

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
แบบป้อนคู่โดยกรอบงานซาเกียน



นายพิสิษฐ์พล จิรพจนานุกรักษ์

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTROLLER DESIGN FOR DFIG-BASED WIND POWER GENERATION USING  
ZAKIAN'S FRAMEWORK



Mr. Pisitpol Chirapongsananurak

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่ โดยกรอบงานซาเกียน

โดย

นายพิสิษฐพล จิรพศานานุรักษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

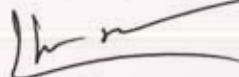
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरุญวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

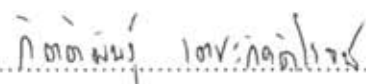
  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นกตัญญ์ อาชาวาคม)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์)

พิสิษฐ์พล จิรพวงศานานุรักษ์ : การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่โดยกรอบงานซาเกียน. (CONTROLLER DESIGN FOR DFIG-BASED WIND POWER GENERATION USING ZAKIAN'S FRAMEWORK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. แนนบุญ หุนเจริญ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ. ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์, 70 หน้า.

ในปัจจุบัน การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นทั่วโลก เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามพลังงานที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่โดยธรรมชาติแล้วแปรผันตามเวลาไม่แน่นอน ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจึงอาจส่งผลกระทบต่อปัญหาเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ได้

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบตัวควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่โดยกรอบงานซาเกียน เพื่อลดผลกระทบเชิงความถี่ที่มีต่อระบบไฟฟ้าหลัก โดยการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม การออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียนซึ่งได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่เป็นหลักการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบเข้าคู่กับสิ่งแวดล้อมที่ระบบทำงานอยู่ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขที่จะยอมรับผลตอบสนองในรูปอสมการ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องและระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกันภายใต้การรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม ผลการทดสอบปรากฏว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีอสมการและหลักการเข้าคู่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ตามข้อกำหนดของการออกแบบ

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า .....ลายมือชื่อนิสิต ..... พิศิษฐ์พล จิรพวงศานานุรักษ์  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า .....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....  
ปีการศึกษา ..... 2553 .....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ..... Se. Anurongwong

## 5270681421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : WIND POWER GENERATION / DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR / CONTROLLER DESIGN / DYNAMICAL SYSTEMS / ZAKIAN'S FRAMEWORK / METHOD OF INEQUALITIES / PRINCIPLE OF MATCHING

PISITPOL CHIRAPONGSANANURAK : CONTROLLER DESIGN FOR DFIG-BASED WIND POWER GENERATION USING ZAKIAN'S FRAMEWORK. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. SUCHIN ARUNSAWATWONG, Ph.D., 70 pp.

Nowadays, wind power generation has been increased all over the world. Wind power generation technologies are being developed rapidly. However, the generated power is directly related to wind speed which is time-varying and uncertain by nature. Therefore, it may cause frequency stability problems in the connected system.

In this thesis, controller design for wind power generation has been conducted. The wind power station is assumed to be the doubly-fed induction generator (DFIG) type. The Zakian's framework has been employed to limit the system frequency negative impact by reducing the generated power fluctuation. The Zakian's framework which consists of the method of inequalities and the principle of matching is a principle of controller design which matches the system with its environment. The design criteria of the Zakian's framework can be in the form of inequalities. Test systems are a two-machine system and a two-area system. Under the fluctuation of wind speed, the simulated test results show that the wind power generation using the controllers designed by the method of inequalities and the principle of matching can produce power within the requirements.

Department : ... Electrical Engineering ..... Student's Signature Pisitpol Chirapongsananurak  
 Field of Study : ... Electrical Engineering ..... Advisor's Signature [Signature]  
 Academic Year : ..... 2010 ..... Co-Advisor's Signature [Signature]

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ รองศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นกนัย อาชวาคม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพันธุ์ เตชะกิตติโรจน์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณภาคีวิศวกรกรมไฟฟ้าและศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์ทุนโครงการศิษย์ก้นกุฏิเป็นทุนการศึกษาในการเรียนระดับปริญญาโท

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและวิธีการออกแบบตัวควบคุม .....	5
2.1 กังหันลม .....	5
2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่ .....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม .....	10
2.4 วิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน .....	11
2.4.1 วิธีอสมการ .....	11
2.4.2 หลักการเข้าคู่.....	13
2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน .....	14
บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม .....	15
3.1 แบบจำลองของความเร็วลม .....	15
3.2 แบบจำลองของกังหันลม.....	17
3.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่.....	19
3.3.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	19
3.3.2 แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์.....	21
3.3.3 แบบจำลองของวงจรรองที่กวีต.....	22

3.4	แบบจำลองของตัวควบคุม .....	23
3.4.1	แบบจำลองของตัวควบคุมทางกล .....	23
3.4.2	แบบจำลองของตัวควบคุมทางไฟฟ้า .....	23
3.5	การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ .....	24
3.5.1	การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ .....	25
3.5.2	การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ .....	27
3.5.3	การควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	27
3.5.4	การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ .....	28
3.6	การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด .....	28
3.6.1	การควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ .....	30
3.6.2	การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกริด .....	30
3.6.3	การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกริด .....	30
บทที่ 4	การออกแบบตัวควบคุม .....	32
4.1	แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม .....	32
4.2	ตัวควบคุมที่ออกแบบ .....	33
4.2.1	ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ .....	34
4.2.2	ตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	35
4.2.3	ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ .....	35
4.2.4	ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริง .....	35
4.2.5	ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน .....	36
4.3	เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม .....	36
4.3.1	เขตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้ .....	37
4.3.2	เขตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ .....	37
4.4	ผลการออกแบบตัวควบคุม .....	38
4.5	สรุปผลการออกแบบตัวควบคุม .....	39
บทที่ 5	การทดสอบตัวควบคุม .....	40
5.1	ระบบทดสอบ .....	40
5.1.1	ระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	40
5.1.2	ระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน .....	40
5.2	อุปกรณ์ในระบบทดสอบ .....	41



5.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส.....	41
5.2.2 ระบบส่งไฟฟ้า.....	41
5.2.3 โหลด.....	42
5.3 วิธีการทดสอบ .....	42
5.4 ผลการทดสอบ.....	42
5.4.1 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	42
5.4.2 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน.....	46
5.5 อธิบายผลการทดสอบ.....	50
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	53
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
รายการอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม .....	59
ภาคผนวก ข ข้อมูลแบบจำลองของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม .....	62
ภาคผนวก ค ข้อมูลระบบทดสอบ.....	63
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	70

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่าขอบเขตของสัญญาณเข้าและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า .....	37
ตารางที่ 4.2 ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม .....	38
ตารางที่ 5.1 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที และความแปรปรวนของความถี่ของระบบในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	46
ตารางที่ 5.2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที และความแปรปรวนของความถี่ของระบบในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน .....	50
ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของ DFIG .....	59
ตารางที่ ก.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม .....	60
ตารางที่ ก.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ .....	60
ตารางที่ ก.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	60
ตารางที่ ก.5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ .....	60
ตารางที่ ก.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ .....	60
ตารางที่ ก.7 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรรองที่กริด .....	61
ตารางที่ ข.1 จุดทำงานเริ่มต้นของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม .....	62
ตารางที่ ข.2 ค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมในแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม .....	62
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลบัลในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	63
ตารางที่ ค.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	64
ตารางที่ ค.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	64
ตารางที่ ค.4 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบกระตุ้นในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	65
ตารางที่ ค.5 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบกระตุ้นในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	65
ตารางที่ ค.6 จุดทำงานเริ่มต้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	65
ตารางที่ ค.7 ค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง .....	66

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลบัลในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน .....	66
ตารางที่ ค.9 ความยาวของสายส่งในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน .....	67
ตารางที่ ค.10 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน .....	68
ตารางที่ ค.11 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน..	68
ตารางที่ ค.12 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบกระตุ้นในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน .....	68
ตารางที่ ค.13 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบกระตุ้นในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน .....	69
ตารางที่ ค.14 จุดทำงานเริ่มต้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน .....	69
ตารางที่ ค.15 ค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน .....	69

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG [1].....	5
รูปที่ 2.2 กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหน้าเข้าหาลม [11, 12].....	6
รูปที่ 2.3 กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหลังเข้าหาลม [11, 12] .....	6
รูปที่ 2.4 กังหันลมแกนตั้ง [11].....	7
รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของ DFIG ในสถานะคงตัว [2, 14–16].....	8
รูปที่ 2.6 แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG ที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส [2].....	9
รูปที่ 2.7 แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG ที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส [2].....	10
รูปที่ 3.1 แผนภาพของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG ....	15
รูปที่ 3.2 ความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบ .....	16
รูปที่ 3.3 ลักษณะสมบัติของกังหันลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ (มุมพิชเท่ากับ 0 องศา) .....	18
รูปที่ 3.4 ลักษณะสมบัติของกังหันลมที่มุมพิชค่าต่างๆ (ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s) .....	18
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกน d.....	20
รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกน q.....	20
รูปที่ 3.7 แผนภาพการควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม.....	23
รูปที่ 3.8 แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์.....	25
รูปที่ 3.9 กราฟค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG.....	26
รูปที่ 3.10 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์.....	26
รูปที่ 3.11 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ .....	27
รูปที่ 3.12 กราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าวรีแอกทีฟและค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน.....	27
รูปที่ 3.13 แผนภาพการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	28
รูปที่ 3.14 แผนภาพการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ .....	28
รูปที่ 3.15 แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด.....	29
รูปที่ 3.16 แผนภาพการควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ .....	30
รูปที่ 3.17 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่กริด .....	30
รูปที่ 3.18 แผนภาพการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรกรองที่กริด .....	31
รูปที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....	33

รูปที่ 4.2	แผนภาพของตัวควบคุมที่ออกแบบ	34
รูปที่ 4.3	แผนภาพของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ที่ออกแบบ	34
รูปที่ 4.4	แผนภาพของตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบ	35
รูปที่ 4.5	แผนภาพของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ที่ออกแบบ	35
รูปที่ 4.6	แผนภาพของตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกแบบ	35
รูปที่ 4.7	แผนภาพของตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันที่ออกแบบ	36
รูปที่ 5.1	แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง	40
รูปที่ 5.2	แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน	41
รูปที่ 5.3	ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง	43
รูปที่ 5.4	ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง	43
รูปที่ 5.5	อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง	44
รูปที่ 5.6	กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง	44
รูปที่ 5.7	ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง	45
รูปที่ 5.8	ความถี่ของระบบในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง	45
รูปที่ 5.9	ขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้ง DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง	46
รูปที่ 5.10	ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน	47
รูปที่ 5.11	ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน	47
รูปที่ 5.12	อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน	48
รูปที่ 5.13	กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน	48
รูปที่ 5.14	ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน	49
รูปที่ 5.15	ความถี่ของระบบในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน	49
รูปที่ 5.16	ขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้ง DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน	50

# บทที่ 1

## บทนำ

บทนี้เป็นบทนำซึ่งจะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตและข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ สำหรับส่วนสุดท้ายของบทนี้จะได้นำเสนอเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นทั่วโลก เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยเมื่อเทียบกับการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล อีกทั้งสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในปริมาณมาก นอกจากนี้การลงทุนติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานลมมีต้นทุนไม่สูงมากและมีแนวโน้มที่ต้นทุนจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีหลายเทคโนโลยี ซึ่งได้แก่ เทคโนโลยีที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage Induction Generator) ร่วมกับตัวเก็บประจุ เทคโนโลยีที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขดลวดพัน (Wound-rotor Induction Generator) ที่ต่อตัวต้านทานภายนอกที่โรเตอร์และใช้ตัวเก็บประจุ เทคโนโลยีที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่ (Doubly-fed Induction Generator หรือ DFIG) ร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ (Converter) และเทคโนโลยีที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) ร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมแต่ละเทคโนโลยีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังนี้ [1]

1. เทคโนโลยีที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกร่วมกับตัวเก็บประจุไม่สามารถควบคุมการผลิตไฟฟ้าได้ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีการแกว่งมาก เมื่อผลิตไฟฟ้าโดยเทคโนโลยีนี้ในสัดส่วนมากอาจทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแย่ลง แต่เทคโนโลยีนี้ใช้การลงทุนน้อยที่สุด

2. เทคโนโลยีที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขดลวดพันที่ต่อตัวต้านทานภายนอกแบบปรับค่าได้ที่โรเตอร์และใช้ตัวเก็บประจุสามารถควบคุมการผลิตไฟฟ้าผ่านทางตัวต้านทานได้ แต่การใช้เทคโนโลยีนี้ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในตัวต้านทานและสามารถควบคุมการผลิตไฟฟ้าได้ไม่มาก

3. เทคโนโลยีที่ใช้ DFIG ร่วมกับคอนเวอร์เตอร์สามารถควบคุมการผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า 2 เทคโนโลยีแรก DFIG เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขดลวดพันที่มีคอนเวอร์เตอร์ต่อเชื่อมขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริด ส่วนขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับกริดโดยตรง การต่อคอนเวอร์เตอร์ลักษณะนี้ทำให้สามารถใช้คอนเวอร์เตอร์ขนาดเล็กซึ่งมีราคาไม่แพงมาก แต่จะเปลี่ยนความเร็วโรเตอร์ได้ในช่วงแคบ

4. เทคโนโลยีที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสร่วมกับคอนเวอร์เตอร์จะสามารถควบคุมการผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุด การต่อคอนเวอร์เตอร์จะต่อเชื่อมระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกริด เทคโนโลยีนี้จะสามารถเปลี่ยนความเร็วโรเตอร์ได้ในช่วงกว้าง แต่ต้องใช้คอนเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่ซึ่งมีราคาแพง

จากข้อดีและข้อเสียของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมแต่ละวิธีที่ได้กล่าวไปแล้ว การใช้เทคโนโลยี DFIG จึงเป็นที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถควบคุมการผลิตไฟฟ้าได้โดยใช้การลงทุนไม่สูงมากแต่สามารถควบคุมการผลิตไฟฟ้าได้

การควบคุม DFIG สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมทางกลผ่านทางมุมพิชของใบพัดกังหันลม และการควบคุมทางไฟฟ้าผ่านทางคอนเวอร์เตอร์

การปรับมุมพิชของใบพัดกังหันลมทำให้กังหันลมรับพลังงานจากลมน้อยลง ดังนั้นจึงใช้การควบคุมมุมพิชเพื่อป้องกันไม่ให้กังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความเสียหายเมื่อลมพัดแรง

การควบคุมในคอนเวอร์เตอร์จะอาศัยการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control) [2-4] ซึ่งทำให้สามารถแยกควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟออกจากกันได้ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงจะควบคุมให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ (Maximum Power Tracking หรือ MPT) [5] การควบคุมแบบนี้ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีการแกว่งมากซึ่งอาจส่งผลเสียต่อเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้า

การออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียนซึ่งได้แก่ วิธีอสมการ (Method of Inequalities หรือ Mol) [6-9] และหลักการเข้าคู่ (Principle of Matching หรือ PoM) [8-10] เป็นหลักการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบเข้าคู่กับสิ่งแวดล้อมที่ระบบทำงานอยู่ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขที่จะยอมรับผลตอบสนองในรูปอสมการ การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีนี้เหมาะสมกับปัญหาการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม เนื่องจากรูปแบบของสัญญาณเข้าที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมใกล้เคียงกับสัญญาณเข้าจริง และเงื่อนไขการจำกัดผลกระทบที่มีต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอสมการได้

ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG โดยกรอบงานซาเกียนซึ่งได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่ เพื่อลดผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าหลัก

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG โดยกรอบงานซาเกียน เพื่อลดผลกระทบเชิงลบที่มีต่อเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้าหลัก

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. จำลองความเร็วลมด้วยค่าความเร็วลมเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่บวกกับตัวแปรสุ่มปกติที่ถูกกรองโดยวงจรรองและจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ได้จากการสุ่ม
2. ละเอียดพลวัตในระบบเชิงกลของกังหันลม
3. ใช้ DFIG เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม
4. รวมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมทุกเครื่องเข้าด้วยกันโดยถือว่าความเร็วลมที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องมีค่าเท่ากันตลอดเวลา
5. พิจารณาเฉพาะการรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม
6. ใช้แบบจำลองที่มีการประมาณและถูกทำให้เป็นเชิงเส้นในการออกแบบตัวควบคุม
7. ออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน
8. ออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจ่ายให้แก่ระบบไฟฟ้าหลัก
9. ทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง และระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน
10. เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนกับตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาปัญหาและผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีต่อเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเร็วลมและระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG
3. ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน



4. สร้างแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
5. ออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน
6. สร้างแบบจำลองของระบบทดสอบ
7. ทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบไว้กับระบบทดสอบที่สร้างขึ้น
8. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ
9. ปรับปรุงตัวควบคุมที่ออกแบบไว้
10. สรุปผลการวิจัย
11. เรียบเรียงผลการวิจัยและจัดทำเป็นรูปเล่มวิทยานิพนธ์
12. เขียนบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่วิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีต่อเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้า
2. สามารถเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

### 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยแต่ละบทมีเนื้อหาดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 2 อธิบายถึงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมโดยใช้เทคโนโลยี DFIG และวิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน

บทที่ 3 อธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเร็วมและระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG

บทที่ 4 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG โดยกรอบงานซาเกียน

บทที่ 5 นำเสนอการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบไว้

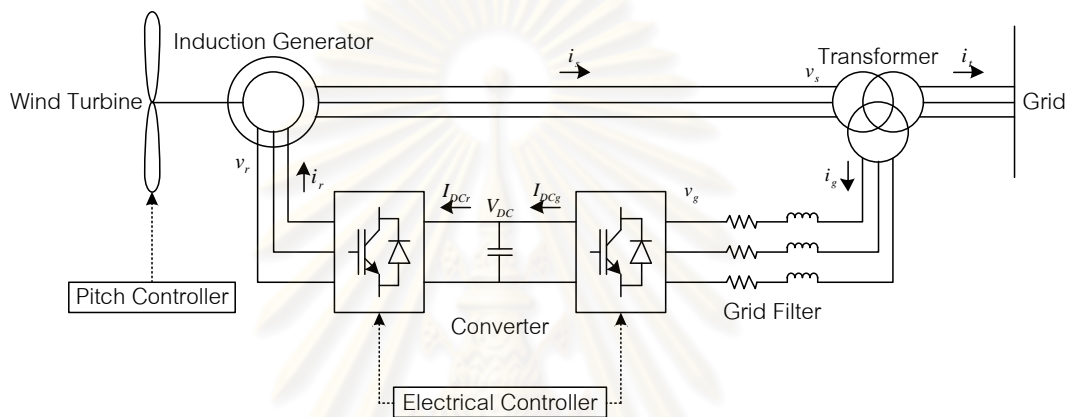
บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปของวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะต่างๆ

## บทที่ 2

### ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและวิธีการออกแบบตัวควบคุม

บทนี้กล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม และวิธีการออกแบบตัวควบคุม โดยกรอบงานสาขาเกี่ยวซึ่งได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่

แผนภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG แสดงไว้ในรูปที่ 2.1

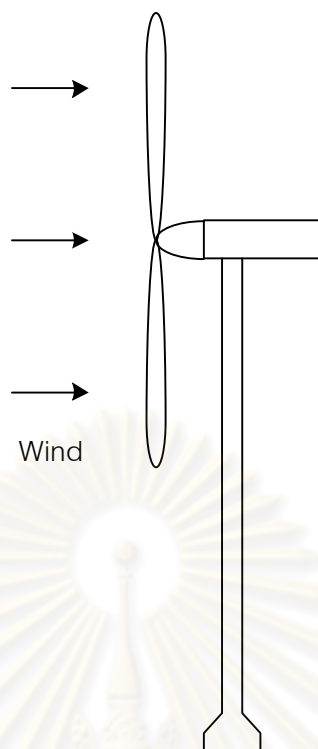


รูปที่ 2.1 แผนภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG [1]

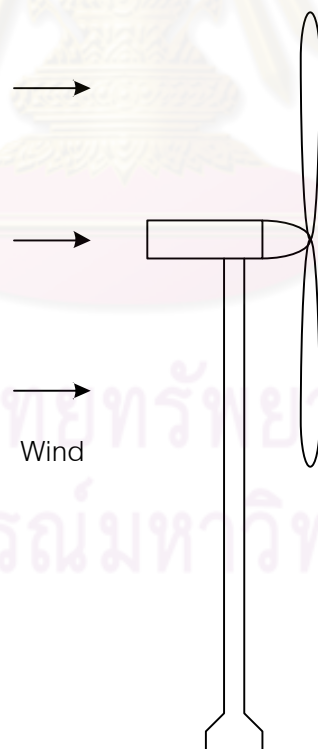
### 2.1 กังหันลม

กังหันลมเป็นระบบทางกลของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม กังหันลมรับพลังงานจากลมมาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลเพื่อนำไปหมุนโรเตอร์ แต่กังหันลมสามารถนำพลังงานในลมมาใช้ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น โดยสามารถเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลได้ไม่เกินค่าสูงสุดทางทฤษฎีคือ 0.593 ซึ่งเป็นไปตามขีดจำกัดของเบตซ์ (Betz Limit) [2, 11–13]

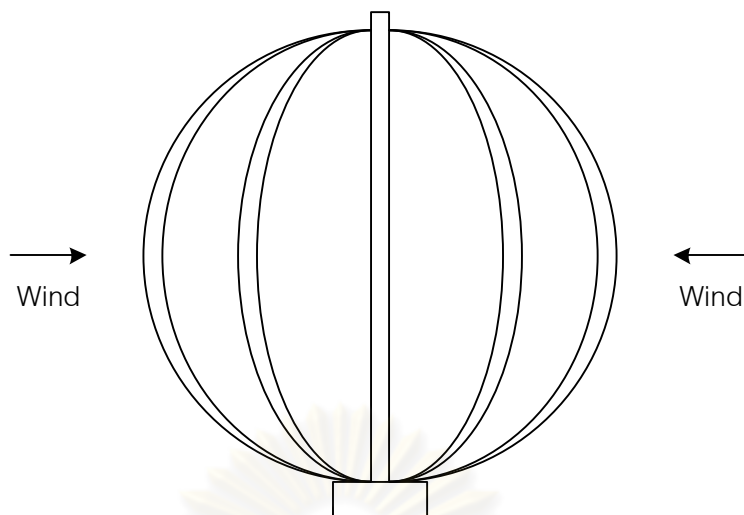
กังหันลมมี 2 ชนิด คือ กังหันลมแกนนอน และกังหันลมแกนตั้ง กังหันลมแกนนอนคือกังหันลมที่ใบพัดหมุนรอบแกนที่ขนานกับพื้นดิน กังหันลมแกนนอนแบ่งออกเป็น 2 ชนิดย่อย คือ ชนิดที่หันหน้าเข้าหาลมดังแสดงในรูปที่ 2.2 และชนิดที่หันหลังเข้าหาลมดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนกังหันลมแกนตั้งคือกังหันลมที่ใบพัดหมุนรอบแกนที่ตั้งฉากกับพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 2.4 กังหันลมแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังนี้ [11]



รูปที่ 2.2 กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหน้าเข้าหาลม [11, 12]



รูปที่ 2.3 กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหลังเข้าหาลม [11, 12]



รูปที่ 2.4 กังหันลมแกนตั้ง [11]

1. กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหน้าเข้าหาลมมีข้อดีคือ สามารถทำงานได้เรียบและจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้มากกว่ากังหันลมชนิดอื่น แต่กังหันลมชนิดนี้มีข้อเสียคือ ต้องใช้การควบคุมที่ซับซ้อนเพื่อให้กังหันหันหน้าเข้าหาลม

2. กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหลังเข้าหาลมมีข้อดีคือ สามารถใช้ลมในการควบคุมให้กังหันหันหลังเข้าหาลมได้ แต่กังหันลมชนิดนี้มีข้อเสียคือ เสาของกังหันบังลมทำให้กังหันผลิตไฟฟ้าได้น้อยลง

3. กังหันลมแกนตั้งมีข้อดีคือ ไม่ต้องใช้การควบคุมให้กังหันหันเข้าหาลมและสามารถออกแบบให้อุปกรณ์ที่มีน้ำหนักมากตั้งอยู่บนพื้นดินได้ แต่กังหันลมชนิดนี้มีข้อเสียคือ ใบพัดของกังหันลมอยู่ใกล้พื้นดินทำให้ไม่สามารถรับลมที่มีความเร็วสูงได้

จากข้อดีและข้อเสียของกังหันลมแต่ละชนิด กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหน้าเข้าหาลมจึงเป็นที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน [11]

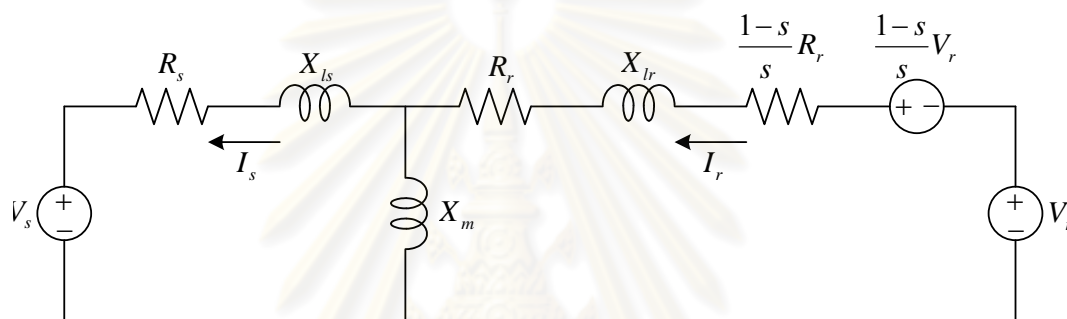
## 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขดลวดพันที่มีคอนเวอร์เตอร์ต่อเชื่อมขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกริด เพื่อนำกระแสไฟฟ้าจากกริดไปใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้น DFIG จึงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ และไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากภายนอก อีกทั้ง คอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แปรความถี่ได้เข้าทางขดลวดโรเตอร์ ส่งผลให้สามารถชดเชยความแตกต่างระหว่างความถี่ทางกลและความถี่ทางไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ การนำเอาคอนเวอร์เตอร์มาใช้ทำให้การควบคุมทำได้ง่ายขึ้นโดย

สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟหรือแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อีกด้วย [1]

การต่อคอนเวอร์เตอร์เข้ากับโรเตอร์ช่วยให้สามารถลดขนาดของคอนเวอร์เตอร์ลงได้โดยทั่วไป ขนาดกำลังพิกัดของคอนเวอร์เตอร์อยู่ที่ประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 ของกำลังพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้ในช่วงที่ความเร็วโรเตอร์แตกต่างจากความเร็วซิงโครนัสไม่เกินร้อยละ 25 ถึง 30 เช่นกัน การที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้ในช่วงที่ความเร็วโรเตอร์แตกต่างกันทำให้สามารถดึงพลังงานจากลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ มาใช้ได้เพิ่มขึ้น [1]

การทำงานของ DFIG ในสถานะคงตัวสามารถอธิบายได้ด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของ DFIG ในสถานะคงตัว [2, 14-16]

โดยที่

$V_s$  คือ เฟสเซอร์ของแรงดันที่สเตเตอร์

$V_r$  คือ เฟสเซอร์ของแรงดันที่โรเตอร์

$I_s$  คือ เฟสเซอร์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากสเตเตอร์

$I_r$  คือ เฟสเซอร์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโรเตอร์

$R_s$  คือ ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

$R_r$  คือ ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

$X_{ls}$  คือ รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวดสเตเตอร์

$X_{lr}$  คือ รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวดโรเตอร์

$X_m$  คือ รีแอกแตนซ์กระตุ้น

$s$  คือ สลิป (Slip) ซึ่งถูกนิยามโดย

$$s := \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\omega_s$  คือ ความเร็วซิงโครนัส และ  $\omega_r$  คือ ความเร็วโรเตอร์ สำหรับกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าดังสมการ (2.2)

$$\begin{aligned} P_s &= \text{Re}(V_s I_s^*) \\ P_r &= \text{Re}(V_r I_r^*) \\ P_m &= \frac{1-s}{s} \left[ |I_r|^2 R_r + \text{Re}(V_r I_r^*) \right] \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยที่  $P_s$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจากสเตเตอร์  $P_r$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าโรเตอร์ และ  $P_m$  คือ กำลังกลขาออกจากกังหันลม จากสมการ (2.2) สามารถพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่ช่องอากาศทางโรเตอร์กับกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายผ่านช่องอากาศทางสเตเตอร์ได้ดังสมการ (2.3)

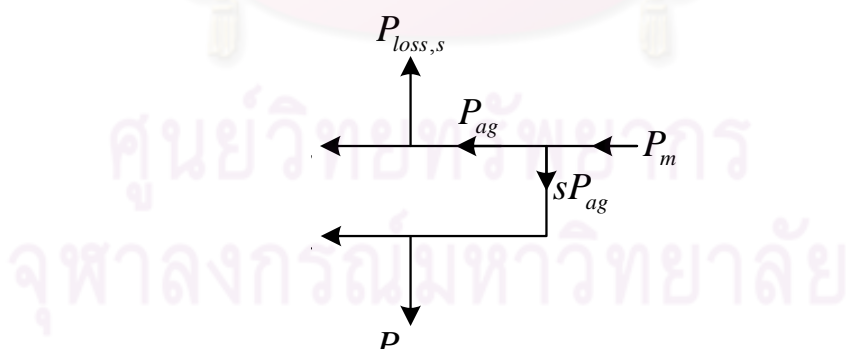
$$P_s + |I_s|^2 R_s = s(P_r + |I_r|^2 R_r) \quad (2.3)$$

เมื่อละเลยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ จะได้ว่า

$$P_s = sP_r \quad (2.4)$$

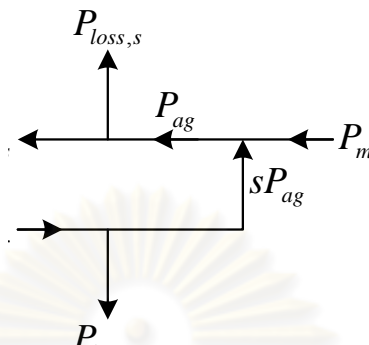
การทำงานของ DFIG มี 2 แบบคือ การทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส และการทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส [2]

การทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสทำให้สลิปเป็นลบและกำลังไฟฟ้าจริงไหลออกจากโรเตอร์ไปสู่กริด ในขณะที่กำลังไฟฟ้าจริงก็ไหลออกจากสเตเตอร์ไปสู่กริดด้วยดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG ที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส [2]

การทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสทำให้สลลิปเป็นบวกและกำลังไฟฟ้าจริงจากกริดไหลเข้าสู่โรเตอร์ แต่กำลังไฟฟ้าจริงไหลออกจากสเตเตอร์ไปสู่กริด เช่นเดียวกับการทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG ที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส [2]

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมอย่างแพร่หลาย ดังนั้นนักวิจัยจำนวนมากได้วิจัยเกี่ยวกับการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าดังนี้

ในปี ค.ศ. 1995 Lane [17] ได้ออกแบบตัวควบคุมมูมพิช เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถทำงานได้เมื่อมีลมพัดแรงอย่างทันทีทันใด โดยใช้วิธีฮิสตแกรมและหลักการเข้าคู่ ตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบพีไอและพีไอดี ในการออกแบบได้ใช้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่คำนึงถึงระบบเชิงกลเป็นหลัก ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหายเมื่อมีลมพัดแรงอย่างทันทีทันใด

ในปี ค.ศ. 1997 Nanayakkara และคณะ [18] ได้ออกแบบตัวควบคุมมูมพิช เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุดโดยส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าน้อยที่สุด ตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบพีดี โดยแบ่งสัญญาณอ้างอิงในการควบคุมเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ทำงานปกติ ช่วงที่ความถี่ห่างจากค่าปกติมาก และช่วงที่ลมแรงมาก นอกจากนี้ยังได้นำการพยากรณ์ความเร็วลมมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมในช่วงที่ทำงานปกติด้วย ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ความถี่ของระบบอยู่ในช่วงที่กำหนดได้แต่พลังงานไฟฟ้าที่ได้น้อยกว่าในกรณีที่ใช้การควบคุมมูมพิชเฉพาะช่วงที่ลมแรงมาก

ในปี ค.ศ. 2004 Ran และคณะ [19] ได้ออกแบบตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตไฟฟ้าได้คงที่ โดยใช้วงจรรองผ่านตัวร่วมกับการควบคุมให้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด ในการออกแบบได้ใช้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่คำนึงถึงระบบไฟฟ้าเป็นหลัก ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตกำลังไฟฟ้าได้คงที่ แต่พลังงานไฟฟ้าที่ได้น้อยกว่าในกรณีที่ใช้การควบคุมให้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด

ในปี ค.ศ. 2007 Muhandó และคณะ [20] ได้ออกแบบตัวควบคุมมมพิชและตัวควบคุมแรงบิดทางไฟฟ้า เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด และลดโหลดแรงบิดของเพลลาในสภาวะปกติ และเพื่อลดโหลดการแกว่งของเพลลาในช่วงที่ลมแรงมาก โดยใช้การควบคุมแบบปรับตัวเองได้ (Self-Tuning Regulator หรือ STR) เพื่อลดการรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม ในการออกแบบได้ใช้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่คำนึงถึงระบบเชิงกลเป็นหลัก ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตกำลังไฟฟ้าได้คงที่ที่ค่าพิกัด

ในปี ค.ศ. 2009 Kusiak และคณะ [21] ได้ออกแบบตัวควบคุมมมพิชและตัวควบคุมแรงบิดทางไฟฟ้า เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด โดยใช้วิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model Predictive Control หรือ MPC) ในการออกแบบได้ใช้ขั้นตอนวิธีทางวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและความเร็วลม ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าและเร็วกว่าในกรณีที่ไม่ใช้การควบคุมแบบนี้

## 2.4 วิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน

วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ กรอบงานซาเกียนซึ่งได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่

### 2.4.1 วิธีอสมการ

การออกแบบตัวควบคุมโดยทั่วไปมักจะมีข้อกำหนดในการออกแบบอยู่ในรูปของอสมการ เนื่องจากผู้ออกแบบต้องการให้สัญญาณใดสัญญาณหนึ่งอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่าน [6–9] เสนอการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีอสมการซึ่งเป็นหลักการทั่วไปของการออกแบบตัวควบคุมที่มีการกำหนดปัญหาในรูปอสมการ

$$\phi_i(p) \leq c_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.5)$$



โดยที่  $p$  คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบ  $\phi_i : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R} \cup \{\infty\}$  คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $\phi_i(p)$  คือ จำนวนจริงที่แสดงพฤติกรรมของระบบ และ  $c_i$  คือ ค่าสูงสุดของ  $\phi_i(p)$  ที่ยอมรับได้ อสมการ (2.5) แสดงสมรรถนะของตัวควบคุมที่ต้องการและเงื่อนไขข้อจำกัดทางกายภาพต่างๆ ของระบบ ดังนั้นคำตอบของการออกแบบคือ ค่า  $p$  ใดๆ ที่สอดคล้องกับอสมการ (2.5)

ในทางปฏิบัติ การคำนวณหาคำตอบสามารถทำได้โดยวิธีเชิงเลขต่างๆ เช่น กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขต (Moving Boundaries Process หรือ MBP) [6, 9] การจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing หรือ SA) [9] ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm หรือ GA) [9] เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การหาคำตอบโดยวิธี MBP เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและไม่ซับซ้อน

การคำนวณโดยใช้วิธีเชิงเลขเหมาะสมกับกรณีที่  $\phi_i(p) < \infty$  สำหรับ  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  เท่านั้น เนื่องจากจุดในบริเวณที่  $\phi_i(p) = \infty$  จับตัวกันเป็นบริเวณที่ต่อเนื่องกัน (Connected Region) ทำให้วิธีเชิงเลขไม่สามารถหาคำตอบได้ ฉะนั้นการหาค่าพารามิเตอร์  $p$  โดยใช้วิธีเชิงเลขจึงต้องเริ่มต้นจากการหาค่า  $p^0$  ซึ่งสอดคล้องกับอสมการ (2.6)

$$\phi_i(p^0) < \infty, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.6)$$

ในการออกแบบตัวควบคุม อสมการ (2.6) สามารถแทนได้ด้วยเงื่อนไขที่ระบบมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (Asymptotic Stability) ดังอสมการ (2.7)

$$\alpha(p) < 0 \quad (2.7)$$

โดยที่  $\alpha : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  คือ ฟังก์ชันที่นิยามตามสมการ (2.8)

$$\alpha(p) := \max_i \operatorname{Re} \lambda_i(p) \quad (2.8)$$

โดยที่  $\lambda_i(p)$  คือ รากของสมการลักษณะเฉพาะของระบบ เมื่อนำอสมการ (2.7) มาใช้ร่วมกับวิธีอสมการ อสมการ (2.7) จะถูกแทนด้วยอสมการ (2.9)

$$\alpha(p) \leq -\varepsilon, 0 < \varepsilon \ll 1 \quad (2.9)$$

โดย เมื่อ  $0 < \varepsilon \ll 1$  อสมการ (2.9) จะให้คำตอบใกล้เคียงกับอสมการ (2.7) ดังนั้นอสมการ (2.9) จึงเป็นอสมการที่ใช้ในการทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

วิธีการหาคำตอบของอสมการ (2.5) โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ [6, 7]

ขั้นที่ 1 หาค่า  $p^0$  ซึ่งทำให้อสมการ (2.6) เป็นจริง โดยใช้สมการ (2.9) คำตอบที่ได้จากขั้นตอนนี้จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นในขั้นตอนถัดไป

ขั้นที่ 2 หาค่า  $p$  ซึ่งทำให้อสมการ (2.5) เป็นจริง โดยในระหว่างการคำนวณต้องไม่ทำให้  $\phi_i(p) = \infty$  ดังนั้นจึงต้องแก้สมการ (2.9) ไปพร้อมกับอสมการ (2.5)

## 2.4.2 หลักการเข้าคู่

การออกแบบตัวควบคุมจะต้องพิจารณาถึงสิ่งแวดล้อมที่ระบบทำงานอยู่ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่าน [8–10] เสนอการออกแบบตัวควบคุมโดยหลักการเข้าคู่ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบเข้าคู่กับสิ่งแวดล้อมที่ระบบทำงานอยู่

สัญญาณเข้าหรือสัญญาณรบกวนของระบบเป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติของสิ่งแวดล้อม สัญญาณเข้านี้ถูกกำหนดให้อยู่ในเซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้ (Possible Set)  $P$  เซตนี้ประกอบด้วยสัญญาณเข้าทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้หรืออาจจะเกิดขึ้นหรืออนุญาตให้เกิดขึ้น

สิ่งแวดล้อมควบคุมระบบผ่านทางสัญญาณเข้าซึ่งทำให้เกิดสัญญาณออกหรือผลตอบสนองของระบบ ถ้าสามารถยอมรับผลตอบสนองของระบบได้ในเงื่อนไขที่กำหนดแล้ว จะเรียกสัญญาณเข้าที่ทำให้เกิดผลตอบสนองนี้ว่าสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ ดังนั้นเซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ (Tolerable Set)  $T$  จึงเป็นลักษณะสมบัติของระบบ

ระบบจะเข้าคู่กับสิ่งแวดล้อมเมื่อเซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้เป็นสับเซตของเซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ กล่าวคือสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้ทั้งหมดเป็นสัญญาณเข้าที่ระบบสามารถทนได้

นิยามของเซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ตัดสินผลตอบสนองของระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้ สัญญาณเข้าจะถูกพิจารณาว่าเป็นสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้เมื่อสัญญาณเข้าดังกล่าวผลิตสัญญาณออกที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดตลอดเวลาดังสมการ (2.10) [8, 9, 17]

$$\|v_i(f)\|_{\infty} \leq \varepsilon_i, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.10)$$

โดยที่  $f$  คือ สัญญาณเข้า  $v_i$  คือ สัญญาณออก และ  $\varepsilon_i$  คือ ขอบเขตของสัญญาณออก  $v_i$  ที่กำหนด ทั้งนี้ สัญญาณเข้า  $f$  และสัญญาณออก  $v_i$  เป็นฟังก์ชันของเวลา เซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้เป็นดังสมการ (2.11)

$$T := \{f \mid \|v_i(f)\|_{\infty} \leq \varepsilon_i, i = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (2.11)$$

และวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้เซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้เป็นไปตามสมการ (2.12) [9]

$$P := \{f \mid \|f\|_{\infty} \leq M, \|f\|_{\infty} \leq D, f(t) = 0 \forall t \leq 0\} \quad (2.12)$$

โดยที่  $M$  คือ ค่าขอบเขตของสัญญาณเข้า และ  $D$  คือ ค่าขอบเขตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า

นิยามให้ค่าสูงสุดของสัญญาณออกเป็นตามสมการ (2.13)

$$\hat{v}_i := \sup_{f \in P} \|v_i(f)\|_\infty \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติ การคำนวณค่าสูงสุดของสัญญาณออก  $\hat{v}_i$  อาจทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการเสนอให้คำนวณค่าขอบเขตบนของสัญญาณออก  $\tilde{v}_i$  แทน โดย  $\tilde{v}_i \geq \hat{v}_i$  ฉะนั้น เมื่อ  $\tilde{v}_i \leq \varepsilon_i$  จะได้ว่า  $\hat{v}_i \leq \varepsilon_i$  [9] ได้แสดงว่าค่าขอบเขตบนของสัญญาณออก  $\tilde{v}_i$  เมื่อเซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้เป็นดังสมการ (2.12) เป็นไปตามสมการ (2.14)

$$\tilde{v}_i = \min \left\{ M \|s_{ss,i}\| + D \|s_i - s_{ss,i}\|, M \|h_i\| \right\} \quad (2.14)$$

โดยที่  $s_i$  คือ ผลตอบสนองของสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของสัญญาณออก  $v_i$   $s_{ss,i}$  คือ ผลตอบสนองของสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของสัญญาณออก  $v_i$  ที่สภาวะอยู่ตัว และ  $h_i$  คือ ผลตอบสนองของสัญญาณเข้าแบบอิมพัลส์ของสัญญาณออก  $v_i$

ในกรณีที่ระบบมีหลายสัญญาณเข้าซึ่งได้แก่  $f_j, j=1, 2, 3, \dots, n$  ค่าขอบเขตบนของสัญญาณออก  $\tilde{v}_i$  มีค่าเป็นไปตามสมการ (2.15)

$$\tilde{v}_i = \sum_{j=1}^N \tilde{v}_{i,j} \quad (2.15)$$

โดยที่  $\tilde{v}_{i,j}$  คือ ค่าขอบเขตบนของสัญญาณออก  $v_i$  สำหรับสัญญาณเข้า  $f_j$

#### 2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน

นักวิจัยจำนวนมาก [9, 17, 22–24] ได้นำกรอบงานซาเกียนไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเนื่องจากกรอบงานซาเกียนเป็นวิธีการออกแบบที่มีความยืดหยุ่นและสมจริง นอกจากนี้กรอบงานซาเกียนยังสามารถใช้กับปัญหาการออกแบบตัวควบคุมที่มีหลายวัตถุประสงค์ได้อีกด้วย สำหรับงานวิจัยที่นำกรอบงานซาเกียนไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมในระบบไฟฟ้ากำลังมีดังนี้

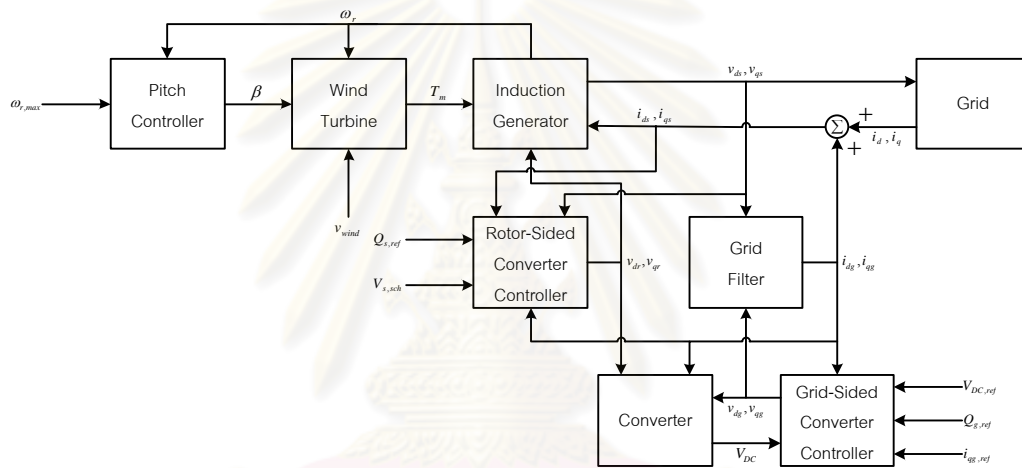
ในปี ค.ศ. 2009 Tia และคณะ [22] ได้ออกแบบส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer หรือ PSS) ในระบบกระตุ้น (Excitation System) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพเมื่อแรงดันที่โหลดมีการแกว่ง ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพโดยมุมโรเตอร์ ความเร็วโรเตอร์ และแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอยู่ในขอบเขตที่กำหนด

### บทที่ 3

#### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

บทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG ซึ่งได้แก่ แบบจำลองของความเร็วลม แบบจำลองของกังหันลม แบบจำลองของ DFIG และแบบจำลองของตัวควบคุม แบบจำลองทั้งหมดถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink [5]

แผนภาพของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG

#### 3.1 แบบจำลองของความเร็วลม

ความเร็วลมมีการแปรเปลี่ยนไปในแต่ละพื้นที่ด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพพื้นที่ ความสูง สภาพอากาศ ฤดูกาล เป็นต้น ความเร็วลมอาจถูกจำลองเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงช้ามากตามฤดูกาลและช่วงเวลากลางวันหรือกลางคืน การเปลี่ยนแปลงนี้จะอยู่ในระดับนาที่หรือชั่วโมงขึ้นไป ส่วนนี้อาจถือว่ามีค่าคงที่เท่ากับค่าเฉลี่ยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้นๆ สำหรับส่วนหลังเป็นส่วนที่มีการแปรปรวนในช่วงเวลาสั้นๆ รอบค่าเฉลี่ยในระดับวินาทีซึ่งถูกจำลองด้วยตัวแปรสุ่ม ทั้งนี้ความเร็วลมไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดได้จึงต้องนำสัญญาณที่ได้จากการสุ่มมากรองผ่านวงจรกรอง [12, 25–27]

วิทยานิพนธ์นี้จำลองความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองในช่วงระยะเวลาสั้นๆ แบบจำลองดังกล่าวเป็นไปตามสมการ (3.1) [25]

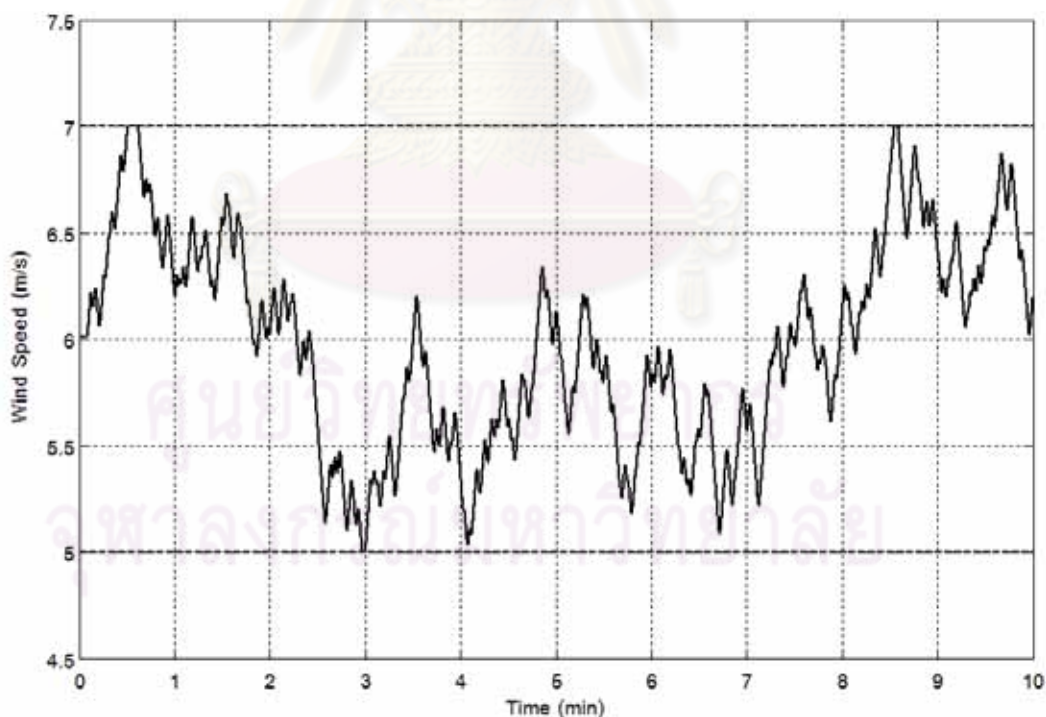
$$v_{wind} = v_m + v_t \quad (3.1)$$

โดยที่  $v_{wind}$  คือ ความเร็วลม  $v_m$  คือ ความเร็วลมเฉลี่ย และ  $v_t$  คือ ความเร็วลมส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งได้จากการนำสัญญาณสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และมีความแปรปรวนเป็น 1 มากรองผ่านวงจรรองที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (3.2) [25]

$$H(s) = \frac{k(v_m)}{(p_1(v_m)s+1)(p_2(v_m)s+1)} \quad (3.2)$$

โดยที่  $H(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรอง  $k$  คือ อัตราขยายของวงจรรอง  $p_1$  และ  $p_2$  คือ ค่าคงตัวเวลาของวงจรรอง พารามิเตอร์ของวงจรรองทั้งหมดเป็นฟังก์ชันของค่าความเร็วลมเฉลี่ย

วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 6 m/s [28] อัตราขยาย ค่าคงตัวเวลาที่ 1 และค่าคงตัวเวลาที่ 2 ในสมการ (3.2) มีค่าเป็น 6 pu 70 s และ 2 s ตามลำดับ [25] นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองความเร็วลมโดยสุ่มค่าจากตัวแปรสุ่มทุก 1 s [12] จำกัดความเร็วลมให้อยู่ในช่วง 5 ถึง 7 m/s และจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมไว้ไม่เกิน  $0.1 \text{ m/s}^2$  ผลการจำลองความเร็วลมเป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.2 แบบจำลองของกังหันลม

กังหันลมทำหน้าที่รับกำลังกลจากลมเพื่อใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้จำลองกำลังกลที่ออกจากกังหันลมด้วยแบบจำลองที่ละเลยพลวัตในระบบเชิงกลในระบบต่อหน่วยดังสมการ (3.3) [1, 2, 5, 13, 29]

$$P_m = k_p \cdot c_p(\lambda, \beta) \cdot v_{wind}^3 \quad (3.3)$$

โดยที่  $P_m$  คือ กำลังกลขาออกจากกังหันลม  $k_p$  คือ กำลังกลสูงสุดที่ได้เมื่อความเร็วลมมีค่า 1 pu  $c_p$  คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของกังหันลม  $\beta$  คือ มุมพิชของใบพัดกังหันลม และ  $\lambda$  คือ อัตราส่วนความเร็วยอด (Tip Speed Ratio) ซึ่งมีค่าดังสมการ (3.4)

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_{wind}} \quad (3.4)$$

โดยที่  $\omega_r$  คือ ความเร็วโรเตอร์ และ  $R$  คือ รัศมีของพื้นที่ที่กังหันลมกวาด

กราฟกำลังกลขาออกจากกังหันลมที่ได้จากผู้ผลิตส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกัน ดังนั้นจึงใช้การประมาณค่า  $c_p$  ด้วยฟังก์ชันเดียวกันได้ [1] ทั้งนี้ [1, 5, 13, 29] ได้แสดงผลการประมาณค่า  $c_p$  ไว้

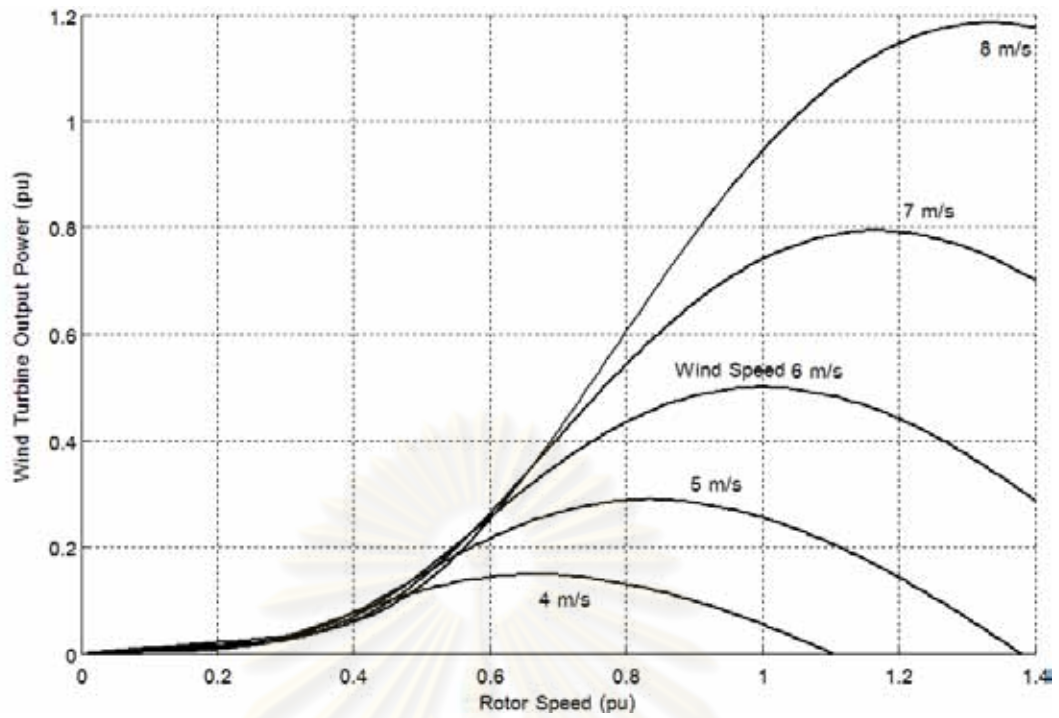
วิทยานิพนธ์นี้กำหนดค่าฐานของความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s รัศมีของพื้นที่ที่กังหันลมกวาดเท่ากับ 48.6 m ค่า  $k_p$  ในสมการ (3.3) เท่ากับ 0.5 pu และค่า  $c_p$  ในสมการ (3.3) เป็นไปตามสมการ (3.5) [5]

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left( \frac{-21}{\lambda_i} \right) + 0.0068\lambda \quad (3.5)$$

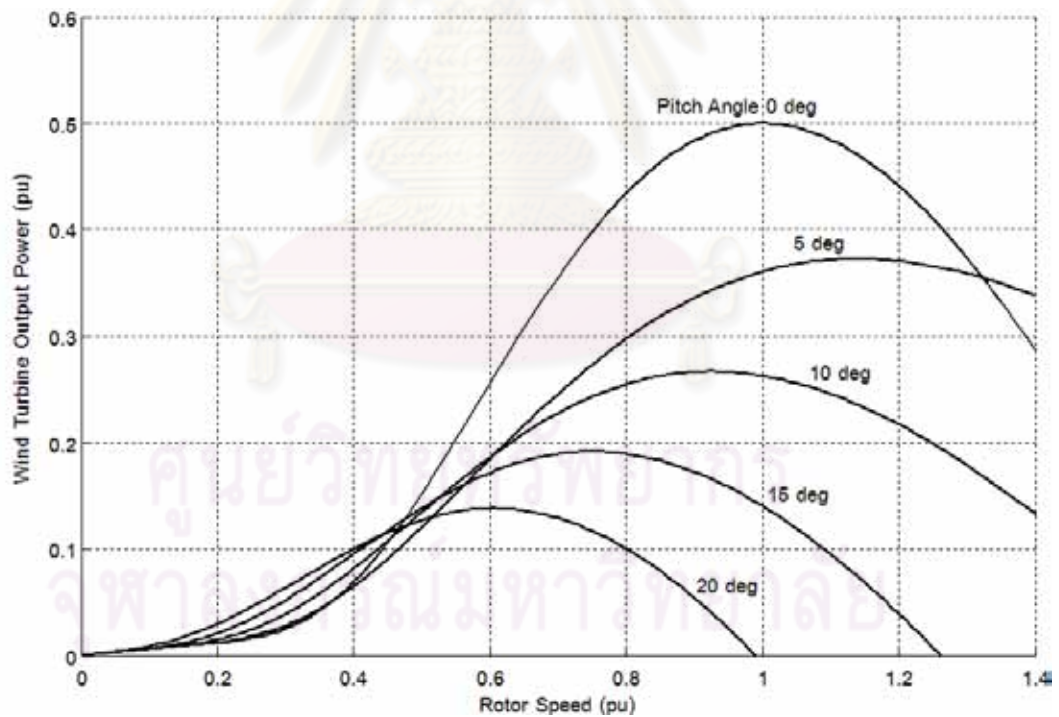
โดยที่  $\lambda_i$  มีค่าดังสมการ (3.6)

$$\lambda_i = \left[ \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \right) - \left( \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right]^{-1} \quad (3.6)$$

กล่าวโดยสรุป ลักษณะสมบัติของกังหันลมเป็นดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ลักษณะสมบัติของกังหันลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ (มุมพิชเท่ากับ 0 องศา)



รูปที่ 3.4 ลักษณะสมบัติของกังหันลมที่มุมพิชค่าต่างๆ (ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s)

สำหรับแรงบิดทางกลที่ได้จากกังหันลมเป็นไปตามสมการ (3.7)

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (3.7)$$

โดยที่  $T_m$  คือ แรงบิดทางกลที่ได้จากกังหันลม

### 3.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานกลที่ได้จากกังหันลมเป็นพลังงานไฟฟ้า DFIG ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คอนเวอร์เตอร์ และวงจรกรองที่กริด โดยค่าพารามิเตอร์ของ DFIG ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้แสดงไว้ในภาคผนวก [5]

#### 3.3.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ละเลยผลของสถานะชั่วคราวทางไฟฟ้าในสเตเตอร์ โดยสมการของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและระบบต่อหน่วยเป็นดังนี้ [1, 2, 13–16]

สมการฟลักซ์เชื่อมโยง คือ

$$\begin{aligned}\psi_{ds} &= -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{dr} &= -L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qs} &= -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{qr} &= -L_m i_{qs} + L_r i_{qr}\end{aligned}\tag{3.8}$$

โดยที่

$\psi_{ds}$  คือ ฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์ในแกน d

$\psi_{qs}$  คือ ฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์ในแกน q

$\psi_{dr}$  คือ ฟลักซ์ในขดลวดโรเตอร์ในแกน d

$\psi_{qr}$  คือ ฟลักซ์ในขดลวดโรเตอร์ในแกน q

$L_s$  คือ ความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดสเตเตอร์

$L_r$  คือ ความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดโรเตอร์

$L_m$  คือ ความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์

$i_{ds}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ในแกน d

$i_{qs}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ในแกน q

$i_{dr}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน d

$i_{qr}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน q

สมการแรงดันของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ คือ



$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= -R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} \\
 v_{qs} &= -R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} \\
 v_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \\
 v_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

โดยที่

$v_{ds}$  คือ แรงดันคร่อมขดลวดสเตเตอร์ในแกน d

$v_{qs}$  คือ แรงดันคร่อมขดลวดสเตเตอร์ในแกน q

$v_{dr}$  คือ แรงดันคร่อมขดลวดโรเตอร์ในแกน d

$v_{qr}$  คือ แรงดันคร่อมขดลวดโรเตอร์ในแกน q

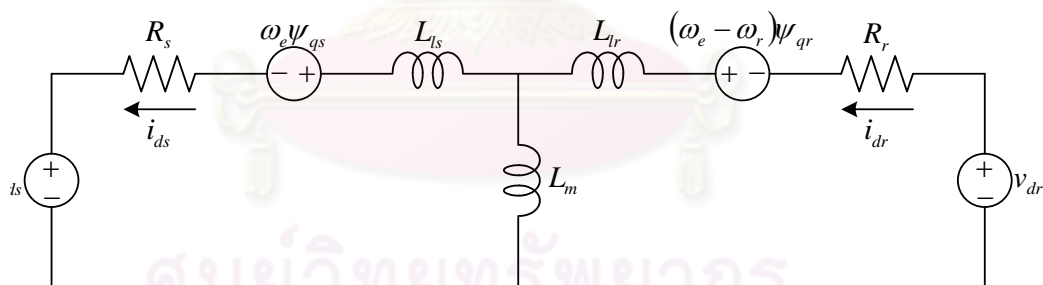
$R_s$  คือ ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

$R_r$  คือ ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

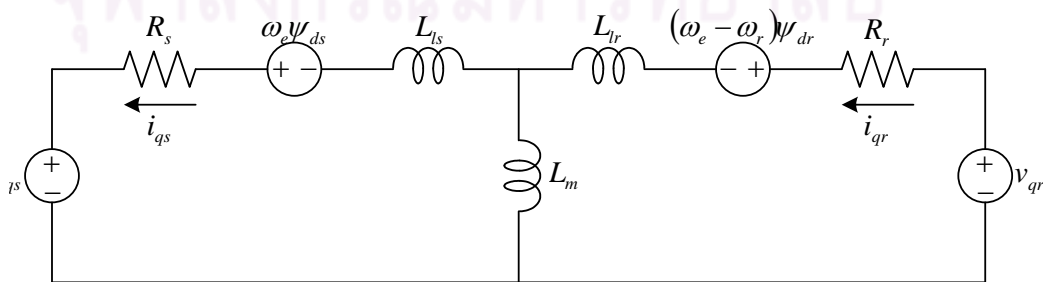
$\omega_{base}$  คือ ค่าฐานของความเร็วโรเตอร์

$\omega_s$  คือ ความเร็วเชิงโคจร

จากสมการ (3.8) และ (3.9) สามารถเขียนวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกน d



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกน q

สมการสถานะของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ คือ

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(T_m - T_{em}) \quad (3.10)$$

โดยที่  $H$  คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ  $T_{em}$  คือ แรงบิดทางไฟฟ้าซึ่งมีค่าดังสมการ (3.11)

$$T_{em} = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (3.11)$$

สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากสเตเตอร์และกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าโรเตอร์เป็นดังสมการ (3.12)

$$\begin{aligned} P_s &= v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s &= v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \\ P_r &= v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ Q_r &= v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \end{aligned} \quad (3.12)$$

โดยที่  $P_s$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากสเตเตอร์  $Q_s$  คือ กำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่ไหลออกจากสเตเตอร์  $P_r$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าโรเตอร์ และ  $Q_r$  คือ กำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่ไหลเข้าโรเตอร์

### 3.3.2 แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์

คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากกริดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่อีกความถี่หนึ่งเพื่อป้อนให้กับโรเตอร์ โดยสามารถควบคุมแรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์โดยใช้ดัชนีการมอดูเลต (Modulation Index) ดังสมการ (3.13) [30]

$$V_{AC} = \frac{m V_{DC}}{2\sqrt{2}} \quad (3.13)$$

โดยที่  $V_{AC}$  คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเฟสไฟสลับที่คอนเวอร์เตอร์  $V_{DC}$  คือ แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และ  $m$  คือ ดัชนีการมอดูเลตซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ส่วนแบบจำลองของวงจรไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการ (3.14) [2, 13]

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC}}(I_{DCg} - I_{DCr}) \quad (3.14)$$

โดยที่  $C_{DC}$  คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจรไฟตรง  $I_{DCg}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟตรงด้านที่เชื่อมต่อกับกริด และ  $I_{DCr}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟตรงด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์

กำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าโรเตอร์ตามสมการ (3.12) ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและระบบต่อหน่วยเป็นดังสมการ (3.15) [2]

$$\begin{aligned} P_c &= v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg} \\ Q_c &= v_{qg} i_{dg} - v_{dg} i_{qg} \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยที่  $P_c$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด และ  $Q_c$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด

### 3.3.3 แบบจำลองของวงจรรองที่กริด

วงจรรองที่กริดมีแบบจำลองในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและระบบต่อหน่วยตามสมการ (3.16)

$$\begin{aligned} v_{ds} - v_{dg} &= R_g i_{dg} + \frac{L_g}{\omega_{base}} \frac{di_{dg}}{dt} - \omega_s L_g i_{qg} \\ v_{qs} - v_{qg} &= R_g i_{qg} + \frac{L_g}{\omega_{base}} \frac{di_{qg}}{dt} + \omega_s L_g i_{dg} \end{aligned} \quad (3.16)$$

โดยที่

$v_{dg}$  คือ แรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดในแกน d

$v_{qg}$  คือ แรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดในแกน q

$i_{dg}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรองที่กริดในแกน d

$i_{qg}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรองที่กริดในแกน q

$R_g$  คือ ความต้านทานของตัวต้านทานในวงจรรองที่กริด

$L_g$  คือ ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำในวงจรรองที่กริด

สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจรรองที่กริดและกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและระบบต่อหน่วยเป็นดังสมการ (3.17) [2]

$$\begin{aligned} P_g &= v_{ds} i_{dg} + v_{qs} i_{qg} \\ Q_g &= v_{qs} i_{dg} - v_{ds} i_{qg} \\ P_t &= v_{ds} i_{dt} + v_{qs} i_{qt} \\ Q_t &= v_{qs} i_{dt} - v_{ds} i_{qt} \end{aligned} \quad (3.17)$$

โดยที่

$P_g$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าวงจรรองที่กริด

$Q_g$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรรองที่กริด

- $P_t$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้ากริด
- $Q_t$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้ากริด
- $i_{dt}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดในแกน d
- $i_{qt}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดในแกน q

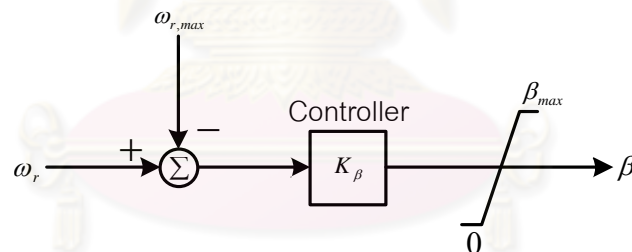
### 3.4 แบบจำลองของตัวควบคุม

การควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมทางกลซึ่งควบคุมผ่านทางมุมพิชของใบพัดกังหันลม และการควบคุมทางไฟฟ้าซึ่งควบคุมผ่านทางคอนเวอร์เตอร์ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้แสดงไว้ในภาคผนวก [5]

#### 3.4.1 แบบจำลองของตัวควบคุมทางกล

ตัวควบคุมทางกล ได้แก่ ตัวควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลมซึ่งทำงานเมื่อความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ โดยตัวควบคุมจะปรับมุมพิชให้รับพลังงานจากลมน้อยลงเพื่อป้องกันไม่ให้กังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความเสียหาย [5] ดังนั้นเมื่อตัวควบคุมนี้ทำงานทำให้ไม่สามารถนำพลังงานจากลมมาใช้ได้อย่างเต็มที่ แผนภาพของตัวควบคุมมุมพิชเป็นดังรูปที่

3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพการควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม

#### 3.4.2 แบบจำลองของตัวควบคุมทางไฟฟ้า

ในการควบคุมทางไฟฟ้า จะสามารถแยกการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟหรือแรงดันออกจากกันได้โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ การควบคุมแบบนี้จะทำผ่านคอนเวอร์เตอร์ทั้งด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์และด้านที่เชื่อมต่อกับกริด โดยการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากสเตเตอร์ และการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์

### 3.5 การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์

การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ และการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์หรือการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์แยกการควบคุมระหว่างการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ โดยหมุนแกน  $d$  ของกรอบอ้างอิงให้อยู่ในแนวเดียวกับฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์ [2–4] ดังนั้น  $\psi_{qs} = 0$  และเมื่อแทนค่าในสมการ (3.8) จะได้

$$i_{qs} = \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (3.18)$$

และเมื่อแทนค่าในสมการ (3.9) จะได้

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} \quad (3.19)$$

เมื่อละเลยความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์โดยให้  $R_s = 0$  และความเร็วเชิงโคโรนัส  $\omega_s$  มีค่าเป็น 1 pu จากสมการ (3.9) และ (3.19) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} v_{ds} &= 0 \\ v_{qs} &= \psi_{ds} \end{aligned} \quad (3.20)$$

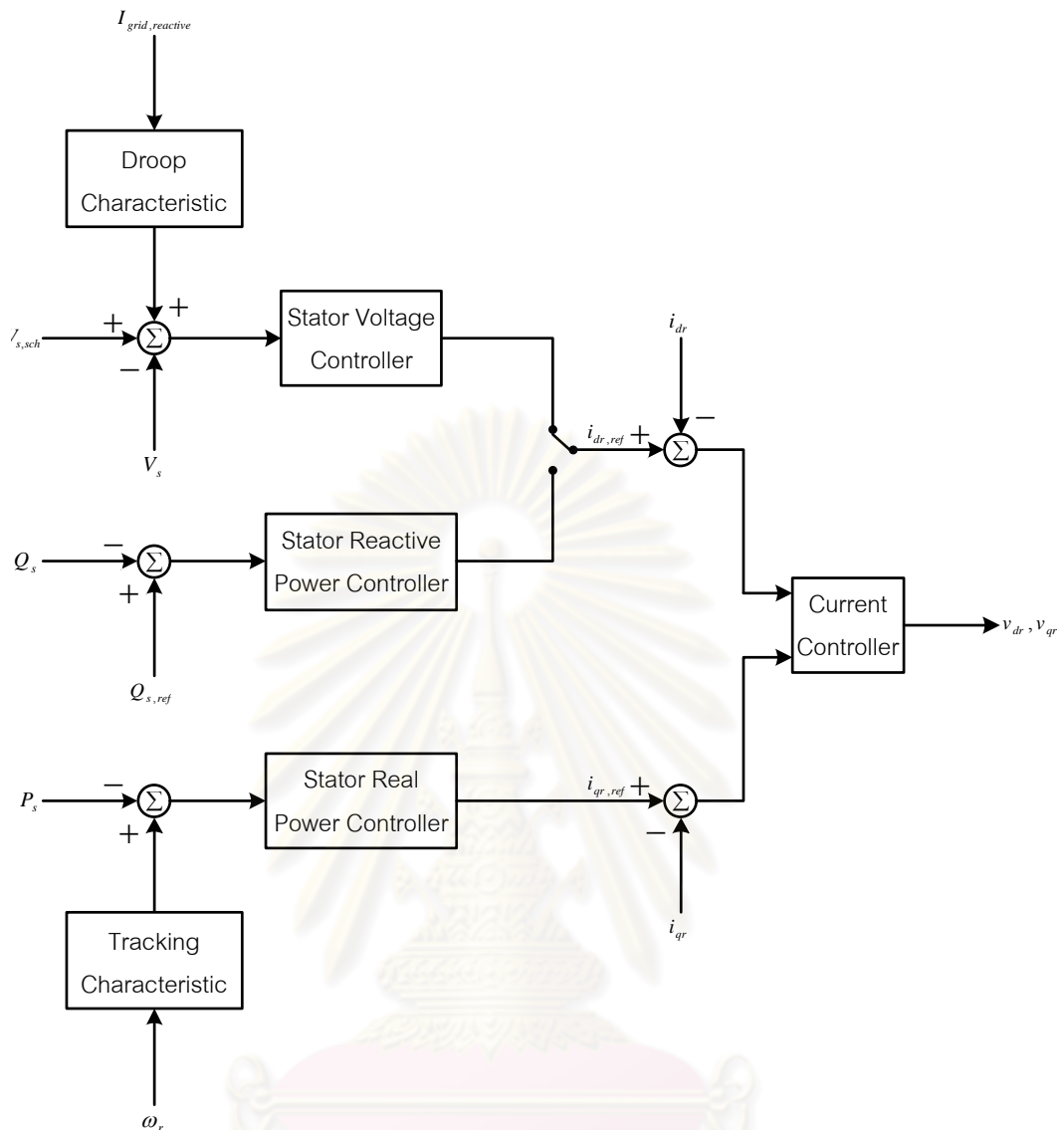
แทนค่าสมการ (3.20) ในสมการ (3.12) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_s &= \psi_{ds} i_{qs} \\ Q_s &= \psi_{ds} i_{ds} \end{aligned} \quad (3.21)$$

แทนค่าสมการ (3.8) และ (3.18) ในสมการ (3.21) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} i_{qr} \\ Q_s &= \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} i_{dr} - \frac{1}{L_s} \psi_{ds}^2 \end{aligned} \quad (3.22)$$

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อกับกริด ฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์จึงค่อนข้างจะคงที่ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ออกจากสเตเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน  $q$  และแกน  $d$  ตามลำดับ แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 3.8



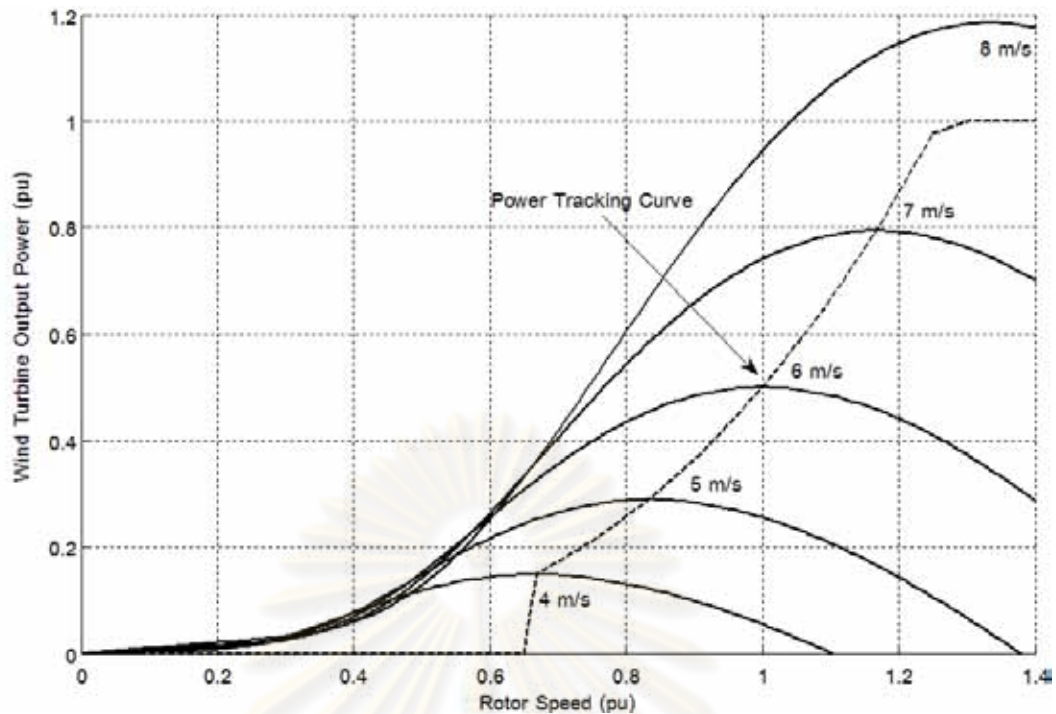
รูปที่ 3.8 แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์

### 3.5.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยการควบคุมให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ [5] กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกจากสเตเตอร์จะถูกควบคุมให้มีค่าเป็นไปตามค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ซึ่งคำนวณจากสมการ (3.23)

$$P_{s,ref} = \frac{P_{t,ref}}{1-s} \quad (3.23)$$

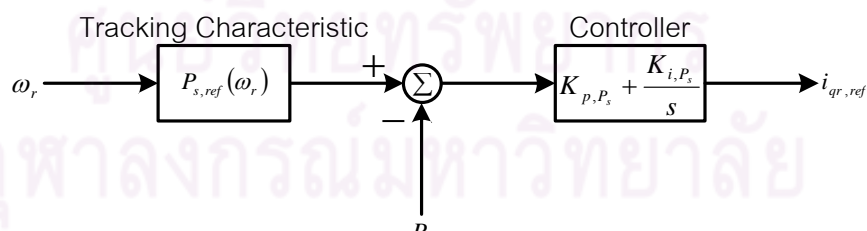
โดยที่  $P_{s,ref}$  คือ ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์  $P_{t,ref}$  คือ ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG ซึ่งเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 3.9 และ  $s$  คือ สลิป



รูปที่ 3.9 กราฟค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG

จากรูปที่ 3.9 เมื่อความเร็วลมมีค่าต่ำจนไม่สามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ การควบคุมจะให้ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าเป็น 0 pu เมื่อความเร็วลมมีค่าที่สามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ การควบคุมจะให้ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของกำลังกลขาออกจากกังหันลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ และเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงจนนำมาผลิตไฟฟ้าได้เกินค่าพิคัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมจะให้ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าเป็น 1 pu ซึ่งเป็นค่าพิคัด

การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ทำโดยใช้การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน  $q$  [2-4] ดังรูปที่ 3.10



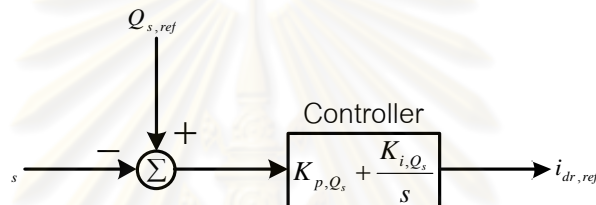
รูปที่ 3.10 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

การทำงานของตัวควบคุมเป็นดังนี้ เริ่มจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ทำงานในสถานะคงตัว เมื่อความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้น แรงบิดทางกลที่ได้จากกังหันลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าแรงบิดทางไฟฟ้า ดังนั้นความเร็วโรเตอร์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวควบคุมจะเพิ่มค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์และ

กำลังไฟฟ้าจริงรวมที่จ่ายออกจาก DFIG มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังไฟฟ้าจริงรวมที่จ่ายออกจาก DFIG และกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่างๆ รวมกันมีค่าเท่ากับกำลังกลที่ได้จากกังหันลม จะทำให้ความเร็วโรเตอร์มีค่าคงที่ ตัวควบคุมหยุดปรับค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจะกลับเข้าสู่ทำงานในสถานะคงตัว สำหรับการดำเนินงานของตัวควบคุมในกรณีที่ความเร็วลมมีค่าลดลงจะสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน [13, 31]

### 3.5.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

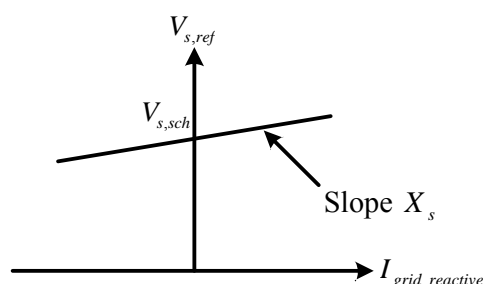
เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกจากสเตเตอร์จะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ ซึ่งการควบคุมทำโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน d [2-4] ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

### 3.5.3 การควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

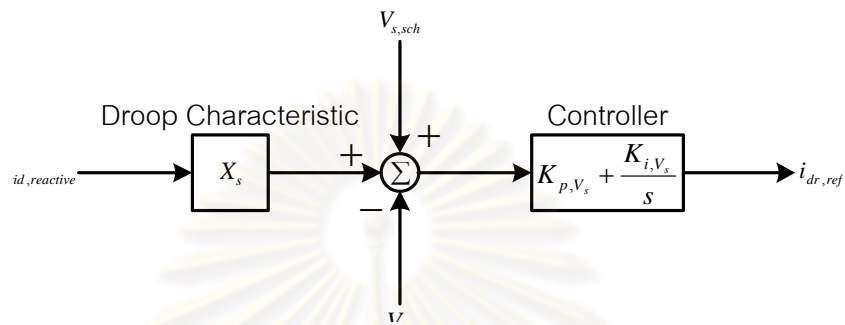
เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยการควบคุมขนาดแรงดัน ขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ตามกราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายเข้าสู่กริด และขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งมีลักษณะเป็นดรู๊ป (Droop) [5] กล่าวคือเมื่อกระแสไฟฟ้รีแอกทีฟเป็นบวกซึ่งแสดงว่ามีความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ การควบคุมจะทำให้ขนาดแรงดันมีค่าสูงเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และในทางกลับกันเมื่อกระแสไฟฟ้รีแอกทีฟเป็นลบซึ่งแสดงว่ามีกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากเกินไปเกินความต้องการ การควบคุมจะทำให้ขนาดแรงดันมีค่าต่ำเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าช่วยดูดซับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ



รูปที่ 3.12 กราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้รีแอกทีฟและค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน



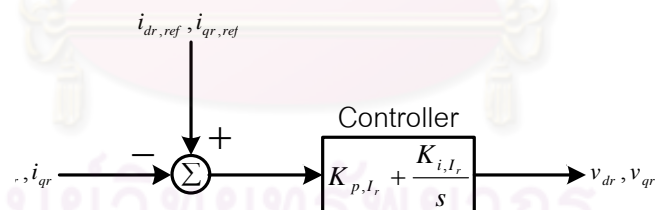
เนื่องจากขนาดแรงดันมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้ที่จ่ายออกมาก ดังนั้นการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน d [2-4] เช่นเดียวกับการควบคุมกำลังไฟฟ้ที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ เพราะฉะนั้นการควบคุมกำลังไฟฟ้ที่จ่ายออกจากสเตเตอร์และการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงไม่สามารถทำพร้อมกันได้ แผนภาพการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### 3.5.4 การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์

เมื่อได้ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงจากตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ที่จ่ายหรือแรงดัน ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าจริงที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ แล้วคำนวณค่าแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์

### 3.6 การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด

การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดใช้ในการควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และการควบคุมกำลังไฟฟ้ที่ไหลเข้าวงจรกริด

การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดแยกการควบคุมระหว่างการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและการควบคุมกำลังไฟฟ้ที่จ่าย โดยหมุนแกน d ของกรอบอ้างอิงให้อยู่ในแนวเดียวกับแรงดันที่กริด [2-4] ดังนั้น  $v_{qs} = 0$  และเมื่อแทนค่าในสมการ (3.17) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_g &= v_{ds} i_{dg} \\ Q_g &= -v_{ds} i_{qg} \end{aligned} \tag{3.24}$$

เนื่องจาก  $P_c = V_{DC} I_{DCg}$  และ  $P_r = V_{DC} I_{DCr}$  แทนค่าในสมการ (3.14) จะได้ว่า

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC} V_{DC}} (P_c - P_r) \tag{3.25}$$

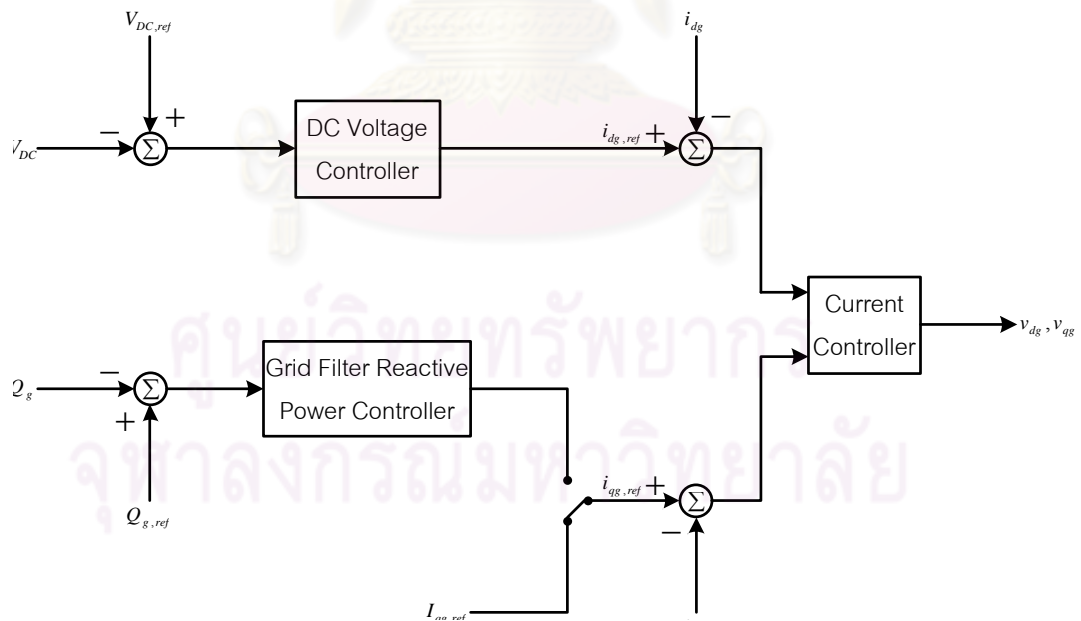
เมื่อละเลยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรกรองที่กริด ดังนั้น  $P_c = P_g$  แทนค่าในสมการ (3.25) จะได้

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC} V_{DC}} (P_g - P_r) \tag{3.26}$$

แทนค่าสมการ (3.24) ในสมการ (3.26) จะได้

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC} V_{DC}} (v_{ds} i_{dg} - P_r) \tag{3.27}$$

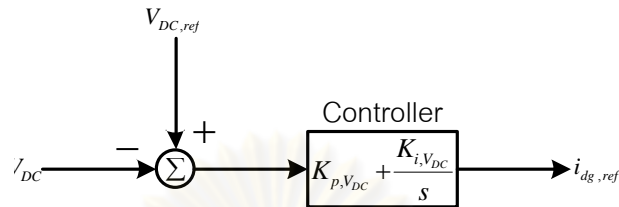
เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อกับกริด แรงดันคร่อมขดลวดสเตเตอร์จึงค่อนข้างจะคงที่ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมแรงดันไฟตรงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่กริดด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองที่กริดในแกน d และแกน q ตามลำดับ แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดแสดงไว้ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด

### 3.6.1 การควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์

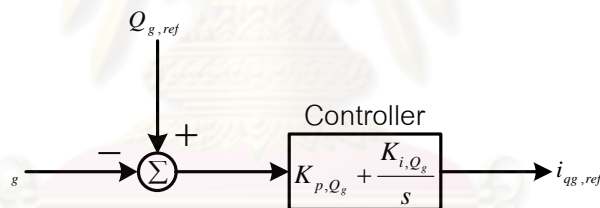
แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมให้คงที่ไม่ขึ้นกับขนาดและทิศทางของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนเวอร์เตอร์โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรองที่กริดในแกน d [2-4] ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แผนภาพการควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์

### 3.6.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรรองที่กริด

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรรองที่กริดจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรองที่กริดในแกน q [2-4] ดังรูปที่ 3.17

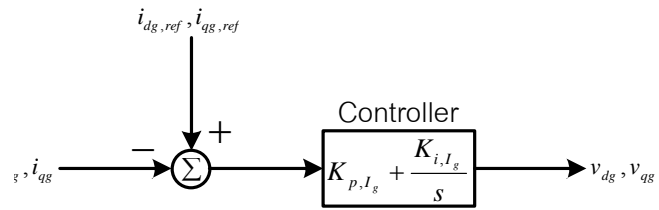


รูปที่ 3.17 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรรองที่กริด

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยไม่ได้ใช้งานตัวควบคุมนี้ ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่

### 3.6.3 การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรรองที่กริด

ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ได้จากตัวควบคุมแรงดันไฟตรงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าจริงที่ไหลในวงจรรองที่กริด เพื่อคำนวณค่าแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนภาพการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรรองที่กวด



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การออกแบบตัวควบคุม

บทนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG โดยกรอบงานซาเกียนซึ่งได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่ โดยกล่าวถึงแบบจำลองของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ตัวควบคุมที่ออกแบบ เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ผลการออกแบบตัวควบคุม และสรุปผลการออกแบบตัวควบคุม

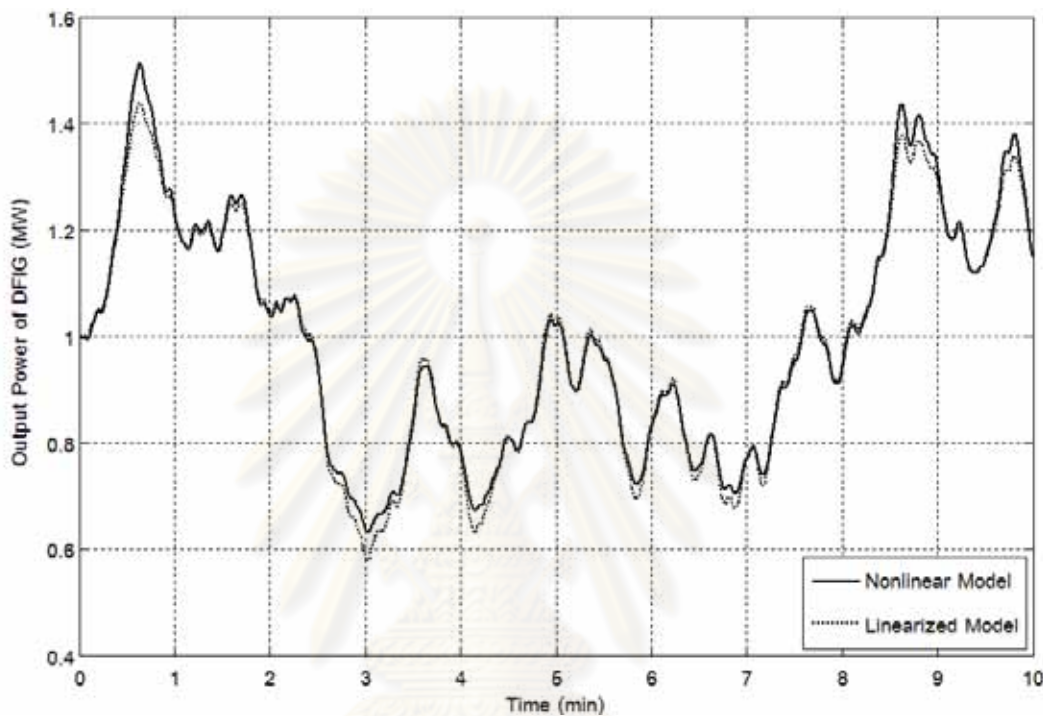
#### 4.1 แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนมากและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมโดยใช้แบบจำลองของระบบไฟฟ้าทั้งหมดได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอการออกแบบตัวควบคุมโดยแทนระบบไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมต่ออยู่ด้วยวงจรสมมูลของเทวินิน (Thevenin) โดยให้แรงดันเทวินินเป็นสัญญาณเข้าและให้อิมพีแดนซ์เทวินินเป็นค่าคงที่ นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมง่ายขึ้นและเหมาะสมกับการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีอสมการและหลักการเข้าคู่ สำหรับค่าอิมพีแดนซ์เทวินินและจุดทำงานที่ใช้ในการทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นแสดงไว้ในภาคผนวก

ทั้งนี้ วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ และกำหนดค่าอ้างอิงกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรองที่กิริดในแกน  $q$  ให้มีค่าคงที่ในการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกิริด

แบบจำลองที่ใช้มีตัวแปรสถานะ 13 ตัว ซึ่งเป็นสถานะที่แสดงพลวัตของพลักซ์ในขดลวดโรเตอร์ในแกน  $d$  และแกน  $q$  ความเร็วโรเตอร์ แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรองที่กิริดในแกน  $d$  และแกน  $q$  ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรองที่กิริดในแกน  $d$  และแกน  $q$  สำหรับสัญญาณเข้าของแบบจำลอง ได้แก่ ความเร็วลม แรงดันเทวินินในแกน  $d$  และแกน  $q$  สัญญาณอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงในรูปที่ 3.10 และสัญญาณอ้างอิงแรงดันในรูปที่ 3.13 ส่วนสัญญาณออกของแบบจำลอง ได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและความเร็วโรเตอร์ เนื่องจากสัญญาณทั้งสองเป็นสัญญาณที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบตัวควบคุม

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมจะทำการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ไม่ได้ทำให้เป็นเชิงเส้น โดยกำหนดให้อิมพีแดนซ์เทวินินมีค่าเป็น 0 pu ความเร็วลมมีค่าดังรูปที่ 3.2 แรงดันเทวินินในแกน d และแกน q มีค่าคงที่เท่ากับ 1 pu และ 0 pu ตามลำดับ สำหรับสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG ผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.1

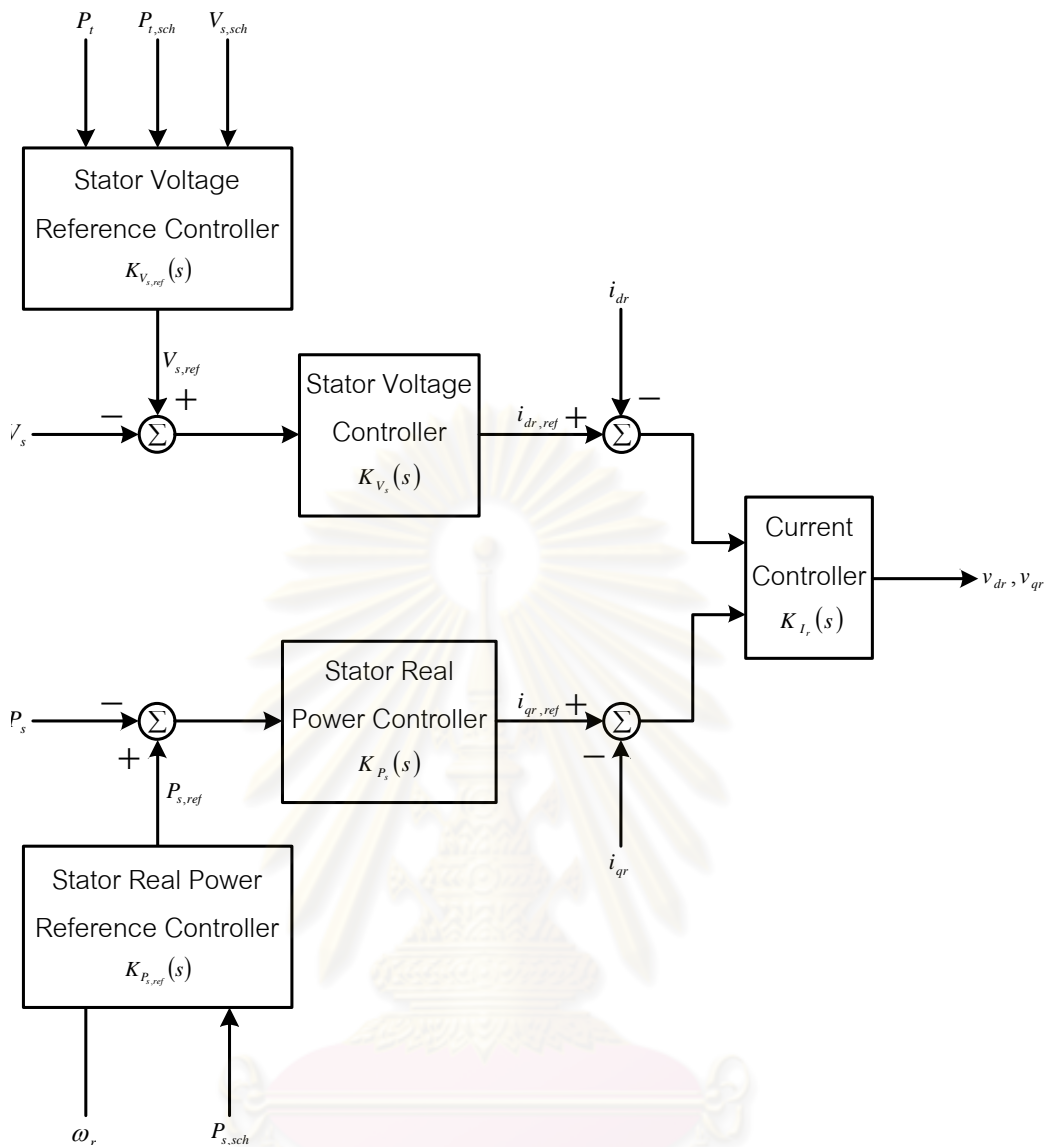


รูปที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นมีความถูกต้องเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

#### 4.2 ตัวควบคุมที่ออกแบบ

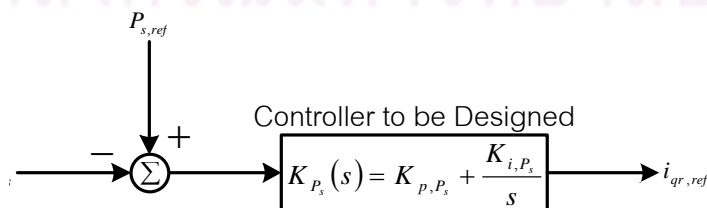
ตัวควบคุมที่ออกแบบมี 5 ตัว โดยเป็นตัวควบคุมที่ดัดแปลงจากตัวควบคุมที่มีอยู่ใน DFIG จำนวน 2 ตัว คือ ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ และตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวควบคุมที่มีอยู่เดิมใน DFIG จำนวน 1 ตัว คือ ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ และเป็นตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นเพิ่มเติมจำนวน 2 ตัว คือ ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริง และตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน แผนภาพของตัวควบคุมที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพของตัวควบคุมที่ออกแบบ

### 4.2.1 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

แผนภาพตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.3

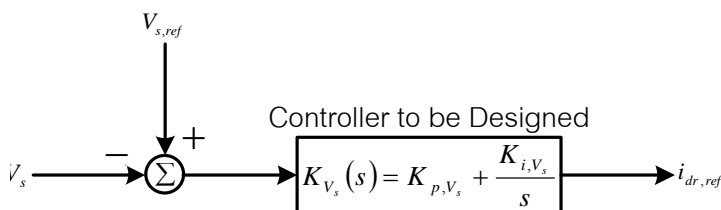


รูปที่ 4.3 แผนภาพของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ที่ออกแบบ

พารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 2 ตัว คือ  $k_{p,Ps}$  และ  $k_{i,Ps}$

### 4.2.2 ตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

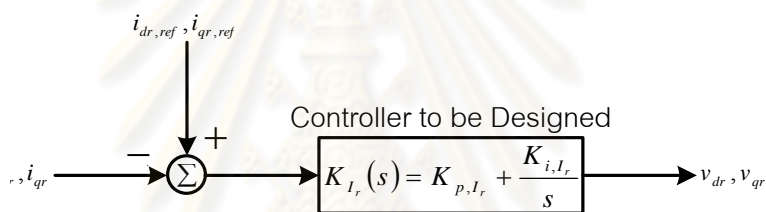
แผนภาพตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพของตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 2 ตัว คือ  $k_{p,V_s}$  และ  $k_{i,V_s}$

### 4.2.3 ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์

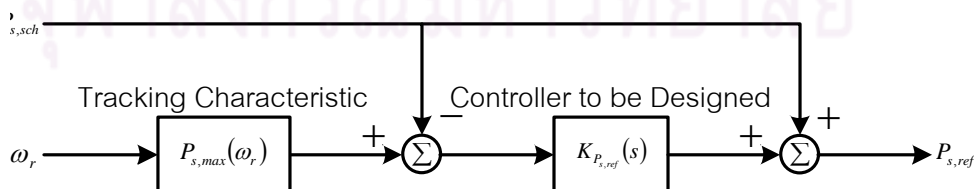
แผนภาพตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ที่ออกแบบพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 2 ตัว คือ  $k_{p,I_r}$  และ  $k_{i,I_r}$

### 4.2.4 ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริง

ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงทำหน้าที่คำนวณค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อป้อนให้กับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ แผนภาพตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพของตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกแบบ  
 วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกแบบมีฟังก์ชันถ่ายโอน  
 ดังนี้

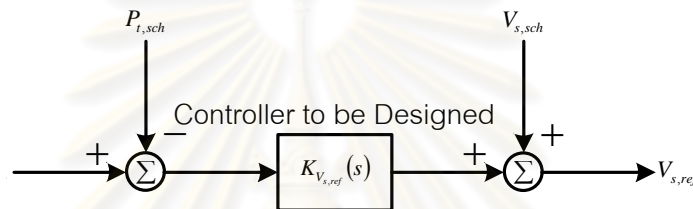


$$K_{P_s,ref}(s) = \frac{k_{P_s,ref} (s^2 + a_{z,P_s,ref} s + b_{z,P_s,ref})}{s^2 + a_{p,P_s,ref} s + b_{p,P_s,ref}} \quad (4.1)$$

พารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 5 ตัว คือ  $k_{P_s,ref}$   $a_{z,P_s,ref}$   $b_{z,P_s,ref}$   $a_{p,P_s,ref}$  และ  $b_{p,P_s,ref}$

#### 4.2.5 ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน

ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันทำหน้าที่คำนวณค่าอ้างอิงแรงดันเพื่อป้อนให้กับตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แผนภาพตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภาพของตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันที่ออกแบบ

วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันที่ออกแบบมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$K_{V_s,ref}(s) = \frac{k_{V_s,ref} (s^2 + a_{z,V_s,ref} s + b_{z,V_s,ref})}{s^2 + a_{p,V_s,ref} s + b_{p,V_s,ref}} \quad (4.2)$$

พารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 5 ตัว คือ  $k_{V_s,ref}$   $a_{z,V_s,ref}$   $b_{z,V_s,ref}$   $a_{p,V_s,ref}$  และ  $b_{p,V_s,ref}$

กล่าวโดยสรุป พารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบมีจำนวน 16 ตัว เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบเป็นดังนี้

$$p = \begin{bmatrix} k_{p,P_s} & k_{i,P_s} & k_{p,V_s} & k_{i,V_s} & k_{p,I_r} & k_{i,I_r} \\ k_{P_s,ref} & a_{z,P_s,ref} & b_{z,P_s,ref} & a_{p,P_s,ref} & b_{p,P_s,ref} \\ k_{V_s,ref} & a_{z,V_s,ref} & b_{z,V_s,ref} & a_{p,V_s,ref} & b_{p,V_s,ref} \end{bmatrix}^T \quad (4.3)$$

#### 4.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบมี 2 ส่วน คือ เซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้และเซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้

#### 4.3.1 เขตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้

เขตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขต่อไปนี้

1. สัญญาณกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริง  $P_{s,sch}$  และ  $P_{l,sch}$  ถือว่ามีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 pu
2. สัญญาณกำหนดค่าขนาดแรงดัน  $V_{s,sch}$  ถือว่ามีค่าคงที่เท่ากับค่าที่เป็นจุดทำงานเริ่มต้นของ DFIG
3. กำหนดให้ใช้ค่าสัญญาณกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.5 pu ในช่วงความเร็วลม 5 ถึง 7 m/s และกำหนดให้ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 6 m/s ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจึงมีค่าไม่เกิน 1 m/s นอกจากนี้ สมมติให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมมีค่าไม่เกิน 0.1 m/s<sup>2</sup>
4. ในสภาวะการทำงานปกติ แรงดันเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 5 ดังนั้นจึงกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันเทวินินในแกน d และแกน q ไว้ไม่เกิน 0.05 pu และสมมติให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทวินินในแกน d และแกน q มีค่าไม่เกิน 0.02 pu/s

ค่าขอบเขตของสัญญาณเข้าและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้าที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าขอบเขตของสัญญาณเข้าและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า

สัญญาณเข้า	ค่าขอบเขตของสัญญาณเข้า	ค่าขอบเขตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า
$\Delta v_{wind}$	1 m/s	0.1 m/s <sup>2</sup>
$\Delta v_{dth}$	0.05 pu	0.02 pu/s
$\Delta v_{qth}$	0.05 pu	0.02 pu/s

#### 4.3.2 เขตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้

เขตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้จะถูกกำหนดโดยความต้องการในการออกแบบตัวควบคุมดังนี้

1. วัตถุประสงค์ในการออกแบบตัวควบคุม คือ เพื่อลดผลกระทบเชิงลบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าหลัก ดังนั้นจึงต้องควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมให้ผลิตไฟฟ้าเรียบ ฉะนั้นจึงจำกัดการเปลี่ยนแปลงและอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG

2. ข้อจำกัดของการออกแบบตัวควบคุม คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ถูกจำกัดโดยขนาดของคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงต้องจำกัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ไว้ด้วย

นอกจากนี้ยังต้องจำกัดการเปลี่ยนแปลงค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน เนื่องจากจะต้องรักษาขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมด้วย

จากวัตถุประสงค์และข้อจำกัดดังกล่าว นำไปสู่สมการที่ใช้ในการออกแบบดังนี้

$$\begin{aligned}\phi_1(p) &= |\Delta P_i| \leq c_1 \\ \phi_2(p) &= |\dot{P}_i| \leq c_2 \\ \phi_3(p) &= |\Delta \omega_r| \leq c_3 \\ \phi_4(p) &= |\Delta V_{s,ref}| \leq c_4\end{aligned}\quad (4.4)$$

ในการออกแบบตัวควบคุมจะใช้ค่าขอบเขตบนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $\phi_1$   $\phi_2$   $\phi_3$  และ  $\phi_4$  ตามสมการ (2.14)

#### 4.4 ผลการออกแบบตัวควบคุม

ในระหว่างการออกแบบตัวควบคุมได้ปรับค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $c_1$   $c_2$   $c_3$  และ  $c_4$  จนมีค่าตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ
$c_1$	0.251 pu
$c_2$	0.3 pu/s
$c_3$	0.1 pu
$c_4$	0.02 pu

จากการใช้กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขตในการแก้ปัญหาการออกแบบตัวควบคุม จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบดังนี้

$$p = \begin{bmatrix} 0.8703 & 712.4 & 0.4680 & 995.4 & 0.5554 & 284.3 \\ & 0.6133 & 9.223 & 4.989 & 1.572 & 0.6933 \\ & & 0.02637 & 30.15 & 0.0002162 & 0.9568 & 1.272 \end{bmatrix}$$

และได้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ออกแบบดังนี้

$$\begin{aligned}\phi_1(p) &= 0.2505 \text{ pu} \\ \phi_2(p) &= 0.2995 \text{ pu/s} \\ \phi_3(p) &= 0.0503 \text{ pu} \\ \phi_4(p) &= 0.0191 \text{ pu}\end{aligned}$$

#### 4.5 สรุปผลการออกแบบตัวควบคุม

จากผลการออกแบบตัวควบคุมแสดงให้เห็นว่าสามารถออกแบบตัวควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการได้

การออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียนมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเนื่องจาก สัญญาณเข้าที่ใช้ในการออกแบบมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณเข้าจริง และปัญหาการออกแบบมีหลายวัตถุประสงค์ที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอสมการได้

อย่างไรก็ตาม การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีนี้จะต้องใช้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น แต่แบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องประมาณแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น แบบจำลองที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นจะมีความถูกต้องเมื่อสัญญาณเข้ามีค่าใกล้เคียงกับค่าสัญญาณเข้าที่เป็นจุดทำงานที่ใช้ในการทำให้เป็นเชิงเส้นเท่านั้น เพราะฉะนั้น คำตอบของการออกแบบตัวควบคุมจึงถูกต้องเฉพาะเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมทำงานอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับจุดทำงานที่ใช้ในการทำให้เป็นเชิงเส้น

## บทที่ 5

### การทดสอบตัวควบคุม

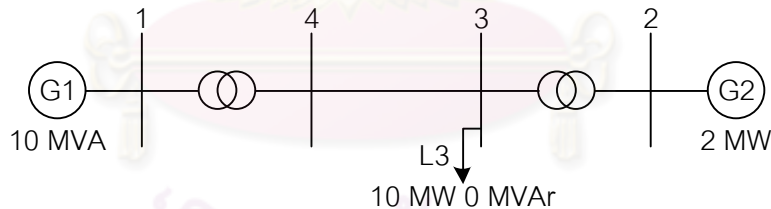
ในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink ทั้งนี้บทนี้จะกล่าวถึง ระบบทดสอบ อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทดสอบ วิธีการที่ใช้ทดสอบ ผลการทดสอบ และอธิบายผลที่ได้จากการทดสอบ

#### 5.1 ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบทดสอบ ได้แก่ ระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง และระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน โดยข้อมูลของระบบทดสอบทั้งสองแสดงไว้ในภาคผนวก [14] ทั้งนี้แบบจำลองทั้งสองถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink

##### 5.1.1 ระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

ระบบทดสอบนี้ประกอบด้วยบัสไฟฟ้าจำนวน 4 บัส สายส่งจำนวน 1 วงจร หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 2 ตัว โหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่จำนวน 1 โหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจำนวน 1 เครื่อง (G1) และโรงไฟฟ้าพลังงานลมจำนวน 1 แห่ง (G2) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

##### 5.1.2 ระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ระบบทดสอบนี้ประกอบด้วยบัสไฟฟ้าจำนวน 12 บัส สายส่งจำนวน 8 วงจร หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 5 ตัว ตัวเก็บประจุขนานจำนวน 2 ตัว โหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่จำนวน 2 โหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจำนวน 4 เครื่อง (G1, G2, G3, G4) และโรงไฟฟ้าพลังงานลมจำนวน 1 แห่ง (G5) ดังรูปที่ 5.2



### 5.2.3 โหลด

แบบจำลองของโหลดที่ใช้เป็นแบบโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ (Constant Power Load) ชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว [14, 32]

### 5.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบมาโดยการจำลองการทำงานของตัวควบคุมในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง และระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink การควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ได้แก่ การควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ การควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ การควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรรองที่กัก สำหรับการรบกวนระบบทดสอบมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเท่านั้น โดยความเร็วลมจะมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่วินาทีที่ 5 เป็นต้นไปดังรูปที่ 3.2 ทั้งนี้จะเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนกับตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ

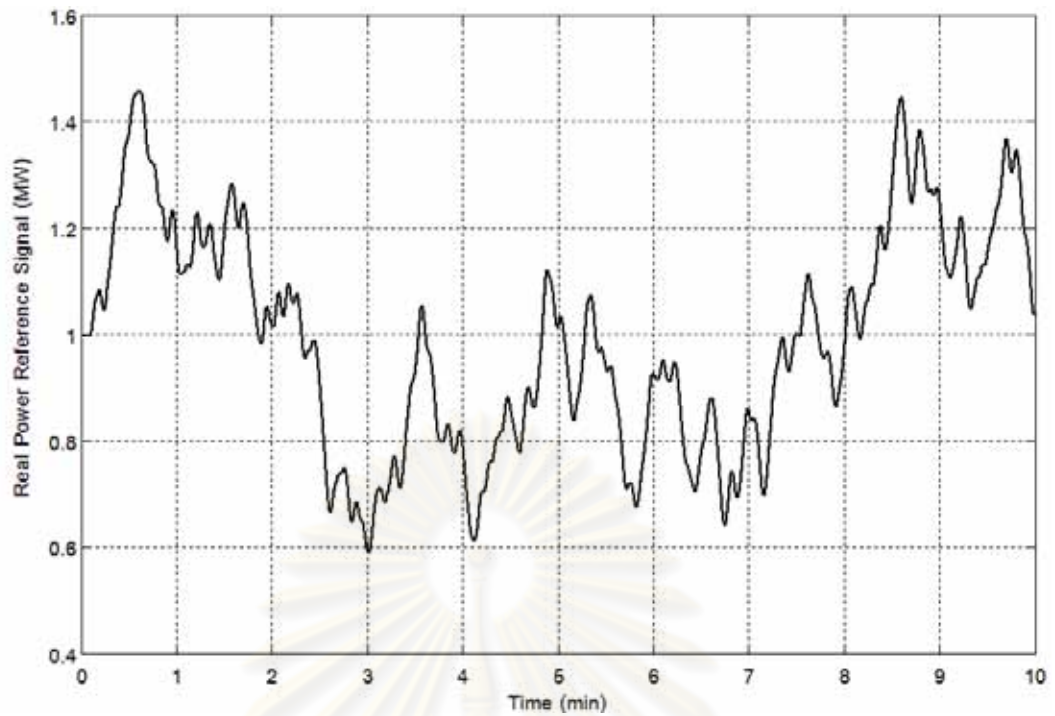
### 5.4 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ผลการทดสอบกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องและผลการทดสอบกับระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

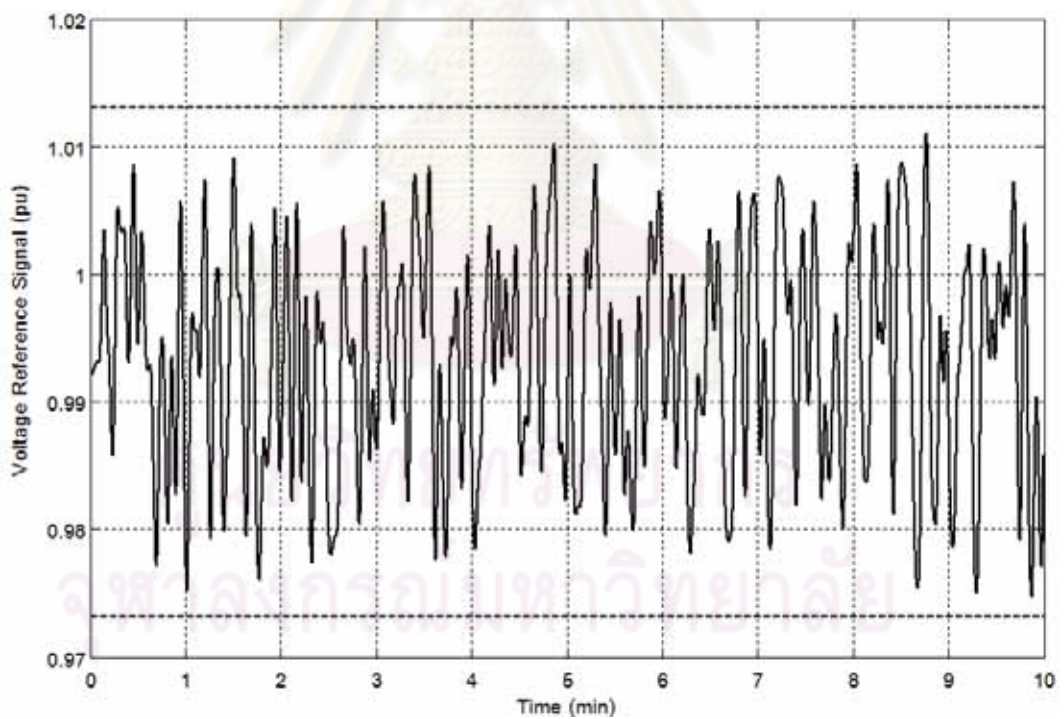
#### 5.4.1 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

จากการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง ได้กราฟของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG และอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ดังรูปที่ 5.3-รูปที่ 5.5 ตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนกับตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ได้ผลดังนี้ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ความถี่ของระบบ และขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้ง DFIG เป็นดังรูปที่ 5.6-รูปที่ 5.9 ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาทีและความแปรปรวนของความถี่ของระบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

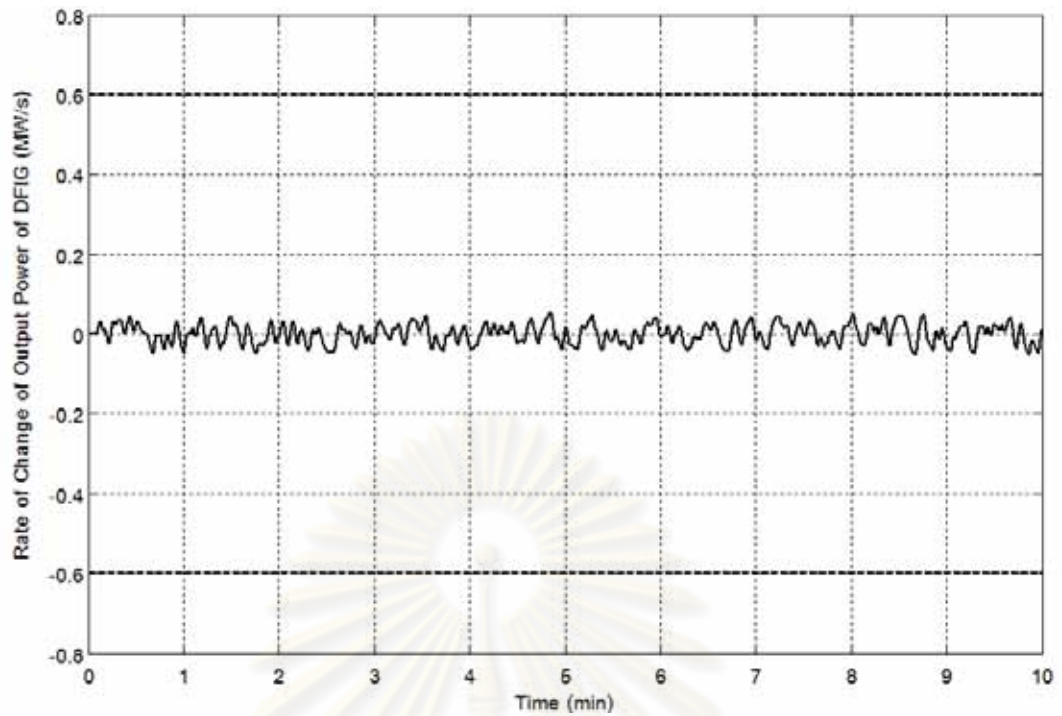


รูปที่ 5.3 ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

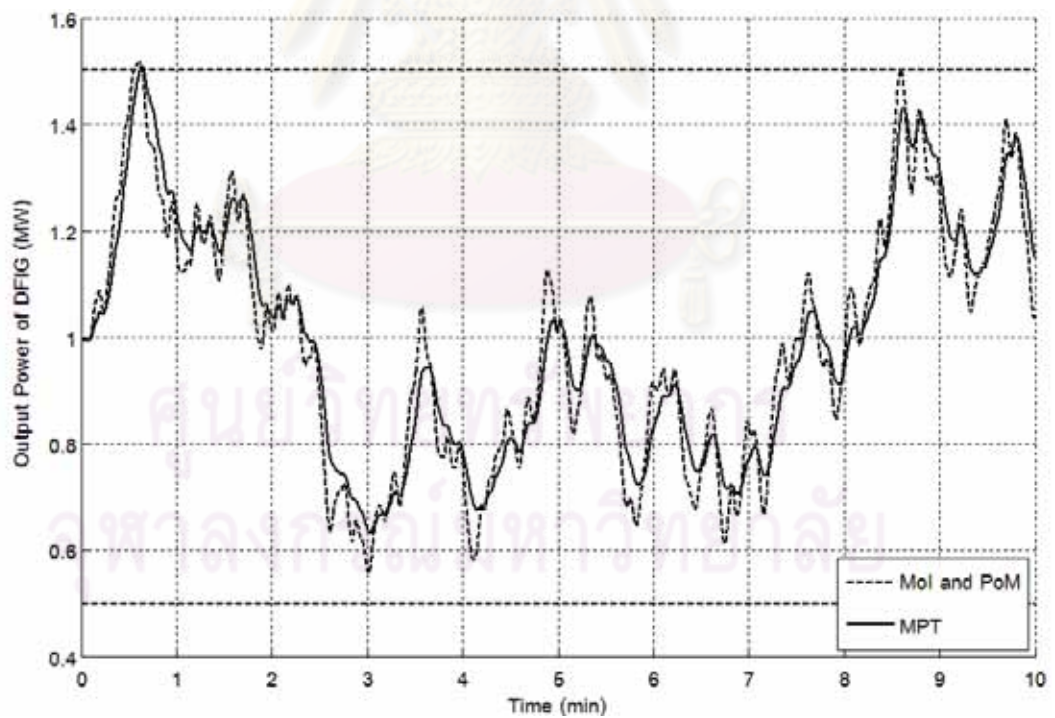


รูปที่ 5.4 ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

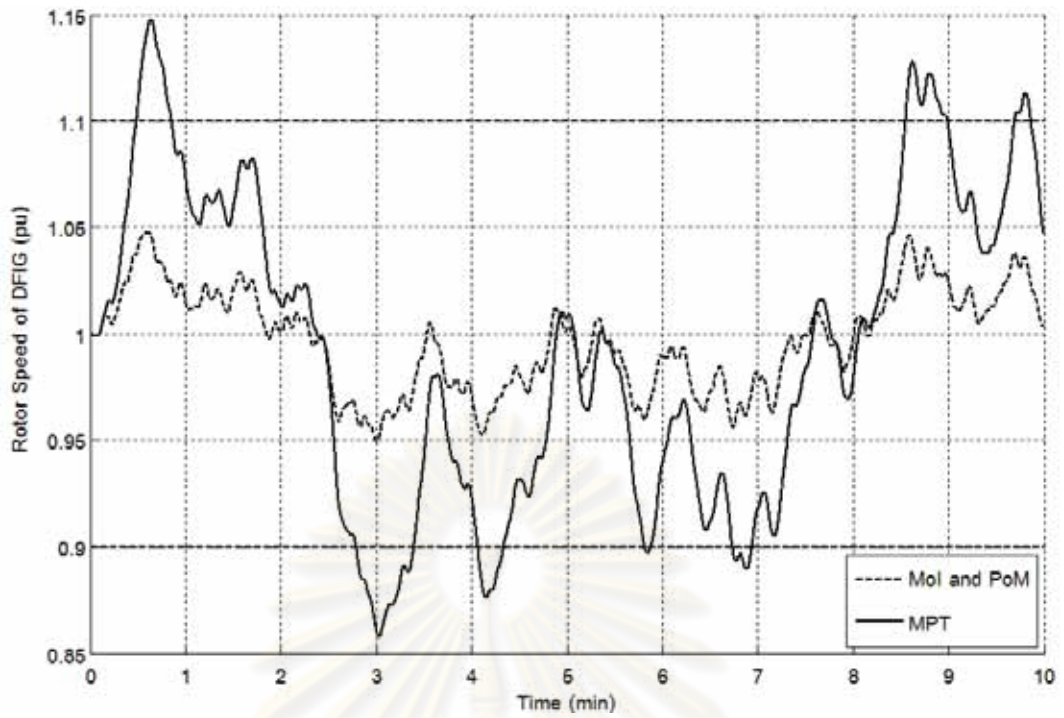




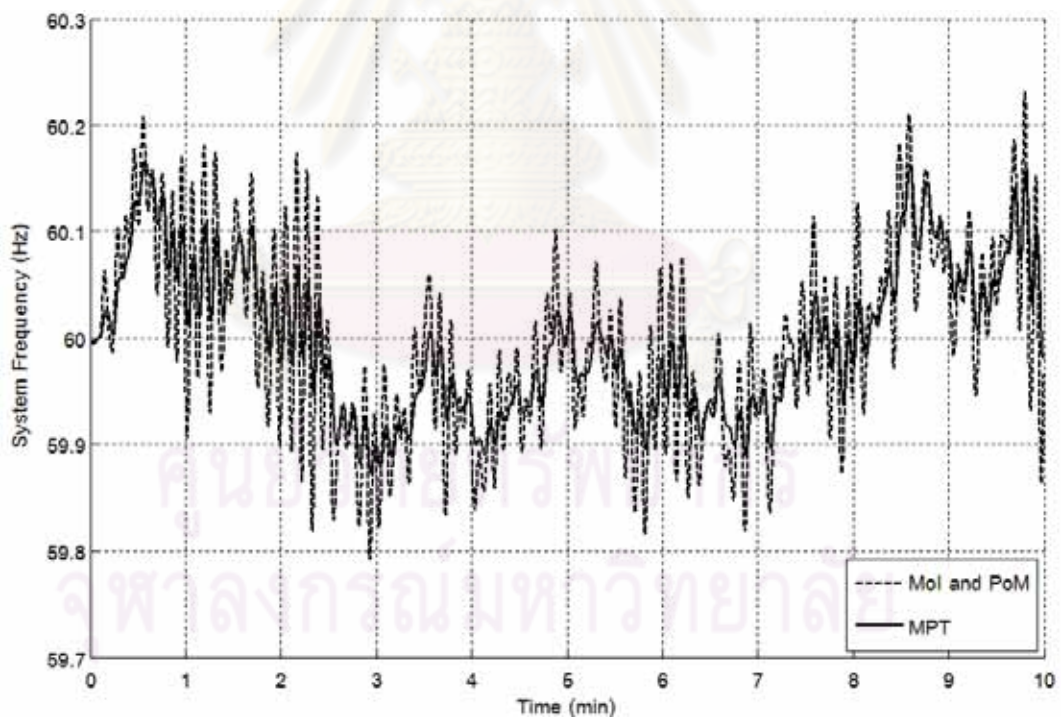
รูปที่ 5.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



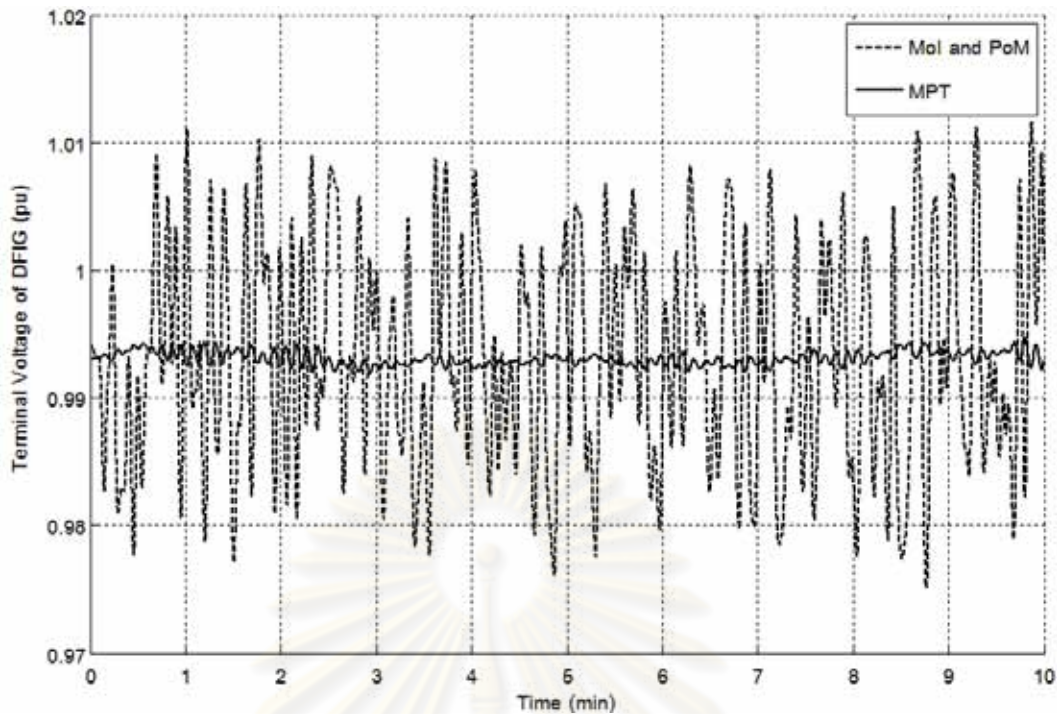
รูปที่ 5.6 กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



รูปที่ 5.7 ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



รูปที่ 5.8 ความถี่ของระบบในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



รูปที่ 5.9 ขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้ง DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

ตารางที่ 5.1 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที และความแปรปรวนของความถี่ของระบบในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

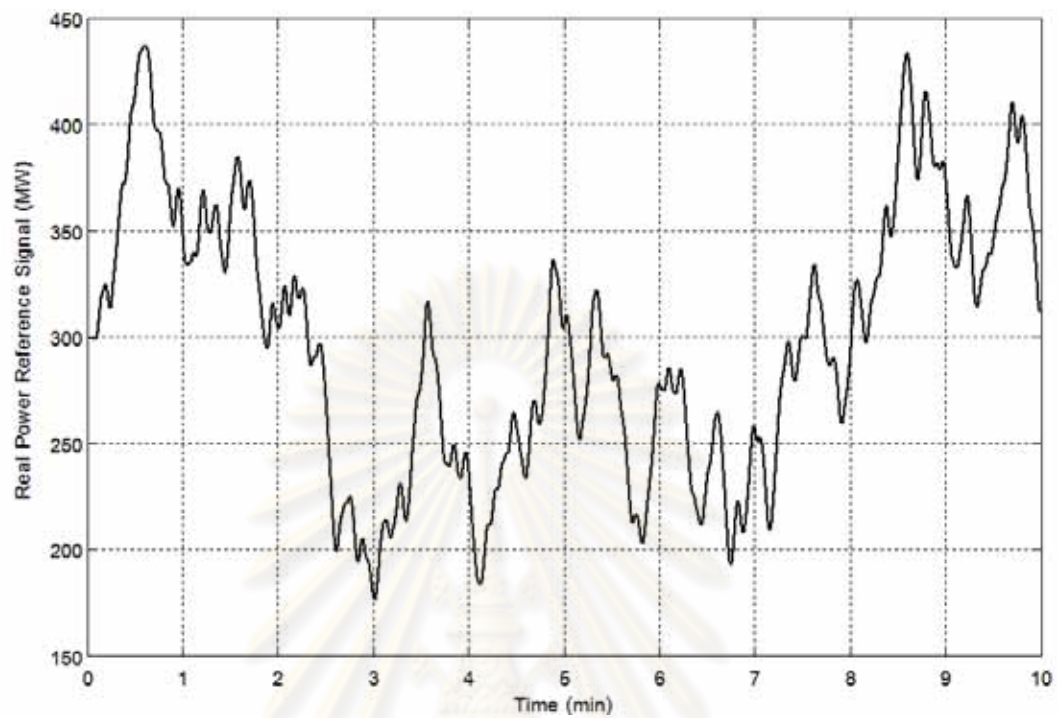
ผลการทดสอบ	ออกแบบโดย กรอบงานซาเกียน	ออกแบบให้ผลิตกำลังไฟฟ้า สูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที (kWh)	164.6	165.7
ความแปรปรวนของความถี่ ของระบบ ( $\text{Hz}^2$ )	0.007910	0.004998

#### 5.4.2 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

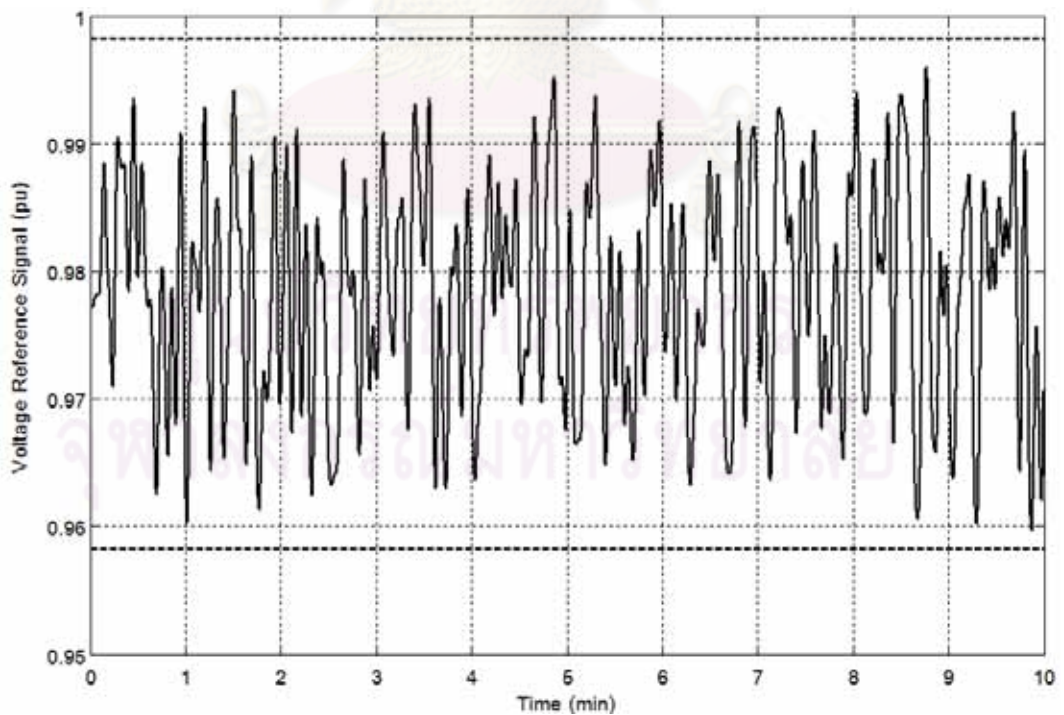
จากการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนกับระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน ได้กราฟของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG และอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ดังรูปที่ 5.10–รูปที่ 5.12 ตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนกับตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ได้ผลดังนี้ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ความถี่ของระบบ และขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้ง DFIG เป็นดัง

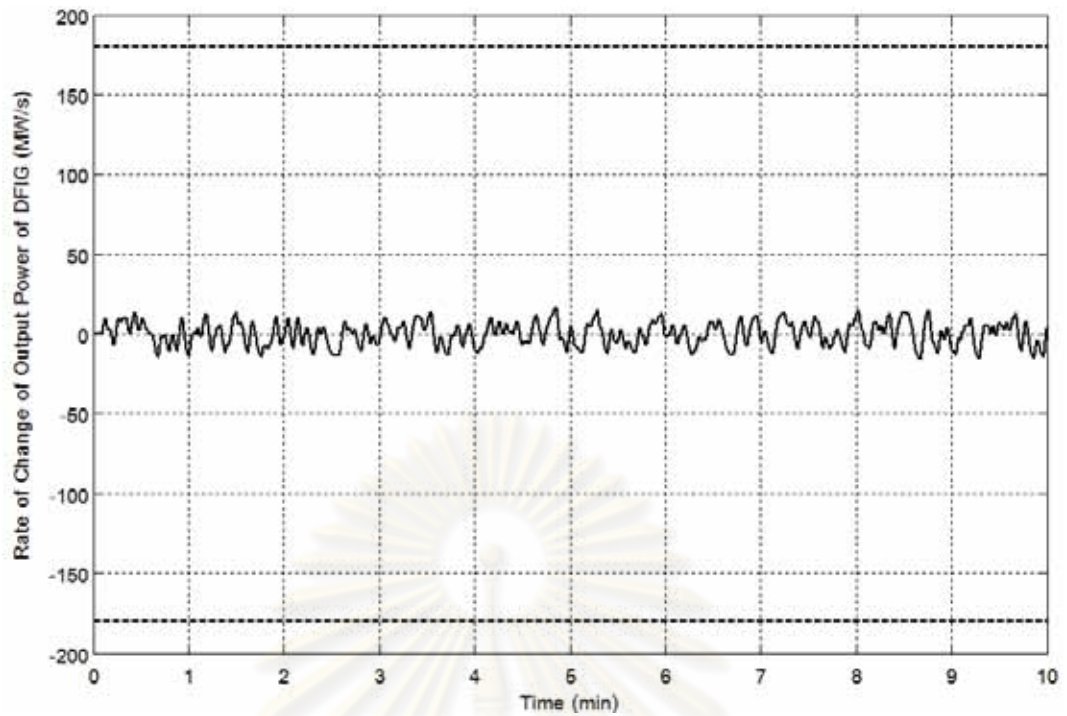
รูปที่ 5.13–รูปที่ 5.16 ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาทีและความแปรปรวนของความถี่ของระบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.2



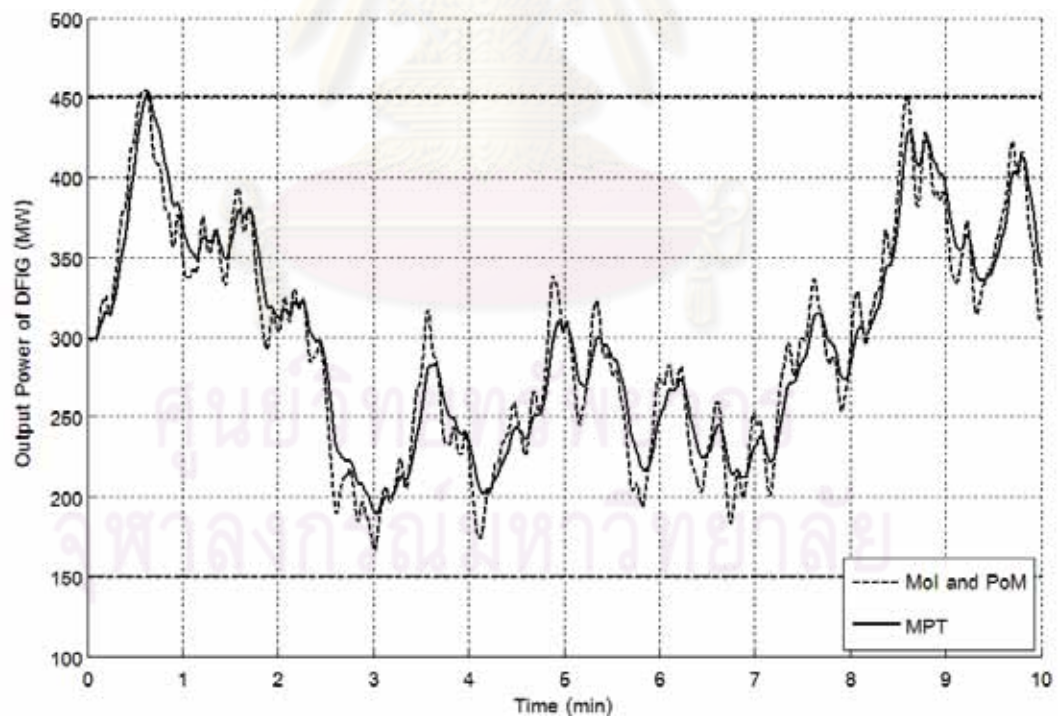
รูปที่ 5.10 ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน



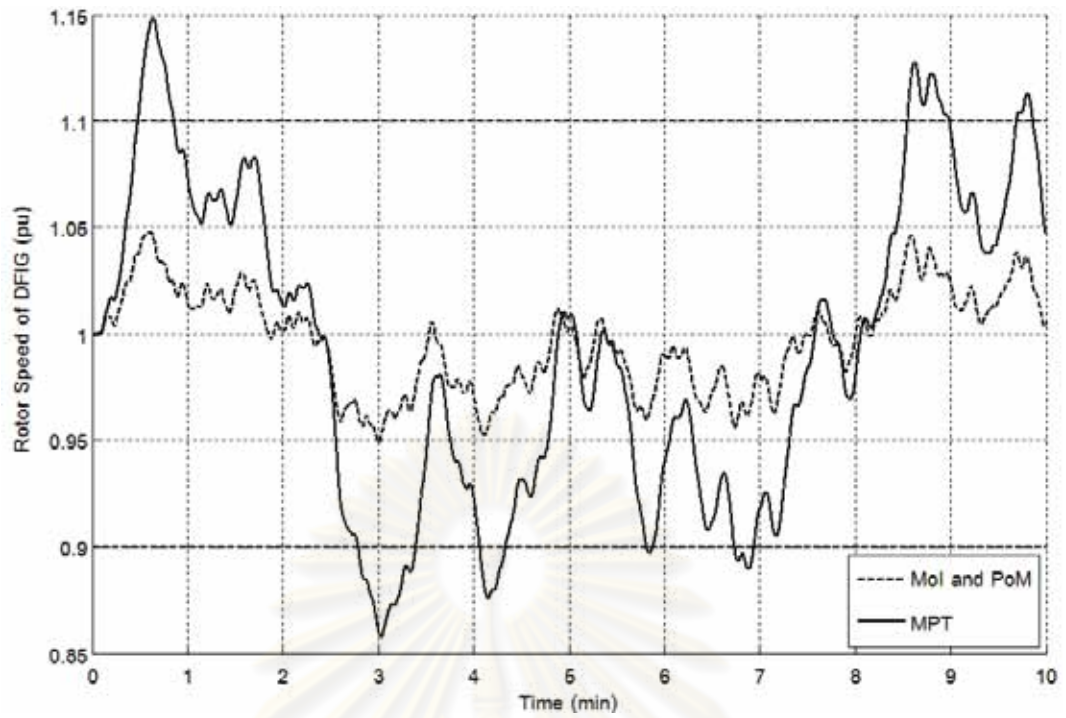
รูปที่ 5.11 ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน



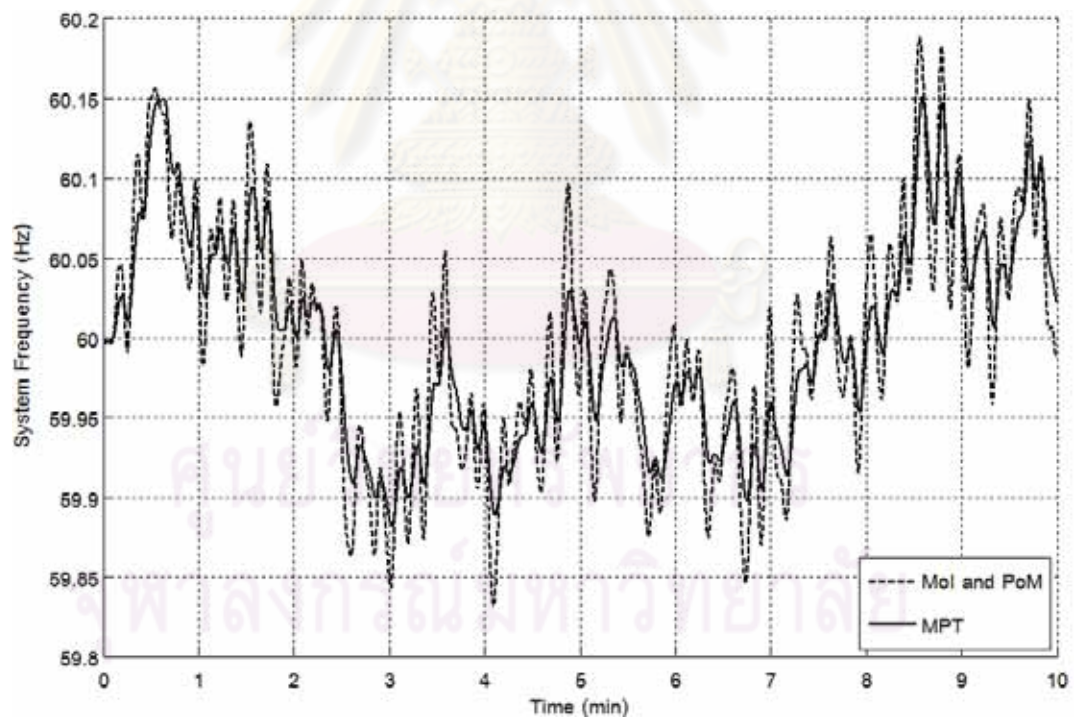
รูปที่ 5.12 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่ที่เชื่อมต่อกัน



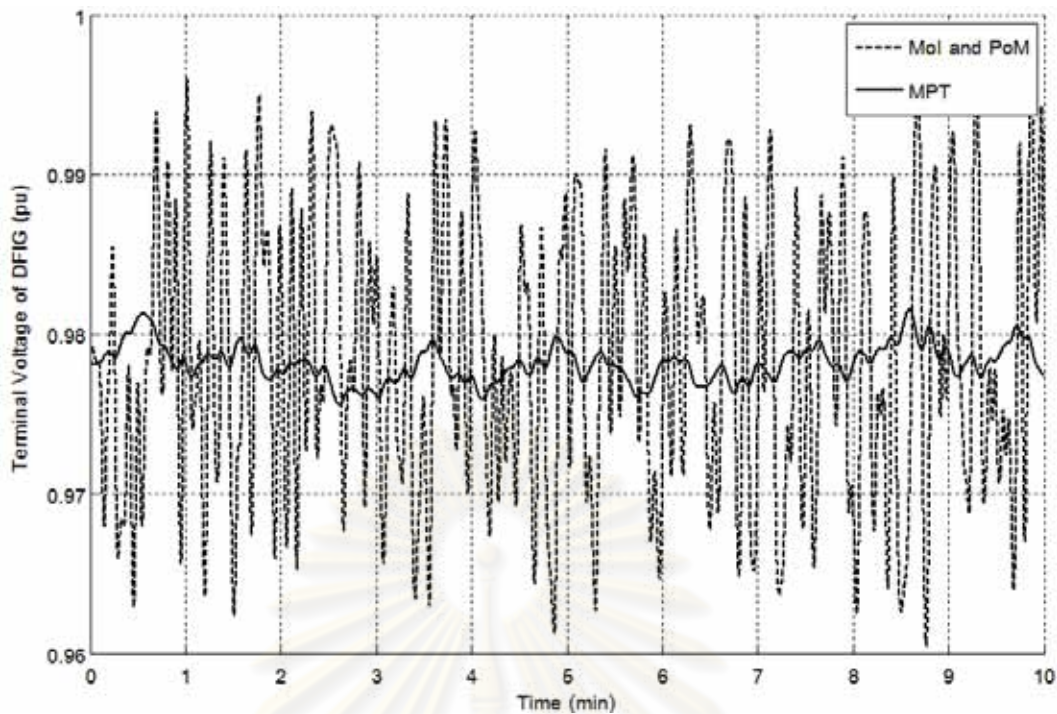
รูปที่ 5.13 กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่ที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 5.14 ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 5.15 ความถี่ของระบบในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 5.16 ขนาดแรงดันที่บัลที่ติดตั้ง DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ตารางที่ 5.2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที และความแปรปรวนของความถี่ของระบบในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ผลการทดสอบ	ออกแบบโดย กรอบงานซาเกียน	ออกแบบให้ผลิตกำลังไฟฟ้า สูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที (MWh)	49.30	49.64
ความแปรปรวนของความถี่ ของระบบ ( $\text{Hz}^2$ )	0.006051	0.004669

## 5.5 อธิบายผลการทดสอบ

จากรูปที่ 5.4 รูปที่ 5.5 รูปที่ 5.7 รูปที่ 5.11 รูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.14 จะเห็นว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้ ความเร็วโรเตอร์ และค่าอ้างอิงขนาดแรงดันมีค่าอยู่ในขอบเขตที่ต้องการดังตารางที่ 4.2 อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้ในรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.13 มีค่าเกินขอบเขตในตารางที่ 4.2 เนื่องจากความเร็วลมในช่วงเวลานั้นเปลี่ยนแปลงไปจากค่าความเร็วลมที่ใช้ในการทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นมาก จึงทำให้แบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมคลาดเคลื่อนไปจากแบบจำลองเดิมดังรูปที่ 4.1

กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้ในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนมีการแกว่งตัวมากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.13 ซึ่งแสดงว่าตัวควบคุมที่ออกแบบไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้มากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ได้ นอกจากนี้ ความถี่ของระบบในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนมีการแกว่งตัวมากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ดังรูปที่ 5.8 รูปที่ 5.15 ตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 เนื่องจาก เมื่อกำลังไฟฟ้าแกว่งมากขึ้นจะทำให้ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สควบคุมความถี่ได้น้อยลงซึ่งทำให้ความถี่ของระบบแกว่งมากขึ้นด้วย

ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้มากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ เนื่องจากตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าควบคุมให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากสเตเตอร์เรียบ ซึ่งจะทำให้ความเร็วโรเตอร์เปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากโรเตอร์จึงมีการแกว่งมาก ด้วยเหตุนี้กำลังไฟฟ้าวรวมจึงยังมีการแกว่งมาก

ขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนมีการแกว่งตัวมากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.16 เนื่องจากตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนปรับขนาดแรงดันเพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงผ่านทางตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันดังรูปที่ 4.7 จึงทำให้ความสามารถในการควบคุมขนาดแรงดันลดลง

การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันส่งผลให้ขนาดแรงดันมีการแกว่งมากดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.16 การแกว่งของขนาดแรงดันที่มากอาจทำให้ระบบเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องจำกัดการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดัน ด้วยเหตุนี้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันจึงไม่สามารถช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้เต็มที่

เนื่องจากพลังงานจากลมถูกเก็บไว้ในรูปของพลังงานจลน์ในโรเตอร์ก่อนที่จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นตัวควบคุมจึงสามารถควบคุมให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้แกว่งน้อย ในขณะที่พลังงานที่ได้จากลมแกว่งมาก โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ในโรเตอร์ ด้วยเหตุนี้ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนและกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ จึงมีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 แต่ความเร็วโรเตอร์ ในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนมีการแกว่งตัวน้อยกว่า



กรณีที่ใช้ตัวควบคุมตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.14 ทั้งนี้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ จะควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมรับพลังงานจากลมให้ได้มากที่สุดในทุกค่าความเร็วลม ในขณะที่ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนไม่ได้ควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมรับพลังงานจากลมมากที่สุด เนื่องจากใช้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงดังรูปที่ 4.6 ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนจึงมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นบทสรุปซึ่งกล่าวถึงข้อสรุปของวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะต่างๆ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้ที่ใช้เทคโนโลยี DFIG เพื่อลดผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าหลัก โดยกรอบงานซาเกียนซึ่งได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่

กรอบงานซาเกียนเป็นวิธีที่เหมาะสมกับปัญหาการออกแบบตัวควบคุมในวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีนี้พิจารณาสัญญาณเข้าที่สมจริง กล่าวคือ พิจารณาสัญญาณเข้าเป็นเซตของสัญญาณที่มีขนาดไม่เกินค่าขอบเขตของสัญญาณเข้า และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงไม่เกินค่าขอบเขตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า ลักษณะสมบัติของสัญญาณเข้าดังกล่าวสามารถครอบคลุมความเร็วลมและแรงดันที่กิริติในช่วงที่ต้องการได้ อีกทั้งการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีนี้ออกแบบตัวควบคุมให้สัญญาณออกอยู่ในค่าขอบเขตที่กำหนด การควบคุมสัญญาณออกดังกล่าวเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ซึ่งไม่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตไฟฟ้าได้คงที่แต่ต้องการเพียงจำกัดผลกระทบเชิงความถี่เท่านั้น นอกจากนี้ การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีนี้สามารถใช้กับปัญหาการออกแบบตัวควบคุมในวิทยานิพนธ์ซึ่งมีหลายวัตถุประสงค์ได้ จากผลการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีนี้กับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องและระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน ได้ผลว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบผลิตไฟฟ้าได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากการใช้แบบจำลองที่ประมาณเป็นเชิงเส้น

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรแบ่งการออกแบบตัวควบคุมเป็นหลายๆ ช่วง ตามค่าความเร็วลมและสัญญาณกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริง เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมถูกทำให้เป็นเชิงเส้นจึงมีความถูกต้องเฉพาะในช่วงที่ความเร็วลมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจุดทำงานที่ใช้ในการทำให้เป็นเชิงเส้น

2. ควรออกแบบตัวควบคุมมุมนพิชของใบพัดกังหันลมด้วย โดยให้ตัวควบคุมปรับมุมนพิชให้กังหันลมรับพลังงานจากลมในปริมาณที่เหมาะสม กล่าวคือ เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงน้อยกว่าค่าที่กำหนด ตัวควบคุมจะปรับมุมนพิชให้กังหันลมรับพลังงานจากลมมากขึ้น และในทางกลับกัน เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงมากกว่าค่าที่กำหนด ตัวควบคุมจะปรับมุมนพิชให้กังหันลมรับพลังงานจากลมน้อยลง

3. ควรเปรียบเทียบผลการออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียนกับวิธีอื่น เช่น วิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง [33] ซึ่งเป็นการออกแบบตัวควบคุมโดยอาศัยการทำนายสัญญาณเข้าและสัญญาณออกเพื่อคำนวณขนาดสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดที่จะป้อนให้กับระบบซึ่งกำหนดโดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับ การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีนี้เหมาะสมกับปัญหาการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม เนื่องจากสามารถใช้เงื่อนไขบังคับในการจำกัดผลกระทบที่มีต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าได้ ทั้งนี้ในการออกแบบอาจใช้วิธีการดังนี้

กำหนดให้สัญญาณเข้าของตัวควบคุม คือ ตัวแปรสถานะและสัญญาณเข้าของแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบ และสัญญาณออกของตัวควบคุม คือ แรงดันคร่อมขดลวดโรเตอร์ในแกน  $d$  และแกน  $q$

กำหนดวัตถุประสงค์และข้อจำกัดของการออกแบบดังนี้ วัตถุประสงค์ของการออกแบบคือ เพื่อจำกัดการเปลี่ยนแปลงและอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ข้อจำกัดของการออกแบบ คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ซึ่งถูกจำกัดโดยขนาดของคอนเวอร์เตอร์ และการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า จากวัตถุประสงค์และข้อจำกัดของการออกแบบ สามารถเขียนปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ดังนี้

$$\max \sum_{i=1}^N P_t(k+i, u)$$

subject to

$$P_{t, \min} \leq P_t(k+i, u) \leq P_{t, \max}$$

$$\Delta P_{t, \min} \leq \Delta P_t(k+i, u) \leq \Delta P_{t, \max}$$

$$\omega_{r, \min} \leq \omega_r(k+i, u) \leq \omega_{r, \max}$$

$$V_{s, \min} \leq V_s(k+i, u) \leq V_{s, \max}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

โดยที่  $P_t$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG  $\omega_r$  คือ ความเร็วโรเตอร์  $V_s$  คือ ขนาดแรงดันที่สเตเตอร์  $N$  คือ ช่วงการทำนาย  $k$  คือ เวลาที่คำนวณค่าสัญญาณควบคุมและ  $u$  คือ เวกเตอร์ของสัญญาณควบคุมซึ่งประกอบด้วย  $u(k), u(k+1), u(k+2), \dots, u(k+M)$  โดย  $M$  คือ ช่วงการควบคุม

## รายการอ้างอิง

- [1] Ackermann, T. Wind power in power system. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Bhadra, S. N., Kastha, D., and Banerjee, S. Wind electrical systems. New Delhi: Oxford University Press, 2005.
- [3] Tapia, A., Tapia, G., Ostolaza, J. X., and Saenz, J. R. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator. IEEE Transactions on Energy Conversion 18 (June 2003): 194–204.
- [4] Chowdhury, B. H., and Chellapilla, S. Double-fed induction generator control for variable speed wind power generation. Electric Power Systems Research 76 (June 2006): 786–800.
- [5] MathWorks, Inc. MATLAB & Simulink[Online]. 2011. Available from: <http://www.mathworks.com>[2011, April 1]
- [6] Zakian, V., and Al-Naib, U. Design of dynamical and control systems by the method of inequalities. Proceedings of Institution of Electrical Engineers 120 (1973): 1421–1427.
- [7] Zakian, V. New formulation for the method of inequalities. Proceedings of Institution of Electrical Engineers 126 (1979): 579–584.
- [8] Zakian, V. Perspectives on the principle of matching and the method of inequalities. International Journal of Control 65 (1996): 147–175.
- [9] Zakian, V., ed. Control systems design: A new framework. London: Springer-Verlag, 2005.
- [10] Zakian, V. Well matched systems. IMA Journal of Mathematical Control and Information 8 (1991): 29–38.
- [11] Masters, G. M. Renewable and efficient electric power systems. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [12] Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L. Wind energy explained: Theory, design, and application. 2<sup>nd</sup> ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.

- [13] Lubosny, Z. Wind turbine operation in electric power systems. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [14] Kundur, P. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [15] Krause, P. C., Wasynczuk, O., and Sudhoff, S. D. Analysis of electric machinery and drive systems. 2<sup>nd</sup> ed. New York: IEEE Press, 2002.
- [16] Ong, C. Dynamic simulation of electric machinery using MATLAB/Simulink. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [17] Lane, P. G. The principle of matching: a necessary and sufficient condition for inputs restricted in magnitude and rate of change. International Journal of Control 62 (1995): 893–915.
- [18] Nanayakkara, N., Nakamura, M., and Hatazaki, H. Predictive control of wind turbines in small power systems at high turbulent wind speeds. Control Engineering Practice 5 (1997): 1063–1069.
- [19] Ran, L., Bumby, J. R., and Tavner, P. J. Use of turbine inertia for power smoothing of wind turbines with a DFIG. 2004 11<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, 106–111. 2004.
- [20] Muhando, E. B., Senjyu, T., Urasaki, N., Urasaki, N., and Funabashi, T. Robust predictive control of variable-speed wind turbine generator by self-tuning regulator. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 1–8. 2007.
- [21] Kusiak, A., Song, Z., and Zheng, H. Anticipatory control of wind turbines with data-driven predictive models. IEEE Transactions on Energy Conversion 24 (September 2009): 766–774.
- [22] Tia, K., Arunsawatwong, S., and Eua-arporn, B. Design of compensators for power systems operating under load voltage fluctuation satisfying bounding conditions. 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 2009, 252–255. 2009.
- [23] Khaisongkram, W., Banjerdpongchai, D., and Arunsawatwong, S. Controller design for a binary distillation column under disturbances with bounds on magnitudes and derivatives using Zakian's framework. 2004 5<sup>th</sup> Asian Control Conference, 1676–1684. 2004.

- [24] Wijaya, S., Arunsawatwong, S., and Wongsaisuwan, M. PI-controller design for an industrial boiler using the method of inequalities. International Conference on Instrumentation, Control & Automation 2009, 190–195. 2009.
- [25] Henriksen, L. C. Model predictive control of a wind turbine. Master's Thesis, Department of Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2007.
- [26] Akhmatov, V. Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power. Doctoral dissertation, Department of Electric Power Engineering, Technical University of Denmark, 2003.
- [27] Welfonder, E., Neifer, R., and Spaimer, M. Development and experimental identification of dynamic models for wind turbines. Control Engineering Practice 5 (1997): 63–73.
- [28] Electricity Generating Authority of Thailand. Wind Turbines[Online]. 2011. Available from: <http://www.egat.co.th>[2011, April 1]
- [29] Heier, S. Grid integration of wind energy conversion systems. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.
- [30] Mohan, N., Undeland, T. M., and Robbins, W. P. Power electronics: Converters, applications, and design. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [31] Liu, Q., Yu F., and Zhang J. Novel modeling and control of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator. The 33<sup>rd</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1621–1626. 2007.
- [32] Taylor, C. W. Power system voltage stability. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [33] Maciejowski, J. M. Predictive control with constraints. London: Prentice Hall, 2002.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอข้อมูล DFIG และตัวควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

#### ก.1 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่

ค่าพารามิเตอร์ของ DFIG แสดงไว้ในตารางที่ ก.1 โดย DFIG มีค่าพิกัด 2 MW และ 20 kV ทำงานที่ความถี่ 60 Hz และคอนเวอร์เตอร์มีค่าพิกัด 1 MW

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของ DFIG

ค่าพารามิเตอร์	DFIG
$R_s$	0.00706 pu
$L_s$	3.071 pu
$R_r$	0.005 pu
$L_r$	3.056 pu
$L_m$	2.9 pu
$H$	5.04 s
$C_{DC}$	10 mF
$R_g$	0.0015 pu
$L_g$	0.15 pu

#### ก.2 ข้อมูลตัวควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองที่กริดแสดงไว้ในตารางที่ ก.2-ตารางที่ ก.7 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ



ตารางที่ ก.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม

ค่าพารามิเตอร์	ตัวควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม
$K_\beta$	500 pu
$\beta_{max}$	45 deg
$\omega_{r,max}$	1.5 pu

ตารางที่ ก.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

ค่าพารามิเตอร์	ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์
$K_{p,P_s}$	1 pu
$K_{i,P_s}$	100 pu

ตารางที่ ก.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ค่าพารามิเตอร์	ตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$K_{p,V_s}$	1.25 pu
$K_{i,V_s}$	300 pu
$X_s$	0.02 pu

ตารางที่ ก.5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์

ค่าพารามิเตอร์	ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์
$K_{p,I_r}$	0.3 pu
$K_{i,I_r}$	8 pu

ตารางที่ ก.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์

ค่าพารามิเตอร์	ตัวควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์
$K_{p,V_{DC}}$	10 pu
$K_{i,V_{DC}}$	100 pu

ตารางที่ ก.7 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรรองที่กริด

ค่าพารามิเตอร์	ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรรองที่กริด
$K_{p,I_g}$	1 pu
$K_{i,I_g}$	100 pu



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลแบบจำลองของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอข้อมูลแบบจำลองของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

#### ข.1 ข้อมูลแบบจำลองของระบบไฟฟ้า

แรงดันเทวินินของแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในแกน d มีค่า 1 pu และแรงดันเทวินินของแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในแกน q มีค่า 0 pu อิมพีแดนซ์เทวินินของแบบจำลองของระบบไฟฟ้ามีค่าความต้านทาน 0 pu และค่ารีแอกแตนซ์ 0.4 pu โดยค่าฐานคือ 10 MVA และ 230 kV

#### ข.2 ข้อมูลแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

จุดทำงานเริ่มต้นของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมแสดงไว้ในตารางที่ ข.1 และค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมในแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมแสดงไว้ในตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.1 จุดทำงานเริ่มต้นของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

จุดทำงาน	ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม
$v_{wind,0}$	6 m/s
$P_{s,0}$	0.5 pu
$Q_{s,0}$	0 pu
$\omega_{r,0}$	1 pu
$V_{DC,0}$	1200 V

ตารางที่ ข.2 ค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมในแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ค่าสัญญาณอ้างอิง	ตัวควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม
$P_{s,sch}$	0.5 pu
$P_{t,sch}$	0.5 pu
$V_{s,sch}$	1 pu
$V_{DC,ref}$	1200 V
$I_{qg,ref}$	0 pu

## ภาคผนวก ค

### ข้อมูลระบบทดสอบ

ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอข้อมูลระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องและระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

#### ค.1 ข้อมูลระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

ข้อมูลระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง ได้แก่ ข้อมูลบัส สายส่ง หม้อแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ทั้งนี้ระบบทดสอบนี้ทำงานที่ความถี่ 60 Hz

##### ค.1.1 ข้อมูลบัส

ข้อมูลบัสที่จุดทำงานเริ่มต้นของการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลบัสในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

บัส	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิตรีแอกทีฟ (MVar)	โหลดจริง (MW)	โหลดรีแอกทีฟ (MVar)	ตัวเก็บประจุชานาน (MVar)	ขนาดแรงดัน (pu)	มุมของแรงดัน (องศา)
1	9.00	2.47	0	0	0	1.030	0
2	1.00	0	0	0	0	0.993	-14.72
3	0	0	10.00	0	0	0.993	-15.30
4	0	0	0	0	0	1.019	-2.46

##### ค.1.2 ข้อมูลสายส่ง

สายส่งจากบัส 3 ไปบัส 4 มีค่ารีแอกแตนซ์ 0.25 pu โดยค่าฐานคือ 10 MVA และ 230 kV

##### ค.1.3 ข้อมูลหม้อแปลง

หม้อแปลงทุกตัวมีค่ารีแอกแตนซ์ 0.05 pu โดยค่าพิกัดคือ 10 MVA และ 20/230 kV

#### ค.1.4 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงไว้ในตารางที่ ค.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วแสดงไว้ในตารางที่ ค.3 และค่าพารามิเตอร์ของระบบกระตุ้นแสดงไว้ในตารางที่ ค.4 และตารางที่ ค.5 ทั้งนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าพิกัด 10 MVA และ 20 kV

ตารางที่ ค.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1
$X_d$	1.81 pu
$X_q$	1.76 pu
$X'_d$	0.3 pu
$X'_q$	0.65 pu
$X_l$	0.15 pu
$R_s$	0.003 pu
$T'_{d0}$	8 s
$T'_{q0}$	1 s
$H$	3.5 s
$D$	0 pu

ตารางที่ ค.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1
$R$	0.05 pu
$T_g$	0.2 s
$T_{ch}$	3 s

ตารางที่ ค.4 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบกระตุ้นในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1
$K_a$	200 pu
$T_r$	0.015 s
$E_{fd,max}$	7 pu
$E_{fd,min}$	-6.4 pu

ตารางที่ ค.5 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบกระตุ้นในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1
$K_s$	7.5 pu
$T_w$	1.41 s
$T_1$	0.154 s
$T_2$	0.033 s
$V_{s,max}$	0.2 pu
$V_{s,min}$	-0.2 pu

#### ค.1.5 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมประกอบด้วยกังหันลมและ DFIG จำนวน 1 ชุด โดยมีค่าพิกัด 2 MW และ 20 KV ค่าพารามิเตอร์ของ DFIG และตัวควบคุมแสดงไว้ในภาคผนวก ก จุดทำงานเริ่มต้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมแสดงไว้ในตารางที่ ค.6 และค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมแสดงไว้ในตารางที่ ค.7

ตารางที่ ค.6 จุดทำงานเริ่มต้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

จุดทำงาน	ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม
$v_{wind,0}$	6 m/s
$\omega_{r,0}$	1 pu
$V_{DC,0}$	1200 V

ตารางที่ ค.7 ค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

ค่าสัญญาณอ้างอิง	ตัวควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม
$P_{s,sch}$	0.5 pu
$P_{t,sch}$	0.5 pu
$V_{s,sch}$	0.993 pu
$V_{DC,ref}$	1200 V
$I_{qg,ref}$	0 pu

## ค.2 ข้อมูลระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ข้อมูลระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน ได้แก่ ข้อมูลบัส สายส่ง หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ทั้งนี้ระบบทดสอบนี้ทำงานที่ความถี่ 60 Hz

### ค.2.1 ข้อมูลบัส

ข้อมูลบัสที่จุดทำงานเริ่มต้นของการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ ค.8

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลบัสในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

บัส	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิตรีแอกทีฟ (MVar)	โหลด		ตัวเก็บประจุ ขนาน (MVar)	ขนาด แรงดัน (pu)	มุมของ แรงดัน (องศา)
			จริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)			
1	700.00	182.46	0	0	0	1.030	20.16
2	700.00	228.45	0	0	0	1.010	10.40
3	718.52	164.28	0	0	0	1.030	-6.80
4	700.00	174.21	0	0	0	1.010	-16.95
5	300.00	0	0	0	0	0.980	-28.99
6	0	0	967.00	100.00	200	0.963	-4.77
7	0	0	2067.00	100.00	400	0.980	-31.98
8	0	0	0	0	0	1.007	13.70
9	0	0	0	0	0	0.979	3.62
10	0	0	0	0	0	1.010	-13.41
11	0	0	0	0	0	0.988	-23.66
12	0	0	0	0	0	0.954	-18.56

### ค.2.2 ข้อมูลสายส่ง

สายส่งทุกวงจรมีค่าความต้านทานต่อความยาวของสายส่ง 0.0001 pu/km ค่ารีแอกแตนซ์ต่อความยาวของสายส่ง 0.001 pu/km และค่าการประจุสายส่ง (Line Charging) ต่อความยาวของสายส่ง 0.00175 pu/km โดยค่าฐานคือ 100 MVA และ 230 kV ทั้งนี้ค่าความยาวของสายส่งแสดงไว้ในตารางที่ ค.9

ตารางที่ ค.9 ความยาวของสายส่งในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

สายส่ง	จากบัส	ไปบัส	ความยาว (km)
1	6	9	10
2	6	12	110
3	6	12	110
4	7	11	10
5	7	12	110
6	7	12	110
7	8	9	25
8	10	11	25

### ค.2.3 ข้อมูลหม้อแปลง

หม้อแปลงทุกตัวมีค่ารีแอกแตนซ์ 0.15 pu โดยค่าพิกัดคือ 900 MVA และ 20/230 kV

### ค.2.4 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงไว้ในตารางที่ ค.10 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วแสดงไว้ในตารางที่ ค.11 และค่าพารามิเตอร์ของระบบกระตุ้นแสดงไว้ในตารางที่ ค.12 และตารางที่ ค.13 ทั้งนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องมีค่าพิกัด 900 MVA และ 20 kV



ตารางที่ ค.10 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 4
$X_d$	1.8 pu	1.8 pu	1.8 pu	1.8 pu
$X_q$	1.7 pu	1.7 pu	1.7 pu	1.7 pu
$X'_d$	0.3 pu	0.3 pu	0.3 pu	0.3 pu
$X'_q$	0.55 pu	0.55 pu	0.55 pu	0.55 pu
$X_l$	0.2 pu	0.2 pu	0.2 pu	0.2 pu
$R_s$	0.0025 pu	0.0025 pu	0.0025 pu	0.0025 pu
$T'_{d0}$	8 s	8 s	8 s	8 s
$T'_{q0}$	0.4 s	0.4 s	0.4 s	0.4 s
$H$	6.5 s	6.5 s	6.175 s	6.175 s
$D$	0 pu	0 pu	0 pu	0 pu

ตารางที่ ค.11 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 4
$R$	0.05 pu	0.05 pu	0.05 pu	0.05 pu
$T_g$	0.2 s	0.2 s	0.2 s	0.2 s
$T_{ch}$	3 s	3 s	3 s	3 s

ตารางที่ ค.12 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบกระตุ้นในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 4
$K_a$	200 pu	200 pu	200 pu	200 pu
$T_r$	0.01 s	0.01 s	0.01 s	0.01 s
$E_{fd,max}$	7 pu	7 pu	7 pu	7 pu
$E_{fd,min}$	-6.4 pu	-6.4 pu	-6.4 pu	-6.4 pu

ตารางที่ ค.13 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบกระตุ้นในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 4
$K_s$	20 pu	20 pu	20 pu	20 pu
$T_w$	10 s	10 s	10 s	10 s
$T_1$	0.05 s	0.05 s	0.05 s	0.05 s
$T_2$	0.02 s	0.02 s	0.02 s	0.02 s
$V_{s,max}$	0.2 pu	0.2 pu	0.2 pu	0.2 pu
$V_{s,min}$	-0.2 pu	-0.2 pu	-0.2 pu	-0.2 pu

### ค.2.5 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมประกอบด้วยกังหันลมและ DFIG จำนวน 300 ชุด โดยแต่ละชุดมีค่าพิกัด 2 MW และ 20 kV ค่าพารามิเตอร์ของ DFIG และตัวควบคุมแสดงไว้ในภาคผนวก ก จุดทำงานเริ่มต้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมแสดงไว้ในตารางที่ ค.14 และค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมแสดงไว้ในตารางที่ ค.15

ตารางที่ ค.14 จุดทำงานเริ่มต้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

จุดทำงาน	ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม
$v_{wind,0}$	6 m/s
$\omega_{r,0}$	1 pu
$V_{DC,0}$	1200 V

ตารางที่ ค.15 ค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ค่าสัญญาณอ้างอิง	ตัวควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม
$P_{s,sch}$	0.5 pu
$P_{t,sch}$	0.5 pu
$V_{s,sch}$	0.978 pu
$V_{DC,ref}$	1200 V
$I_{qg,ref}$	0 pu

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิสิษฐ์พล จีรพวงศานานุรักษ์ เกิดวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2529 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย