

การประสานควบคุมแบบลำดับชั้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงาน
ลมชนิดบ่อนสองทางและตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง
เพื่อหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน

HIERARCHICAL COORDINATED CONTROL OF DOUBLY-FED INDUCTION
GENERATOR WIND TURBINES AND POWER SYSTEM STABILIZERS FOR
ROBUST POWER OSCILLATION DAMPING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-020-202

การประสานควบคุมแบบลำดับชั้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงาน
ลมชนิดป้อนสองทางและตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง
เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน

HIERARCHICAL COORDINATED CONTROL OF DOUBLY-FED INDUCTION
GENERATOR WIND TURBINES AND POWER SYSTEM STABILIZERS FOR
ROBUST POWER OSCILLATION DAMPING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2557
KMITL-xxxx-xx-x-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HIERARCHICAL COORDINATED CONTROL OF DOUBLY-FED INDUCTION
GENERATOR WIND TURBINES AND POWER SYSTEM STABILIZERS FOR
ROBUST POWER OSCILLATION DAMPING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2014-EN-D-018-047



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประสานควบคุมลำดับชั้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดป้อนสองทางและตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน

Thesis Title Hierarchical Coodinated Control of Doubly-fed Induction Generator Wind Turbines and Power System Stabilizers for Robust Power Oscillation Damping

นักศึกษานายทศพร สุรินทร์แก้ว

รหัสประจำตัว 55610751

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-020-202

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
ดร.วรวรรณ	นาคะวิโร	
ดร.คมสันต์	หงษ์สมบัติ	
ดร.สมภพ	ผลไม้	
รศ.ดร.อิสระชัย	งามหรุ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2557 เวลา 14.30-16.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-401

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประสานควบคุมลำดับชั้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดป้อนสองทางและตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน
นักศึกษา	ทศพร สุรินทร์แก้ว
รหัสประจำตัว	55610751
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อิศระชัย งามหรุ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมลำดับชั้นที่ประกอบด้วย การควบคุมจากศูนย์กลาง (Centralized controller) และการควบคุมจากท้องถิ่น (Local controller) ของตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า (Power oscillation damper, POD) ที่ติดตั้งกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดป้อนสองทาง (Doubly-fed induction generator wind turbine, DFIG) ประสานงานร่วมกับตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system stabilizer, PSS) เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน ลำดับชั้นของการควบคุมจากศูนย์กลางประกอบด้วยตัวควบคุม POD และ PSS ที่ติดตั้งอยู่ที่ศูนย์ควบคุมส่วนกลาง (Control center) ซึ่งรับสัญญาณอินพุตจากอุปกรณ์วัดเฟสเซอร์ (Phasor measurement units) วิธีการ Controllability และ Observability ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) และ DFIG เพื่อทำเสถียรภาพต่อโหมดการแกว่ง สัญญาณอินพุตที่เหมาะสมให้กับ POD และ PSS และตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดเฟสเซอร์ ส่วนลำดับชั้นการควบคุมจากท้องถิ่น POD และ PSS ได้ถูกติดตั้งกับ DFIG และ SG ที่เหมาะสมตามลำดับ การออกแบบพารามิเตอร์ของ POD และ PSS ได้พิจารณาตัวแปรต่างๆ เช่น สมรรถนะความหน่วง (Damping performance) โครงสร้างของตัวควบคุม เวลาหน่วง (Time delay) และ หลักความคงทนต่อความไม่แน่นอนต่างๆ ของระบบ (System uncertainties) สุดท้ายได้ทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่นำเสนอกับตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีดั้งเดิมโดยการทดสอบเสถียรภาพพลวัต (Small-signal stability) และเสถียรภาพชั่วคราว (Transient stability) ภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบไฟฟ้ากำลัง

Thesis	Hierarchical Coordinated Control of Doubly-fed Induction Generator Wind Turbines and Power System Stabilizers for Robust Power Oscillation Damping
Student	Mr. Tossaporn Surinkaew
Student ID.	55610751
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

ABSTRACT

This thesis presents the two-level hierarchical scheme which consists of wide area centralized and local controls of the power oscillation damper (POD) equipped with the doubly-fed induction generator (DFIG) wind turbine and the power system stabilizer (PSS) for robust power oscillation damping. In the wide area level, the centralized POD and PSS receive the input signals from synchronized phasor measurement units (PMUs). The geometric measures of controllability and observability are applied to select the suitable DFIG and synchronous generator (SG) for stabilizing the target oscillation mode, the proper input signals of the centralized POD and PSS, and the location of PMUs. In the local level, the POD and PSS are equipped with the suitable DFIG and SG, respectively. In the optimization parameters of POD and PSS, the practical issues such as damping performance, controller structure, communication latency, and robustness against system uncertainties are taken into account. The controller efficiency and resiliency of the proposed controller are evaluated in comparison with other controllers by eigenvalue analysis and nonlinear simulation for a wide range of operating conditions, $N-1$ outage contingencies, severe faults, and communication failure.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิสรระชัย งามทรู ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ตลอดระยะเวลาของการศึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ บุคลากร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดระยะเวลาของการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการ Electrical Power Applications Research Laboratory (EPARL) ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

ที่สำคัญข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง พร้อมทั้งเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา-มารดา ซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ทศพร สุรินทร์แก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	3
บทที่ 2 การประสานควบคุมแบบลำดับชั้น และวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ.....	6
2.1 การควบคุมจากศูนย์กลาง และท้องถิ่น.....	6
2.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดป้อนสองทางซึ่งติดตั้งตัว หน่วยการแกว่งกำลังไฟฟ้า.....	7
2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	13
2.4 วิธีออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ.....	15
2.4.1 การทำระบบให้เป็นเชิงเส้น.....	15
2.4.2 แบบจำลองของระบบที่พิจารณาเวลาหน่วง และความไม่แน่นอนต่างๆของ ระบบ.....	17
2.4.3 การออกแบบฟังก์ชันก่่วัตถุประสงค์โดยใช้หลักความคงทน และการย้ายโพลภายใต้ จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ.....	19
2.4.4 วิธีหึ่งห้อย.....	22
บทที่ 3 การทดสอบตัวควบคุมจากศูนย์กลาง และตัวควบคุมจากท้องถิ่น.....	25
3.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษา.....	25
3.2 การเลือกอินพุต และเอาต์พุตที่เหมาะสมโดยวิธี Geometric measure of controllability and observability.....	27
3.3 ผลการทดสอบตัวควบคุม.....	30
3.4 สรุปผลการทดสอบ.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และด้อย่างยิ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบตัวควบคุมที่นำเสนอ.....	40
4.1 ผลการทดสอบตัวควบคุม.....	40
4.2 สรุปผลการทดสอบ.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ของ DFIG	26
3.2 ผลวิเคราะห์ไอเกนแวลู และโหมดการแกว่ง.....	26
3.3 ผลการวิเคราะห์ Geometric measure of controllability.....	28
3.4 ผลการวิเคราะห์อินพุต และเอาต์พุตที่เหมาะสมของตัวควบคุมจากระยะไกล.....	30
3.5 ผลการวิเคราะห์อินพุต และเอาต์พุตที่เหมาะสมของ POD ของ DFIG.....	30
3.6 ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์.....	32
3.7 พารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	32
3.8 ผลการวิเคราะห์ไอเกนแวลู และโหมดการแกว่ง.....	33
3.9 กรณีศึกษา.....	36
4.1 ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์.....	40
4.2 ค่าเริ่มต้นของ $\mathbf{P}_{SG,h}$ $\mathbf{P}_{DFIG,k}$ และ $T_{d,l}$	41
4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	42
4.4 ผลการวิเคราะห์ไอเกนแวลู และโหมดการแกว่ง.....	42
4.5 กรณีศึกษา.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการควบคุมที่นำเสนอ.....	6
2.2 โครงสร้างของ DFIG และระบบควบคุม.....	7
2.3 การวางแกน d และ q แบบ Flux-based rotating reference frame.....	9
2.4 ตัวควบคุมความเร็ว และตัวควบคุมแรงดันของ DFIG.....	11
2.5 ตัวควบคุมมุมใบพัดของ DFIG.....	12
2.6 โครงสร้างลำดับชั้นของ POD.....	12
2.7 AVR IEEE type III และ Turbine governor IEEE type II.....	14
2.8 แบบจำลองของระบบที่พิจารณาสัญญาณดีเลย์ และความไม่แน่นอนของระบบ.....	17
2.9 ขั้นตอนการหาค่า $\zeta_{m,sc}$ และ $\gamma_{\infty,sc}$	20
2.10 Flow chart ของวิธีหึ่งห้อย.....	24
3.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษา.....	25
3.2 ผลการวิเคราะห์ Geometric measure of observability.....	28
3.3 วิธีการย้ายโพล.....	31
3.4 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Without POD and PSS.....	34
3.5 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Local CPOD and CPSS.....	34
3.6 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Centralized CPOD and CPSS.....	34
3.7 ความเร็วลมที่ใช้ในกรณีศึกษา.....	36
3.8 ผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1.....	37
3.9 ผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 2.....	37
3.10 ผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 3.....	38
3.11 ผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 4.....	38
4.1 กราฟการลู่เข้าของฟังก์ชันกวีตฤประสงค์.....	41
4.2 ความเร็วลมที่ใช้ในกรณีศึกษา.....	43
4.3 การเปลี่ยนแปลงของ γ_{∞} ด้วย MCS 10,000 ครั้ง.....	45
4.4 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Hierarchical CPOD and CPSS.....	45
4.5 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Hierarchical RPOD and RPSS.....	45
4.6 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Hierarchical CPOD and CPSS เมื่อเกิด Communication failure.....	46
4.7 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Hierarchical RPOD and RPSS เมื่อเกิด Communication failure.....	46
4.8 ผลทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ผลทดสอบในกรณีศึกษาที่ 2.....	48
4.10 ผลทดสอบในกรณีศึกษาที่ 3.....	49
4.11 ผลทดสอบในกรณีศึกษาที่ 3.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นไม่เพียงแต่จะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังผลิตกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ และยังทำให้เกิดการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้ากำลัง (Interconnected power systems) เพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งในกรณีข้างต้นอาจจะกระตุ้นให้เกิดโหมดการแกว่งที่ไม่สามารถหน่วงได้ในช่วงความถี่ระหว่าง 0.2-2.0 Hz นั่นคือโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ (Inter-area oscillation modes) และโหมดการแกว่งในพื้นที่ (Local oscillation modes) [1] ในทางกลับกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดป้อนสองทาง (Doubly fed induction generators: DFIGs) ได้ถูกติดตั้งอย่างมากมายในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุม และสนับสนุนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ [2]

อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของ DFIG ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจจะส่งผลเสียต่อความหน่วงของโหมดการแกว่งข้างต้น เนื่องจากการลดลงของความเฉื่อยในระบบ การแทนที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส หรือการทำงานที่ไม่สอดคล้องกันของคอนเวอร์เตอร์ (Converter) ในกลุ่มของ DFIG [3] ในกรณีข้างต้นได้ทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ซับซ้อนและอาจนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับในบริเวณกว้าง ซึ่งในอดีตได้ใช้ตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems stabilizer: PSS) ที่ติดตั้งกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator: SG) มาแก้ไขปัญหานี้อาจจะไม่เพียงพอสำหรับปัญหาที่ซับซ้อนนี้ได้ [4] ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะประสานงานร่วมกันระหว่างตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า (Power oscillation damper: POD) ของ DFIG และ PSS ของ SG เพื่อนำมาแก้ไขปัญหานี้ต่อไป

ในปัจจุบันได้ใช้ POD ที่ติดตั้งกับ DFIG มาประยุกต์ และแก้ไขปัญหการแกว่งโดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนของ DFIG [5-7] ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ก่อให้เกิดแนวคิดและความเป็นไปได้ของการประสานงานร่วมกันระหว่าง POD และ PSS ใน [8] ได้นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ Partial Eigen structure เพื่อนำมาออกแบบ POD และ PSS นอกจากนี้การประสานงานร่วมกันของ POD และ PSS ซึ่งออกแบบโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าด้านออกของ DFIG ได้นำเสนอใน [4] ต่อมาการประสานงานร่วมกันของ POD และ PSS เพื่อนำมาทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งใช้วิธีการออกแบบด้วยหลักความคงทน และพิจารณาความไม่แน่นอนของระบบได้นำเสนอใน [9] ผลสรุปของงานวิจัยเหล่านี้บ่งชี้ว่าการประสานงานร่วมกันของ POD และ PSS ให้ความหน่วงการแกว่งที่ดีกว่าการควบคุมเพียง POD หรือ PSS อย่างไรก็ตาม POD และ PSS ของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นได้ใช้สัญญาณท้องถิ่น (Local signals) เป็นอินพุตให้กับ POD และ PSS ดังนั้นสัญญาณอินพุตเหล่านี้จึงมีความสามารถในการมองเห็น (Observability) ต่อโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ต่ำ และในกรณีนี้อาจจะไม่สามารถทำเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง [10, 11]

ปัญหาการแกว่งระหว่างพื้นที่ได้แก้ไขโดยใช้การควบคุมจากศูนย์กลาง ซึ่งประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดเฟสเซอร์ (Phasor measurement units) วัดสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกลมาเป็นอินพุตให้กับ POD ใน [11] ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมจากศูนย์กลางกับ DFIG ที่ติดตั้ง POD และพิจารณาเวลาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งของตัวควบคุม POD แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุม POD ใน [11] ไม่ได้พิจารณาถึงความไม่แน่นอนต่างๆของระบบ เช่นจุดการทำงานที่หลากหลายของระบบไฟฟ้ากำลัง และสัญญาณอินพุต หรือเอาต์พุตของ POD ขาดหายเนื่องจากการคมนาคมล้มเหลว (Communication failure) ดังนั้นงานวิจัยเหล่านี้จึงไม่สามารถยืนยันเสถียรภาพความคงทนของตัวควบคุม POD ต่อความไม่แน่นอนต่างๆของระบบได้ ใน [12] ได้นำเสนอการควบคุมจากศูนย์กลางของ DFIG ที่ติดตั้ง POD โดยออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Observer-based state-feedback ต่อมาใน [13] ได้นำเสนอการควบคุมจากศูนย์กลางแบบลำดับชั้นของ PSS POD และอุปกรณ์สร้างความยืดหยุ่นให้กับระบบส่งไฟฟ้ากระแสกลับ (FACTS devices) เพื่อควบคุมความถี่ และหน่วยการแกว่งระหว่างพื้นที่ อย่างไรก็ตามเนื่องจากวิธีการออกแบบที่นำเสนอใน [12], [13] ได้ใช้วิธี Linear quadratic regulator ซึ่งยากที่จะเลือกเมตริกซ์ของการถ่วงน้ำหนัก เช่นเดียวกับวิธี Observer-based state-feedback ที่ไม่สามารถทำได้ง่ายในระบบไฟฟ้ากำลังจริง ถึงแม้ว่าตัวควบคุม POD และ PSS ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโดยพิจารณาจุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ และเวลาหน่วงของตัวควบคุม แต่ตัวควบคุม POD และ PSS เหล่านี้ก็ไม่สามารถทำงานได้เมื่อเกิดเหตุการณ์สัญญาณขาดหายเนื่องจากการคมนาคมล้มเหลว (Communication failure)

เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาก็กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการประสานควบคุมแบบลำดับชั้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดบ่อนสองทาง และตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน วิธีการวัดความสามารถในการควบคุมและการมองเห็น (Geometric measures of controllability and observability) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของ DFIG SG และ PMUs เพื่อทำเสถียรภาพต่อโหมดการแกว่งที่ต้องการ และหาสัญญาณอินพุตที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงการแกว่งให้กับ POD และ PSS ซึ่งโครงสร้างของ POD และ PSS ที่ใช้เป็นแบบอันดับสองที่มีเฟสชดเชยแบบนำหน้าและล่าหลัง (Second-order lead/lag compensator) ปัญหาการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ POD และ PSS ได้พิจารณาหลักความคงทนต่อความไม่แน่นอนต่างๆโดยวิธี Inverse output multiplicative perturbation และสมรรถนะความหน่วงของโหมดการแกว่งภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ ซึ่งในที่นี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีหิ่งห้อย (Firefly algorithm) ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ POD และ PSS สุดท้ายวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดสอบตัวควบคุม POD และ PSS ที่นำเสนอในระบบ New England IEEE-39 bus system เพื่อยืนยันเสถียรภาพพลวัต และเสถียรภาพชั่วคราวภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาระบบควบคุมแบบลำดับชั้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดป้อนสองทางและตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. นำเสนอการควบคุมประสานงานแบบลำดับชั้นการควบคุมจากศูนย์กลาง และท้องถิ่นโดย POD ของ DFIG และ PSS ของ SG เพื่อหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน
2. เพื่อออกแบบตัวควบคุม POD และ PSS โดยพิจารณาหลักความคงทน และสมรรถนะความหน่วงของโหมดการแกว่ง ภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ
3. ประยุกต์ใช้วิธีหึ่งห้อยเพื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของ POD และ PSS
4. ประยุกต์ใช้การควบคุมประสานงานแบบลำดับชั้นการควบคุมจากศูนย์กลาง และท้องถิ่นโดย POD ของ DFIG และ PSS ของ SG ซึ่งออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอเพื่อเพิ่ม และยืนยันเสถียรภาพพลวัตและเสถียรภาพชั่วคราวภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ
5. วิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้แหล่งพลังงานที่มีอยู่แล้วในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าแทนที่จะประยุกต์ใช้อุปกรณ์ FACTS ซึ่งมีราคาสูงมาก

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานของวิทยานิพนธ์นี้ แสดงได้ดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองของ DFIG สามารถควบคุมแยกอิสระระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายให้กับระบบได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้ติดตั้ง POD ที่ลูบควบคุมแรงดัน (หรือลูบควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน) ของ DFIG เพื่อใช้กำลังไฟฟ้าเสมือนของ DFIG ในการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้
2. ใช้กำลังไฟฟ้าเสมือนของ DFIG เพื่อหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แทนกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ซึ่งถ้ากำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ถึงขีดจำกัดจะไม่สามารถใช้กำลังไฟฟ้าจริงหน่วงการแกว่งของระบบได้
3. ถึงแม้ DFIG จะไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้ระบบได้เนื่องจากความเร็วลมต่ำกว่าจุดทำงาน Cut-in หรือความเร็วลมเกินจุดทำงาน Cut-off แต่อย่างไรก็ตามคอนเวอร์เตอร์ของ DFIG ก็ยังสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อหน่วงการแกว่งของระบบได้
4. โครงสร้างตัวควบคุมอันดับสองที่มีเฟสชดเชยแบบนำหน้า และล่าหลังเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และสามารถนำมาดัดแปลงเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังจริงได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ดังต่อไปนี้

1. ประยุกต์ใช้การควบคุมจากศูนย์กลางเพื่อแก้ไขปัญหาการแกว่งระหว่างพื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ และการควบคุมท้องถิ่นในการแก้ไขปัญหาสัญญานาเสถียรภาพขาดหายเนื่องจากการคมนาคมล้มเหลว (Communication failure) ของการควบคุมจากศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การควบคุมแบบคงทน (Robust control) และการย้ายโพลของระบบ (Pole placement) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ของ POD และ PSS เพื่อให้คงทนต่อความไม่แน่นอนต่างๆของระบบ และมีสมรรถนะความหน่วงสูงเมื่อเกิดสิ่งรบกวนจากภายนอก เช่น ความผิดพลาดของสามเฟส และการหลุดออกของสายส่ง เป็นต้น

3. ใช้วิธี Geometric measure of controllability and observability เพื่อเลือกสัญญาณและตำแหน่งที่เหมาะสมของ POD PSS DFIG และ SG เพื่อใช้ในการหน่วงการแกว่งอย่างมีประสิทธิภาพ

4. การออกแบบโดยพิจารณาจุดการทำงานที่หลากหลายของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยพิจารณาตัวแปรที่สำคัญ และมีผลกระทบสูงต่อความคงทน และสมรรถนะความหน่วงของระบบจะทำให้ตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถหน่วงการแกว่งได้ในจุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ

5. ประยุกต์ใช้วิธีหึ่งห้อยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่นำเสนอของ POD และ PSS

1.5 ขอบเขตการวิจัย

การประสานควบคุมแบบลำดับชั้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดบ่อนสองทางและตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทนดังที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ ภายใต้การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB และ Power System Analysis Toolbox (PSAT) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. สร้างระบบ New England IEEE-39 bus เพื่อใช้ในการศึกษา และวิเคราะห์โหมดการแกว่งของระบบเมื่อติดตั้งและไม่ติดตั้ง DFIG จากนั้นได้นำวิธี Geometric measure of controllability and observability มาใช้เพื่อเลือกสัญญาณอินพุต และตำแหน่งที่เหมาะสมของ POD PSS DFIG และ SG เพื่อใช้ในการหน่วงการแกว่งอย่างมีประสิทธิภาพ

2. ออกแบบตัวควบคุม POD และ PSS โดยใช้หลักความคงทน และการย้ายโพลภายใต้จุดทำงานที่หลากหลายของระบบไฟฟ้ากำลัง

3. หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม POD และ PSS ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่นำเสนอโดยวิธีหึ่งห้อย

4. ทดสอบตัวควบคุมที่นำเสนอ และตัวควบคุมเปรียบเทียบกับเสถียรภาพพลวัต และเสถียรภาพชั่วคราวในระบบ New England IEEE-39 bus ภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอน และรายละเอียดต่างๆ แบ่งออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎี แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึง วิธีการออกแบบการควบคุมจากศูนย์กลาง และการควบคุมจากท้องถิ่น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ DFIG SG POD และ PSS และการสร้างฟังก์ชันกั่วัตถุประสงค์โดยใช้หลักความคงทน และการย้ายโพล จากนั้นได้กล่าวถึงวิธีการหาค่าที่เหมาะสมฟังก์ชันกั่วัตถุประสงค์นี้ โดยวิธีหึ่งห้อย

บทที่ 3 กล่าวถึงการเลือกสัญญาณที่เหมาะสมด้วยวิธี Geometric Controllability and observability และวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของการควบคุมจากศูนย์กลาง และการควบคุมการควบคุมจากท้องถิ่น

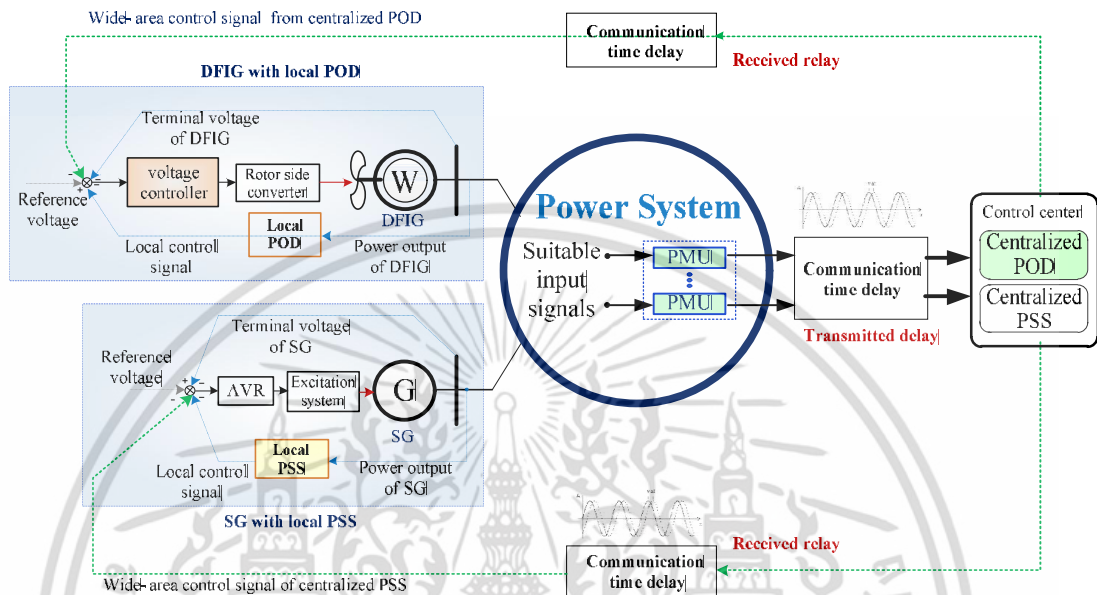
บทที่ 4 นำเสนอการประสานงานการควบคุมจากศูนย์กลาง และการควบคุมจากท้องถิ่นโดย POD และ PSS และทดสอบตัวควบคุมที่นำเสนอกับตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีดั้งเดิมต่อเสถียรภาพพลวัต และเสถียรภาพชั่วคราวภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

การประสานควบคุมแบบลำดับชั้น และวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ

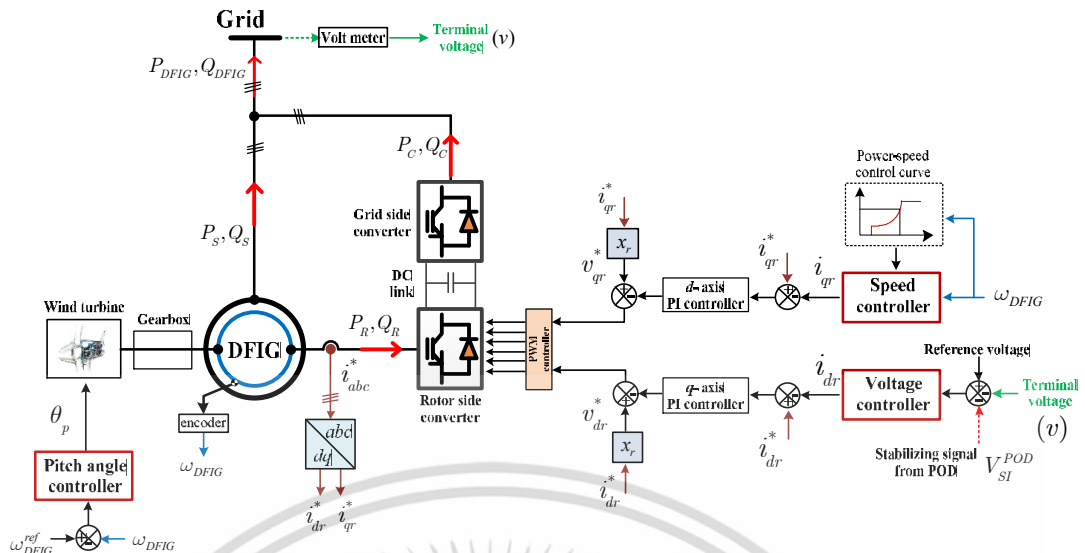


รูปที่ 2.1 หลักการควบคุมลำดับชั้นการควบคุมจากศูนย์กลาง และการควบคุมจากท้องถิ่นที่นำเสนอ

2.1 การประสานควบคุมแบบลำดับชั้น

การควบคุมจากศูนย์กลาง และการควบคุมจากท้องถิ่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดป้อนสองทางซึ่งติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า และตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แสดงในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยการควบคุมจากศูนย์กลางของ POD และ PSS ที่ติดตั้งอยู่ที่ศูนย์ควบคุมส่วนกลาง ซึ่งส่งสัญญาณทำเสถียรภาพให้กับ DFIG และ SG ตามลำดับ และการควบคุมจากท้องถิ่นประกอบด้วยตัวควบคุมท้องถิ่น POD และ PSS ที่ติดตั้งอยู่กับ DFIG และ SG ตามลำดับ ตัวควบคุม POD และ PSS ที่ศูนย์ควบคุมส่วนกลางได้รับอินพุตซึ่งวัดโดยอุปกรณ์วัดเฟสเซอร์ ในทางตรงกันข้าม ตัวควบคุมจากท้องถิ่น POD และ PSS ได้ใช้กำลังไฟฟ้าที่ออกจาก DFIG และ SG เพื่อเป็นอินพุต ตามลำดับ เมื่อเกิดสิ่งรบกวนจากภายนอก (Disturbance) ตัวควบคุมจากศูนย์กลาง และตัวควบคุมจากท้องถิ่นของ POD จะส่งสัญญาณทำเสถียรภาพไปที่ตัวควบคุมแรงดัน ตัวควบคุมจากศูนย์กลาง และตัวควบคุมจากท้องถิ่นของ PSS จะส่งสัญญาณทำเสถียรภาพไปที่ Automatic voltage regulator (AVR) นอกจากนี้ตัวควบคุมจากท้องถิ่นของ POD และ PSS ถูกออกแบบเพื่อทำเสถียรภาพให้กับระบบเมื่อสัญญาณทำเสถียรภาพของตัวควบคุมจากส่วนกลางของ POD และ PSS ไม่สามารถส่งสัญญาณมาทำเสถียรภาพให้กับระบบได้เนื่องจาก Communication failure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ DFIG และระบบควบคุม

2.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดบีสองทางซึ่งติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 2.2 แสดง DFIG ที่ติดตั้ง POD และระบบควบคุม [14] สมการแรงดันในแกน d และ q ของ DFIG แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= -r_s i_{ds} + ((x_s + x_u) i_{qs} + x_u i_{qr}) \\
 v_{qs} &= -r_s i_{qs} - ((x_s + x_u) i_{ds} + x_u i_{dr}) \\
 v_{dr} &= -r_r i_{dr} + (1 - \omega_{DFIG}) ((x_s + x_u) i_{qr} + x_u i_{qs}) \\
 v_{qr} &= -r_r i_{qr} - (1 - \omega_{DFIG}) ((x_s + x_u) i_{dr} + x_u i_{ds})
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

โดยที่ v_{ds}, v_{qs}, v_{dr} และ v_{qr} คือ แรงดันในแกน d และ q ของสเตเตอร์ และโรเตอร์ ตามลำดับ
 i_{ds}, i_{qs}, i_{dr} และ i_{qr} คือ กระแสในแกน d และ q ของสเตเตอร์ และโรเตอร์ ตามลำดับ
 r_s และ r_r คือ ความต้านทานของสเตเตอร์ และโรเตอร์ ตามลำดับ
 x_s และ x_u คือ รีแอกแตนซ์ของสเตเตอร์ และแมกนีไทซ์ ตามลำดับ
 ω_{DFIG} คือ ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG

จากนั้นได้เขียน v_{ds} และ v_{qs} ให้อยู่ในรูปของแรงดันที่ต่อกับโครงข่าย (Terminal voltage) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} v_{ds} &= -v \sin \theta \\ v_{qs} &= v \cos \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยที่ v และ θ คือแรงดัน และมุมเฟสของแรงดันที่ต่อกับโครงข่าย
 \sin และ \cos คือฟังก์ชันไซน์ และคอสของตรีโกณมิติ

กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนขึ้นอยู่กับกระแสทางด้านสเตเตอร์ และคอนเวอร์เตอร์
 แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{DFIG} &= P_S + P_C \\ Q_{DFIG} &= Q_S + Q_C \end{aligned} \quad (2.3)$$

และ

$$\begin{aligned} P_{DFIG} &= v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} \\ Q_{DFIG} &= v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds} + v_{dc} i_{qc} - v_{qc} i_{dc} \end{aligned} \quad (2.4)$$

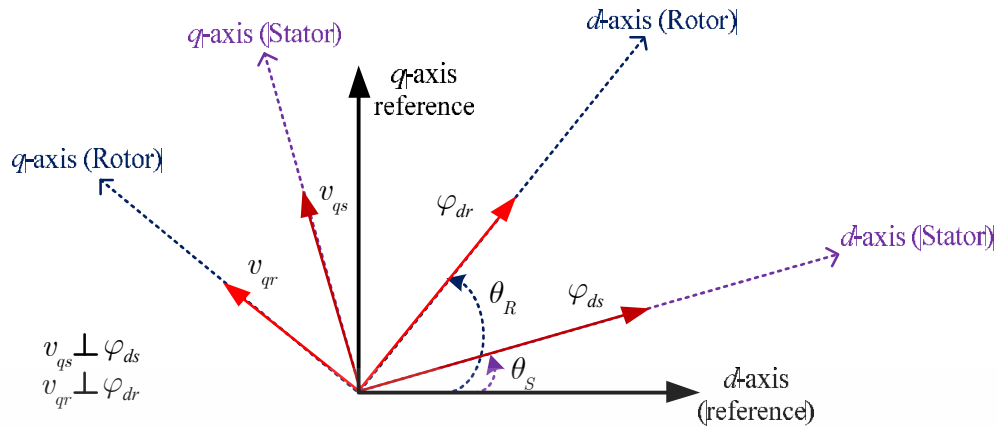
โดยที่ P_{DFIG} และ Q_{DFIG} คือ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ DFIG ตามลำดับ
 P_S, P_C, Q_S และ Q_C คือ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของสเตเตอร์ และ
 คอนเวอร์เตอร์ ตามลำดับ
 v_{dc} และ v_{qc} คือ แรงดันในแกน d และ q ของคอนเวอร์เตอร์ ตามลำดับ
 i_{dc} และ i_{qc} คือ กระแสในแกน d และ q ของคอนเวอร์เตอร์ ตามลำดับ

เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลอง จึงได้สมมติให้แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์เป็นแบบ
 อุดมคติ และไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่โรเตอร์มีค่า
 เท่ากับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่คอนเวอร์เตอร์ดังสมการ (2.5)

$$\begin{aligned} P_C &= P_R \\ Q_C &= Q_R \end{aligned} \quad (2.5)$$

โดยที่ P_R และ Q_R คือกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่โรเตอร์ ตามลำดับ

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างอิสระ
 ซึ่งเป็นเหตุผลที่ว่าลู่การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นอิสระต่อกัน หรือสามารถ
 แยกกันควบคุมได้ (Independently control) [14]



รูปที่ 2.3 การวางแกน d และ q แบบ Flux-based rotating reference frame

รูปที่ 2.3 แสดงการวางแกน d และ q แบบ Flux-based rotating reference frame ที่ใช้ในการสร้าง และอ้างอิงแบบจำลองของ DFIG โดยพิจารณาจากค่าเริ่มต้น $\theta_s = \theta_R = 0^\circ$ ดังนั้นสมการที่ (2.2) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} v_{ds} &= v_{dr} = 0 \\ v_{qs} &= v_{qr} = v \end{aligned} \quad (2.6)$$

แทนค่าสมการ (2.6) ในสมการที่ (2.4) ได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} P_{DFIG} &= v(i_{qs} + i_{qr}) \\ Q_{DFIG} &= -v(i_{ds} + i_{dr}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ และกระแสของสเตเตอร์ได้แสดงโดยสมการที่ (2.8)

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= -((x_s + x_u)i_{dr} + x_u i_{dr}) \\ \varphi_{qs} &= -((x_s + x_u)i_{qs} + x_u i_{qr}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่ φ_{ds} และ φ_{qs} คือฟลักซ์ของสเตเตอร์ในแกน d และ q ตามลำดับ

จัดรูปสมการที่ (2.8) ในรูปของกระแสในแกน d และ q ทางด้านสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} i_{ds} &= \frac{-\varphi_{ds} - x_u i_{dr}}{x_s + x_u} \\ i_{qs} &= \frac{-x_u i_{qr}}{x_s + x_u} \end{aligned} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า (2.9) ลงใน (2.7) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ DFIG ที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายสามารถเขียนในรูปของกระแสทางด้านโรเตอร์ในแกน d และ q ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{DFIG} &= \frac{x_s}{x_s + x_u} v i_{qr} \\ Q_{DFIG} &= \frac{-x_u v i_{dr}}{x_s + x_u} - \frac{v^2}{x_u} \end{aligned} \quad (2.10)$$

ในสมการที่ (2.10) แสดงให้เห็นว่ากระแสแกน q ของโรเตอร์ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ส่วนกระแสแกน d ของโรเตอร์ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ DFIG ซึ่งสามารถแยกการควบคุมได้อย่างอิสระ ต่อไปสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{DFIG} &= (\tau_m - \tau_e) / 2H_m \\ \tau_e &= (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) = x_u (i_{qr} i_{ds} + i_{dr} i_{qs}) \end{aligned} \quad (2.11)$$

กำลังทางกลที่ได้จากความเร็วมเขียนให้อยู่ในรูปของ ความเร็วม ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG และมุมของใบพัดได้ดังนี้

$$P_W = \frac{n_g \rho}{2S_n} c_p(\lambda, \theta_p) A_r v_W^3 \quad (2.12)$$

กราฟเส้นโค้งของ $c_p(\lambda, \theta_p)$ สามารถประมาณค่าโดย

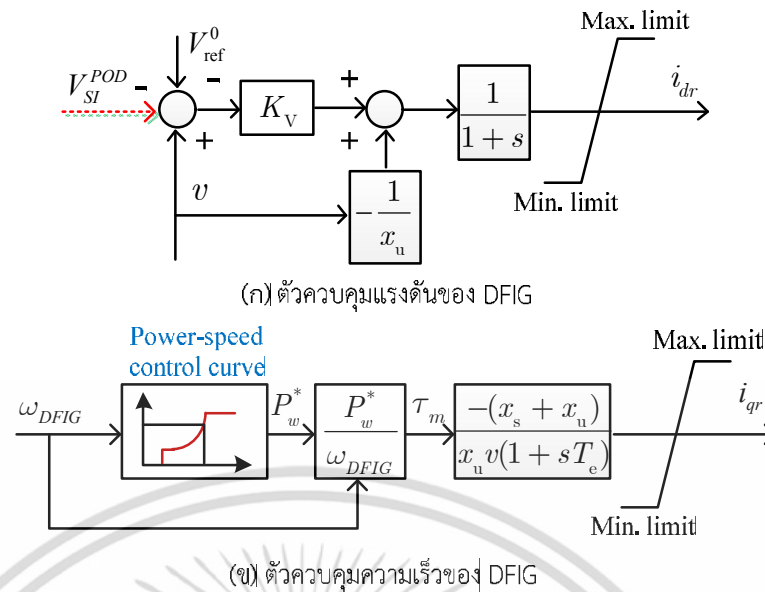
$$c_p = 0.22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta_p - 5 \right) e^{\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.13)$$

เมื่อค่าของ λ_i สามารถประมาณค่าด้วยฟังก์ชันของ λ [15] ดังนี้

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta_p} - \frac{0.35}{\theta_p^3 + 1} \quad (2.14)$$

โดยที่	$\dot{\omega}_{DFIG}$	คือ ตัวแปรสถานะของความเร็วโรเตอร์ของ DFIG
	τ_m และ τ_e	คือ แรงบิดทางกล และทางไฟฟ้า ตามลำดับ
	v_W	คือ ความเร็วม (Wind speed)
	θ_p	คือ มุมของใบพัด (Pitch angle)
	n_g	คือ จำนวนของฟาร์มลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ตัวควบคุมความเร็ว และตัวควบคุมแรงดันของ DFIG
(ก) ตัวควบคุมแรงดัน และ (ข) ตัวควบคุมความเร็ว

- S_n คือ พิกัดของกำลังไฟฟ้าของ DFIG
- ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (Air density)
- c_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังไฟฟ้า
- λ คือ อัตราส่วนความเร็วปลาย
- A_w คือ พื้นที่กวาดของโรเตอร์

จากนั้นการควบคุมกระแสโรเตอร์ในแกน d และ q ที่ใช้ในการควบคุมควบคุมความเร็ว (หรือกำลังไฟฟ้าจริง) และควบคุมแรงดัน (หรือกำลังไฟฟ้าเสมือน) แสดงได้ในรูปที่ 2.4 (ก) และ 2.4 (ข) ตามลำดับ

ในรูป 2.4 สมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสโรเตอร์ในแกน d และ q สามารถแสดงดังสมการที่ (2.15) และ (2.16) ตามลำดับ

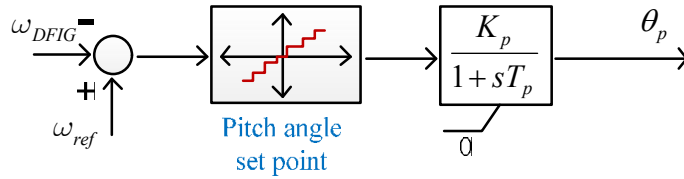
$$\dot{i}_{qr} = \left(\left(-\frac{x_s + x_u}{x_u v} p_w^* \right) / \omega_m - i_{qr} \right) \frac{1}{T_e} \tag{2.15}$$

$$\dot{i}_{dr} = K_v (v - V_{ref}) - \frac{v}{x_u} - i_{dr} \tag{2.16}$$

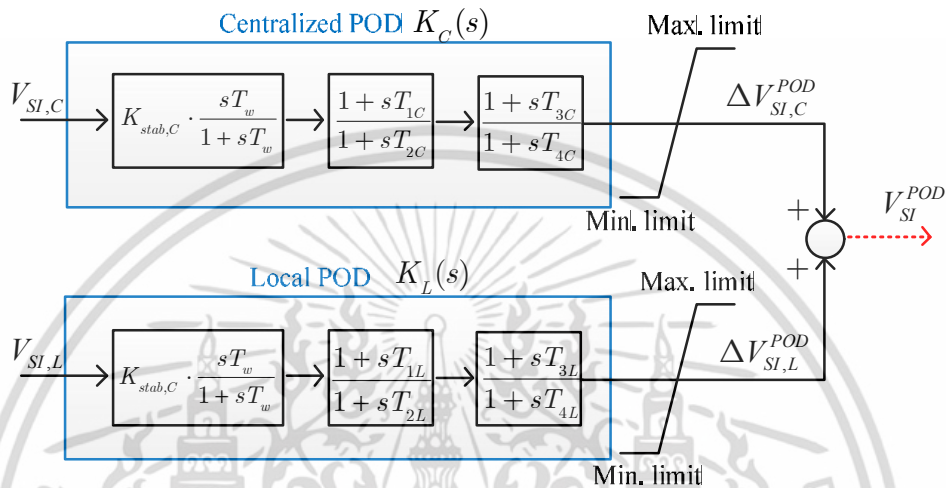
ใน [4] แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดันที่ฝั่งโรเตอร์ให้ผลตอบสนองต่อความหน่วงของ โหมตการแกว่งมากกว่าการควบคุมความเร็ว ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ติดตั้ง POD ที่ลูบควบคุมแรงดันโดยเพิ่มสัญญาณทำเสถียรภาพของ POD เข้าไปที่แรงดันอ้างอิง (Reference voltage) ดังสมการ (2.17)

$$V_{ref} = V_{ref}^0 + V_{SI}^{POD} \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ V_{ref} ที่คำนวณออกมาแล้วนั้นไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ตัวควบคุมมุมใบพัดของ DFIG



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบลำดับชั้นของตัวควบคุมจากศูนย์กลาง และตัวควบคุมจากท้องถิ่นของ POD

- โดยที่
- V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิง
 - V_{ref}^0 คือ ค่าเริ่มต้นของค่าอ้างอิง ($V_{ref}^0 = 1$)
 - V_{SI}^{POD} คือ สัญญาณทำเสถียรภาพที่มาจาก POD
 - p_w^* คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากความเร็วลม
 - K_v คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแรงดัน
 - T_e คือ ค่าคงที่ของตัวควบคุมความเร็ว

สุดท้ายตัวควบคุมมุมใบพัด (Pitch angle controller) ซึ่งทำงานเฉพาะโหมด Super-synchronous ของ DFIG ได้แสดงในรูป 2.5 ซึ่งเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\dot{\theta}_p = (K_p \cdot (f(\omega_{DFIG}, \omega_{ref})) - \frac{\theta_p}{T_p}) \quad (2.18)$$

- โดยที่
- $f(\omega_{DFIG}, \omega_{ref})$ คือ ฟังก์ชันที่เปลี่ยนไปตามผลต่างของ ω_{DFIG} และ ω_{ref}
 - ω_{ref} คือ ความเร็วอ้างอิงของ ω_{DFIG}
 - K_p และ T_p คือ อัตราขยาย และค่าคงที่เวลาของตัวควบคุมใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็น ใบนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตการดำเนินการใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนโครงสร้างลำดับชั้นของ POD ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นโครงสร้างแบบอันดับสองที่มีเฟสชดเชยแบบนำหน้า และล่าหลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ประกอบด้วยอัตราขยาย $K_{stab,C}$ และ $K_{stab,L}$ ค่าคงที่เวลาของวงจรปรับตั้งใหม่ (Washout time constant) T_w มีหน้าที่ทำให้ตัวควบคุม POD ไม่ทำงานในสภาวะอยู่ตัว (Steady state) และทำงานในสภาวะที่เกิดความผิดปกติของระบบ ในที่นี้กำหนดให้ $T_w = 10$ s เพื่อจะให้วงจรปรับตั้งใหม่ทำงานตั้งแต่ความถี่ประมาณ 0.1 Hz ขึ้นไป นอกจากนี้ค่าคงที่เวลาของเฟสชดเชยแบบนำหน้า และล่าหลัง $T_{1,C}$ $T_{2,C}$ $T_{3,C}$ $T_{4,C}$ $T_{1,L}$ $T_{2,L}$ $T_{3,L}$ และ $T_{4,L}$ ทำหน้าที่ปรับเฟสชดเชย และความเหมาะสมของสัญญาณทำเสถียรภาพ ส่วนค่าขอบบน (Max. Limit) และขอบล่าง (Min. Limit) ได้กำหนดให้อยู่ในช่วง ± 0.2 p.u. ค่าพารามิเตอร์ของ POD ได้ถูกออกแบบด้วยหลักความคงทน และการย้ายโพลภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ ซึ่งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีหึ่งห้อย หมายเหตุ PSS ของ SG ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีโครงสร้างลำดับชั้นแบบเดียวกันกับ POD ของ DFIG

2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

แบบจำลองของ SG ในวิทยานิพนธ์นี้ทำการแทนด้วยแบบจำลองอันดับสี่ โดยสามารถหาได้จากสมการ สมการการแกว่ง (Swing Equation) และสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในชั่วคราว (Transient Internal Electro-motive Force) ในแนวแกน d และในแนวแกน q ดังนี้

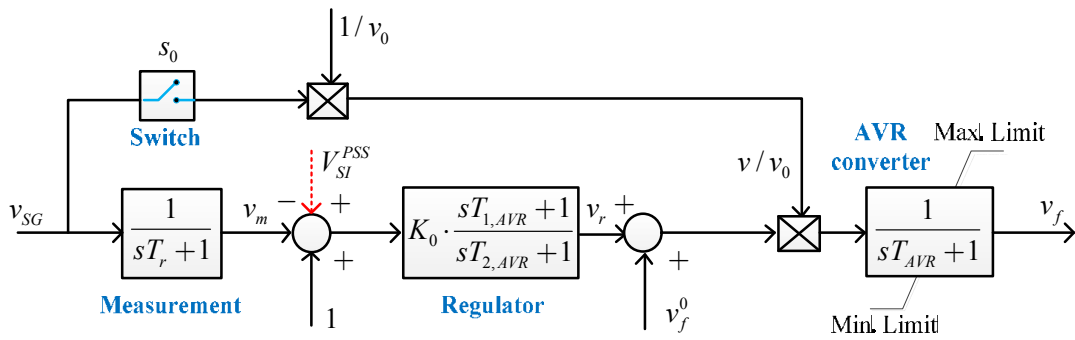
$$\dot{\delta}_{SG} = 1 - \omega_{SG} \quad (2.19)$$

$$\dot{\omega}_{SG} = (P_m - P_e - D + D\omega_{SG}) / M \quad (2.20)$$

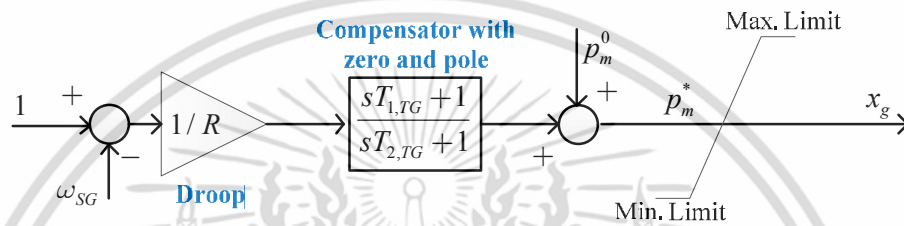
$$\dot{E}'_q = (v_f - E'_q + I_d(X_d - X'_d)) / T'_{d0} \quad (2.21)$$

$$\dot{E}'_d = (-E'_d - I_q(X_q - X'_q)) / T'_{q0} \quad (2.22)$$

โดยที่	δ_{SG}	คือ มุมของโรเตอร์ (Rotor Angle)
	ω_{SG}	คือ ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)
	P_m	คือ กำลังทางกล (Mechanical Power)
	P_e	คือ กำลังทางไฟฟ้า (Electrical Power)
	D	คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง (Damping Coefficient)
	M	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant)
	E'_d, E'_q	คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในชั่วคราวในแนวของแกน d และแกน q
	v_f	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขดฟิลด์ (Field Voltage)
	X_d, X_q	คือ รีแอกแตนซ์ (Reactance) ในแนวของแกน d และแกน q
	X'_d, X'_q	คือ รีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Transient Reactance) ในแนวของแกน d และแกน q
	I_d, I_q	คือ กระแส (Current) ที่แนวของแกน d และแกน q
	T'_{d0}, T'_{q0}	คือ ค่าคงที่เวลาชั่วคราว (Transient Time Constant) ของแกน d และแกน q



(ก) AVR IEEE Type III



(ข) Turbine governor IEEE Type II

รูปที่ 2.7 AVR IEEE type III และ Turbine governor IEEE type II

นอกจากนี้ SG แต่ละตัวได้ติดตั้งตัวควบคุมแรงดัน AVR IEEE type III และตัวควบคุมความเร็ว Turbine governor IEEE type II [14] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 (ก) และ 2.7 (ข) ตามลำดับ สมการเชิงอนุพันธ์ของ AVR IEEE type III แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{v}_m &= (v_{SG} - v_m) / T_r \\ \dot{v}_r &= (K_0 (1 - \frac{T_{1,AVR}}{T_{2,AVR}}) ((1 + V_{SI}^{PSS}) - v_m) - v_r) / T_{2,AVR} \\ \dot{v}_f &= ((v_r + K_0 \frac{T_{1,AVR}}{T_{2,AVR}} ((1 + V_{SI}^{PSS}) - v_m) + v_f^0) \cdot (1 + s_0 (\frac{v}{v_0} - 1)) - v_f) / T_{AVR} \end{aligned} \quad (2.23)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ของ Turbine governor IEEE type II แสดงได้ดังนี้

$$\dot{x}_g = \left(\frac{1}{R} (1 - \frac{T_{1,TG}}{T_{2,TG}}) (1 - \omega_{SG}) - x_g \right) / T_{2,TG} \quad (2.24)$$

โดยที่ v_m v_r และ v_f คือ แรงดันที่ได้จาก เครื่องวัด ตัวควบคุมแรงดัน และฟิลว์ ตามลำดับ

x_g คือ แรงบิดของ Turbine governor

\dot{x}_g คือ สมการเชิงอนุพันธ์ของ x_g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R	คือ ตัวควบคุมความเร็ว (Droop)
V_{SI}^{PSS}	คือ สัญญาณทำเสถียรภาพจาก PSS
ω_{SG}	คือ ความเร็วโรเตอร์ของ SG
v_{SG}	คือ แรงดันขั้วของ SG (Terminal voltage of SG)
v_f^0	คือ ค่าเริ่มต้นของแรงดันฟิวด์
s^0	คือ สวิตช์
T_{AVR} และ K_0	คือ ค่าคงที่เวลา และอัตราขยายของ AVR ตามลำดับ
\dot{v}_m \dot{v}_r และ \dot{v}_f	คือ สมการเชิงอนุพันธ์ของ v_m v_r และ v_f ตามลำดับ
$T_{1,AVR}$ และ $T_{2,AVR}$	คือ ซีโร และโพลของ AVR ตามลำดับ
$T_{1,TG}$ และ $T_{2,TG}$	คือ ซีโร และโพลของ TG ตามลำดับ

2.4 วิธีออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ

ในหัวข้อ 2.4 จะแบ่งวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ ดังนี้ 2.4.1 การทำระบบให้เป็นเชิงเส้น จากนั้นหัวข้อย่อย 2.4.2 ได้วิเคราะห์แบบจำลองของระบบที่พิจารณาเวลาหน่วง และความไม่แน่นอนต่างๆของระบบ ในหัวข้อ 2.4.3 ได้อธิบายการออกแบบฟังก์ชันกวดถูประสงคโดยใช้หลักความคงทน และสุดท้ายหัวข้อ 2.4.4 ได้อธิบายการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีหึ่งห้อย

2.4.1 การทำระบบให้เป็นเชิงเส้น

เนื่องจากระบบที่ใช้ในการศึกษาเป็นระบบ และแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear model and system) เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบโดยใช้หลักความคงทน และวิเคราะห์โหมดการแกว่ง ณ จุดๆหนึ่งของระบบ ขั้นแรกต้องทำระบบให้เป็นเชิงเส้นก่อนโดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) ดังนั้นรูปที่ 2.1 สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการ (2.25)

$$\begin{aligned}\Delta \dot{X} &= A\Delta X + B\Delta U \\ \Delta Y &= C\Delta X + D\Delta U \\ \Delta U &= K\Delta Y\end{aligned}\quad (2.25)$$

เมื่อ

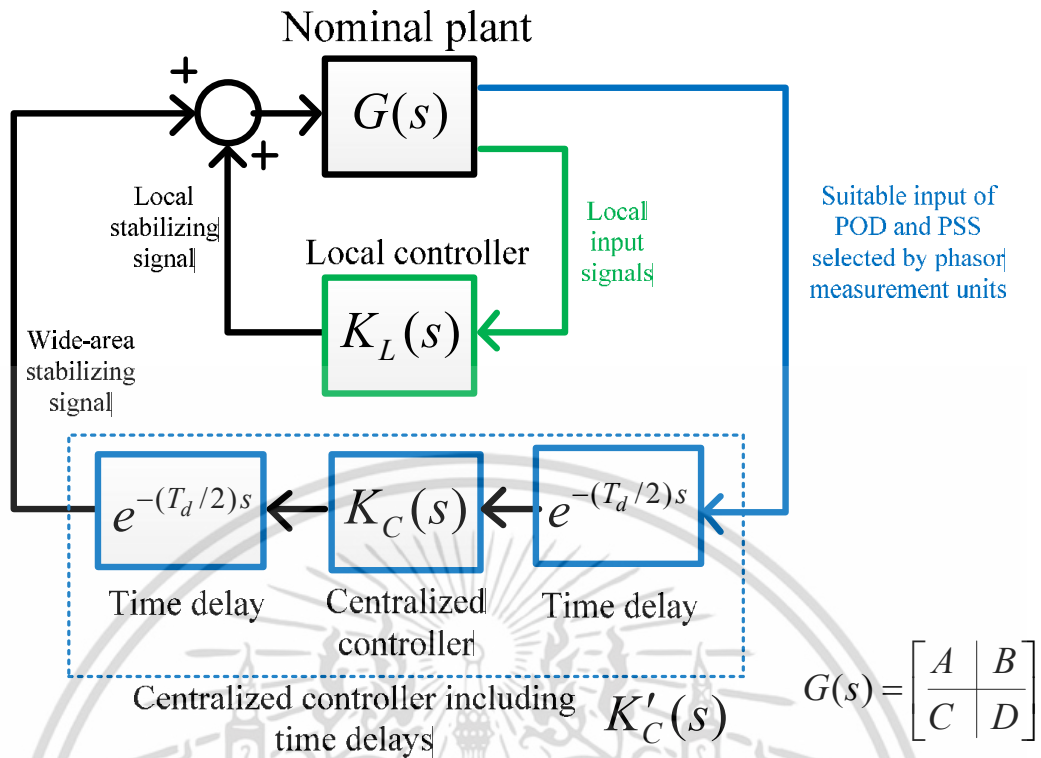
$$\begin{aligned}\Delta X &= [\Delta \delta_{SG} \quad \Delta \omega_{SG} \quad \Delta E'_d \quad \Delta E'_q \quad \Delta v_m \quad \Delta v_r \quad \Delta v_f \quad \Delta x_g \quad \Delta v_{DFIG} \quad \Delta \omega_{DFIG} \quad \Delta \theta_p \quad \Delta i_{dr} \quad \Delta i_{qr}]^T \\ \Delta U &= [\Delta V_{SI}^{POD} \quad \Delta V_{SI}^{PSS}]^T\end{aligned}\quad (2.26)$$

จากรูปที่ 2.6 โครงสร้างลำดับชั้นของ POD และ PSS ได้แบ่งเป็นการควบคุมจากศูนย์กลาง และการควบคุมจากท้องถิ่น ดังนั้น ΔV_{SI}^{POD} และ ΔV_{SI}^{PSS} สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.27)

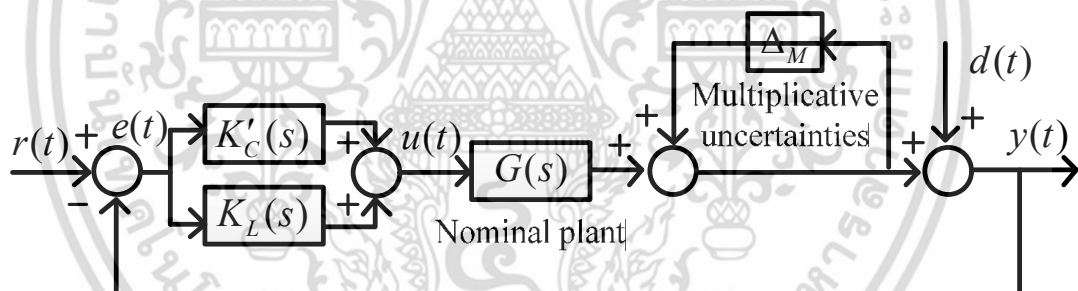
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\Delta V_{SI}^{POD} &= [\Delta V_{SI,C}^{POD} \quad \Delta V_{SI,L}^{POD}] \\ \Delta V_{SI}^{PSS} &= [\Delta V_{SI,C}^{PSS} \quad \Delta V_{SI,L}^{PSS}]\end{aligned}\quad (2.27)$$

- โดยที่ ABC และ D คือ เมตริกซ์ของ ระบบ อินพุต เอาท์พุต และฟีดฟวาคตามลำดับ
- K คือ เมตริกซ์แนวทแยงของ POD และ PSS
- ΔX และ $\Delta \dot{X}$ คือ การเบี่ยงเบนของเวกเตอร์สถานะ และสมการเชิงอนุพันธ์ของเวกเตอร์สถานะ ตามลำดับ
- ΔU คือ เอาท์พุตเวกเตอร์ของสัญญาณทำเสถียรภาพจาก POD และ PSS
- ΔY คือ เอาท์พุตเวกเตอร์จากระบบ (อินพุตเวกเตอร์ของ POD และ PSS ซึ่งวัดโดยอุปกรณ์วัดเฟสเซอร์)
- $\Delta \delta_{SG}$ คือ การเบี่ยงเบนของมุมของโรเตอร์ของ SG
- $\Delta \omega_{SG}$ คือ การเบี่ยงเบนของความเร็วโรเตอร์ของ SG
- Δv_m คือ การเบี่ยงเบนของแรงดันที่วัดได้ของ Automatic voltage regulator (AVR)
- Δv_r คือ การเบี่ยงเบนของแรงดันควบคุมของ AVR
- Δv_f คือ การเบี่ยงเบนของแรงดันที่ฟิลต์ของ AVR
- Δx_g คือ การเบี่ยงเบนของสัญญาณของ Turbine governor
- $\Delta E'_d$ และ $\Delta E'_q$ คือ การเบี่ยงเบนของแรงดันในสถานะชั่วคราวในแกน d และ q ของ SG ตามลำดับ
- Δv_{DFIG} คือ การเบี่ยงเบนของความเร็วลม
- $\Delta \omega_{DFIG}$ คือ การเบี่ยงเบนของความเร็วโรเตอร์ของ DFIG
- $\Delta \theta_p$ คือ การเบี่ยงเบนของมุมใบพัดของ DFIG
- T คือ ทรานส์โพสของเมตริกซ์
- Δi_{dr} และ Δi_{qr} คือ การเบี่ยงเบนของกระแสที่โรเตอร์ของ DFIG ในแกน d และ q ตามลำดับ
- $\Delta V_{SI,C}^{POD}$ และ $\Delta V_{SI,L}^{POD}$ คือ สัญญาณทำเสถียรภาพจากศูนย์ควบคุมส่วนกลาง และท้องถิ่นของ POD ตามลำดับ
- $\Delta V_{SI,C}^{PSS}$ และ $\Delta V_{SI,L}^{PSS}$ คือ สัญญาณทำเสถียรภาพจากศูนย์ควบคุมส่วนกลาง และท้องถิ่นของ PSS ตามลำดับ



(ก) ระบบที่ไม่มีการติดตั้งตัวควบคุม ตัวควบคุมจากศูนย์กลาง และตัวควบคุมจากท้องถิ่น



(ข) ระบบป้อนกลับระบบป้อนกลับที่มีความไม่แน่นอนเชิงผลคูณ

รูปที่ 2.8 แบบจำลองของระบบที่พิจารณาเวลาหน่วง และความไม่แน่นอนของระบบ

2.4.2 แบบจำลองของระบบที่พิจารณาเวลาหน่วง และความไม่แน่นอนต่างๆ ของระบบ

ระบบที่พิจารณาเวลาหน่วงเนื่องจากการคมนาคมของสัญญาณทำเสถียรภาพได้แสดงในรูป 2.8 (ก) เนื่องจากตัวควบคุมจากศูนย์กลางตั้งอยู่ที่ศูนย์การควบคุมส่วนกลางซึ่งไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นเวลาหน่วงจึงมีผลต่อตัวควบคุมจากศูนย์กลางเท่านั้น ในการควบคุมจากศูนย์กลาง เวลาหน่วง (Time delay) ระหว่างอุปกรณ์วัดเฟสเซอร์ และศูนย์ควบคุมส่วนกลาง ($T_d/2$) และระหว่างศูนย์ควบคุมส่วนกลางกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($T_d/2$) ซึ่งได้ประมาณค่าเวลาหน่วงโดยใช้แบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันดับหนึ่งของ Padé (First-order Padé approximation) [16-18] ดังสมการ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ

$$K'_C(s) = e^{-(T_d/2)s} \cdot K_C(s) \cdot e^{-(T_d/2)s} \quad (2.28)$$

$$e^{-(T_d/2)s} \approx \frac{1 - (T_d/2)s}{1 + (T_d/2)s} \quad (2.29)$$

เพื่อที่จะป้องกันสัญญาณทำเสถียรภาพจาก POD และ PSS ขาดหายเนื่องจากการคมนาคมล้มเหลว หรือ Communication failure ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก้ปัญหาโดยติดตั้งตัวควบคุม POD และ PSS ที่ควบคุมท้องถิ่นท้องถิ่น (Local controllers) โดยใช้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจาก DFIG และ SG เป็นสัญญาณอินพุตให้กับ POD และ PSS ตามลำดับ ซึ่งเป็นสัญญาณที่อยู่ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อสามารถหลีกเลี่ยงเวลาหน่วง และแก้ไขปัญหา Communication failure ได้ ส่วนนิยามตัวแปรในรูปที่ 2.8 ได้นิยามดังนี้

โดยที่ $G(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุม (Nominal plant)
 $K_L(s)$ คือ ตัวควบคุม POD และ PSS ของศูนย์ควบคุมจากส่วนกลาง
 $K_C(s)$ คือ ตัวควบคุม POD และ PSS ของการควบคุมจากท้องถิ่น
 $K'_C(s)$ คือ ตัวควบคุม POD และ PSS ของศูนย์ควบคุมจากส่วนกลางที่คิดผลกระทบของเวลาหน่วง
 T_d คือ เวลาหน่วง

การพิจารณาความคงทนของตัวควบคุม POD และ PSS ต่อความไม่แน่นอนต่างๆของระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของโหลด ฯลฯ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองความไม่แน่นอนต่างๆของระบบในรูประบบป้อนกลับที่มีความไม่แน่นอนเชิงผลคูณ (Inverse output multiplicative perturbation) [19] ซึ่งแสดงรายละเอียดในรูป 2.7 (ข)

โดยที่ Δ_M คือ ความไม่แน่นอนแบบเชิงผลคูณของระบบ (Multiplicative uncertainties)
 $r(t)$ คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง
 $e(t)$ คือ ผลต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณทำเสถียรภาพที่มาจากตัวควบคุม
 $u(t)$ คือ อินพุตของระบบ (สัญญาณทำเสถียรภาพของตัวควบคุม POD และ PSS)
 $y(t)$ คือ เอาท์พุตของระบบ (อินพุตของ POD และ PSS)
 $d(t)$ คือ สิ่งรบกวนจากภายนอก

จากทฤษฎีอัตราขยายขนาดเล็ก [18], [19] และรูปที่ 2.8 (ข) ระบบจะเสถียรก็ต่อเมื่อ

$$\|\Delta_M\|_\infty < 1 / \|(I + G(s)(K'_C(s) + K_L(s)))^{-1}\|_\infty \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ γ_∞ คือตัวชี้วัดเสถียรภาพความคงทน (Robust stability margin index)

$$\gamma_\infty = \left\| (I + G(s)(K_C'(s) + K_L(s)))^{-1} \right\|_\infty \quad (2.31)$$

โดยที่ $\| \cdot \|_\infty$ คือ นอร์มนันต์ของเมตริกซ์ (Infinity norm)

I คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix)

ในสมการที่ (2.30) และ (2.31) เมื่อค่า γ_∞ มีค่าต่ำสุด จะทำให้เสถียรภาพความคงทน (Robust stability margin) มีค่าสูงสุด

2.4.3 การออกแบบฟังก์ชันก่อดึงประสงค์โดยใช้หลักความคงทน และการย้ายโพลภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้กล่าวไว้ว่า ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพความคงทน (Robust stability margin) และสมรรถนะความหน่วง (Damping performance) ของระบบ คือกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ SG [20] กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ DFIG [21] และเวลาหน่วง [22] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวแปรเหล่านี้ในการกำหนด และออกแบบค่าความหน่วงของระบบ (Damping ratio: ζ) และ γ_∞ ภายใต้จุดการทำงานที่เป็นไปได้ทั้งหมด (All possible scenarios: *allsce*) ของระบบ ซึ่งตัวแปรทั้งสามตัวนี้ได้เขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ \mathbf{U}_{sc} ที่จุดทำงานที่ sc ใดๆ เมื่อ $sc = 1, \dots, allsce$ ดังนี้

$$\mathbf{U}_{sc} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{SG,h} \\ \mathbf{P}_{DFIG,k} \\ \mathbf{T}_{d,l} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{SG,h} &= [P_{SG1,1} \ P_{SG2,2} \ \dots \ P_{SGns,nps}]_{(nps \times ns)}^T \\ \mathbf{P}_{DFIG,k} &= [P_{DFIG1,1} \ P_{DFIG2,2} \ \dots \ P_{DFIGnd,npd}]_{(npd \times nd)}^T \\ \mathbf{T}_{d,l} &= [T_{d,1} \ T_{d,2} \ \dots \ T_{d,ntd}]_{(1 \times ntd)} \end{aligned} \quad (2.33)$$

ในสมการ (2.33) $\mathbf{P}_{SG,h}$ คือเวกเตอร์ของกำลังไฟฟ้าของ SG ที่จ่ายเข้าสู่ระบบตัวที่ i ที่จุดการทำงานที่ h ซึ่งเขียนได้เป็น $P_{SGi,h}$ เมื่อ $i = 1, \dots, ns$ และ $h = 1, \dots, nps$ เพื่อให้ง่ายต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ $P_{SGi,h}$ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เขียน $P_{SGi,h}$ ให้อยู่ในรูปของอนุกรมเลขคณิตดังนี้

$$P_{SGi,nps} = P_{SGi,1} + (nps - 1)d_{SGi} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Scenario sc^{th}	Variation of output powers of SGs	Variation of output powers of DFIGs	Variation of time delay	Calculated Eqs. (2.38), (2.39) $\gamma_{\infty,sc}, \zeta_{m,sc}$
	$P_{SGi,h}$ $h = 1, \dots, nps$ $i = 1, \dots, ns$	$P_{DFIGj,k}$ $k = 1, \dots, npd$ $j = 1, \dots, nd$	$T_{d,l}$ $l = 1, \dots, ntd$	
1 • sc • $allsce$	1 • h • nps	1 • k • npd	1 • l • ntd	$\gamma_{\infty,1}, \zeta_{m,1}$ • • $\gamma_{\infty,sc}, \zeta_{m,sc}$ • • $\gamma_{\infty,allsce}, \zeta_{m,allsce}$

รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการหาค่า $\zeta_{m,sc}$ และ $\gamma_{\infty,sc}$

โดยที่ ns คือ จำนวนของ SG
 nps คือ จำนวนของจุดการทำงานของ SG
 d_{SGi} คือ ผลต่างร่วมของอนุกรมเลขคณิต $P_{SGi,h}$
 $P_{DFIGj,k}$ ในสมการ (2.33) คือเวกเตอร์ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบของ DFIG ตัวที่ j ที่จุดการทำงานที่ k ซึ่งเขียนได้เป็น $P_{DFIGj,k}$ เมื่อ $j = 1, \dots, nd$ และ $k = 1, \dots, npd$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของลำดับเลขคณิตดังนี้

$$P_{DFIGj,npd} = P_{DFIGj,1} + (npd - 1)d_{DFIGj} \quad (2.35)$$

โดยที่ nd คือ จำนวนของ DFIG
 npd คือ จำนวนของจุดการทำงานของ DFIG
 d_{DFIGj} คือ ผลต่างร่วมของอนุกรมเลขคณิต $P_{DFIGj,k}$

สุดท้ายในสมการที่ (2.33) $T_{d,l}$ คือเวกเตอร์ของเวลาหน่วงตัวที่ l เมื่อ $l = 1, \dots, ntd$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอนุกรมเลขคณิตดังนี้

$$T_{d,ntd} = T_{d,1} + (ntd - 1)d_{Td} \quad (2.36)$$

โดยที่ ntd คือ จำนวนของเวลาหน่วง

d_{Td} คือ ผลต่างร่วมของอนุกรมเลขคณิตของ $T_{d,l}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการ (2.34-2.36) จำนวนเหตุการณ์ทั้งหมด (*allsce*) ที่เป็นไปได้สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$allsce = (nps)^{ns} \times (npd)^{nd} \times ntd \quad (2.37)$$

การหาค่า ζ ของโหมดการแกว่งที่ m และ γ_{∞} ของจุดการทำงานที่ sc ใดๆ ($\zeta_{m,sc}$ และ $\gamma_{\infty,sc}$ ตามลำดับ) จากค่า \mathbf{U}_{sc} ได้แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

หาค่าไอเกนแวลูที่ตรงกับโหมดการแกว่งที่ m ($\lambda_{m,sc}$) จากเมทริกซ์วงปิด (Closed-loop system matrix: A_{cl}) เมื่อ $A_{cl} = A + BK$ ซึ่งค่าไอเกนแวลูที่ตรงกับโหมดการแกว่ง m ที่จุดการทำงาน sc ใดๆของค่า \mathbf{U}_{sc} หาได้จาก $\lambda_{m,sc} = -\sigma_{m,sc} \pm j\omega_{m,sc}$ ดังนั้นค่า $\zeta_{m,sc}$ สามารถหาได้จาก

$$\zeta_{m,sc} = \frac{-\sigma_{m,sc}}{\sqrt{\sigma_{m,sc}^2 + \omega_{m,sc}^2}} \quad (2.38)$$

จากนั้นค่า $\gamma_{\infty,sc}$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\gamma_{\infty,sc} = \|(I + G_{sc}(s)(K_L(s) + K'_{C,sc}(s)))^{-1}\|_{\infty} \quad (2.39)$$

โดยที่ $G_{sc}(s)$ และ $K'_{C,sc}(s)$ คือจุดการทำงานที่ sc ใดๆของ $G(s)$ และ $K'_C(s)$ ตามลำดับ $\sigma_{m,sc}$ และ $\omega_{m,sc}$ คือ ส่วนจริง และส่วนจินตภาพของไอเกนแวลู $\lambda_{m,sc}$ ที่โหมดการแกว่ง m ตามลำดับ

ในวิทยานิพนธ์นี้สมมติให้ γ_{∞}^{\min} และ ζ_m^{\max} คือค่าต่ำสุดและสูงสุดของ $\gamma_{\infty,sc}$ และ $\zeta_{m,sc}$ ตามลำดับ ซึ่งหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma_{\infty}^{\min} &= \text{minimum}(\gamma_{\infty,sc}) \\ \zeta_m^{\max} &= \text{maximum}(\zeta_{m,sc}) \end{aligned} \quad (2.40)$$

ในการวิเคราะห์สมการ (2.40) ค่า γ_{∞}^{\min} หมายถึงเสถียรภาพความคงทนสูงสุดต่อความไม่แน่นอนต่างๆของระบบ หลักการคือเมื่อทำให้ค่าผลต่างระหว่าง $\gamma_{\infty,sc}$ และ γ_{∞}^{\min} มีค่าต่ำสุด จะทำให้เสถียรภาพความคงทนที่ทุกจุดการทำงาน sc ใดๆ มีค่าสูงสุด เช่นเดียวกัน เมื่อทำให้ค่าผลต่างระหว่าง ζ_m^{\max} และ $\zeta_{m,sc}$ มีค่าต่ำสุด สมรรถภาพความหน่วงของระบบต่อสิ่งรบกวนจากภายนอกจะมีค่ามากที่สุด หลักการวิเคราะห์นี้สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันก่่วัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการออกแบบพารามิเตอร์ของ POD และ PSS ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Minimize } \text{RF}_1 \sum_{sc=1}^{allsce} (\gamma_{\infty,sc} - \gamma_{\infty}^{\min}) + \sum_{m=1}^{OS} \text{RF}_2 \sum_{sc=1}^{allsce} (\zeta_m^{\max} - \zeta_{m,sc}) \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} \text{Subject to } \zeta_m^{\max} &\geq \zeta_{spec}, \gamma_{\infty}^{\min} \leq \gamma_{\infty,spec} \\ K^{\min} &\leq K_{stab,C}, K_{stab,L} \leq K^{\max} \\ T_{1,3}^{\min} &\leq T_{C1,C3}, T_{L1,L3} \leq T_{1,3}^{\max} \\ T_{2,4}^{\min} &\leq T_{C2,C4}, T_{L2,L4} \leq T_{1,3}^{\max} \end{aligned} \quad (2.42)$$

เมื่อ RF_1 และ RF_2 สามารถหาได้จากการพิจารณาค่าของ ζ_{spec} และ $\gamma_{\infty,spec}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{RF}_1 &= \gamma_{\infty}^{\min} / \gamma_{\infty,spec} \\ \text{RF}_2 &= \zeta_{spec} / \zeta_m^{\max} \end{aligned} \quad (2.43)$$

โดยที่ ζ_{spec} และ $\gamma_{\infty,spec}$ คือ ค่าที่กำหนดของ ζ_m^{\max} และ γ_{∞}^{\min} ตามลำดับ
 OS คือ จำนวนโหนดการแกว่งที่ต่ำกว่า 5 % ($OS = 6$ โหนด)
 K^{\min} และ K^{\max} คือ ค่าต่ำสุด และสูงสุดของอัตราขยาย $K_{stab,C}$ และ $K_{stab,L}$
 $T_{1,3}^{\min}$ และ $T_{1,3}^{\max}$ คือ ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดของค่าคงที่ของเวลา $T_{C1,C3}$ และ $T_{L1,L3}$
 $T_{2,4}^{\min}$ และ $T_{2,4}^{\max}$ คือ ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดของค่าคงที่ของเวลา $T_{C2,C4}$ และ $T_{L2,L4}$
 RF_1 และ RF_2 คือ ตัวถ่วงน้ำหนักของเทอมแรก และเทอมสองของ (2.37) ตามลำดับ

หาค่าที่เหมาะสมของสมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (2.41) โดยวิธีหิ่งห้อย (Firefly algorithm) [23] ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อย่อถัดไป

2.4.4 วิธีหิ่งห้อย (Firefly algorithm)

วิธีการหิ่งห้อย [23] หรืออัลกอริทึมหิ่งห้อยเป็นวิธีเมตาฮีริสติก (meta-heuristic) ที่ใช้ในการหาค่าตอบที่เหมาะสม โดยเลียนแบบพฤติกรรมการส่องแสง และเข้าหากันของหิ่งห้อย วิธีการหิ่งห้อยเป็นวิธีการที่ใช้ในการหาค่าตอบที่เหมาะสมในเชิงระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ [24] ซึ่งให้ผลดีกว่าวิธีถอดแบบพันธุกรรม (Genetic algorithm) และวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle swarm) [25], [26]

สมการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อย v ที่ถูกดึงดูดโดยหิ่งห้อยตัวอื่น w (หรือที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (2.41) ที่ดีกว่า) สามารถหาได้จาก

$$x_{v+1} = x_v + \beta_0 e^{-\epsilon r_{vw}^2} (x_w - x_v) + \alpha_f (\text{rand} - 0.5) \quad (2.44)$$

ระยะทางระหว่างหิ่งห้อยที่ตำแหน่ง v และ w สามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_{vw} = \sqrt{\sum_{z=1}^{nkt} (x_{v,z} - x_{w,z})^2} \quad (2.45)$$

เนื่องจากวิธีหึ่งห้อยได้ประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบของสมการ (2.41) ดังนั้นตำแหน่ง x_v และ x_w ได้ประกอบด้วยพารามิเตอร์ของ POD และ PSS สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_v &= [K_{stabC,stabL}^{cont,v} \quad T_{1C,1L}^{cont,v} \quad T_{2C,2L}^{cont,v} \quad T_{3C,3L}^{cont,v} \quad T_{4C,4L}^{cont,v}]_{((nkt) \times 1)}^T \\ x_w &= [K_{stabC,stabL}^{cont,w} \quad T_{1C,1L}^{cont,w} \quad T_{2C,2L}^{cont,w} \quad T_{3C,3L}^{cont,w} \quad T_{4C,4L}^{cont,w}]_{((nkt) \times 1)}^T \end{aligned} \quad (2.46)$$

โดยที่	α_f	คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสุ่ม
	$rand$	คือ ค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1
	β_0	คือ ค่าความดึงดูดที่ตำแหน่ง $r_{vw}=0$
	ε	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	x_{v+1}	คือ ตำแหน่งใหม่ของ x_v
	r_{vw}	คือ ระยะทางระหว่างหึ่งห้อย v และ w ที่ตำแหน่ง x_v และ x_w ตามลำดับ
	$x_{v,z}$ และ $x_{w,z}$	คือ ค่าพารามิเตอร์ตำแหน่ง z ของ POD หรือ PSS ที่ตรงกับตำแหน่งของ x_v และ x_w ตามลำดับ
	ตัวห้อย v และ w	คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ตำแหน่ง x_v และ x_w ตามลำดับ
	ตัวห้อย $cont$	คือ POD หรือ PSS ที่เหมาะสม (อธิบายในหัวข้อ 3.2)
	nkt	คือ จำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ต้องการหาค่าให้เหมาะสม

เมื่อหึ่งห้อยเคลื่อนที่จากตำแหน่ง x_v ไปสู่ตำแหน่งใหม่ x_{v+1} โดยการแทนค่าสมการ (2.46) ในสมการ (2.44) และ (2.45) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของ POD และ PSS ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าฟังก์ชันกัณฑ์ประสงค์ (2.41) ซึ่งนี่เป็นการเชื่อมโยงกันระหว่างวิธีหึ่งห้อย พารามิเตอร์ของ POD และ PSS และฟังก์ชันกัณฑ์ประสงค์ (2.41) รูปที่ 2.10 แสดง Flow chart ของวิธีการหึ่งห้อย ซึ่งอธิบายแบ่งเป็นขั้นตอน (1)-(8) ได้ดังนี้

- (1) กำหนดค่าเริ่มต้นให้พารามิเตอร์ของ POD และ PSS โดยการสุ่มตำแหน่งพารามิเตอร์ (จำนวนพารามิเตอร์ที่สุ่มได้จากสมการ 2.46)
- (2) คำนวณค่าของฟังก์ชันกัณฑ์ประสงค์ในสมการ (2.41) ซึ่งวิธีการคำนวณแสดงในรูปที่ 2.8 และสมการ (2.32) - (2.40)
- (3) เรียงลำดับหึ่งห้อยด้วยค่าของฟังก์ชันกัณฑ์ประสงค์จากค่ามากไปค่าน้อย (พารามิเตอร์ของ POD และ PSS ที่ทำให้ฟังก์ชันกัณฑ์ประสงค์น้อยที่สุดจะทำให้ตัวควบคุม POD และ PSS มีเสถียรภาพความคงทน และสมรรถนะความหน่วงมากที่สุด)
- (4) คำนวณระยะทางระหว่างหึ่งห้อยสองตัวใดๆ ด้วยสมการ (2.45)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

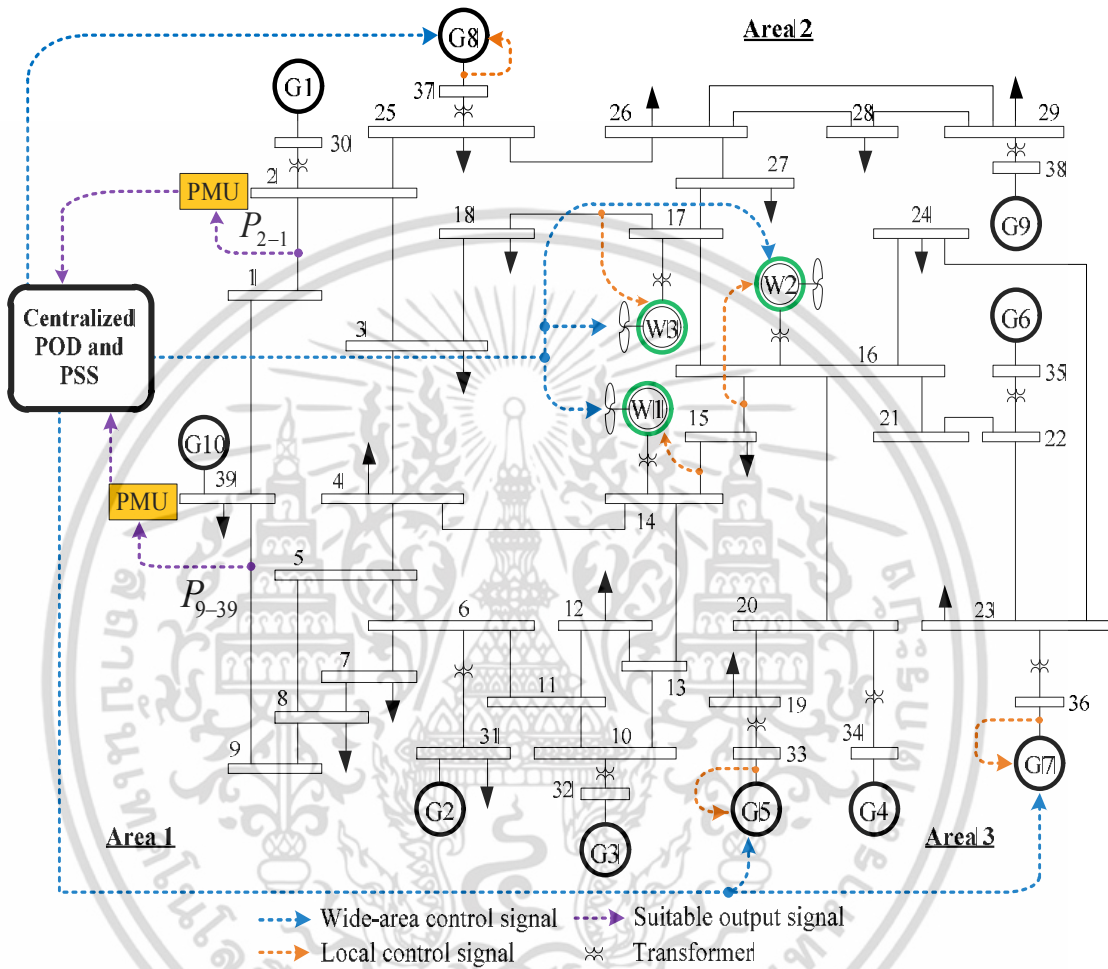


รูปที่ 2.10 Flow chart ของวิธีหึงห้อย

- (5) เคลื่อนที่หึงห้อยไปหาหึงห้อยตัวที่มีแสงมากกว่า (ฟังก์ชันกัณฑ์วัตถุประสงค์ (2.41) ดีกว่า) ด้วยตำแหน่งในสมการ (2.44)
- (6) ตรวจสอบขอบเขตบน และล่างของพารามิเตอร์ของ POD และ PSS
- (7) เพิ่มจำนวนรอบโดย จำนวนรอบ = จำนวนรอบ + 1
- (8) ถ้า จำนวนรอบ = จำนวนรอบสูงสุด ให้หยุดการทำงาน
ถ้า จำนวนรอบ < จำนวนรอบสูงสุด ให้กลับไปขั้นตอนที่ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทดสอบตัวควบคุมจากศูนย์กลาง
และตัวควบคุมจากท้องถิ่น



รูปที่ 3.1 ระบบ New England IEEE 39 bus ที่ใช้ในการศึกษา

3.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษา

ปัญหาการแกว่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาในระบบ New England IEEE-39 bus [27] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.1 ด้วย Base 100 MVA 60 Hz ในระบบนี้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส SG1-SG9 ที่จำลองโดยแบบจำลองอันดับสี่ ส่วน SG10 ใช้ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ่างอิงซึ่งมีความเฉื่อยสูงสุดในระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส SG1-SG10 ได้ติดตั้งระบบ Turbine governor IEEE

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของ DFIG

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
ความยาวใบพัด	75 m
จำนวนใบพัด และจำนวนขั้ว	3, 4
โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์	3 KWs/KVA
อัตราส่วนเกียร์ (Gearbox ratio)	1/89
ความต้านทานของสเตเตอร์ และโรเตอร์ r_s และ r_r	0.01, 0.01 p.u.
รีแอกแตนซ์ของแม่เหล็ก สเตเตอร์ และโรเตอร์ x_m , x_s และ x_r	3.0, 0.1, 0.08 p.u.

ตารางที่ 3.2 ผลวิเคราะห์โหมดการแกว่ง และไอเกนแวลู

โหมดการแกว่ง	ไอเกนแวลู (ความหน่วง %)	โหมดการแกว่ง	ไอเกนแวลู (ความหน่วง %)
1	-0.6376±j10.72 ($\zeta = 6.28\%$)	6	-0.229±j7.68 ($\zeta = 2.98\%$)
2	-0.5220±j9.85 ($\zeta = 5.57\%$)	7	-0.262±j6.24 ($\zeta = 3.87\%$)
3	-0.4190±j9.48 ($\zeta = 4.42\%$)	8	-0.170±j5.33 ($\zeta = 2.68\%$)
4	-0.326±j8.52 ($\zeta = 3.82\%$)	9	-0.057±j3.84 ($\zeta = 1.48\%$)
5	-0.452±j7.94 ($\zeta = 5.67\%$)		

type II และ Automatic voltage regulator IEEE type III [14], [15] เพื่อใช้ในการควบคุมความถี่ และคุมแรงดันของระบบ ตามลำดับ นอกจากนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดบีสองทาง DFIG ขนาดตัวละ 50 MVA ได้ถูกติดตั้งที่บัส 14 16 และ 17 เพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสนับสนุนให้กับระบบ พารามิเตอร์ของ DFIG แสดงได้ในตารางที่ 3.1 จากนั้นได้ทำระบบให้เป็นเชิงเส้นในหัวข้อย่อย 2.3.1 และวิเคราะห์เสถียรภาพพลวัต (Small-signal stability analysis: SSSA) เพื่อดูความหน่วง และโหมดการแกว่งของระบบนี้

ผลการวิเคราะห์ SSSA ได้แสดงดังตารางที่ 3.2 ในระบบนี้มีไอเกนแวลู (Eigenvalue) ซึ่งตรงกับโหมดการแกว่งทั้งหมด 9 โหมดที่สนใจ (อยู่ในช่วงความถี่ 0.2-2.0Hz) ได้แบ่งออกเป็นโหมดการแกว่งในพื้นที่ (Local oscillation modes ~0.8-2.0 Hz) คือโหมด 1-6 และโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ (Inter-area oscillation modes ~ 0.2-0.8 Hz) คือโหมด 7-9 จากผลการวิเคราะห์ SSSA บ่งชี้ได้ว่าโหมดการแกว่งที่ 3 4 6 7 และ 8 มีค่าความหน่วง (ζ) ต่ำกว่า 5% ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรุ้งโหมดการแ่กวง้เหล่านั้โดยใช้วิธีการ Geometric controllability and observability [27-30] วิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาสมของ DFIG และ SG เพื่อที่จะใช้หน้วงการแ่กวง้ของโหมดเหล่านั้ ได้อย่างมีประสิทธิผล เช่นเดียวกับสัญญาณอินพุตที่เหมาสมซึ่งวัดโดย PMUs ให้กับ POD ของ DFIG และ PSS ของ SG ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป

3.2 การเลือกอินพุต และเอาท์พุตที่เหมาสมโดยวิธี Geometric measure of controllability and observability

หลังจากทำ Linearization ตามสมการ (2.1) และวิเคราะห์ SSSA ของระบบที่ใช้ในการศึกษาแล้ว ต่อไปได้ทำการเลือกตำแหน่งติดตั้ง POD และ PSS ที่เหมาสมสำหรับ DFIG และ SG เพื่อทำเสถียรภาพที่ตรงกับโหมดการแ่กวง้ที่สนใจ โดยตำแหน่งที่เหมาสมของ DFIG และ SG ได้พิจารณาโดยวิธี Geometric measure of controllability เมื่อได้ตำแหน่งติดตั้ง POD และ PSS ที่เหมาสมแล้ว ต่อไปได้ทำการเลือกสัญญาณเอาท์พุตที่เหมาสมของระบบเพื่อนำมาใช้เป็นอินพุต ให้กับ POD และ PSS ซึ่งวัดสัญญาณนี้โดยใช้อุปกรณ์วัดเฟสเซอร์โดยพิจารณาจาก Geometric measure of observability สมการของ Geometric measure of controllability and observability [27-30] แสดงได้ดังนี้

$$g_{cg}(m) = \cos(\alpha(\psi_m, B_g)) = \frac{|B_g^T \psi_m|}{\|\psi_m\| \cdot \|B_g^T\|} \quad (3.47)$$

$$g_{oh}(m) = \cos(\eta(\phi_m^T, C_h)) = \frac{|C_h \phi_m|}{\|\phi_m\| \cdot \|C_h\|}$$

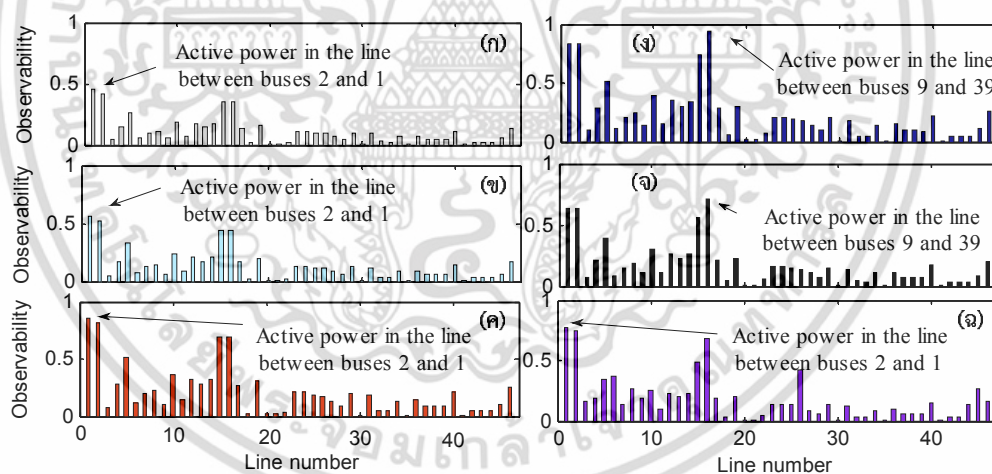
โดยที่ $g_{cg}(m)$ คือ ความสามารถในการควบคุม (Geometric measure of controllability)
 $g_{oh}(m)$ คือ ความสามารถในการมองเห็น (Geometric measure of observability)
 B_g คือ หลัคที่ g ของอินพุตเมตริกซ์ B
 C_h คือ แลวที่ h ของเอาท์พุตเมตริกซ์ C
 ϕ_m และ ψ_m คือ ไอเกนเวกเตอร์ทางขวา (Right eigenvector) และไอเกนเวกเตอร์ทางซ้าย (Left eigenvector) ของโหมดการแ่กวง้ที่ m ตามลำดับ
 $\cos(\alpha(\psi_m, B_g))$ คือ มุมระหว่างไอเกนเวกเตอร์ทางซ้ายของโหมดการแ่กวง้ที่ m และ B_g
 $\cos(\eta(\phi_m^T, C_h))$ คือ มุมระหว่างไอเกนเวกเตอร์ทางขวาของโหมดการแ่กวง้ที่ m และ C_h
 $||$ และ $|||$ คือ ค่าสัมบูรณ์ และค่าประจำแบบยุคลิด ตามลำดับ (Modulus and Euclidean norms of matrix)

ผลการวิเคราะห์ $g_{cg}(m)$ และ $g_{oh}(m)$ ของระบบที่ใช้ในการศึกษาแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้สมการที่ (3.47) ในการเลือกตำแหน่งติดตั้ง POD และ PSS ที่เหมาสมสำหรับ DFIG และ SG และอินพุตที่เหมาสมให้กับ POD และ PSS เพื่อทำเสถียรภาพต่อโหมดการแ่กวง้ที่ m อย่างมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้นี้ได้เห็นใบเซอร์วิชชานี้หากไม่ว่ากรณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ Geometric measure of controllability

Geometric measure of controllability $g_{cg}(m)$						
โหมดการแกว่ง m เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	3	4	6	7	8	9
SG1	0.0153	0.0784	0.1508	0.0074	0.0823	0.0669
SG2	0.0015	0.0122	0.1252	0.0012	0.0063	0.0005
SG3	0.0124	0.0279	0.0998	0.1205	0.0623	0.1518
SG4	0.0007	0.0015	0.0405	0.0518	0.0985	0.0058
SG5	0.2579	0.2472	0.3041	0.0529	0.0060	0.0240
SG6	0.0081	0.0508	0.0526	0.0514	0.0778	0.0514
SG7	0.3730	0.0494	0.0814	0.2003	0.0592	0.0067
SG8	0.0524	0.0022	0.0092	0.2511	0.0091	0.0005
SG9	0.1808	0.0420	0.2229	0.1864	0.1062	0.0088
W1	0.0004	0.0139	0.1572	0.0062	0.0582	0.2881
W2	0.0286	0.0596	0.0801	0.0166	0.1224	0.2664
W3	0.0294	0.0566	0.0820	0.0165	0.1223	0.2661



รูปที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์ Geometric measure of observability

(ก) โหมด 3 (ข) โหมด 4 (ค) โหมด 6 (ง) โหมด 7 (จ) โหมด 8 และ (ฉ) โหมด 9

ประสิทธิผล ในที่นี้ $m=1, \dots, OS$ (โหมดการแกว่ง OS หาได้จากตารางที่ 3.2 คือโหมด 3 4 6 7 8 และ 9 ซึ่งมีความหน่วงน้อยกว่า 5%) ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ Geometric measure of controllability $g_{cg}(m)$ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 สรุปได้ว่าค่า Geometric measure of controllability สูงสุดของแต่ละโหมดแสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG หรือ SG ที่ใช้ทำเสถียรภาพต่อโหมดการแกว่งที่ m มีประสิทธิภาพในการทำเสถียรภาพต่อโหมดการแกว่งที่ m มากที่สุด

เอกสารนี้ที่สุด เอกสารที่สมทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน [27] ได้กล่าวว่ากำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งสามารถใช้เป็นอินพุตให้กับ POD หรือ PSS เพื่อใช้ในการหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้วิเคราะห์ Geometric measure of observability ของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเพื่อใช้เป็นอินพุตให้กับตัวควบคุม POD และ PSS ของตัวควบคุมจากศูนย์กลาง ผลวิเคราะห์ Geometric measure of observability ของกำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งในระบบที่ใช้ในการศึกษาได้แสดงดังรูปที่ 3.2 เช่นเดียวกัน ค่า Observability ที่สูงสุดของแต่ละโหมดการแกว่ง m หมายความว่าอินพุตของ POD หรือ PSS เหล่านี้สามารถใช้ในการหน่วงการแกว่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 3.4 สรุปผลการวิเคราะห์ตำแหน่งที่เหมาะสม DFIG SG และอินพุตที่เหมาะสมของ POD และ PSS เพื่อใช้ในการหน่วงการแกว่งอย่างมีประสิทธิภาพของตัวควบคุมจากศูนย์กลาง จากข้างต้นสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

SG5 ที่ใช้กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 1 และ 2 เป็นอินพุตให้กับ PSS ที่ใช้ในการควบคุมจากศูนย์กลางใช้ในการทำเสถียรภาพโหมดการแกว่ง 4 และ 6

SG7 ที่ใช้กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 1 และ 2 เป็นอินพุตให้กับ PSS ใช้ในการควบคุมจากศูนย์กลางใช้ในการทำเสถียรภาพโหมดการแกว่ง 3

SG8 ที่ใช้กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 9 และ 39 เป็นอินพุตให้กับ PSS ใช้ในการควบคุมจากระยะไกลใช้ในการทำเสถียรภาพโหมดการแกว่ง 7

W1 ที่ใช้กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 1 และ 2 เป็นอินพุตให้กับ POD ใช้ในการควบคุมจากศูนย์กลางใช้ในการทำเสถียรภาพโหมดการแกว่ง 9

W2 ที่ใช้กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 9 และ 39 เป็นอินพุตให้กับ POD ใช้ในการควบคุมจากศูนย์กลางใช้ในการทำเสถียรภาพโหมดการแกว่ง 8

W3 ที่ใช้กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 9 และ 39 เป็นอินพุตให้กับ POD ใช้ในการควบคุมจากศูนย์กลางใช้ในการทำเสถียรภาพโหมดการแกว่ง 8

นอกจากนี้ได้ใช้กำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจาก SG เพื่อเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมจากท้องถิ่นของ PSS ของ SG ส่วนตัวควบคุมจากท้องถิ่นของ POD เนื่องจากพลังงานลมเป็นพลังงานที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจาก DFIG ไม่ควรนำมาใช้เป็นอินพุตให้กับ POD ที่ตัวควบคุมจากท้องถิ่น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้วิเคราะห์ Observability จากกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งที่อยู่ใกล้กับบัสที่ติดตั้ง DFIG เพื่อนำมาเป็นสัญญาณอินพุตให้กับ POD ที่ควบคุมจากท้องถิ่นดังนี้

1) กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 4-14, 13-14 และ 14-15 ได้นำมาหาค่า Observability ที่สูงสุดต่อโหมดการแกว่งที่สนใจ เพื่อนำมาเป็นอินพุตให้กับ POD ที่ควบคุมจากท้องถิ่นของ W1

2) กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 15-16, 16-17, 16-20, 16-21 และ 16-24 ได้นำมาหาค่า Observability ที่สูงสุดต่อโหมดการแกว่งที่สนใจ เพื่อนำมาเป็นอินพุตให้กับ POD ที่ควบคุมจากท้องถิ่นของ W2

3) กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 16-17, 17-18 และ 17-27 ได้นำมาหาค่า Observability ที่สูงสุดต่อโหมดการแกว่งที่สนใจ เพื่อนำมาเป็นอินพุตให้กับ POD ที่ควบคุมจากท้องถิ่นของ W3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์อินพุต และเอาต์พุตที่เหมาะสมของตัวควบคุมจากระยะไกล

โหมดการแกว่ง m	สัญญาณเอาต์พุต: ตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสม	สัญญาณอินพุต : กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งระหว่างบัส
4, 6	SG5	1 and 2
3	SG7	1 and 2
7	SG8	9 and 39
9	W1	1 and 2
8	W2	9 and 39
8	W3	9 and 39

ตารางที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์อินพุต และเอาต์พุตที่เหมาะสมของPOD ที่ควบคุมจากท้องถิ่นของDFIG ที่ความเร็วลมที่พิกัด 12 m/s

Mode	Observability (Wind speed=12m/s)													
	W1				W2						W3			
	P_{m1}	Line 4-14	Line 13-14	Line 14-15	P_{m2}	Line 15-16	Line 16-17	Line 16-20	Line 16-21	Line 16-24	P_{m3}	Line 16-17	Line 17-18	Line 17-27
3 rd	0.004	0.054	0.021	0.109	0.001	0.109	0.098	0.091	0.068	0.047	0.003	0.098	0.101	0.047
4 th	0.001	0.067	0.026	0.134	0.002	0.134	0.120	0.112	0.085	0.058	0.003	0.120	0.124	0.004
6 th	0.001	0.103	0.041	0.210	0.004	0.209	0.189	0.176	0.132	0.091	0.001	0.189	0.195	0.006
4 th	0.001	0.138	0.071	0.209	0.002	0.209	0.200	0.180	0.136	0.093	0.001	0.200	0.203	0.004
8 th	0.005	0.104	0.054	0.158	0.004	0.157	0.150	0.135	0.103	0.071	0.011	0.150	0.153	0.003
9 th	0.029	0.190	0.110	0.110	0.014	0.136	0.130	0.048	0.089	0.061	0.030	0.130	0.133	0.003

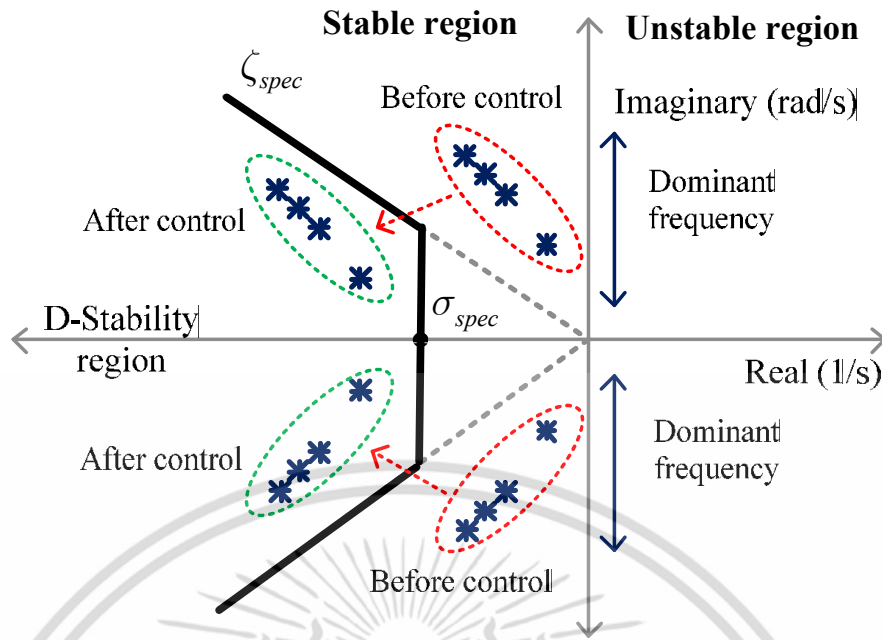
ผลการวิเคราะห์ Observability เพื่อนำมาใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุมท้องถิ่น POD ของ DFIG แสดงดังตารางที่ 3.5 จากข้างต้นสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

W1 ที่ใช้กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 14 และ 15 เป็นอินพุตให้กับ POD ใช้การควบคุมจากท้องถิ่นใช้ในการทำเสถียรภาพโหมดการแกว่ง 6

W2 ที่ใช้กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 15 และ 16 เป็นอินพุตให้กับ POD ใช้การควบคุมจากท้องถิ่นใช้ในการทำเสถียรภาพโหมดการแกว่ง 4 และ 6

W3 ที่ใช้กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งระหว่างบัส 17 และ 18 เป็นอินพุตให้กับ POD ใช้การควบคุมจากท้องถิ่นใช้ในการทำเสถียรภาพโหมดการแกว่ง 4

สามารถสังเกตได้ว่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจาก DFIG มีผลน้อยต่อการควบคุมของแต่ละโหมดการแกว่งที่สนใจ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจาก DFIG ไม่ควรนำมาใช้เป็นอินพุตให้กับ POD ที่ควบคุมจากท้องถิ่น



รูป 3.3 วิธีการย้ายโพล

3.3 ผลการทดสอบตัวควบคุม

หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของการควบคุมลำดับชั้นระยะไกล และการควบคุมลำดับชั้นท้องถิ่นโดยใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีการย้ายโพล (Pole placement) ซึ่งแสดงได้ดังรูป 3.3 และเขียนเป็นฟังก์ชันกวัตต์ได้ดังสมการ (3.48) [9]

$$\text{Minimize } \sum_{m=1}^{OS} DF |\zeta_{spec} - \zeta_m| \tag{3.48}$$

$$\begin{aligned} \text{Subject to } & \zeta_m \geq \zeta_{spec}, \sigma_m \leq \sigma_{spec}, DF = \zeta_{spec} / \zeta_m \tag{3.49} \\ & K^{\min} \leq K_{stab,C}, K_{stab,L} \leq K^{\max} \\ & T_{1,3}^{\min} \leq T_{C1,C3}, T_{L1,L3} \leq T_{1,3}^{\max} \\ & T_{2,4}^{\min} \leq T_{C2,C4}, T_{L2,L4} \leq T_{1,3}^{\max} \end{aligned}$$

- โดยที่ ζ_m คือ ความหน่วงของโหมดการแกว่งที่ m
- σ_{spec} และ σ_{spec} คือ ส่วนจริงที่ได้ และกำหนดไว้ของค่าไอเกนแวลูโหมดที่ m ตามลำดับ
- DF คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณาจาก ζ_m และ ζ_{spec}

หาค่าที่เหมาะสมของสมฟังก์ชันกวัตต์ประสงค์ (2.36) โดยวิธีหิ่งห้อย (Firefly algorithm) โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.6 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนหึ่งห้อยที่ใช้ในการค้นหา	25 ตัว
จำนวนรอบสูงสุดที่ใช้ในการค้นหา	100 รอบ
$\alpha_f \varepsilon$ และ β_0	0.2 1 และ 1
ζ_{spec}	0.05 (หรือ 5%)
K^{\min} และ K^{\max}	0.1 และ 50 p.u.
$T_{1,3}^{\min}$ และ $T_{1,3}^{\max}$	0.1 และ 1 s
$T_{2,4}^{\min}$ และ $T_{2,4}^{\max}$	0.01 และ 0.1 s

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ที่เหมาะสม

Local CPOD and CPSS						
		K_{stab}	T_{L1}	T_{L2}	T_{L3}	T_{L4}
SG5	$K_L(s)$	47.8583	0.8130	0.0725	0.7109	0.0735
SG7	$K_L(s)$	24.2688	0.9635	0.0385	0.7820	0.0129
SG8	$K_L(s)$	40.0140	0.6902	0.0955	0.7688	0.0349
W1	$K_L(s)$	7.0943	0.1321	0.0131	0.4530	0.0142
W2	$K_L(s)$	21.0881	0.8642	0.0495	0.6899	0.0187
W3	$K_L(s)$	45.7868	0.9406	0.0443	0.2541	0.0841
Centralized CPOD and CPSS						
		K_{stab}	T_{L1}	T_{L2}	T_{L3}	T_{L4}
SG5	$K_L(s)$	35.4682	0.010	0.7761	0.0654	0.5925
SG7	$K_L(s)$	37.7343	0.0833	0.3296	0.0526	0.2248
SG8	$K_L(s)$	13.8013	0.0319	0.5554	0.0416	0.2344
W1	$K_L(s)$	33.9851	0.0936	0.7292	0.0848	0.3318
W2	$K_L(s)$	32.7549	0.0415	0.9018	0.0627	0.8566
W3	$K_L(s)$	8.1306	0.0277	0.9634	0.0595	0.3289

ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมลำดับชั้นระยะไกล และตัวควบคุมลำดับชั้นท้องถิ่นที่ออกแบบด้วยสมการ (3.48) จะเรียกว่า “Centralized CPOD and CPSS” และ “Local CPOD and CPSS” ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 3.7 เหตุ Centralized CPOD and CPSS ใช้สัญญาณอินพุต และเอาต์พุตจากตารางที่ 3.4

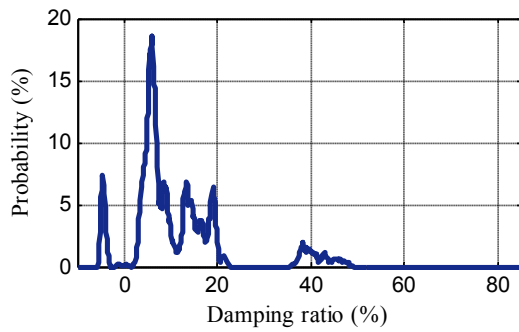
ส่วน Local CPSS ใช้สัญญาณท้องถิ่นเป็นสัญญาณอินพุต (กำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจาก SG) ส่วน Local CPOD ใช้สัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่อยู่ใกล้กับบัสที่ติดตั้ง DFIG (ตารางที่ 3.6) และทั้ง Local CPOD and CPSS ใช้เอาต์พุตจากตารางที่ 3.4

จากนั้นวิเคราะห์ เสถียรภาพพลวัตของตัวควบคุมทั้งสองแบบโดยการดูค่าไอเกนแวลู และความหน่วงของระบบในกรณีศึกษาที่ 1 จากตารางที่ 3.9 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.8 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

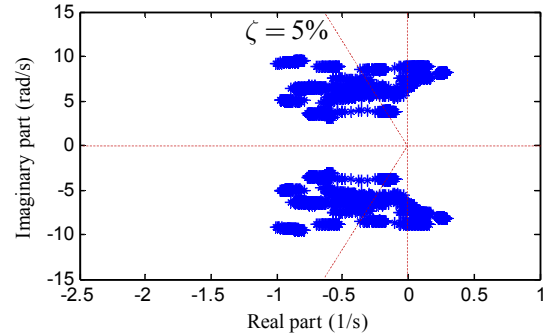
ตารางที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์โอเคนแวลู และโหมดการแกว่ง

Mode	Without POD and PSS	Local CPOD and CPSS	Centralized CPOD and CPSS
1 st	-0.6376±j10.72 (ζ =6.28%)	-1.0522±j10.35 (ζ =10.11%)	-1.2164±j10.51 (ζ =11.50%)
2 nd	-0.5220±j9.85 (ζ =5.57%)	-1.0083±j9.81 (ζ =10.22%)	-1.2260±j9.95 (ζ =12.23%)
3 rd	-0.4190±j9.48 (ζ =4.42%)	-0.9947±j9.59 (ζ =10.32%)	-1.1175±j9.64 (ζ =11.52%)
4 th	-0.326±j8.52 (ζ =3.82%)	-0.9950±j8.92 (ζ =11.09%)	-1.0062±j8.71 (ζ =11.48%)
5 th	-0.452±j7.94 (ζ =5.67%)	-0.7104±j8.35 (ζ =8.48%)	-0.9207±j8.41 (ζ =10.88%)
6 th	-0.6376±j10.72 (ζ =6.28%)	-0.8429±j7.92 (ζ =10.58%)	-0.9680±j7.75 (ζ =12.39%)
7 th	-0.5220±j9.85 (ζ =5.57%)	-0.6947±j6.01 (ζ =11.48%)	-0.8802±j6.51 (ζ =13.40%)
8 th	-0.4190±j9.48 (ζ =4.42%)	-0.7524±j5.52 (ζ =13.51%)	-0.7993±j5.02 (ζ =15.72%)
9 th	-0.326±j8.52 (ζ =3.82%)	-0.6005±j3.42 (ζ =17.29%)	-0.7167±j3.59 (ζ =19.58%)

จากผลการวิเคราะห์โอเคนแวลูแสดงให้เห็นว่าความหน่วงการแกว่งเมื่อไม่มีตัวควบคุม POD และ PSS ซึ่งตรงกับ Without POD and PSS มีค่าต่ำมาก และบางโหมดการแกว่งน้อยกว่า 5% ในทางกลับกัน การติดตั้งตัวควบคุม Local CPOD and CPSS หรือ Centralized CPOD and CPSS สามารถเพิ่มความหน่วงการแกว่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

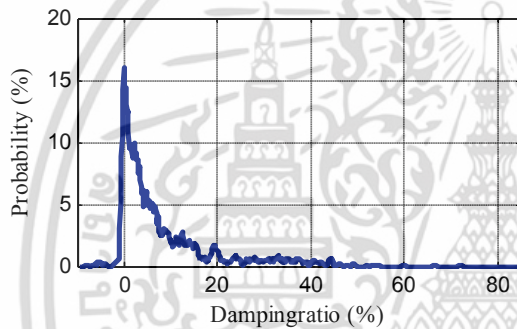


(ก) ความน่าจะเป็น

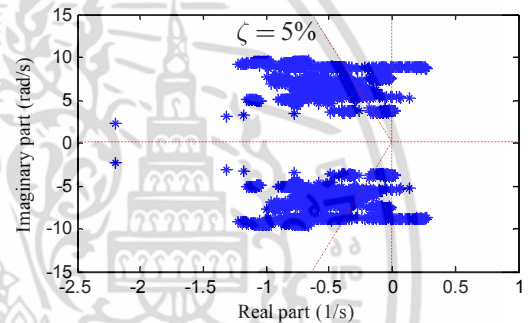


(ข) ทางเดินรากของโหมดการแกว่ง

3.4 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมดการแกว่งทั้ง 9 โหมด
ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Without POD and PSS

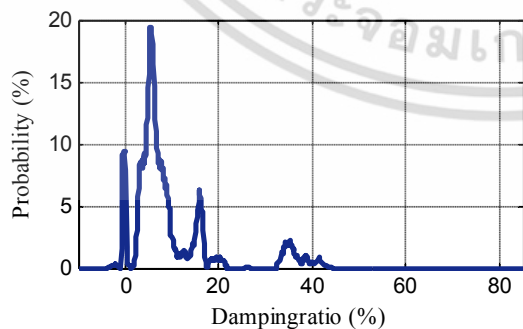


(ก) ความน่าจะเป็น

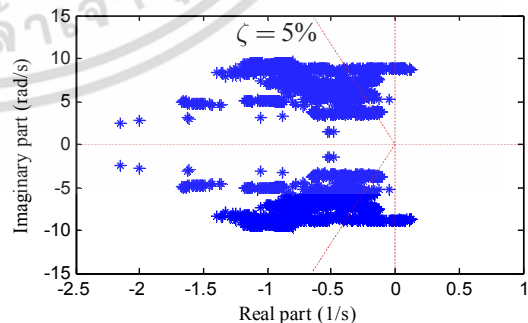


(ข) ทางเดินรากของโหมดการแกว่ง

3.5 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมดการแกว่งทั้ง 9 โหมด
ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Local CPOD and CPSS



(ก) ความน่าจะเป็น



(ข) ทางเดินรากของโหมดการแกว่ง

3.6 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมดการแกว่งทั้ง 9 โหมด
ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Centralized CPOD and CPSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปได้ทำการทดสอบเสถียรภาพพลวัตภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบโดยสังเกตจากการกระจายตัวของทางเดินราก (Locus plot) ของโหมดการแกว่งทั้ง 9 โหมดด้วยวิธี Monte Carlo Simulation (MCS) ในวิทยานิพนธ์นี้ การทำ MCS แต่ละครั้งได้

- 1) ทำการสุ่มค่ากำลังไฟฟ้าของ SG ในช่วง -30% ถึง 30%
- 2) ทำการสุ่มค่ากำลังไฟฟ้าของ DFIG ในช่วง 0-50 MW
- 3) การปลดสายส่งระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 (สายส่งระหว่างบัส 1 และ 2) ระหว่างพื้นที่ 2 และ 3 (สายส่งระหว่างบัส 17 และ 27) และระหว่างพื้นที่ 1 และ 3 (สายส่งระหว่างบัส 7 และ 8)

หมายเหตุ เหตุการณ์ 1) - 3) ได้เกิดขึ้นแบบสุ่ม และพร้อมกันในการทำ MCS แต่ละครั้ง

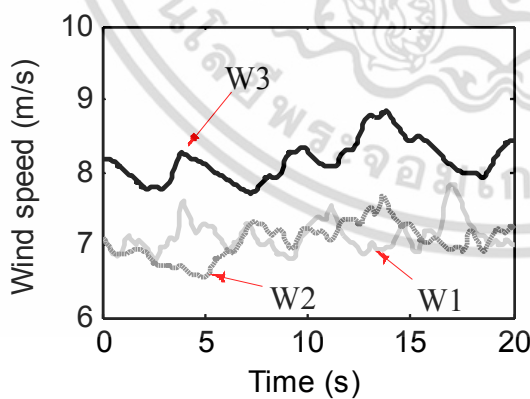
รูปที่ 3.4-3.6 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมดการแกว่งทั้ง 9 โหมดด้วย MCS 10,000 ครั้ง ในกรณี Without POD and PSS, Local CPOD and CPSS และ Centralized CPOD and CPSS ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นทั้งไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุมและตัวควบคุมข้างต้นยังมีบางเหตุการณ์ที่ทำให้โหมดการแกว่งเคลื่อนที่สู่พื้นที่สูญเสียเสถียรภาพ (Unstable region) และยังมีแนวโน้มจะเป็นที่ทำให้ความหวังของโหมดการแกว่งต่ำกว่าหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าตัวควบคุมข้างต้นที่ออกแบบโดยวิธีการย้ายโพล (Pole placement) ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพพลวัตภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายได้ ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมด้วยหลักความคงทนจึงจำเป็น และมีความท้าทายอย่างมาก

ต่อไป ได้ทำการทดสอบตัวควบคุม Local CPOD and CPSS และ Centralized CPOD and CPSS ในเสถียรภาพชั่วคราว โดยจำลองระบบดังรูปที่ 3.1 ในโปรแกรม PSAT [15] ภายใต้กรณีศึกษา 3 กรณีในตารางที่ 3.9 ความไม่แน่นอนต่างๆของระบบ และสิ่งรบกวนจากภายนอกในสามารถจำแนกได้ดังนี้

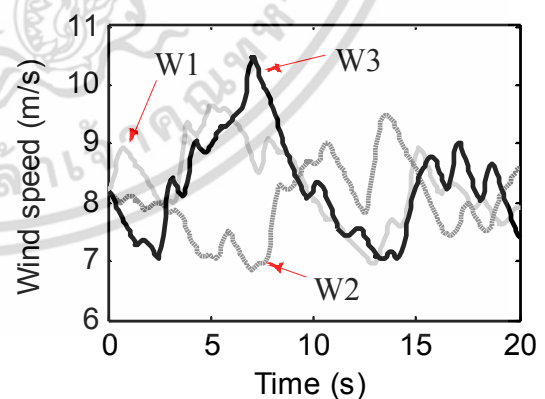
- 1) ความไม่แน่นอนของความเร็วลมในแต่ละ DFIG ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7 ในที่นี้ ได้กำหนดฐานของความเร็วลม (Based wind speed) ที่ 12 m/s นอกจากนี้โหมดการทำงานของ DFIG ได้พิจารณา ดังนี้ โหมด Sub-synchronous ทำงานอยู่ในช่วงความเร็วลม 6-12 m/s โหมด Normal ทำงานอยู่ ณ ความเร็วลม 12 m/s และ โหมด Super-synchronous ทำงานอยู่ในช่วงความเร็วลม 12-24 m/s
- 2) ความไม่แน่นอนซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของ SG (P_{SG})
- 3) สัญญาณจาก POD และ PSS ขาดหายเนื่องจาก Communication failure
- 4) ความผิดพลาดสามเฟสที่เกิดขึ้นในระบบ

ตารางที่ 3.9 กรณีศึกษา (Base 100 MVA, 60 Hz)

กรณีศึกษา	การเปลี่ยนแปลงของ P_{SG}	สิ่งรบกวนจากภายนอก	รูปแบบของลม	Communication failure
1	ไม่เพิ่ม	เกิดความผิดปกติสามเฟสที่บัส 3 ที่เวลา $t=1s$ จากนั้นเวลา $t=1.05s$ ความผิดปกตินี้ได้หายไปเอง	รูปที่ 3.7 (ก)	ไม่เกิด
2	เพิ่มขึ้น 25% ทุก SG	สายส่งระหว่างบัส 4 และ 14 ได้ถูกเปิดออก เกิดความผิดปกติสามเฟสที่บัส 12 ที่เวลา $t=1s$ จากนั้นเวลา $t=1.10s$ ความผิดปกตินี้ได้หายไปเอง	รูปที่ 3.7 (ข)	ไม่เกิด
3	เพิ่มขึ้น 17% ทุก SG	เกิดความผิดปกติสามเฟสที่บัส 15 ที่เวลา $t=1s$ จากนั้นเวลา $t=1.12s$ ความผิดปกตินี้ได้หายไปเอง	รูปที่ 3.7 (ข)	เกิด
4	เพิ่มขึ้น 5% ทุก SG	เกิดความผิดปกติสามเฟสที่บัส 26 ที่เวลา $t=1s$ จากนั้นเวลา $t=1.15s$ ความผิดปกตินี้ได้หายไปเอง	รูปที่ 3.7 (ข)	เกิด



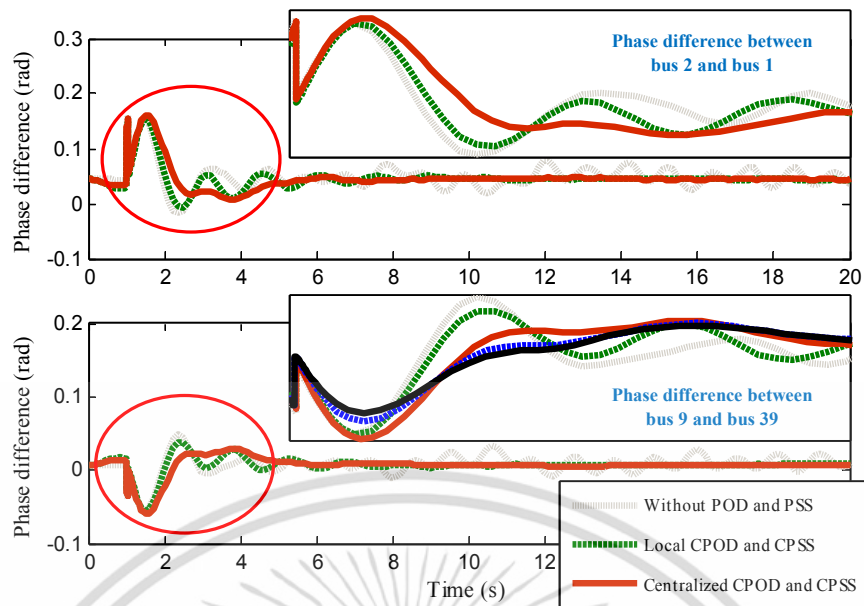
(ก) ความเร็วลมในกรณีศึกษาที่ 1



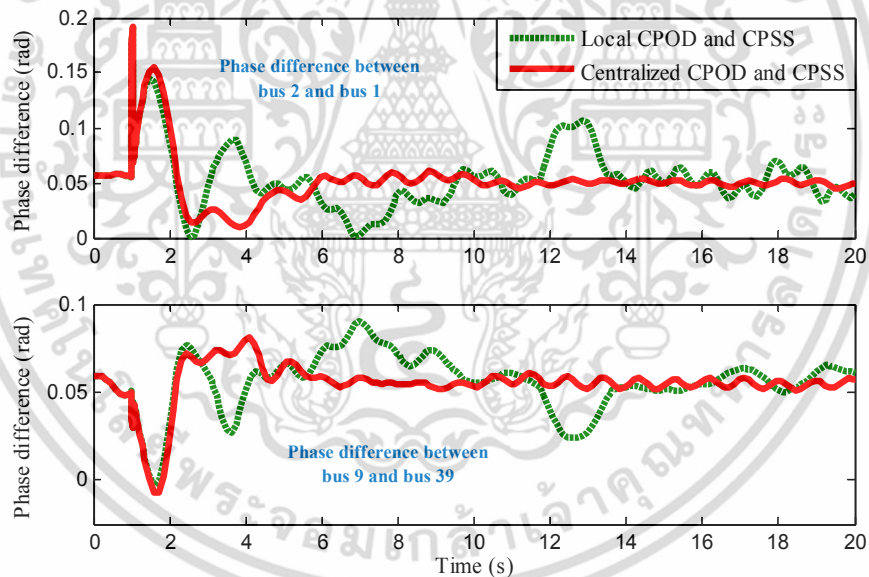
(ข) ความเร็วลมในกรณีศึกษาที่ 2 ถึง 4

รูปที่ 3.7 ความเร็วลมที่ใช้ในกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ 3.9 ผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 2

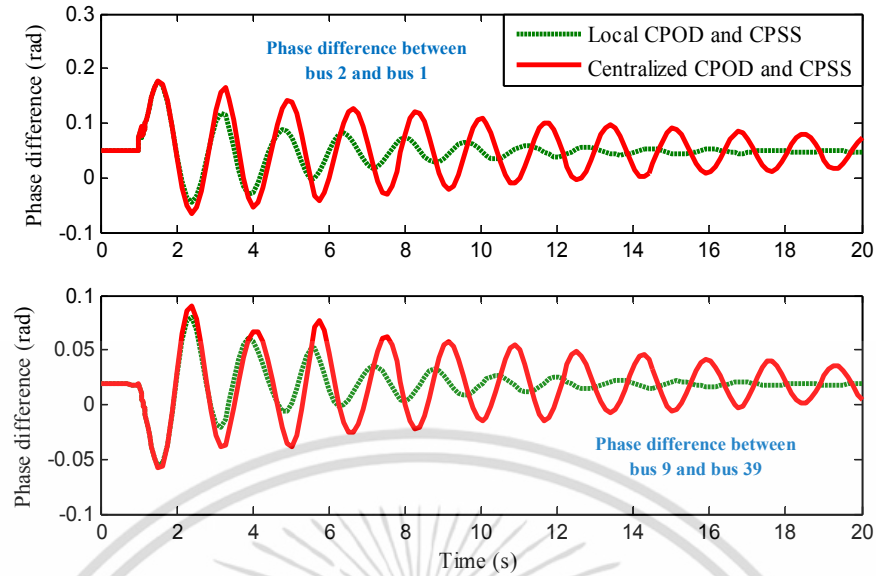
รูปที่ 3.8-3.11 แสดงมุมเฟสระหว่างบัส 2 และ บัส 1 และบัส 9 และบัส 39 ในกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

ในกรณีที่ 1 แสดงในรูป 3.8 แสดงให้เห็นว่าการที่ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุม POD และ PSS มีประสิทธิภาพในการหน่วงการแกว่งน้อยกว่าเมื่อติดตั้งทั้ง POD และ PSS

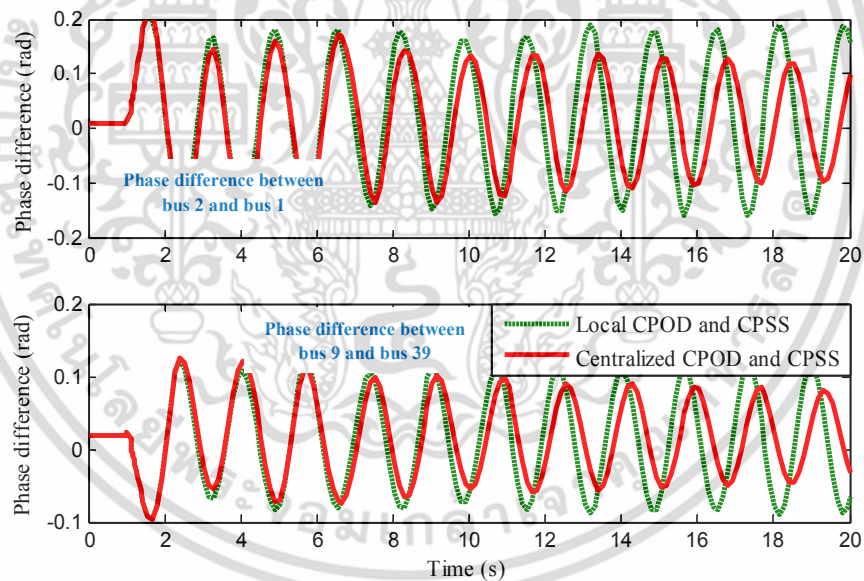
เมื่อเปลี่ยนจุดการทำงานของระบบ ในกรณีที่ 2 แสดงในรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่า Local CPOD and CPSS ซึ่งใช้สัญญาณท้องถิ่นเป็นอินพุตมีความสามารถในการหน่วงการแกว่งได้น้อยกว่า

Centralized CPOD and CPSS ซึ่งใช้สัญญาณที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 3.11 ผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 4

เมื่อเกิดเหตุการณ์ Communication failure ขึ้น ในกรณีที่ 3 แสดงในรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่า Centralized CPOD and CPSS ไม่สามารถส่งสัญญาณทำเสถียรภาพเพื่อหน่วงการแกว่งได้ในทางตรงข้าม Local CPOD and CPSS สามารถหน่วงการแกว่งได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ Communication failure นี้คือข้อเสียของการใช้ตัวควบคุมจากศูนย์กลาง ดังนั้นการออกแบบควรจะต้องติดตั้งตัวควบคุมลำดับชั้นท้องถิ่นเพื่อป้องกันการเกิด Communication failure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำให้ระยะเวลาในการเกิดความผิดพลาดเพิ่มขึ้น และเปลี่ยนจุดการทำงานของระบบ ในกรณีที่ 4 แสดงในรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นชัดเจนว่า Centralized CPOD and CPSS และ Local CPOD and CPSS ไม่สามารถทำงานในกรณีที่ 4 การแกว่งของผลต่างของมุมเฟสแกว่งอย่างรุนแรง และระบบได้สูญเสียเสถียรภาพในที่สุด เพราะว่า Centralized CPOD and CPSS และ Local CPOD and CPSS ออกแบบโดยวิธีการย้ายโพล ณ จุดการทำงานเดียวของระบบ ซึ่งไม่สามารถการันตีเสถียรภาพความคงทน และสมรรถนะความหวังได้ภายใต้หลากหลายจุดการทำงานได้ ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมจึงต้องพิจารณาเสถียรภาพความคงทน และสมรรถนะความหวังภายใต้จุดการทำงานของระบบที่หลากหลาย

3.3 สรุปผลการทดสอบ

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการเลือกอินพุต และเอาต์พุตที่เหมาะสมโดยวิธี Geometric measure of controllability and observability เพื่อใช้ในการห้วงการแกว่งอย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นได้ทดสอบตัวควบคุมจากศูนย์กลาง และตัวควบคุมจากท้องถิ่นซึ่งออกแบบโดยวิธีการย้ายโพล โดยใช้ระบบ New England IEEE 39 bus ในการจำลอง ผลสรุปคือ ในสถานการณ์ปกติ ตัวควบคุมลำดับจากศูนย์กลางที่ใช้สัญญาณอินพุตที่เหมาะสมสามารถห้วงการแกว่งได้ดีกว่าตัวควบคุมจากท้องถิ่นที่ใช้สัญญาณท้องถิ่นเป็นอินพุต เนื่องจากสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมมีความสามารถในการมองเห็นโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ได้ดีกว่าสัญญาณอินพุตท้องถิ่น ในทางตรงข้าม ตัวควบคุมจากศูนย์กลางไม่สามารถทำงานได้ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ Communication failure ขึ้น นอกจากนี้ความคงทนต่อความไม่แน่นอนต่างๆของระบบยังเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบตัวควบคุม เพราะระบบในความเป็นจริงได้มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นบทที่ 4 จึงได้พัฒนา และออกแบบตัวควบคุมจากศูนย์กลาง และตัวควบคุมจากท้องถิ่นให้ทำงานร่วมกันซึ่งประสานการควบคุมระหว่าง POD และ PSS เพื่อห้วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทนภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ ซึ่งเสถียรภาพความคงทน และสมรรถนะความหวังของตัวควบคุมที่นำเสนอจะแสดงให้เห็นในบทต่อไป

บทที่ 4

การทดสอบตัวควบคุมที่นำเสนอ

ในบทนี้จะทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่ประสานงานระหว่างการควบคุมจากศูนย์กลาง และการควบคุมจากท้องถิ่นซึ่งประสานการควบคุมโดย DFIG ที่ติดตั้ง POD และ SG ที่ติดตั้ง PSS ที่นำเสนอตั้งสมการที่ (2.41) และการควบคุมจากศูนย์กลาง และการควบคุมจากท้องถิ่นซึ่งประสานการควบคุมโดย DFIG ที่ติดตั้ง POD และ SG ที่ติดตั้ง PSS ในสมการที่ (3.48) ในเสถียรภาพพลวัต และเสถียรภาพชั่วคราวภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ New England IEEE 39 bus ในรูป 3.1

4.1 ผลการทดสอบตัวควบคุม

โปรแกรม PSAT [15] และ MATLAB ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (2.41) และทดสอบตัวควบคุมที่นำเสนอ โดยค่าเริ่มต้นสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (2.41) และวิธีหึ่งห้อยดังตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า SG ($\mathbf{P}_{SG,h}$) แต่ละตัวในสมการที่ (2.34) ได้ออกแบบกำลังไฟฟ้าของ SG ที่จ่ายเข้าสู่ระบบได้ 3 ระดับจากค่าเริ่มต้นคือ -30% ถึง +30% ของค่าเริ่มต้น ซึ่งค่าเริ่มต้นของระบบในรูปที่ 3.1 หาได้จาก [27] ในส่วนของ DFIG ($\mathbf{P}_{DFIG,k}$) ได้พิจารณาการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้ 2 ระดับจากขนาดของ DFIG แต่ละตัว (ตัวละ 50 MW) ในส่วนของเวลาหน่วง ($T_{d,l}$) ได้พิจารณาอยู่ในช่วง 0-350 ms ตารางสรุปค่าเริ่มต้นแสดงดังตารางที่ 4.2 จากตารางที่ 4.2 และสมการ 2.37 เหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดคือ $allsce = 3^9 \times 2^3 \times 3 = 472,392$ เหตุการณ์ ซึ่งทุกๆเหตุการณ์นี้ใช้วิธีหึ่งห้อยในการหาคำตอบ หลังจากหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีหึ่งห้อย ตัวควบคุมที่นำเสนอที่ออกแบบโดยสมการ (2.41) จะเรียกว่า “Hierarchical RPOD and RPSS” และตัวควบคุมที่ออกแบบโดยสมการ (3.48) จะเรียกว่า “Hierarchical CPOD and CPSS” ซึ่งทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ Hierarchical RPOD and RPSS และ Hierarchical CPOD and CPSS ด้วยวิธีหึ่งห้อย หลังจาก

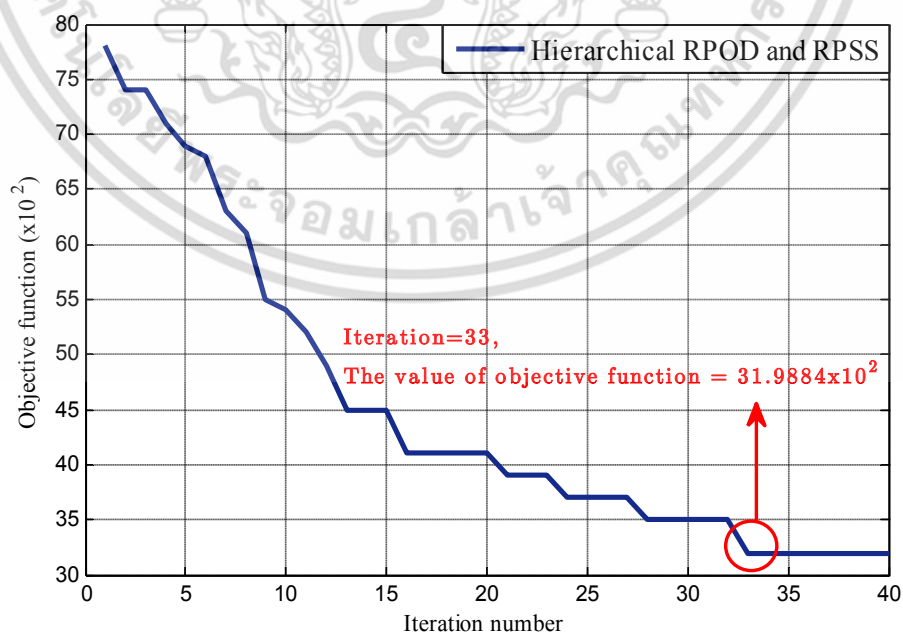
ตารางที่ 4.1 ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนหึ่งห้อยที่ใช้ในการค้นหา	7 ตัว
จำนวนรอบสูงสุดที่ใช้ในการค้นหา	40 รอบ
$\alpha_f \epsilon$ และ β_0	0.2 1 และ 1
ζ_{spec} และ $\gamma_{\infty,spec}$	0.05 และ 2
K^{\min} และ K^{\max}	0.1 และ 50 p.u.
$T_{1,3}^{\min}$ และ $T_{1,3}^{\max}$	0.1 และ 1 s
$T_{2,4}^{\min}$ และ $T_{2,4}^{\max}$	0.01 และ 0.1 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าเริ่มต้นของ $P_{SG,h}$, $P_{DFIG,k}$ และ $T_{d,l}$

ค่าเริ่มต้นของ $P_{SG,h}$	
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
P_{SG1} P_{SG2} P_{SG3} P_{SG4} P_{SG5} P_{SG6} P_{SG7} P_{SG8} และ P_{SG9}	10 8.3 5.4 5.6 6.5 5.08 6.32 6.5 และ 2.5 p.u.
$P_{SG1,1}$ $P_{SG2,1}$ $P_{SG3,1}$ $P_{SG4,1}$ $P_{SG5,1}$ $P_{SG6,1}$ $P_{SG7,1}$ $P_{SG8,1}$ และ $P_{SG9,1}$	7 5.81 3.78 3.92 4.55 3.56 4.42 4.55 และ 1.75 p.u.
d_{SG1} d_{SG2} d_{SG3} d_{SG4} d_{SG5} d_{SG6} d_{SG7} d_{SG8} และ d_{SG9}	3 2.49 1.62 1.68 1.95 1.52 1.9 1.95 และ 0.75 p.u.
nps และ ns	3 และ 9
ค่าเริ่มต้นของ $P_{DFIG,k}$	
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
$P_{DFIG1,1}$ $P_{DFIG2,1}$ และ $P_{DFIG3,1}$	0.25 0.25 และ 0.25 p.u.
d_{DFIG1} d_{DFIG2} และ d_{DFIG3}	0.25 0.25 และ 0.25 p.u.
npd และ nd	2 และ 3
ค่าเริ่มต้นของ $T_{d,l}$	
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
$T_{d,1}$ และ d_{Td}	50 และ 150 ms
ntd	3



รูปที่ 4.1 กราฟการลู่เข้าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในพิธีกรรณกิจเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

Hierarchical CPOD and CPSS						Hierarchical RPOD and RPSS							
Local POD and PSS						Local POD and PSS							
		K_{stab}	T_{L1}	T_{L2}	T_{L3}	T_{L4}			K_{stab}	T_{L1}	T_{L2}	T_{L3}	T_{L4}
SG5	$K_L(s)$	34.4607	0.1960	0.0925	0.2371	0.0168	SG5	$K_L(s)$	17.5364	0.2870	0.0487	0.3033	0.0332
SG7	$K_L(s)$	37.4076	0.9657	0.0357	0.8432	0.0149	SG7	$K_L(s)$	46.9501	0.3711	0.0266	0.2536	0.0468
SG8	$K_L(s)$	22.5271	0.1042	0.0781	0.5845	0.0578	SG8	$K_L(s)$	43.7971	0.5238	0.0914	0.3049	0.0635
W1	$K_L(s)$	4.1911	0.7974	0.0778	0.9965	0.0801	W1	$K_L(s)$	27.5078	0.3074	0.0982	0.4921	0.0336
W2	$K_L(s)$	11.4488	0.8356	0.0442	0.1704	0.0941	W2	$K_L(s)$	31.1238	0.8599	0.0495	0.3800	0.0643
W3	$K_L(s)$	45.6669	0.8818	0.0611	0.4984	0.0217	W3	$K_L(s)$	29.3522	0.2753	0.0200	0.9310	0.0740
Centralized POD and PSS						Centralized POD and PSS							
		K_{stab}	T_{L1}	T_{L2}	T_{L3}	T_{L4}			K_{stab}	T_{L1}	T_{L2}	T_{L3}	T_{L4}
SG5	$K_L(s)$	34.4607	0.1760	0.0595	0.2637	0.0462	SG5	$K_L(s)$	4.2758	0.5397	0.0431	0.5690	0.0189
SG7	$K_L(s)$	37.4076	0.4598	0.0230	0.3374	0.0168	SG7	$K_L(s)$	13.1241	0.6207	0.0989	0.3084	0.0336
SG8	$K_L(s)$	22.5271	0.3339	0.0868	0.2310	0.0316	SG8	$K_L(s)$	40.0507	0.3136	0.0134	0.5400	0.0402
W1	$K_L(s)$	4.1911	0.8201	0.0660	0.2225	0.0211	W1	$K_L(s)$	1.4610	0.5130	0.0897	0.6617	0.0712
W2	$K_L(s)$	11.4488	0.4883	0.0416	0.8824	0.0266	W2	$K_L(s)$	46.4427	0.9668	0.0922	0.7112	0.0223
W3	$K_L(s)$	45.6669	0.9196	0.0562	0.6217	0.0316	W3	$K_L(s)$	36.5165	0.5921	0.0817	0.4560	0.0749

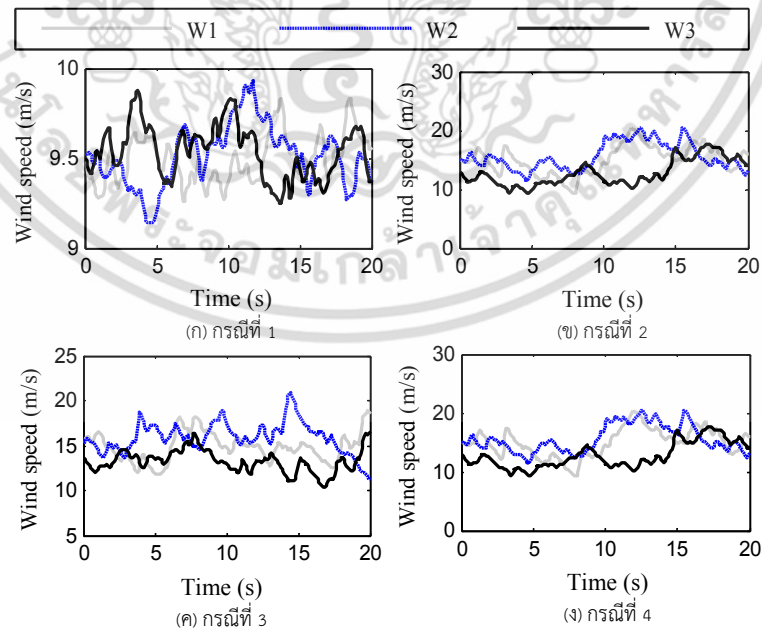
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ไอเกนแวลู และโหมดการแกว่งของ Hierarchical CPOD and CPSS และ Hierarchical RPOD and RPSS

Mode	Without POD and PSS	Hierarchical CPOD and CPSS	Hierarchical RPOD and RPSS
1 st	-0.6376±j10.72 ($\zeta = 6.28\%$)	-1.5884±j10.01 ($\zeta = 15.67\%$)	-1.7599±j9.95 ($\zeta = 17.42\%$)
2 nd	-0.5220±j9.85 ($\zeta = 5.57\%$)	-1.4703±j9.77 ($\zeta = 14.88\%$)	-1.5072±j9.70 ($\zeta = 15.37\%$)
3 rd	-0.4190±j9.48 ($\zeta = 4.42\%$)	-1.5092±j9.61 ($\zeta = 15.51\%$)	-1.6742±j9.65 ($\zeta = 17.09\%$)
4 th	-0.326±j8.52 ($\zeta = 3.82\%$)	-1.2220±j8.64 ($\zeta = 14.00\%$)	-1.4223±j8.67 ($\zeta = 16.19\%$)
5 th	-0.452±j7.94 ($\zeta = 5.67\%$)	-1.2633±j8.30 ($\zeta = 15.05\%$)	-1.3447±j8.27 ($\zeta = 16.05\%$)
6 th	-0.6376±j10.72 ($\zeta = 6.28\%$)	-1.0663±j7.40 ($\zeta = 14.26\%$)	-1.1858±j7.53 ($\zeta = 15.56\%$)
7 th	-0.5220±j9.85 ($\zeta = 5.57\%$)	-0.9477±j6.67 ($\zeta = 14.07\%$)	-1.0137±j6.65 ($\zeta = 15.07\%$)
8 th	-0.4190±j9.48 ($\zeta = 4.42\%$)	-0.8541±j5.17 ($\zeta = 16.30\%$)	-0.9440±j5.20 ($\zeta = 17.86\%$)
9 th	-0.326±j8.52 ($\zeta = 3.82\%$)	-0.8804±j4.22 ($\zeta = 20.42\%$)	-0.9245±j4.25 ($\zeta = 21.26\%$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 กรณีศึกษา (Base 100 MVA, 60 Hz)

กรณี	สิ่งรบกวนจากภายนอก	Communication failure	สายส่งที่ถูกปลด	การเปลี่ยนแปลงของ P_{SG}	รูปแบบของลม	เวลาหน่วง T_d (ms)
1	ความผิดปกติของสามเฟสชั่วคราวเกิดขึ้นที่บัส 3 ที่เวลา $t=1s$ จากนั้นที่เวลา $t=1.075s$ ความผิดปกติได้หายไปเอง	ไม่เกิด	-	No change	รูปที่ 4.2 (ก)	100
2	ความผิดปกติของสามเฟสเกิดขึ้นที่สายส่งระหว่างบัส 25 และ 26 ที่เวลา $t=1s$ และได้ปลดสายส่งเส้นนี้เพื่อกำจัดความผิดปกติที่เวลา $t=1.1$	ไม่เกิด	Buses 4-14	+20% ทุก SG	รูปที่ 4.2 (ข)	300
3	ความผิดปกติของสามเฟสเกิดขึ้นที่สายส่งระหว่างบัส 25 และ 26 ที่เวลา $t=1s$ และได้ปลดสายส่งเส้นนี้เพื่อกำจัดความผิดปกติที่เวลา $t=1.1$	เกิด	-	-12% ทุก SG	รูปที่ 4.2 (ค)	-
4	ความผิดปกติของสามเฟสเกิดขึ้นที่สายส่งระหว่างบัส 4 และ 5 ที่เวลา $t=1s$ และได้ปลดสายส่งเส้นนี้เพื่อกำจัดความผิดปกติที่เวลา $t=1.12$	เกิด	Buses 7-8	+5% ทุก SG	รูปที่ 4.2 (ง)	-



รูปที่ 4.2 ความเร็วลมที่ใช้ในกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้เหมาะสมด้วยวิธีหึ่งห้อย รูปที่ 4.1 แสดงกราฟการลู่เข้า (Convergence curve) ของฟังก์ชันกัณฑ์ประสงค์ของ Hierarchical RPOD and RPSS ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้งสองตัวนี้ได้แสดงในตารางที่ 4.3

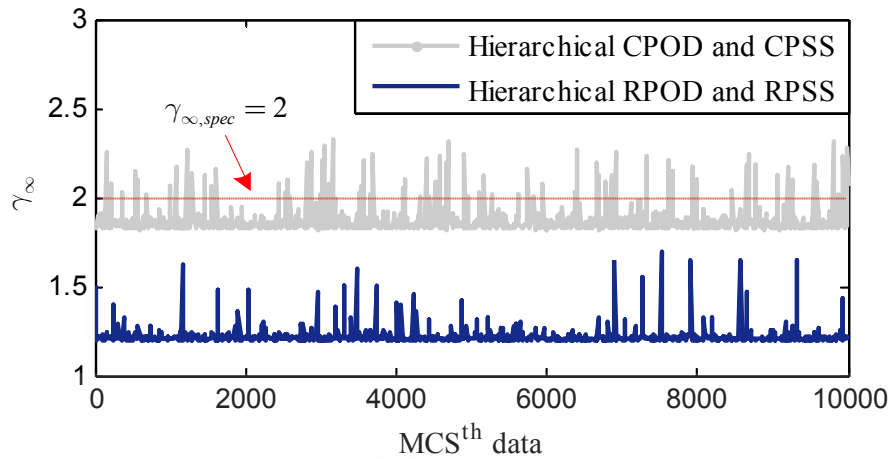
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์โอเคนแวลูของ Hierarchical RPOD and RPSS และ Hierarchical CPOD and CPSS ในกรณีศึกษาที่ 1 จากตารางที่ 4.5 จากผลการวิเคราะห์ ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม ซึ่งตรงกับ Without POD and PSS มีค่าความหน่วงทั้ง 9 โหมดการแกว่งต่ำมาก ในกรณีนี้เมื่อเกิดสิ่งรบกวนจากภายนอก อาจทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้ ในทางกลับกันความหน่วงของโหมดการแกว่งเหล่านี้ได้เพิ่มขึ้นอย่างมากโดยการติดตั้งตัวควบคุม Hierarchical RPOD and RPSS หรือ Hierarchical CPOD and CPSS

ตามคำนิยามของ γ_∞ ที่หมายถึงตัววัดเสถียรภาพความคงจาก (2.31) ในบทที่ 2 ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการทดสอบเสถียรภาพความคงทนภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ โดยสังเกตจากการกระจายตัวของ γ_∞ โหมดด้วยวิธี MCS 10,000 ครั้ง ในวิทยานิพนธ์นี้ การทำ MCS แต่ละครั้งได้

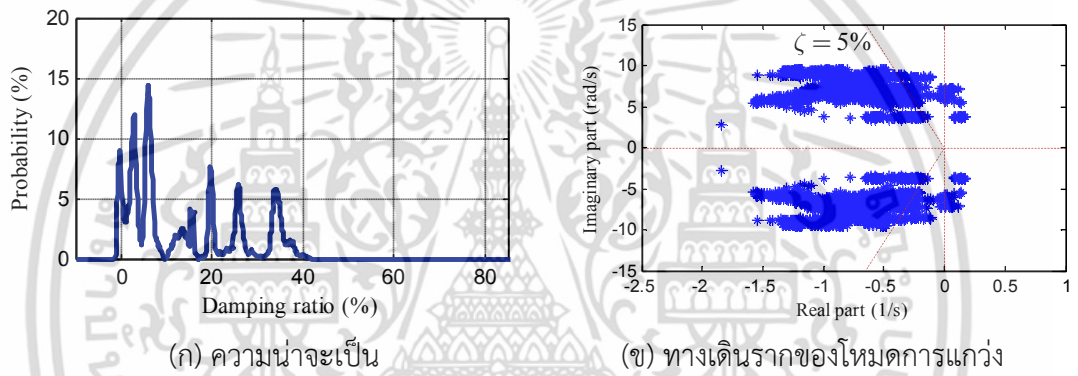
- 1) ทำการสุ่มค่ากำลังไฟฟ้าของ SG ในช่วง -30% ถึง 30%
- 2) ทำการสุ่มค่ากำลังไฟฟ้าของ DFIG ในช่วง 0-50 MW
- 3) การปลดสายส่งระหว่างพื้นที่ 1 และ 2 (สายส่งระหว่างบัส 1 และ 2) ระหว่างพื้นที่ 2 และ 3 (สายส่งระหว่างบัส 17 และ 27) และระหว่างพื้นที่ 1 และ 3 (สายส่งระหว่างบัส 7 และ 8)
- 4) เหตุการณ์ Communication failure

หมายเหตุ เหตุการณ์ 1) - 4) ได้เกิดขึ้นแบบสุ่ม และพร้อมกันในการทำ MCS แต่ละครั้ง

ดังนั้น ถ้าค่าของ γ_∞ ที่ทำการทดสอบด้วย MCS 10,000 ครั้งมีค่าต่ำกว่า $\gamma_{\infty,spec}$ แสดงว่าตัวควบคุมที่นำเสนอมีเสถียรภาพความคงทนภายใต้สมมุติฐานของ Small gain theorem ที่กล่าวในบทที่ 2 ที่ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นถูกจำกัดให้เป็นเชิงเส้นด้วยค่าของนอร์ม สามารถยืนยันเสถียรภาพความคงทนได้ด้วยตัวควบคุมที่นำเสนอ



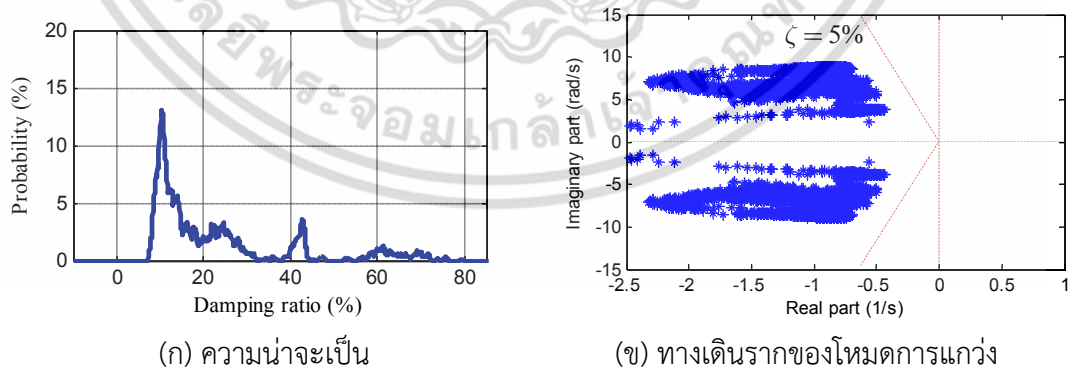
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของ γ_{∞} ด้วย MCS 10,000 ครั้ง



(ก) ความน่าจะเป็น

(ข) ทางเดินรากของโหมดการแกว่ง

รูปที่ 4.4 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมดการแกว่งทั้ง 9 โหมด ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Hierarchical CPOD and CPSS

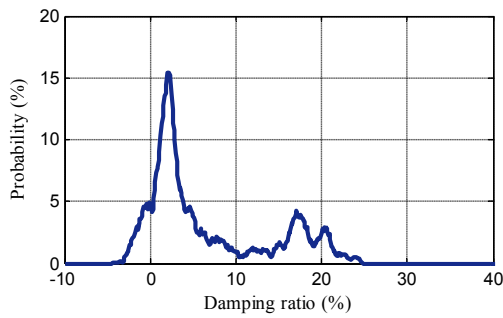


(ก) ความน่าจะเป็น

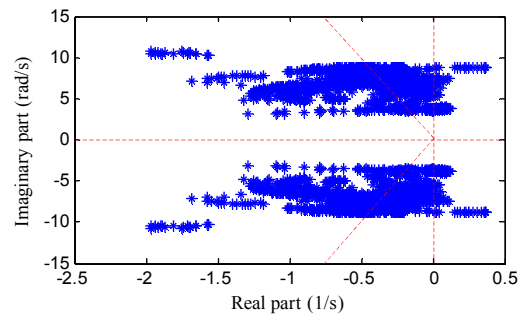
(ข) ทางเดินรากของโหมดการแกว่ง

รูปที่ 4.5 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมดการแกว่งทั้ง 9 โหมด ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Hierarchical RPOD and RPSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

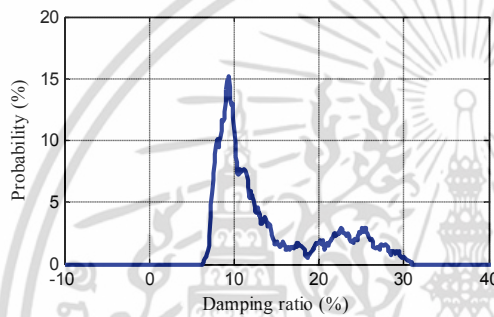


(ก) ความน่าจะเป็น

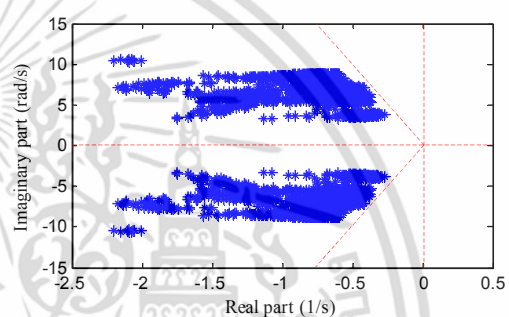


(ข) ทางเดินรากของโหมตการแกว่ง

รูปที่ 4.6 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Hierarchical CPOD and CPSS เมื่อเกิด Communication failure



(ก) ความน่าจะเป็น



(ข) ทางเดินรากของโหมตการแกว่ง

รูปที่ 4.7 ความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ด้วย 10,000 Monte Carlo Simulation ในกรณี Hierarchical RPOD and RPSS เมื่อเกิด Communication failure

หลังจากการทดสอบ รูปที่ 4.2 แสดงค่า γ_∞ ด้วยการจำลอง MCS 10,000 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า Hierarchical RPOD and RPSS ที่นำเสนอมีค่า γ_∞ ต่ำกว่าค่า $\gamma_{\infty,spec}$ ทุกจุดการทำงาน ในทางกลับกันมีบางเหตุการณ์ในกรณีของ Hierarchical CPOD and CPSS ที่ทำให้ค่า γ_∞ มีค่ามากกว่า $\gamma_{\infty,spec}$ ซึ่งทำให้ Hierarchical CPOD and CPSS ไม่สามารถความคงทนต่อความไม่แน่นอนต่างๆของระบบได้ในบางเหตุการณ์

ต่อไปรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมตการแกว่งทั้ง 9 โหมต ตามลำดับ ด้วย MCS 10,000 ครั้ง ในกรณี Hierarchical POD and PSS และ Hierarchical RPOD and RPSS ในกรณีที่ไม่มีเกิด Communication failure จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าบางเหตุการณ์ของตัวควบคุม Hierarchical CPOD and CPSS ที่โหมตการแกว่งเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่สูญเสียเสถียรภาพ (Unstable region) ในทางกลับกันตัวควบคุม Hierarchical RPOD and RPSS สามารถรักษาโหมตการแกว่งทุกโหมตให้อยู่ในพื้นที่ที่ยอมรับได้ (D-stable region) และมีค่ามากกว่า

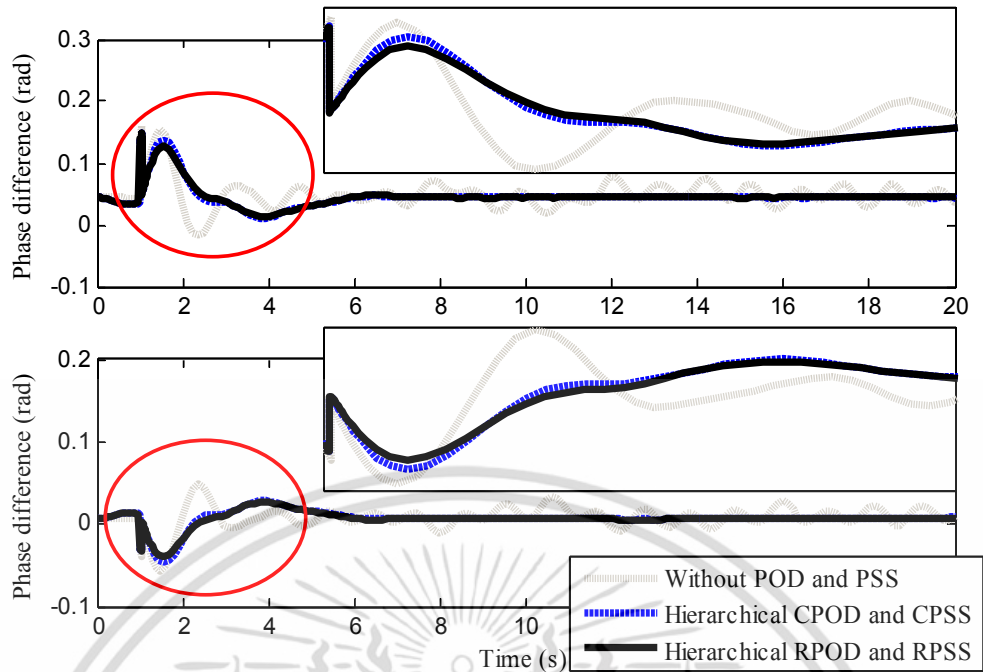
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\zeta_{\infty, spec} = 5\%$ ทุกโหมด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอมีสมรรถนะความหน่วงสูงกว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบ

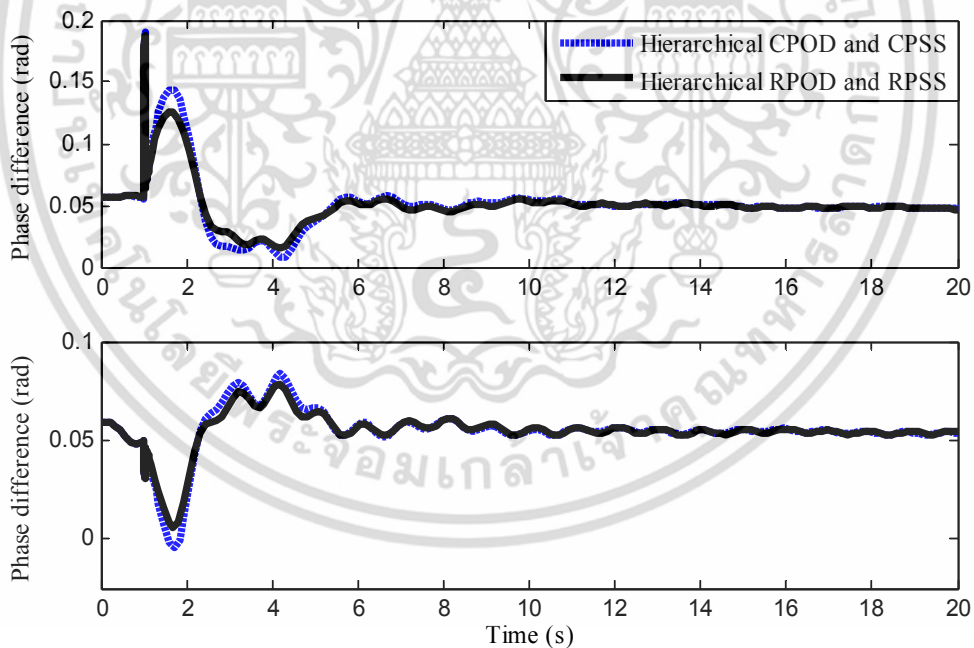
ต่อไปรูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงความน่าจะเป็น และทางเดินรากของโหมดการแกว่งทั้ง 9 โหมด ตามลำดับ ด้วย MCS 10,000 ครั้ง ในกรณี Hierarchical POD and PSS และ Hierarchical RPOD and RPSS ในกรณีที่เกิด Communication failure ซึ่งในกรณีนี้ ตัวควบคุมที่นำเสนอและตัวควบคุมเปรียบเทียบได้ใช้การควบคุมจากท้องถิ่น (Local POD and PSS) ในการทำเสถียรภาพเท่านั้น จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าบางเหตุการณ์ของตัวควบคุม Hierarchical CPOD and CPSS ที่โหมดการแกว่งเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่สูญเสียเสถียรภาพ (Unstable region) และมีความน่าจะเป็นของอัตราส่วนความหน่วงอยู่ในช่วง -3% ถึง 24% ในทางกลับกันตัวควบคุม Hierarchical RPOD and RPSS สามารถรักษาโหมดการแกว่งทุกโหมดให้อยู่ในพื้นที่ที่ยอมรับได้ (D-stable region) และมีค่ามากกว่า $\zeta_{\infty, spec} = 5\%$ ทุกโหมด และมีความน่าจะเป็นของอัตราส่วนความหน่วงอยู่ในช่วง 7% ถึง 31% ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอมีสมรรถนะความหน่วงสูงกว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบในกรณีของ Communication failure

ต่อไปได้ทดสอบตัวควบคุมที่นำเสนอในเสถียรภาพชั่วคราวใน 4 กรณีศึกษาซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5 จากตารางที่ 4.5 นอกเหนือจากสิ่งรบกวนจากภายนอกแล้ว ความไม่แน่นอนต่างๆของระบบได้แบ่งออกเป็น

- 1) การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของ SG P_{SG} ที่จ่ายเข้าสู่ระบบ
- 2) ความไม่แน่นอนของความเร็วลมในแต่ละ DFIG ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.4 ในที่นี้ได้กำหนดฐานของความเร็วลม (Based wind speed) ที่ 12 m/s นอกจากนี้โหมดการทำงานของ DFIG ได้พิจารณา ดังนี้ โหมด Sub-synchronous ทำงานอยู่ในช่วงความเร็วลม 6-12 m/s โหมด Normal ทำงานอยู่ ณ ความเร็วลม 12 m/s และ โหมด Super-synchronous ทำงานอยู่ในช่วงความเร็วลม 12-24 m/s
- 3) การเปลี่ยนแปลงของเวลาหน่วง T_d
- 4) การเปิดสายส่งก่อนเกิดสิ่งรบกวนจากภายนอกด้วยหลัก N-1 contingencies
- 5) สัญญาณทำเสถียรภาพล้มเหลวเนื่องจาก Communication failure

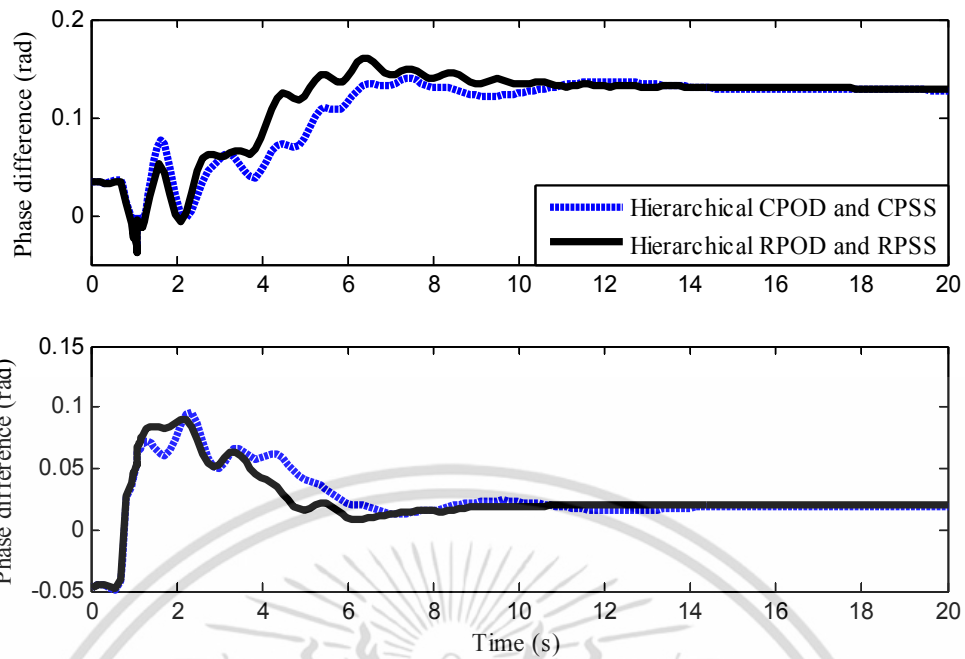


รูปที่ 4.8 ผลทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1

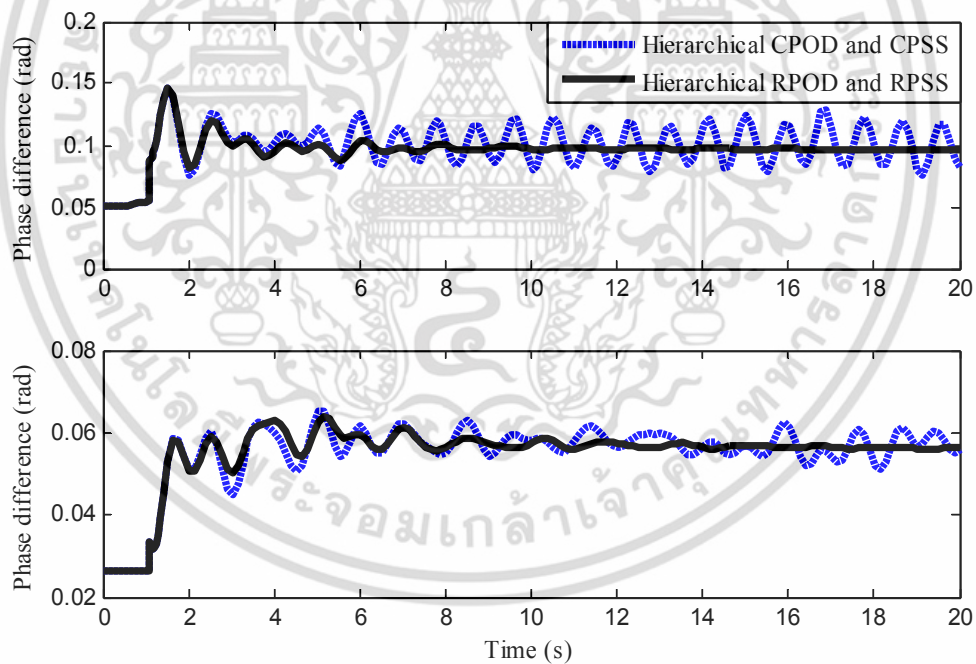


รูปที่ 4.9 ผลทดสอบในกรณีศึกษาที่ 2

รูปที่ 4.8-4.11 แสดงผลต่างของมุมเฟสระหว่างสองพื้นที่ใดๆ ของกรณีศึกษา 1-4 ตามลำดับ ในกรณีศึกษาที่ 1 แสดงในรูป 48 สามารถเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อไม่มีการติดตั้งตัวควบคุม Without เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลทดสอบในกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 4.11 ผลทดสอบในกรณีศึกษาที่ 4

POD and PSS ระบบไม่สามารถรักษาเสถียรภาพได้ ในทางกลับกัน Hierarchical CPOD and CPSS และ Hierarchical RPOD and RPSS สามารถหน่วงการแกว่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่ง Hierarchical RPOD and RPSS มีความสามารถในการหน่วงการแกว่งได้ดีกว่า Hierarchical CPOD and CPSS เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาในกรณีศึกษาที่ 2 แสดงในรูป 4.9 นอกจากการปลดสายส่งระหว่างบัส 4 และ 14 ก่อนเกิดสิ่งรบกวนจากภายนอกแล้ว ยังได้ทำการเพิ่มการเปลี่ยนแปลงของ และ ทำให้เสถียรภาพของ Hierarchical CPOD and CPSS ลดลงอย่างมาก ในทางตรงข้าม Hierarchical RPOD and RPSS ที่ออกแบบภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบสามารถทำเสถียรภาพให้กับระบบในกรณีนี้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

ในกรณีศึกษาที่ 3 แสดงในรูป 4.10 เมื่อเกิดเหตุการณ์ Communication failure จึงทำให้ตัวควบคุมจากศูนย์กลางไม่สามารถส่งสัญญาณทำเสถียรภาพให้กับระบบได้ ดังนั้นตัวควบคุมจากท้องถิ่นของ Hierarchical CPOD and CPSS และ Hierarchical RPOD and RPSS ได้นำมาทำเสถียรภาพในกรณีนี้ จากผลการทดสอบ ตัวควบคุมจากท้องถิ่นของ Hierarchical CPOD and CPSS สามารถหน่วงการแกว่งได้น้อยกว่า ซึ่งแตกต่างการตัวควบคุมจากท้องถิ่นของ Hierarchical RPOD and RPSS ที่สามารถหน่วงการแกว่งด้วยตัวควบคุมจากท้องถิ่นอย่างเดียว

ยิ่งไปกว่านั้นในกรณีศึกษาที่ 4 แสดงในรูป 4.11 นอกจากเหตุการณ์ Communication failure แล้วก่อนเกิดสิ่งรบกวนจากภายนอกยังได้ทำการปลดสายส่งระหว่างบัส 7 และ 8 ออก จากผลการทดสอบ Hierarchical CPOD and CPSS ไม่สามารถหน่วงการแกว่ง และระบบสูญเสียเสถียรภาพในที่สุด ในขณะที่ Hierarchical RPOD and RPSS สามารถหน่วงการแกว่งนี้ได้อย่างคงทน ผลการทดสอบในกรณีศึกษาเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของสมรรถนะความหน่วง และความคงที่ ดีกว่าของตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ

4.2 สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบตัวควบคุมจากการควบคุมจากศูนย์กลาง และการควบคุมจากท้องถิ่นซึ่งประสานการควบคุมโดย DFIG ที่ติดตั้ง POD และ SG ที่ติดตั้ง PSS ได้นำเสนอในบทนี้ ซึ่งได้ทดสอบตัวควบคุมที่นำเสนอเกี่ยวกับตัวควบคุมเปรียบเทียบที่ออกแบบโดยวิธีการย้ายโพลในเสถียรภาพพลวัต และเสถียรภาพชั่วคราว ผลการทดสอบในระบบ New England IEEE 39 bus แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะความหน่วง และความคงที่ที่ดีกว่าของตัวควบคุมที่นำเสนอภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบที่มีการเชื่อมโยงระหว่างพื้นที่ นอกจากนี้ยังได้จำลองสถานการณ์ของสิ่งรบกวนต่างๆจากภายนอก และความไม่แน่นอนของระบบ เช่น ความผิดปกติสามเฟส การเปิดสายส่งด้วยหลัก $N-1$ contingencies และการเปลี่ยนแปลงเวลาหน่วง กำลังไฟฟ้าของ SG และ DFIG ผลการทดสอบสรุปได้ว่าตัวควบคุมที่นำเสนอมีความสามารถในการทำเสถียรภาพให้กับระบบสูงกว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประสานควบคุมลำดับชั้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมชนิดป้อนสองทาง (Doubly-fed induction generator: DFIG) ที่ติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า (Power oscillation damper: POD) และตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system stabilizer: PSS) สำหรับหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทน ตัวควบคุม POD และ PSS ในวิทยานิพนธ์นี้มีโครงสร้างแบบอันดับสองที่มีเฟสชดเชยแบบนำหน้า และล่าหลัง (Second-order lead/lag compensator) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีอันดับน้อย ง่ายต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบจริง การออกแบบตัวควบคุมได้พิจารณาหลักความคงทน และสมรรถนะความหน่วงภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลายของระบบ จากผลการทดสอบเสถียรภาพพลวัต และเสถียรภาพชั่วคราวในระบบ New England IEEE 39 bus สามารถสรุปงานวิจัยออกมาได้ดังต่อไปนี้

- 1) สามารถควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้า และพลังงานทดแทนที่มีอยู่ในระบบเพื่อใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพพลวัต และเสถียรภาพชั่วคราวในระบบได้
- 2) สามารถใช้กำลังไฟฟ้าเสมือนของ DFIG เพื่อหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบได้ ซึ่งสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ในขณะที่ DFIG ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบ
- 3) ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยพิจารณาหลักความคงทน (Robustness) และสมรรถนะความหน่วง (Damping performance) ภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลาย มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีดั้งเดิม หรือการย้ายโพล (Pole placement)
- 4) ตัวควบคุมจากการควบคุมจากศูนย์กลางสามารถใช้สัญญาณอินพุตที่มีความสามารถในการมองเห็นโหมตการแกว่งระหว่างพื้นที่ได้ดี ในขณะที่ตัวควบคุมการควบคุมจากท้องถิ่นถูกนำมาประยุกต์ใช้เมื่อตัวควบคุมจากศูนย์กลางไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากไม่สามารถส่งสัญญาณทำเสถียรภาพมาที่ตัวควบคุมได้ หรือ Communication failure
- 5) ตัวควบคุม POD และ PSS ที่ใช้มีสมรรถนะการทำงานที่สูงภายใต้จุดการทำงานที่หลากหลาย อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นในการทำงานได้ดีในเสถียรภาพพลวัต และเสถียรภาพชั่วคราว
- 6) พารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งหมดได้มีการออกแบบให้มีความเหมาะสมพร้อมกันทั้งหมดด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีหิ้งห้อย
- 7) สามารถออกแบบตัวควบคุมให้ทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีที่ระบบมีการควบคุมหลายตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

- 1) สามารถที่จะประยุกต์ใช้ตัวควบคุม POD กับอุปกรณ์ FACTS devices ที่มีอยู่ในระบบได้
- 2) สามารถที่จะประยุกต์ใช้ตัวควบคุม POD กับแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เช่น แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) ได้
- 3) นอกจากใช้ DFIG ที่ติดตั้ง POD ในการหน่วงการแกว่งของระบบแล้ว สามารถประยุกต์ใช้ตัวควบคุมใบพัด (Pitch angle) เพื่อควบคุมความถี่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Roger G. **Power system oscillations**. Kluwer. 2000.
- [2] Muller S. Deicke M. and De Doncker R. W. "Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines", **IEEE Industry Applications Magazine**, vol. 8 no. 3, 2002. pp. 26 - 33.
- [3] Gautam D. Vittal V. and Harbour T. "Impact of Increased Penetration of DFIG-based Wind Turbine Generators on Transient and Small Signal Stability of Power Systems", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol. 24, no. 3, 2009. pp. 1426 - 1434.
- [4] Huang H. and Chung C. Y. "Coordinated Damping Control Design for DFIG-based Wind Generation Considering Power Output Variation", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol. 27, no. 4, 2012. pp. 1916 - 1925.
- [5] Hughes F. M. A-Lara O. Jenkins N. and Strbac G. "A Power System Stabilizer for DFIG-based Wind Generation", **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 21, no. 8, 2006. pp. 763 - 772.
- [6] Fan L. Yin H. and Miao Z., "On Active/reactive Power Modulation of DFIG-based Wind Generation", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol. 26, no.2, 2011. pp. 513-521.
- [7] Jose D. G. Oriol G. B. Fernando D. B. and Andreas S., "Power Oscillation Damping Supported by Wind Power: A Review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 16, 2012. pp. 4982 - 4993.
- [8] Kshatriya N. Annakage U.D. Hughes F. M. and Gole A.M., "Optimized Partial Eigenstructure Assignment-based Design of a Combined PSS and Active Damping Controller of a DFIG", **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 25, no. 2, 2010. pp. 866 - 876.
- [9] Surinkaew T. and Ngamroo I., "Coordinated robust control of DFIG Wind Turbine and PSS for Stabilization of Power Oscillation Considering System Uncertainties", **IEEE Tran. Sust. Energy**, vol.5, no.3, 2014. pp. 823 - 833.
- [10] Chow J. H. Sanchez-Gasca J. J. Haoxing R. and Wang S., "Power System Damping Controller Design Using Multiple Input Signals", **IEEE Control Syst. Magazine**, vol. 20, no. 4, 2000, pp. 82-90.
- [11] Mokhtari M. and Aminifar F., "Toward Wide-area Oscillation Control Through Doubly-fed Induction Generator Wind Farms", **IEEE Trans. Power Syst.**, Early access.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Leon A.E. and Solsona J.A., "Power Oscillation Damping Improvement by Adding Multiple Wind Farms to Wide-area Coordinating controls", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol.29, no.3, 2014, pp. 1356-1364.
- [13] Leon A.E., Mauricio J.M., Gomez-Exposito A., and Solsona J.A., "Hierarchical Wide-area Control of Power Systems Including Wind Farms and FACTS for Short-term Frequency Regulation", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol.27, no.4, 2012, pp. 2084-2092.
- [14] Milano F. **Power System Modelling and Scripting**. Springer. 2010.
- [15] Milano F. **Power System Analysis Toolbox Version 2.1.8**. Albecete. Spain: Universidad de Castilla-La Mancha. 2013.
- [16] Saejia M. and Ngamroo J., "A Robust Centralized SMES Controller Design on WAMS Considering System and Communication Delay Uncertainties", **Elect. Power Syst. Res.**, vol 81, no.4, 2011, pp. 846-852.
- [17] Dörfler F., Jovanović M.R., Chertkov M., and Bullo F., "Sparsity-Promoting Optimal Wide-area Control of Power Networks", **IEEE Tran. Power Syst.**, Early access.
- [18] Skogestad S. and Postlethwaite I. **Multivariable Feedback Control Analysis and Design. 2nd ed.** New York, USA. Wiley. 2005.
- [19] Gu D.-W., Petkov P. HR., and Konstantinov M.M. **Robust Control Design with MATLAB**. London. Springer. 2005.
- [20] Rai D., Faried S.O. Ramakrishna G., and Edris A., "Damping Inter-area Oscillations Suing Phase Imbalanced Series Compensation Schemes", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol.26, no.3, 2011, pp. 1753-1761.
- [21] Mishra Y., Mishra S., Fangxing L., Dong Z. Y., and Bansal R.C., "Small-signal Stability Analysis of a DFIG-based Wind Power System Under Different Modes of Operation", **IEEE Tran. Energy Conv.**, vol.24, no.5, 2009, pp. 972-982.
- [22] Mokhtari M., Aminifar F., Nazarpour D., and Golshannavaz S., "Wide-area Power Oscillation Damping with a Fuzzy Controller Compensating the Continuous Communication Delays", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol.28, no.4, 2013, pp. 1997-2005.
- [23] Yang X.S. **Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications**. Wiley. 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] Apostolopoulos T., Vlachos A. "Application of the Firefly Algorithm for Solving Economic Emissions Load Dispatch Problem", *Int J Comb*, 2011.
- [25] Yang X.S., "Firefly Algorithm for Multimodal Optimization" **Stochastic Algorithm, Foundations and Application, SAGA 2009 Lecture Notes in Computer Science**, vol. 5729, 2009, pp. 169-178.
- [26] Chandrasekaran K., Simon S. P., "Optimal Deviation based Firefly Algorithm Tuned Fuzzy Design for Multi-objective UCP", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol. 28, no. 1, 2013, pp. 460-471.
- [27] Zang Y. and Bose A. "Design of Wide-area Damping Controllers for Inter Area Oscillations", **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 23, no. 3, 2008, pp. 1136-1143.
- [28] Heniche A. and Kamwa I., "Assessment of Two Methods to Select Wide-Area Signals for Power System Damping Control", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol. 23, no. 2, 2008, pp. 572-581.
- [29] Li Y., Rehtanz C., Rüberg S., Luo L., and Cao Y., "Wide-area Robust Coordination Approach of HVDC and FACTS Controllers for Damping Multiple Interarea Oscillations", **IEEE Tran. Power Del.**, vol. 27, no.3, 2012, pp. 1096-1105.
- [30] Farsangi M.M., Song Y.H., and Lee K.Y., "Choice of FACTS Device Control Inputs for Damping Interarea Oscillations", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol.19, no.2, 2004, pp. 1135-1143.
- [31] Preece R., Milanovic J., Almutairi, and Marjanovic O., "Probabilistic Evaluation of Damping Controller in Networks with Multiple VSC-HVDC lines", **IEEE Tran. Power Syst.**, vol. 28, no. 1, 2013, pp. 367-376.
- [32] Kunjumammed L., Singh R., and Pal B., "Robust Signal Selection for Damping of Inter-area Oscillations", **IET Gener. Transm. Distrib.**, vol. 6, no. 5, 2012, pp. 404-416.
- [33] Zolotas A., Chaudhuri B., Jaimoukha I., and Korba P., "A Study on LQG/LTR Control for Damping Inter-area Oscillations in Power System", **IEEE Trans. Control Syst. Technol.**, vol. 15, no. 1, 2007, pp. 151-160.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

วารสารต่างประเทศ (International Journal)

1. T. Surinkaew and I. Ngamroo, “Coordinated robust control of DFIG wind turbine and PSS for stabilization of power oscillations considering system uncertainties”, IEEE Trans. Sust. Energy, vol. 5, no. 3, 2014, pp. 823-833, Jul. 2014.
2. T. Surinkaew and I. Ngamroo, “Robust power oscillation damper design for DFIG-based wind turbine based on specified structure mixed H_2/H_∞ ”, International Journal of Renewable Energy, vol. 66, pp. 15-24, June 2014.

บทความทางวิชาการระดับนานาชาติ (International Conference)

1. T. Surinkaew and I. Ngamroo, “Wide area robust centralized power oscillation dampers design for DFIG-based wind turbines”, 18th Power Systems Computation Conference (18th PSCC), 18-22 Aug. 2014, Wroclaw, Poland.
2. I. Ngamroo and T. Surinkaew, “Optimization of robust power oscillation damper for DFIG wind turbine considering $N-1$ outage contingencies,” IEEE PES Innovation Smart Grid Technology (ISGT Europe 2014), 12-15 Oct. 2014, Istanbul, Turkey.
3. T. Surinkaew and I. Ngamroo, “Application of DFIG wind turbine to damping of inter-area oscillation based on wide area centralized control,” Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition (GRE 2014), 27 Jul.–1 Aug. 2014, Tokyo, Japan.
4. T. Surinkaew and I. Ngamroo, “Robust decentralized power oscillation dampers design of DFIG wind turbines for stabilization of inter-area oscillation,” 2014 Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT ASIA 2014), 20-23 May 2014, Kuala Lumpur, Malaysia.
5. T. Surinkaew and I. Ngamroo, “Robust stabilization of multimachine power system by DFIG wind turbine equipped with power oscillation damper,” The 2014 International Electrical Engineering Congress (IEECON 2014), 19-21 March 2014, Pattaya City, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


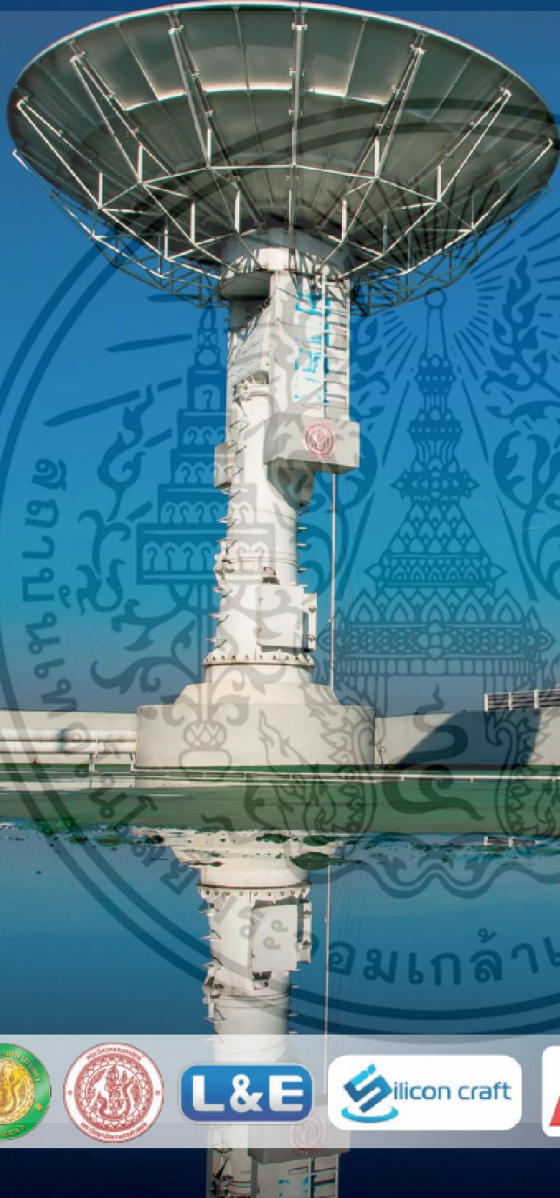


6. **T. Surinkaew** and I. Ngamroo, “Damping of power oscillation by robust cooperative control of DFIG wind turbine and PSS,” International Conference on Engineering, Applied Science, and Technology (ICEAST 2013), 21-24 Aug. 2013, Bangkok, Thailand.
7. **T. Surinkaew** and I. Ngamroo, “Coordinated robust design of DFIG wind turbine and PSS for stabilization of power oscillation,” International Smart Grid Conference & Exhibition 2013 (ISGT&E 2013), 8-11 Jul. 2013, Jeju, Korea.
8. **T. Surinkaew**, I. Ngamroo, and W. Nakawiro, “Robust power oscillation damper design for DFIG-based wind turbine,” The Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2013), 15-17 May 2013, Krabi, Thailand.
9. **T. Surinkaew** and I. Ngamroo, “ H_∞ control based-specified structure robust power oscillation damping controller design of UPFC,” The 2013 International Electrical Engineering Congress (IEECON 2013), 13-15 March 2013, Chiangmai, Thailand.

บทความทางวิชาการระดับชาติ (National Conference)

1. **T. Surinkaew** and I. Ngamroo, “Robust coordinated control of DFIG wind turbines with power system stabilizers for damping of power oscillations,” The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36), 11-13 Dec. 2013, Kanchanaburi, Thailand.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36
The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36)
 11-13 ธันวาคม 2556
 ณ เฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จ.กาญจนบุรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประสานควบคุมแบบคงทนของกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางซึ่งติดตั้งตัว
 หน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าและตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า
**Robust Coordinated Control of DFIG Wind Turbines with Power Oscillation Dampers and Power
 System Stabilizers for Damping of Power Oscillations**

ทศพร สุรินทร์แก้ว อิศระชัย งามหฺร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: tsurinkae@hotmial.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประสานการควบคุมแบบคงทนของ
 กังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly-
 fed induction generator, DFIG) ที่ติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า
 (Power oscillation damper, POD) และตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง
 (Power system stabilizer, PSS) เพื่อหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าโดย
 พิจารณาความคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบ โครงสร้างของ POD
 และ PSS เป็นแบบตัวชดเชยฟีดแบ็ก/ลำโพงสองขั้วที่สอง ในที่นี้ได้
 เปรียบความไม่แน่นอนในระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงการลัดกำลังไฟฟ้า
 โหลด และพารามิเตอร์ระบบ เป็นต้น ด้วยความไม่แน่นอนเชิงผลคูณ
 จากนั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PSS และ POD ที่
 เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมที่หาค่าเหมาะที่สุดเพื่อให้ได้สมรรถนะการทำให้เสถียรภาพ
 และความคงทนสูง ผลการจำลองคอมพิวเตอร์ในระบบ IEEE New
 England 39 บัสแสดงให้เห็นว่าการควบคุมประสานของ DFIG ที่ติดตั้ง
 POD และ PSS ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการทำให้เสถียรภาพระบบและมี
 ความคงทนสูงกว่า POD และ PSS ที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม
 กิ่งสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังลมชนิดป้อนสองทาง ตัว
 หน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า ตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง
 เสถียรภาพความคงทน ความไม่แน่นอนในระบบ

Abstract

This paper proposes the new robust coordinated control of
 doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine equipped with
 power oscillation damper (POD) and power system stabilizer (PSS) for
 damping of power oscillation considering system uncertainties. The
 optimization of POD and PSS parameters is based on an enhancement
 of stabilizing performance and robust stability. Simulation study in
 IEEE-39 bus New England system shows that the superior stabilizing
 effect and robustness of the proposed robust POD and PSS.

Keywords: Doubly-fed induction generator, power oscillation damper,
 power system stabilizer, robust stability, system uncertainties

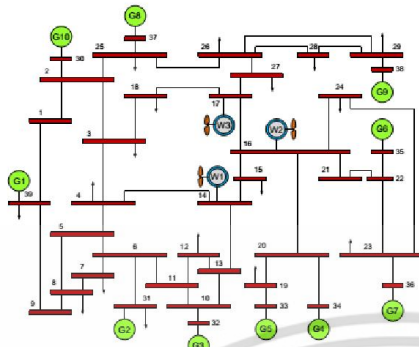
1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้ากำลังส่งผลดี
 ทางด้านเศรษฐศาสตร์ในด้านการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อย่างไรก็ตามก็อาจ
 ทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีความหน่วงด้านและความถี่
 ในช่วง 0.2-2.0 Hz [1] เมื่อเกิดการลัดวงจรที่รุนแรงในระบบ อาจส่งผล
 ทำให้โหมดการแกว่งเหล่านี้ไม่เสถียร จนทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพ
 และส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการ
 ติดตั้ง PSS กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีเพื่อแก้ไขปัญหา
 ปัจจุบัน กังหันลมชนิด DFIG ได้รับความสนใจอย่างสูง
 เนื่องจาก DFIG สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามความเร็วลมที่ไม่
 สมบูรณ์ได้และมีต้นทุนในการติดตั้งต่ำ เมื่อกังหันลมชนิด DFIG เข้ามา
 มีส่วนร่วมในการจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้น จึงเกิดแนวคิดที่กังหันลมชนิดนี้
 ควรมีส่วนร่วมในการให้บริการเสริม (Ancillary services) แก่ระบบ
 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสามารถในการหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าของ
 DFIG ใน [2] ได้ติดตั้ง POD เข้าไปกับ DFIG เพื่อทำให้เสถียรภาพระบบ
 นอกจากนี้ ใน [3] ได้เสนอการประสานควบคุมของ DFIG และ PSS โดย
 พิจารณาการแกว่งไฟฟ้าลัดของ DFIG อย่างโรตารีกัน ในระบบไฟฟ้า
 กำลังมีความไม่แน่นอนต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้า
 และโหลด เป็นต้น บทความข้างต้นยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของความไม่
 แน่นอนนี้ ซึ่งไม่สามารถรับรองได้ว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถลดการ
 แกว่งกำลังไฟฟ้าได้ภายใต้ความไม่แน่นอนต่างๆ นี้

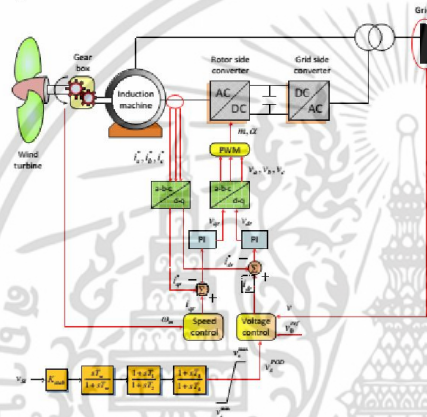
บทความนี้นำเสนอการประสานควบคุมระหว่าง DFIG ซึ่ง
 ติดตั้ง POD และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีซึ่งติดตั้ง PSS เมื่อพิจารณา
 ความคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบ เพื่อให้ POD และ PSS มี
 สมรรถนะสูงต่อการหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าและความคงทนสูงต่อ
 ความไม่แน่นอนในระบบ ในที่นี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองความไม่
 แน่นอนเชิงผลคูณเพื่อแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสมของ POD และ PSS
 แล้วใช้อัลกอริทึมที่หาค่าเหมาะที่สุด (Firefly algorithm) เพื่อค้นหาค่าคอมที่
 เหมาะสม ผลการลัดในระบบ IEEE New England 39 บัสแสดงให้เห็น
 ว่าสมรรถนะการทำให้เสถียรภาพและความคงทนของ DFIG ที่ติดตั้ง POD
 และ PSS ที่นำเสนอซึ่งเหนือกว่า POD และ PSS แบบดั้งเดิม

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON-36) 11 - 13 ธันวาคม 2556 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ระบบ IEEE New England 39 บัส ที่ติดตั้งกังหันลมชนิด DFIG



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของ DFIG และระบบควบคุม

2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE New England 39 บัส ที่ใช้ในการศึกษา โดยแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ด้วยแบบจำลองอันดับที่ 4 ซึ่งติดตั้งระบบควบคุมแรงดันและโคโรนอร์เตอร์ เมื่อ G1 แทนระบบภายนอก จึงทำการติดตั้ง PSS ที่ G2 – G10 ส่วนกังหันลมชนิด DFIG จะติดตั้งที่บัส 14, 16 และ 17 ซึ่งมีพิกัดกำลังรวมกัน 200 MW [3] ในการศึกษา สมมุติให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตและโหลดอย่าง มาก และเกิดสิ่งรบกวนต่างๆ เช่น ความผิดพลาดของ 3 เฟส กำลังไฟฟ้าไม่ สม่าเสมอของลม เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่มีความ หลวมต่ำ โมงงานวิจัยนี้จะใช้การประสานควบคุมของ DFIG ที่ติดตั้ง POD และ PSS เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบของ DFIG และระบบควบคุม [4] ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมทางฝั่งโรเตอร์โดยใช้เทคนิค

การควบคุมเวกเตอร์ (vector control) ซึ่งสามารถแยกการควบคุมทั้ง กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างอิสระ ในที่นี้ได้ใช้แกน อ้างอิงแบบ flux-based rotating frame โดยกระแสโรเตอร์ในแกนตั้ง (i_{qr}) ใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงในขณะที่กระแสโรเตอร์ในแกนตรง (i_{dr}) ใช้ เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนดังนี้

$$p_c = \frac{x_s}{x_s + x_r} v_{qr}^2 \tag{1}$$

$$q_c = -\frac{x_m v_{qr}}{x_s + x_r} - \frac{v^2}{x_s}$$

เมื่อ p_c และ q_c คือกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ x_s คือ สเตตเตอร์รีแอคแตนซ์ (stator self-reactance) x_r คือรีแอคแตนซ์ที่เกี่ยวข้อ (magnetizing reactance) และ v คือแรงดันของ DFIG

ในบทความนี้ใช้ POD เพื่อทำเสถียรภาพผ่านการควบคุม แรงดัน (voltage control) ซึ่ง POD มีโครงสร้างที่สชดเขย น้าหรับควบคุม ลำดับที่สองเหมือนกับ PSS ที่ใช้ทั่วไป

3. การออกแบบการประสานควบคุมระหว่าง POD และ PSS

พิจารณาระบบป้อนกลับซึ่งแทนความไม่แน่นอนในระบบ ด้วยแบบจำลองความไม่แน่นอนเชิงผลคูณ [5] จากทฤษฎีอัตราขยาย ขนาดเล็กสามารถรับรองเสถียรภาพด้านความคงทนของระบบได้ก็ ต่อเมื่อ

$$\|\Delta G\|_\infty < 1 / \|(I + GK)^{-1}\|_\infty = 1/\gamma_\infty \tag{2}$$

เมื่อ G คือระบบที่พิจารณา K เป็นตัวควบคุมที่ออกแบบ ΔG คือความ ไม่แน่นอนในระบบเชิงผลคูณ $\|\cdot\|_\infty$ แทนค่าอนุกรมอนันต์ของฟังก์ชันถ่าย โอน ดังนั้นเมื่อทำให้ค่า γ_∞ มีค่าต่ำที่สุดก็จะทำให้ระบบมีส่วนต่อ เสถียรภาพลงตามความไม่แน่นอนในระบบได้สูงสุด

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าด้านออกของเครื่อง ก่อเกิดไฟฟ้าเชิง โครนีส (P_g) เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบกับ อัตราส่วนความหน่วง (ζ_m) ของโหมดการแกว่งกำลัง ไฟฟ้าที่ m ดังนั้นใน ที่นี้จึงเลือก P_g มาเพื่อพิจารณาหาค่าของ γ_∞ เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อ P_g เพิ่มขึ้น ค่าของ γ_∞ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ζ_m จะลดลง ซึ่ง ส่งผลเสียต่อเสถียรภาพความคงทนและสมรรถนะของตัวควบคุม ในที่นี้ นี้จะกำหนด P_g ให้อยู่ในรูปเซต (Set) ของกำลัง ไฟฟ้าด้านออกของเครื่อง ก่อเกิดไฟฟ้าเชิง โครนีสแต่ละตัวดังนี้

$$P_g = \{P_{g-2}, P_{g-3}, P_{g-1}, \dots, P_{g-10}\} \tag{3}$$

ในที่นี้กำหนดให้ P_{g-1}, \dots, P_{g-10} เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยปริมาณ ที่เท่ากัน ให้ a เป็นจำนวนข้อมูลของ P_{g-1} ที่พิจารณาข้อมูลที k ของ P_{g-1} หรือ P_{g-10} $k=1, \dots, a$ สามารถคำนวณหาค่า γ_∞ จาก (2) และ ζ_m ได้จากเมทริกซ์ ระบบของระบบปิด สามารถเขียน P_{g-1} ในรูปของลำดับเลขคณิตได้

$$P_{g-1} = P_{g-1} (1 + (a-1)d_m) \tag{4}$$

เมื่อ d_m เป็นผลต่างร่วมของลำดับเลขคณิต ให้ γ_∞^{max} คือค่าต่ำสุดของ γ_∞ และ ζ_m^{min} คือค่าสูงสุดของ ζ_m ในแต่ละชุดข้อมูลของ P_g เมื่อผลต่าง

ระหว่าง $\gamma_{\infty,k}$ และ γ_{∞}^{\min} มีค่าน้อยที่สุด เสถียรภาพความคงทนของตัวควบคุม PSS และ POD จะเป็นที่ยอมรับได้สำหรับ P_g ที่ค่าใดๆ เช่นเดียวกันเมื่อผลต่างระหว่าง ζ_m^{\max} และ ζ_m มีค่าน้อยที่สุด สมรรถนะการหน่วงการแกว่งของตัวควบคุม POD และ PSS จะได้รับการรับรองสำหรับทุกค่าของ P_g

เพื่อให้ตัวควบคุม POD และ PSS ให้ความคงทนและสมรรถนะสูงจึงตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมดังนี้

$$\text{Minimize } RF_1 \sum_{k=1}^N (\gamma_{\infty,k} - \gamma_{\infty}^{\min}) + \sum_{m=1}^M RF_2 \sum_{k=1}^N (\zeta_m^{\max} - \zeta_{m,k}) \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \zeta_m^{\max} \geq \zeta_{m,spec}, \gamma_{\infty}^{\min} \leq \gamma_{\infty,spec}$$

$$K_{sub,i}^{\min} \leq K_{sub,i}, K_{sub,j} \leq K^{\max}$$

$$T_{1,3}^{\min} \leq T_{1,3}, T_{1,3,j} \leq T_{1,3}^{\max}$$

$$T_{2,4}^{\min} \leq T_{2,4}, T_{2,4,j} \leq T_{2,4}^{\max}$$

$$i = 2, \dots, 10, j = 1, \dots, 3$$

เมื่อ $\gamma_{\infty,spec}$ และ $\zeta_{m,spec}$ คือค่าที่ยอมรับได้ของ γ_{∞}^{\min} และ ζ_m^{\max} ตามลำดับซึ่งกำหนดอย่างเหมาะสมโดยผู้ออกแบบ ให้ i และ j แทนลำดับที่ของ PSS และ POD ตามลำดับ OS คือจำนวนโหมการแกว่ง RF_1 และ RF_2 คือค่าตัวประกอบของการจัดอันดับ ซึ่งพิจารณาดังนี้

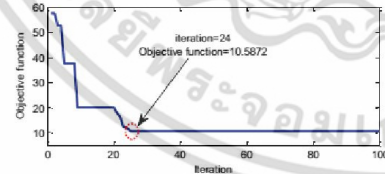
$$RF_1 = 1 - (\gamma_{\infty,spec} - \gamma_{\infty}^{\min}) / \gamma_{\infty,spec} \quad (6)$$

$$RF_2 = 1 - (\zeta_m^{\max} - \zeta_{m,spec}) / \zeta_m^{\max}$$

ในที่นี้ ทำการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีอัลกอริทึมเชิงหอย [6]

4. ผลการศึกษา

รูปที่ 3 แสดงเส้นโค้งเข้าหาค่าคง (Convergence curve) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (4) ผลการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD และ PSS แสดงดังในตารางที่ 1 เชื่อกันว่าตัวควบคุมที่นำเสนอว่า Robust POD and PSS ในที่นี้จะเปรียบเทียบกับ POD และ PSS ที่ออกแบบโดยการปรับปรุงอัตราส่วนความหน่วงโดยไม่พิจารณาเสถียรภาพความคงทน ซึ่งจะเรียกว่า Conventional POD and PSS โดยจะทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ใน 3 กรณีศึกษาแสดงในตารางที่ 2 รูปที่ 5-7 แสดงมุมโรเตอร์ของ G2-G10 เทียบกับ G1 ในกรณีศึกษาที่ 1 - 3 ตามลำดับ ในกรณีที่ 1 จะเห็นได้ Conventional POD and PSS และ Robust POD and PSS มีความสามารถหน่วงระบบได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มี POD and PSS ในกรณีที่ 2 มุมโรเตอร์ของ



รูปที่ 3 เส้นโค้งเข้าหาค่าคง

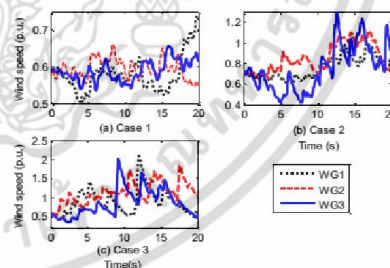
Conventional POD and PSS มีการแกว่งมากกว่าในกรณีของ Robust POD and PSS ในกรณีที่ 3 เห็นได้อย่างชัดเจนว่า Conventional POD and PSS ไม่สามารถคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบจนสูญเสียสมรรถนะการทำให้เสถียรภาพ ส่งผลให้การแกว่งเพิ่มขึ้นอย่างไม่สิ้นสุด ในทางตรงกันข้าม Robust POD and PSS มีความคงทนสูงต่อความไม่แน่นอนนี้ สามารถลดการแกว่งของมุมโรเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของ Robust POD and PSS

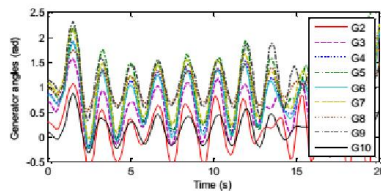
	Robust POD and PSS				
	K_{sub}	$T_{1,3}$	$T_{1,3,2}$	$T_{1,3,3}$	$T_{2,4}$
G2	30.8700	0.7166	0.0559	0.7426	0.0564
G3	30.3327	0.9700	0.0840	0.3860	0.0629
G4	6.5971	0.3289	0.0823	0.7011	0.0112
G5	28.1228	0.5091	0.0914	0.3539	0.0159
G6	23.8819	0.9852	0.0930	0.6051	0.0687
G7	38.6567	0.1956	0.0101	0.5876	0.0106
G8	22.6217	0.2761	0.0808	0.6567	0.0114
G9	44.5536	0.7855	0.0916	0.7827	0.0443
G10	16.6224	0.5537	0.0608	0.7905	0.0802
WG1	7.6583	0.7894	0.0231	0.6532	0.0678
WG2	15.6683	0.6172	0.0901	0.2583	0.0125
WG3	37.0423	0.1278	0.0120	0.5471	0.0278

ตารางที่ 2 กรณีศึกษาในการจำลองทางคอมพิวเตอร์

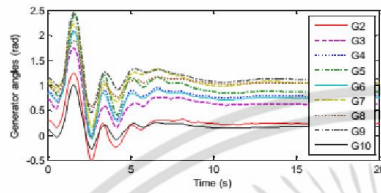
กรณี	กำลังไฟฟ้าด้านออกของเครื่องจักรโรเตอร์	สิ่งรบกวนจากภายนอก		รูปแบบของลม
		ค่าผิดพลาด	ความถี่ของแรงสั่น	
1	ไม่เปลี่ยนแปลง	-5.2% ทุกบัส	เกิดสั่นจลนศาสตร์ที่สายส่งระหว่างบัส 2 และบัส 3 ที่เวลา $t = 1.0$ s ทำจัดการสั่นจลนศาสตร์ด้วยการเปิดสายส่งเมื่อที่เวลา $t = 1.10$ s และไม่ต่อสายส่งกลับเข้าไป	รูปที่ 4 (a)
2	+5.2% ทุกบัส	-5.2% ทุกบัส	เกิดสั่นจลนศาสตร์ที่บัส 18 เวลา $t = 1$ s เป็นเวลา 100ms	รูปที่ 4 (b)
3	+8.5% ทุกบัส	-5.2% ทุกบัส	เกิดสั่นจลนศาสตร์ที่สายส่งระหว่างบัส 2 และบัส 3 ที่เวลา $t = 1.0$ s ทำจัดการสั่นจลนศาสตร์ด้วยการเปิดสายส่งเมื่อที่เวลา $t = 1.10$ s และไม่ต่อสายส่งกลับเข้าไป	รูปที่ 4 (c)



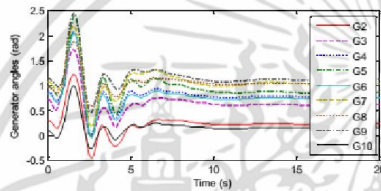
รูปที่ 4 รูปแบบของลม



(a) Without POD and PSS

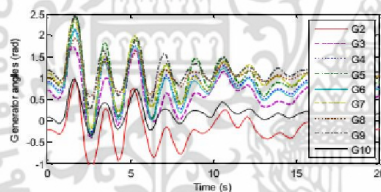


(b) Conventional POD and PSS

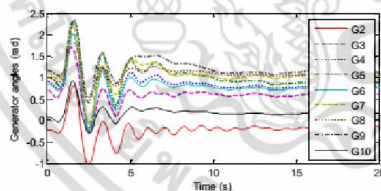


(c) Robust POD and PSS

รูปที่ 5 มุมโรเตอร์ในกรณีที่ 1

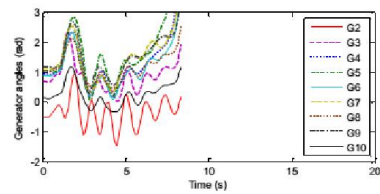


(a) Conventional POD and PSS

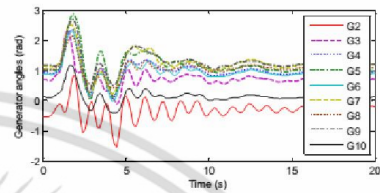


(b) Robust POD and PSS

รูปที่ 6 มุมโรเตอร์ในกรณีที่ 2



(a) Conventional POD and PSS



(b) Robust POD and PSS

รูปที่ 7 มุมโรเตอร์ในกรณีที่ 3

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบการประสานควบคุมระหว่าง DFIG ที่ติดตั้ง POD และ PSS โดยใช้หลักความคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบ โดยประยุกต์ใช้ระบบควบคุมป้อนกลับที่มีความไม่แน่นอนเชิงผลคูณเพื่อตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสม แล้วใช้วิธีอัลกอริทึม หึ่งที่น้อยที่สุดค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม POD และ PSS โครงสร้างของ POD และ PSS เป็นแบบตัวคูณเชิงเฟสและตามลำดับที่สอง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในระบบจริง ผลการจำลองศึกษาในระบบ IEEE New England 39 บัส แสดงให้เห็นว่าการประสานการควบคุม DFIG ที่ติดตั้ง POD และ PSS ที่นำเสนอมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพและความคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบที่สูงกว่า DFIG ที่ติดตั้ง POD และ PSS ซึ่งออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994.
- [2] F. M. Hughes, O. A-Lara, N. Jenkins, and G. Strbac, "A power system stabilizers for DFIG-based wind generation", IEEE Trans., Power Systems, vol.21, no.8, pp. 763-72, May 2006.
- [3] H. Hunang and C.Y. Chung, "Coordinated damping control design for DFIG-based wind generation considering power output variation", IEEE Trans., Power Systems, vol. 27, no. 4, pp. 1916-25, November 2012.
- [4] F. Milano, "Power System Analysis Toolbox version 2.1.8", 2013.
- [5] D. W. Gu, P. Hr. Petkov, and M.M. Konstantinov, "Robust Control Design With MATLAB", Springer, 2005.
- [6] Xin-She Yang, "Engineering Optimization", John Wiley & Sons, 2010.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ทศพร สุรินทร์แก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	15 มีนาคม 2533 ที่ จ.เชียงราย
ที่อยู่	17 หมู่ 20 ต.เวียงชัย อ.เวียงชัย จ.เชียงราย 57210
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนและรางวัล	2556 ทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2556 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน จาก สทพ.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้