

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่แบบโรบัสต์ของ SMES

โดยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞

ROBUST DESIGN FOR FREQUENCY STABILIZER OF SMES BASED ON H_∞



ชานนท์ วรกุลพิพัฒน์

CHANON VORAKULPIPAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

จพ.
๕๖๒๑ ก
๒๕๔๗

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.๒๕๔๗

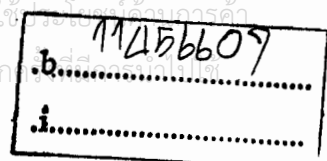
เลขหมู่.....

ISBN 974-15-1268-6

เลขทะเบียน.....

58587

วัน,เดือน,ปี 26 ส.ค. 2549



ROBUST DESIGN FOR FREQUENCY STABILIZER OF SMES BASED ON H_∞



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADGRABANG**

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ISBN 974-15-1268-6
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Robust Design for Frequency Stabilizer of SMES based on H_∞
Student	Mr. Chanon Vorakulpipat
Student ID.	43061120
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Asso. Prof. Monton Leelajindakrirerk
Thesis Co-Advisor	Asso. Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

ABSTRACT

This thesis presents robust design for a frequency stabilizer of SMES based on H_∞ . The proposed frequency stabilizer of SMES can damp out the frequency oscillation when changes in active power happen. In addition, there is the advantage in the high robustness as well as in the good disturbance attenuation performance. The proposed controller guarantee the higher stability of system than the conventional controller against uncertainties such as system parameters variations and changing load with the frequency in the vicinity of the inter-area oscillation mode (0.2-0.8 Hz). Mathematical models, overlapping decomposition and robust design based on H_∞ theory are applied in the design process.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง สำหรับคำปรึกษาที่ได้ชี้แนะแนวทางการวิจัย ตลอดจนความเอาใจใส่สอบถามถึงความก้าวหน้า และปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้วิจัยได้ฝึกฝนด้านการบริหารงานอย่างมีระบบและบริหารการใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ ดร. อิศระชัย งามหรุ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในเรื่องทฤษฎีการออกแบบ และการทดลอง ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ถาวร เบลญนราสุทธิ อาจารย์ภาควิชาควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาเรื่องทฤษฎีในระบบควบคุมทั่วไป

ขอขอบพระคุณ ดร. คมสันต์ หงษ์สมบัติ นักศึกษารุ่นพี่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาจนเกิดความคิดริเริ่มในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ของผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนทั้งกำลังใจ และกำลังทรัพย์ สำหรับการศึกษาค้นคว้าหาความรู้จนผู้วิจัยมีโอกาสทางการศึกษานี้ และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ที่มีส่วนช่วยเหลือผู้วิจัยในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และท้ายที่สุด ขอขอบคุณ นาย ชาลี วรกุลพิพัฒน์ น้องชายของผู้วิจัย สำหรับเอื้อเฟื้ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และเป็นกำลังใจที่มีให้ผู้วิจัยเสมอมา จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน

ชานนท์ วรกุลพิพัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES กับ LFC.....	6
2.1 ลูบการควบคุมความถี่ โหลด LFC.....	6
2.1.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	7
2.1.2 แบบจำลองของโหลด.....	8
2.1.3 แบบจำลองของเทอร์ไบน์.....	9
2.1.4 แบบจำลองของระบบควบคุมความเร็วรอบ.....	10
2.1.5 แบบจำลองของตัวควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าอัตโนมัติ AGC.....	14
2.1.5.1 AGC ในระบบพื้นที่เดียว.....	14
2.1.5.2 AGC ในระบบหลายพื้นที่.....	15
2.1.6 แบบจำลองของขีดจำกัดของอัตราการผลิต GRC.....	20
2.1.7 แบบจำลองของอัตราส่วนในการผลิตกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่.....	21
2.2 ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES.....	24
2.2.1 ลักษณะทั่วไปและแบบจำลองของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES.....	24
2.2.2 ผลการใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES กับระบบไฟฟ้ากำลัง.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว.....	33
3.1 หลักการ โดยทั่วไปของทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว.....	33
3.2 การหาสมการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว.....	35
3.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการของ LFC 3 พื้นที่.....	35
3.2.2 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวกับ LFC 3 พื้นที่.....	40
บทที่ 4 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุม โรบัสต์ โดยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞	47
4.1 ประวัติของทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞	47
4.2 การออกแบบตัวควบคุม โรบัสต์โดยอาศัยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞	48
4.2.1 ข้อกำหนดที่สามารถระบุได้ของฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิด ของตัวควบคุมโรบัสต์แบบ H_∞	48
4.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมโรบัสต์แบบ H_∞	50
บทที่ 5 การออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞	55
บทที่ 6 การทดลอง.....	62
6.1 กรณีที่ใช้ในการทดลอง.....	62
6.2 การทดลอง.....	62
6.2.1 การทดลองเพื่อออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID.....	63
6.2.2 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมทั้งสองวิธี.....	68
6.2.2.1 การทดลองส่วนที่ 1 : เปลี่ยนแปลงค่าบวกของ สัมประสิทธิ์เดมปีง.....	69
6.2.2.2 การทดลองส่วนที่ 2 : เปลี่ยนแปลงค่าลบของ สัมประสิทธิ์เดมปีง.....	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 สรุปผลการทดลอง.....	88
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก. โปรแกรมสำหรับออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามการควบคุมแบบ H_∞	94
ภาคผนวก ข. ผลการออกแบบจากโปรแกรม hinf_design.m.....	100
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	118

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์ของระบบ LFC 3 พื้นที่.....	27
3.1 แสดงค่าแวกเตอร์แวกเตอร์เงาจริง ค่าอัตราส่วนการแกมปี และค่าเปอร์เซ็นต์ของ โอเวอร์ชูตสูงสุดก่อนและหลังการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว.....	46
6.1 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเข้าที่พุดสูงสุดของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการ ควบคุมแบบ H_∞ ในแต่ละกรณี.....	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา **VII** เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 แสดงกำลังไฟฟ้าทางเอาต์พุตของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3.....	30
2.27 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พื้นที่ 1 ในกรณีที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ใน 2 พื้นที่.....	30
2.28 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พื้นที่ 3 ในกรณี ที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ใน 2 พื้นที่.....	31
2.29 แสดงระดับพลังงานที่สะสมของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1.....	31
2.30 แสดงระดับพลังงานที่สะสมของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3.....	32
3.1 แสดงรูปแบบของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่ที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	35
3.2 แสดงแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่ที่มีการยกเลิกระบบ GOV และมีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ในพื้นที่ 1 และ 3.....	36
3.3 แสดงการแบ่งพื้นที่ตามทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว.....	40
3.4 แสดงการแบ่งพื้นที่ตามทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวในอีกรูปแบบหนึ่ง.....	42
4.1 แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมป้อนกลับ.....	48
4.2 แสดงแผนภาพบล็อกของ $G(s)$	49
4.3 แสดงแผนภาพบล็อกทั่วไปของการควบคุมโรบัสต์.....	50
4.4 แสดงแผนภาพบล็อกของ $G(s)$ เมื่อถูกพิจารณาแยกออกเป็นส่วน.....	51
5.1 แสดงโพลลอคของฟังก์ชันการถ่ายโอนรอบวงเปิด $P(s)$ ตามสมการที่ (3.18).....	55
5.2 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_S^{-1} ในการออกแบบตามสมการที่ (5.1).....	56
5.3 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_S^{-1} เทียบกับ W_T^{-1} ในการออกแบบตามสมการที่ (5.1) และ (5.2).....	57
5.4 แสดงผลการยืนยันความถูกต้องตามเงื่อนไขของสมการ (4.4) ในการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดของสมการที่ (3.18).....	58
5.5 แสดงผลการยืนยันความถูกต้องตามเงื่อนไขของสมการ (4.5) ในการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดของสมการที่ (3.18).....	58
5.6 โพลลอคของฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงเปิด $P(s)$ ตามสมการที่ (3.23).....	59
5.7 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_S^{-1} ในการออกแบบตามสมการที่ (3.17).....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_S^{-1} เทียบกับ W_T^{-1} ในการออกแบบตามสมการที่ (5.4) และ (5.5).....	60
5.9 แสดงผลการยืนยันความถูกต้องตามเงื่อนไขของสมการ (4.4) ในการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดของสมการที่ (3.23).....	61
5.10 แสดงผลการยืนยันความถูกต้องตามเงื่อนไขของสมการ (4.5) ในการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดของสมการที่ (3.23).....	61
6.1 แสดงสามกรณีที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	62
6.2 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้น ขนาด 0.01 เอร์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3.....	64
6.3 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ 2 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้น ขนาด 0.01 เอร์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3.....	64
6.4 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้น ขนาด 0.01 เอร์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3.....	65
6.5 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุม แบบ H_∞ ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เอร์ยูนิตเมกะ วัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3.....	65
6.6 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุม แบบ H_∞ ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เอร์ยูนิตเมกะ วัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3.....	66
6.7 แสดงระดับในการใช้พลังงานที่สะสมของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้น ขนาด 0.01 เอร์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3.....	67
6.8 แสดงระดับในการใช้พลังงานที่สะสมของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้น ขนาด 0.01 เอร์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3.....	67
6.9 แสดงสัญญาณรบกวนภายนอกที่เกิดขึ้นที่พื้นที่ 1 ตามสมการที่ (6.6).....	70
6.10 แสดงสัญญาณรบกวนภายนอกที่เกิดขึ้นที่พื้นที่ 3 ตามสมการที่ (6.6).....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 6.11 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 0.5 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....71
- 6.12 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 0.5 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....71
- 6.13 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{ie12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 0.5 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....72
- 6.14 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{ie23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 0.5 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....72
- 6.15 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{ie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 0.5 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....73
- 6.16 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 1.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....73
- 6.17 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 1.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....74
- 6.18 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{ie12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 1.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....74
- 6.19 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{ie23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 1.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.20 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{ie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 1.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	75
6.21 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	76
6.22 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	76
6.23 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{ie12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	77
6.24 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{ie23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	77
6.25 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{ie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	78
6.26 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	79
6.27 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	79
6.28 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{ie12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.29 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{ie23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	80
6.30 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{ie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	81
6.31 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.3 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	81
6.32 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.3 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	82
6.33 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{ie12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.3 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	82
6.34 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{ie23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.3 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	83
6.35 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{ie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.3 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	83
6.36 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.6 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	84
6.37 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง เปลี่ยนเป็น -0.6 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.38	แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{tie12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แอมป์เปลี่ยนแปลงเป็น -0.6 เฟอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....85
6.39	แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{tie23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แอมป์เปลี่ยนแปลงเป็น -0.6 เฟอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....85
6.40	แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{tie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอก ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แอมป์เปลี่ยนแปลงเป็น -0.6 เฟอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3.....86
ก.1	แสดงแผนภาพบล็อกที่ใช้ประกอบการใช้งานของโปรแกรม hinf_design.m รูปที่ 1.....98
ก.2	แสดงแผนภาพบล็อกที่ใช้ประกอบการใช้งานของโปรแกรม hinf_design.m รูปที่ 2.....99

ความถี่ SMES ให้ได้ตามข้อกำหนดต่างๆ เช่น ค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum overshoot) ของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น

แต่เป้าหมายสูงสุดของการออกแบบระบบควบคุม คือ การสร้างระบบควบคุมที่สามารถนำไปใช้กับงานจริง ปัญหาที่เกิดขึ้นในข้อแรกคือ ระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมมักจะมี ความแตกต่างกับระบบที่ใช้งานจริง หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่ามีความไม่แน่นอน (Uncertainties) เกิดขึ้นในระบบ เมื่อตัวควบคุมถูกออกแบบตามแบบจำลองหนึ่ง แต่ในระบบจริงพารามิเตอร์ (parameter) เปลี่ยนแปลงไปจากแบบจำลองที่นำมาออกแบบ ตัวควบคุมจะมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งโดยทั่วไป การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังจะไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้

ปัญหาที่ตามมาอีกข้อหนึ่ง คือ โหลดที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูง เช่น ระบบขนส่งที่ใช้สนามแม่เหล็ก (magnetic levitation transportation), เครื่องขับเคลื่อนความเร็วอัตราสูง (large scale accelerator) และโรงงานทดสอบปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (a testing plant for nuclear fusion) เป็นต้น อยู่หลายชนิดในปัจจุบัน และโหลดเหล่านี้ก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเช่นกัน โหลดเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาสำหรับการแกว่งของการเปลี่ยนแปลงความถี่ทางไฟฟ้า โดยเฉพาะเมื่อโหลดแกว่งด้วยความถี่ที่มีคาบในย่าน 0.2 ถึง 0.8 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นย่านการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างพื้นที่แล้ว ระบบกำลังไฟฟ้าอาจสูญเสียความมีเสถียรภาพได้โดยง่าย [11]

ปัญหาทั้งสองข้อนี้หากเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน อาจทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้ ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ถูกออกแบบมาจากงานวิจัยที่ผ่านมา ไม่ได้คำนึงถึงปัญหาทั้งสองข้อนี้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ให้ตรงเป้าหมายสูงสุดของการออกแบบระบบควบคุม คือมีคุณสมบัติในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ให้ได้มากที่สุด และมีคุณสมบัติในการทนทานต่อสิ่งที่ทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้อย่างเหมาะสม คุณสมบัติเหล่านี้ เรียกว่า คุณสมบัติโรบัสต์ (robustness) ของระบบควบคุม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาการออกแบบและประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES โดยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ เพื่อให้สามารถควบคุมความถี่ทางไฟฟ้าในระบบให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบที่ไม่อาจคาดการณ์ได้ และรองรับสัญญาณรบกวนภายนอก ซึ่งในที่นี้หมายถึงสัญญาณที่เป็นการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าจริง ที่มีการสวิงเป็นคาบที่เสี่ยงต่อการทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องด้วยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบต่างๆ มากมาย ส่งผลทำให้ระบบมีโรบัสต์มากขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีความมุ่งหวังให้ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ถูกออกแบบตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ถูกติดตั้งอยู่มีโรบัสต์มากขึ้นตามหลักการเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านๆ มา ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้คาดว่าเมื่อระบบมีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไป และมีการแกว่งของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงที่เปลี่ยนแปลงไปในย่านความถี่ที่ไม่พึงประสงค์ (0.2 - 0.8 เฮิรท์ซ์) การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้ออกแบบตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพทางความถี่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้ออกแบบตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ซึ่งเป็นวิธีเดิม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดในการวิจัย

ในการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีอยู่ 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ และขั้นตอนการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพที่ได้มาจากการออกแบบกับระบบไฟฟ้ากำลังจริง

ขั้นตอนการออกแบบได้อาศัยทฤษฎีหรือแนวความคิดดังนี้ คือ

1. แนวความคิดในการแสดงสมการสถานะอันดับที่ 1 [10-16]

การเปลี่ยนสมการที่มีอนุพันธ์อันดับที่ n (n^{th} — order differential equation) ให้เป็นสมการสถานะที่มีอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First — order differential equation) มีความจำเป็นในขั้นตอนการออกแบบ เพราะเนื่องจากสมการในรูปที่มีอนุพันธ์อันดับหนึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่า และสามารถลดรูปได้ง่ายกว่า

2. แนวความคิดในการลดรูปควบคุมความถี่โหลด LFC (Load frequency control) โดยการยกเลิกระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [10-11]

การยกเลิกระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES เป็นแนวความคิดที่มีความจำเป็น เนื่องจากทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ LFC มีความซับซ้อนน้อยลงมาก แต่ไม่มีผลกระทบต่อตัวควบคุมที่ต้องการออกแบบ เนื่องจากระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีผลตอบสนองที่ช้ากว่าตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES เป็นอย่างมาก

3. ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว [8-11]

ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว (Overlapping Decomposition) มีความสามารถในการแยกระบบใหญ่ให้เป็นระบบย่อยๆ โดยที่เสถียรภาพของระบบใหญ่สามารถตรวจสอบได้จากระบบย่อย ทฤษฎีนี้มีความจำเป็นอย่างมาก เพราะเนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ได้มามีความยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งยากต่อการนำไปใช้ออกแบบ ระบบย่อยที่ได้หลังจากประยุกต์ใช้ทฤษฎีนี้แล้วจะมีความซับซ้อนน้อยลง จึงสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบย่อยมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมได้โดยง่าย

4. ทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ [12-16]

ในการออกแบบตัวควบคุมโดยคำนึงถึงคุณสมบัติของโรบัสต์ ทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ เป็นทฤษฎีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ทฤษฎีนี้สามารถระบุข้อกำหนด (Specification) ของฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิด (closed-loop transfer function) การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมมีขั้นตอนซับซ้อน แต่สามารถหาได้โดยง่ายในโปรแกรม MATLAB [17]

ขั้นตอนการทดลองได้ใช้แนวความคิดในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามที่ได้ออกแบบมาจากวิธีที่นำเสนอกับ LFC 3 พื้นที่ โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES แบบเดิม ซึ่งใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ในการออกแบบ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

วิจัยผลของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามวิธีที่นำเสนอซึ่งเป็นวิธีที่คำนึงถึงคุณสมบัติของโรบัสต์โดยอาศัยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ในการประยุกต์ใช้กับ LFC 3 พื้นที่ เพื่อแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ต่างๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ถูกออกแบบมาด้วยวิธีเดิมซึ่งไม่ได้คำนึงถึงคุณสมบัติของโรบัสต์ การเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณีนี้จะถูกควบคุมปัจจัยให้มีความสามารถในการควบคุมความถี่ ในขณะที่มีสัญญาณรบกวนภายนอกเป็นแบบขั้น (step) เท่ากัน

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดของแต่ละบทดังต่อไปนี้
บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงเรื่องทั่วไปในการศึกษา ประกอบไปด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงแบบจำลอง LFC ซึ่งเป็นแผนภาพที่แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจริง [18] โดยแสดงให้เห็นถึงความหมายของแต่ละแผนภาพบล็อก พร้อมทั้งแสดงแผนภาพบล็อกของ LFC ที่มีมากกว่า 1 พื้นที่ โดยเฉพาะ LFC 3 พื้นที่ซึ่งเป็นแผนภาพที่นำมาใช้ในการวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในหัวข้อย่อยถัดไปกล่าวถึงรูปร่างโดยพื้นฐานและหลักการทางานทั่วไปของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ใช้ในการแก้ไขผลตอบสนองเชิงความถี่ นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการจำลองของการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES กับระบบไฟฟ้ากำลัง 2 พื้นที่ เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบขึ้นจากโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมโดยอยู่ในระบบ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ในการปรับปรุงผลตอบสนองเชิงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ LFC 3 พื้นที่ นอกจากนี้ในบทยังกล่าวถึง การลดรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้สมการที่นำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES มีความซับซ้อนน้อยลง และไม่กระทบต่อผลของการออกแบบ โดยการใช้หลักการลดรูปของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงประวัติความเป็นมา [15] และการออกแบบตัวควบคุมตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ พร้อมกับการกล่าวถึงหลักการในการออกแบบตามข้อกำหนดที่ผู้ออกแบบต้องการระบุโดยการออกแบบฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนัก (weighting function) เพื่อให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (closed-loop transfer function) ตรงตามที่ต้องการของผู้ออกแบบ

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่กล่าวถึงในบทที่ 4 จะถูกนำมาใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาจากบทที่ 3 เพื่อให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมตามข้อกำหนดในระบบไฟฟ้ากำลังจริง

บทที่ 6 เป็นการกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้มาจากบทที่ 5 กับ LFC 3 พื้นที่ที่ได้แสดงในบทที่ 2 การทดลองจะเป็นการจำลองเหตุการณ์ในโปรแกรม MATLAB ผลตอบสนองต่างๆ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและระดับพลังงานในตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES จะถูกแสดงเป็นรูปกราฟในบทนี้

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞

บทที่ 2

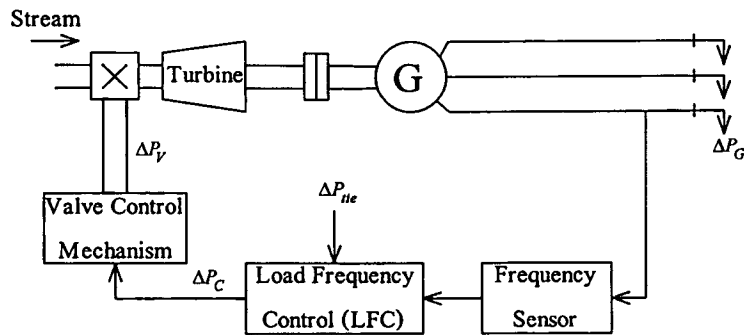
การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่

แบบ SMES กับ LFC

2.1 การควบคุมความถี่โหลด LFC

เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าจริง (active power) ส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับความถี่ (system frequency) ในระบบไฟฟ้ากำลัง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าเสมือน (reactive power) ส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับขนาดของแรงดัน (voltage magnitude) ดังนั้น โหลดกำลังไฟฟ้าจริงและโหลดกำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถถูกควบคุมโดยอิสระต่อกัน ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่มีผลมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เปลี่ยนแปลงไป ได้มีตัวควบคุมที่ใช้ในการศึกษาคือ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator) AVR การเพิ่มขึ้นของโหลดกำลังไฟฟ้าเสมือนจะส่งผลกระทบต่อลดลงของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่การศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่มีผลมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าจริงที่เปลี่ยนแปลงไป ได้มีตัวควบคุมที่ใช้ในการศึกษาคือ ตัวควบคุมความถี่ของโหลด (Load Frequency Control) LFC การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าจริงในโหลดจะส่งผลกระทบต่อลดลงของความถี่ของคลื่นไฟฟ้าที่ถูกจ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาเกี่ยวกับตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่นำมาใช้ในการปรับปรุงความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าจริง ดังนั้น LFC จึงเป็นตัวควบคุมที่จะถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จุดประสงค์หลักของในการควบคุมของ LFC คือ การรักษาระดับของความถี่โหลดและควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป (Δf) จะถูกตรวจจับจากมุมที่เปลี่ยนแปลงของการหมุนของโรเตอร์ ($\Delta \delta$) นั่นเอง Δf จะถูกนำมาขยายและแปลงเป็นสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริง (ΔP_r) ซึ่งจะถูกส่งมาเพื่อเพิ่มทอร์คที่เทอร์ไบน์ (turbine) ให้มีกำลังขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลง $\Delta \delta$ น้อยลง ทำให้ Δf อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้มากขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของ LFC ในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัส ฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละส่วนของ LFC มีที่มาดังนี้

2.1.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เริ่มจากสมการแบบเชิงเส้น (linearized equation) ของการแกว่งของเครื่องจักรเชิงโรตัส ทั่วไป คือ

$$\frac{M}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2.1)$$

โดยที่

M เป็นค่าคงที่ความเฉื่อย (inertia constant) มีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับพลังงานจลน์ในการ หมุนของโรเตอร์ ค่านี้จะประเมินในขณะที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงโรตัส

ω_s เป็นความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของเครื่องจักร (electrical power angle)

δ เป็นมุมของกำลังทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rotor electrical power angle)

P_m เป็นกำลังทางกล (mechanical power)

P_e เป็นกำลังทางไฟฟ้า (electrical power)

เนื่องจากความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าเป็นอนุพันธ์ของมุมทางไฟฟ้า ดังนั้นอาจแสดงในเทอมของการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ ดังนี้

$$\frac{d\Delta f}{f_s} = \frac{1}{M} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

f เป็นความถี่ทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rotor electrical power angle)

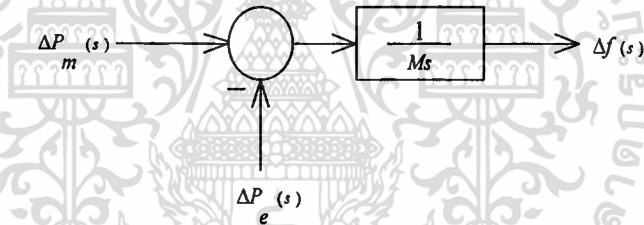
ความถี่ทางไฟฟ้าของโรเตอร์สามารถถูกแสดงในหน่วยเปอร์เซ็นต์ได้ ดังนี้

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{1}{M} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.3) สามารถเขียนแทนในรูปของโดเมนความถี่โดยการแปลงลาปลาซ (Laplace Transformation) จะได้สมการดังนี้

$$\Delta f(s) = \frac{1}{Ms} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \quad (2.3)$$

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทำให้ได้แผนภาพบล็อก ดังนี้



รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพบล็อกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.2 แบบจำลองของโหลด

การเปลี่ยนแปลงของโหลดจะส่งผลกระทบต่อ ΔP_e ในรูปที่ 2.2 โหลดในระบบไฟฟ้ากำลังจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันมากมาย เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดประเภทมอเตอร์ แต่จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดประเภทแสงสว่างและความร้อน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ ΔP_e จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับการประกอบกันของโหลดทั้งสองประเภทซึ่งประมาณค่าได้ดังนี้

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta f \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

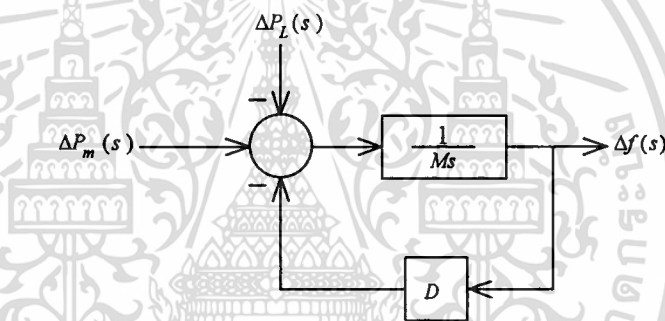
โดยที่

ΔP_L เป็นส่วนเปลี่ยนแปลงของโหลดที่ไม่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงของความถี่

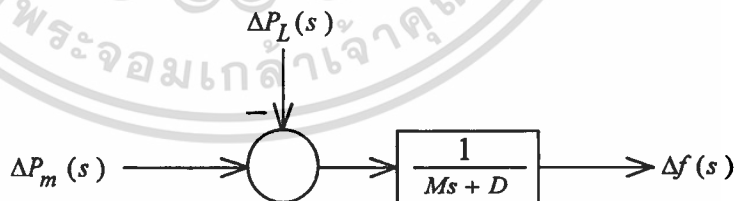
$D\Delta f$ เป็นส่วนเปลี่ยนแปลงของโหลดที่มาจาก การเปลี่ยนแปลงของความถี่

D เป็นอัตราส่วนค่าเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของโหลดต่อค่าเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความถี่ เช่น ถ้าโหลดเปลี่ยนแปลงไป 1.6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการเปลี่ยนแปลงในความถี่ 1 เปอร์เซ็นต์ ค่าของ D จะเท่ากับ 1.6

เมื่อรวมแบบจำลองของโหลดเข้ากับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้มาจากหัวข้อที่แล้ว จะทำให้ได้แผนภาพบล็อกที่แสดงในรูปที่ 2.3 และเมื่อเขียนแสดงในรูปแบบที่ไม่มีลููป้อนกลับ (feedback loop) ทำให้ได้แบบจำลองที่ง่ายขึ้น แผนภาพบล็อกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่แสดงในรูปแบบที่ไม่มีลููป้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพบล็อกของโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพบล็อกของโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ไม่มีลููป้อนกลับ

2.1.3 แบบจำลองของเทอร์ไบน์

เทอร์ไบน์เป็นตัวขับเคลื่อนที่ใช้จ่ายกำลังงานทางกล ซึ่งอาจเป็นไปได้หลายรูปแบบ เช่น เทอร์ไบน์ไฮดรอลิก (Hydraulic turbine) ที่อาศัยพลังงานจากน้ำที่ตกจากแหล่งเก็บที่สูง หรือพลังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

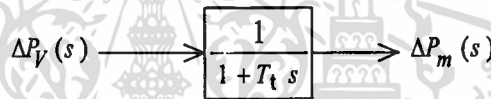
งานไอน้ำจากการเผาไหม้ถ่านหิน แก๊ส เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เป็นต้น แบบจำลองของเทอร์ไบน์จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตทางกล ΔP_m กับกำลังงานอินพุตที่มาจากน้ำหรือไอน้ำ ΔP_v เทอร์ไบน์มีแตกต่างกันหลายชนิด แต่แบบจำลองอย่างง่ายของเทอร์ไบน์ทั่วไป จะเป็นประเภทเทอร์ไบน์พลังงานไอน้ำที่ไม่มีการป้อนไอน้ำย้อนกลับ (nonreheat steam turbine) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1 + T_t s} \quad (2.6)$$

โดยที่

T_t คือ ค่าคงตัวเวลาของเทอร์ไบน์ (turbine time constant) โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 2.0 วินาที

แผนภาพบล็อกสำหรับเทอร์ไบน์ทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.5



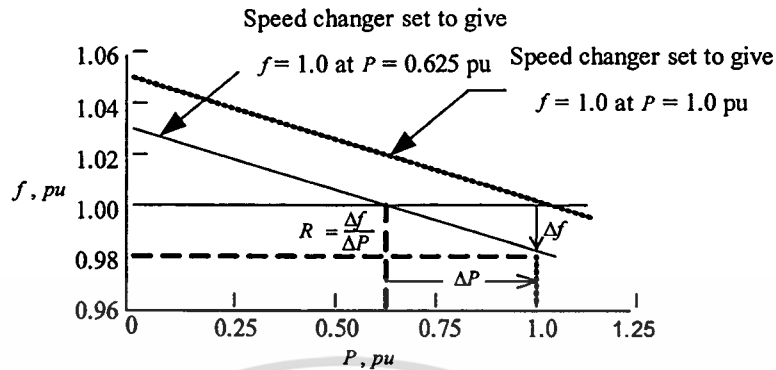
รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพบล็อกของเทอร์ไบน์ทั่วไป

2.1.4 แบบจำลองของระบบควบคุมความเร็วควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อโหลดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด กำลังไฟฟ้าที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมากกว่ากำลังงานกลที่ป้อนเข้าไป กำลังงานกลที่ขาดนี้จะถูกจ่ายด้วยพลังงานจลน์ที่มาจากระบบการหมุนที่เทอร์ไบน์ เมื่อพลังงานจลน์ถูกจ่ายออกไปจะทำให้ความเร็วของเทอร์ไบน์ลดลง และทำให้ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลงด้วยเช่นเดียวกัน ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงจะถูกตรวจจับด้วยระบบควบคุมความเร็ว เพื่อนำมาปรับกำลังงานกลทางเอาต์พุตให้ความเร็วเข้าสู่สถานะเสถียรภาพใหม่ ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแรกสุดคือระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบวัตต์ (Watt governor) ซึ่งตรวจจับความเร็วด้วยวิธีการทางกลและจ่ายพลังงานกลตามความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของเทอร์ไบน์ อย่างไรก็ตามระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้วิธีการของอิเล็กทรอนิกส์จากการตรวจจับความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของเทอร์ไบน์

เมื่อมีโหลดกำลังไฟฟ้าจริงเพิ่มขึ้น ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะยอมให้ความเร็วของเทอร์ไบน์ตกลงไปด้วยความเร็วกำหนด ความสัมพันธ์ของโหลดกับความเร็ว

ของเทอร์ไบน์ที่ถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดยตัวเลือกความเร็ว (speed changer) จะถูกตั้งไว้กราฟเส้นใดเส้นหนึ่ง



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของโหลดกับความถี่ของเทอร์ไบน์ที่ถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมความเร็วรอบในสภาวะอยู่ตัว

ค่าสปีดเรกูเรเตอร์ (Speed Regulation: R) คือ ค่าที่แสดงความชันของเส้นกราฟ โดยทั่วไป ค่า R จะมีค่าประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของโหลด กำลังงานอินพุตของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ΔP_g) เป็นผลต่างระหว่างกำลังงานอ้างอิง ΔP_{ref} กับกำลังงาน $\frac{1}{R} \Delta f$ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

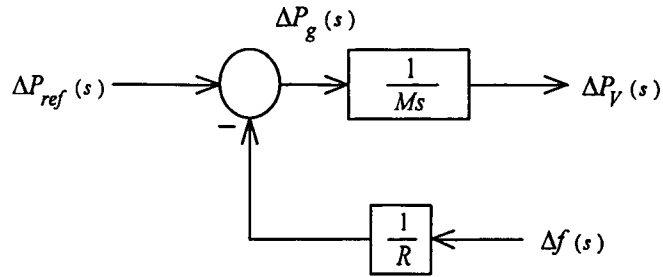
$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta f \quad (2.7)$$

สามารถแสดงได้ในโดเมนความถี่ ดังนี้

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta f(s) \quad (2.8)$$

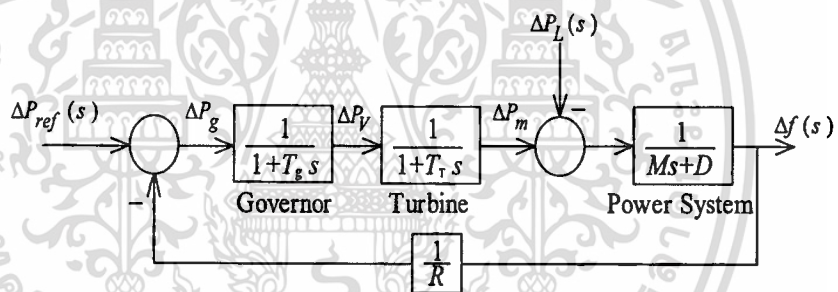
ΔP_g จะถูกแปลงผ่านตัวขยายไฮดรอลิก (Hydraulic Amplifier) ให้อยู่ในรูปของกำลังไอน้ำ ΔP_v สมมติว่าความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น และมีค่าคงที่เวลา T_g เข้ามาเกี่ยวข้อง จะได้ความสัมพันธ์ในโดเมนความถี่ ดังนี้ 1

$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1 + T_g s} \Delta P_g(s) \quad (2.9)$$



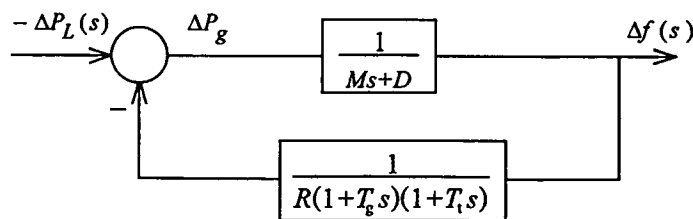
รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมความเร็วรอบ

สมการที่ (2.8) – (2.9) ถูกแสดงด้วยแผนภาพบล็อกที่แสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อรวมแผนภาพบล็อกในรูปที่ 4, 5 และ 7 เข้าด้วยกันก็จะได้แผนภาพบล็อกของ LFC ที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพบล็อกของ LFC ที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบ

เมื่อให้โหลดที่เปลี่ยนแปลง $-\Delta P_L(s)$ เป็นสัญญาณอินพุต และให้ความถี่ที่เปลี่ยนแปลง $\Delta f(s)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุต จะสามารถเขียนแผนภาพบล็อกในรูปที่ 2.8 ให้อยู่ในรูปที่ 2.9 ได้



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพบล็อกของ LFC ที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ

$-\Delta P_L$ เป็นสัญญาณอินพุต และ $\Delta f(s)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุต
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดพิมพ์ขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงเปิดของแผนภาพบล็อกในรูปที่ 2.9 คือ

$$KG(s)H(s) = \frac{1}{R} \frac{1}{(Ms + D)(1 + T_g s)(1 + T_i s)} \quad (2.10)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดที่สัมพันธ์ระหว่างโหลดที่เปลี่ยนแปลง $-\Delta P_L$ กับความถี่ที่เปลี่ยนแปลง $\Delta f(s)$ คือ

$$\frac{\Delta f(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{(1 + T_g s)(1 + T_i s)}{(Ms + D)(1 + T_g s)(1 + T_i s) + 1/R} \quad (2.11)$$

หรือ

$$\Delta f(s) = -\Delta P_L(s) T(s) \quad (2.12)$$

เมื่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงเป็นแบบขั้น (Step) กล่าวคือ $\Delta P_L(s) = \Delta P_L / s$ ค่าของ Δf ที่สภาวะอยู่ตัว คือ

$$\Delta f_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta f(s) = (-\Delta P_L) \frac{1}{D + 1/R} \quad (2.13)$$

ในกรณีที่โหลดไม่มีประเภทที่มาจาก การเปลี่ยนแปลงความถี่ ($D = 0$) ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะอยู่ตัวจะอยู่ในรูปของค่า R ดังนี้

$$\Delta f_{ss} = (-\Delta P_L) R \quad (2.14)$$

ในระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่หลายตัวทำงานร่วมกัน โดยมีค่าสปีดเรกกูเรเตอร์เท่ากับ R_1, R_2, \dots, R_n ตามลำดับ และมีโหลดประเภทมอเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความถี่ในอัตราส่วน D แล้ว ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะอยู่ตัว แสดงได้ดังนี้

$$f_{ss} = (-\Delta P_L) \frac{1}{D + 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n} \quad (2.15)$$

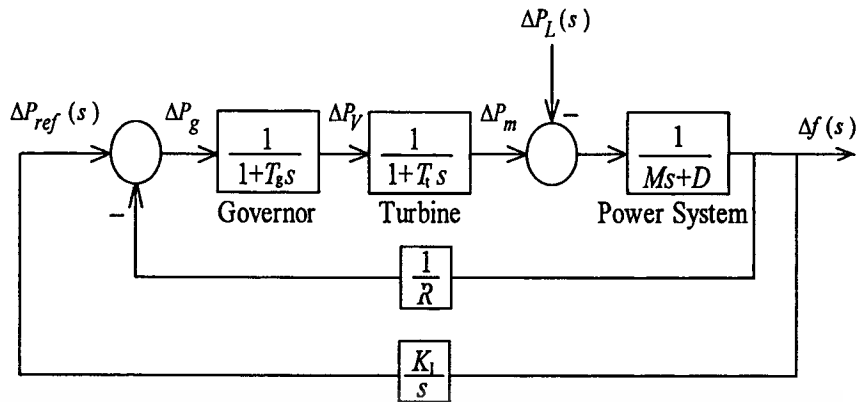
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 แบบจำลองของตัวควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าอัตโนมัติ AGC

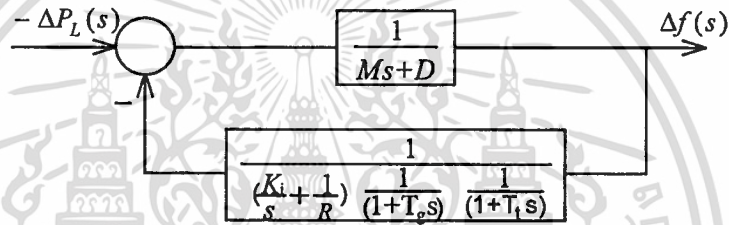
เมื่อมีโหลดมากขึ้น ความเร็วของเทอร์ไบน์จะตกลงก่อนที่ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะปรับกำลังงานกลทางเอาท์พุทให้ความเร็วเข้าสู่สถานะเสถียรภาพใหม่ เมื่อความเร็วเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยลง สัญญาณความคลาดเคลื่อน (Error Signal) ที่ถูกตรวจจับก็จะเริ่มลดลงด้วย และระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะเริ่มรักษาความเร็วของเทอร์ไบน์ให้คงที่ อย่างไรก็ตาม ความเร็วของเทอร์ไบน์ที่คงที่นี้ไม่ใช่ความเร็วเดิมก่อนมีการเพิ่มขึ้นของโหลด วิธีการหนึ่งที่จะรักษาความเร็วของเทอร์ไบน์ให้อยู่ในค่าเดิมก่อนการเพิ่มขึ้นของโหลด คือการเพิ่มตัวอินทิเกรต (integrator) เข้าไป โดยตัวอินทิเกรตจะตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยตลอดช่วงเวลา ดังนั้น เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ความถี่ของไฟฟ้าที่ได้มาก็จะถูกรักษาให้คงที่อยู่ตลอดเวลาเช่นกัน ตัวอินทิเกรตนี้เรียกว่า ตัวควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control) AGC ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมต่อหลายๆ พื้นที่ AGC จะถูกนำมาใช้รองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดในแต่ละพื้นที่โดยคำนึงถึงเรื่องความประหยัดสูงสุด และสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ให้ได้มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อมีการรบกวนอย่างรุนแรงเกินความสามารถของ AGC จะรองรับได้ AGC จะปิดการทำงานชั่วคราว และปล่อยให้ระบบการควบคุมฉุกเฉินทำงานแทน ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึง AGC ในระบบพื้นที่เดียว และ AGC ในระบบที่มีการเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่

2.1.5.1 AGC ในระบบพื้นที่เดียว

เมื่อไม่มี AGC ในระบบ LFC โหลดที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อความถี่ของระบบในสถานะอยู่ตัว โดยจะขึ้นอยู่กับค่า R ของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการลดค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงให้เป็นศูนย์ จะต้องเพิ่มตัวควบคุม AGC เข้าสู่ระบบ AGC จะทำหน้าที่เพิ่มลำดับชั้นของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอีกหนึ่งชั้น เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงความถี่ในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ เกนของ AGC จะต้องถูกปรับให้เหมาะสมที่สุด แผนภาพบล็อกของ LFC พื้นที่เดียวที่รวม AGC ในระบบแสดงในรูปที่ 2.10 และสามารถถูกแสดงในรูปแผนภาพบล็อกสมมูลย์ได้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดง AGC ในระบบพื้นที่เดียว



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพบล็อกสมมูลของ AGC ในระบบพื้นที่เดียว

ฟังก์ชันถ่ายโอนรบบวงปิดของระบบควบคุมในรูปที่ 2.11 แสดงได้ดังนี้

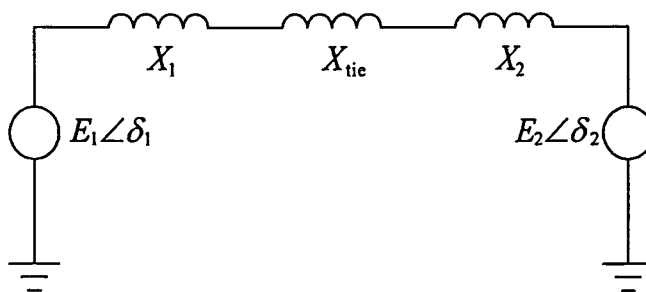
$$\frac{\Delta f(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{s(1+T_g s)(1+T_t s)}{s(Ms + D)(1+T_g s)(1+T_t s) + K_I + s/R} \tag{2.16}$$

2.1.5.2 AGC ในระบบหลายพื้นที่

เนื่องจากกลุ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานร่วมกันจะมีจังหวะการหมุนเดียวกัน และเทอร์ไบน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีการตอบสนองเหมือนกัน จึงเป็นไปได้ที่จะแสดงระบบทั้งหมดใน LFC ได้

ก่อนที่จะศึกษา AGC ในระบบหลายพื้นที่ AGC ในระบบสองพื้นที่จะถูกนำมาพิจารณา ก่อน รูปที่ 2.12 แสดงหน่วยการกำเนิดไฟฟ้าสองพื้นที่โดยมีการเชื่อมระบบด้วยสายส่งที่มีค่ารีแอกแตนซ์ (reactance) เป็น x_{ie} ในแต่ละหน่วยการกำเนิดไฟฟ้าจะถูกแสดงโดยแหล่งกำเนิดแรงดันที่มีค่ารีแอกแตนซ์สมมูลย์อยู่ข้างหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสองพื้นที่

ในสภาวะปกติ กำลังไฟฟ้าจริงที่ถ่ายโอนระหว่างพื้นที่ แสดงได้ดังนี้

$$P_{12} = \frac{|E_1||E_2|}{X_{12}} \sin \delta_{12} \quad (2.17)$$

โดยที่ $X_{12} = X_1 + X_{tie} + X_2$ และ $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ สมการที่ (2.17) สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟระหว่างพื้นที่ ΔP_{12} น้อย กล่าวคือ

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= \left. \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12_0}} \Delta \delta_{12} \\ &= T_{12} \Delta \delta_{12} \end{aligned} \quad (2.18)$$

ค่า T_{12} คือ ค่าความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ_{12} ในแกนนอนและ P_{12} ในแกนตั้ง ณ.มุม $\delta_{12_0} = \delta_{1_0} - \delta_{2_0}$

เนื่องจาก T_{12} ถูกนิยามเป็นค่าสัมประสิทธิ์ซิงโครไนซ์ (Synchronizing Coefficient) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $P_{\max} \cos \delta_0$ ดังนั้น ค่า T_{12} จึงสามารถนิยามได้ดังนี้

$$T_{12} = \left. \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12_0}} = \frac{|E_1||E_2|}{X_{12}} \cos \Delta \delta_{12_0} \quad (2.19)$$

การเปลี่ยนแปลงการไหลกำลังไฟระหว่างพื้นที่นิยามได้ในรูป

$$\Delta P_{12} = T_{12} (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (2.20)$$

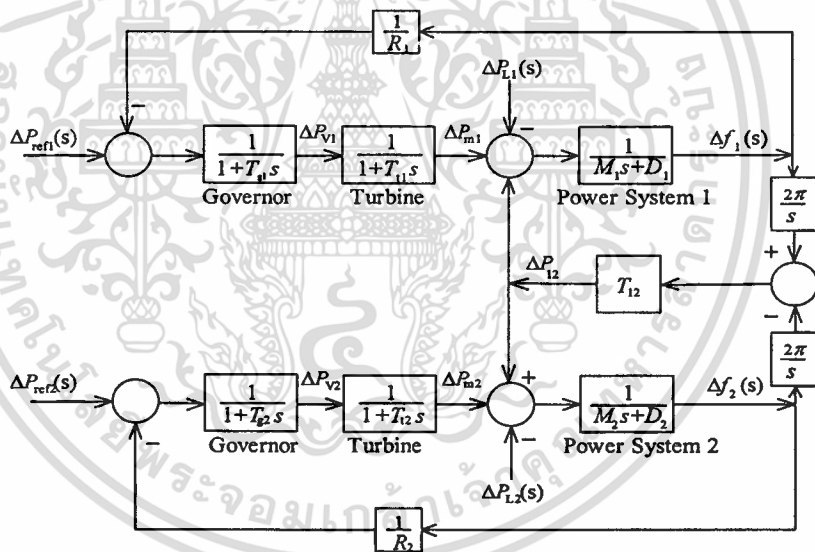
จากสมการ (2.20) สามารถทำการหาอนุพันธ์ แล้วเขียนแทนในรูปของโดเมนความถี่โดย
 เอกสาร **การแปลงลาปลาซ** จะได้สมการดังนี้ **งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta P_{12}(s) = \frac{T_{12}}{s} (\Delta \omega_1(s) - \Delta \omega_2(s)) \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) สามารถเขียนแทนในรูปของการเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ดังนี้

$$\Delta P_{12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} (\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)) \quad (2.22)$$

กำลังไฟฟ้าจะไหลระหว่างพื้นที่ เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในพื้นที่หนึ่งและกำลังไฟฟ้าลดลงในอีกพื้นที่หนึ่ง ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างระหว่างมุมของเฟส ถ้า $\Delta \delta_1 > \Delta \delta_2$ แล้ว กำลังไฟฟ้าจะไหลจากพื้นที่ 1 ไปพื้นที่ 2 แผนภาพบล็อกแสดง LFC ของสองพื้นที่ที่แสดงได้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดง LFC ของระบบไฟฟ้ากำลังสองพื้นที่

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ 1 ทั้งสองพื้นที่จะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เท่ากัน ในสถานะอยู่ตัวดังนี้

$$\Delta f = \Delta f_1 = \Delta f_2 \quad (2.23)$$

และ

$$\begin{aligned}\Delta P_{m1} - \Delta P_{12} - \Delta P_{L1} &= \Delta f D_1 \\ \Delta P_{m2} + \Delta P_{12} &= \Delta f D_2\end{aligned}\quad (2.24)$$

การเปลี่ยนแปลงกำลังทางกลถูกกำหนดโดยค่า R ของระบบ GOV

$$\begin{aligned}\Delta P_{m1} &= \frac{-\Delta f}{R_1} \\ \Delta P_{m2} &= \frac{-\Delta f}{R_2}\end{aligned}\quad (2.25)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.25) ลงในสมการที่ (2.24) แล้วแก้สมการหาค่า Δf จะได้

$$\begin{aligned}\Delta f &= \frac{-\Delta P_{L1}}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \\ &= \frac{-\Delta P_{L1}}{B_1 + B_2}\end{aligned}\quad (2.26)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}B_1 &= \frac{1}{R_1} + D_1 \\ B_2 &= \frac{1}{R_2} + D_2\end{aligned}\quad (2.27)$$

B_1 และ B_2 เป็นแฟกเตอร์ความลำเอียงของความถี่ (frequency bias factor) การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลระหว่างพื้นที่แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta P_{12} &= -\frac{\left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)\Delta P_{L1}}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right)\left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \\ &= \frac{B_2}{B_1 + B_2}(-\Delta P_{L1})\end{aligned}\quad (2.28)$$

เมื่อพิจารณา LFC ในรูปที่ 2.13 เมื่อมีกำลังไฟฟ้าของโหลเปลี่ยนแปลงที่พื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น ΔP_{L1} เกิดขึ้นที่พื้นที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความถี่ในสภาวะอยู่ตัวจะเกิดขึ้นตามเอกสารสมการที่ (2.26) ทำให้กำลังทางกลเพิ่มขึ้นในทั้งสองพื้นที่ตามสมการที่ (2.25) แต่กำลังทางกลที่เพิ่มไม่เท่ากันทุกพื้นที่ อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นรวมกันทั้งสองพื้นที่จะน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ 1 (ΔP_{L1}) ดังนั้น กำลังทางกลที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนจะขาดไป กำลังงานกลที่ขาดนี้จะถูกจ่ายด้วยพลังงานจลน์ที่มาจากระบบการหมุนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในทั้งสองพื้นที่ เมื่อพลังงานจลน์ถูกจ่ายออกไปจะทำให้ความเร็วของเทอร์ไบน์ลดลงในทั้งสองพื้นที่ด้วยค่า $\Delta f D_1$ ในพื้นที่ 1 และ $\Delta f D_2$ ในพื้นที่ 2 และจะเกิดกำลังไฟฟ้าไหลระหว่างพื้นที่ตามสมการที่ (2.28)

หลักการควบคุมของ LFC ที่ดีในสภาวะการทำงานปกติมีดังนี้

- รักษาระดับของความถี่โดยประมาณให้ได้ 50 เฮิร์ตซ์
- รักษาระดับการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ให้ได้ตามที่กำหนด
- แต่ละพื้นที่จะต้องรองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดในแต่ละพื้นที่นั้นๆ เอง

ใน LFC โดยทั่วไปต้องมีการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ด้วย โดยที่ในแต่ละพื้นที่นั้นจะต้องลดค่าความคลาดเคลื่อนของการควบคุมพื้นที่ (Area Control Error) ACE ให้เป็นศูนย์ ค่า ACE นี้จะประกอบด้วย ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ในแต่ละพื้นที่และการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ ดังนี้

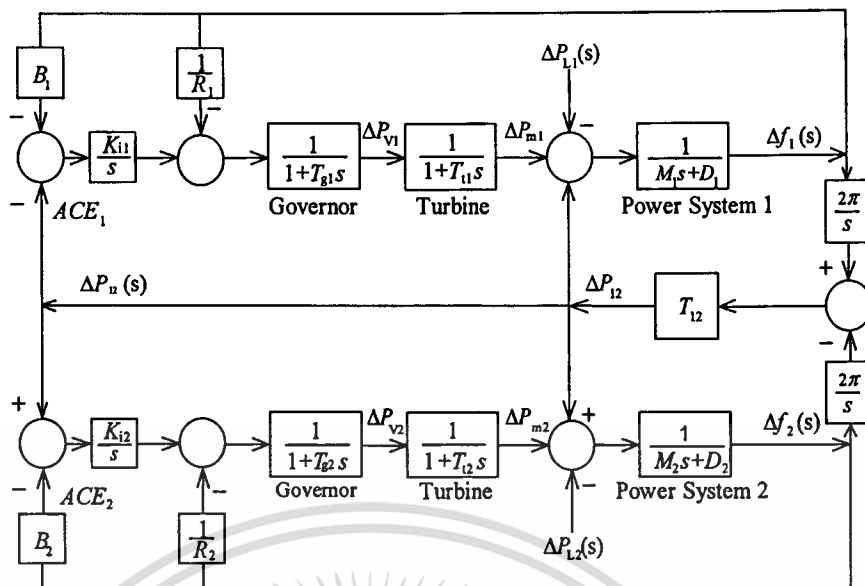
$$ACE_i = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} + K_i \Delta f \quad (2.29)$$

โดยที่ค่า K_i บ่งบอกถึงขนาดของผลกระทบที่มาจากกรรบกรวนในพื้นที่ใกล้เคียง โดยปกติค่า K_i จะถูกเลือกให้เท่ากับในพื้นที่นั้น

ดังนั้น ACE ของระบบไฟฟ้ากำลังสองพื้นที่แสดงได้ดังนี้

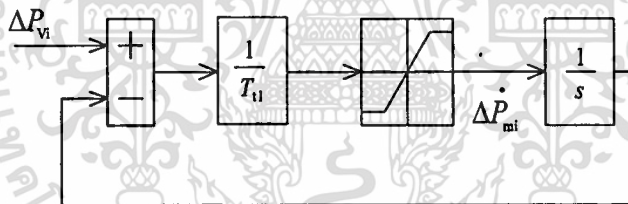
$$\begin{aligned} ACE_1 &= \Delta P_{12} + B_1 \Delta f_1 \\ ACE_2 &= \Delta P_{21} + B_2 \Delta f_2 \end{aligned} \quad (2.30)$$

โดยที่ ΔP_{12} เป็นการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 และ ΔP_{21} เป็นการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 1 ACE ถูกใช้เป็นสัญญาณเพื่อใช้กระตุ้นการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ทำให้ ΔP_{12} และ Δf เป็นศูนย์ เมื่ออยู่ในสภาวะอยู่ตัว แผนภาพบล็อกของ LFC 2 พื้นที่ที่มี AGC แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพบล็อกของ LFC 2 พื้นที่ที่มี AGC

2.1.6 แบบจำลองของขีดจำกัดของอัตราการผลิต GRC

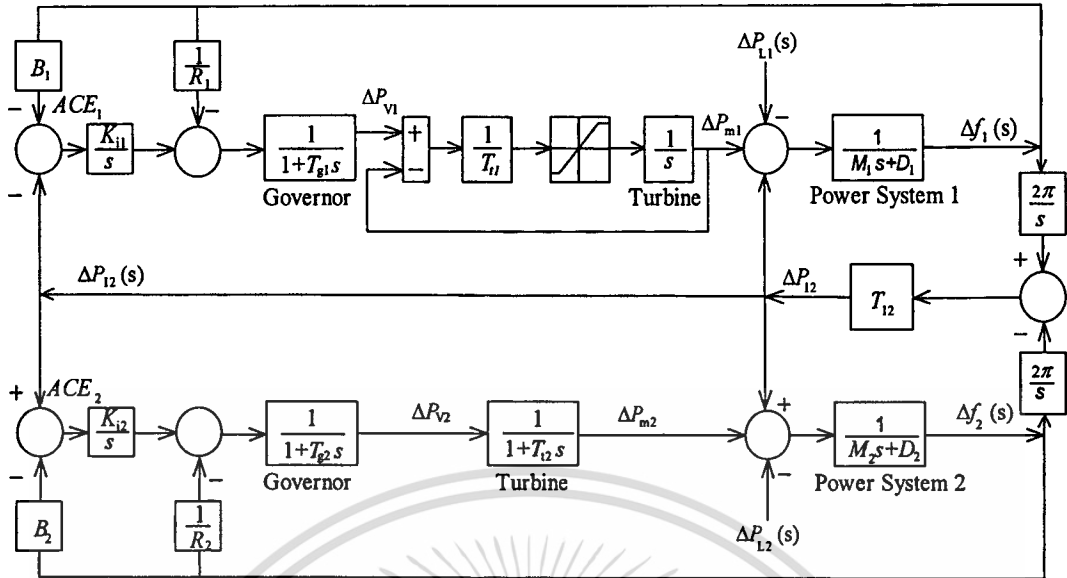


รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพบล็อกของ GRC

ในสถานการณ์ความเป็นจริง ในการผลิตกำลังไฟฟ้านี้จะมีขีดจำกัดของอัตราการผลิต (Generator Rate Constraint) GRC โดยทั่วไป ขีดจำกัดของอัตราการผลิตมีค่า 0.1 เปอร์ยูนิตต่อนาที ดังแสดงในสมการที่ (2.29)

$$\Delta \dot{P}_g \leq 0.1 p.u. / \text{min} = 0.0017 p.u. / \text{sec} \tag{2.29}$$

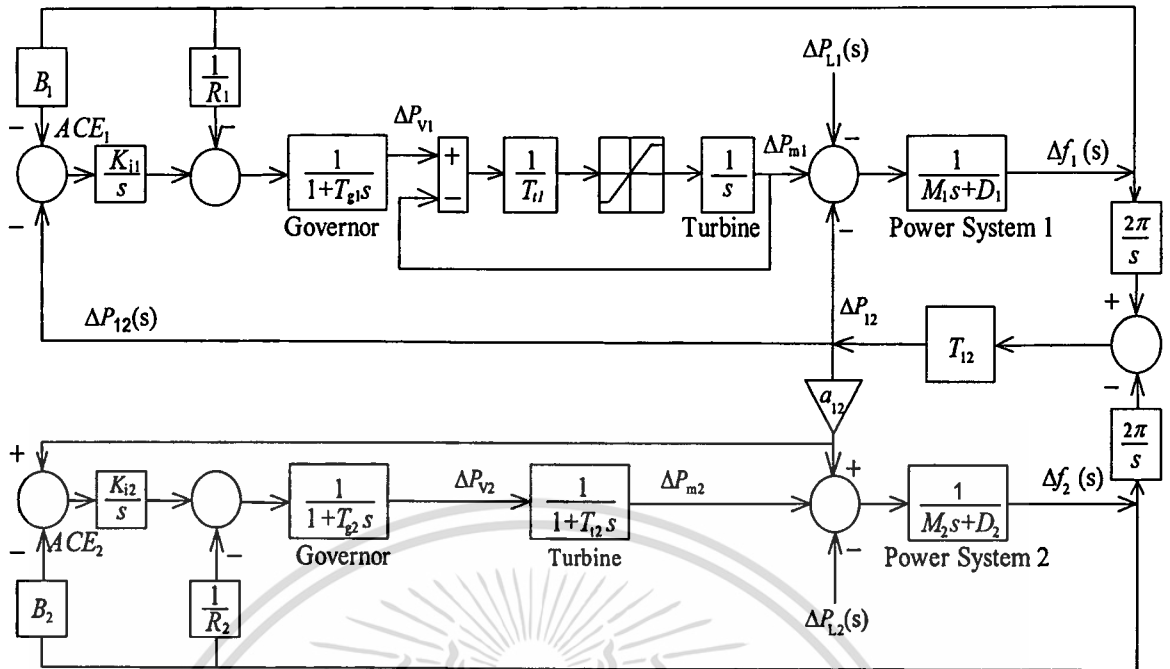
แผนภาพบล็อกของ GRC แสดงในรูปที่ 2.15 และแบบจำลองของ LFC ที่มี GRC อยู่ในพื้นที่ 1 แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงแบบจำลองของ LFC ที่มี GRC อยู่ในพื้นที่ 1

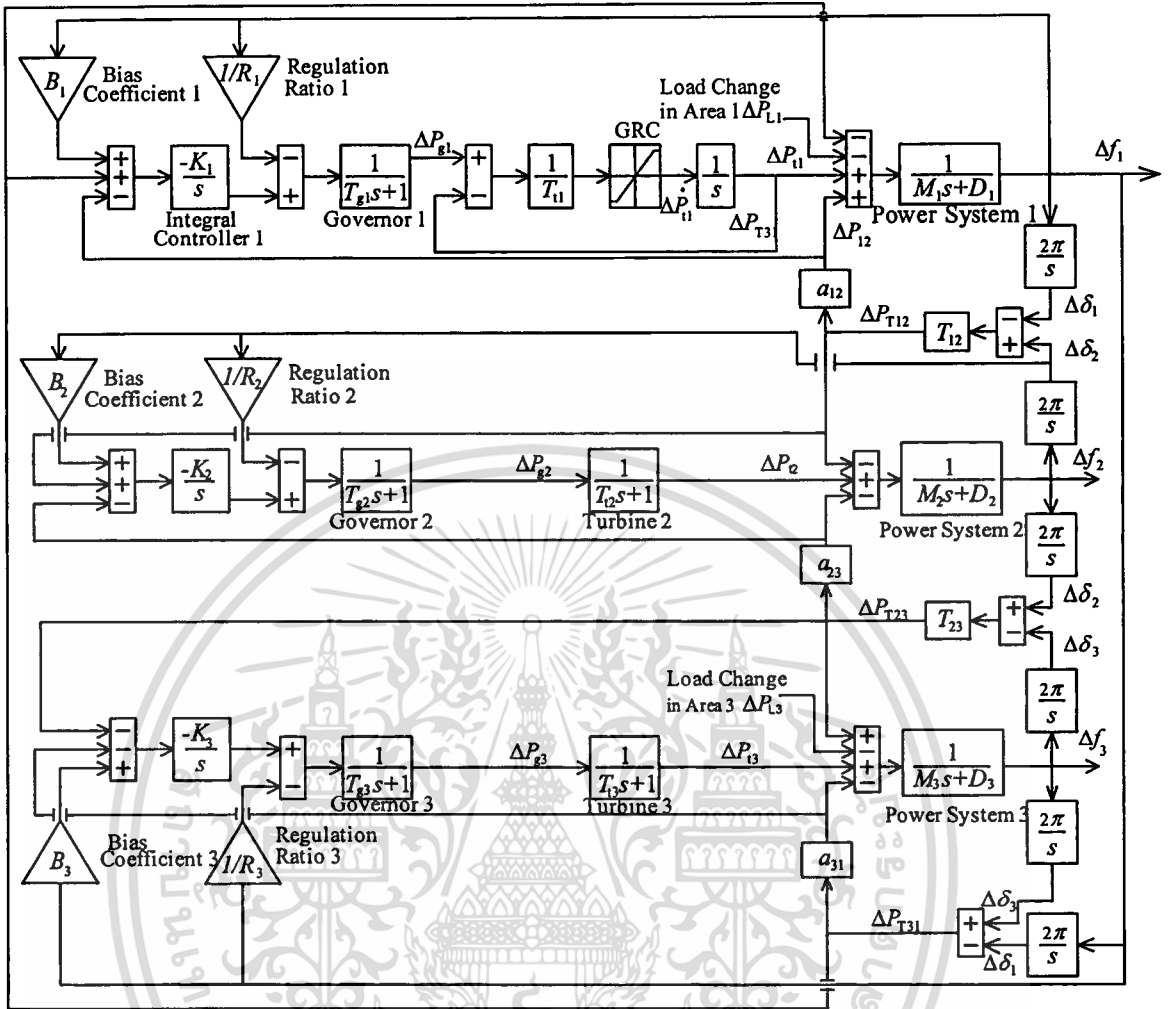
2.1.7 แบบจำลองของอัตราส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่

เนื่องจากในแต่ละพื้นที่มีอัตราการผลิตกำลังไฟฟ้าไม่เท่ากัน ในแบบจำลอง LFC ซึ่งมีการคิดคำนวณแบบเปอร์ยูนิตจำเป็นต้องมีตัวคูณในแนวที่อยู่ระหว่างพื้นที่ ตัวคูณนี้เรียกว่า อัตราส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ (Area Capacity Ratio) ซึ่งแทนสัญลักษณ์ด้วย a_{ij} ยกตัวอย่างเช่น ถ้าพื้นที่ 1 มีความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าเป็น 2,000 เมกะวัตต์ และพื้นที่ 2 มีความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าเป็น 4,000 เมกะวัตต์ ค่า a_{12} เป็นอัตราส่วนความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ 1 ต่อพื้นที่ 2 จะมีค่า 0.5 และค่า a_{21} จะมีค่าเป็น 2 ซึ่งในแบบจำลองของ LFC จะมี a_{12} หรือ a_{21} เพียงตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น และกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างพื้นที่จะถูกคูณด้วยค่าเกนค่านี้ก่อนที่จะไหลเข้ามาอีกพื้นที่ แบบจำลองของ LFC ของ 2 พื้นที่ที่มีแผนภาพบล็อกของอัตราส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงแบบจำลองของ LFC ของ 2 พื้นที่ที่มีแผนภาพบล็อกของอัตราส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่

แบบจำลองของ LFC ของ 3 พื้นที่อาศัยหลักการเดียวกับ LFC ที่มี 2 พื้นที่ แบบจำลองของ LFC ของ 3 พื้นที่ที่มีแผนภาพบล็อกในแต่ละส่วนครบบริบูรณ์และมี SMES ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 แสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงแบบจำลองของ LFC ของ 3 พื้นที่ที่มีแผนภาพบล็อกทุกส่วนครบบริบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES

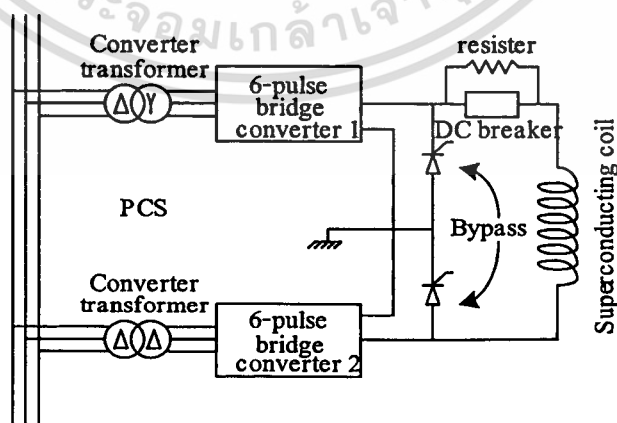
2.2.1 ลักษณะทั่วไปและแบบจำลองของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES

ตัวควบคุม SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) สามารถประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้ 2 ประเภทดังนี้

1. ประเภทใช้สำหรับปรับระดับโหลด ในประเภทนี้จะเป็นตัวควบคุม SMES ที่มีขนาดใหญ่ ตัวนำแม่เหล็กที่เป็นส่วนประกอบของตัวควบคุม SMES จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นร้อยๆเมตร และสามารถสะสมพลังงานได้ถึง 10^7 ถึง 10^8 เมกะจูล
2. ประเภทใช้สำหรับปรับปรุงเสถียรภาพความถี่ของระบบ ในประเภทนี้จะใช้อุปกรณ์ SMES ที่มีขนาดเล็ก ตัวนำแม่เหล็กที่เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ SMES จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่กี่เมตร และสามารถสะสมพลังงานได้ไม่เกิน 10^2 เมกะจูล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ SMES ที่ใช้ในประเภทที่ 2 ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES อยู่ในระบบ และการรบกวนภายนอกเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งในที่นี้หมายถึงการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจริง การแกว่งของผลตอบสนองเชิงความถี่จะกลับเข้าสู่สภาวะเดิมก่อนเกิดการรบกวนได้ช้า การนำตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ประเภทนี้เข้าไปในระบบจะปรับปรุงผลตอบสนองเชิงความถี่ให้เข้าสู่สภาวะเดิมเร็วขึ้น พร้อมกันนั้นยังสามารถแคมนปีผลตอบสนองเชิงความถี่ให้ระบบมีโอเวอร์ชูตสูงสุด (maximum overshoot) ลดลง

ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES เป็นแหล่งสะสมชนิดหนึ่งซึ่งสะสมพลังงานในรูปของกระแสไฟฟ้าตรง อันเป็นผลให้เกิดสนามแม่เหล็กของไฟตรง ขดลวดจะนำกระแสที่อุณหภูมิไครโอเจนิค (Cryogenic Temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ขดลวดจะเป็นตัวนำได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของตัวนำเลย



รูปที่ 2.19 แสดงรูปร่างโดยพื้นฐานของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.19 แสดงรูปร่างโดยพื้นฐานของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ในคอยล์ชนิดตัวนำยิ่งยวด (superconducting coil) จะถูกอัดประจุเป็นค่าๆหนึ่ง ซึ่งจะไม่ถึงค่าเต็มพิกัด คอยล์แม่เหล็กกระแสตรง (DC magnetic coil) จะต่ออยู่กับหน่วยไฟฟ้ากระแสสลับผ่านทางระบบการแปลงผันกำลังงาน (Power Conversion System) PCS ที่ประกอบด้วยเรกติไฟเออร์ (rectifier) และอินเวอร์เตอร์ (inverter) เมื่อได้มีการอัดประจุแล้ว คอยล์จะนำกระแส ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่มีการสูญเสีย คอยล์นี้จะถูกรักษาไว้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ และจะถูกแช่อยู่ในฮีเลียมเหลวตลอดเวลา

เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าจริงเพิ่มขึ้น พลังงานที่ถูกเก็บสะสมจะถูกปล่อยออกมาเกือบทั้งหมด โดยทันทีผ่านทาง PCS เข้าสู่หน่วยกระแสสลับเพื่อชดเชยกับโหลดที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้เปรียบเสมือนว่าโหลดที่เพิ่มขึ้นจะลดลง ส่งผลให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ลดลงเช่นกัน ในขณะที่ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกลไกการควบคุมอื่นๆเริ่มทำงานให้ระบบไฟฟ้ากำลังเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่ คอยล์จะอัดประจุกลับเข้าสู่ค่ากระแสเริ่มต้นใหม่ เพื่อพร้อมที่จะรองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจริงครั้งต่อไป รูปที่ 2.20 แสดงตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ขนาด 1.2 เมกะจูล ที่ได้มีการติดตั้งจริงในประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 2.20 แสดงของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่มีการติดตั้งจริงในประเทศญี่ปุ่น

ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID เป็นวิธีการเดิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยที่ผ่านมา วิธีการควบคุมแบบ PID เป็นวิธีที่สามารถควบคุมค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่ให้เป็นศูนย์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมสมรรถนะผลตอบสนองชั่วคราว เช่น ค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum Overshoot) ค่าเวลาหน่วง (Delay time) เป็นต้น ตัวควบคุมแบบ PID ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional) P ตัวควบคุมแบบอินทิเกรต

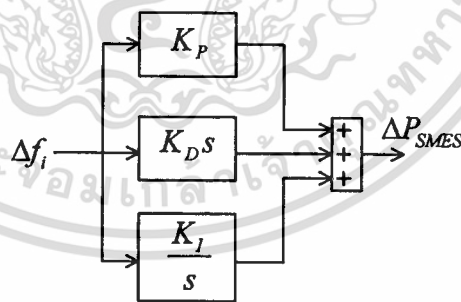
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Integral) I และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative) D และมีฟังก์ชันการถ่ายโอนตามสมการที่ (2.30)

$$G_c(s) = K_P + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (2.30)$$

โดยที่ K_P , K_D และ K_I เป็นค่าจริง

ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ เป็นการออกแบบโดยใช้วิธีผลตอบสนองความถี่ ซึ่งจะพิจารณาถึงผลตอบสนองในด้านต่างๆ เพราะจะแสดงให้เห็นว่าระบบควรจะถูกปรับปรุงแก้ไขอย่างไร แต่ระบบจะถูกออกแบบให้สอดคล้องกับข้อกำหนดในโดเมนความถี่แทนที่จะเป็นข้อกำหนดในโดเมนเวลา นั่นคือ เมื่อออกแบบโดยวิธีการของผลตอบสนองความถี่จากฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงเปิด (Open loop transfer function) เรียบร้อยแล้ว จะทราบถึงข้อมูลของโพล (pole) และซีโร (zero) ของฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิด (closed loop transfer function) จากนั้นต้องตรวจสอบพฤติกรรมของผลตอบสนองชั่วคราวว่าสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ต้องการในโดเมนเวลาหรือไม่ ถ้าผลไม่เป็นที่พอใจแล้ว ต้องวิเคราะห์และออกแบบระบบใหม่ตั้งแต่ต้นจนกว่าจะได้ผลเป็นที่พอใจ แต่ในทางปฏิบัติทั่วไปสามารถใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบใน โดเมนเวลาเพื่อให้ระบบมีคุณสมบัติสอดคล้องกับข้อกำหนดที่เลือกไว้เท่าที่จะเป็นได้ แบบจำลองของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES แสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แบบจำลองของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES

2.2.2 ผลการใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES กับระบบไฟฟ้ากำลัง

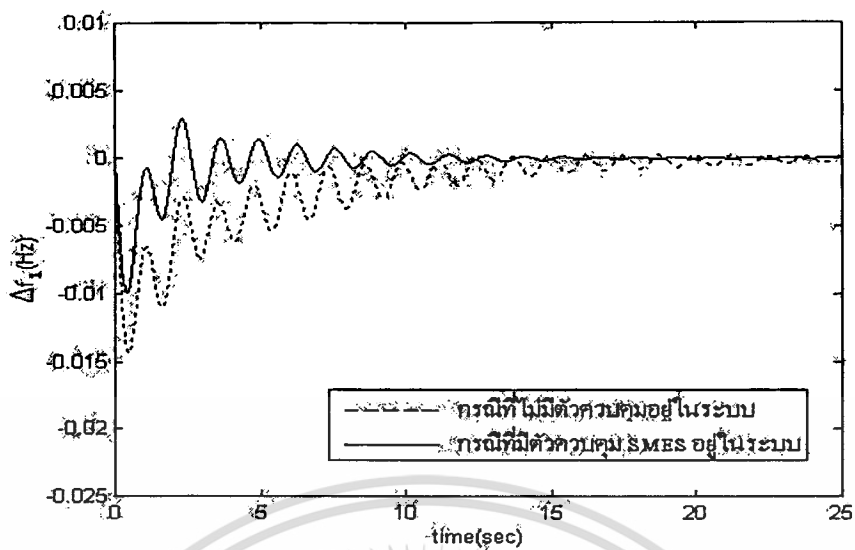
ในบทความวิจัยที่ผ่านมา [3-5] ได้ทำการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังจาก LFC แล้วทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมใดเลยกับมีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ในระบบ จากบทความเหล่านั้นได้นำเสนอให้เห็นว่าการนำตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES มาประยุกต์ใช้ในระบบสามารถปรับปรุงผลตอบสนองเชิงความถี่ได้ดีขึ้น ในหัวข้อเอกสารนี้ขอเน้นไปที่การปรับปรุงผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง อย่างไรก็ตามไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES กับระบบไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่ที่แสดงในรูปที่ 2.18 โดยให้มีการรบกวนภายนอกจากการเพิ่มขึ้นของโหลดไฟฟ้าจริง 0.01 เปอรฺยูนิตเมกะวัตต์ที่พื้นที่ 1 และ 3 และกรณีที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES อยู่ในระบบ ให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ของสมการที่ (2.30) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 เท่ากับค่าที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ แสดงในตารางที่ 2.1 [10] ดังนี้

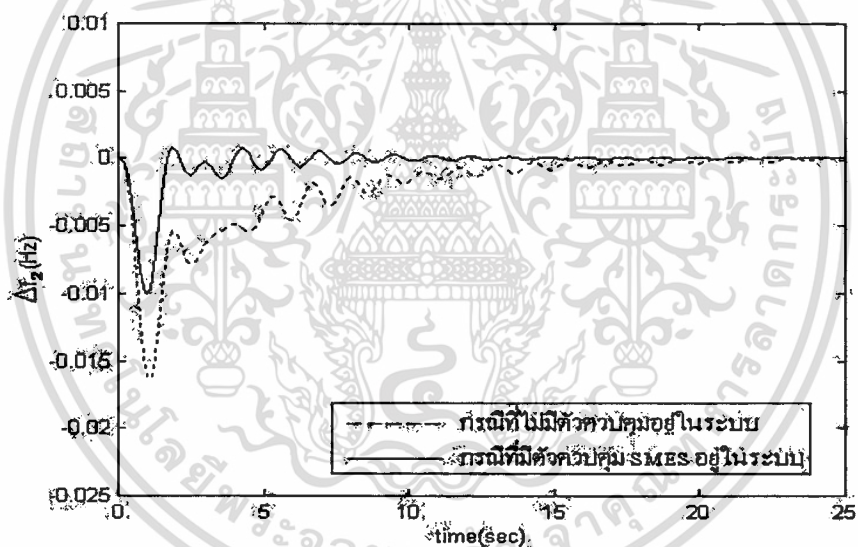
ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของระบบ LFC 3 พื้นที่

อัตราส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้าในพื้นที่ 1 : 2 : 3 = 500 : 1000 : 200 เมกะวัตต์			
ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant) [pu MW.s /Hz]	$M_1 = 0.2$	$M_2 = 0.167$	$M_3 = 0.15$
ค่าสัมประสิทธิ์แดมป์ (Damping Coefficient) [pu MW/Hz]	$D_1 = 0.006$	$D_2 = 0.00833$	$D_3 = 0.005$
ค่าสัมประสิทธิ์การซิงโครไนซ์ (Synchronizing Coefficient) [pu MW/rad]	$T_{12} = 0.159$	$T_{23} = 0.064$	$T_{31} = 0.079$
อัตราส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ (Area Capacity Ratio)	$a_{12} = 2.0$	$a_{23} = 0.2$	$a_{31} = 2.5$
ค่าคงที่เวลาของเทอร์ไบน์ (Turbine Time Constant) [s]	$T_{t1} = 0.25$	$T_{t2} = 0.3$	$T_{t3} = 0.25$
ค่าคงที่เวลาของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Governor Time Constant) [s]	$T_{g1} = 0.1$	$T_{g2} = 0.08$	$T_{g3} = 0.1$
ค่าอัตราส่วนการเรีกฎเกณฑ์ (Regulation Ratio) [Hz/pu MW]	$R_1 = 2.4$	$R_2 = 2.4$	$R_3 = 2.4$
ค่าสัมประสิทธิ์ความลำเอียง (Bias Coefficient) [pu MW/Hz]	$B_1 = 0.2$	$B_2 = 0.2$	$B_3 = 0.2$
ค่าเกนการอินทิเกรต (Integral Gain) [1/s]	$K_{I1} = 0.4$	$K_{I2} = 0.4$	$K_{I3} = 0.4$

ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 2.22 ถึง 2.30

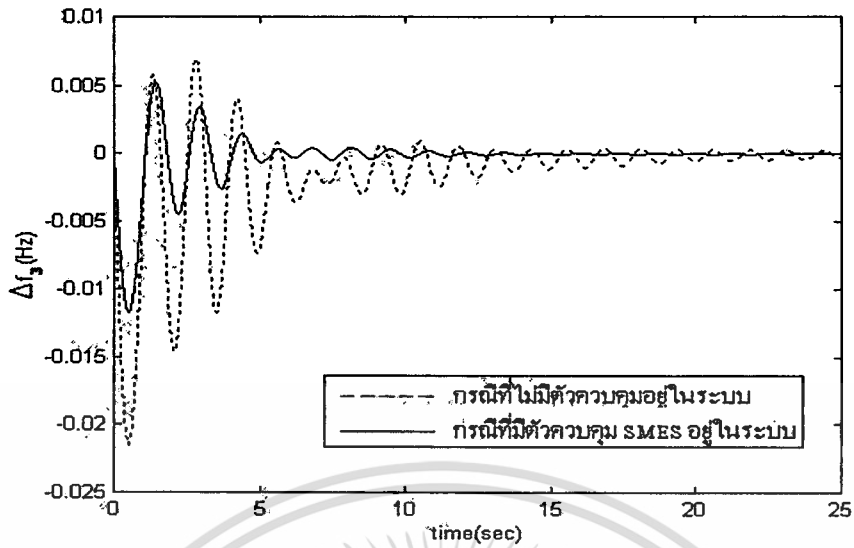


รูปที่ 2.22 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ 1

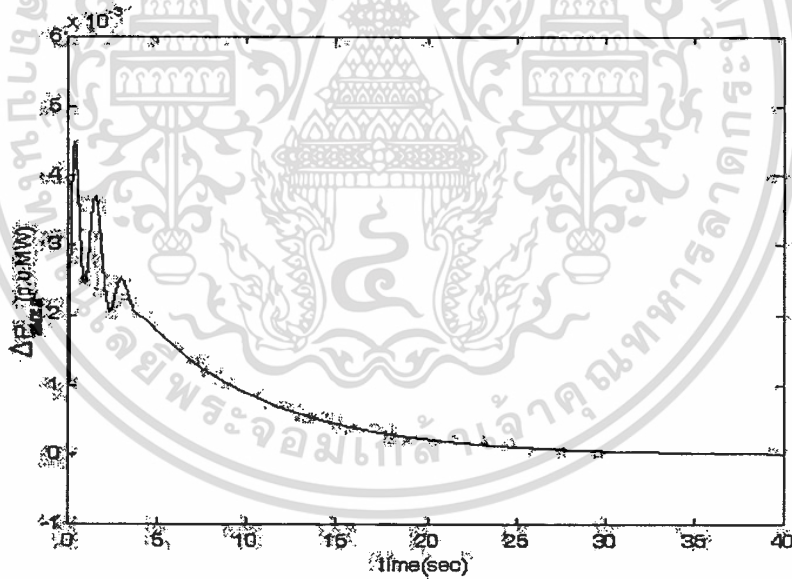


รูปที่ 2.23 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

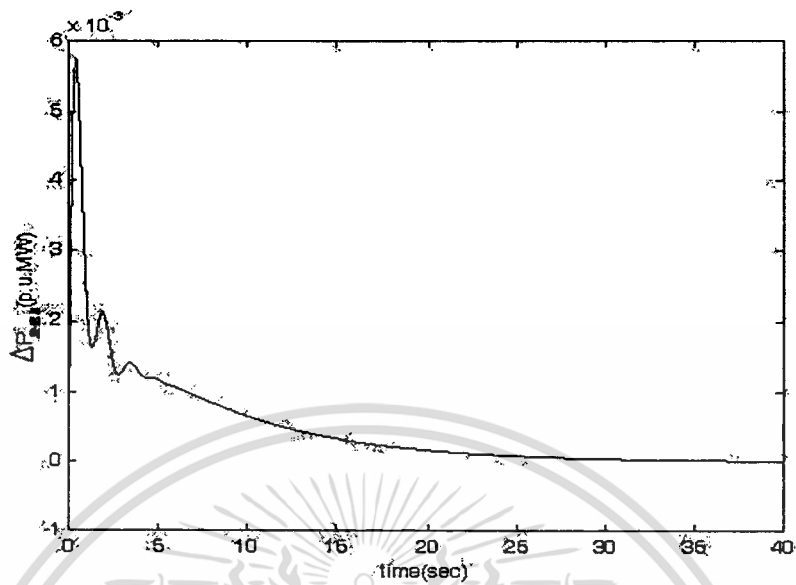


รูปที่ 2.24 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ 3

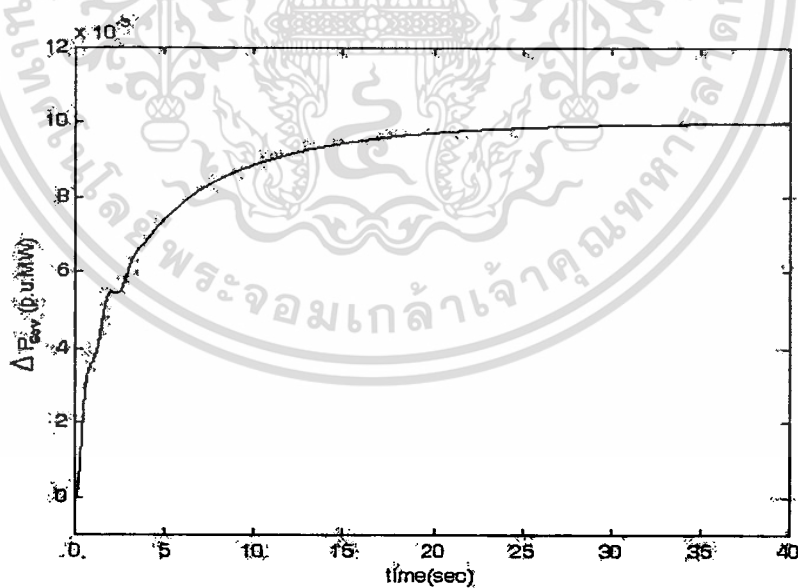


รูปที่ 2.25 แสดงกำลังไฟฟ้าทางเอาต์พุตของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

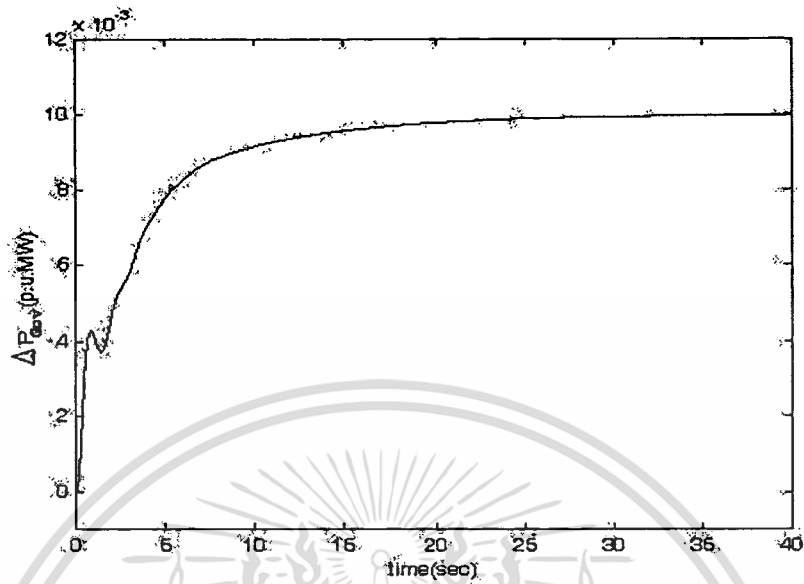


รูปที่ 2.26 แสดงกำลังไฟฟ้าทางเอาต์พุตของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3

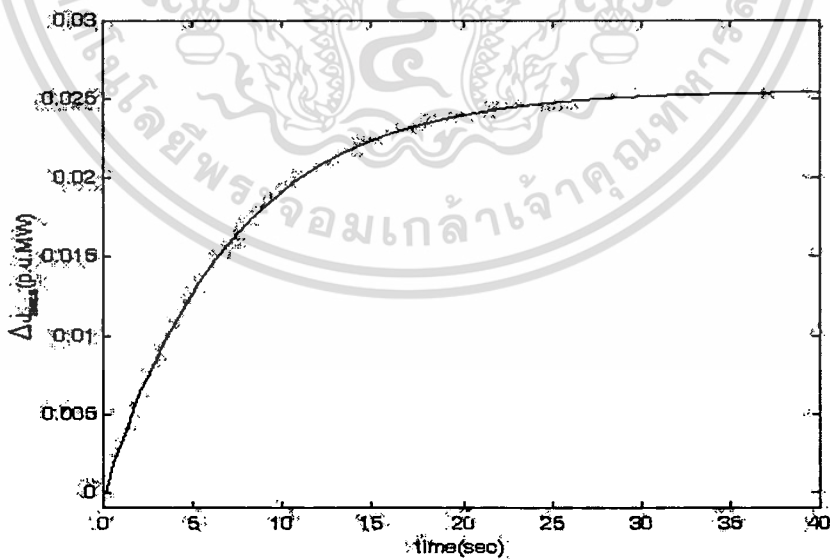


รูปที่ 2.27 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พื้นที่ 1
ในกรณีที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ใน 2 พื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

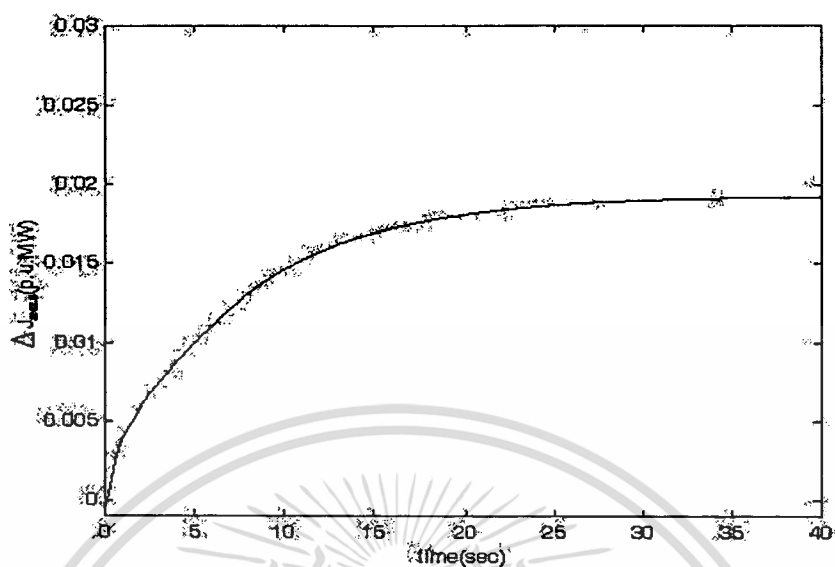


รูปที่ 2.28 กำลังไฟฟ้าแอทฟุดของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พื้นที่ 3 ในกรณีที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ใน 2 พื้นที่



รูปที่ 2.29 แสดงระดับพลังงานที่สะสมของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แสดงระดับพลังงานที่สะสมของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจริงเป็นแบบขั้น 0.01 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ในระบบไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่แล้ว ความถี่ของระบบจะเปลี่ยนแปลงไป แต่เมื่อมีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ในระบบ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบจะลดลงในทุกพื้นที่ เนื่องจากตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES เป็นแหล่งสะสมพลังงานที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกมาเพื่อชดเชยกับโหลดกำลังไฟฟ้าจริงที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของระบบลดลง รูปที่ 2.22 – 2.24 ยืนยันให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ในพื้นที่ 1 และ 3 ลดลง และในรูปที่ 2.25 – 2.26 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกมาทันที เมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงการใช้กำลังไฟฟ้าจริง และจะเริ่มลดลงเป็นศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไปถึงขณะหนึ่ง รูปที่ 2.27 – 2.28 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นว่าระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้ผลตอบสนองช้ากว่าตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES มาก ดังนั้นในช่วงเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจริง ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงมาชดเชยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และจะเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้าทีละเล็กละน้อยอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงสภาวะอยู่ตัว ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงชดเชยทั้งหมด และรูปที่ 2.29 – 2.30 แสดงระดับพลังงานที่สะสมของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 และ 3 จะพบว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนจากภายนอก พลังงานที่สะสมในตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว

การหาสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง เป็นกระบวนการแรกในการออกแบบตัวควบคุมใดๆ แต่ปัญหาหนึ่งในการออกแบบตัวควบคุมในระบบไฟฟ้ากำลังคือ สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก การออกแบบจึงไม่สามารถทำได้ง่าย ในบทนี้จะเป็นการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ LFC 3 พื้นที่ที่มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว (Overlapping decomposition) ซึ่งทฤษฎีนี้มีข้อดีคือ ลดความซับซ้อนของสมการทางคณิตศาสตร์ที่จะนำมาใช้ออกแบบได้ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการโดยทั่วไปของทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวในหัวข้อ 3.1 และ การหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ LFC 3 พื้นที่ที่มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวในหัวข้อ 3.2

3.1 หลักการโดยทั่วไปของทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว

ระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต MIMO (Multi-Input Multi-Output) ซึ่งเป็นระบบที่มีความยุ่งยากซับซ้อน สามารถแสดงดังสมการที่ (3.1)

$$S : \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \\ B_{31} & B_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

เมตริกซ์ย่อย A_{ij} และ B_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) มีมิติ (dimension) ที่ถูกต้องตามสถานะและเวกเตอร์อินพุตที่เกี่ยวข้อง ระบบ \tilde{S} สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ (3.2)

$$\tilde{S} : \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{23} \\ A_{21} & 0 & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \\ B_{21} \\ B_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $z_1 = [x_1^T, x_2^T]^T$ และ $z_2 = [x_2^T, x_3^T]^T$ เนื่องจากตัวแปรสถานะ x_2 ถูกรวมอยู่ในเมตริกซ์ย่อย ทั้ง z_1 และ z_2 ระบบ \tilde{S} สามารถถูกแยกออกเป็นสองระบบย่อยดังสมการที่ (3.3) และ (3.4)

$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 : \dot{z}_1 = & \left(\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} z_1 + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} u_1 \right) \\ & + \begin{bmatrix} 0 & A_{13} \\ 0 & A_{23} \end{bmatrix} z_2 + \begin{bmatrix} B_{12} \\ B_{22} \end{bmatrix} u_2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_2 : \dot{z}_2 = & \left(\begin{bmatrix} A_{22} & A_{23} \\ A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} z_2 + \begin{bmatrix} B_{21} \\ B_{31} \end{bmatrix} u_2 \right) \\ & + \begin{bmatrix} A_{21} & 0 \\ A_{31} & 0 \end{bmatrix} z_1 + \begin{bmatrix} B_{21} \\ B_{31} \end{bmatrix} u_1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

ระบบย่อยสองระบบคือ \tilde{S}_1 และ \tilde{S}_2 จะถูกนำมาพิจารณาในการศึกษาเรื่องเสถียรภาพของระบบในสมการที่ (3.1) เทอมทางขวามือของสมการที่ (3.3) และ (3.4) จะสามารถถูกแยกออกเป็นสองระบบย่อยคือ ระบบย่อยแยกเดี่ยว (decoupled subsystem) ซึ่งเป็นเทอมที่อยู่ในวงเล็บ และระบบย่อยเกี่ยวพัน (Interconnected subsystem) ซึ่งเป็นเทอมที่อยู่นอกวงเล็บ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [8-9] หากระบบย่อยแยกเดี่ยว \tilde{S}_1 และ \tilde{S}_2 ใดๆสามารถรักษาความมีเสถียรภาพในสถานการณ์ที่มีอินพุตค่าหนึ่ง ระบบย่อยเกี่ยวพันของระบบก็จะสามารถรักษาความมีเสถียรภาพในสถานการณ์นั้นเช่นเดียวกัน และยังไปกว่านั้น ระบบเดิมก่อนมีการแยกแบบคาบเกี่ยว S ก็จะสามารถรักษาความมีเสถียรภาพในสถานการณ์เช่นนั้นได้เช่นเดียวกัน จากทฤษฎีดังกล่าวสามารถถูกพิสูจน์ได้จากการหาค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum Overshoot) ของระบบ โดยค่าโอเวอร์ชูตสูงสุดของระบบก่อนการแยกแบบคาบเกี่ยว S จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าโอเวอร์ชูตสูงสุดของระบบย่อยแยกเดี่ยว ดังนั้นในขั้นตอนการออกแบบ ระบบย่อยแยกเดี่ยวสามารถนำมาใช้ในการออกแบบแทนระบบทั้งหมดในสมการที่ (3.1) ได้ ระบบย่อยแยกเดี่ยวของสมการที่ (3.3) และ (3.4) สามารถถูกแสดงได้ในสมการที่ (3.5) และ (3.6)

$$\tilde{S}_{D1} : \dot{z}_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} z_1 + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} u_1 \quad (3.5)$$

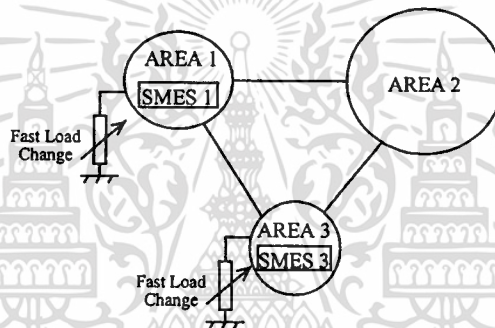
$$\tilde{S}_{D2} : \dot{z}_2 = \begin{bmatrix} A_{22} & A_{23} \\ A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} z_2 + \begin{bmatrix} B_{22} \\ B_{32} \end{bmatrix} u_2 \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

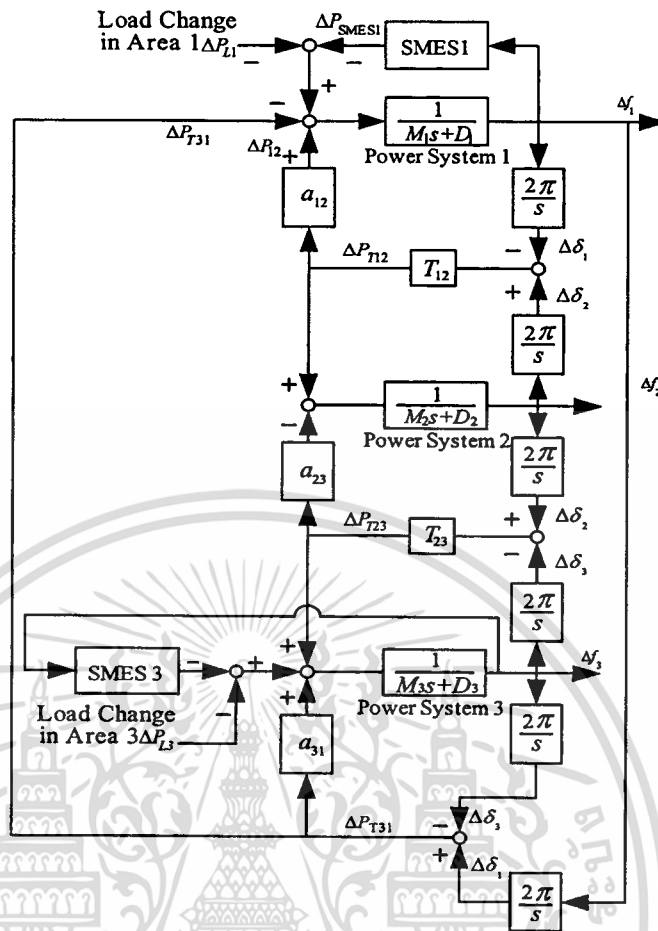
3.2 การหาสมการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว

ในหัวข้อนี้ เป็นการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยหัวข้อ 3.2.1 จะเป็นการหาแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง LFC 3 พื้นที่ในรูปแบบสมการที่ (3.1) ส่วนหัวข้อที่ 3.2.2 จะมีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว ให้อยู่ในรูปของสมการที่ (3.5) และ (3.6) เพื่อให้สมการทางคณิตศาสตร์อยู่ในรูปอย่างง่ายก่อนนำมาใช้ออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ในบทที่ 4 และ 5 ต่อไป

3.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการของ LFC 3 พื้นที่



รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบของระบบ ไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่ที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 และ 3



รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่ที่มีการยกเลิกระบบควบคุมความเร็วรอบ และมีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ในพื้นที่ 1 และ 3

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่เป็นระบบการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง จึงเป็นเหตุให้งานวิจัยที่ผ่านๆ มาได้นำแบบจำลองของ LFC 3 พื้นที่มาใช้ในการศึกษา ดังนั้นแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่ [10] จึงถูกนำมาใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เช่นกัน โดยสมมติให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจริงอย่างทันทีทันใดที่พื้นที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความถี่เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง และมีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 และ 3 เพื่อทำหน้าที่ชดเชยการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าจริง รูปแบบของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่ที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 และ 3 แสดงในรูปที่ 3.1

ถึงแม้ว่าระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจริงได้ แต่ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ผลตอบสนองที่ช้ากว่าตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES มาก จึงไม่จำเป็นที่ต้องนำระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาใช้ในขั้นตอนการออกแบบ รูปแบบของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 พื้นที่ที่มีการยกเลิกระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมีการใช้ตัวควบคุมเสถียร

ภาพทางความถี่ SMES ในพื้นที่ 1 และ 3 แสดงในรูปที่ 3.2 นี้ ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการอนุพันธ์อันดับที่ n ที่มาจากรูปที่ 3.2 สามารถแสดงในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 ดังสมการที่ (3.7)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{(m-1)1} & A_{(m-1)2} & A_{(m-1)3} & \cdots & A_{(m-1)n} \\ A_{m1} & A_{m2} & A_{m3} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + u(t) \quad (3.7)$$

ในที่นี้ให้ตัวแปรสถานะ (State Variable) เป็น $[\Delta f_1 \quad \Delta P_{T12} \quad \Delta f_2 \quad \Delta P_{T23} \quad \Delta f_3]$ โดยที่ Δf_i คือ ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจากความถี่ปกติของพื้นที่ i และ ΔP_{ij} คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างพื้นที่จากพื้นที่ i ไปยังพื้นที่ j ที่เปลี่ยนแปลงไป (i และ j คือ 1, 2, 3) จากแบบจำลองในรูปที่ 3.2 สามารถหาตัวแปรสถานะแต่ละตัวได้ดังนี้

- ตัวแปรสถานะ Δf_1

$$\Delta f_1 = \frac{1}{D_1 + M_1 s} (a_{12} \Delta P_{T12} - \Delta P_{T31} + \Delta P_{SMES1})$$

$$(D_1 + M_1 s) \Delta f_1 = a_{12} \Delta P_{T12} - \Delta P_{T31} + \Delta P_{SMES1}$$

$$D_1 \Delta f_1 + M_1 \dot{\Delta f}_1 = a_{12} \Delta P_{T12} - \Delta P_{T31} + \Delta P_{SMES1}$$

$$M_1 \dot{\Delta f}_1 = -D_1 \Delta f_1 + a_{12} \Delta P_{T12} - \Delta P_{T31} + \Delta P_{SMES1}$$

$$\dot{\Delta f}_1 = -\frac{D_1}{M_1} \Delta f_1 + \frac{a_{12}}{M_1} \Delta P_{T12} - \frac{1}{M_1} \Delta P_{T31} + \frac{1}{M_1} \Delta P_{SMES1}$$

$$\begin{aligned} \dot{\Delta f}_1 = & -\frac{D_1}{M_1} \Delta f_1 + \frac{a_{12}}{M_1} \Delta P_{T12} - \frac{1}{M_1} \left(-\frac{T_{31}}{T_{21}} \Delta P_{T12} + \frac{T_{31}}{T_{23}} \Delta P_{T23} \right) \\ & + \frac{1}{M_1} \Delta P_{SMES1} \end{aligned}$$

$$\dot{\Delta f}_1 = -\frac{D_1}{M_1} \Delta f_1 + \left(\frac{a_{12}}{M_1} + \frac{T_{31}}{M_1 T_{21}} \right) \Delta P_{T12} - \frac{T_{31}}{T_{23} M_1} \Delta P_{T23} + \frac{1}{M_1} \Delta P_{SMES1}$$

$$\dot{\Delta f}_1 = -\frac{D_1}{M_1} \Delta f_1 + \left(\frac{a_{12} + T_{31}/T_{21}}{M_1} \right) \Delta P_{T12} - \frac{T_{31}}{T_{23} M_1} \Delta P_{T23} + \frac{1}{M_1} \Delta P_{SMES1}$$

(3.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวแปรสถานะ ΔP_{T12}

$$\begin{aligned}\Delta P_{T12} &= T_{12} \left(-\frac{2\pi}{s} \Delta f_1 + \frac{2\pi}{s} \Delta f_2 \right) \\ \Delta P_{T12} &= -\frac{2\pi T_{12}}{s} \Delta f_1 + \frac{2\pi T_{12}}{s} \Delta f_2 \\ \Delta \dot{P}_{T12} &= -2\pi T_{12} \Delta f_1 + 2\pi T_{12} \Delta f_2\end{aligned}\quad (3.9)$$

- ตัวแปรสถานะ Δf_2

$$\begin{aligned}\Delta f_2 &= \frac{1}{M_2 s + D_2} (-\Delta P_{T12} - a_{23} \Delta P_{T23}) \\ \Delta f_2 &= -\frac{1}{M_2 s + D_2} \Delta P_{T12} - \frac{a_{23}}{M_2 s + D_2} \Delta P_{T23} \\ (D_2 + M_2 s) \Delta f_2 &= -\Delta P_{T12} - a_{23} \Delta P_{T23} \\ M_2 s \Delta f_2 &= -\Delta P_{T12} - D_2 \Delta f_2 - a_{23} \Delta P_{T23} \\ \Delta \dot{f}_2 &= -\frac{1}{M_2} \Delta P_{T12} - \frac{D_2}{M_2} \Delta f_2 - \frac{a_{23}}{M_2} \Delta P_{T23}\end{aligned}\quad (3.10)$$

- ตัวแปรสถานะ ΔP_{T23}

$$\begin{aligned}\Delta P_{T23} &= T_{23} \left(-\frac{2\pi}{s} \Delta f_1 + \frac{2\pi}{s} \Delta f_2 \right) \\ \Delta P_{T23} &= -\frac{2\pi T_{23}}{s} \Delta f_1 + \frac{2\pi T_{23}}{s} \Delta f_2 \\ \Delta \dot{P}_{T23} &= -2\pi T_{23} \Delta f_1 + 2\pi T_{23} \Delta f_2\end{aligned}\quad (3.11)$$

- ตัวแปรสถานะ Δf_3

$$\begin{aligned}\Delta f_3 &= \frac{1}{D_3 + M_3 s} (a_{31} \Delta P_{T31} + \Delta P_{T23} + \Delta P_{SMES3}) \\ (D_3 + M_3 s) \Delta f_3 &= a_{31} \Delta P_{T31} + \Delta P_{T23} + \Delta P_{SMES3} \\ D_3 \Delta f_3 + M_3 \Delta \dot{f}_3 &= a_{31} \Delta P_{T31} + \Delta P_{T23} + \Delta P_{SMES3} \\ M_3 \Delta \dot{f}_3 &= -D_3 \Delta f_3 + a_{31} \Delta P_{T31} + \Delta P_{T23} + \Delta P_{SMES3} \\ \Delta \dot{f}_3 &= -\frac{D_3}{M_3} \Delta f_3 + \frac{a_{31}}{M_3} \Delta P_{T31} + \frac{1}{M_3} \Delta P_{T23} + \frac{1}{M_3} \Delta P_{SMES3} \\ \Delta \dot{f}_3 &= -\frac{D_3}{M_3} \Delta f_3 + \frac{a_{31}}{M_3} \left(-\frac{T_{31}}{T_{12}} \Delta P_{T12} + \frac{T_{31}}{T_{23}} \Delta P_{T23} \right) \\ &\quad + \frac{1}{M_3} \Delta P_{T23} + \frac{1}{M_3} \Delta P_{SMES3}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

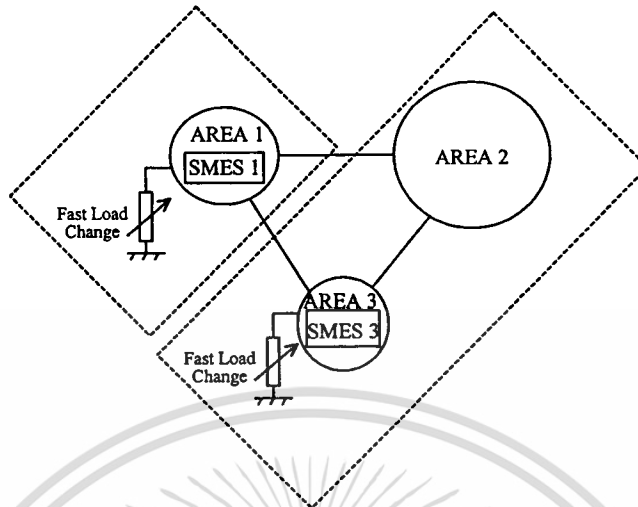
$$\begin{aligned}\dot{\Delta f}_3 &= -\frac{D_3}{M_3} \Delta f_3 + \frac{a_{31} T_{31}}{M_3 T_{12}} \Delta P_{T_{12}} + \left(\frac{a_{31} T_{31}}{M_3 T_{23}} + \frac{1}{M_3} \right) \Delta P_{T_{23}} + \frac{1}{M_3} \Delta P_{SMES3} \\ \dot{\Delta f}_3 &= -\frac{D_3}{M_3} \Delta f_3 + \frac{a_{31} T_{31}}{M_3 T_{12}} \Delta P_{T_{12}} + \left(\frac{1 + a_{31} T_{31} / T_{23}}{M_3} \right) \Delta P_{T_{23}} + \frac{1}{M_3} \Delta P_{SMES3}\end{aligned}\quad (3.12)$$

จากสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 ในสมการที่ (3.8) – (3.12) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{T_{12}} \\ \dot{\Delta f}_2 \\ \Delta \dot{P}_{T_{23}} \\ \dot{\Delta f}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & \frac{a_{12} + T_{31} / T_{12}}{M_1} & 0 & -\frac{T_{31}}{M_1 T_{23}} & 0 \\ -2\pi T_{12} & 0 & 2\pi T_{12} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_2} & -\frac{D_2}{M_2} & -\frac{a_{23}}{M_2} & 0 \\ 0 & 0 & 2\pi T_{23} & 0 & -2\pi T_{23} \\ 0 & \frac{a_{31} T_{31}}{M_3 T_{12}} & 0 & \frac{1 + a_{31} T_{31} / T_{23}}{M_3} & -\frac{D_3}{M_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T_{12}} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{T_{23}} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{SMES1} \\ \Delta P_{SMES3} \end{bmatrix}\quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวกับ LFC 3 พื้นที่



รูปที่ 3.3 แสดงการแบ่งพื้นที่ตามทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว

ตามทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวในหัวข้อที่ 3.1 ระบบ \tilde{s}_1 ในสมการที่ (3.13) จะถูกแยกออกเป็นระบบย่อย 2 ระบบดังนี้

$$\tilde{s}_1 : \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & \frac{a_{12} + T_{31}/T_{12}}{M_1} \\ -2\pi T_{112} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_1} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{SMES1} \\ + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{T_{31}}{M_1 T_{23}} & 0 \\ 0 & 2\pi T_{12} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{T12} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{T23} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix}$$

(3.14)

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_{T12} \\ \Delta \dot{f}_2 \\ \Delta \dot{P}_{T23} \\ \Delta \dot{f}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2\pi T_{12} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{M_2} & -\frac{D_2}{M_2} & -\frac{a_{23}}{M_2} & 0 \\ 0 & 2\pi T_{23} & 0 & -2\pi T_{23} \\ -\frac{a_{31}T_{31}}{M_3T_{12}} & 0 & \frac{1+a_{31}T_{31}/T_{23}}{M_3} & -\frac{D_3}{M_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{T12} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{T23} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{M_3} \end{bmatrix} \Delta P_{SMES3} + \begin{bmatrix} -2\pi T_{12} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T12} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) เทอมที่อยู่ในวงเล็บเป็นระบบย่อยแยกเดี่ยว และเทอมที่อยู่
นอกวงเล็บเป็นระบบย่อยเกี่ยวพันซ์ ตามทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวที่ ได้แสดงในหัวข้อ 3.1 ระบบ
ย่อยเกี่ยวพันซ์สามารถถูกยกเลิกได้ในขั้นตอนการออกแบบ ผลก็คือ ระบบที่ใช้ในการออกแบบจะมี
เฉพาะระบบย่อยแยกเดี่ยว ดังแสดงในสมการที่ (3.16)

$$\tilde{s}_{D1} : \begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{T12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & \frac{a_{12} + T_{31}/T_{12}}{M_1} \\ -2\pi T_{12} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_1} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{SMES1} \quad (3.16)$$

และ

$$\tilde{s}_{D2} : \begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_{T12} \\ \Delta \dot{f}_2 \\ \Delta \dot{P}_{T23} \\ \Delta \dot{f}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2\pi T_{12} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{M_2} & -\frac{D_2}{M_2} & -\frac{a_{23}}{M_2} & 0 \\ 0 & 2\pi T_{23} & 0 & -2\pi T_{23} \\ -\frac{a_{31}T_{31}}{M_3T_{12}} & 0 & \frac{1+a_{31}T_{31}/T_{23}}{M_3} & -\frac{D_3}{M_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{T12} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{T23} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{M_3} \end{bmatrix} \Delta P_{SMES3} \quad (3.17)$$

ตามสมการที่ (3.16) และ (3.17) เทอมของ ΔP_{SMES1} และ ΔP_{SMES3} ได้ปรากฏอยู่ในระบบ
ย่อย \tilde{s}_{D1} และ \tilde{s}_{D2} ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า \tilde{s}_{D1} เป็นเมตริกซ์ขนาด 2×2 ดังนั้น \tilde{s}_{D1} จึงเหมาะสม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 ดังนั้น จึงสามารถแสดงพลาตซ์จริงที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 ได้ในสมการที่ (3.18)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.18)$$

โดยที่

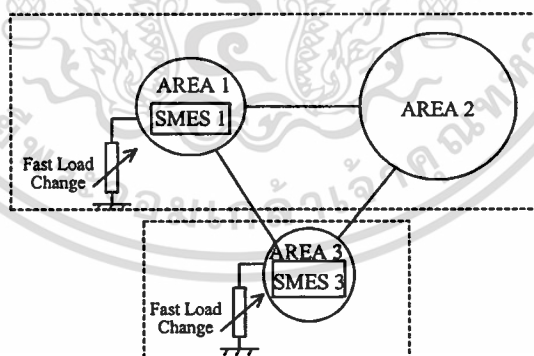
$$x = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T12} \end{bmatrix}, u = [\Delta P_{SMES1}], y = [\Delta f_1]$$

และ

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & \frac{a_{12} + T_{31}/T_{12}}{M_1} \\ -2\pi T_{12} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ M_1 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0], D = 0$$

หากทำการแบ่งพื้นที่ตามทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว ในอีกรูปแบบหนึ่งดังแสดงในรูปที่

3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการแบ่งพื้นที่ตามทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวในอีกรูปแบบหนึ่ง

ระบบ \tilde{r} ในสมการที่ (3.13) จะถูกแยกออกเป็นระบบย่อย 2 ระบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{s}_1 : \begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{T_{12}} \\ \Delta \dot{f}_2 \\ \Delta \dot{P}_{T_{23}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & \frac{a_{12} + T_{31}/T_{12}}{M_1} & 0 & -\frac{T_{31}}{M_1 T_{23}} \\ -2\pi T_{12} & 0 & 2\pi T_{12} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_1} & -\frac{D_2}{M_2} & -\frac{a_{23}}{M_2} \\ 0 & 0 & 2\pi T_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T_{12}} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{T_{23}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{SMES1} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -2\pi T_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{T_{23}} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

และ

$$\tilde{s}_2 : \begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_{T_{23}} \\ \Delta \dot{f}_3 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 0 & -2\pi T_{23} \\ \frac{1 + a_{31} T_{31}/T_{23}}{M_3} & -\frac{D_3}{M_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{T_{23}} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M_3} \end{bmatrix} \Delta P_{SMES3} \right) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2\pi T_{23} & 0 \\ 0 & -\frac{a_{31} T_{31}}{M_3 T_{12}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T_{12}} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{T_{23}} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

จากสมการที่ (3.19) และ (3.20) เทอมที่อยู่ในวงเล็บเป็นระบบย่อยแยกเดี่ยว และเทอมที่อยู่นอกวงเล็บเป็นระบบย่อยเกี่ยวพัน เมื่อออกแบบระบบควบคุม ระบบย่อยเกี่ยวพันสามารถถูกยกเลิกได้ ผลก็คือ ระบบย่อยจะอยู่ในรูป

$$\tilde{s}_{D1} : \begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{T_{12}} \\ \Delta \dot{f}_2 \\ \Delta \dot{P}_{T_{23}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & \frac{a_{12} + T_{31}/T_{12}}{M_1} & 0 & -\frac{T_{31}}{M_1 T_{23}} \\ -2\pi T_{12} & 0 & 2\pi T_{12} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_1} & -\frac{D_2}{M_2} & -\frac{a_{23}}{M_2} \\ 0 & 0 & 2\pi T_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T_{12}} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{T_{23}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{SMES1} \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{s}_{D2} : \begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_{T23} \\ \Delta \dot{f}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -2\pi T_{23} \\ \frac{1 + a_{31}T_{31}/T_{23}}{M_3} & -\frac{D_3}{M_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{T23} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M_3} \end{bmatrix} \Delta P_{SMES3} \quad (3.22)$$

และเช่นเดียวกัน จากสมการที่ (3.21) และ (3.22) เทอมของ ΔP_{SMES1} และ ΔP_{SMES3} ได้ปรากฏอยู่ในระบบย่อย \tilde{s}_{D1} และ \tilde{s}_{D2} ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า \tilde{s}_{D2} เป็นเมตริกซ์ขนาด 2×2 ดังนั้น \tilde{s}_{D2} จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3 ดังนั้นจึงสามารถแสดงพลานต์จริงที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3 ได้ในสมการที่ (3.23)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.23)$$

โดยที่

$$x = \begin{bmatrix} \Delta P_{T23} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix}, u = \Delta P_{SMES3}, y = \Delta f_3$$

และ

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -2\pi T_{23} \\ \frac{1 + a_{31}T_{31}/T_{23}}{M_3} & -\frac{D_3}{M_3} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M_3} \end{bmatrix}, C = [0 \quad 1], D = 0$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.1 แล้ว สมการที่ (3.18) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 และสมการที่ (3.23) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3 สามารถแสดงได้ในสมการที่ (3.24) และ (3.25)

$$\tilde{s}_{D1} : \begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{T12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03 & 12.4843 \\ -0.9990 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -5 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{SMES1} \quad (3.24)$$

$$\tilde{s}_{D2} : \begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_{T23} \\ \Delta \dot{f}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0.4021 \\ 21.5729 & -0.0333 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{T23} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -6.6667 \end{bmatrix} \Delta P_{SMES3} \quad (3.25)$$

และเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.1 ลงในสมการที่ (3.13) ซึ่งมาจากแบบจำลอง LFC 3 พื้นที่ก่อนถูกประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว แสดงในสมการ (3.26)

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{T12} \\ \Delta \dot{f}_2 \\ \Delta \dot{P}_{T23} \\ \Delta \dot{f}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03 & 12.4843 & 0 & -61.7187 & 0 \\ -0.9990 & 0 & 0.9990 & 0 & 0 \\ 0 & -59.8802 & -0.4988 & -11.9760 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0402 & 0 & -0.0402 \\ 0 & -8.2809 & 0 & 212.3958 & -0.0333 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T12} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{T23} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -6.6667 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{SMES1} \\ \Delta P_{SMES3} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

จากสมการที่ (3.24) ถึง (3.26) สามารถแสดงค่าเจาะจง ค่าอัตราส่วนการแดมป์ (damping ratio) และค่าเปอร์เซ็นต์ของโอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum overshoot) ได้ดังตารางที่ 3.1 โดยค่าอัตราส่วนการแดมป์สามารถหาได้จากคำสั่ง damp ในโปรแกรม MATLAB และค่าเปอร์เซ็นต์ของโอเวอร์ชูตสูงสุดหาได้จากค่าอัตราส่วนการแดมป์ดังแสดงในสมการที่ (3.27)

$$M_p(\%) = e^{(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})} \cdot 100 \quad (3.27)$$

โดยที่ $M_p(\%)$ เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของโอเวอร์ชูตสูงสุด และ ζ เป็นค่าอัตราส่วนการแดมป์

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าเจาะจง ค่าอัตราส่วนการแคมป์ และค่าเปอร์เซ็นต์ของโอเวอร์ชูตสูงสุดก่อนและหลังการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยว

สมการที่แสดง	ค่าเจาะจง	ค่าอัตราส่วนการแคมป์	ค่าเปอร์เซ็นต์ของโอเวอร์ชูตสูงสุด
สมการที่ (3.24)	$-1.50e-2 + 3.53i$	$4.25e-3$	98.67
	$-1.50e-2 - 3.53i$	$4.25e-3$	98.67
สมการที่ (3.25)	$-1.67e-2 + 2.95i$	$5.66e-3$	98.28
	$-1.67e-2 + 2.95i$	$5.66e-3$	98.28
สมการที่ (3.26)	$-2.52e-2 + 3.27i$	$7.72e-3$	97.60
	$-2.52e-2 - 3.27i$	$7.72e-3$	97.60
	$-8.41e-2$	1	0
	$-2.14e-1 + 8.40i$	$2.54e-2$	92.33
	$-2.14e-1 - 8.40i$	$2.54e-2$	92.33

จากตารางที่ 3.1 จะเป็นการยืนยันทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของโอเวอร์ชูตสูงสุดของระบบย่อยแยกเดี่ยวหลังการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวในสมการที่ (3.24) และ (3.25) มีค่าใกล้เคียงกับค่าเปอร์เซ็นต์ของโอเวอร์ชูตสูงสุดของระบบเดิม ก่อนการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวในสมการที่ (3.26) จึงเป็นการยืนยันได้ว่าสมการทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3.24) และ (3.25) สามารถนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES แทนสมการที่ (3.26) ได้

บทที่ 4

ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์

โดยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞

4.1 ประวัติของทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞

ในปี ค.ศ. 1981 G. Zames ได้คิดค้นสูตรของทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ เป็นครั้งแรก ซึ่งเป็นการออกแบบตัวควบคุมในโดเมนของความถี่ (frequency domain) ต่อมาในปี ค.ศ. 1987 B.A. Francis ได้เขียนหนังสือแนะนำกระบวนการสังเคราะห์ตัวควบคุม H_∞ ซึ่งยังคงเป็นการออกแบบตัวควบคุมในโดเมนความถี่เช่นกัน แต่เทคนิคในการออกแบบตัวควบคุมที่ได้กล่าวไว้ในหนังสือของ B.A. Francis นั้นได้เปลี่ยนมาใช้สมการริกคาตี (Riccati equation) ซึ่งทำการออกแบบในโดเมนของเวลา (time domain) งานวิจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุม H_∞ ในโดเมนเวลา และยังเป็นต้นแบบมาตลอดจนถึงทุกวันนี้ คือ งานวิจัยของ J.C. Doyle และคณะในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีนี้จะต้องแปลงระบบให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน GD (Glover Doyle) ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานที่ถูกคิดค้นโดย K. Glover และ J.C. Doyle และจะต้องหาค่า γ ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ $\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$ โดยที่ γ เป็นสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณรบกวนจากภายนอก $\rho(X_\infty Y_\infty)$ เป็นค่าเงาเงงที่มีค่าสูงสุดของ $(X_\infty Y_\infty)$ X_∞ เป็นค่าที่ได้จากการแก้สมการริกคาตีของตัวควบคุม และ Y_∞ เป็นค่าที่ได้จากการแก้สมการริกคาตีของตัวสังเกต (observer) การหาค่า γ ทำได้โดยกำหนดให้ γ มีค่าสูงก่อน แล้วลดค่าลงจนไม่ผ่านเงื่อนไข $\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$ ต่อมาในปี ค.ศ. 1993 X.P. Li และ B.C. Chang ได้นำเสนออัลกอริทึม (algorithm) สำหรับหาค่า γ อย่างรวดเร็ว ทำให้ประหยัดเวลาในการหาค่า γ อย่างไรก็ตาม การหาค่า γ ด้วยวิธีการข้างต้น ยังไม่สามารถกำหนดค่า γ ได้ตามความต้องการ ดังนั้นค่า γ จึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบ

วิธีการออกแบบตัวควบคุม H_∞ ที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด ยังไม่ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ ด้วยข้อจำกัดในการใช้งานในทางปฏิบัติ จึงมีผู้ทำการวิจัยระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง เริ่มจากในปี ค.ศ. 1990 P.P. Khargonegar และคณะได้ทำการวิจัยระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง 2 ตัว คือ A , B เปลี่ยนแปลง ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดกำเนิดการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ปัญหาเสถียรภาพโรบัสต์ถูกแก้ปัญหาคด้วยวิธีการลียาปูนอฟ (Lyapunov) ดังนั้นจึงสามารถแก้ปัญหาคด้วยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ได้ด้วย หลังจากนั้นไม่นาน L. Xie และคณะได้หาความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมแบบโรบัสต์และการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

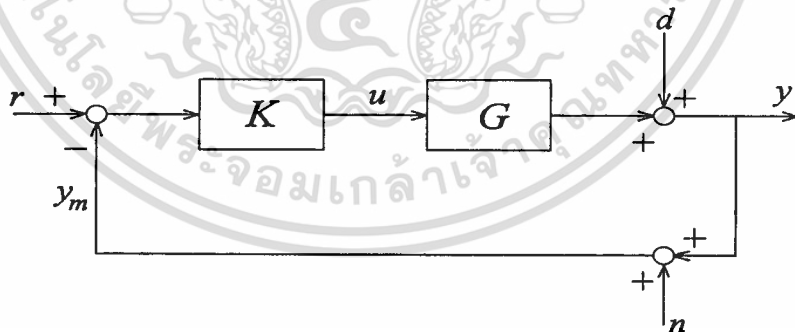
แบบ H_∞ โดยแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เป็นส่วนของการควบคุมแบบโรบัสต์ และการกำจัดเทอมของการรบกวนจากภายนอกเป็นส่วนของการควบคุมของ H_∞ และในการวิจัยนี้ยังสามารถกำหนดสมรรถนะในการลดทอนการรบกวนจากภายนอก γ ได้ล่วงหน้าภายใต้การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ การออกแบบตัวควบคุมเป็นการป้อนกลับทางเอาต์พุต และสุดท้ายในปี ค.ศ. 1994 K. Gu ได้พิจารณาถึงระบบควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ ที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง ซึ่งระบบควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ มีพารามิเตอร์ของพลาเน็ตทั้งหมด 9 ตัว คือ $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}$ และ D_{22}

4.2 การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์โดยอาศัยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞

4.2.1 ข้อกำหนดที่สามารถระบุได้ของฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดของตัวควบคุมโรบัสต์แบบ

H_∞

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดที่สามารถระบุได้หลังจากที่ระบบมีตัวควบคุมแบบ H_∞ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุมใดๆ เรียกว่า ฟังก์ชันการถ่ายโอนรอบวงเปิด (open-loop transfer function) และหลังจากที่ระบบมีการป้อนกลับด้วยตัวควบคุม ฟังก์ชันถ่ายโอนโดยรวมทั้งหมดเรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิด (closed-loop transfer function) ข้อกำหนดที่สามารถระบุได้จะต้องถูกตรวจสอบจากฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิด แผนภาพบล็อกทั่วไปของระบบควบคุมป้อนกลับแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมป้อนกลับ

จากรูปที่ 4.1 $G(s)$ เป็นพลาเน็ตที่ถูกกำหนดให้เป็นรูปทั่วไป (generalized plant) y เป็นเอาต์พุตที่ถูกสังเกต (observed output) r เป็นสัญญาณอ้างอิง (reference signal) $K(s)$ เป็นตัวควบคุม (controller) u เป็นสัญญาณควบคุม (control input) จากตัวควบคุม d เป็นสัญญาณรบกวนจากภายนอก (disturbance) ที่อินพุตของ $G(s)$ n เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวรับรู้ (noise) ที่เอาต์พุตของ $G(s)$ ฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดที่ใช้ในการออกแบบมีอยู่ 2 ฟังก์ชันคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

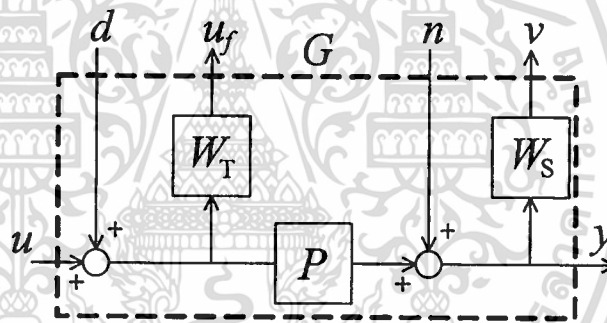
ฟังก์ชันเซนซิวิตี (sensitivity function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดจาก d ไปยัง y ตามที่แสดงในสมการที่ (4.1) และฟังก์ชันคอมพลิเมนทารีเซนซิวิตี (complementary function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดจาก r ไปยัง y ตามที่แสดงในสมการที่ (4.2) และผลรวมของค่าฟังก์ชันในสมการที่ (4.1) และ (4.2) จะได้เป็นเมตริกซ์หนึ่งหน่วย (unity matrix) ตามสมการที่ (4.3)

$$S = \frac{I}{I + GK} \quad (4.1)$$

$$T = \frac{GK}{I + GK} \quad (4.2)$$

$$S + T = 1 \quad (4.3)$$

พลานต์ที่จะทำการออกแบบตามหลักการควบคุมแบบ H_∞ จะต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปของ $G(s)$ แผนภาพบล็อกของ $G(s)$ แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพบล็อกของ $G(s)$

รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า $G(s)$ ประกอบด้วย $P(s)$ เป็นพลานต์ที่ถูกระบุ (nominal plant) W_S เป็นฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนักพฤติกรรม (performance weighting function) W_T เป็นฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีโครงสร้าง (uncertainties weighting function) u_f และ v เป็นสัญญาณความคลาดเคลื่อน (error signal) ของ W_S และ W_T ตามลำดับ

$P(s)$ เป็นพลานต์ของฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงเปิดที่จะทำการออกแบบ ซึ่งจะถูกถ่วงน้ำหนักด้วย W_S และ W_T แล้วทำการแปลงโดยผ่านวิธีการลิเนียร์แฟรคชันนัลทรานส์ฟอร์มชัน (linear fractional transformation) เพื่อให้เป็นพลานต์ในรูป $G(s)$

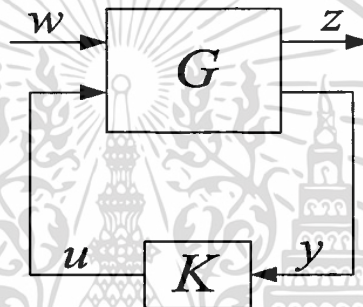
ในการออกแบบ $K(s)$ ได้มีข้อกำหนดสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิด S และ T ตามสมการที่ (4.4) และ (4.5)

$$|S(j\omega)| < \frac{1}{|W_s(j\omega)|}, \forall \omega \quad (4.4)$$

$$|T(j\omega)| < \frac{1}{|W_T(j\omega)|}, \forall \omega \quad (4.5)$$

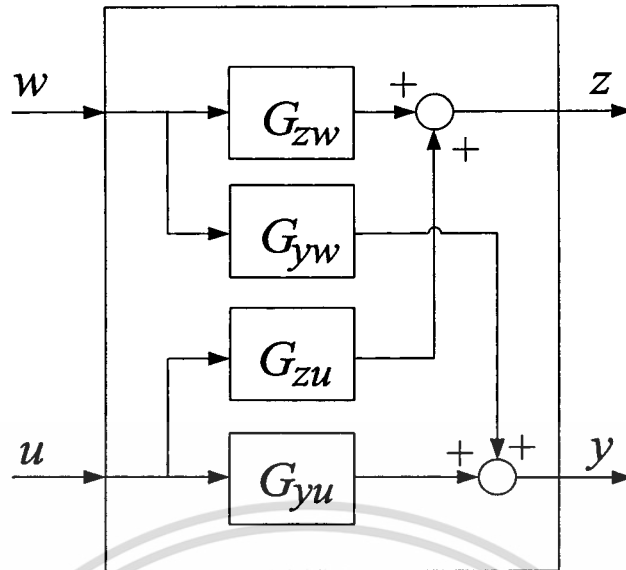
4.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมโรบัสต์แบบ H_∞

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมการที่ใช้แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมโรบัสต์แบบ H_∞ หลังจากระบุข้อกำหนดของฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิด แผนภาพบล็อกทั่วไปของการควบคุมโรบัสต์ แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพบล็อกทั่วไปของการควบคุมโรบัสต์

ในแผนภาพบล็อกทั่วไปของการควบคุมโรบัสต์ที่แสดงในรูปที่ 4.3 ประกอบด้วยบล็อก $G(s)$ $K(s)$ และสัญญาณ u และ y ตามหัวข้อที่ผ่านมา w เป็นสัญญาณรบกวนต่างๆ (exogeneous input) ที่มีผลกระทบต่อระบบควบคุม ซึ่งประกอบด้วย d และ n ในรูปที่ 4.2 และ z เป็นเอาต์พุตที่ถูกควบคุม (controlled output) ซึ่งประกอบด้วย u_f และ v ในรูปที่ 4.2 เช่นกัน รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพบล็อกของ $G(s)$ เมื่อถูกพิจารณาแยกออกเป็นส่วน



รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพบล็อกของ $G(s)$ เมื่อถูกพิจารณาแยกออกเป็นส่วน

โดยที่ G_{zw} เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนจาก w ไปยัง z

G_{yw} เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนจาก w ไปยัง y

G_{zu} เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนจาก u ไปยัง z

G_{yu} เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนจาก u ไปยัง y

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบข้างต้นเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} z &= G_{zw}w + G_{zu}u \\ y &= G_{yw}w + G_{yu}u \\ u &= Ky \end{aligned} \quad (4.6)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดระหว่าง z และ w จะหาได้โดยแทนค่า $u = Ky$ ในสมการสำหรับค่า y ดังนั้นจะได้

$$y = G_{yw}w + G_{yu}Ky \quad (4.7)$$

หลังจากนั้นจัดรูปสมการสำหรับค่า y ใหม่จะได้ดังสมการ (4.8)

$$y = (I - G_{yu}K)^{-1}G_{yw}w \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I เป็นเมตริกซ์หนึ่งหน่วย

เมื่อแทน y ที่ได้ลงใน $u = Ky$ จะได้

$$u = K(I - G_{yu}K)^{-1}G_{yw}w \quad (4.9)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (4.8) และสมการที่ (4.9) ลงในสมการ z แล้วจะได้

$$\begin{aligned} z &= G_{zw}w + G_{zu}K(I - G_{yu}K)^{-1}G_{yw}w \\ &= [G_{zw} + G_{zu}K(I - G_{yu}K)^{-1}G_{yw}]w \end{aligned} \quad (4.10)$$

ดังนั้น สมการถ่ายโอนรอบวงปิดระหว่าง z และ w จะมีค่าเป็น

$$T_{zw} = G_{zw} + G_{zu}K(I - G_{yu}K)^{-1}G_{yw} \quad (4.11)$$

โดยที่ $z = T_{zw}w$ สมการถ่ายโอนรอบวงปิดที่ได้เรียกว่าลิเนียร์แฟรคชันนัลทรานส์ฟอร์มชัน ซึ่งวิธีการหาค่าสมการถ่ายโอนของระบบที่มี 2 ทางเข้าออกดังแสดงในรูปที่ 4.3

ปัญหาการควบคุม H_∞ สำหรับรูปที่ 4.3 คือ ต้องการหาค่าควบคุม $K(s)$ สำหรับพลาเน็ต $G(s)$ ที่ทำให้ค่าอนอร์มอินฟินิตี้ (infinity norm) ของฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิด T_{zw} มีค่าต่ำกว่า γ ซึ่งค่า γ มีค่าเป็นบวก ในการออกแบบระบบควบคุม H_∞ นั้น ปัญหาการควบคุม H_∞ มาตรฐาน (standard H_∞ control problem) ซึ่งก็คือ

$$\text{Find } K \text{ stabilizin g } \|T_{zw}\| \leq \gamma \quad (4.11)$$

และปัญหาการควบคุม H_∞ มาตรฐานนี้มักจะพบในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

ฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s)$ สามารถถูกเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ (4.12)

$$G(s) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & 0 & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนทำการออกแบบตัวควบคุม โรบัสต์จะต้องทดสอบระบบตามเงื่อนไขต่างๆ ของ $G(s)$ ดังนี้

- (A, B_1) สามารถถูกควบคุมได้ (controllable) และ (C_1, A) สามารถหาค่าตัวสังเกตได้ (observable)
- (A, B_2) สามารถทำให้เสถียรได้ (stabilizable) และ (C_2, A) สามารถถูกตรวจสอบได้ (detectable)
- $D_{12}^* [C_1 \ D_{12}] = [0 \ I]$
- $\begin{bmatrix} B_1 \\ D_{21} \end{bmatrix} D_{21}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

โดยที่ ตัวยก * คือคอมเพล็กซ์คอนจูเกตทรานซโพส (complex conjugate transpose)

นอกจากนี้แล้ว มีเงื่อนไขมากกว่านี้อีก 2 ข้อ นั่นคือ $D_{11} = 0$ และ $D_{22} = 0$ แต่ถ้า $D_{22} \neq 0$ ก็ไม่ใช่เป็นปัญหาสำคัญ เพราะ D_{22} สามารถจัดรูปแบบให้เป็นศูนย์ได้โดยวิธีลิเนียร์แฟรคชันนัลทรานส์ฟอร์มเมชันที่ตัวควบคุม $K(s)$

ในการออกแบบตัวควบคุม H_∞ จะออกแบบโดยใช้สมการริคคาตี ซึ่งตัวควบคุม H_∞ สามารถถูกเขียนในรูปของค่าเมตริกซ์แฮมิลตันเนียน (Hamiltonian Matrix) ได้ดังสมการที่ (4.13) และ (4.14) ดังนี้

$$H_\infty := \begin{bmatrix} A & \gamma^{-2} B_1 B_1^* - B_2 B_2^* \\ -C_1^* C_1 & -A^* \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$J_\infty := \begin{bmatrix} A^* & \gamma^{-2} C_1^* C_1 - C_2^* C_2 \\ -B_1 B_1^* & -A \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

ตัวควบคุม $K(s)$ ที่ยอมรับได้จะสามารถหาค่าได้ตามเงื่อนไข $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$ ก็ต่อเมื่อมีการทดสอบระบบตามเงื่อนไขต่างๆ ดังต่อไปนี้

- $H_\infty \in \text{dom}(\text{Ric})$ และ $X_\infty := \text{Ric}(H_\infty) > 0$
- $J_\infty \in \text{dom}(\text{Ric})$ และ $Y_\infty := \text{Ric}(J_\infty) > 0$
- $\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$

โดยที่ $H_\infty \in \text{dom}(\text{Ric})$ หมายถึงเมตริกซ์ H_∞ ประกอบด้วยคุณสมบัติ 2 ข้อ คือ

- ไม่มีค่าเจาะจงอยู่ที่แกนจินตภาพ
- เมตริกซ์ย่อย $\text{Im} \begin{bmatrix} I \\ X_\infty \end{bmatrix}$ และ $\text{Im} \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$ เป็นเมตริกซ์ที่คอมพลิเมนทารี (complementary)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$J_\infty \in \text{dom}(\text{Ric})$ หมายถึงเมตริกซ์ J_∞ ประกอบด้วยคุณสมบัติ 2 ข้อ คือ

- ไม่มีค่าเฉพาะจางอยู่ที่แกนจินตภาพ
- เมตริกซ์ย่อย $\text{Im} \begin{bmatrix} I \\ Y_\infty \end{bmatrix}$ และ $\text{Im} \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$ เป็นเมตริกซ์ที่คอมพลิเมนทารี (complementary)

กัน

และ $\rho(X_\infty Y_\infty)$ หมายถึงค่าสูงสุดของค่าเฉพาะจางของผลคูณเมตริกซ์ X_∞ กับ Y_∞

เมื่อเงื่อนไข 3 เงื่อนไขมีการพิสูจน์ว่าถูกต้องแล้ว ตัวควบคุม $K(s)$ ที่อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์รวมกลุ่ม (packed-matrix notation) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$K(s) := \begin{bmatrix} \hat{A}_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ F_\infty & 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

โดยที่

$$\hat{A}_\infty := A + \gamma^{-2} B_1 B_1^* X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2$$

$$\hat{F}_\infty := -B_2^* X_\infty$$

$$L_\infty := -Y_\infty C_2^*$$

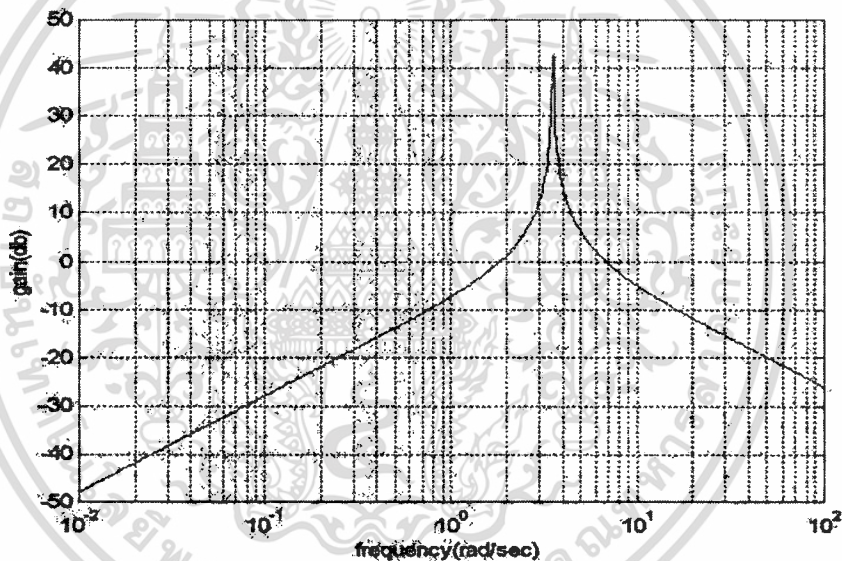
$$Z_\infty := (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1}$$

บทที่ 5

การออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES

ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 จะใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวตามรูปที่ 3.3 สมการที่ใช้ในการออกแบบเป็นตามสมการที่ (3.18) ซึ่งมีโพลีออดของฟังก์ชันการถ่ายโอนรอบวงเปิด $P(s)$ แสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงโพลีออดของฟังก์ชันการถ่ายโอนรอบวงเปิด $P(s)$ ตามสมการที่ (3.18)

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าแกนของ $P(s)$ มีค่าสูงมากในย่านความถี่ 0.2 – 0.8 เฮิรตซ์ (ประมาณ 1.2 – 5 เรเดียนต่อวินาที) ดังนั้น จึงสมควรมีการป้อนกลับด้วยตัวควบคุมที่สามารถทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดมีค่าแกนลดลงในย่านความถี่ดังกล่าวตามข้อกำหนดในสมการที่ (4.4)

รูปแบบทั่วไปของฟังก์ชัน W_s^{-1} เป็นไปตามสมการที่ (5.1)

$$W_s^{-1} = \frac{(1/T)s + 10^{G_c/20}}{(1/(T \cdot 10^{G_c/20})) + 1} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

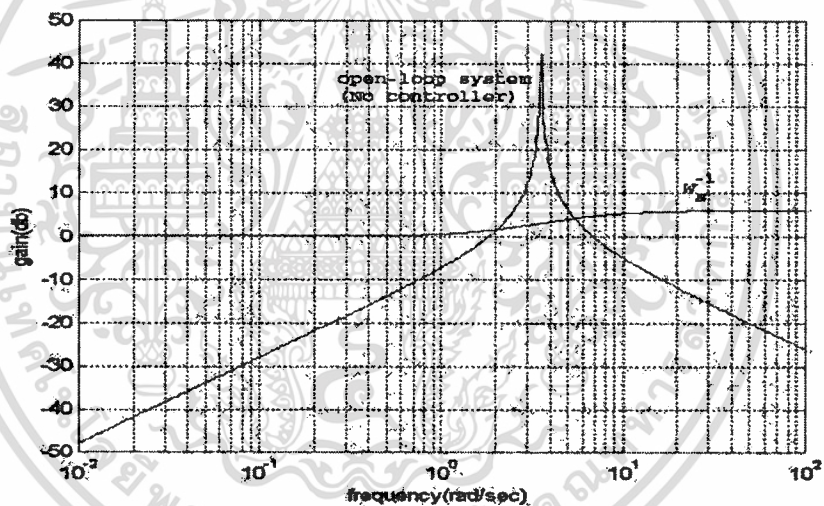
T เป็นความถี่ในหน่วยเรเดียนต่อวินาที เมื่อ W_s^{-1} มีค่าเท่ากับ 2 เดซิเบล

G_l เป็นค่าเกณฑ์ของ W_s^{-1} ที่ความถี่ต่ำ

G_h เป็นค่าเกณฑ์ของ W_s^{-1} ที่ความถี่สูง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเลือกค่า G_l เท่ากับ 0 เดซิเบล G_h เท่ากับ 6 เดซิเบล และ T เท่ากับ 2.5 เรเดียนต่อวินาที ดังนั้นเมื่อแทนลงในสมการที่ (5.1) จะมีส่วนกลับของผลตอบสนองเชิงความถี่ W_s^{-1} แสดงในสมการที่ (5.2) และผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_s^{-1} แสดงในรูปที่ 5.2

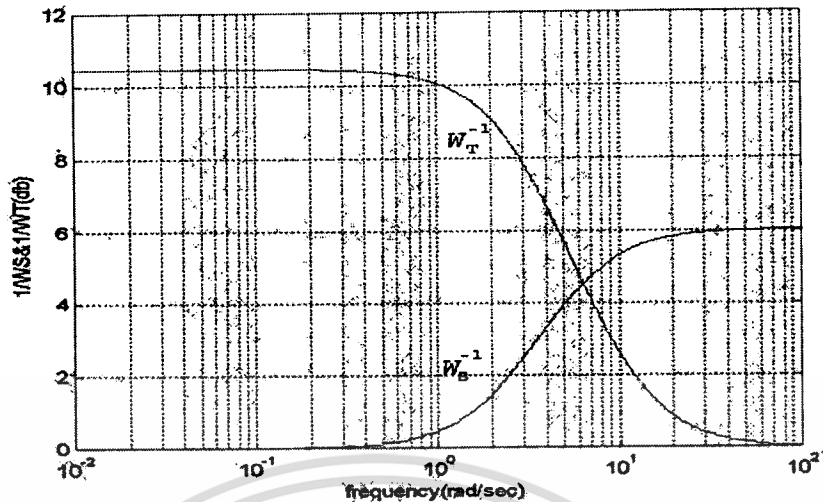
$$W_s^{-1} = \frac{2s+5}{s+10} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.2 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_s^{-1} ในการออกแบบตามสมการที่ (5.2)

จากสมการที่ (4.3) จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนักทั้ง 2 ฟังก์ชันรวมกันเป็นเมตริกซ์หนึ่งหน่วย ดังนั้น เมื่อเลือก W_s^{-1} เป็นวงจรรองผ่านความถี่ต่ำ แล้ว W_T^{-1} จะต้องถูกเลือกเป็นวงจรรองผ่านความถี่สูง (high pass filter) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือก W_T ตามสมการที่ (5.3) และผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_T^{-1} เมื่อเทียบกับ W_s^{-1} แสดงในรูปที่ 5.3

$$W_T^{-1} = \frac{s+10}{s+3} \quad (5.3)$$



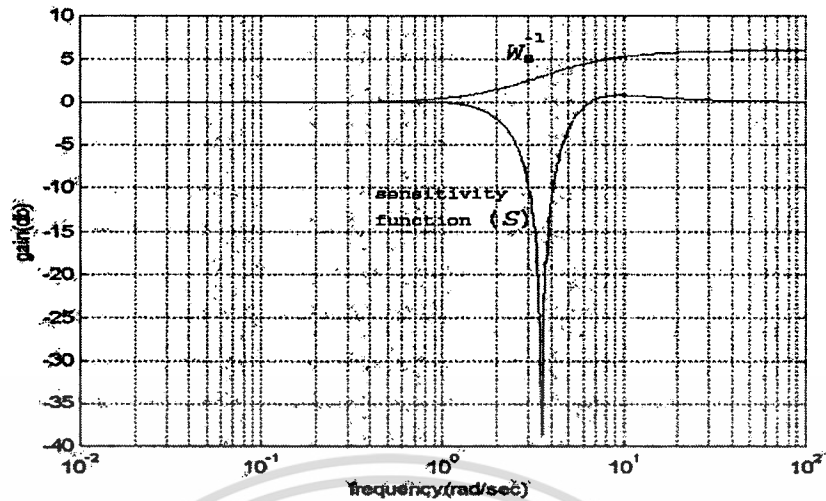
รูปที่ 5.3 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_S^{-1} เทียบกับ W_T^{-1} ตามสมการที่ (5.2) และ (5.3)

เนื่องจากการคำนวณด้วยมือ (manual calculation) เพื่อหาผลเฉลยของตัวควบคุม $K(s)$ ในสมการที่ (4.13) - (4.15) ซึ่งเป็นตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 มีความยุ่งยากเป็นอย่างมาก ดังนั้นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการใช้ในการคำนวณหาตัวควบคุม $K(s)$ จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รายละเอียดของโปรแกรม `hinf_design.m` ที่ใช้ในการคำนวณหาตัวควบคุม $K(s)$ แสดงอยู่ในภาคผนวก ก และผลการออกแบบของโปรแกรม `hinf_design.m` แสดงอยู่ในภาคผนวก ข

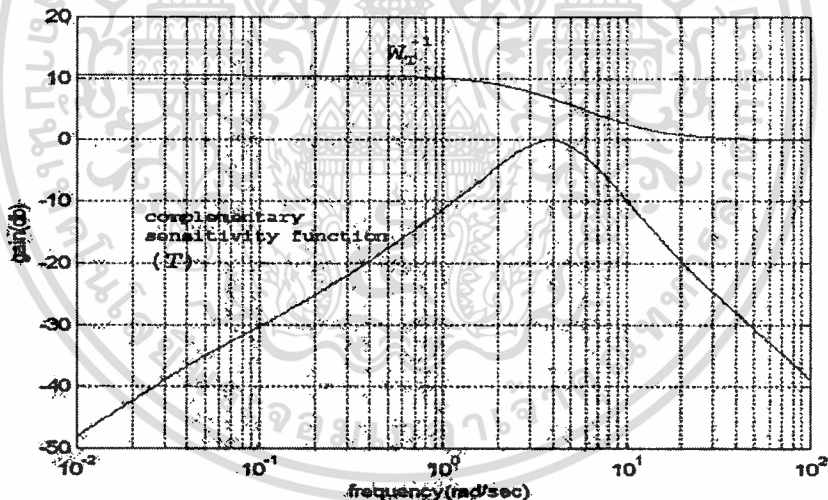
ตัวควบคุม $K(s)$ ซึ่งเป็นตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 แสดงได้ดังสมการที่ (5.4)

$$K_{SMES1} = \frac{34s^3 + 781s^2 + 1379s - 157}{s^4 + 129s^3 + 1279s^2 + 2473s + 159} \quad (5.4)$$

เมื่อนำตัวควบคุม $K(s)$ ที่ได้มาเป็นตัวป้อนกลับในระบบ ฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดที่ได้สามารถยืนยันความถูกต้องตามข้อกำหนดในสมการ (4.4) และ (4.5) ได้ในรูปที่ 5.4 และ 5.5



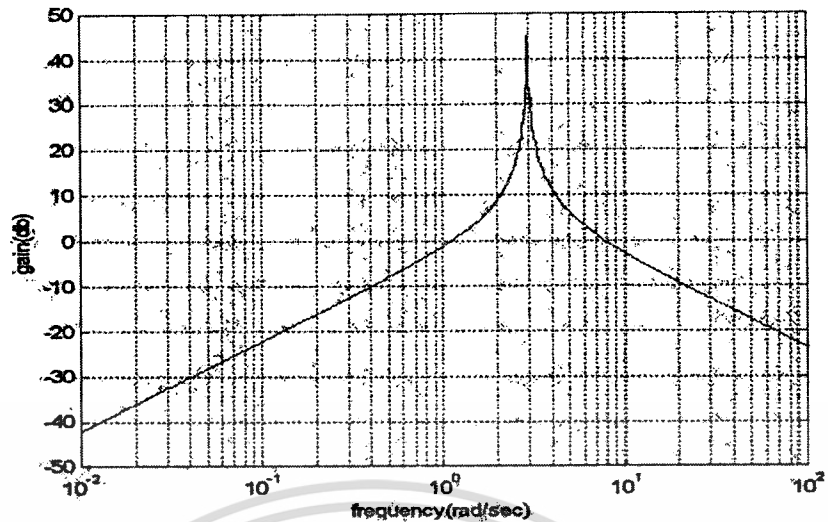
รูปที่ 5.4 แสดงผลการขึ้นชั้นความถูกต้องตามเงื่อนไขของสมการ (4.4) ในการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดของสมการที่ (3.18)



รูปที่ 5.5 แสดงผลการขึ้นชั้นความถูกต้องตามเงื่อนไขของสมการ (4.5) ในการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดของสมการที่ (3.18)

ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3 จะใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวตามรูปที่ 3.4 สมการที่ใช้ในการออกแบบเป็นตามสมการที่ (3.23) ซึ่งมีโพลีต์อดของฟังก์ชันการถ่ายโอนรอบวงเปิด $P(s)$ แสดงในรูปที่ 5.6

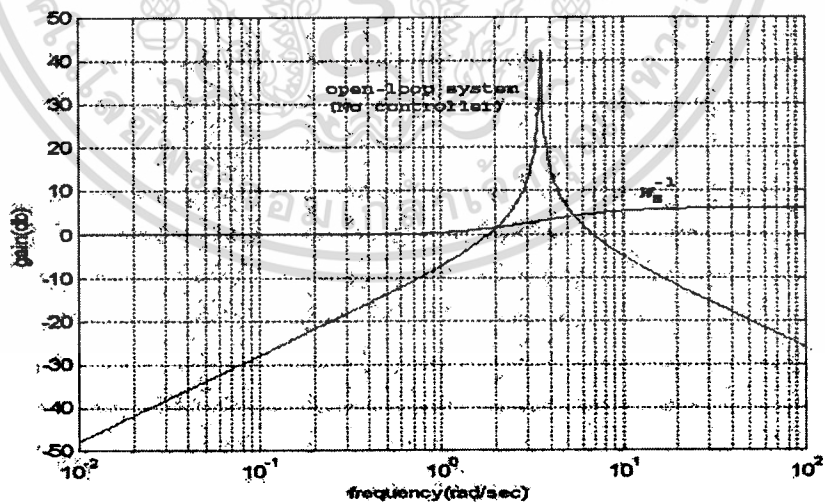
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 โบทพล็อตของฟังก์ชันถ่ายโอนรบบวงเปิด $P(s)$ ตามสมการที่ (3.23)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกฟังก์ชัน W_s ตามสมการที่ (5.5) และผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_s^{-1} แสดงในรูปที่ (5.7)

$$W_s^{-1} = \frac{2s+10}{s+10} \quad (5.5)$$

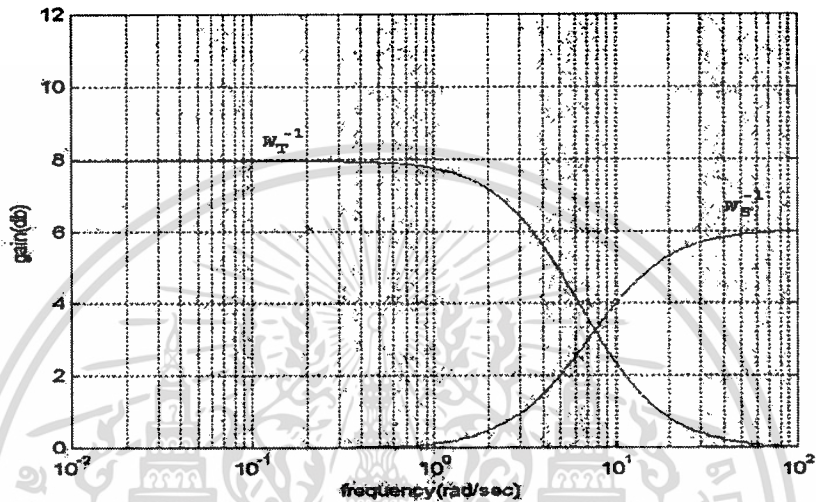


รูปที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_s^{-1} ในการออกแบบตามสมการที่ (3.17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือก W_T สำหรับการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3 ดังสมการที่ (5.6) และผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_T^{-1} เมื่อเทียบกับ W_S^{-1} แสดงในรูปที่ 5.8

$$W_T^{-1} = \frac{s+10}{s+4} \quad (5.6)$$

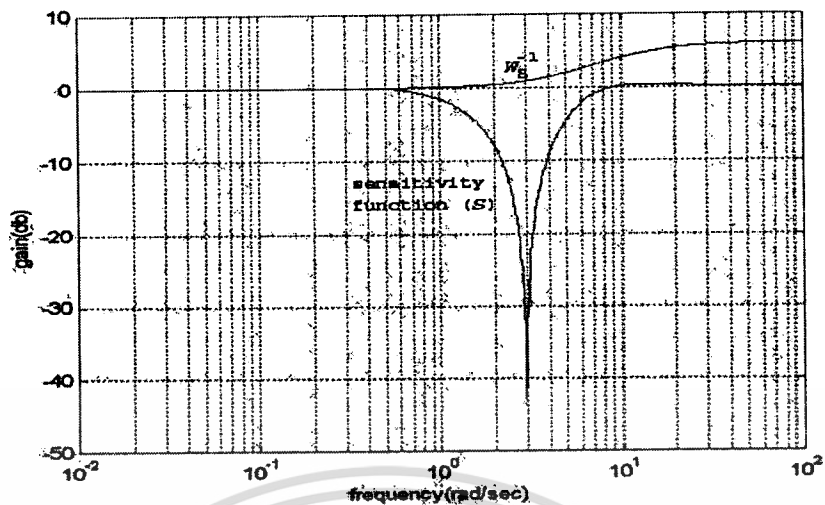


รูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ W_S^{-1} เทียบกับ W_T^{-1} ตามสมการที่ (5.5) และ (5.6)

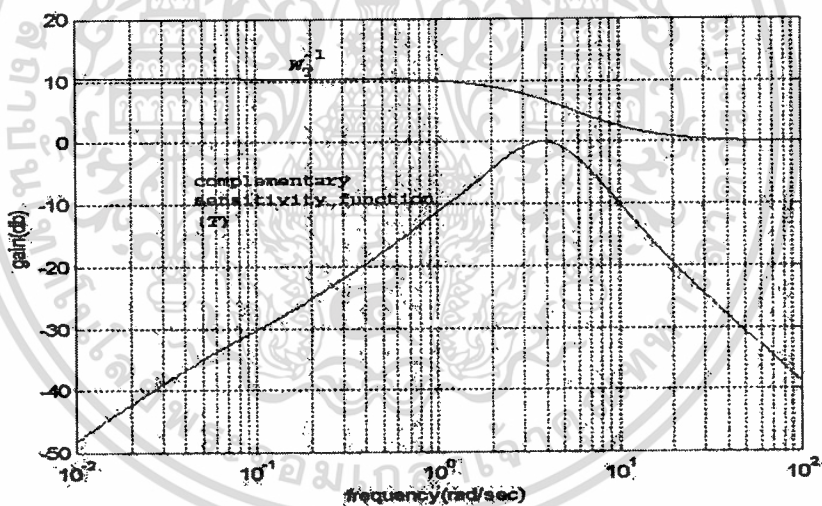
ตัวควบคุม $K(s)$ ซึ่งเป็นตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 3 แสดงในสมการที่ (5.7)

$$K_{SMES3} = \frac{193s^3 + 3800s^2 + 13869s - 842}{s^4 + 422s^3 + 5586s^2 + 17645s + 678} \quad (5.7)$$

เมื่อนำตัวควบคุม $K(s)$ ที่ได้มาเป็นตัวป้อนกลับในระบบ ฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดที่สามารถยืนยันความถูกต้องตามข้อกำหนดในสมการ (4.4) และ (4.5) ได้ในรูปที่ 5.9 และ 5.10



รูปที่ 5.9 แสดงผลการขึ้นชั้นความถูกต้องตามเงื่อนไขของสมการ (4.4) ในการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดของสมการที่ (3.23)



รูปที่ 5.10 แสดงผลการขึ้นชั้นความถูกต้องตามเงื่อนไขของสมการ (4.5) ในการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดของสมการที่ (3.23)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

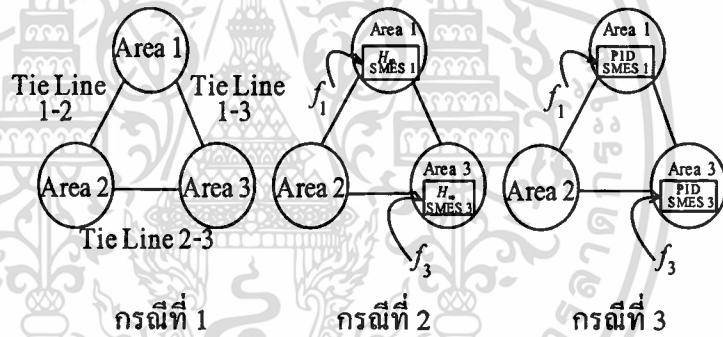
บทที่ 6

การทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่ได้ออกแบบมาในบทที่ 5 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ซึ่งเป็นวิธีการเดิม โปรแกรม MATLAB จะใช้ในการจำลองเหตุการณ์พร้อมกับแสดงผลการทดลองทั้งหมดในบทนี้

6.1 กรณีที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองจึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองของ LFC 3 พื้นที่ทั้งหมด 3 กรณีในรูปที่ 6.1 ในการศึกษาและเปรียบเทียบผลทั้งหมด



รูปที่ 6.1 แสดงสามกรณีที่นำมาใช้ในการทดลอง

รูปที่ 6.1 กรณีทั้งสามที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

กรณีที่ 1 ไม่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ใดใน LFC ทั้ง 3 พื้นที่

กรณีที่ 2 มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้รับการออกแบบตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞

กรณีที่ 3 มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้รับการออกแบบตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID

6.2 การทดลอง

ในการทดลองจะประกอบด้วย 2 ส่วน ซึ่งกรณีทั้งสามในหัวข้อที่ผ่านมาจะถูกนำมาใช้ในการทดลองทั้ง 2 ส่วนนี้ การทดลองทั้ง 2 ส่วนมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 1 เป็นการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ในกรณีที่ 3 เพื่อให้มีความสามารถในการปรับปรุงผลตอบสนองเชิงความถี่ได้เท่ากับตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ในกรณีที่ 2 ที่ออกแบบมาแล้วจากบทที่ 5 เมื่อสัญญาณรบกวนภายนอกเป็นสัญญาณที่ไม่มีค่าความถี่ ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยความถี่โรบัสต์ของระบบในการรักษาความถี่เสถียรภาพ

ส่วนที่ 2 ปรับสถานการณ์ที่ต้องอาศัยความถี่โรบัสต์ของระบบ เช่น พารามิเตอร์เปลี่ยนไป และสัญญาณรบกวนภายนอกมีความถี่อยู่ในย่านการสวิตช์ระหว่างพื้นที่ ซึ่งเป็นย่านที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ แล้วสังเกตตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้รับการออกแบบตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอว่า มีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพความถี่ของระบบ ได้ดีกว่าตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้รับการออกแบบตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID หรือวิธีเดิมหรือไม่

6.2.1 การทดลองเพื่อออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ตามวิธีการลองผิดลองถูก และจะทำการตรวจสอบผลตอบสนองในโดเมนเวลาให้มีความสามารถในการแฉกค่าโอเวอร์ชูตสูงสุดให้เท่ากับตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่ออกแบบมาจากบทที่ 5 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกเป็นแบบขั้น (Unit Step) ขนาด 0.01 เปอรฺยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3 ในแบบจำลองของ LFC 3 พื้นที่ตามที่แสดงในรูปที่ 2.18 ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ที่ได้เลือกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงในสมการที่ (6.2) และ (6.3)

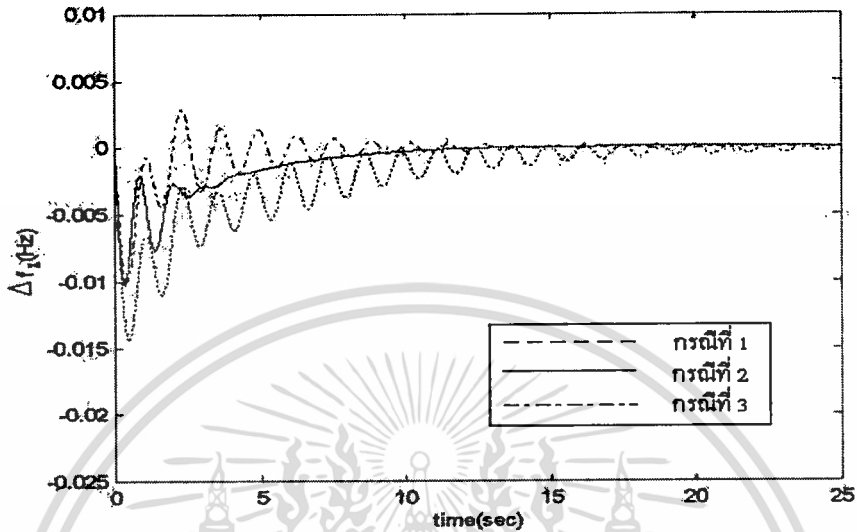
$$K_{SMES1} = 0.07 + \frac{1}{s} + 0.05s \quad (6.2)$$

$$K_{SMES3} = 0.15 + \frac{1}{s} + 0.10s \quad (6.3)$$

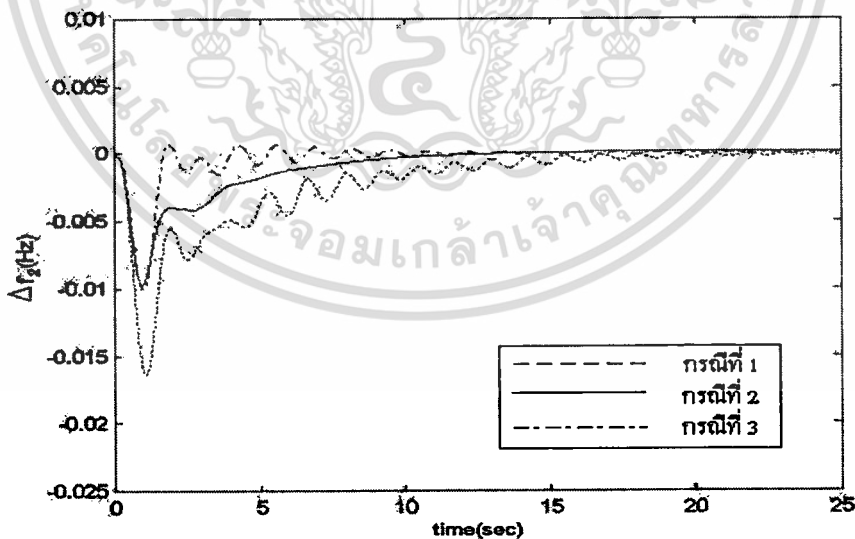
รูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.4 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ LFC 3 พื้นที่ตามแบบจำลองในรูปที่ 2.18 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เปอรฺยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES สามารถลดค่าโอเวอร์ชูตสูงสุดของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปได้ และตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้รับการออกแบบตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ในสมการที่ (6.2) และ (6.3) มีความสามารถในการลดค่าโอเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดสูงสุดได้เท่ากับตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้รับการออกแบบตามควบคุมทฤษฎีการแบบ H_∞ ในสมการที่ (5.3) และ (5.6)

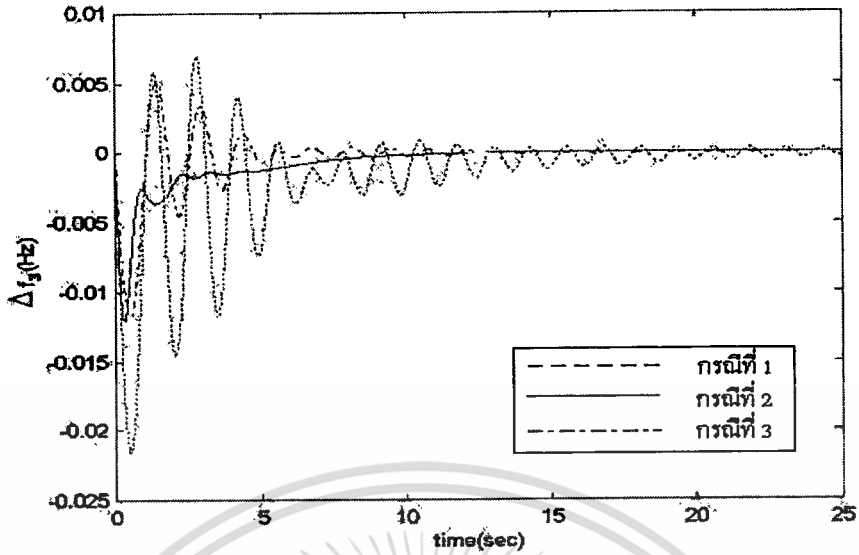


รูปที่ 6.2 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เฮอร์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3



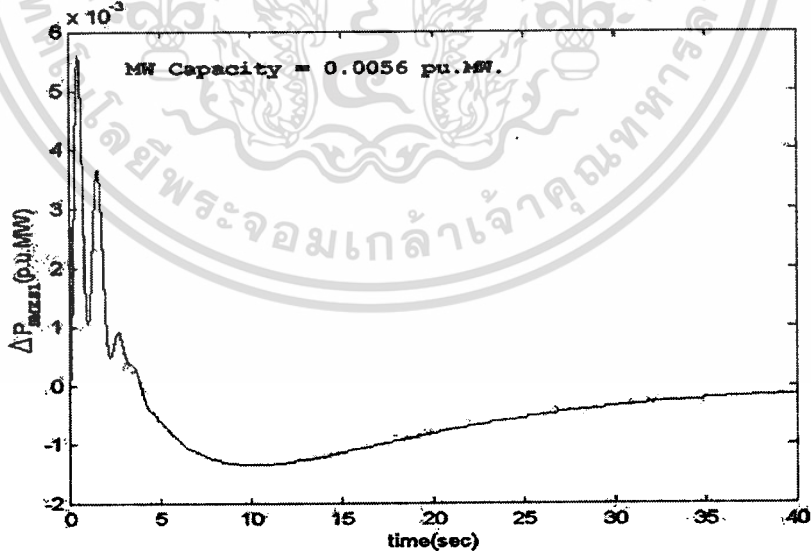
รูปที่ 6.3 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ 2 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เฮอร์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



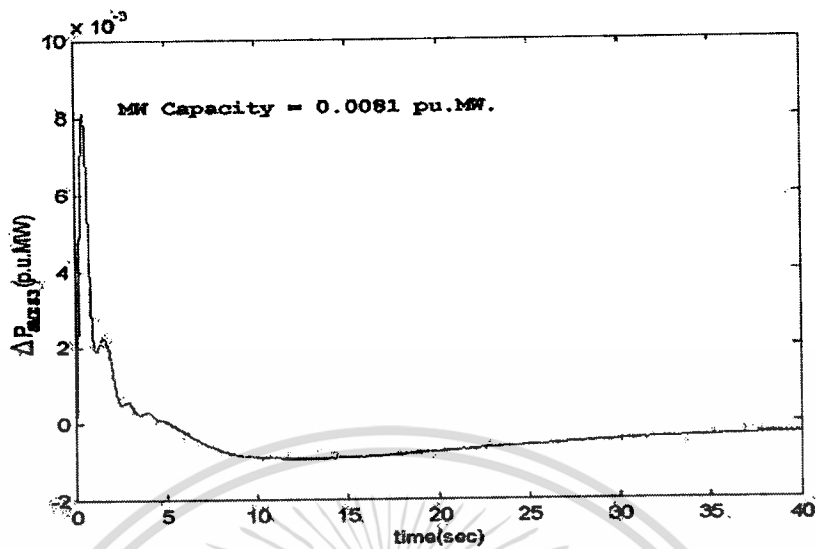
รูปที่ 6.4 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3

รูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 6.5 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



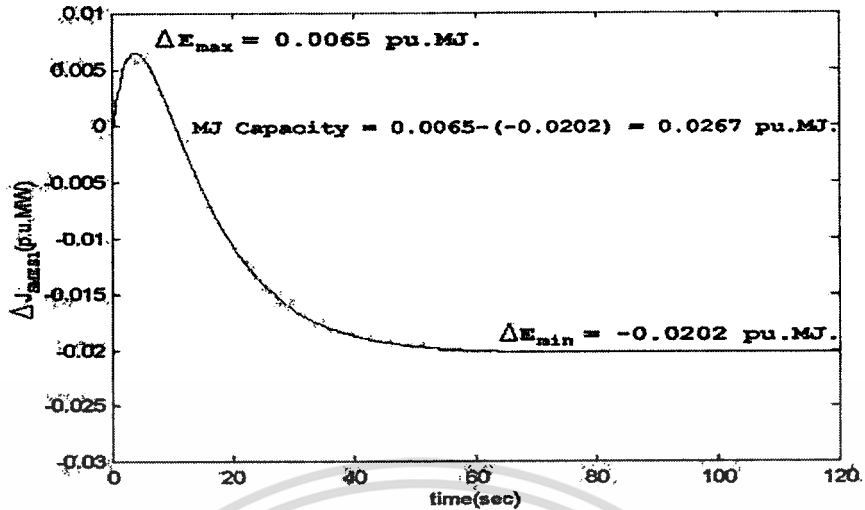
รูปที่ 6.6 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3

ค่าความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ (MW Capacity) สำหรับตัวควบคุมต้องมีค่าถึงระดับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดที่ออกมาจากตัวควบคุมนั้นๆ ซึ่งจากรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6 ค่าความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 เป็น 0.0056 และ 0.0081 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ ตามลำดับ

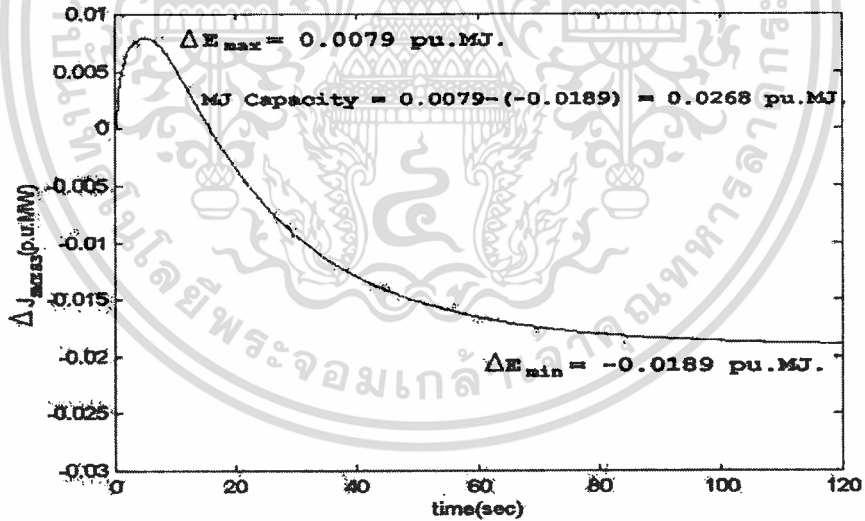
เนื่องจากค่ากำลังงานเป็นอนุพันธ์ของค่าระดับพลังงาน ดังนั้นสามารถหาค่าระดับพลังงานของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ได้จากการอินทิเกรตค่ากำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวมันเอง ตามสมการที่ (6.4)

$$\Delta E_{SMES} = \int \Delta P_{SMES} dt \quad (6.4)$$

รูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.8 แสดงระดับพลังงานของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 6.7 แสดงระดับในการใช้พลังงานที่สะสมของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_{∞} ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เปอร์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3



รูปที่ 6.8 แสดงระดับในการใช้พลังงานที่สะสมของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_{∞} ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบเป็นขั้นขนาด 0.01 เปอร์ยูนิตเมกะวัตต์เกิดที่พื้นที่ 1 และ 3

ค่าความสามารถในการสะสมพลังงาน (*MJ Capacities*) สำหรับตัวควบคุมแบบสะสมพลังงานต้องมีค่าในการรองรับพลังงานที่เปลี่ยนแปลงสูงสุดในช่วงการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ดังนั้นค่าความสามารถในการสะสมพลังงานของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES สามารถหาได้จากผลต่างของระดับพลังงานสูงสุดและระดับพลังงานต่ำสุดของตัวมันเอง ตามสมการที่ (6.5)

$$SMES \text{ MJ Capacity} = \Delta E_{SMES(max)} - \Delta E_{SMES(min)} \quad (6.5)$$

ซึ่งจากรูปที่ (6.6) และ (6.7) ค่าความสามารถในการสะสมพลังงานของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.0267 และ 0.0268 เปรอร์ยูนิทเมกะจูลน์ ตามลำดับ

6.2.2 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมทั้งสองวิธี

การทดสอบความมีโรบัสต์ของระบบจะต้องทดสอบจากการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ จากระบบเดิม เช่น พารามิเตอร์ในระบบ หรือสัญญาณรบกวนภายนอกที่เข้ามาในระบบ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อระบบที่มาจากการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้น เนื่องจากในสภาวะการใช้งานจริง หากการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบเปลี่ยนแปลงไป หรือค่าอิมพีแดนซ์โครงข่าย (network impedance) เปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์เดมปีงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นในการทดลองจะทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์เดมปีง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

การทดลองส่วนที่ 1 : เปลี่ยนแปลงค่าบวกของสัมประสิทธิ์เดมปีง ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงสัญญาณรบกวนภายนอกจากแบบขั้น ไปเป็นแบบคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่อยู่ใกล้ย่านที่เป็นการสวิงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างพื้นที่ ซึ่งเป็นความถี่ที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ
2. เปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์เดมปีงที่พื้นที่ที่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอก โดยลดค่าลงมาเรื่อยๆ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

การทดลองส่วนที่ 2 : เปลี่ยนแปลงค่าลบของสัมประสิทธิ์เดมปีง ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงสัญญาณรบกวนภายนอกจากแบบขั้น ไปเป็นแบบคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่อยู่ใกล้ย่านที่เป็นการสวิงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างพื้นที่ ซึ่งเป็นความถี่ที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงที่พื้นที่ที่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอก โดยเปลี่ยนค่าจากที่เป็นบวก (positive) ไปเป็นค่าที่เป็นลบ (negative) แล้วเพิ่มค่าที่เป็นลบไปเรื่อยๆ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

6.2.2.1 การทดลองส่วนที่ 1 : เปลี่ยนแปลงค่าบวกของสัมประสิทธิ์แดมปีง

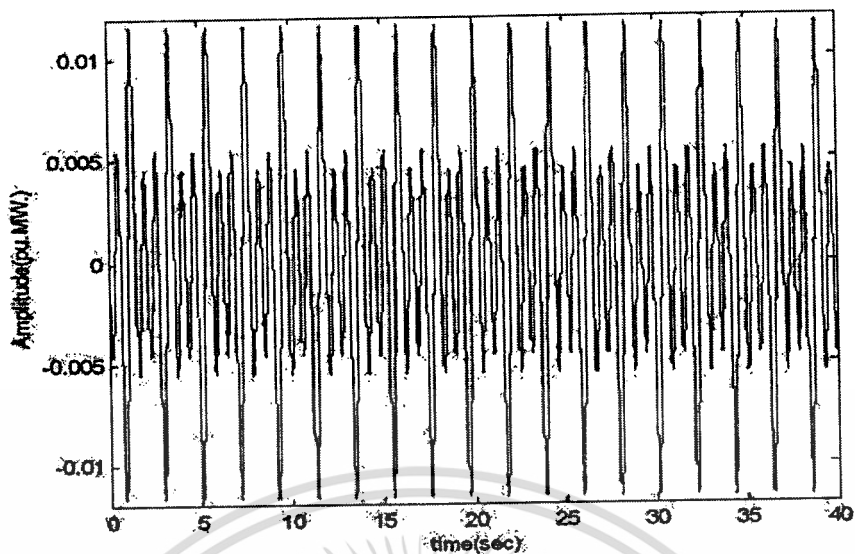
สำหรับการทดลองในส่วนนี้ สัญญาณรบกวนภายนอกที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 จะเปลี่ยนจากสัญญาณแบบขั้นไปเป็นสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่บริเวณย่าน 0.2 – 0.8 เฮิร์ตซ์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะให้สัญญาณรบกวนภายนอกที่พื้นที่ 1 เป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยรูปคลื่นไซน์ 3 ลูกคลื่น ลูกคลื่นแรกมีขนาดแอมพลิจูด -0.002 เฟอร์ยูนิตเมกะวัตต์ ความถี่ 3 รอบต่อวินาที หรือ 0.48 เฮิร์ตซ์ ลูกคลื่นที่สองมีขนาดแอมพลิจูด 0.004 เฟอร์ยูนิตเมกะวัตต์ ความถี่ 6 รอบต่อวินาที หรือ 0.95 เฮิร์ตซ์ และลูกคลื่นที่สามมีขนาดแอมพลิจูด -0.007 เฟอร์ยูนิตเมกะวัตต์ ความถี่ 9 รอบต่อวินาที 1.43 เฮิร์ตซ์ รวมสัญญาณลูกคลื่นที่พื้นที่ 1 แสดงในสมการที่ (6.6)

$$\Delta P_{L1} = -0.002 \sin(3t) + 0.004 \sin(6t) - 0.007 \sin(9t) \quad (6.6)$$

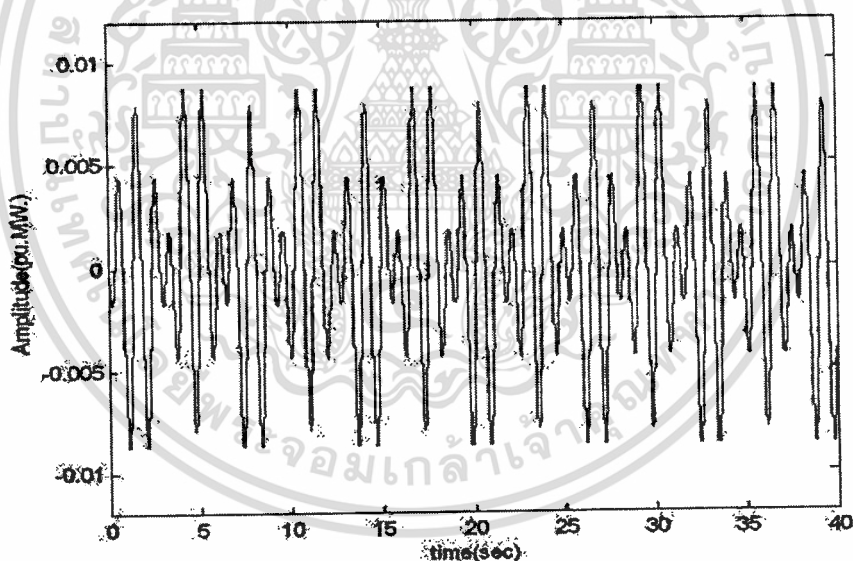
และให้สัญญาณรบกวนภายนอกที่พื้นที่ 3 เป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยคลื่นรูปไซน์ 3 ลูกคลื่น ลูกคลื่นแรกมีขนาดแอมพลิจูด -0.001 เฟอร์ยูนิตเมกะวัตต์ ความถี่ 1 รอบต่อวินาที หรือ 0.16 เฮิร์ตซ์ ลูกคลื่นที่สองมีขนาดแอมพลิจูด 0.004 เฟอร์ยูนิตเมกะวัตต์ ความถี่ 5 รอบต่อวินาที หรือ 0.80 เฮิร์ตซ์ และลูกคลื่นที่สามมีขนาดแอมพลิจูด -0.005 เฟอร์ยูนิตเมกะวัตต์ ความถี่ 7 รอบต่อวินาที 1.11 เฮิร์ตซ์ รวมสัญญาณลูกคลื่นที่พื้นที่ 3 แสดงในสมการที่ (6.7)

$$\Delta P_{L3} = -0.001 \sin(1t) + 0.004 \sin(5t) - 0.007 \sin(7t) \quad (6.7)$$

สัญญาณรบกวนภายนอกที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) สามารถในรูปที่ 6.9 และรูปที่ 6.10 ตามลำดับ



รูปที่ 6.9 แสดงสัญญาณรบกวนภายนอกที่เกิดขึ้นที่พื้นที่ 1 ตามสมการที่ (6.6)



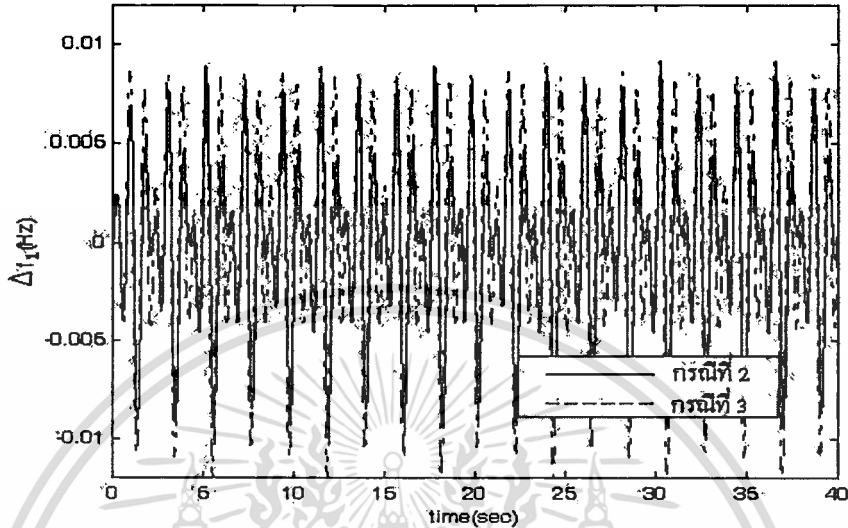
รูปที่ 6.10 แสดงสัญญาณรบกวนภายนอกที่เกิดขึ้นที่พื้นที่ 3 ตามสมการที่ (6.7)

และทำการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แคมป์ปิ้ง โดยเพิ่มค่าขึ้นเรื่อยๆ ในวิชานีพนธ์ฉบับนี้ จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แคมป์ปิ้ง ดังนี้

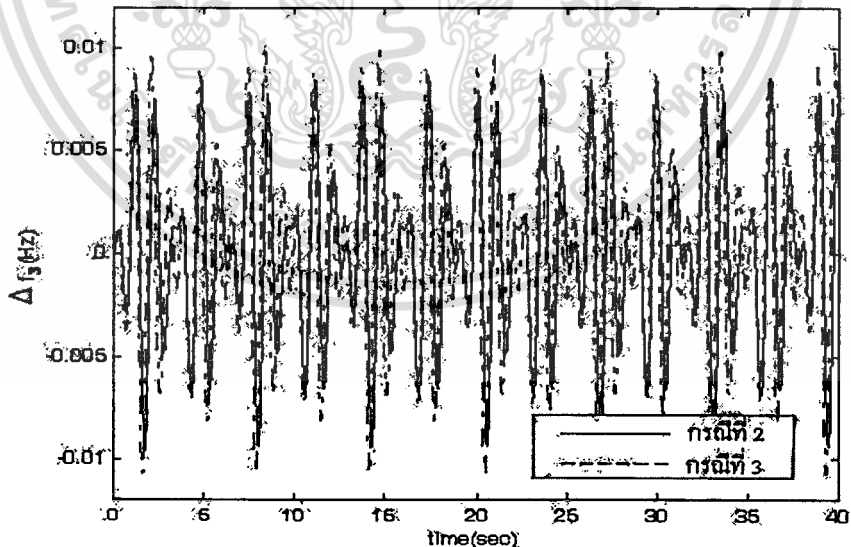
1. ค่าสัมประสิทธิ์แคมป์ปิ้งที่พื้นที่ 1 เปลี่ยนจาก 0.006 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ไปเป็น 0.5, 1 และ 2 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงที่พื้นที่ 3 เปลี่ยนจาก 0.005 เอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ไปเป็น 0.5, 1 และ 2 เอร์ยูนิตเมกะวัตต์ ตามลำดับ
ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6.11 ถึงรูปที่ 6.25



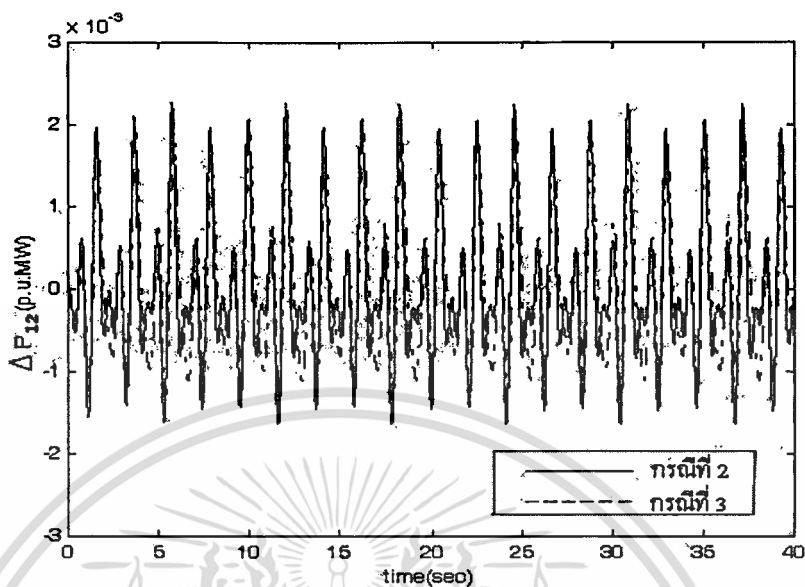
รูปที่ 6.11 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น 0.5 เอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3



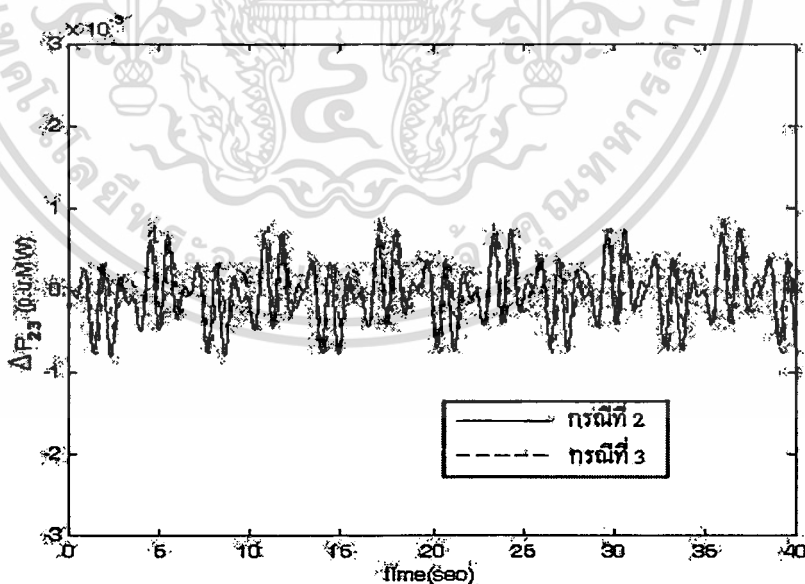
รูปที่ 6.12 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น 0.5 เอร์ยูนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

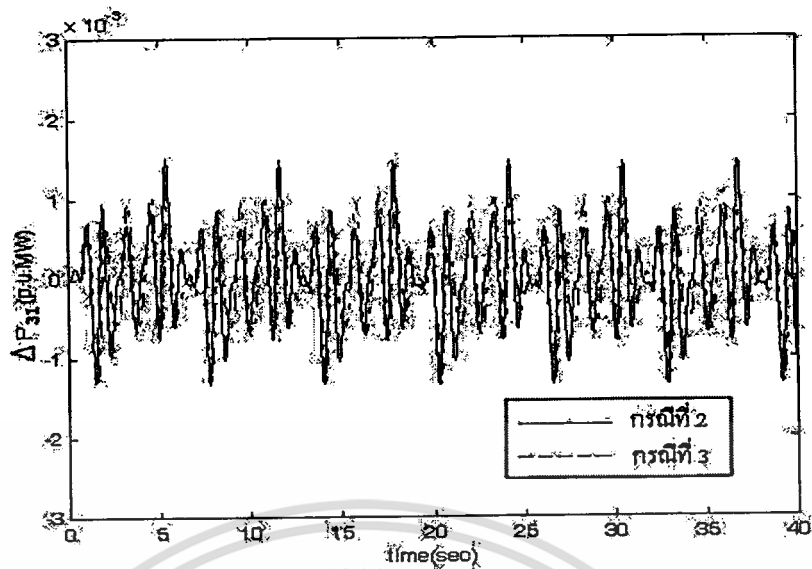


รูปที่ 6.13 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{1e12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น 0.5 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

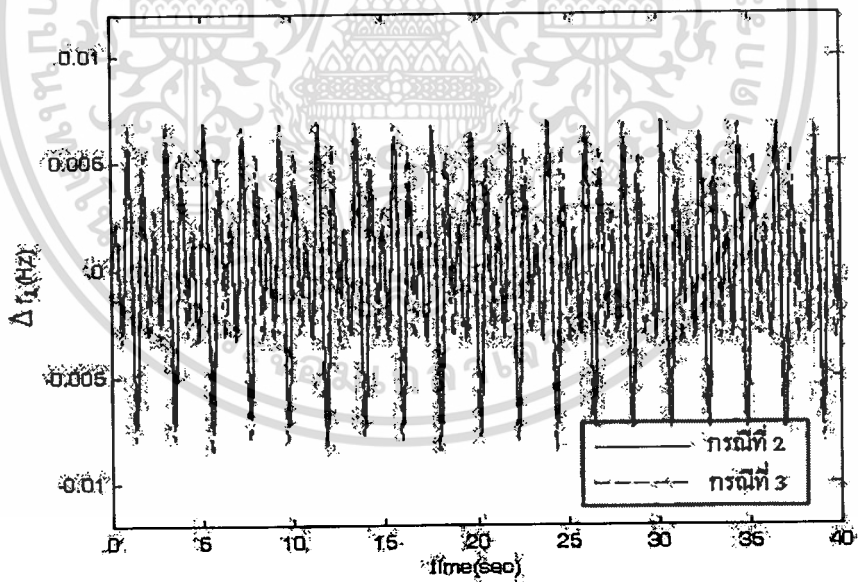


รูปที่ 6.14 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{2e23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น 0.5 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

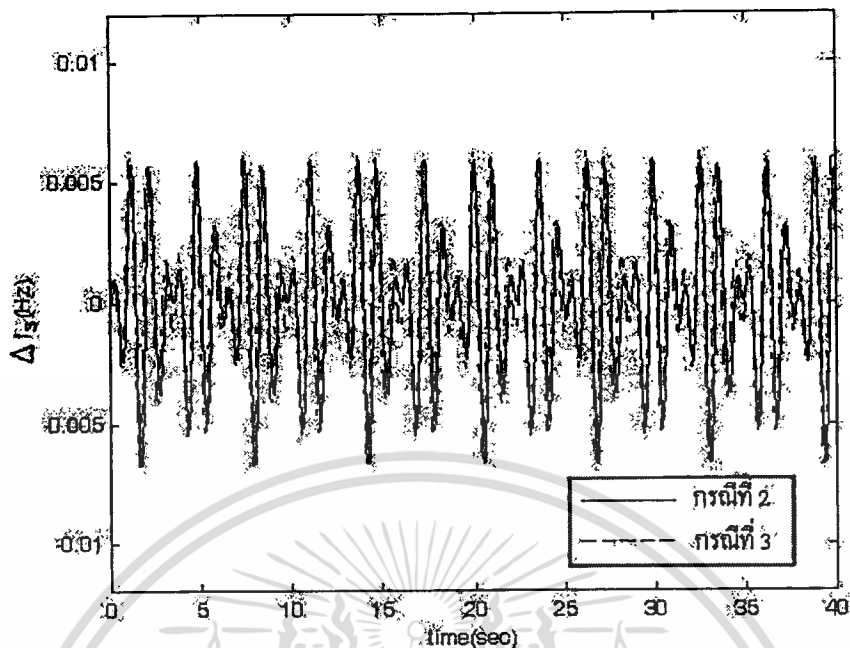


รูปที่ 6.15 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{tie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แคมปีงเปลี่ยนเป็น 0.5 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

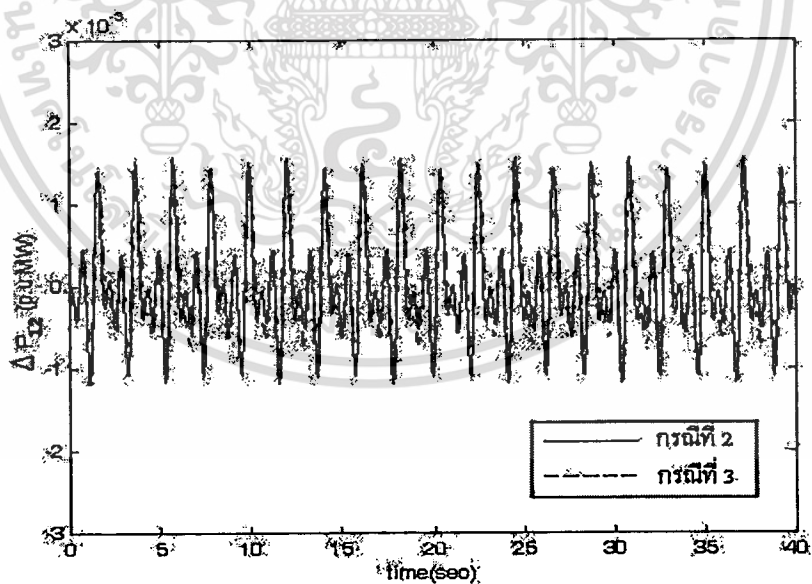


รูปที่ 6.16 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แคมปีงเปลี่ยนเป็น 1.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

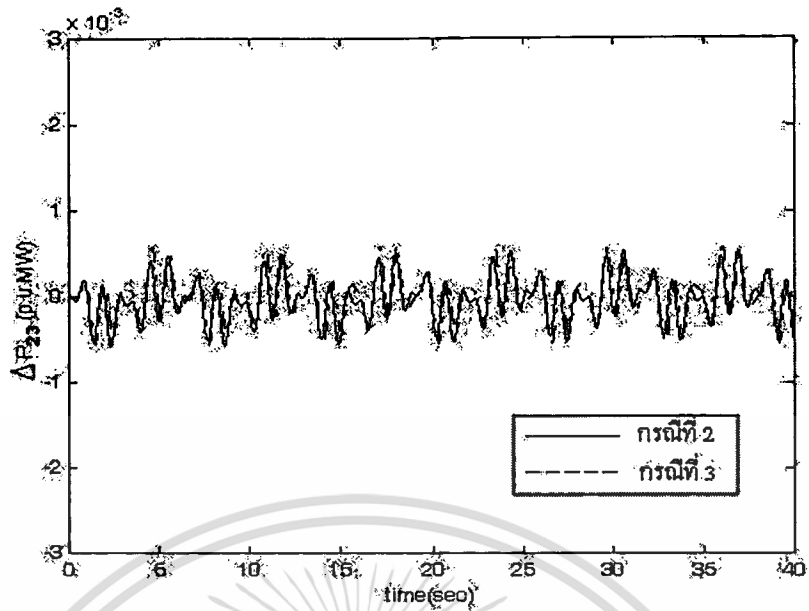


รูปที่ 6.17 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมป์เปลี่ยนเป็น 1.0 เปอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

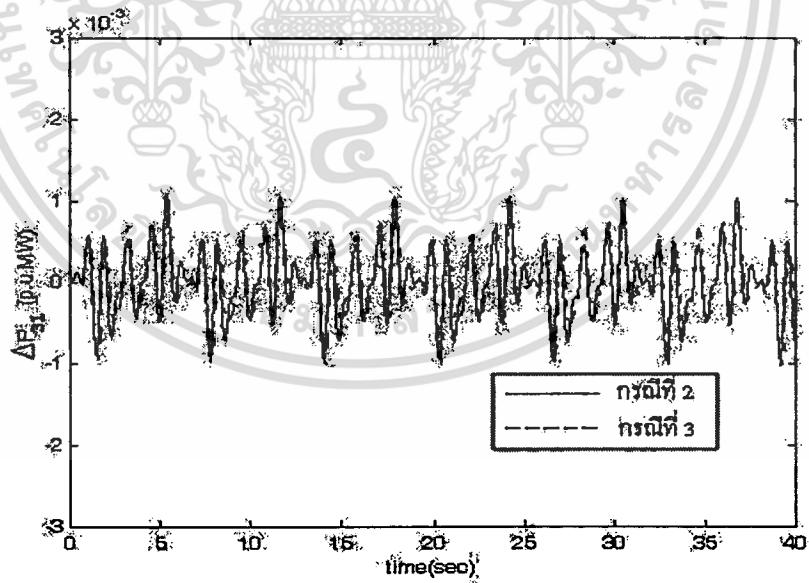


รูปที่ 6.18 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{fl12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมป์เปลี่ยนเป็น 1.0 เปอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

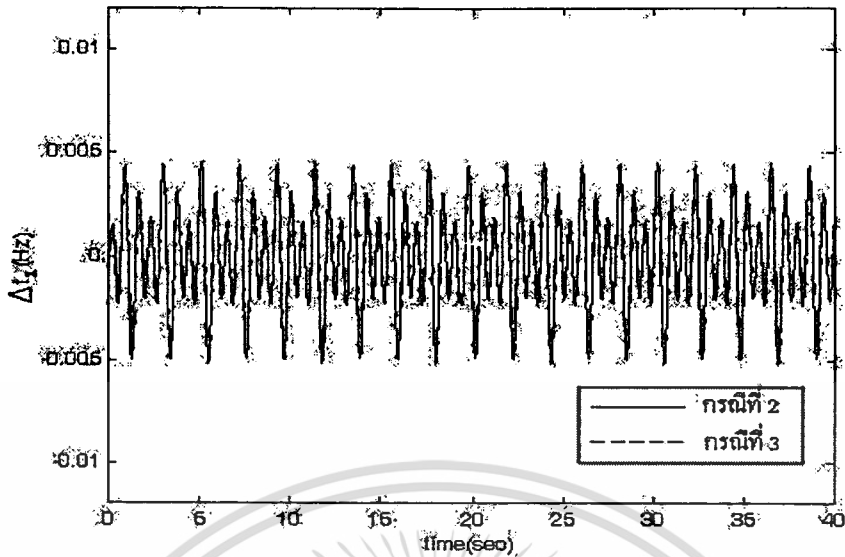


รูปที่ 6.19 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{ll23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น 1.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

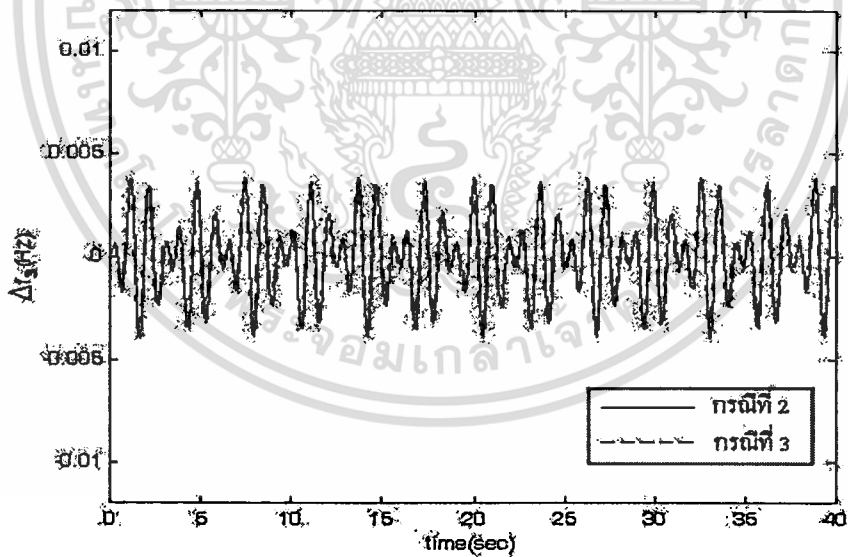


รูปที่ 6.20 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{ll31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น 1.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

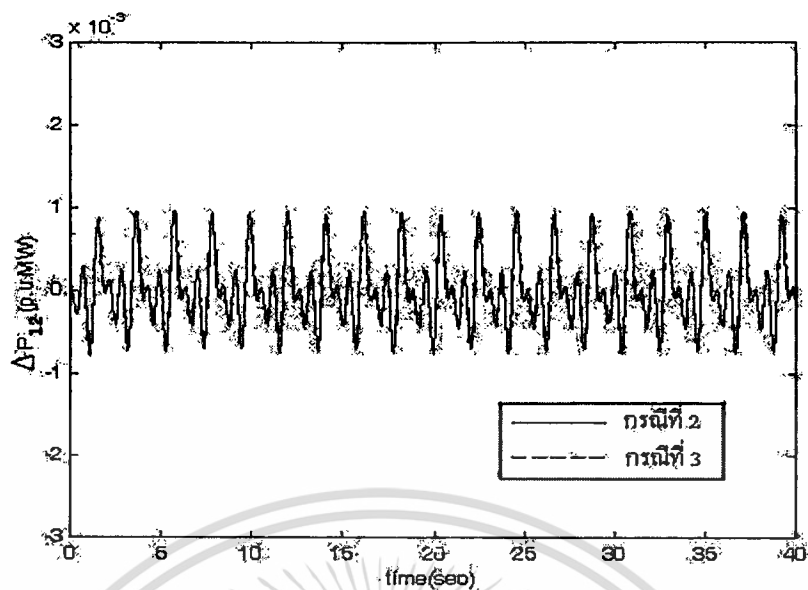


รูปที่ 6.21 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมป์เปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอ์ยูนิคเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

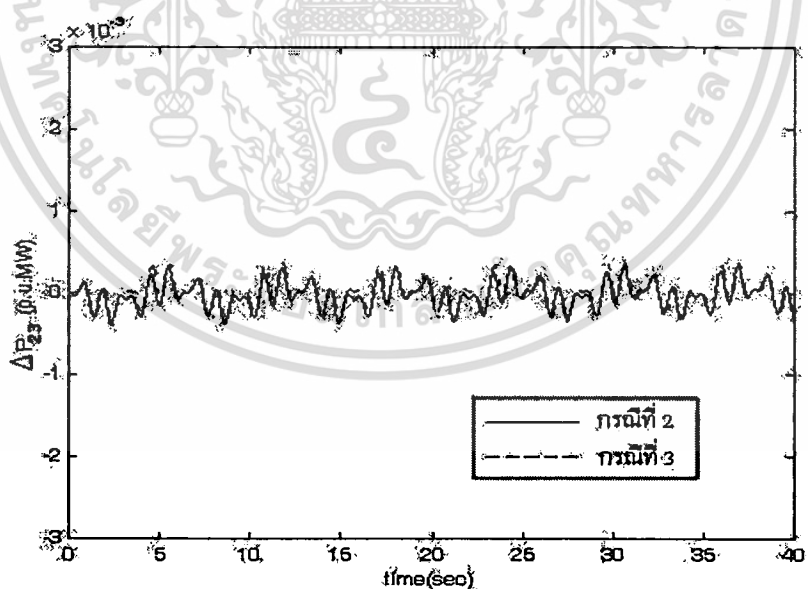


รูปที่ 6.22 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมป์เปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอ์ยูนิคเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

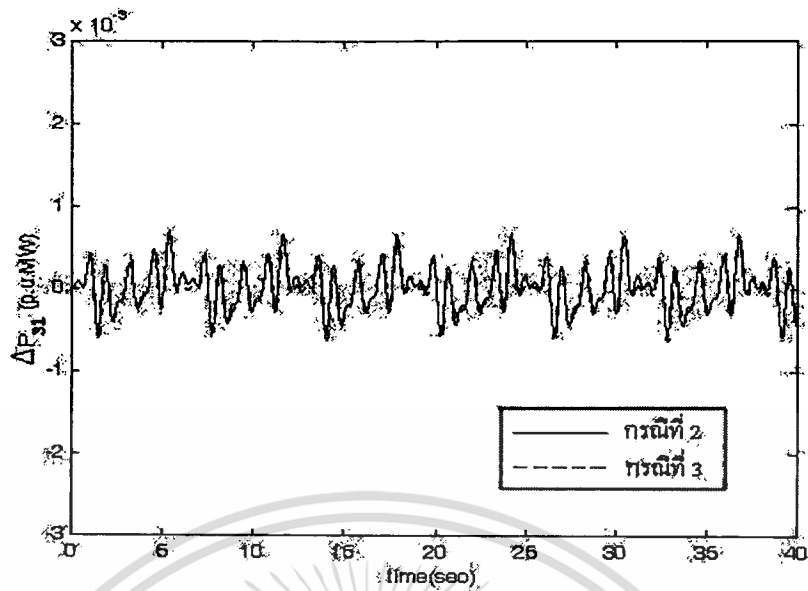


รูปที่ 6.23 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{ie12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3



รูปที่ 6.24 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{ie23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



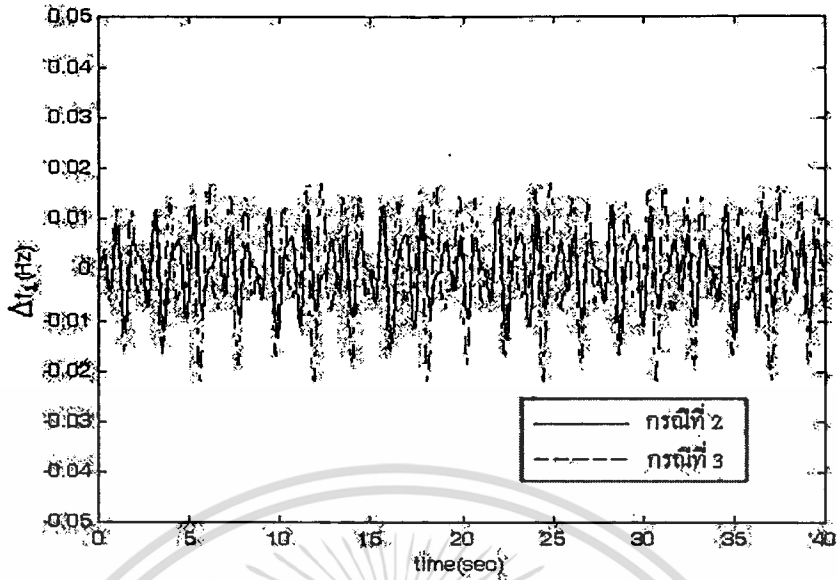
รูปที่ 6.25 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{ne31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปี้งเปลี่ยนเป็น 2.0 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

6.2.2.2 การทดลองส่วนที่ 2 : เปลี่ยนแปลงค่าของสัมประสิทธิ์แดมปี้ง

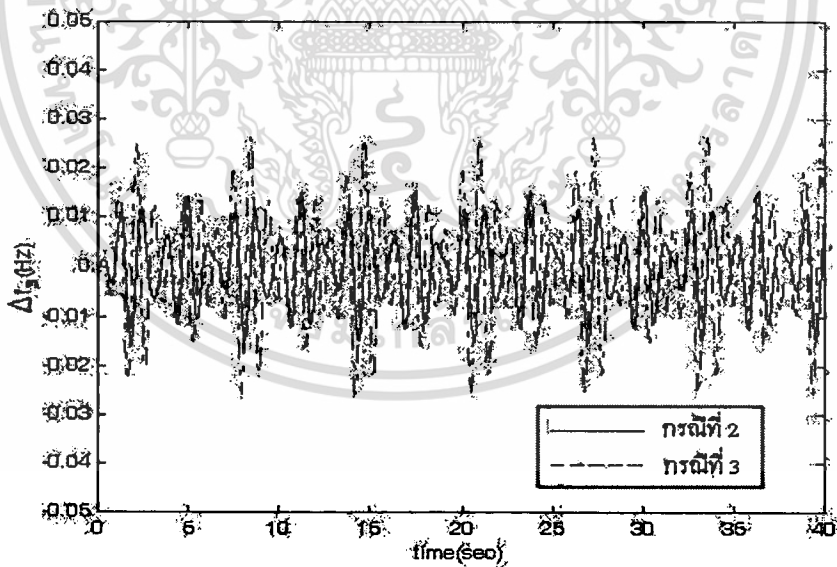
ให้สัญญาณรบกวนภายนอกเป็นตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่ได้แสดงแล้วในรูปที่ 6.8 และ 6.9 และทำการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แดมปี้ง โดยเพิ่มค่าที่เป็นลบขึ้นเรื่อยๆ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าค่าสัมประสิทธิ์แดมปี้ง ดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์แดมปี้งที่พื้นที่ 1 เปลี่ยนจาก 0.006 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ไปเป็น -0.05, -0.3 และ -0.6 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ ตามลำดับ
2. ค่าสัมประสิทธิ์แดมปี้งที่พื้นที่ 3 เปลี่ยนจาก 0.005 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ไปเป็น -0.05, -0.3 และ -0.6 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ ตามลำดับ

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6.26 ถึงรูปที่ 6.40

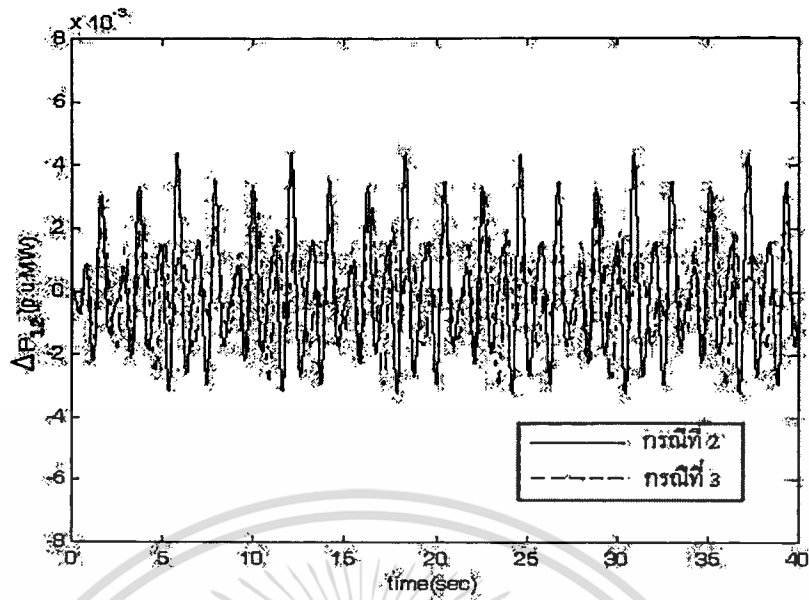


รูปที่ 6.26 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

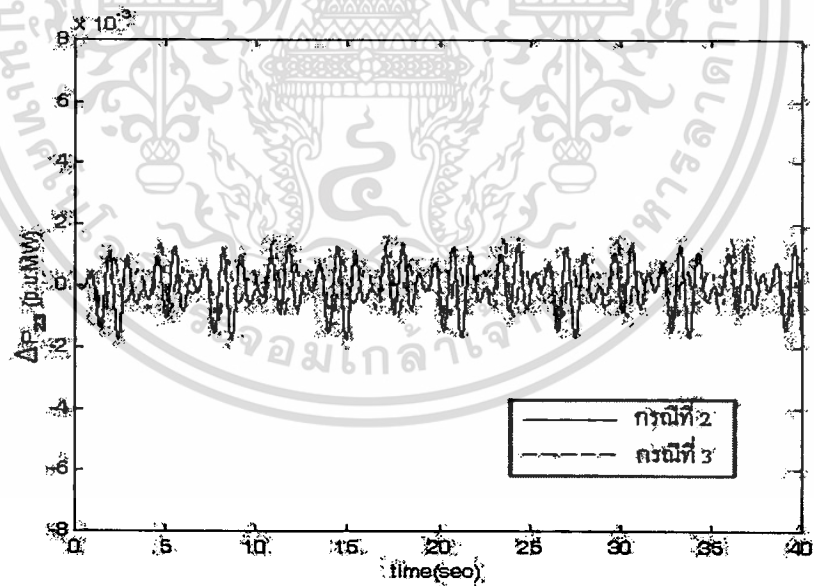


รูปที่ 6.27 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

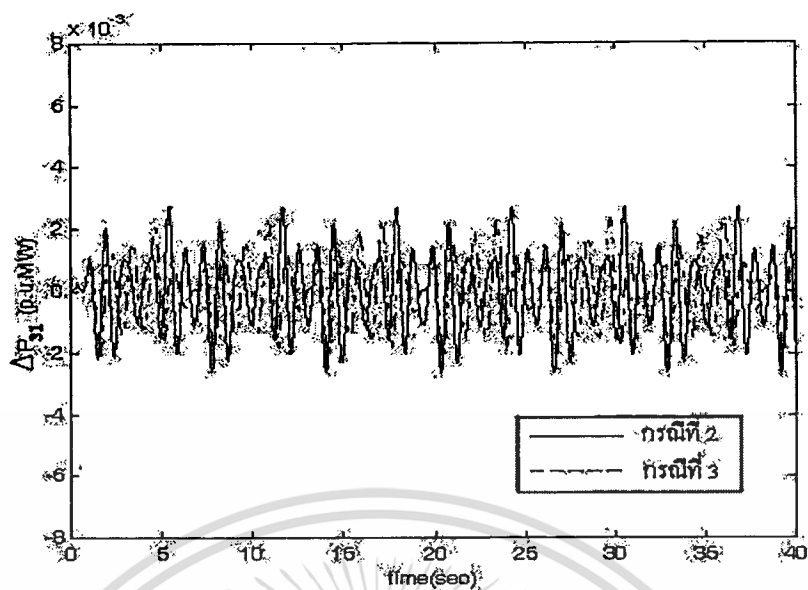


รูปที่ 6.28 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{1e2}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

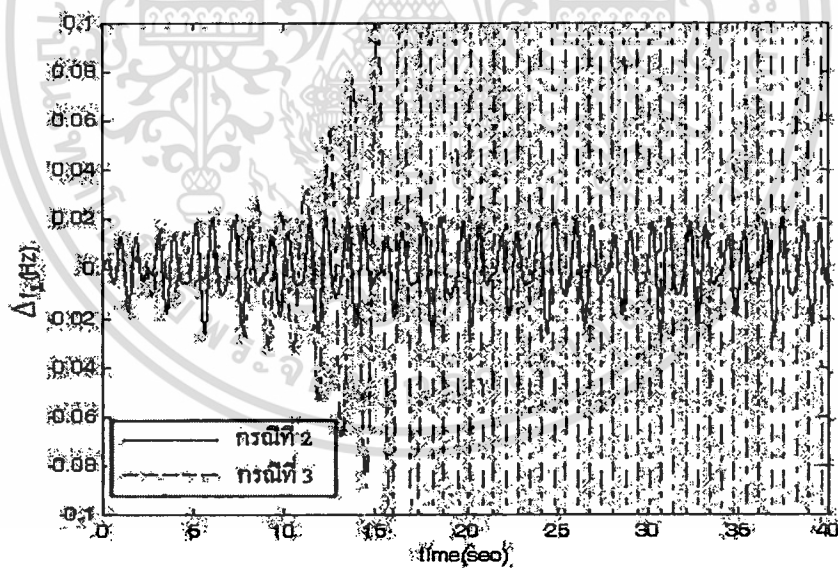


รูปที่ 6.29 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{2e3}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

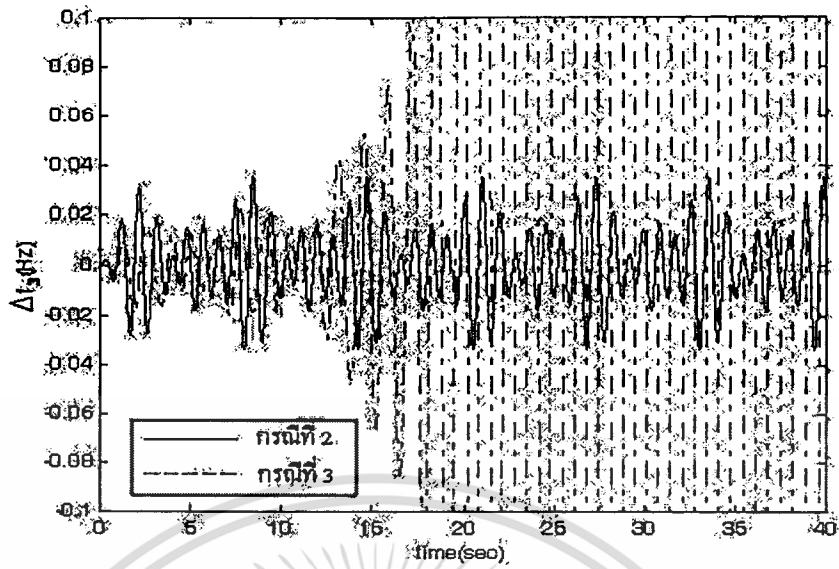


รูปที่ 6.30 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{ie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.05 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

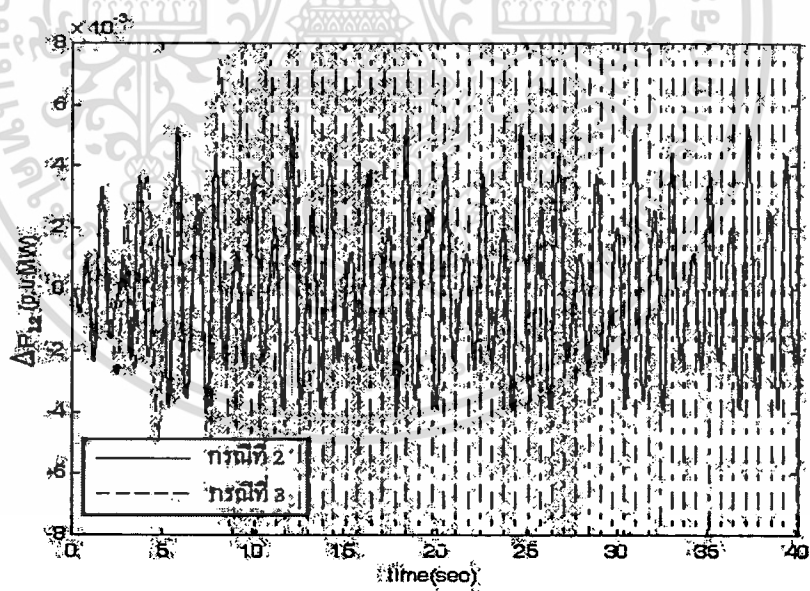


รูปที่ 6.31 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.3 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

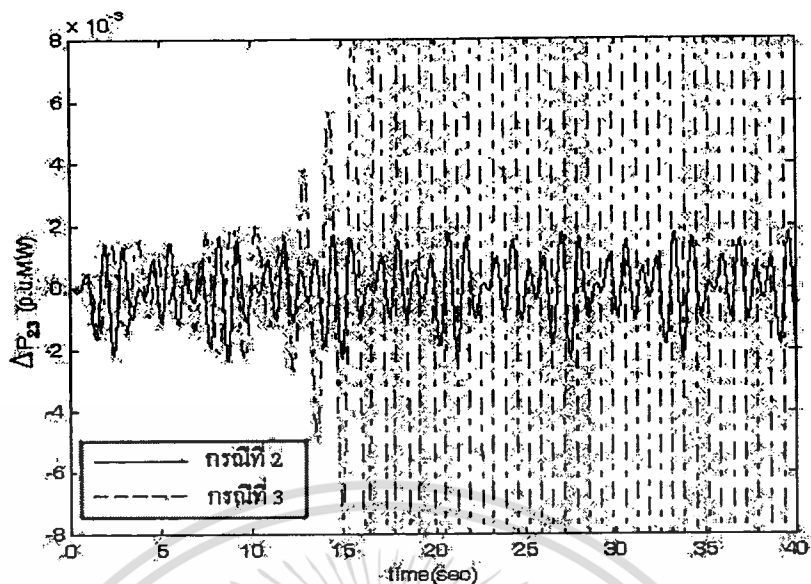


รูปที่ 6.32 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.3 เปอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

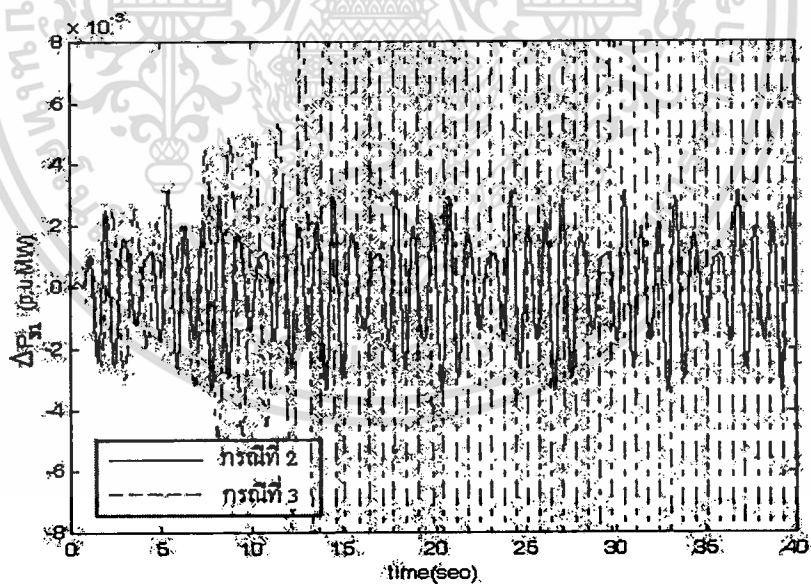


รูปที่ 6.33 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{tie12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.3 เปอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

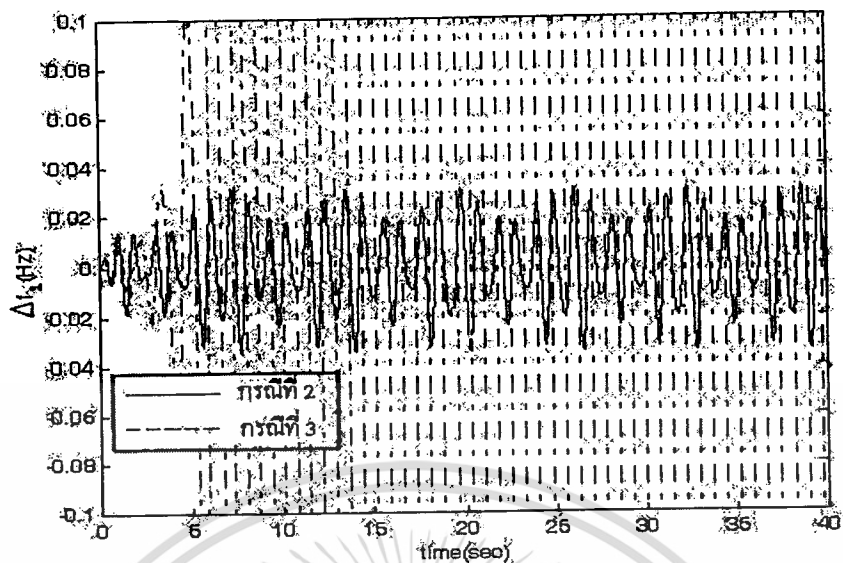


รูปที่ 6.34 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{ie23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.3 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

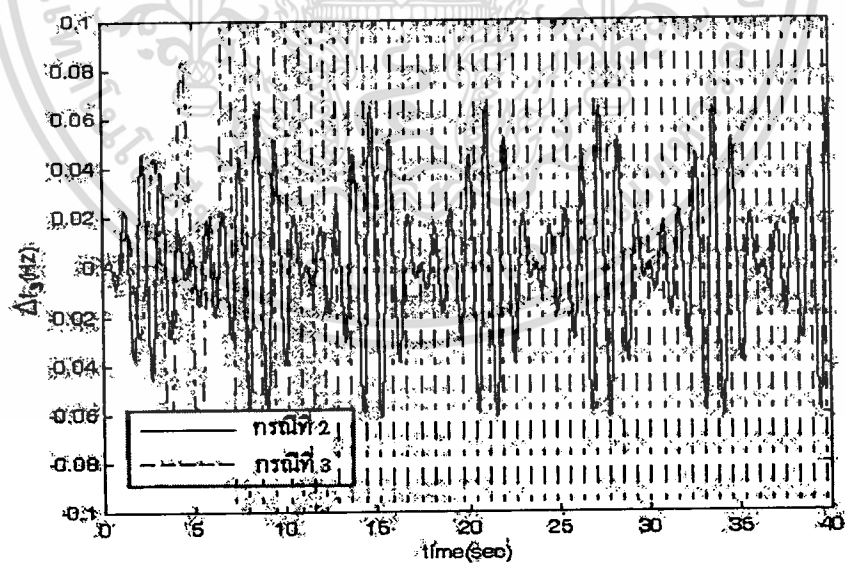


รูปที่ 6.35 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{ie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.3 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

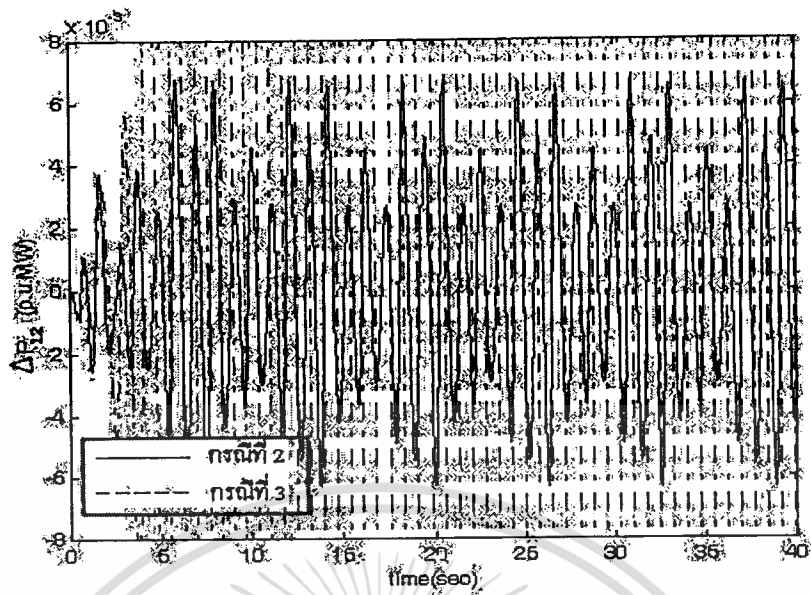


รูปที่ 6.36 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 1 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.6 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

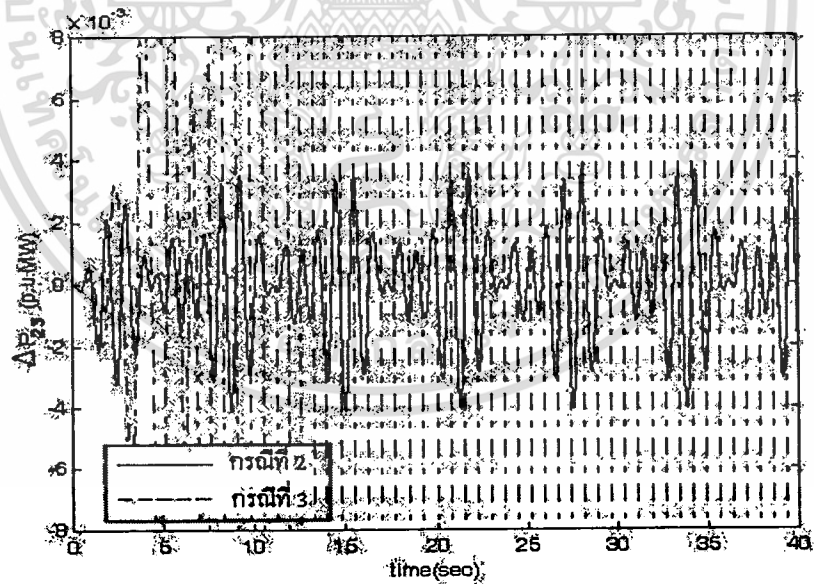


รูปที่ 6.37 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่พื้นที่ 3 เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.6 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

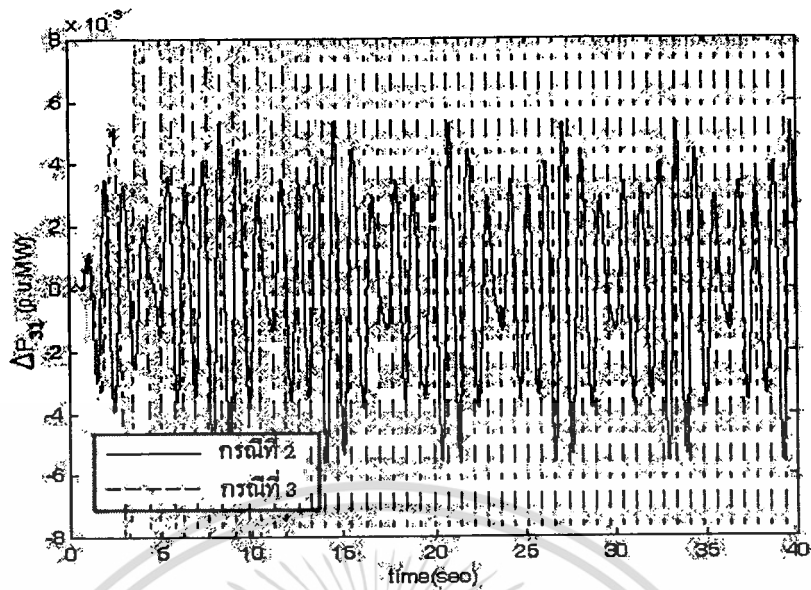


รูปที่ 6.38 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 (P_{ie12}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.6 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3



รูปที่ 6.39 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 2 ไปยังพื้นที่ 3 (P_{ie23}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.6 เปรอ์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.40 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ไหลข้ามจากพื้นที่ 3 ไปยังพื้นที่ 1 (P_{1ie31}) เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงเปลี่ยนเป็น -0.6 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ที่พื้นที่ 1 และ 3

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า หากทำการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงที่เป็นลบจนถึงค่า -0.3 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์แล้ว LFC 3 พื้นที่ที่มีตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ PID จะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้อีกต่อไป ในขณะที่ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ จะรักษาเสถียรภาพของระบบได้และยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบได้ต่อไปอีก เมื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แดมปีงที่เป็นลบต่อไปเป็น -0.6 เปรอร์ยูนิตเมกะวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์

จากผลการทดลองในทุกกรณี สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าเข้าที่พุดสูงสุด เพื่อนำมาประมาณค่าความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเข้าที่พุดสูงสุดของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ในแต่ละกรณี

สัญญาณรบกวนภายนอก (เปอร์เซ็นต์เมกะวัตต์)		ค่าสัมประสิทธิ์แอมป์ (เปอร์เซ็นต์เมกะวัตต์ ต่อเฮิร์ตซ์)		กำลังไฟฟ้าเข้าที่พุดสูงสุด ของ SMES (เปอร์เซ็นต์เมกะวัตต์)		เปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้า เข้าที่พุดสูงสุดของ SMES ต่อค่าสูง สุดของสัญญาณรบกวนภายนอก	
พื้นที่ 1	พื้นที่ 3	พื้นที่ 1	พื้นที่ 3	พื้นที่ 1	พื้นที่ 3	พื้นที่ 1	พื้นที่ 3
0.01	0.01	0.006	0.005	0.0056	0.0082	56.27	81.91
สมการที่ (6.6)	สมการที่ (6.7)	2.000	2.000	0.0024	0.0022	20.39	25.33
สมการที่ (6.6)	สมการที่ (6.7)	1.000	1.000	0.0040	0.0041	33.86	46.18
สมการที่ (6.6)	สมการที่ (6.7)	0.500	0.500	0.0057	0.0065	45.59	73.90
สมการที่ (6.6)	สมการที่ (6.7)	0.006	0.005	0.0099	0.0137	84.39	156.72
สมการที่ (6.6)	สมการที่ (6.7)	-0.050	-0.050	0.0108	0.0156	92.24	178.08
สมการที่ (6.6)	สมการที่ (6.7)	-0.300	-0.300	0.0117	0.0178	100.41	200.86
สมการที่ (6.6)	สมการที่ (6.7)	-0.600	-0.600	0.0140	0.0243	120.25	277.01

จากตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกเป็น 0.01 เปอร์เซ็นต์เมกะวัตต์เกิดขึ้นที่พื้นที่ 1 และ 3 กำลังไฟฟ้าเข้าที่พุดสูงสุดของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES จะเท่ากับ 0.0056 และ 0.0082 เปอร์เซ็นต์เมกะวัตต์ของพื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และกำลังไฟฟ้าเข้าที่พุดสูงสุดของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ต่อค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนภายนอกจะเท่ากับ 56.27 เปอร์เซ็นต์และ 81.91 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ แต่เมื่อสัญญาณรบกวนภายนอกเป็นสัญญาณที่มีคาบอยู่ในย่าน 0.2 – 0.8 เฮิร์ตซ์ ตามสมการที่ (6.6) และ (6.7) ที่พื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 แต่ค่าสัมประสิทธิ์แอมป์ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม กำลังไฟฟ้าเข้าที่พุดสูงสุดของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES จะเท่ากับ 0.0099 และ 0.0137 เปอร์เซ็นต์เมกะวัตต์ของพื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และเมื่อเทียบกำลังไฟฟ้าเข้าที่พุดสูงสุดของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ต่อค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนภายนอกจะเท่ากับ 84.39 เปอร์เซ็นต์และ 156.72 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ 1 และพื้นที่ 3 ตามลำดับ และหากค่าสัมประสิทธิ์แอมป์ที่พื้นที่ 1 และ 3 มีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES จะมีค่าลดลง และหากค่าเอกสารถูกเปลี่ยนเป็นเอกสารถูกส่วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์แอมป์ที่พื้นที่ 1 และ 3 มีค่าลดลง หรือเป็นลบที่มากขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองทุกกรณี จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES จำเป็นต้องมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกเป็นคาบในย่านที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพ และค่าสัมประสิทธิ์แอมป์มีค่าลดลงหรือเป็นลบที่มากขึ้น

6.3 สรุปผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ เข้ากับ LFC 3 พื้นที่แล้วพบว่า ตัวควบคุมตามวิธีที่นำเสนอ นั้นสามารถรองรับความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ และรองรับสัญญาณรบกวนภายนอกที่มีความถี่ในย่านที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพได้ดีกว่าระบบควบคุมแบบเดิม ซึ่งในการทดลองได้ใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบเดิมคือการควบคุมแบบ PID ในการเปรียบเทียบ และตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ จำเป็นต้องมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีสัญญาณรบกวนภายนอกเป็นคาบในย่านที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพ และค่าสัมประสิทธิ์แอมป์มีค่าลดลงหรือเป็นลบที่มากขึ้น

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ เพื่อให้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES แบบนี้ นอกจากจะสามารถจ่ายพลังงาน เพื่อชดเชยสัญญาณรบกวนภายนอกที่เป็นกำลังไฟฟ้าจริงที่เปลี่ยนแปลงไปตามตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ทั่วๆไปแล้ว ยังสามารถรักษาเสถียรภาพความถี่ในขอบเขตที่มากขึ้น

ในการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ จะต้องรู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ LFC ซึ่งหาได้จากแผนภาพบล็อกของ LFC ที่เป็นแบบทั่วไป แต่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ LFC ที่มีพื้นที่มากกว่า 2 พื้นที่นั้นจะเป็นสมการที่มีความซับซ้อนกันอย่างมาก จึงมีความจำเป็นต้องทำแบบจำลองนี้ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายที่สุดก่อนจะนำมาทำการออกแบบ ดังนั้น วิธีต่างๆ จึงนำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ง่ายที่สุด เช่น การยกเลิกระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเนื่องจากควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ผลตอบสนองที่ช้ากว่าตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES อย่างมาก และการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแยกแบบคาบเกี่ยวในการแยกระบบออกเป็น 2 ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ถูกแยกออกมานี้จะมีความเสถียรภาพเท่ากับระบบเดิมก่อนถูกแยก ซึ่งแทนที่จะออกแบบตามระบบเดิมก่อนถูกแยก ก็สามารถออกแบบตามระบบที่ถูกแยกออกมาแล้วได้ ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ในรูปสมการที่ง่ายขึ้น

หลังจากได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ในรูปที่ง่ายที่สุดแล้ว ก็สามารถออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ ได้ โดยการนำโปรแกรม MATLAB เข้ามาช่วยในการออกแบบ เพียงแต่ป้อนค่าเมตริกซ์ของพลาเน็ตที่ได้มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายแล้ว แล้วกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนรอบวงปิดว่าควรลดเกนของพลาเน็ตให้ไม่เกินเท่าไรในย่านความถี่ที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพ การกำหนดนี้ได้มาจากการออกแบบฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนัก 2 ฟังก์ชันที่เป็นทฤษฎีทั่วไปของการออกแบบตัวควบคุมแบบ H_∞ โปรแกรม MATLAB นี้จะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมได้

ผลการทดลองในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ตามที่ได้ออกแบบมาตามวิธีที่นำเสนอจะสามารถรักษาเสถียรภาพทางความถี่ได้มากขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้จัดทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพารามิเตอร์ในระบบ และมีสัญญาณรบกวนภายนอกอยู่ในย่านที่เสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ เมื่อเทียบกับตัวควบคุมเสถียรภาพทางความถี่ SMES ที่ได้รับการออกแบบตามทฤษฎีการควบคุมแบบเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jaleeli, "Understanding Automatic Generation Control," IEEE Trans. on Power System, Vol. 7, No. 3, 1992, pp. 1106-1112.
- [2] W. Hassenzahl, "Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, No. 2, 1989, pp. 750-758.
- [3] S. Banerjee, J.K. Chatterjee and S.C. Tripathy, "Application of Magnetic Energy Storage Unit As Load-Frequency Stabilizer," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 5, No. 1, 1990, pp. 46-51.
- [4] S.C. Tripathy and K.P. Juengst, "Sampled Data Automatic Generation Control with Superconducting Magnetic Energy Storage in Power Systems," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 12, No. 2, 1997, pp. 187-192.
- [5] S.C. Tripathy, R. Balasubramanian and P.S. Chandramohan, "Effect of Superconducting Magnetic Energy Storage on Automatic Generation Control Considering Governor Deadband and Boiler Dynamics," IEEE Trans. on Power System, Vol. 7, No. 3, 1992, pp. 1266-1273.
- [6] O.L. Elgerd, "Electric Energy System Theory: An Introduction," Second Edition, McGraw-Hill, 1985.
- [7] Y. Mitani, K. Tsuji and Y. Murakami, "Application of Superconducting Magnetic Energy Storage to Improve Power System Dynamics Performance," IEEE Trans. On Power System, Vol. 3, No. 4, 1998, pp. 1418-1425.
- [8] M.G. Singh, "Decentralised Control," North-Holland Systems and Control Series, 1981, pp. 322-327.
- [9] M. Ikeda, "Decentralized control with overlapping information sets," Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 34, No. 2, 1981, pp. 279-310.
- [10] I. Ngamroo, "Stabilization of Frequency Oscillations in a Multi-area Interconnected Power System Using Static Synchronous Series Compensator", ASEAN Journal on Science and Technology for Development, Vol. 18, No. 2, 2001, pp. 1-14.
- [11] I. Ngamroo, Y. Mitani, K. Tsuji, "Application of SMES Coordinated with Solid-State Phase Shifter to Load Frequency Control", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, June 1999, pp. 322-325.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] K. Zhou, "Essentials of Robust Control", Prentice-Hall Inc., 1998.
- [13] S. Skogestad and I. Postlethwaite, "Multivariable Feedback Control Analysis and Design," London: John Wiley Ltd., 1998.
- [14] M. Green and D.J.N. Limbeer, "Linear Robust Control," New Jersey: Prentice Hall Inc., 1995.
- [15] สุเมธ เชาว์ไวย. "การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ " วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [16] นวเทพ ชนาพรรณ. "ตัวควบคุมโรบัสต์สำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมแบบฐานหมุน" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [17] B. Shahian and M. Hassul, "Control System design Using MATLAB," New Jersey: Prentice Hall Inc., 1993.
- [18] H. Saadat, "Power System Analysis," McGraw-Hill International Edition, 1999, pp. 527-585.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.
โปรแกรมสำหรับออกแบบตัวเสถียรภาพความถี่ SMES
ตามการควบคุมแบบ H_∞

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมสำหรับออกแบบตัวเสถียรภาพความถี่ SMES

ตามการควบคุมแบบ H_∞

โปรแกรม hinf_design.m

```

%H-infinity SMES 1 Design
D1=0.006; M1=0.2; a12=2; T31=0.079; T12=0.159;
A=[-D1/M1 (a12+T31/T12)/M1;-2*pi*T12 0];
B=[1/M1 0]';
C=[1 0];
D=0;

[a,b,c,d]=linmod('design_SMES1');

G=pck(a,b,c,d);
seesys(G);
ny=1; nu=1; Gam_min=0; Gam_max=10; tol=0.1;
[K,Tzw,Gam_subopt]=hinfsyn(G,ny,nu,Gam_min,Gam_max,tol);
[Ak,Bk,Ck,Dk]=unpck(K);
fprintf('\nTransfer Function of Stabilizer of SMES1 is\n');
[numK,denK]=ss2tf(Ak,Bk,Ck,Dk)

w=logspace(-2,2,1000);
P=ss(A,B,C,D);
K1=0;
P1=feedback(P,-K1);
[M,Pp]=bode(P1,w);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Mdb=20*log10(M(1,:));

K=ss(Ak,Bk,Ck,Dk);
sys=feedback(P,K);
[Mc,Pc]=bode(sys,w);
Mcdb=20*log10(Mc(1,:));

figure(1),semilogx(w,Mdb,'k',w,Mcdb,'k');
axis([1e-2 1e2 -60 60])
grid

%H-infinity SMES 3 Design
T23=0.064; a31=2.5; T31=0.079; M3=0.15; D3=0.005;
A=[0 -2*pi*T23;(1+a31*T31/T23/M3) -D3/M3];
B=[0 1/M3]';
C=[0 1];
D=0;

[a,b,c,d]=linmod('design_SMES3');
G=pck(a,b,c,d);
seesys(G);
ny=1; nu=1; Gam_min=0; Gam_max=10; tol=0.1;
[K,Tzw,Gam_subopt]=hinfsyn(G,ny,nu,Gam_min,Gam_max,tol);
[Ak,Bk,Ck,Dk]=unpck(K);
fprintf('\nTransfer Function of Stabilizer of SMES3 is\n');
[numK,denK]=ss2tf(Ak,Bk,Ck,Dk)

w=logspace(-2,2,1000);
P=ss(A,B,C,D);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

K1=0;
P1=feedback(P,-K1);
[M,Pp]=bode(P1,w);
Mdb=20*log10(M(1,:));

K=ss(Ak,Bk,Ck,Dk);
sys=feedback(P,K);
[Mc,Pc]=bode(sys,w);
Mcdb=20*log10(Mc(1,:));

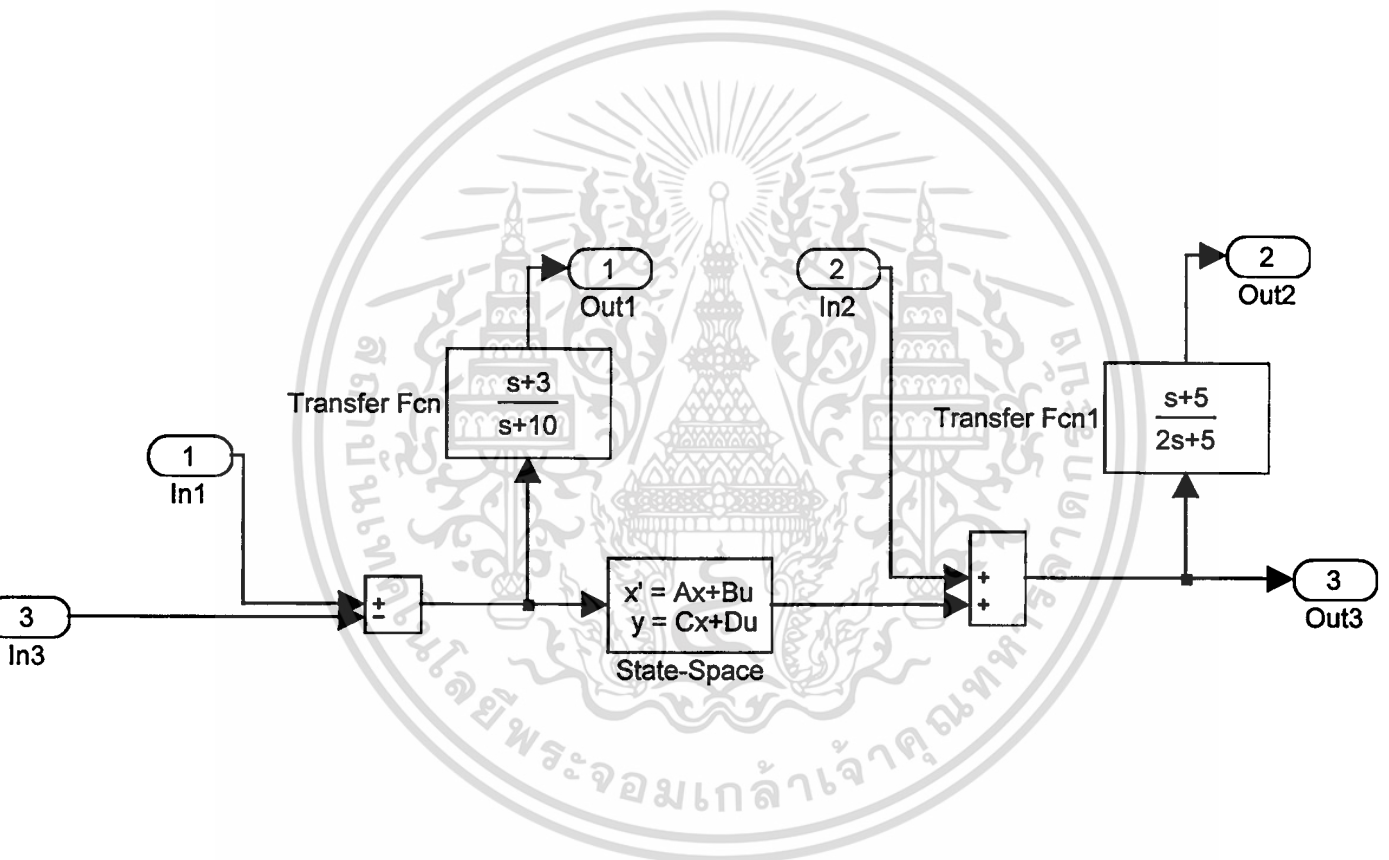
figure(2),semilogx(w,Mdb,w,Mcdb);
axis([1e-2 1e2 -60 60])
grid

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

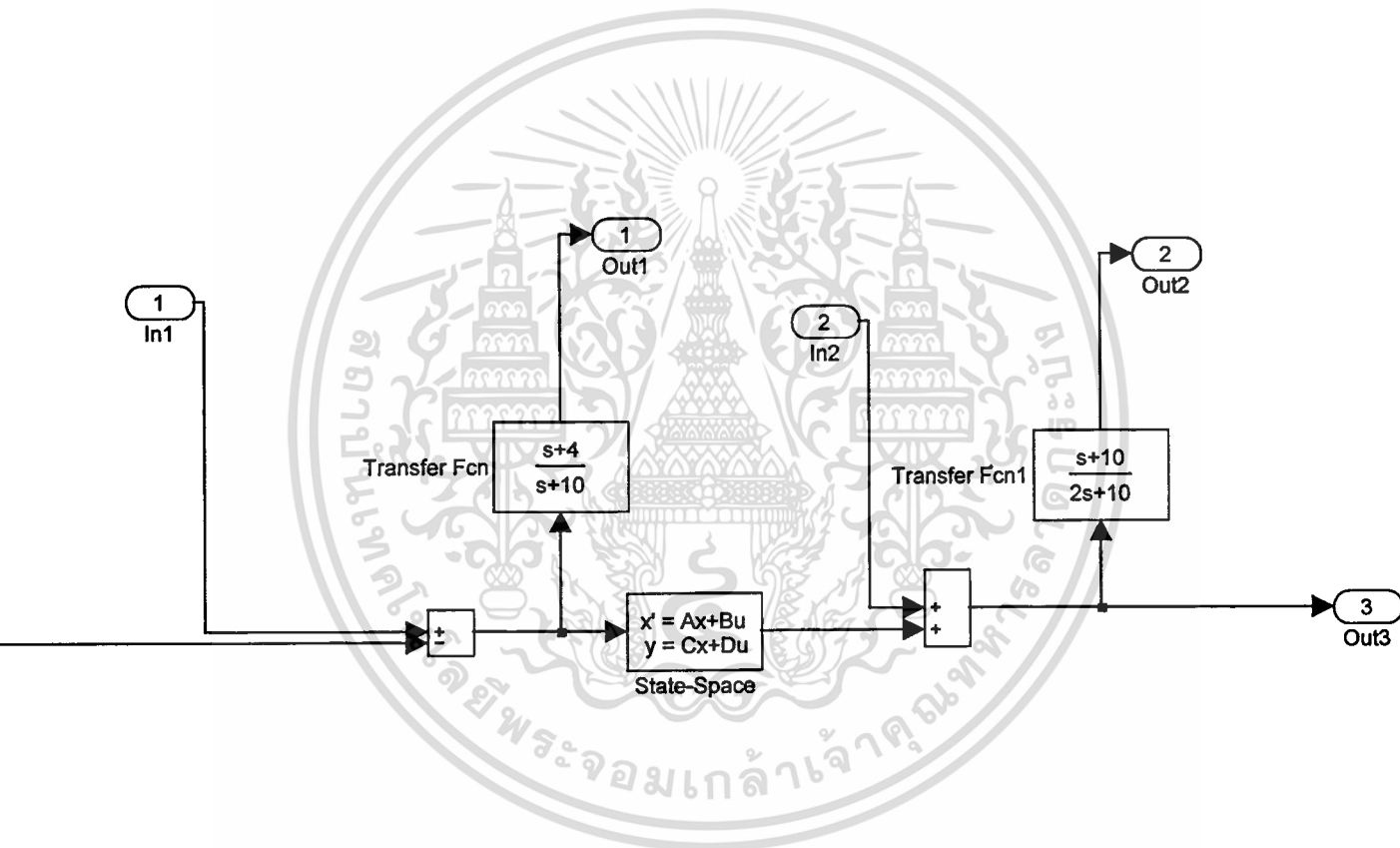
โปรแกรม design_SMES1



รูปที่ ก.1 แสดงแผนภาพบล็อกที่ใช้ประกอบการใช้งานของโปรแกรม hinf_design.m รูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม design_SMES3



รูปที่ ก.2 แสดงแผนภาพบล็อกที่ใช้ประกอบการใช้งานของ โปรแกรม hinf_design.m รูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are two traditional Thai stupas (chedis) flanking a central decorative element. The entire emblem is surrounded by a circular border containing Thai text. The text at the top reads 'มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์' (Mahavithayalai Rajabhat Buriram) and the text at the bottom reads 'พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' (Phra Chomklao Chao Khan Thara Ladkrabang).

ภาคผนวก ข.
ผลการออกแบบจากโปรแกรม hinf_design.m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลการออกแบบจากโปรแกรม hinf_design.m

» hinf_design

```
-1.0e+001 0.0e+000 0.0e+000 0.0e+000 | 1.0e+000 0.0e+000 -1.0e+000
0.0e+000 -3.0e-002 1.2e+001 0.0e+000 | 5.0e+000 0.0e+000 -5.0e+000
0.0e+000 -1.0e+000 0.0e+000 0.0e+000 | 0.0e+000 0.0e+000 0.0e+000
0.0e+000 1.0e+000 0.0e+000 -2.5e+000 | 0.0e+000 1.0e+000 0.0e+000
-----|-----
-7.0e+000 0.0e+000 0.0e+000 0.0e+000 | 1.0e+000 0.0e+000 -1.0e+000
0.0e+000 5.0e-001 0.0e+000 1.3e+000 | 0.0e+000 5.0e-001 0.0e+000
0.0e+000 1.0e+000 0.0e+000 0.0e+000 | 0.0e+000 1.0e+000 0.0e+000
```

Resetting value of Gamma min based on D_11, D_12, D_21 terms

Test bounds: 1.0000 < gamma <= 10.0000

gamma	hamx_eig	xinf_eig	hamy_eig	yinf_eig	nrho_xy	p/f
10.000	7.3e-001	9.8e-004	2.5e+000	0.0e+000	0.0059	p
5.500	7.2e-001	9.9e-004	2.5e+000	0.0e+000	0.0196	p
3.250	7.0e-001	1.0e-003	2.5e+000	0.0e+000	0.0578	p
2.125	6.5e-001	1.0e-003	2.5e+000	0.0e+000	0.1441	p
1.563	5.6e-001	1.1e-003	2.5e+000	0.0e+000	0.2962	p
1.281	4.6e-001	1.2e-003	2.5e+000	0.0e+000	0.5028	p
1.141	3.5e-001	1.2e-003	2.5e+000	0.0e+000	0.7232	p
1.070	2.6e-001	1.3e-003	2.5e+000	2.2e-017	0.9171	p

Gamma value achieved: 1.0703

Transfer Function of Stabilizer of SMES1 is

numK =

1.0e+003 *

0 0.0342 0.7811 1.3794 -0.1569

denK =

1.0e+003 *

0.0010 0.1287 1.2792 2.4732 0.1590

-1.0e+001 0.0e+000 0.0e+000 0.0e+000 | 1.0e+000 0.0e+000 -1.0e+000

0.0e+000 0.0e+000 -4.0e-001 0.0e+000 | 0.0e+000 0.0e+000 0.0e+000

0.0e+000 2.2e+001 -3.3e-002 0.0e+000 | 6.7e+000 0.0e+000 -6.7e+000

0.0e+000 0.0e+000 1.0e+000 -5.0e+000 | 0.0e+000 1.0e+000 0.0e+000

-----|-----
-6.0e+000 0.0e+000 0.0e+000 0.0e+000 | 1.0e+000 0.0e+000 -1.0e+000

0.0e+000 0.0e+000 5.0e-001 2.5e+000 | 0.0e+000 5.0e-001 0.0e+000

0.0e+000 0.0e+000 1.0e+000 0.0e+000 | 0.0e+000 1.0e+000 0.0e+000

Resetting value of Gamma min based on D_11, D_12, D_21 terms

Test bounds: 1.0000 < gamma <= 10.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

gamma	hamx_eig	xinf_eig	hamy_eig	yinf_eig	nrho_xy	p/f
10.000	5.3e-001	4.3e-003	1.8e+000	0.0e+000	0.0071	p
5.500	5.2e-001	4.3e-003	1.8e+000	0.0e+000	0.0238	p
3.250	5.0e-001	4.4e-003	1.7e+000	-5.6e-018	0.0705	p
2.125	4.7e-001	4.5e-003	1.7e+000	0.0e+000	0.1779	p
1.563	4.0e-001	4.7e-003	1.7e+000	-5.6e-018	0.3731	p
1.281	3.3e-001	4.9e-003	1.6e+000	1.1e-017	0.6508	p
1.141	2.5e-001	5.2e-003	1.6e+000	0.0e+000	0.9646	p
1.070	1.9e-001	5.4e-003	1.6e+000	0.0e+000	1.2577#	f

Gamma value achieved: 1.1406

Transfer Function of Stabilizer of SMES3 is

numK =

1.0e+004 *

0 0.0193 0.3800 1.3869 -0.0842

denK =

1.0e+004 *

0.0001 0.0422 0.5586 1.7645 0.0678

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

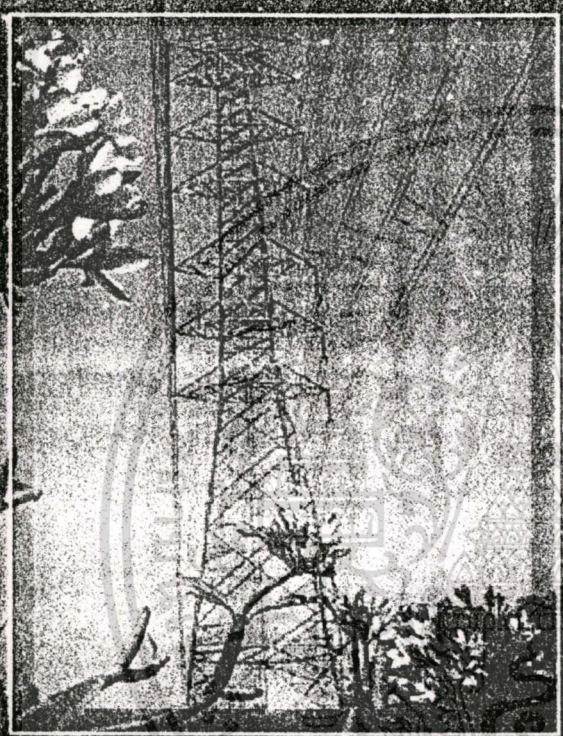


ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proceedings of the
International Conference on
**Electric Supply
Industry in Transition:**
*Issues and
Prospects
for Asia*



Volume 1

14-16 January 2004
Thailand

Organized by



Asian Institute of Technology
Thailand



Power Systems Engineering
Research Center, U.S.A.



University of Technology Sydney
Australia

COGEN 3

Proven, Clean & Efficient Biomass, Coal, Gas Cogeneration

The EC - ASEAN Business Facilitator



Robust Decentralized Design of H_∞ -based Frequency Stabilizer of SMES

C. Vorakulpipat M.Leelajindrakirerk

I. Ngamroo

Electrical Engineering Department
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Electrical Power Engineering Program
Sirindhorn International Institute of Technology
Thammasat University, Pathumtani, Thailand

Contact person : Chanon Vorakulpipat

Electrical Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, 10520, Thailand, Tel/Fax: 66-2-3264550, e-mail: chanonv@rocketmail.com

Abstract: This paper presents a new robust decentralized design of frequency stabilizer for superconducting magnetic energy storage (SMES) based on an H_∞ control. As an interconnected power system is subjected to load disturbances, system frequency may be severely disturbed and oscillate. To stabilize frequency oscillations, the active power control by SMES installed in a power system can be applied. The proposed decentralized control design translates interconnected power systems installed with SMESs into a Multi-Input Multi-Output (MIMO) control system. The technique of overlapping decompositions is applied to extract the decoupled subsystem with Single-Input Single-Output (SISO) from an MIMO system. As a result, a frequency stabilizer of SMES can be independently designed to enhance the damping of the inter-area mode embedded in the decoupled subsystem. In addition, to guarantee the robust stability of system against uncertainties such as system parameters variations etc., the multiplicative uncertainty model is also incorporated. Consequently, H_∞ control via a mixed sensitivity approach is applied to design the robust frequency stabilizer of SMES. Study results explicitly show that the robustness of the H_∞ -based frequency stabilizer of SMES is superior to that of the PID based stabilizer under various load disturbances and negative damping.

Keywords: Decentralized control, System uncertainties, Robust stability, Superconducting magnetic energy storage, Frequency stabilization, Overlapping decompositions, H_∞ control

1. Introduction

Nowaday, various kinds of apparatus with large power consumption, such as, a magnetic levitation transportation, a large scale accelerator, a testing plant for nuclear fusion etc., tend to increase significantly. When these loads are concentrated in an interconnected power system, they may cause a serious problem of frequency oscillation. Especially, if the frequency of changing load is in the vicinity of the inter-area oscillation mode (0.2-0.8 Hz), the oscillation of system frequency may experience a serious stability problem due to an inadequate damping. Under this situation, the conventional frequency control, i.e. a governor, may no longer be able to absorb the large frequency oscillations due to its slow response [1]. In order to compensate these sudden load changes and stabilize frequency oscillation, an active power source with fast response, such as SMES [2], is expected as one of the most effective countermeasure.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In the literature [3-5], a SMES is proposed for investigating its application to frequency control. It has been observed that a SMES can effectively reduce frequency and tie-line power oscillations following sudden load disturbances. Nevertheless, system uncertainties such as changes in system configuration due to unpredictable disturbance, system parameters variation and modeling errors, etc. have not been considered in these literatures. The frequency stabilizer of SMES that are designed without taking system uncertainties into consideration may not guarantee a robust stability of the system.

To solve this problem, this paper proposes a new robust decentralized design of frequency stabilizers for SMESs based on an H_∞ control. The multiplicative uncertainty model is employed to represent all possible uncertainties in interconnected power systems. The H_∞ control based on mixed sensitivity approach is applied to design frequency stabilizer. The robustness of designed frequency stabilizer is evaluated in the three-area loop interconnected system.

The organization of this paper is as follows. Section 2 provides the motivation of the proposed control. Next, Section 3 explains the proposed design method. Subsequently, the simulation study of designed PSSs is given in Section 4. Finally, the outcomes from this paper are summarized.

2. Motivation of The Proposed Control

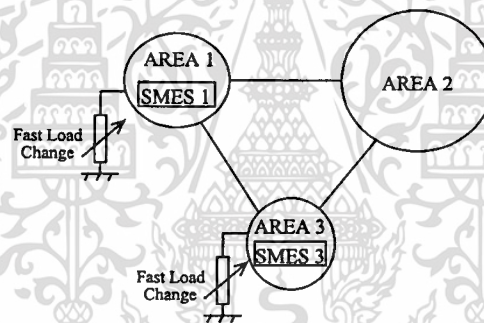


Fig. 1. Three-Area Loop Interconnected Power System with SMESs

A three-area loop interconnected power system [6] as shown in Fig.1. is used as a study system. It is assumed the large loads with sudden change have been installed in areas 1 and 3. These load changes cause severe frequency oscillations in both areas. To solve this problem, SMES1 and SMES3 are placed in areas 1 and 3 respectively. Here, the frequency stabilizer of each SMES is designed by the proposed control.

3. Proposed Control Design

3.1 Coordinated Control of SMES and Governor

The response of SMES is extremely rapid when compared to the conventional frequency control system, i.e. a governor. The difference in responses signifies that the SMES and governor can be coordinated.

When a power system is subjected to a sudden load disturbance, the SMES quickly acts to damp frequency oscillation in the transient period. Subsequently, the governor continues to eliminate the steady-state error in frequency oscillation. As the periods of operation for the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SMES and governor do not overlap, the dynamic of governor can then be neglected in the design of frequency stabilizer for the sake of simplicity.

3.2 Linearized Power System Model

The power system shown in Fig. 1 can be represented by a linearized power system model, as shown in Fig. 2. Note that the governors are eliminated in this system. The SMES model is represented by the active power controller [7]. The dynamic characteristic of SMES is modeled as the first order controller with a time constant $T_{SM} = 0.03$ sec. The linearized state equation of Fig. 2 can be expressed as

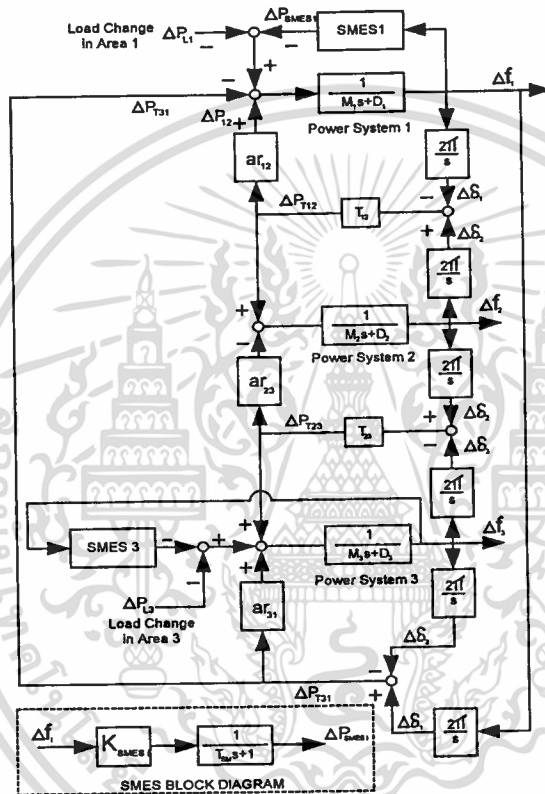


Fig. 2. Linearized Model of Three Area System for Control Design

$$S : \begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{T12} \\ \Delta \dot{f}_2 \\ \Delta \dot{P}_{T23} \\ \Delta \dot{f}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T12} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{T23} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$+ \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \\ b_{51} & b_{52} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{SMES1} \\ \Delta P_{SMES2} \end{bmatrix}$$

where $a_{11} = -D_1/M_1$, $a_{12} = (ar_{12} + T_{31}/T_{12})/M_1$, $a_{14} = -T_{31}/M_1 T_{23}$, $a_{21} = -2\pi T_{12}$, $a_{23} = 2\pi T_{12}$, $a_{32} = -1/M_2$, $a_{33} = -D_2/M_2$, $a_{34} = -ar_{23}/M_2$, $a_{43} = 2\pi T_{23}$, $a_{45} = -2\pi T_{23}$, $a_{52} = -ar_{31} T_{31}/M_3 T_{12}$, $a_{54} = (1 + ar_{31} T_{31}/T_{23})/M_3$, $a_{55} = -D_3/M_3$, $b_{11} = -1/M_1$, $b_{52} = -1/M_3$, the others are equal to 0

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The variable ΔP_{T31} is represented in terms of ΔP_{T12} and ΔP_{T23} by

$$\Delta P_{T31} = -\frac{T_{31}}{T_{12}}\Delta P_{T12} + \frac{T_{31}}{T_{23}}\Delta P_{T23} \quad (2)$$

Thus, ΔP_{T31} has disappeared in (1). This system has two conjugate pairs of complex eigenvalues and a negative real eigenvalue. The former corresponds to two inter-area oscillation modes, and the latter the inertia center mode. Based on the mode controllability matrix, the inter-area modes between areas 1 and 2, and areas 2 and 3 are controllable for the control inputs ΔP_{SMES1} and ΔP_{SMES3} , respectively. Accordingly, the design purpose of frequency stabilizer is to enhance the damping of the mentioned inter-area modes.

3.3 Overlapping Decomposition

Since the system (1) is a Multi-Input Multi-Output (MIMO) system, it is not easy to design both frequency stabilizers simultaneously and directly from the system. To simplify the design process, the technique of overlapping decompositions [8-9] is applied to reduce the system (1) to a subsystem embedded with only the inter-area mode of interest. The original system (1) is referred to as the system S .

$$S : \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \\ B_{31} & B_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

The sub-matrices A_{ij} and B_{ij} , ($i, j = 1, 2, 3$) have appropriate dimensions identical to the corresponding states and input vectors. According to the process of overlapping decompositions, the system S can be expressed as

$$\tilde{S} : \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{23} \\ A_{21} & 0 & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \\ B_{21} \\ B_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

where $z_1 = [x_1^T, x_2^T]^T$ and $z_2 = [x_2^T, x_3^T]^T$. Subsequently, the system \tilde{S} can be decomposed into two interconnected overlapping subsystems, i.e.

$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 : \dot{z}_1 = & \left(\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} z_1 + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} u_1 \right) \\ & + \begin{bmatrix} 0 & A_{13} \\ 0 & A_{23} \end{bmatrix} z_2 + \begin{bmatrix} B_{12} \\ B_{22} \end{bmatrix} u_2 \end{aligned} \quad (5)$$

and

$$\begin{aligned} \tilde{S}_2 : \dot{z}_2 = & \left(\begin{bmatrix} A_{22} & A_{23} \\ A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} z_2 + \begin{bmatrix} B_{21} \\ B_{31} \end{bmatrix} u_2 \right) \\ & + \begin{bmatrix} A_{21} & 0 \\ A_{31} & 0 \end{bmatrix} z_1 + \begin{bmatrix} B_{21} \\ B_{31} \end{bmatrix} u_1 \end{aligned} \quad (6)$$

The state variable x_2 is repeatedly included in both subsystems, which implies “Overlapping Decompositions”.

For system stabilization, two interconnected subsystems \tilde{S}_1 and \tilde{S}_2 are considered. The terms in the right hand sides of (5) and (6) can be separated into the decoupled subsystems (as indicated in the parenthesis in (5) and (6)) and the interconnected subsystems. As mentioned in [8-9], if each decoupled subsystem can be stabilized by its own input, the asymptotic stability of the interconnected overlapping subsystem \tilde{S}_1 and \tilde{S}_2 are maintained. Moreover, the asymptotic stability of the original system S is also guaranteed. Consequently, the interactions of the decoupled subsystems with the interconnection subsystems in (5) and (6) are regarded as perturbations. They can be neglected during control design. As a result, the decoupled subsystems of (5) and (6) can be expressed as

$$\tilde{S}_{D1} : \dot{z}_1 = \left(\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} z_1 + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} u_1 \right) \quad (7)$$

and

$$\tilde{S}_{D2} : \dot{z}_2 = \left(\begin{bmatrix} A_{22} & A_{23} \\ A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} z_2 + \begin{bmatrix} B_{22} \\ B_{32} \end{bmatrix} u_2 \right) \quad (8)$$

By regarding the power deviation between areas 1 and 2 (ΔP_{T12}) as the overlapped variable for design of frequency stabilizer of SMES1, the subsystem embedded with the inter-area mode between areas 1 and 2 can be expressed as

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{s1} : \begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{T12} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} -D_1/M_1 & (a_{r12} + T_{31}/T_{12})/M_1 \\ -2\pi T_{12} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{T12} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 1/M_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{SMES1} \end{aligned} \quad (9)$$

Next, by considering the power deviation between areas 2 and 3 (ΔP_{T23}) as the overlapped variable for design of frequency stabilizer of SMES3, the subsystem embedded with the inter-area mode between areas 2 and 3 can be expressed as

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{s2} : \begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_{T23} \\ \Delta \dot{f}_3 \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 0 & -2\pi T_{23} \\ 1 + a_{31} T_{31}/T_{23}/M_3 & -D_3/M_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{T23} \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/M_3 \end{bmatrix} \Delta P_{SMES3} \end{aligned} \quad (10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Equations (9) and (10) are used to design SMES1 and SMES3, respectively. It should be noted that after the process of overlapping decompositions, the original MIMO system (1) are divided into two decoupled Single-Input Single-Output (SISO) subsystems ((10) and (11)). Accordingly, each frequency stabilizer can be independently designed in the decoupled subsystem.

3.4 H_∞ Control Design

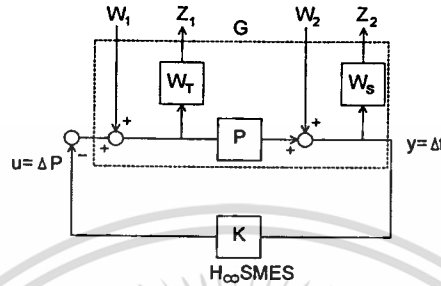


Fig. 3. H_∞ control design

In order to design the controller based on H_∞ method, each decoupled subsystem can be formulated into Linear Fractional Transformation model in Fig.3. [10]. The multiplicative uncertainty is used to model all possible perturbed plants. For the system notations, P is the interconnected system which consists of nominal plant G , i.e., a transfer function of a decoupled subsystem, performance weighting function W_S and uncertainties weighting function W_T , y is a measurement plant output, u is a control signal, w_1 and w_2 are disturbances at plant input and output, respectively, z_1 and z_2 are error signals of W_T and W_S weights, respectively. The H_∞ controller is represented by controller K . It utilizes the frequency deviation Δf_i of the controlled area as the feedback signal input.

To achieve robustness, the controller must be obtained satisfying inequality (11) and (12) for the control system

$$\|S\|_\infty \leq \|W^{-1}S\|_\infty \quad (11)$$

$$\|T\|_\infty \leq \|W^{-1}T\|_\infty \quad (12)$$

where S is the sensitivity transfer function $((I+GK)^{-1})$ and T is the complementary sensitivity transfer function $(GK(I+GK)^{-1})$. According to inequalities (11) and (12), The W_S is selected in form of low pass filter as

$$W = \frac{s+5}{s} \quad (13)$$

For all frequencies, the relation of $S + T = I$ is held. Thus, W_T is selected in form of high pass filter as

$$W = \frac{s+3}{T} \quad (14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

As a result, the H_∞ -based frequency stabilizer of SMES in an area 1 is

$$K_{SMES\ 1} = \frac{34s^3 + 781s^2 + 1379s - 157}{s^4 + 129s^3 + 1279s^2 + 2473s + 159} \quad (15)$$

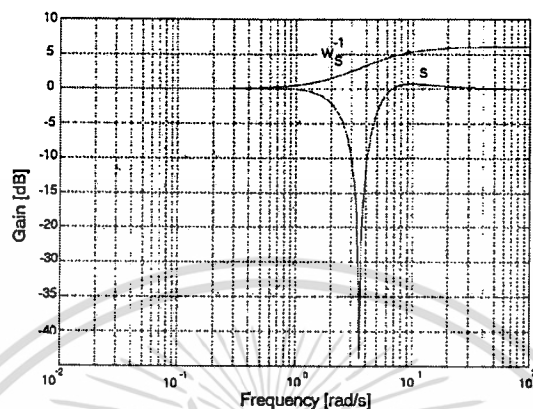


Fig. 4. Bode Plot of S and W_S^{-1}

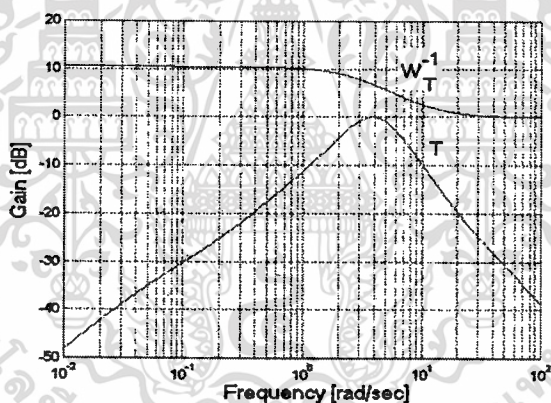


Fig. 5. Bode Plot of T and W_T^{-1}

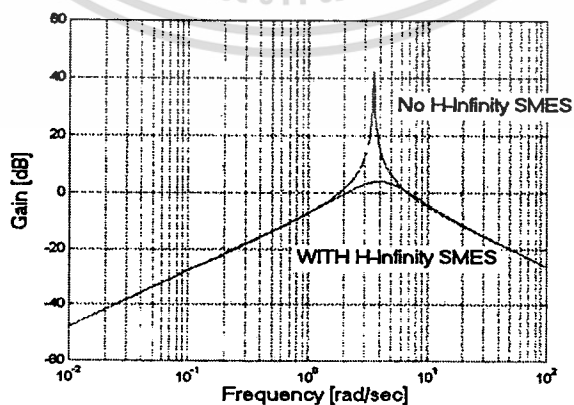


Fig. 6. Bode Plot of subsystem (9) (Before and After Applying H_∞ SMES)

Fig.4. and Fig.5. confirm that the conditions in (11) and (12) are satisfied by the designed controller K_{SMES} . In addition, The control effect of H_∞ -based stabilizer is clearly

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

shown by bode plots of designed model in Fig.6. The H_∞ -based stabilizer is capable of reducing the peak resonance in the frequency of inter-area oscillation mode.

The same strategy is used to design the H_∞ -based stabilizer in area 3. W_S and W_T are selected as

$$w_S = \frac{s + 10}{2s + 20} \tag{16}$$

$$w_T = \frac{s + 4}{s + 10} \tag{17}$$

As a result, the H_∞ -based frequency stabilizer of SMES in area 3 is given by

$$K_{SMES3} = \frac{193s^3 + 3800s^2 + 13869s - 842}{s^4 + 422s^3 + 5586s^2 + 17645s + 678} \tag{18}$$

4. Simulation Results

In simulation, the designed H_∞ -based stabilizer is compared to the PID-based frequency stabilizer. Based on the same first overshoot of frequency oscillation against 0.01 pu.MW step load increase in areas 1 and 3, The PID-based stabilizer are given as,

$$K_{SMES1} = 0.07 + \frac{1}{s} + 0.05s \tag{19}$$

$$K_{SMES3} = 0.15 + \frac{1}{s} + 0.10s \tag{20}$$

In addition, the governor is included in a linearized power model in a simulation study, as shown in Fig.7.

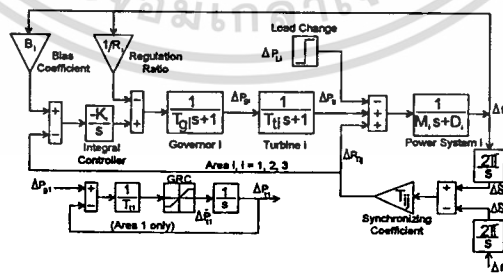


Fig.7. Linearized model with governor

Simulation studies are separated to 3 cases as shown in Fig.8.

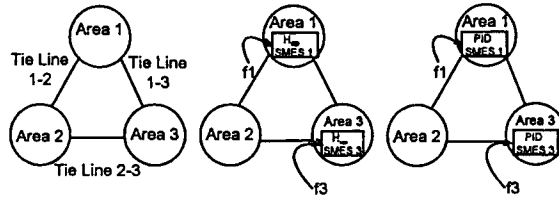


Fig. 8. Case studies for Three Area Loop System

Figures 9 and 10 show the dynamics responses for 0.01 pu.MW step load disturbance in areas 1 and 3. H_∞ -based stabilizers provide better damping effects on frequency oscillations Δf_1 and Δf_3 than those of PID-based stabilizers.

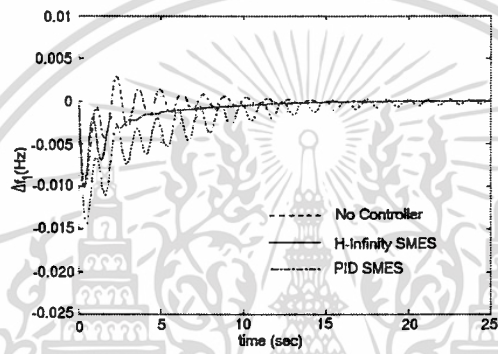


Fig. 9. Frequency Deviation of Area 1

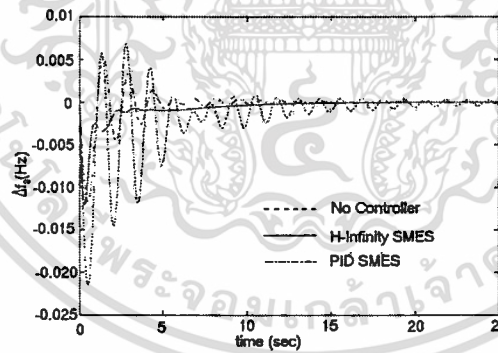


Fig. 10. Frequency Deviation of Area 3

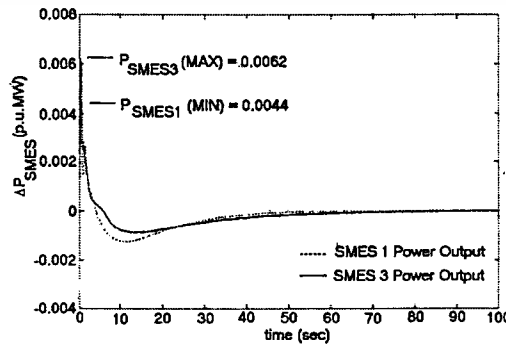


Fig. 11. The active power output of H_∞ -based stabilizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

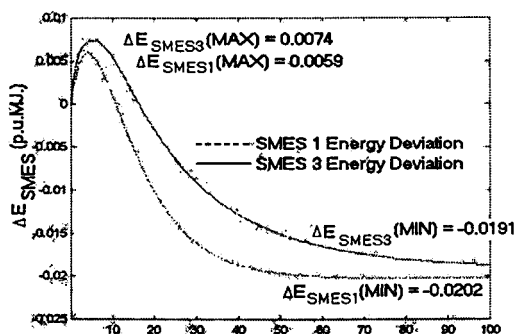


Fig. 12. The energy deviations of H_∞ - based stabilizer

Fig.11. shows the active power outputs of H_∞ - based stabilizers. The MW capacities of SMES are evaluated from the peak value of power output of the SMES. The MW capacities of SMES1 and SMES3 are 0.0044 and 0.0062 pu.MW, respectively. Fig.12. shows the MJ energy deviations of H_∞ - based stabilizers that evaluated from

$$\Delta E_{SMES} = \int \Delta P_{SMES} dt \quad (21)$$

Necessary MJ capacity of SMES can be calculated by

$$MJ \text{ Capacity} = \Delta E_{SMES(MAX)} - \Delta E_{SMES(MIN)} \quad (22)$$

As a result, MJ capacities of SMES1 and SMES3 are 0.0261 and 0.0265 pu.MJ, respectively.

Next, the load changes applied to areas 1 and 3 are assumed to be $\Delta P_{L1} = -0.002 \sin(3t) + 0.004 \sin(6t) - 0.007 \sin(9t)$ and $\Delta P_{L3} = -0.001 \sin(1t) + 0.004 \sin(5t) - 0.005 \sin(7t)$, respectively. Suppose that the system is in unstable state so that the system damping coefficient D_1 and D_3 are -0.3 [pu.MW/Hz]. As shown in Figs.13 and 14, the power system with PID-based stabilizer completely loses stability, frequency oscillations in areas 1 and 3 severely fluctuate and finally diverge. On the other hand, frequency oscillations are effectively stabilized by H_∞ - based stabilizers. These results confirm that the robustness of the H_∞ - based stabilizer is superior to that of the PID-based stabilizer.

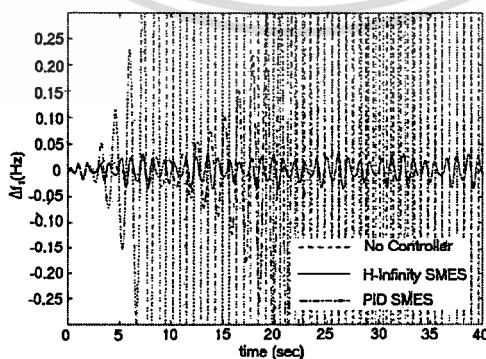


Fig. 13. Frequency Deviation of Area 1

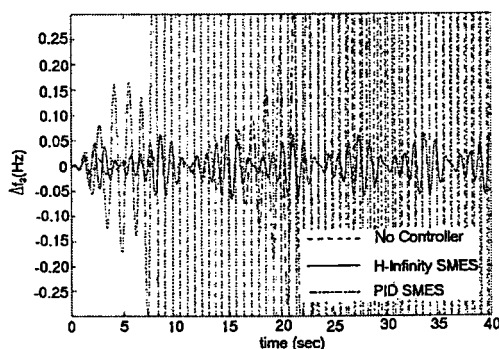


Fig. 14. Frequency Deviation of Area 3

5. Conclusion

This paper focuses on the new robust design of frequency stabilizer of SMES by taking system uncertainties into consideration. The overlapping decompositions technique is used to extract the SISO subsystem embedded with the inter-area oscillation mode of interest from the original MIMO system. As a result, each frequency stabilizer can be independently designed in the decoupled subsystem. By including the multiplicative uncertainty model in the decoupled subsystem, the H_∞ control via mixed sensitivity approach can be applied to design frequency stabilizer of SMES. The resulted H_∞ frequency stabilizer is low order controller. In addition, it used only a frequency deviation of the control area as a local signal input. Experimental studies have confirmed the high robustness of the designed frequency stabilizers against various load disturbances with changing frequency in the vicinity of inter-area mode and negative damping.

References

- [1] Jaleeli, 1992. Understanding Automatic Generation Control. *IEEE Trans. on Power System* 7(3) : 1106-1112.
- [2] Hassenzahl, W., 1989. Superconducting Magnetic Energy Storage. *IEEE Trans. on Magnetics* 25(2) : 750-758.
- [3] Banerjee S.; Chatterjee, J.K. and Tripathy, S.C., 1990. Application of Magnetic Energy Storage Unit As Load-Frequency Stabilizer. *IEEE Trans. on Energy Conversion* 5(1) : 46-51.
- [4] Tripathy, S.C. and Juengst, K.P., 1997. Sampled Data Automatic Generation Control with Superconducting Magnetic Energy Storage in Power Systems. *IEEE Trans. on Energy Conversion* 12(2) : 187-192.
- [5] Tripathy, S.C.; Balasubramanian, R. and Chandramohan Nair, P.S., 1992. Effect of Superconducting Magnetic Energy Storage on Automatic Generation Control Considering Governor Deadband and Boiler Dynamics. *IEEE Trans. on Power System*, 7(3) : 1266-1273.
- [6] Elgerd, O.L. 1985, *Electric Energy System Theory, An Introduction. 2nd edition*: McGraw-Hill. 340
- [7] Mitani, Y.; Tsuji, K. and Murakami, Y., 1998. Application of Superconducting Magnetic Energy Storage to Improve Power System Dynamics Performance. *IEEE Trans. On Power System*, 3(4) : 1418-1425.
- [8] Singh, M.G., 1981, *Decentralised Control* : North-Holland Systems and Control Series, 322-327.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] Ikeda, M. et al. 1981. Decentralized control with overlapping information sets. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 34(2) : 279-310.
- [10] Zhou, K., 1998, *Essentials of Robust Control* : Prentice-Hall, Inc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย ชานนท์ วรกุลพิพัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤษภาคม 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2538 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2543 มีผลงานทางวิชาการที่ได้ตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในวิศว ภารลาดกระบัง จำนวน 1 เรื่อง และวารสารประชุมวิชาการนานาชาติ จำนวน 1 เรื่อง ประสบการณ์ การทำงาน ในปี พ.ศ. 2539 เริ่มทำงานเป็นวิศวกร แผนกออกแบบและติดตั้ง บริษัท จี อี เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นผู้จัดการโครงการ แผนกออกแบบและติดตั้ง บริษัท จี อี เอ็นจิ เนียร์ จำกัด

ผลงานทางวิชาการ

1. ชานนท์ วรกุลพิพัฒน์, คมสันต์ หงษ์สมบัติ, มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์. “การออกแบบตัว ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ชนิดพีซีด้วยข้อมูลพีไอโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึมที่ได้รับการ ปรับปรุงแล้ว.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2543.
2. C. Vorakulpipat, M. Leelajindakrirk, I. Ngamroo, “Robust Decentralized Design of H_∞ - based Frequency Stabilizer of SMES”, Proceeding of the International Conference on Electric Supply Industry in Transition : Issues and Prospects for Asia, Vol. 1, pp. 1-44 – pp. 1-56, 14 – 16 January 2004.