac{E'V_s}{X_\Sigma} \qquad 5\text{-}26$$

$$b = \frac{E'V_s}{X} \qquad 5\text{-}27$$

โดย b_Σ คือขนาดของคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าและมุมเมื่อมีอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมต่อในระบบ และ b คือขนาดของคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าและมุมเมื่อไม่มีอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมต่อในระบบ โดยทั่วไปอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมมีการทำงานชดเชยที่น้อยกว่า 100% ของค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง ทำให้ X_Σ มีค่าเป็นบวกเสมอ

เมื่อพิจารณาสมการสวิงและแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ต่ออนุกรมกับรีแอกแตนซ์ชั่วครู่ โดยเมื่อมีอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมต่อในระบบ โดยสมการสวิงของระบบไฟฟ้าแสดงดังสมการ

$$\begin{aligned} &\frac{d\delta'}{dt} = \Delta\omega \\ &M_i\frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - b\sin\delta' - D_i\frac{d\delta'}{dt} - (b_\Sigma\sin\delta')\frac{X_C(t)}{X} \end{aligned} \qquad 5\text{-}28$$

เมื่อ $\Delta\omega$ คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า M_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_m คือ กำลังทางกลขาเข้าจากชุดขับเคลื่อนเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้า D_i คือ สัมประสิทธิ์การหน่วง และ $X_C(t)$ เป็นตัวแปรควบคุมเนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรม และที่จุดสมดุลของการทำงานมุมไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ $(\hat{\delta}' = 0, \Delta\hat{\omega} = 0)$

ฟังก์ชันพลังงานประกอบด้วยพลังงานจลน์ E_k และพลังงานศักย์ E_p ที่เป็นไปตามฟังก์ชันเลียปูโนฟแสดงดังสมการ

$$V(\delta', \Delta\omega) = E_k + E_p \quad 5\text{-}29$$

$$E_k = \frac{1}{2} M \ \Delta\omega^2 \quad 5\text{-}30$$

$$E_p = -\left[P_m\left(\delta' - \hat{\delta}'\right) + b\left(\cos\delta' - \cos\hat{\delta}'\right)\right] \quad 5\text{-}31$$

ที่จุดสมดุลพลังงานในระบบมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อระบบมีการลัดวงจรพลังงานในระบบจะมีค่ามากขึ้น ทำให้มุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความเร็วเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น จุดประสงค์ของกลยุทธ์ในการควบคุมคือทำการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งเพื่อให้ระบบกลับเข้าสู่จุดสมดุลเร็วที่สุด โดย $\hat{\delta}' = 0$ $\Delta\hat{\omega} = 0$ และ $V = 0$ นั่นคือการลดพลังงานที่เกิดจากการลัดวงจรผ่านทางรีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับแบบอนุกรมที่ต่อในระบบ ทำให้ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลับสู่สมดุลเร็วที่สุด ในการออกแบบระบบควบคุมจึงพยายามทำให้การเปลี่ยนแปลงของพลังงานในระบบ $\dot{V}$ มีค่าเป็นลบตลอดช่วงเวลาในการลดพลังงานในระบบ

จากสมการพลังงานของระบบสามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานได้ดังนี้

$$\frac{dE_k}{dt} = \frac{\partial E_k}{\partial\omega}\frac{d\Delta\omega}{dt} = M\Delta\omega\frac{d\Delta\omega}{dt} \quad 5\text{-}32$$

$$\frac{dE_p}{dt} = \frac{\partial E_p}{\partial\delta'}\frac{d\delta'}{dt} = \frac{\partial E_p}{\partial\delta'}\Delta\omega = -\left[P_m - b\sin\delta'\right]\Delta\omega \quad 5\text{-}33$$

เมื่อแทนค่าสมการสวิงในสมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ ได้ดังสมการ

$$\frac{dE_k}{dt} = \left[P_m - b\sin\delta'\right]\Delta\omega - D_i\Delta\omega^2 - \left(b_\Sigma \sin\delta'\right)\frac{X_C(t)}{X}\Delta\omega \quad 5\text{-}34$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบตามฟังก์ชันเลียปูโนฟแสดงดังสมการ

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{dE_k}{dt} + \frac{dE_p}{dt} = -D\Delta\omega^2 - \left(b_\Sigma \sin\delta'\right)\frac{X_C(t)}{X}\Delta\omega \qquad 5\text{-}35$$

ระบบจะมีเสถียรภาพเมื่อการเปลี่ยนพลังงาน $\dot{V}$ มีค่าเป็นลบ จากสมการข้างต้นระบบจะกลับเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นเมื่อ $\dot{V}$ มีค่าเป็นลบมากขึ้น โดยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการควบคุมผ่านตัวแปรควบคุม $X_C(t)$ ซึ่งตัวแปรควบคุม $X_C(t)$ สามารถทำให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานมีค่าเป็นลบเมื่อกลยุทธ์ในการออกแบบเป็นดังสมการ (b_Σ เป็นบวกเสมอเมื่ออุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับแบบอนุกรมมีการทำงานชดเชยที่น้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ของค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง จากการที่ X_Σ มีค่าเป็นบวกเสมอ)

$$X_C(t) = KX\left(\sin\delta'\right)\Delta\omega \qquad 5\text{-}36$$

เมื่อ K เป็นอัตราขยายของชุดควบคุม และ X เป็นค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งเมื่อไม่มีการชดเชยในสายส่งซึ่งมีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อใช้กลยุทธการออกแบบตัวแปรควบคุมข้างต้น ทำให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบมีค่าเป็นลบเสมอดังสมการ

$$\frac{dV}{dt} = -D\Delta\omega^2 - Kb_\Sigma\left(\sin\delta'\right)^2\Delta\omega^2 \qquad 5\text{-}37$$

เมื่อนำสมการกลยุทธ์ในการออกแบบแทนในสมการสวิงจะได้

$$\begin{aligned} &\frac{d\delta'}{dt} = \Delta\omega \\ &M_i\frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - b\sin\delta' - D_i\frac{d\delta'}{dt} - D_{ser}\frac{d\delta'}{dt} \end{aligned} \qquad 5\text{-}38$$

เมื่อ

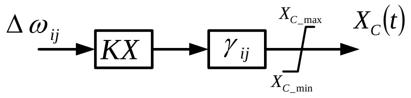
$$D_{ser} = Kb_\Sigma\left(\sin\delta'\right)^2 \geq 0 \qquad 5\text{-}39$$

D_{ser} แสดงถึงค่าการหน่วงเนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรม โดยค่าดังกล่าวจะเป็นบวกเสมอนั่นคือสามารถเพิ่มการหน่วงให้กับระบบได้เมื่อมีการใช้กลยุทธ์ในการควบคุมดังที่กล่าวมา

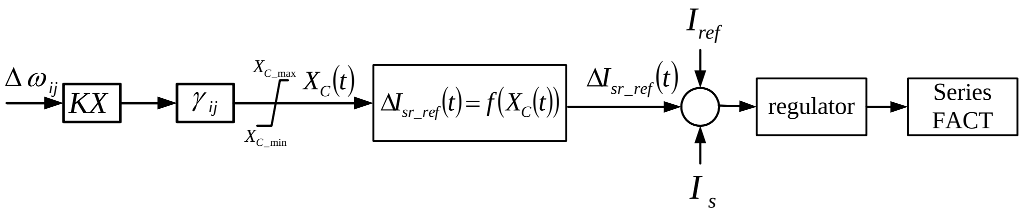
ดังนั้นกลยุทธ์ในการเพิ่มเสถียรภาพชั่วครู่ให้กับระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายชุดทำได้โดยการเพิ่มความเร็วในการลดลงของพลังงานของระบบผ่านทางการปรับการชดเชยในสายส่ง $X_C(t)$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมที่มีการติดตั้งระหว่างโนด i และ j แสดงดังสมการ

$$X_{sr}(t) = KX\gamma_{ij}\Delta\omega_{ij} \qquad 5\text{-}40$$

เมื่อ $\gamma_{ij} = \sin\delta'_{ij} = \sin(\delta'_i - \delta'_j)$ และ $\Delta\omega_{ij} = \Delta\omega_i - \Delta\omega_j$ สำหรับแผนภาพกลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมผ่านการปรับ $X_C(t)$ แสดงดังรูปที่ 5.8 เมื่อสัญญาณขาเข้าของการควบคุมคือผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความเร็วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่างโนด i และ j โดยใช้มุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า δ'_i และ δ'_j ในการคำนวณตัวคูณ γ_{ij} และ X คือรีแอกแตนซ์สมมูลระหว่างโนด i และ j เมื่อไม่มีการชดเชยแบบอนุกรมในสายส่ง เมื่อโนด i และ j เป็นโนดเชื่อมโยงของสายส่งที่มีการชดเชยแบบอนุกรมในรูปที่ 5.9 แสดงกลยุทธการควบคุมอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับแบบอนุกรมผ่านการปรับกระแสอ้างอิง



รูปที่ 5.8 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมผ่านการปรับ $X_C(t)$



รูปที่ 5.9 กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแบบอนุกรมผ่านการปรับกระแสอ้างอิง

5.3 การระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน

การระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน เป็นการนำหลักการทางสถิติ (Stochastic) ซึ่งนำความไม่แน่นอน ข้อมูลทางสถิติ และหลักการของความน่าจะเป็นมาพิจารณาร่วมด้วย ทำให้สามารถหาผลเฉลยของตัวแปรสถานะของระบบที่เวลาปัจจุบัน (t_k) จากข้อมูลที่ตรวจวัดและคำนวณได้จากเวลาก่อนหน้า (t_{k-1})

การหาคำตอบหรือการประมาณตัวแปรสถานะของระบบโดยใช้แบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน สามารถหาผลเฉลยของตัวแปรสถานะของระบบที่ต้องการทราบค่าในเวลาปัจจุบัน $(\hat{\theta}[k])$ ที่ได้มาจากค่าผลเฉลยของตัวแปรสถานะของระบบที่ต้องการทราบค่าในเวลาก่อนหน้า $(\hat{\theta}[k-1])$ และผลเฉลยนี้ยังขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างค่าสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือค่าที่วัดจากเครื่องมือวัดในเวลาปัจจุบัน $(y[k])$ โดยรวมผลของความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด $v[k]$ เข้าไปด้วย กับ ส่วนที่สองคือค่าประมาณที่เครื่องมือวัดควรจะวัดได้ $(\varphi^T[k]\hat{\theta}[k-1])$ โดยค่าในส่วนที่สองนี้ได้มาจากตัวแปรสถานะที่ต้องการทราบค่าในเวลาก่อนหน้า $(\hat{\theta}[k-1])$ กับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดในเวลาก่อนหน้า $(\varphi^T[k])$ โดยที่ผลต่างระหว่างค่าที่เครื่องมือวัดวัดได้จริงกับค่าที่ควรจะวัดได้ $(y[k]-\varphi^T[k]\hat{\theta}[k-1])$ ถูกนำมาให้น้ำหนักโดยการคูณด้วยตัวคูณคาล์มาน (Kalman Gain, $L[k]$) แล้วนำผลที่ได้มาใช้แก้ไขค่าตัวแปรสถานะที่คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า $(\hat{\theta}[k-1])$ จะสังเกตได้ว่าค่าที่นำมาใช้แก้ไขผลเฉลยของตัวแปรสถานะที่ต้องการทราบค่า $(\hat{\theta}[k])$ ขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างค่าที่เครื่องมือวัดวัดได้จริงกับค่าที่ควรวัดได้และตัวคูณคาล์มาน $(L[k]\lfloor y[k]-\varphi^T[k]\hat{\theta}[k-1]\rfloor)$ กล่าวคือ ถ้าผลต่างระหว่างค่าที่เครื่องมือวัดสามารถวัดได้จริงกับค่าที่ควรจะวัดได้มีค่ามากและนั่นคือข้อมูลมีความน่าเชื่อถือน้อยทำให้ค่าตัวคูณคาล์มานที่คำนวณได้จะมีค่าสูง ทำให้ผลเฉลยของตัวแปรที่ต้องการทราบค่าต้องแก้ไขคำตอบมาก ($L[k]\lfloor y[k]-\varphi^T[k]\hat{\theta}[k-1]\rfloor$ มีค่ามาก) ในทางกลับกันถ้าผลต่างระหว่างค่าที่เครื่องมือวัดวัดได้จริงกับค่าที่ควรวัดได้มีค่าน้อยและนั่นคือข้อมูลมีความน่าเชื่อถือทำให้ค่าตัวคูณคาล์มานที่คำนวณได้มีค่าต่ำ ทำให้ผลเฉลยของตัวแปรที่ต้องการทราบค่าถูกแก้ไขเพียงเล็กน้อย($L[k]\lfloor y[k]-\varphi^T[k]\hat{\theta}[k-1]\rfloor$ มีค่าน้อย) โดยการคำนวณค่าตัวคูณคาล์มาน เป็นการคำนวณที่ได้นำข้อมูลทางสถิติของระบบมาพิจารณาแล้ว และเป็นค่าตัวคูณที่ทำให้ $P[k]$ มีค่าต่ำสุด จึงเป็นที่ยอมรับว่าขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มานเป็นการประมาณสถานะของระบบแบบเหมาะสมที่สุด (Optimal state estimator)

การระบุโหมดการสั่นโดยใช้แบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน สามารถกำจัดผลของสัญญาณรบกวนที่มีผล

ต่อเครื่องมือวัดสัญญาณในระบบ ความไม่สมบูรณ์ของเครื่องมือวัดและความคลาดเคลื่อนในการวัด ผ่านทางตัวแปรสุ่ม $v[k]$ ซึ่งแสดงถึงความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดในการประมาณตัวแปรสถานะของระบบ

การระบุโหมดการสั่นโดยใช้แบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน สามารถกำจัดผลของปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมข้างเคียงของระบบ ผ่านทางตัวแปรสุ่ม $w[k]$ซึ่งแสดงถึงผลของปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการประมาณตัวแปรสถานะของระบบ

ตัวแปรสุ่ม $v[k]$ซึ่งแสดงถึงความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดและตัวแปรสุ่ม $w[k]$ซึ่งแสดงถึงผลของปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อระบบ เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์นั้นมีความเหมาะสม เป็นไปตามทฤษฎีข้อจำกัดศูนย์กลาง (Central limit theorem) กล่าวไว้ว่าเมื่อนำตัวแปรสุ่มหลายตัวมารวมกันผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่พบในสภาพแวดล้อมจริงมักมีที่มาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งรวมกัน จึงสามารถประมาณได้ว่าสัญญาณรบกวนเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ ที่สอดคล้องกับทฤษฎีข้อจำกัดศูนย์กลางและโดยทั่วไปตัวแปรสุ่มสามารถหาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนได้จากการทดลอง ซึ่งเพียงพอต่อการอธิบายฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function) ของตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ขั้นตอนการหาผลเฉลยด้วยขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มานมีความสมบูรณ์ทางคณิตศาสตร์

การตั้งสมมุติฐานว่าตัวแปรสุ่ม $v[k]$และ $w[k]$ เป็นสัญญาณรบกวนขาว(White noise) มีความเหมาะสมเนื่องจากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนขาวครอบคลุมทุกความถี่ตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ โดยในทางปฏิบัติระบบจะตอบสนองได้ในช่วงความถี่ที่จำกัด ดังนั้นเมื่อมองจากมุมมองของระบบที่มีช่วงตอบสนองที่จำกัด การใช้สัญญาณรบกวนขาวสำหรับตัวแปรสุ่ม $v[k]$และ $w[k]$มีความเหมาะสมและช่วยลดความซับซ้อนของการพัฒนาขั้นตอนการแก้ปัญหา

ขั้นตอนการหาผลเฉลยตัวแปรสถานะของระบบโดยใช้แบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ด้วยขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มานตามที่อธิบายในข้อ1.นั้นการได้มาของผลเฉลยของตัวแปรสถานะของระบบที่ต้องการทราบค่าในเวลาปัจจุบัน(t_k)ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่วัดและคำนวณได้จากช่วงเวลาก่อนหน้านั้นเพียงช่วงเวลาเดียว (t_{k-1}) ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานจึงต้องการจำนวนของหน่วยความจำเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณน้อยกว่าการหาผลเฉลยเพื่อประมาณสถานะของระบบด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average) หรือ วิธีขั้นตอนการคำนวณแบบวนซ้ำแบบอื่นๆ

รูปแบบสมการวงจรกรองของคาล์มาน สำหรับการประมาณสมการสถานะของระบบ แสดงสมการ

$$\begin{aligned} x(t+1) &= F(t)x(t) + w(t) \\ y(t) &= H(t)x(t) + v(t) \end{aligned} \qquad 5\text{-}41$$

เมื่อพิจารณาสัญญาณขาออกของระบบเป็นแบบการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression model) ดังสมการ

$$\hat{y}(t \mid \theta) = \varphi^T(t)\theta \qquad 5\text{-}42$$

สามารถนำสมการวงจรกรองของคาล์มานเพื่อใช้หาผลเฉลยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \theta(t+1) &= \theta(t) \\ y(t) &= \varphi^T(t)\theta(t) + v(t) \end{aligned} \qquad 5\text{-}43$$

จากสมการวงจรกรองของคาล์มาน เมื่อกำหนดให้

$F(t) = I$, $H(t) = \varphi^T(t)$, $R_1(t) = 0 \left[= E\omega(t)\omega^T(t)\right]$, $E\nu(t)\nu^T(t) = R_2(t)$, $\lambda \equiv 1$ และ

$\Lambda_t = R_2(t)$

ข้อสังเกตในการใช้สมการวงจรกรองของคาล์มานในการประมาณแบบจำลองของระบบ

- ถ้าสัญญาณรบกวน $\nu(t)$ เป็นแบบเกาส์และเป็นการรบกวนแบบขาวแล้วทฤษฎีวงจรกรองของคาล์มาน จะเป็นแบบการกระจายหลัง (Posterior distribution) ของ $\theta(t)$ นั่นคือ Z^{t-1} เป็นค่าเฉลี่ยแบบเกาส์ (Gaussian with mean value, $\hat{\theta}(t)$) และเมตริกความแปรปรวน (Covariance matrix, $P(t)$) มีค่าตามสมการ 5-49 โดย $\lambda(t) = 1$ และ $\Lambda_t = R_2(t)$
- จากเงื่อนไขค่าเริ่มต้นในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า $\hat{\theta}(0)$ เป็นค่าเฉลี่ยและ $P(0)$ เป็นค่าความแปรปรวนของสัญญาณที่วัดได้ ซึ่งใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ
- ค่า Λ_t ในกรณีหลายตัวแปรมีค่าเท่ากับความแปรปรวนของสมการความผิดพลาด และในกรณีตัวแปรเดียว $\alpha_t^{-1} = E\nu^2(t)$ โดยจะใช้ $\beta(k,k) = \alpha_k$ ในการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก

ในกรณีที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา การประมาณสมการสถานะของระบบจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นกัน ดังนั้นค่าการถ่วงน้ำหนักปัจจุบันจะมีความสัมพันธ์กับค่าการถ่วงน้ำหนักของช่วงการสุ่มก่อนหน้า โดยเมื่อเลือกใช้ $\lambda(j) < 1$ และกำหนดให้ $\lambda(j) \equiv \lambda$ จะได้

$$\beta(t,k)=\lambda^{t-k} \tag{5-44}$$

โดยเรียก λ ว่า ปัจจัยการลืม (Forgetting factor) โดยความสัมพันธ์ของ $\gamma(t)$ แสดงดังสมการ

$$\gamma(t)\equiv\gamma=1-\lambda \tag{5-45}$$

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหามีคุณสมบัติเป็นแบบสุ่มมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned}\theta(t+1)&=\theta(t)+w(t)\\ Ew(t)w^T(t)&=R_1(t)\end{aligned} \tag{5-46}$$

โดย w คือ การรบกวนเกาส์แบบขาว และ $E\nu^2(t)=R_2(t)$ ทำให้สามารถใช้สมการวงจรกรองของคาล์มานในการคำนวณพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณของระบบได้ดังสมการ

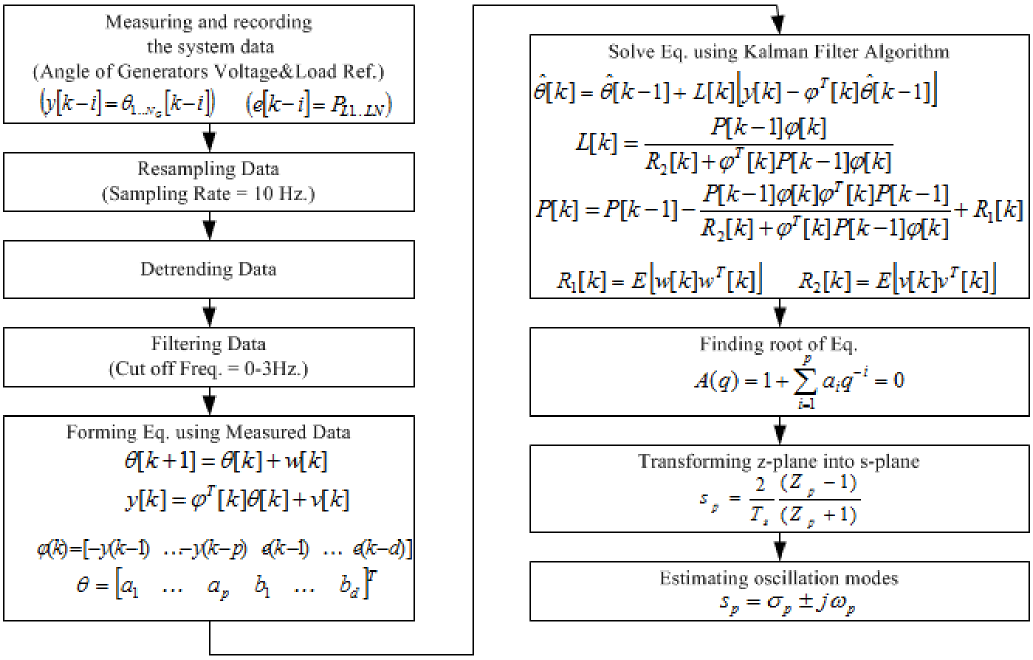
$$\hat{\theta}(t)=\hat{\theta}(t-1)+L(t)\left[y(t)-\varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)\right] \tag{5-47}$$

$$L(t)=\frac{P(t-1)\varphi(t)}{R_2(t)+\varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \tag{5-48}$$

$$P(t)=P(t-1)-\frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{R_2(t)+\varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}+R_1(t) \tag{5-49}$$

โดยค่า $L(t)$ มีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์เมื่อมีการคำนวณอย่างต่อเนื่อง ทำให้พารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณเข้าสู่คำตอบที่ต้องการอย่างถูกต้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การประมาณสมการสถานะของระบบแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่ประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน เพื่อคำนวณโหมดการสั่นที่สำคัญของระบบไฟฟ้า โดยมีการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการประมาณสมการสถานะของระบบแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด โดยการเปรียบเทียบผลในแง่ของความผิดพลาดในค่าที่คำนวณได้และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 5.10 แผนภาพขั้นตอนการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน

5.4 การปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กด้วยค่าความไวเชิงฟังก์ชัน

การออกแบบระบบความคุมโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ด้วยแนวคิดค่าความไวเชิงฟังก์ชัน จากสมการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของการควบคุมแบบป้อนกลับในระบบต่อโหมดการแกว่งในระบบดังสมการ

$$\Delta s = \frac{\partial s/\partial H}{1-(\partial s/\partial H)H(s)'}\Delta H(s) \qquad 5\text{-}50$$

เมื่อ

$$S_{i,j} = \frac{\partial s/\partial H_j}{1-(\partial s/\partial H_j)H_j(s)'}\Big|_{s=\lambda_i} \qquad 5\text{-}51$$

โดย S_{ij} คือ ค่าความไวเชิงฟังก์ชันของโหมดการแกว่ง i เทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ j เมื่อระบบที่ศึกษาประกอบด้วยโหมดการแกว่งหลายโหมด (n ชุด) และมีชุดควบคุมแบบป้อนกลับหลายชุด (m ชุด) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของโหมดการแกว่งเนื่องจากชุดควบคุมแบบป้อนกลับหลายชุดในระบบ แสดงดังสมการ

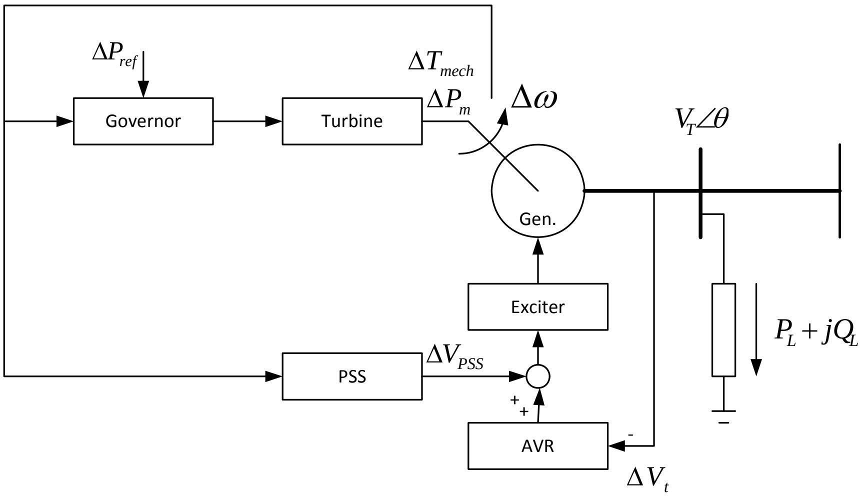
$$\Delta s = \mathbf{S} \times \Delta \mathbf{H} \qquad 5\text{-}52$$

เมื่อ $\Delta s = \begin{bmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \vdots \\ \Delta s_n \end{bmatrix}$ และ $\Delta \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \vdots \\ \Delta H_m \end{bmatrix}$ และ $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,m} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \dots & S_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n,1} & S_{n,2} & \dots & S_{n,m} \end{bmatrix}$

สำหรับโหมดการแกว่ง i การเลื่อนโหมดการแกว่งในระบบขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันถ่ายโอนที่เป็นชุดควบคุมของระบบ m ชุด

$$\Delta s_i = \sum_{j=1}^{m} S_{i,j} \times \Delta H(s_i) \Big|_{s_i=\lambda_i} \qquad 5\text{-}53$$

$$\Delta \lambda_i = S_{i,1} \times \Delta H(\lambda_i) + S_{i,2} \times \Delta H(\lambda_i) + \ldots + S_{i,m} \times \Delta H(\lambda_i) \qquad 5\text{-}54$$



รูปที่ 5.11 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการควบคุมด้วยระบบกระตุ้นและติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังรูปที่ 5.11 โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีสมการสถานะอันดับที่สี่ ระบบควบคุมกังหันถูกพิจารณาเป็นแบบคงตัว ระบบกระตุ้นพิจารณาเป็นสมการอันดับที่สาม โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดควบคุมแรงดันเป็นสมการอันดับหนึ่ง และ ตัวสร้างเสถียรภาพ

ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิจารณาเป็นสมการอันดับสาม โดยสามารถแสดงสมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีชุดควบคุมดังนี้

$$\left.\begin{aligned}\Delta\dot{x} &= A(s)\Delta x + B(s)\Delta u \\ \Delta y &= C(s)\Delta x + D(s)\Delta u\end{aligned}\right|_{\lambda=s} \qquad 5\text{-}55$$

เมื่อ

$$\Delta x = \begin{bmatrix}\Delta E'_q \\ \Delta E'_d \\ \Delta\delta \\ \Delta\omega\end{bmatrix} \qquad \Delta u = \begin{bmatrix}\Delta I_q \\ \Delta I_d \\ \Delta P_m \\ \Delta V_{ref} \\ \Delta E_t\end{bmatrix} \qquad \Delta y = \begin{bmatrix}E_q \\ E_d\end{bmatrix} \qquad 5\text{-}56$$

$$A(s) = \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{T'_{do}} & 0 & 0 & \dfrac{G_{EXC}(s)G_{pss}(s)}{T'_{do}} \\ 0 & -\dfrac{1}{T'_{qo}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_0 \\ -\dfrac{I_{qo}}{M} & -\dfrac{I_{do}}{M} & -\dfrac{D}{M} & 0 \end{bmatrix} \qquad 5\text{-}57$$

$$B(s) = \begin{bmatrix} 0 & -\dfrac{(X_d - X'_d)}{T'_{do}} & 0 & \dfrac{G_{EXC}(s)}{T'_{do}} & -\dfrac{G_{EXC}(s)G_{AVR}(s)}{T'_{do}} \\ \dfrac{(X_q - X'_q)}{T'_{qo}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\dfrac{E'_{qo} + (X'_q - X'_d)I_{do}}{M} & -\dfrac{E'_{do} + (X'_q - X'_d)I_{qo}}{M} & \dfrac{1}{M} & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad 5\text{-}58$$

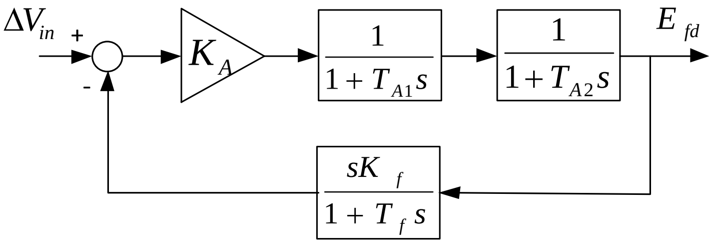
$$C(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad 5\text{-}59$$

$$D(s) = \begin{bmatrix} -r_a & -X'_d & 0 & 0 & 0 \\ X'_q & -r_a & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad 5\text{-}60$$

ในการคำนวณหาความไวเชิงฟังก์ชันตามสมการ 5-51 สำหรับสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังรูปที่ 5.11 ที่มีสมการสถานะตามสมการ 5-55 ต้องพิจารณาหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนและ

สมการอนุพันธ์ของระบบกระตุ้นและตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังที่แสดงต่อไปนี้

ในลำดับแรกจะแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการอนุพันธ์ของระบบกระตุ้นโดยพิจารณาจากระบบกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบกระตุ้น

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบกระตุ้นในรูปที่ 5.12 แสดงดังสมการ

$$G_{EXC}(s)=\frac{K_AT_fs+K_A}{T_{A1}T_{A2}T_fs^3+\left(T_{A1}T_{A2}+\left(T_{A1}+T_{A2}\right)T_f\right)s^2+\left(\left(T_{A1}+T_{A2}\right)+T_f+K_AK_f\right)s+1} \quad \text{5-61}$$

$$G_{EXC}(s)=\frac{A_{1EXC}s+A_{0EXC}}{B_{3EXC}s^3+B_{2EXC}s^2+B_{1EXC}s+B_{0EXC}} \quad \text{5-62}$$

เมื่อกำหนดให้

$A_{1EXC}=K_AT_f$

$A_{0EXC}=K_A$

$B_{3EXC}=T_{A1}T_{A2}T_f$

$B_{2EXC}=T_{A1}T_{A2}+\left(T_{A1}+T_{A2}\right)T_f$

$B_{1EXC}=\left(T_{A1}+T_{A2}\right)+T_f+K_AK_f$

$B_{0EXC}=1$

$A_{G_{EXC}(s)}=K_AT_fs+K_A$

$B_{G_{EXC}(s)}=T_{A1}T_{A2}T_fs^3+\left(T_{A1}T_{A2}+\left(T_{A1}+T_{A2}\right)T_f\right)s^2+\left(\left(T_{A1}+T_{A2}\right)+T_f+K_AK_f\right)s+1$

เมื่อสามารถหาสมการอนุพันธ์ของ $A'_{G_{EXC(s)}}$ และ $B'_{G_{EXC(s)}}$ ได้ดังนี้

$$A'_{G_{EXC}(s)} = K_A T_f \qquad 5\text{-}63$$

$$B'_{G_{EXC}(s)} = 3T_{A1}T_{A2}T_f s^2 + 2\left(T_{A1}T_{A2} + \left(T_{A1} + T_{A2}\right)T_f\right)s + \left(\left(T_{A1} + T_{A2}\right) + T_f + K_A K_f\right) \qquad 5\text{-}64$$

ดังนั้นสามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$G'_{EXC}(s) = \frac{B_{G_{EXC}(s)}A'_{G_{EXC}(s)} - A_{G_{EXC}(s)}B'_{G_{EXC}(s)}}{B^2_{G_{EXC}(s)}} \qquad 5\text{-}65$$

$$G'_{EXC}(s) = \frac{C_{3EXC}s^3 + C_{2EXC}S^2 + C_{1EXC}s + C_{0EXC}}{\left[D_{3EXC}s^3 + D_{2EXC}s^2 + D_{1EXC}s^1 + D_{0EXC}\right]^2} \qquad 5\text{-}66$$

เมื่อกำหนดให้

$C_{3EXC} = -K_A T_{A1}T_{A2}T_f^2$

$C_{2EXC} = -K_A T_f \left(3T_{A1}T_{A2} + \left(T_{A1} + T_{A2}\right)T_f\right)$

$C_{1EXC} = -2K_A \left(T_{A1}T_{A2} + \left(T_{A1} + T_{A2}\right)T_f\right)$

$C_{0EXC} = -K_A \left(\left(T_{A1} + T_{A2}\right) + K_A K_f\right)$

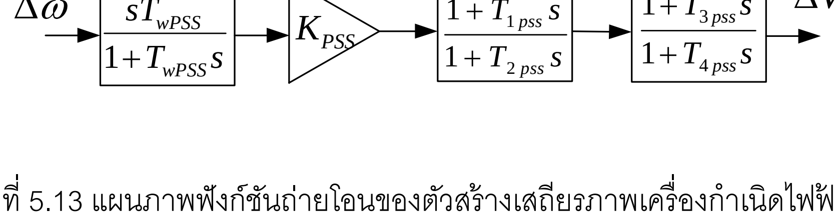
$D_{3EXC} = T_{A1}T_{A2}T_f$

$D_{2EXC} = T_{A1}T_{A2} + \left(T_{A1} + T_{A2}\right)T_f$

$D_{1EXC} = T_{A1} + T_{A2} + T_f + K_A K_f$

$D_{0EXC} = 1$

ต่อไปจะทำการพิจารณาหาฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการอนุพันธ์ของตัวสร้างเสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวสร้างเสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังรูปที่ 5.13 แสดงดังสมการ

$$G_{PSS}(s) = K_{PSS} \times \frac{sT_{wPSS}}{(1+sT_{wPSS})} \times \frac{(1+sT_{1PSS})}{(1+sT_{2PSS})} \times \frac{(1+sT_{3PSS})}{(1+sT_{4PSS})} \quad 5\text{-}67$$

$$G_{PSS}(s) = \frac{K_{PSS}T_{wPSS}\left(T_{1PSS}T_{3PSS}s^3 + (T_{1PSS}+T_{3PSS})s^2 + s\right)}{T_{2PSS}T_{4PSS}T_{wPSS}s^3 + \left(T_{2PSS}T_{4PSS} + (T_{2PSS}+T_{4PSS})T_{wPSS}\right)s^2 + (T_{2PSS}+T_{4PSS}+T_{wPSS})s + 1} \quad 5\text{-}68$$

$$G_{PSS}(s) = \frac{A_{3PSS}s^3 + A_{2PSS}s^2 + A_{1PSS}s}{B_{3PSS}s^3 + B_{2PSS}s^2 + B_{1PSS}s + B_{0PSS}} \quad 5\text{-}69$$

เมื่อกำหนดให้

$$A_{3PSS} = K_{PSS}T_{wPSS}T_{1PSS}T_{3PSS}$$

$$A_{2PSS} == K_{PSS}T_{wPSS}(T_{1PSS}+T_{3PSS})$$

$$A_{1PSS} = K_{PSS}T_{wPSS}$$

$$B_{3PSS} = T_{2PSS}T_{4PSS}T_{wPSS}$$

$$B_{2PSS} = \left(T_{2PSS}T_{4PSS} + (T_{2PSS}+T_{4PSS})T_{wPSS}\right)$$

$$B_{1PSS} = (T_{2PSS}+T_{4PSS}+T_{wPSS})$$

$$B_{0PSS} = 1$$

$$A_{G_{PSS}(s)} = K_{PSS}T_{wPSS}\left(T_{1PSS}T_{3PSS}s^3 + (T_{1PSS}+T_{3PSS})s^2 + s\right)$$

$$B_{G_{PSS}(s)} = T_{2PSS}T_{4PSS}T_{wPSS}s^3 + \left(T_{2PSS}T_{4PSS} + (T_{2PSS}+T_{4PSS})T_{wPSS}\right)s^2 \ldots$$
$$+ (T_{2PSS}+T_{4PSS}+T_{wPSS})s + 1$$

$$B'_{G_{PSS}(s)} = 3T_{PSS2}T_{PSS4}T_{wPSS}s^2 \ldots$$
$$+ 2\left(T_{PSS2}T_{PSS4} + (T_{PSS2}+T_{PSS4})T_{wPSS}\right)s^1 + (T_{PSS2}+T_{PSS4}+T_{wPSS})$$

ดังนั้นสามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$G'_{PSS}(s) = \frac{B_{G_{PSS}(s)}A'_{G_{PSS}(s)} - A_{G_{PSS}(s)}B'_{G_{PSS}(s)}}{B^2_{G_{PSS}(s)}} \quad 5\text{-}70$$

$$G'_{PSS}(s) = \frac{C_{5PSS}s^5 + C_{4PSS}s^4 + C_{3PSS}s^3 + C_{2PSS}s^2 + C_{1PSS}s + C_{0PSS}}{\left[D_{3PSS}s^3 + D_{2PSS}s^2 + D_{1PSS}s + D_{0PSS}\right]^2} \quad 5\text{-}71$$

เมื่อกำหนดให้

$$
\begin{aligned}
C_{5PSS} &= 0 \\
C_{4PSS} &= K_{pss} T_{wPSS} (T_{1PSS} T_{3PSS} T_{4PSS} T_{wPSS} + T_{1PSS} T_{2PSS} T_{3PSS} T_{wPSS} \cdots \\
&\quad - T_{1PSS} T_{2PSS} T_{4PSS} T_{wPSS} - T_{2PSS} T_{3PSS} T_{4PSS} T_{wPSS} + T_{1PSS} T_{2PSS} T_{3PSS} T_{4PSS}) \\
C_{3PSS} &= 2K_{PSS} T_{wPSS} \cdots \\
&\quad \times (T_{1PSS} T_{3PSS} T_{wPSS} - T_{2PSS} T_{3PSS} T_{wPSS} + T_{1PSS} T_{2PSS} T_{3PSS} + T_{1PSS} T_{3PSS} T_{4PSS}) \\
C_{2PSS} &= K_{PSS} T_{wPSS} (T_{1PSS} T_{wPSS} - T_{2PSS} T_{wPSS} + T_{3PSS} T_{wPSS} - T_{4PSS} T_{wPSS} \cdots \\
&\quad + T_{1PSS} T_{2PSS} + 3T_{1PSS} T_{3PSS} + T_{1PSS} T_{4PSS} + T_{2PSS} T_{3PSS} \cdots \\
&\quad - T_{2PSS} T_{4PSS} + T_{3PSS} T_{4PSS}) \\
C_{1PSS} &= 2K_{PSS} T_{wPSS} \left(T_{1PSS} + T_{3PSS} \right) \\
C_{0PSS} &= K_{PSS} T_{wPSS} \\
D_{3PSS} &= T_{2PSS} T_{4PSS} T_{wPSS} \\
D_{2PSS} &= T_{2PSS} T_{4PSS} + \left(T_{2PSS} + T_{4PSS} \right) T_{wPSS} \\
D_{1PSS} &= T_{2PSS} + T_{4PSS} + T_{wPSS} \\
D_{0PSS} &= 1
\end{aligned}
$$

การหาการเปลี่ยนแปลงของสมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีชุดควบคุมการกระตุ้นและตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเทียบการเปลี่ยนแปลงกับฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $G_{PSS}(s)$ แสดงได้ดังสมการ

$$
\frac{\partial \mathbf{A}(s)}{\partial \mathbf{H}(s)} = \frac{\partial \mathbf{A}(s)}{\partial G_{PSS}(s)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T'_{do}} \left(G_{EXC}(s) + G_{pss}(s) G'_{EXC}(s) \frac{\partial s}{\partial G_{pss}(s)} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \text{5-72}
$$

เมื่อเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางขวาของเมตริกสถานะตามสมการ5-57 แสดงดังนี้

$$
\upsilon = \begin{bmatrix} -\left(\frac{T'_{do}}{T'_{do} s + 1} \right) \frac{I_{qo}}{M} \\ -\left(\frac{T'_{qo}}{T'_{qo} s + 1} \right) \frac{I_{do}}{M} \\ -\frac{D}{Ms} \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \text{5-73}
$$

และเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะทางซ้ายของเมตริกสถานะตามสมการ5-57 แสดงดังนี้

$$\mu = \begin{bmatrix} -\left(\frac{D\omega_o}{I_{qo}s} + \frac{Ms}{I_{qo}}\right) \\ 0 \\ \frac{\omega_o}{s} \\ 1 \end{bmatrix} \qquad 5\text{-}74$$

จากสมการ 4-87 เมื่อแทนค่าด้วยสมการ 5-72, 5-73 และ 5-74 ทำให้สามารถหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างโหมดและฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมในรูปแบบ $\partial s/\partial H$ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมที่เป็นตัวอ้างอิง ได้แก่ฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $G_{PSS}(s)$ ดังสมการ

$$\left.\frac{\partial\lambda}{\partial H}\right|_{\lambda=s_i} = \frac{\partial s}{\partial G_{pss}(s)} = \frac{\left(-I_{qo}G_{EXC}(s)\Big/M(T'_{do}s+1)\right)}{\left(\left(\left(\frac{T'_{do}}{T'_{do}s+1}\right)\frac{I_{qo}}{M}\right)\left(\frac{D\omega_o}{I_{qo}s}+\frac{Ms}{I_{qo}}\right)-\left(\frac{D\omega_o}{Ms^2}\right)+\left(\frac{I_{qo}G_{pss}(s)G'_{EXC}(s)}{(T'_{do}s+1)M}\right)+1\right)} \qquad 5\text{-}75$$

ความไวเชิงฟังก์ชันตามสมการ 5-51 เมื่อพิจารณาชุดควบคุมคือ ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังสมการ

$$S_{i,j} = \left.\frac{\partial s/\partial H_j}{1-(\partial s/\partial H_j)H_j{}'(s)}\right|_{s=\lambda_i} = \left.\frac{\partial s/\partial G_{pss_j}(s)}{1-\left(\partial s/\partial G_{pss_j}(s)\right)G_{pss_j}{}'(s)}\right|_{s=\lambda_i} \qquad 5\text{-}76$$

เมื่อแทนค่าสมการ 5-75 ในสมการ 5-76 สามารถหาความไวเชิงฟังก์ชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งแสดงถึงความไวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า j ที่มีผลต่อโหมดการสั่น i ที่เกิดขึ้นในระบบ

$$S_{i,j} = \left.\frac{-I_{qo}^2 s^2 G_{EXCj}(s)}{MT'_{do}(M+I_{qo})s^3 + I_{qo}\left(M+I_{qo}\left(G_{pssj}(s)G'_{EXCj}(s)+G_{EXCj}(s)G'_{pssj}(s)\right)\right)s^2 + D\omega_o T'_{do}(M+I_{qo})s + D\omega_o I_{qo}}\right|_{s=\lambda_i} \qquad 5\text{-}77$$

ความไวเชิงฟังก์ชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า j ที่มีผลต่อโหมดการสั่น i สามารถแสดงในรูปอย่างง่ายดังสมการ

$$S_{i,j} = \left.\frac{S_n}{S_d}\right|_{s=\lambda_i} \qquad 5\text{-}78$$

เมื่อกำหนดให้

$$S_n = -I_{qo}^2 s^2 G_{EXCj}(s) \qquad 5\text{-}79$$

$$S_d = MT'_{do}\left(M + I_{qo}\right)s^3 + I_{qo}\left(M + I_{qo}\left(G_{pssj}(s)G'_{EXCj}(s) + G_{EXCj}(s)G'_{pssj}(s)\right)\right)s^2 \ldots \quad \text{5-80}$$
$$+ D\omega_o T'_{do}\left(M + I_{qo}\right)s + D\omega_o I_{qo}$$

โดยพบว่าความไวเชิงฟังก์ชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $(M = 2H)$, ค่าคงที่การหน่วงการแกว่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (D). ค่าคงตัวเวลาขณะเปิดวงจรที่ภาวะชั่วครู่ในแกน d (T'_{do}) จุดทำงานปัจจุบันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านทางกระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์แกน q (I_{q0}) และความเร็วเชิงมุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(ω_o) รวมถึงฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการอนุพันธ์ของระบบกระตุ้นและตัวสร้างเสถียรภาพตามสมการ 5-62, 5-66, 5-69 และ 5-71

ค่าความไวในสมการที่ 5-77 ถูกนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมให้กับระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า j ซึ่งจะตอบสนองต่อโหมดการสั่น i ซึ่งถูกประมาณโหมดการสั่นและพบว่ามีค่าการหน่วงต่ำที่ต้องการปรับค่าการหน่วงให้มีค่าสูงขึ้น โดยทำการสร้างแรงดันอ้างอิงเสริมเข้าสู่ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า j เพื่อเพิ่มการหน่วงที่สอดคล้องการโหมดการสั่นของระบบที่มีค่าการหน่วงต่ำ ทำให้สามารถปรับปรุงเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กผ่านทางระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชุดที่ตอบสนองต่อโหมดการสั่นที่ต้องการปรับปรุงได้โดยมีประสิทธิภาพที่สุด

บทที่ 6

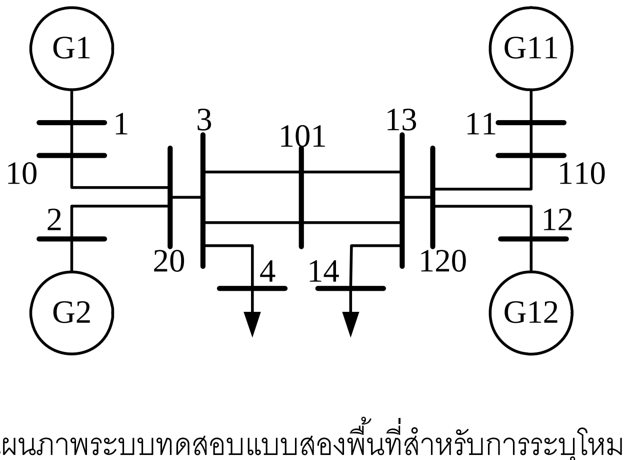
การทดสอบสมรรถนะ

ในบทนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของการควบคุมเชิงประสานและการประมาณค่าโหมดการสั่นในระบบไฟฟ้าที่นำเสนอ โดยทำการจำลองระบบไฟฟ้าโดยใช้สมการต่างๆของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังอธิบายในบทที่ 2 ซึ่งการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาการออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานและการศึกษาการระบุโหมดการสั่นในระบบไฟฟ้า

6.1 ผลการศึกษาการระบุโหมดการสั่นในระบบไฟฟ้า

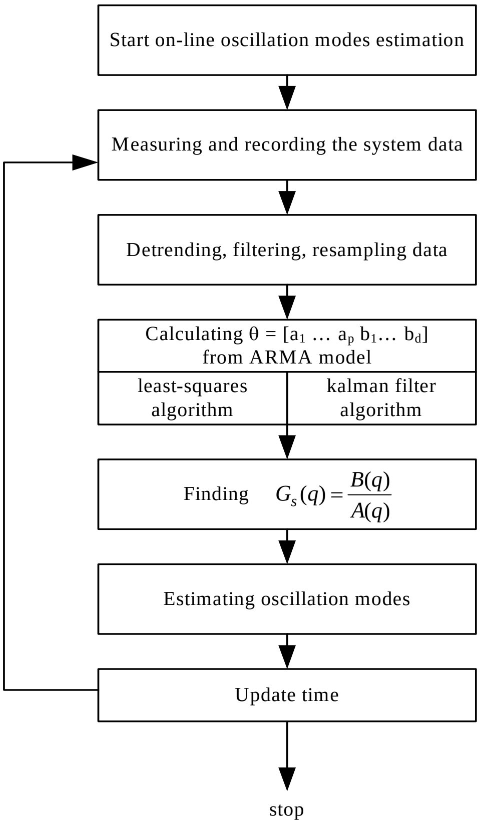
ในส่วนนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการระบุโหมดการสั่นในระบบไฟฟ้า โดยการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน ที่ได้ปรับปรุงขั้นตอนในการคำนวณ เปรียบเทียบกับวิธีการระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด ที่ใช้ขั้นตอนการคำนวณแบบดั้งเดิม โดยสมการที่ใช้คำนวณและขั้นตอนในการคำนวณได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 และ 5

ประสิทธิภาพของทั้งสองวิธีถูกเปรียบเทียบในแง่ของ ค่าความผิดพลาดแบบรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) และ เวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยระบบที่ใช้ทำการทดสอบคือ ระบบทดสอบแบบสองพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 6.5 โดยในแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีตัวแปรสถานะจำนวน 28 ตัว และจากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยการวิเคราะห์เชิงโหมด พบว่าระบบทดสอบนี้มีโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นจำนวน 3 โหมด เป็นโหมดท้องถิ่นจำนวน 2 โหมด และโหมดระหว่างพื้นที่จำนวน 1 โหมด



รูปที่ 6.1 แผนภาพระบบทดสอบแบบสองพื้นที่สำหรับการระบุโหมดการสั่น

ขั้นตอนในการคำนวณของทั้งสองวิธีในการทดสอบนี้แสดงดังรูปที่ 6.6 โดยเริ่มต้นจากการวัดและเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณ ในการทดสอบนี้ทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของทุกเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาใช้ในการคำนวณ อัตราการสุ่มข้อมูลมีค่า 100 เฮิรตซ์ ต่อมาทำการกำจัดค่าเฉลี่ยของข้อมูล กรองความถี่ข้อมูลในช่วง 0.1-5 เฮิรตซ์ และ ปรับอัตราการสุ่มของข้อมูลทุกชุดให้เท่ากัน หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้เข้าสู่การคำนวณโหมดการสั่นจากทั้งสองวิธี โดยผลการคำนวณแสดงเป็นค่าความหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดขึ้น



รูปที่ 6.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการทดสอบสมรรถนะการระบุโหมดการสั่น

ขั้นตอนการทดสอบและเปรียบเทียบผลได้ทำการจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงจุดทำงานของระบบทดสอบจำนวน 4 ช่วงเวลา ช่วงเวลาละ 15 นาที โดยจุดทำงานที่เปลี่ยนแปลงและค่าโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นจากการคำนวณด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงโหมดแสดงใน

ตารางที่ 6.1 ในการทดสอบทำการเปรียบเทียบผลของทั้งสองวิธีในแง่ของค่าความผิดพลาดในการคำนวณและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณและจำนวนโหมดที่ต้องการประเมินทั้งหมดในสมการการคำนวณ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 6.2 โดยเป็นการเปรียบเทียบ

ค่าความผิดพลาดในการคำนวณกับการวิเคราะห์เชิงโหมดขอโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบทั้งโหมดการสั่นท้องถิ่นและโหมดการสั่นระหว่างพื้นที่ พบว่าค่าความถี่ของโหมดที่เกิดในระบบที่ค่าที่แม่นยำกว่าความหน่วงที่คำนวณได้ โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณมีค่านานขึ้นเมื่อจำนวนโหมดที่ต้องการประมาณมีค่ามากขึ้นและเมื่อใช้จำนวนข้อมูลในการคำนวณที่มากขึ้น

ตารางที่ 6.1 การเปลี่ยนแปลงจุดทำงานของระบบทดสอบและค่าการวิเคราะห์เชิงโหมด

		Time (minute)			
		0-15	15-30	30-45	45-60
Load	BUS4 (MW)	967	967	967	967
	BUS14 (MW)	1767	883.5	1943	1060
Generation	G1 (MW)	700	834	682	804
	G2 (MW)	700	350	770	420
	G11 (MW)	719	360	791	431
	G12 (MW)	700	350	770	420
โหมดระหว่างพื้นที่	Damping (%)	0.972	7.0364	0.233	5.448
	Freq. (Hz)	0.622	0.6383	0.604	0.6413
Local 1 Mode	Damping (%)	7.772	11.313	5.937	10.940
	Freq. (Hz)	1.126	1.0402	1.1396	1.052
Local 2 Mode	Damping (%)	8.009	20.517	7.235	17.491
	Freq. (Hz)	1.092	1.002	1.096	1.037

ส่วนผลการทดสอบประสิทธิภาพของการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน แสดงดังตารางที่ พบว่าค่าความผิดพลาดในการคำนวณค่าความหน่วงและความถี่ของโหมดที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยวิธีการระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ย

เคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด แต่เวลาที่ใช้คำนวณเร็วกว่าถึง 15-20 เท่า แต่ค่าความผิดพลาดจะสูงขึ้นเมื่อใช้จำนวนข้อมูลที่มากขึ้น เนื่องจากวิธีนี้ต้องการการเก็บข้อมูลเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณโดยใช้ผลการคำนวณในช่วงเวลาก่อนหน้ามาเป็นค่าเริ่มในการคำนวณในช่วงเวลาถัดไปแทน จึงทำให้จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณมีผลต่อความผิดพลาดในการคำนวณและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 6.2 ประสิทธิภาพของวิธีการระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด

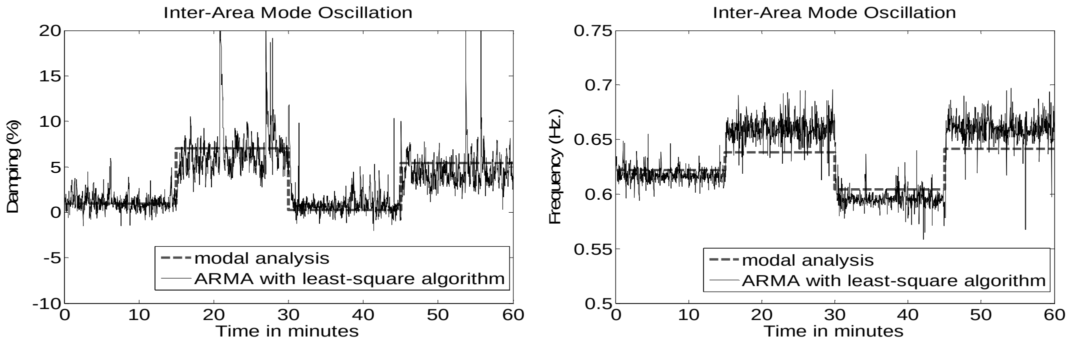
Number of estimated poles (p)	Number of data (N)	one step cal. time (msec.)	RMSE			
			โหมดระหว่างพื้นที่		โหมดท้องถิ่น	
			Damping (%)	Freq. (Hz.)	Damping (%)	Freq. (Hz.)
4	400	329	1.519	0.022	3.370	0.051
	600	446	2.127	0.021	3.329	0.049
	800	574	1.962	0.021	2.733	0.051
6	400	383	1.874	0.017	5.119	0.037
	600	491	2.129	0.017	2.977	0.035
	800	623	1.825	0.017	2.531	0.028
8	400	457	2.798	0.016	3.345	0.035
	600	555	2.092	0.014	2.106	0.032
	800	682	2.074	0.014	1.954	0.029

ในรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 แสดงค่าความหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นระหว่างพื้นที่ตามเวลาที่คำนวณ ด้วยวิธีการระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด และการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน ตามลำดับ พบว่าการแปรปรวนของค่าที่คำนวณได้ด้วยวิธีการระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ย

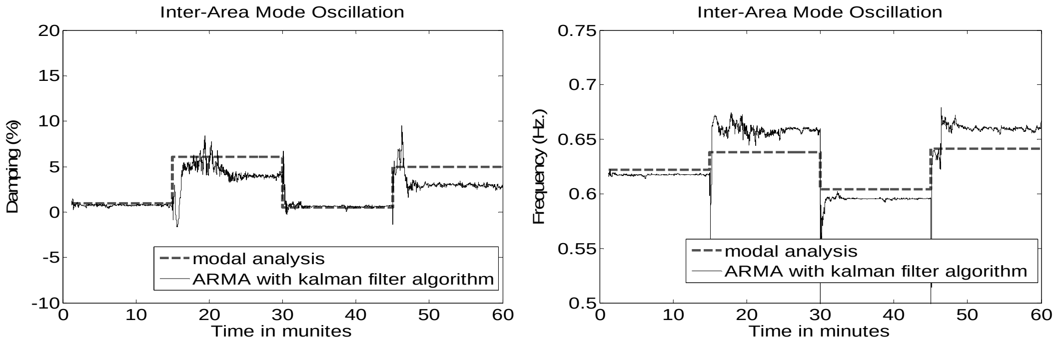
เคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด มีค่ามากกว่าการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน

ตารางที่ 6.3 ประสิทธิภาพของการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน

Number of estimated poles (p)	Number of data (N)	one step cal. time (msec.)	RMSE			
			โหมดระหว่างพื้นที่		โหมดท้องถิ่น	
			Damping (%)	Freq. (Hz.)	Damping (%)	Freq. (Hz.)
4	400	12.5	3.624	0.047	2.268	0.042
	600	18.5	2.012	0.015	3.172	0.100
	800	23.2	2.091	0.014	4.056	1.072
6	400	18.2	4.465	0.026	2.925	0.048
	600	19.9	2.095	0.015	1.890	0.036
	800	23.7	2.462	0.018	2.220	0.863
8	400	23.9	5.108	0.023	3.147	0.034
	600	24.4	2.365	0.013	2.796	0.042
	800	25.4	7.126	0.146	4.953	0.589



รูปที่ 6.3 ค่าการหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นระหว่างพื้นที่สำหรับการคำนวณวิธีการระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด



รูปที่ 6.4 ค่าการหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นระหว่างพื้นที่สำหรับการคำนวณวิธี การระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน

สรุปว่า การคำนวณค่าความหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดในระบบด้วยการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน มีความเร็วในการคำนวณที่เร็วกว่า และความผิดพลาดในการคำนวณไม่ได้สูงขึ้น จึงเหมาะแก่การเป็นวิธีที่เลือกใช้ในการคำนวณโหมดการสั่นในระบบตามเวลาจริง

6.2 ผลการศึกษาสมรรถนะการควบคุมเชิงประสาน

จุดประสงค์ของการนำเสนอวิธีการควบคุมเชิงประสานนี้เพื่อใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ได้แก่ เสถียรภาพชั่วครู่และเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ภายใต้เงื่อนไขการดำเนินงานด้วยการใช้ตัวควบคุมที่น้อยที่สุด วิธีการควบคุมเชิงประสานที่นำเสนอผ่านทางชุดควบคุมท้องถิ่น ได้แก่ ชุดควบคุมการกระตุ้นและตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งมีพื้นฐานมาจากฟังก์ชันพลังงานและทฤษฎีของเลียปูโนฟ ตามสมการที่ 6-1 สามารถแสดงแผนภาพการทำงานของการควบคุมเชิงประสาน ดังรูปที่ 6.5 ตัวควบคุมประสานจะถูกติดตั้งที่ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า สัญญาณขาเข้าสำหรับตัวควบคุมประสานคือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว $(\Delta\omega_i)$ มุมของโรเตอร์ (δ_i) และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (E_i) ซึ่งถูกวัดได้จากระบบไฟฟ้า สัญญาณออกของตัวควบคุมประสานจะถูกส่งผ่านด้วย ค่าน้ำหนักคงที่ (K_{wl}) เป็นสัญญาณที่เพิ่มให้กับชุดควบคุมท้องถิ่น ได้แก่ ชุดควบคุมกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและตัวควบคุมของอุปกรณ์ควบคุม

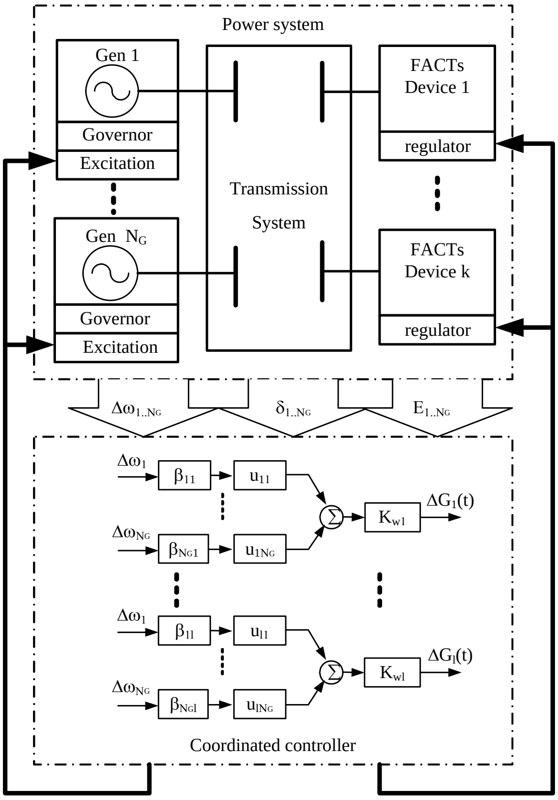
$$\Delta G_l(\delta) = K_{wl} \cdot \sum_{i=1}^{N_G}\sum_{j=1}^{N_G} \Delta\omega_i \beta_{il} u_{lj}(\delta) \qquad 6\text{-}1$$

โดยที่

$$u_{lj}(\delta)=\sum_{j=1}^{N_G}\beta_{lj}\cos\delta_{ij}$$
$$\beta_{il}=X_{SHCi}B_{il}\left|E_i\right|$$
$$\beta_{lj}=X_{SHC_j}B_{lj}\left|E_j\right|$$
$$\bar{Y}_{ij}=G_{ij}+jB_{ij}$$
$$\delta_{ij}=\delta_i-\delta_j$$

โดย X_{SHCi} คือ รีแอกแตนซ์ลัดวงจรที่บัส i ส่วน $\bar{Y}_{ij}$ คือแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และ j , δ_{ij} คือผลต่างระหว่างมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i และ j

ค่าน้ำหนักคงที่ (K_{wl}) จะถูกกำหนดมาจากความสามารถของชุดควบคุมท้องถิ่น โดยชุดควบคุมท้องถิ่นที่มีอัตรากำลังการผลิตสูง จะมีค่าน้ำหนักที่สูงด้วย ซึ่งการปรับค่าน้ำหนักสามารถทำได้ในตัวควบคุมประสานเท่านั้น โดยค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทำงานของระบบไฟฟ้า ความสามารถของตัวควบคุมประสานขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ถูกวัดจากระบบไฟฟ้าซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของระบบ ตัวควบคุมประสานนี้สามารถปรับปรุงเสถียรภาพของระบบภายใต้เงื่อนไขการทำงานและการเปลี่ยนแปลงทุกสถานะ



รูปที่ 6.5 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมเชิงประสาน

6.2.1 การทดสอบในระบบทดสอบแบบสองพื้นที่

ในส่วนต่อไปจะเป็นการนำเสนอวิธีการใหม่ในการควบคุมเชิงประสานซึ่งมีพื้นฐานจากสัญญาณในพื้นที่กว้าง สำหรับการประสานตัวควบคุมท้องถิ่น โดยตัวควบคุมเชิงประสานจะทำการส่งสัญญาณเสริม ไปยังตัวควบคุมท้องถิ่น วิธีการใหม่ที่นำเสนอจะใช้ฟังก์ชันพลังงานที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูโนฟ สำหรับการสร้างแบบจำลองตัวควบคุมเชิงประสาน ในการศึกษานี้ตัวควบคุมประสานซึ่งถูกติดตั้งที่ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าจะใช้การวัดระยะไกลและการชดเชยการโต้ตอบกันระหว่างตัวควบคุมท้องถิ่น เมื่อทำการนำตัวควบคุมประสานไปใช้ในระบบไฟฟ้า พบว่า สามารถสร้างการหน่วงโหมดการสั่นเพิ่มขึ้น และช่วยปรับปรุงเสถียรภาพรวมของระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าแบบสองพื้นที่ ที่มีการติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมแบบขนาน ได้แก่ อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตถูกเลือกมาใช้ในการจำลองสถานการณ์และทำการศึกษา ผลของการจำลองสถานการณ์ในสภาวะการทำงานและความผิดพร่องที่แตกต่างกันชี้ให้เห็นว่า การนำวิธีการควบคุมเชิงประสานที่ได้นำเสนอไปใช้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าและช่วยทำให้การหน่วงโหมดการสั่นดีขึ้นสำหรับระบบไฟฟ้าแบบหลายเครื่องจักร นอกจากนั้นแล้ววิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีการติดตั้งตัวควบคุมท้องถิ่นหลายตัว

6.2.1.1 กรณีศึกษา

เนื้อหาในหัวข้อนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย ระบบทดสอบและกระบวนการทดสอบ เนื้อหาในส่วนแรกจะอธิบายถึงระบบที่นำมาใช้ในการทดสอบคือ ระบบไฟฟ้าแบบสองพื้นที่ ซึ่งถูกเลือกมาเป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้า สำหรับในส่วนที่สองจะเป็นการอธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการในการทดสอบ

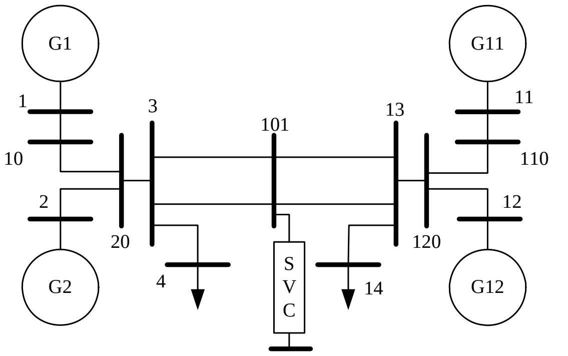
ส่วนที่ 1 ระบบไฟฟ้าแบบสองพื้นที่ สำหรับใช้ในการทดสอบถูกนำมาใช้ในการศึกษาเนื่องจากเป็นระบบไฟฟ้าที่มีการต่อเชื่อมกันและมีการสั่นแบบระหว่างพื้นที่และแบบท้องถิ่น แสดงดังรูปที่ 6.6 ระบบทดสอบนี้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 4 ชุดในสองพื้นที่ จำนวนบัสเท่ากับ 13 บัส ภาระโหลดไฟฟ้าจำนวน 2 ชุดและมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ได้แก่ อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้าอ้างอิงมาจาก Kundur (1994) ในการศึกษานี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวถูกแสดงด้วย แบบจำลองแบบสมการสถานะอันดับสี่และมีการติดตั้งด้วยแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองระบบกระตุ้น และแบบจำลองตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า อุปกรณ์ควบคุม ได้แก่ อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์หน่วงการสั่นของระบบไฟฟ้าถูกติดตั้งเพื่อทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ติดตั้งและเพื่อปรับปรุงการหน่วงการสั่นในบัสที่ 101

ส่วนที่ 2 สภาวการณ์ทำงานของระบบทดสอบ ในการศึกษาสมรรถนะของวิธีการควบคุมเชิงประสาน (COOR) และวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม (CC) เพื่อปรับปรุงการหน่วงการสั่นของระบบไฟฟ้า สภาวการณ์ทำงานของระบบทดสอบจึงถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณี ตามเงื่อนไขในการทำงานและการเปลี่ยนแปลงในระบบแสดงดังตารางที่ 6.4

กรณีที่ 1 จำนวนโหลดรวมของระบบไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2,734 MW กำลังการผลิตไฟฟ้ารวมในพื้นที่ 1 เท่ากับ 1,395 MW และ 258 MVAR กำลังการผลิตไฟฟ้ารวมในพื้นที่ 2 เท่ากับ 1,419 MW และ 209 MVAR กระแสไฟฟ้ารวมจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 มีค่าเท่ากับ 396 MW ความผิดพร่องในระบบเป็นการลัดวงจรแบบชั่วคราว ชนิด 3 เฟสลงดิน ที่เวลา t = 1 วินาที บนสายส่ง 13-101 ใกล้บัสที่ 101 โดยการลัดวงจรจะถูกกำจัดไปที่เวลา t = 1.1 วินาที

กรณีที่ 2 จำนวนโหลดไฟฟ้ารวมในระบบที่ทำการศึกษาจะเพิ่มขึ้นอีก 15 เปอร์เซ็นต์จากกรณีที่ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,144 MW กำลังการผลิตไฟฟ้ารวมในพื้นที่ 1 เท่ากับ 1,629 MW และ 573 MVAR กำลังการผลิตไฟฟ้ารวมในพื้นที่ 2 เท่ากับ 1,632 MW และ 525 MVAR กระแสไฟฟ้ารวมจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 มีค่าเท่ากับ 471 MW ความผิดพร่องในระบบเป็นการลัดวงจรแบบชั่วคราวชนิด 3 เฟสลงดิน ที่เวลา t = 1 วินาที บนสายส่ง 13-101 ใกล้บัสที่ 3 โดยการลัดวงจรจะถูกกำจัดไปที่เวลา t = 1.1 วินาที โดยการเปิดวงจรสายส่งเส้นที่ 3 - 101

กรณีที่ 3 จำนวนโหลดไฟฟ้ารวมในระบบที่ทำการศึกษามีค่าเท่ากับ 2,734 MW กำลังการผลิตไฟฟ้ารวมในพื้นที่ 1 เท่ากับ 1,409 MW และ 346 MVAR กำลังการผลิตไฟฟ้ารวมในพื้นที่ 2 เท่ากับ 1,419 MW และ 307 MVAR กระแสไฟฟ้ารวมจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 มีค่าเท่ากับ 508 MW ความผิดพร่องในระบบเป็นแบบการลัดวงจรชั่วคราวของวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ที่เวลา t = 1 วินาทีบนสายส่งเส้น 13-101 ใกล้บัสที่ 101 โดยการลัดวงจรจะถูกทำให้หายไปที่เวลา t = 1.1 วินาที โดยการเปิดวงจรสายส่งเส้นที่ 13 – 101



รูปที่ 6.6 ระบบทดสอบแบบสองพื้นที่ที่ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

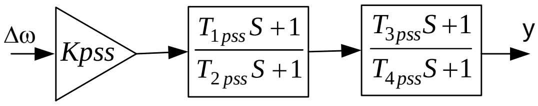
ตารางที่ 6.4 สภาวการณ์ทำงานของระบบทดสอบ

อุปกรณ์ในระบบ	สภาวะ	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
G1	P (MW)	695	824	709
	Q (MVAR)	137	249	165
G2	P (MW)	700	805	700
	Q (MVAR)	121	324	181
G11	P (MW)	719	827	719
	Q (MVAR)	126	236	155
G12	P (MW)	700	805	700
	Q (MVAR)	83	289	152
SVC	Q (MVAR)	200	200	200
Load L4	P (MW)	967	1,112	867
	Q (MVAR)	100	115	100
Load L14	P (MW)	1,767	2,032	1,867
	Q (MVAR)	100	115	100
Tie Line Power Flow	P (MW) Area1 to Area2	396	471	508
System contingency	Fault BUS	101	3	101
	Fault Clear	Temporary fault	Open line 3-101	Open line 13-101

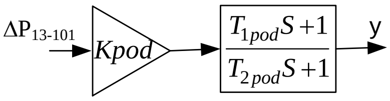
6.2.1.2 ผลการทดสอบ

ในแต่ละกรณีจะทำการศึกษาวิธีการในการควบคุมทั้ง 2 วิธี คือ วิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม และวิธีการควบคุมเชิงประสาน โดยในการศึกษาระบบไฟฟ้าที่ใช้วิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม ตัวสร้างเสถียรภาพถูกติดตั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ตัวควบคุมการลดการแกว่งจะถูกติดตั้งในอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต เพื่อปรับปรุงการหน่วงการสั่น แต่สำหรับวิธีการควบคุมเชิงประสาน จะไม่ทำการติดตั้งทั้งสองอุปกรณ์ข้างต้น โดยจะติดตั้งเพียงตัวควบคุมเชิงประสาน

เมื่อวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมถูกนำไปใช้ในระบบทดสอบ ตัวแปรในการควบคุมอุปกรณ์ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ตัวควบคุมการลดการแกว่งทุกตัวจะถูกปรับอย่างเหมาะสมสำหรับกรณีที่ 1 โดยทำการปรับปรุงระดับต่ำสุดของการหน่วงให้มีค่าไม่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ แผนผังของอุปกรณ์ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ อุปกรณ์ตัวควบคุมการลดการแกว่ง สำหรับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต แสดงดังรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.7 แผนผังตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.8 แผนผังตัวควบคุมการลดการแกว่งสำหรับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

ผลการคำนวณตัวแปรในการควบคุมสำหรับวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมในกรณีที่ 1 ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 6.5 โดยตัวแปรดังกล่าวใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในการปรับอัตราส่วนการหน่วงที่ต่ำที่สุดให้มีค่าไม่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะถูกนำไปใช้สำหรับกรณีที่ 2 และ 3 เช่นกัน

ตารางที่ 6.5 ตัวแปรควบคุมที่ใช้สำหรับวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม

Parameters	PSS gen1	PSS gen2	PSS gen11	PSS gen12	Parameters	POD for SVC
Kpss	5.2087	4.4986	5.6090	6.5379	Kpod	0.2682
T1_pss	0.8557	0.8006	0.4696	0.4579	T1_pod	0.2504
T2_pss	0.0010	0.0010	0.0010	0.0011	T2_pod	1.8491
T3_pss	3.1954	3.1660	3.2322	3.2153		
T4_pss	5.2927	5.3086	5.2692	5.2859		

ในการศึกษาความสามารถของวิธีการควบคุมเชิงประสานและวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมเพื่อที่จะปรับปรุงการหน่วงการสั่นของระบบไฟฟ้า สามารถทำได้ด้วยการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธีโดยใช้การวิเคราะห์ค่าลักษณะเฉพาะและการจำลองสถานการณ์ทางเวลา

การวิเคราะห์เชิงโหมดซึ่งแสดงอัตราส่วนการหน่วงและความถี่ของการสั่นแสดงในตารางที่ 6.6 ในการทดสอบทุกกรณีจะมีโหมดการสั่นหลักจำนวน 3 โหมดการสั่น ประกอบด้วย โหมดท้องถิ่นจำนวน 2 โหมดและโหมดระหว่างพื้นที่จำนวน 1 โหมด จากการทดสอบในทุกกรณีพบว่า

การหน่วงการสั่นของระบบไฟฟ้าทั้งโหมดท้องถิ่นและโหมดระหว่างพื้นที่สามารถถูกปรับปรุงได้ด้วยวิธีการควบคุมประสาน

ในการนำวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมไปใช้ในกรณีที่ 1 นั้น ตัวแปรควบคุมของตัวควบคุมท้องถิ่นทุกตัวถูกปรับอย่างเหมาะสม ค่าอัตราส่วนการหน่วงสำหรับวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมในทุกโหมดการสั่นมีค่ามากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนของการหน่วงเมื่อนำวิธีการควบคุมประสานไปทดสอบในระบบไฟฟ้ายังคงมีค่าที่ดีกว่า

แม้ว่าจะนำวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมมาใช้สำหรับกรณีที่ 2 ตัวแปรควบคุมไม่ได้ถูกปรับอย่างเหมาะสม จุดทำงานของระบบไฟฟ้า ในกรณีที่ 2 ถูกปรับเปลี่ยนไปจากกรณีที่ 1 ดังนั้น ค่าอัตราส่วนการหน่วงจึงลดลงและทำให้ระบบไฟฟ้าไม่เสถียร แต่เมื่อนำวิธีควบคุมประสานมาใช้พบว่า อัตราส่วนการหน่วงของทุกโหมดการสั่นได้รับการปรับปรุงและทำให้ระบบไฟฟ้ามีความเสถียร เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ 3 วิธีการควบคุมประสานสามารถช่วยปรับปรุงอัตราส่วนการหน่วงในทุกโหมดการสั่นได้ดีกว่าวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม

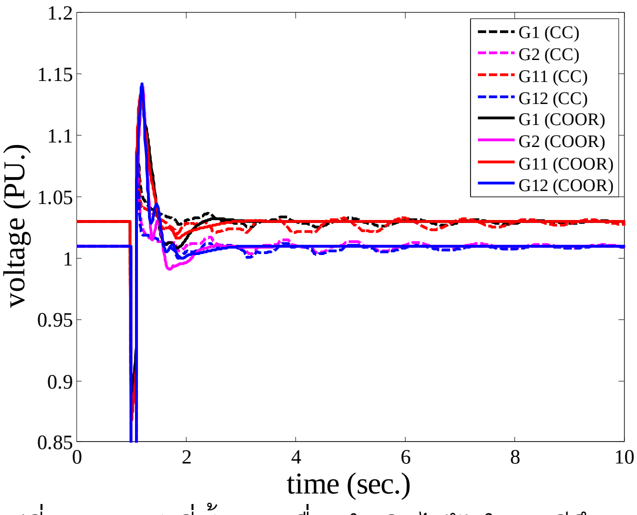
ตารางที่ 6.6 ค่าโหมดการแกว่งหลังจากเกิดการลัดวงจรในระบบทดสอบ

กรณีที่	รูปแบบการควบคุม	โหมดท้องถิ่น1 การหน่วง (%) (ความถี่,(Hz.))	โหมดท้องถิ่น2 การหน่วง (%) (ความถี่,(Hz.))	โหมดระหว่างพื้นที่ การหน่วง (%) (ความถี่,(Hz.))
1	CC	18.51 (1.07)	5.31 (0.88)	34.66 (0.57)
	COOR	23.12 (1.21)	21.04 (0.95)	55.01 (0.64)
2	CC	5.11 (1.05)	-2.18 (0.91)	8.61 (0.54)
	COOR	31.30 (1.06)	14.52 (0.97)	41.21 (0.52)
3	CC	15.06 (1.08)	4.27 (0.89)	12.63 (0.60)
	COOR	24.15 (1.01)	23.35 (0.95)	32.75 (0.48)

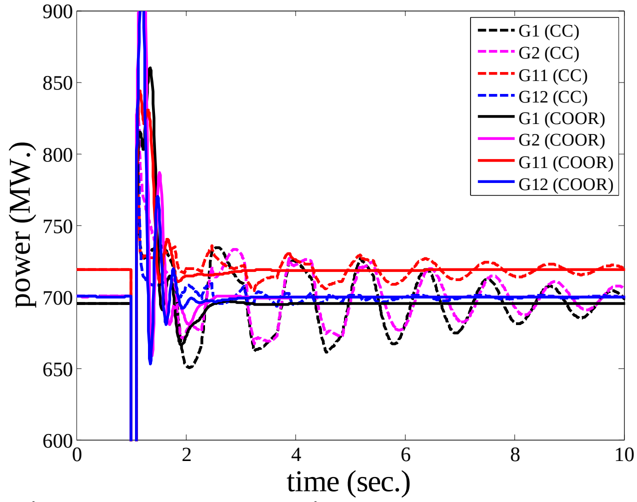
การจำลองสถานการณ์สำหรับทุกกรณีทำโดยใช้ MATLAB/Simulink เพื่อแสดงศักยภาพในการหน่วง รูปที่ 6.9 ถึงรูปที่ 6.12 แสดงผลการจำลองเวลาสำหรับกรณีที่ 1 โดยแสดงแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 และมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับรูปที่ 6.13 ถึงรูปที่ 6.16 แสดงผลการจำลองเวลาสำหรับกรณีที่ 2 โดยแสดงแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่

1 และ 2 และมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ รูปที่ 6.17 ถึงรูปที่ 6.20 แสดงผลการจำลองเวลาสำหรับกรณีที่ 3 โดยแสดงแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 และมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ

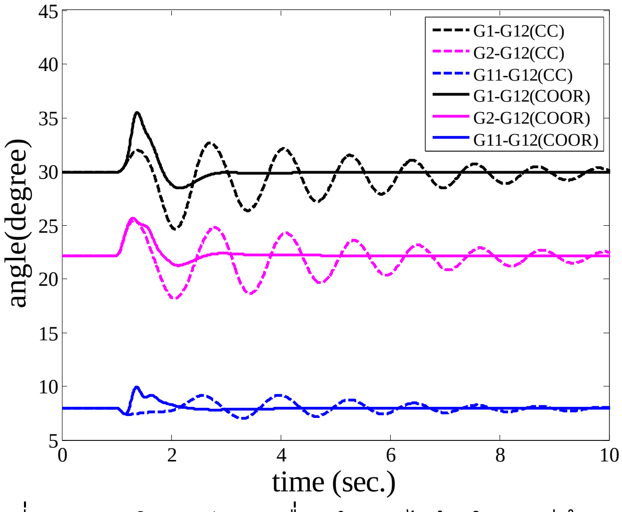
ผลการจำลองสถานการณ์ในทุกกรณี แสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า มุม และการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายที่เชื่อมต่อกันมีการหน่วงที่ดีขึ้นเมื่อทำการติดตั้งด้วยวิธีการควบคุมประสานในระบบไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ ซึ่งวิธีการควบคุมประสานนี้สามารถช่วยทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดีขึ้นโดยทำการปรับปรุงการหน่วงการสั่นในทุกสภาวะการทำงาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า วิธีการที่นำเสนอนี้ไม่ต้องการการปรับตัวแปรควบคุมแต่จะใช้สัญญาณควบคุมขาเข้าที่เหมาะสมในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า



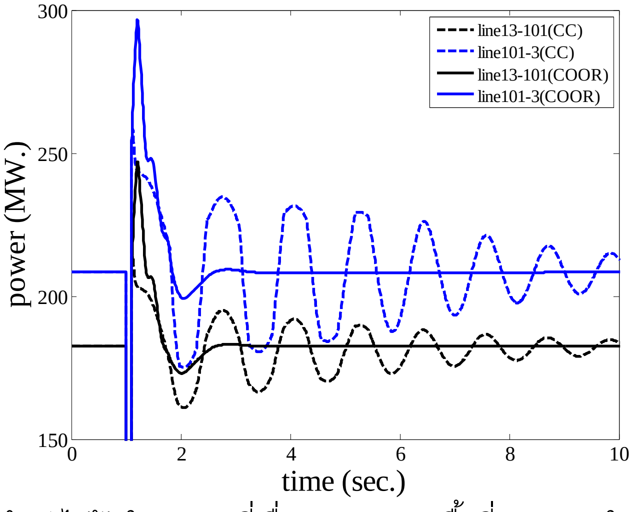
รูปที่ 6.9 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 1



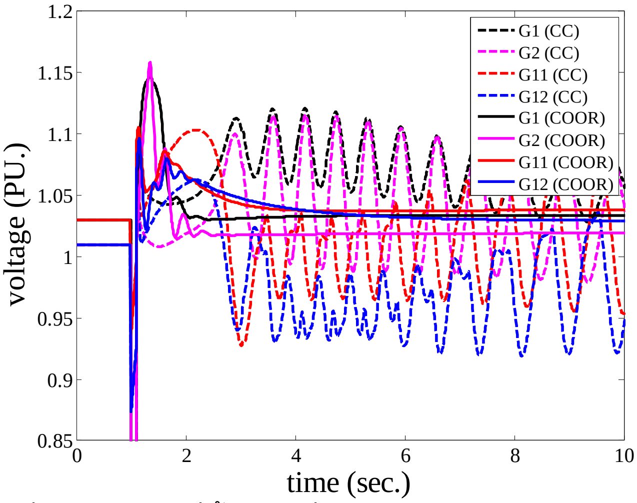
รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 1



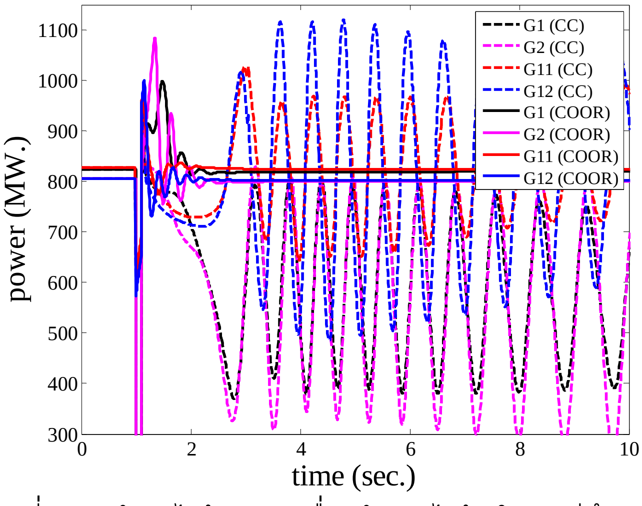
รูปที่ 6.11 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 1



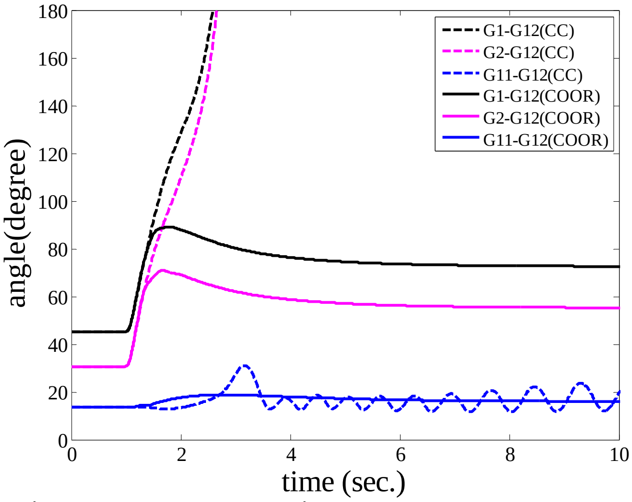
รูปที่ 6.12 กำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 ในกรณีศึกษาที่1



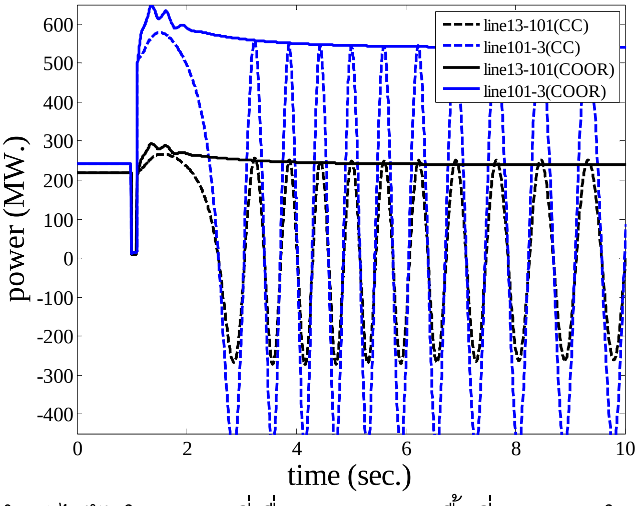
รูปที่ 6.13 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 2



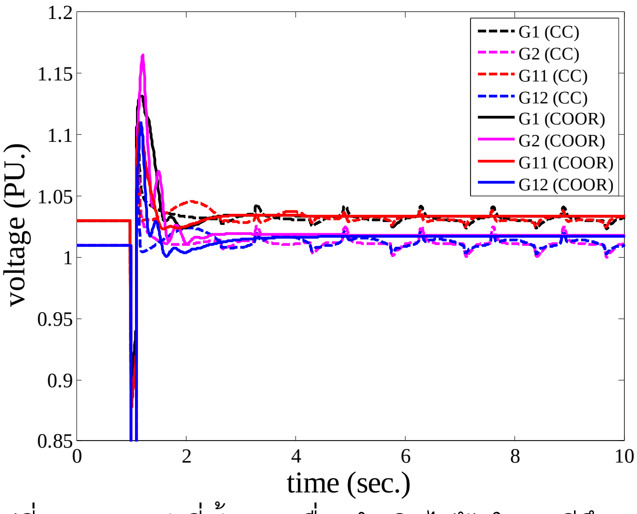
รูปที่ 6.14 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 2



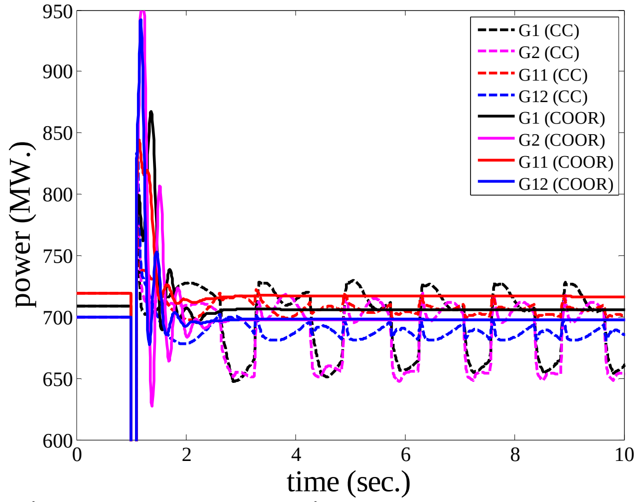
รูปที่ 6.15 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 2



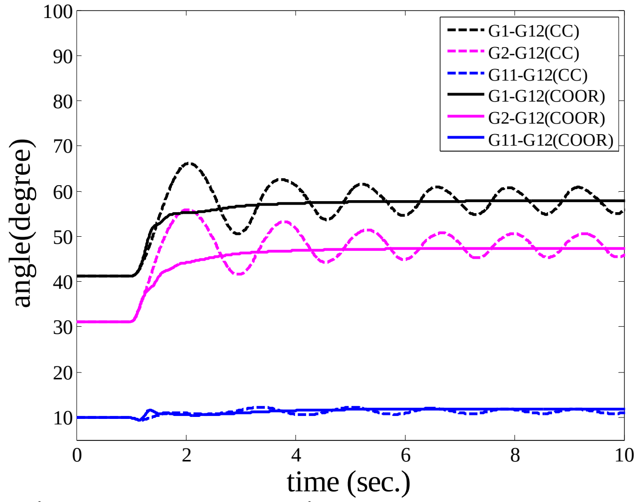
รูปที่ 6.16 กำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 ในกรณีศึกษาที่ 2



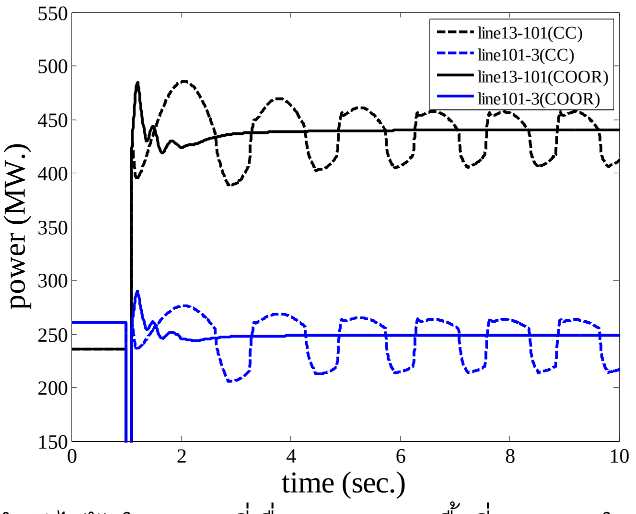
รูปที่ 6.17 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 6.18 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 6.19 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 6.20 กำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 ในกรณีศึกษาที่3

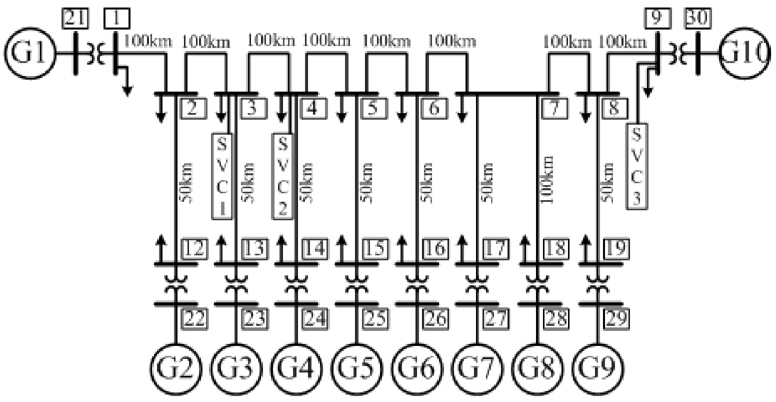
6.2.2 การทดสอบในระบบทดสอบ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น

ในส่วนนี้เป็นการนำเสนอวิธีการควบคุมเชิงประสานที่มีพื้นฐานจากสัญญาณวัดจากบริเวณกว้าง เพื่อทำการประสานชุดควบคุมท้องถิ่น อุปกรณ์ชุดควบคุมเชิงประสาน จะทำการส่งผ่าน สัญญาณควบคุมเสริม ไปยังชุดควบคุมท้องถิ่น วิธีที่นำเสนอใช้หลักการของฟังก์ชันพลังงานตามทฤษฎีของเลียปูโนฟ มาใช้ในการออกแบบระบบควบคุม สำหรับการจำลองอุปกรณ์ชุดควบคุมเชิงประสานในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ดังกล่าวจะถูกติดตั้งในศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า จะใช้อุปกรณ์การวัดระยะไกลและทำการชดเชยการโต้ตอบกันระหว่างชุดควบคุมท้องถิ่น เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเชิงประสานจะช่วยให้การหน่วง ของโหมดการแกว่งที่เกิดในระบบเพิ่มขึ้นและปรับปรุงเสถียรภาพรวมของระบบไฟฟ้า ระบบทดสอบ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น ที่มีการติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุม ถูกเลือกมาใช้ในการจำลองและทดสอบในการศึกษานี้ ผลจากการจำลองในสภาวะการทำงาน ที่แตกต่างกัน พบว่า การนำวิธีที่นำเสนอไปใช้สามารถเพิ่มเวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่องและเพิ่มการหน่วงของโหมดการแกว่งที่เกิดในระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องจักรหลายตัว นอกจากนั้นวิธีที่นำเสนอนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีจำนวนชุดควบคุมท้องถิ่นหลายตัว

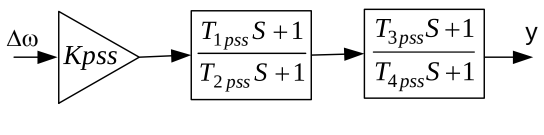
6.2.2.1 กรณีศึกษา

เนื้อหาในหัวข้อนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย ระบบทดสอบและกระบวนการทดสอบ เนื้อหาในส่วนแรกจะอธิบายถึงระบบที่นำมาใช้ในการทดสอบคือ ระบบทดสอบ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งถูกเลือกมาเป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้า สำหรับในส่วนที่สองจะเป็นการอธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการในการทดสอบ

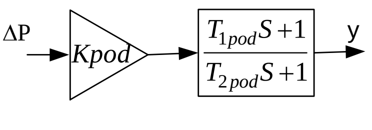
ส่วนที่ 1 ระบบที่ถูกเลือกมาใช้ในการศึกษานี้ คือ ระบบทดสอบ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากเป็นระบบไฟฟ้าที่มีการต่อเชื่อมกันและมีการสั่นแบบระหว่างพื้นที่ และ แบบท้องถิ่น แสดงดังรูปที่ 6.21 ระบบทดสอบนี้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 ตัว ซึ่งเป็นต้นแบบของระบบไฟฟ้า 60 เฮิรตซ์ ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะการสั่นแบบยาวนานของระบบไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 10 ตัวถูกกำหนดชื่อเป็น G1 ถึง G 10 ในระบบทดสอบ ในงานวิจัยนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวถูกแสดงด้วย แบบจำลองสมการสถานะอันดับสี่ และถูกติดตั้งด้วยแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองระบบกระตุ้น และแบบจำลองตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.21 ระบบทดสอบ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 6.22 แผนภาพตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 6.23 แผนภาพชุดควบคุมการหน่วงของอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 6.10 แสดงตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกใช้ในการจำลองสถานการณ์ สำหรับตัวแปรของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 6.11 สายในแผนภาพ 1 เส้นเป็น

ตัวแทนของวงจร 3 เฟสที่มีจำนวน 2 วงจร ค่าฐานของระบบไฟฟ้าคือ ความถี่เท่ากับ 60 เฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้าฐานเท่ากับ 1000 MVA มีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม คือ อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต จำนวน 3 ตัว ที่มีการติดตั้งตัวควบคุมการลดการแกว่งของอุปกรณ์ควบคุม เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้า และปรับปรุงตัวหน่วงการสั่น ที่บัส 3, 4 และ 9

ตารางที่ 6.7 ตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Parameter	Value	Parameter	Value
X_d (pu)	1.70	$T_d^{''}$ (sec.)	0.03
X_q (pu)	1.70	$T_q^{''}$ (sec.)	0.03
$X_d^{'}$ (pu)	0.35	T_a (sec.)	0.40
$X_d^{''}$ (pu)	0.25	X_l (pu)	0.225
$X_q^{''}$ (pu)	0.25	H (pu)	7.00
$T_d^{'}$ (sec.)	1.00		

ตารางที่ 6.8 พารามิเตอร์ของสายส่งและหม้อแปลง

Line 50 km.	R+jX = 0.0021+j0.0630 (pu) jB/2 = 0.0305 (pu)
Line 100 km.	R+jX = 0.0042+j0.1260 (pu) jB/2 = 0.0610 (pu)
Gen.1 transformer	jX = j0.00932 (pu)
Gen.2-7&9 transformer	jX = j0.0140 (pu)
Gen.8 transformer	jX = j0.0280 (pu)
Gen.10 transformer	jX = j0.00466 (pu)

ส่วนที่ 2 เงื่อนไขของระบบทดสอบในการศึกษาความสามารถของตัวควบคุมประสานและวิธีการควบคุมแบบเดิมที่ประกอบด้วย ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดควบคุมการลดการแกว่งของอุปกรณ์ควบคุม เพื่อปรับปรุงเวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่อง และค่าการหน่วงการสั่นของระบบไฟฟ้า เงื่อนไขของระบบทดสอบสามารถแสดงในตารางที่ 6.9 และตารางที่ 6.10 ผลกระทบต่อ เวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่อง การทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงหลายสภาวะการทำงาน

ตารางที่ 6.9 สภาวะการทำงานของระบบทดสอบ

Load no.	Load (GW.)/ (GVar)	Load no.	Load (GW.)/ (GVar)
1	8.400/1.990	12	3.850/0.860
2	2.450/0.500	13	3.850/0.860
3	2.450/0.500	14	3.850/0.860
4	2.450/0.500	15	3.850/0.860
5	2.450/0.500	16	3.850/0.860
6	2.450/0.500	17	3.850/0.860
7	3.675/0.800	18	1.925/0.390
8	2.450/0.500	19	3.850/0.860
9	19.810/4.950		

ตารางที่ 6.10 สภาวะการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Gen. no.	Output (GW.)/(GVar)	Gen. no.	Output (GW.)/(GVar)
1	9.450/2.347	6	6.300/1.344
2	6.300/1.328	7	6.300/1.348
3	6.300/0.830	8	3.150/0.673
4	6.300/0.830	9	6.300/1.418
5	6.300/1.333	10	18.822/7.087

6.2.2.2 ผลการทดสอบ

ในการศึกษาความสามารถของตัวควบคุมประสานสำหรับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ระบบทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 4 กรณี

กรณีที่ 1 คือ ระบบทดสอบแบบไม่มีตัวควบคุม โดยไม่มีการติดตั้งชุดสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ตัวควบคุมการลดการแกว่งในอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

กรณีที่ 2 คือ ระบบทดสอบแบบมีตัวควบคุม แบบมีการติดตั้งอุปกรณ์ชุดสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ตัวควบคุมการลดการแกว่งในอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบ

สถิต ซึ่งเมื่อตัวควบคุมแบบเดิมถูกใช้ในระบบทดสอบ ตัวแปรในการควบคุมชุดสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ตัวควบคุมการลดการแกว่ง จะถูกปรับอย่างเหมาะสมเพื่อปรับปรุงระดับการหน่วงที่ต่ำที่สุดให้มีค่าไม่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยผลการคำนวณตัวแปรควบคุมสำหรับตัวควบคุมแบบเดิมแสดงในตารางที่ 6.11 และตารางที่ 6.12

กรณีที่ 3 คือ ระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวควบคุมประสาน

กรณีที่ 4 คือ ระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวควบคุมประสาน ร่วมกับติดตั้งชุดสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวและติดตั้งตัวควบคุมการลดการแกว่งที่อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

ตารางที่ 6.11 ตัวแปรในตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการปรับค่าอย่างเหมาะสม

	PSS gen1	PSS gen2	PSS gen3	PSS gen4	PSS gen5
Kpss	10.000	3.498	3.609	4.579	2.379
T1_pss	0.230	0.150	0.469	0.459	0.579
T2_pss	0.020	0.050	0.010	0.011	0.011
T3_pss	0.230	0.150	0.232	0.253	0.213
T4_pss	0.020	0.050	0.010	0.059	0.085
	PSS gen6	PSS gen7	PSS gen8	PSS gen9	PSS gen10
Kpss	5.208	4.986	5.600	3.379	2.537
T1_pss	0.490	0.455	0.250	0.459	0.640
T2_pss	0.020	0.020	0.020	0.011	0.021
T3_pss	0.490	0.455	0.450	0.153	0.322
T4_pss	0.020	0.020	0.020	0.029	0.005

ตารางที่ 6.12 ตัวแปรในตัวควบคุมการลดการแกว่งสำหรับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตที่มีการปรับค่าอย่างเหมาะสม

	POD SVC1	POD SVC2	POD SVC3
Kpod	4.277	4.186	2.891
T1_pod	0.857	0.806	0.696
T2_pod	0.010	0.010	0.010

6.2.2.2.1 การประเมินเวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่อง

การทดสอบเพื่อหาประสิทธิผลของตัวควบคุมประสาน ถูกพิจารณาโดยใช้เวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่อง ดำเนินการโดยพิจารณาที่การเกิดการลัดวงจรแบบชั่วคราวแบบ 3 เฟสลงดิน ที่บัส 2 ถึง 8 ซึ่ง เวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่อง สามารถหาได้จากการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของช่วงเวลาของการเกิดการลัดวงจร จนกระทั่งระบบทดสอบที่ศึกษาสูญเสียเสถียรภาพ ในตารางที่ 6.13 แสดงเวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่อง ของระบบไฟฟ้าที่เป็นกรณีศึกษา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของตัวควบคุมประสานที่ถูกติดตั้งต่อ เวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่อง ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6.13 เวลาสูงสุดในการกำจัดความผิดพร่อง เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบชั่วคราวแบบ 3 เฟสลงดิน

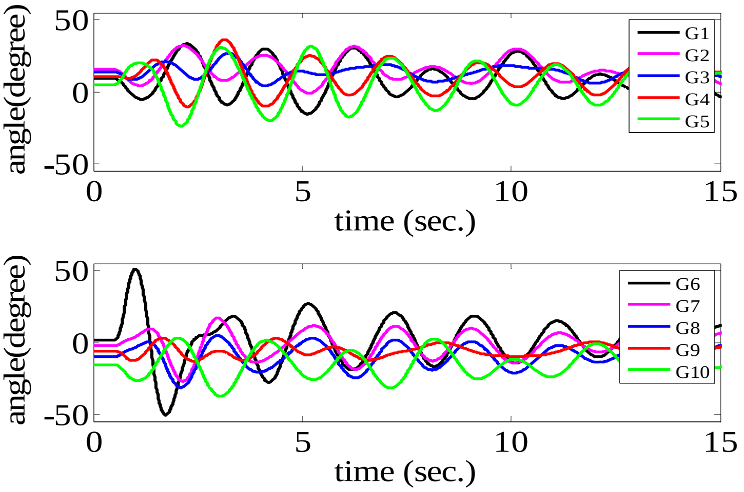
Faulted BUS	Critical clearing time of system (msec.)			
	Without controller	With PSS and POD controller	With Coordinated controller	Coordinated controller with PSS and POD
BUS 2	311.0	394.5	461.5	458.9
BUS 3	412.4	413.6	483.4	478.4
BUS 4	430.2	431.0	483.0	488.2
BUS 5	425.1	447.5	509.5	506.1
BUS 6	435.9	466.0	526.7	524.4
BUS 7	443.2	452.8	474.3	479.1
BUS 8	456.9	468.7	538.2	557.6

6.2.2.2.2 ผลการจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์จะทำการศึกษาความสามารถของเสถียรภาพของการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ เมื่อการลัดวงจรชั่วคราวแบบ 3 เฟสลงดินเกิดขึ้นบัสที่ 6 ที่ 0.5 วินาทีและมีระยะเวลาของความผิดพร่อง เท่ากับ 0.250 วินาที การจำลองสถานการณ์ ในแต่ละกรณี แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการหน่วง โดยรูปที่ 6.24 ถึงรูปที่ 6.27 แสดงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบที่ไม่มีการติดตั้งตัวควบคุม ระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและตัวควบคุมการลดการแกว่ง ระบบทดสอบที่มีการ

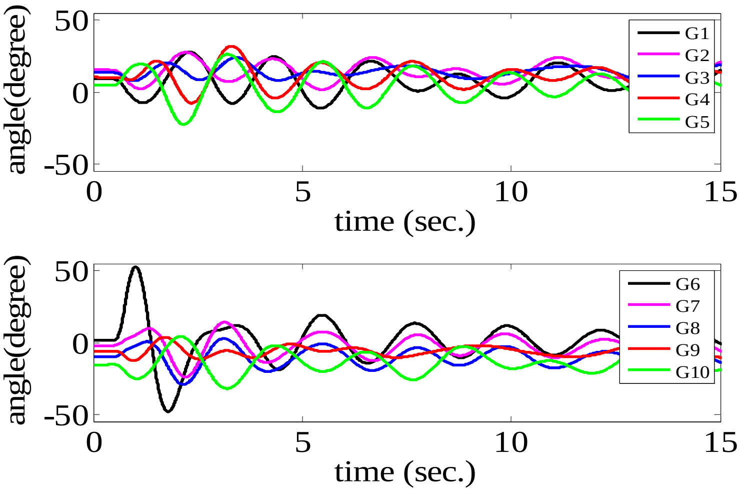
ติดตั้งตัวควบคุมประสาน และระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวควบคุมประสาน ตัวสร้างเสถียรภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและตัวควบคุมการลดการแกว่ง ตามลำดับ

รูปที่ 6.28 ถึงรูปที่ 6.31 แสดงกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับการจำลองสถานการณ์ทั้ง 4 กรณีของระบบทดสอบ และรูปที่ 6.32 ถึงรูปที่ 6.35 แสดงแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการจำลองสถานการณ์ทั้ง 4 กรณีเช่นเดียวกัน

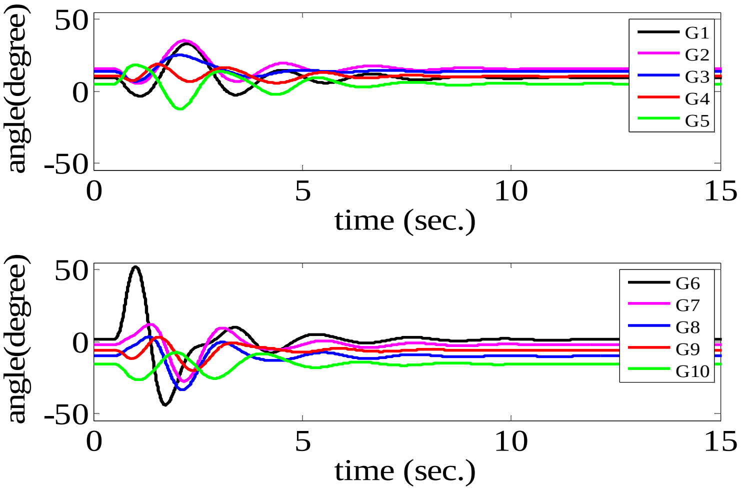


รูปที่ 6.24 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 1

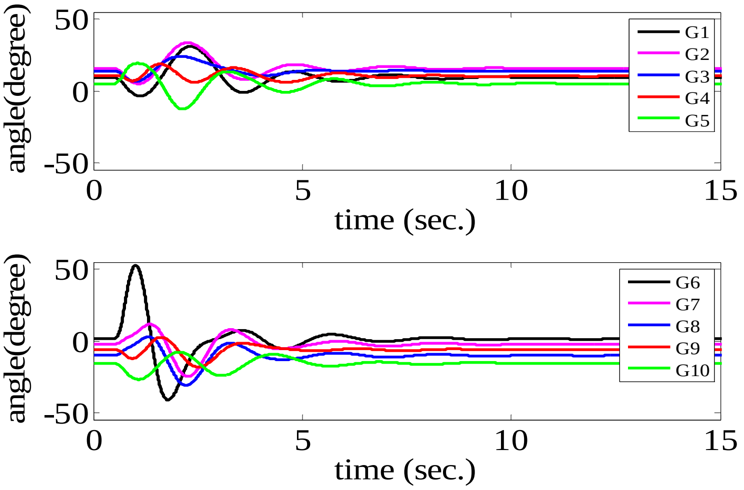
.



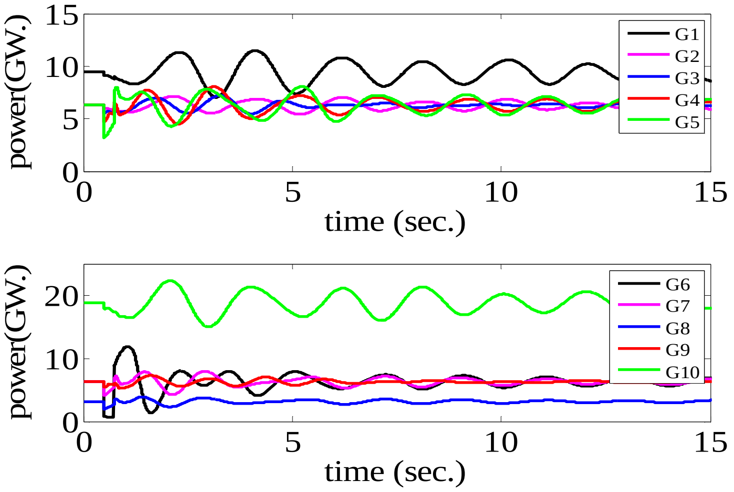
รูปที่ 6.25 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 2



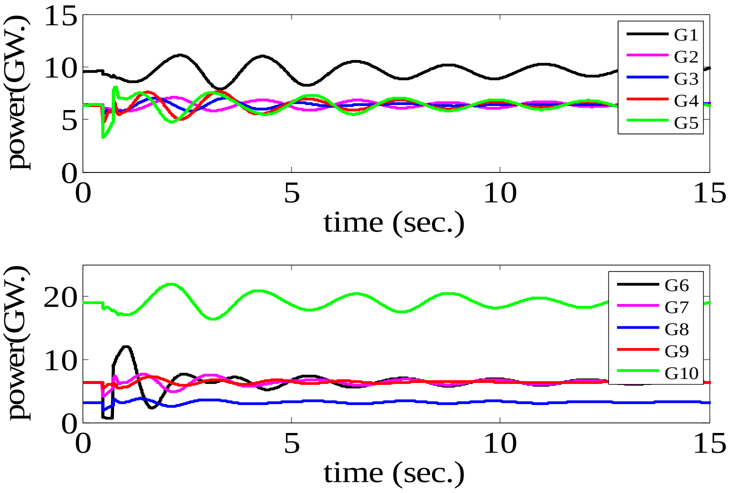
รูปที่ 6.26 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 3



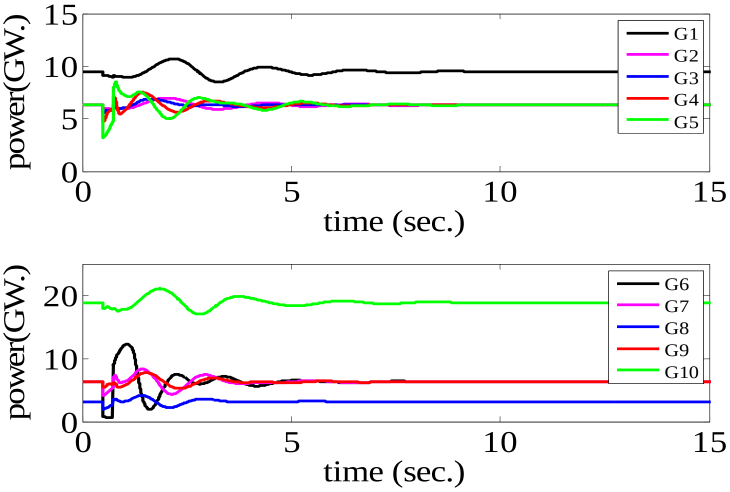
รูปที่ 6.27 มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 4



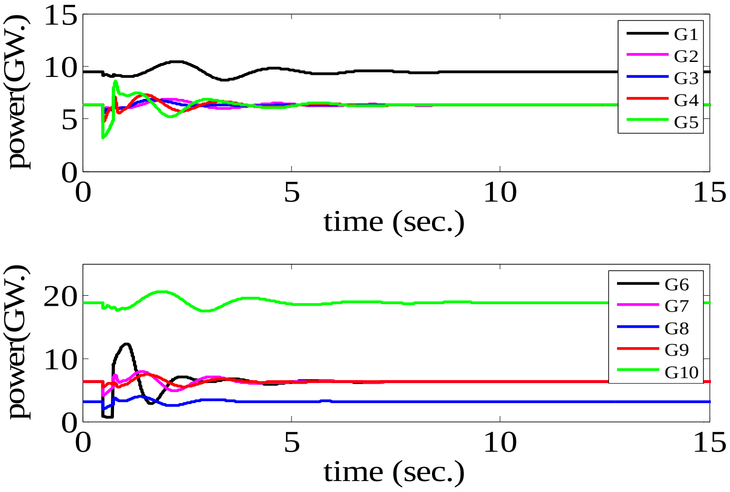
รูปที่ 6.28 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 1



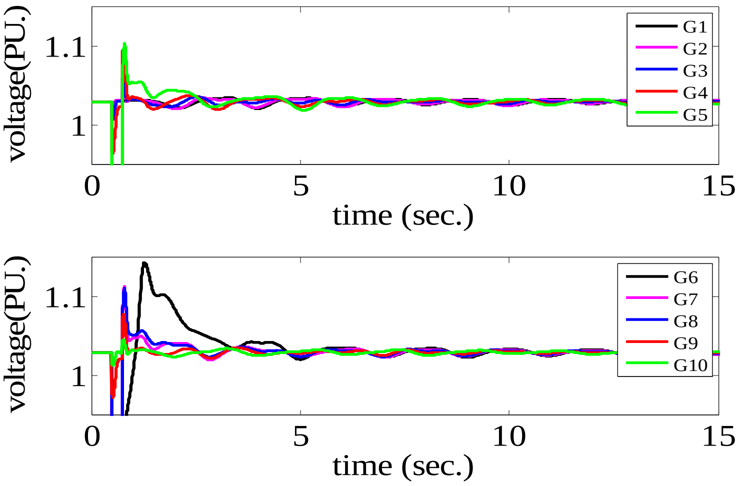
รูปที่ 6.29 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 2



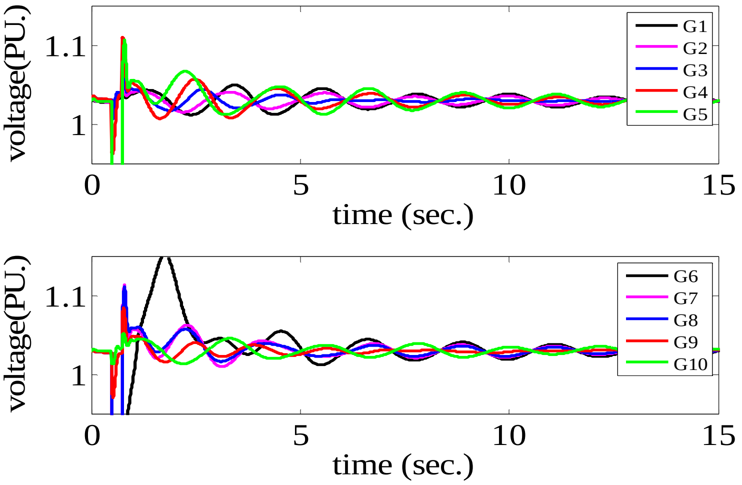
รูปที่ 6.30 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 3



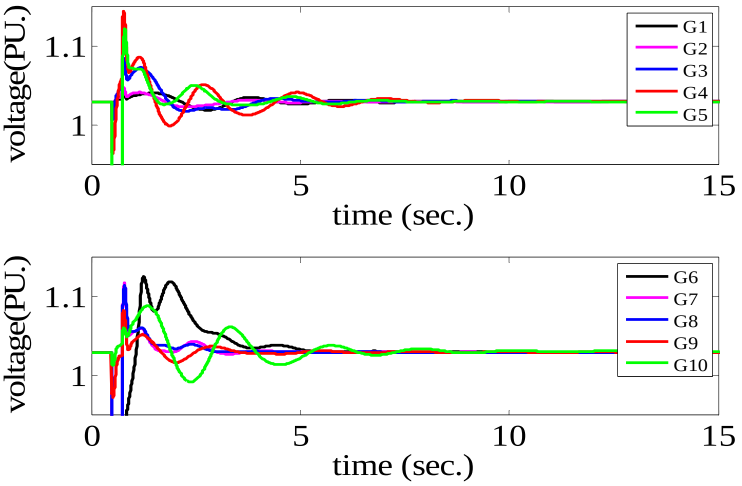
รูปที่ 6.31 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 4



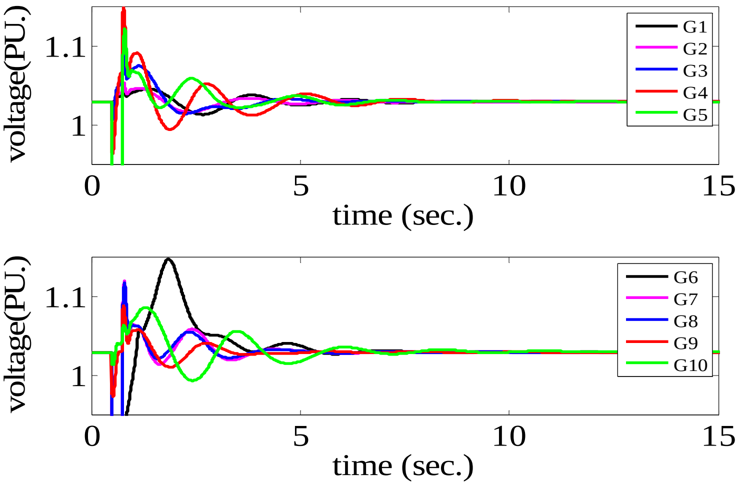
รูปที่ 6.32 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 1



รูปที่ 6.33 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 6.34 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 3



รูปที่ 6.35 แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบัสที่ 6 สำหรับกรณีที่ 4

ผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าและมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการหน่วงที่ดีเมื่อมีการติดตั้งตัวควบคุมประสานในระบบไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ วิธีการควบคุมเชิงประสานสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยปรับปรุงการหน่วงของการสั่นในเงื่อนไขการทำงานต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้า วิธีการที่นำเสนอนี้ไม่จำเป็นต้องทำการปรับตัวแปรควบคุมแต่จะนำสัญญาณขาเข้าที่ใช้ในการควบคุมที่เหมาะสมไปใช้ในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 สรุปผล

ในงานวิจัยนี้นำเสนอ 2 ส่วน ประกอบด้วย การปรับปรุงการระบุโหมดการสั่นในระบบไฟฟ้า และการออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยการเพิ่มค่าการหน่วงของโหมดการสั่นระหว่างพื้นที่

การระบุโหมดการสั่นได้ทำการศึกษาขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีการระบุโหมดการสั่นจากสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนกำลังสองน้อยที่สุด พบว่า การคำนวณด้วยวิธีดังกล่าวสามารถประมาณโหมดการสั่นของระบบไฟฟ้าที่แสดงในรูปของค่าการหน่วงและความถี่ของโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ ในการศึกษาพบว่า ความผิดพลาดในการคำนวณของความถี่ของโหมดการสั่นมีความผิดพลาดน้อยกว่าการประมาณค่าการหน่วงเมื่อเทียบกับการระบุโหมดการสั่นด้วยวิธีประมาณเชิงโหมด อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าโหมดการสั่นยังคงใช้ระยะเวลายาวนาน ในงานวิจัยจึงทำการปรับปรุงขั้นตอนการคำนวณโดยนำขั้นตอนการคำนวณการระบุโหมดการสั่นด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่โดยประยุกต์ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน มาใช้ ซึ่งพบว่า ความผิดพลาดในการคำนวณไม่ได้เพิ่มมากขึ้น แต่ใช้เวลาในการคำนวณลดลง เนื่องจากขั้นตอนการคำนวณด้วยขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบวงจรกรองของคาล์มาน ใช้จำนวนข้อมูลในการคำนวณน้อยกว่า ทำให้วิธีดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการระบุโหมดการสั่นตามเวลาจริงได้ ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้

การออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโดยนำหลักการฟังก์ชันพลังงานจากทฤษฎีของเลียปูโนฟ และทฤษฎีความไวเชิงฟังก์ชันต่อระบบควบคุม ในการออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานโดยใช้พื้นฐานจากทฤษฎีของเลียปูโนฟ สัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมที่นำมาใช้ ได้แก่ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยตัวควบคุมจะส่งสัญญาณขาออกผ่านค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณามาจากค่าพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมท้องถิ่น สัญญาณขาออกนี้ถูกส่งไปเป็นสัญญาณควบคุมเสริมให้กับอุปกรณ์ควบคุมแบบท้องถิ่นเพื่อปรับปรุงค่าการหน่วงระหว่างพื้นที่ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการทดสอบประสิทธิภาพของการควบคุมเชิงประสานที่ออกแบบด้วยวิธีแรกทำในระบบทดสอบแบบสองพื้นที่และระบบทดสอบ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นในระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับ ได้แก่ อุปกรณ์ชดเชยกำลังรี

แอกทีฟแบบสถิต พบว่า ระบบควบคุมเชิงประสานสามารถเพิ่มค่าการหน่วงให้กับโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องทำการปรับตัวแปรในระบบควบคุมแม้ว่าจุดทำงานของระบบจะเปลี่ยนแปลงไป หรือเกิดการผิดพร่องในระบบที่กระตุ้นโหมดการสั่นต่างๆกัน

ในการออกแบบระบบควบคุมเชิงประสานโดยใช้ทฤษฎีความไวเชิงฟังก์ชันต่อระบบควบคุม เป็นการนำค่าที่ได้จากการระบุโหมดการสั่นตามเวลาจริงมาคำนวณหาความไวของตัวควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบและนำไปใช้ในการปรับตัวแปรควบคุมที่มีการติดตั้งอยู่แล้วในระบบให้สอดคล้องกับโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในการปรับค่าตัวแปรของชุดควบคุมใช้หลักการการหาค่าโหมดสูงที่สุดมาใช้ในการคำนวณเพื่อเลื่อนโหมดการสั่นที่มีค่าการหน่วงต่ำไปสู่ตำแหน่งที่มีค่าโหมดการสั่นสูงขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ทั้งในส่วนของเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กและเสถียรภาพชั่วครู่ เป็นการนำค่าที่วัดได้จริงจากระบบมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณต่างๆที่ใช้อย่างครบถ้วน รวมถึงกรณีที่สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีความผิดพลาดหรือถูกรบกวนในการวัด จะส่งผลต่อการคำนวณที่ถูกต้องในการระบุโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในระบบ และส่งผลต่อการควบคุมเชิงประสานที่ออกแบบอาจมีความไม่เหมาะสมต่อสภาวะการทำงานของระบบจริงในขณะนั้น จึงต้องทำการเพิ่มขั้นตอนในการประมาณสัญญาณที่ต้องการใช้ในการออกแบบการควบคุมเชิงประสานและการระบุโหมดการสั่นในจุดที่ไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณติดตั้งอยู่ โดยการนำขั้นตอนวิธีการประมาณสถานะของระบบ (State estimation) เพิ่มเติมในส่วนควบคุมที่ส่วนกลาง โดยจำเป็นต้องพิจารณาเวลาในการคำนวณที่ใช้ในการประมาณสถานะของระบบให้ตอบสนองตามเวลาจริง เพื่อให้การควบคุมเชิงประสานสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบได้อย่างรวดเร็ว รวมถึงการปรับปรุงเสถียรภาพศึกษาไม่ได้ทำนายค่าการหน่วงของจุดทำงานในอนาคตของระบบเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนแปลงสภาวการณ์จ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สอดคล้องกับภาระโหลดในอนาคต ซึ่งถ้ามีการทำนายจุดทำงานล่วงหน้าของระบบไฟฟ้าได้จะทำให้การปรับตัวแปรในระบบควบคุมให้เหมาะสมกับจุดทำงานในอนาคตได้อย่างแม่นยำ และทำให้สามารถรับประกันการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ณ จุดทำงานในอนาคตได้

รายการอ้างอิง

ปรีชานนท์ คุ้มกระทึก. การปรับปรุงเสถียรภาพชั่วขณะของระบบไฟฟ้ากำลังโดยการใช้อุปกรณ์แฟคทส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.

สมยศ ตันติภัทรกุล. การศึกษาพฤติกรรมที่ภาวะชั่วครู่ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางกับภาคใต้ของประเทศไทยภายใต้การรบกวนขนาดใหญ่และการปรับปรุงเสถียรภาพที่ภาวะชั่วครู่ของระบบโดยใช้ SVC. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

Anderson, P.M., and Fouad, A.A. 2003. Power System Control and Stability. Wiley Interscience. New Jersey.

Chung, C.Y.I., Wang, K.W., Tse, C.T., Bian, X.Y., and David, A.K. 2003. Probabilistic eigenvalue sensitivity analysis and PSS design in multimachine systems. IEEE Transactions on Power Systems. 18, 4: 1439-1445.

Hauer, J., Demeur, C., and Scharf, L. 1990. Initial result in prony analysis of power system response signals. IEEE Transactions on Power Systems. 5, 1: 80-89.

Heniche, A. and Kammwa, I. 2008. Assessment of two methods to select wide-area signals for power system damping control. IEEE Transactions on Power Systems. 23, 2: 572-581.

IEEE Std 421.5-2005 Energy Development and Power Generating Committee. 2006. IEEE Recommended practice for excitation system models for power system stability studies. IEEE Power Engineering Society. New York.

Jakpattanajit C., Hoonchareon N., and Yokoyama A. A new coordinated control scheme of PSS and FACT devices for improving power system oscillations in multi-machine system. Proceeding of 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON2010). Hangzhou. China.

Jakpattanajit C., Hoonchareon N., and Yokoyama A. A new coordinated control scheme of PSS and SVC for enhancing power system stability. Proceeding of IASTED International Conference Power and Energy System (AsiaPES 2010). Phuket. Thailand.

Jeong, K.S., Jyung, T.Y., and Baek, Y.S. 2011. Modeling and dynamic analysis of STATCOM for short-term voltage stability improvement using EMTP/RV. Journal of International Council on Electrical Engineering. 1, 2: 129-134.

Jiang, S., Gole, A.M., Annakkage, U.D., and Jacobson, D.A. 2011. Damping performance analysis of IPFC and UPFC controllers using validated small-signal models. IEEE Transactions on Power Delivery. 26, 1: 446-454.

Kundur, P. 1994. Power System Stability and Control. MCGraw Hill. New York.

Larimore, W.E. 1990. Canonical variate analysis in identification, filtering and adaptive control. Proceeding of 29th IEEE Conference on Decision and Control. Honolulu. Hawaii. pp. 596-604.

Li, T., Feng, G., Wang, D., and Tong, S. 2010. Neural-network-based simple adaptive control of uncertain multi-input multi-output non-linear systems. IET Control Theory and Application . 4, 9: 1543-1557.

Ljung, L. 1999. System Identification Theory for The User. Prentice Hall. New Jersey.

Machowski, J., Bialek, J.W., and Bumby, J.R. 2008. Power System Dynamics Stability and Control. John Wiley & Sons. West Sussex.

Mohan, R. and Varma, R. 2002. Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems. Wiley-Interscience. New York.

Monticelli, A. 1999. State Estimation in Electric Power Systems A Generalizes Approach. Kluwer Academic. Massachusetts.

Nelson, M. and Leonard, T. 1990. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static VAR compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. IEEE Transactions on Power Systems. 5, 4: 1455-1469.

Ong, C.M. 1998. Dynamoc Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink. Prentice Hall. New Jersey.

Pai, M.A. 1981. Power System Stability Analysis by the Direct Method of Lyapunov. North Holland. New York.

Padiyar, K.R. 2009. Facts Controllers in Power Transmission and Distribution. Anshan. Kent.

Phadke, A.G., and Kasztenny, B. 2009. Synchronized phasor and frequency measurement under transient conditions. IEEE Transactions on Power Delivery. 24, 1: 89-95.

Rao, P., and Sen, I. 2000. Robust pole placement stabilizer design using linear matrix inequalities. IEEE Transactions on Power Systems. 15, 1: 313-319.

Rogers, G. 2000. Power System Oscillations. Kluwer Academic. Massachusetts.

Rouco, L. and Pagola, F.L. 1997. An eigenvalue sensitivity approach to location and controller design of controllable series capacitors for damping power system oscillations. IEEE Transactions on Power Systems. 12, 4: 1660-1666.

Tse, C.T. and Tso, S.K. 1988. Design optimisation of power system stabilisers based on model and eigenvalue-sensitivity analyses. IEE Proceedings. 135, 5: 406-415.

Trudnowski, D.J., Pierre, J.W., Zhou, N., Hauer, J.F., and Parashar, M. 2008. Performance of three mode-meter bloch-processing algorithms for automated dynamic stability assessment. IEEE Transaction on Power System. 23, 2: 680-690.

Van Overschee, P. and DeMoor, B. 1994. N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic system. Automatica. 30:75-93.

Van Overschee, P. and DeMoor, B. 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications. Kluwer Academic Publishers.

Verhaegeni, M. 1994. Identification of the deterministic part of MIMO state space models, given in innovations form from input-output data. Automatica. 30, 1:61-74.

Viberg, M.1995. On subspace-based methods for the identification of linear time-invariant systems. Automatica. 31, 12:1835-1852.

Wies, R.W., Pierre, J.W., and Trudnowski, D.J. 2003. Use of ARMA block processing for estimating stationary low-frequency electromechanical modes of power systems. IEEE Transactions on Power Systems. 18, 1: 167-173.

Xu , L. and Ahmed-Zaid, S. 1995. Tuning of power system controllers using symbolic eigensensitivity analysis and linear programming. IEEE Transactions on Power Systems. 10, 1: 314-321.

Zhou, E.Z. 1994. Functional sensitivity concept and its application to power system damping analysis. IEEE Transaction on Power Systems. 9, 1: 518-524.

Zhou, E.Z., Malik, O.P., and Hope, G.S. 1991. Theory and method for selection of power system stabilizer location. IEEE Transaction on Energy Conversion. 6, 1: 170-176.

Zhou, E.Z., Malik, O.P., and Hope, G.S.1992. Design of stabilizer for a multi machine power system based on the sensitivity of PSS effect. IEEE Transaction on Energy Conversion. 7, 3: 606-613.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชัยฤกษ์ จักรพัฒนจิต เกิดเมื่อวันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนโยธินบูรณะ ในปีพ.ศ. 2536 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จนสำเร็จหลักสูตรในปี พ.ศ. 2540 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จนสำเร็จหลักสูตรในปี พ.ศ. 2544 และได้รับทุนโครงการพัฒนาอาจารย์สาขาขาดแคลนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา และสำนักสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ในความร่วมมือกับ ASEAN University Network / Southeast Asia Engineering Education Development Network (AUN/SEED-Net) เพื่อศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ในปี พ.ศ. 2550

บทความทางวิชาการจากวิทยานิพนธ์

[1] ชัยฤกษ์ จักรพัฒนจิต และ แนบบุญ หุนเจริญ, "A Study of Coordinative Control for PSS's to Enhance Power Oscillation Damping in Multi-machine System," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON 32)

[2] C. Jakpattanajit, N. Hoonchareon and A. Yokoyama "On-line Estimation of Power System Low Frequency Oscillatory Modes in Large Power Systems", in Proc. 16th International Conference on Electrical Engineering(ICEE2010)

[3] C. Jakpattanajit, N. Hoonchareon and A. Yokoyama "A New Coordinated Control Scheme of PSS and FACT devices for Improving Power System Oscillations in Multi-Machine System", in Proc. 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON2010)

[4] C. Jakpattanajit, N. Hoonchareon and A. Yokoyama "A New Coordinated Control Scheme of PSS and SVC for Enhancing Power System Stability", in Proc. IASTED International Conference Power and Energy System (AsiaPES 2010)

[5] C. Jakpattanajit, N. Hoonchareon and A. Yokoyama "On-line Estimation of Power System Low Frequency Oscillatory Modes in Large Power Systems", Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 1, No. 3, pp. 352-358, Jul. 2011.