

การศึกษาวิธีการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
ชนิดป้อนสองทาง

Study of power oscillation damping method by DFIG-based wind turbine



โดย

วันฉัตร

ปราบสุธา

วันยุธ

สุวรรณเครือ

วารุณี

อุณนันทพิทักษ์

วโรดม

ไพศาลทรัพย์ผล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2556

Study of power oscillation damping method by DFIG-based wind turbine



Wunchut Prabsuta
Wunyuth Suwankurn
Warunee Ounananpitak
Waroj Paisalsuppol

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา... 2013

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาวิธีการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
ชนิดบ่อนสองทาง

Study of power oscillation damping method by DFIG-based wind turbine



โดย

วันฉัตร

ปราบสุธา

วันยุทธ

สุวรรณเครือ

วารุณี

อุ้นอนันต์พิทักษ์

วโรตม์

ไพศาลทรัพย์ผล

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ **รองศาสตราจารย์ ดร. อิศระชัย งามหรร** เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาวิธีการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
ชนิดป้อนสองทาง

ผู้จัดทำ

1. นาย วันฉัตร ปราบสุธา
2. นาย วันยุทธ สุวรรณเครือ
3. นางสาว วารุณี อุ่นอนันพิทักษ์
4. นาย วโรตม์ ไพศาลทรัพย์ผล



J. Ngan

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. อิศระชัย งามหรุ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาวิธีการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ชนิดป้อนสองทาง

นาย วันฉัตร ปราบสุธา
นาย วันยุทธ สุวรรณเครือ
นางสาววารุณี อุ่ณอนันพิทักษ์
นาย วโรจน์ ไพศาลทรัพย์ผล
รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ภายใต้ความไม่แน่นอนของระบบและสิ่งรบกวนต่างๆเช่น ความผิดพลาด กำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ
ที่ผลิตจากกังหันลม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราหนึ่งต่ำ ปริมาณนี้ได้นำ
เสนอผลกระทบของกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly fed
Induction generator, DFIG) ทางเสถียรภาพพลวัตในระบบไฟฟ้ากำลัง และการประยุกต์ใช้ DFIG ที่มี
การติดตั้งตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper, POD) ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบ
เพื่อแก้ปัญหาข้างต้น โครงสร้างของ POD ที่นำเสนอเป็นแบบตัวชดเชยเฟสนำหน้าลำดับที่สองโดย
พารามิเตอร์ของ POD ได้ถูกเลือกด้วยวิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) ผล
การจำลองทางคอมพิวเตอร์ในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์ (Single machine infinite
bus, SMIB) และระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area four-machine interconnected power
system) ทำให้เห็นว่า POD มีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพระบบได้ดีกว่าวิธีการออกแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of power oscillation damping method by DFIG-based wind turbine

Mr.Wunchut Prabsuta

Mr.Wunyuth Suwankurn

Ms.Warunee Ounanapitak

Mr.Waroj Paisalsuppol

Assoc.Prof. Dr.Issarachai Ngamroo Supervisor

Year 2013

ABSTRACT

Under various system uncertainties and disturbance such as generation change, unpredictable structure, fault, and wind power output variation etc. these scenario may cause the system instability. To overcome this problem, this thesis focuses on the impact of doubly-fed induction generator (DFIG)-based wind turbine on small signal stability of power system. In order to improve the small signal stability, the DFIG equipped with power oscillation damper (POD) is applied. The structure of POD is a practical second-order lead/lag compensator. The parameter of POD is properly selected by PSO . Simulation results in Two-Area Four-Machine Interconnected Power System demonstrate that the POD significantly affects to improve the small signal stability.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. อิศระชัย งามหรุ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความรู้ และให้คำแนะนำ ในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับคณะผู้จัดทำในครั้งนี้ ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆ ในห้อง Electrical Power Applications Research Laboratory (EPARL) ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำ และคอยชี้แนะในการแก้ไขปัญหา ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ของคณะผู้จัดทำ ที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุน ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขต และข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอน และวิธีการศึกษา	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญานิพนธ์	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้า	6
2.1.1 โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส	6
2.1.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสลำดับที่ 6	7
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิด ป้อนสองทาง	9
2.3 แบบจำลองของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์ (SMIB)	15
2.4 ระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area Four-machine Interconnected Power System)	16
2.5 พื้นฐานของเสถียรภาพพลวัตในระบบไฟฟ้ากำลัง	16
2.6 วิธีกลุ่มอนุภาค	17
2.6.1 ที่มาและความหมายของวิธีการกลุ่มอนุภาค	17
2.6.2 หลักการทำงานของวิธีกลุ่มอนุภาค	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบพารามิเตอร์	
3.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง กับตัวหน่วงการแกว่ง	20
3.1.1 โครงสร้างของตัวหน่วงการแกว่ง	20
3.1.2 โครงสร้างของ DFIG ที่มีการติดตั้ง POD	20
3.2 ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อกับบัสบัส	21
3.2.1 โครงสร้างของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อกับบัสบัส	22
3.2.2 แนวคิดในการทำเสถียรภาพในระบบ SMIB	24
3.2.3 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ POD	24
3.3 ระบบสองพื้นที่เครื่องกำเนิด	28
3.3.1 แบบจำลองของระบบสองพื้นที่เครื่องกำเนิด	28
3.3.2 แนวคิดในการทำเสถียรภาพของระบบสองพื้นที่เครื่องกำเนิด	30
3.3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ POD ในระบบสองพื้นที่เครื่องกำเนิด	32
บทที่ 4 ผลการจำลอง	
4.1 ผลการทดสอบของระบบ SMIB	36
4.2 ผลการทดสอบในระบบสองพื้นที่เครื่องกำเนิด	40
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการจำลอง	46
5.2 ข้อดีและข้อจำกัด	47
5.3 ข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม	48
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก บทควมวิชาการ	51
ประวัติผู้เขียน	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส	6
2.2	วงจรการควบคุมโดยการป้อนสองทาง	9
2.3	แผนภาพบล็อกการควบคุมความเร็วโรเตอร์	13
2.4	ไดอะแกรมการควบคุมความเร็วแรงดันของ DFIG	14
2.5	กราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและความเร็ว	14
2.6	วงจรควบคุมมูรับลมของกังหัน	15
2.7	ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์ (SMIB) ที่ใช้ในการศึกษา	15
2.8	ระบบ Two-Area Four-Machine interconnected power system	16
2.9	ข้างต้นเป็นรูปแสดงการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค	18
2.10	แผนภาพการทำงานของ PSO	19
3.1	โครงสร้างของตัวหน่วงการแกว่ง	20
3.2	วงจรควบคุมของ DFIG ที่มีการติดตั้ง POD เพิ่มเข้าไป	21
3.3	ระบบ SMIB ที่มีการติดตั้ง DFIG	22
3.4	ความสัมพันธ์ของความหน่วงของระบบและกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด	24
3.5	ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมในระบบ SMIB	27
3.6	ระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	28
3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหน่วงของระบบ	31
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและส่วนจริงของค่าเจาะจง	32
3.9	ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมในระบบ Two-area	35
4.1	เส้นโค้งคู่เข้าหาค่าตอบของสมการวัตถุประสงค์	36
4.2	แนวโน้มอัตราหน่วงกับกำลังไฟฟ้าของ DFIG	38
4.3	แนวโน้มอัตราหน่วงกับกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	38
4.4	การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3 และบัสอนันต์กรณีที่ 1	39
4.5	กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3 และบัสอนันต์กรณีที่ 2	40
4.6	การเส้นโค้งคู่เข้าหาค่าตอบของสมการวัตถุประสงค์	41
4.7	เส้นทางเดินรากลของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่	43
4.8	กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส12 กรณีที่ 1	44
4.9	กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส12 กรณีที่ 2	44
4.10	กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส12 กรณีที่ 3	44
4.11	กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส12 กรณีที่ 4	45
4.12	กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส12 กรณีที่ 5	45

เอกสารฉบับนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 พารามิเตอร์ของตัวหน่วงการแกว่งระบบ SMIB	37
4.2 เสถียรภาพพลวัตโหมดการแกว่งเฉพาะที่ของระบบกรณีออกแบบ	37
4.3 การทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวของระบบ SMIB	39
4.4 พารามิเตอร์ของตัวหน่วงการแกว่งระบบ Two-Area	41
4.5 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพพลวัตของระบบสองพื้นที่	42
4.6 การทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวของระบบ Two-Area	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ พลังงานไฟฟ้ามีความต้องการอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งส่งผลดีทางด้านเศรษฐศาสตร์ในด้านการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ เป็นต้นเหตุทำให้เกิดการที่อัตราห้วงในช่วงความถี่ 0.2 – 2 Hz ของระบบมีค่าต่ำลง เมื่อเกิดสิ่งรบกวนในระบบขึ้น เช่น ความผิดพลาด อาจส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพและเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับในบริเวณกว้างได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system stabilizer ,PSS) ซึ่งถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ามาแก้ปัญหาดังกล่าวแต่เนื่องจาก PSS มีปัญหาในเรื่องการแกว่งของแรงดันที่บัสและเป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ

จากความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มีความต้องการสูงในปัจจุบันแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ๆได้ถูกนำมา พัฒนาใช้งานเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง กังหันลมชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง(Doubly fed induction generator, DFIG) ด้วยคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมชนิดนี้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดทุกย่านของความเร็วลมที่ไม่คงที่และต้นทุนในการติดตั้งมีราคาต่ำทำให้ได้รับความนิยมอย่างมาก และในส่วนระบบควบคุมของ DFIG ยังสามารถแยกควบคุมระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างอิสระต่อกันทำให้เกิดแนวคิดที่ว่ากังหันลมชนิดนี้ควรมีส่วนช่วยในการปรับปรุงเสถียรภาพระบบ

ปัญหานี้พจนันจึงได้เสนอแนวทางในการปรับปรุงเสถียรภาพระบบโดยใช้คุณสมบัติในการควบคุมได้ของ DFIG โดยติดตั้งตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper , POD) ที่ DFIG ในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อกับบัสอนันต์ (Single machine infinite bus, SMIB) และระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area four machine interconnected power system) เมื่อพิจารณาผลของกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในระบบที่มีผลต่อเสถียรภาพพลวัตของระบบและสมรรถนะของตัวควบคุม จึงได้ใช้แนวคิดดังกล่าวในการตั้งปัญหาการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวหน่วงการแกว่ง จากนั้นได้ใช้อัลกอริธึมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) ในการแก้ปัญหาที่เหมาะสม ผลการจำลองระบบตัวหน่วงการแกว่งของระบบมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าสถานะที่เกิดความผิดพลาดในระบบ SMIB และ Two-area four machine interconnected power system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการประยุกต์ใช้ตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper, POD) เข้ากับกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly fed induction generator, DFIG)

2. เพื่อนำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับ POD ให้มีความเหมาะสมมีสมรรถนะพอที่จะทำให้เสถียรภาพให้ระบบและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะที่เกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์และระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิดที่มีการติดตั้งกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

2. ออกแบบพารามิเตอร์สำหรับตัวหน่วงการแกว่งโดยพิจารณาจากสมรรถนะของตัวควบคุมที่จะทำให้เสถียรภาพให้ได้ทุกสภาวะการทำงานของระบบ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการศึกษา

1. ศึกษาในเรื่องของพฤติกรรมของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly fed induction machine ,DFIG) และทฤษฎีพื้นฐานต่างๆเกี่ยวกับการควบคุม

2. วิเคราะห์ปัญหาของกังหันลมชนิด DFIG ที่มีการติดตั้งเข้าไปในระบบ

3. สร้างแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพพลวัตของระบบโดยแบบจำลองที่ใช้เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์ (Single machine infinite bus ,SMIB)และระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area four machine interconnected power system)

4. เขียนโปรแกรมจำลองระบบข้างต้น โดยติดตั้งกังหันลม DFIG เข้าไปในระบบร่วมกับการพิจารณาเสถียรภาพพลวัตของระบบ

5. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการทำงานของตัวหน่วงการแกว่ง(Power oscillation damper, POD)

6. ปรับปรุงแบบจำลองเดิมโดยมีการติดตั้งตัวหน่วงการแกว่ง (POD) เพื่อให้ร่วมทำงานกับกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (DFIG)

7. เขียนโปรแกรมจำลองระบบที่มีการปรับปรุงและพิจารณาเสถียรภาพพลวัตของระบบ

8. ออกแบบอัลกอริทึมสำหรับใช้ในกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับ POD เพื่อให้

ตัวควบคุมมีสมรรถนะในการทำให้เสถียรภาพให้ระบบทุกจุดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. บันทึกผลเพื่อเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลทดสอบจากการใช้งานโปรแกรม ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อทำการแก้ไขและปรับปรุง

10. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมไปถึงแนวทางในการพัฒนาโปรแกรม

1.5 แผนการดำเนินงาน

ปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้เป็นผลจากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทำความเข้าใจหลักการ ทฤษฎีตลอดจนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งดำเนินการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังนี้

การดำเนินการ	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และกำหนดขอบเขตของงานวิจัย	↔									
2. ออกแบบ แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา		↔								
3. ศึกษาโปรแกรม และทำการสร้างแบบจำลองระบบจากโปรแกรม Psat และ MATLAB/Simulink			↔							
4. เปรียบเทียบผลกรณีต่างๆและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ								↔		
5. สรุปผลการทดสอบ									↔	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถจำลองแบบพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (DFIG) เพื่อผลตอบสนองกรณีที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ
2. สามารถประยุกต์ใช้คุณสมบัติของ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (DFIG) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบ
3. สามารถประยุกต์ใช้อัลกอริทึมในกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวหน่วงการแกว่ง (POD) เพื่อให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพให้ระบบและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าในสภาวะที่เกิดความผิดปกติในระบบ
4. เป็นการนำเสนอแนวทางใหม่ในการปรับปรุงเสถียรภาพระบบโดยใช้ตัวหน่วงการแกว่ง (POD) ทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (DFIG) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า
5. สามารถจำลองระบบไฟฟ้ากำลังและผลตอบสนองจากการเกิดความผิดปกติลงบนระบบคอมพิวเตอร์ทำให้เราสามารถรู้ถึงปัญหาเพื่อที่จะวางแนวทางการแก้ไขได้อย่างถูกต้องสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังในความเป็นจริงได้

1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์

ปฏิญานิพนธ์ นี้ได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงเสถียรภาพระบบโดยใช้คุณสมบัติในการควบคุมได้ของ DFIG โดยติดตั้งตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper, POD) ที่ DFIG ในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์ (Single machine infinite bus) และระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area four machine interconnected power system)

บทที่ 1 ในบทนี้กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ รวมไปถึงวิธีการดำเนิน และแผนการดำเนินโครงการ ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับ การวิจัยนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของเสถียรภาพพลวัตในระบบไฟฟ้ากำลังแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (DFIG) แบบจำลองระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์ และ แบบจำลองระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่บทที่ 3 การจำลองและการออกแบบการทดลอง ในบทนี้ อธิบายถึงแนวความคิดในการการคำนวณค่าติดตั้งปัญหาการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมสำหรับการทำเสถียรภาพระบบ และอธิบายการตั้ง

อัลกอริธึมในการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งจะแบ่งเป็นสองระบบที่พิจารณา ทั้งในระบบ SMIB และระบบ Two-area four machine interconnected power system

บทที่ 4 ผลการจำลอง ในบทนี้ แสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมเพื่อทดสอบ สมรรถนะระบบที่มี POD จึงทำการเปรียบเทียบสามกรณี กรณีไม่มีตัวควบคุม กรณีที่มี POD โดยพารามิเตอร์ได้จากการเลือกอย่างเหมาะสม และกรณีที่มี POD โดยกรณีที่สามพารามิเตอร์ได้จากการตั้งปัญหาสร้างสมการวัตถุประสงค์และใช้วิธีการกลุ่มอนุภาคในการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ของ POD โดยจำลองระบบภายใต้สถานการณ์เดียวกัน

บทที่ 5 สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปที่ได้จากการศึกษาค้นคว้า และการดำเนินการจัดทำโครงการ สรุปผลการทดลองที่ได้ และข้อเสนอแนะของโครงการ

ภาคผนวก ในส่วนนี้จะประกอบด้วยบทความทางวิชาการ ซึ่งอธิบายถึงรายละเอียดโดยย่อของ วิธีการที่ได้นำเสนอทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

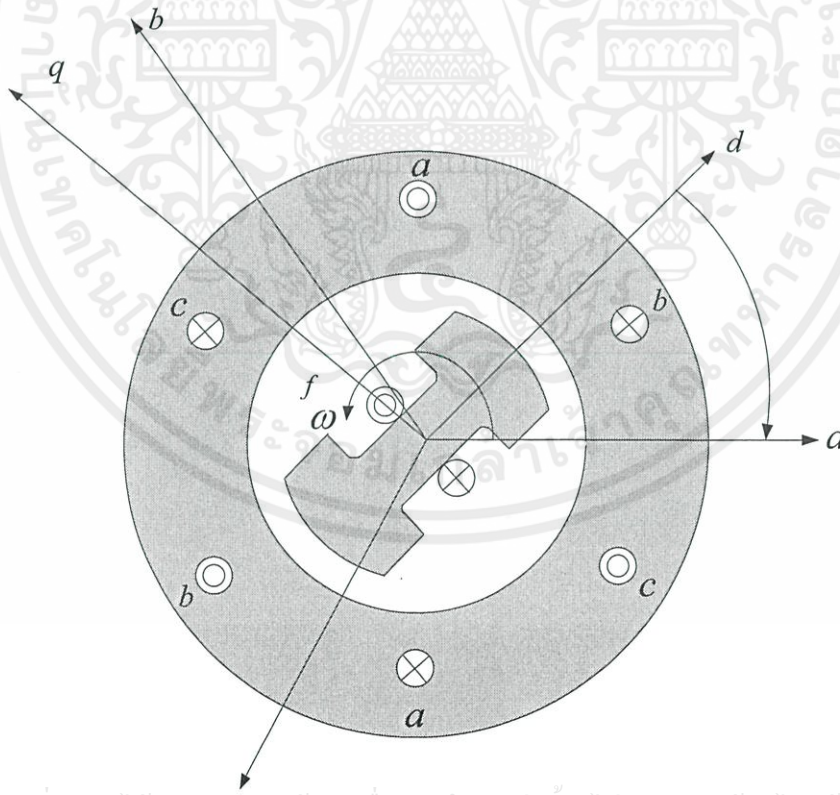
ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนกลับสองทางที่ใช้กับกังหันลมสำหรับผลิตกำลังไฟฟ้า และการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนกลับสองทาง

2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงแบบจำลองของเครื่องจักรกลซิงโครนัสและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยสามารถอธิบายได้จากส่วนประกอบของสมการดังนี้

2.1.1 โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

แบบจำลองของปาร์ค-คอนคอร์ดีเดีย (Park-concordia) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกใช้ในการอธิบายสมการเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

ในรูปที่ 2.1 ได้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสทั่วไปที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเครื่องกำเนิด โดยสามารถเขียนแรงดันไฟฟ้าในแต่ละแกนเพื่ออธิบายพฤติกรรมต่างๆให้อยู่ในรูปของเฟสเซอร์แรงดันแกนตรง และแกนขวาง ของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงได้ดังนี้

$$v_q = V \cos(\delta - \theta) \quad (2.1)$$

$$v_d = V \sin(\delta - \theta) \quad (2.2)$$

โดยที่พลังงานไฟฟ้าที่ถูกส่งให้ระบบจะสามารถแสดงได้ตามรูปสมการดังนี้

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.3)$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \quad (2.4)$$

2.1.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสลำดับที่ 6

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแทนด้วยสมการแบบจำลองอันดับที่หกซึ่งประกอบไปด้วย $[\delta, \omega, e'_d, e''_d, e'_q, e''_q]$ โดยสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{\delta} = \Omega_b (\omega - 1) \quad (2.5)$$

$$\dot{\omega} = (P_m - P_e - D(\omega - 1)) / M \quad (2.6)$$

$$\dot{e}'_q = \frac{-\dot{e}'_q - (x_d - x'_d) \frac{T''_{d0} x''_d}{T'_{d0} x'_d} (x_d - x'_d) i_d + (1 - \frac{T_{AA}}{T'_{d0}}) v_f^*}{T'_{d0}} \quad (2.7)$$

$$\dot{e}'_d = (f_s(e'_d) + \frac{x_q - x'_q - \frac{T''_{q0} x''_q}{T'_{q0} x'_q} (x_q - x'_q) i_q}{T'_{q0}}) \quad (2.8)$$

$$\dot{e}''_q = \frac{-e''_q + e'_q - (x'_d - x''_d + \frac{T''_{d0} x''_d}{T'_{d0} x'_d} (x_d - x'_d)) i_d + \frac{T_{AA}}{T'_{d0}} v_f^*}{T''_{d0}} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{e}_d'' = \left(-e_d'' + e_d' + \frac{x_q' - x_q'' - \frac{T_{q0}'' x_q'}{T_{q0}' x_q'} (x_q - x_q') i_q}{T_{q0}''} \right) \quad (2.10)$$

$$0 = v_q + r_a i_q - e_q'' + (x_d'' - x_l) i_d \quad (2.11)$$

$$0 = v_d + r_a i_d - e_d'' - (x_q'' - x_l) i_q \quad (2.12)$$

โดยที่

δ	คือ มุมโรเตอร์
ω	คือ ความเร็วเชิงมุม
P_m	คือ กำลังทางกล
P_e	คือ กำลังทางไฟฟ้า
D	คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง
M	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย
e_q	คือ แรงดันไฟฟ้าในแนวแกนตรง
e_d	คือ แรงดันไฟฟ้าในแนวแกนขวาง
e_q'	คือ แรงดันไฟฟ้าชั่วคราวในแนวแกนขวาง
e_d'	คือ แรงดันไฟฟ้าชั่วคราวในแนวแกนตรง
e_q''	คือ แรงดันไฟฟ้าชั่วแวบในแนวแกนขวาง
e_d''	คือ แรงดันไฟฟ้าชั่วแวบในแนวแกนตรง
X_q	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ในแนวแกนขวาง
X_d	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ในแนวแกนตรง
X_q'	คือ ค่ารีแอกแตนซ์สภาวะชั่วคราวในแนวแกนขวาง
X_d'	คือ ค่ารีแอกแตนซ์สภาวะชั่วคราวในแนวแกนตรง
X_q''	คือ ค่ารีแอกแตนซ์สภาวะชั่วแวบในแนวแกนขวาง
X_d''	คือ ค่ารีแอกแตนซ์สภาวะชั่วแวบในแนวแกนตรง
v_q	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์ในแนวแกนขวาง
v_d	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์ในแนวแกนตรง
r_a	คือ ค่าความต้านทานที่ขั้วลวดอาามาเจอร์
x_l	คือ ค่าความรีแอกแตนซ์รั่วไหล
i_q	คือ กระแสในแนวแกนขวาง
i_d	คือ กระแสในแนวแกนตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

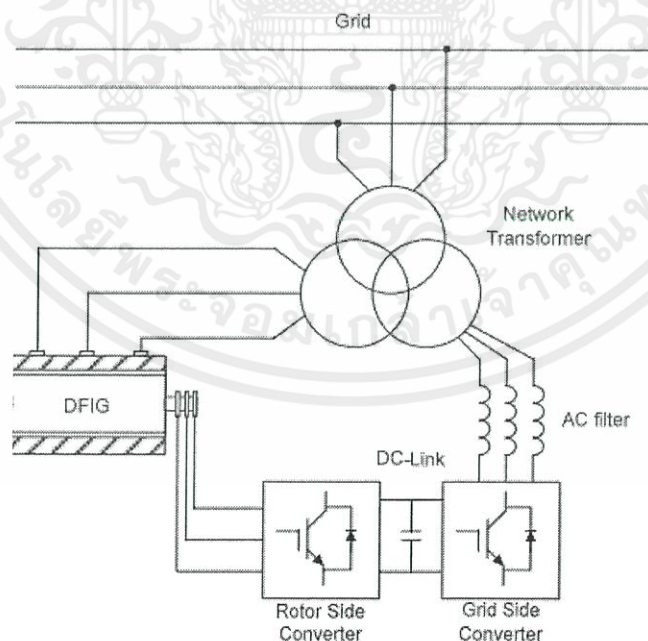
- T'_{d0} คือ ค่าคงตัวเวลาเปิดวงจรรขั้วครู่ในแนวแกนตรง
- T'_{q0} คือ ค่าคงตัวเวลาเปิดวงจรรขั้วครู่ในแนวแกนขวาง
- T''_{d0} คือ ค่าคงตัวเวลาเปิดวงจรรขั้วแวนในแนวแกนตรง
- T''_{q0} คือ ค่าคงตัวเวลาเปิดวงจรรขั้วแวนในแนวแกนขวาง

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนกลับสองทาง

ในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์นั้น เนื่องจากในปัจจุบันมีการพัฒนาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมากขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดการประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการควบคุมแรงดันและกระแสที่โรเตอร์ โดยอาศัยวงจรรและวิธีการต่างๆ เช่น วงจรบริดจ์ วงจรชอปเปอร์ วิธีการควบคุมเวกเตอร์ เป็นต้นเพื่อช่วยในการปรับค่าป้อนเข้าโรเตอร์ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์ได้โดยการควบคุมการสวิตช์ที่คอนเวอร์เตอร์เท่านั้น [4-6]

โดยการควบคุมที่ใช้อย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพคือ วิธีการควบคุมเวกเตอร์ (Vector control) โดยวิธีการนี้เป็นการควบคุมกระแสโรเตอร์โดยอาศัยการแจกแจงกระแสตามเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้อยที่สเตเตอร์

ด้วยเหตุนี้เพื่อให้สามารถควบคุมด้วยวิธีการควบคุมเวกเตอร์ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องอาศัยคอนเวอร์เตอร์ชนิดปรับความกว้างพัลส์ (PWM converter) มาเชื่อมต่อกับวงจรรโรเตอร์ ดังแสดงในรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรือเผยแพร่ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 วงจรการควบคุมโดยการป้อนสองทาง

โดยในรูปจะเห็นว่า มีชุดคอนเวอร์เตอร์สองชุดที่ต่ออยู่ในวงจรโรเตอร์ ชุดหนึ่งต่อเข้ากับวงจรโรเตอร์ และระหว่างชุดคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองต้องมีตัวเก็บประจุเพื่อคงค่าแรงดันกระแสตรงจากการแปลงให้คงที่ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า DC link ส่วนชุดคอนเวอร์เตอร์อีกชุดจะเชื่อมต่อเข้ากับไฟตรงหรืออาจผ่านหม้อแปลงแรงดันเพื่อแปลงค่า ซึ่งจะทำการแปลงไฟฟ้สามารถไหลได้ 2 ทิศทางทำให้สามารถควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ทั้งโหมดการทำงานมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทุกย่านความเร็ว ซึ่งการเชื่อมต่องจรชนิดนี้นิยมใช้กับเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าพลังงานลม

จากสมการความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าในสภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดป้อนกลับสองทางประมาณค่าได้จากค่าพลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้อยที่ โรเตอร์ และ สเตเตอร์ ซึ่งได้

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} + ((x_s + x_m) i_{ds} + x_m i_{dr}) \quad (2.13)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} - ((x_s + x_m) i_{ds} + x_m i_{dr}) \quad (2.14)$$

$$v_{dr} = -R_R i_{dr} + (1 - \omega_n) ((x_R + x_m) i_{qr} + x_m i_{qs}) \quad (2.15)$$

$$v_{qr} = -R_R i_{qr} + (1 - \omega_n) ((x_R + x_m) i_{dr} + x_m i_{ds}) \quad (2.16)$$

ซึ่งการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนกลับสองทางนั้นมีตัวแปรในการวิเคราะห์ดังนี้

โดยที่	S_n	คือ ค่ากำลังไฟฟ้า MVA
	V_n	คือ แรงดันไฟฟ้า kV
	f_n	คือ ความถี่ทางไฟฟ้าของระบบ Hz
	r_s	คือ ค่าความต้านทานของสเตเตอร์ p.u.
	x_s	คือ ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์ p.u.
	r_R	คือ ค่าความต้านทานของโรเตอร์ p.u.
	x_R	คือ ค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์ p.u.
	x_m	คือ ค่าความเหนี่ยวนำคัปปลิ่ง m/s
	H_{ω_r}	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของกังหันลม kW/s/kVA
	H_m	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของโรเตอร์ kW/s/kVA
	K_S	คือ ค่าคงที่ของเพลา p.u.
	R	คือ รัศมีของโรเตอร์ m
	p	คือ จำนวนโพล
	n_b	คือ จำนวนซี่ของกังหันลม
	n_{GB}	คือ อัตราการทดเฟืองของชุดขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยพลังงานจลน์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่แรงดันทางด้านสเตออร์แปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่กริดและมุมเฟสของแรงดันที่กริด

$$V_{ds} = V \sin(-\theta) \quad (2.17)$$

$$V_{dr} = V \cos(\theta) \quad (2.18)$$

และกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ผลิตได้มีค่าตามค่ากระแสที่สเตออร์และที่ด้านคอนเวอร์เตอร์

$$P = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} \quad (2.19)$$

$$Q = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} + v_{qc} i_{dc} + v_{dc} i_{qc} \quad (2.20)$$

โดยที่กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากด้านคอนเวอร์เตอร์ไปยังกริดมีค่าเท่ากับ

$$P_c = v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} \quad (2.21)$$

$$Q_c = v_{qc} i_{dc} - v_{dc} i_{qc} \quad (2.22)$$

และกำลังไฟฟ้าที่โรเตอร์มีค่าเท่ากับ

$$P_R = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (2.23)$$

$$Q_R = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \quad (2.24)$$

เนื่องจากในการวิเคราะห์นี้ ไม่มีผลจากการสูญเสียที่คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งได้

$$P_C = P_R \quad (2.25)$$

$$Q_C = 0 \quad (2.26)$$

ดังนั้นได้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายไปยังกริดเท่ากับ

$$P_e = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (2.27)$$

$$Q_e = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า คอนเวอร์เตอร์สามารถควบคุมการทำงานของเครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนกลับสองทาง โดยที่

$$\dot{\omega}_m = (T_m - T_e) / 2H \quad (2.29)$$

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (2.30)$$

ซึ่งอธิบายฟลักซ์เกี่ยวค้ำที่สเตเตอร์กับกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\psi_{ds} = -((x_s + x_m) i_{ds} + x_m i_{dr}) \quad (2.31)$$

$$\psi_{qs} = -((x_s + x_m) i_{qs} + x_m i_{qr}) \quad (2.32)$$

ดังนั้นได้สมการแรงบิดความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าเท่ากับ

$$T_e = x_m (i_{qr} i_{ds} - i_{dr} i_{qs}) \quad (2.33)$$

และสมการความสัมพันธ์แรงบิดทางกลเท่ากับ

$$T_m = \frac{P_w}{\omega_m} \quad (2.34)$$

โดย P_w คือกำลังงานที่ได้รับจากพลังงานลม ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ความเร็วของลมดังนี้

$$P_w = \frac{\rho}{2} c_p(\lambda, \theta_p) A_r v_w^3 \quad (2.35)$$

โดยที่ P_w คือ ค่าพลังงานลม, θ_p คือ มุมของแต่ละใบพัดที่ปรับมุมรับกับลม, λ คือ อัตราเร็วลมปลาย และ v_w คือ ความเร็วของลม ส่วนค่า $c_p(\lambda, \theta_p)$ สามารถประมาณได้จากสมการความสัมพันธ์

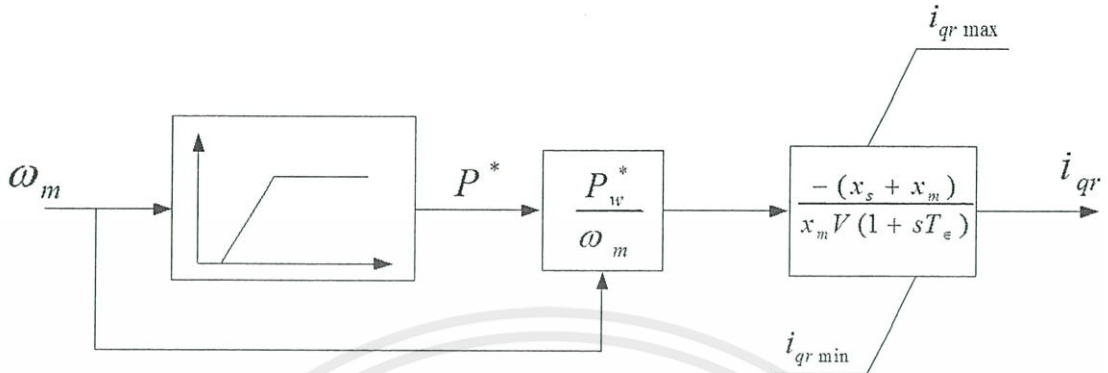
$$c_p(\lambda, \theta_p) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta_p - 5 \right) e^{\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.36)$$

โดยที่

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta_p} - \frac{0.035}{\theta_p^3 + 1} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ λ_i ใช้งาน $\lambda + 0.08\theta_p$ มา $\theta_p^3 + 1$ ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้ทำการวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งพบว่าคอนเวอร์เตอร์ทำงานเหมือนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในอุดมคติ โดยที่ได้กระแส i_{dr} และ i_{qr} เป็นตัวแปรสถานะที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของโรเตอร์



รูปที่ 2.3 แผนภาพบล็อกการควบคุมความเร็วโรเตอร์

และยังใช้กระแส i_{dr} และ i_{qr} ในการควบคุมแรงดันกล่าวคือ DFIG มีคุณสมบัติในการควบคุมแรงดันที่ขั้วของระบบได้ซึ่งคุณสมบัติตรงนี้เองจะนำมาใช้ประโยชน์ในบทความต่อไป โดยมีสมการความสัมพันธ์เชิงอนุพันธ์ของกระแส i_{dr} และ i_{qr} ดังสมการที่ (2.38) และ (2.39)

$$i_{qr} = \left(\left(-\frac{x_s + x_m}{x_m V} \right) P_w^*(\omega_m) / \omega_m - i_{qr} \right) \frac{1}{T_e} \quad (2.38)$$

$$i_{dr} = K_V (V - V_{ref}) - V / x_m - i_{dr} \quad (2.39)$$

โดยที่ $P_w^*(\omega_m)$ คือ ค่าคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ที่ทำการปรับปรุงพลังงานลมและได้คำนวณโดยใช้ค่าความเร็วโรเตอร์ขณะทำงาน (แสดงในรูปที่ 2.3) ซึ่งได้ว่า $P_w^* = 0$ ถ้ามีความเร็วโรเตอร์ $\omega_m < 0.5$ p.u. และ $P_w^* = 1$ ถ้ามีความเร็วโรเตอร์ ดังนั้นการควบคุมความเร็วโรเตอร์มีผลเฉพาะในช่วงสภาวะทำงานโดยขอบเขตการควบคุมถูกจำกัดด้วยค่ากระแสดังนี้

$$i_{qr, \max} = -\frac{x_s + x_\mu}{x_\mu} P_{\min} \quad (2.40)$$

$$i_{qr, \min} = -\frac{x_s + x_\mu}{x_\mu} P_{\max} \quad (2.41)$$

$$i_{dr, \max} = -\frac{x_s + x_\mu}{x_\mu} Q_{\min} - \frac{x_s + x_\mu}{x_\mu^2} \quad (2.42)$$

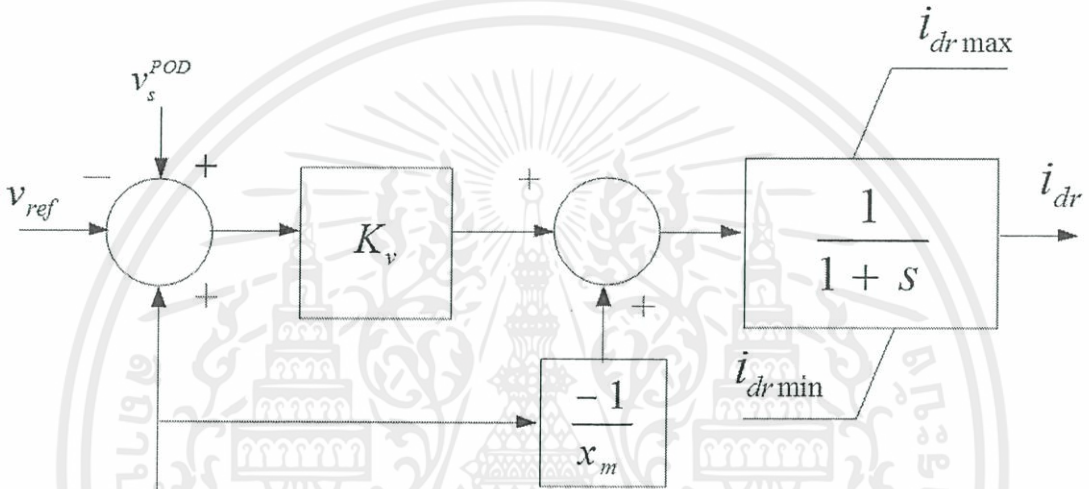
$$i_{dr, \min} = -\frac{x_s + x_\mu}{x_\mu} Q_{\max} - \frac{x_s + x_\mu}{x_\mu^2} \quad (2.43)$$

ในการควบคุมมุมของแต่ละใบพัดที่ปรับมุมรับกับลม θ_p แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งอธิบายด้วยสมการความสัมพันธ์เชิงอนุพันธ์ดังนี้

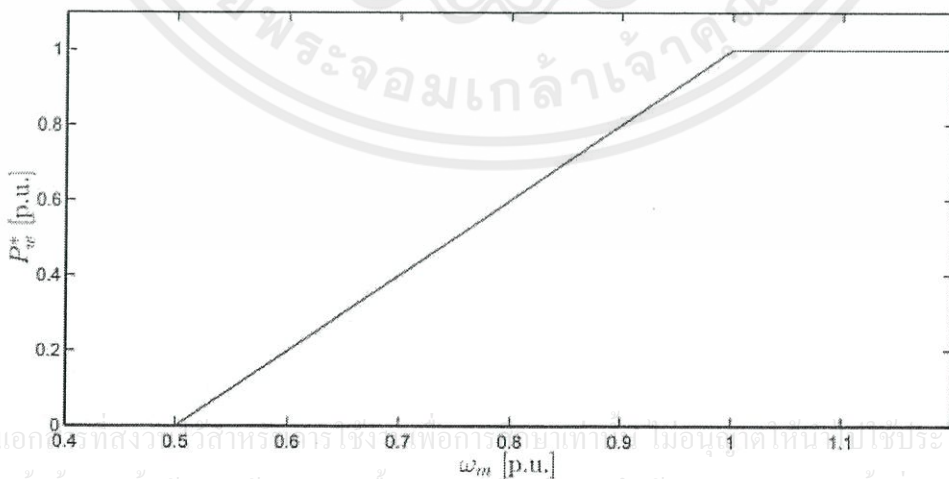
$$\dot{\theta}_p = \frac{(K_p \phi (\omega_m - \omega_{ref}) - \theta_p)}{T_p} \tag{2.44}$$

โดยที่ ϕ คือฟังก์ชันที่ใช้ปรับค่ามุมอ้างอิงเท่านั้น

เมื่อ $(\omega_m - \omega_{ref})$ มากเกินค่าที่กำหนดไว้ $\pm \Delta\omega$ ซึ่งการควบคุมมุมของใบพัดนั้นควบคุมเฉพาะสภาวะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่

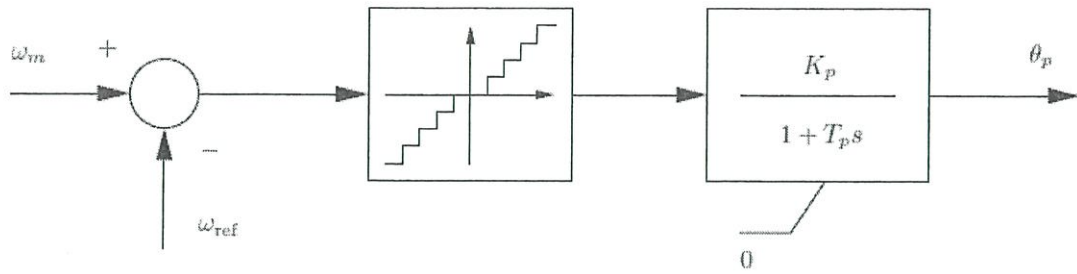


รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมการควบคุมความเร็วแรงดันของ DFIG



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและความเร็ว



รูปที่ 2.6 วงจรควบคุมมุมรับลมนของกังหัน

การควบคุมเวกเตอร์ (Vector control) ซึ่งสามารถแยกการควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างอิสระ ในที่นี้ได้ใช้แกนอ้างอิงแบบ flux-based rotating frame โดยกระแสโรเตอร์ในแกนตั้ง (i_{qr}) ใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงในขณะที่กระแสโรเตอร์ในแกนตรง (i_{dr}) ใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนดังนี้

$$P_e = \frac{x_s}{x_s + x_u} v_{DFIG} i_{qr} \tag{2.45}$$

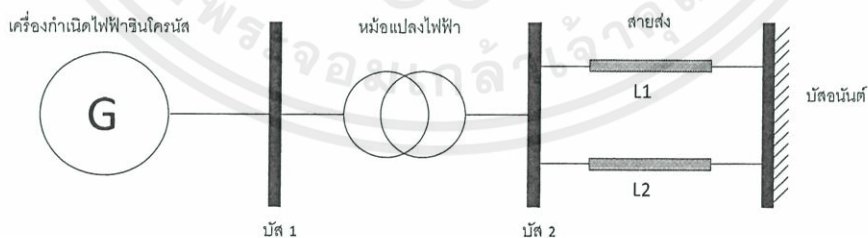
$$Q_e = -\frac{x_u v_{DFIG} i_{qr}}{x_s + x_u} - \frac{v_{DFIG}^2}{x_u} \tag{2.46}$$

เมื่อ P_e คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจาก DFIG

Q_e คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ออกจาก DFIG

v_{DFIG} คือ แรงดันของ DFIG

2.3 แบบจำลองของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์ (SMIB)

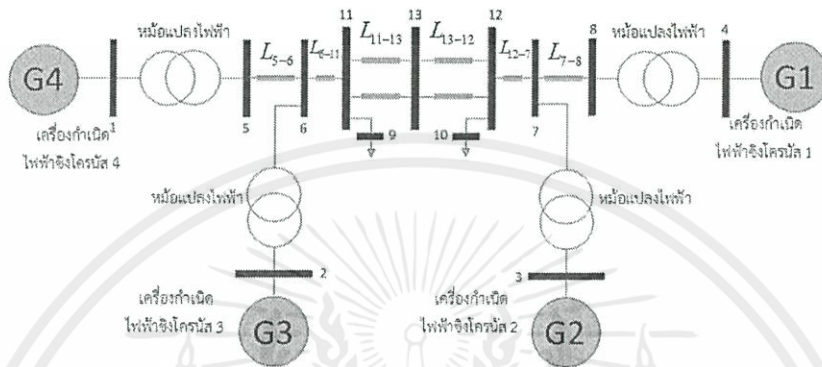


รูปที่ 2.7 ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์ (SMIB) ที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด
 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษามีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.7 ประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) จ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งไปยังบัสอนันต์ แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ระบบนี้เป็นพื้นฐานและเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษา

พฤติกรรมตัวแปรต่างๆภายในระบบระบบ SMIB เป็นระบบอย่างง่ายที่ใช้เพื่อจำลองระบบในการศึกษาพฤติกรรมของระบบทางไฟฟ้ากำลัง

2.4 ระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area four-machine interconnected power system)



รูปที่ 2.8 ระบบ Two-area four-machine interconnected power system

ระบบในส่วนนี้คือระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area four machine interconnected power system) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสทั้งหมดสี่ตัวแทนด้วย G1 ถึง G4 มีจำนวนบัสเท่ากับ 11 บัส แบ่งเป็นสองพื้นที่ฝั่งซ้ายประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 2 ตัวเรียกว่าพื้นที่หนึ่งและฝั่งขวาประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 2 ตัวเช่นกันเรียกว่า พื้นที่สอง โดยทั้งสองพื้นที่เชื่อมต่อกับบริเวณบัส 6 และบัส 7 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างสองพื้นที่จะไหลผ่านสายส่งที่บัส 13 และความถี่มูลฐานของระบบเท่ากับ 60 Hz

2.5 พื้นฐานของเสถียรภาพพลวัตในระบบไฟฟ้ากำลัง

เสถียรภาพพลวัต (Dynamic stability) หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังในการรักษาภาวะซิงโครไนซ์ เมื่อเกิดการรบกวนในระบบ ซึ่งหากระบบไม่สามารถรักษาภาวะซิงโครไนซ์หรือสูญเสียเสถียรภาพ ในบางครั้งเรียกว่าเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal stability) [16] ในการวิเคราะห์จะต้องทำระบบให้อยู่ในเชิงเส้นเสียก่อนซึ่งระบบจะอยู่ในรูปของสมการสถานะ (State equation)

$$\dot{\Delta X} = A\Delta X + B\Delta U \quad (2.47)$$

$$\Delta Y = C\Delta X + D\Delta U \quad (2.48)$$

โดยที่	ΔX	คือ เวกเตอร์สถานะ
	ΔU	คือ เวกเตอร์อินพุต
	ΔY	คือ เวกเตอร์เอาต์พุต
	A	คือ เมตริกซ์สถานะ
	B	คือ เมตริกซ์อินพุต
	C	คือ เมตริกซ์เอาต์พุต
	D	คือ เมตริกซ์ตัวควบคุมป้อนกลับ

หลังจากนั้นเราจะสามารถวิเคราะห์โหมดการแกว่งของระบบได้จากการหาค่าลักษณะเฉพาะของสมการโดยแทน λ_i เท่ากับค่าลักษณะเฉพาะอันดับที่ i ของระบบโดยสามารถจัดค่าลักษณะเฉพาะให้อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อนดังสมการที่ 2.49 โดยที่ σ และ ω คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพตามลำดับ และหาความหน่วง ζ ได้จากสมการที่ 2.50 ซึ่งความหน่วงดังกล่าวจะเป็นตัวที่บ่งบอกเสถียรภาพของระบบในโหมดการแกว่งนั้นๆเมื่อมีสิ่งรบกวนในระบบจะเกิดการแกว่งของโหมดการแกว่งที่ความถี่ต่ำซึ่งในกรณีที่รุนแรงอาจทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้

$$\lambda = \sigma + j\omega \quad (2.49)$$

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.50)$$

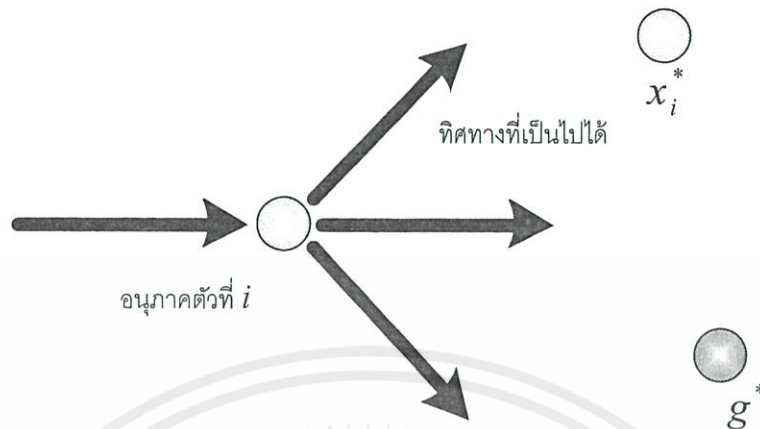
2.6 วิธีการกลุ่มอนุภาค

2.6.1 ที่มาและความหมายของวิธีการกลุ่มอนุภาค

วิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) ได้ถูกพัฒนาโดยนักวิจัยชื่อ Kennedy และ Eberhart ในปี ค.ศ. 1995 โดยเป็นกระบวนการหาค่าที่มีพื้นฐานในการเลียนแบบพฤติกรรมของฝูงปลาและฝูงนกในธรรมชาติ PSO อาจจะมีบางวิธีการที่คล้ายคลึงกับวิธีการทางพันธุกรรมและกระบวนการติดต่อกันแต่จะง่ายกว่าเพราะไม่มีการกลายพันธุ์ หรือ การใช้สารฟีโลโมน แต่มีการแทนที่ด้วยการใช้จำนวนจริงที่ได้มาจากการสุ่มค่าและการติดต่อกับสื่อสารภายในฝูงนก (Swarm) [15]

กระบวนการค้นหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันเป้าหมายโดยมีวิธีการปรับทิศทาง การเคลื่อนที่ของแต่ละตัวแทนซึ่งถูกเรียกว่ากลุ่มอนุภาคการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคประกอบไปด้วยสองส่วนประกอบหลัก ส่วนแรกคือการสุ่มค่าและส่วนที่สองเป็นการกำหนดค่า ซึ่งแต่ละอนุภาคในพื้นที่หลายมิติที่รวมเรียกว่า Swarm นี้จะเก็บข้อมูลเวกเตอร์สองเวกเตอร์คือ เวกเตอร์ตำแหน่งและเวกเตอร์ความเร็ว แต่ละกลุ่มอนุภาคจะถูกดึงดูดไปยังตำแหน่งที่ดีที่สุดของทั้งฝูง g^* และตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่ม x^* เมื่อกลุ่มอนุภาคค้นพบตำแหน่งที่ดีกว่าตำแหน่งก่อนหน้ามันจะทำการปรับปรุงค่า

ตำแหน่งที่ดีที่สุดให้เป็นค่าตำแหน่งปัจจุบันของแต่ละกลุ่มอนุภาค โดยมีเป้าหมายในการหาค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชันกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 2.9 ข้างต้นเป็นรูปแสดงการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

2.6.2 หลักการทำงานของวิธีกกลุ่มอนุภาค

กระบวนการวิธีกกลุ่มอนุภาคจะเริ่มต้นจากการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายและกำหนดค่าเริ่มต้นโดยตำแหน่งเริ่มต้น x_i ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดเฉพาะกลุ่มจะกำหนดค่าโดยการสุ่มค่าในช่วงที่ต้องการหาส่วนความเร็วเริ่มต้น v_i จะกำหนดให้เป็นศูนย์ของทุกอนุภาคโดยวิธีกกลุ่มอนุภาคจะทำการค้นหาค่า g^* ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดของฟังก์ชันเป้าหมายจากค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x_1), \dots, f(x_n)$ หลังจากนั้นจะเป็นขั้นตอนของการอัปเดตความเร็วโดยใช้สมการดังนี้

$$v_{id}(t+1) = w(t)v_{id}(t) + c_p u(p_{id} - x_{id}(t)) + c_g u(p_{gd} - x(t)) \quad (2.51)$$

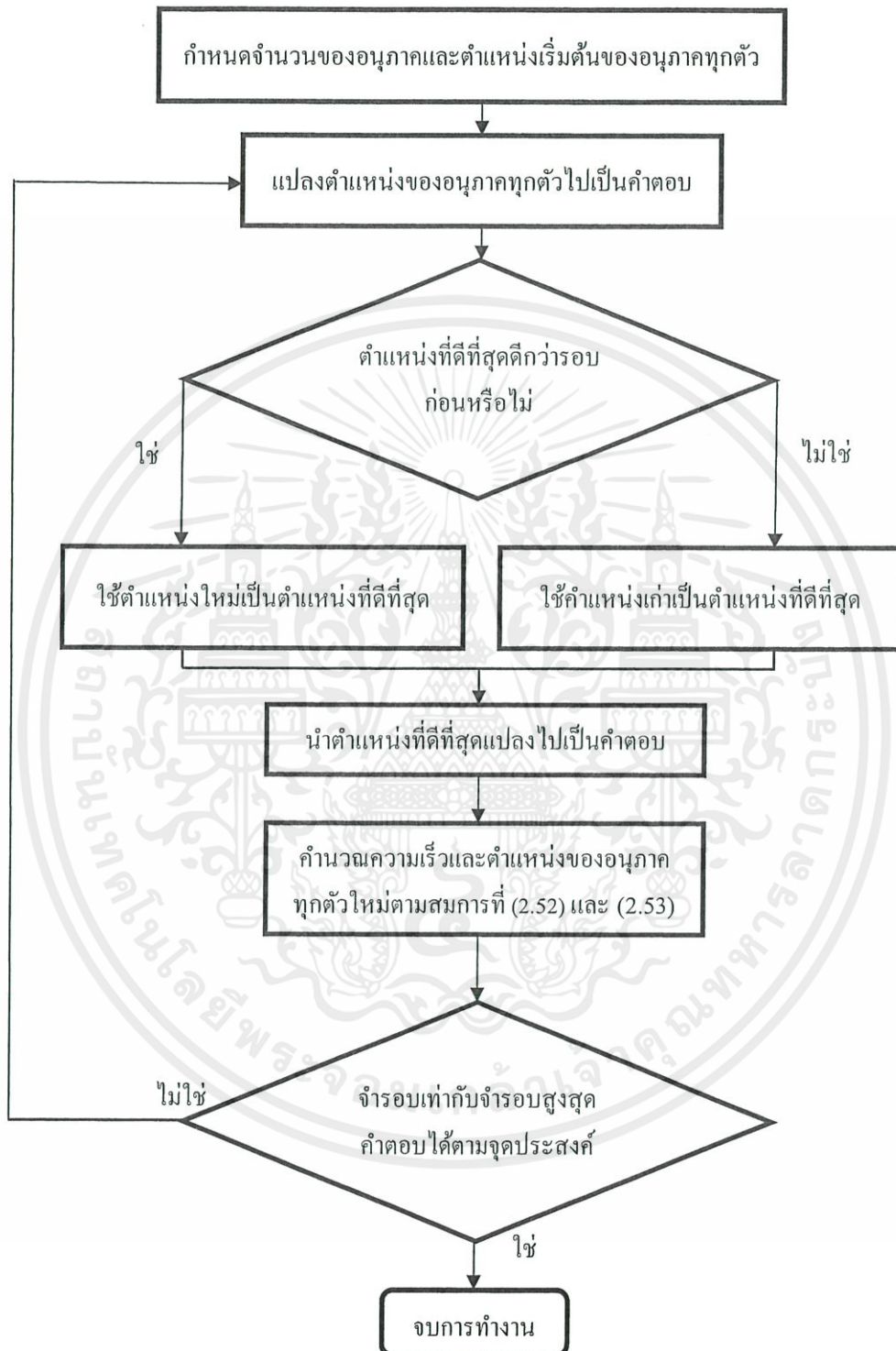
$$v_{id}(t+1) = \begin{cases} -V_{\max}, & v_{id}(t+1) \leq -V_{\max} \\ V_{\max}, & v_{id}(t+1) \geq V_{\max} \end{cases} \quad (2.52)$$

หลังจากอัปเดตความเร็วแล้วจะทำการคำนวณตำแหน่งใหม่โดยใช้สมการ

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (2.53)$$

นำค่าตำแหน่งใหม่ที่ได้มาหาค่าของฟังก์ชันเป้าหมายแล้วหาตำแหน่งที่ดีที่สุดเฉพาะกลุ่ม x^* และเมื่อทำการคำนวณหาความเร็วเสร็จแล้วจึงทำการหาค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชัน g^* ของแต่ละรอบและกลับไปยังการหาค่าตำแหน่งใหม่ กระบวนการ PSO จะทำซ้ำไปจนกว่าจะถึงรอบที่ได้

กำหนดไว้โดยค่าสุดท้ายที่ได้จะเป็นค่าของตำแหน่งที่ดีที่สุดโดยมีอัลกอริทึมในการทำงานแสดงดังแผนภาพในรูปที่ 2.10 ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษานานับัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.10 แผนภาพการทำงานของ PSO
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบพารามิเตอร์

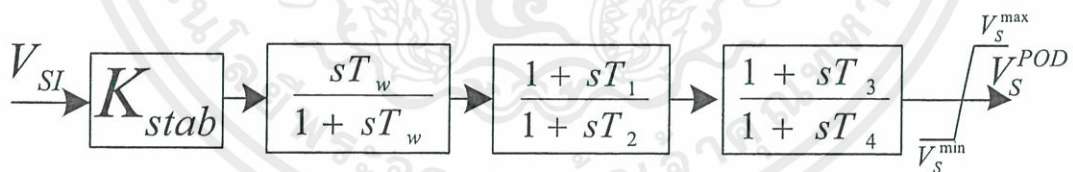
ในบทนี้อธิบายถึงแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly fed induction generator, DFIG) ที่มีการติดตั้งตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper, POD) เพื่อช่วยทำเสถียรภาพระบบ และในส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบคือระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อกับบัสอนันต์ (Single machine infinite bus, SMIB) และระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area four-machine interconnected power system) สุดท้ายคือแนวคิดในการตั้งปัญหาสมการจุดประสงค์และขั้นตอนการหาคำตอบของสมการจุดประสงค์

3.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางกับตัวหน่วงการแกว่ง

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างของตัวหน่วงการแกว่ง (POD) และโครงสร้างของส่วนควบคุมของ DFIG ที่มีการติดตั้ง POD เข้าไปบริเวณส่วนควบคุมของ DFIG

3.1.1 โครงสร้างของตัวหน่วงการแกว่ง

ตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper, POD) มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยจะประกอบด้วยเฟสชดเชยลำดับอันดับสอง K_{stab} คืออัตราขยายของวงจร, T_w คือค่าคงตัวของวงจรตรวจจับ, T_1, T_2, T_3 และ T_4 คือค่าคงตัวของวงจรเฟสนำและเฟสตาม, V_{SI} คือสัญญาณเข้าของตัวหน่วงการแกว่งสัญญาณขาออก V_s^{POD} จะถูกจำกัดโดย V_s^{\min} และ V_s^{\max}

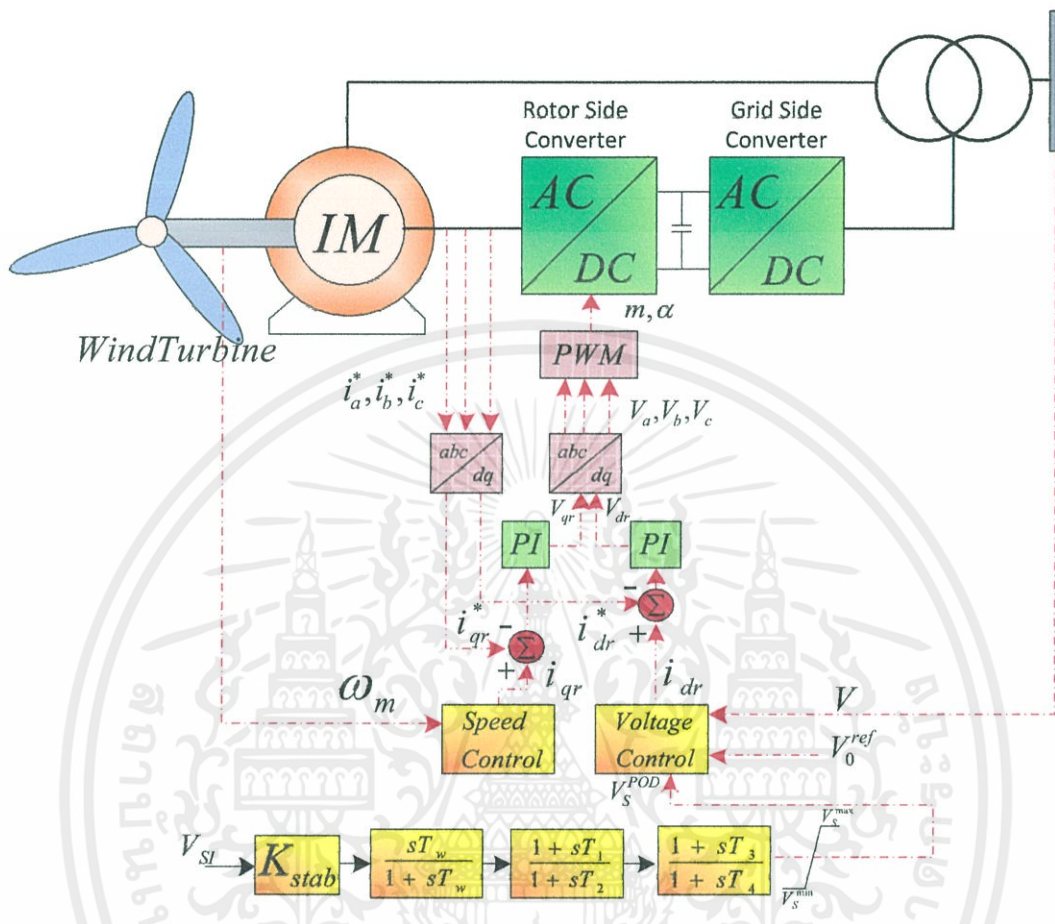


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของตัวหน่วงการแกว่ง

3.1.2 โครงสร้างของ DFIG ที่มีการติดตั้ง POD

โครงสร้างของส่วนควบคุมของ DFIG สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถแบ่งการควบคุมออกได้ 2 ส่วนคือส่วนควบคุมแรงดันและส่วนควบคุมความเร็วในสภาวะปกติ [14] ส่วนควบคุมแรงดันของ DFIG จะทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันที่ขั้วบัสส่วนที่ต่อเข้ากับกริด โดยในกรณีที่ไม่มี POD ต่อเข้าไป สัญญาณขาเข้าของ POD จะเป็นสัญญาณของกำลังไฟฟ้าที่มีการแกว่งในระบบ

กรณีดังกล่าวคือเครื่องกำเนิดจะไม่ได้ควบคุมแค่แรงดันอีกต่อไปแต่จะมีส่วนช่วยในการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ [7-9] ดังแสดงในรูปที่ 3.2



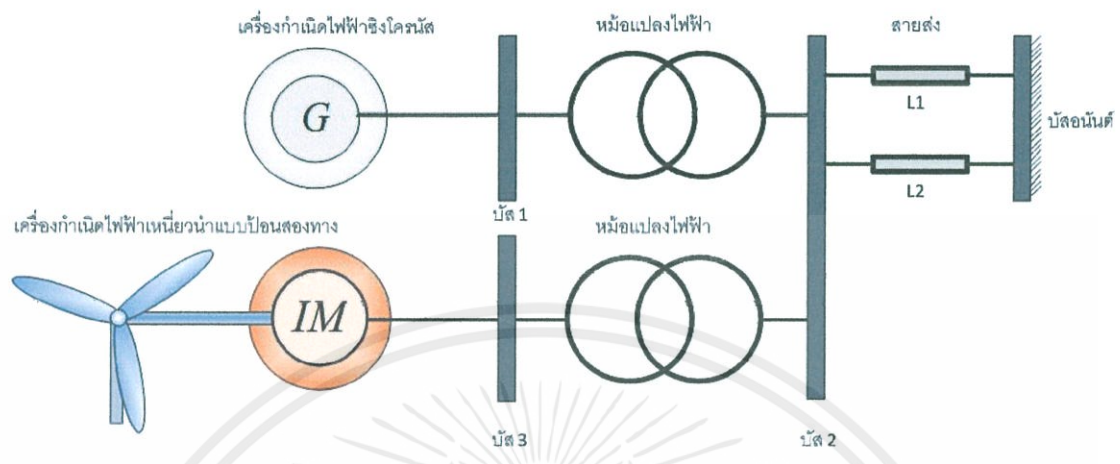
รูปที่ 3.2 วงจรควบคุมของ DFIG ที่มีการติดตั้ง POD เพิ่มเข้าไป

3.2 ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อกับบัสอนันต์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทดสอบในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อกับบัสอนันต์ (Single machine infinite bus, SMIB) ส่วนแรกจะกล่าวถึงแบบจำลองของระบบ SMIB องค์ประกอบของระบบ และตำแหน่งที่ DFIG เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ ส่วนที่สองกล่าวถึงแนวคิดในการทำเสถียรภาพของระบบ ส่วนสุดท้ายกล่าวถึงการตั้งปัญหาที่เหมาะสม สมการจุดประสงค์ อัลกอริทึมในการหาคำตอบของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 โครงสร้างของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อกับบัสอนันต์



รูปที่ 3.3 ระบบ SMIB ที่มีการติดตั้ง DFIG

ระบบ SMIB ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (DFIG) ต่อเข้าไปในระบบ [11] แสดงในรูป 3.3 ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) ขนาด 500 MVA และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางที่ต่ออยู่กับกังหันลม (Doubly fed induction generator) แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแทนด้วยสมการแบบจำลองอันดับที่ 6 ตามสมการหัวข้อ 2.1 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและพารามิเตอร์ DFIG แสดงดังนี้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีพิกัด 500 MVA พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามุ่งต่อไปนี้ [11]

- ความถี่ (f) = 60 Hz
- ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Armature Resistance) (R_a) = 0.003 p.u.
- ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Reactance) (X_l) = 0.15 p.u.
- ค่ารีแอกแตนซ์ในแนวแกนตรง (X_d) = 1.8 p.u.
- ค่ารีแอกแตนซ์ซิงโครนัสในแนวแกนขวาง (X_q) = 1.7 p.u.
- ค่ารีแอกแตนซ์ชั่วคราวในแนวแกนตรง (X'_d) = 0.3 p.u.
- ค่าคงตัวเวลาชั่วคราวของการเปิดวงจรในแนวแกนตรง (τ'_{d0}) = 1.0 sec
- ค่าสัมประสิทธิ์ของความเฉื่อย (H) = 3.5 sec
- ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (D) = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 160 MVA มีพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดังต่อไปนี้ [11]

ระดับแรงดัน (V)	=	69	kV
ความถี่ (f)	=	60	Hz
ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ (R_s)	=	0.01	p.u.
ค่ารีแอกแตนซ์ที่สเตเตอร์ (X_s)	=	0.10	p.u.
ค่าความต้านทานที่โรเตอร์ (R_r)	=	0.01	p.u.
ค่ารีแอกแตนซ์ที่โรเตอร์ (X_r)	=	0.10	p.u.
ค่ารีแอกแตนซ์เกี่ยวคล้อง (X_m)	=	3.00	p.u.
ค่าอัตราขยายของวงจรควบคุมมุมพิชท์ (K_p)	=	10.0	p.u.
ค่าคงตัวเวลาของวงจรควบคุมมุมพิชท์ (T_p)	=	3	sec
ค่าอัตราขยายของวงจรควบคุมแรงดัน (K_v)	=	10.0	p.u.
ค่าคงตัวเวลาของวงจรควบคุมแรงดัน (T_v)	=	0.01	sec
จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)	=	4	
อัตราเกียร์ทด (Gear Ratio)	=	1/89	
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max})	=	1.00	p.u.
ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุด (P_{min})	=	0.00	p.u.
ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนสูงสุด (Q_{max})	=	0.7	p.u.
ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนต่ำสุด (Q_{min})	=	-0.7	p.u.
ความยาวใบพัดของกันหันลม (Blade length)	=	75	m
จำนวนใบพัด	=	3	
จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	=	80	

พารามิเตอร์ของสายส่งแต่ละเส้น

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ($L1$)	=	0.001+j0.9	p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ($L2$)	=	0.001+j0.9	p.u.

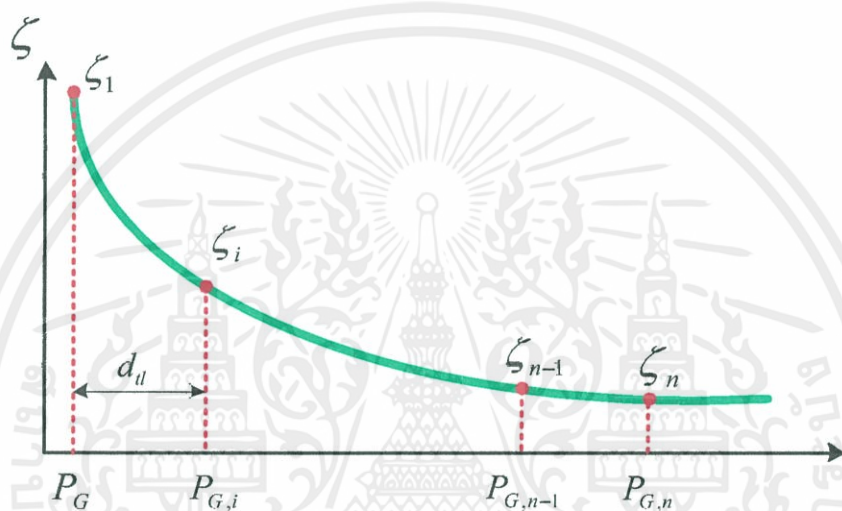
พารามิเตอร์ของลมมีดังนี้ [10]

ความเร็วลมปกติ (Nominal wind speed)	=	15	m/s
ความหนาแน่นของอากาศ (Air density)	=	1.255	kg / m ³
ค่าคงตัวเวลาของวงจรกรอง (Filter time constant)	=	4	sec
ค่าแซมเปิล (Sample time)	=	0.1	sec
ค่าการกระจาย (C)	=	20	
ค่าการกระจาย (K)	=	2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยฯ กรุณาแจ้งให้มหาวิทยาลัยฯ ทราบ

3.2.2 แนวคิดในการทำเสถียรภาพในระบบ SMIB

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (P_G) หรือ กำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (P_{DFIG}) เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนความหน่วง (ζ) ของโหมดการแกว่งเฉพาะจุดซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อ P_G หรือ P_{DFIG} มีค่าเพิ่มขึ้นค่าของ ζ มีแนวโน้มลดลงซึ่งส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบและสมรรถนะของตัวควบคุม [11, 12] ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของอัตราหน่วงของระบบและกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด

3.2.3 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ POD

จากแนวคิดในหัวข้อที่ 3.2.2 จะพบว่าทุกๆค่าของกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (P_G) หรือกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (P_{DFIG}) ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราหน่วงของโหมดการแกว่งเฉพาะที่ของระบบมีแนวโน้มต่ำลงและสอดคล้องสมรรถนะของตัวควบคุมจะมีแนวโน้มที่ต่ำลงเช่นกันเพื่อให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพทุกจุดการทำงานของระบบดังนั้นจึงสามารถตั้งสมการวัตถุประสงค์ได้ตามสมการที่ (3.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Minimize: Objective function } \sum_{i=1}^n |\zeta_{spec} - \zeta_i| + \sum_{k=1}^n |\zeta_{spec} - \zeta_k| \quad (3.1)$$

โดยมีเงื่อนไขคือ

$$0.1 = K_{\min} \leq K \leq K_{\max} = 50$$

$$0.1 = T_{1,3}^{\min} \leq T_{1,3} \leq T_{1,3}^{\max} = 20$$

$$0.01 = T_{2,4}^{\min} \leq T_{2,4} \leq T_{2,4}^{\max} = 20$$

โดยที่ ζ_{spec} คือ อัตราหน่วงที่ผู้ออกแบบกำหนด

ζ_i คือ อัตราหน่วงของระบบเมื่อ DFIG ทำงานที่พิกัดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส

ทำงานที่ตำแหน่งกำลังไฟฟ้าที่เท่ากับ $P_{G,i}$

ζ_k คือ อัตราหน่วงของระบบเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสทำงานที่พิกัดและ DFIG

ทำงานที่ตำแหน่งกำลังไฟฟ้าที่เท่ากับ $P_{DFIG,k}$

K คือ อัตราขยายของตัวหน่วงการแกว่ง

K_{\min} คือ อัตราขยายต่ำสุดของตัวหน่วงการแกว่ง

K_{\max} คือ อัตราขยายสูงสุดของตัวหน่วงการแกว่ง

$T_{1,3}$ คือ ค่าคงตัวเวลาของเฟสนำอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ

$T_{1,3}^{\min}$ คือ ค่าคงตัวเวลาต่ำสุดของเฟสนำอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ

$T_{1,3}^{\max}$ คือ ค่าคงตัวเวลาสูงสุดของเฟสนำอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ

$T_{2,4}$ คือ ค่าคงตัวเวลาของเฟสตามอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ

$T_{2,4}^{\min}$ คือ ค่าคงตัวเวลาต่ำสุดของเฟสตามอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ

$T_{2,4}^{\max}$ คือ ค่าคงตัวเวลาสูงสุดของเฟสตามอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ

จากสมการที่ (3.1) อธิบายได้ว่าในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสและ DFIG มากขึ้นพบว่าจะทำให้อัตราหน่วง (Damping ratio) มีแนวโน้มลดลง ถ้าในกรณีที่พจน์แรกของสมการที่ (3.1) มีค่าต่ำสุด ผลก็คือในทุกๆตำแหน่งของกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสเมื่อมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราหน่วงของระบบทุกตำแหน่งจะมีค่าเข้าใกล้ค่า ζ_{spec} ทุกค่า กล่าวคือตัวหน่วงการแกว่งจะมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในทุกๆจุดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ส่วนในกรณีพจน์ที่สองของสมการที่ (3.1) เมื่อพจน์ดังกล่าวมีค่าต่ำสุดผลก็คือทุกๆตำแหน่งของกำลังไฟฟ้าที่ออกจาก DFIG เมื่อมีกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัตราหน่วงของระบบทุกตำแหน่ง

จะมีค่าเข้าใกล้ ζ_{spec} ทุกค่า กล่าวคือผลสมรรถนะของตัวหน่วงการแกว่งจะมีค่าสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในทุกๆจุดการทำงานของ DFIG

กระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้ ในส่วนของระบบ SMIB

ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดให้ DFIG ทำงานที่พิกัดและให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 50 MVA ทำการวิเคราะห์อัตราหน่วงของโหมดการแกว่งเฉพาะที่และเก็บข้อมูล

ขั้นตอนที่ 2 : เพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ละ 50 MVA ทำการวิเคราะห์อัตราหน่วงของโหมดการแกว่งเฉพาะที่และเก็บข้อมูลทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 อีกครั้งและเก็บข้อมูลเพื่อหาค่าพจน์แรกในสมการที่ (3.1)

ขั้นตอนที่ 3 : กำหนดให้เครื่องกำเนิดซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัดและให้ DFIG จ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 16 MVA ทำการวิเคราะห์อัตราหน่วงของโหมดการแกว่งเฉพาะที่และเก็บข้อมูล

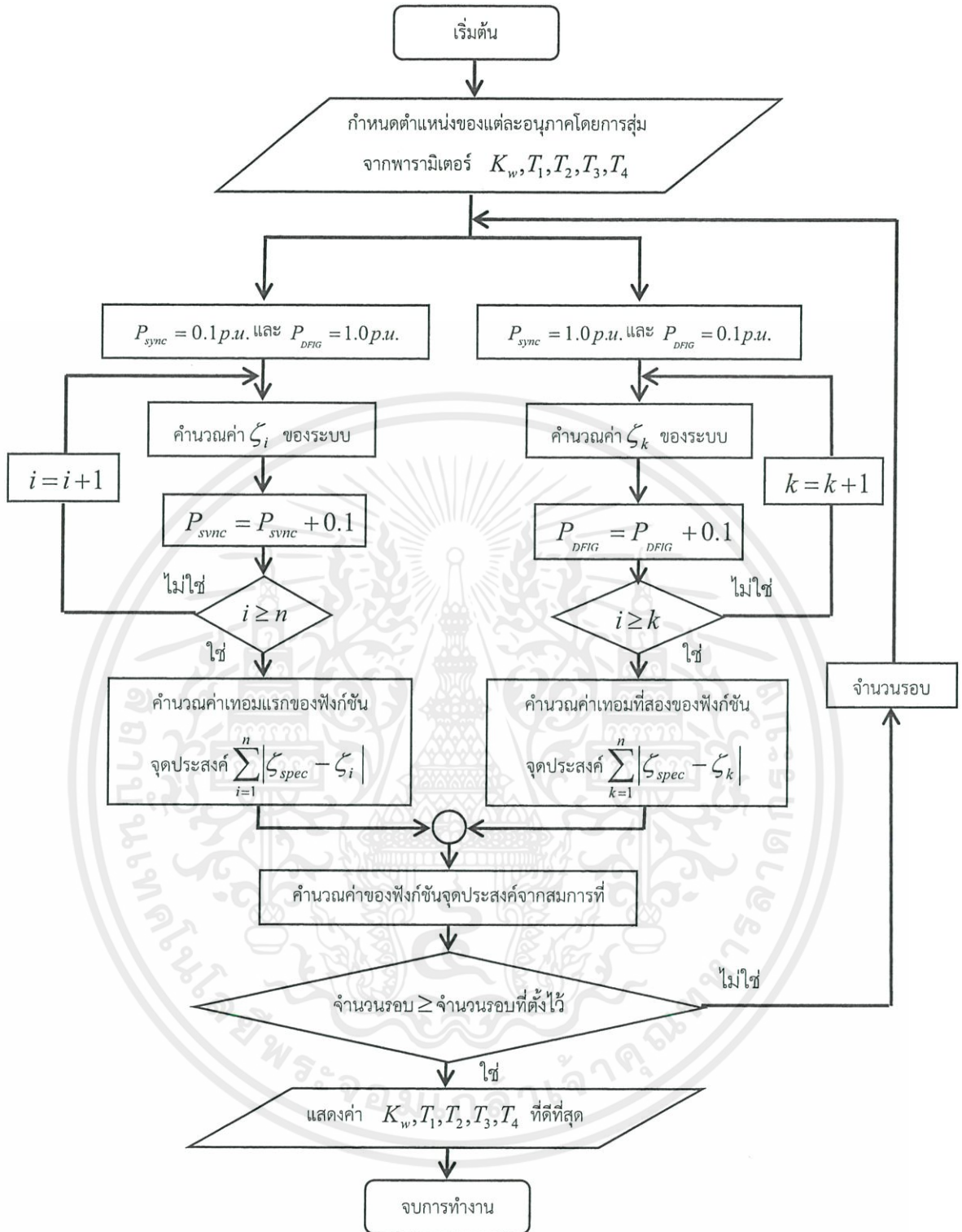
ขั้นตอนที่ 4 : เพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจาก DFIG โดยเพิ่มทีละ 16 MVA ทำการวิเคราะห์อัตราหน่วงของโหมดการแกว่งเฉพาะที่และเก็บข้อมูลทำตามขั้นตอนที่ 3 และ 4 อีกครั้งและเก็บข้อมูลเพื่อหาค่าพจน์ที่สองในสมการที่ (3.1)

ขั้นตอนที่ 5 : นำผลรวมของพจน์แรกที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และ 2 และพจน์ที่สองที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 และ 4 ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (3.1) มีค่าน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 6 : เลือกค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากอัตราหน่วงของโหมดการแกว่งเฉพาะจุดของระบบ

โดยขั้นตอนในการทำงานพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมแสดงเป็นแผนภาพผังการทำงานในรูปที่ 3.5 โดยได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization) ในการแก้ปัญหาสมการวัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



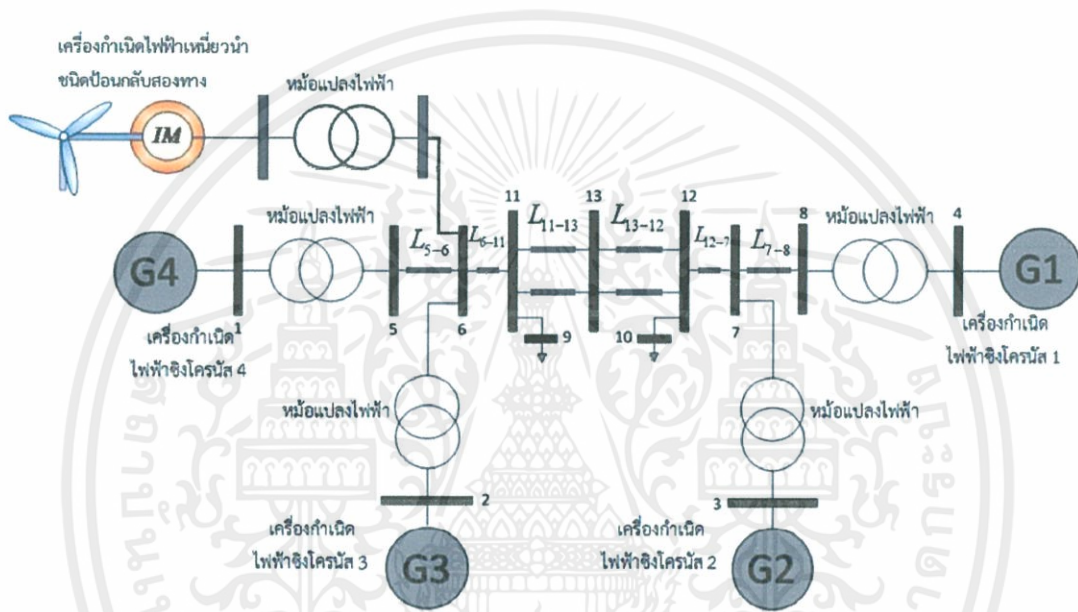
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมในระบบ SMIB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area four-machine interconnected power system) โดยจะแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆคือส่วนแรกจะกล่าวถึงโครงสร้างแบบจำลองของระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิดพารามิเตอร์ต่างๆตำแหน่งที่ DFIG เชื่อมต่อกับระบบและส่วนที่สองอธิบายถึงแนวคิดในการทำเสถียรภาพของระบบการตั้งสมการวัตุดิบประสงค์และขั้นตอนการแก้ปัญหาสมการวัตุดิบประสงค์

3.3.1 แบบจำลองของระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด



รูปที่ 3.6 ระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Two-area four-machine interconnected power system) ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly fed induction generator, DFIG) ต่อเข้าไปในระบบ [7] แสดงในรูป 3.3 ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) ขนาด 900 MVA 4 ตัวแทนด้วย G1 ถึง G4 ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งมีพารามิเตอร์เหมือนกันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางที่ต่ออยู่กับกังหันลมแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแทนด้วยสมการแบบจำลองอันดับที่หกตามสมการหัวข้อ 2.1 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและพารามิเตอร์ DFIG แสดงดังนี้

ระบบ Two-area four-machine interconnected power system ที่ติดตั้ง DFIG ที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.4 แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบจำลองอันดับที่หกซึ่งติดตั้งระบบควบคุมแรงดันและโกเวอร์เนอร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีพิกัด 900 MVA พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้ [7]

กำลังไฟฟ้าที่พิกัด (S_{rate})	=	900	MVA
แรงดันที่พิกัด (v_{rate})	=	69	kV
ความถี่ (f)	=	60	Hz
ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_a)	=	0.003	p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์รีแอกแตนซ์ (x_l)	=	0.15	p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์รีแอกแตนซ์ในแนวแกนตรง (x_d)	=	1.81	p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์รีแอกแตนซ์ชั่วคราวในแนวแกนตรง (x_d')	=	0.3	p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์รีแอกแตนซ์ชั่วคราวในแนวแกนตรง (x_d'')	=	0.23	p.u.
ค่าคงตัวเวลาสถานะชั่วคราวในแนวแกนตรง (τ_{d0}')	=	8.0	sec
ค่าคงตัวเวลาสถานะชั่วคราวในแนวแกนตรง (τ_{d0}'')	=	0.03	sec
ค่าอิมพีแดนซ์รีแอกแตนซ์ในแนวแกนขวาง (x_q)	=	1.76	p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์รีแอกแตนซ์สถานะชั่วคราวในแนวแกนขวาง (x_q')	=	0.65	p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์รีแอกแตนซ์สถานะชั่วคราวในแนวแกนขวาง (x_q'')	=	0.25	p.u.
ค่าคงตัวเวลาสถานะชั่วคราวในแนวแกนขวาง (T_{q0}')	=	0.03	sec
ค่าคงตัวเวลาสถานะชั่วคราวในแนวแกนขวาง (T_{q0}'')	=	0.03	sec
ค่าสัมประสิทธิ์ของความเฉื่อย (H)	=	3.0	

DFIG ขนาด 200 MVA มีพารามิเตอร์ของ DFIG มีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ [7]

กำลังไฟฟ้าที่พิกัด (S_{rate})	=	200	MVA
แรงดันที่พิกัด (v_{rate})	=	69	kV
ความถี่ (f)	=	60	Hz
ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ (R_s)	=	0.01	p.u.
ค่ารีแอกแตนซ์ที่สเตเตอร์ (X_s)	=	0.10	p.u.
ค่าความต้านทานที่โรเตอร์ (R_r)	=	0.01	p.u.
ค่ารีแอกแตนซ์ที่โรเตอร์ (X_r)	=	0.08	p.u.
ค่ารีแอกแตนซ์เกี่ยวกับคล่อง (X_m)	=	3.00	p.u.
ค่าอัตราขยายของวงจรถบคุมมุมนพิกซ์ (K_p)	=	10.0	p.u.
ค่าคงตัวเวลาของวงจรถบคุมมุมนพิกซ์ (T_p)	=	3	sec
ค่าอัตราขยายของวงจรถบคุมแรงดัน (K_v)	=	10.0	
ค่าคงตัวเวลาของวงจรถบคุมพิกซ์ (T_v)	=	0.01	sec
จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)	=	4	
อัตราเกียร์ทด (Gear Ratio)	=	1/89	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำเอกสารไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{\max})	=	1.00	p.u.
ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุด (P_{\min})	=	0.00	p.u.
ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนสูงสุด (Q_{\max})	=	0.7	p.u.
ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนต่ำสุด (Q_{\min})	=	-0.7	p.u.
ความยาวใบพัดของกังหันลม (Blade length)	=	75	m
จำนวนใบพัด	=	3	
จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	=	100	

พารามิเตอร์ของสายส่งแต่ละเส้น

อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ($L5-6$)	=	$0.001 + j0.9$	p.u.
อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ($L6-11$)	=	$0.001 + j0.9$	p.u.
อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ($L11-13$)	=	$0.001 + j0.9$	p.u.
อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ($L13-12$)	=	$0.001 + j0.9$	p.u.
อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ($L12-7$)	=	$0.001 + j0.9$	p.u.
อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ($L7-8$)	=	$0.001 + j0.9$	p.u.

พารามิเตอร์ของลมมีดังนี้

ความเร็วลมปกติ (Nominal Wind Speed)	=	15	m/s
ความหนาแน่นของอากาศ (Air Density)	=	1.255	kg / m^3
ค่าคงตัวของวงจรรอง (Filter time constant)	=	4	sec
ค่าแซมเปิล (Sample Time)	=	0.1	sec
ค่าการกระจาย (C)	=	20	
ค่าการกระจาย (K)	=	2	

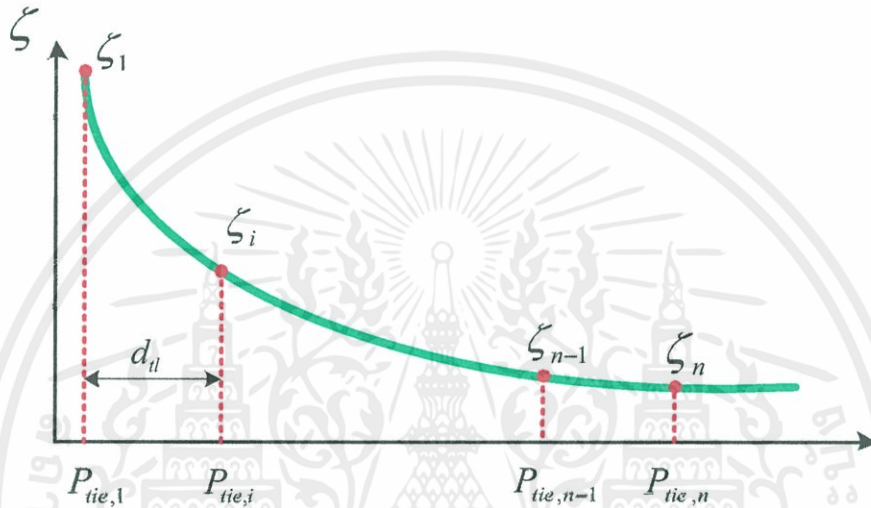
3.3.2 แนวคิดในการทำเสถียรภาพของระบบสองพื้นที่ที่เครื่องกำเนิด

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างสองพื้นที่ (P_{tie}) หรือกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P_G) เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนความหน่วง (ζ) ของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ซึ่งเลือกใช้พิจารณา เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อ P_{tie} หรือ P_G มีค่าเพิ่มขึ้นค่าของ ζ มีแนวโน้มลดลงซึ่งส่งผลเสียต่อเสถียรภาพและสมรรถนะของตัวควบคุมดังรูปที่ 3.7 โดยให้ความสัมพันธ์ P_{tie} ในช่วงที่พิจารณาสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเลขคณิต

เอกสารนี้มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.2) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{tie,i} = P_{tie,1} + (1-i)d_{il} \quad (3.2)$$

โดยที่ $P_{tie,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างพื้นที่ตำแหน่งที่ i
 $P_{tie,1}$ คือ กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างพื้นที่ตำแหน่งที่ 1
 d_{il} คือ ผลต่างรวมของกำลังไฟฟ้า

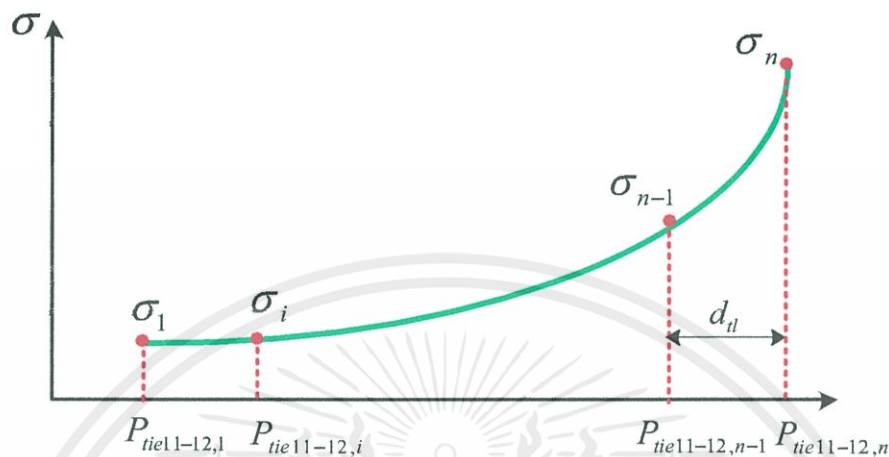


รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและอัตราหน่วงของระบบ

จากแนวคิดดังกล่าวเมื่อพิจารณาพบว่าที่ตำแหน่งกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบหรือสายส่งค่าน้อยอัตราหน่วงของระบบจะมีค่าสูงซึ่งนั่นหมายความว่าระบบจะมีเสถียรภาพมากสำหรับโหมดการแกว่งที่พิจารณาซึ่งในที่นี้คือโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ และในกรณีที่กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิด หรือกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งมีค่าสูงอัตราหน่วงของระบบจะมีค่าต่ำลงทำให้ระบบไร้เสถียรภาพ

จากความสัมพันธ์สมการในหัวข้อการวิเคราะห์เสถียรภาพพลวัตในบทที่ 2 จะพบว่าเมื่อทำระบบให้เป็นเชิงเส้นและหาค่าลักษณะเฉพาะของระบบ ค่าลักษณะเฉพาะที่ได้จะเป็นตัวบ่งบอกเสถียรภาพของระบบเมื่อมีสิ่งรบกวนขนาดเล็กโดยองค์ประกอบของค่าลักษณะเฉพาะ จะเป็นค่าจำนวนเชิงซ้อน โดยค่าส่วนจริงจะเป็นตัวบ่งบอกว่าระบบจะเข้าสู่ระบบเสถียรภาพช้าหรือเร็ว หรือกรณีที่ไม่มีค่าเป็นบวกพบว่าระบบไร้เสถียรภาพ และ ส่วนจินตภาพเป็นตัวบอกคาบการแกว่งของระบบเมื่อมีสิ่งรบกวน ในส่วนของหัวข้อนี้กล่าวถึงกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าขาออกเครื่องกำเนิดหรือกำลังไฟฟ้าในสายส่งมีการเพิ่มขึ้น แนวโน้มส่วนจริงของค่าลักษณะเฉพาะของโหมดการแกว่งที่เรา

พิจารณาจะมีความมากขึ้นหรืออาจหมายความว่าตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะจะเคลื่อนที่เข้าหาแกนจินตภาพมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและส่วนจริงของค่าลักษณะเฉพาะ

3.3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ POD ในระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด

จากแนวคิดในหัวข้อ 3.3.2 เมื่อกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (P_{tie}) มีความมากขึ้นจะส่งผลค่าอัตราหนึ่ง ζ ของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ 1 และ พื้นที่ 2 มีแนวโน้มลดลง อีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่าส่งผลต่อตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่จะมีตำแหน่งเข้าใกล้แกนจินตภาพมากขึ้นโดยจากที่กล่าวมาทำให้สามารถตั้งสมการจุดประสงค์ได้ตั้งสมการที่ (3.3) ภายใต้เงื่อนไขเกี่ยวกับขอบเขตของอัตราหนึ่งของระบบที่ไม่มากจนเกินเงื่อนไขทางปฏิบัติเกินไปหรือน้อยจนไม่พอที่จะทำเสถียรภาพ และรวมถึงพารามิเตอร์ของตัวหน่วงการแกว่งซึ่งจะต้องใช้ขอบเขตที่ยอมรับได้ในการตั้งปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสม

$$\text{Minimize Objective function: } \sum_{i=1}^n (|\zeta_{\max} - \zeta_i| + |\sigma_{\min} - \sigma_i|) \quad (3.3)$$

โดยมีเงื่อนไขคือ

$$\zeta_{\max} \geq \zeta_{spec}, \zeta_{spec} = 0.18$$

$$\sigma_{\min} \leq \sigma_{spec}, \sigma_{spec} = 0.8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง

$$0.1 = K_{\min} \leq K \leq K_{\max} = 50$$

$$0.1 = T_{1,3}^{\min} \leq T_{1,3} \leq T_{1,3}^{\max} = 20$$

$$0.01 = T_{2,4}^{\min} \leq T_{2,4} \leq T_{2,4}^{\max} = 20$$

โดยที่	ζ_{spec}	คือ อัตราหน่วงที่ผู้ออกแบบกำหนด
	ζ_{max}	คือ อัตราหน่วงสูงสุดในช่วง $P_{tie,1}$ ถึง $P_{tie,10}$
	ζ_i	คือ อัตราหน่วงของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ที่ตำแหน่ง $P_{tie,i}$
	σ_{spec}	คือ ส่วนจริงที่ผู้ออกแบบกำหนด
	σ_{min}	คือ ส่วนจริงที่ต่ำที่สุดในช่วง $P_{tie,1}$ ถึง $P_{tie,10}$
	σ_i	คือ ส่วนจริงของค่าลักษณะเฉพาะของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ที่ตำแหน่ง $P_{tie,i}$
	K_{min}	คือ อัตราขยายต่ำสุดของตัวหน่วงการแกว่ง
	K_{max}	คือ อัตราขยายสูงสุดของตัวหน่วงการแกว่ง
	$T_{1,3}$	คือ ค่าคงตัวของเฟสนำอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ
	$T_{1,3}^{min}$	คือ ค่าคงตัวเวลาต่ำสุดของเฟสนำอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ
	$T_{1,3}^{max}$	คือ ค่าคงตัวเวลาสูงสุดของเฟสนำอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ
	$T_{2,4}$	คือ ค่าคงตัวของเฟสตามอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ
	$T_{2,4}^{min}$	คือ ค่าคงตัวเวลาต่ำสุดของเฟสตามอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ
	$T_{2,4}^{max}$	คือ ค่าคงตัวเวลาสูงสุดของเฟสตามอันดับ 1 และอันดับ 2 ตามลำดับ

จากสมการจุดประสงค์ (3.3) จากแนวคิดที่ว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าในสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราหน่วงของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่จะมีแนวโน้มต่ำลงและตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะจะมีแนวโน้มเข้าหาแกนจินตภาพมากขึ้นผลดังกล่าวเมื่อสมการจุดประสงค์มีค่าต่ำที่สุดในพจน์แรกผลก็คือค่าอัตราหน่วงของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ทุกจุดการทำงานของกำลังไฟฟ้าในสายส่งจะมีค่าเข้าใกล้อัตราหน่วงสูงสุดของระบบกล่าวคือในทุกๆจุดการทำงานของอัตราหน่วงจะมีค่าสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ในส่วนของพจน์ที่สองอธิบายได้ว่าเมื่อพจน์ที่สองมีค่าต่ำที่สุดตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะทุกจุดการทำงานของมีตำแหน่งเข้าใกล้ตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะที่อยู่ไกลแกนจินตภาพมากที่สุดทุกจุดการทำงาน กล่าวคือตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะบนระนาบเชิงซ้อนเมื่อกำลังไฟฟ้าในสายส่งเพิ่มมากขึ้นแนวโน้มความเร็วในการวิ่งเข้าหาแกนจินตภาพจะช้าลงทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้ยาก

กระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ในส่วนของระบบ Two-area four-machine interconnected power system

ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งระหว่างบัส 11 และ บัส 13 มีค่าเท่ากับ 300 MVA แล้วทำการวิเคราะห์โหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ (Inter-area mode) ของระบบ

จากนั้นบันทึกผล

ขั้นตอนที่ 2 : ทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในสายส่งกำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

ระหว่างบัส 11 และ บัส 13 จากขั้นตอนที่ 1 เพิ่มขึ้น 28 MVA แล้วทำการวิเคราะห์โหมดการแกว่ง

ระหว่างพื้นที่ของบัสระบบจากนั้นบันทึกผล

ขั้นตอนที่ 3 : ทำขั้นตอนที่ 2 วนซ้ำจนกำลังไฟฟ้าในสายส่งมีค่าเท่ากับ 580 MVA แล้วเก็บค่าบันทึกผลทุกจุดการทำงานที่วนซ้ำไป

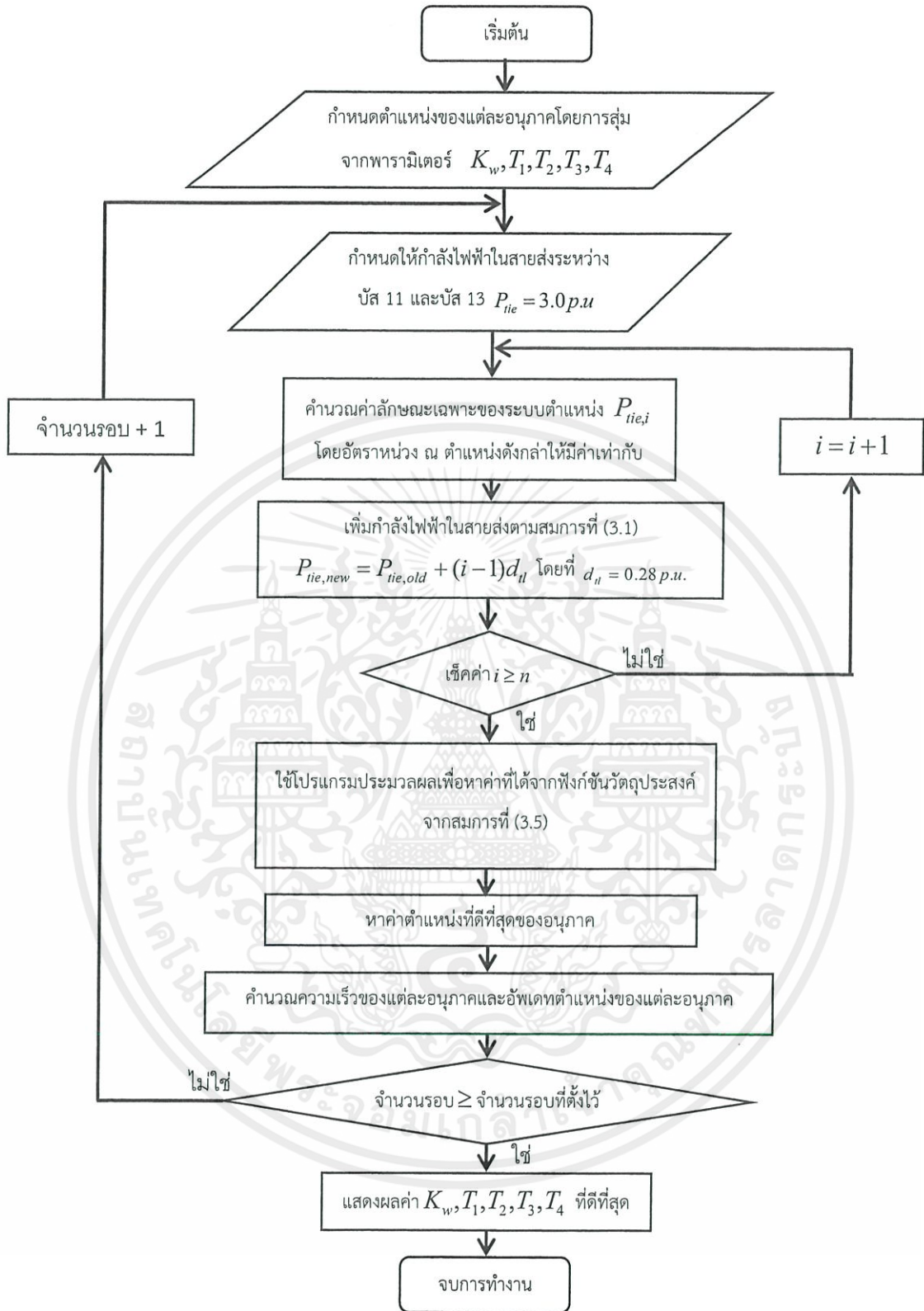
ขั้นตอนที่ 4 : นำผลข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 มาหาผลลัพธ์จากสมการจุดประสงค์สมการที่ (3.3) ให้มีค่าน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 5 : เลือกค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากอัตราหน่วยของโหมตการแกว่งระหว่างพื้นที่ของระบบ

โดยขั้นตอนในการทำงานพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมแสดงเป็นแผนภาพผังการทำงานในรูปที่ 3.8 โดยได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization) ในการแก้ปัญหาสมการจุดประสงค์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมในระบบ Two-area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

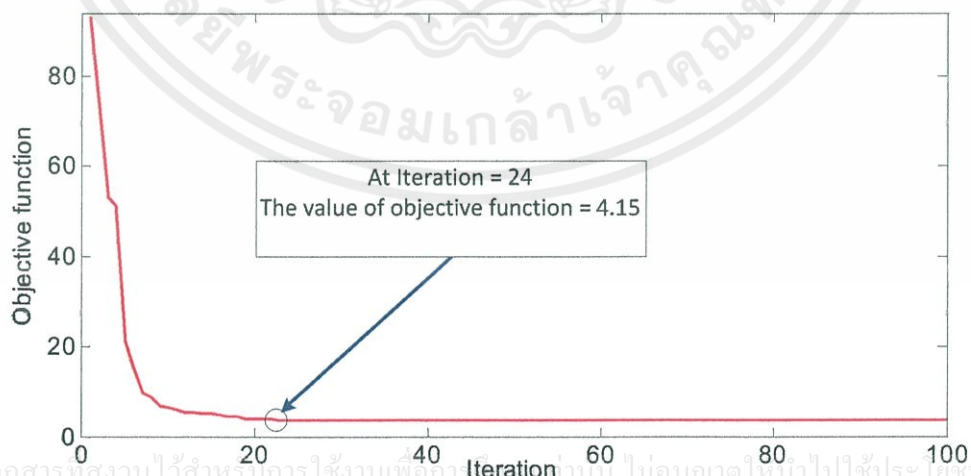
ผลการจำลอง

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพพลวัตสูงที่สุดในทุกสภาวะการทำงานและมีสมรรถนะในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะชั่วคราวของระบบ เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลังจึงได้ทำการเปรียบเทียบระบบที่ไม่ได้ทำการติดตั้ง POD, ระบบที่มีการเลือกพารามิเตอร์ POD โดยการเลือกอย่างเหมาะสมและพารามิเตอร์ที่ถูกเลือกโดยวิธีการกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด กระทำภายใต้ระบบปฏิบัติการของโปรแกรม MATLAB และ PSAT (Power system analysis toolbox)

4.1 ผลการทดสอบของระบบ SMIB

เพื่อให้เห็นสมรรถนะของวิธีการนำเสนอ ในการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบระบบที่พารามิเตอร์ของ POD ที่ได้ถูกเลือกอย่างเหมาะสมและพารามิเตอร์ของ POD ที่ถูกหาจาก PSO โดยปัญหาของระบบ SMIB จะมุ่งเน้นไปที่เสถียรภาพพลวัตของระบบโดยพิจารณาจากโหมดการแกว่งเฉพาะที่ (Local mode) เนื่องจากในระบบ SMIB โหมดการแกว่งดังกล่าวสัมพันธ์กับโหมดทางกลรวมกับความถี่ที่มีค่าต่ำของเครื่องกำเนิดในสภาวะกรณีที่มีสิ่งรบกวนและโหมดการแกว่งดังกล่าวมีอัตราหน่วงต่ำกว่าห้าเปอร์เซ็นต์ระบบจะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้

จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม เมื่อทำการหาค่าที่ได้จากสมการวัตถุประสงค์ ผลการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD โดยการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัสและ DFIG สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 เส้นโค้งลู่เข้าหาค่าตอบของสมการวัตถุประสงค์

ผลการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่ได้จากการเลือกค่าที่เหมาะสมและการหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีการ PSO โดยแก้มการวัดคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยให้พารามิเตอร์ที่ถูกเลือกอย่างเหมาะสมตั้งชื่อว่า Conventional POD (CPOD) และกรณีหาค่าพารามิเตอร์ด้วย PSO ตั้งชื่อว่า Proposed POD (PPOD)

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของตัวหน่วงการแกว่งระบบ SMIB

ตัวควบคุม	K_{stab}	T_1	T_2	T_3	T_4
CPOD	2.8231	0.6614	0.0955	0.9432	0.0519
PPOD	2.7682	0.1634	0.0821	1.0000	0.1000

หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบเสถียรภาพของตัวควบคุมทดสอบทั้งสองตัวโดยจะแบ่งการทดสอบเป็นสองหัวข้อใหญ่ ในส่วนแรกจะทดสอบเสถียรภาพพลวัตของระบบโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและ DFIG ผลการทดสอบที่กรณีออกแบบแสดงดังในตารางที่ 4.2 ซึ่งอธิบายได้ว่ากรณีที่ไม่มี DFIG เชื่อมต่อเข้าระบบ (Without DFIG without POD) อัตราหน่วงของระบบจะมีค่าอยู่ที่ 4.2% จากนั้นในกรณีต่อมาที่มีการเชื่อมต่อ DFIG เข้าสู่ระบบ (With DFIG without POD) พบว่าค่าอัตราหน่วงของระบบมีค่าตกลงเหลือเพียง 2.9% ซึ่งพบว่า DFIG เป็นปัญหาในแง่ของเสถียรภาพพลวัตเนื่องจากเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบแล้วทำให้ระบบเสถียรภาพแย่ง และทั้งสองกรณีข้างต้นมีอัตราหน่วงต่ำกว่า 5% ซึ่งทางระบบไฟฟ้ากำลังถือว่าไร้เสถียรภาพสองกรณีถัดมาพบว่าเมื่อเชื่อมต่อ CPOD และ PPOD เข้าไปในระบบตัวควบคุมทั้งสองตัวสามารถปรับปรุงเสถียรภาพโหมดการแกว่งดังกล่าวให้มีค่าขึ้นได้ ในกรณีของ CPOD จะมีสมรรถนะมากกว่า PPOD ในกรณีออกแบบ

ตารางที่ 4.2 เสถียรภาพพลวัตโหมดการแกว่งเฉพาะที่ของระบบกรณีออกแบบ

ชนิดตัวควบคุม	ตำแหน่งค่าเจาะจง	% อัตราหน่วง
Without DFIG Without POD	$-0.29 \pm 7.1j$	4.2
DFIG Without POD	$-0.22 \pm 7.4j$	2.9
DFIG With CPOD	$-1.09 \pm 7.4j$	15.03
DFIG With PPOD	$-1.08 \pm 7.4j$	15.01

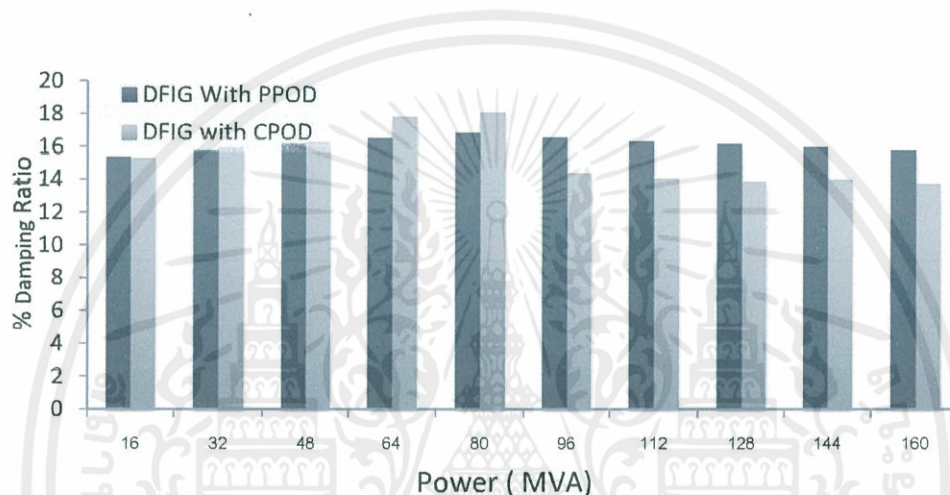
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้นี้หากมีการใช้โดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิได้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

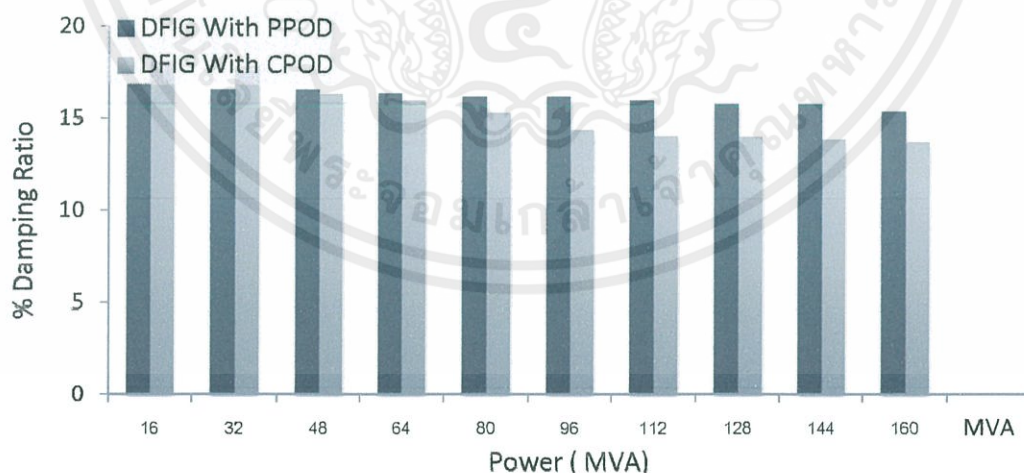
จากนั้นได้ทำการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมทั้งสองตัว CPOD และ PPOD

ด้วยการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ออกจาก DFIG และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แสดงดังรูปที่ 4.2

และ รูปที่ 4.3 โดยในรูปที่ 4.2 เป็นกรณีที่ปรับตั้งค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัดจากนั้นเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของ DFIG ตั้งแต่ 16 MVA ถึง 160 MVA โดยเพิ่มขึ้นทีละ 16 MVA แล้วดูแนวโน้มอัตราหน่วงของระบบทั้งสองกรณี เช่นกันในรูปที่ 4.3 ให้ DFIG จ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ที่พิกัด จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสตั้งแต่ 50 MVA จนถึง 500 MVA โดยเพิ่มขึ้นทีละ 50 MVA และดูแนวโน้มของอัตราหน่วงของระบบ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในช่วงแรกที่กำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดทั้งสองจ่ายออกมีค่าต่ำกว่าอัตราหน่วงของระบบ กรณี CPOD จะมีค่าสูงกว่ากรณี PPOD แต่เมื่อในกรณีที่กำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสมรรถนะของ PPOD จะมีแนวโน้มลดลงช้ากว่ากรณี CPOD



รูปที่ 4.2 แนวโน้มอัตราหน่วงกับกำลังไฟฟ้าของ DFIG

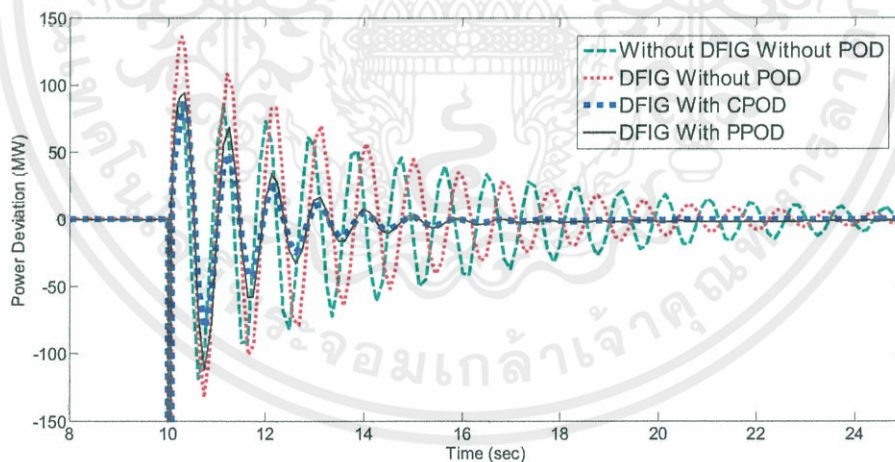


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
รูปที่ 4.3 แนวโน้มอัตราหน่วงกับกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นในส่วนที่สองได้มีการทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวเพื่อสนับสนุนผลการทดลองของระบบโดยแบ่งการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3 ที่จุดการทำงานต่างกันแบ่งเป็น 2 กรณี โดยผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบทุกกรณีตัวควบคุมในกรณีแรกตัวควบคุมทั้งสองสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อกรณีที่สองกำลังไฟฟ้าของ DFIG และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าสูงสุดจะเห็นว่ากรณี CPOD ระบบไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้

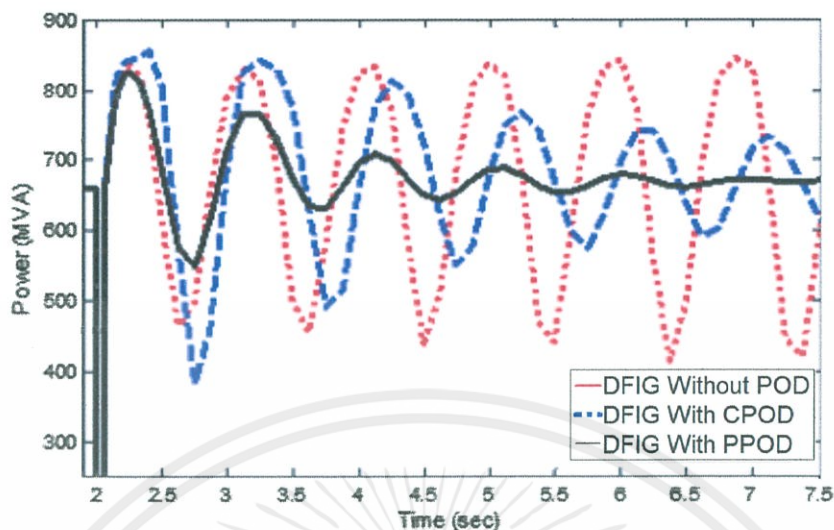
ตารางที่ 4.3 การทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวของระบบ SMIB

กรณี	รายละเอียด
1	ให้เกิดความผิดพลาดบริเวณบัส 2 ที่เวลา $t=10$ วินาที โดยให้เครื่องกำเนิดจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 325 MVA หลังจากนั้น 0.07 วินาทีความผิดพลาดหายไปเอง
2	ให้เกิดความผิดพลาดบริเวณบัส 2 ที่เวลา $t=2$ วินาที โดยให้เครื่องกำเนิดและ DFIG ทำงานที่พิกัด หลังจากนั้น 0.07 วินาทีความผิดพลาดหายไปเอง



รูปที่ 4.4 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3 และบัสอนันต์กรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



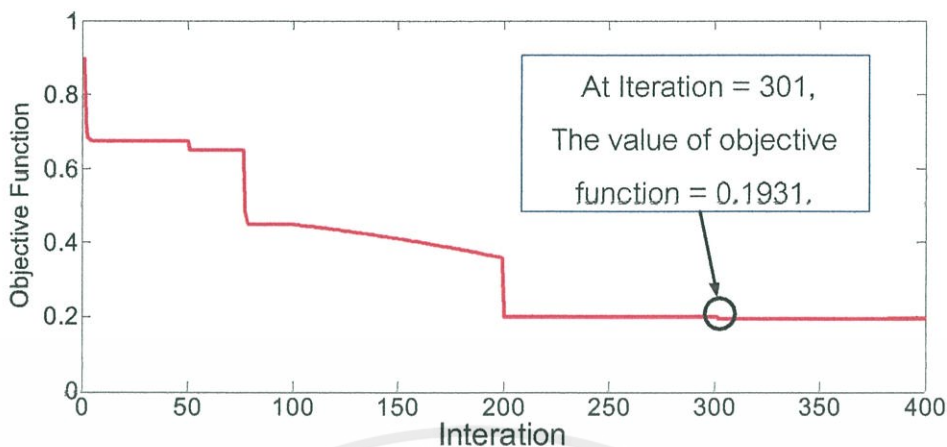
รูปที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 3 และบัสอันดับกรณีสี่ที่ 2

4.2 ผลการทดสอบในระบบ Two-area four-machine interconnected power system

จากการวิเคราะห์ระบบสองพื้นที่ในบทที่ 3 เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในทุกๆจุดการทำงานโดยจุดการทำงานต่างๆขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 13 โดยในส่วนนี้เช่นกันจะทำการทดสอบกรณีตัวควบคุมที่ถูกเลือกอย่างเหมาะสมและกรณีตัวควบคุมที่ถูกเลือกโดย PSO ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงเสถียรภาพพลวัตของระบบที่โหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ (Inter-area mode) เนื่องจากโหมดดังกล่าวเป็นโหมดความถี่ต่ำที่สัมพันธ์กับโหมดทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบโหมดดังกล่าวจะเกิดการแกว่งขึ้นซึ่งในกรณีที่สิ่งรบกวนเช่นความผิดปกติของสามเฟสระบบจะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเพื่อทำการหาค่าที่ได้จากสมการจุดประสงค์ ผลการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD โดยการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 13 สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การเส้นโค้งเข้าสู่หาคำตอบของสมการวัตถุประสงค์

ผลการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่ได้จากการเลือกค่าที่เหมาะสมและการหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีการ PSO โดยแก้สมการวัตถุประสงค์แสดงดังตารางที่ 4.4 โดยให้พารามิเตอร์ที่ถูกเลือกอย่างเหมาะสมตั้งชื่อว่า Conventional POD (CPOD) และกรณีหาค่าพารามิเตอร์ด้วย PSO ตั้งชื่อว่า Proposed POD (PPOD)

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของตัวหน่วงการแกว่งระบบ Two-area

ชนิดตัวควบคุม	K_{stab}	T_w	T_1	T_2	T_3	T_4
DFIG With PPOD	1.054	10	0.850	16.26	11.66	18.15
DFIG With CPOD	7.204	10	8.800	11.71	0.1	17.42

หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบเสถียรภาพของตัวควบคุมทดสอบทั้งสองตัวโดยจะแบ่งการทดสอบเป็นสองหัวข้อใหญ่ ในส่วนแรกจะทดสอบเสถียรภาพพลวัตของระบบโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 13 โดยให้กรณีออกแบบที่กำลังไฟฟ้าสายส่งมีค่าเท่ากับ 300 MVA ผลการทดสอบเสถียรภาพพลวัตแสดงดังตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าในกรณีที่มี DFIG เสถียรภาพของระบบจะต่ำลงไปจาก 4.39 % ลดลงเหลือเพียง 3.35 % และทั้งสองกรณีมีค่าต่ำกว่า 5 % ซึ่งทางระบบไฟฟ้ากำลังถือว่าไร้เสถียรภาพเมื่อมี POD เชื่อมต่อเข้ามาในระบบจะเห็นว่าทั้งสองกรณีสุดท้ายสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของระบบได้และทั้งสองกรณีมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพในกรณีออกแบบที่ใกล้เคียงกัน

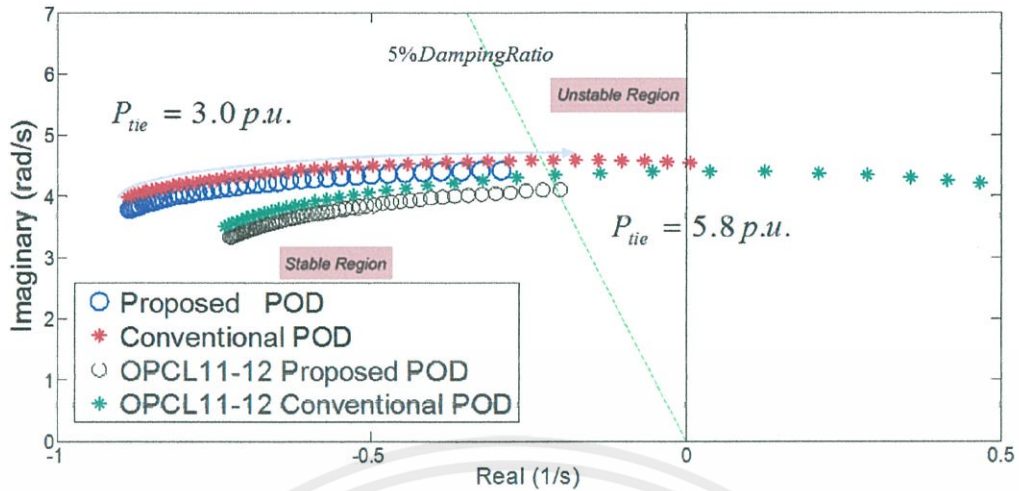
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพพลวัตของระบบสองพื้นที่

ชนิดตัวควบคุม	โหมดการแกว่ง	ค่าไอเกน	$\zeta(\%)$	$f(\text{Hz})$
Without DFIG Without POD	Local Mode I	$-0.400 \pm 7.35j$	9.43	1.17
	Local Mode II	$-0.686 \pm 6.75j$	10.1	1.07
	Inter-area Mode	$-0.170 \pm 3.88j$	4.39	0.62
DFIG Without POD	Local Mode I	$-0.683 \pm 6.97j$	9.75	1.11
	Local Mode II	$-0.841 \pm 6.22j$	13.4	0.99
	Inter-area Mode	$-0.139 \pm 3.72j$	3.35	0.59
DFIG With PPOD	Local Mode I	$-1.380 \pm 6.87j$	19.7	1.09
	Local Mode II	$-1.150 \pm 6.59j$	17.2	1.05
	Inter-area Mode	$-0.892 \pm 3.98j$	21.9	0.63
DFIG With CPOD	Local Mode I	$-1.720 \pm 6.48j$	15.6	1.03
	Local Mode II	$-1.050 \pm 6.40j$	16.2	1.02
	Inter-area Mode	$-0.880 \pm 3.80j$	20.1	0.60

หลังจากนั้นในทำการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมทั้งสองตัวคือ PPOD และ CPOD ด้วยการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 13 และพิจารณาทางเดินรากของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่ากรณีของ PPOD ตำแหน่งของทางเดินรากจะมีแนวโน้มเดินเข้าหาส่วนที่ไร้เสถียรภาพช้ากว่ากรณี CPOD จากรูปจะแบ่งเป็นสองกรณีใหญ่ๆ คือกรณีที่สายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 13 มีสองเส้น และกรณีที่มีการเปิดวงจรสายส่งหนึ่งเส้น (OPCL 11-12 proposed POD และ OPCL 11-12 Conventional POD) แล้วเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งโดยเริ่มต้นที่กรณีออกแบบคือ 300 MVA เพิ่มขึ้นทีละ 10 MVA จนถึง 580 MVA พบว่ากรณีที่ 2 แม้จะมีการเปิดสายส่งก็ตามซึ่งทำให้เสถียรภาพของระบบแยกลงแต่ตัวควบคุมกรณี PPOD ก็ยังมีสมรรถนะพอที่จะหน่วงระบบได้ซึ่งอัตราหน่วงยังมีค่ามากกว่า 5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



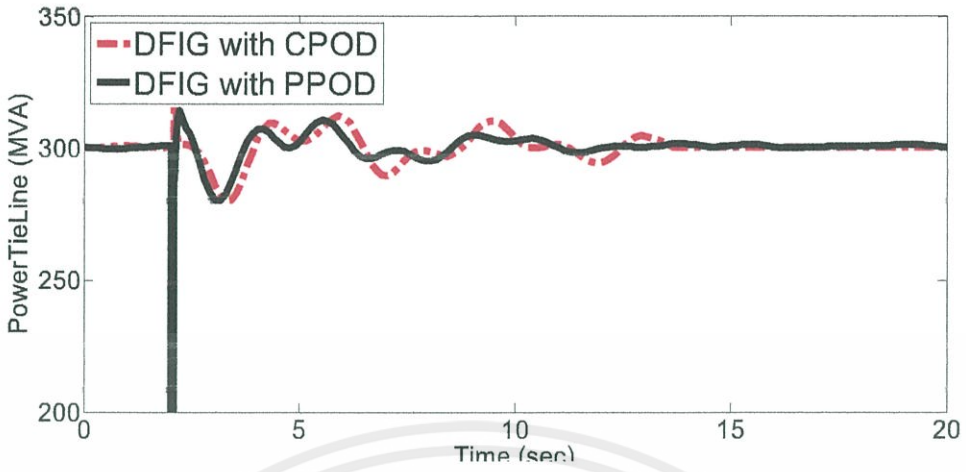
รูปที่ 4.7 เส้นทางเดินรากของโหมตการแกว่งระหว่างพื้นที่

เพื่อสนับสนุนผลการทดสอบเสถียรภาพพลวัตจึงได้ทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งขณะเกิดสิ่งรบกวนต่างๆในระบบเพื่อดูสมรรถนะของตัวควบคุมว่ามีสมรรถนะในเสถียรภาพชั่วคราวเช่นกันหรือไม่ โดยแบ่งการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.6

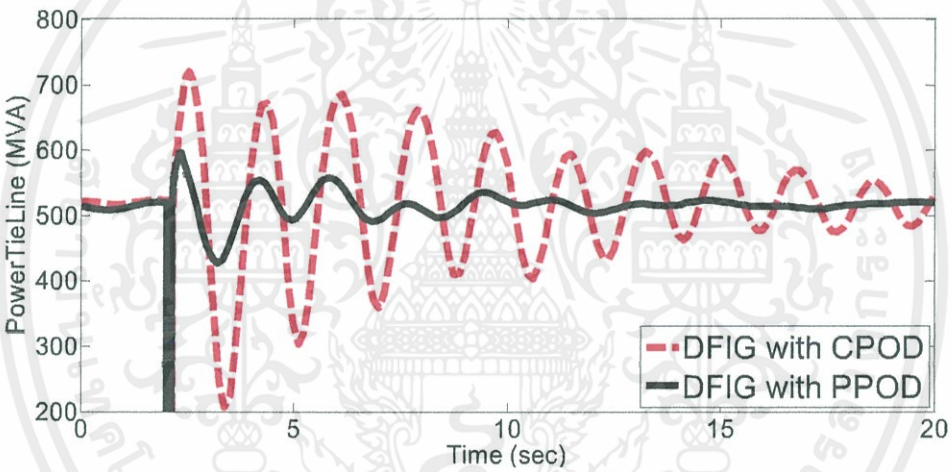
ตารางที่ 4.6 การทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวของระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด

กรณี	P_{tie} (MVA)	รูปที่	รายละเอียด
1	300	4.8	เกิดความผิดพลาดสามเฟส บริเวณระหว่างบัส 11 และ บัส 12 ที่เวลา $t = 2$ หลังจากนั้น 0.07 วินาที ความผิดพลาดหายไปเอง
2	520	4.9	เกิดความผิดพลาด สามเฟสบริเวณบัส 14 ที่เวลา $t = 2$ หลังจากนั้น 0.1 วินาที ความผิดพลาดหายไปเอง
4	520	4.10	สายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 12 มีการเปิดวงจรออก และเกิดความผิดพลาดสามเฟสบริเวณบัส 12 ที่เวลา $t = 2$ หลังจากนั้น 0.08 วินาทีความผิดพลาดหายไปเอง
4	560	4.11	เกิดความผิดพลาด สามเฟสบริเวณบัส 11 และ บัส 12 ที่เวลา $t = 2$ หลังจากนั้น 0.07 วินาที ความผิดพลาดหายไปเอง

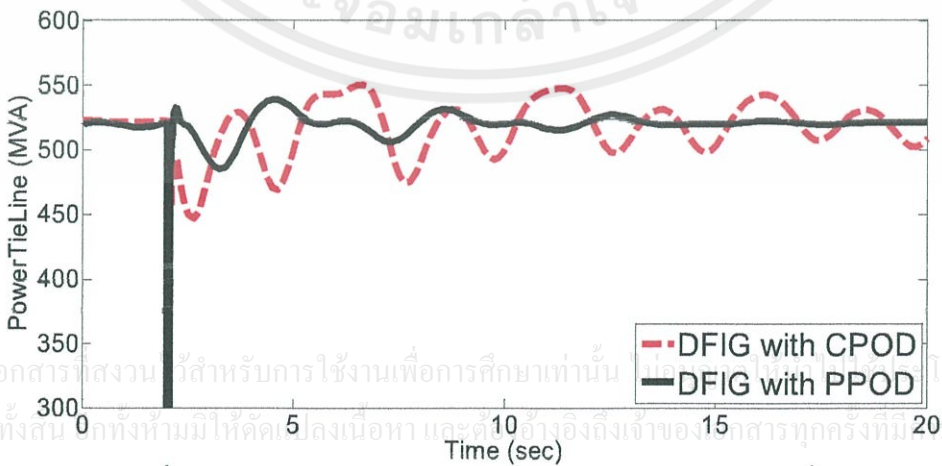
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส12 กรณีที่ 1

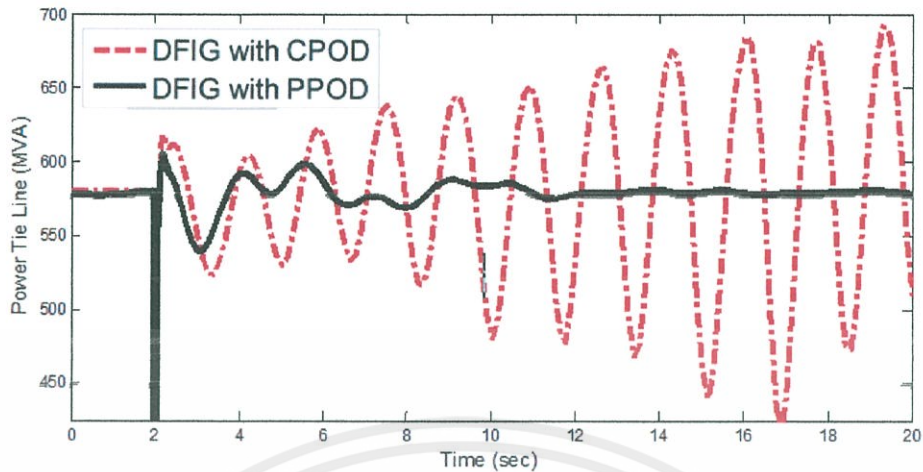


รูปที่ 4.9 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส12 กรณีที่ 2

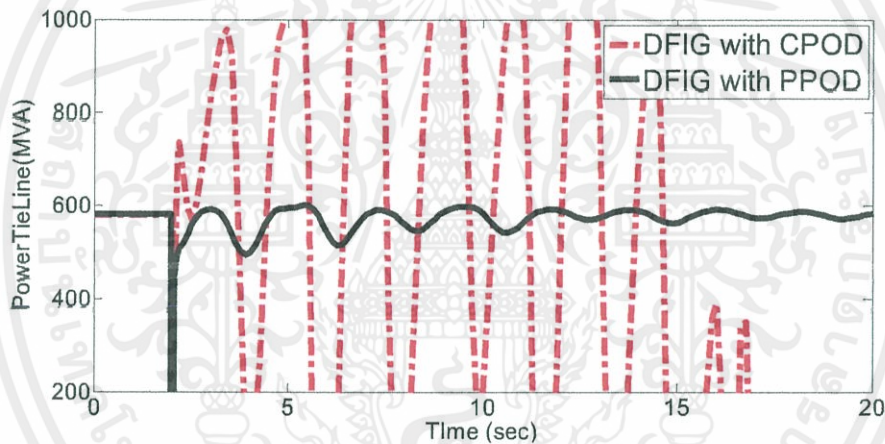


รูปที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส12 กรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์บริการวิชาการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้



รูปที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 12 กรณีที่ 4



รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 12 กรณีที่ 5

จากผลการทดสอบในห้ากรณีสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่หนึ่ง จากรูปที่ 4.8 ตัวควบคุมทั้งสองตัวมีสมรรถนะใกล้เคียงกันจะเห็นได้จากการแกว่งเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ใกล้เคียงกัน จากนั้นในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 ตัวควบคุม CPOD มีการแกว่งที่สูงกว่ากรณี PPOD อย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ และสุดท้ายกรณีที่ 4 และกรณีที่ 5 ตัวควบคุม CPOD ไม่อาจรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ได้ ตรงกันข้ามในกรณีของ PPOD สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้ เห็นได้จากกำลังไฟฟ้าที่แกว่งเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับกรณีของ CPOD ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่

4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลอง

ปริญญาพนธ์นี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly fed induction generator , DFIG) ที่มีการติดตั้งตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper ,POD) เพื่อแก้ปัญหาอัตราหวนต่ำในช่วงความถี่ 0.2 – 2 Hz ของระบบโดยโครงสร้าง POD ที่ใช้เป็นแบบเฟสชดเซย์ล้าหน้าล้าหลังอันดับสอง โดยที่ทำการจำลองและทดสอบในระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวต่อบัสอนันต์ (Single machine infinite bus , SMIB) และสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด (Two-area four-machine interconnected power system)

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการทำงานของระบบที่ไม่ติดตั้ง DFIG เพียงอย่างเดียว และระบบที่มีการติดตั้ง DFIG ร่วมกับ POD ที่ออกแบบพารามิเตอร์ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization ,PSO) พบว่า DFIG ที่ติดตั้ง POD สามารถปรับปรุงเสถียรภาพพลวัตของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะครุในสภาวะที่เกิดความผิดพลาดสามเฟสขึ้นในระบบทั้งในระบบ SMIB และ Two-area four-machine interconnected power system

ในระบบ SMIB ค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าสมรรถนะของ POD ดังกล่าวสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของระบบได้ทุกจุดการทำงานของ DFIG และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเห็นได้จากอัตราหวนที่มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ PSO ในการหาค่าพารามิเตอร์และในกรณีของระบบสองพื้นที่สี่เครื่องกำเนิด ค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าสมรรถนะของ POD ที่นำเสนอสามารถปรับปรุงอัตราหวนของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ให้มีค่าสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในทุกๆ จุดการทำงาน เห็นได้จากตำแหน่งของค่าเจาะจงของระบบที่มีแนวโน้มเข้าหาแกนจินตภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่พารามิเตอร์ไม่ได้หาโดย PSO และเมื่อทดสอบในเสถียรภาพชั่วคราวพบว่าตัวควบคุมมีความสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อดีและข้อจำกัด

ข้อดี

1. เป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุอันเนื่องมาจากกังหันลมชนิด DFIG สร้างปัญหาให้ระบบมีอัตราหน่วยต่ำเป็นการประยุกต์ใช้ประโยชน์จาก DFIG ทำให้นอกจาก DFIG จะไม่สร้างปัญหาแต่ยังสามารถช่วยปรับปรุงเสถียรภาพระบบให้อีกด้วย
2. ในการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD วิธีการกลุ่มอนุภาคสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม ในการแก้ปัญหาสมการวัตถุประสงค์ภายใต้เงื่อนไขที่จำกัดได้

ข้อจำกัด

1. สมรรถนะของตัวหน่วยการแกว่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ POD รับสัญญาณอินพุตเข้ามาขนาดของ DFIG และโหมดการทำงานของ DFIG
2. ปัญหาความหน่วงต่ำที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เชื่อมต่อเข้าไปในระบบ พิกัดของ DFIG และโหมดการทำงานของ DFIG

5.3 ข้อเสนอแนะ

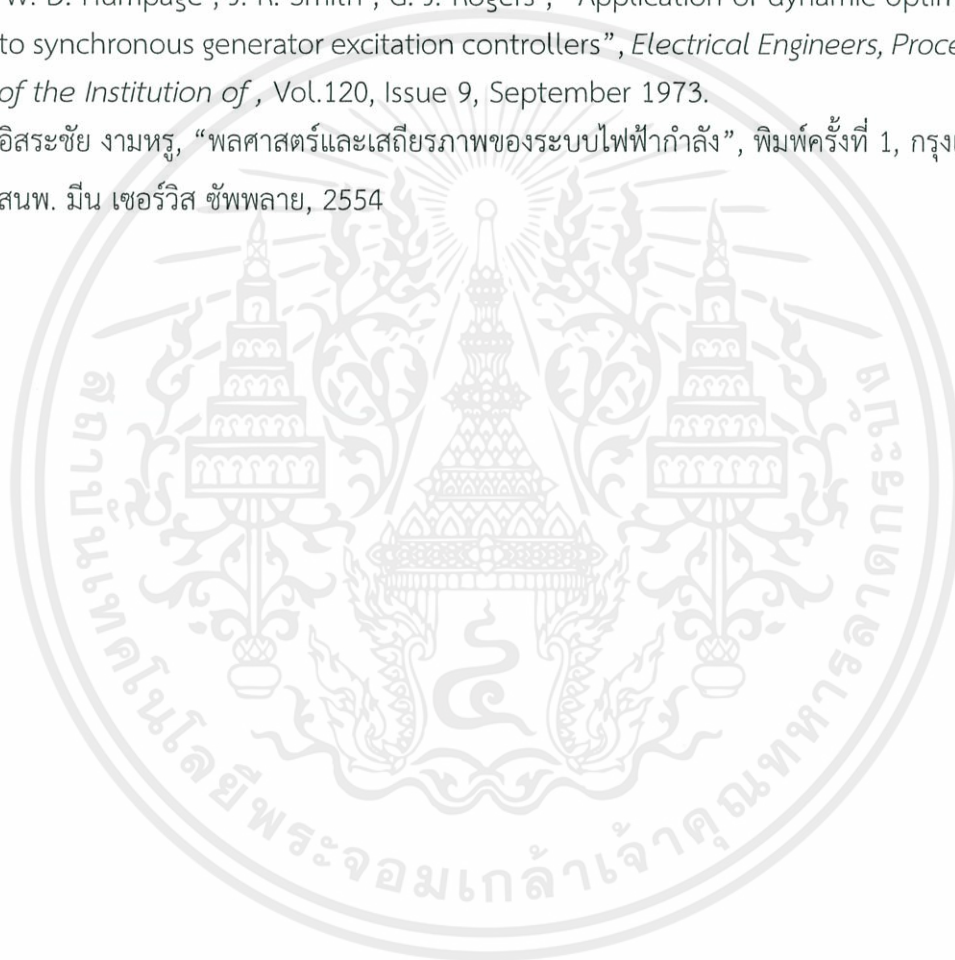
1. ในอนาคตเมื่อมีการเชื่อมต่อของพลังงานหมุนเวียนเข้ามาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำโรงไฟฟ้าพลังลมมีส่วนช่วยในการทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมาก
2. นอกจากการผลิตไฟฟ้าแล้วสามารถนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันเพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994.
- [2] F. Milano, "Power System Analysis Toolbox version 2.1.8", 2013.
- [3] N. R. Chaudhuri and B. Chaudhuri, "Considerations toward coordinated control of DFIG-Based wind farms," *IEEE Trans. on Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp.1263-1270, 2013.
- [4] I. D. Margaris, S. A. Papathanassiou, N.D. Hatziargyriou, A. D. Hansen, and P. Sorensen, "Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration", *IEEE Trans. on Sust. Energy*, vol. 3, no.2, pp.189-199, 2012.
- [5] F.M. Hughes, O. Anaya-Lara, G. Ramtharan, N. Jenkins and G. Strbac, "Influence of Tower Shadow and Wind Turbulence on the Performance of Power System Stabilizers for DFIG-Based Wind Farms", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 23, no.3, pp.519-528, 2008.
- [6] Yi Wang, Member, IEEE and Lie Xu, Senior Member, "Coordinated Control of DFIG and FSIG-Based Wind Farms Under Unbalanced Grid Conditions", *IEEE Trans. on Power Deliv.*, Vol. 25, No. 1, January 2010
- [7] Zhixin Miao, Lingling Fan ; Dale Osborn ; Subbaraya Yuvarajan : "Control of DFIG based Wind Generation to Improve Inter-Area Oscillation Damping", *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, pp.1-7, July 2008.
- [8] Feng Wu ; Xiao-Ping Zhang, Senior Member, Ping Ju, Member, J. Michael, H. Sterling , "Decentralized Nonlinear Control of Wind Turbine With Doubly Fed Induction Generator", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, May 2008
- [9] M. Mohammadi , M. Gitizadeh , A. Roosta : "Dynamic Stability Improvement of a Power System Incorporating DFIG Wind Power Plant Using Optimized Control Parameters of a SVC", *IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2012)*, pp. 416 – 421, 6-7 June 2012.
- [10] Shuhui Li and Tim A. Haskew, Senior Member, IEEE, "Energy Capture, Conversion, and Control Study of DFIG Wind Turbine under Weibull Wind Distribution", *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, pp.1-9, July 2009.
- [11] Jiaying Shi, Chen Shen , "Impact of DFIG Wind Power on Power System Small Signal Stability", *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2013 IEEE PES*, pp.1-6, February 2013.
- [12] He Yikang, Senior Member, Hu Jiabing, Zhao Rende, "Modeling and Control of Wind-Turbine Used DFIG under Network Fault Conditions", *Electrical Machines*

- and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on , Vol. 2, pp.986-991, September 2005.
- [13] Hailiang Xu, Student Member, Jiabing Hu, Member, Yikang He, Senior Member, “Operation of Wind-Turbine-Driven DFIG Systems Under Distorted Grid Voltage Conditions: Analysis and Experimental Validations”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 27, No. 5, May 2012
- [14] Li Lin , Liangliang Song , Wenxia Li , Sheng Jing : “Modal Analysis Concerning the Control Mode of Doubly-fed Induction Generator”, *International Conference on* , pp.1-6, September 2009.
- [15] W. D. Humpage , J. R. Smith , G. J. Rogers , “Application of dynamic optimization to synchronous generator excitation controllers”, *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of* , Vol.120, Issue 9, September 1973.
- [16] อิศระชัย งามหรุ, “พลศาสตร์และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง”, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, สนพ. มীন เซอร์วิส ซัพพลาย, 2554



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาวิธีการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าด้วยกัณฑ์ลมนที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

Study of Power Oscillation Damping Method by DFIG-based Wind Turbine

วันฉัตร พรอบสุธา วันยุทธ สุวรรณเครือ วารุณี อุ๋นอนันพิทักษ์ และวโรจน์ ไทศาลทรัพย์ผล
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: wun_chat@hotmail.com

บทคัดย่อ

ภายใต้ความไม่แน่นอนของระบบและสิ่งรบกวนต่างๆ เช่น ความผิดพลาด กำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ผลิตจากกังหันลม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราห้วงต่ำ ปริมาณนี้ได้นำเสนอผลกระทบของกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly fed Induction generator, DFIG) ทางเสถียรภาพพลวัตในระบบไฟฟ้ากำลัง และการประยุกต์ใช้ DFIG ที่มีกรติดตั้งตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper, POD) ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบเพื่อแก้ปัญหาข้างต้น โครงสร้างของ POD ที่นำเสนอเป็นแบบตัวชดเชยเฟสนำหน้าลำดับที่สอง โดยพารามิเตอร์ของ POD ได้ถูกเลือกด้วยวิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวกับบัสบัสและระบบสองพื้นที่ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เห็นว่า POD มีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพระบบได้ดีกว่าวิธีการออกแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง, กังหันลม, ตัวหน่วงการแกว่ง, เสถียรภาพพลวัต

Abstract

Under various system uncertainties and disturbance such as generation change, unpredictable structure, fault, and wind power output variation etc. these scenario may cause the system instability. To overcome this problem, this thesis focuses on the impact of doubly-fed induction generator (DFIG)-based wind turbine on small signal stability of power system. In order to improve the small signal stability, the DFIG equipped with power oscillation damper (POD) is applied. The structure of POD is a practical second-order lead/lag compensator. The optimized parameter of POD is automatically tuned by PSO. Simulation results in Two-area four-machine interconnected power system confirm that the proposed POD is superior to the conventional POD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา

Keywords: Doubly-fed induction generator, particle swarm optimization, power oscillation damper, small signal stability

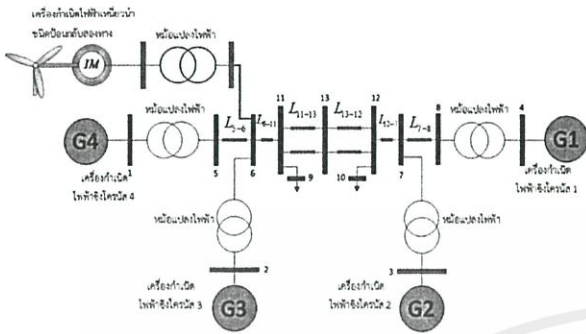
1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีความต้องการอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งส่งผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ในด้านการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงการเชื่อมต่องดกล่าว เป็นสาเหตุทำให้อัตราห้วงของความถี่ต่ำในช่วง 0.2-0.8 Hz [1] มีค่าต่ำ เมื่อเกิดสิ่งรบกวนในระบบขึ้น เช่น เกิดการลัดวงจรขึ้น อาจทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพและเกิดไฟฟ้าดับในบริเวณกว้างได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์เข้ามาแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่ง Power System Stabilizer (PSS) มีปัญหาในส่วนองแรงดันที่บัสคือเกิดแกว่งของแรงดันที่บัสขึ้น [5]

ซึ่งในปัจจุบันนี้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีความต้องการสูง เป็นสาเหตุให้แหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ (Renewable energy) ได้ถูกนำมาพัฒนาใช้งานเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไฟฟ้าพลังงานลมเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly-fed induction generator, DFIG) เนื่องจาก DFIG สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงทุกย่านของความเร็วลมที่ไม่คงที่และต้นทุนในการติดตั้งมีราคาต่ำทำให้ได้รับความนิยมอย่างมาก คุณสมบัติสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เป็นส่วนของสำคัญของ DFIG คือ มีการแยกการควบคุมระหว่างการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนการควบคุมของทั้งสองตัวแปรจะมีการควบคุมที่เป็นอิสระต่อกัน ด้วยความสามารถในการควบคุมดังกล่าว จึงทำให้ DFIG สามารถประยุกต์ใช้ในการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ

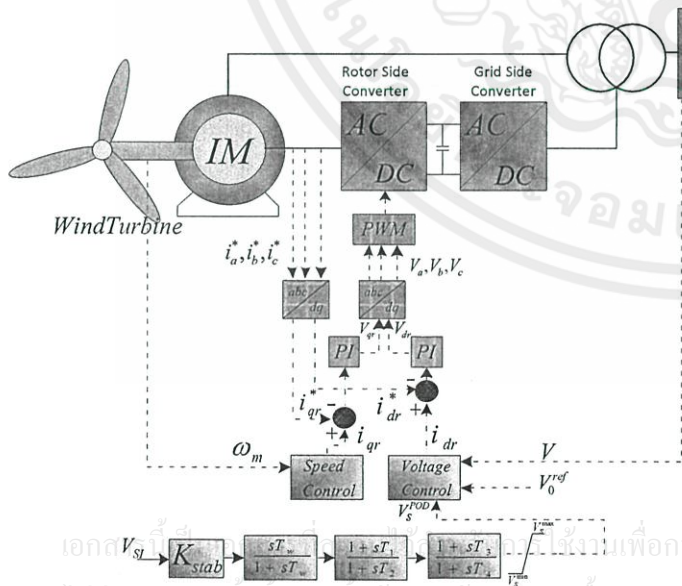
บทความนี้จึงได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงเสถียรภาพระบบโดยใช้คุณสมบัติในการควบคุมได้ของ DFIG โดยติดตั้งตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper, POD) ที่ DFIG ในระบบสองพื้นที่ที่เครื่องกำเนิด เมื่อพิจารณาผลของกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในระบบที่มีผลต่อเสถียรภาพพลวัตของระบบและสมรรถนะของตัวควบคุม ในที่นี้ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดดังกล่าวในการตั้งปัญหาการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวหน่วงการแกว่ง จากนั้นได้ใช้อัลกอริทึมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) ในการแก้ปัญหาที่เหมาะสม ผลการจำลองระบบตัวหน่วงการแกว่งของระบบมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าในระบบสองพื้นที่ที่เครื่องกำเนิด

2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 1 ระบบ Two-area four-machine interconnected power system ที่ติดตั้ง DFIG

รูปที่ 1 ระบบที่ใช้ในการศึกษา Two-area four-machine interconnected power system ที่มีการติดตั้ง DFIG ที่ใช้ในการศึกษา แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่ง โครนัสด้วยแบบจำลองอันดับที่ 6 ซึ่งติดตั้งระบบควบคุมแรงดันและโถวเวอร์เนอร์ มีพิกัดกำลัง 900 MW [1] พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่ง โครนัสเป็นไปตามตารางที่ 5 และพารามิเตอร์ของ DFIG [3] ดังตารางที่ 6 ในการศึกษา สมมติให้ DFIG มีการมีเสถียรภาพพร้อมที่ติดตั้ง POD เพื่อช่วยในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบมาก ในสภาวะที่เกิดสิ่งรบกวนต่างๆ เช่น ความผิดพลาด 3 เฟส เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่มีความหน่วงต่ำ ในงานวิจัยนี้ใช้การประสานควบคุมของ DFIG ที่ติดตั้ง และ POD เพื่อแก้ปัญหาอัตราหน่วงของระบบที่ต่ำ



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของ DFIG และระบบควบคุม

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมทางฝั่งของโรเตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ (Vector control) ซึ่งสามารถแยกการควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างอิสระ ในที่นี้ได้ใช้แกนอ้างอิงแบบ Flux-based rotating frame โดยกระแสโรเตอร์ในแกนตั้ง (i_{qr}) ใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงในขณะที่กระแสโรเตอร์ในแกนตรง (i_{dr}) ใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนดังนี้

$$p_e = \frac{x_s}{x_s + x_u} v i_{qr} \quad (1)$$

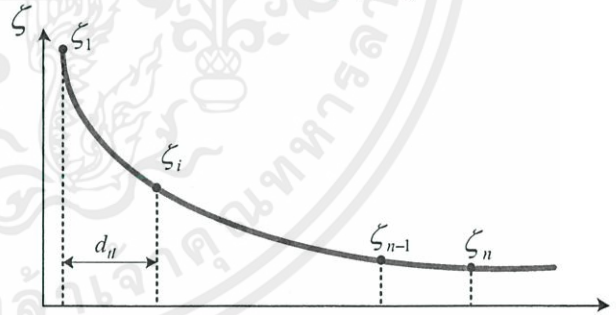
$$q_e = -\frac{x_u v i_{dr}}{x_s + x_u} - \frac{v^2}{x_u}$$

เมื่อ p_e และ q_e คือกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ x_s คือ สดเตอเรียร์แอกแดนซ์ (Stator self-reactance) x_u คือรีแอกแตนซ์ที่เกี่ยวข้อง (Magnetizing reactance) และ v คือแรงดันของ DFIG

บทความนี้ใช้ POD เพื่อทำเสถียรภาพผ่านการควบคุมแรงดัน (voltage control) ซึ่ง POD มีโครงสร้างเฟสชดชวยแบบนำหน้า/ตามหลัง ลำดับที่สองเหมือนกับ PSS ที่ใช้ทั่วไป

3. การออกแบบตัวหน่วงการแกว่ง

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างสองพื้นที่ (P_{tie}) เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนความหน่วง (ζ) ของโหมคการแกว่งระหว่างพื้นที่ จึงเลือกเป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อ P_{tie} เพิ่มขึ้น ค่าของ ζ มีแนวโน้มลดลง ซึ่งส่งผลเสถียรภาพและสมรรถนะของตัวควบคุม [4] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราหน่วงและการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

กำหนดสมการความสัมพันธ์ผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บริเวณสายส่งระหว่างบัส 11 และ บัส 12 ($P_{tie,i}$) โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, 10$ เพื่อแสดงจุดการทำงานของระบบซึ่งสัมพันธ์กับผลรวมกำลังไฟฟ้าที่ใหญ่ในสายส่งดังสมการที่ (2)

$$P_{tie,i} = P_{tie,1}(1 + (i-1)d_{ii}) \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษา ใช้ได้โดยไม่แสวงหากำไร ไม่ควรแก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

โดยกำหนดให้ d_{ii} คือผลต่างของอนุกรมเลขคณิตของกำลังไฟฟ้าระหว่างสายส่งระหว่างจุดการทำงานที่ $P_{tie,i}$ และ $P_{tie,i-1}$ โดยที่ ζ_i คือค่าอัตราส่วนของโหมคการแคว่งระหว่างพื้นที่ที่ตำแหน่ง $P_{tie,i}$ และ ζ_{max} คือค่าสูงสุดของทุกค่าของ ζ_i และค่า σ_i คือค่าส่วนจริงของโหมคการแคว่งระหว่างพื้นที่ตำแหน่ง $P_{tie,i}$ และ σ_{min} คือค่าน้อยที่สุดของทุกค่าของ σ_i

จากแนวคิดดังกล่าวพบว่าเมื่อผลต่างของ ζ_{max} และทุกค่าของ ζ_i ในช่วงที่พิจารณามีค่าน้อยที่สุดผลคือระบบมีอัตราส่วนสูงที่สุดในทุกค่าของ P_{tie} และเมื่อผลต่างของ σ_{min} และทุกค่าของ σ_i มีค่าน้อยที่สุดผลคือตำแหน่งของค่าไอเกนของโหมคการแคว่งระหว่างพื้นที่มีอัตราการเข้าหาแกนจินตภาพช้าลงในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของ P_{tie} โดยที่การพิจารณาทั้งหมดพิจารณาใน $i=1,2,\dots,10$ เพื่อให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพสูงที่สุดจึงตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมได้สมการจุดประสงค์ดังนี้

Minimize

$$\sum_{i=1}^{10} |\zeta_{max} - \zeta_i| + \sum_{i=1}^{10} |\sigma_{min} - \sigma_i| \quad (3)$$

Subject to

$$\zeta_{max} \geq \zeta_{spec}, \quad \zeta_{spec} = 0.18$$

$$\sigma_{min} \leq \sigma_{spec}, \quad \sigma_{spec} = -0.8$$

$$K_{min} = 1 \leq K \leq K_{max} = 50$$

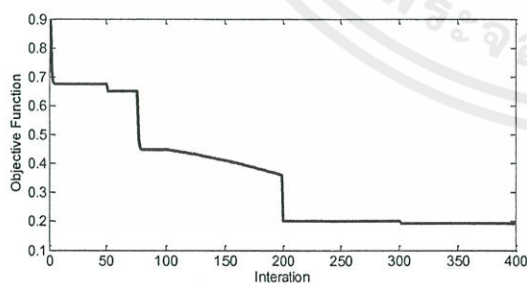
$$T_{1,3}^{min} = 0.1 \leq T \leq T_{1,3}^{max} = 20$$

$$T_{2,4}^{min} = 0.1 \leq T \leq T_{2,4}^{max} = 20$$

เมื่อ ζ_{spec} และ σ_{spec} คือค่าที่ยอมรับได้ของ ζ_{max} และ

σ_{min} ตามลำดับซึ่งกำหนดอย่างเหมาะสมโดยผู้ออกแบบในที่นี้ทำการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค[5]

4. ผลการศึกษา



รูปที่ 4 เส้นโค้งผู้เข้าหาค่าตอบ

รูปที่ 4 แสดงเส้นโค้งผู้เข้าหาค่าตอบ (Convergence Curve)

ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (3) ผลการหาค่าพารามิเตอร์ POD แสดงดังตารางที่ 1 เรียกตัวควบคุมที่นำเสนอว่า Proposed POD (DFIG with

PPOD) ในที่นี้จะเปรียบเทียบการ POD ที่ออกแบบโดยการเลื่อนตำแหน่งโพล (Pole assignment) ซึ่งเรียกว่า Conventional POD (DFIG with CPOD) ค่าลักษณะเฉพาะของโหมคการแคว่งระหว่างพื้นที่แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าในกรณีที่ไม่มี DFIG (Without DFIG Without POD) และมี DFIG (Without DFIG Without POD) กรณีที่มี DFIG มีอัตราส่วนต่ำกว่าและทั้งสองกรณีมีอัตราส่วนต่ำกว่า 5% ในทางตรงกันข้ามกรณี DFIG with PPOD และ DFIG with CPOD อัตราส่วนของระบบถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น

จากนั้นในรูปที่ 5 แสดงแนวทางเดินรากของค่าไอเกนโหมคการแคว่งระหว่างพื้นที่ โดยมีการเพิ่มขึ้น P_{tie} ตั้งแต่ 3.0 p.u. จนถึง 5.8 p.u. ในกรณีที่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงและกรณีที่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงขณะที่มีการเปิดวงจรของสายส่งพบว่ากรณี DFIG with PPOD ตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะอยู่ในส่วนที่มีเสถียรภาพ (Stable region) ทั้งสองกรณี ตรงกันข้าม ในกรณีของ DFIG with CPOD ตำแหน่งของค่าไอเกนอยู่ในตำแหน่งที่ไร้เสถียรภาพ (Unstable region) พบว่า DFIG with PPOD มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า DFIG with CPOD

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของตัวห้วงการแคว่ง

ชนิดตัวควบคุม	K_{stab}	T_w	T_1	T_2	T_3	T_4
PPOD	1.054	10	0.850	16.26	11.66	18.15
CPOD	7.204	10	8.800	11.71	0.1	17.42

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพพลวัต ($P_{tie} = 300$ MVA)

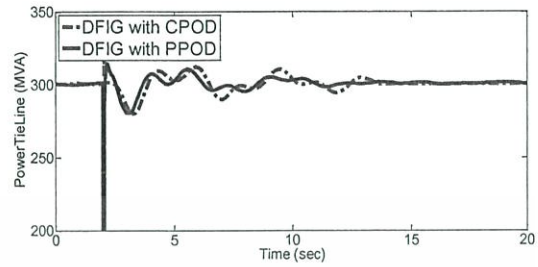
ชนิดตัวควบคุม	โหมคการแคว่ง	ค่าไอเกน	ζ (%)	f (Hz)
Without DFIG	Local Mode I	$-0.400 \pm 7.35j$	9.43	1.17
	Local Mode II	$-0.686 \pm 6.75j$	10.1	1.07
	Inter-area Mode	$-0.170 \pm 3.88j$	4.39	0.62
DFIG	Local Mode I	$-0.683 \pm 6.97j$	9.75	1.11
	Local Mode II	$-0.841 \pm 6.22j$	13.4	0.99
	Inter-area Mode	$-0.139 \pm 3.72j$	3.35	0.59
DFIG	Local Mode I	$-1.380 \pm 6.87j$	19.7	1.09
	Local Mode II	$-1.150 \pm 6.59j$	17.2	1.05
	Inter-area Mode	$-0.892 \pm 3.98j$	21.9	0.63
DFIG	Local Mode I	$-1.720 \pm 6.48j$	15.6	1.03
	Local Mode II	$-1.050 \pm 6.40j$	16.2	1.02
	Inter-area Mode	$-0.880 \pm 3.80j$	20.1	0.60

จากนั้นได้ทำการทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวโดยแบ่งการจำลองเป็น 5 กรณีศึกษาดังตารางที่ 3 พบว่าในกรณีในที่ 1 รูปที่ 5 ซึ่งเป็นกรณีออกแบบที่ P_{tie} เท่ากับ 3.0 p.u. ตัวควบคุมทั้งสอง DFIG with PPOD และ DFIG with CPOD มีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพได้เทียบเท่ากันซึ่งสอดคล้องกับรูปกราฟที่การแกว่งของกำลังไฟฟ้ามมีการแกว่งเล็กน้อยทั้งสองตัวควบคุมในกรณีที่ 2 และ 3 พบว่ากรณี DFIG with CPOD มีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงกว่ากรณี DFIG with PPOD จากรูปที่ 6 และ รูปที่ 7 ซึ่งตัวควบคุม DFIG with PPOD มีสมรรถนะที่ดีกว่าในกรณีดังกล่าวสุดท้ายในกรณีที่ 4 และ 5 พบว่ากรณีที่ DFIG with CPOD มีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างมากและสูญเสียเสถียรภาพในที่สุด ตรงกันข้ามในกรณี DFIG with PPOD ตัวควบคุมยังสามารถหน่วงให้ระบบให้กลับมามีเสถียรภาพได้ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9

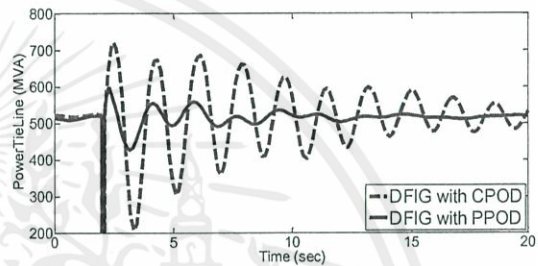
ตารางที่ 3 กรณีศึกษา ($P_{base} = 100$ MVA)

กรณี	P_{tie} (p.u.)	รายละเอียด
1	3.0	เกิดความผิดปกติพร้อมสามเฟส บริเวณระหว่างบัส 11 และ บัส 12 ที่เวลา $t=2$ หลังจากนั้น 70 ms ความผิดปกติหายไปเอง
2	5.2	เกิดความผิดปกติพร้อม สามเฟสบริเวณบัส 14 ที่เวลา $t=2$ หลังจากนั้น 100 ms ความผิดปกติหายไปเอง
3	5.2	สายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 12 มีการเปิดวงจรออก และเกิดความผิดปกติพร้อม สามเฟส บริเวณบัส 12 ที่เวลา $t=2$ หลังจากนั้น 80 ms ความผิดปกติหายไปเอง
4	5.6	เกิดความผิดปกติพร้อม สามเฟสบริเวณบัส 11 และ บัส12 ที่เวลา $t=2$ หลังจากนั้น 70 ms ความผิดปกติหายไปเอง
5	5.8	เกิดความผิดปกติพร้อม สามเฟสบริเวณระหว่างบัส 11 และ บัส 12 ที่เวลา $t=2$ หลังจากนั้น 70 ms ความผิดปกติหายไปด้วยการเปิดวงจรสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 12

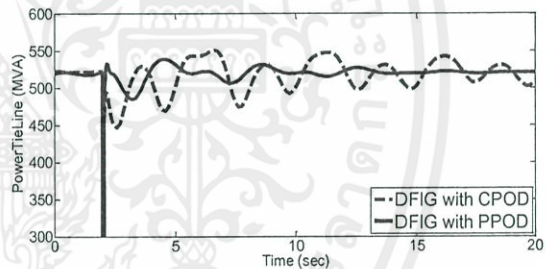
รูปที่ 4 ทางเดินรากลของโหมคการแกว่งระหว่างพื้นที่



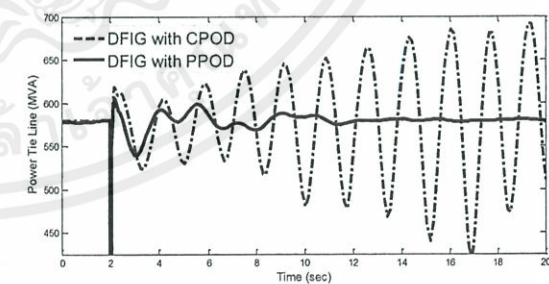
รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส12 กรณีที่ 1



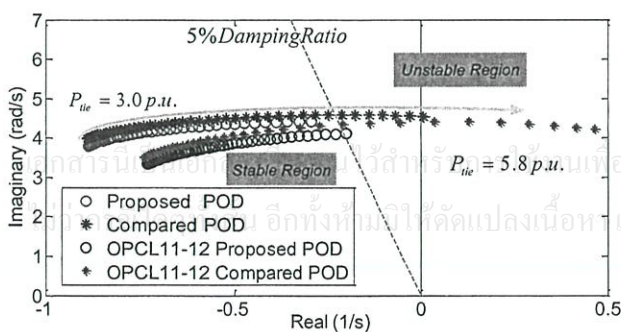
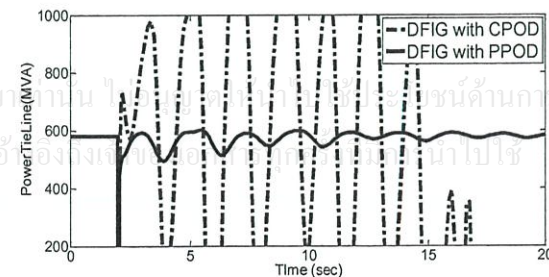
รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 12 กรณีที่ 2



รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 12 กรณีที่ 3



รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 12 กรณีที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษา การวิจัยและการบริการวิชาการแก่สังคม การทำซ้ำ การเผยแพร่ หรือการแจกจ่ายในทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 11 และบัส 12 กรณีที่ 5

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบการประสานควบคุมระหว่าง DFIG ที่ติดตั้ง POD โดยใช้แนวคิดที่ว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าในสายส่งเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้เสถียรภาพของระบบแย่ง เพื่อตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสม แล้วใช้วิธีการกลุ่มอนุภาคเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม POD โครงสร้างของ POD เป็นแบบตัวชดเชยเฟสนำและตามอันดับที่สอง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในระบบจริง ผลการจำลองศึกษาในระบบสองพื้นที่ที่เครื่องกำเนิดแสดงให้เห็นว่าการ DFIG ที่ติดตั้ง POD ที่นำเสนอมีสมรรถนะในการทำให้เสถียรภาพและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งได้ดีกว่าการออกแบบโดยวิธีดั้งเดิม

6. ภาคผนวก

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
กำลังไฟฟ้าที่พิกัด (S_{rate})	900 MVA
แรงดันที่พิกัด (V_{rate})	69 kV
ความถี่ (f)	60 Hz
ความต้านทานขดลวดความจอร์ (R_d)	0.003 p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์รั่วไหล (x_r)	0.15 p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์ในแนวแกนตรง (x_d)	1.81 p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์สภาวะชั่วคราวในแนวแกนตรง (x_d')	0.3 p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์ชั่วคราวในแนวแกนตรง (x_d'')	0.23 p.u.
ค่าคงตัวเวลาสภาวะชั่วคราวแนวแกนตรง (T_{d0}')	8 วินาที
ค่าคงตัวเวลาสภาวะชั่วคราวแนวแกนตรง (T_{d0}'')	0.03 วินาที
ค่าอิมพีแดนซ์ในแนวแกนขวาง (x_q)	1.76 p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์สภาวะชั่วคราวในแนวแกนขวาง (x_q')	0.65 p.u.
ค่าอิมพีแดนซ์ชั่วคราวในแนวแกนขวาง (x_q'')	0.25 p.u.
ค่าคงตัวเวลาสภาวะชั่วคราวในแนวแกนขวาง (T_{q0}')	1 วินาที
ค่าคงตัวเวลาชั่วคราวในแนวแกนขวาง (T_{q0}'')	0.07 วินาที
ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย (H)	3

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ของ DFIG

ตัวแปร	ค่า
กำลังไฟฟ้าที่พิกัด (S_{rate})	200 MVA
แรงดันที่พิกัด (V_{rate})	69 kV
ความถี่ (f)	60 Hz
ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ (R_s)	0.01 p.u.
ค่ารีแอกแตนซ์ที่สเตเตอร์ (X_s)	0.10 p.u.
ค่าความต้านทานที่โรเตอร์ (R_r)	0.01 p.u.
ค่ารีแอกแตนซ์ที่โรเตอร์ (X_r)	0.08 p.u.
ค่ารีแอกแตนซ์เกี่ยวกับ (X_m)	3.00 p.u.
ค่าอัตราขยายวงจรถวลิตซ์ (K_p)	10
ค่าคงตัวเวลางจรควบคุมพิชิตซ์ (T_p)	3 วินาที
วินาที ค่าอัตราขยายวงจรถวลิตซ์แรงดัน (K_V)	10
ค่าคงตัวเวลางจรควบคุมพิชิตซ์ (T_e)	0.01 วินาที
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4
เกียร์ทด	1/89
จำนวนใบพัดของกังหันลม	3
จำนวนเครื่องกำเนิดภายในโรงไฟฟ้ากังหันลม	100

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994.
- [2] F. Milano, "Power System Analysis Toolbox version 2.1.8", 2013.
- [3] N. R. Chaudhuri and B. Chaudhuri, "Considerations toward coordinated control of DFIG-Based wind farms," *IEEE Trans. on Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp.1263-1270, 2013.
- [4] I. D. Margaris, S. A. Papathanassiou, N.D. Hatziargyriou, A. D. Hansen, and P. Sorensen, "Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration," *IEEE Trans. on Sust. Energy*, vol. 3, no.2, pp.189-199, 2012.
- [5] B. Chaudhuri, B.C. Pal, A. C. Zolots, I. M. Jaimoukha, and T. C. Green, "Mixed-sensitivity approach to H_∞ control of power system oscillations employing multiple FACTS devices," *IEEE Trans. On Power Syst.*, vol.18, no. 3, pp. 1149-1156, Aug. 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นาย วันฉัตร ปราบสุธา

เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2535

ที่อยู่ 85 แสงชูโต 5/2 ถนนแสงชูโต ปากแพรก เมือง กาญจนบุรี

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวิสุทธรังษีจังหวัดกาญจนบุรี

เมื่อปีการศึกษา 2553 เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ในปีการศึกษา 2553

E-mail : .wun_chat@hotmail.com

ฝึกงานที่ : Maizuru Kousen (Japn) , Nissin company (Japan)

(Internship)



นาย วโรตม์ ไพศาลทรัพย์ผล

เกิดเมื่อวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ.2534

ที่อยู่ 17 แขวง บางนา เขต บางนา จังหวัด กรุงเทพมหานคร

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนราชวินิตบางแก้ว จังหวัด

สมุทรปราการ เมื่อปีการศึกษา 2552 เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขา

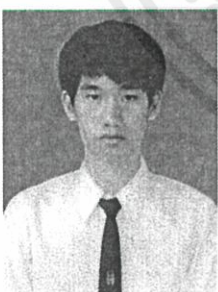
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า

คุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2553

E-mail : waroj.p@gmail.com

ฝึกงานที่ : บริษัท Johnson & Johnson (Thailand) Ltd.

(แผนก Utility)



นาย วันยุทธ สุวรรณเครือ

เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ.2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ สำเร็จ

การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ จังหวัด

กรุงเทพมหานครฯ เมื่อปีการศึกษา 2552 เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2553

E-mail : free_day_999@hotmail.com

ฝึกงานที่ : บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

(แผนกวางแผน และควบคุมระบบท่อก๊าซธรรมชาติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นางสาววารุณี อุ่อนันต์พิทักษ์
เกิดเมื่อวันที่ 4 มิถุนายน พ.ศ.2535 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จ
การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนศึกษานารีวิทยา จังหวัด
กรุงเทพมหานคร เมื่อปีการศึกษา 2552 เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2553

E-mail : nf.waru@gmail.com

ฝึกงานที่ : บริษัท เคมีแมน จำกัด

(แผนกซ่อมบำรุงไฟฟ้า)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้