



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบคงทนด้วยกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิด
ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทิศทางซึ่งติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า
**Robust Power System Stabilization by Doubly Fed Induction Generator
Wind Turbine with Power Oscillation Damper**

นายอิสระชัย งามหรุ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณทุนรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบคงทนด้วยกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิด
ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทิศทางซึ่งติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า
**Robust Power System Stabilization by Doubly Fed Induction Generator
Wind Turbine with Power Oscillation Damper**

นายอิสระชัย งามหรุ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณทุนรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบคงทนด้วยกักเก็บลมนชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทิศทางซึ่งติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า

แหล่งเงิน งบรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557

ประจำปีงบประมาณ 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 60000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2556 ถึง กันยายน 2557

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายอิสระชัย งามหรุ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า (Power oscillation damper, POD) ซึ่งติดตั้งกับกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly-fed induction generator, DFIG) โดยพิจารณาความคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบ โครงสร้างของ POD เป็นแบบตัวชดเชยเฟส นำหน้า/ล่าหลังลำดับที่สอง ในที่นี้ได้แทนความไม่แน่นอนในระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงการผลิตกำลังไฟฟ้าโหลด และพารามิเตอร์ระบบ เป็นต้น ด้วยความไม่แน่นอนเชิงผลคูณ จากนั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมหึ่งห้อยเพื่อให้ได้สมรรถนะการทำเสถียรภาพและความคงทนสูง ผลการจำลองคอมพิวเตอร์ในระบบ IEEE 2 พื้นที่ 4 เครื่องจักร แสดงให้เห็นว่าการควบคุมประสานของ DFIG ที่ติดตั้ง POD ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการทำเสถียรภาพระบบและมีความคงทนสูงกว่า POD ที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมนชนิดป้อนสองทาง ตัวหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพความคงทน ความไม่แน่นอนในระบบ

Research Title: Robust Power System Stabilization by Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine with Power Oscillation Damper

Researcher: Issarachai Ngamroo

Faculty: Engineering **Department:** Electrical Engineering

ABSTRACT

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

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

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

อิสรระชัย งามทรู

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 การลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทนด้วยกังหันลม DFIG ซึ่งติดตั้ง POD ด้วยวิธีการออกแบบที่ นำเสนอ	4
2.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษาและแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	4
2.2 วิธีออกแบบที่นำเสนอ.....	12
2.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	13
บทที่ 3 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	21
บทที่ 4 ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	22
บรรณานุกรม.....	23
ภาคผนวก.....	25
ประวัตินักวิจัย.....	25

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าพารามิเตอร์ของ DFIG	5
2.2 กรณีศึกษา.....	15
2.3 ผลวิเคราะห์ค่าไอเกินและสัดส่วนการหมุนของโหมดการแกว่ง.....	16

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงด้วย DFIG ซึ่งติดตั้ง POD.....	4
2.2 โครงสร้างของกังหันลม DFIG และระบบควบคุม.....	6
2.3 กรอบการหมุนเมื่อใช้ฟลักซ์แม่เหล็กเป็นแกนฐานอ้างอิง.....	8
2.4 ระบบควบคุมความเร็วโรเตอร์	10
2.5 ระบบควบคุมแรงดัน.....	10
2.6 ระบบควบคุมมุมพิชต์.....	11
2.7 โครงสร้าง POD.....	11
2.8 ระบบควบคุมผสม H/H_{∞}	12
2.9 บริเวณเสถียร D.....	13
2.10 กราฟการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม.....	14
2.11 การเปลี่ยนแปลงของ $\ T_{z_{\infty w1}}\ _{\infty}$ เมื่อเพิ่ม P_{ie} จาก 3.0 p.u. ถึง 6.5 p.u.....	17
2.12 ทางเดินของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่เมื่อเพิ่ม P_{ie} จาก 3.0 p.u. ถึง 6.5 p.u.....	17
2.13 รูปแบบความเร็วลม (a) กรณี 1 (b) กรณี 2 (c) กรณี 3 (d) กรณี 4.....	18
2.14 ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนส์ในกรณีที่ 1	18
2.15 ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนส์ในกรณีที่ 2	19
2.16 ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนส์ในกรณีที่ 3	19
2.17 ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนส์ในกรณีที่ 4	20

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังด้วยสายส่งเชื่อมโยง นอกจะเสริมความน่าเชื่อถือได้ในระบบให้สูงขึ้นแล้วยังทำให้เกิดผลดีในเชิงเศรษฐศาสตร์ อย่างไรก็ตาม การเชื่อมต่อระบบตามยาว (Longitudinal interconnection) ก่อให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ (Inter-Area Oscillation) ที่มีความหน่วงต่ำและความถี่การแกว่งในช่วง 0.2-0.8 Hz [1] ซึ่งเป็นปัญหาที่ทำลายทางด้านเสถียรภาพและการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง ในกรณีที่ไม่สามารถหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้จะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง และ ทำให้ระบบสูญเสียความเป็นซิงโครนัส เป็นต้น เพื่อแก้ปัญหการแกว่งกำลังไฟฟ้า ได้มีการประยุกต์ใช้ตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer, PSS) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีติดตั้งมากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส อย่างไรก็ตาม เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อสัญญาณควบคุมการแกว่งกำลังไฟฟ้าจาก PSS ส่งไปที่ตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติ จะส่งผลเสียต่อผลตอบสนองของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [1]

ปัจจุบัน การผลิตไฟฟ้าด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานลมได้รับความสนใจอย่างสูง เมื่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังลมมีส่วนร่วมมากขึ้นในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ จึงเกิดแนวคิดว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังลมควรให้การสนับสนุนระบบไฟฟ้ากำลังในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังลมได้รับความสนใจอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น ความสามารถในการลดหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังลมได้รับการพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของ Grid code ของประเทศสเปน [2] โดยเฉพาะกั้นหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly-fed induction generator: DFIG) ได้รับความสนใจอย่างสูง เนื่องจาก DFIG มีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างรวดเร็ว [3] ดังนั้น จึงสามารถนำ DFIG ไปประยุกต์ใช้เพื่อหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ DFIG เพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังดังต่อไปนี้ ใน [4] ได้ติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าเข้าไปในแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังลมโดยการเลียนแบบจากตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer, PSS) โดยทั่วไป การควบคุมคอนเวอร์เตอร์จะใช้หลักการควบคุมเวกเตอร์และการควบคุมขนาดและมุมของฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux Magnitude and Angle Control, FMAC) ใน [5] มีการติดตั้ง PSS เข้าไปในกั้นหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) ซึ่งใช้ค่าสลิปของ DFIG เป็นสัญญาณอินพุท นอกจากนี้ ใน [6] และ [7] ได้ใช้กำลังไฟฟ้าของสเตเตอร์และแรงดันที่ขั้วของ DFIG เป็นสัญญาณอินพุทของ DFIG ตามลำดับ ผลการศึกษาใน [5-7] แสดงให้เห็นว่า PSS ที่ใช้สัญญาณอินพุทต่างๆ นั้น สามารถ

ทำเสถียรภาพระบบได้ดี ใน [8] ได้นำเสนอการควบคุมอย่างเหมาะสมโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม DFIC ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ใน [9] ได้นำเสนอวิธีการควบคุมประสมระหว่างวิธีการกำหนดโครงสร้างไอเก้นแวลูวิธีทำให้เหมาะสมแบบไม่เชิงเส้นสำหรับ PSS แบบดั้งเดิมซึ่งมีหลายสัญญาณอินพุตเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังได้นำการใช้อัลกอริทึมวิธีกุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) [10] มาปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมของกังหันลม ใน [11] ได้นำเสนอวิธีทางเดินของรากเพื่อออกแบบตัวควบคุมของกังหันลมเพื่อเพิ่มการหน่วงของโหมดการแกว่ง ต่อมา มีการนำเสนอ PSS สำหรับกังหันลมที่ปรับความเร็วได้โดยใช้สัญญาณอินพุตเป็นความถี่ของระบบโดยใช้หลักการ FMAC หรือการควบคุมเวกเตอร์ [12] ผลศึกษาแสดงให้เห็นว่า PSS ที่นำเสนอนี้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้ยังมีการควบคุมที่ง่ายกว่า PSS แบบดั้งเดิมโดยไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการติดตั้งและต้องการเพียงสัญญาณเฉพาะแห่งเป็นอินพุตเท่านั้น

ในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ได้แสดงให้เห็นว่า DFIC สามารถทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ POD เหล่านี้ได้รับการออกแบบจากจุดทำงานเพียงจุดเดียว ดังนั้น ภายใต้เงื่อนไขการดำเนินงานต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ สิ่งรบกวนจากภายนอก และระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้น ฯลฯ ตัวควบคุมเหล่านี้จะไม่สามารถทนต่อความไม่แน่นอนของระบบ และไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้

งานวิจัยนี้นำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power oscillation damper: POD) แบบคงทนสำหรับ DFIC เพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยง โครงสร้างของ POD นั้นเหมือนกับ PSS เป็นแบบตัวชดเชยเฟสนำหน้า-ล่าหลัง (Lead-lag compensator) ลำดับที่สอง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่ายกับระบบไฟฟ้ากำลังจริง ในที่นี้จะใช้การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ POD ที่เหมาะสมอย่างอัตโนมัติด้วยวิธีหิ่งห้อย (Firefly optimization algorithm) เพื่อให้ POD ที่ได้มีสมรรถนะสูงในการหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนระบบเช่นการลัดวงจรขึ้นและมีความคงทนสูงต่อความไม่แน่นอนในระบบ การประเมินประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่นำเสนอจะดำเนินการด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับตัวควบคุมดั้งเดิม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อนำเสนอการควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังลมอย่างชาญฉลาดสำหรับทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) เพื่อนำเสนอวิธีออกแบบคงทนแนวใหม่สำหรับตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังลม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงสองพื้นที่ของ IEEE

- 2) ศึกษาด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) พิจารณาเลือกระบบไฟฟ้ากำลังศึกษาเชื่อมโยงสองพื้นที่ของ IEEE
- 2) ศึกษาการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกังหันลมแบบ DFIG
- 3) วิเคราะห์เสถียรภาพระบบในสถานะชั่วคราวและพลวัต ด้วยการจำลองระบบในโดเมนเวลาด้วยคอมพิวเตอร์
- 4) ศึกษาและออกแบบ POD ด้วยวิธีนำเสนอ
- 5) ทำการออกแบบ POD โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 6) ทดสอบผลการลดการแกว่งของ POD ที่ออกแบบมาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบโดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบทั่วไป
- 7) ทดสอบความคงทนของ POD ที่ออกแบบมาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังพร้อมกับความไม่แน่นอนในระบบในสถานะต่างๆโดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบดั้งเดิม
- 8) สรุปผลการศึกษาวิจัยเพื่อเขียนบทความส่งวารสารระดับนานาชาติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

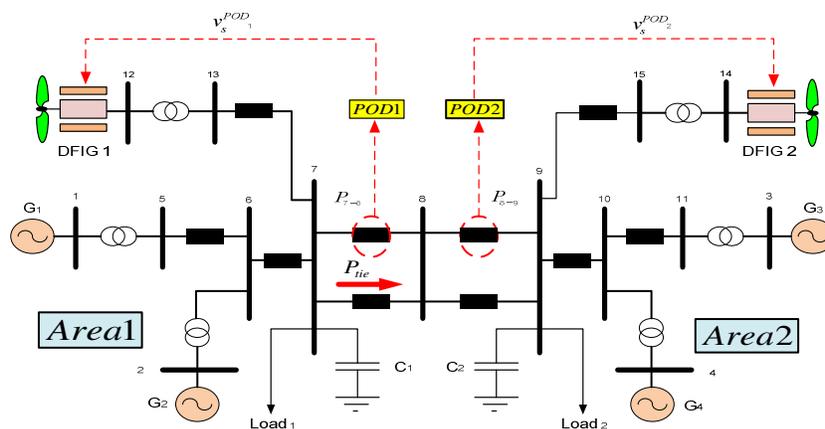
- 1) งานวิจัยนี้สามารถตีพิมพ์เป็นบทความฉบับเต็ม (Full paper) ในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI
- 2) องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบ POD ที่คงทนสำหรับ DFIG เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยง
- 3) เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาโท

บทที่ 2

การลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าอย่างคงทนด้วยกังหันลม DFIG ซึ่งติดตั้ง POD ด้วยวิธีการออกแบบที่นำเสนอ

ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบศึกษา แบบจำลอง DFIG และ POD แล้วจึงอธิบายวิธีออกแบบ POD ที่นำเสนอ แล้วจึงแสดงผลการทดสอบ POD ที่ออกแบบมาด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

2.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษาและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

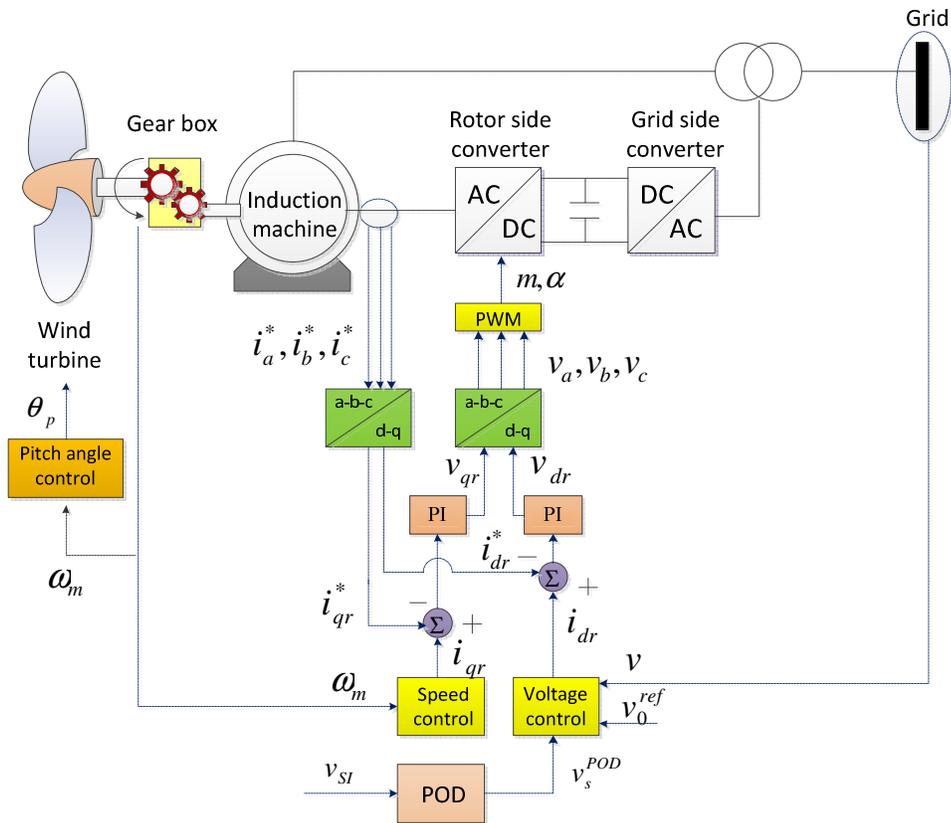


ภาพที่ 2.1 การทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงด้วย DFIG ซึ่งติดตั้ง POD

ภาพที่ 2.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังแบบสองพื้นที่สี่เครื่องจักรที่ใช้ในการศึกษา ในที่นี้แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสด้วยแบบจำลองอันดับที่ 6 พร้อมติดตั้งตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (automatic voltage regulator, AVR) ชนิดที่ 3 และเทอร์บายไกวอนอร์ชนิดที่ 2 [13] กังหันลม DFIG ติดตั้งที่บัสที่ 7 เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ ในการศึกษานี้จะสมมติว่า กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเชื่อมโยงทั้งสองเส้นระหว่างบัสที่ 7 และบัสที่ 8 มีปริมาณสูงมาก นอกจากนี้ยังเกิดลัดวงจรในระบบบ่อยครั้ง จึงเป็นผลให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ซึ่งมีความหน่วงต่ำจนทำให้ระบบไม่เสถียร ในที่นี้จะใช้ DFIG เพื่อที่จะลดการแกว่งกำลังไฟฟ้า ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของ DFIG

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของ DFIG

Parameters	Value
Power rating	50 MVA
Frequency rating	60 Hz
Stator resistance (r_s)	0.01 p.u.
Stator reactance (x_s)	0.10 p.u.
Rotor resistance (r_r)	0.01 p.u.
Rotor reactance (x_r)	0.08 p.u.
Magnetizing reactance (x_m)	3.00 p.u.
Inertia constants (H_m)	3 kWs/kVA
Gearbox ratio	1/89
Number of poles	4
Blade length	75 m
Number of blade	3
Pitch angle time constant (T_p)	3
Pitch control gain (K_p)	10
Power control time constant (T_e)	0.01
Voltage control gain (K_e)	50



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของกังหันลม DFIG และระบบควบคุม

2.1.1 แบบจำลองกังหันลม DFIG

ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของกังหันลม DFIG และระบบควบคุม สามารถแสดงสมการทางไฟฟ้าของสเตเตอร์และโรเตอร์ได้คือ

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

เมื่อ v_{ds} , v_{qs} , v_{dr} และ v_{qr} เป็นแรงดันสเตเตอร์และโรเตอร์ในแกน d และ q ตามลำดับ

i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} และ i_{qr} เป็นกระแสสเตเตอร์และโรเตอร์ในแกน d และ q ตามลำดับ

v_a , v_b และ v_c เป็นแรงดันเฟส a, b และ c ตามลำดับ

r_s และ r_r เป็นความต้านทานของสเตเตอร์และโรเตอร์ ตามลำดับ

x_s เป็นรีแอกแตนซ์ของสเตเตอร์

x_u เป็นรีแอกแตนซ์แมกเนไตซ์ของสเตเตอร์

ω_m เป็นความเร็วโรเตอร์

ในที่นี้สามารถแสดงแรงดันสเตเตอร์ในแกน d และ q ซึ่งเป็นฟังก์ชันของขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่ขั้วคือ

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

เมื่อ v และ θ เป็นขนาดและเฟสของแรงดันที่ขั้ว ตามลำดับ

กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของ DFIG คือ

$$\begin{aligned} p &= v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} \\ q &= v_{ds} i_{ds} - v_{qs} i_{qs} + v_{dc} i_{dc} - v_{qc} i_{qc} \end{aligned} \quad (2.3)$$

เมื่อ p และ q เป็นกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือน ตามลำดับ

v_{dc} และ v_{qc} เป็นแรงดันในแกน d และ q ของคอนเวอร์เตอร์ ตามลำดับ

i_{dc} และ i_{qc} กระแสในแกน d และ q ของคอนเวอร์เตอร์ ตามลำดับ

กำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ไปยังกริดไฟฟ้าคือ

$$\begin{aligned} p_c &= v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} \\ q_c &= v_{dc} i_{dc} - v_{qc} i_{qc} \end{aligned} \quad (2.4)$$

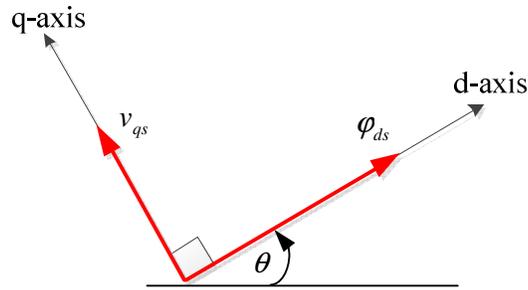
เมื่อ p_c และ q_c เป็นกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของคอนเวอร์เตอร์ที่ไหลไปกริดไฟฟ้า ตามลำดับ

ส่วนกำลังไฟฟ้าด้านโรเตอร์คือ

$$\begin{aligned} p_r &= v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ q_r &= v_{dr} i_{dr} - v_{qr} i_{qr} \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อ p_r และ q_r เป็นกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของโรเตอร์ตามลำดับ

เมื่อสมมติว่า ไม่มีกำลังสูญเสียในคอนเวอร์เตอร์ จะได้ $p_c = p_r$ เนื่องจากสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนอย่างเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 2.3 กรอบการหมุนเมื่อใช้ฟลักซ์แม่เหล็กเป็นแกนฐานอ้างอิง

ภาพที่ 3 แสดงกรอบการหมุนเมื่อใช้ฟลักซ์แม่เหล็กเป็นแกนฐานอ้างอิงซึ่งใช้สร้างแบบจำลองกังหันลม DFIG เนื่องจาก ค่าเริ่มต้นของ $\theta = 0$ สามารถเขียนสมการที่ (2.2) ได้คือ

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

และสมการที่ (2.3) คือ

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

สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์สเตเตอร์และกระแสได้คือ

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

เมื่อ φ_{ds} และ φ_{qs} เป็นฟลักซ์ของสเตเตอร์ในแกน d และ q ตามลำดับ

แสดง (2.8) ในรูปของกระแสสเตเตอร์จะได้

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

แทนสมการที่ (9) ในสมการที่ (7) จะได้สมการกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนที่ DFIG จ่ายเข้าไปในกริดไฟฟ้าซึ่งแสดงด้วยกระแสโรเตอร์แกน d และ q คือ

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{x_s}{x_s + x_u} v i_{qr} \\
 q &= -\frac{x_u v i_{dr}}{x_s + x_u} - \frac{v^2}{x_u}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

ข้อสังเกต

- (1) กำลังไฟฟ้าจริง p ด้านออกสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสในคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ในแกน q หรือ i_{qr}
- (2) กำลังไฟฟ้าเสมือนด้านออก q สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสในคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ในแกน d หรือ i_{dr}
- (3) กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนสามารถควบคุมได้เป็นอิสระต่อกัน
สมการการเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแสดงได้คือ

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega}_m &= (\tau_m - \tau_e) / 2H_m \\
 \tau_e &= (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

เมื่อ $\dot{\omega}_m$ เป็นอนุพันธ์ของความเร็วโรเตอร์เทียบเวลา τ_m และ τ_e เป็นแรงบิดทางกลและไฟฟ้า ตามลำดับ H_m เป็นค่าคงที่ความเฉื่อยของโรเตอร์ φ_{ds} และ φ_{qs} เป็นฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ในแกน d และ q ตามลำดับ

ดังนั้น สามารถแสดงสมการแรงบิดไฟฟ้าได้คือ

$$\tau_e = x_u (i_{qr} i_{ds} + i_{dr} i_{qs})
 \tag{2.12}$$

กำลังทางกล p_w สามารถแสดงได้ด้วย

$$p_w = \frac{n_g \rho}{2S_n} c_p(\lambda, \theta_p) A_r v_w^3
 \tag{2.13}$$

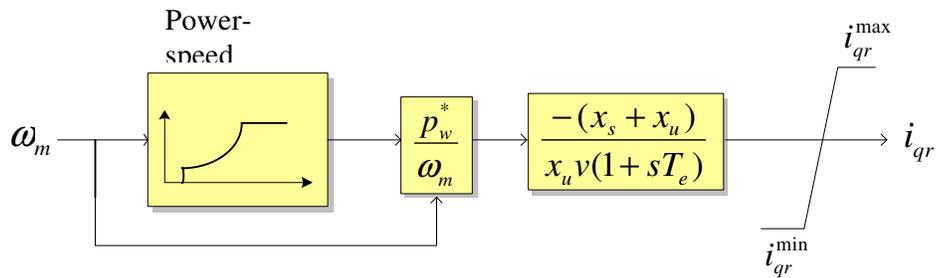
เมื่อ v_w คือความเร็วลม θ_p คือมุมพิทช์ n_g คือจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า S_n คือพิทช์กำลังไฟฟ้า ρ คือความหนาแน่นอากาศ c_p คือสัมประสิทธิ์กำลัง λ คือสัดส่วนความเร็วทิว (tip speed ratio) A_r คือพื้นที่หน้าตัดโรเตอร์ สามารถประมาณ $c_p(\lambda, \theta_p)$ ด้วย

$$c_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta_p - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.14)$$

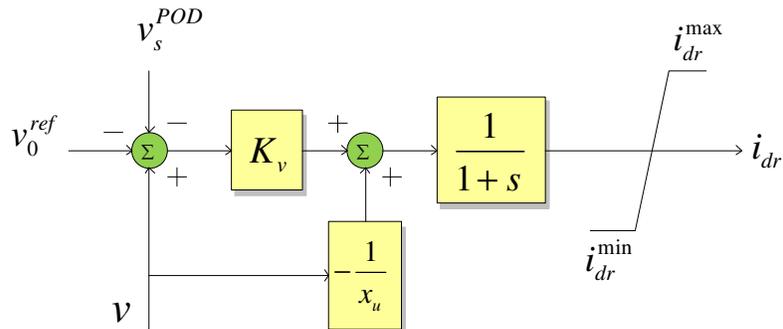
เมื่อสามารถประมาณ λ_i ด้วย

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta_p} - \frac{0.35}{\theta_p^3 + 1} \quad (2.15)$$

ภาพที่ 2.4 แสดงระบบควบคุมความเร็วโรเตอร์ด้วยกระแสโรเตอร์ i_{qr} ภาพที่ 2.5 แสดงระบบควบคุมแรงดันด้วยกระแสโรเตอร์ i_{dr}



ภาพที่ 2.4 ระบบควบคุมความเร็วโรเตอร์



ภาพที่ 2.5 ระบบควบคุมแรงดัน

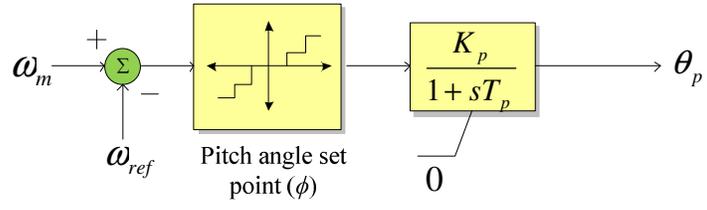
ดังนั้น สามารถแสดงสมการอนุพันธ์ของกระแส i_{qr} และ i_{dr} ได้คือ

$$\dot{i}_{qr} = \left(-\frac{x_s + x_u}{x_u v} p_w^*(\omega_m) / \omega_m - i_{qr} \right) \frac{1}{T_e} \quad (2.16)$$

$$\dot{i}_{dr} = K_v (v - v_{ref}) - \frac{v}{x_u} - i_{dr} \quad (2.17)$$

$$0 = v_{ref}^0 - v_{ref} + v_s^{POD} \quad (2.18)$$

เมื่อ v_0^{ref} คือค่าแรงดันอ้างอิงเริ่มต้น v_s^{POD} คือสัญญาณควบคุมจาก POD p_w^* คือกำลังไฟฟ้าที่ v_0^{ref} K_v คือค่าเกนของการควบคุมแรงดัน T_e คือค่าคงตัวทางเวลาของการควบคุมกำลังไฟฟ้า i_{dr}^{min} , i_{dr}^{max} , i_{qr}^{min} , และ i_{qr}^{max} คือค่ากระแสโรเตอร์สูงสุดและต่ำสุดในแกน d และ q ตามลำดับ ในที่นี้ จะใช้สัญญาณจาก POD เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้า



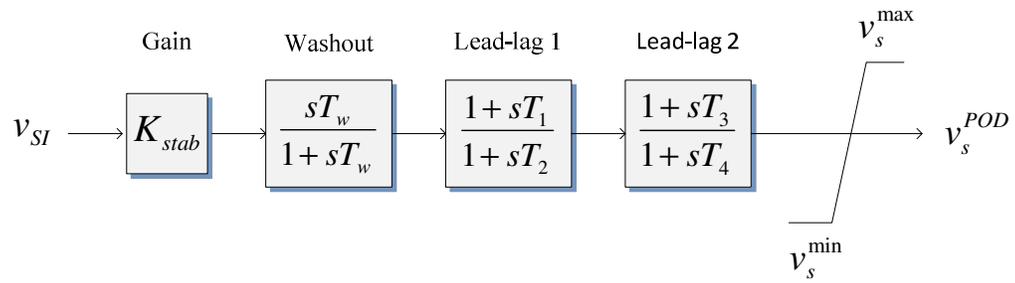
ภาพที่ 2.6 ระบบควบคุมมุมพิทช์

ภาพที่ 6 แสดงการควบคุมมุมพิทช์ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการอนุพันธ์คือ

$$\dot{\theta}_p = (K_p \phi(\omega_m - \omega_{ref}) - \theta_p) / T_p \tag{2.19}$$

เมื่อ ϕ เป็นฟังก์ชันซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมพิทช์เมื่อเกิดความแตกต่างของ $\omega_m - \omega_{ref}$
 ω_{ref} เป็นค่าความเร็วอ้างอิง
 K_p เป็นเกนควบคุมมุมพิทช์
 T_p เป็นค่าคงตัวทางเวลาการควบคุมมุมพิทช์

2.1.2 แบบจำลอง POD



ภาพที่ 2.7 โครงสร้าง POD

รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างของ POD ซึ่งเป็นแบบเฟสนำ/ตามอันดับที่สอง ประกอบด้วยค่าเกน K_{stab} ค่าเวลาคงตัวสำหรับกรองสัญญาณ (Washout filter) $T_w=10$ และส่วนเฟสนำ/ตามสองส่วนซึ่งแต่ประกอบด้วยค่าเวลาคงตัว T_1, T_2, T_3 และ T_4 ส่วน Washout filter การันตีว่าไม่มีสัญญาณเอาต์พุตของ POD ออกมาในสภาวะคงตัว สัญญาณอินพุต v_{SF} คือกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งระหว่างบัส 7 และบัส 12 (P_{Line}) สัญญาณเอาต์พุต v_s^{POD} ถูกจำกัดด้วยลิมิเตอร์ที่มีค่าต่ำสุด v_s^{min} และค่าสูงสุด v_s^{max} ในที่นี้จะหาค่าที่เหมาะสมของ $K_{stab}, T_1, T_2, T_3,$ และ T_4 ด้วยวิธีที่น่าเสนอ

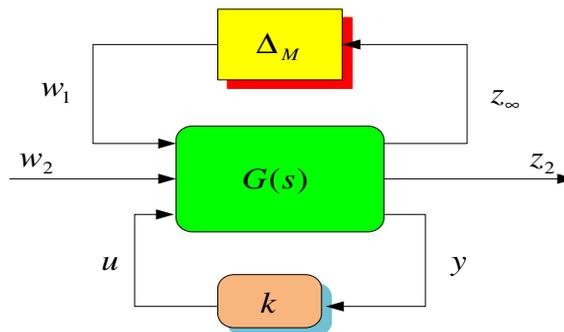
2.1.3 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำให้เป็นเชิงเส้น

สามารถแสดงสมการสถานะเชิงเส้นของระบบได้คือ

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2.20)$$

เมื่อระบบที่พิจารณานี้เป็นแบบอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว (single input single output (SISO)) ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าระบบ G .

2.2 วิธีออกแบบที่น่าเสนอ



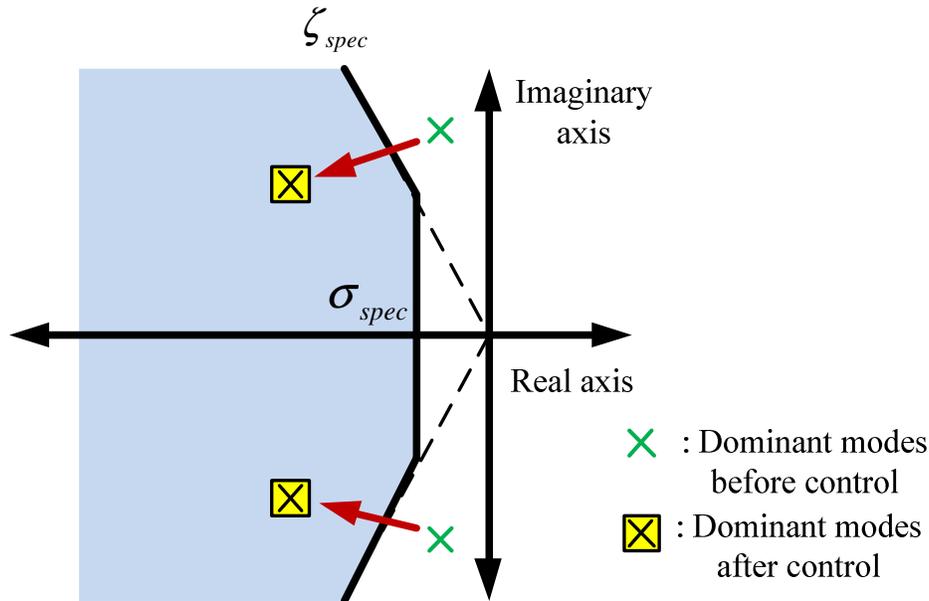
ภาพที่ 2.8 ระบบควบคุมผสม H_2/H_∞

เป็นที่ทราบดีว่าการควบคุม H_2 เหมาะสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะชั่วคราว ส่วนการควบคุม H_∞ เหมาะสำหรับการรักษาเสถียรภาพระบบต่อความไม่แน่นอนระบบ เพื่อให้ได้ทั้งสองจุดประสงค์ จึงมีการนำเสนอการควบคุมผสม H_2/H_∞ ภาพที่ 2.8 แสดงระบบควบคุมผสม H_2/H_∞ เมื่อ $G(s)$ เป็นระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา Δ_M เป็นแบบจำลองแทนความไม่แน่นอนระบบชนิดการคูณ k เป็นตัวควบคุม w_1 และ w_2 เป็นเวกเตอร์ของสิ่งรบกวนและอินพุตอื่นๆจากภายนอก ตามลำดับ y เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่วัด

ได้ u เป็นเวกเตอร์อินพุตจากตัวควบคุม z_2 เป็นเอาต์พุตที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะ H_2 และ z_∞ เป็นเอาต์พุตที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะ H_∞ เมื่ออ้างอิงจาก [14] เพื่อให้ตัวควบคุมที่ออกแบบมีสมรรถนะการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด จำเป็นต้องทำให้ออร์มสองของฟังก์ชันระหว่าง w_2 และ z_2 คือ $\|T_{z_2 w_2}\|_2$ ต่ำที่สุด ในขณะที่การทำให้ตัวควบคุมมีความคงทนต่อความไม่แน่นอนสูงสุดนั้นต้องทำให้ออร์มอันดับของฟังก์ชันระหว่าง w_1 และ z_∞ น้อยกว่าหนึ่ง ในที่นี้จะตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมของพารามิเตอร์ POD ดังนี้

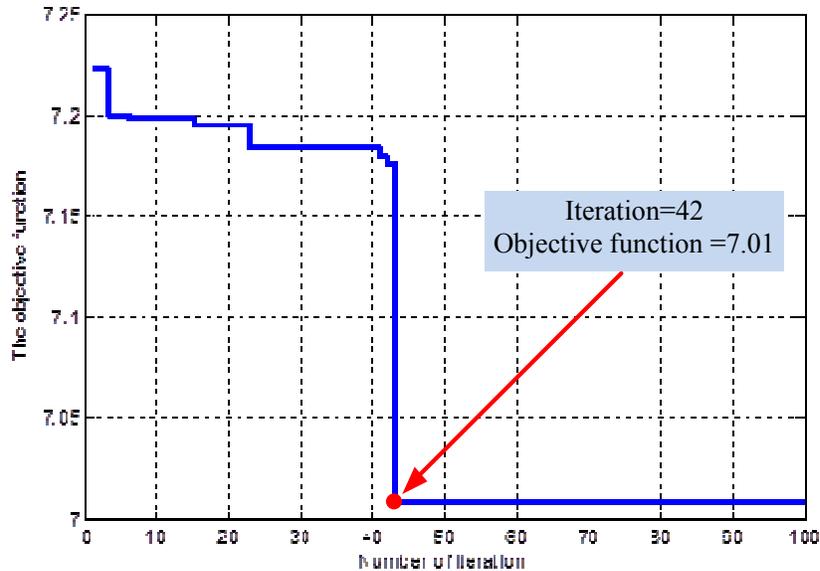
$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \|T_{z_2 w_2}\|_2 & (2.21) \\ & \text{Subject to } \|T_{z_\infty w_1}\|_\infty < 1 \\ & \zeta \geq \zeta_{spec}, \sigma \leq \sigma_{spec}, \\ & 0.01 \leq K_{stab} \leq 5, 0.01 \leq T_{1,3} \leq 20, 0.01 \leq T_{2,4} \leq 20. \end{aligned}$$

เมื่อทำให้สัดส่วนการหน่วงของโหมดการแกว่ง ζ มีค่ามากกว่าค่าสัดส่วนการหน่วงที่ตั้งไว้ ζ_{spec} และ ส่วนจริงของค่าไอเก้นของโหมดการแกว่ง σ มีค่าน้อยกว่าค่าส่วนจริงของค่าไอเก้นที่ตั้งไว้ σ_{spec} ดังแสดงด้วยพื้นที่เสถียรภาพ D ดังภาพที่ 2.9 ในที่นี้จะแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสมด้วยวิธีหิ้งห้อย [15]



ภาพที่ 2.9 บริเวณเสถียร D

2.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 2.10 กราฟการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม

ในที่นี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของ POD ที่เหมาะสมที่จุดทำงานในกรณีที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 2 ภาพที่ 2.10 แสดงกราฟการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (2.21) ผลการออกแบบตัวควบคุมกนทนที่น่าเสนอ ในที่นี้จะเรียกว่า DFIG-RPOD คือ

DFIG-RPOD:

$$K_{RPOD}(s) = 2.2722 \cdot \frac{1+9.7256s}{1+10.7324s} \cdot \frac{1+8.7259s}{1+10.5342s} \quad (2.22)$$

ในที่นี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการแกว่งของ DFIG-RPOD กับ POD แบบดั้งเดิมซึ่งจะเรียกว่า DFIG-CPOD ซึ่งทำให้เหมาะสมด้วยวิธีกำหนดตำแหน่งโพลเพื่อให้ได้สัดส่วนการหน่วงเช่นเดียวกับกรณีของ DFIG-RPOD ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \sum_{\zeta \leq \zeta_{spec}} |\zeta_{spec} - \zeta| + \sum_{\sigma \geq \sigma_{spec}} |\sigma_{spec} - \sigma| \quad (2.23) \\ & \text{Subject to } \zeta \geq \zeta_{spec}, \sigma \leq \sigma_{spec}, \\ & \quad 0.01 \leq K_{stab} \leq 5, 0.01 \leq T_{1,3} \leq 20, 0.01 \leq T_{2,4} \leq 20. \end{aligned}$$

แก้ปัญห (30) ด้วยอัลกอริทึมหึ่งห้อยจะได้

DFIG-CPOD:

$$K_{CPOD}(s) = 2.2132 \cdot \frac{1+5.5845s}{1+5.1794s} \cdot \frac{1+10.8641s}{1+9.5620s} \quad (2.24)$$

ตารางที่ 2.2 กรณีศึกษา (MVA base=100 MVA, Frequency base=60 Hz).

กรณี	ความเร็วลมเฉลี่ย, v_{wind} (m/s)	P_{tie} (p.u.)	ความไม่แน่นอนระบบ		
			Δv_{wind} (m/s)	ΔP_{tie} (p.u.)	สิ่งรบกวนระบบ
1	7.0	4.2	0.0	0.0	เกิดลัดวงจรสามเฟสที่บัส 6 ที่เวลา $t = 1$ s เคลียร์ฟอลต์ด้วยการเปิดเบรกเกอร์ที่สายส่งระหว่างบัส 8 และบัส 9 ที่เวลา $t = 1.05$ s และไม่มีการรีโคลส
2	7.0	3.0	0.0	1.2	เกิดลัดวงจรสามเฟสที่บัส 8 ที่เวลา $t = 1$ s เคลียร์ฟอลต์ด้วยการเปิดเบรกเกอร์ที่สายส่งระหว่างบัส 8 และบัส 9 ที่เวลา $t = 1.08$ s และไม่มีการรีโคลส
3	9.0	5.7	2.0	1.5	เกิดลัดวงจรสามเฟสที่บัส 9 ที่เวลา $t = 1$ s เคลียร์ฟอลต์ด้วยการเปิดเบรกเกอร์ที่สายส่งระหว่างบัส 8 และบัส 9 ที่เวลา $t = 1.10$ s และไม่มีการรีโคลส
4	13.5	4.5	6.5	0.3	เหมือนกรณีที่ 2

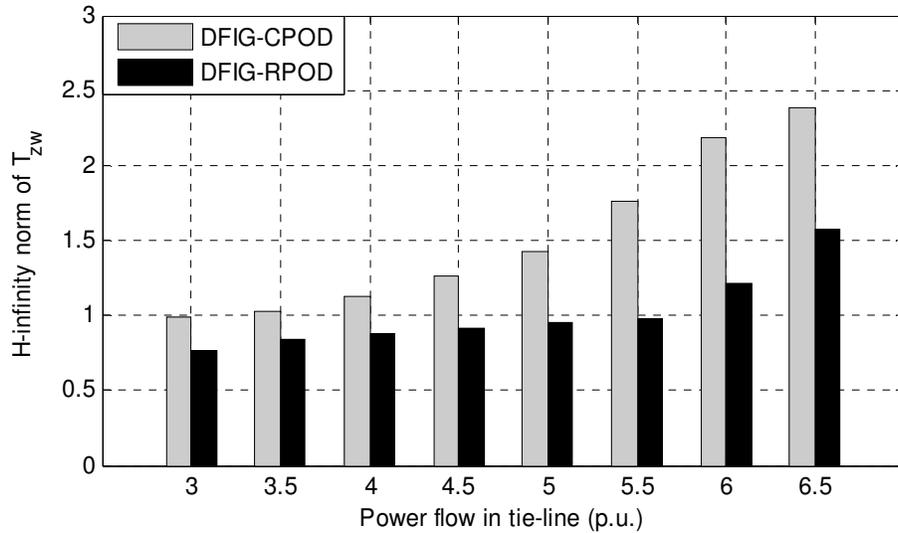
ตารางที่ 2.3 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าไอเกินของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่และโหมดโลคอล (local mode) ในกรณีที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อไม่มี POD ค่าสัดส่วนการหน่วงของโหมดการแกว่งต่ำมาก ในทางตรงข้าม ทั้ง DFIG-CPOD และ DFIG-RPOD สามารถปรับปรุงสัดส่วนการหน่วงได้ตามค่าที่ตั้งไว้

ตารางที่ 2.3 ผลวิเคราะห์ค่าไอเก้นและสัดส่วนการหน่วงของโหมดการแกว่ง

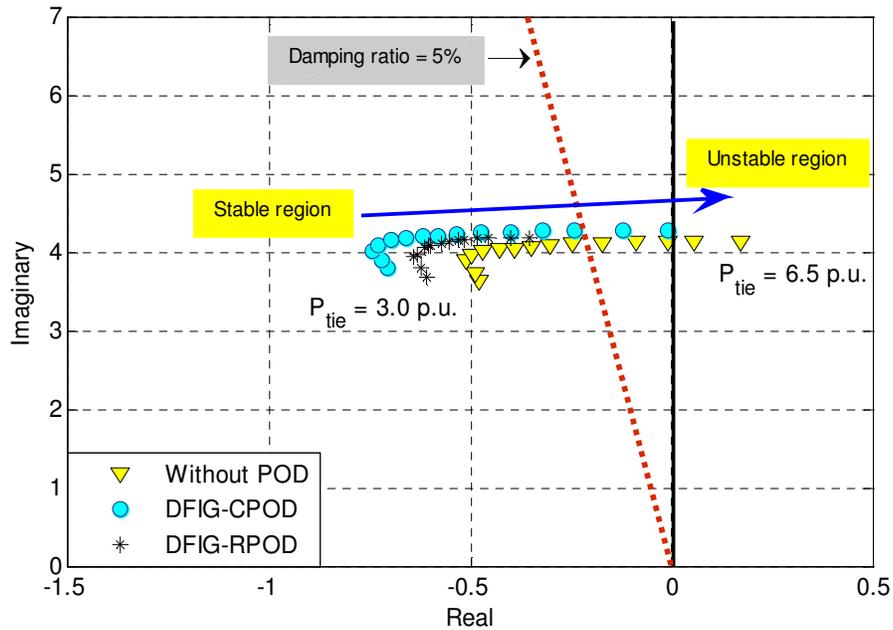
Type of controller	Oscillation modes	Eigenvalue	Damping ratio (%)	Frequency (Hz)
Without POD	Inter-area	$-0.170 \pm 4.010i$	4.24	0.6382
	Local 1	$-0.767 \pm 6.950i$	11.10	1.1061
	Local 2	$-1.050 \pm 7.160i$	14.50	1.1395
DFIG-CPOD	Inter-area	$-0.618 \pm 4.050i$	15.08	0.6446
	Local 1	$-1.110 \pm 6.960i$	15.80	1.0982
	Local 2	$-1.210 \pm 7.190i$	16.60	1.1443
DFIG-RPOD	Inter-area	$-0.657 \pm 4.070i$	16.05	0.6478
	Local 1	$-1.110 \pm 6.970i$	15.70	1.1093
	Local 2	$-1.210 \pm 7.190i$	16.60	1.1443

ในที่นี้ จะประเมินความคงทนของ DFIG-CPOD และ DFIG-RPOD ด้วยค่าของ $\|T_{z_{\infty w1}}\|_{\infty}$ ภาพที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบค่า $\|T_{z_{\infty w1}}\|_{\infty}$ ของ DFIG-CPOD และ DFIG-RPOD เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า P_{tie} จาก 3.0 p.u. ถึง 6.5 p.u. จะเห็นว่า $\|T_{z_{\infty w1}}\|_{\infty}$ ในกรณีของ DFIG-CPOD เพิ่มขึ้นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่า DFIG-CPOD มีความคงทนน้อยลงเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ไหลมีค่ามากขึ้น ในทางตรงกันข้าม $\|T_{z_{\infty w1}}\|_{\infty}$ ในกรณีของ DFIG-RPOD มีการเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่า แสดงให้เห็นว่า DFIG-RPOD มีความคงทนสูงต่อกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

ภาพที่ 2.12 แสดงทางเดินของค่าไอเก้นซึ่งแสดงโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่เมื่อเพิ่ม P_{tie} จาก 3.0 p.u. ถึง 6.5 p.u. จะเห็นว่าที่กำลังไฟฟ้าสูง โหมดการแกว่งในกรณีไม่มี POD และ DFIG-CPOD มีแนวโน้มเคลื่อนไปยังบริเวณที่ไม่เสถียร ในทางตรงกันข้าม โหมดการแกว่งในกรณีของ DFIG-RPOD ยังคงอยู่ในบริเวณที่เสถียรที่ตั้งไว้ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความคงทนสูงของ DFIG-RPOD

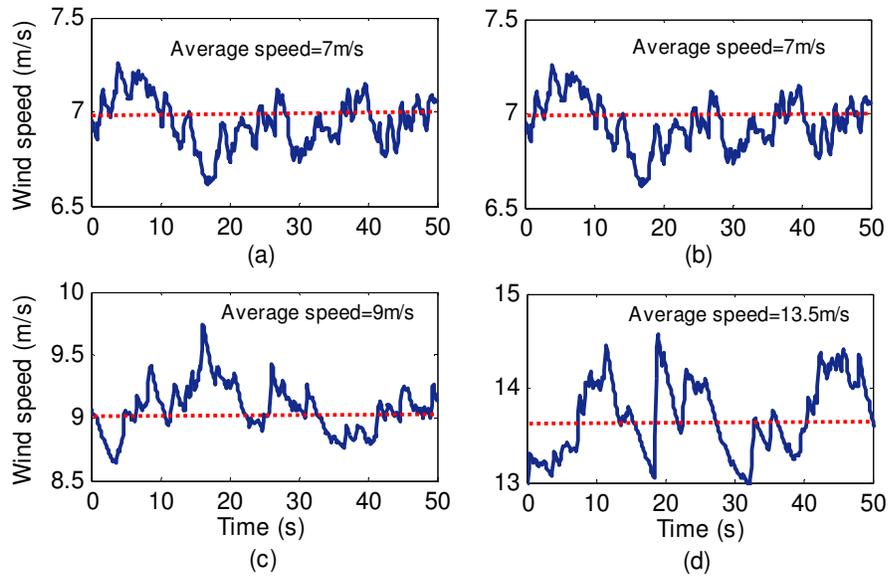


ภาพที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของ $\|T_{z\infty w}\|_{\infty}$ เมื่อเพิ่ม P_{tie} จาก 3.0 p.u. ถึง 6.5 p.u.

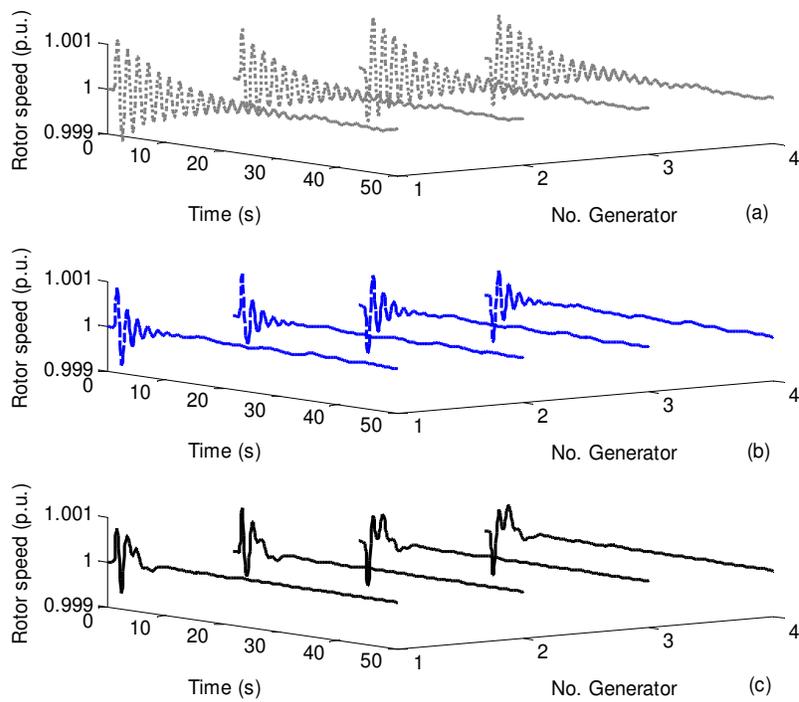


ภาพที่ 2.12 ทางเดินของโหนดการแกว่งระหว่างพื้นที่เมื่อเพิ่ม P_{tie} จาก 3.0 p.u. ถึง 6.5 p.u.

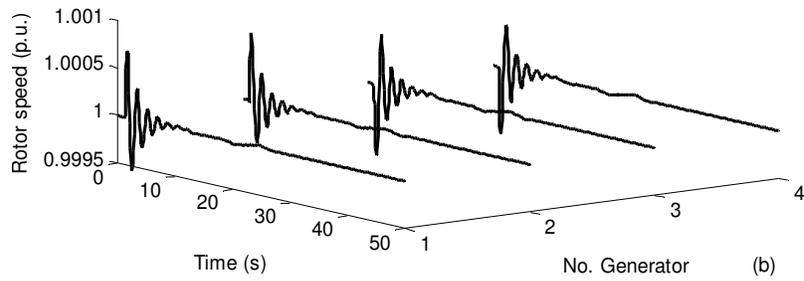
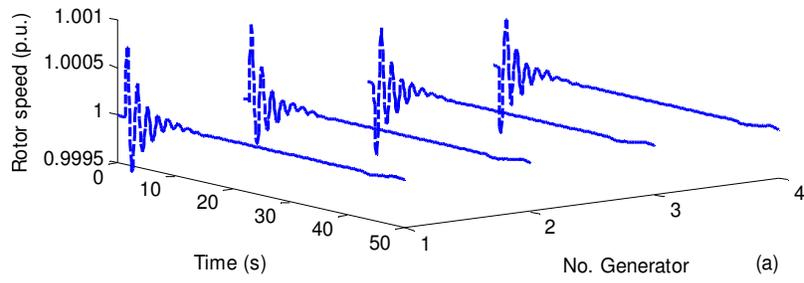
ในที่นี้ จะแสดงผลการจำลองแบบไม่เชิงเส้นภายใต้กรณีศึกษาทั้งสี่เมื่อเกิดลิ่งรบกวนขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2 ด้วยโปรแกรม PSAT [16] ภาพที่ 2.13 แสดงรูปแบบความเร็วลมตามกรณี 1 ถึง 4



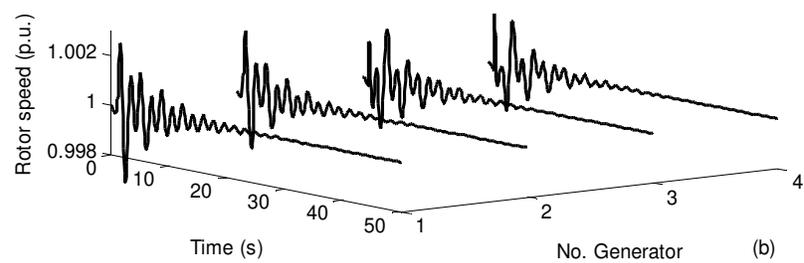
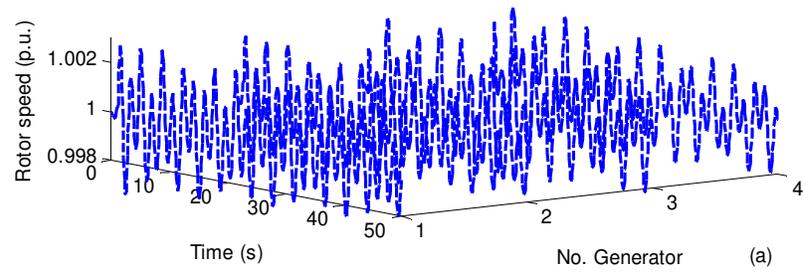
ภาพที่ 2.13 รูปแบบความเร็วลม (a) กรณี 1 (b) กรณี 2 (c) กรณี 3 (d) กรณี 4



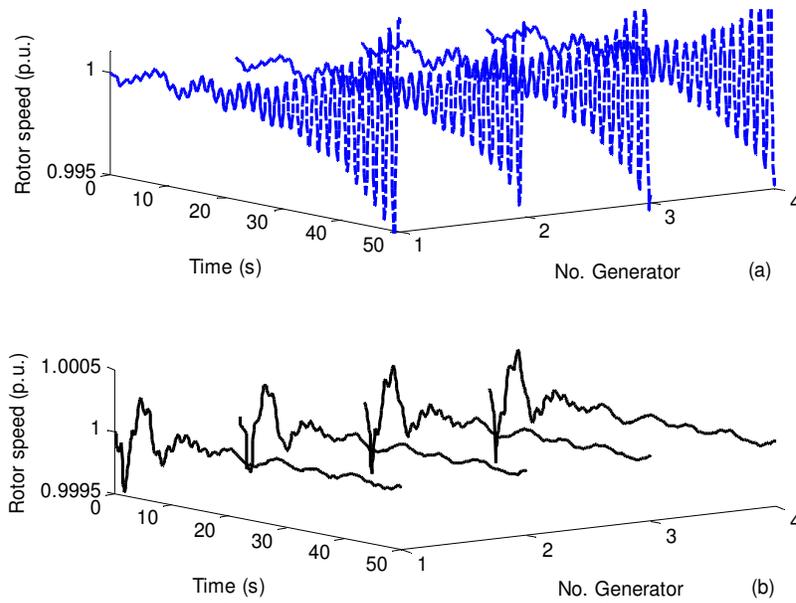
ภาพที่ 2.14 ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนส์ในกรณีที่ 1 : (a) Without POD (b) DFIG-CPOD และ (c) DFIG-RPOD.



ภาพที่ 2.15 ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในกรณีที่ 2 : (a) Without POD (b) DFIG-CPOD และ (c) DFIG-RPOD.



ภาพที่ 2.16 ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในกรณีที่ 3 : (a) Without POD (b) DFIG-CPOD และ (c) DFIG-RPOD.



ภาพที่ 2.17 ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ในกรณีที่ 4 : (a) Without POD (b) DFIG-CPOD และ (c) DFIG-RPOD.

ภาพที่ 2.14 แสดงความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ในกรณีที่ 1 เมื่อไม่มี POD ความเร็วโรเตอร์เปลี่ยนแปลงอย่างสูง ในทางตรงกันข้าม DFIG-CPOD และ DFIG-RPOD สามารถลดการแกว่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาพที่ 2.15 แสดงความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ในกรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการหน่วงของ DFIG-CPOD น้อยกว่าของ DFIG-RPOD อย่างมาก

ภาพที่ 2.16 และ 2.17 แสดงความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ในกรณีที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการทำเสถียรภาพของ DFIG-CPOD เสื่อมลงอย่างมาก ความเร็วโรเตอร์แกว่งอย่างรุนแรงและไม่เสถียรในที่สุด ในทางตรงกันข้าม DFIG-RPOD มีความคงทนสูงต่อความไม่แน่นอนระบบนี้ สามารถลดการแกว่งได้อย่างคงทน ผลการจำลองนี้แสดงให้เห็นว่า DFIG-RPOD มีความคงทนต่อความไม่แน่นอนระบบสูงกว่า DFIG-CPOD

บทที่ 3

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบ POD อย่างคงทนสำหรับกังหันลมชนิด DFIG เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยง สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

- 1) วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ POD ที่นำเสนอใช้วิธีการควบคุมผสม H_2/H_∞ จึงสามารถรับรองสมรรถนะการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าได้และยังเพิ่มความคงทนต่อความไม่แน่นอนระบบได้สูง
- 2) โครงสร้างของ POD เป็นแบบตัวชดเชยเฟส/ตามอันดับที่สองซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับ PSS จึงทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังจริง
- 3) วิธีการทำให้เหมาะสมที่นำเสนอสามารถนำไปใช้หาพารามิเตอร์ของ POD ได้อย่างอัตโนมัติ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้หาพารามิเตอร์ในกรณีที่มี POD หลายตัวอีกด้วย
- 4) POD ที่นำเสนอสามารถลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างคงทนภายใต้ความไม่แน่นอนในระบบต่างๆ เช่น สถานะการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้าต่างๆ การลัดวงจร การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบสายส่ง และรูปแบบความเร็วลม เป็นต้น
- 5) การลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของ POD ดำเนินการด้วยการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนด้านออกของกังหันลมชนิด DFIG ดังนั้น จึงไม่ส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของกังหันลม
- 6) การลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของกังหันลมชนิด DFIG นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นการบริการเสริม (Ancillary service) ต่อไปสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งฟาร์มกังหันลมเป็นจำนวนมากในอนาคต

ในการศึกษาต่อไป จะพิจารณาการควบคุมประสานระหว่าง DFIG-POD และ PSS เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่

บทที่ 4
ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

T. Surinkaew and I. Ngamroo, “Robust power oscillation damper design for DFIG-based wind turbine based on a specified structure mixed H_2/H_∞ control,” *Renewable Energy*, vol. 66, June 2014, pp. 15-24.

(Impact Factor 2013 = 3.361)

ได้แนบบทความในภาคผนวก

บรรณานุกรม

- [1] A.R. Messina. "Inter-area oscillations in power systems: a nonlinear and nonstationary perspective", Springer, 2009.
- [2] D.G. José Luis, et al., "Power oscillation damping supported by wind power: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp.4982-93, 2012.
- [3] G. Abad, J. Lopez, M. Rodruex, L. Marroyo and G. Iwanski, Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation, IEEE Press series on power engineering, Wiley-IEEE Press, 2011.
- [4] J. Morren, "Grid support by power electronic converters of distributed generation units," PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 2006.
- [5] F. M. Hughes, O. A-Lara, N. Jenkins, and G. Strbac, "Control of DFIG-based wind generation for power network support," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 1958-1966, Nov. 2005.
- [6] F. M. Hughes, O. A-Lara, N. Jenkins, and G. Strbac, "A power system stabilize for DFIG-based wind generation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 763-772, May 2006.
- [7] D. Ke, C. Chung, and Y. Xue, "Controller design for DFIG-based wind power generation to damp interarea oscillation," *Proceedings of the 5th international Conference on critical infrastructure*, pp. 1-6, 2010.
- [8] Y. Mishra, S. Mishra, M. Tripathy, N. Senroy and Z. Y. Dong, "Improving stability of a DFIG-based wind power system with tuned damping controller," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, pp. 650-660, Sept., 2009.
- [9] N. Kshatriya, U. D. Annakkage, F. M. Hughes, and A. M. Gole "Optimized partial eigenstructure assignment-based design of a combined PSS and active damping controller for a DFIG," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 866-876, May 2005.
- [10] F. Wu, Z. Zhang, K. Godfrey, and P. Ju, "Small signal stability analysis and optimal control of a wind turbine with doubly fed induction generator," *IET Generation, Transmission and Distribution* vol. 1, pp. 751-761, 2007.
- [11] Z. Miao, L. Fan, D. Osborn, and S. Yuvaranjan, "Control of DFIG based wind generation to improve inter-area oscillations damping," *Proceedings of the IEEE PES General Meeting*, 2008.
- [12] P. Ledesma and C. Gallardo, "Contribution of variable-speed wind farms to damping of power system oscillations," *Proceedings of the IEEE Power Tech.* 2007, pp. 1698-1702.

- [13] F. Milano, Power system modelling and scripting, Springer, 2010.
- [14] S. Skoqstad and I. Postlethwaite, Multiple feedback control: analysis and design, Wiley, 2005.
- [15] X.S. Yang, Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications, Wiley, 2010.
- [16] F. Milano, Power system analysis toolbox version 2.1.6, 2011.

ภาคผนวก

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล อิสระชัย งามหรุ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
PhD	Electrical Engineering	Osaka University	2543
M.Eng	Electrical Engineering	Osaka University	2540
B.Eng	Electrical Engineering	KMITL	2535

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ การควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2548	รางวัลทุนวิจัยมูลนิธิ ไทเทคครั้งที่ ๑๒	มูลนิธิไทเทค
2549	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2550	Best paper award, The 8 th International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore	The 8 th International Power Engineering Conference, Singapore
2552	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2553	Best paper award in electrical power systems, the 2010 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference, (ECTI-CON 2010, Chiangmai, Thailand.	ECTI Association
2554	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า

2555	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2556	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2537-2543	ทุนรัฐบาลญี่ปุ่น	รัฐบาลญี่ปุ่น
2544-2546	ทุนวิจัยหลังปริญญาเอก เลขที่ PDF/71/2544	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2547-2549	ทุนพัฒนานักวิจัย (เมธีวิจัย สกว.) เลขที่ RSA4780015	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550-2553	ทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการ พัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว.)	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550-2552	ทุนวิจัยโครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนา อุตสาหกรรม เลขที่ IUG5080015	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2552-2557	ทุนศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการ	กองทุนวิจัย สจล
2554-2556	ทุนพัฒนานักวิจัย	กองทุนวิจัย สจล
2557-2559	ทุนงบประมาณแผ่นดิน	วช.

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่

1. I. Ngamroo and T. Karaipoom, "Cooperative control of SFCL and SMES for enhancing fault ride through capability and smoothing power fluctuation of DFIG wind farm," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, issue 5, October 2014, Article#:
2. I. Ngamroo and T. Karaipoom, "Improving low-voltage ride-through performance and alleviating power fluctuation of DFIG wind turbine in DC microgrid by optimal SMES with fault current limiting function," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, issue 5, October 2014, Article#:5700805.

3. J. Pahasa and I. Ngamroo, "Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid," *IEEE Systems Journal*, vol. x, issue x, 2014, pp. xx-xx.
4. T. Surinkaew and I. Ngamroo, "Coordinated robust control of DFIG wind turbine and PSS for stabilization of power oscillations considering system uncertainties," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, issue 3, 2014, pp. 823-833.
5. S. Vachirasricirikul and I. Ngamroo, "Robust LFC in a smart grid with wind power penetration by coordinated V2G control and frequency controller," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, issue 1, January 2014, pp. 371-380.
6. I. Ngamroo and S. Vachirasricirikul, "Optimization of SFCL and SMES units for multimachine transient stabilization based on kinetic energy control," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, issue 3, part 2, June 2013, pp. 5000109.
7. I. Ngamroo and S. Vachirasricirikul, "Coordinated control of optimized SFCL and SMES for improvement of power system transient stability," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, issue 3, June 2012, pp.5600805.
8. M. Saejia and I. Ngamroo, "Alleviation of power fluctuation in interconnected power systems with wind farm by SMES with optimal coil size," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, issue 3, June 2012, pp.5701504.
9. I. Ngamroo, "Simultaneous optimization of SMES coil size and control parameters for robust power system stabilization," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, issue 3, part 2, June 2011, pp. 1358-1361.

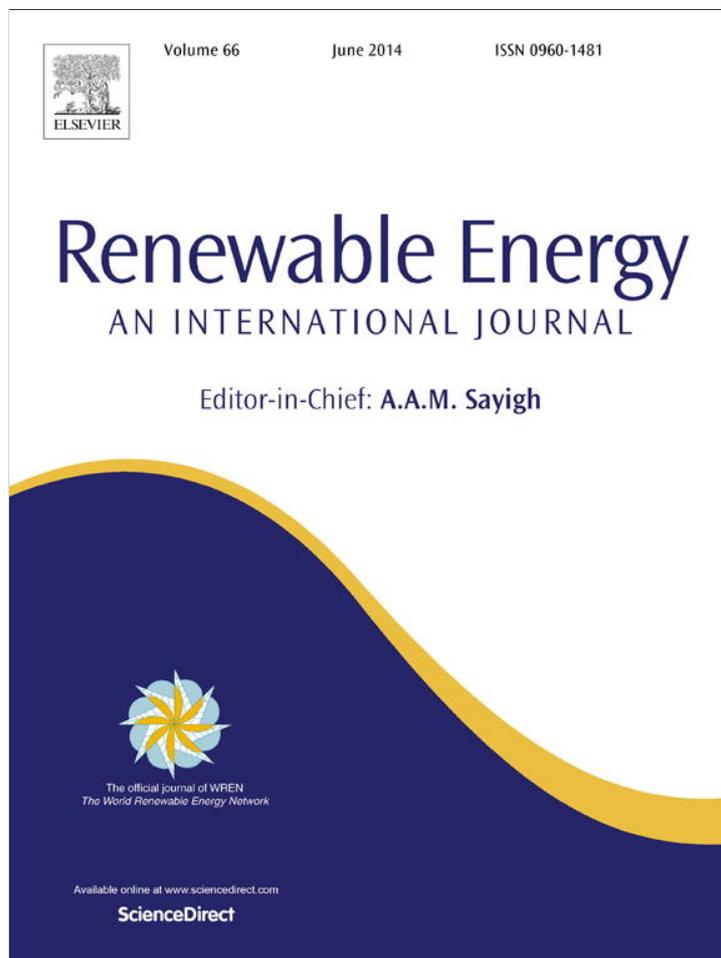
ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในแขนอ่านฮาร์ดดิสก์ FEM KMITL ลิขสิทธิ์เลขที่ 253609 ได้รับการจดลิขสิทธิ์เมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554 โดยกรมทรัพย์สินทางปัญญา

อื่นๆ

หนังสือ พลศาสตร์และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Dynamics and Stability) ISBN: 978-616-7367-46-0 วศ.สจล: 244 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 1 เมื่อ สิงหาคม พ.ศ. 2554, 459 หน้า

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

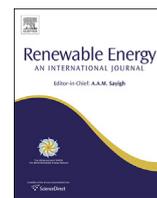
In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/authorsrights>



Contents lists available at ScienceDirect

Renewable Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/renene

Robust power oscillation damper design for DFIG-based wind turbine based on specified structure mixed H_2/H_∞ control



Tossaporn Surinkaew*, Issarachai Ngamroo

School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 March 2013

Accepted 21 November 2013

Available online 15 December 2013

Keywords:

Doubly fed induction generator

Inter-area oscillation

Power oscillation damper

Mixed H_2/H_∞ control

Linear matrix inequalities

Firefly algorithm

ABSTRACT

As the integration of a doubly fed induction generator (DFIG)-based wind power generation into power systems tends to increase significantly, the contribution of DFIG wind turbine is highly expected. Since the active and reactive power outputs of DFIG can be independently modulated, the stabilizing effect of DFIG on the inter-area power system oscillation is a challenging issue. This paper proposes a new robust control design of power oscillation damper (POD) for a DFIG-based wind turbine using a specified structure mixed H_2/H_∞ control. The POD structure is a practical 2nd-order lead–lag compensator with single input. Normally, H_∞ control mainly enforces the closed-loop stability while noise attenuation or regulation against random disturbances is expressed in H_2 control. As a result, the mixed H_2/H_∞ control gives a powerful multi-objective control design so that both closed-loop stability and performance of designed controller can be guaranteed. Here, the linear matrix inequality is applied to formulate the optimization problem of POD based on a mixed H_2/H_∞ control. The POD parameters are optimized so that the performance and robustness of the POD against system disturbances and uncertainties are maximal. The firefly algorithm is automatically applied to solve the optimization problem. Simulation study in a two-area four-machine interconnected power system shows that the DFIG with robust POD is superior to conventional POD in terms of stabilizing effect as well as robustness against various power generating and loading conditions, unpredictable network structure, and random wind patterns.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Interconnections in power systems not only provide an enhancement of system reliability, but also increase the economical efficiency. Nevertheless, they occasionally cause the inter-area power oscillation with low frequency and poor damping [1]. The stability of the inter-area oscillation modes is deteriorated by the heavy load condition in tie-lines especially due to the electric power exchange. Furthermore, the increase of system uncertainties due to a deregulated environment with complex power contracts, various generating and loading conditions as well as unpredictable network structure, etc., makes the stabilization of inter-area oscillation more difficult [2].

Nowadays, the integration of wind power generation into power systems increases considerably. As the sharing of wind power generation increases, the contribution of wind power for power

system control and stabilization is highly expected. Especially, the ability of wind power generation for damping of power system oscillations is a very challenging issue. As an example, in the new Spanish grid code for wind power, the ability of power oscillation damping is included [3].

Among of wind turbines, the doubly-fed induction generator (DFIG) wind energy system is extensively used nowadays. In Ref. [4], a modelling of DFIG-based wind turbine generation system for real time electromagnetic simulation study is proposed. With the developed real-time model, new controller designs or protective devices can be easily implemented and tested in a hardware-in-the-loop configuration. In Ref. [5], the second-order sliding mode control of DFIG in real time simulation is represented. The power extraction maximization of the proposed sliding mode control is superior to traditional techniques. The active and reactive power outputs of DFIG can be controlled independently by the power converters based on vector control [6], flux magnitude and angle control [7]. As a result, the DFIG-based wind turbine not merely enhances the energy transfer efficiency but also provides the damping of power system oscillations. In Ref. [8], the power oscillation damper (POD) is added to the wind turbine controller with

* Corresponding author. Tel./fax: +66 2635 8330.

E-mail address: Tsurinkaew@hotmail.com (T. Surinkaew).

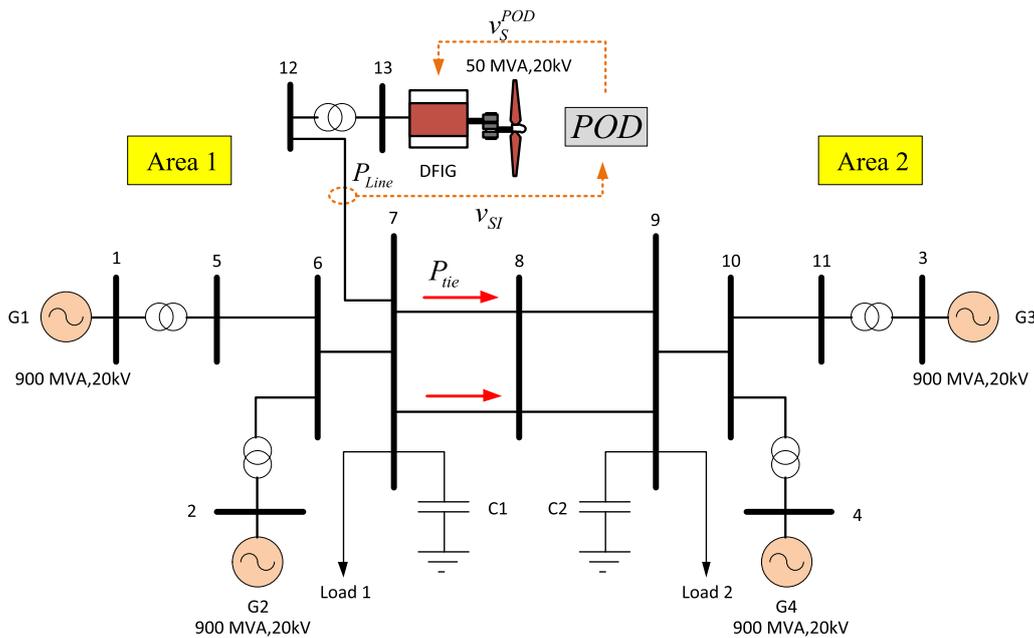


Fig. 1. Two-area four-machine interconnected power system with DFIG.

the same function as a power system stabilizer (PSS) from the synchronous generator. The PODs with various inputs such as the angle variation [9], the slip of DFIG [10] etc. are presented. The DFIG wind turbine equipped with POD with all the inputs shows the good damping performance. In Ref. [11], the optimization of DFIG control parameters is proposed based on the minimizing of some criteria. A mixed control of Eigen-structure assignment and a multi-objective nonlinear optimization method for the POD based on the conventional PSS is presented in Ref. [12]. In Ref. [13], the DFIG with active and reactive power loops is presented. In Ref. [14], the mixed active and reactive control strategy of DFIG based on Lyapunov method is proposed. The PODs proposed for DFIG in these works show good stabilizing effect. Nevertheless, there are several system uncertainties in actual power systems such as various wind power patterns, generating and loading conditions, unpredictable network structures, and system parameters variation etc. The POD designed without considering such uncertainties may fail to stabilize the power oscillation. The POD with high robustness against system uncertainties is significantly anticipated.

In fact, it is desirable to follow several objectives such as stability, disturbance attenuation and reference tracking, and consider the practical constraints, simultaneously. Pure H_∞ synthesis cannot adequately capture all design specifications. Normally, H_∞ synthesis mainly enforces closed-loop stability and meets some constraints and limitations, while noise attenuation or regulation against random disturbances is more naturally expressed in H_2 synthesis. As a result, the mixed H_2/H_∞ control synthesis gives a powerful multi-objective control design addressed by the linear matrix inequalities techniques [15].

This paper focuses on the robust control design of a POD equipped with DFIG wind turbine for stabilization of inter-area oscillation in interconnected power systems. The POD structure is a practical 2nd-order lead–lag compensator with single input. The optimization of POD parameters is carried out by a specified structure mixed H_2/H_∞ control based on linear matrix inequality (LMI). The parameters of POD are optimized so that the damping performance and robust stability margin against system uncertainties are satisfied. The firefly algorithm is applied to solve the

optimization problem. Simulation result shows the robustness and stabilizing effect of the proposed POD is much superior to those of the conventional POD.

2. Study system and modelling

2.1. Study system

The two-area four-machine power system as depicted in Fig. 1 is used as the study system [1]. Each synchronous generator is represented by a 6th-order model. It is equipped with an automatic voltage regulator (AVR) type 3 and a turbine governor type 2 [16]. The DFIG wind turbine equipped with POD is placed at bus 7 to supply electrical power to the system. In this study, it assumed that the power flow in two tie-lines (P_{tie}) between bus 7 and bus 8 are in heavy condition and the system disturbances such as faults, etc., occasionally occur. These situations cause the inter-area oscillation with poor damping. To damp out this oscillation mode, the DFIG is used. The DFIG parameters are given in Table 1.

Table 1
DFIG parameters.

Parameters	Value
Power rating	50 MVA
Frequency rating	60 Hz
Stator resistance (r_s)	0.01 p.u.
Stator reactance (x_s)	0.10 p.u.
Rotor resistance (r_r)	0.01 p.u.
Rotor reactance (x_r)	0.08 p.u.
Magnetizing reactance (x_m)	3.00 p.u.
Inertia constants (H_m)	3 kW/s/kVA
Gearbox ratio	1/89
Number of poles	4
Blade length	75 m
Number of blade	3
Pitch angle time constant (T_p)	3
Pitch control gain (K_p)	10
Power control time constant (T_e)	0.01
Voltage control gain (K_e)	50

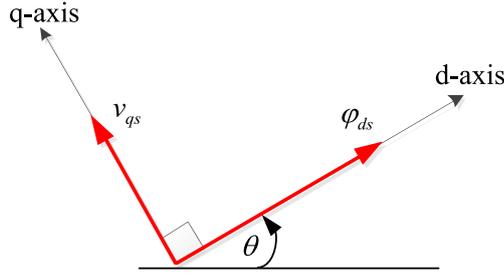


Fig. 3. The flux-based rotating reference frame.

then, (3) can be written as

$$\begin{aligned} p &= v(i_{qs} + i_{qr}) \\ q &= -v(i_{ds} + i_{dr}) \end{aligned} \quad (7)$$

The relation between stator fluxes and generator currents is expressed by

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= -((x_s + x_u)i_{ds} + x_u i_{dr}) \\ \varphi_{qs} &= -((x_s + x_u)i_{qs} + x_u i_{qr}) \end{aligned} \quad (8)$$

where φ_{ds} and φ_{qs} are d and q axis of stator fluxes, respectively.

Express (8) in form of stator currents as

$$\begin{aligned} i_{ds} &= \frac{-\varphi_{ds} - x_u i_{dr}}{x_s + x_u} \\ i_{qs} &= \frac{-x_u i_{qr}}{x_s + x_u} \end{aligned} \quad (9)$$

Substitute (9) into (7), the active and reactive powers of DFIG injected to the grid can be written in d - q axis of rotor current as

$$\begin{aligned} p &= \frac{x_s}{x_s + x_u} v i_{qr} \\ q &= -\frac{x_u v i_{dr}}{x_s + x_u} - \frac{v^2}{x_u} \end{aligned} \quad (10)$$

Note that, in (10), the quadrature (q)-axis current of the rotor side converter (i_{qr}) is applied to control the real power output while the direct (d)-axis current (i_{dr}) is used to control the reactive power output. This is the reason that the decoupling of cross terms in this vector control appears in Fig. 2.

The generator motion equation is expressed by

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_m &= (\tau_m - \tau_e)/2H_m \\ \tau_e &= (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \end{aligned} \quad (11)$$

where $\dot{\omega}_m$ is state variable of rotor speed, τ_m and τ_e are mechanical and electrical torques, H_m is rotor inertia, and φ_{ds} and φ_{qs} are d and q stator fluxes, respectively.

Thus the electrical torque is provided by

$$\tau_e = x_u (i_{qr} i_{ds} + i_{dr} i_{qs}) \quad (12)$$

The mechanical power p_w extracted from wind which is the function of the wind speed v_w , the rotor speed ω_m and the pitch angle θ_p , is given by

$$p_w = \frac{n_g \rho}{2S_n} c_p(\lambda, \theta_p) A_r v_w^3 \quad (13)$$

where n_g is the number of machines that compose the wind park, S_n is the power rating, ρ is the air density, c_p is the performance coefficient or power coefficient, λ is the tip speed ratio and A_w is the area swept by rotor. The $c_p(\lambda, \theta_p)$ curve is approximated as follows

$$c_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta_p - 5 \right) e^{\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (14)$$

where λ_i can be approximated by a function of λ [16] which is given by

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta_p} - \frac{0.35}{\theta_p^3 + 1} \quad (15)$$

The rotor currents i_{qr} and i_{dr} are used for rotor speed control and voltage control which are depicted in Figs. 4 and 5, respectively.

As a result, i_{qr} and i_{dr} can be expressed by

$$i_{qr} = \left(-\frac{x_s + x_u}{x_u v} p_w^*(\omega_m)/\omega_m - i_{qr} \right) \frac{1}{T_e} \quad (16)$$

$$i_{dr} = K_v (v - v_{ref}) - \frac{v}{x_u} - i_{dr} \quad (17)$$

$$v_{ref} = v_{ref}^0 + v_s^{POD} \quad (18)$$

where v_{ref}^0 is the initial reference voltage, v_s^{POD} is an additional signal of the POD, and p_w^* is the power speed characteristic which roughly optimizes the wind energy capture, K_v is voltage control gain, and T_e is power control time constant, i_{dr}^{min} , i_{dr}^{max} , i_{qr}^{min} , and i_{qr}^{max} are d and q minimum and maximum rotor currents, respectively. Here, the stabilization of power oscillation is conducted by the voltage control of i_{dr} via the POD signal.

Finally the pitch angle control is illustrated in Fig. 6 and described by the differential equation

$$\dot{\theta}_p = (K_p \varphi (\omega_m - \omega_{ref}) - \theta_p / T_p) \quad (19)$$

where φ is a function which allows varying pitch angle set point only when the different $(\omega_m - \omega_{ref})$ exceeds the predefined value $\pm \Delta\omega$, ω_{ref} is the reference speed, K_p is the pitch control gain, T_p is the pitch control time constant. Note that, the pitch control works only for super-synchronous speeds. An anti-windup limiter locks the pitch angle $\theta_p = 0$ for sub-synchronous speeds.

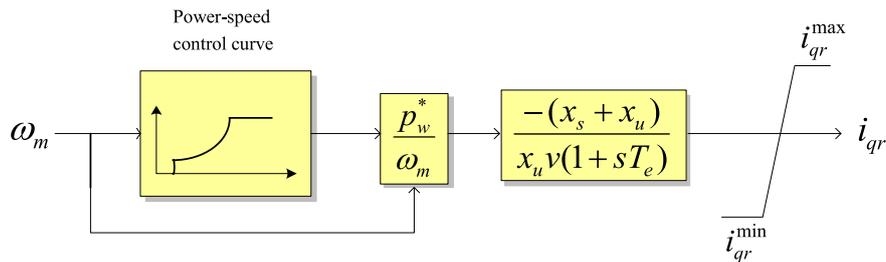


Fig. 4. Rotor speed control scheme of DFIG.

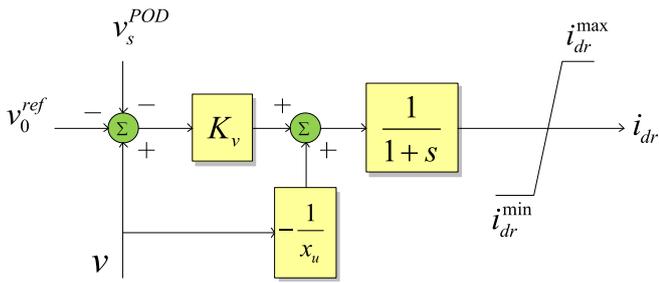


Fig. 5. Voltage control scheme of DFIG.

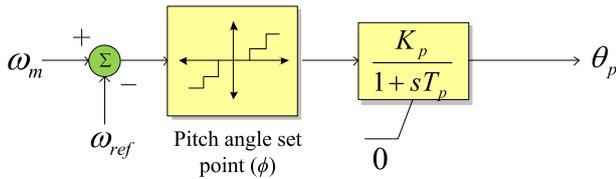


Fig. 6. Pitch angle control scheme of DFIG.

2.3. POD model

The structure of the POD controller of DFIG is a 2nd-order lead–lag compensator as depicted in Fig. 7. The POD consists of a stabilizer gain K_{stab} , a washout filter with time constant $T_w = 10$, and two phase compensator blocks with time constants T_1, T_2, T_3 , and T_4 . The washout signal ensures that the POD output is zero in steady state. The input signal v_{SI} is the active power flow (P_{line}) in the transmission line between bus 7 and bus 12. The output signal v_s^{POD} is subject to an anti-windup limiter, v_s^{\min} and v_s^{\max} are minimum and maximum of v_s^{POD} . The gain determines the amount of damping introduced by POD while the phase compensator block provides the appropriate lead–lag compensation of the output signal. Here, the search parameters of the proposed robust POD are K_{stab}, T_1, T_2, T_3 , and T_4 .

2.4. Linearized power system model

The linearized state equation is used to represent the system as

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (20)$$

where the state vector $x = [\delta \ \omega \ e'_q \ e'_d \ e''_q \ e''_d \ v_m \ v_r \ v_f \ x_g \ v_w \ \omega_m \ \theta_p \ i_{dr} \ i_{qr}]^T$, δ is the rotor angle, $(n \times 1)$; ω is the synchronous rotor speed $(n \times 1)$; e'_q and e'_d are the transient internal voltages of a synchronous generator in d and q axis, respectively, $(n \times 1)$; e''_q and e''_d are the subtransient internal voltages of a synchronous generator in d and q axis, respectively, $(n \times 1)$; v_m is the measurement voltage, $(m \times 1)$; v_r is the regulator voltage, $(m \times 1)$; v_f is the field voltage $(m \times 1)$; x_g is the output signal of governor, $(m \times 1)$; v_w is the output

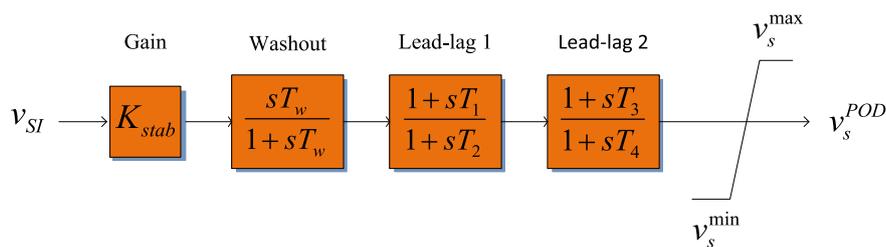


Fig. 7. Structure of POD.

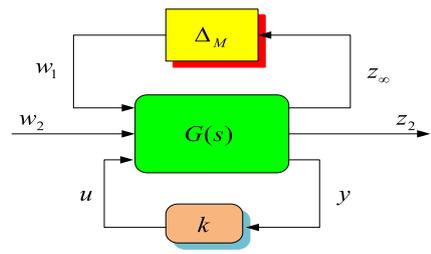


Fig. 8. Closed loop system via mixed H_2/H_∞ control.

signal of wind speed, ω_m is the rotor speed of DFIG, θ_p is the pitch angle, i_{dr} and i_{qr} are the DFIG rotor currents in d and q axis, respectively, n is the number of synchronous generator, m is the number of AVR and turbine governor, $u = [v_s^{POD}]$, u is the control output signal, $y = [v_{SI}]$, y is the input of controller. Note that the system in (20) is the single input single output (SISO) control system and is referred to as the nominal plant G .

3. Proposed control design

3.1. Mixed H_2/H_∞ control

It is well known that each robust control method is mainly useful for capturing a set of design specification. For instance, the H_2 tracking control is suitable to deal with transient performance by minimizing the linear quadratic cost of tracking error and control output, while H_∞ approach is more useful to maintain the close loop stability in the presence of model uncertainties [18]. Accordingly, a mixed H_2/H_∞ control technique can provide both objectives. Fig. 8 shows the closed loop system via mixed H_2/H_∞ control, where $G(s)$ is a linear time invariant system, Δ_M is multiplicative uncertainties, k is a controller, w_1 and w_2 are disturbance and other external input vector, respectively, y is a measured output vector, u is an input vector from controller, z_2 is an output channel associated with the Linear Quadratic Gaussian (LQG) aspects (H_2 performance), and z_∞ is an output channel associated with the H_∞ performance.

A mixed H_2/H_∞ a static output feedback (SOF) control design can be expressed as the following optimization problem that is the determination of an admissible SOF law k belonging to a family of internally stabilizing SOF gain K_{sof} ,

$$u = ky, \quad k \in K_{sof} \quad (21)$$

such that

$$\inf_{k \in K_{sof}} \|T_{z_2 w_2}\|_2 \text{ subject to } \|T_{z_\infty w_1}\|_\infty < 1 \quad (22)$$

where $T_{z_\infty w_1}$ and $T_{z_2 w_2}$ be the transfer functions from w_1 and w_2 to z_∞ and z_2 , respectively. The optimization problem (22) defines a

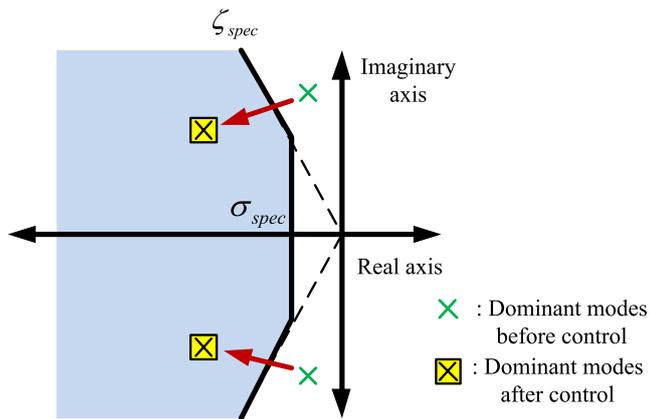


Fig. 9. D-stability region.

robust performance synthesis problem where the H_2 norm is chosen as the performance measure. Here an LMI algorithm is introduced to get a suboptimal solution for the above optimization problem. Specifically, the developed algorithm formulates the H_2/H_∞ SOF control through a general SOF stabilization problem. The proposed algorithm searches the desired suboptimal H_2/H_∞ SOF controller k within a family of H_2 stabilizing controllers K_{Sof} such that

$$|\gamma_2^* - \gamma_2| < \varepsilon, \gamma_\infty < 1 \quad (23)$$

when

$$\gamma_2 = \|T_{z_2 w_2}\|_2, \gamma_\infty = \|T_{z_\infty w_1}\|_\infty \quad (24)$$

where ε is a small real positive number, γ_2^* is an H_2 performance corresponding to the H_2/H_∞ SOF controller k , γ_2 and γ_∞ are optimal H_2 and H_∞ performance indices, respectively, which can be obtained from application of standard H_2/H_∞ dynamic output feedback control. In the proposed strategy, based on the generalized static output stabilization feedback lemma [18], first, the stability domain of space (POD parameters), which guarantees the stability of the closed loop system, is specified. In the second step, the subset of the stability domain in POD parameters space in the first step is determined so that the H_2 tracking performance is minimized. Finally, and in the third step, the optimization is conducted so that the H_2 performance index and the H_∞ constraint are met [15]. Besides, to enhance the system damping, the dominant oscillation mode is designed to move to the D-stability region with the specified damping ratio ζ_{spec} and the specified real part σ_{spec} as shown in Fig. 9.

Based on this concept, the optimization problem of POD parameters can be formulated as

$$\text{Minimize } \|T_{z_2 w_2}\|_2 \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{Subject to } & \|T_{z_\infty w_1}\|_\infty < 1 \\ & \zeta \geq \zeta_{spec}, \sigma \leq \sigma_{spec}, \\ & 0.01 \leq K_{stab} \leq 5, 0.01 \leq T_{1,3} \leq 20, 0.01 \leq T_{2,4} \leq 20. \end{aligned} \quad (26)$$

This optimization problem is solved by the firefly algorithm.

3.2. Firefly algorithm

The firefly algorithm is a meta-heuristic algorithm, inspired by the flashing behaviour of fireflies [19]. The firefly algorithm uses

mainly real random numbers based on the global communication among the swarming particles. It is very effective in multi-objective optimization [20]. The firefly algorithm can find the global optima as well as all the local optima simultaneously in a very effective manner. Besides, the firefly algorithm is better than genetic algorithms and particle swarm optimization because fireflies aggregate more closely around each optimum (without jumping around as in the case of genetic algorithms). The interactions between different subregions are minimal in parallel implementation [21,22]. Fig. 10 shows flow chart of firefly algorithm, the firefly algorithm is explained as follow:

1. Generate initial population of fireflies with random positions and light intensity.
2. Evaluate the objective function in (25) for each firefly and check constrain in (26).
3. Ranking the fireflies by their light intensity.
4. Move all fireflies toward brighter ones x_i .

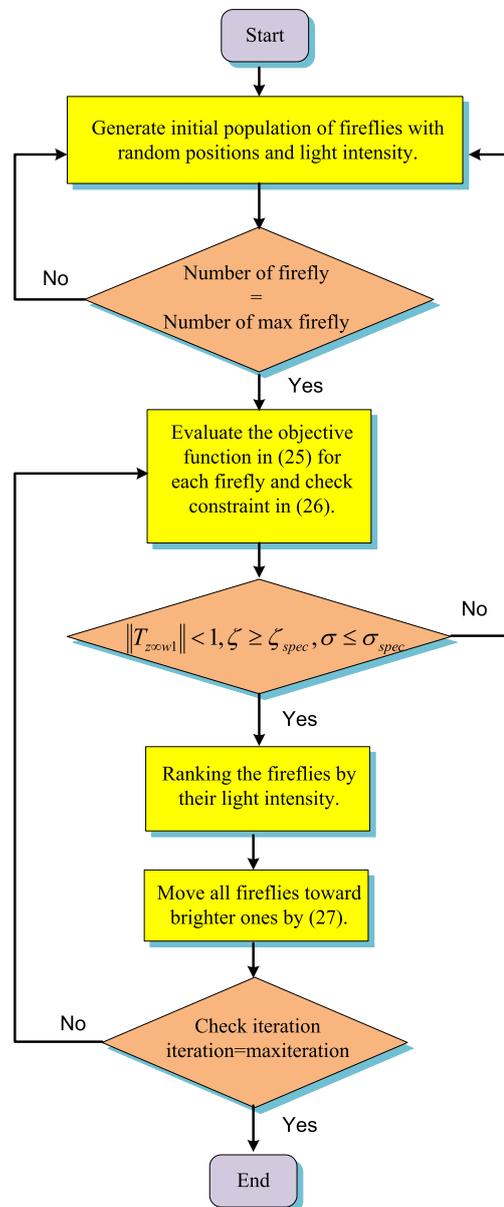


Fig. 10. Flow chart of firefly algorithm.

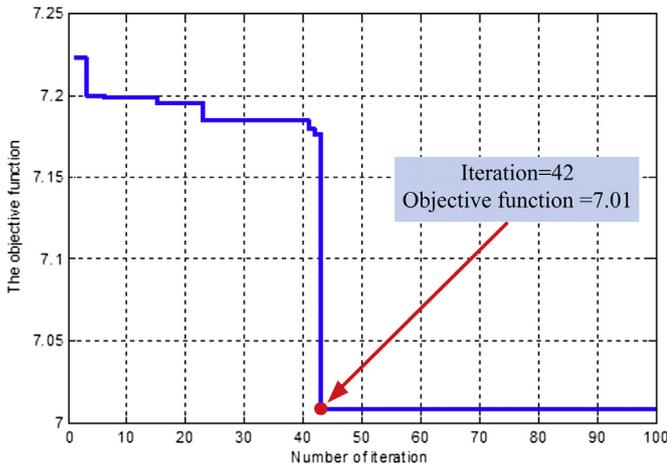


Fig. 11. Convergence curve of the objective function.

$$x_i = x_i \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha(\text{rand} - 0.5) \quad (27)$$

where α is the randomization parameter, rand is the random number in (0,1), β_0 is the attractiveness at $r = 0$, r is distance between any two fireflies i and j at x_i and x_j , γ is light absorption coefficient.

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^d (x_{i,n} - x_{j,n})^2} \quad (28)$$

where d is number of dimension.

- When the maximum number of iterations is arrived, stop the process. Otherwise go to process 2.

4. Simulation study

For the stopping condition or the maximum iteration of optimization, it is set by observing the convergence of objective function. Here, it is set at 100, which is enough to guarantee that the optimal value of objective function is achieved. For the values of α , γ , and β_0 , it is worth pointing out that equation (27) is a random

Table 2
Operating conditions (MVA base = 100 MVA, frequency base = 60 Hz).

Case	Average wind speed, v_{wind} (m/s)	P_{tie} (p.u.)	Uncertainty handling information		
			Δv_{wind} (m/s)	ΔP_{tie} (p.u.)	Applied disturbance
1	7.0	4.2	0.0	0.0	A 3 phase fault occurs at bus 6 at $t = 1$ s, the fault is cleared by opening the circuit breaker at line between bus 8 and bus 9 at $t = 1.05$ s, and not reclosed.
2	7.0	3.0	0.0	1.2	A 3 phase fault occurs at bus 8 at $t = 1$ s, the fault is cleared by opening the circuit breaker at line between bus 8 and bus 9 at $t = 1.08$ s, and not reclosed.
3	9.0	5.7	2.0	1.5	A 3 phase fault occurs at bus 9 at $t = 1$ s, the fault is cleared by opening the circuit breaker at line between bus 8 and bus 9 at $t = 1.10$ s, and not reclosed.
4	13.5	4.5	6.5	0.3	Same case 2.

Table 3
Eigenvalue analysis results.

Type of controller	Oscillation mode	Eigenvalue	Damping ratio (%)	Frequency (Hz)
Without POD	Inter-area	$-0.170 \pm 4.010i$	4.24	0.6382
	Local 1	$-0.767 \pm 6.950i$	11.10	1.1061
	Local 2	$-1.050 \pm 7.160i$	14.50	1.1395
DFIG-CPOD	Inter-area	$-0.618 \pm 4.050i$	15.08	0.6446
	Local 1	$-1.110 \pm 6.960i$	15.80	1.0982
	Local 2	$-1.210 \pm 7.190i$	16.60	1.1443
DFIG-RPOD	Inter-area	$-0.657 \pm 4.070i$	16.05	0.6478
	Local 1	$-1.110 \pm 6.970i$	15.70	1.1093
	Local 2	$-1.210 \pm 7.190i$	16.60	1.1443

walk biased towards the brighter fireflies. If $\beta_0 = 0$, (27) becomes a simple random walk. The parameter γ characterizes the variation of the attractiveness. The value of γ is very important in determining the speed of the convergence and how the firefly algorithm behaves. For α , it is the random parameter in the range of 0 and 1. In this study, the appropriate values of parameters are selected as $\alpha = 0.2$, $\gamma = 1$, and $\beta_0 = 1$. For the number of firefly population, by observing the convergence of solution, it is properly selected at 25. Convergence curve of the objective function is depicted in Fig. 11, at 1st iteration, the initial value of the objective function is randomly found at 7.23. After that, the fireflies continuously minimize the value of objective function to 7.01 at 42nd iteration. Subsequently, the objective function value is kept constant at 7.01 because this value still satisfies the constraint $\|T_{z \in w1}\|_{\infty}$ in (26). The fireflies cannot find any other better solution which satisfies this constraint. This is the reason that the fireflies can improve the optimized result just 3% from the initial value. Note that, the optimization is carried out based on the normal operating condition in case 1 as described in Table 2. The uncertainty handling information given in Table 2 consists of two items as follows.

- Uncertainty due to the power flow in two tie-lines between bus 7 and bus 8.
- Uncertainty due to the average wind speed (v_{wind}). This is the deviation of average wind speed from the initial wind speed. Here, the initial average wind speed is set at 7 m/s.

After optimization processing, the proposed robust POD of DFIG which is referred to as “DFIG-RPOD”, is obtained as.

DFIG-RPOD:

$$K_{\text{RPOD}}(s) = 2.2722 \cdot \frac{1 + 9.7256s}{1 + 10.7324s} \cdot \frac{1 + 8.7259s}{1 + 10.5342s} \quad (29)$$

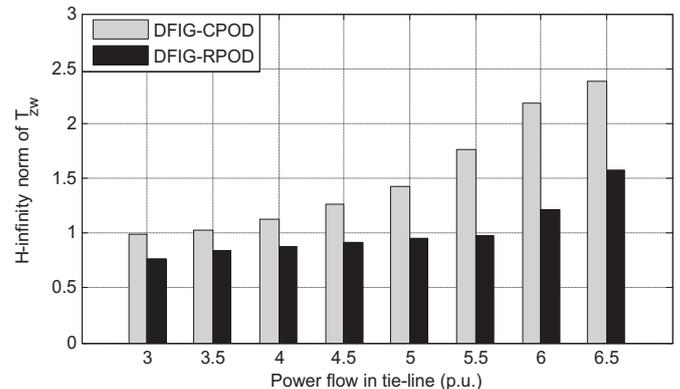


Fig. 12. Variation of $\|T_{z \in w1}\|_{\infty}$ when P_{tie} is varied from 3.0 to 6.5 p.u.

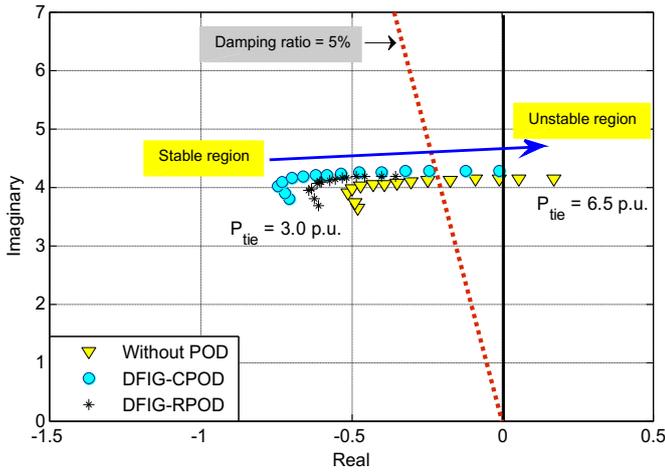


Fig. 13. Locus of dominant inter-area mode when P_{tie} is varied from 3.0 to 6.5 p.u.

The robustness of DFIG-RPOD is compared with the conventional POD designed without considering the robustness which is referred as “DFIG-CPOD”. The DFIG-CPOD is designed to yield the damping ratio and real part of the dominant modes same as the design specification of DFIG-RPOD. The optimization problem of DFIG-CPOD based on the pole assignment is formulated as

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \sum_{\zeta \leq \zeta_{spec}} |\zeta_{spec} - \zeta| + \sum_{\sigma \geq \sigma_{spec}} |\sigma_{spec} - \sigma| \\ & \text{Subject to } \zeta \geq \zeta_{spec}, \sigma \leq \sigma_{spec}, 0.01 \leq K_{stab} \leq 5, 0.01 \leq T_{1,3} \leq 20, 0.01 \leq T_{2,4} \leq 20. \end{aligned} \quad (30)$$

The objective of the optimization in (30) is to move the dominant modes to the D-stability region as shown in Fig. 9. Solving (30) by firefly algorithm, the controller of DFIG-CPOD based on the same case 1, is obtained as

DFIG-CPOD:

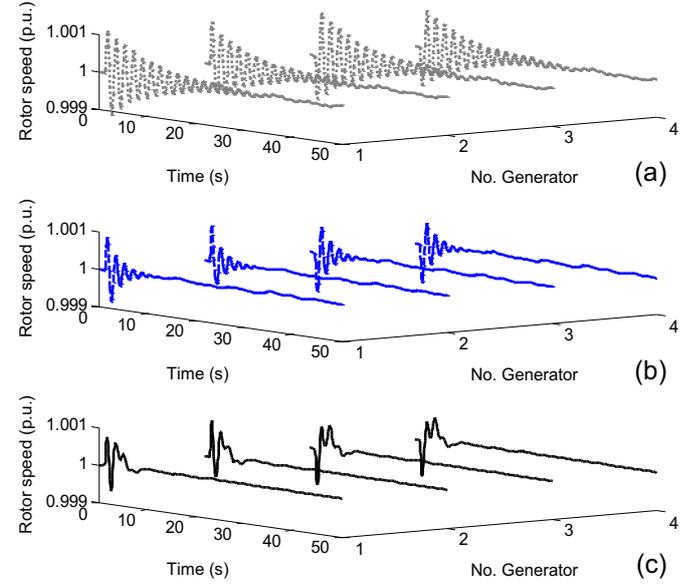


Fig. 15. Synchronous generator rotor speed in case 1: (a) without POD, (b) DFIG-CPOD, and (c) DFIG-RPOD.

$$K_{CPOD}(s) = 2.2131 \cdot \frac{1 + 5.5845s}{1 + 5.1794s} \cdot \frac{1 + 10.8641s}{1 + 9.5620s} \quad (31)$$

The eigenvalue and damping ratio of local and inter-area oscillation modes of DFIG-CPOD and DFIG-RPOD under case 1 are described in Table 3. Without POD, the damping ratio of oscillation mode is very poor. On the other hand, the damping ratio is improved by DFIG-CPOD and DFIG-RPOD as design specification.

The robustness of the DFIG-CPOD and DFIG-RPOD is evaluated by the value of $\|T_{z \infty w1}\|_{\infty}$. Fig. 12 shows the comparison of $\|T_{z \infty w1}\|_{\infty}$ between DFIG-CPOD and DFIG-RPOD when P_{tie} is varied from 3.0 to 6.5 p.u. Obviously, $\|T_{z \infty w1}\|_{\infty}$ in case of DFIG-CPOD largely changes. The DFIG-CPOD is very sensitive to the

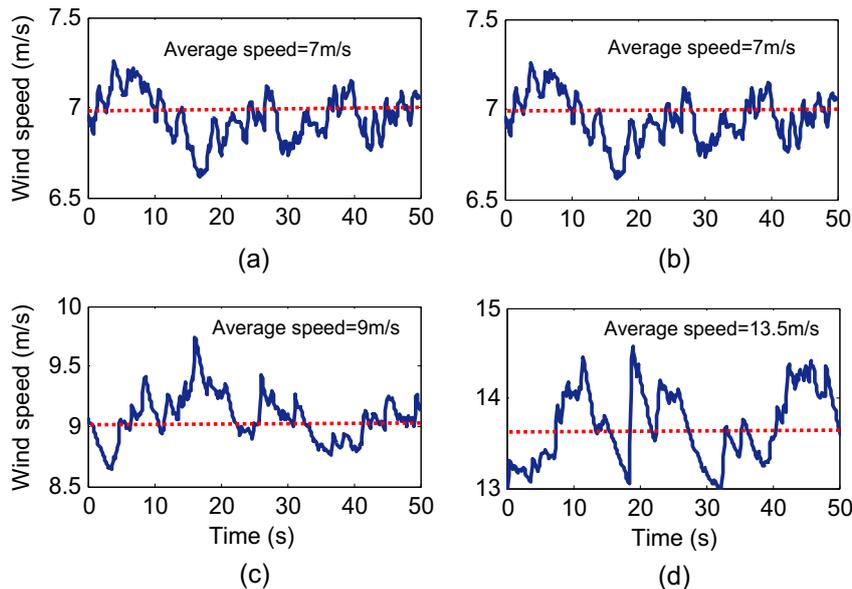


Fig. 14. Patterns of wind (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, and (d) case 4.

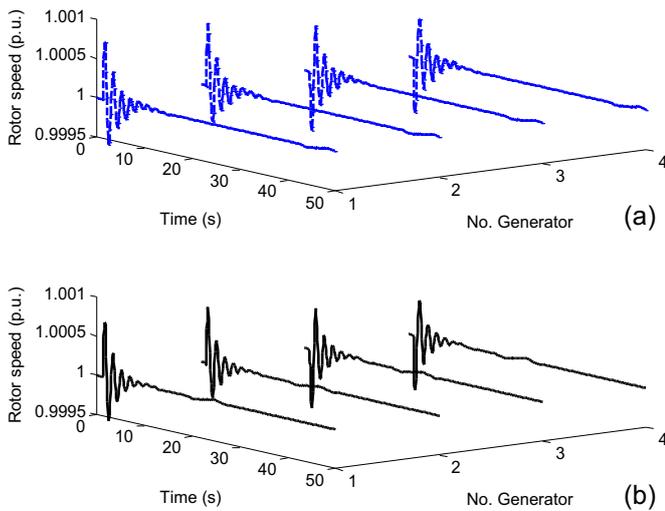


Fig. 16. Synchronous generator rotor speed in case 2: (a) DFIG-CPOD, and (b) DFIG-RPOD.

uncertainty due to the tie-line power flow. On the other hand, the change in $\|T_{z \infty w1}\|_{\infty}$ in case of DFIG-RPOD is lesser. The DFIG-RPOD is not much sensitive to the variation of the tie-line power.

Next, the locus of the eigenvalue corresponding to the dominant inter-area mode under the variation of P_{tie} from 3.0 to 6.5 p.u. is depicted in Fig. 13. Under the heavy power flow condition, the locus of the dominant mode in case of without POD and DFIG-CPOD tends to move to the unstable region. On the other hand, the locus in case of DFIG-RPOD is still in D-stability region. This result indicates that the robustness of DFIG-RPOD against heavy power flow is superior to that of DFIG-CPOD.

Next, the nonlinear simulation of four case studies against applied disturbance as given in Table 2 is performed by power system analysis toolbox (PSAT) [23]. Simulation results of the rotor speed of synchronous generators 1–4 are provided as follows. Fig. 14 shows the pattern of wind applied for cases 1–4.

Fig. 15 shows the rotor speed oscillation in case 1. Without POD, the rotor speed largely oscillates. On the other hand, the DFIG with either CPOD or RPOD is able to damp the oscillation effectively. In

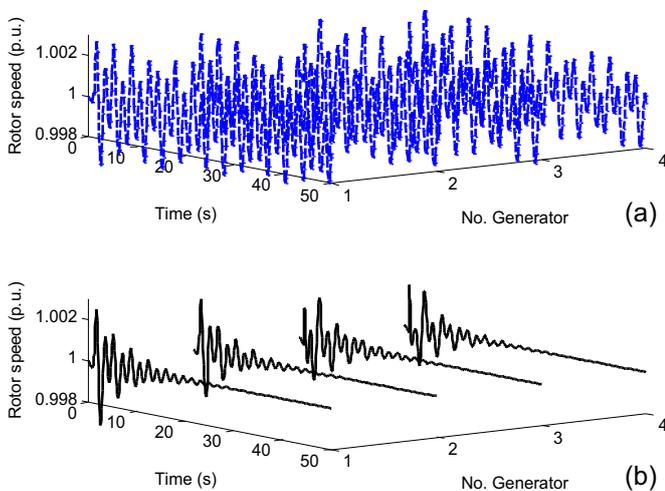


Fig. 17. Synchronous generator rotor speed in case 3: (a) DFIG-CPOD, and (b) DFIG-RPOD.

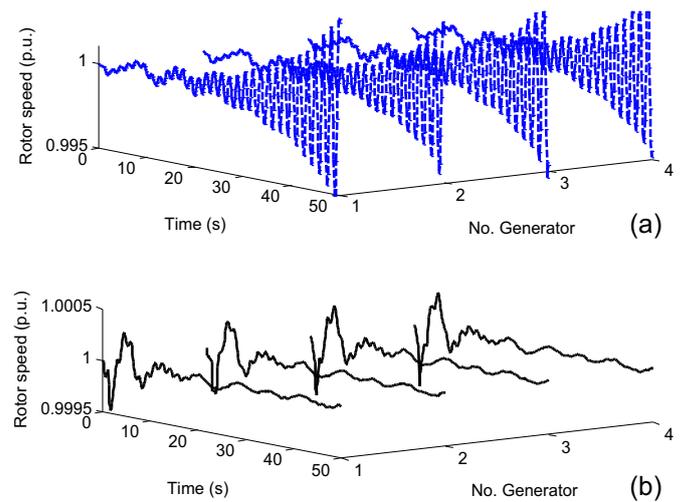


Fig. 18. Synchronous generator rotor speed in case 4: (a) DFIG-CPOD, and (b) DFIG-RPOD.

case 2 as depicted in Fig. 16, the damping effect of DFIG-CPOD is much less than that of DFIG-RPOD. In cases 3 and 4 in Figs. 17 and 18, respectively, the stabilizing effect of DFIG-CPOD is completely deteriorated. The rotor speeds severely oscillate and eventually the system is unstable. On the other hand, the DFIG-RPOD is robustly capable of damping out the oscillation. These simulation results confirm that the DFIG-RPOD is very robust against the various power flows, patterns of wind, wind speeds, severe faults, and faults location. Advantages of the proposed POD can be summarized as follows;

- 1) Since the structure of POD is a 2nd-order lead/lag compensator which is the same as the conventional power system stabilizer, it is easy to implement in practical power systems.
- 2) The proposed optimization technique is very systematic, automatic, and practical. The POD parameters can be automatically obtained by the optimization. Besides, the proposed optimization can be applied to multiple PODs case.
- 3) The optimized POD is able to robustly stabilize the power system under various system uncertainties such as various generating and loading conditions, and patterns of wind.
- 4) Since the stabilizing performance of POD is carried out by the reactive power output control of DFIG wind turbine, this does not affect the active power generation of DFIG wind turbine.
- 5) The power oscillation damping by DFIG wind turbine can be served as the new ancillary service in the future smart grid.

5. Conclusion

A new robust power oscillation damper design with a specified structure mixed H_2/H_{∞} control based on LMI technique for DFIG-based wind turbine has been presented. The structure of power oscillation damper is specified as the 2nd-order lead–lag compensator which is easy to realize in practical system. Based on a mixed H_2/H_{∞} control concept, the controller parameter of POD is automatically optimized based on the enhancement of robust stability margin and robust performance by the firefly algorithm. Simulation result in the two-area four-machine interconnected power system confirms that the DFIG equipped with the robust POD is very robust against various heavy power flows, severe faults, faults location, and patterns of wind.

References

- [1] Kundur P. *Power system stability and control*. McGraw-Hill; 1994.
- [2] Messina AR. *Inter-area oscillations in power systems: a nonlinear and nonstationary perspective*. Springer; 2009.
- [3] M. de Industria Turismo y Comercio: Secretaria de Estado de Energia. *Instalaciones conectadas a la Red de Transporte y equipo generador: requisitos minimos de diseno, equipamiento, funcionamiento, puesta en servicio y seguridad*. Technical Report. Red Electrica; 2008.
- [4] Pak Lok-Fu, Dinavahi Venkata. Real-time simulation of a wind energy system based on the doubly-fed induction generator. *IEEE Trans Power Syst* 2009;23: 1301–9.
- [5] Beltran Brice, El Hachemi Benbouzid Mohamed, Ahmed-Ali Tarek. Second-order sliding mode control of a doubly fed induction generator driven wind turbine. *IEEE Trans Energy Convers* 2012;27:261–9.
- [6] Dominguez-Garcia JL, Gomis-Bellmunt O, Trilla-Romero L, Junyent-Ferre A. Vector control of squirrel cage induction generator for wind power. In: *Proceedings of the international conference on electrical machines* 2010.
- [7] Jauch C, Cronin T, Sorensen P, Jensen B. A fuzzy logic pitch angle controller for power system stabilization. *Wind Energy* 2007;10:19–30.
- [8] Morren J. *Grid support by power electronic converters of distributed generations units*. PhD Thesis. Technische Universiteit Delft; 2006.
- [9] Hughes F, Anaya-Lara O, Jenkins N, Strbac G. Control of DFIG-based wind generation for power network support. *IEEE Trans Power Syst* 2005;20:1958–66.
- [10] Anaya-Lara O, Hughes, Jenkins N, Strbac G. Power system stabilizer for a generic DFIG-based wind turbine controller. In: *Proceedings of the 8th IEE international conference on AC and DC power transmission* 2006. pp. 145–9.
- [11] Mishra Y, Mishra S, Tripathy M, Senroy N, Dong Z. Improving stability of DFIG-based wind power system with tuned damping controller. *IEEE Trans Energy Convers* 2009;24:650–60.
- [12] Kshatriya N, Annakkage U, Hughes F, Gole A. Optimized partial eigenstructure assignment-based design of a combined PSS and active damping controller for a DFIG. *IEEE Trans Power Syst* 2010;25:866–76.
- [13] Gong B, Xu D, Wu B. Network damping capability of DFIG-based wind farm. In: *Proceedings of the IEEE energy conversion congress and exposition* 2010.
- [14] Fernandez RD, Battaiotto PE, Mantz RJ. Wind farm non-linear control for damping electromechanical oscillations of power systems. *Renew Energy* 2008;33:2258–65.
- [15] Bevrani H. *Robust power system frequency control*. Springer; 2009.
- [16] Milano F. *Power system modelling and scripting*. Springer; 2010.
- [17] Miao Zhixin, Fan Lingling, Osborn Dale, Yuvarajan Subbaraya. Control of DFIG-based wind generation to improve interarea oscillation damping. *IEEE Trans Energy Convers* 2009;24:415–22.
- [18] Skoqstad S, Postlethwaite I. *Multiple feedback control: analysis and design*. Wiley; 2005.
- [19] Yang XS. *Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications*. Wiley; 2010.
- [20] Apostolopoulos T, Vlachos A. Application of the firefly algorithm for solving economic emissions load dispatch problem. *Int J Comb* 2011.
- [21] Yang Xin-She. Firefly algorithm for multimodal optimization. In: *Stochastic algorithms: foundations and applications, SAGA 2009 Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5729; 2009. pp. 169–78.
- [22] Chandrasekaran K, Simon Sishaj P. Optimal deviation based firefly algorithm tuned fuzzy design for multi-objective UCP. *IEEE Trans Power Syst* 2013;28: 460–71.
- [23] Milano F. *Power system analysis toolbox version 2.1.6*; 2011.