

การออกแบบระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติโดยใช้วีธีอสมการ



นายรักษนัย นิธิฤทธิไกร

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF AUTOMATIC GENERATION CONTROL
USING THE METHOD OF INEQUALITIES



Mr. Raksanai Nidhiritdhikrai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2006

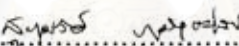
Copyright of Chulalongkorn University

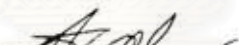
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติโดยใช้วิธีอสมการ
โดย	นายรักษนัย นิธิฤทธิไกร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิวงศ์

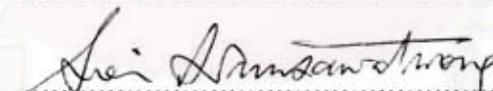
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิวงศ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

นายรักษนัย นิธิฤทธิไกร : การออกแบบระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติโดยใช้วิธีอสมการ.
(DESIGN OF AUTOMATIC GENERATION CONTROL USING THE METHOD OF
INEQUALITIES) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.สุชิน
อรุณสวัสดิ์วงศ์, 98 หน้า.

ในปัจจุบันเงื่อนไขหรือข้อตกลงของตลาดการซื้อขายไฟฟ้ามีผลกระทบต่อการดำเนินงานด้านพลังงาน การป้องกันการละเมิดเงื่อนไขหรือข้อตกลงเหล่านี้สามารถทำได้ตั้งแต่กระบวนการออกแบบตัวควบคุมของระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (Automatic Generation Control, AGC) โดยนำเงื่อนไขหรือข้อตกลงดังกล่าวมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขในการออกแบบที่เพิ่มขึ้นจากเงื่อนไขตามการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม การออกแบบตามหลักการดังกล่าวทำให้ระบบมีความสอดคล้องกับเงื่อนไขความเชื่อถือได้ทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์เพิ่มขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการออกแบบแบบใหม่สำหรับระบบ AGC ที่อยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังสองพื้นที่ นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการออกแบบระบบ AGC ด้วยวิธีอสมการ หลักการออกแบบแบบใหม่นี้นำเงื่อนไขทางการตลาดมาเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาออกแบบด้วยเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นของระบบทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์ ในการกำหนดรูปแบบของปัญหานั้นอาศัยเซตของอสมการที่เป็นไปตามธรรมชาติของปัญหาซึ่งเป็นปัญหาการออกแบบที่มีหลายเงื่อนไข จากผลลัพธ์ของการวิจัยพบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	รักษนัย นิธิฤทธิไกร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	<i>Adde</i>
ปีการศึกษา	2549	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	<i>Dr. Anurattaj</i>

4870435721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: AUTOMATIC GENERATION CONTROL / ANCILLARY SERVICE / LOAD FOLLOWING AND REGULATION / METHOD OF INEQUALITIES / CONTROL SYSTEMS DESIGN

RAKSANAI NIDHIRITDHIKRAI : DESIGN OF AUTOMATIC GENERATION CONTROL USING THE METHOD OF INEQUALITIES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. BUNDHIT EUA-ARPORN, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASST. PROF. SUCHIN ARUNSAWATWONG, Ph.D., 98 pp.

Nowadays, electricity market criteria have significant impacts in power system operation. The violation of these criteria can be prevented in a proper design of the Automatic Generation Control (AGC) controller by treating the market requirement as part of design criteria. With this design concept, we can increase technical and economical reliability compliance to the power system.

This thesis, using the method of inequalities, proposes a new design strategy for a multiarea AGC system and a procedure for solving it. In this strategy, electricity market constraints are taken into consideration in order to increase technical and economical reliability of the system. The design problem is formulated as a set of inequalities in accordance with the multiobjective nature of the problem. As a result, the design problem can be solved in an effective way.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department	Electrical Engineering	Student's signature	Raksanai Nidhiritdhikrai
Field of study	Electrical Engineering	Advisor's signature	B. Eua-arporn
Academic Year	2006	Co-advisor's signature	Suchin Arunsawatwong

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้โดยได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ ที่ได้กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ โดยได้ให้คำปรึกษาแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ และอาจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ ซึ่งอยู่ในคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ตรวจสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งเพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้นส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนการศึกษา “72 พรรษา” เป็นทุนการศึกษาในการเรียนต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิตตลอดระยะเวลา 2 ปี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ที่นำมาสู่ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์	5
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	6
บทที่ 2 หลักการพื้นฐานของระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (AGC)	8
2.1 ระบบควบคุมความถี่เนื่องจากโหลด (LFC).....	8
2.1.1 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าและโหลด (Generating unit and Load model) .9	
2.1.2 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้า (Turbine and Governor model).....	11
2.2 ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (AGC)	12
2.2.1 ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าเดี่ยว	12
2.2.2 ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าหลายพื้นที่	12
2.2.3 ระบบควบคุมการเปลี่ยนแปลงกำลังในสายเชื่อมต่อ (Tie-line bias control).....	14
บทที่ 3 รายละเอียดของแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้และน้ำ.....	17
3.1 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้	17
3.1.1 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกักหน้ไอน้.....	18
3.1.2 แบบจำลองของกักหน้ไอน้	19
3.2 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ.....	26

3.2.1	แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ.....	26
3.2.2	แบบจำลองของกังหันน้ำ.....	28
3.3	แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำ	29
3.4	แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ.....	31
3.5	ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC.....	33
3.6	สรุป.....	36
บทที่ 4	วิธีอสมการ (The method of inequalities)	37
4.1	ขั้นตอนในการออกแบบระบบควบคุม.....	37
4.1.1	กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขต (Moving boundaries process)	38
4.1.2	กระบวนการคำนวณหาจุดทดสอบ	39
4.2	ขั้นตอนในการออกแบบระบบและทำให้ระบบมีเสถียรภาพ	40
4.3	ตัวอย่างการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอสมการ.....	41
บทที่ 5	การประยุกต์ใช้วิธีอสมการในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC เปรียบเทียบกับระบบ AGC ที่ออกแบบด้วยวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด.....	45
5.1	ระบบ AGC ที่ใช้ในการทดสอบ	45
5.2	การวิเคราะห์ระบบเชิงพลวัตโดยใช้สมการสถานะ.....	46
5.3	การออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด	49
5.4	การออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC โดยใช้วิธีอสมการ	56
5.5	สรุป.....	65
บทที่ 6	แบบแผนการซื้อขายและบริการทางไฟฟ้า.....	66
6.1	บริการ Regulation และ Load following.....	66
6.1.1	คำจำกัดความของบริการ Regulation และ Load following	67
6.1.2	ตัวอย่างการพิจารณาบริการ Regulation.....	67
6.1.3	ตัวอย่างการพิจารณาบริการ Load following.....	69
6.1.4	ตัวอย่างการพิจารณาบริการแบบ Regulation และ Load following.....	70
6.2	การวัด (Measurement).....	71
บทที่ 7	การออกแบบระบบควบคุมของระบบ AGC โดยใช้วิธีอสมการ	72
7.1	เงื่อนไขของการออกแบบ	72
7.2	ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล.....	74
7.3	ตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น	76

7.4 สรุป.....	79
บทที่ 8 การประยุกต์ใช้วิธีอสมการในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในประเทศไทย	80
8.1 การสร้างแบบจำลองของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในประเทศไทย.....	80
8.2 การออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1.....	88
8.3 รายละเอียดและผลการออกแบบระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1.....	89
8.4 สรุป.....	93
บทที่ 9 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	94
9.1 สรุปผลการวิจัย	94
9.2 ข้อเสนอแนะ	94
รายการอ้างอิง	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	98

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำ	19
ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในแบบจำลองทั่วไปของกังหันไอน้ำกับพารามิเตอร์มาตรฐานของกังหันไอน้ำ	24
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์มาตรฐานของกังหันไอน้ำ	25
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ	28
ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์มาตรฐานของกังหันน้ำ	28
ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำ (IEEE G1)	30
ตารางที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ (IEEE G3)	32
ตารางที่ 3.8 รายละเอียดของหน่วยผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ควบคุมที่ 1 และ 2	34
ตารางที่ 3.9 รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง	34
ตารางที่ 4.1 ข้อกำหนดในการออกแบบระบบตัวอย่างดังรูปที่ 4.2	43
ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบระบบตัวอย่างดังรูปที่ 4.2	43
ตารางที่ 5.1 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในรูปที่ 5.10	61
ตารางที่ 5.2 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในรูปที่ 5.10	61
ตารางที่ 7.1 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล	75
ตารางที่ 7.2 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล	75
ตารางที่ 7.3 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น	77
ตารางที่ 7.4 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น	77
ตารางที่ 8.1 รายละเอียดของหน่วยผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ควบคุมที่ 1	81
ตารางที่ 8.2 รายละเอียดของหน่วยผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ควบคุมที่ 2	83
ตารางที่ 8.3 รายละเอียดของสายเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ควบคุมที่ 1 และพื้นที่ควบคุมที่ 2	84

ตารางที่ 8.4 ค่าของ H และ D สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำในแต่ละกลุ่ม.....	84
ตารางที่ 8.5 ค่าของ H และ D สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำในแต่ละกลุ่ม	85
ตารางที่ 8.6 รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง.....	85
ตารางที่ 8.7 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC จากการประเมิน ระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1.....	90
ตารางที่ 8.8 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุม ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1.....	91



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระบบ LFC และระบบ AVR ของเครื่องจักรกลเชิงโรคนัส9

รูปที่ 2.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า9

รูปที่ 2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด10

รูปที่ 2.4 แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด10

รูปที่ 2.5 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้า11

รูปที่ 2.6 แบบจำลองของระบบ LFC สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าเดี่ยว11

รูปที่ 2.7 แบบจำลองของระบบ LFC สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าเดี่ยวที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล .12

รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของระบบสองพื้นที่13

รูปที่ 2.9 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ซึ่งมีระบบ LFC เป็น
วงรอบปฐมภูมิ14

รูปที่ 2.10 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่15

รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ของตัวควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำ18

รูปที่ 3.2 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำ18

รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันไอน้ำแต่ละชนิด21

รูปที่ 3.4 แบบจำลองสำหรับกังหันไอน้ำชนิดต่างๆ22

รูปที่ 3.5 แบบจำลองทั่วไปของกังหันไอน้ำ23

รูปที่ 3.6 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำ
(IEEEG1)26

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ27

รูปที่ 3.8 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ27

รูปที่ 3.9 แบบจำลองทั่วไปของกังหันน้ำ28

รูปที่ 3.10 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ
(IEEEG3)29

รูปที่ 3.11 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำ
(IEEEG1)29

รูปที่ 3.12 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำ
(IEEEG1)31

รูปที่ 3.13 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ
(IEEEG3)31

รูปที่ 3.14 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ
(IEEEG3)33

รูปที่ 3.15 แผนภาพของระบบสองพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC33

รูปที่ 3.16 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่.....35

รูปที่ 3.17 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งหมดในพื้นที่ควบคุมที่ i 35

รูปที่ 3.18 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ในพื้นที่ควบคุมที่ i 35

รูปที่ 3.19 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำในพื้นที่ควบคุมที่ i 36

รูปที่ 4.1 ระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม.....41

รูปที่ 4.2 ผลตอบ $y(t, p)$ ของระบบที่ได้จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอสมการ.....43

รูปที่ 4.3 ผลตอบ $u(t, p)$ ของระบบที่ได้จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอสมการ.....44

รูปที่ 4.4 ผลตอบ $\dot{u}(t, p)$ ของระบบที่ได้จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอสมการ.....44

รูปที่ 5.1 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล.....45

รูปที่ 5.2 แบบจำลองสถานะของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่.....46

รูปที่ 5.3 ผลตอบ ΔP_{12} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบ
โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และแบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล52

รูปที่ 5.4 ผลตอบ $\Delta \omega_1$ ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบ
โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล53

รูปที่ 5.5 ผลตอบ $\Delta \omega_2$ ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบ
โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล53

รูปที่ 5.6 ผลตอบ ΔP_{M1} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบ
โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล54

รูปที่ 5.7 ผลตอบ ΔP_{M2} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบ
โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล54

รูปที่ 5.8 ผลตอบ ACE_1 ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบ
โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล55

รูปที่ 5.9 ผลตอบ ACE_2 ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบ
โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล55

รูปที่ 5.10 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่.....56

รูปที่ 5.11 แบบจำลองของตัวแปรสถานะของระบบ AGC.....57

รูปที่ 5.12	ผลตอบ ΔP_{12} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบ โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ	61
รูปที่ 5.13	ผลตอบ $\Delta \omega_1$ ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบ โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ	62
รูปที่ 5.14	ผลตอบ $\Delta \omega_2$ ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบ โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ	62
รูปที่ 5.15	ผลตอบ ΔP_{M1} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบ โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ	63
รูปที่ 5.16	ผลตอบ ΔP_{M2} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบ โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ	63
รูปที่ 5.17	ผลตอบ ACE_1 ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบ โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ	64
รูปที่ 5.18	ผลตอบ ACE_2 ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบ โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ	64
รูปที่ 6.1	องค์ประกอบของ Regulation ของโหลดทั้งหมด.....	68
รูปที่ 6.2	องค์ประกอบของ Load following ของโหลดทั้งหมด.....	69
รูปที่ 6.3	องค์ประกอบของบริการ Regulation และ Load following.....	70
รูปที่ 7.1	ผลตอบ ΔP_{M1} ΔP_{M2} และ ΔP_{12} ของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุม แบบอินทิกรัล.....	76
รูปที่ 7.2	ผลตอบ $\Delta \omega_1$ และ $\Delta \omega_2$ ของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล.....	76
รูปที่ 7.3	ผลตอบ ΔP_{M1} ΔP_{M2} และ ΔP_{12} ของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุม แบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น.....	78
รูปที่ 7.4	ผลตอบ $\Delta \omega_1$ และ $\Delta \omega_2$ ของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุม แบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น.....	78
รูปที่ 8.1	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงในประเทศไทยตอนบน	80
รูปที่ 8.2	แผนภาพของระบบสองพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC	81
รูปที่ 8.3	แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่.....	86
รูปที่ 8.4	แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งหมดในพื้นที่ควบคุมที่ i	87
รูปที่ 8.5	แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำในพื้นที่ควบคุมที่ i	87
รูปที่ 8.6	แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำในพื้นที่ควบคุมที่ i	88

รูปที่ 8.7 ผลตอบ ΔP_{M1} ΔP_{M2} และ ΔP_{12} ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริง
 ในหัวข้อ 8.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 1 เท่ากับ 0.01 p.u.91

รูปที่ 8.8 ผลตอบ $\Delta \omega_1$ และ $\Delta \omega_2$ ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริง
 ในหัวข้อ 8.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 1 เท่ากับ 0.01 p.u.92

รูปที่ 8.9 ผลตอบ ΔP_{M1} ΔP_{M2} และ ΔP_{12} ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริง
 ในหัวข้อ 8.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 2 เท่ากับ 0.01 p.u.92

รูปที่ 8.10 ผลตอบ $\Delta \omega_1$ และ $\Delta \omega_2$ ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริง
 ในหัวข้อ 8.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 2 เท่ากับ 0.01 p.u.93



บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติและวิธีการที่จะนำเสนอเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวอย่างสังเขป หลังจากนั้นจะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตและขั้นตอนของการศึกษาวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ รวมทั้งโครงสร้างของวิทยานิพนธ์เพื่อให้ผู้สนใจมองเห็นภาพรวมของการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การจัดสรรและควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าเกี่ยวข้องโยงกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกันระหว่างหลายพื้นที่ โดยมุ่งเน้นการควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าให้สอดคล้องกับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นอกจากนี้การจัดสรรกำลังการผลิตยังมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนต่ำสุดด้วย ซึ่งต้องเริ่มต้นจากการพยากรณ์โหลด จากนั้นจึงทำการจัดสรรกำลังการผลิตที่ควรจ่ายออกมาจากโรงไฟฟ้าแต่ละแห่งให้คุ้มค่าที่สุดที่สุด การควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าให้ได้ตามแผนการผลิตที่ได้จัดสรรไว้ นั้นทำโดยการใช้ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (Automatic Generation Control, AGC) ประกอบด้วยระบบควบคุมย่อย 2 ระบบคือ 1. ระบบควบคุมความถี่เนื่องจากโหลด (Load frequency control, LFC) และ 2. ระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Automatic voltage regulation, AVR)

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะปกติคือ การควบคุมความถี่เนื่องจากโหลด ซึ่งก็คือหน้าที่พื้นฐานของระบบ LFC สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกันระหว่างหลายพื้นที่คือ พยายามรักษาสมดุลของกำลังจริงระหว่างกำลังการผลิตและโหลด กล่าวคือ พยายามปรับค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่และกำลังจริงที่แลกเปลี่ยนกันของพื้นที่ควบคุมผ่านสายเชื่อมต่อ (Tie-line) ให้มีค่าตามที่กำหนดไว้เสมอในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยธรรมชาติแล้วระบบ LFC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหลายพื้นที่ที่เชื่อมโยงกันเป็นระบบขนาดใหญ่จะมีจำนวนตัวแปรสถานะมากและประกอบด้วยระบบย่อยหลายระบบที่เชื่อมโยงกันด้วยสายเชื่อมต่อทำให้การออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับระบบดังกล่าวเป็นเรื่องที่ไม่ง่ายนัก การควบคุมระบบ LFC ที่ได้ผลและใช้กันมากในช่วง 50 กว่าปีที่ผ่านมา (Conventional LFC) ซึ่งใช้แนวคิดของการควบคุมการเปลี่ยนแปลงกำลังในสายเชื่อมต่อ (Tie-line bias control) ของ Cohn [1] และหลักการไม่มีการกระทำระหว่างกัน (Noninteraction principle) ของ Quazza [2] แม้ว่าการควบคุมดังกล่าวบรรลุถึงเป้าหมายของการควบคุมดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นก็ตาม

แต่ในระยะหลังมีนักวิจัยหลายท่านสนใจและพยายามนำทฤษฎีควบคุมสมัยใหม่ (Modern control theory) มาใช้ออกแบบระบบ LFC เพื่อปรับปรุงผลตอบชั่วคราวของระบบ LFC ให้ดีขึ้นกว่าเดิมโดยอาศัยทฤษฎีการควบคุมเหมาะสมที่สุด (Optimal control theory) เป็นหลัก อาทิเช่น Fosha, et al. [3] เป็นผู้ริเริ่มนำทฤษฎีควบคุมสมัยใหม่มาประยุกต์กับปัญหาของระบบ LFC โดยใช้ตัวควบคุมป้อนกลับสถานะแบบสัดส่วน (Purely proportional controller) กฎการควบคุม (Control law) ขึ้นกับขนาดสัญญาณรบกวนของโหลด (Load disturbance) Cavin, et al. [4] และ Miniesy [5] ได้ใช้ตัวกรอง Kalman (Kalman filter) และตัวสังเกต Luenburger (Luenburger observer) ตามลำดับสำหรับบอกเอกลักษณ์ของขนาดสัญญาณรบกวนของโหลด เพื่อแก้ปัญหาเรื่องผลของสัญญาณรบกวนของโหลดที่มีต่อกฎการควบคุมดังกล่าว Calovic [6, 7] ได้ใช้ตัวควบคุมป้อนกลับสถานะและสัญญาณออกแบบสัดส่วนอินทิกรัล (Proportional integral controller) ทำให้กฎการควบคุมไม่ขึ้นกับขนาดของสัญญาณรบกวนของโหลด แม้ว่างานวิจัยดังกล่าวพิสูจน์ได้ว่า วิธีการควบคุมเหล่านั้นสามารถปรับปรุงผลตอบชั่วคราวของระบบ LFC ให้ดีขึ้นกว่าการควบคุมแบบที่นิยมใช้กันมาก แต่มีความชัดเจนว่าจะก่อให้เกิดปัญหามากในทางปฏิบัติ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานจริง เนื่องจากการควบคุมเหล่านั้นเป็นการควบคุมแบบรวมศูนย์ (Centralized control) ข้อมูลที่ตัวควบคุมใช้ก็มีโครงสร้างแบบรวมศูนย์ กล่าวคือ ตัวควบคุมของระบบย่อยหนึ่งๆต้องการข้อมูลของระบบย่อยอื่นๆด้วย ทำให้งานวิจัยช่วงหลังเปลี่ยนมาสนใจการควบคุมระบบ LFC แบบกระจาย (Decentralized control) เพราะในการควบคุมแบบกระจายตัวควบคุมของระบบย่อยหนึ่งๆต้องการเพียงข้อมูลของระบบย่อยนั้นๆ ทำให้ตัวควบคุมมีโครงสร้างเรียบง่ายเหมาะที่จะนำมาใช้ควบคุมระบบขนาดใหญ่ นอกจากนี้ในการใช้งานจริงต้องการตัวควบคุมที่มีโครงสร้างง่าย แต่เพียงพอที่จะทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพมากกว่าตัวควบคุมที่มีโครงสร้างซับซ้อน ซึ่งอาจให้ผลตอบชั่วคราวของระบบที่ดีกว่าก็ตาม

สำหรับแนวความคิดเกี่ยวกับระบบ LFC แบบกระจายนั้น สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ [8] ได้กล่าวไว้ว่า แนวความคิดเรื่อง LFC แบบกระจายเริ่มมีในงานวิจัยของ Miniesy, et al. [9] ในรูปของการควบคุมแบบสองชั้น (Two level control) แต่ในระยะแรกทฤษฎีที่สนับสนุนการควบคุมแบบกระจายยังมีน้อย งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบ LFC แบบสองชั้นดังกล่าวจึงยังไม่ได้ผลเท่าที่ควร ต่อมาทฤษฎีการควบคุมแบบกระจายได้รับการพัฒนาขึ้นดังปรากฏใน Bengtsson, et al. [10], Sandell, et al. [11], Singh [12] และ Jamshidi [13] งานวิจัยเกี่ยวกับระบบ LFC แบบกระจายจึงเริ่มปรากฏขึ้นอีก โดยแต่ละคนก็มีแนวความคิดที่ต่างกันออกไป อาทิเช่น Bengamin, et al. [14], Calovic, et al. [15], Venkateswarlu, et al. [16] และ Davison, et al. [17] เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบรวมศูนย์ การนำทฤษฎีการควบคุมแบบกระจายมาใช้งานยังมีอยู่เป็นจำนวนน้อยแม้ว่ายังมีปัญหาที่น่าสนใจในการทำงานวิจัยอีกมากก็ตาม

การออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ที่พบมากในปัจจุบันนั้น พบว่ามีการนำวิธีการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด (Optimal control) [3, 6, 18] ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำให้ดัชนีสมรรถนะ (Performance index) ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบนั้นมีค่าต่ำสุด การควบคุมฟัซซี (Fuzzy control) [19] ซึ่งเป็นการควบคุมที่สามารถรองรับความไม่แน่นอนของสัญญาณควบคุมได้ดี แต่ต้องใช้ข้อมูลในอดีตของระบบ และผู้เชี่ยวชาญเพื่อกำหนดรูปแบบรายละเอียด จำนวน และกฎการแยกประเภทของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ที่เหมาะสมกับระบบ และการควบคุมป้อนกลับสถานะ (State feedback control) ซึ่งเป็นการควบคุมที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง แต่พบว่าตัวแปรสถานะบางตัวไม่สามารถนำมาเป็นสัญญาณป้อนกลับในทางปฏิบัติได้ ปัญหานี้แก้ไขได้ด้วยการใช้ตัวสังเกต Luenberger (Luenberger observer) [20]

การออกแบบตามวิธีที่กล่าวมานั้น มีการกำหนดรูปแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical formulation) ของปัญหาการออกแบบที่ไม่สามารถสะท้อนถึงเงื่อนไขของการออกแบบที่มีหลายเงื่อนไขได้อย่างครบถ้วน ดังนั้นเมื่อทำการออกแบบเสร็จ จะต้องทำการจำลองผลเพื่อตรวจสอบว่าระบบที่ออกแบบนั้นสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งหมดของการออกแบบหรือไม่ ถ้าไม่สอดคล้องก็ต้องกลับไปปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบในลักษณะลองผิดลองถูก (Trial and error) และทำการออกแบบใหม่

อย่างไรก็ตามในการออกแบบด้วยวิธีอสมการ (The method of inequalities) [21] นั้น การกำหนดรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการออกแบบจะสะท้อนถึงเงื่อนไขที่แท้จริงของการออกแบบทั้งหมด จึงทำให้ผลการออกแบบด้วยวิธีอสมการสามารถยืนยันได้ว่าระบบที่ออกแบบนั้นจะสอดคล้องกับเงื่อนไขของการออกแบบทั้งหมดโดยไม่จำเป็นต้องทำการจำลองผลเพื่อตรวจสอบว่าระบบที่ออกแบบนั้นสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งหมดหรือไม่ ด้วยเหตุผลนี้ผู้วิจัยจึงเลือกนำวิธีการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอสมการมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของระบบ AGC

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการออกแบบแบบใหม่สำหรับระบบ AGC ที่อยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังสองพื้นที่ นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการออกแบบระบบ AGC ด้วยวิธีอสมการ หลักการออกแบบแบบใหม่นี้นำเงื่อนไขทางการตลาดมาเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาออกแบบด้วยเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นของระบบทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์ ในการกำหนดรูปแบบของปัญหานั้นอาศัยเซตของอสมการที่เป็นไปตามธรรมชาติของปัญหาซึ่งเป็นปัญหาการออกแบบที่มีหลายเงื่อนไข จากผลลัพธ์ของการวิจัยพบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการจัดสรรและควบคุมกำลังการผลิตที่เชื่อมโยงกันระหว่างหลายพื้นที่ซึ่งสอดคล้องกับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา
2. นำวิธีอสมการมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของระบบ AGC เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยคำนึงถึงต้นทุนการผลิตที่คุ้มค่าที่สุด
3. นำระบบควบคุมแบบใหม่ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยคำนึงถึงต้นทุนการผลิตที่คุ้มค่าที่สุด
4. นำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาและสร้างแบบแผนการซื้อขายกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมที่เพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยคำนึงถึงเงื่อนไขในการซื้อขายกำลังไฟฟ้าด้วย

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาค้นคว้าและพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ เฉพาะแบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำและไอน้ำ
2. พิจารณาระบบควบคุมความถี่เนื่องจาก โหลด (Load frequency control, LFC) เป็นหลัก โดยมีสมมุติฐานทั่วไปดังนี้
 - 2.1 สัญญาณรบกวนโหลดมีลักษณะเป็นฟังก์ชันขั้นบันได (Step function) และเกิดขึ้นโดยไม่ทราบล่วงหน้าทั้งขนาดของสัญญาณและเวลาที่เกิดขึ้น
 - 2.2 สัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของระบบจึงจัดเป็นพลวัตของสัญญาณขนาดเล็ก
 - 2.3 ไม่คิดผลของการประวิงเวลา (Time delay)
 - 2.4 ไม่คำนึงถึงผลที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Automatic voltage regulator, AVR) ที่มีต่อระบบ LFC กล่าวคือ คิดว่าแรงดันในระบบมีค่าคงที่ขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบ LFC
3. นำวิธีอสมการ (The method of inequalities) มาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของระบบ AGC
4. คำนึงถึงความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในการจัดสรรและควบคุมกำลังการผลิตของระบบการผลิตไฟฟ้า โดยพิจารณาหลักการทำงานและพัฒนาแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าหลายพื้นที่

5. พิจารณาแบบแผนการซื้อขายกำลังไฟฟ้าสมัยใหม่ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ และนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยให้ความสนใจเฉพาะการควบคุมความถี่โดยตรง (Direct frequency control)
6. ปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อตกลงในการซื้อขายกำลังไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าและพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ เฉพาะแบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำและไอน้ำ
2. สร้างแบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่
3. ศึกษาวิธีการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอสมการ และนำวิธีอสมการมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของระบบ AGC
4. สร้างแบบจำลองของระบบ AGC จากระบบไฟฟ้าจริงในประเทศไทยที่มีความซับซ้อนมากขึ้น
5. ศึกษาแบบแผนการซื้อขายไฟฟ้าสมัยใหม่ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ และนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองที่สร้างขึ้น
6. ออกแบบระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับข้อตกลงการซื้อขายไฟฟ้า
7. เรียบเรียง และนำเสนอผลการศึกษาในรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าหลายพื้นที่มาทำการจำลองเพื่อพิจารณาผลตอบแทนเวลาของระบบผลิตไฟฟ้าว่ามีประสิทธิภาพ หรืออยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ของข้อตกลงในการซื้อขายกำลังไฟฟ้าได้หรือไม่
2. สามารถจำลองสถานการณ์ล่วงหน้าได้ ซึ่งทำให้การผลิตและการจัดสรรกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น
3. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติให้ตอบสนองได้ตามข้อตกลงในการซื้อขายกำลังไฟฟ้า

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติและวิธีการที่จะนำเสนอเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวอย่างสังเขป หลังจากนั้นจะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตและขั้นตอนของการศึกษาวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (AGC) รวมไปถึงหลักการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC โดยในบทนี้จะนำเสนอแนวความคิดหลักของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ AGC สำหรับพื้นที่เดียว สำหรับระบบสองพื้นที่ และรวมไปถึงหลักการขยายไปสู่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ AGC สำหรับระบบหลายพื้นที่

บทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้และน้ำ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC ที่มีความสมจริงมากขึ้นในบทต่อไป

บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของวิธีอสมการ (The method of inequalities) เพื่อที่จะนำวิธีอสมการไปใช้แก้ปัญหการออกแบบระบบ AGC ด้วยหลักการออกแบบแบบใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 5 กล่าวถึงการประยุกต์วิธีอสมการมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC และนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ระบบเชิงพลวัตโดยใช้สมการสถานะ (State equation) ซึ่งเป็นหลักการขั้นพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบเชิงพลวัต โดยผลตอบของระบบที่ได้จากการออกแบบระบบ AGC ด้วยวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด (Optimal control) จะถูกใช้เป็นมาตรฐานหรือเป้าหมายในการออกแบบระบบ AGC ด้วยวิธีอสมการ

บทที่ 6 กล่าวถึงแบบแผนการซื้อขายและบริการทางไฟฟ้าที่สนใจ ตลอดจนนำเสนอเกี่ยวกับลักษณะพื้นฐานของการวัดและการให้คำจำกัดความของบริการต่างๆ เกี่ยวกับกำลังจริง การบริการที่มีความสำคัญมากที่สุดประการหนึ่งซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจ คือ การรักษาความสมดุลระหว่างโหลด และการผลิตกำลังไฟฟ้าภายในพื้นที่ควบคุม (Control area) ซึ่งตามปกติคือการควบคุมความถี่ของระบบที่มีการเชื่อมต่อกัน ในบทความนี้เรียกว่าการควบคุมความถี่โดยตรง (Direct frequency control, DFC) ซึ่งประกอบด้วยบริการประเภท Regulation และ Load following

บทที่ 7 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธีอสมการในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ โดยจะมีการพิจารณาเงื่อนไขที่เกี่ยวกับตลาดการซื้อขายไฟฟ้าเข้าไปด้วย

บทที่ 8 กล่าวถึงการนำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในประเทศไทย และการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ที่สร้างขึ้นด้วยการประยุกต์วิธีอสมการมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC

บทที่ 9 เป็นการสรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ เพื่อให้ผู้อ่านวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้นำไปเป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการพื้นฐานของระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (AGC)

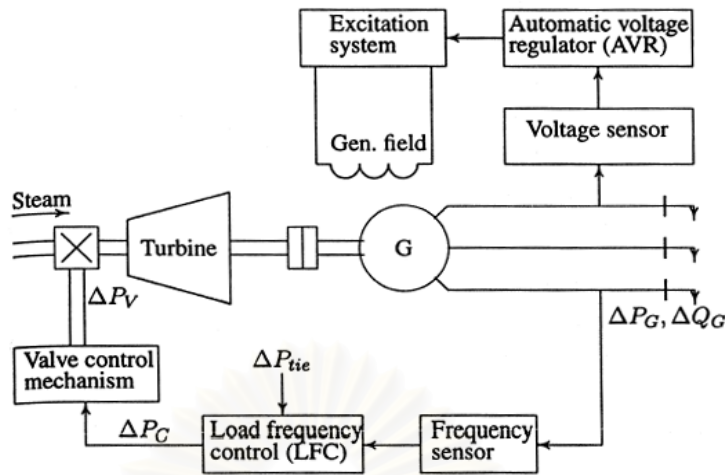
การเปลี่ยนแปลงของกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟ ส่งผลกระทบต่อระบบผลิตกำลังไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนแปลงของกำลังจริงจะส่งผลกระทบต่อความถี่ของระบบไฟฟ้า ส่วนการเปลี่ยนแปลงของกำลังรีแอกทีฟนั้นมีผลกระทบต่อความถี่เพียงเล็กน้อย แต่จะมีผลกระทบโดยตรงกับขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้า การควบคุมกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟ สามารถกระทำได้ผ่านระบบควบคุมพื้นฐานซึ่งเรียกว่าระบบ AGC (Automatic Generation Control) [22] ซึ่งประกอบด้วยระบบควบคุม 2 ระบบ คือ 1. ระบบควบคุมความถี่เนื่องจากโหลด (Load Frequency Control, LFC) ซึ่งจะควบคุมความถี่ของระบบให้มีค่าคงที่โดยใช้ความสัมพันธ์ของกำลังจริงกับความถี่ของระบบ และ 2. ระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Automatic Voltage Regulator, AVR) ซึ่งจะควบคุมให้ขนาดของแรงดันของระบบนั้นมีค่าคงที่ โดยใช้ความสัมพันธ์ของกำลังรีแอกทีฟกับขนาดของแรงดัน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีการติดตั้งระบบควบคุมพื้นฐาน LFC และ AVR อยู่ด้วย ดังรูปที่ 2.1 [22] โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่คำนึงถึงผลที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบ AVR ที่มีต่อระบบ LFC กล่าวคือ คิดว่าแรงดันในระบบมีค่าคงที่ขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบ LFC

2.1 ระบบควบคุมความถี่เนื่องจากโหลด (LFC)

จุดประสงค์หลักของระบบ LFC คือ ควบคุมให้ความถี่ของไฟฟ้าของระบบมีค่าคงที่และมีความน่าเชื่อถือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของระบบและกำลังจริงนั้น จะถูกตรวจจับผ่านสัญญาณความคลาดเคลื่อน $\Delta\omega$ โดย ω คือ มุมของโรเตอร์และสัญญาณความคลาดเคลื่อนนี้จะถูกขยายเพื่อที่จะส่งไปที่ต้นกำลังเพื่อปรับค่าแรงบิดให้เหมาะสมแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 [22]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระบบ LFC และระบบ AVR ของเครื่องจักรกลเชิงโรนัส

2.1.1 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าและโหลด (Generating unit and Load model)

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเริ่มต้นพิจารณาที่สมการ swing ของเครื่องจักรกลเชิงโรนัสซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_M - \Delta P_e \tag{2.1}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{d \Delta \frac{\omega}{\omega_s}}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta P_M - \Delta P_e) \tag{2.2}$$

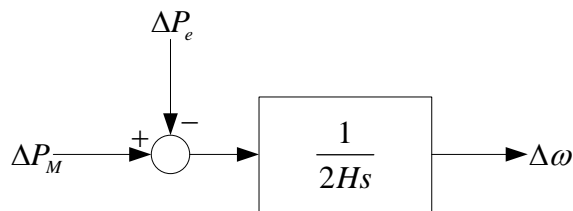
กำหนดให้ ω ใหม่เป็นความเร็วเชิงมุมในหน่วย per unit

$$\frac{d \Delta \omega}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta P_M - \Delta P_e) \tag{2.3}$$

ทำการแปลงลาปลาซ

$$\Delta \omega(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_M(s) - \Delta P_e(s)] \tag{2.4}$$

ความสัมพันธ์ที่ได้นำมาเขียนแบบจำลองได้ดังรูปที่ 2.2

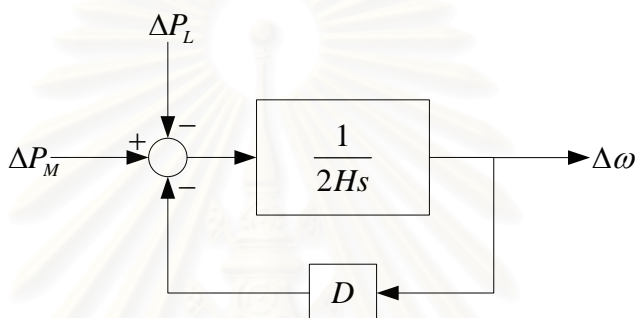


รูปที่ 2.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการพัฒนาแบบจำลองโหลดเราอาจพิจารณาลักษณะสมบัติระหว่างความเร็วและโหลด (Speed-load characteristics) ซึ่งสามารถประมาณได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

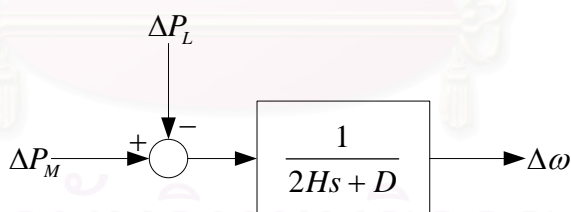
$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (2.5)$$

โดยที่ ΔP_L คือ ปริมาณของโหลดที่เปลี่ยนแปลงโดยไม่เกี่ยวข้องกับความถี่ของระบบ $D\Delta\omega$ คือ ปริมาณของโหลดที่เปลี่ยนแปลงโดยเกี่ยวข้องกับความถี่ของระบบ และ D คือ เปรอร์เซ็นต์ของปริมาณโหลดที่เปลี่ยนแปลงหารด้วยเปอร์เซ็นต์ของปริมาณความถี่ที่เปลี่ยนแปลง จากนั้นนำความสัมพันธ์ที่ได้มาเขียนแบบจำลองได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด

เมื่อได้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด นำแบบจำลองที่ได้้นั้นมาหาแบบจำลองที่สมมูลกัน จะได้แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดใหม่ ดังรูปที่ 2.4



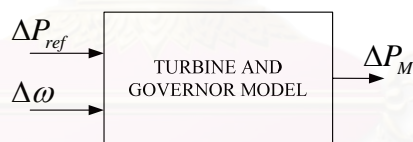
รูปที่ 2.4 แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด

เนื่องจากเมื่อปริมาณของโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดในขณะนั้นแตกต่างจากกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตให้กับระบบ ส่งผลให้ความเร็วของกังหันในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความถี่ของระบบเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในหน่วยผลิตไฟฟ้าจึงต้องมีตัวควบคุมความเร็วเพื่อทำให้ความเร็วของกังหันและความถี่ของระบบกลับมาสู่ค่าปกติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1.2 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้า (Turbine and Governor model)

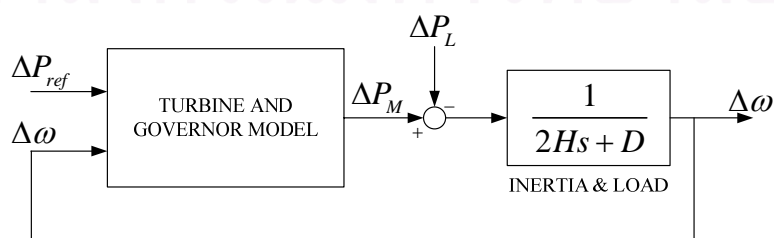
หน่วยผลิตไฟฟ้านั้นประกอบด้วยส่วนประกอบย่อยที่สำคัญสองส่วนคือ 1. ส่วนของต้นกำเนิดกำลังทางกล เช่น กังหันน้ำ (Hydro turbine) กังหันก๊าซ (Gas turbine) หรือ กังหันไอน้ำ (Steam turbine) เป็นต้น โดยที่พลังงานนั้นมาจากการเผาถ่านหิน ก๊าซ หรือเชื้อเพลิงทางนิวเคลียร์ 2. ส่วนของเครื่องควบคุมความเร็ว (Governor) ซึ่งมีหลักการการทำงานคือ เมื่อปริมาณโหลดเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน จะทำให้ความต้องการกำลังทางไฟฟ้าของโหลดในขณะนั้นมีปริมาณมากกว่ากำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตให้กับระบบ ดังนั้นจะทำให้ความเร็วของกังหันลดลง ส่งผลให้ความถี่ไฟฟ้าของระบบนั้นลดลง ความเร็วของกังหันที่ตรวจวัดได้จะถูกส่งสัญญาณไปปรับวาล์วเพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกลที่ใส่เข้าไปให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อทำให้ความเร็วของกังหันและความถี่ของระบบนั้นเท่าเดิม

เนื่องจากแบบจำลองของกังหันและเครื่องควบคุมความเร็วของหน่วยผลิตไฟฟ้าขึ้นอยู่กับส่วนประกอบย่อยทั้งสองชนิดที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งอยู่กับชนิดของหน่วยผลิตไฟฟ้านั้นๆ โดยรายละเอียดในการสร้างแบบจำลองของกังหันและเครื่องควบคุมความเร็วของหน่วยผลิตไฟฟ้านั้นจะนำมากล่าวต่อไป ดังนั้นเราจะกำหนดรูปแบบของแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้า

เมื่อนำแบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด และแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้ามารวมกัน จะได้แบบจำลองของระบบ LFC สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าเดี่ยว เป็นดังรูปที่ 2.6



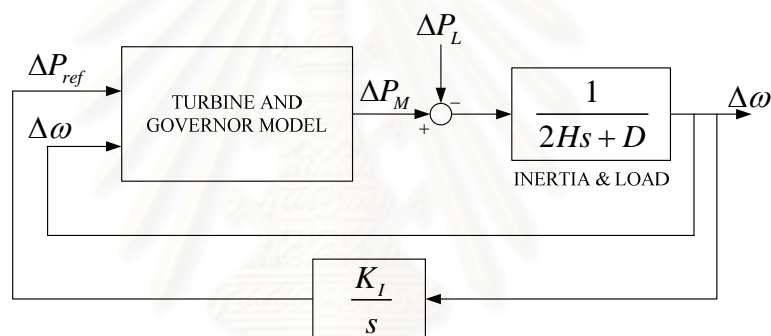
รูปที่ 2.6 แบบจำลองของระบบ LFC สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าเดี่ยว

2.2 ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (AGC)

ระบบ AGC เป็นระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมความถี่ของระบบและขนาดของแรงดันของระบบให้มีค่าคงที่หรือกลับสู่ค่าที่ตั้งไว้ เมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง

2.2.1 ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าเดี่ยว

ในระบบ LFC ในรูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของโหลด จะทำให้ผลลัพธ์ของความถี่ของระบบเมื่อระบบกลับสู่สภาวะคงตัวเปลี่ยนแปลงไป การที่จะทำให้ผลลัพธ์ของความถี่ของระบบเมื่อระบบกลับสู่สภาวะคงตัวกลับสู่ความถี่ที่ตั้งไว้ โดยการใส่ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controller) ลงไปดังรูปที่ 2.7 เพื่อที่จะเพิ่มให้ค่าของ $\Delta\omega$ ที่สถานะคงตัวมีค่าเป็นศูนย์ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนเนื่องจากโหลด ΔP_L เป็นฟังก์ชันขั้นบันได

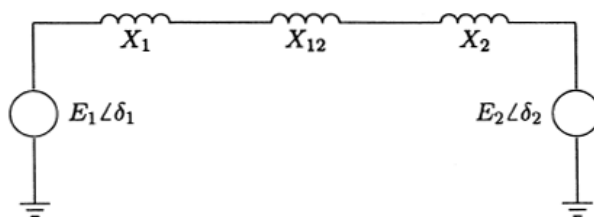


รูปที่ 2.7 แบบจำลองของระบบ LFC สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าเดี่ยวที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

2.2.2 ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าหลายพื้นที่

ในสภาวะปกติการหมุนของโรเตอร์ของกลุ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานอยู่กับระบบไฟฟ้าในบริเวณที่ใกล้กันมักมีทิศทางที่สอดคล้องกันจะทำให้ผลตอบจากกัมมันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator turbine) มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน กลุ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้เรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกาะติดกัน (Coherent generator) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะให้วงรอบของระบบ LFC (LFC loop) เป็นตัวแทนของระบบในแต่ละพื้นที่ซึ่งจะใช้อ้างอิงเป็นพื้นที่ควบคุม (Control area) ในการศึกษาระบบ AGC ในหลายพื้นที่ซึ่งเชื่อมโยงกันนั้น ควรเริ่มต้นจากการศึกษาระบบ AGC ของสองพื้นที่ก่อน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พิจารณาระบบสองพื้นที่ ซึ่งแต่ละพื้นที่จะพิจารณาเป็นหน่วยผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกันด้วยสายส่งที่ปราศจากกำลังจริงสูญเสีย โดยแต่ละพื้นที่จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage source) และความต้านทานเชิงซ้อนสมมูล (Equivalent reactance) ดังรูปที่ 2.8 [22]



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของระบบสองพื้นที่

การทำงานปกติกำลังจริงจะถูกส่งผ่านสายส่งจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 ดังสมการ

$$P_{12} = \frac{|E_1||E_2|}{X_{12}} \sin \delta_{12} \quad (2.6)$$

เมื่อ $X_{12} = X_1 + X_{ie} + X_2$ และ $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$

จากสมการข้างต้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้ สำหรับกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ΔP_{12} จากค่าปกติจะเป็นดังสมการ

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= \left. \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12_0}} \Delta \delta_{12} \\ &= T_s \Delta \delta_{12} \end{aligned}$$

โดยที่ T_s คือความชันของ power angular curve ที่มุมในการทำงานเริ่มต้น $\delta_{12_0} = \delta_{1_0} - \delta_{2_0}$ และถูกนิยามให้เป็น synchronizing power coefficient ดังนั้นจะได้ว่า

$$T_s = \left. \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12_0}} = \frac{|E_1||E_2|}{X_{12}} \cos \Delta \delta_{12_0} \quad (2.7)$$

และจะได้สมการการเปลี่ยนแปลงของกำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 เป็นดังนี้

$$\Delta P_{12} = T_s (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2)$$

การเปลี่ยนแปลงของกำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งนั้นจะปรากฏขึ้นเมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้นในพื้นที่หนึ่ง หรือ มีโหลดลดลงในอีกพื้นที่หนึ่ง ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่ง โดยทิศทางการไหลของกำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งนั้นขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของ phase angle คือถ้า $\Delta \delta_1 > \Delta \delta_2$ จะทำให้การเปลี่ยนแปลงกำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งจะเพิ่มขึ้นในทิศทางเสมือนมีกำลังไฟฟ้าที่ไหลเพิ่มขึ้นจาก พื้นที่ 1 ไปยัง พื้นที่ 2

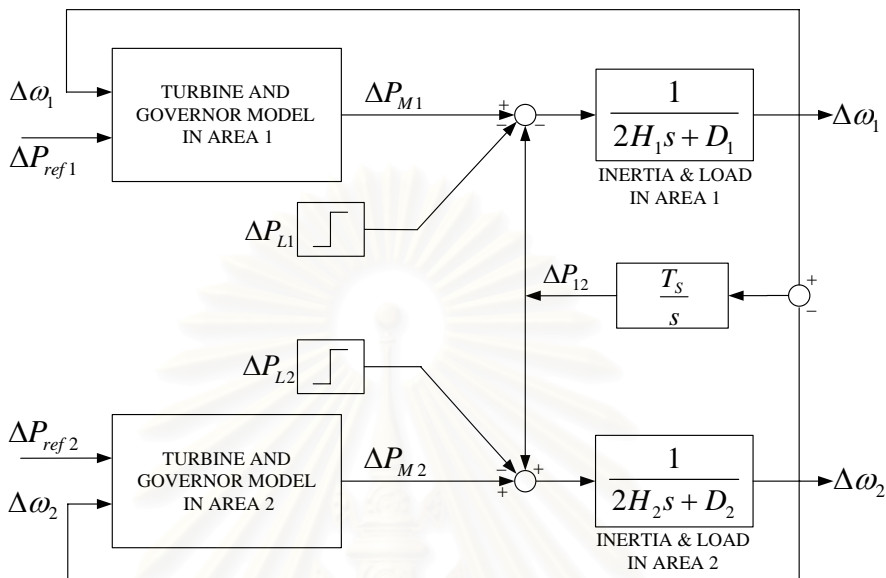
พิจารณากรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ 1 (ΔP_{L1}) ซึ่งมีผลทำให้ความถี่ของระบบในแต่ละพื้นที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลจะทำให้ทั้งสองพื้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความถี่เท่ากันดังสมการ

$$\Delta \omega = \Delta \omega_1 = \Delta \omega_2 \quad (2.8)$$

$$\Delta P_{M1} - \Delta P_{12} - \Delta P_{L1} = \Delta \omega D_1 \quad (2.9)$$

$$\Delta P_{M2} + \Delta P_{12} = \Delta \omega D_2 \tag{2.10}$$

นำความสัมพันธ์ข้างต้นมาสร้างแบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ซึ่งมีระบบ LFC เป็นวงรอบปฐมภูมิ (Primary loop) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ซึ่งมีระบบ LFC เป็นวงรอบปฐมภูมิ

จากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของความถี่ของระบบในแต่ละพื้นที่ และกำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งในสถานะคงตัวนั้นจะไม่ใช่ศูนย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในแต่ละพื้นที่ซึ่งขัดแย้งกับหลักการควบคุมขั้นพื้นฐานที่ต้องการให้การเปลี่ยนแปลงของกำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งในสถานะคงตัวมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้การทำให้กำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งในสถานะคงตัวมีค่าเป็นศูนย์นั้นจำเป็นต้องใช้หลักการควบคุมการเปลี่ยนแปลงกำลังในสายเชื่อมต่อ (Tie-line bias control) [22, 23] ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.2.3 ระบบควบคุมการเปลี่ยนแปลงกำลังในสายเชื่อมต่อ (Tie-line bias control)

ในระบบผลิตไฟฟ้าหลายพื้นที่ที่เชื่อมต่อกันด้วยสายเชื่อมต่อพบว่า เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงและในสถานะอยู่ตัวการเปลี่ยนแปลงของโหลดนั้นมีค่าคงที่ การควบคุมของตัวควบคุมความเร็วของหน่วยผลิตไฟฟ้าในส่วนที่เป็นการควบคุมปฐมภูมิ (Primary control) ไม่สามารถทำให้ความถี่ของระบบและกำลังที่ส่งผ่านสายเชื่อมต่อกลับมาสู่ค่าปกติได้ในสถานะอยู่ตัว เหตุการณ์ดังกล่าวขัดแย้งกับแผนควบคุมการผลิตขั้นพื้นฐานของระบบปกติที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. รักษาความถี่โดยประมาณของระบบให้อยู่ที่ค่าปกติ (50 Hz)
2. รักษากำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายเชื่อมต่อให้เป็นไปตามแผนที่กำหนดไว้ล่วงหน้า
3. ในแต่ละพื้นที่ควรควบคุมกำลังการผลิตเพื่อรองรับความต้องการของโหลดในพื้นที่นั้นๆ

ในระบบ AGC จะมีการควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายเชื่อมต่อให้เป็นไปตามแผนควบคุมการผลิตขั้นพื้นฐานของระบบปกติด้วยการใช้สัญญาณ ACE (Area control error) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$ACE_i = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} + K_i \Delta \omega \tag{2.11}$$

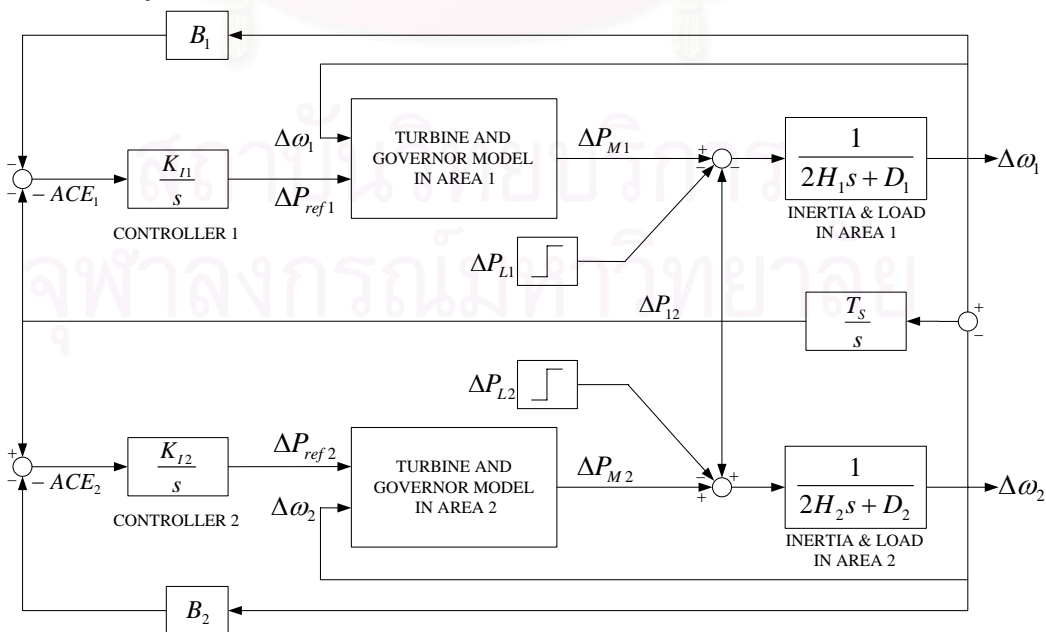
โดยที่ K_i เป็นปริมาณการเชื่อมโยงกันในช่วงที่มีสัญญาณรบกวนในพื้นที่ข้างเคียง สัญญาณ ACE เป็นสัญญาณที่บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของกำลังในสายเชื่อมต่อ แต่ละพื้นที่ที่ควบคุมจะต้องลด ACE ในแต่ละพื้นที่ลงให้เป็นศูนย์ในสถานะอยู่ตัว ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้สัญญาณป้อนกลับอินทิกรัล (Integral feedback) ของ ACE ในแต่ละพื้นที่ที่ควบคุมเป็นสัญญาณควบคุมในพื้นที่ที่ควบคุมนั้นๆ อีกชั้นหนึ่งเรียกว่า การควบคุมทุติยภูมิ (Secondary control)

เมื่อพิจารณาในระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่พบว่าจะต้องเลือก K_i ให้เท่ากับ Frequency bias factor ในแต่ละพื้นที่ซึ่งก็คือ $B_i = 1/R_i + D_i$ ดังนั้นจะได้ ACE ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ดังสมการ

$$ACE_1 = \Delta P_{12} + B_1 \Delta \omega_1 \tag{2.12}$$

$$ACE_2 = \Delta P_{21} + B_2 \Delta \omega_2 \tag{2.13}$$

โดยที่ ΔP_{12} และ ΔP_{21} คือการเปลี่ยนแปลงของกำลังทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านกันระหว่างสองพื้นที่จากที่ได้จัดสรรไว้ล่วงหน้า ACE ในแต่ละพื้นที่นั้นเป็นสัญญาณความคลาดเคลื่อนที่ใช้สำหรับกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังการผลิต และเมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัวจะทำให้ ΔP_{12} $\Delta \omega_1$ และ $\Delta \omega_2$ มีค่าเป็นศูนย์ และนำความสัมพันธ์ที่ได้มาสร้างแบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ได้ดังรูปที่ 2.10 [22]



รูปที่ 2.10 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่

จากหลักการของการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC ดังกล่าว เราสามารถขยายไปเป็นหลักการในการสร้างแบบจำลองในหลายพื้นที่ได้โดยใช้หลักการเดียวกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

รายละเอียดของแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็ว และกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำและน้ำ

เนื่องจากการผลิตกำลังไฟฟ้าในระบบขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกันโดยปกติประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ พลังน้ำ พลังนิวเคลียร์ และพลังกังหันก๊าซ โดยที่โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์นั้นตามปกติจะใช้สำหรับจ่ายโหลดฐาน (Base load) และทำการผลิตที่ค่ากำลังสูงสุดคงที่โดยไม่มีระบบ AGC มาเกี่ยวข้อง ส่วนโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซนั้นมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตเพื่อให้สอดคล้องกับโหลดได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ในการจ่ายโหลดสูงสุด (Peak load) เท่านั้น ทั้งนี้เราพบว่าระบบ AGC ไม่มีส่วนร่วมมากนักในหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งสองชนิดข้างต้น อีกทั้งตามปกติสัดส่วนของกำลังการผลิตดังกล่าวเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตทั้งหมดจะมีค่าไม่สูงมากนัก ดังนั้นหน้าที่หลักของระบบ AGC คือการควบคุมหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ และไอน้ำ ซึ่งมักเป็นกำลังการผลิตส่วนใหญ่ในแต่ละพื้นที่ที่สนใจ ดังนั้นในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ AGC หลายพื้นที่ที่เราต้องทราบแบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำและไอน้ำ

แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำและไอน้ำ ประกอบด้วยแบบจำลองขององค์ประกอบย่อยต่างๆ เช่น แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด ตัวควบคุมความเร็วและกังหัน (Turbine and governor model) ตัวกระตุ้น (Exciter) และตัวปรับเสถียรภาพ (Stabilizer) อย่างไรก็ตามในการสร้างแบบจำลองระบบ AGC สำหรับหลายพื้นที่นั้นเราสามารถทำได้โดยอาศัยเพียงแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด และแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำและไอน้ำเท่านั้น [22, 23] โดยทั่วไปแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงรายละเอียดของแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำและไอน้ำซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

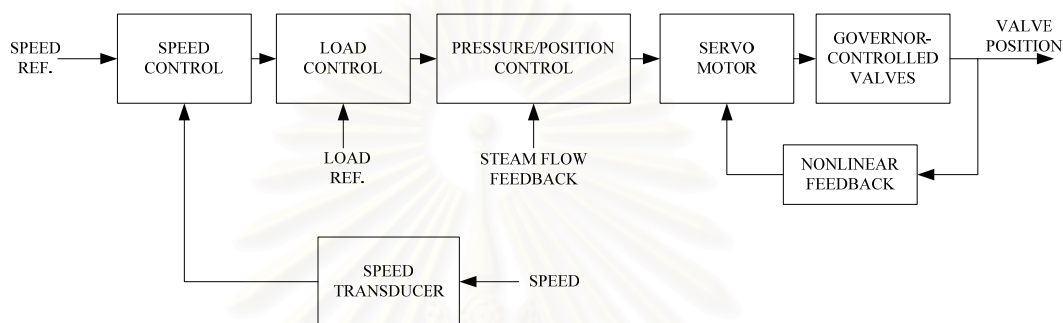
3.1 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำ

เนื่องจากหน้าที่ของตัวควบคุมความเร็วของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำคือการทำให้ความเร็วของกังหันและความถี่ของระบบกลับมาสู่ค่าปกติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลันด้วยการตรวจจับความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของกังหันและส่งสัญญาณควบคุมไปเปลี่ยนแปลงพลังงานกลที่ใส่ให้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำเพื่อทำให้ความเร็วของกังหันและความถี่ของระบบกลับสู่ค่าปกติ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันสามารถทำ

ได้โดยการรวมแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและแบบจำลองของกังหันเข้าด้วยกัน [24] โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อ 3.1.1 และหัวข้อ 3.1.2

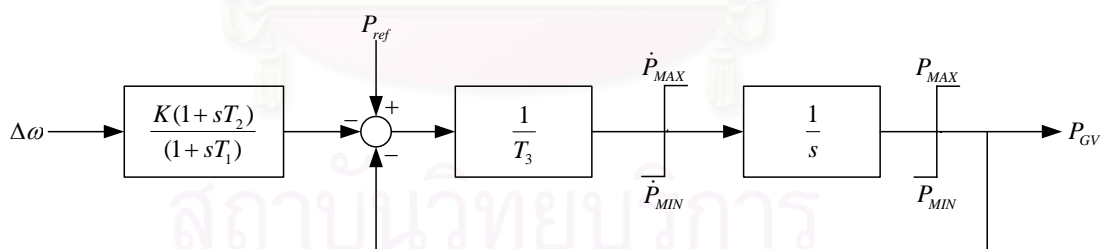
3.1.1 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำ

ระบบควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำนั้นจะใช้ตัวควบคุมความเร็วซึ่งมีแผนภูมิรูปภาพแสดงความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ของตัวควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำ

จากรูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ของตัวควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำ สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถแสดงแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำดังรูปที่ 3.2 โดยพารามิเตอร์ต่างๆจะขึ้นอยู่กับชนิดของระบบควบคุมความเร็วดังแสดงตัวอย่างไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันไอน้ำ

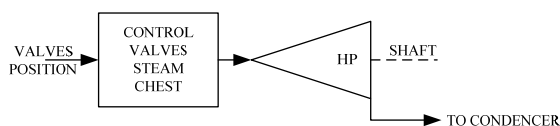
ชนิดของตัวควบคุมความเร็ว	ค่าคงที่ทางเวลา		
	T_1	T_2	T_3
Mechanical-Hydraulic	0.2 – 0.3	0	0.1
General Electric EH with Steam Feedback	0	0	0.025
General Electric EH without Steam Feedback	0	0	0.1
Westinghouse EH with Steam Feedback	2.8	1.0	0.15
Westinghouse EH without Steam Feedback	0	0	0.1
ค่า K มีค่าเท่ากับ $1/R$ โดย R คือ Droop constant			
โดยทั่วไป \dot{P}_{MAX} และ \dot{P}_{MIN} จะมีค่าเท่ากับ 0.1 และ -0.1 ตามลำดับ			

3.1.2 แบบจำลองของกังหันไอน้ำ

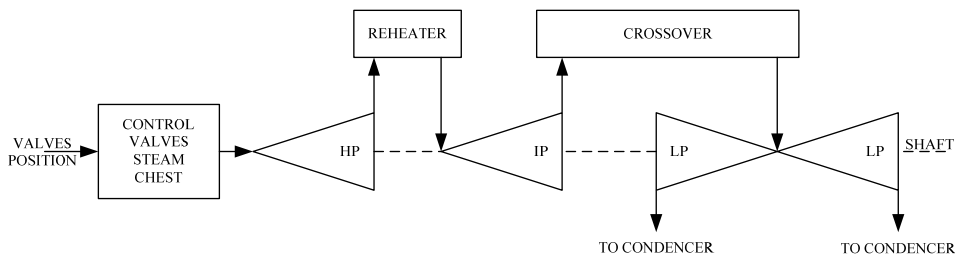
โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำมีหลายชนิด [24] ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. ชนิดไม่มีการทำความร้อนซ้ำ (Nonreheat)
2. ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat)
3. ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)
4. ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 1
5. ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 2
6. ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)

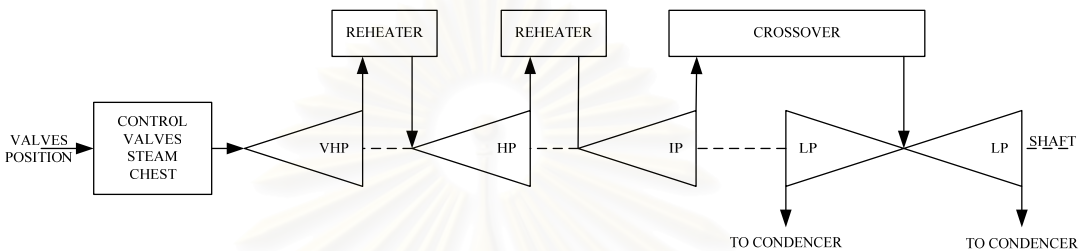
กังหันไอน้ำแต่ละชนิดมีรูปแบบการจัดเรียงส่วนประกอบที่แตกต่างกันดังแผนภาพแสดง ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันไอน้ำดังรูปที่ 3.3 และจากความสัมพันธ์ของ ส่วนประกอบต่างๆของกังหันไอน้ำในรูปที่ 3.3 จะสามารถสร้างแบบจำลองสำหรับกังหันไอน้ำ ชนิดต่างๆได้ ดังรูปที่ 3.4



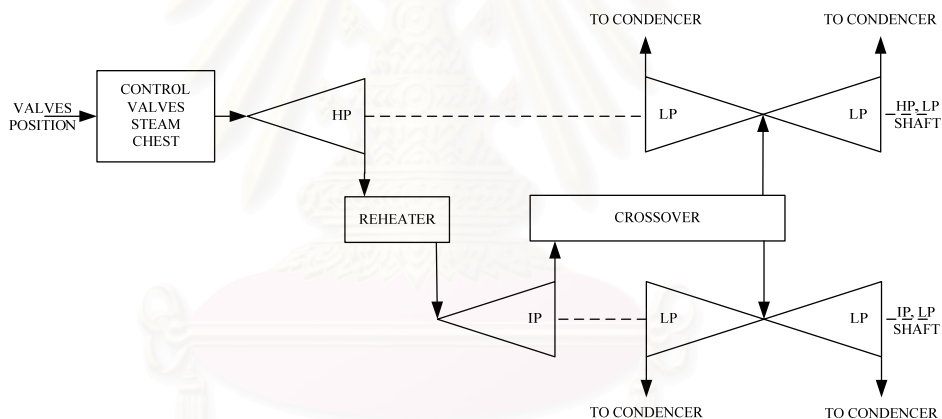
(ก) ชนิดไม่มีการทำความร้อนซ้ำ (Nonreheat)



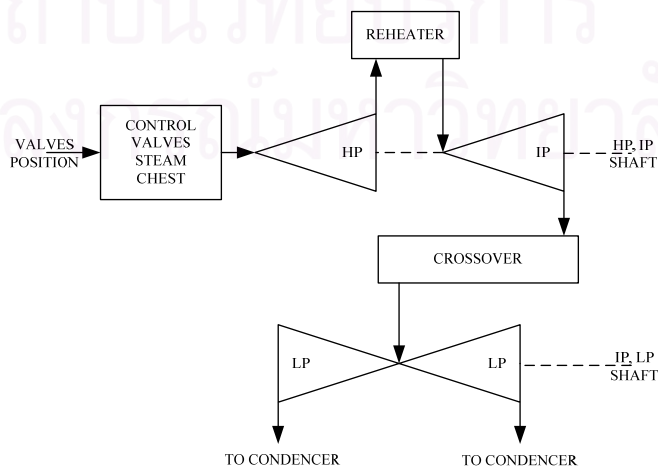
(ข) ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat)



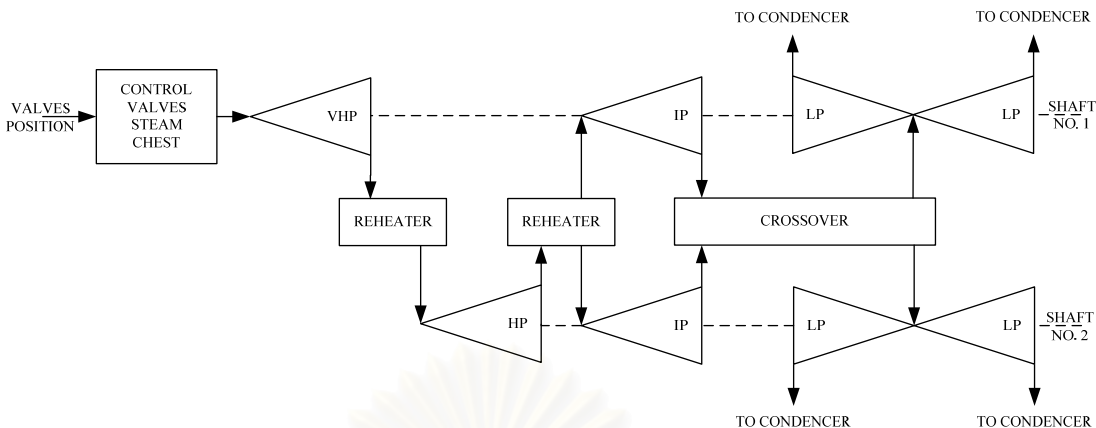
(ค) ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)



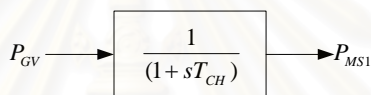
(ง) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 1



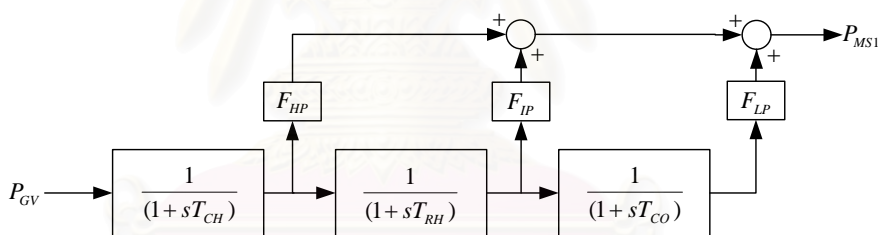
(จ) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 2



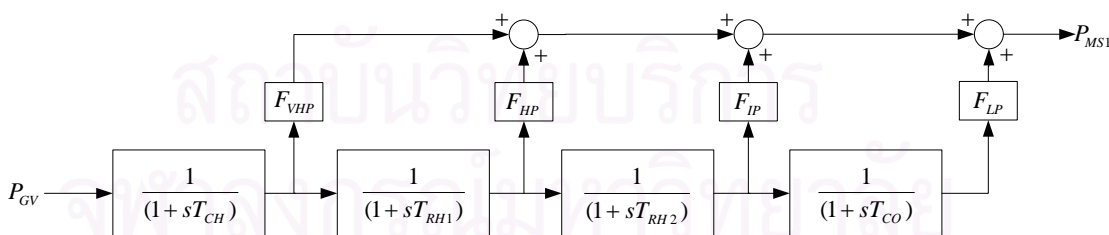
(ฉ) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)
 รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันไอน้ำแต่ละชนิด



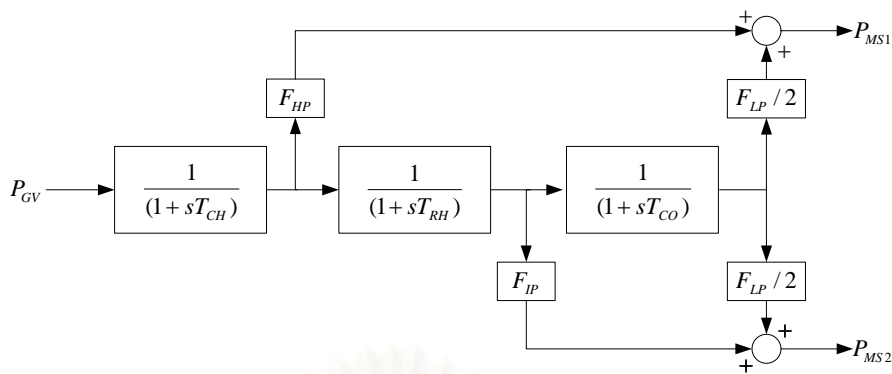
(ก) ชนิดไม่มีการทำความร้อนซ้ำ (Nonreheat)



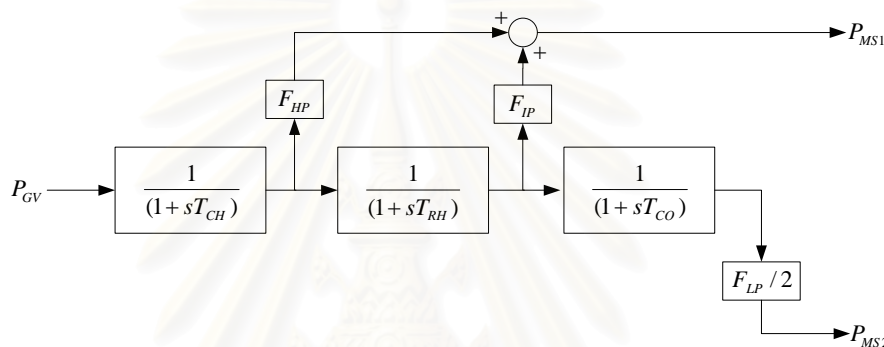
(ข) ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat)



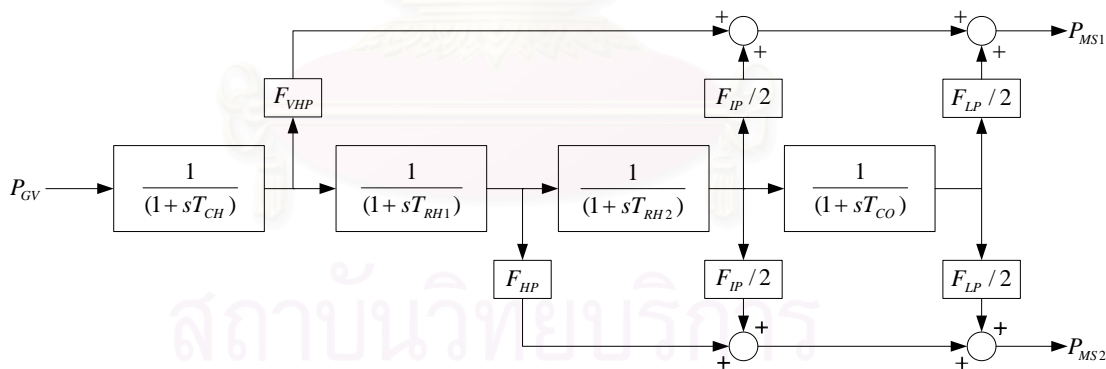
(ค) ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)



(ง) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 1



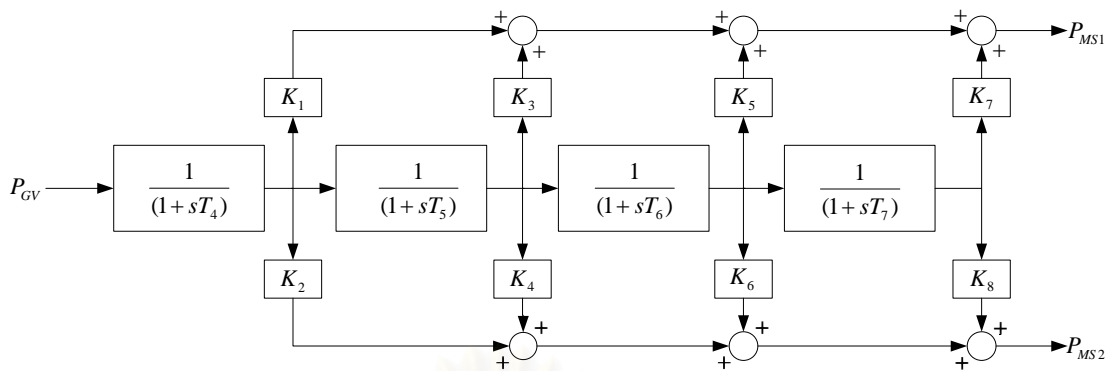
(จ) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 2



(ฉ) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)

รูปที่ 3.4 แบบจำลองสำหรับกังหันไอน้ำชนิดต่างๆ

จากแผนภูมิรูปภาพแสดงความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ และแบบจำลองสำหรับกังหันไอน้ำชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4 เราสามารถสร้างแบบจำลองทั่วไปของกังหันไอน้ำได้ดังรูปที่ 3.5 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองในรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 มีความสัมพันธ์กันดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.5 แบบจำลองทั่วไปของกังหันไอน้ำ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

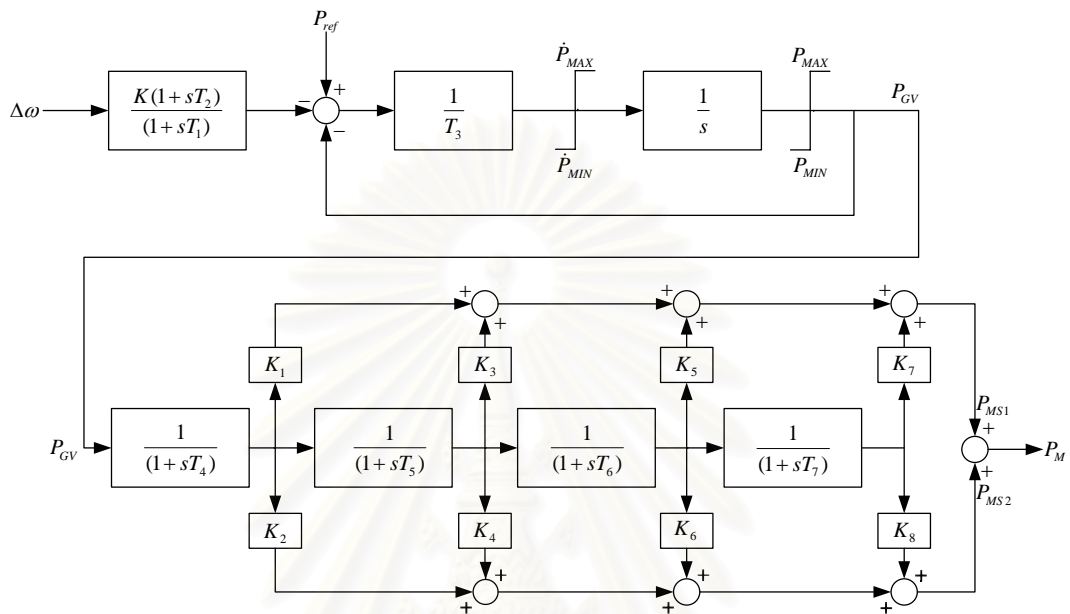
ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในแบบจำลองทั่วไปของกังหันไอน้ำกับพารามิเตอร์มาตรฐานของกังหันไอน้ำ

ชนิดของกังหันไอน้ำ	ค่าคงที่ทางเวลา				ตัวประกอบที่มีส่วนร่วมของกังหันในแต่ละส่วน							
	T_4	T_5	T_6	T_7	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
รูปที่ 4 (ก) ชนิดไม่มีการทำความร้อนซ้ำ (Nonreheat)	T_{CH}	-	-	-	1	0	0	0	0	0	0	0
รูปที่ 4 (ข) ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat)	T_{CH}	T_{RH}	T_{CO}	-	F_{HP}	0	F_{IP}	0	F_{LP}	0	0	0
รูปที่ 4 (ค) ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)	T_{CH}	T_{RH1}	T_{RH2}	T_{CO}	F_{VHP}	0	F_{HP}	0	F_{IP}	0	F_{LP}	0
รูปที่ 4 (ง) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 1	T_{CH}	T_{RH}	T_{CO}	-	F_{HP}	0	0	F_{IP}	$F_{LP}/2$	$F_{LP}/2$	0	0
รูปที่ 4 (จ) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 2	T_{CH}	T_{RH}	T_{CO}	-	F_{HP}	0	F_{IP}	0	0	F_{LP}	0	0
รูปที่ 4 (ฉ) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)	T_{CH}	T_{RH1}	T_{RH2}	T_{CO}	F_{VHP}	0	0	F_{HP}	$F_{IP}/2$	$F_{IP}/2$	$F_{LP}/2$	$F_{LP}/2$

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์มาตรฐานของกังหันไอน้ำ

ชนิดของกังหันไอน้ำ	ตัวประกอบที่มีส่วนร่วมของกังหันในแต่ละส่วน				ค่าคงที่ทางเวลา			
	F_{VHP}	F_{HP}	F_{IP}	F_{LP}	T_{CH}	T_{RH} T_{RH1}	T_{RH2}	T_{CO}
รูปที่ 4 (ก) ชนิดไม่มีการทำความร้อนซ้ำ (Nonreheat)	-	-	-	-	0.2 – 0.5	-	-	-
รูปที่ 4 (ข) ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat)	-	0.3	0.4	0.3	0.1 – 0.4	4 – 11	-	0.3 – 0.5
รูปที่ 4 (ค) ชนิด Tandem Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)	-	0.22	0.3	0.26	0.1 – 0.4	4 – 11	4 – 11	0.3 – 0.5
รูปที่ 4 (ง) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 1	0.22	0.3	0.3	0.4	0.1 – 0.4	4 – 11	-	0.3 – 0.5
รูปที่ 4 (จ) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Reheat) รูปแบบที่ 2	-	0.25	0.25	0.5	0.1 – 0.4	4 – 11	-	0.3 – 0.5
รูปที่ 4 (ฉ) ชนิด Cross Compound แบบทำความร้อนซ้ำสองครั้ง (Double Reheat)	0.22	0.22	0.28	0.28	0.1 – 0.4	4 – 11	-	0.3 – 0.5

เมื่อนำแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วมารวมกับแบบจำลองของกังหันไอน้ำจะได้แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำดังรูปที่ 3.6 และมีชื่อเรียกตามมาตรฐานว่า IEEE G1



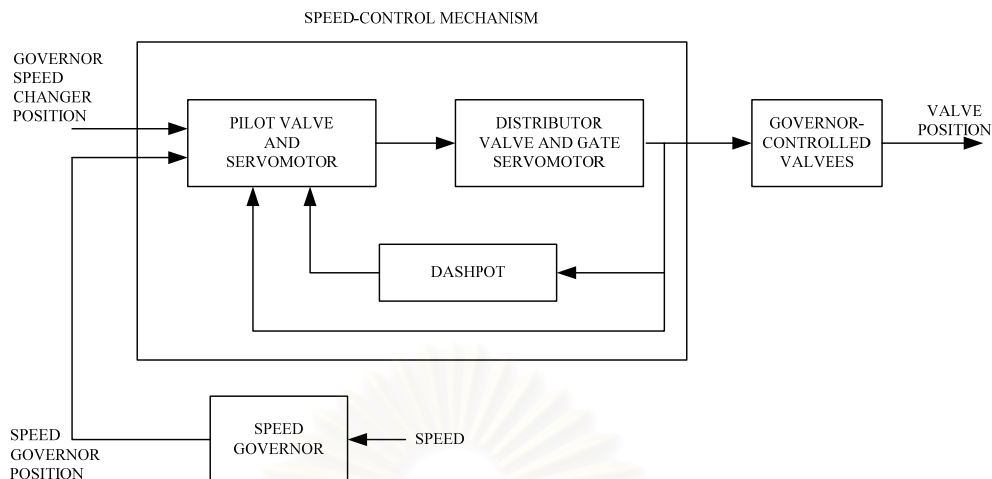
รูปที่ 3.6 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำ (IEEE G1)

3.2 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ

เนื่องจากหน้าที่ของตัวควบคุมความเร็วของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ คือการทำให้ความเร็วของกังหันและความถี่ของระบบกลับมาสู่ค่าปกติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลัน ด้วยการตรวจจับความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของกังหัน และส่งสัญญาณควบคุมไปเปลี่ยนแปลงพลังงานทางกลที่ใส่ให้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำเพื่อทำให้ความเร็วของกังหันและความถี่ของระบบกลับมาสู่ค่าปกติ ดังนั้นการสร้างแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วสามารถทำได้โดยการรวมแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและแบบจำลองย่อยของกังหันเข้าด้วยกัน [24] โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2

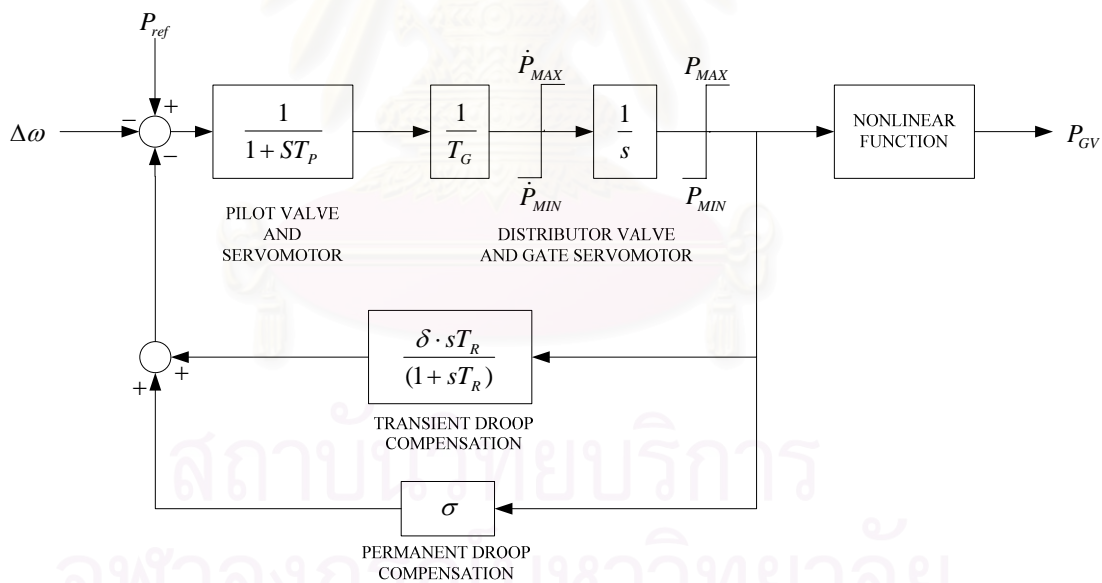
3.2.1 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ

ระบบควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ จะใช้ตัวควบคุมความเร็วซึ่งมีแผนภูมิรูปภาพแสดงความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ

รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ และสามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะได้แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำดังรูปที่ 3.8 และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะมีตัวอย่างของค่ามาตรฐานดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.8 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ

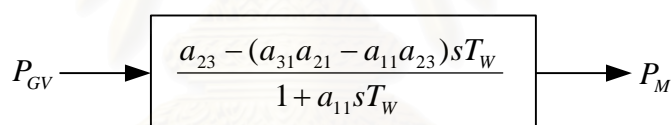
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วของกังหันน้ำ

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานของพารามิเตอร์	ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์
T_R	5.00	2.50 – 25.00
T_G	0.20	0.20 – 0.40
T_P	0.04	0.03 – 0.05
δ	0.30	0.20 – 1.00
σ	0.05	0.03 – 0.06

โดยปกติค่ามาตรฐานของ T_R และ δ สามารถหาได้จากสมการ $T_R = 5T_W$ และ $\delta = 2.5T_W/2H$ ตามลำดับ โดยที่ H คือค่าคงที่ทางความเฉื่อยของกังหันในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ และค่า R (Droop constant) มีค่าเท่ากับ δ

3.2.2 แบบจำลองของกังหันน้ำ

จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองทั่วไปของกังหันน้ำนั้นเป็นดังรูปที่ 3.9 และค่ามาตรฐานของค่าพารามิเตอร์ต่างๆเป็นดังตารางที่ 3.5 [24]

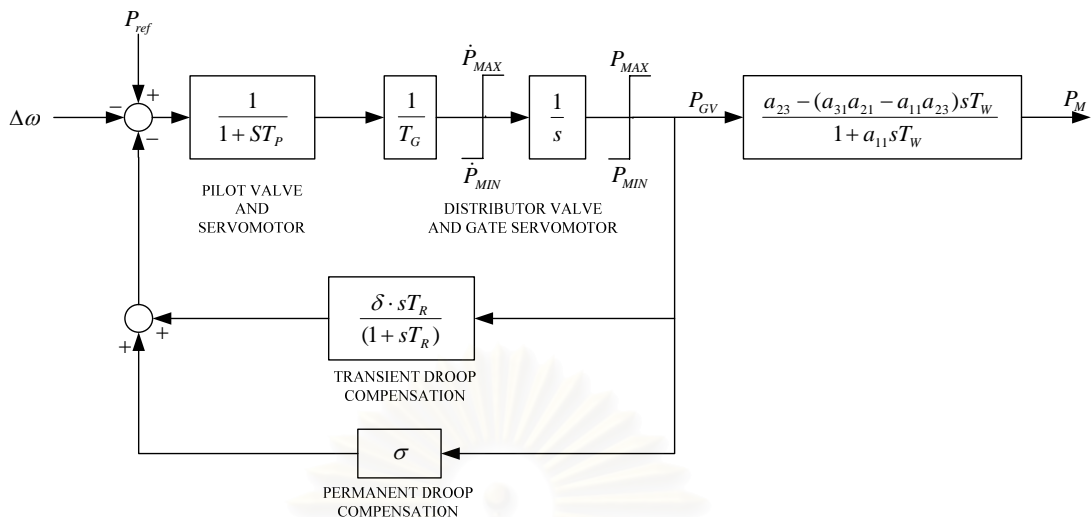


รูปที่ 3.9 แบบจำลองทั่วไปของกังหันน้ำ

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์มาตรฐานของกังหันน้ำ

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานของพารามิเตอร์
a_{11}	0.5
a_{13}	1
a_{21}	1.5
a_{23}	1

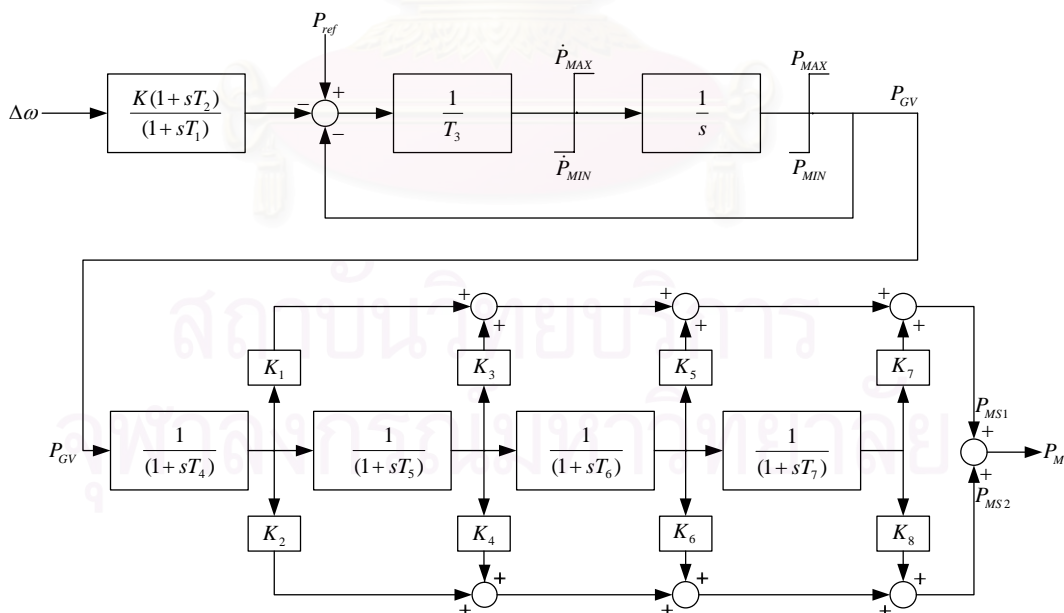
เมื่อนำแบบจำลองของระบบควบคุมความเร็วมารวมกับแบบจำลองของกังหันน้ำจะได้แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกังหันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำดังรูปที่ 3.10 และมีชื่อเรียกตามมาตรฐานว่า IEEE3



รูปที่ 3.10 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ (IEEE G3)

3.3 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้

จากการศึกษาพบว่าหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำที่มีขนาดประมาณ 200-300 MW มีแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ตามมาตรฐานที่มีชื่อว่า IEEE G1 [24] ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.11 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆเป็นดังตารางที่ 3.6

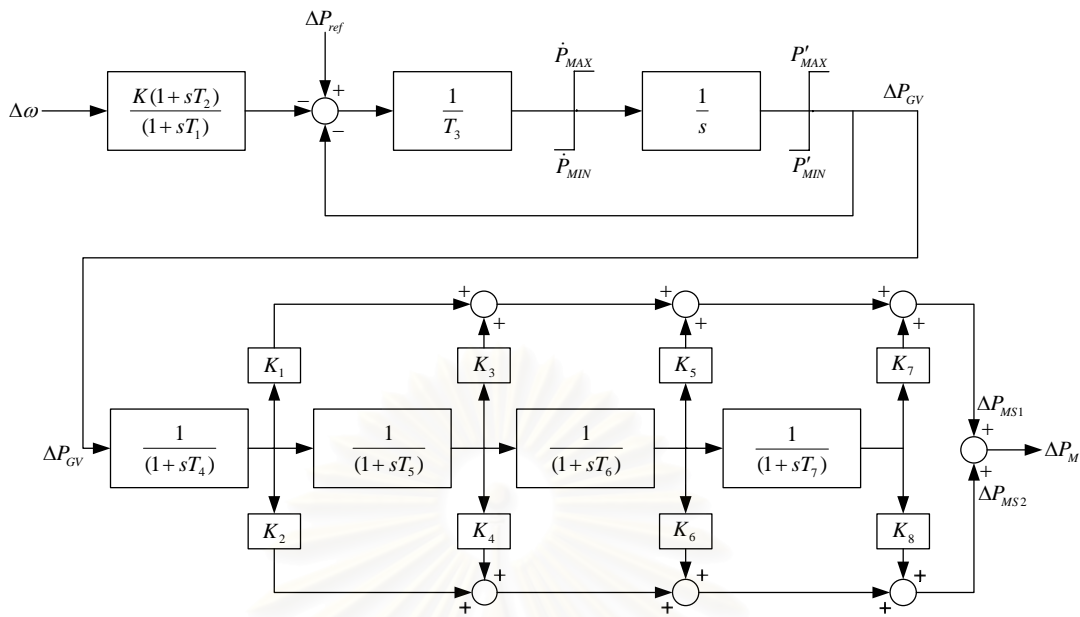


รูปที่ 3.11 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ (IEEE G1)

ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ (IEEEG1)

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ (IEEEG1)		
K	Controller Gain (p.u.)	20
T_1	Governor Time Constant (s)	0.25
T_2	Governor Derivative Time Constant (s)	0
T_3	Servo Time Constant (s)	0.1
K_1	High Pressure Turbine Factor (p.u.)	0.3
K_2	High Pressure Turbine Factor (p.u.)	0
T_5	Intermediate Pressure Turbine Time Constant (s)	10
K_3	Intermediate Pressure Turbine Factor (p.u.)	0.4
K_4	Intermediate Pressure Turbine Factor (p.u.)	0
T_6	Medium Pressure Turbine Time Constant (s)	0.4
K_5	Medium Pressure Turbine Factor (p.u.)	0.3
K_6	Medium Pressure Turbine Factor (p.u.)	0
T_4	High Pressure Turbine Time Constant (s)	0.3
T_7	Low Pressure Turbine Time Constant (s)	0
K_7	Low Pressure Turbine Factor (p.u.)	0
K_8	Low Pressure Turbine Factor (p.u.)	0
\dot{P}_{MIN}	Valve Closing Time (p.u./s)	-0.1
P_{MIN}	Minimum Gate Limit (p.u.)	0
\dot{P}_{MAX}	Valve Opening Time (p.u./s)	0.1
P_{MAX}	Maximum Gate Limit (p.u.)	1

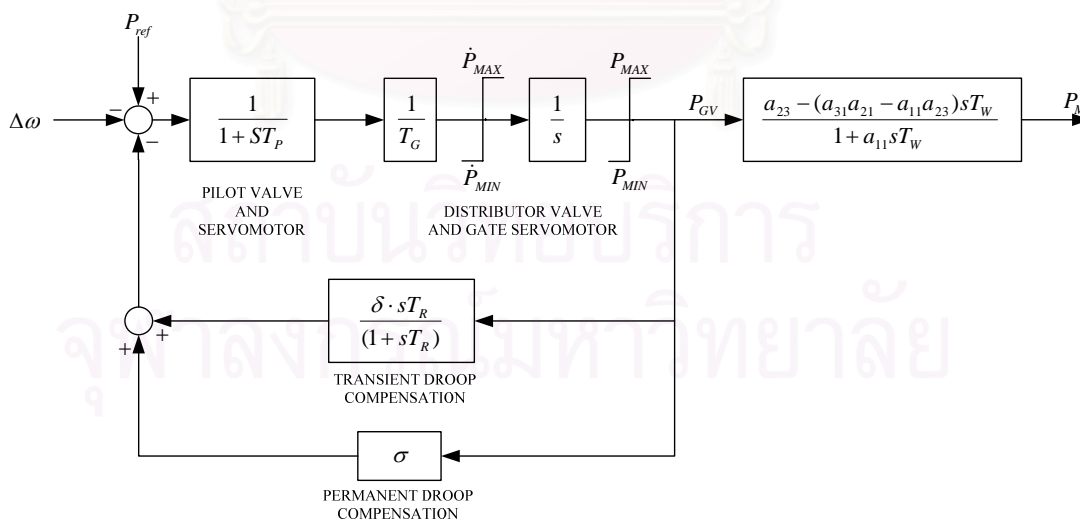
การวิเคราะห์การทำงานของระบบ AGC ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพิจารณาสัญญาณขนาดเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงรอบจุดสมดุล ดังนั้นแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC เป็นดังรูปที่ 3.12 โดยที่ค่าของ P'_{MAX} และ P'_{MIN} นั้นขึ้นอยู่กับจุดสมดุลในการทำงานของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้



รูปที่ 3.12 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกั้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำ (IEEEG1)

3.4 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกั้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ

จากการศึกษาพบว่าหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำที่มีขนาดประมาณ 70 MW มีแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกั้นตามมาตรฐานที่มีชื่อว่า IEEEG3 [24] ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.13 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆเป็นดังตารางที่ 3.7

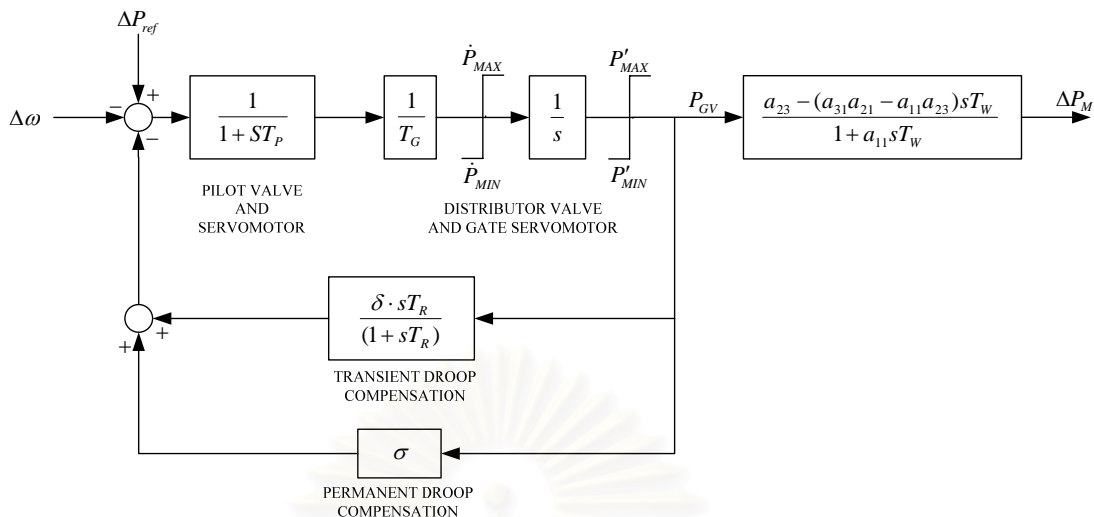


รูปที่ 3.13 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกั้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ (IEEEG3)

ตารางที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ (IEEEG3)

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ (IEEEG3)		
T_G	Gate Servomotor Time Constant (s)	0.2
T_P	Pilot Valve Time Constant (s)	0.04
σ	Permanent Droop (p.u.)	0.04
δ	Temporary Droop (p.u.)	0.4
T_R	Governor Time Constant (s)	5
a_{11}	Waterhammer 1th Factor (p.u.)	0.5
a_{13}	Waterhammer 2th Factor (p.u.)	1
a_{21}	Waterhammer 3th Factor (p.u.)	1.5
a_{23}	Waterhammer 4th Factor (p.u.)	1
T_W	Water Starting Time (s)	1
\dot{P}_{MIN}	Valve Closing Time (p.u./s)	-0.1
P_{MIN}	Minimum Gate Limit (p.u.)	0
\dot{P}_{MAX}	Valve Opening Time (p.u./s)	0.1
P_{MAX}	Maximum Gate Limit (p.u.)	1

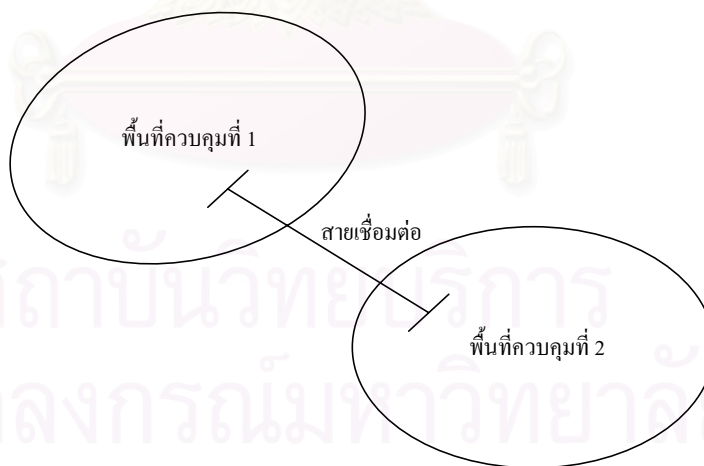
การวิเคราะห์การทำงานของระบบ AGC ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพิจารณาสัญญาณขนาดเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงรอบจุดสมดุล ดังนั้นแบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักกันของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC เป็นดังรูปที่ 3.14 โดยที่ค่าของ P'_{MAX} และ P'_{MIN} นั้นขึ้นอยู่กับจุดสมดุลในการทำงานของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ



รูปที่ 3.14 แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกั้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ (IEEE G3)

3.5 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC

พิจารณาระบบสองพื้นที่ โดยแต่ละพื้นที่ของการควบคุมมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ ดังรูปที่ 3.15 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเป็นไปตามตารางที่ 3.6 ตารางที่ 3.7 ตารางที่ 3.8 และตารางที่ 3.9 โดยค่าฐานที่ใช้คือ $S_{base} = 500 \text{ MVA}$ และ $f_{base} = 50 \text{ Hz}$ และจะได้แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ที่เป็นดังรูปที่ 3.16 ถึงรูปที่ 3.19



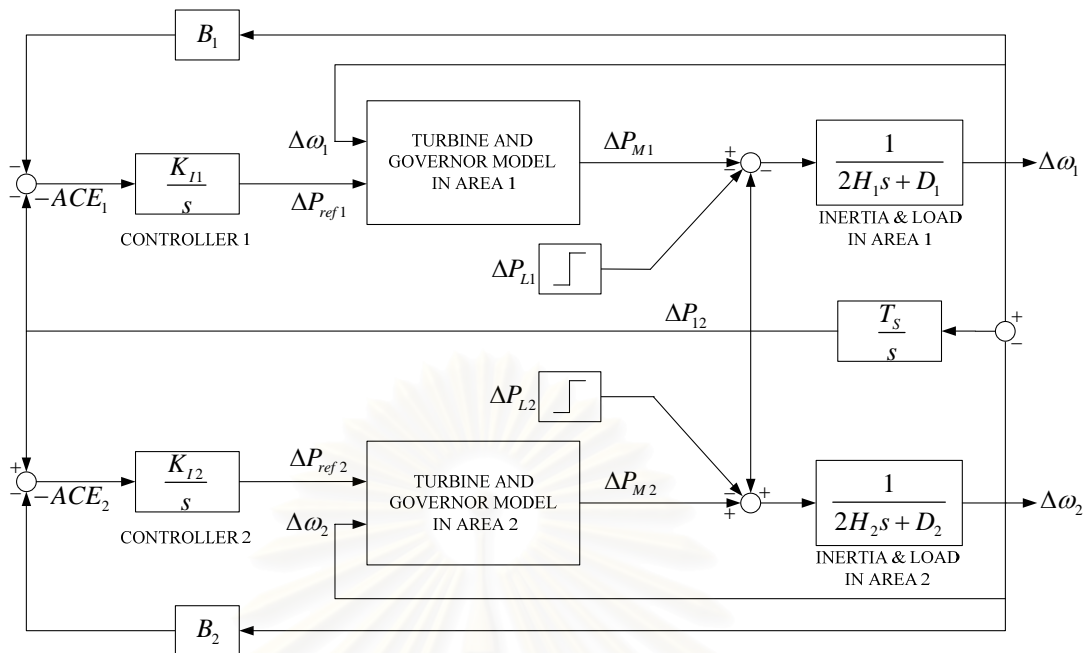
รูปที่ 3.15 แผนภาพของระบบสองพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดของหน่วยผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ควบคุมที่ 1 และ 2

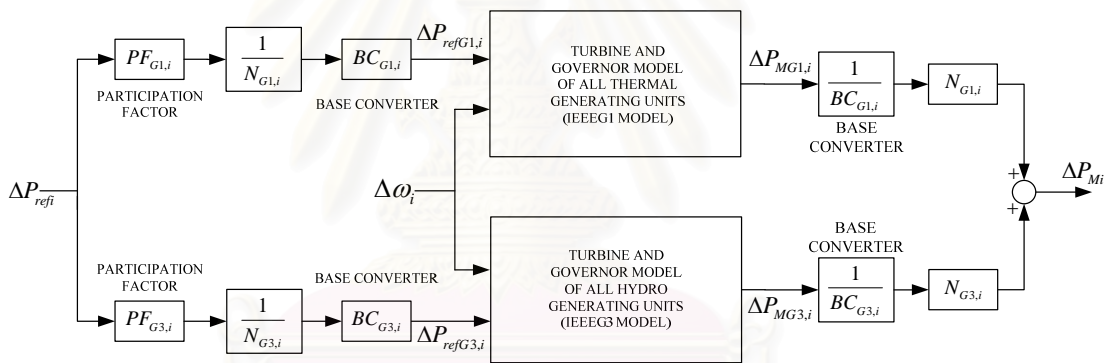
รายละเอียดของหน่วยผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ควบคุมที่ 1 และ 2
หน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำขนาด 400 MW จำนวน 1 หน่วย $H = 5 \text{ sec} \quad D = 0.8 \quad R_{Thermal} = \frac{1}{K} = 0.05$ และ ตัวประกอบการมีส่วนร่วม (Participation factor) = 0.75
หน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาด 70 MW จำนวน 3 หน่วย $H = 3.3 \text{ sec} \quad D = 0.8 \quad R_{Hydro} = \sigma = 0.04$ และ ตัวประกอบการมีส่วนร่วม (Participation factor) = 0.25

ตารางที่ 3.9 รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

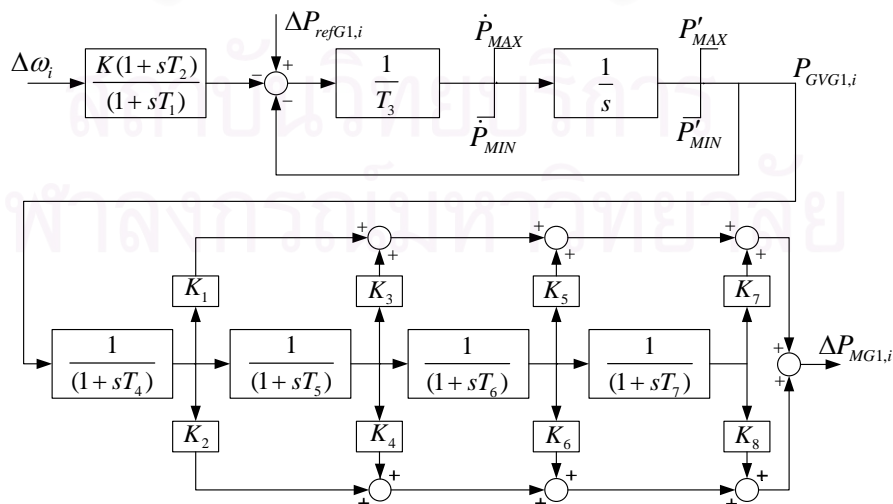
พื้นที่ควบคุมที่ 1	พื้นที่ควบคุมที่ 2
$H_1 = \frac{5 \times 400 + 3 \times 3.3 \times 70}{500} = 4.1526 \text{ sec}$	$H_2 = \frac{5 \times 400 + 3 \times 3.3 \times 70}{500} = 4.1526 \text{ sec}$
$D_1 = \frac{0.8 \times 400 + 3 \times 0.8 \times 70}{500} = 0.9760$	$D_2 = \frac{0.8 \times 400 + 3 \times 0.8 \times 70}{500} = 0.9760$
$R_{G1,1} = \frac{0.05}{400} \times 500 = 0.0625$	$R_{G1,2} = \frac{0.05}{400} \times 500 = 0.0625$
$R_{G3,1} = \frac{0.04}{70} \times 500 = 0.2857$	$R_{G3,2} = \frac{0.04}{70} \times 500 = 0.2857$
$B_1 = D_1 + \frac{1}{R_{G1,1}} + 3 \times \frac{1}{R_{G3,1}} = 27.3$	$B_2 = D_2 + \frac{1}{R_{G1,2}} + 3 \times \frac{1}{R_{G3,2}} = 27.3$
$PF_{G1,1} = 0.75$	$PF_{G1,2} = 0.75$
$PF_{G3,1} = 0.25$	$PF_{G3,2} = 0.25$
$BC_{G1,1} = \frac{500}{400}$	$BC_{G1,2} = \frac{500}{400}$
$BC_{G3,1} = \frac{500}{70}$	$BC_{G3,2} = \frac{500}{70}$
$N_{G1,1} = 1$	$N_{G1,2} = 1$
$N_{G3,1} = 3$	$N_{G3,2} = 3$
Tie-line torque coefficient $T_s = 2$	



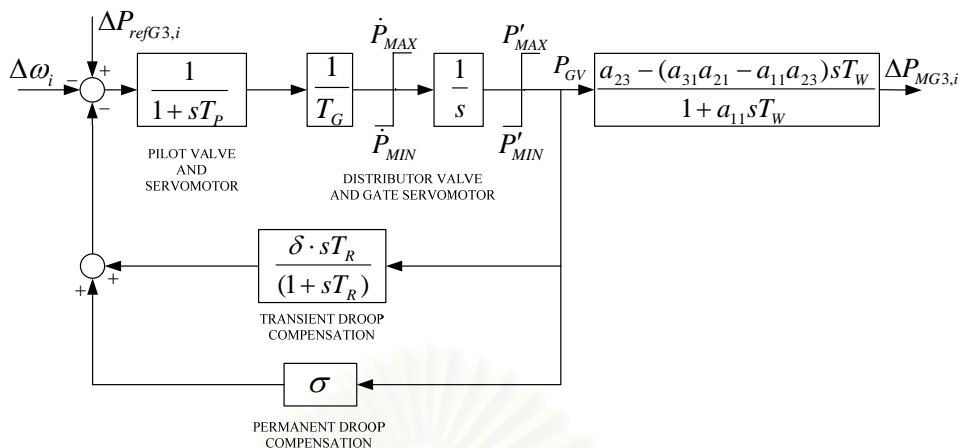
รูปที่ 3.16 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่



รูปที่ 3.17 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งหมดในพื้นที่ควบคุมที่ *i*



รูปที่ 3.18 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำในพื้นที่ควบคุมที่ *i*



รูปที่ 3.19 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำในพื้นที่ควบคุมที่ i

3.6 สรุป

ในบทนี้เราจะได้ แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ (IEEEG1) แบบจำลองของตัวควบคุมความเร็วและกักหน้ของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ (IEEEG3) และแบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ ตลอดจนหลักการพื้นฐานในการหาค่าพารามิเตอร์ H_1 H_2 D_1 D_2 B_1 และ B_2 ของแบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่

บทที่ 4

วิธีอสมการ (The method of inequalities)

วิธีการออกแบบมีองค์ประกอบพื้นฐาน 2 ส่วน คือ

1. การกำหนดรูปแบบ (Formulation) ของปัญหาการออกแบบให้อยู่ในรูปของปัญหาทางคณิตศาสตร์

2. การหาคำตอบของปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดขึ้นซึ่งสามารถทำได้ในทางปฏิบัติ คำตอบของปัญหาดังกล่าวจะเป็นคำตอบของการออกแบบ (Design solution)

ทั้งนี้วิธีการออกแบบที่ดีควรสามารถหาคำตอบของการออกแบบที่ทำให้ผู้ออกแบบบรรลุถึงเป้าหมายที่ต้องการในการออกแบบได้อย่างแม่นยำและสมจริง

โดยทั่วไปข้อกำหนดในการออกแบบ (Design requirements) มักเป็นเงื่อนไขที่เขียนอยู่ในรูปของอสมการ (Inequalities) และเนื่องจากปัญหาการออกแบบที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective) จำนวนเงื่อนไขดังกล่าวจึงมีหลายเงื่อนไข

ด้วยเหตุนี้ Zakian และ Al-Naib [21] จึงเสนอวิธีอสมการซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่กำหนดรูปแบบ (Formulate) ปัญหาการออกแบบในรูปของอสมการ

$$\Phi_i(p) \leq C_i \quad \text{สำหรับ } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.1)$$

โดยที่ p คือ พารามิเตอร์ในการออกแบบ (p_1, p_2, \dots, p_n) ค่าจำนวนจริง $\Phi_i(p)$ แสดงถึงพฤติกรรมหรือลักษณะสมบัติในแง่หนึ่งๆ ของระบบที่ออกแบบ และค่าขอบเขต C_i คือ ค่ามากที่สุดของ $\Phi_i(p)$ ที่ยอมรับ ค่า $p \in R^n$ ที่สอดคล้องกับอสมการ (4.1) จะเป็นคำตอบของการออกแบบ

ในทางปฏิบัติคำตอบของอสมการ (4.1) สามารถได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงเลข (Numerical algorithm) ดังนั้นการคำนวณที่ซับซ้อนและยุ่งยากต่างๆ เป็นหน้าที่ของคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้ผู้ออกแบบสามารถใส่ใจกับการกำหนดรูปแบบปัญหาการออกแบบได้อย่างเต็มที่โดยไม่ต้องพะวงกับปัญหาการคำนวณ เห็นได้ชัดว่าการออกแบบที่ดีขึ้นอยู่กับข้อกำหนดรูปแบบปัญหาการออกแบบนั้นคือ ขึ้นอยู่กับการเลือกอสมการ $\Phi_i(p) \leq C_i$ ที่เหมาะสมมาใช้ในการออกแบบ

4.1 ขั้นตอนในการออกแบบระบบควบคุม

อสมการ (4.1) แสดงถึงสมรรถนะของระบบที่ได้กำหนดไว้ และเงื่อนไขข้อจำกัด (Constraints) ทางกายภาพของระบบต่างๆ องค์ประกอบของเวกเตอร์ p แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเชิงพลวัต เช่น อัตราขยายของตัวควบคุม หรือเป็นค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองของโรงไฟฟ้าก็ได้

กำหนดให้เซต S_i และ S เป็นเซตของจุด $p \in R^n$ ที่สอดคล้องกับอสมการ $\Phi_i(p) \leq C_i$ และอสมการ (4.1) ตามลำดับ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$S_i = \{p : \Phi_i(p) \leq C_i\} \quad (4.2)$$

$$S = \bigcap_{i=1}^m S_i \quad (4.3)$$

โดยที่ p คือจุดในปริภูมิ R^n ซึ่งมีพิกัดของจุดในปริภูมินี้คือ (p_1, p_2, \dots, p_n) และขอบเขตของ S_i ถูกกำหนดโดย $\Phi_i(p) = C_i$ จะเห็นได้ว่า p สอดคล้องกับอสมการทั้งหมดก็ต่อเมื่อ p อยู่ใน S ดังนั้นจะเรียก S ว่าเป็นเซตที่ยอมรับได้ (Admissible set) และทุกๆ p ในเซต S ว่าเป็นจุดที่ยอมรับได้ (Admissible point)

ถ้าในกรณีที่ S เป็นเซตว่างแต่การอินเตอร์เซกชัน S^* ของ S_i บางเซตที่ไม่เป็นเซตว่าง อาจหาคำตอบโดยประมาณซึ่งก็คือเวกเตอร์ p ที่อยู่ในเซต S^* นั้นเอง

ดังนั้นการแก้ปัญหาการออกแบบคือการหาเวกเตอร์ p ที่สอดคล้องกับอสมการทั้งหมด สามารถทำได้โดยการค้นหาค่า p จากค่าเริ่มต้นที่กำหนดไว้ไปยังจุด p ที่อยู่ในเซตที่ยอมรับได้ S เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขต (Moving boundaries process, MBP) [21, 25] โดยแต่ละขั้นของการเคลื่อนย้ายแต่ละครั้งจะต้องมีการคำนวณจุดทดสอบขึ้นมาเพื่อทดสอบว่า จุดทดสอบนี้สามารถใช้เป็นจุดต่อไปในการเคลื่อนย้ายได้หรือไม่ และเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการคำนวณหาจุดทดสอบ ทั้งสองกระบวนการที่กล่าวมานั้นมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขต (Moving boundaries process)

การหาคำตอบของอสมการ (4.1) ใช้วิธีการค้นหาเชิงเลขแบบวนซ้ำ (Iterative numerical search method) โดยค้นหาจากจุดเริ่มต้นใดๆ $p^0 \in R^n$ ไปยังจุดที่ยอมรับได้และให้ p^k เป็นค่าของ p ในการเคลื่อนย้ายครั้งที่ k

ในการเคลื่อนย้ายจากจุด p^k ไปยังจุดทดสอบ \tilde{p}^k ถ้าจุดทดสอบ \tilde{p}^k ประสบความสำเร็จแล้วจะยอมรับ \tilde{p}^k ให้เป็นจุดเริ่มต้นใหม่ในการค้นหา p^{k+1} ต่อไป มิฉะนั้นก็จะสร้างจุดทดสอบ \tilde{p}^k ขึ้นมาใหม่จากกระบวนการคำนวณหาจุดทดสอบ

Zakian และ Al-Naib [21] ให้นิยามของการประสบความสำเร็จที่ใช้ในกระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขต ดังนี้

จุดทดสอบ \tilde{p}^k จะประสบความสำเร็จ ถ้า สำหรับทุกค่า $i = 1, 2, \dots, m$

$$\Phi_i(\tilde{p}^k) \leq \begin{cases} C_i & \text{ในกรณีที่ } \Phi_i(p^k) \leq C_i \\ \Phi_i(p^k) & \text{ในกรณีที่ } \Phi_i(p^k) > C_i \end{cases}$$

กำหนดให้เซต S_i^k เป็นเซตของจุด $p \in R^n$ ที่สอดคล้องกับอสมการ $\Phi_i(p) \leq C_i^k$ และเซต S^k เป็นอินเตอร์เซกชันของทุกๆ เซต S_i^k ในการเคลื่อนย้ายครั้งที่ k โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$S_i^k = \{p : \Phi_i(p) \leq C_i^k\} \quad (4.4)$$

$$S^k = \bigcap_{i=1}^m S_i^k \quad (4.5)$$

โดยที่ขอบเขตของ S_i ถูกกำหนดโดย $\Phi_i(p) = C_i^k$ และ C_i^k มีค่าเท่ากับ C_i ในกรณีที่ $\Phi_i(p^k) \leq C_i$ และ $\Phi_i(p^k) > C_i$ ในกรณีที่

หลังจากทำการค้นหาซ้ำจนขอบเขตของ S_i^k อยู่ภายในหรือซ้อนทับกับขอบเขตของ S_i สำหรับทุกค่า $i = 1, 2, \dots, m$ แล้ว จะได้ว่าปัญหาการออกแบบระบบที่มีเงื่อนไขเป็นอสมการนั้นสามารถแก้ไขได้โดยมีคำตอบของปัญหาคือ $p = p^k$ ตัวสุดท้ายที่ได้จากกระบวนการค้นหาแบบวนซ้ำ

4.1.2 กระบวนการคำนวณหาจุดทดสอบ

กระบวนการคำนวณหาจุดทดสอบ \tilde{p}^k นั้นจะใช้กระบวนการของ Rosenbrock [26] กำหนดให้ v_i^j ที่ $i = 1, 2, \dots, n$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และให้ e_i เป็นจำนวนจริงที่เกี่ยวข้องกับ v_i^j โดยที่

$$\tilde{p}^k = p^k + e_i v_i^j \quad (4.6)$$

การเริ่มต้นของกระบวนการที่ค่า $j = 0$ ค่าของ e_i และ v_i^j จะถูกเลือกอย่างไม่เจาะจง ถ้าจุดทดสอบ \tilde{p}^k ไม่ใช่จุดที่ประสบความสำเร็จจะแทน e_i ด้วย βe_i โดยที่ $-1 < \beta < 0$ ถ้าจุด \tilde{p}^k ไม่เป็นจุดที่ประสบความสำเร็จแล้วจะแทน e_i ด้วย αe_i โดยที่ $\alpha > 1$ จาก Zakian และ Al-Naib [21] แนะนำให้ใช้ค่า $\alpha = 3$ และ $\beta = -0.5$ โดยที่ในทั้งสองกรณีค่า i จะถูกแทนด้วย $i+1$ และเมื่อค่า $i = n$ จะให้ค่า $i+1 = 1$ ถ้ามีจุดทดสอบที่สำเร็จตามด้วยจุดทดสอบที่ไม่สำเร็จเกิดขึ้นในทุกๆค่า $i = 1, 2, \dots, n$ แล้ว v_i^j จะถูกแทนที่ด้วย v_i^{j+1} ที่ทุกๆค่า $i = 1, 2, \dots, n$ โดยที่เวกเตอร์ v_i^{j+1} หาได้จากกระบวนการดังนี้

กำหนดให้ d_i มีค่าเท่ากับผลรวมของ e_i ที่ทุกๆการทดสอบที่สำเร็จในการดำเนินการที่ j และกำหนดให้

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= d_1 v_1^j + d_2 v_2^j + \dots + d_n v_n^j \\ a_2 &= d_2 v_2^j + \dots + d_n v_n^j \\ &\vdots \\ a_n &= d_n v_n^j \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

และทำให้ a_i ตั้งฉากซึ่งกันและกันโดยใช้กระบวนการ Gram-Schmidt [27] ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= a_1 \\ v_1^{j+1} &= \frac{b_1}{\|b_1\|} \\ b_2 &= a_2 - \langle a_2, v_1^{j+1} \rangle \cdot v_1^{j+1} \\ v_2^{j+1} &= \frac{b_2}{\|b_2\|} \\ &\vdots \\ b_n &= a_n - \sum_{k=1}^{n-1} \langle a_n, v_k^{j+1} \rangle \cdot v_k^{j+1} \\ v_n^{j+1} &= \frac{b_n}{\|b_n\|} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

4.2 ขั้นตอนในการออกแบบระบบและทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

การออกแบบระบบควบคุมและระบบพลวัต ฟังก์ชัน $\Phi_i(p)$ ที่ใช้เป็นฟังก์ชันหลัก (Principal) จะเกี่ยวข้องกับผลตอบทางเวลาของระบบ เช่น Maximum overshoot Rise time และ Settling time ซึ่งมีโอกาสมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) ได้สำหรับบางค่าของ $p \in R^n$ ด้วยเหตุนี้เราพบว่าในการหาคำตอบของสมการ (4.1) ด้วยวิธีเชิงเลขนั้น คอมพิวเตอร์มีความยากลำบากในการคำนวณ ณ จุด $p \in R^n$ ที่ $\Phi_i(p) = \infty$ สำหรับบางค่า i ส่งผลให้ในการหาคำตอบด้วยวิธีเชิงเลขจำเป็นต้องทำการคำนวณในบริเวณที่ $\Phi_i(p) < \infty$ สำหรับทุกค่า i เท่านั้น

ในการออกแบบระบบควบคุมพบว่าเงื่อนไข $\Phi_i(p) < \infty$ สำหรับทุกค่า i มักสามารถแทนได้ด้วยเงื่อนไขที่ระบบวงปิดมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (Asymptotic stability) ดังนั้นในการหาคำตอบของสมการ (4.1) ด้วยวิธีเชิงเลขจึงมักเรียกกระบวนการหาค่าเริ่มต้น p^0 ที่ทำให้ $\Phi_i(p^0) < \infty$ สำหรับทุกค่า i ว่าเป็นกระบวนการทำให้ระบบมีเสถียรภาพ (Stabilization process)

การคำนวณค่า p ที่สอดคล้องกับ $\Phi_i(p) < \infty$ สำหรับทุกค่า i ด้วยระเบียบวิธีเชิงเลข (Numerical method) โดยเริ่มต้นจากจุด $p \in R^n$ ใดๆ ไม่สามารถทำได้โดยอาศัยฟังก์ชัน Φ_i แต่อย่างใด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแทนเงื่อนไข $\Phi_i(p) < \infty$ สำหรับทุกค่า i ด้วย

$$\Phi_0(p) < 0 \quad (4.9)$$

โดยที่ $\Phi_0(p)$ มีค่าจำกัด ($\Phi_0(p) < \infty$) เสมอสำหรับ $p \in R^n$ ใดๆ และ $\Phi_0(p)$ สามารถคำนวณได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับระบบที่เขียนในรูปฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer function)

$$\Phi_0(p) \triangleq \max_i \operatorname{Re} \lambda_i \quad (4.10)$$

โดยที่ λ_i คือ pole ของระบบวงปิด หรือรากของสมการลักษณะสมบัติ (Characteristic equation) และเรียก $\Phi_0(p)$ ว่า พิกัดเสถียรภาพ (Abcissa of stability) ของสมการลักษณะสมบัติ

สำหรับระบบที่เขียนอยู่ในรูปสมการสถานะ (State equation)

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + f(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

ฟังก์ชัน Φ_0 ที่ใช้ก็คือ

$$\Phi_0(p) \triangleq \max_i \operatorname{Re} \lambda_i(A) \quad (4.12)$$

โดยที่ λ_i เป็นค่าไอเกน (Eigenvalue) ของ A และเรียก $\Phi_0(p)$ ว่า พิกัดสเปกตรัม (Spectral abscissa) ของ A

Zakian และ Al-Naib [21] เสนอให้หาคำตอบของสมการ $\Phi_i(p) \leq C_i$ ($i = 1, 2, \dots, m$) ออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนนี้ทำการหาจุด p ที่ทำให้ $\Phi_i(p) < \infty$ สำหรับทุกค่า i ซึ่งทำได้โดยการหาคำตอบของการออกแบบโดยหาคำตอบของสมการ

$$\Phi_0(p) \leq -\varepsilon_0 \quad \text{โดยที่ } 0 < \varepsilon_0 \ll 1$$

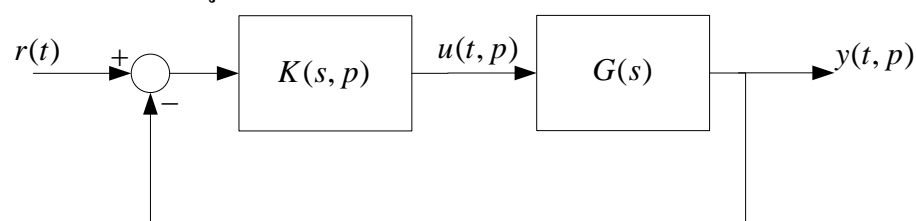
ซึ่งแสดงถึงการมีเสถียรภาพของระบบ และคำตอบที่ได้ของค่า p จะใช้เป็นค่าเริ่มต้น p^0 ขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนนี้ทำการหาคำตอบของการออกแบบระบบโดยเพิ่มเงื่อนไขในการทำให้ระบบมีเสถียรภาพรวมกับเงื่อนไขของการออกแบบที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นจะได้ว่าเงื่อนไขทั้งหมดที่นำมาพิจารณามีดังนี้ $\Phi_0(p) \leq -\varepsilon_0$ โดยที่ $0 < \varepsilon_0 \ll 1$ และ $\Phi_i(p) \leq C_i$ สำหรับ $i = 1, 2, \dots, m$ และคำตอบที่ได้ของค่า p นั้นจะเป็นคำตอบของสมการ

4.3 ตัวอย่างการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอสมการ

พิจารณาระบบดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

โดยพารามิเตอร์ต่างๆของระบบเป็นดังนี้

$$G(s) = \frac{10}{s(s+1)(s+5)}$$

$$K(s, p) = \frac{p_1(1+p_2s)}{1+p_2p_3s}$$

$$R(s) = \frac{1}{s}$$

$$0.01 \leq p_1 \leq 100$$

$$0 \leq p_2 \leq 20$$

$$0.01 \leq p_3 \leq 100$$

ในการที่ระบบควบคุมจะมีผลตอบเชิงพลวัตที่ดีนั้นมีความต้องการในการออกแบบแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ความต้องการเกี่ยวกับผลตอบของระบบ คือ ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของ $y(t)$ มีค่าน้อยเพียงพอ
2. ความต้องการเกี่ยวกับสัญญาณควบคุม คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของ $|u(t)|$ และ $|\dot{u}(t)|$ มีค่าน้อยเพียงพอ เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณควบคุมมีขนาดใหญ่เกินไปมิฉะนั้นอุปกรณ์บางตัว เช่น ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) อาจมีการอึดตัว

จากเงื่อนไขในการออกแบบข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นเซตของอสมการที่ใช้ในการออกแบบได้ดังนี้

$$\Phi_1 = OS \text{ ของ } y(t) \leq C_1 \quad (4.13)$$

$$\Phi_2 = T_r \text{ ของ } y(t) \leq C_2 \quad (4.14)$$

$$\Phi_3 = T_s \text{ ของ } y(t) \leq C_3 \quad (4.15)$$

$$\Phi_4 = \max |u(t)| \leq C_4 \quad (4.16)$$

$$\Phi_5 = \max |\dot{u}(t)| \leq C_5 \quad (4.17)$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขในการออกแบบข้างต้น เห็นได้ชัดว่าการออกแบบโดยใช้หลักการควบคุมเหมาะสมที่สุด (Optimal control) ซึ่งเป็นการทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายที่อยู่ในรูปกำลังสอง (Quadratic objective function) มีค่าต่ำสุดนั้นไม่เหมาะสมต่อการนำมาแก้ปัญหานี้

การออกแบบที่ประสบความสำเร็จซึ่งได้จากการหาคำตอบของเซตของอสมการในอสมการที่ (4.13) ถึงอสมการที่ (4.17) โดยที่ค่าของเซต C_i เป็นดังตารางที่ 4.1 และ $p \in R^3$ คือพารามิเตอร์ของการออกแบบ โดยการใช้กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขตในการหาคำตอบของการออกแบบพบว่าคำตอบของการออกแบบคือ

$$p_1 = 0.6310$$

$$p_2 = 1.7463$$

$$p_3 = 0.0915$$

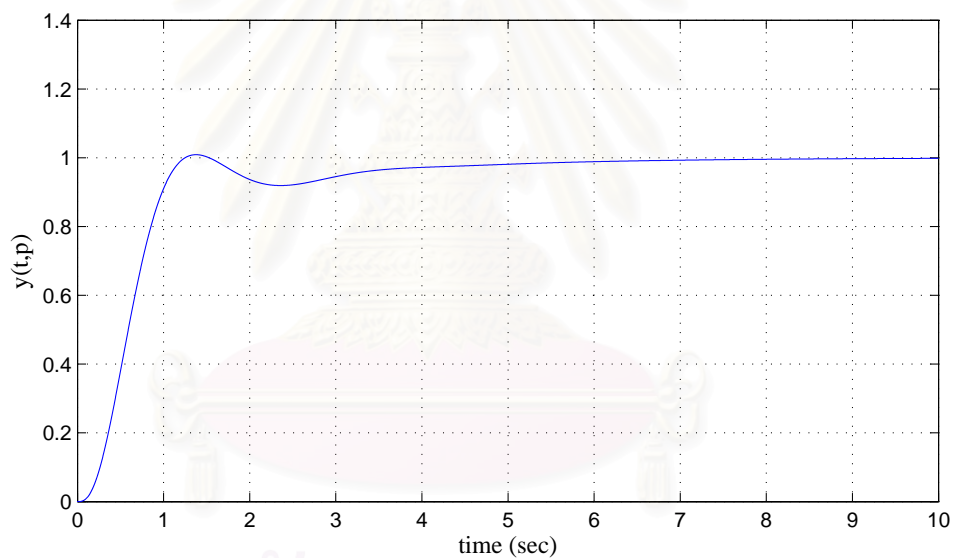
โดยที่ ค่า $\Phi_i(p)$ แสดงในตารางที่ 4.2 และผลตอบของระบบเป็นดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 ข้อกำหนดในการออกแบบระบบตัวอย่างดังรูปที่ 4.2

ข้อกำหนดในการออกแบบระบบตัวอย่างดังรูปที่ 4.2		
$C_1 = 0.01$	$C_2 = 1 \text{ sec}$	$C_3 = 5 \text{ sec}$
$C_4 = 10$	$C_5 = 40$	

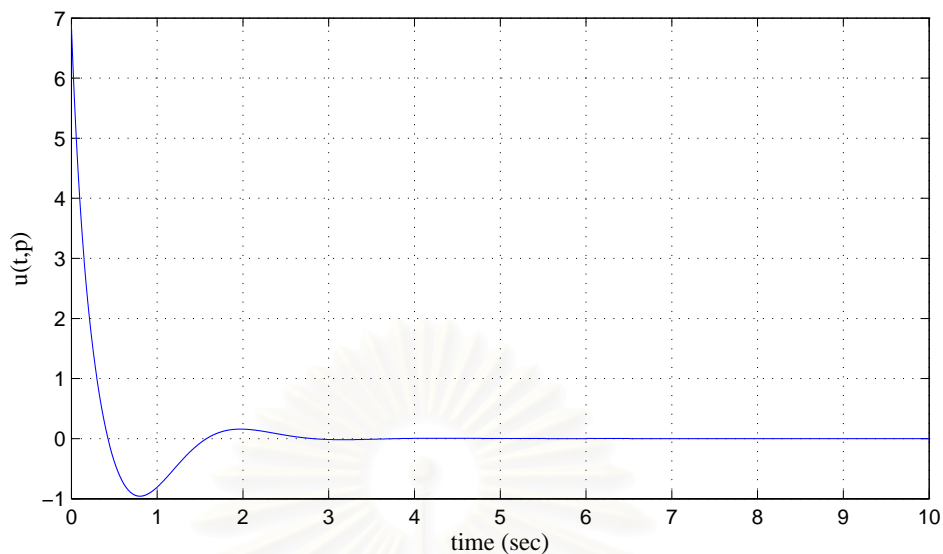
ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบระบบตัวอย่างดังรูปที่ 4.2

ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบระบบตัวอย่างดังรูปที่ 4.2		
$\Phi_1 = 0.0090$	$\Phi_2 = 0.9830 \text{ sec}$	$\Phi_3 = 4.8811 \text{ sec}$
$\Phi_4 = 6.8990$	$\Phi_5 = 39.1179$	

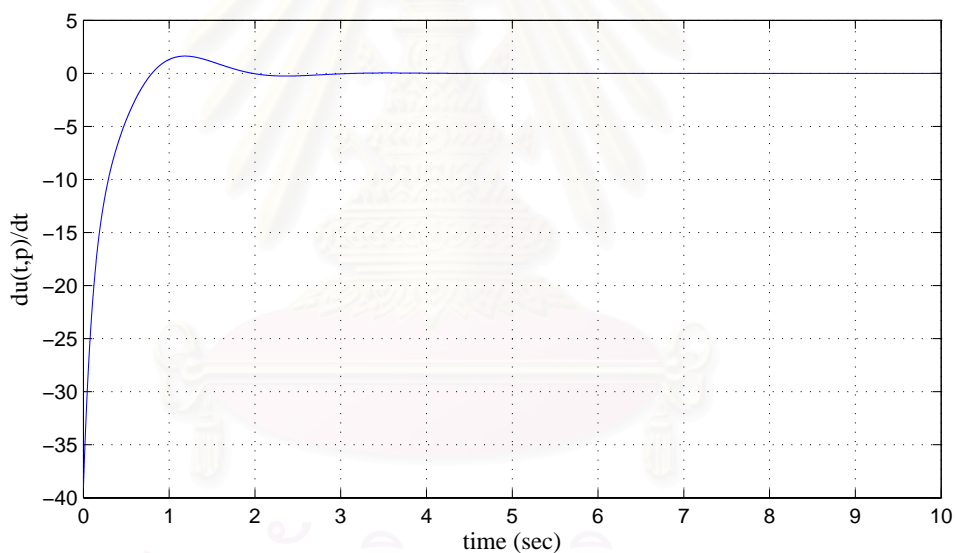


รูปที่ 4.2 ผลตอบ $y(t, p)$ ของระบบที่ได้จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอสมการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ผลตอบ $u(t, p)$ ของระบบที่ได้จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีสมการ



รูปที่ 4.4 ผลตอบ $\dot{u}(t, p)$ ของระบบที่ได้จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีสมการ

จากตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีสมการ พบว่าวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีสมการสามารถแก้ปัญหาการออกแบบที่มีหลายวัตถุประสงค์ได้อย่างเป็นระบบและสามารถยืนยันได้ว่าระบบที่ออกแบบนั้นจะสอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบทั้งหมด

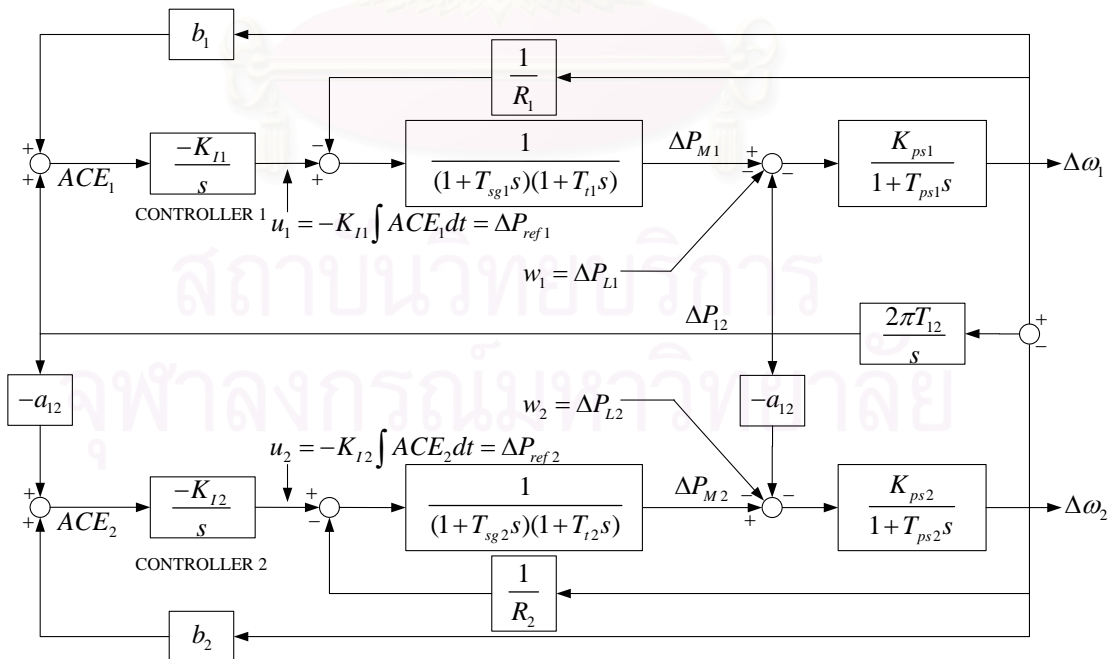
บทที่ 5

การประยุกต์ใช้วิธีอสมการในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC เปรียบเทียบกับระบบ AGC ที่ออกแบบด้วยวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด

บทนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธีอสมการมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC และนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ระบบเชิงพลวัตโดยใช้สมการสถานะ (State equation) ซึ่งเป็นหลักการขั้นพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบเชิงพลวัต โดยผลตอบของระบบที่ได้จากการออกแบบระบบ AGC ด้วยวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด (Optimal control) จะถูกใช้เป็นมาตรฐานหรือเป้าหมายในการออกแบบระบบ AGC ด้วยวิธีอสมการ โดยจุดประสงค์ของการออกแบบระบบ AGC ด้วยวิธีอสมการคือการทำให้ระบบมีผลตอบใกล้เคียงกับผลตอบของระบบ AGC ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) โดยตัวควบคุมที่ต้องใช้หลักการควบคุมแบบกระจาย (Decentralized control)

5.1 ระบบ AGC ที่ใช้ในการทดสอบ

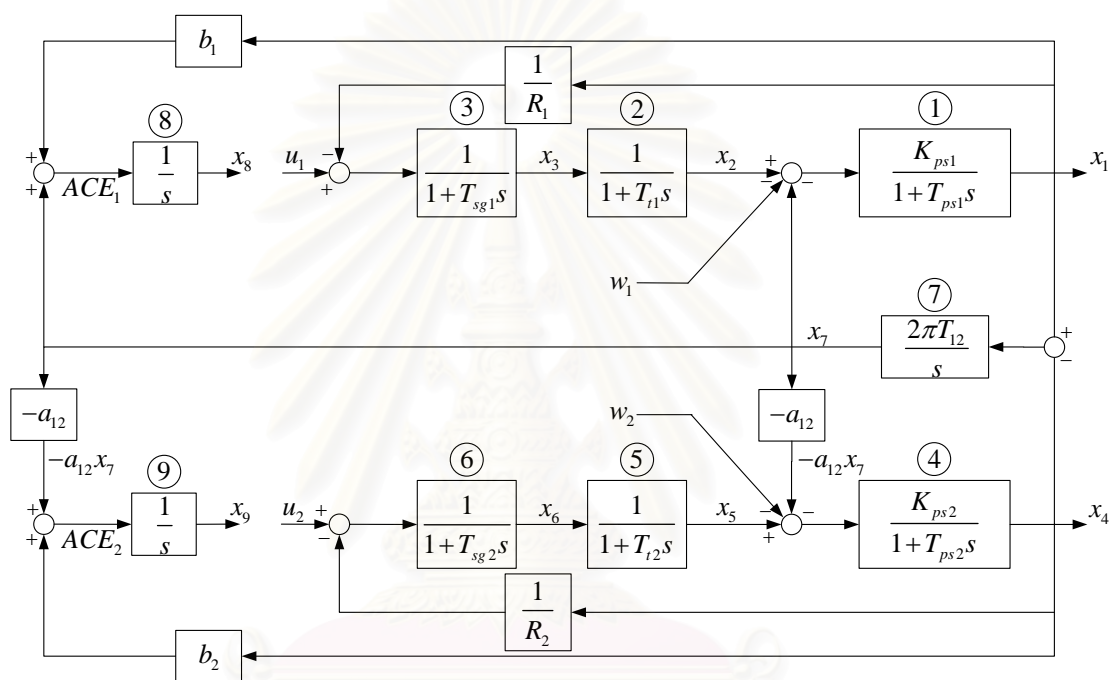
ระบบ AGC ที่ใช้ในการทดสอบนี้ นำมาจาก Kothari และ Nagrath [28] ซึ่งระบบที่ใช้จะ เป็นระบบ AGC ของระบบสองพื้นที่ที่เหมือนกันทุกประการดังรูปที่ 5.1 [28]



รูปที่ 5.1 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

5.2 การวิเคราะห์ระบบเชิงพลวัตโดยใช้สมการสถานะ

การวิเคราะห์ระบบ AGC โดยใช้สมการสถานะนั้นจะต้องมีการกำหนดตัวแปรสถานะลงในแบบจำลอง การสร้างแบบจำลองของตัวแปรสถานะ วงรอบการป้อนกลับของอินทิกรัลของ ACE จะถูกเปิดออกโดยค่าคงที่ทางเวลาและตัวแปรสถานะของระบบ AGC แสดงไว้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แบบจำลองสถานะของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่

ตามทฤษฎีการควบคุม ΔP_{ref1} และ ΔP_{ref2} จะทำหน้าที่เป็นสัญญาณควบคุม u_1 และ u_2 วิธีการควบคุมทั่วไปจะให้ u_1 และ u_2 ซึ่งได้มาจากการอินทิกรัลของ ACE_1 และ ACE_2 ตามลำดับ ในทฤษฎีการควบคุมสมัยใหม่ u_1 และ u_2 จะได้จากผลบวกเชิงเส้นของตัวแปรสถานะทั้งหมดซึ่งเรียกว่าการป้อนกลับสถานะแบบเต็ม (Full state feedback) ในการสร้างสมการสถานะนั้นทำได้โดยเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ที่สัมพันธ์กับแบบจำลองย่อยทั้งหมดในรูปที่ 5.2 ให้อยู่ในเทอมของตัวแปรสถานะของระบบได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \Delta\omega_1 & x_4 &= \Delta\omega_2 & x_8 &= \int ACE_1 dt \\
 x_2 &= \Delta P_{M1} & x_5 &= \Delta P_{M2} & x_9 &= \int ACE_2 dt \\
 u_1 &= \Delta P_{ref1} & u_2 &= \Delta P_{ref2} \\
 w_1 &= \Delta P_{L1} & w_2 &= \Delta P_{L2}
 \end{aligned}$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 1

$$\begin{aligned}x_1 + T_{ps1} \dot{x}_1 &= K_{ps1} (x_2 - x_7 - w_1) \\ \dot{x}_1 &= -\frac{1}{T_{ps1}} x_1 + \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} x_2 - \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} x_7 - \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} w_1\end{aligned}\quad (5.1)$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 2

$$\begin{aligned}x_2 + T_{t1} \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{T_{t1}} x_2 + \frac{1}{T_{t1}} x_3\end{aligned}\quad (5.2)$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 3

$$\begin{aligned}x_3 + T_{sg1} \dot{x}_3 &= -\frac{1}{R_1} x_1 + u_1 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{R_1 T_{sg1}} x_1 - \frac{1}{T_{sg1}} x_3 + \frac{1}{T_{sg1}} u_1\end{aligned}\quad (5.3)$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 4

$$\begin{aligned}x_4 + T_{ps2} \dot{x}_4 &= K_{ps2} (x_5 + a_{12} x_7 - w_2) \\ \dot{x}_4 &= -\frac{1}{T_{ps2}} x_4 + \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} x_5 + \frac{a_{12} K_{ps2}}{T_{ps2}} x_7 - \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} w_2\end{aligned}\quad (5.4)$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 5

$$\begin{aligned}x_5 + T_{t2} \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_5 &= -\frac{1}{T_{t2}} x_5 + \frac{1}{T_{t2}} x_6\end{aligned}\quad (5.5)$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 6

$$\begin{aligned}x_6 + T_{sg2} \dot{x}_6 &= -\frac{1}{R_2} x_4 + u_2 \\ \dot{x}_6 &= -\frac{1}{R_2 T_{sg2}} x_4 - \frac{1}{T_{sg2}} x_6 + \frac{1}{T_{sg2}} u_2\end{aligned}\quad (5.6)$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 7

$$\dot{x}_7 = 2\pi T_{12} x_1 - 2\pi T_{12} x_4 \quad (5.7)$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 8

$$\dot{x}_8 = b_1 x_1 + x_7 \quad (5.8)$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 9

$$\dot{x}_9 = b_2 x_4 + a_{12} x_7 \quad (5.9)$$

สมการทั้ง 9 สมการตั้งแต่สมการที่ (5.1) ถึงสมการที่ (5.9) สามารถนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ดังสมการ

$$\dot{x} = Ax + Bu + Fw \quad (5.10)$$

โดยที่ $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_9]^T$ คือ เวกเตอร์สถานะ (State vector) $u = [u_1 \ u_2]^T$ คือ เวกเตอร์ของการควบคุม (Control vector) $w = [w_1 \ w_2]^T$ คือ เวกเตอร์ของสัญญาณรบกวน (Disturbance vector) และเมตริกซ์ A B และ F เป็นดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{ps1}} & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{t1}} & \frac{1}{T_{t1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_1 T_{sg1}} & 0 & -\frac{1}{T_{sg1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ps2}} & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} & 0 & \frac{a_{12} K_{ps2}}{T_{ps2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{t2}} & \frac{1}{T_{t2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_2 T_{sg2}} & 0 & -\frac{1}{T_{sg2}} & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & -a_{12} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{sg1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{sg2}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F^T = \begin{bmatrix} -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

วิธีการควบคุมแบบทั่วไปดังรูปที่ 5.1 สัญญาณควบคุม u_1 และ u_2 ได้มาจากตัวแปรสถานะ x_8 และ x_9 ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$u_1 = -K_{i1} x_8 = -K_{i1} \int ACE_1 dt$$

$$u_2 = -K_{i2} x_9 = -K_{i2} \int ACE_2 dt$$

5.3 การออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด

ภายใต้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด (Optimal control) [28] นั้น สัญญาณควบคุม u_1 และ u_2 ได้มาจากการป้อนกลับของตัวแปรสถานะทั้งหมดของระบบ โดยที่ค่าคงที่ของการป้อนกลับสามารถหาได้จากเงื่อนไขความเหมาะสมที่สุด (Optimal criteria)

เมื่อพิจารณาสมการ (5.10) พบว่าแบบจำลองของเรานั้นยังไม่ได้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานของทฤษฎีการควบคุมเหมาะสมที่สุดดังสมการ

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.11)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าไม่มีพจน์ของสัญญาณ Fw ที่อยู่ในสมการ (5.10) มากไปกว่านั้นเวกเตอร์สัญญาณรบกวนที่มีค่าคงที่ w ควรจะต้องทำให้ตัวแปรสถานะและเวกเตอร์ของสัญญาณควบคุม u มีค่าคงที่ที่สถานะคงตัว ในขณะที่ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) ในวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุดนั้นตัวแปรสถานะและเวกเตอร์ควบคุมต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ที่สถานะคงตัวเพื่อที่จะทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าต่ำสุด

ในสถานะคงตัว ($\dot{x} = 0$) สมการ (5.10) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$0 = Ax_{ss} + Bu_{ss} + Fw \quad (5.12)$$

ให้ x และ u เกิดจากองค์ประกอบในสถานะชั่วขณะกับสถานะคงตัว ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$x = x' + x_{ss} \quad (5.13)$$

$$u = u' + u_{ss} \quad (5.14)$$

แทน x และ u จากสมการ (5.13) และสมการ (5.14) ลงในสมการ (5.10) จะได้

$$\dot{x}' = A(x' + x_{ss}) + B(u' + u_{ss}) + Fw \quad (5.15)$$

จากสมการ (5.12) จะได้ว่า

$$\dot{x}' = Ax' + Bu' \quad (5.16)$$

ในการป้อนกลับสถานะแบบเต็ม (Full state feedback) ของเวกเตอร์ควบคุม u จะได้จากผลบวกเชิงเส้นของตัวแปรสถานะทุกตัวซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$u = -Kx \quad (5.17)$$

โดยที่ K คือเมตริกซ์ของการป้อนกลับ (Feedback matrix)

เมื่อพิจารณา

$$u' + u_{ss} = -K(x' + x_{ss})$$

สำหรับระบบที่มีเสถียรภาพจะได้ว่า x' และ u' จะมีค่าเป็นศูนย์ที่สถานะคงตัว ดังนั้นจะได้ว่า

$$u_{ss} = -Kx_{ss} \quad (5.18)$$

และ

$$u' = -Kx' \quad (5.19)$$

พิจารณาระบบในรูปที่ 5.2 เมื่อมีสัญญาณรบกวนคงที่ w_1 และ w_2 จะได้ว่าที่สถานะคงตัว ตัวแปรสถานะต่างๆเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
x_{1ss} &= x_{4ss} = x_{7ss} = 0 \\
x_{2ss} &= x_{3ss} = w_1 \\
u_{1ss} &= w_1 \\
x_{5ss} &= x_{6ss} = w_2 \\
u_{2ss} &= w_2 \\
x_{8ss} &= \text{constant} \\
x_{9ss} &= \text{constant}
\end{aligned} \tag{5.20}$$

ค่าของ x_{8ss} และ x_{9ss} จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการป้อนกลับ และสามารถหาได้จากสมการในสถานะคงตัวดังนี้

$$\begin{aligned}
u_{1ss} &= k_{11}x_{1ss} + k_{12}x_{2ss} + \dots + k_{19}x_{9ss} = w_1 \\
u_{2ss} &= k_{21}x_{1ss} + k_{22}x_{2ss} + \dots + k_{29}x_{9ss} = w_2
\end{aligned}$$

เมตริกซ์ของการป้อนกลับ K ในสมการที่ (5.19) คือเมตริกซ์ที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าต่ำสุดในการเคลื่อนย้ายระบบจากสถานะเริ่มต้นใดๆ ($x'(0)$) ไปยังจุดกำเนิดในเวลาที่ไม่จำกัด ($x'(\infty) = 0$) โดยฟังก์ชันเป้าหมายทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบกำลังสองดังสมการ

$$PI = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x'^T Q x' + u'^T R u') dt \tag{5.21}$$

โดยที่ เมตริกซ์ Q และ R จะถูกกำหนดค่าให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. การเบี่ยงเบนของ ACE ในแต่ละพื้นที่รอบๆ ค่าที่สภาวะอยู่ตัว ($x'_7 + b_1 x'_1$ และ $-a_{12} x'_7 + b_2 x'_4$) มีค่าน้อยสุด ซึ่งโดยทั่วไปค่าที่สภาวะอยู่ตัวของ ACE ในแต่ละพื้นที่นั้นจะมีค่าเป็นศูนย์
2. การเบี่ยงเบนของ $\int ACE dt$ ในแต่ละพื้นที่รอบๆ ค่าที่สภาวะอยู่ตัว (x'_8 และ x'_9) มีค่าน้อยสุด ซึ่งโดยทั่วไปค่าที่สภาวะอยู่ตัวของ $\int ACE dt$ ในแต่ละพื้นที่นั้นจะเป็นค่าคงที่
3. การเบี่ยงเบนของเวกเตอร์ควบคุม (u'_1 และ u'_2) รอบๆ ค่าที่สภาวะอยู่ตัวมีค่าน้อยสุด ซึ่งโดยทั่วไปค่าที่สภาวะอยู่ตัวของเวกเตอร์ของการควบคุมจะเป็นค่าคงที่ การทำให้มีค่าต่ำสุดนี้ ชี้ดจำกัดของความพยายามในการควบคุมจะขึ้นอยู่กับสมรรถนะทางกายภาพต่างๆ ของระบบ

จากวัตถุประสงค์ของการออกแบบด้านบนจะสามารถเขียนฟังก์ชันเป้าหมายได้ดังนี้

$$PI = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [(x'_7 + b_1 x'_1)^2 + (-a_{12} x'_7 + b_2 x'_4)^2 + (x'_8 + x'_9)^2 + k(u'_1 + u'_2)^2] dt \tag{5.22}$$

จากฟังก์ชันเป้าหมายในสมการ (5.22) จะได้ว่าเมตริกซ์ Q และ R สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q = \begin{bmatrix} b_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_2^2 & 0 & 0 & -a_{12}b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & 0 & 0 & -a_{12}b_2 & 0 & 0 & (1+a_{12}^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = kI$$

การหาค่าของเมตริกซ์ของการป้อนกลับ K ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าต่ำสุดนั้นคือปัญหาพื้นฐานของการควบคุมเหมาะสมที่สุด (Standard optimal control problem) โดยค่า K นั้นจะหาได้จากการหาค่าตอบของสมการลดรูปของ Riccati (Reduced Riccati equation) ดังสมการ

$$A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q = 0 \quad (5.23)$$

$$K = R^{-1}B^T S \quad (5.24)$$

โดยค่าที่ข้อมรับได้ของเมตริกซ์ K ที่ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพอยู่

แทนสมการ (5.19) ลงในสมการ (5.16) จะได้ระบบเชิงพลวัตที่มีการป้อนกลับดังสมการ

$$\dot{x}' = (A - BK)x' \quad (5.25)$$

ในมุมมองทางด้านเสถียรภาพของระบบส่วนจริงของค่าไอเกน (Eigenvalue) ทั้งหมดของเมตริกซ์ $(A - BK)$ จะต้องมามีค่าเป็นลบจึงจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

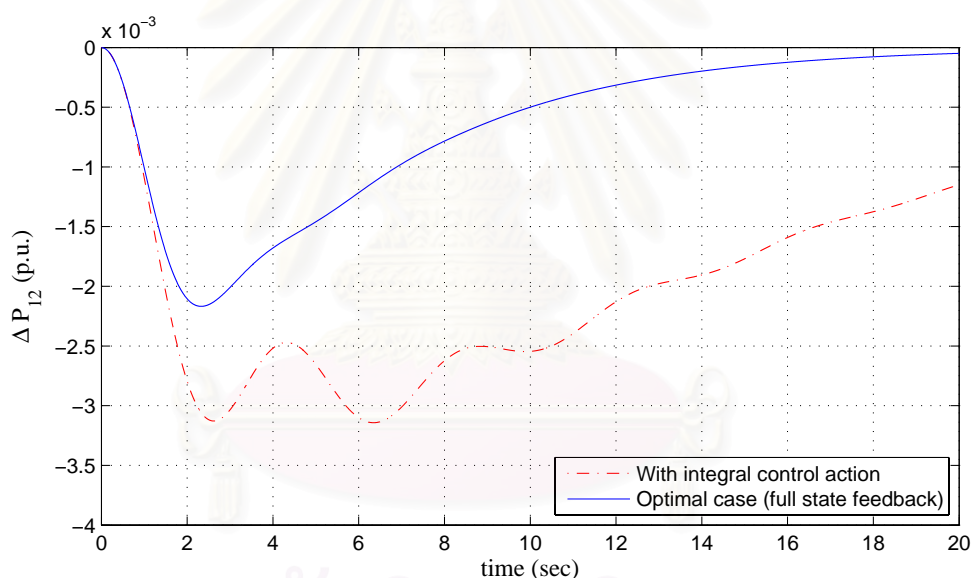
ในการออกแบบเราจะพิจารณาระบบ AGC ของระบบสองพื้นที่ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สอดคล้องกับระบบในรูปที่ 5.1 เป็นดังนี้

$$\begin{array}{lll} T_{sg} = 0.4 \text{ sec} & T_i = 0.5 \text{ sec} & T_{ps} = 20 \text{ sec} \\ R = 3 & K_{ps} = 1/B = 100 & b = 0.425 \\ K_i = 0.09 & a_{12} = 1 & 2\pi T_{12} = 0.05 \end{array}$$

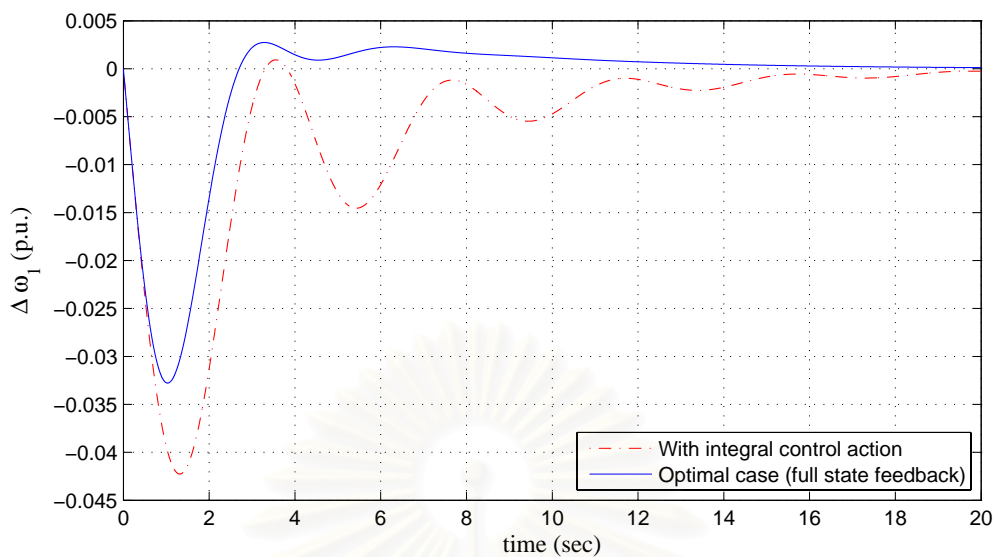
เมื่อใช้วิธีการออกแบบโดยใช้หลักการควบคุมเหมาะสมที่สุด (Optimal control) เมตริกซ์ K ซึ่งได้จากการหาค่าตอบเชิงเลขเป็นดังสมการที่ (5.26) โดยผลตอบของระบบที่มีตัวควบคุมเหมาะสมที่สุดแบบป้อนกลับสถานะแบบเต็ม (Full state feedback) กับผลตอบของระบบที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเท่านั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.9 ซึ่งเห็นได้ว่าระบบที่มีตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะแบบเต็ม (Full state feedback controller) มีสมรรถนะที่ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด แต่ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะแบบเต็มนั้นใช้หลักการควบคุมแบบรวมศูนย์ (Centralized control) กล่าวคือ ตัวควบคุมของระบบย่อยหนึ่งๆต้องการข้อมูลของระบบย่อย

อื่นๆด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถทำได้ยากและไม่นิยมใช้ถึงแม้ว่าผลตอบของระบบที่ออกแบบจะเป็นที่พึงพอใจก็ตาม

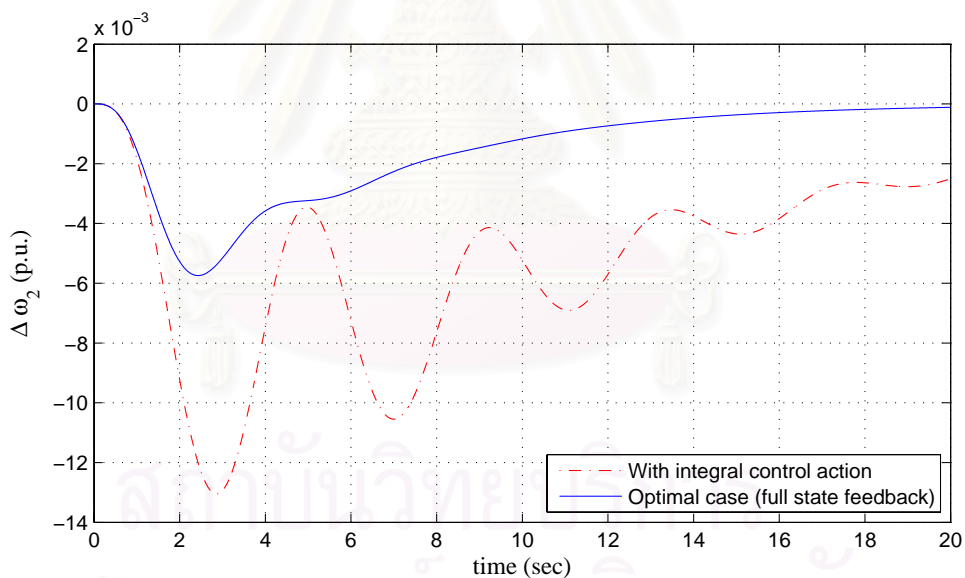
$$K^T = \begin{bmatrix} 0.5286 & -0.0046 \\ 1.1419 & -0.0211 \\ 0.6813 & -0.0100 \\ -0.0046 & 0.5286 \\ -0.0211 & 1.1419 \\ -0.0100 & 0.6813 \\ -0.7437 & 0.7437 \\ 0.9999 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.9999 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$



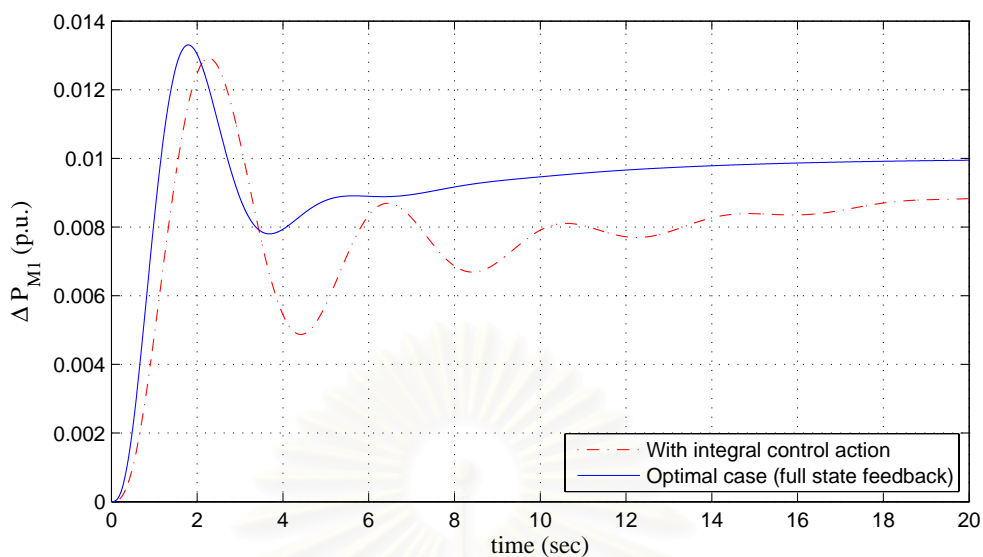
รูปที่ 5.3 ผลตอบ ΔP_{12} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และแบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล



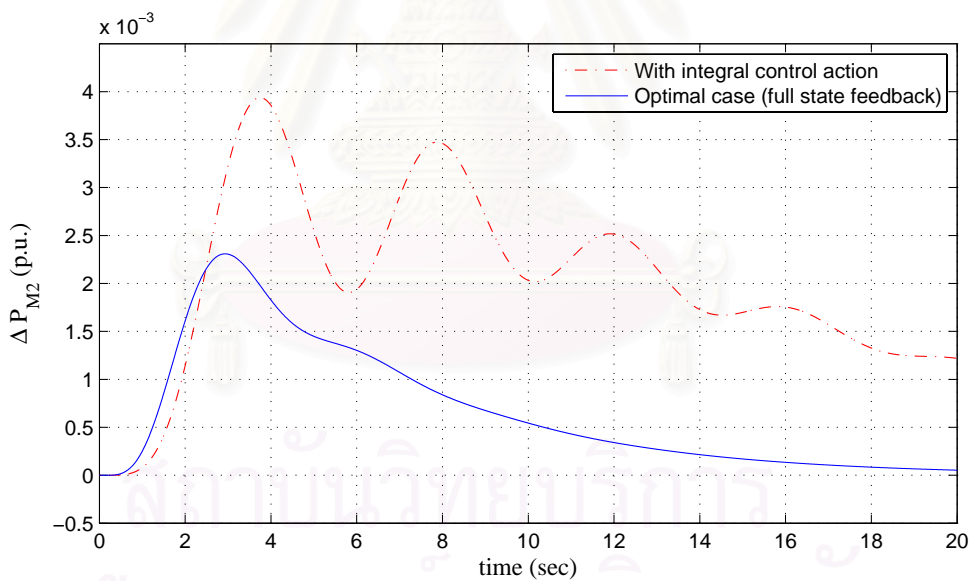
รูปที่ 5.4 ผลตอบ $\Delta\omega_1$ ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล



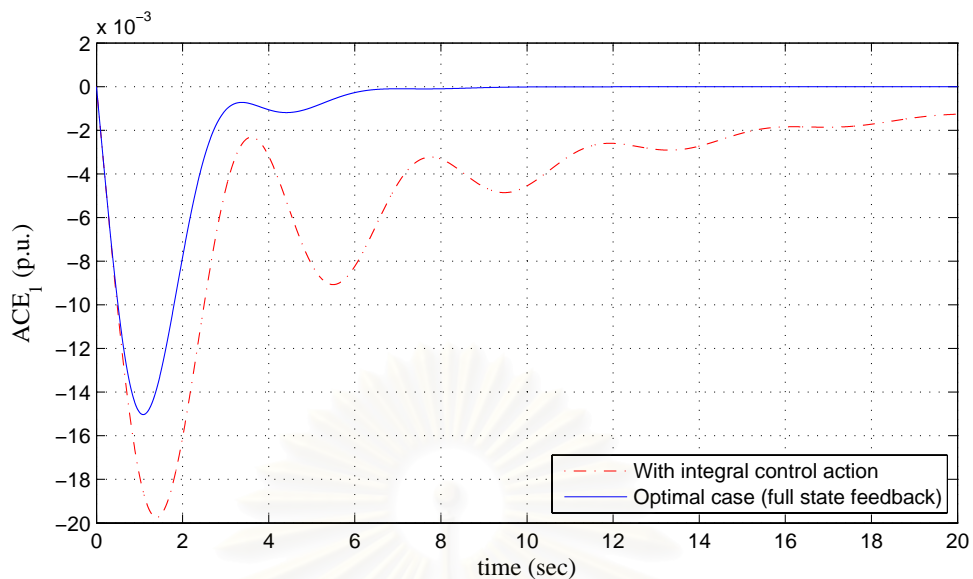
รูปที่ 5.5 ผลตอบ $\Delta\omega_2$ ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล



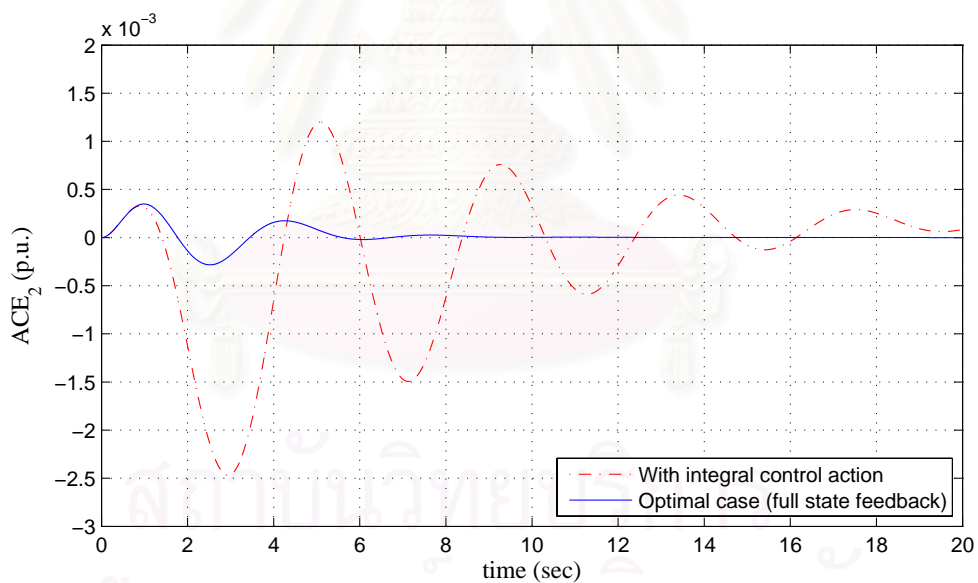
รูปที่ 5.6 ผลตอบ ΔP_{M1} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล



รูปที่ 5.7 ผลตอบ ΔP_{M2} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล



รูปที่ 5.8 ผลตอบ ACE_1 ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล



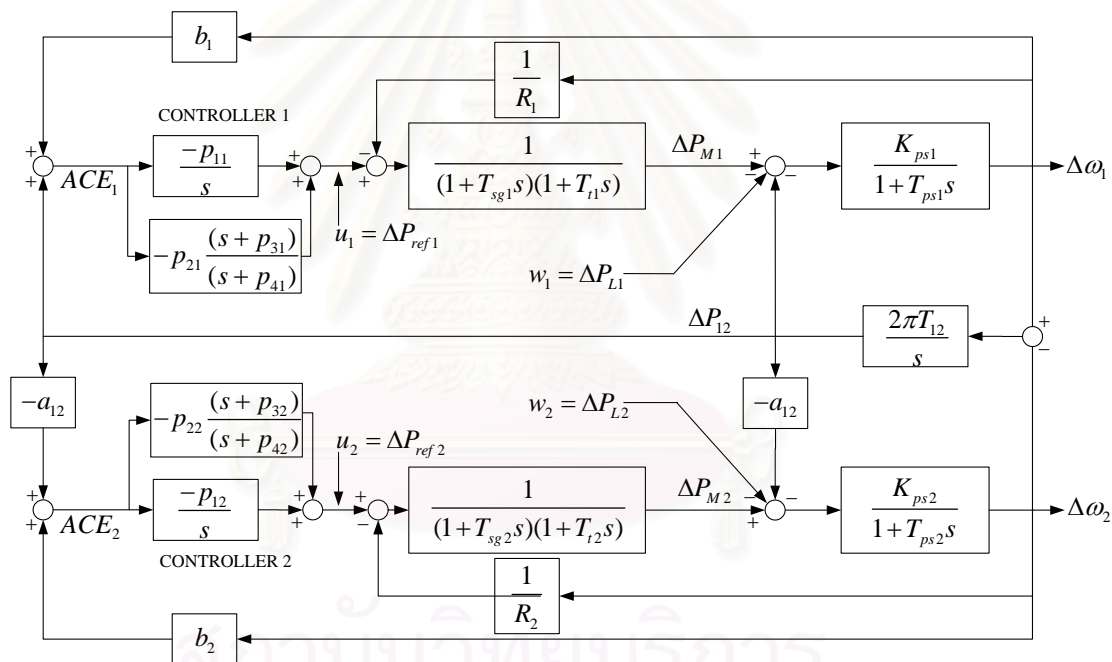
รูปที่ 5.9 ผลตอบ ACE_2 ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.1 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

5.4 การออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC โดยใช้วิธีสมการ

การออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อนี้จะใช้ระบบดังรูปที่ 5.1 โดยที่ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นตัวควบคุมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นซึ่งมีฟังก์ชัน โอนย้าย (Transfer function) เป็นดังสมการที่ (5.27) และสมการที่ (5.28) ซึ่งจะได้แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ ที่ใช้ในการออกแบบเป็นดังรูปที่ 5.10

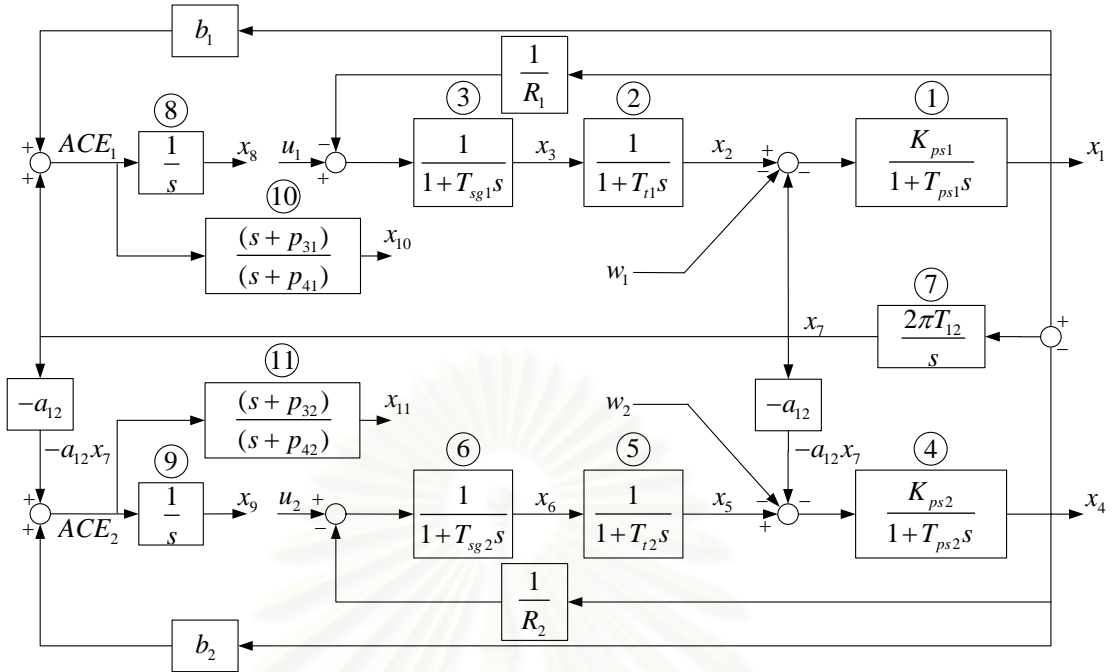
$$G_1(s) = \frac{-p_{11}}{s} - p_{21} \cdot \left(\frac{s + p_{31}}{s + p_{41}} \right) \tag{5.27}$$

$$G_2(s) = \frac{-p_{12}}{s} - p_{22} \cdot \left(\frac{s + p_{32}}{s + p_{42}} \right) \tag{5.28}$$



รูปที่ 5.10 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่

เนื่องจากเราเพิ่มความซับซ้อนของตัวควบคุมเราจะต้องเพิ่มจำนวนของตัวแปรสถานะ โดยที่แบบจำลองของตัวแปรสถานะของระบบ AGC เป็นดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แบบจำลองของตัวแปรสถานะของระบบ AGC

จากรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าตัวแปรสถานะที่เพิ่มขึ้นมาคือ x_{10} และ x_{11} ดังนั้นเราต้องปรับปรุงสมการสถานะโดยการเพิ่มสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้บรรยายพฤติกรรมของตัวแปรสถานะ x_{10} และ x_{11} ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 10

$$\dot{x}_{10} + p_{41}x_{10} = \dot{x}_7 + b_1\dot{x}_1 + p_{31}x_7 + b_1p_{31}x_1 \quad (5.29)$$

แทน \dot{x}_1 และ \dot{x}_7 จากสมการที่ (5.1) และสมการที่ (5.7) ลงในสมการที่ (5.29) จะได้

$$\dot{x}_{10} = 2\pi T_{12}x_1 - 2\pi T_{12}x_4 - \frac{b_1}{T_{ps1}}x_1 + \frac{b_1K_{ps1}}{T_{ps1}}x_2 - \frac{b_1K_{ps1}}{T_{ps1}}x_7 \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} & - \frac{b_1K_{ps1}}{T_{ps1}}w_1 + p_{31}x_7 + b_1p_{31}x_1 - p_{41}x_{10} \\ \dot{x}_{10} = & (2\pi T_{12} - \frac{b_1}{T_{ps1}} + b_1p_{31})x_1 + \frac{b_1K_{ps1}}{T_{ps1}}x_2 - 2\pi T_{12}x_4 + (p_{31} - \frac{b_1K_{ps1}}{T_{ps1}})x_7 \\ & - p_{41}x_{10} - \frac{b_1K_{ps1}}{T_{ps1}}w_1 \end{aligned} \quad (5.31)$$

สำหรับแบบจำลองย่อยที่ 11

$$\dot{x}_{11} + p_{42}x_{11} = -a_{12}\dot{x}_7 + b_2\dot{x}_4 - a_{12}p_{32}x_7 + b_2p_{32}x_4 \quad (5.32)$$

แทน \dot{x}_4 และ \dot{x}_7 จากสมการที่ (5.4) และสมการที่ (5.7) ลงในสมการที่ (5.32) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{x}_{11} = & -2\pi T_{12} a_{12} x_1 + 2\pi T_{12} a_{12} x_4 - \frac{b_2}{T_{ps2}} x_4 + \frac{b_2 K_{ps2}}{T_{ps2}} x_5 + \frac{a_{12} b_2 K_{ps2}}{T_{ps2}} x_7 \\ & - \frac{b_2 K_{ps2}}{T_{ps2}} w_2 - a_{12} p_{32} x_7 + b_2 p_{32} x_4 - p_{42} x_{11} \end{aligned} \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{11} = & -2\pi T_{12} a_{12} x_1 + (2\pi T_{12} a_{12} - \frac{b_2}{T_{ps2}} + b_2 p_{32}) x_4 + \frac{b_2 K_{ps2}}{T_{ps2}} x_5 \\ & + (\frac{a_{12} b_2 K_{ps2}}{T_{ps2}} - a_{12} p_{32}) x_7 - p_{42} x_{11} - \frac{b_2 K_{ps2}}{T_{ps2}} w_2 \end{aligned} \quad (5.34)$$

สมการทั้ง 11 สมการตั้งแต่สมการที่ (5.1) ถึงสมการที่ (5.9) รวมกับสมการที่ (5.31) และสมการที่ (5.34) สามารถนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ดังสมการ

$$\dot{x} = Ax + Bu + Fw \quad (5.35)$$

โดยที่ $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{11}]^T$ คือ เวกเตอร์สถานะ (State vector) $u = [u_1 \ u_2]^T$ คือ เวกเตอร์ของการควบคุม (Control vector) $w = [w_1 \ w_2]^T$ คือ เวกเตอร์ของสัญญาณรบกวน (Disturbance vector) และเมตริกซ์ A B และ F เป็นดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{ps1}} & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{t1}} & \frac{1}{T_{t1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_1 T_{sg1}} & 0 & -\frac{1}{T_{sg1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ps2}} & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} & 0 & \frac{a_{12} K_{ps2}}{T_{ps2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{t2}} & \frac{1}{T_{t2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_2 T_{sg2}} & 0 & -\frac{1}{T_{sg2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & -a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{10,1} & \frac{b_1 K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & A_{10,7} & 0 & 0 & -p_{41} & 0 \\ -2\pi T_{12} a_{12} & 0 & 0 & A_{11,4} & \frac{b_2 K_{ps2}}{T_{ps2}} & 0 & A_{11,7} & 0 & 0 & 0 & -p_{42} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad A_{10,1} &= 2\pi T_{12} - \frac{b_1}{T_{ps1}} + b_1 p_{31} & A_{10,7} &= p_{31} - \frac{b_1 K_{ps1}}{T_{ps1}} \\ A_{11,4} &= 2\pi T_{12} a_{12} - \frac{b_2}{T_{ps2}} + b_2 p_{32} & A_{11,7} &= \frac{a_{12} b_2 K_{ps2}}{T_{ps2}} - a_{12} p_{32} \end{aligned}$$

$$B^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{sg1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{sg2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F^T = \begin{bmatrix} -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{b_1 K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{b_2 K_{ps2}}{T_{ps2}} \end{bmatrix}$$

วิธีการควบคุมแบบทั่วไป จากรูปที่ 5.11 สัญญาณควบคุม u_1 ได้มาจากตัวแปรสถานะ x_8 กับ x_{10} และ u_2 ได้มาจากตัวแปรสถานะ x_9 กับ x_{11} ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$u_1 = -p_{11}x_8 - p_{21}x_{10}$$

$$u_2 = -p_{12}x_9 - p_{22}x_{11}$$

ซึ่งสามารถจัดรูปแบบได้ดังสมการที่ (5.17) โดยที่เมตริกซ์ของการป้อนกลับ K เป็นดังสมการ

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11} & 0 & p_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{12} & 0 & p_{22} \end{bmatrix}$$

จากผลตอบของวิธีการออกแบบตัวควบคุมเหมาะสมที่สุดพบว่าตัวควบคุมในแต่ละพื้นที่ควบคุมในระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ ตัวควบคุมในแต่ละพื้นที่ควรมีลักษณะเหมือนกันทุกประการด้วย ดังนั้นจะได้ว่า

$$p_{11} = p_{12}$$

$$p_{21} = p_{22}$$

$$p_{31} = p_{32}$$

$$p_{41} = p_{42}$$

ดังนั้นจะได้ว่าเมตริกซ์ของการป้อนกลับ K สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11} & 0 & p_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11} & 0 & p_{21} \end{bmatrix}$$

โดยจุดประสงค์ของการออกแบบระบบ AGC ด้วยวิธีอสมการคือการทำให้ระบบมีผลตอบใกล้เคียงกับผลตอบของระบบ AGC ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุดในมุมมองของค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) โดยตัวควบคุมที่ใช้ต้องใช้หลักการควบคุมแบบกระจาย (Decentralized control) ซึ่งสามารถเขียนเป็นเซตของอสมการได้ดังนี้

$$\Phi_1 = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_1(t_i) - x_{1_{opt}}(t_i))^2} \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_1 \quad (5.36)$$

$$\Phi_2 = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_2(t_i) - x_{2_{opt}}(t_i))^2} \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_2 \quad (5.37)$$

$$\Phi_3 = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_3(t_i) - x_{3_{opt}}(t_i))^2} \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_3 \quad (5.38)$$

$$\Phi_4 = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_4(t_i) - x_{4_{opt}}(t_i))^2} \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_4 \quad (5.39)$$

$$\Phi_5 = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_5(t_i) - x_{5_{opt}}(t_i))^2} \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_5 \quad (5.40)$$

$$\Phi_6 = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_6(t_i) - x_{6_{opt}}(t_i))^2} \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_6 \quad (5.41)$$

$$\Phi_7 = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_7(t_i) - x_{7_{opt}}(t_i))^2} \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_7 \quad (5.42)$$

$$\Phi_8 = OS \text{ ของ } x_2 \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_1 \quad (5.43)$$

$$\Phi_9 = T_r \text{ ของ } x_2 \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_1 \quad (5.44)$$

$$\Phi_{10} = T_s \text{ ของ } x_2 \text{ เมื่อ } w_1 = 0.01 \text{ p.u. และ } w_2 = 0 \text{ p.u.} \leq C_1 \quad (5.45)$$

การออกแบบตัวควบคุมแบบอินทิกรัลในแต่ละพื้นที่ควบคุมโดยฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเป็นดังสมการที่ (5.46) และสมการที่ (5.47)

$$G_1(s) = \frac{-p_{11}}{s} - p_{21} \cdot \left(\frac{s + p_{31}}{s + p_{41}} \right) \quad (5.46)$$

$$G_2(s) = \frac{-p_{11}}{s} - p_{21} \cdot \left(\frac{s + p_{31}}{s + p_{41}} \right) \quad (5.47)$$

ในการออกแบบที่ประสบความสำเร็จซึ่งได้จากการหาคำตอบของเซตของสมการในสมการที่ (5.36) ถึงสมการที่ (5.45) โดยที่ค่าของเซต C_i เป็นดังตารางที่ 5.1 และ $p \in R^4$ คือพารามิเตอร์ของการออกแบบ โดยการใช้กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขตในการหาคำตอบของการออกแบบพบว่าคำตอบของการออกแบบคือ

$$p_{11} = 0.34670$$

$$p_{21} = 4.43520$$

$$p_{31} = 0.313685$$

$$p_{41} = 8.89340$$

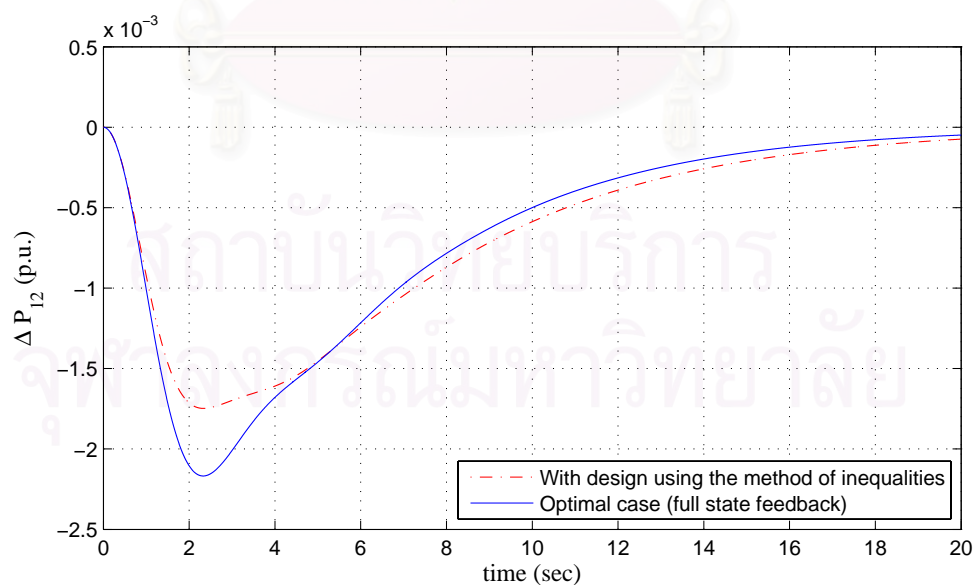
โดยที่ค่า $\Phi_i(p)$ แสดงในตารางที่ 5.2 และผลตอบของระบบเป็นดังรูปที่ 5.12 ถึงรูปที่ 5.18

ตารางที่ 5.1 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในรูปที่ 5.10

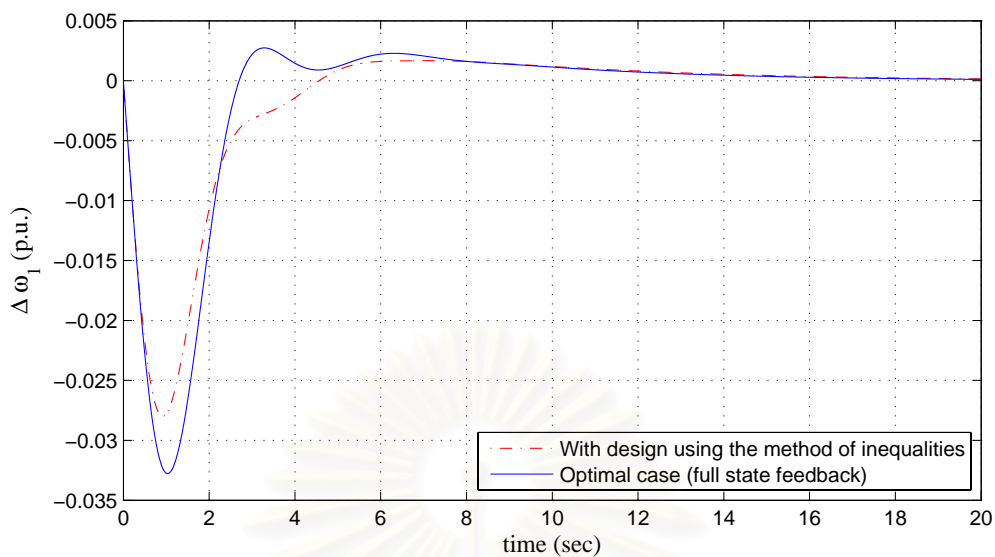
ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในรูปที่ 5.10		
$C_1 = 0.19$ p.u.	$C_2 = 0.0514$ p.u.	$C_3 = 0.07382$ p.u.
$C_4 = 0.0231$ p.u.	$C_5 = 0.0119$ p.u.	$C_6 = 0.01314$ p.u.
$C_7 = 0.01265$ p.u.	$C_8 = 0.35$	$C_9 = 1.1$ sec
$C_{10} = 15.541$ sec		

ตารางที่ 5.2 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในรูปที่ 5.10

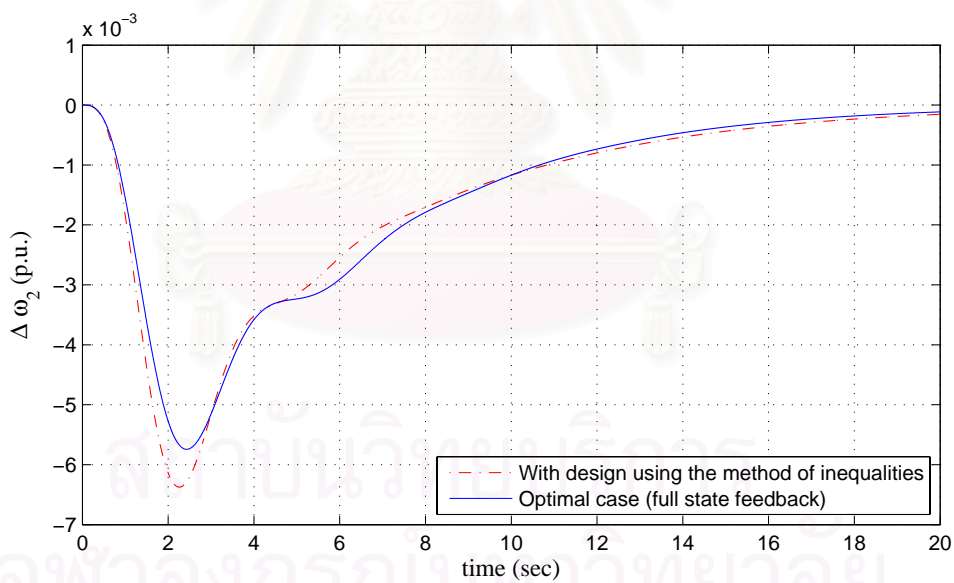
ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในรูปที่ 5.10		
$\Phi_1 = 0.18936$ p.u.	$\Phi_2 = 0.05135$ p.u.	$\Phi_3 = 0.073819$ p.u.
$\Phi_4 = 0.023099$ p.u.	$\Phi_5 = 0.011899$ p.u.	$\Phi_6 = 0.013138$ p.u.
$\Phi_7 = 0.012649$ p.u.	$\Phi_8 = 0.245006$	$\Phi_9 = 0.92583$ sec
$\Phi_{10} = 15.54026$ sec		



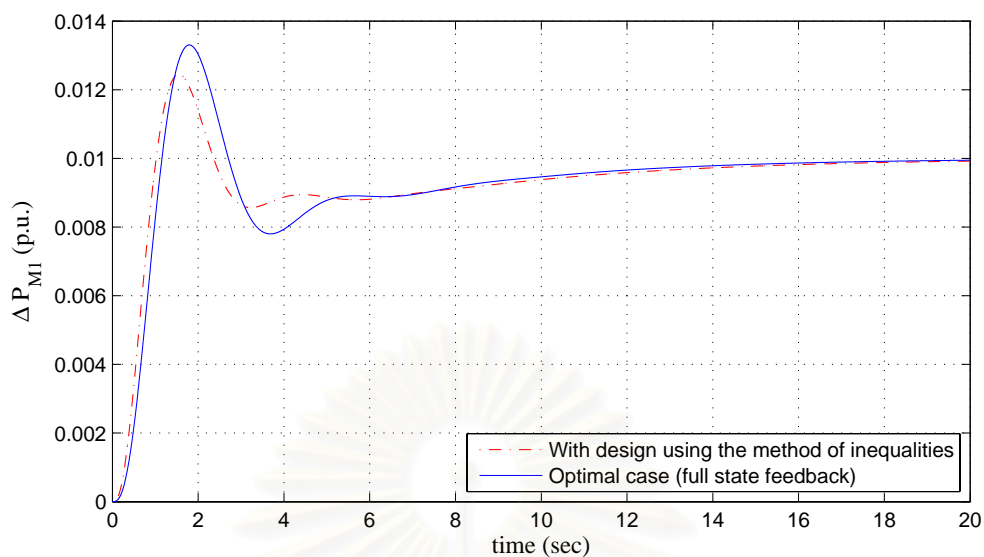
รูปที่ 5.12 ผลตอบ ΔP_{12} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ



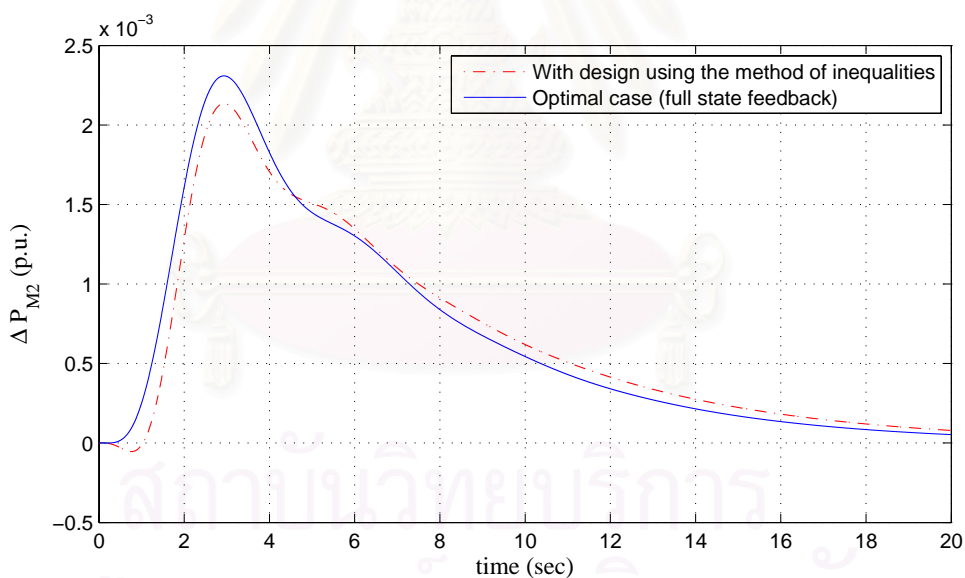
รูปที่ 5.13 ผลตอบ $\Delta\omega_1$ ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ



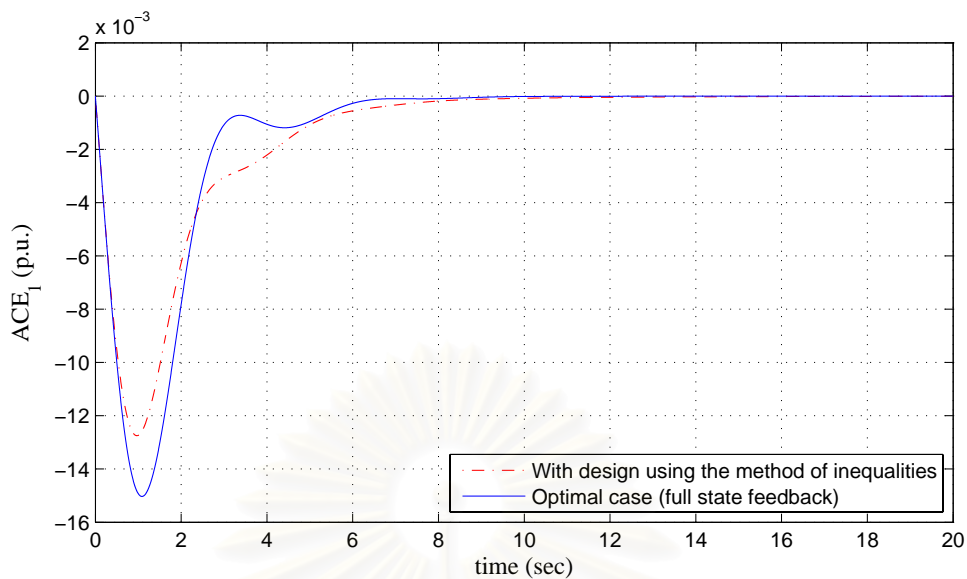
รูปที่ 5.14 ผลตอบ $\Delta\omega_2$ ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ



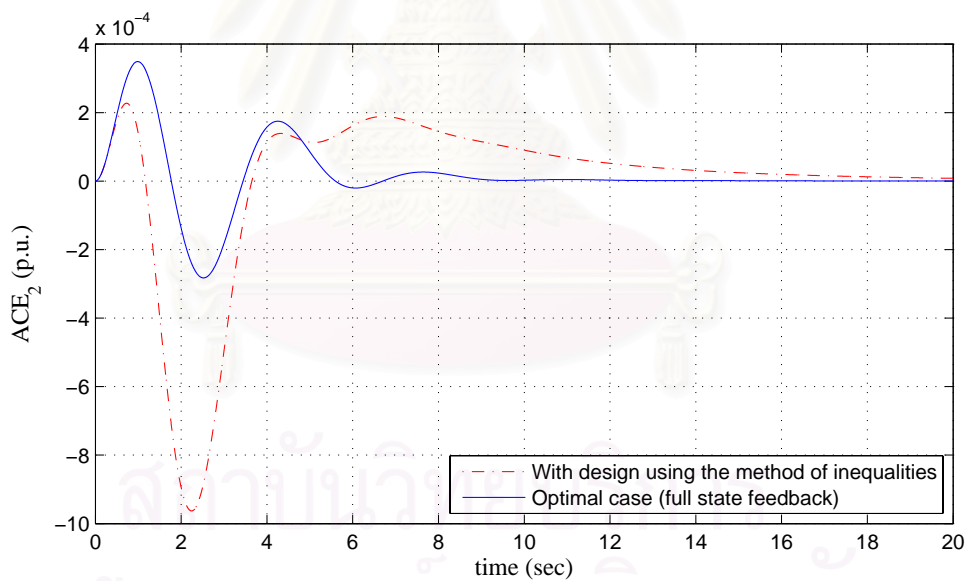
รูปที่ 5.15 ผลตอบ ΔP_{M1} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ



รูปที่ 5.16 ผลตอบ ΔP_{M2} ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ



รูปที่ 5.17 ผลตอบ ACE_1 ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ



รูปที่ 5.18 ผลตอบ ACE_2 ของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ในรูปที่ 5.10 ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด และที่ออกแบบด้วยวิธีอสมการ

5.5 สรุป

เมื่อพิจารณาผลตอบแทนของระบบ AGC ที่ออกแบบโดยวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด (Optimal control) เป็นต้นแบบในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC โดยใช้วิธีอสมการพบว่า

1. การออกแบบด้วยวิธีอสมการใช้ตัวควบคุมที่มีโครงสร้างที่ง่ายกว่าและเป็นการควบคุมแบบกระจาย (Decentralized control) กล่าวคือ ตัวควบคุมของระบบย่อยหนึ่งๆ ต้องการเพียงข้อมูลของระบบย่อยนั้นๆ ทำให้ตัวควบคุมมีโครงสร้างเรียบง่ายเหมาะที่จะนำมาใช้ควบคุมระบบขนาดใหญ่ และเป็นที่ยอมรับในการปฏิบัติจริง ในขณะที่การออกแบบด้วยวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุดนั้นใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะแบบเต็ม (Full state feedback controller) และเป็นการควบคุมแบบรวมศูนย์ (Centralized control) กล่าวคือ ตัวควบคุมของระบบย่อยหนึ่งๆ ต้องการข้อมูลของระบบย่อยอื่นๆ ด้วยซึ่งไม่นิยมใช้ในการปฏิบัติจริง

2. ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบทั้งสองวิธีมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาจากผลตอบแทน ΔP_{12} , $\Delta \omega_1$, $\Delta \omega_2$, ΔP_{M1} และ ΔP_{M2} ของระบบดังแสดงในรูปที่ 5.12 ถึงรูปที่ 5.18

เมื่อพิจารณาในแง่มุมมองของความเป็นจริง การออกแบบด้วยวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุดมีจุดอ่อนคือ

1. การหาฟังก์ชันเป้าหมายที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การออกแบบทั้งหมด ซึ่งทำได้โดยการทดลองปรับค่าของเมตริกซ์ Q และ R จากนั้นหาผลตอบแทนของระบบเพื่อตรวจสอบว่าผลตอบแทนของระบบที่ได้นั้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ทั้งหมดหรือไม่ ถ้าไม่สอดคล้องก็ต้องกลับไปปรับค่าของเมตริกซ์ Q และ R ในลักษณะลองผิดลองถูก (Trial and error) และทำการออกแบบใหม่ ซึ่งทำให้กระบวนการออกแบบนั้นใช้เวลานาน

2. ในกรณีที่ปัญหาการออกแบบมีการจำกัดขนาดของสัญญาณควบคุม เช่น $\max |u(t)| \leq C$, หรือ $\max |\dot{u}(t)| \leq C$, ดังตัวอย่างในหัวข้อ 4.3 การออกแบบด้วยวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุดทำได้ยากมาก ในขณะที่การออกแบบด้วยวิธีอสมการสามารถทำได้เนื่องจากเป็นการค้นหาคำตอบในปริภูมิพารามิเตอร์ (Parameter space) ซึ่งเป็นวิธีที่มีข้อจำกัดน้อยมาก

ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงเลือกนำวิธีการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอสมการมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของระบบ AGC

บทที่ 6

แบบแผนการซื้อขายและบริการทางไฟฟ้า

ในหลายปีที่ผ่านมาผลจากการแปรรูปกิจการไฟฟ้าทำให้เกิดการแยกประเภทของปริมาณทางไฟฟ้าก่อนที่จะนำมาพิจารณาเป็นบริการต่าง ๆ [29] ซึ่งเรียกโดยรวมว่า Ancillary service อันประกอบไปด้วยบริการย่อยต่าง ๆ เช่น Voltage support service Regulation & Frequency service Energy imbalance service Operating reserve service และ Black start capacity service เป็นต้น ความพยายามที่จะกำหนดชนิดบริการนั้นต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ด้านพลังงานขั้นพื้นฐาน เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกันระหว่างบริการต่าง ๆ กับความน่าเชื่อถือของระบบนั้น ทำให้การพิจารณากำหนดบริการต่าง ๆ ต้องมั่นใจได้ว่าจะสามารถใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดการแข่งขันทางด้านราคาค่าไฟฟ้าที่สมบูรณ์มากขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการบริการเกี่ยวกับกำลังจริง ซึ่งเป็นเซตย่อยของบริการที่กล่าวไว้ข้างต้น

เนื่องจากกำลังจริงสามารถส่งผ่านสายส่งไปได้เป็นระยะทางไกลเพื่อรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ของโหลดที่อยู่ในพื้นที่ไกลๆ ได้ ส่วนกำลังรีแอกทีฟและบริการที่ไม่เกี่ยวกับกำลังจริงอื่นๆ จะจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ตามธรรมชาติกับกำลังจริง ซึ่งเป็นเหตุผลที่จะนำบริการเกี่ยวกับกำลังจริงเข้าไปในโครงสร้างของตลาดเป็นอันดับแรก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับลักษณะพื้นฐานของการวัดและการให้คำจำกัดความของบริการต่างๆ เกี่ยวกับกำลังจริง

การบริการที่มีความสำคัญมากที่สุดประการหนึ่งซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจคือ การรักษาความสมดุลระหว่างโหลด และการผลิตกำลังไฟฟ้าภายในพื้นที่ควบคุม (Control area) ซึ่งตามปกติคือการควบคุมความถี่ของระบบที่มีการเชื่อมต่อกัน ในบทความนี้เรียกว่าการควบคุมความถี่โดยตรง (Direct frequency control, DFC) ซึ่งประกอบด้วยบริการประเภท Regulation และ Load following [30] โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1 บริการ Regulation และ Load following

การให้บริการแบบ Regulation และ Load following มีข้อแตกต่างกันที่กรอบเวลาในการพิจารณา โดยการให้บริการแบบ Regulation นั้นเป็นบริการที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบความถี่สูง โดยจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลดภายใต้กรอบเวลาที่อยู่ในหน่วยนาที่ ส่วน Load following นั้นเป็นการให้บริการในส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำของการเปลี่ยนแปลงของ

โหลดซึ่งหมายถึงการให้บริการในส่วนที่นอกเหนือจากการบริการ Regulation เราสามารถให้คำจำกัดความของการให้บริการทั้งสองส่วนดังนี้

6.1.1 คำจำกัดความของการบริการ Regulation และ Load following

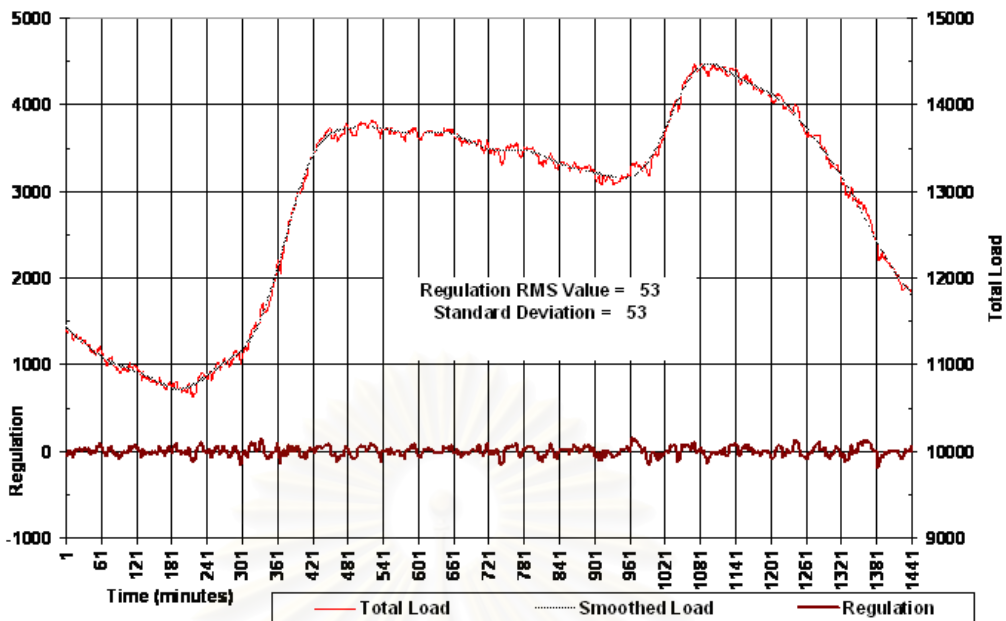
ในตลาดการซื้อขายไฟฟ้าที่ใช้ระบบคาบเวลาในการวางแผนการผลิตล่วงหน้า ตัวอย่างเช่น ในอังกฤษใช้คาบเวลาในการวางแผนการผลิตเท่ากับ 30 นาที ส่วน Eastern interconnection ใช้คาบเวลาในการวางแผนการผลิตเท่ากับ 1 ชั่วโมง และ OASIS [30] กำหนดให้ใช้คาบเวลาในการวางแผนการผลิตเท่ากับ 1 ชั่วโมง เป็นต้น จะเห็นได้ชัดว่าคุณลักษณะที่สำคัญของ Load following คือการรับผิดชอบในส่วนของการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานที่ได้มีการวางแผนการผลิตไว้ล่วงหน้ากับพลังงานที่เกิดขึ้นจริงตามเวลาที่กำหนดไว้ในการวางแผนการผลิต

บริการ Regulation และ Load following สามารถแบ่งแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจนด้วยการใช้คาบเวลาในการวางแผนการผลิตสำหรับแบ่งขอบเขตระหว่างบริการทั้งสองชนิด โดย Illian และ Hoffman [30] เสนอแนวทางการพิจารณาดังนี้

พิจารณากรณีในตลาดการซื้อขายไฟฟ้ามีคาบเวลาในการวางแผนการผลิตล่วงหน้าเป็น 1 ชั่วโมง เราจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงที่มีความยาวของคาบเวลาเป็นสองเท่าของคาบเวลาของการวางแผนการผลิตล่วงหน้ามาใช้ในการแบ่งขอบเขตระหว่าง Regulation กับ Load following ซึ่งในตัวอย่างนี้คือ 2 ชั่วโมง ดังนั้นจะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของโหลดที่มีคาบเวลาดำกว่า 2 ชั่วโมง จะถูกพิจารณาเป็นส่วนของการบริการ Regulation และการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของโหลดที่มีคาบเวลามากกว่าหรือเท่ากับ 2 ชั่วโมง จะพิจารณาเป็นส่วนของการบริการ Load following

6.1.2 ตัวอย่างการพิจารณาบริการ Regulation

รูปที่ 6.1 แสดงองค์ประกอบของ Regulation ของโหลดทั้งหมด โดยองค์ประกอบของการให้บริการชนิด Regulation นั้นสามารถคำนวณได้จาก Fourier transforms ของ Total load เพื่อแยกองค์ประกอบในการควบคุมความถี่ออกเป็นส่วนของ Regulation ที่มีคาบเวลาน้อยกว่า 2 ชั่วโมง และส่วนของ Smoothed load ซึ่งมีคาบเวลามากกว่าหรือเท่ากับ 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เราอาจทราบส่วนของ Smoothed load ได้โดยการนำโหลดทั้งหมดลบออกด้วยส่วนของ Regulation



รูปที่ 6.1 องค์ประกอบของ Regulation ของโหลดทั้งหมด

การแยกองค์ประกอบของโหลดด้วยวิธีการนี้ องค์ประกอบของ Regulation นั้นมีปริมาณของพลังงานรวมมีค่าเป็นศูนย์ หรืออีกความหมายหนึ่งคือ พลังงานในส่วนองค์ประกอบของ Regulation มีความสมดุลเสมอโดยที่ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ของส่วน Regulation สามารถคำนวณได้จากสมการ (6.1) (6.2) และ (6.3) ตามลำดับ เนื่องจากพลังงานรวมทั้งหมดของ Regulation มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Regulation ก็จะเป็นศูนย์ด้วยเช่นกัน และเมื่อพิจารณาพร้อมกับสมการที่ (6.3) จะได้ว่าค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของส่วน Regulation จะมีค่าเท่ากัน

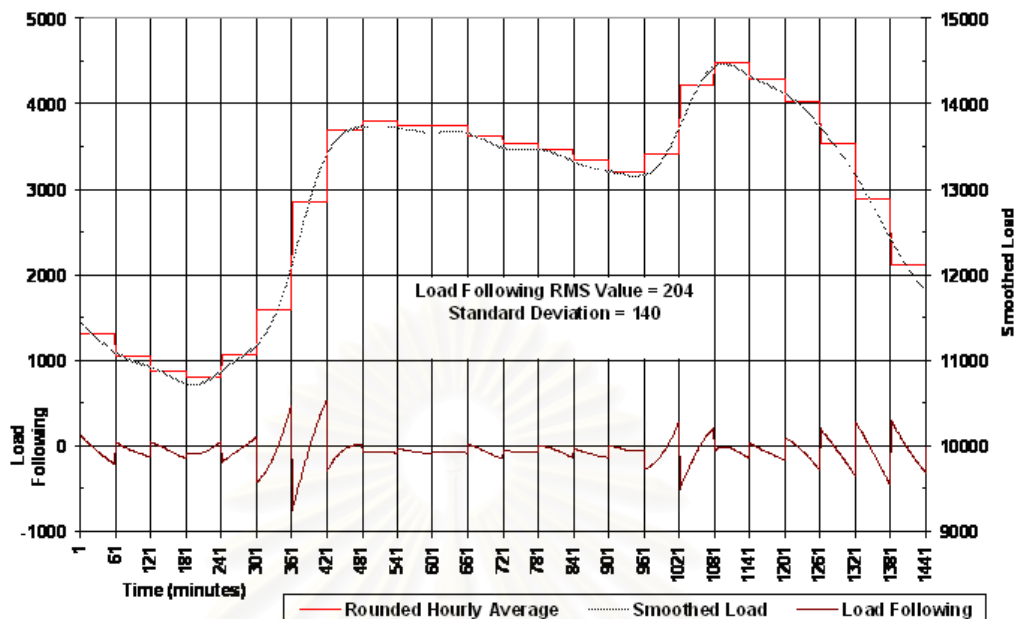
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \tag{6.1}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum x_i^2 - \bar{x}^2 \tag{6.2}$$

$$RMS^2 = \sigma^2 + \bar{x}^2 \tag{6.3}$$

ในความเป็นจริง เราทราบองค์ประกอบของ Smoothed load หรือโหลดทั้งหมดได้จากการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำ เนื่องจากเราจะทราบจำนวนข้อมูลทั้งหมดได้ก็ต่อเมื่อการส่งพลังงานเสร็จสิ้นจริง

6.1.3 ตัวอย่างการพิจารณาบริการ Load following



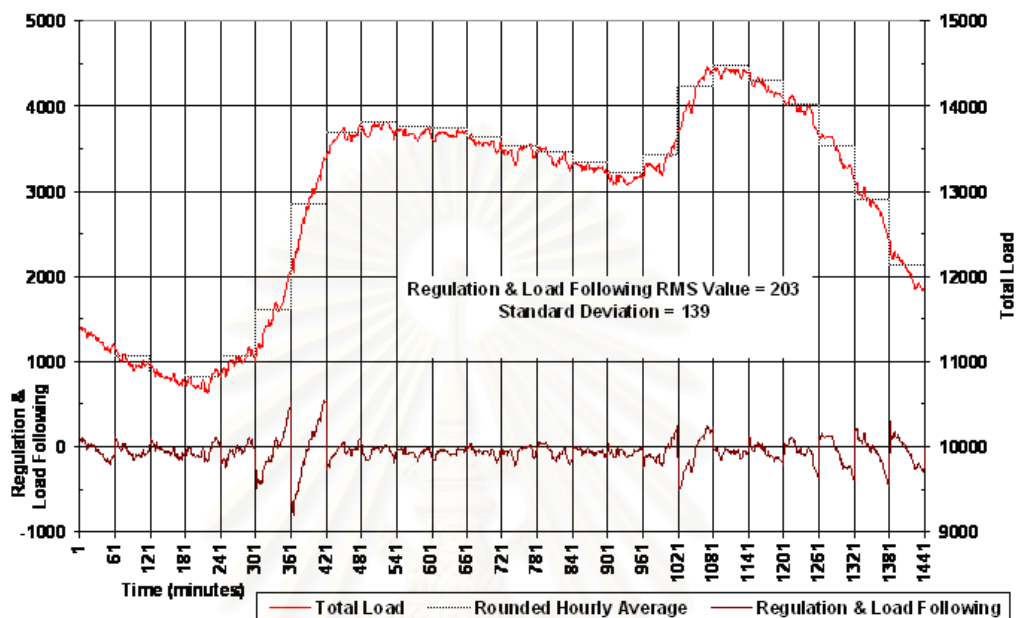
รูปที่ 6.2 องค์ประกอบของ Load following ของโหลดทั้งหมด

รูปที่ 6.2 องค์ประกอบของ Load following ของโหลดทั้งหมดโดยเราสามารถคำนวณหา Smoothed load ได้ด้วยวิธีการเดียวกับในตัวอย่างของ Regulation ส่วน Rounded hourly average ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อจำลองการวางแผนการผลิตพลังงานไฟฟ้าในตลาดอย่างแท้จริง โดยรวมถึงค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์โหลด เราทราบ Load following ได้จาก $\text{Load following} = \text{Smoothed load} - \text{Rounded hourly average}$ เนื่องจากเมื่อทำการหาพื้นที่ใต้กราฟของ Load following พบว่าค่าที่ได้มีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่าเกิดความไม่สมดุลของพลังงานที่มีส่วนร่วมในองค์ประกอบของ Load following ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ของ Load following สามารถคำนวณได้จากสมการ (6.1) (6.2) และ (6.3) เนื่องจากพลังงานรวมของ Load following มีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นค่าเฉลี่ย จึงมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ด้วยเช่นกัน จึงเป็นสาเหตุให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ของ Load following มีค่าแตกต่างกัน

จากตัวอย่างทั้งสองที่ได้กล่าวมานั้น แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างบริการ Regulation กับ Load following ได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ในทางปฏิบัติจะพบว่าการแยกองค์ประกอบของบริการ Regulation และ Load following ก็ประสบปัญหาเช่นกันเนื่องจากการแยกองค์ประกอบต่าง ๆ นั้น ต้องทราบข้อมูลทั้งหมดก่อนซึ่งเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดไม่สามารถวัดได้จนกว่าการส่งพลังงานจะเสร็จสิ้น ดังนั้นในทางปฏิบัติองค์ประกอบส่วนที่เป็น Smoothed load จะได้จากการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพ

6.1.4 ตัวอย่างการพิจารณาบริการแบบ Regulation และ Load following

การรวมบริการทั้งสองชนิดคือบริการ Regulation และ Load following จะทำให้การคำนวณต่าง ๆ ง่ายขึ้น เนื่องจากสามารถลดความต้องการในการพยากรณ์ขอบเขตในการแบ่งบริการทั้งสองชนิดออกจากกันดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 องค์ประกอบของบริการ Regulation และ Load following

รูปที่ 6.3 แสดงองค์ประกอบของบริการ Regulation และ Load following ซึ่งจะเห็นได้ว่าบริการที่วัดได้นั้นจะบ่งบอกถึงบริการรวมทั้งสองชนิด เมื่อคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของ Regulation และ Load following จะพบว่ามีค่าเท่ากับพลังงานที่มาจากบริการทั้งสองประเภทรวมกัน จากตัวอย่างพบว่าความแตกต่างในการวัดของบริการที่แยกออกจากกันกับบริการที่นำมารวมนั้นนั้น ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

จากผลการวัดพบว่า การวัดโดยใช้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) สามารถใช้เป็นตัวแทนที่เหมาะสมของปริมาณการใช้บริการ Regulation และ Load following ได้ โดยที่ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ของบริการที่มีค่ามากจะแสดงว่าบริการของการทำงานในส่วนนี้มากด้วยเช่นกัน

นอกจากการใช้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ประมาณปริมาณของบริการได้แล้ว ยังมีวิธีการอื่นที่สามารถวัดค่าที่แท้จริงของบริการได้ซึ่งใช้การวัดชนิดนี้จะรวมเทอมของ coincidence เข้ากับค่า RMS เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยรายละเอียดต่างๆ จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

6.2 การวัด (Measurement)

การวัดองค์ประกอบของพลังงานในการให้บริการควบคุมความถี่นั้น (E_{reg}) สามารถคำนวณได้โดยการรวมความคลาดเคลื่อนทุกช่วงเวลาดังแสดงในสมการ (6.4)

$$E_{reg} = \frac{1}{n} \sum \overline{\Delta T} \quad (6.4)$$

โดยที่ $\overline{\Delta T}$ คือ ค่าเฉลี่ยทุก 1 นาทีของความคลาดเคลื่อนจากแผนการผลิตที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า

จาก Illian และ Hoffman [30] พบว่ามีการพัฒนามาตรฐานการวัดที่เรียกว่า มาตรฐานสมรรถนะของการควบคุม 1 (Control performance standard 1, CPS1) [31, 32] ซึ่งใช้ค่าตัวประกอบความสอดคล้อง (Compliance factor, CF) ในการวัดสมรรถนะของการควบคุมสำหรับแต่ละพื้นที่ควบคุม โดยที่ค่า CF สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6.5)

$$CF = \frac{1}{n} \sum \frac{\overline{ACE} * \overline{\Delta F}}{B} \quad (6.5)$$

โดยที่ \overline{ACE} คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ $\overline{\Delta F}$ คือ ค่าเฉลี่ยทุก 1 นาทีของความถี่ที่คลาดเคลื่อนจากแผนการผลิตที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า ค่า CF ที่เป็นบวกจะบ่งบอกว่าพื้นที่ควบคุมนั้นทำหน้าที่เป็นภาระในการควบคุมของระบบ AGC สำหรับระบบหลายพื้นที่ และค่า CF ที่เป็นลบจะบ่งบอกว่าพื้นที่ควบคุมนั้นทำหน้าที่ช่วยในการควบคุมในระบบ AGC ในหลายพื้นที่

จากมาตรฐานสมรรถนะของการควบคุม 1 ที่เป็นจุดเริ่มต้นที่ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการกำหนดขอบเขตความสามารถและการวัดของ Regulation และ Load following โดย Illian และ Hoffman [30] แสดงให้เห็นว่าการเกิดขึ้นพร้อมกัน (Coincidence) ระหว่างความคลาดเคลื่อนในระบบที่มีการเชื่อมต่องันนั้นมีความสำคัญ ดังนั้นการวัดปริมาณของบริการ Regulation และ Load following ควรใช้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ที่มีการรวมตัวประกอบ Coincidence (F) เข้าไปด้วยเพื่อเป็นค่าที่ใช้ในการวัดของบริการ Regulation และ Load following (C_{reg}) ดังสมการที่ (6.6)

$$C_{reg}^2 = \frac{1}{n} \sum \overline{\Delta T} * \overline{\Delta F} \quad (6.6)$$

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ที่ได้มานี้จะเป็นตัวชี้วัดที่แสดงถึงปริมาณสำคัญที่เป็นส่วนประกอบของบริการ เมื่อนำองค์ประกอบของปริมาณบริการที่กำหนดโดยความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมาอินทิกรัลจะได้ปริมาณที่ใช้วัดองค์ประกอบของพลังงานของบริการนั้น ๆ

บทที่ 7

การออกแบบระบบควบคุมของระบบ AGC โดยใช้วิธีอสมการ

การออกแบบระบบควบคุมของระบบ AGC นั้นใช้วิธีการของอสมการในการออกแบบระบบ โดยมีเงื่อนไขการออกแบบคือ

1. เงื่อนไขพื้นฐานในการออกแบบ เช่น Maximum overshoot Rise time และ Settling time
2. ขีดจำกัดต่างๆ ของพารามิเตอร์
3. เงื่อนไขทางด้านบริการหรือข้อตกลงในการซื้อขายกำลังไฟฟ้า เช่น ปริมาณของบริการ Regulation

การออกแบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ AGC ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

7.1 เงื่อนไขของการออกแบบ

โดยทั่วไปเงื่อนไขของการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบ AGC เพื่อให้ได้ผลตอบของระบบเชิงพลวัตที่ดีนั้นจะต้องมีเงื่อนไขดังนี้

1. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{M1}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ
2. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{M2}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ
3. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{M1}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{L2}) มีค่าน้อยเพียงพอ
4. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{M2}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{L2}) มีค่าน้อยเพียงพอ
5. ค่าสูงสุดของ $|\Delta\omega_1|$ และ $|\Delta\omega_2|$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ
6. ค่าสูงสุดของ $|\Delta\omega_1|$ และ $|\Delta\omega_2|$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{L2}) มีค่าน้อยเพียงพอ

และสำหรับเงื่อนไขเพิ่มเติมในการออกแบบคือ

7. เงื่อนไขที่เกี่ยวกับขีดจำกัดต่างๆ ของพารามิเตอร์

8. เงื่อนไขทางด้านบริการหรือข้อตกลงในการซื้อขายกำลังไฟฟ้า

จากเงื่อนไขในการออกแบบข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นเซตของสมการที่ใช้ในการออกแบบได้ดังนี้

$$\Phi_1 = OS \text{ ของ } \Delta P_{M1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_1 \quad (7.1)$$

$$\Phi_2 = T_r \text{ ของ } \Delta P_{M1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_2 \quad (7.2)$$

$$\Phi_3 = T_s \text{ ของ } \Delta P_{M1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_3 \quad (7.3)$$

$$\Phi_4 = OS \text{ ของ } \Delta P_{M2} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_4 \quad (7.4)$$

$$\Phi_5 = T_r \text{ ของ } \Delta P_{M2} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_5 \quad (7.5)$$

$$\Phi_6 = T_s \text{ ของ } \Delta P_{M2} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_6 \quad (7.6)$$

$$\Phi_7 = \max |\Delta \omega_1| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_7 \quad (7.7)$$

$$\Phi_8 = \max |\Delta \omega_2| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_8 \quad (7.8)$$

$$\Phi_9 = \max |\Delta \omega_1| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_9 \quad (7.9)$$

$$\Phi_{10} = \max |\Delta \omega_2| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_{10} \quad (7.10)$$

เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นในทั้งสองพื้นที่ควบคุมนั้นเหมือนกันทุกประการ ดังนั้นเพื่อลดเวลาและความซับซ้อนในการคำนวณจะใช้ตัวควบคุมที่เหมือนกันทุกประการในทั้งสองพื้นที่ของการควบคุมและใช้เงื่อนไขของการออกแบบตัวควบคุมเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของโหลดในพื้นที่ที่ 1 เท่านั้น ($\Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u.}$ และ $\Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.}$) เพื่อให้ได้ผลตอบของระบบเชิงพลวัตที่ค่านั้นจะต้องมีเงื่อนไขดังนี้

1. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{M1}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ
2. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{M2}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ
3. ค่าสูงสุดของ $|\Delta \omega_1|$ และ $|\Delta \omega_2|$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ

และมีเงื่อนไขที่เกี่ยวกับขีดจำกัดต่างๆ ของพารามิเตอร์คือ

4. ค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลของแบบจำลอง IEEE3 ในพื้นที่ควบคุมที่ 1 ทั้งหมด ($\Delta P_{MG3,1}$) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ
5. ค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลของแบบจำลอง IEEE3 ในพื้นที่ควบคุมที่ 2 ทั้งหมด ($\Delta P_{MG3,2}$) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ และมีเงื่อนไขทางด้านบริการหรือข้อตกลงในการซื้อขายกำลังไฟฟ้าดังนี้
6. ปริมาณของบริการ Regulation (C_{reg}) จากสมการที่ (6.6)
7. ตัวประกอบความสอดคล้อง (CF) จากสมการที่ (6.5) ของพื้นที่ควบคุมที่ 1
8. ตัวประกอบความสอดคล้อง (CF) จากสมการที่ (6.5) ของพื้นที่ควบคุมที่ 2

จากเงื่อนไขในการออกแบบข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นเซตของสมการที่ใช้ในการออกแบบได้ดังนี้

$$\Phi_1 = OS \text{ ของ } \Delta P_{M1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_1 \quad (7.11)$$

$$\Phi_2 = T_r \text{ ของ } \Delta P_{M1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_2 \quad (7.12)$$

$$\Phi_3 = T_s \text{ ของ } \Delta P_{M1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_3 \quad (7.13)$$

$$\Phi_4 = \max |\Delta \omega_1| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_4 \quad (7.14)$$

$$\Phi_5 = \max |\Delta \omega_2| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_5 \quad (7.15)$$

$$\Phi_6 = \max \Delta P_{MG3,1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_6 \quad (7.16)$$

$$\Phi_7 = \max \Delta P_{MG3,2} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_7 \quad (7.17)$$

$$\Phi_8 = C_{reg1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_8 \quad (7.18)$$

$$\Phi_9 = CF_1 \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_9 \quad (7.19)$$

$$\Phi_{10} = CF_2 \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_{10} \quad (7.20)$$

นำเงื่อนไขของการออกแบบมาออกแบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยมีรายละเอียดและผลการออกแบบดังนี้

7.2 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

การออกแบบตัวควบคุมแบบอินทิกรัลในแต่ละพื้นที่ควบคุม โดยฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer function) ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเป็นดังสมการที่ (7.21) และสมการที่ (7.22)

$$G_1(s) = \frac{P_1}{s} \quad (7.21)$$

$$G_2(s) = \frac{P_1}{s} \quad (7.22)$$

การออกแบบที่ประสบความสำเร็จซึ่งได้จากการหาคำตอบของเซตของสมการในสมการที่ (7.11) ถึงสมการที่ (7.20) โดยที่ค่าของเขต C_i เป็นดังตารางที่ 7.1 และ $p \in R^1$ คือพารามิเตอร์ของการออกแบบ โดยการใช้กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขตในการหาคำตอบของการออกแบบพบว่าคำตอบของการออกแบบคือ

$$p_1 = 0.09772$$

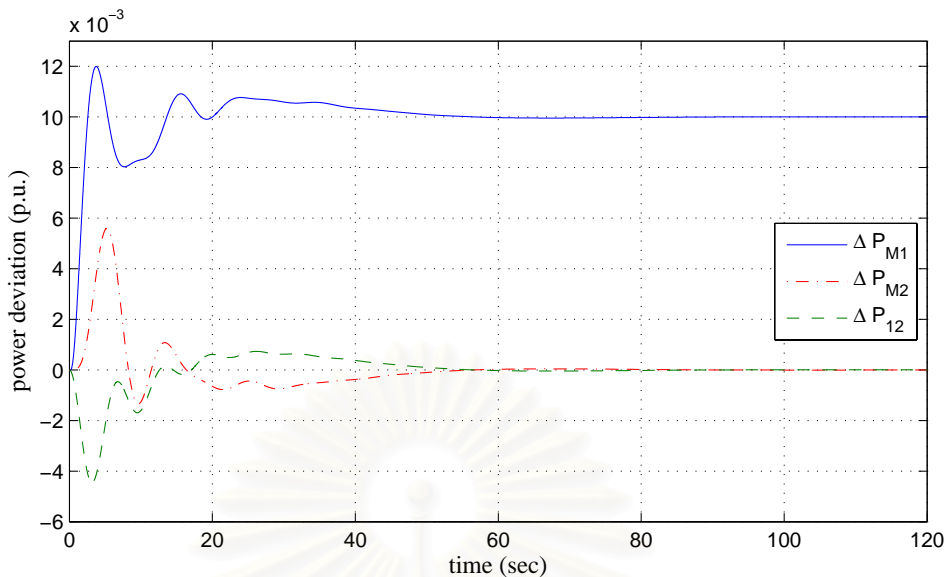
โดยที่ค่า $\Phi_i(p)$ แสดงในตารางที่ 7.2 และผลตอบของระบบเป็นดังรูปที่ 7.1 และรูปที่ 7.2

ตารางที่ 7.1 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

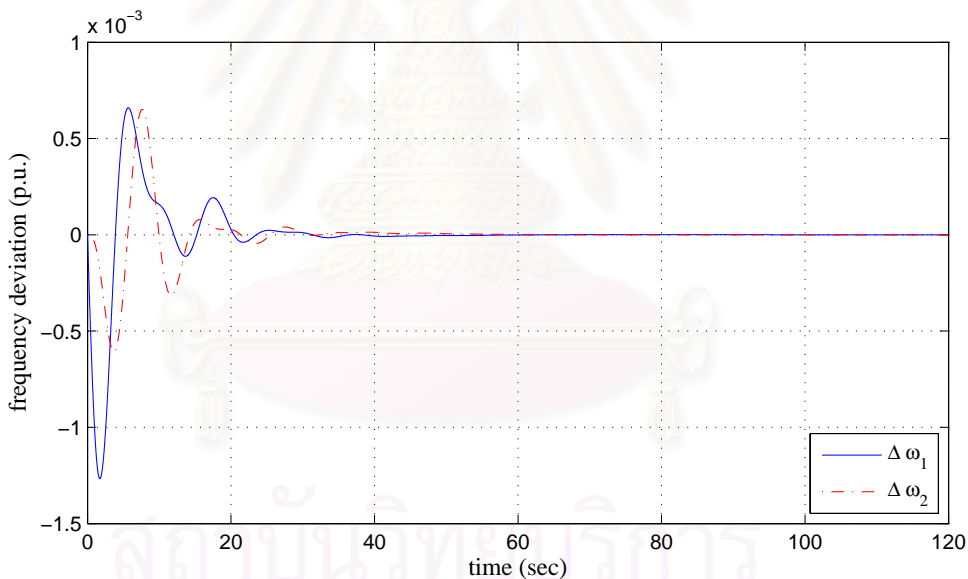
ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล		
$C_1 = 0.2$	$C_2 = 2.5 \text{ sec}$	$C_3 = 45.75 \text{ sec}$
$C_4 = 0.0015 \text{ p.u.}$	$C_5 = 0.0015 \text{ p.u.}$	$C_6 = 0.0033 \text{ p.u.}$
$C_7 = 0.0033 \text{ p.u.}$	$C_8 = 0.4517$	$C_9 = 6.525 \times 10^{-5}$
$C_{10} = 6.525 \times 10^{-5}$		

ตารางที่ 7.2 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล		
$\Phi_1 = 0.19968$	$\Phi_2 = 2.31851 \text{ sec}$	$\Phi_3 = 45.74461 \text{ sec}$
$\Phi_4 = 0.001267 \text{ p.u.}$	$\Phi_5 = 0.0006511 \text{ p.u.}$	$\Phi_6 = 0.003034 \text{ p.u.}$
$\Phi_7 = 0.000891 \text{ p.u.}$	$\Phi_8 = 0.45165$	$\Phi_9 = 2.39736 \times 10^{-7}$
$\Phi_{10} = 9.97069 \times 10^{-9}$		



รูปที่ 7.1 ผลตอบ ΔP_{M1} ΔP_{M2} และ ΔP_{12} ของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล



รูปที่ 7.2 ผลตอบ $\Delta \omega_1$ และ $\Delta \omega_2$ ของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

7.3 ตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

การออกแบบตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นในแต่ละพื้นที่ควบคุมโดยฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer function) ของตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเป็นดังสมการที่ (7.23) และสมการที่ (7.24)

$$G_1(s) = \frac{p_1}{s} + p_2 \left(\frac{s + p_3}{s + p_4} \right) \tag{7.23}$$

$$G_2(s) = \frac{p_1}{s} + p_2 \left(\frac{s + p_3}{s + p_4} \right) \quad (7.24)$$

การออกแบบที่ประสบความสำเร็จซึ่งได้จากการหาคำตอบของเซตของสมการในสมการที่ (7.11) ถึงสมการที่ (7.20) โดยที่ค่าของเซต C_i เป็นดังตารางที่ 7.3 และ $p \in R^4$ คือพารามิเตอร์ของการออกแบบ โดยการใช้กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขตในการหาคำตอบของการออกแบบพบว่าคำตอบของการออกแบบคือ

$$p_1 = 0.15482 \quad p_2 = 152.88939 \quad p_3 = 0.08522 \quad p_4 = 721.57649$$

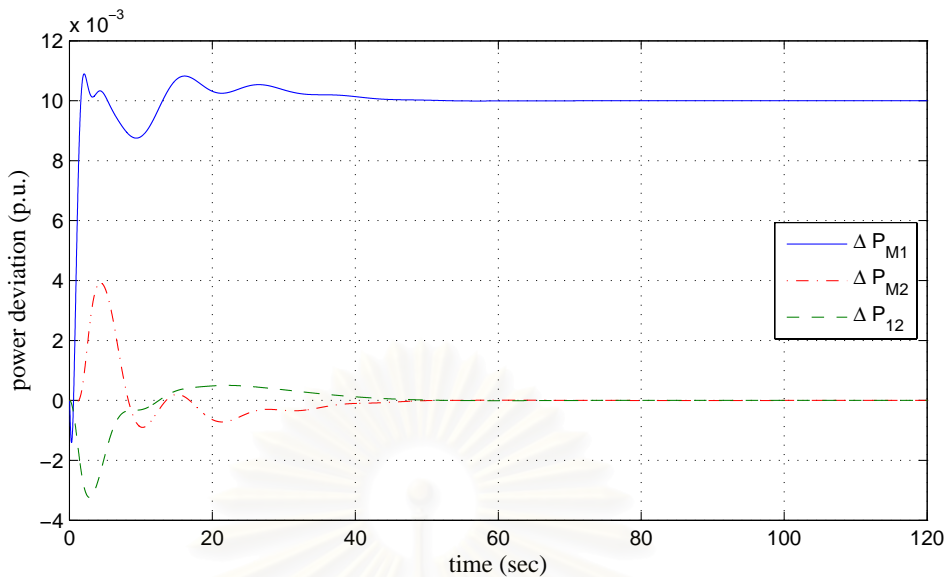
โดยที่ค่า $\Phi_i(p)$ แสดงในตารางที่ 7.4 และผลตอบของระบบเป็นดังรูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4

ตารางที่ 7.3 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

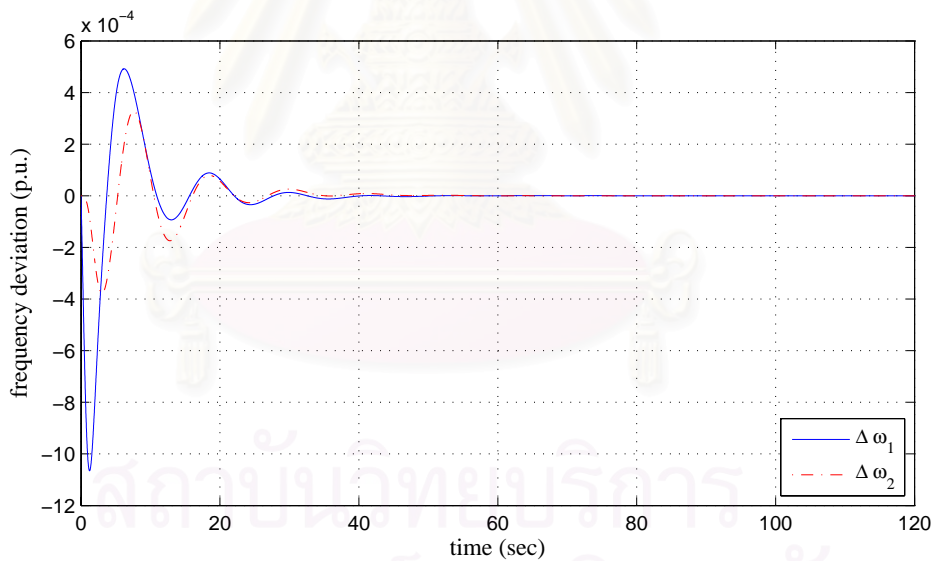
ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น		
$C_1 = 0.09$	$C_2 = 2.5 \text{ sec}$	$C_3 = 35 \text{ sec}$
$C_4 = 0.0015 \text{ p.u.}$	$C_5 = 0.0015 \text{ p.u.}$	$C_6 = 0.003 \text{ p.u.}$
$C_7 = 0.003 \text{ p.u.}$	$C_8 = 0.395$	$C_9 = 6.525 \times 10^{-5}$
$C_{10} = 6.525 \times 10^{-5}$		

ตารางที่ 7.4 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุม ของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น		
$\Phi_1 = 0.08979$	$\Phi_2 = 1.42755 \text{ sec}$	$\Phi_3 = 34.70476 \text{ sec}$
$\Phi_4 = 0.0010656 \text{ p.u.}$	$\Phi_5 = 0.0003783 \text{ p.u.}$	$\Phi_6 = 0.00298 \text{ p.u.}$
$\Phi_7 = 0.0005289 \text{ p.u.}$	$\Phi_8 = 0.39489$	$\Phi_9 = 9.99408 \times 10^{-8}$
$\Phi_{10} = 5.0165 \times 10^{-10}$		



รูปที่ 7.3 ผลตอบ ΔP_{M1} ΔP_{M2} และ ΔP_{12} ของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น



รูปที่ 7.4 ผลตอบ $\Delta \omega_1$ และ $\Delta \omega_2$ ของระบบ AGC ในหัวข้อ 3.5 ที่มีตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

7.4 สรุป

การออกแบบด้วยวิธีอสมการ (The method of inequalities) นั้นการกำหนดรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการออกแบบจะสะท้อนถึงเงื่อนไขที่แท้จริงของการออกแบบทั้งหมด จึงทำให้ผลการออกแบบด้วยวิธีอสมการสามารถยืนยันได้ว่าระบบที่ออกแบบนั้นจะสอดคล้องกับเงื่อนไขของการออกแบบทั้งหมดโดยไม่จำเป็นต้องทำการจำลองผลเพื่อตรวจสอบว่าระบบที่ออกมานั้นสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งหมดหรือไม่

จากการทดสอบพบว่า วิธีการออกแบบด้วยวิธีอสมการสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบ AGC ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่จำกัดรูปแบบและจำนวนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม เงื่อนไขของการออกแบบใหม่สามารถเพิ่มเติมเข้าไปในกระบวนการออกแบบได้อย่างง่ายดาย และ ตัวควบคุมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นสามารถทำให้ระบบเป็นไปตามเงื่อนไขของการออกแบบที่ดีกว่าได้

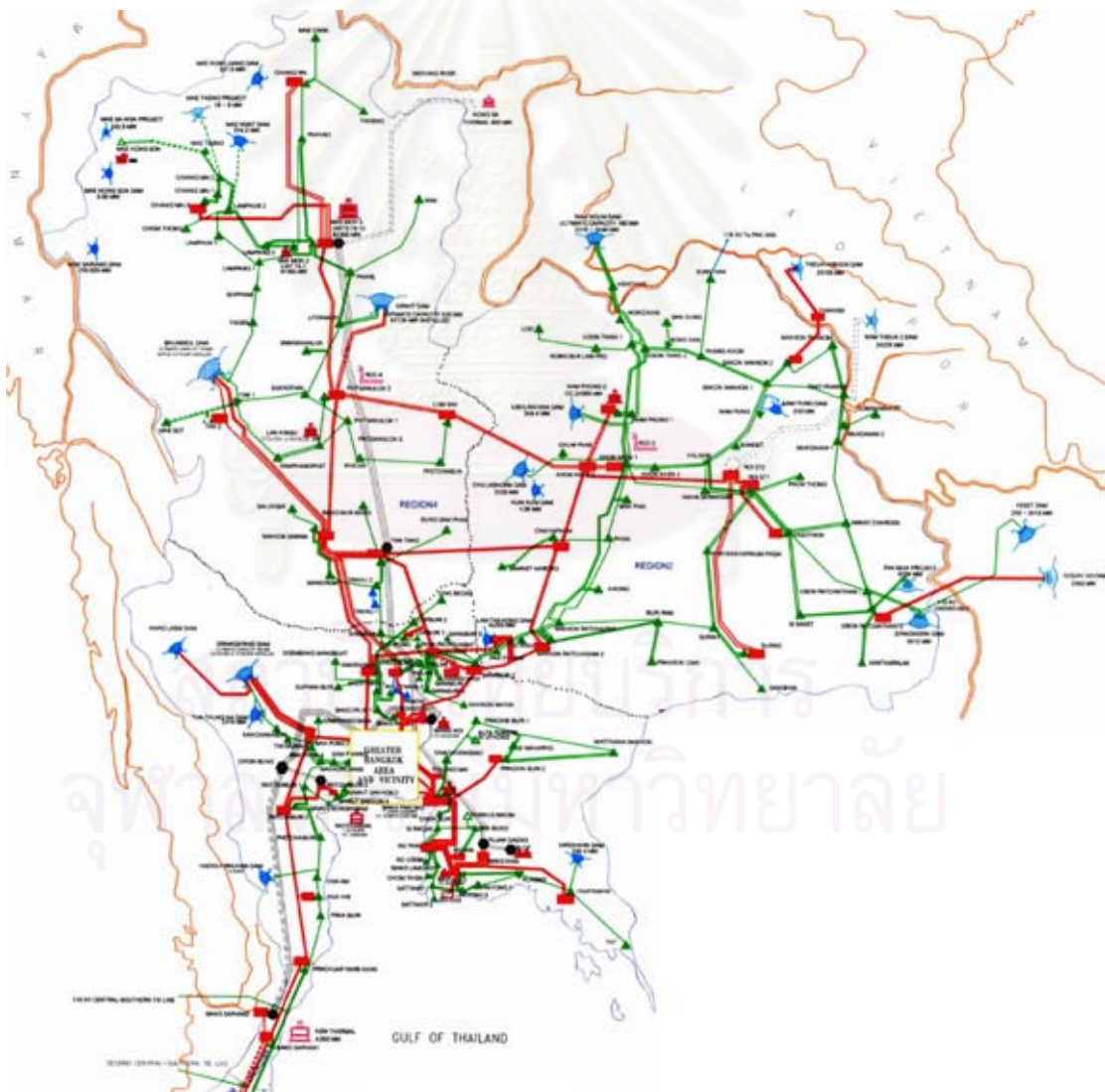
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

การประยุกต์ใช้วิธีสมการในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในประเทศไทย

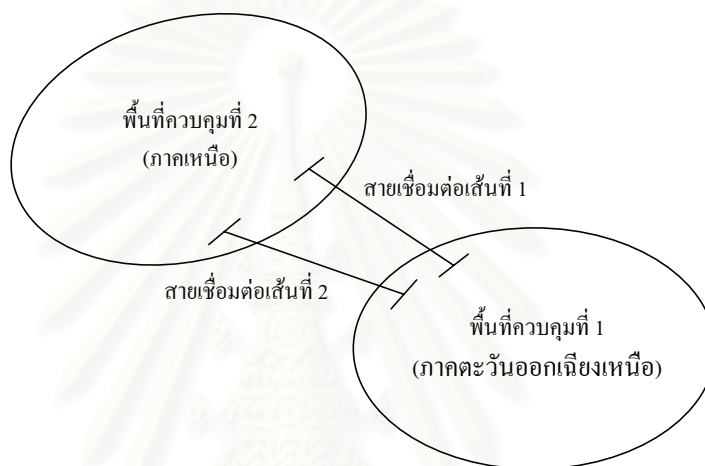
บทนี้กล่าวถึงการนำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในประเทศไทย และการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ที่สร้างขึ้นด้วยการประยุกต์วิธีสมการมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC

8.1 การสร้างแบบจำลองของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในประเทศไทย



รูปที่ 8.1 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงในประเทศไทยตอนบน

จากระบบไฟฟ้าจริงในประเทศไทยในรูปที่ 8.1 เราพิจารณาระบบไฟฟ้าในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นพื้นที่ควบคุมที่ 1 และภาคเหนือเป็นพื้นที่ควบคุมที่ 2 ระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ดังรูปที่ 8.2 โดยละเอียดผลกระทบของระบบไฟฟ้าในภาคอื่นๆ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเป็นไปตามตารางที่ 8.1 ถึงตารางที่ 8.6 ตารางที่ 3.6 และตารางที่ 3.7 โดยค่าฐานที่ใช้คือ $S_{base} = 1000 \text{ MVA}$ และ $f_{base} = 50 \text{ Hz}$ และจะได้แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่ที่เป็นดังรูปที่ 8.3 ถึงรูปที่ 8.6



รูปที่ 8.2 แผนภาพของระบบสองพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบ AGC

ตารางที่ 8.1 รายละเอียดของหน่วยผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ควบคุมที่ 1

หน่วยผลิตที่	บัสที่หน่วยผลิตไฟฟ้าติดตั้งอยู่	รหัสของหน่วยผลิตไฟฟ้า	ชนิดของหน่วยผลิตไฟฟ้า	ขนาดพิกัด S_{base} (MVA)	แรงดันพิกัด V_{base} (KV)
1	21001	CLB H1	Hydro	22.5	11.5
2	21002	CLB H2	Hydro	22.5	11.5
3	21007	LTK H1	Hydro	278	16.5
4	21008	LTK H2	Hydro	278	16.5
5	21011	NP H1	Hydro	3.5	3.3
6	21012	NP H2	Hydro	3.5	3.3
7	21013	NPO2 C10	Thermal	148	13.8
8	21014	NPO2 G11	Thermal	151.5	13.8
9	21015	NPO2 G12	Thermal	151.5	13.8
10	21016	NPO2 C20	Thermal	148	13.8

ตารางที่ 8.1 (ต่อ) รายละเอียดของหน่วยผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ควบคุมที่ 1

หน่วยผลิตที่	ปีที่หน่วยผลิต ไฟฟ้าติดตั้งอยู่	รหัสของหน่วย ผลิตไฟฟ้า	ชนิดของหน่วย ผลิตไฟฟ้า	ขนาดพิกัด S_{base} (MVA)	แรงดันพิกัด V_{base} (KV)
11	21017	NPO2 G21	Thermal	151.5	13.8
12	21018	NPO2 G22	Thermal	151.5	13.8
13	21019	PMN H1	Hydro	36	6
14	21020	PMN H2	Hydro	36	6
15	21021	PMN H3	Hydro	36	6
16	21022	PMN H4	Hydro	36	6
17	21023	SRD H1	Hydro	14	6.6
18	21024	SRD H2	Hydro	14	6.6
19	21025	SRD H3	Hydro	14	6.6
20	21026	UR H1	Hydro	10.5	10
21	21027	UR H2	Hydro	10.5	10
22	21028	UR H3	Hydro	10.5	10
23	26001	HHO H1	Hydro	72	13.8
24	26002	HHO H2	Hydro	72	13.8
25	26006	NNG H1	Hydro	17.5	11
26	26007	NNG H2	Hydro	17.5	11
27	26008	NNG H3	Hydro	50	11
28	26009	NNG H4	Hydro	50	11
29	26010	NNG H5	Hydro	50	11
30	26021	THPP H1	Hydro	126	13.8
31	26022	THPP H2	Hydro	126	13.8
32	26023	XSET H15	Hydro	3.65	11
33	26023	XSET H15	Hydro	3.65	11
34	26023	XSET H15	Hydro	16	11
35	26023	XSET H15	Hydro	16	11
36	26023	XSET H15	Hydro	16	11

ตารางที่ 8.2 รายละเอียดของหน่วยผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ควบคุมที่ 2

หน่วยผลิตที่	บัสที่หน่วยผลิต ไฟฟ้าติดตั้งอยู่	รหัสของหน่วย ผลิตไฟฟ้า	ชนิดของหน่วย ผลิตไฟฟ้า	ขนาดพิกัด S_{base} (MVA)	แรงดันพิกัด V_{base} (KV)
1	41001	BB H12	Hydro	73.68	13.8
2	41001	BB H12	Hydro	73.68	13.8
3	41002	BB H34	Hydro	73.68	13.8
4	41002	BB H34	Hydro	73.68	13.8
5	41003	BB H56	Hydro	73.68	13.8
6	41003	BB H56	Hydro	73.68	13.8
7	41004	BB H7	Hydro	121.75	13.8
8	41005	BB H8	Hydro	186.7	13.8
9	41006	LKB G1	Thermal	20.75	11.5
10	41007	LKB G2	Thermal	20.75	11.5
11	41008	LKB G3	Thermal	21.18	11.5
12	41009	LKB G4	Thermal	21.18	11.5
13	41010	LKB G5	Thermal	21.18	11.5
14	41011	LKB G6	Thermal	32	10.5
15	41012	LKB G7	Thermal	32	10.5
16	41013	LKB G8	Thermal	32	10.5
17	41014	MM2 T1	Thermal	83.33	13.8
18	41015	MM2 T2	Thermal	83.33	13.8
19	41016	MM2 T3	Thermal	83.33	13.8
20	41017	MM3 T4	Thermal	167	13.8
21	41018	MM3 T5	Thermal	167	13.8
22	41019	MM3 T6	Thermal	167	13.8
23	41020	MM3 T7	Thermal	167	13.8
24	41021	MM3 T8	Thermal	333.33	18
25	41022	MM3 T9	Thermal	333.33	18
26	41023	MM3 T10	Thermal	333.33	18

ตารางที่ 8.2 (ต่อ) รายละเอียดของหน่วยผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ควบคุมที่ 2

หน่วยผลิตที่	บัสที่หน่วยผลิต ไฟฟ้าติดตั้งอยู่	รหัสของหน่วย ผลิตไฟฟ้า	ชนิดของหน่วย ผลิตไฟฟ้า	ขนาดพิกัด S_{base} (MVA)	แรงดันพิกัด V_{base} (KV)
27	41024	MM3 T11	Thermal	333.33	18
28	41025	MM3 T12	Thermal	333.33	18
29	41026	MM3 T13	Thermal	333.33	18
30	41027	SK H1	Hydro	132	13.8
31	41028	SK H2	Hydro	132	13.8
32	41029	SK H3	Hydro	132	13.8
33	41030	SK H4	Hydro	132	13.8
34	41031	TTK S1	Thermal	230	22
35	41032	TTK S2	Thermal	230	22

ตารางที่ 8.3 รายละเอียดของสายเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ควบคุมที่ 1 และพื้นที่ควบคุมที่ 2

สายเชื่อมต่อเส้นที่	บัสต้นสาย	บัสปลายสาย	R	X	B
1	21807	41865	1.852	13.457	29.807
	21807	41865	1.852	13.457	29.807
2	21820	41821	1.765	12.813	28.355
	21820	41821	1.765	12.813	28.355

ตารางที่ 8.4 ค่าของ H และ D สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำในแต่ละกลุ่ม

กลุ่มที่	หน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำขนาด	H	D	R
1 (Class 1)	ต่ำกว่า 110 MW	4	0.4	0.05
2 (Class 2)	110-300 MW	5	0.4	0.05
3 (Class 3)	สูงกว่า 300 MW	6	0.4	0.05

ตารางที่ 8.5 ค่าของ H และ D สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำในแต่ละกลุ่ม

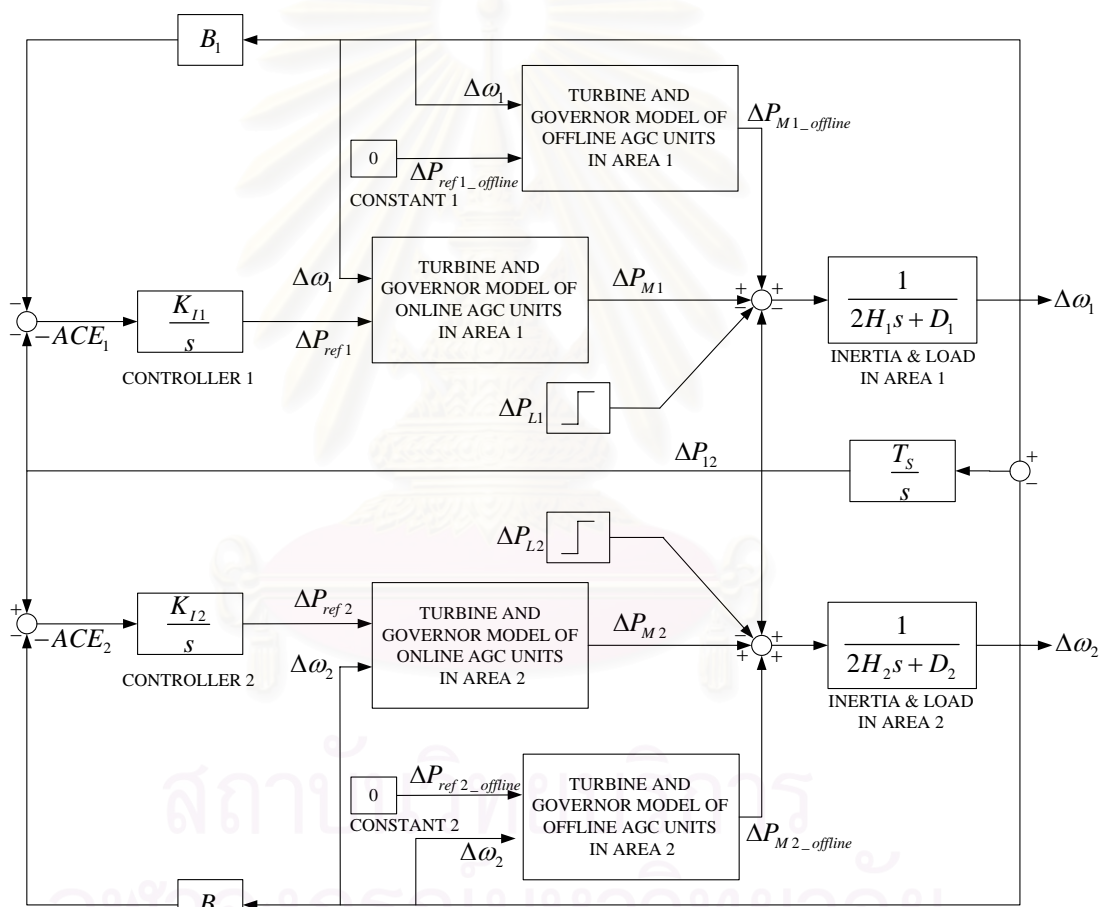
กลุ่มที่	หน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาด	H	D	R
1 (Class 1)	ต่ำกว่า 80 MW	2	0.4	0.04
2 (Class 2)	80-160 MW	3	0.4	0.04
3 (Class 3)	สูงกว่า 160 MW	4	0.4	0.04

ตารางที่ 8.6 รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

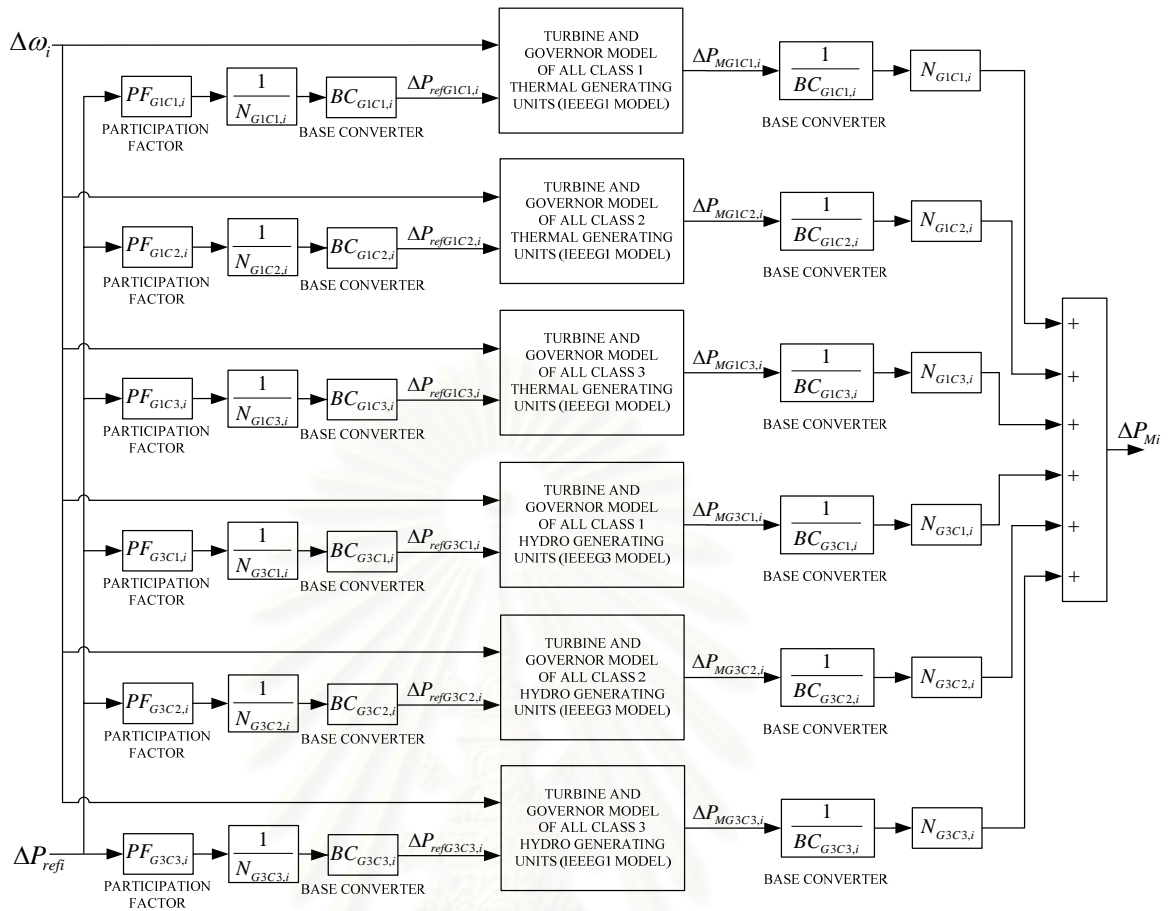
พื้นที่ควบคุมที่ 1	พื้นที่ควบคุมที่ 2
$H_1 = 8.7976$	$H_2 = 23.02421$
$D_1 = 0.94552$	$D_2 = 1.943016$
$B_1 = 55.53052$	$B_2 = 105.486466$
$PF_{G1C1,1} = \text{ไม่มี}$	$PF_{G1C1,2} = 0.144358$
$PF_{G1C2,1} = 0.116295721$	$PF_{G1C2,2} = 0.046177$
$PF_{G1C3,1} = \text{ไม่มี}$	$PF_{G1C3,2} = 0.032555$
$PF_{G3C1,1} = 0.266370208$	$PF_{G3C1,2} = 0.294561$
$PF_{G3C2,1} = 0.460721804$	$PF_{G3C2,2} = 0.13361$
$PF_{G3C3,1} = 0.156612268$	$PF_{G3C3,2} = 0.34874$
$BC_{G1C1,1} = \text{ไม่มี}$	$BC_{G1C1,2} = \frac{1000}{41}$
$BC_{G1C2,1} = \frac{1000}{149.75}$	$BC_{G1C2,2} = \frac{1000}{188}$
$BC_{G1C3,1} = \text{ไม่มี}$	$BC_{G1C3,2} = \frac{1000}{333.33}$
$BC_{G3C1,1} = \frac{1000}{25.15}$	$BC_{G3C1,2} = \frac{1000}{73.68}$
$BC_{G3C2,1} = \frac{1000}{126}$	$BC_{G3C2,2} = \frac{1000}{129.95}$
$BC_{G3C3,1} = \frac{1000}{278}$	$BC_{G3C3,2} = \frac{1000}{186.7}$
$N_{G1C1,1} = \text{ไม่มี}$	$N_{G1C1,2} = 11$
$N_{G1C2,1} = 4$	$N_{G1C2,2} = 6$
$N_{G1C3,1} = \text{ไม่มี}$	$N_{G1C3,2} = 4$

ตารางที่ 8.6 (ต่อ) รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

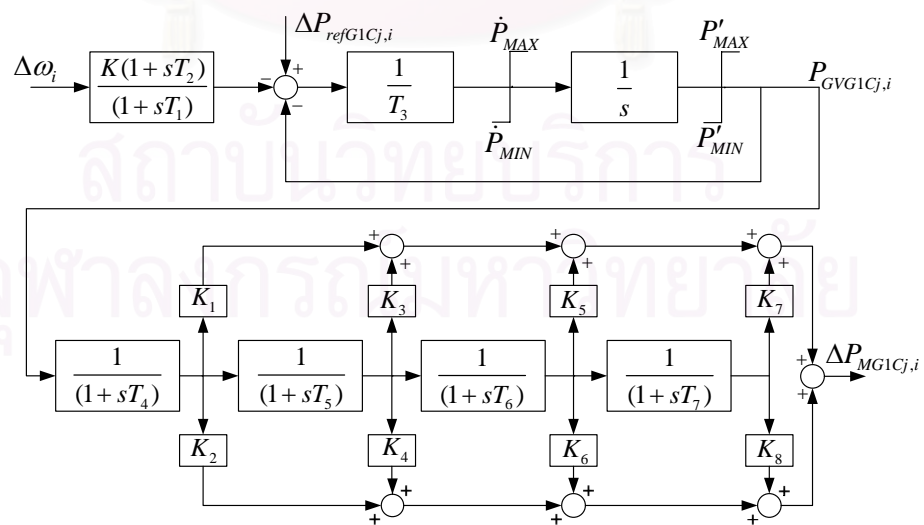
พื้นที่ควบคุมที่ 1	พื้นที่ควบคุมที่ 2
$N_{G3C1,1} = 26$	$N_{G3C1,2} = 6$
$N_{G3C2,1} = 2$	$N_{G3C2,2} = 5$
$N_{G3C3,1} = 2$	$N_{G3C3,2} = 1$
Tie-line torque coefficient $T_s = 0.987557222$	



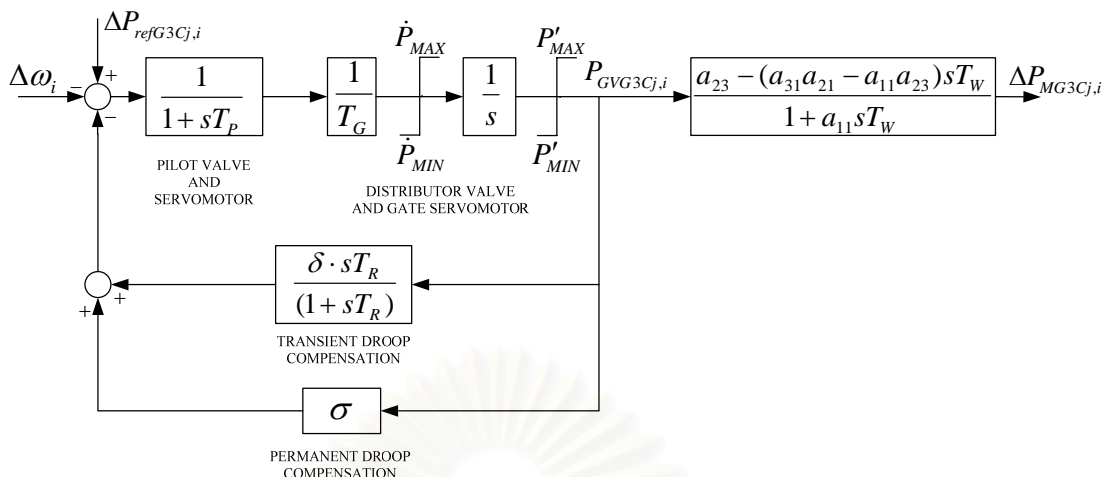
รูปที่ 8.3 แบบจำลองของระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่



รูปที่ 8.4 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งหมดในพื้นที่ควบคุมที่ i



รูปที่ 8.5 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำในพื้นที่ควบคุมที่ i



รูปที่ 8.6 แบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังน้ำในพื้นที่ควบคุมที่ i

8.2 การออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1

เงื่อนไขของการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบ AGC เพื่อให้ได้ผลตอบของระบบเชิงพลวัตที่ดีนั้นจะต้องมีเงื่อนไขดังนี้

1. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{M1}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ
2. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{M2}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ
3. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{M1}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{L2}) มีค่าน้อยเพียงพอ
4. ค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังเชิงกลทั้งหมดในพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{M2}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{L2}) มีค่าน้อยเพียงพอ
5. ค่าสูงสุดของ $|\Delta\omega_1|$ และ $|\Delta\omega_2|$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 1 (ΔP_{L1}) มีค่าน้อยเพียงพอ
6. ค่าสูงสุดของ $|\Delta\omega_1|$ และ $|\Delta\omega_2|$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดพื้นที่ที่ 2 (ΔP_{L2}) มีค่าน้อยเพียงพอ

และสำหรับเงื่อนไขเพิ่มเติมในการออกแบบคือ

7. เงื่อนไขที่เกี่ยวกับขีดจำกัดต่างๆ ของพารามิเตอร์

8. เงื่อนไขทางด้านบริการหรือข้อตกลงในการซื้อขายกำลังไฟฟ้า

จากเงื่อนไขในการออกแบบข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นเซตของสมการที่ใช้ในการออกแบบได้ดังนี้

$$\Phi_1 = OS \text{ ของ } \Delta P_{M1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_1 \quad (8.1)$$

$$\Phi_2 = T_r \text{ ของ } \Delta P_{M1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_2 \quad (8.2)$$

$$\Phi_3 = T_s \text{ ของ } \Delta P_{M1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_3 \quad (8.3)$$

$$\Phi_4 = OS \text{ ของ } \Delta P_{M2} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_4 \quad (8.4)$$

$$\Phi_5 = T_r \text{ ของ } \Delta P_{M2} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_5 \quad (8.5)$$

$$\Phi_6 = T_s \text{ ของ } \Delta P_{M2} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_6 \quad (8.6)$$

$$\Phi_7 = \max |\Delta \omega_1| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_7 \quad (8.7)$$

$$\Phi_8 = \max |\Delta \omega_2| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_8 \quad (8.8)$$

$$\Phi_9 = \max |\Delta \omega_1| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_9 \quad (8.9)$$

$$\Phi_{10} = \max |\Delta \omega_2| \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_{10} \quad (8.10)$$

$$\Phi_{11} = C_{reg1} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_{11} \quad (8.11)$$

$$\Phi_{12} = CF_1 \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_{12} \quad (8.12)$$

$$\Phi_{13} = CF_2 \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0.01 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0 \text{ p.u.} \leq C_{13} \quad (8.13)$$

$$\Phi_{14} = C_{reg2} \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_{14} \quad (8.14)$$

$$\Phi_{15} = CF_1 \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_{15} \quad (8.15)$$

$$\Phi_{16} = CF_2 \text{ เมื่อ } \Delta P_{L1} = 0 \text{ p.u. และ } \Delta P_{L2} = 0.01 \text{ p.u.} \leq C_{16} \quad (8.16)$$

นำเงื่อนไขของการออกแบบมาออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC ในหัวข้อ 8.1 โดยมีรายละเอียดและผลการออกแบบดังนี้

8.3 รายละเอียดและผลการออกแบบระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1

การออกแบบตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นในแต่ละพื้นที่ควบคุมโดยฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer function) ของตัวควบคุมแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเป็นดังสมการที่ (8.17) และสมการที่ (8.18)

$$G_1(s) = \frac{p_1}{s} + p_2 \left(\frac{s^2 + p_3s + p_4}{s^2 + p_5s + p_6} \right) \quad (8.17)$$

$$G_2(s) = \frac{p_7}{s} + p_8 \left(\frac{s^2 + p_9s + p_{10}}{s^2 + p_{11}s + p_{12}} \right) \quad (8.18)$$

การออกแบบที่ประสบความสำเร็จซึ่งได้จากการหาคำตอบของเซตของสมการในสมการที่ (8.1) ถึงสมการที่ (8.16) โดยที่ค่าขอบเขต C_i เป็นดังตารางที่ 8.7 และ $p \in R^{12}$ คือพารามิเตอร์ของการออกแบบ โดยใช้กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขตในการหาคำตอบของการออกแบบพบว่าคำตอบของการออกแบบคือ

$$p_1 = 0.01480 \quad p_2 = 0.01262 \quad p_3 = -0.70495$$

$$p_4 = -0.05767 \quad p_5 = 0.43919 \quad p_6 = 0.18436$$

$$p_7 = 0.01860 \quad p_8 = 0.03872 \quad p_9 = -0.63516$$

$$p_{10} = 0.01481 \quad p_{11} = 1.09830 \quad p_{12} = 0.07645$$

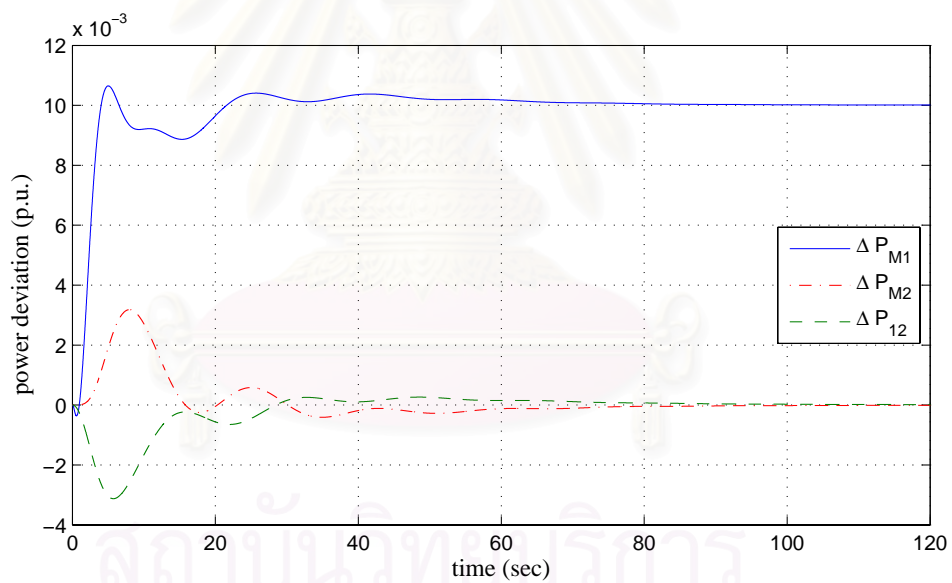
โดยที่ ค่า $\Phi_i(p)$ แสดงในตารางที่ 8.8 และผลตอบของระบบเป็นดังรูปที่ 8.7 และรูปที่ 8.8

ตารางที่ 8.7 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1

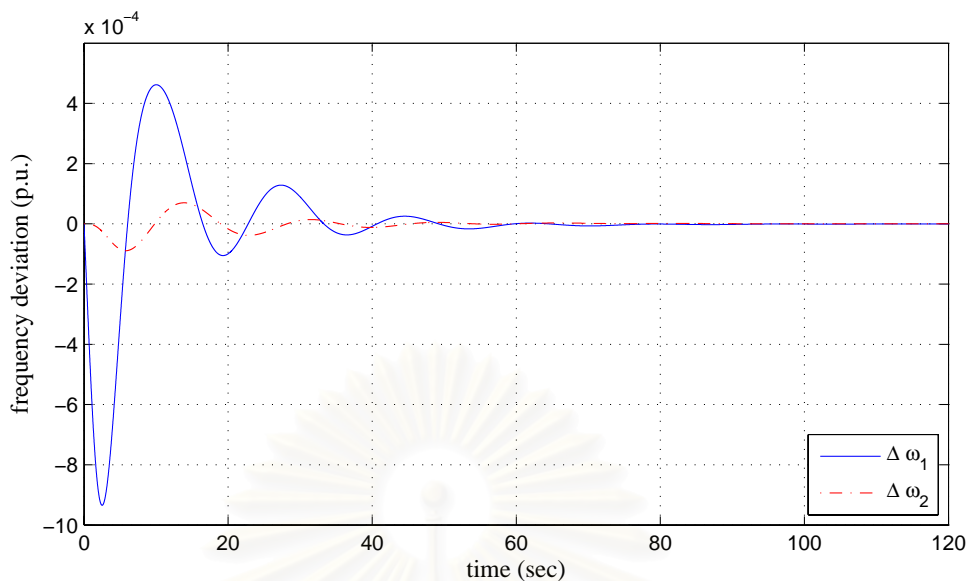
ข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1		
$C_1 = 0.065$	$C_2 = 5 \text{ sec}$	$C_3 = 50 \text{ sec}$
$C_4 = 0.065$	$C_5 = 0.5 \text{ sec}$	$C_6 = 50 \text{ sec}$
$C_7 = 0.001 \text{ p.u.}$	$C_8 = 0.001 \text{ p.u.}$	$C_9 = 0.001 \text{ p.u.}$
$C_{10} = 0.001 \text{ p.u.}$	$C_{11} = 0.7133$	$C_{12} = 6.525 \times 10^{-5}$
$C_{13} = 6.525 \times 10^{-5}$	$C_{14} = 0.4185$	$C_{15} = 6.525 \times 10^{-5}$
$C_{16} = 6.525 \times 10^{-5}$		

ตารางที่ 8.8 ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1

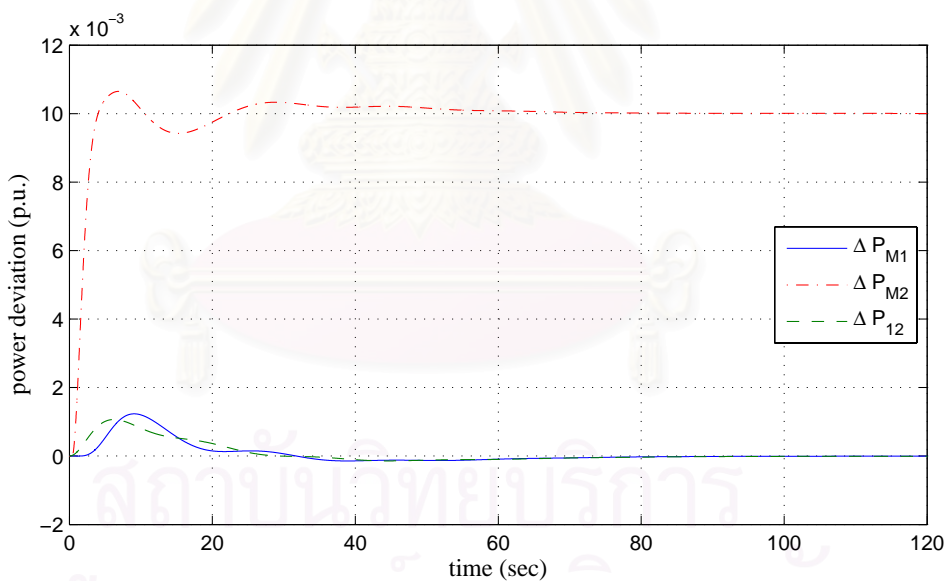
ลักษณะสมบัติของผลตอบของระบบหลังจากทำการออกแบบตัวควบคุม ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1		
$\Phi_1 = 0.06499$	$\Phi_2 = 3.49730 \text{ sec}$	$\Phi_3 = 49.99992 \text{ sec}$
$\Phi_4 = 0.06487$	$\Phi_5 = 3.11565 \text{ sec}$	$\Phi_6 = 47.15200 \text{ sec}$
$\Phi_7 = 9.34694 \times 10^{-4} \text{ p.u.}$	$\Phi_8 = 8.92477 \times 10^{-5} \text{ p.u.}$	$\Phi_9 = 8.87443 \times 10^{-5} \text{ p.u.}$
$\Phi_{10} = 3.16982 \times 10^{-4} \text{ p.u.}$	$\Phi_{11} = 0.71327$	$\Phi_{12} = 1.69771 \times 10^{-7}$
$\Phi_{13} = 9.27444 \times 10^{-9}$	$\Phi_{14} = 0.41833$	$\Phi_{15} = 1.36084 \times 10^{-8}$
$\Phi_{16} = 4.84706 \times 10^{-8}$		



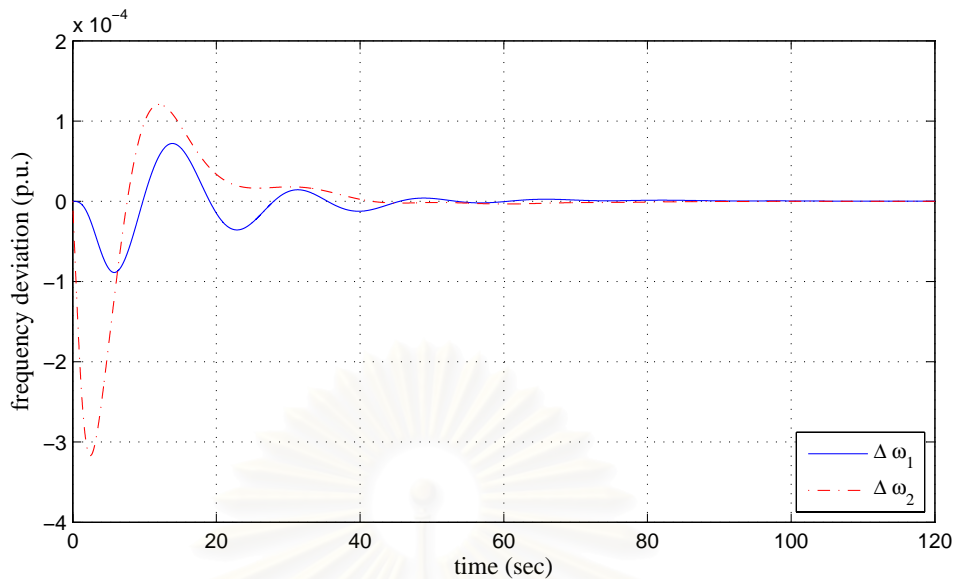
รูปที่ 8.7 ผลตอบ ΔP_{M1} ΔP_{M2} และ ΔP_{12} ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริงในหัวข้อ 8.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 1 เท่ากับ 0.01 p.u.



รูปที่ 8.8 ผลตอบ $\Delta\omega_1$ และ $\Delta\omega_2$ ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริง ในหัวข้อ 8.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 1 เท่ากับ 0.01 p.u.



รูปที่ 8.9 ผลตอบ ΔP_{M1} ΔP_{M2} และ ΔP_{12} ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริง ในหัวข้อ 8.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 2 เท่ากับ 0.01 p.u.



รูปที่ 8.10 ผลตอบ $\Delta\omega_1$ และ $\Delta\omega_2$ ของระบบ AGC จากการประเมินระบบไฟฟ้าจริง ในหัวข้อ 8.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 2 เท่ากับ 0.01 p.u.

8.4 สรุป

เนื่องจากพื้นที่ควบคุมทั้งสองพื้นที่นั้นมีความแตกต่างกันทั้งในด้านกำลังการผลิตและสัดส่วนของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังไอน้ำและน้ำ และผลตอบของระบบ AGC ที่ออกแบบโดยใช้วิธีอสมการ พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 1 หรือพื้นที่ที่ 2 ($\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. หรือ $\Delta P_{L2} = 0.01$ p.u.) ผลตอบของการเปลี่ยนแปลงกำลังทางกลในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลด (ΔP_{M1} หรือ ΔP_{M2}) จะมีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกันในมุมมองของค่า Maximum overshoot (OS) ค่า Rise time (T_r) และค่า Settling time (T_s) กล่าวคือ ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยใช้วิธีอสมการนั้นสามารถทำให้ผลกระทบของ ΔP_{M1} และ ΔP_{M2} เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. และ $\Delta P_{L2} = 0.01$ p.u. ตามลำดับมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งทำได้ยากมากในการออกแบบโดยใช้วิธีอื่น

จากการทดสอบพบว่า วิธีการออกแบบด้วยวิธีอสมการสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบ AGC สำหรับระบบสองพื้นที่จากระบบไฟฟ้าจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ในกรณีที่พื้นที่ควบคุมทั้งสองพื้นที่นั้นมีความแตกต่างกันก็ตาม

บทที่ 9

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการออกแบบแบบใหม่สำหรับระบบ AGC ที่อยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังสองพื้นที่ นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการออกแบบระบบ AGC ด้วยวิธีอสมการ หลักการออกแบบแบบใหม่นี้นำเสนอแนวทางที่ชัดเจนในการพิจารณาออกแบบด้วยเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นของระบบทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์ ในการกำหนดรูปแบบของปัญหานี้ อาศัยเซตของอสมการที่เป็นไปตามธรรมชาติของปัญหาซึ่งเป็นปัญหาการออกแบบที่มีหลายเงื่อนไข

ผลการวิจัยพบว่า การออกแบบด้วยวิธีอสมการสามารถแก้ปัญหาการออกแบบที่ได้กล่าวไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นอย่างดี มีประสิทธิภาพ คือสามารถทำให้ระบบมีผลตอบที่ดี และในขณะเดียวกันยังสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้อีกด้วย และยิ่งไปกว่านั้นข้อได้เปรียบของวิธีอสมการคือ เงื่อนไขในการออกแบบแบบใหม่สามารถเพิ่มเติมเข้าไปในกระบวนการออกแบบได้อย่างง่ายดายโดยการเพิ่มอสมการเข้าไปในกระบวนการออกแบบ นั่นคือในกรณีที่ข้อตกลงทางการตลาดมีการเปลี่ยนแปลง เราสามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของระบบ AGC ให้สอดคล้องกับข้อตกลงที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างง่ายดายเพื่อที่จะเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ ข้อดีอีกประการหนึ่งของวิธีอสมการคือ เราไม่จำเป็นต้องออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเท่านั้น แต่ยังสามารถออกแบบพารามิเตอร์ในส่วนอื่นของระบบได้อีกด้วย

9.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาแบบจำลองของหน่วยผลิตไฟฟ้าชนิดอื่นๆ เพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความหลากหลายของแบบจำลอง
2. สร้างแบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากขึ้น
3. เพิ่มระยะเวลาในการพิจารณาในการออกแบบ
4. พิจารณา รูปแบบของสัญญาณรบกวนเนื่องจากโหลดชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่ในรูปแบบของฟังก์ชันขั้นบันได
5. ศึกษาเงื่อนไขทางการตลาดที่เหมาะสมที่จะนำมาพิจารณาในการออกแบบเพิ่มเติม

รายการอ้างอิง

1. Cohn, N. **Control of generation and power flow on interconnected systems**. New York: John Wiley, 1966.
2. Quazza, G. Noninteracting controls of interconnected electric power systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** 85(1966):727-741.
3. Fosha, C.E., Jr.; and Elgerd, O.I. The megawatt-frequency control problem: A new approach via optimal control theory. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** 89(April 1970):563-571.
4. Cavin, R.K.; Budge, M.C.; and Rasmussen, P. An optimal linear systems approach to load-frequency control. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** 90(1971):2472-2482.
5. Miniesy, S.M.; and Bohn, E.V. Optimum load-frequency continuous control with unknown deterministic power demand. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** 91(1972): 1910-1915.
6. Calovič, M.S. Linear regulator design for a load and frequency control. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** 91(1972):2271-2285.
7. Calovič, M.S.; Bingulac, S.P.; and Cuk, N.M. An output feedback proportional-plus-integral regulator for automatic generation control. **IEEE PES Summer Meeting** (July 1973): Paper No. C73-489-2.
8. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์. การควบคุมความถี่เนื่องจากโหลดแบบกระจายในระบบไฟฟ้ากำลัง 2 เขต ด้วยการป้อนกลับสัญญาณออก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชา วิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
9. Miniesy, S.M.; and Bohn, E.V. Two-level control of interconnected power plants. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** 90(1971):2742-2748.
10. Bengtsson, G.; and Lindahl, S. A design scheme for incomplete state or output feedback with application to boiler and power system control. **Automatica** 10(1974):15-30.
11. Sandell, N.R., Jr.; Varaiya, P.; Athans, M.; and Safonov, M.G. Survey of decentralized control methods for large scale systems. **IEEE Transactions on AC**. 23(1978):108-128.
12. Singh, M. **Decentralized control**. The Netherlands: North-Holland, 1981.

13. Jamshidi, M. **Large-scale systems: modeling and control**. U.S.A.: North-Holland, 1983.
14. Bengamin, N.M.; and Chan, W.C. Multilevel load-frequency control of interconnected power systems. **Proceedings of the IEE** 125(June 1978): 521-526.
15. Calovic, M.S.; Cuk, N.M.; and Djorovic, M. Autonomous area generation control of interconnected power systems. **Proceedings of the IEE** 124(April 1977): 393-402.
16. Venkateswarlu, K.; and Mahalanabis, A.K. Design of decentralized load-frequency regulators. **Proceedings of the IEE** 124(September 1977): 817-820.
17. Davison, E.J.; and Tripathi, N.K. The optimal decentralized control of a large power system: load and frequency control. **IEEE Transactions on AC**. 23(1978): 312-325.
18. Tacker, E.C.; Lee, C.C.; Reddoch, T.W.; Tan, T.O.; and Julich, P.M. Optimal control of interconnected electric energy systems: A new formulation. **Proceedings of the IEEE** 60(1972): 1239 – 1241.
19. Chown, G.A.; and Hartman, R.C. Design and experience with a fuzzy logic controller for Automatic Generation Control(AGC). **IEEE Transactions on Power Systems** 13(August 1998): 965 – 970.
20. Bohn, E.V.; and Miniesy S.M. Optimum load frequency sample data control with randomly varying system disturbances. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** 5(September – October 1972): 1916 – 1923.
21. Zakian, V.; and Al-Naib, U. Design of dynamical and control systems by the method of inequalities. **Proceedings of the IEE** 120(November 1973): 1421 – 1427.
22. Saadat, H. **Power system analysis**. Singapore: McGraw-Hill, 1999.
23. Kundur, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1994.
24. IEEE Committee Report. Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** (December 1973): 128 – 139.
25. Zakian, V., ed. **Control systems design**. London: Springer, 2005.
26. Rosenbrock, H.H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. **Computer Journal** 3 (1960): 175 – 184.
27. Lipschutz, S. **Schaum's outline of theory and problem of linear algebra**. New York: McGraw-Hill, 1968.

28. Kothari, D.P., and Nagrath, I.J. **Modern power system analysis**. 3rd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2003.
29. New York Independent System Operator. **NYISO Ancillary services manual**. New York: New York Power Pool, 1999.
30. Illian, H.F., and Hoffman, S. P. **Real energy interconnected operations services** [Online]. Available from: <http://www.nerc.com>
31. Jaleeli, N.; and VanSlyck, L.S. NERC's new control performance standards. **IEEE Transactions on Power Systems** 14 (August 1999): 1092 – 1099.
32. Yao, M.; Shoults, R.R.; and Kelm, R. AGC Logic based on NERC's new control performance standard and disturbance control standard. **IEEE Transactions on Power Systems** 15 (May 2000): 852 – 857.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรักษนัย นิธิฤทธิไกร เกิดวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2526 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย