ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246944

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนี่ยวนำแบบป้อนคู่โดยตรงจากชายฝั่ง

นายพิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b 00251778

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246944

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่โดยกรอบงานซาเกียน

นายพิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5270681421

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

Mr. Pisitpol Chirapongsananurak

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	การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่โดยกรอบงานซาเกียน
โดย	นายพิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

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

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

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภดนัย อาชวาคม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพันธุ์ เตชะกิตติโรจน์)

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

246944

ในปัจจุบัน การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นทั่วโลก เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามพลังงานที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่โดยธรรมชาติแล้วแปรผันตามเวลาไม่แน่นอน ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจึงอาจส่งผลกระทบต่อปัญหาเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ได้

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบตัวควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่โดยกรอบงานซาเกียน เพื่อลดผลกระทบเชิงความถี่ที่มีต่อระบบไฟฟ้าหลัก โดยการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม การออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียนซึ่งได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่เป็นหลักการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบเข้าคู่กับสิ่งแวดล้อมที่ระบบทำงานอยู่ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขที่จะยอมรับผลตอบสนองในรูปอสมการ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องและระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกันภายใต้การรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม ผลการทดสอบปรากฏว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีอสมการและหลักการเข้าคู่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ตามข้อกำหนดของการออกแบบ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

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.

246944

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 .....

Academic Year : 2010 Co-Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ รองศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภดนัย อาชวาคม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพันธุ์ เตชะกิตติโรจน์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์ทุนโครงการศิษย์ก้นกุฏิเป็นทุนการศึกษาในการเรียนระดับปริญญามหาบัณฑิต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฏ
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 แบบจำลองของวงจรกรองที่กริด 22

หน้า

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 การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ 27
3.5.3 การควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 27
3.5.4 การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ 28
3.6 การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด 28
3.6.1 การควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ 30
3.6.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่กริด 30
3.6.3 การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรกรองที่กริด 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 เซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้ 37
4.3.2 เซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ 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 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 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 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรกรองที่กริด 61
ตารางที่ ข.1 จุดทำงานเริ่มต้นของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม 62
ตารางที่ ข.2 ค่าสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมในแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม 62
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลบัสในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง 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 ข้อมูลบัสในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน 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 5
รูปที่ 2.2 กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหน้าเข้าหาลม 6
รูปที่ 2.3 กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหลังเข้าหาลม 6
รูปที่ 2.4 กังหันลมแกนตั้ง 7
รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของ DFIG ในสถานะคงตัว 8
รูปที่ 2.6 แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG ที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส 9
รูปที่ 2.7 แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG ที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส 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 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ 27
รูปที่ 3.12 กราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟและค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน 27
รูปที่ 3.13 แผนภาพการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 28
รูปที่ 3.14 แผนภาพการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ 28
รูปที่ 3.15 แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด 29
รูปที่ 3.16 แผนภาพการควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ 30
รูปที่ 3.17 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่กริด 30
รูปที่ 3.18 แผนภาพการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรกรองที่กริด 31
รูปที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 33

หน้า

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