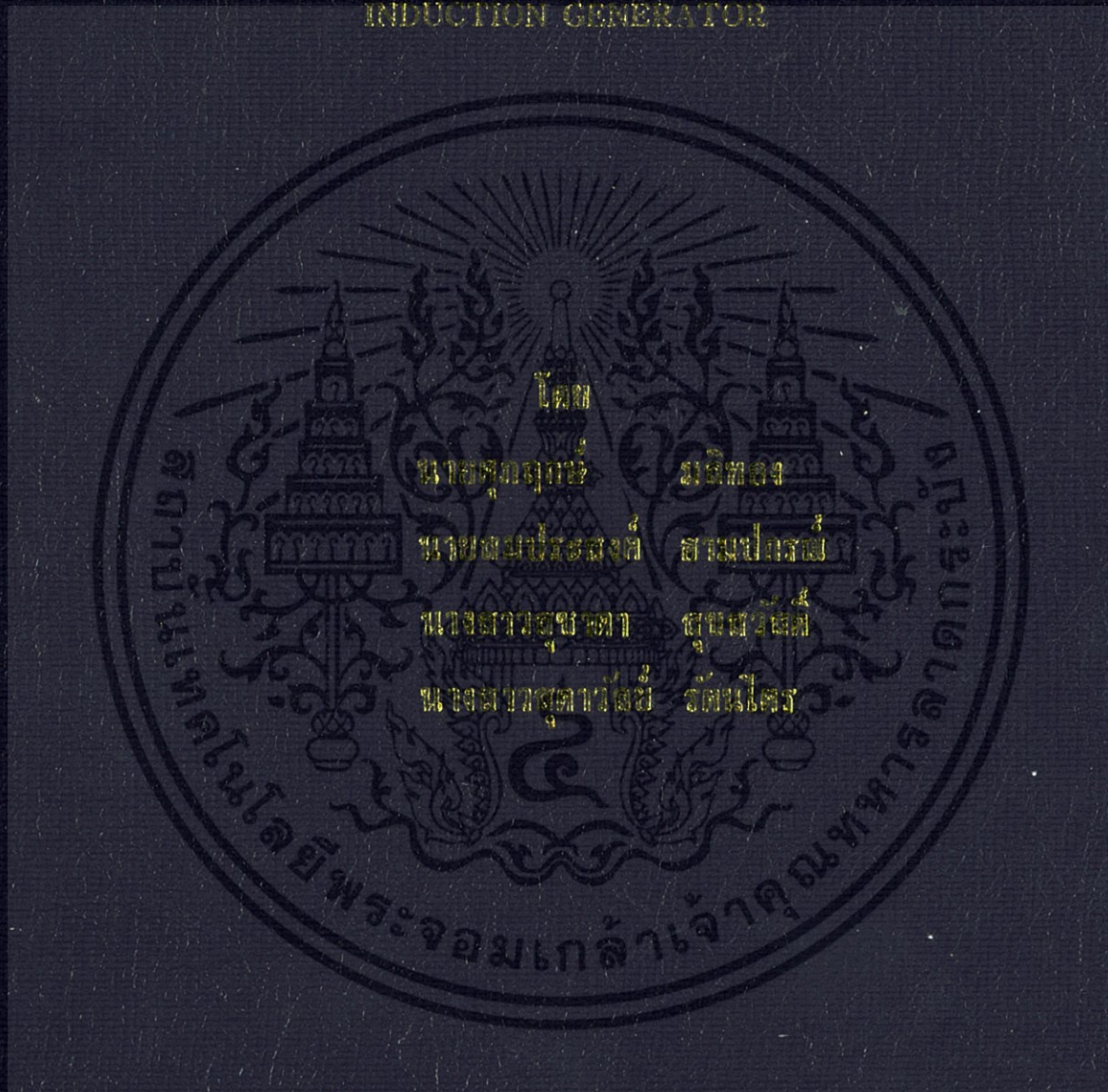


การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดกำลัง
POWER SYSTEM FREQUENCY CONTROLLED FROM DOUBLY FED
INDUCTION GENERATOR



ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง
POWER SYSTEM FREQUENCY CONTROLLED FROM DOUBLY FED
INDUCTION GENERATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POWER SYSTEM FREQUENCY CONTROLLED FROM DOUBLY FED INDUCTION
GENERATOR



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2555

การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง
POWER SYSTEM FREQUENCY CONTROLLED FROM DOUBLY FED INDUCTION
GENERATOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง

ผู้จัดทำ

- 
1. นายศุภฤกษ์ มลิตทอง
 2. นายสมประสงค์ ฮามปกรณ์
 3. นางสาวสุชาดา สุขสวัสดิ์
 4. นางสาวสุดาวลัย รัตนไตร


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. อิศระชัย งามหรุ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง

นายศุภฤกษ์ มลิทอง
นายสมประสงค์ ฮามปกรณ์
นางสาวสุชาดา สุขสวัสดิ์
นางสาวสุดาวลัย รัตนไตร
รศ.ดร.อิสรชัย งามทร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง (POWER SYSTEM FREQUENCY CONTROLLED FROM DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR) เมื่อระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงความต้องการของภาระทางไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าถูกรบกวนจากปัจจัยอื่นภายนอก รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลม ส่งผลให้ความถี่ของระบบเปลี่ยนไปจากเดิมความถี่ของระบบไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่วาระบบถูกรบกวนแบบใด มีความรุนแรงมากน้อยเพียงใด ซึ่งความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปนี้สามารถควบคุมได้โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทิศทางชนิดกึ่งหันลมที่ต่ออยู่กับระบบ และควบคุมแรงบิดของกังหันลม เพื่อที่จะนำไปควบคุมความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปให้กลับมามีเสถียรภาพได้ดังเดิม

POWER SYSTEM FREQUENCY CONTROLLED FROM DOUBLY FED INDUCTION

GENERATOR

Suparek Malithong

Somprasong Hampakorn

Suchada Suksawat

Sudawan Rattana-trai

Assoc.Prof.Dr.Issarachai Ngamroo Supervisor

Year 2012

ABSTRACT

This thesis presents an alleviation of the frequency fluctuation of the power system with doubly-fed induction generator wind turbine (DFIG). When the system changes the requirement of the load and the system is supplied the unbalance power from DFIG, they may cause frequency oscillation. Changing the frequency in the power system is more or less depended on disturbance that mentioned above. This thesis applies the DFIG to reduce the frequency fluctuation in power system. Simulation result shows that the proposed method can stabilize the frequency fluctuation.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความรู้ และให้คำแนะนำ ในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ให้กับคณะผู้จัดทำในครั้งนี้ ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ของคณะผู้จัดทำที่คอยให้ กำลังใจ และให้การสนับสนุน ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ



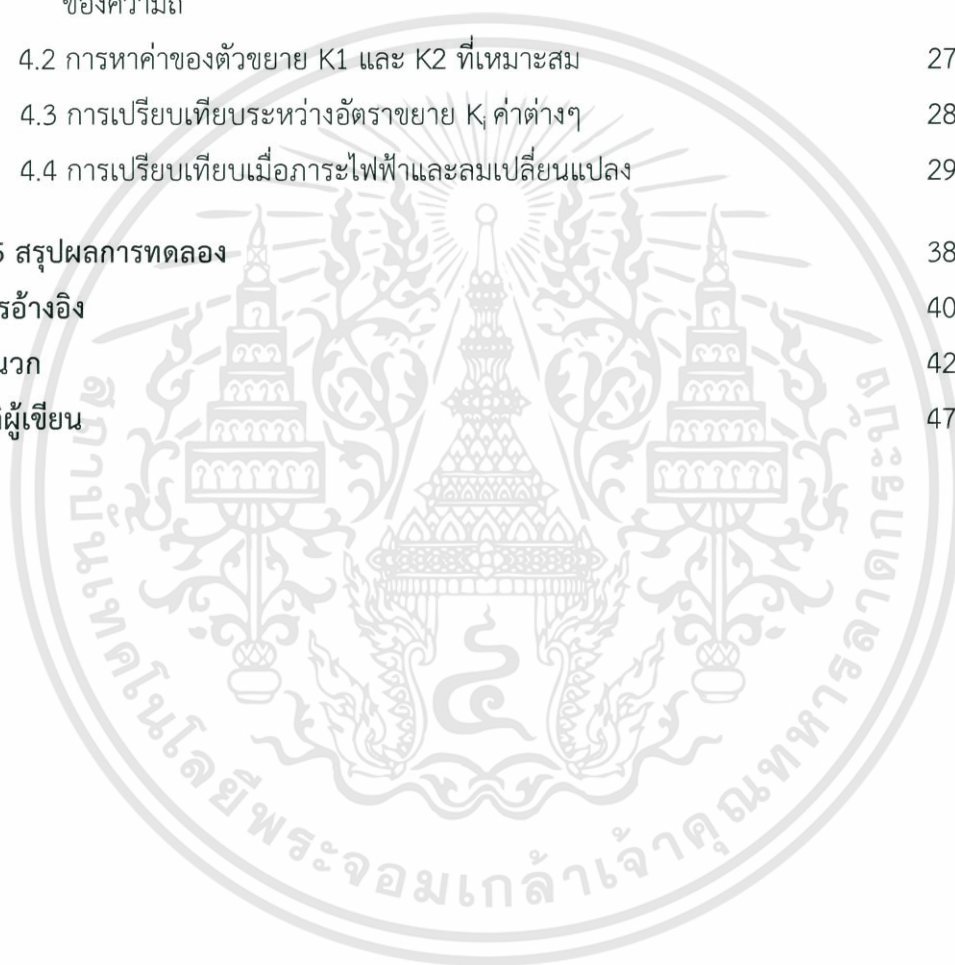
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	XIII
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พลังงานลม	5
2.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลม	5
2.1.1.1 พลังงานลม	5
2.1.1.2 กังหันลม	5
2.1.1.3 รูปแบบเทคโนโลยีกังหันลม	5
2.1.1.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลม	6
2.1.1.5 ข้อดีของพลังงานลม	9
2.1.2 การตอบสนองเชิงโครนัส	10
2.2 ตัวควบคุมระบบ	10
2.3 สมการ	13
2.3.1 สมการการแกว่ง	13
2.3.1.1 การตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อภาระทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง	13
2.3.1.2 การตอบสนองของภาระทางไฟฟ้าเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง	16
2.3.2 สมการของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	18
บทที่ 3 การจำลอง และออกแบบการทดลอง	21
3.1 แบบจำลองระบบเชิงโครนัส	21
3.2 แบบจำลองลูปควบคุมเสริม	23

สารบัญ (ต่อ)

3.3 แบบจำลองระบบกึ่งหันลม	24
3.4 แบบจำลองส่วนควบคุมปรับค่าแรงบิดโรเตอร์ของกึ่งหันลม	24
3.5 แบบจำลองปริพันธ์เพื่อนำไปสู่การหาค่าที่เหมาะสม	25
3.6 แบบจำลองตัวควบคุมปริพันธ์	26
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	26
4.1 การเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีตัวควบคุมและไม่มีตัวควบคุมผลตอบสนองของความถี่	26
4.2 การหาค่าของตัวขยาย K1 และ K2 ที่เหมาะสม	27
4.3 การเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยาย K _i ค่าต่างๆ	28
4.4 การเปรียบเทียบเมื่อภาระไฟฟ้าและลมเปลี่ยนแปลง	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	38
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	42
ประวัติผู้เขียน	47



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของระบบระบบความเร็วรอบเกือบคงที่	6
2.2 โครงสร้างของระบบที่สามารถปรับความเร็วได้	7
2.3 โครงสร้างของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	8
2.4 ลักษณะของกระแสที่จ่ายให้ขดโรเตอร์ขณะที่มีการเปลี่ยนความเร็วรอบ	8
2.5 โครงสร้างของระบบคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มพิกัดกำลัง	9
2.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนของกังหันไอน้ำ	10
2.7 บล็อกไดอะแกรมระบบป้อนกลับ	12
2.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วกับแรงบิด	14
2.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วกับกำลัง	16
2.10 ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วกับกำลังรวมกับค่าคงที่ความหน่วง	17
2.11 ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วกับกำลังรวมกับค่าคงที่ความหน่วง	17
2.12 วงจรสมมูลของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	19
3.1 แบบจำลองระบบการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง	21
3.2 แบบจำลองระบบชิงโครนิส	21
3.3 แบบจำลองลูบควบคุมเสริม	22
3.4 แบบจำลองระบบกังหันลม	24
3.5 แบบจำลองส่วนควบคุมปรับค่าแรงบิดโรเตอร์ของกังหันลม	24
3.6 แบบจำลองปริพันธ์เพื่อนำไปสู่การหาค่าที่เหมาะสม	25
3.7 แบบจำลองตัวควบคุมปริพันธ์	25
4.1 กราฟผลของระบบที่มีและไม่มีตัวควบคุมผลตอบสนองของความถี่	26
4.2 กราฟค่าของอัตราขยาย $K1, K2$ และพื้นที่ใต้กราฟของผลตอบสนองของความถี่	27
4.3 การเปรียบเทียบระหว่างค่าของอัตราขยาย $K1, K2$ ค่าต่างๆ	28
4.4 กราฟผลของอัตราขยาย Ki ในค่าต่างๆ	28
4.5 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง ไม่มีแรงบิดจากลม	29
4.6 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ไม่มีแรงบิดจากลม	30
4.7 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม ไม่มีแรงบิดจากลม	31
4.8 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง แรงบิดจากลมคงที่	32

สารบัญรูป (ต่อ)

4.9 กราฟผลตอบแทนความถี่การไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงบิดจากลมคงที่	33
4.10 กราฟผลตอบแทนความถี่การไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม แรงบิดจากลมคงที่	34
4.11 กราฟผลตอบแทนความถี่การไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลง	35
4.12 กราฟผลตอบแทนความถี่การไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงบิดจากลม เปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม	36
4.13 กราฟผลตอบแทนความถี่การไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม แรงบิดจากลม เปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม	37



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1 แผนการดำเนินการโครงการ

3



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายและมีส่วนในการช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบ ตัวอย่างเช่นพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น เนื่องจากเป็นพลังงานที่ได้จากธรรมชาติ และเป็นพลังงานสะอาดที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย แต่ในการใช้พลังงานลมในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น จำเป็นจะใช้ควบคู่กับกังหันลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ซึ่งระบบไฟฟ้าที่มีกังหันลม (Wind Turbine) เป็นส่วนหนึ่งในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยปกติแล้วตัวกังหันลมมักจะเป็นตัวรวบรวมระบบไฟฟ้า เนื่องจากต้นกำลังทางกลมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้ควบคุมได้ยาก และไม่สามารถควบคุมความเร็วลมได้ ซึ่งเป็นข้อเสียของระบบไฟฟ้าที่มีกังหันลม จากปัญหาของระบบไฟฟ้าที่พบในช่วงต้นที่กล่าวมานั้น นำไปสู่แนวคิดที่จะแก้ปัญหาโดยนำข้อเสียของระบบไฟฟ้าไปปรับปรุงระบบไฟฟ้า เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากลับมามีประสิทธิภาพดังเดิม

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ ที่จะให้ผู้ใช้ไฟฟ้ามั่นใจในระบบไฟฟ้า การที่ระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของภาระทางไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าถูกรบกวนจากปัจจัยอื่นภายนอก รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลม จะส่งผลทำให้ความถี่ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งความถี่ของระบบไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ว่าระบบถูกรบกวนแบบใด มีความรุนแรงมากแค่ไหน

ปริญญานิพนธ์นี้จึงเป็นการนำข้อเสียของผลตอบสนองของความถี่ของระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกังหันลม (Frequency Response from Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine) ที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการควบคุมผลตอบสนองความถี่ของระบบไฟฟ้าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (Proportional-Integral: PI) ทำหน้าที่ควบคุมแรงบิดของกังหันลมให้ได้มาซึ่งผลตอบสนองความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของผลตอบสนองของความถี่ของระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกังหันลมเป็นส่วนหนึ่งของระบบ

1.2.2 เพื่อศึกษาและออกแบบตัวควบคุมที่จะเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้า เพื่อให้ผลตอบสนองของความถี่ของระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและมีค่าความผิดพลาดของความถี่ที่สภาวะคงตัวน้อยที่สุด

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1.3.1 ศึกษาการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง โดยจะสนใจในเรื่องของเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและค่าความผิดพลาดของความถี่ที่สภาวะคงตัว และออกแบบตัวควบคุมที่จะใส่เข้าไปในระบบไฟฟ้า เพื่อให้ผลตอบสนองของความถี่ของระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและมีค่าความผิดพลาดของความถี่ที่สภาวะคงตัวน้อยที่สุด

1.3.2 ออกแบบตัวควบคุมระบบเพื่อให้ผลตอบสนองของความถี่ของระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพ และมีค่าความผิดพลาดของความถี่ที่สภาวะคงตัวให้ดียิ่งขึ้น

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1.4.1 ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง

1.4.2 ศึกษาและออกแบบแบบจำลองของระบบที่มีการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทางด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

1.4.3 ทำการปรับปรุงแก้ไขแบบจำลองของระบบที่มีการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทางด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการโครงการ

การดำเนินงาน	มิ.ย. 2555	ก.ค. 2555	ส.ค. 2555	ก.ย. 2555	ต.ค. 2555	พ.ย. 2555	ธ.ค. 2555	ม.ค. 2556	ก.พ. 2556
1. ศึกษาข้อมูลและขอบเขตของงานวิจัยจากบทความต่างประเทศ	←.....→								
2. ศึกษาและออกแบบแบบจำลองของระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink		←.....→							
3. สร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้าตามที่ได้ออกแบบไว้แล้วแก้ไขจุดบกพร่องจนได้ผลตามต้องการ			←.....→						
4. วิเคราะห์ผลของแบบจำลองของระบบไฟฟ้า							←.....→		
6.สรุปผลการทดลอง								←.....→	
7.จัดทำรูปเล่มปริยญาณิพนธ์และวารสารทางวิชาการ								←.....→	

←.....→ : แผนงานที่วางไว้

←————→ : แผนงานที่ทำได้จริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.6.1 ระบบไฟฟ้าที่มีการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง จะมีเสถียรภาพอยู่เสมอเนื่องจากมีตัวควบคุมที่ทำให้ระบบกลับมาสู่เสถียรภาพอีกครั้ง และมีค่าความผิดพลาดของความถี่ที่สภาวะคงตัวน้อย

1.6.2 ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า เนื่องจากระบบไฟฟ้าจะมีเสถียรภาพอยู่เสมอ



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบทางไฟฟ้า

2.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลม

2.1.1.1 พลังงานลม

พลังงานลม เป็นพลังงานตามธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ความกดดันของบรรยากาศและแรงจากการหมุนของโลก สิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเร็วลมและกำลังลม เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าลมเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่มีอยู่ในตัวเอง ซึ่งในบางครั้งแรงที่เกิดจากลมอาจทำให้บ้านเรือนที่อยู่อาศัยพังทลายต้นไม้ หักโค่นลง สิ่งของวัตถุต่างๆ ล้มหรือปลิวลอยไปตามลม ฯลฯ ในปัจจุบันมนุษย์จึงได้ให้ความสำคัญและนำพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่โดยทั่วไป ไม่ต้องซื้อหา เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อม และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จุกหมดสิ้น พลังงานลมก็เหมือนกับพลังงานแสงอาทิตย์คือไม่ต้องซื้อ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเอาพลังงานลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น พื้นที่ซึ่งมีปัญหาในการวิจัยพัฒนานำเอาพลังงานลมมาใช้งานเนื่องจากปริมาณของลมไม่สม่ำเสมอตลอดปี แต่ก็ยังคงมีพื้นที่บางพื้นที่ที่สามารถนำเอาพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ เช่น พื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลเป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ช่วยในการเปลี่ยนจากพลังงานลมออกมาเป็นพลังงานในรูปอื่น ๆ เช่น พลังงานไฟฟ้า หรือ พลังงานกล ก็ได้แก่ กังหันลม เป็นต้น แต่ก็ยังมีวิธีอีกหลายอย่าง

2.1.1.2 กังหันลม

กังหันลม คือเครื่องจักรกลอย่างหนึ่งที่สามารถรับและแปลงพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้ และนำพลังงานกลมาใช้เพื่อสูบน้ำโดยตรงหรือผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า การพัฒนากังหันลมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์เริ่มมีมาตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณจนถึงยุคปัจจุบัน โดยการออกแบบกังหันลมต้องอาศัยความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของลมและหลักวิศวกรรมศาสตร์ในแขนงต่าง ๆ เพื่อให้ได้กำลังงาน พลังงาน และประสิทธิภาพสูงสุด

2.1.1.3 รูปแบบเทคโนโลยีกังหันลม

กังหันลมสามารถแบ่งออกตามลักษณะการจัดวางแกนของใบพัดได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

1. กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Turbine : VAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ

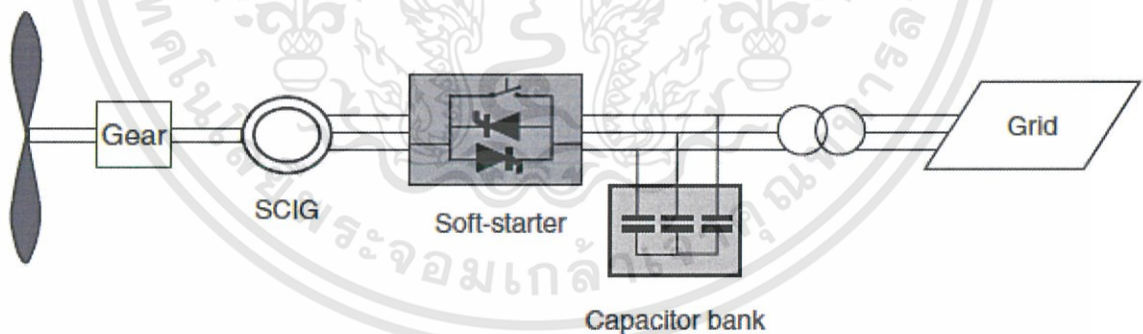
2. กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Turbine : HAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลม

2.1.1.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลม

เนื่องจากความเร็วรอบของกังหันลมจะต้องเปลี่ยนตามความเร็วลมเพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุด ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมกับกังหันลมจะต้องสามารถทำงานแบบปรับความเร็วได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งแบบซิงโครนัสและแบบเหนี่ยวนำ (อะซิงโครนัส) ต่างก็ทำงานที่ความเร็วรอบ เกือบจะคงที่ ในการจ่ายพลังงานเข้ากับระบบของการไฟฟ้าที่มีความถี่คงที่ ดังนั้น ในการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วรอบไม่คงที่เข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า หรือกริด นั้นจะต้องใช้เทคนิคเฉพาะในการเชื่อมต่อ ซึ่งเราสามารถแบ่งประเภทของการควบคุมออกเป็น 4 ชนิด คือ

1. ชนิดที่ 1 : ระบบความเร็วรอบเกือบคงที่

ระบบนี้ทำให้กังหันลมสูญเสียความสามารถในการผลิตพลังงานระบบนี้จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Generator : SCIG) ทำงานร่วมกับชุดอุปกรณ์ลดการกระชากขณะเริ่มทำงาน (Soft Start) เพื่อลดกระแสกระชากในการเริ่มทำงาน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำจะดึงกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบ จึงต้องทำการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยระบบความถี่คงที่ถือเป็นเทคโนโลยีเก่าและไม่นิยมใช้สำหรับกังหันลมขนาดใหญ่ในปัจจุบันโครงสร้างของระบบนี้แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบความเร็วรอบเกือบคงที่

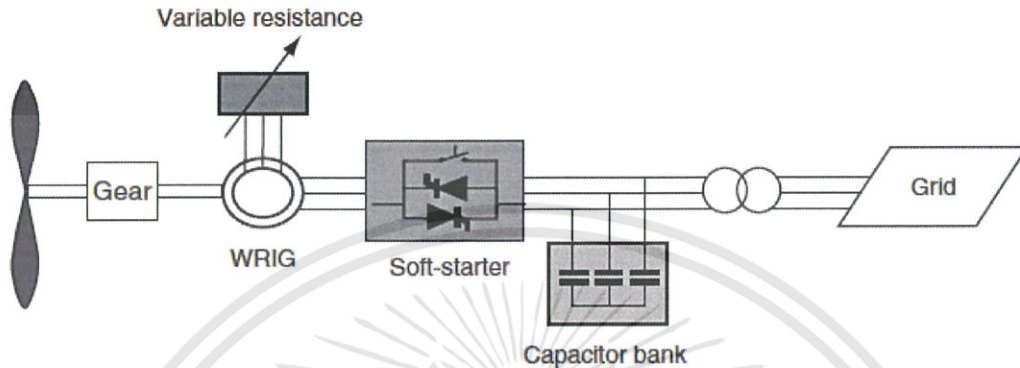
(ที่มา: Alessandro Roman. Frequency Response from Wind Turbines)

2. ชนิดที่ 2 : ระบบที่สามารถปรับความเร็วได้

ส่วนประกอบหลักของระบบคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำที่มีขดลวดโรเตอร์ (Wound Rotor Induction Generator : WRIG) การปรับความเร็วรอบสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนความต้านทานที่ต่ออยู่กับขดลวดโรเตอร์ ซึ่งเป็นการปรับสลิบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำและเนื่องจากระบบนี้ยังต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบไฟฟ้าและระบบลดการกระชากขณะเริ่มทำงาน (Soft Start) ความสามารถในการปรับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำได้ในช่วง 0-10% สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ผู้ผลิตกังหันลมของเดนมาร์ค เช่น Vestas ยังคงใช้งานระบบนี้อยู่กับกังหันลมบางรุ่น โครงสร้างของระบบนี้แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของระบบที่สามารถปรับความเร็วได้

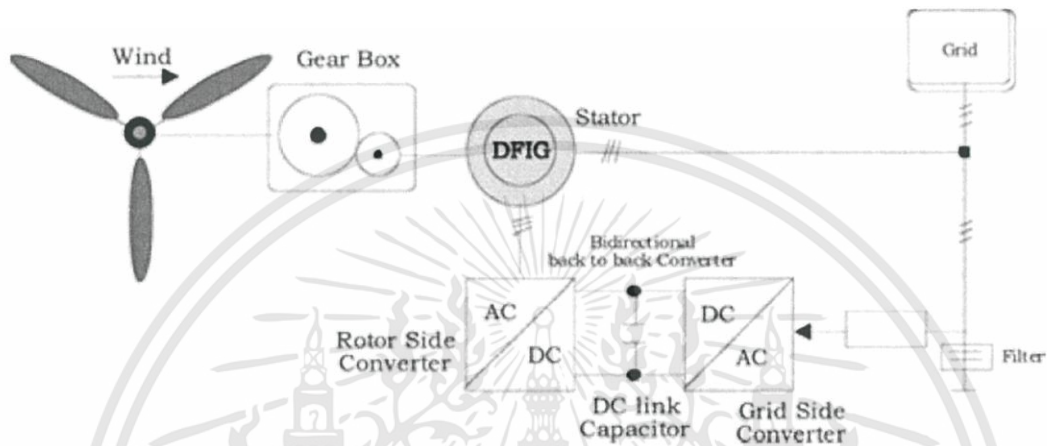
(ที่มา: Alessandro Roman. Frequency Response from Wind Turbines)

3. ชนิดที่ 3 : ระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดควบคุมสองทาง (Doubly Fed Induction Generator : DFIG)

ระบบ DFIG เป็นระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบปรับความเร็วได้ ระบบนี้นิยมใช้กันแพร่หลายเพราะมีข้อดีว่าการควบคุมความเร็วรอบชนิด 2 คือ สามารถปรับความเร็วรอบได้ในช่วง -40% ถึง +30% ของความเร็วซิงโครนัส ความสามารถในการปรับความเร็วได้ในช่วงกว้างทำให้ได้พลังงานสูงสุดจากกังหันเกือบตลอดย่านของความเร็วลม ระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ยังมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ สามารถใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดกำลังเพียงประมาณ 30% ของพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จึงสามารถใช้กับกังหันลมขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำที่มีขดลวดโรเตอร์ (Wound Rotor Induction Generator : WRIG) ประกอบด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์ซึ่งต่อในลักษณะหันหลังชนกัน (Back-To-Back) คอนเวอร์เตอร์ที่ต่อทางด้านโรเตอร์ เรียกว่า Rotor Side Converter หรือ Machine Side Converter ส่วนคอนเวอร์เตอร์ที่อยู่ทางด้านระบบไฟฟ้าเรียกว่า Grid Side Converter หรือ Line Side Converter ขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำที่มีขดลวดโรเตอร์จะต่ออยู่กับกริดที่มีความถี่คงที่ ส่วนขดลวดโรเตอร์จะต่ออยู่กับชุดคอนเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับขดลวดโรเตอร์ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโรเตอร์ขึ้นอยู่กับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้ระบบไฟฟ้ามองเห็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสมือนว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ นอกจากนี้ ระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ยังไม่ต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

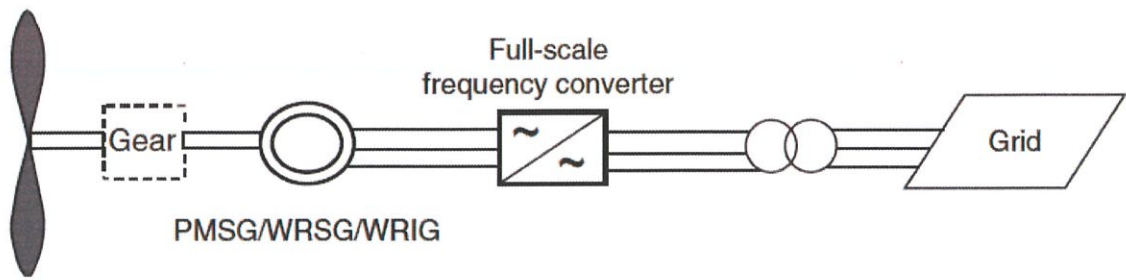
ความเร็วลมมีค่าสูงพอ จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งตัวเก็บประจุ ส่วนข้อเสียของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง คือ ยังต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำที่มีขดลวดโรเตอร์ ซึ่งมี สลิปริง และปัญหาที่เกิดกับชุดคอนเวอร์เตอร์ตอนเกิดสภาวะความผิดพลาดขึ้นในระบบไฟฟ้า โครงสร้างของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง แสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนลักษณะของกระแสที่จ่ายให้ขดโรเตอร์ขณะที่มีการเปลี่ยนความเร็วรอบแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
(ที่มา: Alessandro Roman. Frequency Response from Wind Turbines)

4. ชนิดที่ 4 : ระบบคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มพิกัดกำลัง (Full Scale Converter)

ระบบนี้สามารถปรับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ตลอดช่วงของการควบคุม โดยการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าจะมีคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีพิกัดกำลังเท่ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยคอนเวอร์เตอร์ ยังควบคุมการจ่ายไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบ และระบบลดการกระชากขณะเริ่มทำงาน (Soft Start) ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบชนิด 4 เป็นได้ทั้งแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก, เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำที่มีขดลวดโรเตอร์ และเครื่องกำเนิดชนิดซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator: PMSG) และมีผู้ผลิตกังหันบางรายใช้ระบบนี้กับกังหันลมแบบไม่ต้องใช้เกียร์ทด (Gear Less) โครงสร้างระบบคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มพิกัดกำลัง แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มพิกัดกำลัง

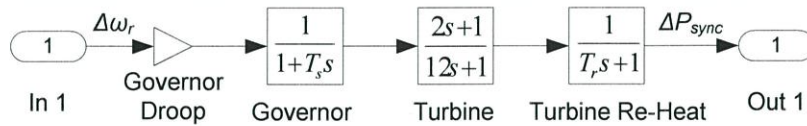
(ที่มา: Alessandro Roman. Frequency Response from Wind Turbines)

2.1.1.5 ข้อดีของพลังงานลม

- เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยลดระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่สุดของการผลิตพลังงานลม นอกจากนี้พลังงานลมยังปราศจากสารก่อมลพิษอื่นๆ ที่เกิดจากเชื้อเพลิงฟอสซิลและโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อีกด้วย
- มีความสมดุลด้านพลังงานที่ดีเยี่ยม การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการผลิต ติดตั้ง และให้บริการของกังหันลมที่มีช่วงอายุโดยเฉลี่ย 20 ปีถูก "ทดแทน" หลังดำเนินการผลิต 3-6 เดือน ซึ่งเท่ากับการผลิตพลังงานมากกว่า 19 ปีโดยแทบไม่มีค่าใช้จ่ายด้านสิ่งแวดล้อมเลย
- ดำเนินงานได้รวดเร็ว ฟาร์มกังหันลมสามารถสร้างเสร็จสิ้นภายในไม่กี่สัปดาห์ โดยใช้รถเครนติดตั้งหอคอยของกังหันลม ส่วนเชื่อมต่อกับปีกหมุน (โครงยึด) และ ใบพัดเหนือฐานคอนกรีตเสริมกำลัง ด้วยเงินลงทุนที่เท่ากัน พลังงานลมสร้างงานมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ 5 เท่า และผลิตพลังงานได้มากกว่า 2.3 เท่า
- เป็นแหล่งพลังงานที่น่าเชื่อถือและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากลมที่ใช้ขับเคลื่อนกังหันลมไม่มีค่าใช้จ่ายตลอดกาล และไม่ถูกกระทบโดยราคาของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ขึ้นๆ ลงๆ นอกจากนี้ยังไม่ต้องอาศัยการทำเหมือง ขุดเจาะ หรือ ขนส่งไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้า ในขณะที่ราคาเชื้อเพลิงฟอสซิลสูงขึ้น คุณค่าของพลังงานลมก็สูงขึ้นเช่นกัน ทำให้ค่าใช้จ่ายของการผลิตไฟฟ้าโดยพลังงานลมมีแต่จะลดลง

นอกจากนี้ในโครงการใหญ่ๆ ที่ใช้กังหันลมขนาดกลางที่ได้รับการทดสอบประสิทธิภาพ จะมีศักยภาพในการปฏิบัติงาน 98% อย่างสม่ำเสมอโดยอาศัยลม ซึ่งหมายถึงต้องซ่อมแซมเป็นระยะเวลาเพียง 2% ซึ่งเป็นประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่าประสิทธิภาพที่คาดหวังได้จากโรงไฟฟ้าทั่วไปอย่างมาก

2.1.2 การตอบสนองเชิงโครนัส



รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนของกังหันไอน้ำ

(ที่มา: Alessandro Roman. Frequency Response from Wind Turbines)

ปริมาณของโรงไฟฟ้าและระดับการตอบสนองจะถูกตั้งค่าโดยตัวขยาย ที่ตำแหน่งบล็อกดรูพ โกวเวอร์เนอร์ (Governor Droop) หรือค่า K ดรูพ โกวเวอร์เนอร์สามารถทำให้เกิดเสถียรภาพมากขึ้นในการทำงานได้ หลักการทำงานของดรูพ โกวเวอร์เนอร์เป็นการนำค่าเอาต์พุตมาคำนวณหาค่าผิดพลาดของระบบ และนำค่าความผิดพลาดนั้นไปเทียบกับค่าอ้างอิงทำให้ได้ค่าที่สามารถนำไปปรับปรุงระบบได้ซึ่งค่า K สามารถนำเสนอโดยฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่าง ค่าความเปลี่ยนแปลงเชิงโครนัสเอาต์พุต และค่าความเปลี่ยนแปลงของระบบความถี่

เขียนเป็นสมการได้

$$k = \frac{\Delta P (pu)}{\Delta f (pu)} \quad (2.1)$$

บล็อกโกวเวอร์เนอร์ (Governor) คือค่าจริงจากกังหันไอน้ำเพื่อเปลี่ยนระดับพลังงานเอาต์พุตเมื่อระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงจากทางด้านอินพุตซึ่ง 0.2 เป็นค่าคงที่เวลาปกติของโกวเวอร์เนอร์สำหรับกังหันไอน้ำ ($T_G=0.2s$)

บล็อกเทอร์ไบน์ (Turbine) คือ การทำงานจริงของกังหันในการทำงานปกติและค่าปกติของค่าคงที่เวลา คือ 0.3 ($T_{CH}=0.3s$)

บล็อกเทอร์ไบน์แบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ (Turbine Re-heat) คือ การทำงานจริงของเทอร์ไบน์แบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ในการทำงานปกติ แบบจำลองจะใช้ค่าคงที่ของเวลาเท่ากับ $12s$

2.2 ตัวควบคุมระบบ

ตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ เป็นที่นิยมใช้ควบคุมกระบวนการ ซึ่งการควบคุมกระบวนการโดยทั่วไปจะเกี่ยวกับการคุมค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมเช่น อุณหภูมิ ความดัน ระดับ ฯลฯ คุณสมบัติของการควบคุมแบบพีไออีกอย่างหนึ่งก็คือ สามารถปรับปรุงให้ค่าผิดพลาดที่อยู่ในสภาวะคงตัวให้ลดน้อยลงหรือทำให้ไม่มีค่าผิดพลาดอยู่ในสภาวะคงตัวก็ได้ โดยตัว ควบคุม Proportional (P) คือการปรับสัดส่วนสัญญาณตัวควบคุม Integral (I) คือการอินทิเกรต สัญญาณกลไกทั้งสองถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนควบคุมสัญญาณให้เกิดผลอย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วน (P)

เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน

เทอมของสัดส่วนเป็นไปตามสมการ
$$U_p(t) = k_p e(t) \quad (2.2)$$

โดยที่ $U_p(t)$ คือ สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

k_p คือ อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

e คือ ค่าความผิดพลาด

t คือ เวลา

ผลอัตราขยายสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้าม ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย

ปริพันธ์ (I)

ผลจากเทอมปริพันธ์ (บางครั้งเรียก Reset) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์ (K_i)

เทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ
$$U_i(t) = k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.3)$$

เมื่อ $U_i(t)$ คือ สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

k_i คือ อัตราขยายปริพันธ์ (ตัวแปรปรับค่าได้)

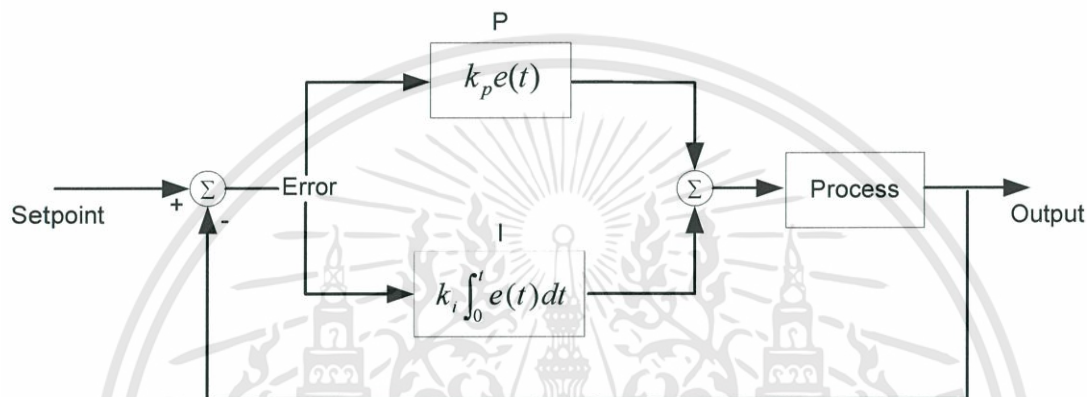
e คือ ค่าความผิดพลาด

t คือ เวลา

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสม จึงสามารถทำให้เกิดค่าพุ่งเกินหรือโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น)

เขียนสมการ PI ได้
$$U_{PI}(t) = k_e e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.4)$$

ทำเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ (2.3)



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมระบบป้อนกลับ

นำสมการที่ (2.2) และ (2.3) มาแปลงลาปลาซ จะได้

$$U_p(s) = k_p E(s) \quad (2.5)$$

$$U_i(s) = \frac{k_i}{s} E(s) \quad (2.6)$$

โดย $E(s)$ คือ สัญญาณขาเข้า

$U_p(s), U_i(s)$ คือ สัญญาณขาออกในเทอมสัดส่วน และเทอมปริพันธ์ตามลำดับ

แสดงตัวควบคุมต่างๆ ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังต่อไปนี้

ตัวควบคุม P
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \quad (2.7)$$

ตัวควบคุม PI
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (2.8)$$

2.3 สมการ

2.3.1 สมการการแกว่ง

2.3.1.1 การตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อภาระทางไฟฟ้าเปลี่ยน

เมื่อภาระทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้แรงบิดทางไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงทันที ซึ่งเป็นสาเหตุของความแตกต่างระหว่างแรงบิดทางกล กับแรงบิดทางไฟฟ้าเป็นผลให้ความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังสมการการเคลื่อนที่ผลของความแตกต่างระหว่างแรงบิดทางไฟฟ้า กับแรงบิดทางกลคือแรงบิดความเร่ง

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.9)$$

เมื่อ T_m, T_e มีค่าเป็นบวกสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

T_a คือ ค่าแรงบิดความเร่ง ($N.m$)

T_m คือ ค่าแรงบิดทางกล ($N.m$)

T_e คือ ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า ($N.m$)

สามารถหาสมการการแกว่งได้จาก ;

$$j \frac{d\omega_m}{dt} = T_a \quad (2.10)$$

โดยที่ j คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ($kg.m^2$)

ω_m คือ ค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s)

สำหรับระบบไฟฟ้าพิจารณาความเฉื่อย ในรูปค่าคงที่ความเฉื่อย H ;

$$H = \frac{1}{2} \frac{j\omega_{om}^2}{VA_{base}} \quad (2.11)$$

เมื่อ ω_{om} ค่าความเร็วเชิงมุมพิกัด (rad/s)

$$\frac{2HVA_{base}}{\omega_{om}^2} = j \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.10) จัดรูปใหม่ได้ ;

$$j = \frac{dt}{d\omega_m} T_a \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการ (2.9) แทนในสมการ (2.13) ได้ ;

$$j = \frac{dt}{d\omega_m} (T_m - T_e) \quad (2.14)$$

นำสมการ (2.14) แทนในสมการ (2.12) ได้ ;

$$\frac{2HVA_{base}}{\omega_{om}^2} = \frac{dt}{d\omega_m} (T_m - T_e) \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) จัดรูปใหม่ได้ ;

$$2H = \left[\frac{(T_m - T_e)}{\frac{VA_{base}}{\omega_{om}}} \right] \frac{dt(\omega_{om})}{d\omega_m} \quad (2.16)$$

จากสมการ $T_{base} = \frac{VA_{base}}{\omega_m}$ เป็นสมการหนึ่งหน่วยของการเคลื่อนที่ ; (2.17)

$$\bar{\omega}_r = \frac{\omega_m}{\omega_{om}} \quad (2.18)$$

นำสมการที่ (2.17) และ (2.18) แทนในสมการที่ (2.16) ได้ ;

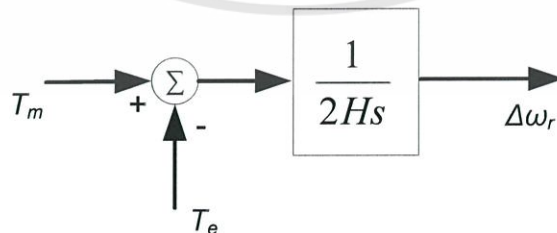
$$2H = \frac{(T_m - T_e)}{T_{base}} \frac{dt}{d\bar{\omega}_r} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) จัดรูปใหม่ได้ ;

$$\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (\bar{T}_m - \bar{T}_e) \quad (2.20)$$

โดยที่ $\Delta\omega_r = \frac{d\bar{\omega}_r}{dt}$

จากสมการที่ (2.20) สร้างเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วกับความเร่ง

(ที่มา: Alessandro Roman. Frequency Response from Wind Turbines)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	S	คือ รูปลาปลาซ
	T_a	คือ แรงบิดความเร่ง (pu)
	T_m	คือ แรงบิดทางกล (pu)
	H	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (MW*sec/MVA)
	T_e	คือ แรงบิดทางไฟฟ้า (pu)
	$\Delta\omega_r$	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วโรเตอร์เชิงมุม (pu)

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงบิด แสดงได้โดย

$$P = \omega_r T \quad (2.21)$$

พิจารณาจากความเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากแสดงได้โดยใส่ Δ หน้าตัวแปรนั้น ส่วนค่าเริ่มต้นเขียนได้โดยใส่ 0 ข้างใต้ตัวแปรนั้น สามารถเขียนได้

$$P = P_0 + \Delta P \quad (2.22)$$

$$T = T_0 + \Delta T \quad (2.23)$$

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \quad (2.24)$$

นำสมการ (2.22), (2.23) และ (2.24) แทนในสมการที่ (2.21) ;

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T) \quad (2.25)$$

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 T_0 + \Delta\omega_r \Delta T) + (\omega_0 \Delta T + \Delta\omega_r T_0) \quad (2.26)$$

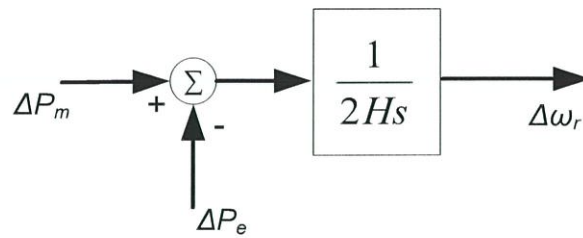
โดยที่ $P_0 = \omega_0 T_0 + \Delta\omega_r \Delta T$ และ $\Delta P = \omega_0 \Delta T + \Delta\omega_r T_0$

ดังนั้น $\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 (\Delta T_m - \Delta T_e) + \Delta\omega_r (T_{m0} - T_{e0}) \quad (2.27)$

ในสภาวะคงตัวแรงบิดทางไฟฟ้ากับแรงบิดทางกลจะมีค่าเท่ากัน ($T_{m0} = T_{e0}$) และ ให้ความเร็วเท่ากับหนึ่งหน่วย ($\omega_0 = 1$) จะได้

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (2.28)$$

เทียบกับสมการ (2.20) สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมในรูปของ ΔP_m และ ΔP_e ได้ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วกับกำลัง

(ที่มา: Alessandro Roman. Frequency Response from Wind Turbines)

ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่เราพิจารณานี้ กำลังทางกลของกังหันเป็นตัวหลักที่รับพลังงานจากลมและซึ่งไม่ขึ้นกับความถี่

2.3.1.2 การตอบสนองของภาระทางไฟฟ้าเมื่อความถี่เปลี่ยน

ภาระของระบบไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์ทางไฟฟ้าหลายชนิด สำหรับอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปอื่น ๆ ได้ เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานแสง , พลังงานความร้อน เป็นต้น พลังงานไฟฟ้านั้นจะไม่ขึ้นกับความถี่ ส่วนในรูปแบบของภาระมอเตอร์ เช่น พัดลม , ปั๊ม การเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้ากับความถี่จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยน ลักษณะที่ว่าจะขึ้นอยู่กับความถี่หรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของโหลด สามารถพิจารณาได้จาก

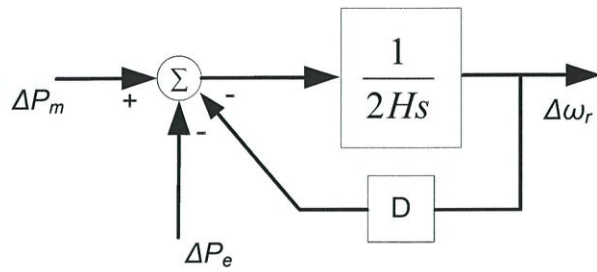
$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega_r \quad (2.29)$$

โดยที่ ΔP_L คือ ไม่มีการตอบสนองความถี่เมื่อภาระเปลี่ยน

$D\Delta\omega_r$ คือ มีการตอบสนองความถี่เมื่อภาระเปลี่ยน

D คือ ค่าคงที่ความหน่วงโหลด

ค่าคงที่ความหน่วงแสดงได้จากเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนของโหลดต่อหนึ่งเปอร์เซ็นต์ของความถี่ D มีค่า 1-2% ค่า $D=2$ หมายความว่า เมื่อความถี่เปลี่ยนไป 1% ทำให้ภาระเปลี่ยนไป 2% บล็อกไดอะแกรมที่รวมผลกระทบของค่าความหน่วงของโหลด แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วกับกำลังรวมกับค่าคงที่ความหน่วง
(ที่มา: Alessandro Roman. Frequency Response from Wind Turbines)

สามารถลดรูปได้โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

$$\frac{out}{in} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \tag{2.30}$$

โดย $G(s) = \frac{1}{2Hs}$, $H(s) = D$

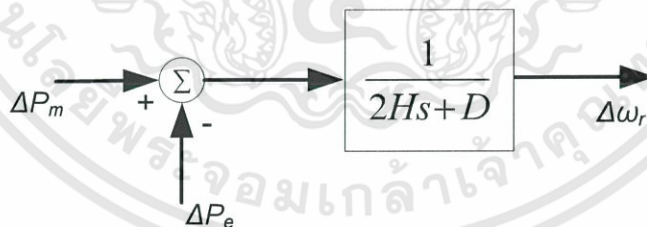
แทนในสมการ (2.30) ได้

$$\frac{out}{in} = \frac{\frac{1}{2Hs}}{1+\frac{1}{2Hs}D} \tag{2.31}$$

จัดรูปได้

$$\frac{out}{in} = \frac{1}{2Hs+D} \tag{2.32}$$

สามารถนำมาเขียนบล็อกไดอะแกรมใหม่ได้แสดงดังรูปที่ 2.11

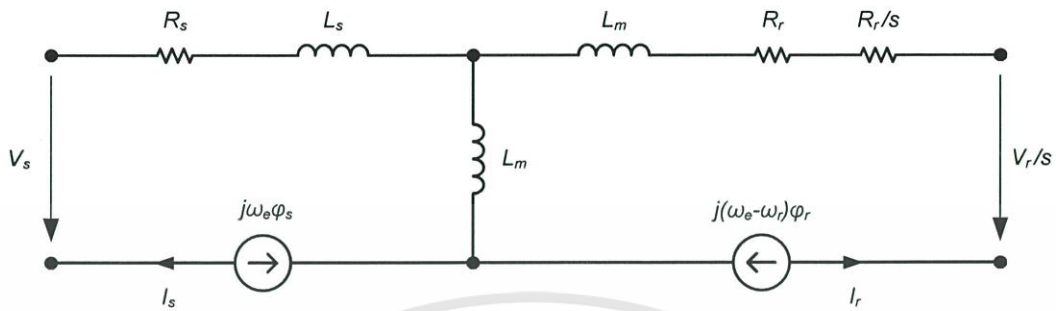


รูปที่ 2.11 ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วกับกำลังรวมกับค่าคงที่ความหน่วง
(ที่มา: Alessandro Roman. Frequency Response from Wind Turbines)

ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็ว ผลตอบสนองของระบบจะทำให้การเปลี่ยนแปลง ซึ่งกำหนดโดยค่าคงที่ความเฉื่อย และค่าคงที่ความหน่วง ค่าความคลาดเคลื่อนของสภาวะคงตัว จะถูกชดเชยโดยค่าการที่เปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับ การตอบสนองของความถี่

2.3.2 สมการของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

จากรูปวงจรสมมูลของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

โดย	V_s	คือ ความเร็วสเตเตอร์
	V_r	คือ ความเร็วโรเตอร์
	i_s	คือ กระแสสเตเตอร์
	i_r	คือ กระแสโรเตอร์
	R_s	คือ ความต้านทานสเตเตอร์
	R_r	คือ ความต้านทานโรเตอร์
	ϕ_s	คือเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์
	ϕ_r	คือเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์
	ω_e	คือ ความเร็วเชิงมุมกรอป้ออริง
	ω_r	คือ ความเร็วเชิงมุมโรเตอร์
	j	คือ ตัวประกอบจำนวนเชิงซ้อน
	L_m	คือ ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก
	L_s	คือ ค่าความเหนี่ยวนำสเตเตอร์
	L_r	คือ ค่าความเหนี่ยวนำโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตเตอร์

$$\vec{V}_s = R_s \vec{i}_s + \vec{\varphi}_s + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \vec{\varphi}_s \quad (2.33)$$

$$\vec{V}_s = R_s \vec{i}_s + L_{ss} \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r + \frac{L_{ss}}{\omega_s} \frac{d}{dt} \vec{i}_s + \frac{L_m}{\omega_s} \frac{d}{dt} \vec{i}_r \quad (2.34)$$

พิจารณาในรูป แกน d-q ;

$$\text{d-axis ; } V_{sd} = R_s i_{sd} - L_{ss} i_{sq} - L_m i_{rq} + \frac{L_{ss}}{\omega_s} \frac{d}{dt} i_{sd} + \frac{L_m}{\omega_s} \frac{d}{dt} i_{rd} \quad (2.35)$$

$$\text{q-axis ; } V_{sq} = R_r i_{sq} + L_{ss} i_{sd} + L_m i_{rd} + \frac{L_{ss}}{\omega_s} \frac{d}{dt} i_{sq} + \frac{L_m}{\omega_s} \frac{d}{dt} i_{rq} \quad (2.36)$$

โรเตอร์

$$\vec{V}_r = R_r \vec{i}_r + s \vec{\varphi}_r + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \vec{\varphi}_r \quad (2.37)$$

$$\vec{V}_r = R_r \vec{i}_r + L_{rr} \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s + \frac{L_{ss}}{\omega_s} \frac{d}{dt} \vec{i}_r + \frac{L_m}{\omega_s} \frac{d}{dt} \vec{i}_s \quad (2.38)$$

พิจารณาในรูป แกน d-q ;

$$\text{d-axis ; } V_{rd} = R_r i_{rd} - s L_{rr} i_{rq} - s L_m i_{sq} + \frac{L_{rr}}{\omega_s} \frac{d}{dt} i_{rd} + \frac{L_m}{\omega_s} \frac{d}{dt} i_{sd} \quad (2.39)$$

$$\text{q-axis ; } V_{rq} = R_r i_{rq} + s L_{rr} i_{rd} + s L_m i_{sd} + \frac{L_{rr}}{\omega_s} \frac{d}{dt} i_{rq} + \frac{L_m}{\omega_s} \frac{d}{dt} i_{sq} \quad (2.40)$$

นำ $\frac{\omega_s}{L_{ss}} \times$ (2.39) แล้ว จัดรูปได้ ;

$$\frac{d}{dt} i_{rd} = \left[-\frac{\omega_s \omega_r}{L_{rr}} i_{rd} + \frac{\omega_s}{L_{rr}} V_{rd} \right] + s \omega_s i_{rq} + s \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} i_{sq} - \frac{L_m}{L_{rr}} i_{sd} \quad (2.41)$$

นำ $\frac{\omega_s}{L_{ss}} \times$ (2.40) แล้ว จัดรูปได้ ;

$$\frac{d}{dt} i_{rq} = \left[-\frac{\omega_s \omega_r}{L_{rr}} i_{rq} + \frac{\omega_s}{L_{rr}} V_{rq} \right] - s \omega_s i_{rd} - s \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} i_{sd} - \frac{L_m}{L_{rr}} i_{sq} \quad (2.42)$$

$$\text{โดยที่} \left[-\frac{\omega_s \omega_r}{L_{rr}} i_{rq} + \frac{\omega_s}{L_{rr}} V_{rq} \right] = s \left[1 - \frac{L_m^2}{L_{ss} L_{rr}} \right] i_{rq}$$

$$\frac{1}{L_{rr}} \left[-\omega_s R_r i_{rq} + \omega_s V_{rq} \right] = s \left[1 - \frac{L_m^2}{L_{ss} L_{rr}} \right] i_{rq}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[-\omega_s R_r i_{rq} + \omega_s V_{rq}] = sL_{rr} \left[1 - \frac{L_m^2}{L_{ss}L_{rr}} \right] i_{rq}$$

$$[-\omega_s R_r i_{rq} + \omega_s V_{rq}] = sL_0 i_{rq}$$

$$\omega_s V_{rq} = [sL_0 + \omega_s R_r] i_{rq}$$

$$V_{rq} = \left[\frac{sL_0}{\omega_s} + \frac{\omega_s}{\omega_s} R_r \right] i_{rq}$$

นำ $\left(\frac{1}{R_r}\right)$ คูณทั้งสองข้างของสมการ ;

$$\left(\frac{1}{R_r}\right) V_{rq} = \left[\frac{sL_0}{\omega_s} + \frac{\omega_s}{\omega_s} R_r \right] i_{rq} \left(\frac{1}{R_r}\right)$$

ดังนั้น จะได้ $i_{rq} = \frac{1}{R_r} \left(\frac{1}{1+sT_1}\right) V_{rq}$ (2.43)

โดยที่ $\frac{1}{R_r} = X_2$ แทนค่าได้;

$$i_{rq} = \left(\frac{X_2}{1+sT_1}\right) V_{rq}$$
 (2.44)

จากสมการแรงบิด

$$T_e = \varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd} = \varphi_{rd} i_{rq} - \varphi_{rq} i_{rd}$$
 (2.45)

กำหนดให้ $\varphi_{sd} = 1$ และ $\varphi_{sq} = 0$ จะได้

$$T_e = i_{sq}$$
 (2.46)

จากสมการอัตราส่วนจำนวนรอบ

$$i_{sq} = \frac{L_m}{L_{ss}} i_{rq}$$
 (2.47)

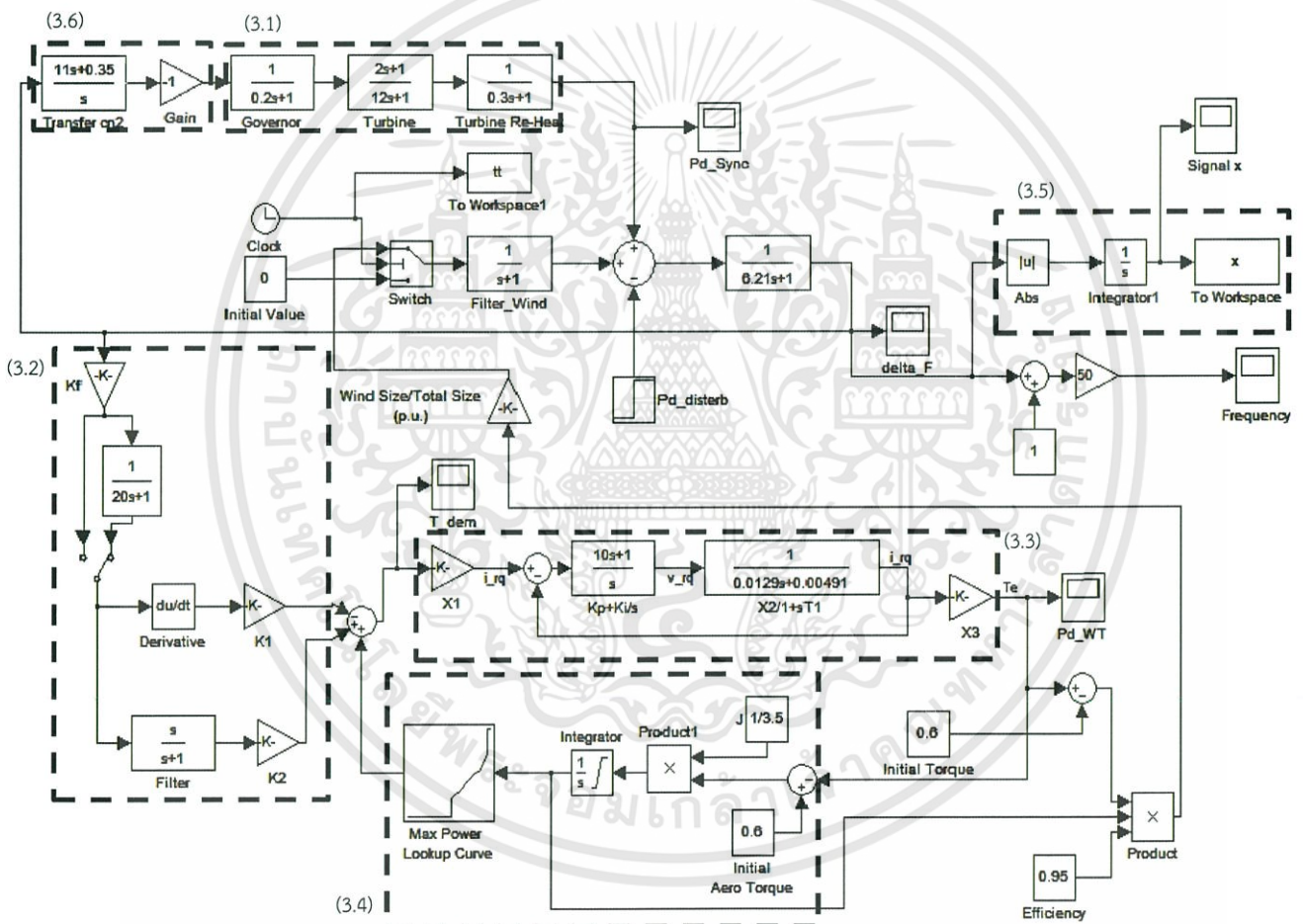
เมื่อนำสมการ (2.46) แทนในสมการ (2.47) จะได้

$$T_e = \frac{L_m}{L_{ss}} i_{rq}$$
 (2.48)

บทที่ 3

การจำลอง และออกแบบการทดลอง

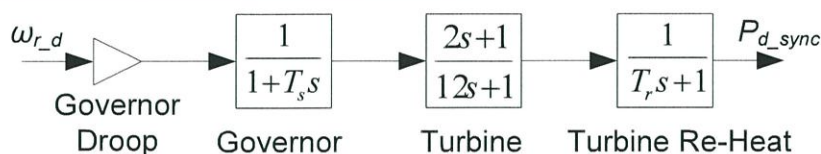
ในบทนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมของแบตเตอรี่ให้มีความเหมาะสมเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบที่มีส่วนประกอบของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม เนื่องจากกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลมส่งผลให้กำลังไฟฟ้าในระบบไม่คงที่จึงได้มีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้จ่ายกำลังไฟฟ้าและเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบได้ ซึ่งระบบดังกล่าวมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังด้วย
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 แบบจำลองระบบซิงโครนัส



รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบซิงโครนัส

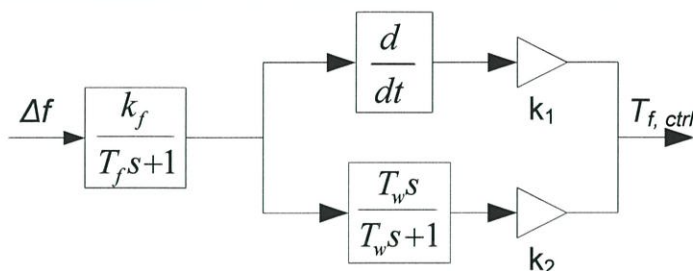
จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.2 เป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบซิงโครนัส ซึ่งประกอบไปด้วย โกวเวอร์เนอร์ (Governor) ที่เป็นตัวควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ความถี่ระบบ) และโกวเวอร์เนอร์ยังประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่า ดรู๊ป (Droop) ที่เป็นตัวช่วยให้การทำงานของกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดเสถียรภาพขึ้น และช่วยในการแบ่งโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และส่วนของกังหัน (Turbine) และ (Turbine Re-Heat) จะมีบล็อกไดอะแกรมซึ่งจะเป็นไปตามคุณสมบัติของกังหันแต่ละตัว

โดยกำหนดให้	T_G	คือ ค่าคงตัวเวลาของตัวคุมความเร็ว
	T_R	คือ ค่าคงตัวของความเฉื่อยของกังหันในส่วนของการเพิ่มความร้อนใหม่
	ω_{rd}	คือ ความเร็วเชิงมุมอ้างอิง
	ΔP_{sync}	คือ ค่าส่วนต่างกำลังไฟฟ้าของซิงโครนัส

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบได้มีการกำหนดไว้ดังต่อไปนี้

- ค่าโกวเวอร์เนอร์ดรู๊ป (y) เท่ากับ 11
- ค่าคงตัวเวลาของตัวคุมความเร็ว (T_G) เท่ากับ 0.2
- ค่าคงตัวของความเฉื่อยของกังหันการเพิ่มความร้อนใหม่ (T_R) เท่ากับ 0.3

3.2 แบบจำลองรูปควบคุมเสริม



รูปที่ 3.3 แบบจำลองรูปควบคุมเสริม

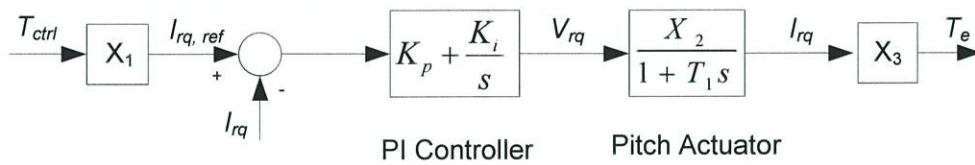
ตัวควบคุมนี้มีชื่อว่า แบบจำลองรูปควบคุมเสริม (Supplementary Control Loop) เป็นส่วนของการแปลงค่า ผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป (Δf) ให้เป็นแรงบิดเพื่อนำไปควบคุมระบบ (T_f) เพื่อที่จะได้มาซึ่งแรงบิดที่จะนำไปควบคุมระบบนั้นจะต้องผ่านขั้นตอนดังรูปที่ 3.3

ในส่วนของบล็อกทางด้านซ้ายมีไว้เพื่อหน่วงเวลา โดยใช้ ค่าคงที่ของเวลาการหน่วง (T_f) ร่วมกับ ตัวขยายฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกับผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลง (K_f) เพื่อที่จะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกับผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลง

ในส่วนของบล็อกขวาจะแปลงผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป จากสมการการแกว่ง $j \frac{d\omega}{dt} = T$ พบว่าเมื่อความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์กังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงมีผลให้ความถี่ของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วย และในส่วนของผลของความเฉื่อยของกังหันลม (j) จะแทนด้วย K_1 สุดท้ายจะได้ว่า $k_1 \frac{df}{dt} = T$ นั่นก็คือผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น เมื่อผ่านบล็อกนี้จะได้ออกมาเป็นแรงบิด

ในส่วนของบล็อกขวาล่างจะเป็น “Washout Filter” มีลักษณะคล้ายกับ High-Pass Filter ที่จะกรองความถี่ต่ำออก สังเกตว่า $s = j\omega$ พบว่าเมื่อความถี่ของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ($\Delta f = 0$) จะทำให้ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์กังหันลมเท่ากับศูนย์ในส่วนของบล็อกนี้จะไม่มีผลใดๆ เกิดขึ้นโดยที่ T_w คือ ค่าคงที่ของเวลาของ Washout Filter

3.3 แบบจำลองระบบกังหันลม

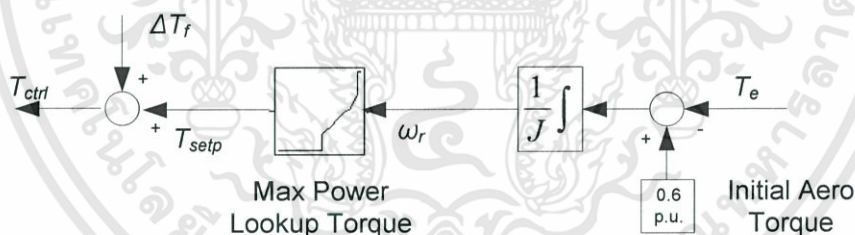


รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบกังหันลม

ส่วนนี้เรียกว่า “Pitch Controller” เป็นส่วนที่แปลงค่ากระแสที่รับเข้ามาจากส่วนควบคุมเสริมซึ่งเทียบกับกระแสโรเตอร์ในแกน q (i_{rq}) ไปเป็นค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_e)

จากทางซ้าย ค่าคงที่ X_1 จะเปลี่ยนแรงบิดควบคุม (T_{ctrl}) เป็นกระแสโรเตอร์อ้างอิง (i_{rq_ref}) ต่อมา Sum block จะเปรียบเทียบระหว่างค่ากระแสโรเตอร์อ้างอิงในแกน q (i_{rq_ref}) กับกระแสโรเตอร์ในแกน q (i_{rq}) ซึ่งหาได้จากสมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นกระแสโรเตอร์ควบคุมในแกน q (i_{rq_ctrl}) ที่ได้จะถูกส่งเข้า PI Controller เพื่อแปลง i_{rq_ctrl} เป็น V_{rq} ก่อนเข้า Pitch Actuator ให้ได้ i_{rq} ออกมา ซึ่งเป็นไปตามสมการ $i_{rq} = \left(\frac{X_2}{1+sT_1} \right) V_{rq}$ แล้วผ่านค่าคงที่ X_3 เพื่อแปลงเป็นแรงบิดทางไฟฟ้า (T_e) ซึ่ง X_3 เป็นส่วนกลับของ X_1 ($X_3 = \frac{1}{X_1}$)

3.4 แบบจำลองส่วนควบคุมปรับค่าแรงบิดโรเตอร์ของกังหันลม

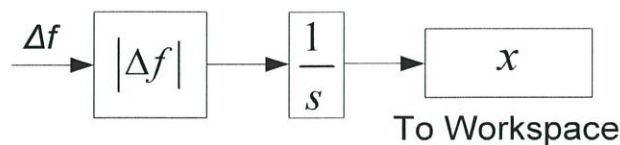


รูปที่ 3.5 แบบจำลองส่วนควบคุมปรับค่าแรงบิดโรเตอร์ของกังหันลม

ในส่วนนี้แรงบิดที่ได้จากกังหันลม (T_e) จะนำไปรวมกับแรงบิดทางกล (T_m) ที่เกิดจากแรงลม นั้นจะได้ผลลัพธ์เป็น แรงบิดความเร่ง (accelerating torque, T_a) แต่แรงบิดทางกลนั้นจะสวนทางกับแรงบิดทางไฟฟ้า ดังนั้น $T_a = T_m - T_e$ และจากสมการการแกว่ง $j \frac{d\omega_r}{dt} = T_a$ จะพบว่าเมื่อทำการแปลงปริพันธ์ค่าแรงบิดความเร่งจะได้ค่าของความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของกังหันลมจากนั้นจะนำค่าความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ของกังหันลมไปเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของโรเตอร์จะได้เป็นค่าแรงบิดปรับตั้ง (Torque Set Point, $T_{set\ point}$) ค่าแรงบิดปรับตั้งที่ได้นั้นจะนำไปรวมกับค่าแรงบิดเพื่อนำไปควบคุมระบบ (T_f) จะได้เป็นค่าแรงบิดควบคุม (T_{ctrl}) เพื่อนำไปควบคุมระบบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

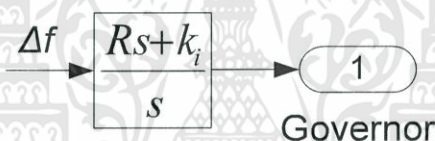
3.5 แบบจำลองปริพันธ์เพื่อนำไปสู่การหาค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 3.6 แบบจำลองปริพันธ์เพื่อนำไปสู่การหาค่าที่เหมาะสม

เป็นการนำผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลง(Δf) ไปทำการหาปริพันธ์เพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา หลังจากที่ได้พื้นที่ใต้กราฟมาแล้วก็จะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาว่า ค่าของอัตราขยาย $K1$ และ $K2$ ไตที่ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลามีค่ายอดต่ำที่สุด

3.6 แบบจำลองตัวควบคุมปริพันธ์



รูปที่ 3.7 แบบจำลองตัวควบคุมปริพันธ์

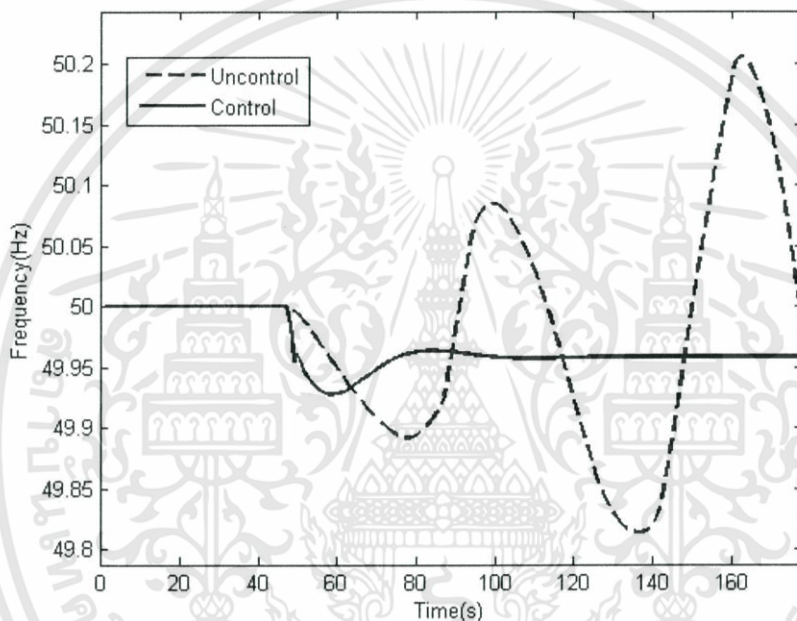
เป็นการปรับค่าความถี่ให้มีค่าความคลาดเคลื่อนในขณะเข้าสู่สภาวะคงตัวน้อยที่สุด ควรใช้อัตราขยายของตัวควบคุมปริพันธ์ที่เหมาะสม เนื่องจากมีค่าของอัตราขยายของตัวควบคุมปริพันธ์หลายค่าที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในขณะเข้าสู่สภาวะคงตัวเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงควรที่จะพิจารณาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมปริพันธ์ที่เหมาะสมจากกราฟ

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

4.1 การเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีตัวควบคุมและไม่มีตัวควบคุมผลตอบสนองของความถี่

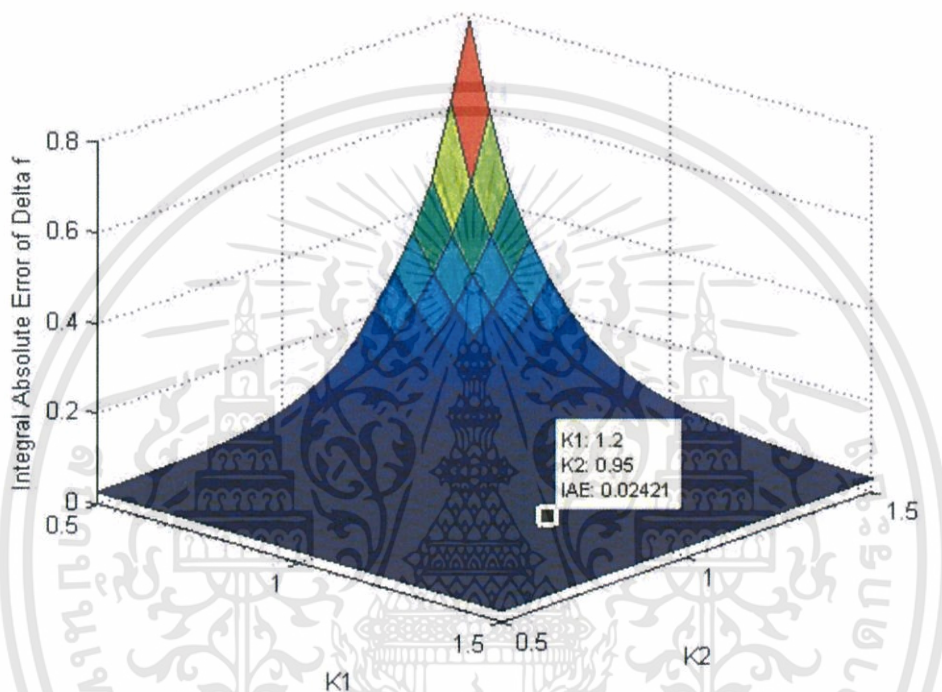
การเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองความถี่ของระบบที่มีตัวควบคุมและระบบที่ไม่มีตัวควบคุม พบว่าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของภาระไฟฟ้า ระบบที่มีตัวควบคุมจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ส่วนระบบที่ไม่มีตัวควบคุมจะไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้



รูปที่ 4.1 กราฟผลของระบบที่มีและไม่มีตัวควบคุมผลตอบสนองของความถี่

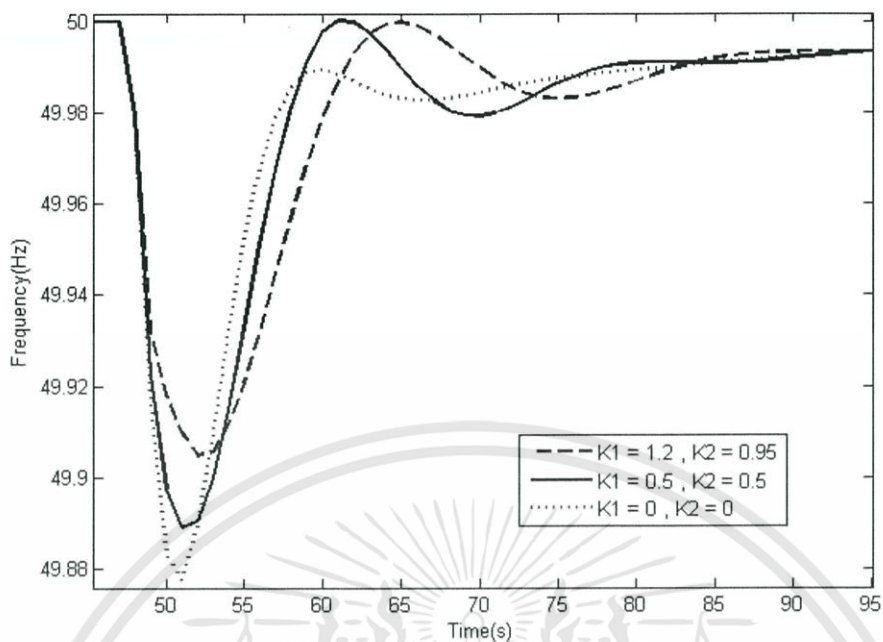
4.2 การหาค่าของตัวขยาย $K1$ และ $K2$ ที่เหมาะสม

การหาค่าอัตราขยาย $K1$ และ $K2$ ที่เหมาะสมที่สุด หาได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟของผลตอบสนองของความถี่ที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ต่ำนี้แสดงให้เห็นถึงค่ายอด และค่าพุ่งเกินที่ต่ำ รวมไปถึงการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็วด้วย โดยค่าอัตราขยายที่ทำให้พื้นที่ใต้กราฟน้อยที่สุดคือ $K1 = 1.2$ และ $K2 = 0.95$



รูปที่ 4.2 กราฟค่าของอัตราขยาย $K1, K2$ และพื้นที่ใต้กราฟของผลตอบสนองของความถี่

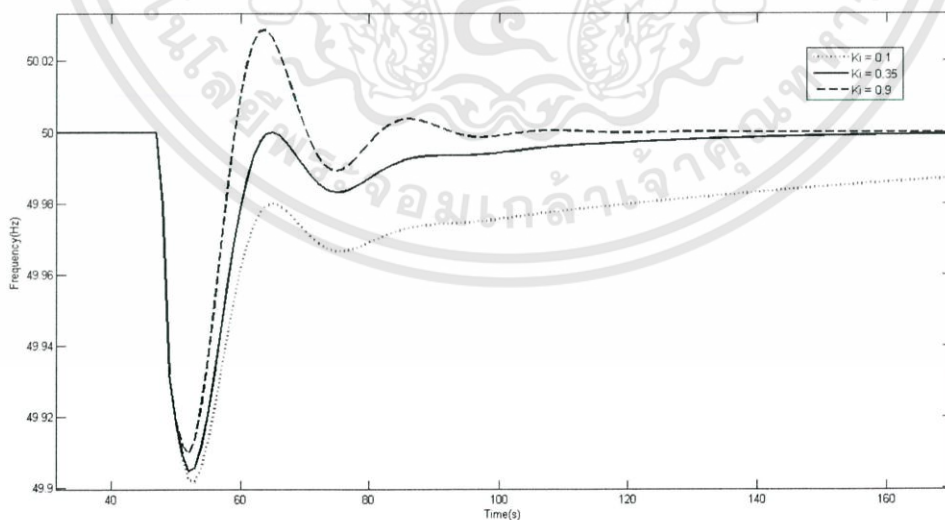
เมื่อทำการทดสอบพบว่าค่าของอัตราขยาย $K1, K2$ ที่ได้ทำการหาค่าได้อย่างเหมาะสมนั้นจะช่วยลดค่ายอด และค่าพุ่งเกิน ได้ดีกว่าค่าของอัตราขยาย $K1, K2$ ที่ได้ปรับไว้อย่างไม่เหมาะสม และระบบที่ไม่มีตัวควบคุมเลย ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบระหว่างค่าของอัตราขยาย K_1, K_2 ค่าต่างๆ

4.3 การเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยาย K_i ค่าต่างๆ

ค่าอัตราขยาย K_i จะช่วยลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ซึ่งค่าอัตราขยาย K_i นี้จะขึ้นอยู่กับ การปรับเปลี่ยนตามความต้องการ ว่าต้องการระบบในลักษณะใด ถ้าหากปรับค่าที่ไม่เหมาะสม กราฟที่ได้จะเกิดการแกว่ง และไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว



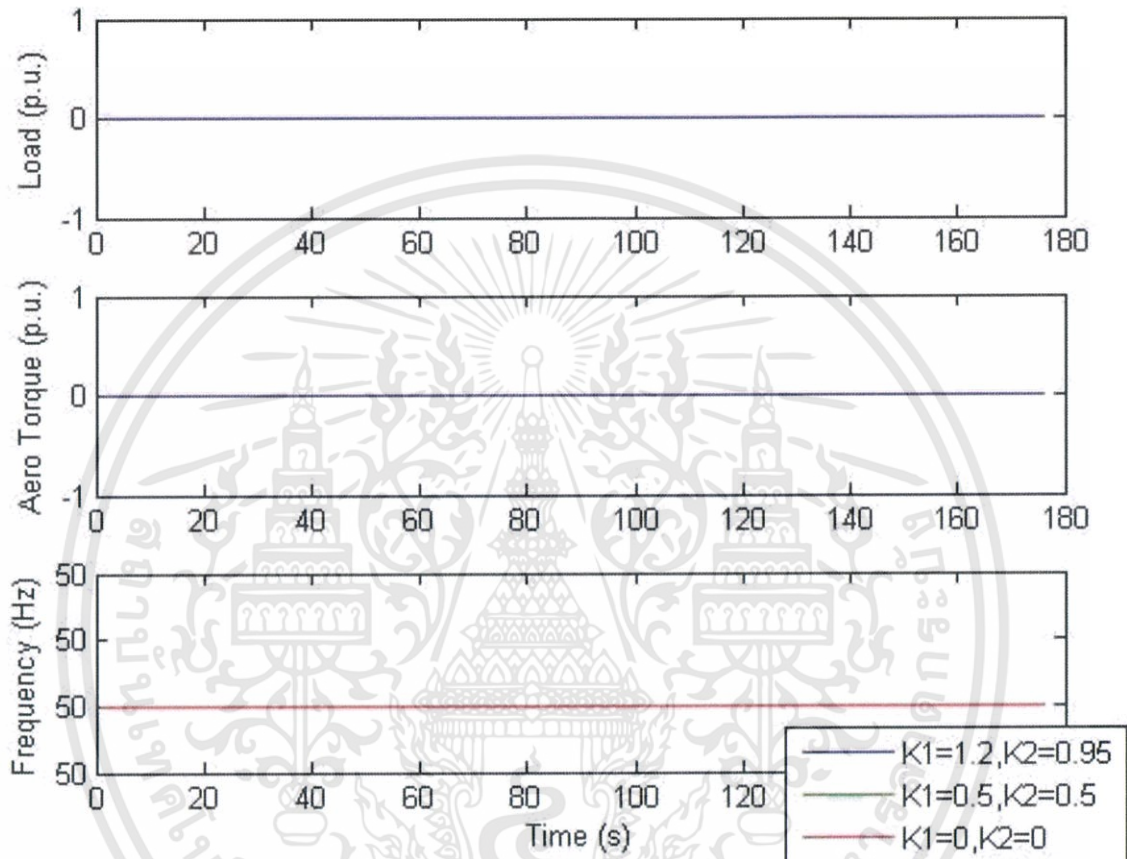
รูปที่ 4.4 กราฟผลของอัตราขยาย K_i ในค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเปรียบเทียบเมื่อภาวะไฟฟ้าและลมเปลี่ยนแปลง

4.4.1 กรณีภาวะไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง ไม่มีแรงบิดจากลม

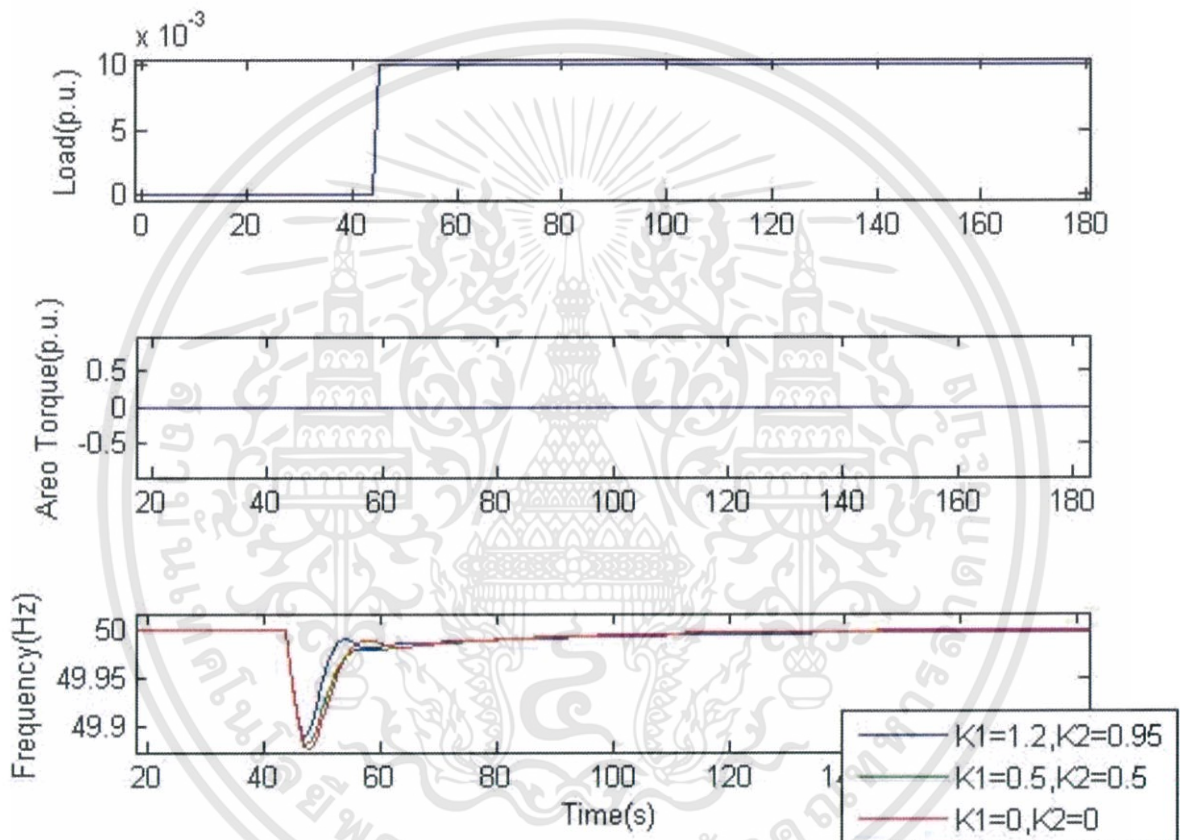
เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของภาวะไฟฟ้า ความถี่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทางชนิดกึ่งหันลมเข้ามาในระบบ



รูปที่ 4.5 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง ไม่มีแรงบิดจากลม

4.4.2 กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ไม่มีแรงบิดจากลม

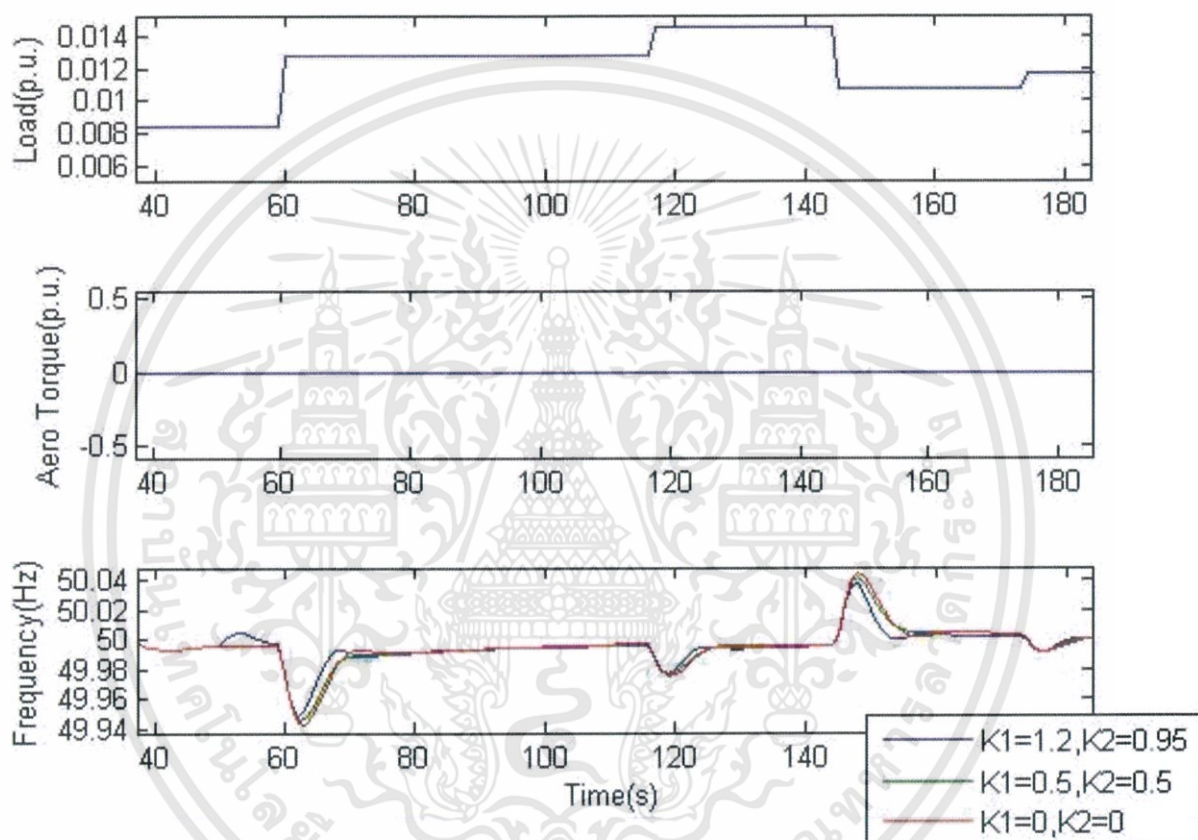
เมื่อภาวะไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได และไม่มีกำลังจากลมเข้ามาช่วยในระบบ กรณีนี้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากไม่มีกำลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทางชนิด กังหันลมเข้ามาช่วยขณะที่ความต้องการไฟฟ้ามีเปลี่ยนแปลง ทำให้ความถี่ของระบบตกลงในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้องการไฟฟ้า



รูปที่ 4.6 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ไม่มีแรงบิดจากลม

4.4.3 กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม ไม่มีแรงบิดจากลม

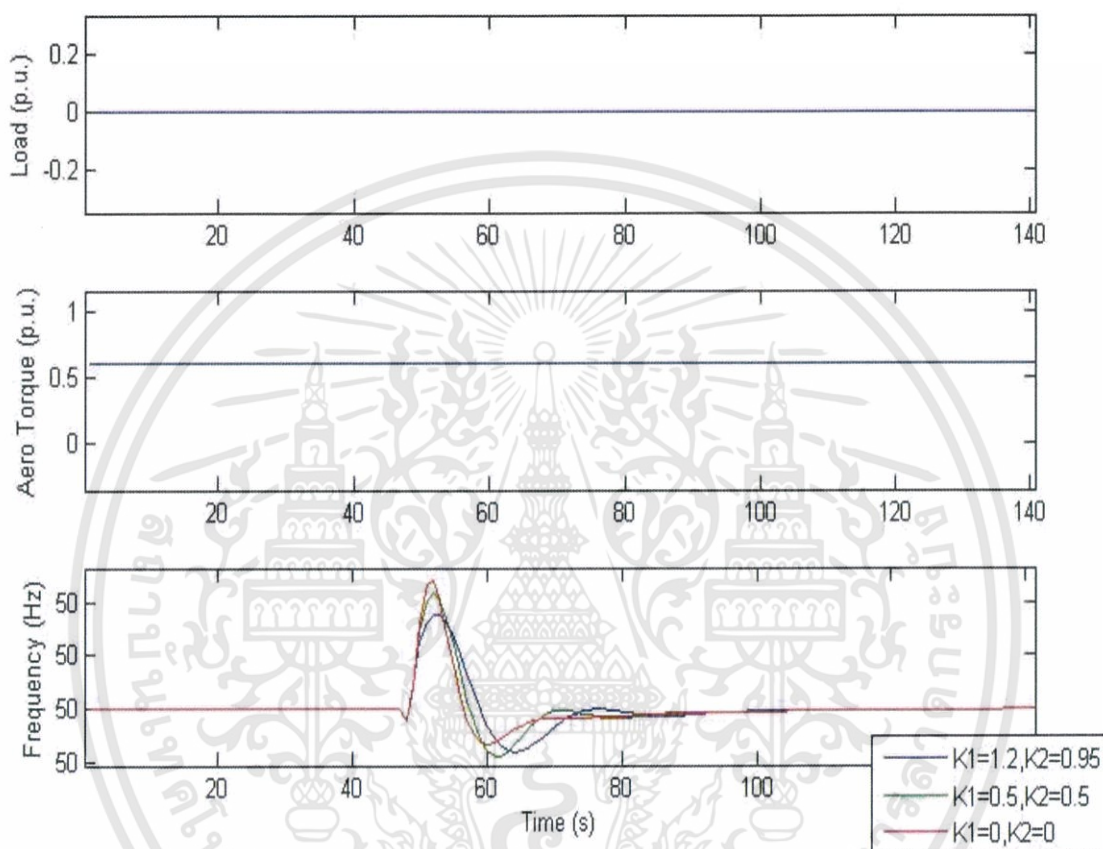
เมื่อภาวะไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม และไม่มีกำลังจากลมเข้ามาช่วยในระบบ พบว่าเมื่อความต้องการทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ตกลง ถ้าหากความต้องการทางไฟฟ้าลดลงจะทำให้ความถี่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ไม่มีแรงบิดจากลม



รูปที่ 4.7 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม ไม่มีแรงบิดจากลม

4.4.4 กรณีภาวะไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง แรงบิดจากลมคงที่

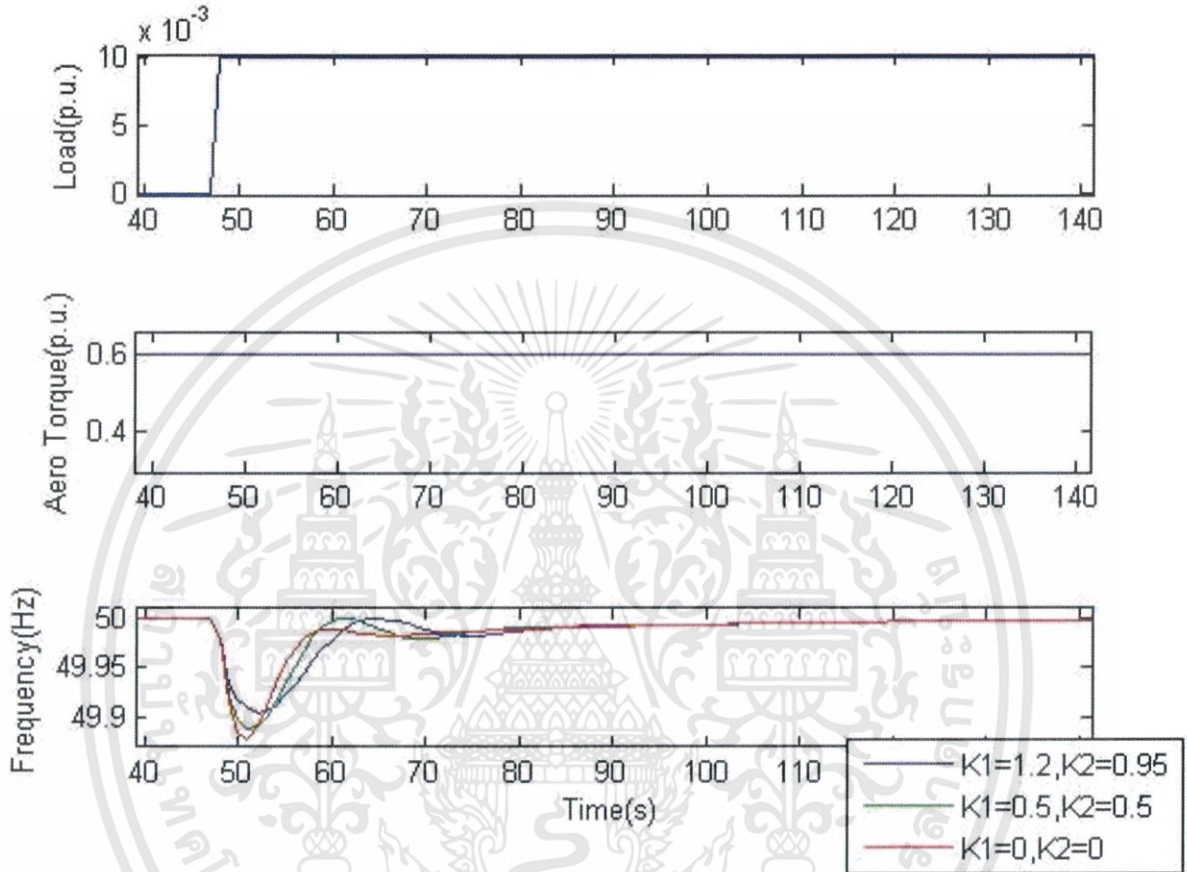
เมื่อภาวะไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่มีกำลังไฟฟ้าจากลมคงที่ที่จ่ายเข้ามาในระบบ ทำให้ความถี่ของระบบมีการกระเพื่อมขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มียิ่งกว่าความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟ



รูปที่ 4.8 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง แรงบิดจากลมคงที่

4.4.5 กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงบิดจากลมคงที่

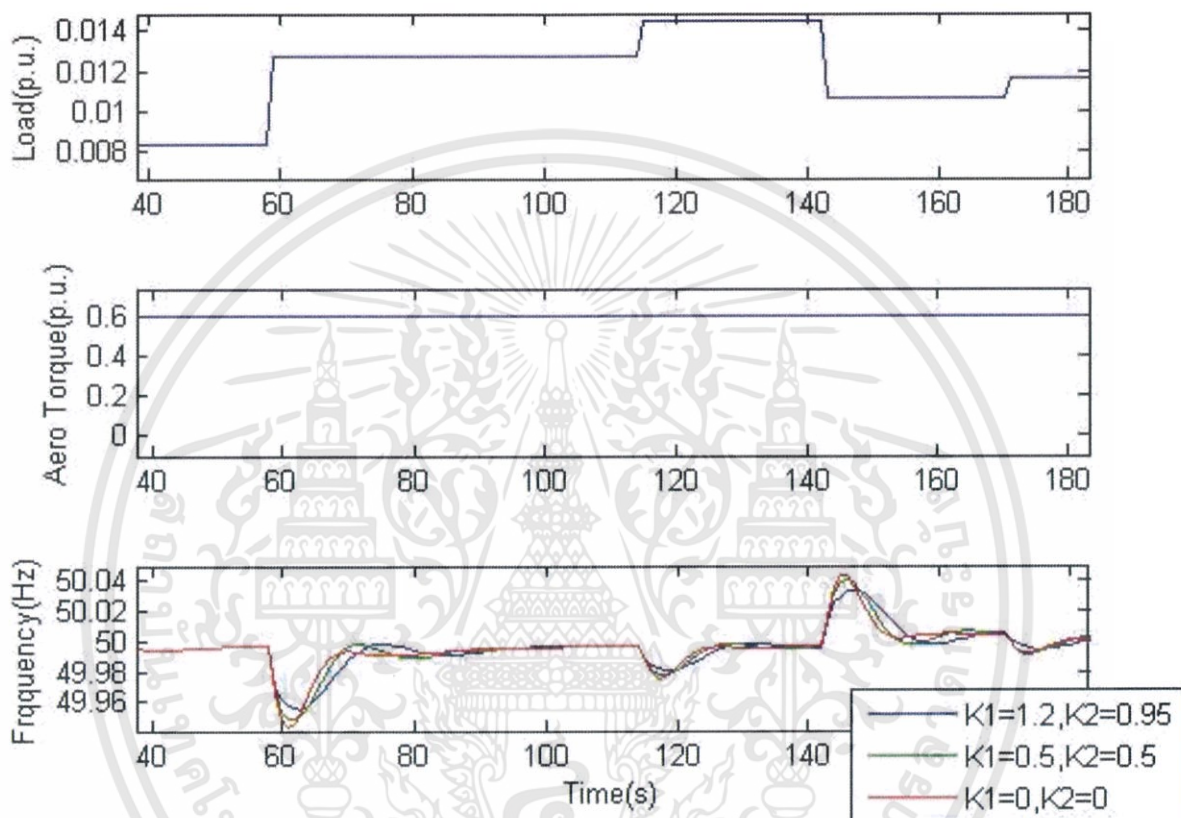
เมื่อภาวะไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได และมีกำลังจากลมคงที่ที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ทำให้ความถี่ตกลง เนื่องจากความต้องการทางไฟฟ้ามีมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามาในระบบ



รูปที่ 4.9 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงบิดจากลมคงที่

4.4.6 กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม แรงบิดจากลมคงที่

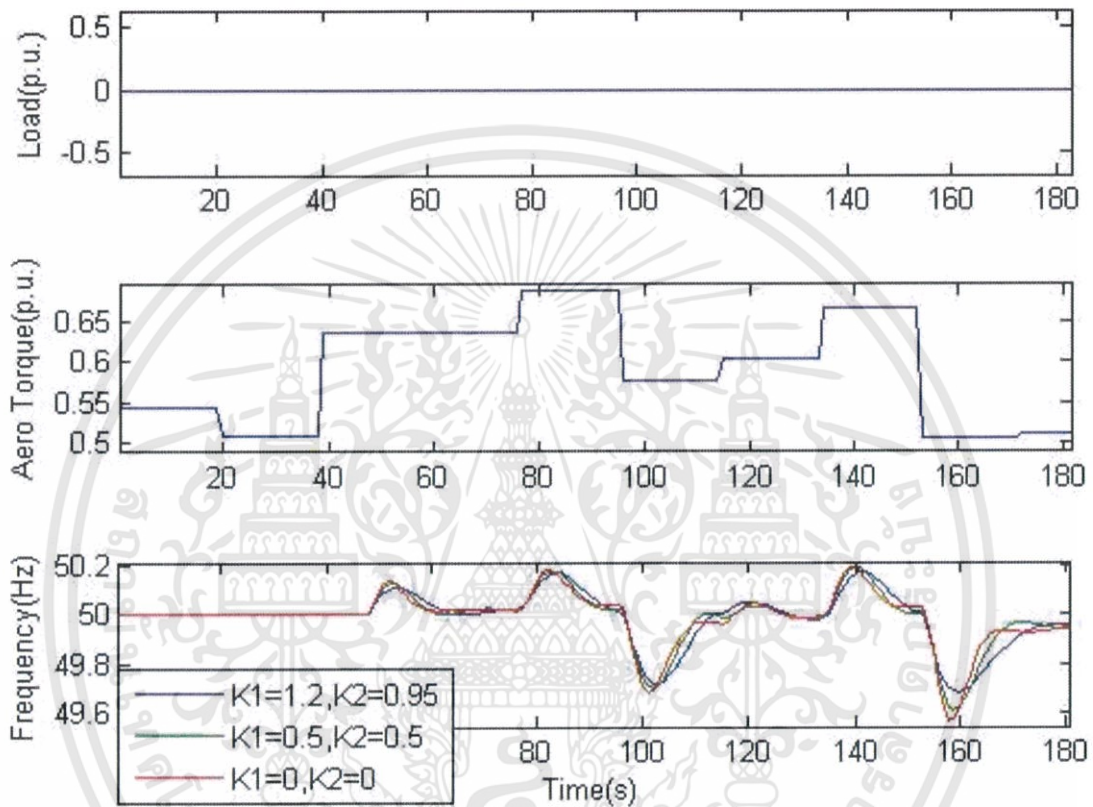
เมื่อภาวะไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม และมีกำลังจากลมคงที่ที่จ่ายเข้าสู่ระบบ พบว่าเมื่อความต้องการทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ตกลง ถ้าหากความต้องการทางไฟฟ้าลดลงจะทำให้ความถี่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม แรงบิดจากลมคงที่

4.4.7 กรณีภาวะไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

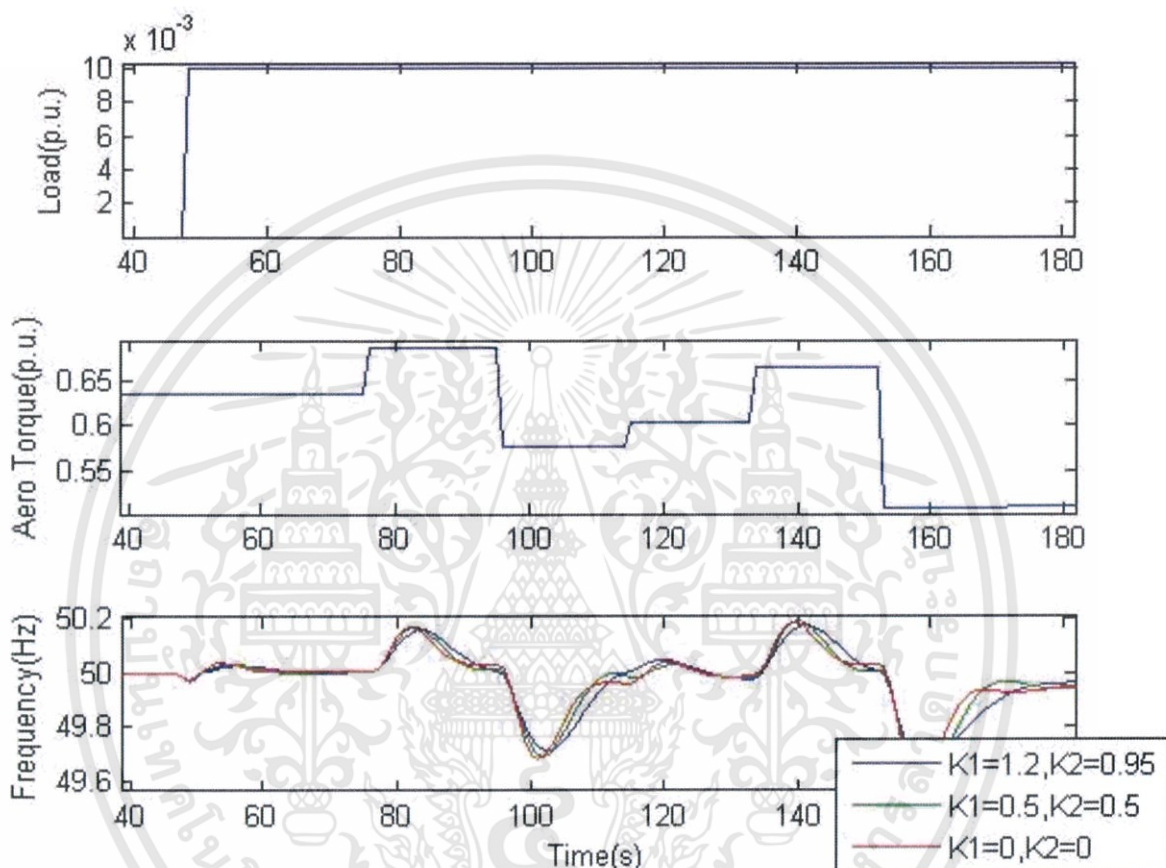
เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของภาวะไฟฟ้า แต่มีการจ่ายกำลังจากลมแบบสุ่มเข้าสู่ระบบ ในกรณีนี้ถือเป็นข้อเสียของระบบกังหันลมเนื่องจากลมมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนทำให้ความถี่ที่ได้จากกังหันลมนั้นไม่คงที่



รูปที่ 4.11 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

4.4.8 กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

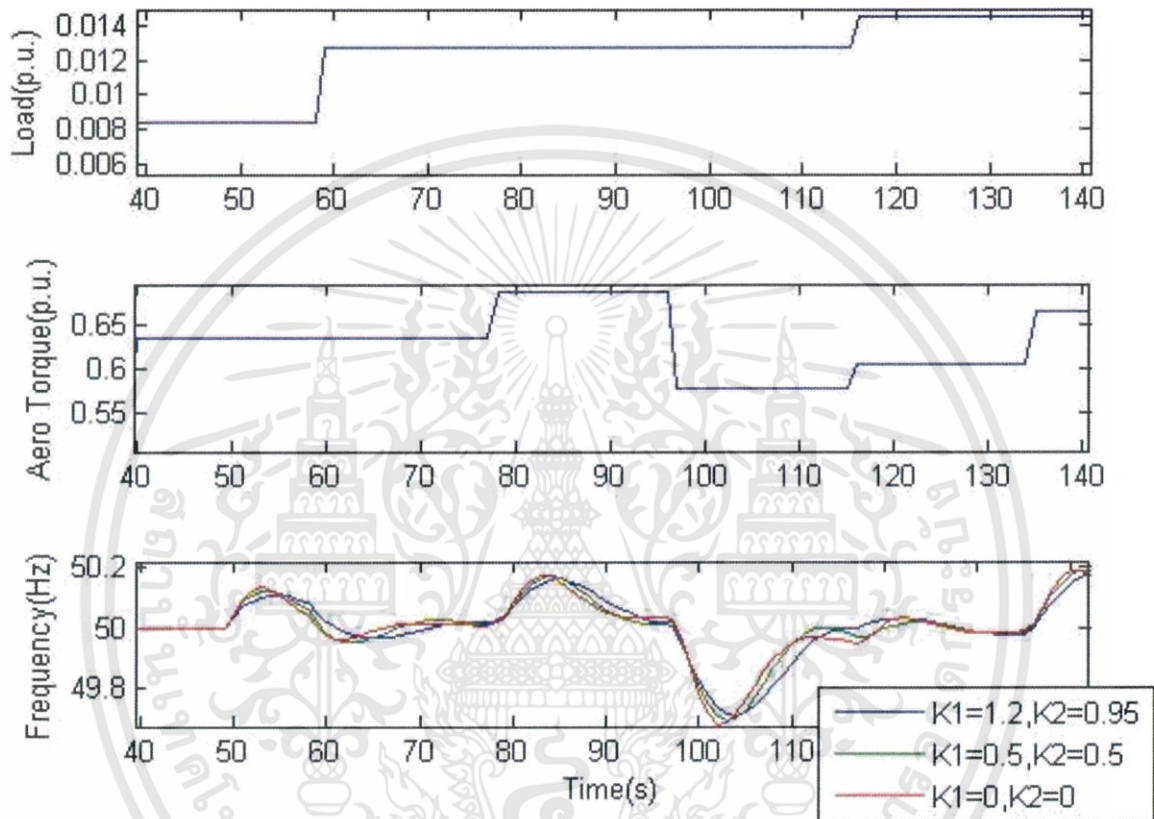
เมื่อภาวะไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได และมีการจ่ายกำลังจากลมแบบสุ่มเข้าสู่ระบบ พบว่าเมื่อความต้องการทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่เพิ่มขึ้น ถ้าหากความต้องการทางไฟฟ้าลดลงจะทำให้ความถี่ลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.12 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

4.4.9 กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

เมื่อภาวะไฟฟ้าและกำลังจากลมมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม พบว่าเมื่อความต้องการทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ลดลง ถ้าหากความต้องการทางไฟฟ้าลดลงจะทำให้ความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งกรณีนี้สามารถเกิดขึ้นได้บ่อยๆ เนื่องจากปกติแล้วความต้องการไฟฟ้าและแรงลมเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 4.13 กราฟผลตอบสนองความถี่กรณีภาวะไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหั่นลมเป็นส่วนหนึ่งของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink พบว่าระบบที่มีตัวควบคุมจะให้ค่าผลตอบแทนของเวลาที่ดีกว่าระบบที่ไม่มีตัวควบคุม ดังนั้นจึงได้ตัวควบคุมผลตอบแทนของเวลาที่สามารถทำให้ความถี่ของระบบกลับมาเป็นเสถียรภาพได้ดังเดิม โดยตัวควบคุมนี้จะทำงานเมื่อผลตอบแทนของเวลาที่ระบบที่เปลี่ยนแปลงไป (Δf) จากนั้นจะผ่านตัวควบคุมที่มีชื่อว่าแบบจำลองลู่วงเสริม (Supplementary Control Loop) ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นซึ่งแรงบิดนี้จะไปชดเชยกำลังผลิตของระบบที่สูญเสียไปขณะที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงของความต้องการไฟฟ้า

เมื่อเราทราบว่าระบบที่มีตัวควบคุมจะให้ผลตอบแทนของเวลาที่ดีกว่า จึงได้มีการศึกษาหาค่าของตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่ได้ทำการศึกษา เพื่อให้ผลตอบแทนของเวลาที่ระบบมีค่ายอดและค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวต่ำที่สุดหรือเป็นศูนย์ซึ่งพบว่าค่าอัตราขยายของลู่วงเสริมควรเป็น $K1 = 1.2$ และ $K2 = 0.95$ ในส่วนของค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว เราสามารถเพิ่มอัตราขยายปริพันธ์ (K_i) เข้าไปในระบบซึ่งค่าอัตราขยายปริพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.35 เนื่องจากทำให้ได้ค่าพุ่งเกินที่ต่ำ และเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็ว โดยในส่วนของค่าอัตราขยายปริพันธ์นี้สามารถปรับค่าได้ตามความเหมาะสม

เมื่อระบบที่ได้ศึกษาสามารถให้ผลตอบแทนของเวลาที่เสถียรภาพในสภาวะปกติแล้ว จึงได้ศึกษาเสถียรภาพของผลตอบแทนของเวลาที่ระบบที่มีตัวควบคุมในสถานการณ์ต่างๆดังนี้

- กรณีภาระไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง ไม่มีแรงบิดจากลม
- กรณีภาระไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ไม่มีแรงบิดจากลม
- กรณีภาระไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม ไม่มีแรงบิดจากลม
- กรณีภาระไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง แรงบิดจากลมคงที่
- กรณีภาระไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงบิดจากลมคงที่
- กรณีภาระไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม แรงบิดจากลมคงที่
- กรณีภาระไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม
- กรณีภาระไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม
- กรณีภาระไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม แรงบิดจากลมเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

จากกรณีที่ได้ทำการศึกษามานั้น พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหั่นลมจะไม่มีค่าความจำเป็นเมื่อภาระไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากความต้องการไฟฟ้าในความเป็นจริงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้ความถี่ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหั่นลมจึงมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจำเป็นอย่างยิ่งในการช่วยลดการแกว่งของความถี่ แต่เนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหันลมได้มาจากแรงลมจึงมีความไม่แน่นอน ซึ่งความถี่นั้นจะแกว่งมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปัจจัยกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหันลมจะชดเชยความต้องการไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงได้มากหรือน้อยเพียงใด

นอกจากนี้ลูปควบคุมเสริม (Supplementary Control Loop) จะสามารถทำให้การแกว่งของความถี่ลดลง และจะลดลงต่ำสุดเมื่อตั้งค่าค่าอัตราขยายของลูปควบคุมเสริมควรเป็น $K1$ และ $K2$ อย่างเหมาะสม ดังตัวอย่างการทดลองในกรณีต่างๆข้างต้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] พลังงานลม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา www.wikipedia.com
- [2] ระบบควบคุมพีไอดี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา www.wikipedia.com
- [3] สุทธิ หอเพชรรุ่งเรืองศิษย์ สุฤทธิ อภิวัฒน์ และเก่า มจพ., “การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดใหญ่,”.
- [4] วิทวัส เฟื่องไพบูลย์, อภินัฐ ยงวนิชเศรษฐ และวรกฤต ฤกษ์เวียง, “ การประยุกต์ใช้ระบบ สะสมพลังงานแบตเตอรี่เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังแบบแยกอิสระ,” , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] วรชาติ แซก, “ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (A Doubly-Fed Induction Machine),” , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Alessandro Roman, Tesi di Laurea di, Prof. R. Turri, Prof and N. Jenkins, Dott. J. Ekanayake, “ Regolazione di frequenza Relatori di turbine eoliche,” , UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA Facoltà di Ingegneria , Corso di Laurea in INGEGNERIA ELETTROTECNICA, 23 Aprile 2010.
- [7] J.B. Ekanayake, N. Jenkins and G. Strbac, “ Frequency Response From Wind Turbines,” *WIND ENGINEERING*, Vol.32, NO. 6, 2008.
- [8] G. Ramtharan, J.B. Ekanayake and N. Jenkins, “ Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines,” .
- [9] “ IEEE Frequency Response from Wind Turbines,” , Ian Moore Cardiff University, UK, Janaka Ekanayake Cardiff University, UK.
- [10] Yaser Soliman Qudaih, Michael Bernard and Yasunori Mitani Kyushu, “ Model Predictive Based Load Frequency Control Design in the Presence of DFIG Wind Turbine,” , Institute of Technology Department of Electrical and Electronics Engineering Kitakyushu, Japan , T. H. Mohamed Kumamoto University Department of Computer Science and Electrical Engineering Kumamoto, Japan.
- [11] T. H. Mohamed, A.A.Hassan, H. Bevrani, and T. Hiyama, “ MODEL PREDICTIVE BASED LOAD FREQUENCY CONTROL DESIGN,” .
- [12] “ Research Article Power System Frequency Response from Fixed Speed and Doubly Fed Induction Generator based Wind Turbines *WIND ENERGY*,”

- [13] L. Holdsworth, The Manchester Centre for Electrical Energy (MCEE), UMIST, Manchester, UK, J. B. Ekanayake, Department of Electrical and Electronics Engineering, University of Peradeniya, Peradeniya, Sri Lanka , N. Jenkins, Tyndall Centre for Climate Change Research, UK and The Manchester Centre for Electrical Energy (MCEE), UMIST, Manchester, UK, “ Wind Energ,” 2004; 7:21–35 (DOI: 10.1002/we.105)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง

Power System Frequency Controlled with Doubly Fed Induction Generator

ศุภฤกษ์ มลิตทอง สมประสงค์ ฮามปรกรณ์ สุชาดา สุขสวัสดิ์ และ สุดาวลัย รัตนไตร
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอย จลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลตอบสนองของความถี่ของระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหันลม (Frequency Response from Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine) เป็นส่วนหนึ่งของระบบ เมื่อระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงความต้องการของภาระทางไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าถูกรบกวนจากปัจจัยอื่นภายนอก รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลม ส่งผลให้ความถี่ของระบบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปนี้สามารถควบคุมได้โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหันลมที่ต่ออยู่กับระบบ โดยควบคุมแรงบิดของกึ่งหันลมด้วยควบคุมแบบพีไอ (Proportional-Integral: PI) เพื่อที่จะนำไปควบคุมความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปให้กลับมามีเสถียรภาพได้ดังเดิม

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหันลม, ตัวควบคุมพีไอ

Abstract

This thesis presents a study of the frequency response of the power system with Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine (DFIG). When the system to change the requirements of the load or the system is disturbed by external factors. Including uncertainty of the power from DFIG. As a result, the frequency of the system changes from frequency base. The frequency changing of the system can be controlled by DFIG, and torque of the wind turbine can be controlled by Proportional-Integral (PI) controlled for to control the changing the frequency of the power system to return to its stability.

Keyword: Doubly-Fed Induction Generator, Proportional-Integral (PI)

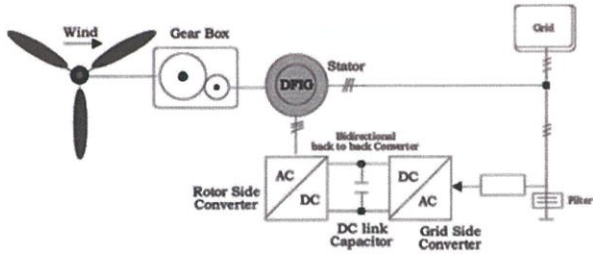
1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวกังหันลมอยู่ด้วยมักจะเกิดการรบกวนระบบไฟฟ้า เนื่องจากคาน้ำล้นทางกลมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งเป็นข้อเสียของระบบไฟฟ้าที่มีกึ่งหันลม จากปัญหาของระบบไฟฟ้าที่พบในข้างต้นที่กล่าวมานั้น นำไปสู่แนวคิดที่จะแก้ปัญหาโดยนำข้อเสียของระบบไฟฟ้าไปปรับปรุงระบบไฟฟ้า เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากลับมา มีเสถียรภาพดังเดิม เสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ การที่ระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของภาระทางไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าถูกรบกวนจากปัจจัยอื่นภายนอก รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลม จะส่งผลให้ความถี่ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ปริญญาณิพนธ์นี้จึงเป็นการนำข้อเสียของการตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหันลม (Frequency Response from Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine) ที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการควบคุมผลตอบสนองความถี่ของระบบไฟฟ้าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (Proportional-Integral: PI) ทำหน้าที่ควบคุมแรงบิดของกึ่งหันลมให้ได้มาซึ่งผลตอบสนองความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ต้องการ

2. ระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดควบคุมสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG)

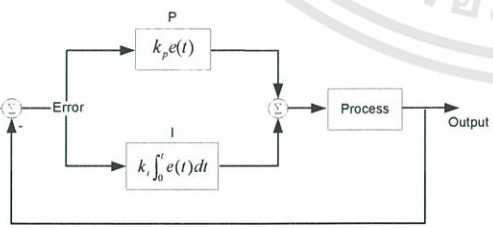
ระบบ DFIG เป็นระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบปรับความเร็วได้ สามารถปรับความเร็วรอบได้ในช่วง -40% ถึง +30% ของความเร็วเชิงโรตัส ทำให้ได้พลังงานสูงสุดจากกึ่งหันเกือบตลอดย่านของความเร็วลมระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง มีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ สามารถใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์ที่มีพิคกำลังเพียงประมาณ 30% ของพิคกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงสามารถใช้กับกังหันขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำที่มีขดลวดโรเตอร์ (Wound Rotor Induction Generator :WRIG) ประกอบด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์ซึ่งต่อในลักษณะหันหลังชนกัน (Back-To-Back) คอนเวอร์เตอร์ที่ต่อทางด้านโรเตอร์ เรียกว่า Rotor Side Converter หรือ Machine Side Converter ส่วนคอนเวอร์เตอร์ที่อยู่ทางด้านระบบไฟฟ้า เรียกว่า Grid Side Converter หรือ Line Side Converter ขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำที่มีขดลวดโรเตอร์จะต่ออยู่กับกริดที่มีความถี่คงที่ ส่วนขดโรเตอร์จะต่ออยู่กับชุดคอนเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับขดลวดโรเตอร์ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโรเตอร์ขึ้นอยู่กับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้ระบบไฟฟ้ามองเห็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสมือนว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ นอกจากนั้น ระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ยังไม่ต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงพอ จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งตัวเก็บประจุ ส่วนข้อเสียของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง คือ ยังต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำที่มีขดลวดโรเตอร์ซึ่งมี สลปีริง และปัญหาที่เกิดขึ้นกับชุดคอนเวอร์เตอร์คือเกิดสภาวะความผิดพลาดขึ้นในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมระบบป้อนกลับ

ตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ เป็นที่นิยมใช้ควบคุมกระบวนการ และคุณสมบัติของการควบคุมแบบพีไออีกอย่างหนึ่งก็คือ สามารถปรับปรุงให้ค่าผิดพลาดที่อยู่ในสภาวะคงตัวให้ลด

น้อยลงหรือทำให้ไม่มีค่าผิดพลาดอยู่ในสภาวะคงตัวก็ได้ โดยตัวควบคุม Proportional (P) คือการปรับสัดส่วนสัญญาณตัวควบคุม Integral (I) คือการอินทิเกรต สัญญาณกลไกทั้งสองถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนควบคุมสัญญาณให้เกิดผลอย่างเหมาะสม แสดงตัวควบคุมต่างๆ ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังต่อไปนี้

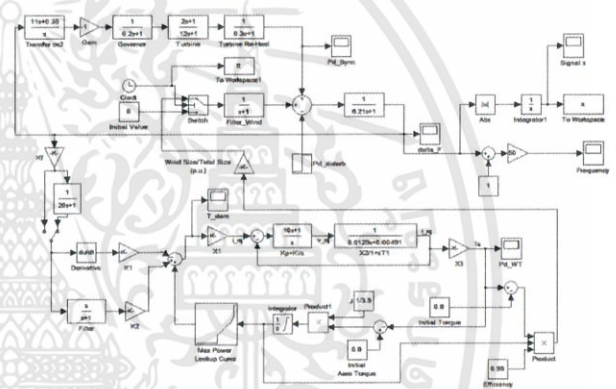
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \tag{1}$$

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} \tag{2}$$

ซึ่งจะได้ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบพีไอคือ

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k}{s} \tag{3}$$

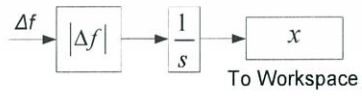
3. การจำลอง และออกแบบ



รูปที่ 3 แบบจำลองระบบการควบคุมความเร็วระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทิศทาง

ในการออกแบบตัวควบคุมจะทำการปรับค่าตัวควบคุมโดยให้ได้ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงอินทิกรัล (Integral Absolute error, IAE) น้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ โดยการวิเคราะห์หา ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จะนำไปตามฟังก์ชัน ดังสมการ

$$IAE = \int_0^t |\Delta f| dt$$

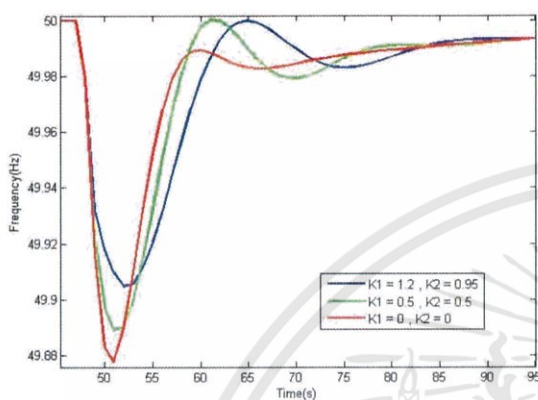


- โดยทำการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งมีกระบวนการทำงานดังต่อไปนี้
- ขั้นตอนที่ 1: กำหนดช่วงให้ค่าพารามิเตอร์ K1, K2
- ขั้นตอนที่ 2: หาค่าพารามิเตอร์ K1, K2 ที่ทำให้ IAE มีค่าต่ำที่สุดจากโปรแกรมที่เขียน
- ขั้นตอนที่ 3: ตรวจสอบว่าตัวควบคุมส่งผลที่ได้มากับแบบจำลองระบบและแสดงผลของการตอบสนองความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการจำลอง และออกแบบ

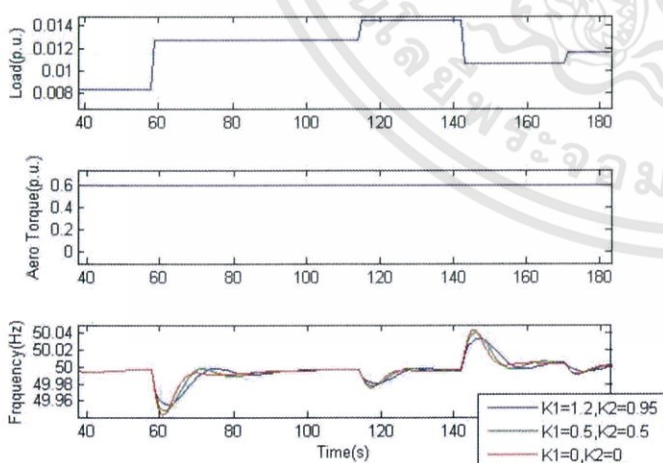
ค่าอัตราขยาย K1 และ K2 ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ต่ำนี้แสดงให้เห็นถึงค่ายอด และค่าพุงเกินที่ต่ำ รวมไปถึงการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็วด้วย โดยค่าอัตราขยายที่ทำให้พื้นที่ใต้กราฟน้อยที่สุดคือ $K1 = 1.2$ และ $K2 = 0.95$



รูปที่ 4 กราฟผลของอัตราขยาย K1 และ K2 ในค่าต่างๆเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันได

การเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยาย K1 และ K2 ในค่าต่างๆ เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดไม่คงที่

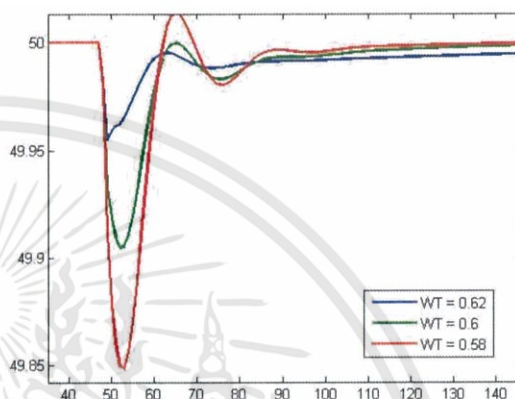
เมื่อภาระไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ แนวโน้มผลของอัตราขยายจะคล้ายกับกรณีที่ภาระไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงคงที่สังเกตได้ว่า ถึงแม้ภาระไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ แต่ระบบก็สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้



รูปที่ 5 กราฟผลของอัตราขยาย K1 และ K2 ในค่าต่างๆ เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดไม่คงที่

4.6 การเปรียบเทียบผลตอบสนองความถี่เมื่อแรงบิดจากลมมีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงบิดจากลมในค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่ายิ่งแรงบิดมีค่าสูงขึ้นเท่าไร ค่ายอดก็จะลดลง เนื่องจากแรงบิดจะไปชดเชยกับโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้ได้ค่ายอดที่น้อย



รูปที่ 4.6 กราฟผลตอบสนองความถี่ของระบบโดยมีการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดจากลมที่ค่าต่างๆ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมสองทางชนิดกึ่งหันลมและการศึกษาหาค่าของตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่ได้ทำการศึกษา ผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงอินทิกรัลค่าที่ต่ำหรือเป็นศูนย์ ซึ่งพบว่าค่าอัตราขยายของลู่วควบคุมเสริมที่ได้มานั้นทำให้เกิดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่น้อยที่สุด แล้วจึงได้ศึกษาเสถียรภาพของผลตอบสนองความถี่ของระบบที่มีตัวควบคุมที่ได้โดยให้มีโหลดเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ระบบยังสามารถกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้ และเมื่อระบบที่แรงบิดจากลมมีการเปลี่ยนแปลงพบว่าเมื่อแรงบิดจากลมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้สัญญาณความถี่ของระบบที่ได้มีการแกว่งน้อยลง ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อแรงลมเพิ่มขึ้นทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแต่ภาระทางไฟฟ้ายังมีการเปลี่ยนแปลงคงที่ ทำให้กำลังไฟฟ้าส่วนต่างระหว่างคันกำลังกับภาระทางไฟฟ้าลดลง จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณความถี่น้อยลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] พลังงานลม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา www.wikipedia.com
- [2] ระบบควบคุมพีไอดี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา www.wikipedia.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [3] สุทธิ หอเพชรรุ่งเรืองศิษย์ สุฤทธิ อภิวัฒน์ และเก่า มจพ., “การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดใหญ่.”
- [4] วิทวัส เพ็ญไพญญ์, อภินันท์ ช่างนิชเศรษฐ และวรกฤต ฤกษ์เวียง, “การประยุกต์ใช้ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังแบบแยกอิสระ,” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] วรชาติ แซ่ก๊ก, “เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (A Doubly-Fed Induction Machine),” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Alessandro Roman, Tesi di Laurea di, Prof. R. Turri, Prof and N. Jenkins, Dott. J. Ekanayake, “Regolazione di frequenza Relatori di turbine eoliche,” UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea in INGEGNERIA ELETTROTEC NICA, 23 Aprile 2010.
- [7] J.B. Ekanayake, N. Jenkins and G. Strbac, “Frequency Response From Wind Turbines,” **Wind Engineering**, Vol.32, NO. 6, 2008.
- [8] G. Ramtharan, J.B. Ekanayake and N. Jenkins, “Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines.”
- [9] “IEEE Frequency Response from Wind Turbines,” Ian Moore Cardiff University, UK, Janaka Ekanayake Cardiff University, UK.
- [10] Yaser Soliman Qudaih, Michael Bernard and Yasunori Mitani Kyushu, “Model Predictive Based Load Frequency Control Design in the Presence of DFIG Wind Turbine,” Institute of Technology Department of Electrical and Electronics Engineering Kitakyushu, Japan, T. H. Mohamed Kumamoto University Department of Computer Science and Electrical Engineering Kumamoto, Japan.
- [11] T. H. Mohamed, A.A.Hassan, H. Bevrani, and T. Hiyama, “Model Predictive Based Load Frequency Control Design.”
- [12] “Research Article Power System Frequency Response from Fixed Speed and Doubly Fed Induction Generator based Wind Turbines,” **Wind Energy**.
- [13] L. Holdsworth, The Manchester Centre for Electrical Energy (MCEE), UMIST, Manchester, UK, J. B. Ekanayake, Department of Electrical and Electronics Engineering, University of Peradeniya, Peradeniya, Sri Lanka, N. Jenkins, Tyndall Centre for Climate Change Research, UK and The Manchester Centre for Electrical Energy (MCEE), UMIST, Manchester, UK, “Wind Energ,” 2004; 7:21–35 (DOI: 10.1002/we.105).

ประวัติผู้จัดทำ



นายสุกฤกษ์ มลิตอง รหัสนักศึกษา 52011222
514 หมู่ 19 ต.ดอนคา อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรี 72160
suparer.k.mt@gmail.com
086-3743493



นายสมประสงค์ สามปรกรณ์ รหัสนักศึกษา 52011240
114/17 หมู่ 5 ต.ภูมิเวท ต.ปากเกร็ด อ.ปากเกร็ด
นนทบุรี 11120
my_name_is_weng@hotmail.com
089-1236922



นางสาวสุชาดา สุขสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 52011297
90 ถ.ระเบียงก๊กจอนุสรณ์ ต.บางค้อ อ.บางค้อ
จ.ฉะเชิงเทรา 24110
pankchocolate@hotmail.com
083-8857543



นางสาวสุดาวัลย์ รัตนไตร รหัสนักศึกษา 52011305
179/313 หมู่ 7 ต.บ้านกล้วย-ไทรน้อย ต.พิมลราช
อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี 11110
boom_batov@hotmail.com
089-4333054

ประวัติผู้จัดทำ



นายศุภฤกษ์ มลิทอง รหัสนักศึกษา 52011222
514 หมู่ 19 ต.ดอนคา อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรี 72160
suparek.mt@gmail.com
086-3743493



นายสมประสงค์ ฮามปรณ รหัสนักศึกษา 52011240
114/17หมู่5 ถ.ภูมิเวท ต.ปากเกร็ด อ.ปากเกร็ด นนทบุรี 11120
my_name_is_weng@hotmail.com
089-1236922



นางสาวสุชาดา สุขสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 52011297
90 ถ.ระเบียบกิจอนุสรณ์ ต.บางคล้า อ.บางคล้า จ.ฉะเชิงเทรา 24110
pankchocolate@hotmail.com
083-8857543



นางสาวสุตาวัลย์ รัตนไตร รหัสนักศึกษา 52011305
179/313 หมู่ 7 ถ.บ้านกล้วย-ไทรน้อย ต.พิมลราช อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี 11110
boom_batov@hotmail.com
089-4333054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้