

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่าน
ความผิดพร้อมและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิด
ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทาง

APPLICATION OF SUPERCONDUCTING COIL TO ENHANCE FAULT RIDE
THROUGH CAPABILITY AND ALLEVIATE POWER FLUCTUATION OF
DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR WIND TURBINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-020-200

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่าน
ความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิด
ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทาง

APPLICATION OF SUPERCONDUCTING COIL TO ENHANCE FAULT RIDE
THROUGH CAPABILITY AND ALLEVIATE POWER FLUCTUATION OF
DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR WIND TURBINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF SUPERCONDUCTING COIL TO ENHANCE FAULT RIDE
THROUGH CAPABILITY AND ALLEVIATE POWER FLUCTUATION OF
DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR WIND TURBINE



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

KMITL-2014-EN-M-020-200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติพ่วงอง และลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ชนิดป้อนสองทาง

Thesis Title Application of Superconducting Coil to Enhance Fault Ride Through Capability and Alleviate Power Fluctuation of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine

นักศึกษา นายธนพนธ์ การรัมย์


รหัสประจำตัว 55610753

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-020-200

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

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2557 เวลา 16.30-18.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-401

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ณ วันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2557
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทาง
นักศึกษา	นายธนพนธ์ การัยภูมิ
รหัสประจำตัว	55610753
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อิศระชัย งามหรุ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ขดลวดตัวนำยิ่งยวดนอกจากจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) แล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสฟอลต์ (Fault Current Limiter: FCL) ในการศึกษาได้ทำการหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสม พลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) เริ่มจากการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในกังหันลมชนิด DFIG เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า จำกัดกระแสไฟฟ้าเกินทั้งด้านโรเตอร์และสเตเตอร์และลดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ดีซีลิงค์ของกังหันลม DFIG ต่อมาได้ทำการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันการจำกัดกระแส (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่มีกังหันลมชนิด DFIG ต่ออยู่ สุดท้ายได้ออกแบบอุปกรณ์ SMES-FCL เพื่อใช้ปรับปรุงความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกังหันลม DFIG ในระบบดีซีไมโครกริด ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงประสิทธิภาพของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Application of Superconducting Coil to Enhance Fault Ride Through Capability and Alleviate Power Fluctuation of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine
Student	Mr. Tanapon Karaipoom
Student ID.	55610753
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

ABSTRACT

This thesis proposes the application of superconducting coil (SC) to enhance fault ride through capability and alleviate power fluctuation of the grid-connected doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine. The superconducting coil acts as a superconducting magnetic energy storage (SMES) at normal operation and also as a fault current limiter (FCL) during faults. The simultaneous optimization of the inductance of SC, the initial necessary stored energy in SC and the PI controller parameters are carried out by particle swarm optimization. To demonstrate the performance of proposed method, three applications of SC are conducted as follows. First, the SC which is integrated into the DFIG wind turbine, is applied to smoothen the power fluctuation, suppress the overcurrents in the rotor and the stator and reduce the overvoltage in the dc link of the DFIG. Next, the superconducting magnetic energy storage with fault current limiting function (SMES-FCL) is optimally designed for stability improvement of the grid-connect DFIG wind turbine. Finally, the new configuration of SMES-FCL is designed to improve fault ride through capability and alleviate power fluctuation of the DFIG wind turbine in the DC microgrid. Simulation results confirm the significant control effect of the SC.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ ที่ให้คำแนะนำและแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการศึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการศึกษา

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

ขอขอบคุณกองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยในระดับปริญญาโทให้แก่ข้าพเจ้าในการทำวิทยานิพนธ์นี้

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง พร้อมทั้งเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและมารดา ซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ธนพนธ์ การัยภูมิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลม DFIG เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ.....	4
1.1.2 อุปกรณ์ SMES-FCL ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่อร่วมอยู่.....	5
1.1.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบดีซีไมโครกริดด้วยอุปกรณ์ SMES-FCL ที่เหมาะสม.....	5
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	6
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	7
1.5 ขอบเขตการวิจัย	7
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	8
บทที่ 2 หลักการควบคุมกังหันลม DFIG	9
2.1 กังหันลม DFIG	9
2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller).....	16
2.3 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค.....	17
บทที่ 3 การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลม DFIG เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ.....	21
3.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา.....	21
3.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในกรณีศึกษา.....	23
3.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด.....	29
3.4 ผลการจำลองและทดสอบ.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.5 สรุปผลการทดสอบ.....	54
บทที่ 4 อุปกรณ์ SMES-FCL ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มี กังหันลม DFIG ต่อร่วมอยู่.....	55
4.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ศึกษา.....	56
4.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES, FCL และ SMES-FCL.....	57
4.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด.....	60
4.4 ผลการจำลองและทดสอบ.....	64
4.5 สรุปผลการทดสอบ.....	70
บทที่ 5 การปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของ กำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบดีซีไมโครกริดด้วยอุปกรณ์ SMES-FCL ที่เหมาะสม.....	71
5.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด.....	72
5.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL.....	73
5.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด.....	78
5.4 ผลการจำลองและทดสอบ.....	82
5.5 สรุปผลการทดสอบ.....	88
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	89
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ.....	22
3.2 พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่.....	22
3.3 พารามิเตอร์ของ STATCOM	22
3.4 พารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี PSO	34
3.5 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของ Battery และ STATCOM	35
3.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของ IAE ของ ΔP	49
3.7 การเปรียบเทียบค่าสูงสุดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์.....	53
4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ.....	57
4.2 พารามิเตอร์ของ FCL SMES และ SMES-FCL.....	65
4.3 ขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES และ SMES-FCL.....	69
5.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ.....	72
5.2 การทำงานของสวิตช์ของดีซีช้อปเปอร์ใน SMES-FCL.....	76
5.3 พารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL.....	84
5.4 ขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES และ SMES-FCL.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของกังหันลม DFIG.....	9
2.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	10
2.3 การควบคุมกังหันลม DFIG ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์.....	14
2.4 วงจรสมมูลของคัปปลิ่งโซค.....	14
2.5 การควบคุมกังหันลม DFIG ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด.....	15
2.6 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์.....	17
2.7 ขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงอนุภาค.....	19
3.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในกังหันลม.....	21
3.2 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งแบตเตอรี่หรือตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	21
3.3 วงจรไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด.....	23
3.4 โครงสร้างของแบตเตอรี่.....	26
3.5 โครงสร้างของ STATCOM.....	27
3.6 โครงสร้างตัวควบคุมขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสภาวะปกติ.....	29
3.7 โครงสร้างตัวควบคุมขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสภาวะเกิดความผิดปกติ.....	29
3.8 โครงสร้างของตัวตรวจจับสภาวะเกิดความผิดปกติ.....	30
3.9 โครงสร้างตัวควบคุมของแบตเตอรี่.....	30
3.10 โครงสร้างตัวควบคุมของ STATCOM.....	31
3.11 ความเร็วลม.....	33
3.12 การหาค่าคำตอบของแต่ละเทอมของสมการวัดอุปสงค์.....	34
3.13 การหาค่าคำตอบของ E_{sc0} I_{sc0} และ L_{sc}	34
3.14 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	36
3.15 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์.....	37
3.16 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ที่มีอิทธิพลต่อกำลังไฟฟ้า.....	38
3.17 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	39
3.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	39
3.19 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า.....	39
3.20 ความเร็วโรเตอร์.....	40
3.21 ผลต่างระหว่างกำลังทางกล P_m กับกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG}	41
3.22 กำลังไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด.....	41
3.23 กำลังไฟฟ้า.....	41
3.24 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์.....	42
3.25 พลังงานไฟฟ้าสะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด.....	42
3.26 กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์.....	44
3.27 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด.....	45
3.28 อธิบายสภาวะการทำงานของดีซีทูดี้คอนเวอร์เตอร์.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์.....	47
3.30 กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A.....	48
3.31 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายและรับให้กับระบบของแบตเตอรี่กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด.....	48
3.32 IAE ของกำลังไฟฟ้า ΔP_{Bus1}	49
3.33 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	50
3.34 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์.....	50
3.35 กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์.....	51
3.36 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด.....	52
3.37 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์.....	53
4.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้ง SMES-FCL.....	56
4.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES.....	57
4.3 วงจรไฟฟ้าของ FCL.....	58
4.4 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL.....	59
4.5 โครงสร้างตัวควบคุมของ SMES และ SMES-FCL.....	60
4.6 ความเร็วลม.....	64
4.7 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ D_k , IAE , E_{SCO} และ L_{SC}	65
4.8 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	66
4.9 IAE ของผลต่างกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	67
4.10 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	68
4.11 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	68
4.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	68
4.13 ความเร็วโรเตอร์.....	69
4.14 พลังงานจลน์ในโรเตอร์.....	69
5.1 ระบบดีซีไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา.....	72
5.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES.....	73
5.3 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL.....	73
5.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะปกติ.....	74
5.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะเกิดความผิดปกติ.....	75
5.6 หลักการทำงานของ SMES-FCL.....	76
5.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES.....	78
5.8 โครงสร้างของตัวควบคุม FCL.....	79
5.9 ความเร็วลม.....	83
5.10 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของสมการวัตถุประสงค์.....	83
5.11 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ $1/V_C$, IAE , ΔP_{Bus4} , L_{SC} และ E_{SCO}	83
5.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	85
5.14 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	85
5.15 การเปรียบเทียบการลดลงของแรงดันไฟฟ้า.....	86
5.16 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	86
5.17 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	86
5.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	87
5.19 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	87
5.20 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG1.....	87
5.21 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG2.....	88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ตลอดเวลาที่ผ่านมา พลังงานไฟฟ้าที่แปรรูปมาจากพลังงานทดแทน (Alternative Energy) ได้รับความนิยมนำมาใช้ในระบบการผลิตกำลังไฟฟ้าและมีอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี [1] ว่าจะจะเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ และพลังงานแหล่งอื่น ๆ พลังงานเหล่านี้จะเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่เกิดขึ้นอยู่อย่างต่อเนื่องไม่หมดไปและสามารถนำมาผลิตกำลังไฟฟ้าได้อย่างไม่มีวันหมด แต่กระนั้นแล้ว ความต้องการพลังงานไฟฟ้ายังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี

วิทยานิพนธ์นี้จะให้ความสนใจกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการแปรรูปพลังงานลม เนื่องจากระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาการติดตั้งฟาร์มกังหันลมทั้งบนบก (Onshore) และนอกชายฝั่งทะเล (Offshore) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายและมีอัตราการเพิ่มการผลิตประมาณ 318 GW ในปลายปี 2013 และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ปี [2] โดยเฉพาะกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งเป็นกังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตกำลังไฟฟ้า และได้รับความนิยมนำมาใช้อย่างต่อเนื่องอันเนื่องมาจากประโยชน์หลายด้าน เช่น การติดตั้งการลงทุนที่ต่ำ ความสามารถในการควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แยกอิสระต่อกัน [3] ซึ่งการติดตั้งกังหันลม DFIG ในระบบกำลังไฟฟ้าจะส่งผลดีในแง่ของการเพิ่มกำลังการผลิตให้ระบบไฟฟ้าเพื่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม การติดตั้งกังหันลม DFIG อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย เนื่องมาจากกังหันลมจะได้รับพลังงานลมที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้กังหันลม DFIG ผลิตกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power Fluctuation) ให้กับระบบ [4, 5] เมื่อการติดตั้งกังหันลมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอาจส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักบางส่วนอาจปิดตัวลงเพื่อลดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงต่อการผลิตกำลังไฟฟ้า ทำให้ความถี่ของระบบจากการรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักในระบบลดน้อยลง ส่งผลให้เมื่อเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบจะนำไปสู่การเสถียรภาพได้ง่าย [6, 7] นอกจากนี้กังหันลม DFIG ยังมีจุดบกพร่องในโครงสร้างของตัวกังหันลมเองเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบเนื่องจากกังหันลม DFIG ขดลวดทางด้านสเตเตอร์จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยตรง และขดลวดทางด้านโรเตอร์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter) และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด (Grid Side Converter) [8] ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์จะอ่อนไหวต่อการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบเมื่อเกิดกระแสฟลัดอย่างฉับพลัน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิน (Overcurrent) ทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ และยังเกิดแรงดันไฟฟ้าเกิน (Overvoltage) ในส่วนของดีซีลิงก์ (DC Link) ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัว [9, 10] ด้วยเหตุนี้ คอนเวอร์เตอร์จะเกิดความเสียหายทำให้คอนเวอร์เตอร์ไม่สามารถควบคุมกังหันลม DFIG ได้อีกต่อไปและนำไปสู่การปลดตัวเองออกจากระบบไฟฟ้า ทำให้ระบบกำลังไฟฟ้าจะสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งที่ได้จากกังหันลมและเป็นการนำไปสู่การเสถียรภาพในระบบกำลังไฟฟ้าได้ [6, 11] แต่อย่างไรก็ตาม การที่กังหันลมจะปลดตัวเองออกจากระบบจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานหรือกฎเกณฑ์ที่ใช้ร่วมกันระหว่างผู้ผลิตเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าและองค์การที่ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าและมักเรียกมาตรฐานนี้ว่ามาตรฐาน Grid Code ซึ่งจะกล่าวถึงเมื่อเกิดสถานะความผิดปกติในระบบจะเกิดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลมมีค่าลดลงเป็นเท่าไรจากค่าแรงดันไฟฟ้าปกติ และระยะเวลาที่เกิดความผิดปกติจนถึงระยะเวลาฟื้นตัวของกังหันลมนานเท่าไร โดยทั้งนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าหน้าบัสของกังหันลมเป็นเกณฑ์ตัดสินว่ากังหันลมจะต้องปลดตัวออกจากระบบหรือไม่ [12] ดังนั้น กังหันลมจะต้องทนต่อสถานะเกิดความผิดปกติหรือข้ามผ่านความผิดปกติ (Fault Ride Through) ในระบบเพื่อให้ผ่านมาตรฐาน Grid Code และยังสามารถกลับมาทำงานในสภาวะปกติได้ดังเดิม

เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวในระบบได้มีการนำเสนอขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) มาออกแบบเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ซึ่ง SMES จะทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าทั้งรับและจ่ายให้กับระบบได้ โดย SMES ใน [13] จะใช้ปรับปรุงเสถียรภาพให้กับกังหันลม โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Logic Controller) ควบคุมการทำงานของ SMES และเปรียบเทียบกับกังหันลมที่ติดตั้งตัวควบคุมแบบฟัซซี่เพื่อควบคุมใบพัดกังหันลม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ควบคุม SMES ให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่ากังหันลมที่ติดตั้งตัวควบคุมแบบฟัซซี่ ยกเว้นเสียแต่ว่า ตัวควบคุมแบบฟัซซี่นั้นมีความยุ่งยากในการออกแบบ และขนาดของ SMES ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าเหมาะสมสำหรับการทำเสถียรภาพ และใน [14] จะใช้ SMES เพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติให้กับกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) ภายใต้การทดสอบสภาวะความผิดปกติ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อความผิดปกติเกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงที่ SMES ติดตั้งอยู่ SMES เองจะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพให้กับกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ดังนั้น ทั้งกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะไม่สามารถข้ามผ่านความผิดปกติได้ และใน [15] เป็นการชดเชยทั้งแบบขนานและอนุกรมโดยใช้ SMES ซึ่งติดตั้งหน้ากังหันลม โดย SMES จะประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในลักษณะแบบขนานและอนุกรมที่จะช่วยเพิ่มความหน่วงของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและช่วยชดเชยการเกิดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลมเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ ส่วนใน [16] จะใช้ตัวจำกัดกระแสฟอลต์ (Fault Current Limiter: FCL) ที่เป็นตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Fault Current Limiter: SFCL) ประเภทตัวต้านทาน ในการยับยั้งกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นให้ลดน้อยลงด้วยการเพิ่มความต้านทานขึ้นภายในตัวเองเพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถข้ามผ่านความผิดปกติให้กับกังหันลม DFIG แต่ถึงกระนั้น การเพิ่มความต้านทานจะเป็นการสร้างการสูญเสียทางกำลังไฟฟ้า (Power Loss) เมื่อยังจำกัดกระแสฟอลต์ได้มากเท่าไรก็จะเกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นเท่านั้น ดังนั้น ควรจะต้องพิจารณาถึงค่าความต้านทานที่เหมาะสมด้วย เมื่อขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถนำมาเป็นทั้ง SMES และ FCL จึงมีการนำเสนอการร่วมกันของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ใน [17-20] โดยใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันในการทำเสถียรภาพทั้งการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการยับยั้งกระแสฟอลต์ที่เกิดจากความผิดปกติ โดย SMES จะติดตั้งขนานกับบัสแบบทั่ว ๆ ไป และทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แต่เมื่อมีการทำงานร่วมกันกับ FCL แล้วตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะต่อกับสายส่งอีกด้วยโดยผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบอย่างอัตโนมัติผ่านวงจรเรียงกระแส ซึ่งเปรียบเสมือนการแทรกอินพีแดนซ์เข้าไปในระบบด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อจำกัดกระแสฟอลต์ นอกจากนี้ ยังมีการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในกังหันลม DFIG ระหว่างคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดใน [21] ด้วยสมรรถนะการสะสมพลังงานไฟฟ้าและการตอบสนองที่รวดเร็วของขดลวดตัวนำยิ่งยวด ทำให้การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงทั้งทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์เป็นไปได้อย่างอิสระต่อกัน ส่งผลให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ได้จากภายใน ยิ่งไปกว่านั้น ใน [22] ยังนำเสนอการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในกังหันลม DFIG ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดด้วยโครงสร้างแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage Source Topology) และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current Source Topology) ในสภาวะปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แต่เมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อไปยังทางด้านโรเตอร์หรือสเตเตอร์เพื่อใช้จำกัดกระแสเกินที่เกิดทางด้านโรเตอร์หรือสเตเตอร์ ซึ่งผลลัพธ์ยังแสดงว่าการเชื่อมต่อขดลวดตัวนำยิ่งยวดในลักษณะอนุกรมกับทางด้านสเตเตอร์จะทำได้ดีกว่าการเชื่อมอนุกรมกับทางด้านโรเตอร์ แต่อย่างไรก็ตาม ใน [21, 22] ก็ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่ใช้่นั้นมีความเหมาะสม

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในลักษณะการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยจะมุ่งเน้นเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ทั้งในระบบไฟฟ้ากระแสสลับและระบบไฟฟ้าดีซีไมโครกริด โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำการออกแบบเนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานได้ง่ายและไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มสมรรถนะให้กับการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้จะทำการออกแบบขนาดค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) [23] ไปพร้อม ๆ กันภายใต้วัตถุประสงค์ที่กำหนดและเป็นไปอย่างอัตโนมัติ

โดยในการศึกษาจะนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน 3 ระบบ คือ 1) นำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ติดตั้งภายในกังหันลม DFIG เพื่อแก้ปัญหการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ 2) นำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแส (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) โดยการทำงานร่วมกันของ SMES และ FCL อย่างเกิดประโยชน์สูงสุดด้วยการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันเพื่อใช้ปรับปรุงเสถียรภาพของกังหันลม DFIG ในระบบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3) จากการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ออกแบบ SMES-FCL ในระบบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแล้วในการศึกษานี้จะออกแบบ SMES-FCL ในระบบดีซีไมโครกริดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG และรายละเอียดของที่มา และความสำคัญของปัญหาสำหรับในแต่ละระบบที่นำมาประยุกต์ใช้ได้แบ่งแยกการอธิบายดังต่อไปนี้

1.1.1 การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลม DFIG เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ

ในปัจจุบัน กำลังการผลิตจากกังหันลมมียอดกำลังผลิตเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี และในปลายปี 2012 มียอดการผลิตกำลังการผลิตของกังหันลมประมาณ 280 GW [24] แสดงให้เห็นว่ากังหันลมมีการติดตั้งเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล ซึ่งจากปัญหาของกังหันลมทั้งการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่งเข้าสู่ระบบและปัญหาแรงดันต่ำหน้าบัสของกังหันลมนั้นจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการเพิ่มความสามารถของการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG ใน [25, 26] มีการติดตั้งตัวต้านทาน Crowbar ทางด้านโรเตอร์ของกังหันลม DFIG เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าเกินในขดลวดโรเตอร์ตัวต้านทาน Crowbar จะทำหน้าที่ลัดวงจรไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์เพื่อแยกวงจรไฟฟ้าออกจากระบบ ส่งผลให้กังหันลม DFIG จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Generator) และจะรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อเกิดความผิดปกติจากระบบแทน และใน [27-29] มีการนำเสนอตัวเก็บประจุที่มีความจุสูง (Supercapacitor) อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสถิตย์ (Static Var Compensator) และอุปกรณ์ชดเชยซิงโครนัสแบบสถิตย์ (Static Synchronous Compensator: STATCOM) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบทำให้สามารถแก้ปัญหาการลดลงของแรงดันไฟฟ้าหน้าบัสของกังหันลม DFIG ได้ และนอกจากนี้ใน [30] ได้ติดตั้งอุปกรณ์ฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorer) ด้วยการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแบบอนุกรมเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าในสายส่งระหว่างเกิดความผิดปกติ ซึ่งเป็นการปรับปรุงความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติให้กับกังหันลม DFIG และใน [14] SMES ได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แต่เมื่อเกิดความผิดปกติในบริเวณที่ใกล้ SMES จะไม่สามารถช่วยทำเสถียรภาพได้ และ RSFCL ใน [16] จะจำกัดกระแสฟลัดเพื่อปรับปรุงความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG แต่อย่างไรก็ตาม การจำกัดกระแสฟลัดนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในรูปแบบของตัวต้านทานซึ่งควรพิจารณาในส่วนนี้ และใน [17-20] จะเป็นการใช้ SMES-FCL โดยในสภาวะปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเป็นตัวสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะแทรกเข้าไปในระบบเพื่อจำกัดกระแสฟลัดผ่านทางวงจรรีเลย์กระแส และใน [15] SMES จะทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าและชดเชยแรงดันไฟฟ้าด้วยการต่ออินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมและแบบขนาน ดังนั้น จะสามารถเพิ่มความหน่วงให้กับระบบเมื่อเกิดความผิดปกติและช่วงลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าได้ เมื่อนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในกังหันลม DFIG ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดใน [21] จะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากภายในกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมากกว่านั้นการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในกังหันลมใน [22] ยังใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการจำกัดกระแสฟลัดทั้งทางด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์ได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามทั้ง [21, 22] ยังไม่สามารถยืนยันถึงความเหมาะสมของขนาดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมที่ติดตั้งภายในกังหันลม DFIG สำหรับการปรับปรุงความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ในสภาวะการทำงานปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวสะสมพลังงานเพื่อใช้ลดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบอย่างฉับพลันขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่ยับยั้งกระแสไฟฟ้าเกินในสเตเตอร์และโรเตอร์ และยังยับยั้งแรงดันไฟฟ้าเกินในดีซีลิงค์อีกด้วย และในวิทยานิพนธ์นี้ยังค้นหาขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสมโดยใช้วิธีฝูงอนุภาคไปพร้อม ๆ กัน โดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [31] จะแสดงให้เห็นว่าขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมที่ติดตั้งภายในกังหันลม DFIG จะให้ประสิทธิผลที่เหนือกว่าทั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ไม่เหมาะสม แบบเตอร์รี และ STATCOM

1.1.2 อุปกรณ์ SMES-FCL ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่อร่วมอยู่

จากปัญหาของกังหันลม DFIG ทั้งการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่งและแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงที่หน้าบัสของกังหันลมเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบนั้น

ในงานวิจัยที่ผ่านมาใน [17-20] ได้นำเสนอโครงสร้างของวงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL ด้วยการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันเพื่อใช้ในการจำกัดกระแสฟลัดและลดการเกิดแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage Sag) ในระบบกำลังไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) ต่ออยู่ เว้นเสียแต่ที่ SMES-FCL ยังไม่มีการประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาของเสถียรภาพชั่วคราว ความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ และการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG นอกจากนี้ โครงสร้างของวงจรไฟฟ้าและการควบคุมใน [17-20] มีข้อจำกัดในประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าวของกังหันลม DFIG และในอีกด้านหนึ่ง การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของ SMES-FCL อย่างเหมาะสมนั้นยังไม่ได้คำนึงถึง

วิทยานิพนธ์นี้แนะนำเสนอเทคนิคการทำให้เหมาะสมของ SMES-FCL เพื่อใช้ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่ออยู่ โดยจะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของวงจรไฟฟ้า วงจรการควบคุม เทคนิคการทำให้เหมาะสมที่สุด และผลการจำลองจะแสดงให้เห็นว่า SMES-FCL นั้นให้ผลการทำเสถียรภาพที่เหนือกว่า SMES และ FCL

1.1.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบดีซีไมโครกริดด้วยอุปกรณ์ SMES-FCL ที่เหมาะสม

ในช่วงเวลาที่ผ่านมา กังหันลมแบบเปลี่ยนแปลงความเร็ว (Variable Speed Wind Turbine) ชนิด DFIG ได้รับความนิยมอย่างมากในระบบดีซีไมโครกริด [32] อย่างไรก็ตาม กังหันลม DFIG ต้องเผชิญกับปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือการเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่งในสภาวะการทำงานปกติและการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำ (Low Voltage Ride Through) ในสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ [22] ซึ่งปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาที่ร้ายแรงต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอใน [15, 22] และ [17-20] โดยการใช้งานร่วมกันของ SMES และ FCL เพื่อใช้แก้ปัญหาดังกล่าวในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใน [22] ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะติดตั้งภายในกังหันลม DFIG เพื่อใช้ยับยั้งกระแสเกินและแรงดันไฟฟ้าเกินในช่วงที่เกิดความผิดปกติในระบบ และใน [15] SMES จะมีส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ทั้งการชดเชยแบบอนุกรมและขนาน เพื่อใช้ลดการแกว่งทั้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของกังหันลม แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ SMES ใน [15, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22] ไม่สามารถแสดงผลของการลดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลม DFIG ในระหว่างเกิดความผิดปกติได้ ดังนั้น จะไม่สามารถยืนยันได้ว่ากังหันลม DFIG จะสามารถข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านได้ ส่วนใน [17-20] แสดงถึงการใช้งานร่วมกันของ SMES และ FCL เพื่อใช้ยับยั้งกระแสฟลัดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบที่ไม่ได้ติดตั้งแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ซึ่งในงานวิจัยที่กล่าวมาไม่มีงานวิจัยใดที่จะประยุกต์ใช้งานร่วมกันของ SMES และ FCL เพื่อแก้ปัญหาทั้งการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบดีซีไมโครกริดอยู่เลย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอโครงสร้างทางวงจรไฟฟ้าใหม่และเทคนิคการทำให้เหมาะสมที่สุดของ SMES-FCL เพื่อการปรับปรุงความสามารถการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบดีซีไมโครกริด โดยผลของการควบคุม SMES-FCL จะประเมินด้วยแบบจำลองทางเวลา (Time Simulation) และจะเปรียบเทียบกับ SMES แบบดั้งเดิม

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการทำเสถียรภาพให้เกิดประโยชน์สูงสุด
2. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม
3. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่ออยู่
4. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่เหมาะสมพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสในระบบดีซีไมโครกริดสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
5. เพื่อนำเสนอการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามการแก้ปัญหาอย่างเหมาะสม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยมีสมมติฐานของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษากังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางจะเชื่อมต่อกับบัสอนันต์เพื่อจำลองว่าต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะจำลองโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำและไม่คิดผลข้างเคียงของขดลวดตัวนำยิ่งยวด เนื่องจากจะสมมติให้พร้อมสามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าและจำกัดกระแสฟลัดต์ได้ตลอดเวลา

3. คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการศึกษาจะไม่คำนึงถึงการสูญเสียกำลังทางไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบในระบบกำลังไฟฟ้าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าเพียงเล็กน้อย

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาระบบการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางมีแนวคิดและหลักการจากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาดังต่อไปนี้

1. การใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาใช้แก้ปัญหาการข้ามผ่านความผิดพลาดและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทาง

จากปัญหาของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางใน [13-15] ได้มีการนำอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดมาใช้แก้ปัญหาทั้งการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม และใน [16] ใช้ตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดจำกัดกระแสฟลัดต์ประเภทตัวต้านทานมาแก้ปัญหาการข้ามผ่านความผิดพลาดของกังหันลม และยังมีการนำข้อดีทั้งสองอุปกรณ์ใน [17-20] เพื่อใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยการใช้ขดลวดร่วมกันในการแก้ปัญหาของกังหันลม จึงเป็นแนวคิดที่มาของการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาออกแบบเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สามารถทั้งทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและยังสามารถใช้จำกัดกระแสฟลัดต์ได้อีกด้วย และยังต้องการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสม

2. การนำอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสมาแก้ปัญหาของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางที่ต่อรวมอยู่ในระบบดีซีไมโครกริด

จากการแก้ปัญหาของกังหันลมที่ผ่านมาใน [17-20] ยังไม่มีงานวิจัยใดที่นำอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสมาใช้ในการทำเสถียรภาพในระบบดีซีไมโครกริด จึงเป็นแนวความคิดที่จะออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่เหมาะสมพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสขึ้นใหม่ในระบบดีซีไมโครกริด

จากแนวคิดที่กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้ได้นำมาทดสอบกับการทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยได้แยกพิจารณาหลายระบบ ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 บทที่ 4 และบทที่ 5

1.5 ขอบเขตการวิจัย

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางตามที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ เพื่อทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [31] รายละเอียดอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์พีไออย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสเพื่อใช้ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่อรวมอยู่ และยังออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดพลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์พีไออย่างเหมาะสม

3. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสในระบบดีซีไมโครกริดสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง และออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์พีไออย่างเหมาะสม

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอน และรายละเอียดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงที่มา แบบจำลองวงจรทางไฟฟ้าและหลักการควบคุมของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ตัวควบคุมพีไอ และการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีผู้จูนภาค

บทที่ 3 กล่าวถึงการประยุกต์การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมที่ติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดนำมาออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่ออยู่

บทที่ 5 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดนำมาออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์รุ่นใหม่ในระบบดีซีไมโครกริดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

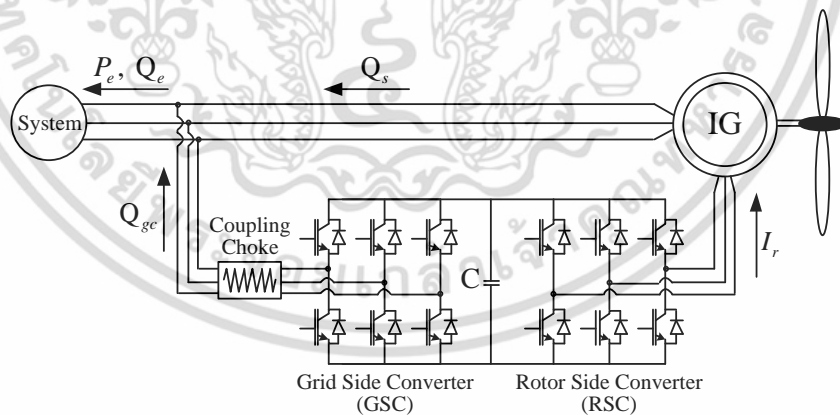
บทที่ 2

หลักการควบคุมกังหันลม DFIG

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและการควบคุมกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) และหลักการตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) และในท้ายบทนี้จะอธิบายถึงเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมพีไอให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization)

2.1 กังหันลม DFIG

ในปัจจุบัน การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานลมจะได้รับความนิยมอย่างสูงมากขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยมียอดรวมกำลังการผลิตจากพลังงานลมทั่วโลกประมาณ 318 GW ในปลายปี 2013 และคาดว่าจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ปี [2] โดยเฉพาะกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) เป็นกังหันลมชนิดหนึ่งที่ได้รับนิยมนิยมเพิ่มขึ้นอย่างสูง เนื่องจากประโยชน์อันหลากหลายของกังหันลม DFIG เช่น การติดตั้งและการลงทุนต่ำ สามารถปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ง่าย พิกัดของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดเล็ก และสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แยกอิสระต่อกัน เป็นต้น [3] ซึ่งกังหันลมชนิดนี้จะเป็นกังหันลมชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ (Variable Speed Wind Turbine) ได้ จึงทำให้สามารถสร้างประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างสูงเมื่อเทียบกับกังหันลมที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ (Fixed Speed Wind Turbine) ได้ [8] ทำให้ผู้ผลิตไฟฟ้าหันมาติดตั้งกังหันลมชนิดนี้กันอย่างแพร่หลายในระบบผลิตกำลังไฟฟ้า

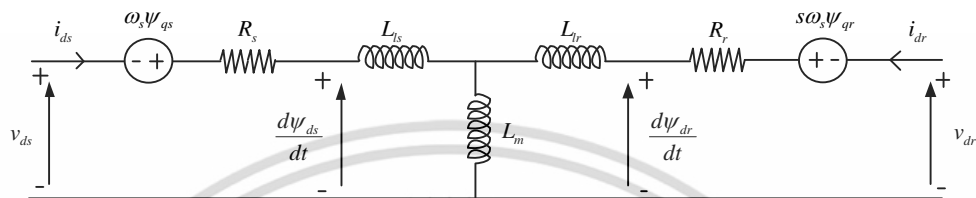


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกังหันลม DFIG

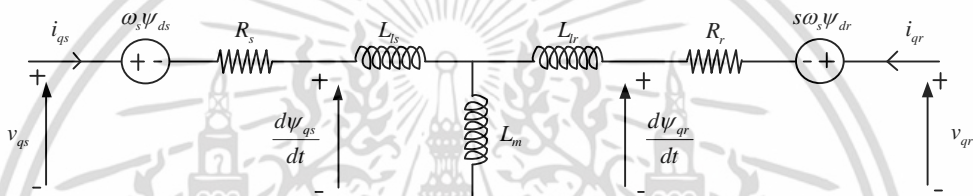
โดยรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของกังหันลม DFIG ที่ต่อร่วมกับระบบ (System) เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด โดยโครงสร้างหลักของกังหันลมชนิดนี้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Generator: IG) คอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter) คอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด (Grid Side Converter) ตัวเก็บประจุ C และอิมพีแดนซ์ของคัปปลิงโชค (Coupling Choke) โดยขดลวดทางสเตเตอร์จะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรงด้วยแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าเดียวกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับระบบ และขดลวดโรเตอร์จะเชื่อมต่อกับระบบโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมการรับพลังงานจากลมแล้วแปรรูปเป็นกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุด กังหันลมชนิดนี้จึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกได้สูงสุดแม้ว่าความเร็วลมจะไม่คงที่ก็ตาม [8]

การควบคุมของกังหันลม DFIG จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ โดยทั้ง 2 ส่วนการควบคุมจะใช้สมการพื้นฐานการควบคุมที่แตกต่างกัน โดยส่วนของการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์จะอธิบายได้ดังนี้



(ก) โครงสร้างตามแนวแกน d



(ข) โครงสร้างตามแนวแกน q

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบีสองทาง

วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และสามารถแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า (v) กระแสไฟฟ้า (i) ฟลักซ์ (ψ) และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (T_e) [8] ได้ดังนี้

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (2.1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (2.2)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s\omega_s \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \quad (2.3)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + s\omega_s \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (2.4)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.6)$$

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.7)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.8)$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (2.9)$$

และค่า L_s , L_r และ $s\omega_s$ สามารถหาค่าได้จาก

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.10)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (2.11)$$

$$s\omega_s = \omega_s - \omega_r = \omega_{sr} \quad (2.12)$$

โดยที่

v_{ds} และ v_{qs} คือแรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ตามแนวแกน d และ q (V)

v_{dr} และ v_{qr} คือแรงดันไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ตามแนวแกน d และ q (V)

i_{ds} และ i_{qs} คือกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ตามแนวแกน d และ q (A)

i_{dr} และ i_{qr} คือกระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ตามแนวแกน d และ q (A)

ψ_{ds} และ ψ_{qs} คือฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ตามแนวแกน d และ q (Wb)

ψ_{dr} และ ψ_{qr} คือฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ตามแนวแกน d และ q (Wb)

s คือสลลิป

n_p คือจำนวนคู่ขั้ว

T_e คือแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (N-m)

L_m คือค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กในเต้ซึ่ง (H)

L_s คือค่าความเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ (H)

L_r คือค่าความเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ (H)

L_{ls} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์ (H)

L_{lr} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านโรเตอร์ (H)

ω_s คือความเร็วเชิงโคโรนัส (rpm)

ω_r คือความเร็วโรเตอร์ (rpm)

ω_{sr} คือค่าผลต่างระหว่างความเร็วเชิงโคโรนัสกับความเร็วโรเตอร์ (slip speed) (rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากขดลวดทางด้านสเตเตอร์เชื่อมต่อกับระบบโดยตรง ส่งผลให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์ (v_s) และความถี่ระบบจะมีค่าเดียวกันกับระบบ ทำให้สมการที่ (2.1) และ (2.2) สามารถตัดส่วนของเทอมอนุพันธ์ของฟลักซ์ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\psi_{ds} = (v_{qs} - R_s i_{qs}) / \omega_s \quad (2.13)$$

$$\psi_{qs} = (v_{ds} - R_s i_{ds}) / (-\omega_s) \quad (2.14)$$

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{ds}^2 + \psi_{qs}^2} \quad (2.15)$$

และตามการควบคุมแบบ Field Oriented Control (FOC) จะกำหนดให้ v_s มีค่าเท่ากับ v_{ds} และ v_{qs} มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น ψ_s จะเท่ากับ ψ_{qs} และ ψ_{ds} จะมีค่าเป็นศูนย์ [8] ดังนั้น ตามสมการที่ (2.5) เมื่อ ψ_{ds} มีค่าเท่ากับศูนย์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$i_{ds} = -\frac{L_m}{L_s} i_{dr} \quad (2.16)$$

เช่นเดียวกับสมการที่ (2.9) เมื่อ ψ_{ds} มีค่าเท่ากับศูนย์ และแทนด้วยสมการที่ (2.16) สามารถเขียนสมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าใหม่ได้ดังนี้

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \left(-\frac{L_m}{L_s} i_{dr} \psi_s \right) \quad (2.17)$$

และกำหนดให้กระแสไฟฟ้า i_{dr} จากสมการที่ (2.17) เป็นกระแสไฟฟ้าอ้างอิง i_{dr_ref} ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์จะสามารถเขียนสมการที่ (2.17) โดยจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$i_{dr_ref} = -\frac{2L_s T_e}{3n_p L_m \psi_s} \quad (2.18)$$

โดยแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (T_e) สามารถถูกกำหนดได้จากเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ ซึ่งมีอินพุตเป็นค่าผลต่างระหว่างความเร็วโรเตอร์จริง (ω_r) กับความเร็วโรเตอร์อ้างอิง (ω_{ref}) และความเร็วโรเตอร์อ้างอิง ω_{ref} จะถูกกำหนดมาจากกำลังไฟฟ้า P_e ตามรูปที่ 2.1 และเมื่อกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน Q_{gc} มีค่าเป็นศูนย์แล้วจะสามารถเขียนผลรวมกำลังไฟฟ้าเสมือนของกันหังลม DFIG ตามรูปที่ 2.1 ได้ดังนี้

$$Q_e = Q_s + Q_{gc} = Q_s \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กำหนดให้ ψ_s เท่ากับ ψ_{qs} และ v_{qs} มีค่าเป็นศูนย์แล้วจะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน Q_s ได้ตามสมการดังนี้

$$Q_s = \text{Im}[(v_{ds} + jv_{qs})(i_{ds} + ji_{qs})^*] = -v_{ds}i_{qs} \quad (2.20)$$

และจากสมการที่ (2.6) แทนลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$Q_s = -\frac{v_{ds}}{L_s}(\psi_s - L_m i_{qr}) \quad (2.21)$$

ตามสมการที่ (2.21) สามารถอธิบายได้ว่าการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน Q_s ทางด้านสเตเตอร์สามารถควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้า i_{qr} ซึ่งจะถูกกำหนดใหม่ให้เป็นกระแสอ้างอิง i_{qr_ref} และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ v_{dr_ref} และ v_{qr_ref} จะกำหนดมาจากการควบคุมของกระแสอ้างอิง i_{qr_ref} และ i_{dr_ref} และเมื่อนำสมการที่ (2.7) และ (2.8) แทนค่าลงในสมการที่ (2.3) และ (2.4) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_{sr} (L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) \quad (2.22)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_{sr} (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) \quad (2.23)$$

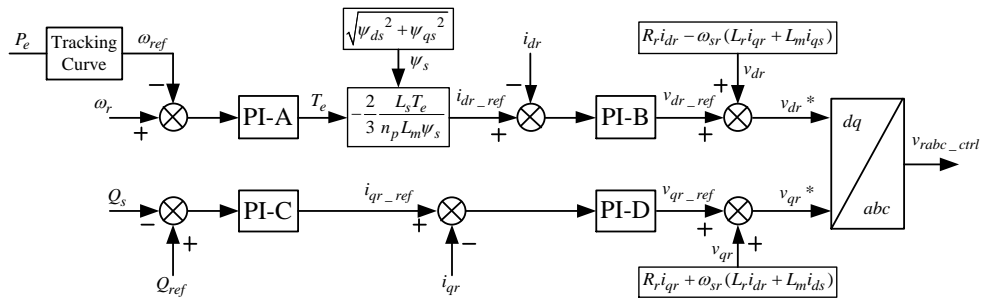
และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ v_{dr_ref} และ v_{qr_ref} จะนำมารวมกับสมการที่ (2.22) และ (2.23) จะได้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง v_{dr}^* และ v_{qr}^* ที่ใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ตามสมการ

$$v_{dr}^* = v_{dr} + v_{dr_ref} \quad (2.22)$$

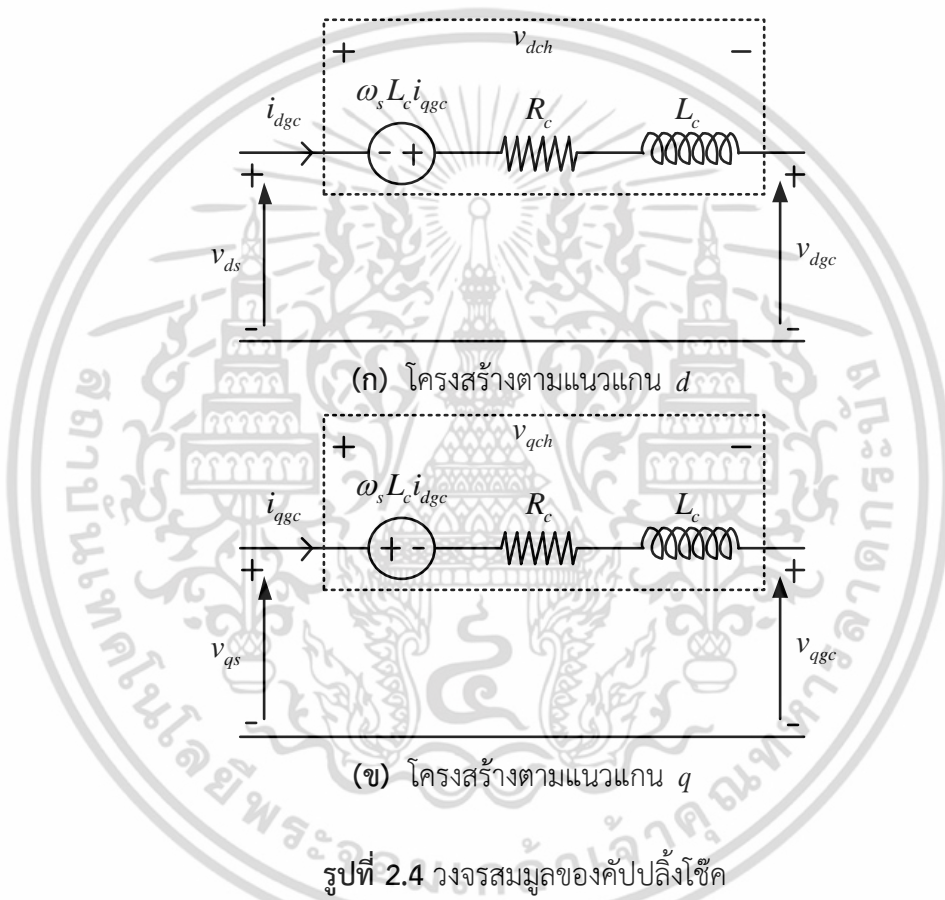
$$v_{qr}^* = v_{qr} + v_{qr_ref} \quad (2.23)$$

และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง v_{dr}^* และ v_{qr}^* ตามแนวแกน d และ q ตามลำดับนี้จะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าสามเฟส v_{abc_ctrl} เพื่อใช้สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ด้วยวิธีการสร้างสัญญาณมอดูเลตตามความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) และจากสมการที่ (2.13) - (2.23) สามารถแสดงการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ได้จากการคำนวณพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและใช้ตัวควบคุมพีไอทั้งหมด 4 ตัว คือ PI-A PI-B PI-C และ PI-D สำหรับคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การควบคุมกักหน้ลม DFIG ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของค้ปปล้งโซ้ค

และส่วนของการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดจะพิจารณาส่วนของค้ปปล้งโซ้คตามรูปที่ 2.1 และสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.4 และเขียนเป็นสมการแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$v_{dgc} = v_{ds} - v_{dch} \tag{2.24}$$

$$v_{qgc} = v_{qs} - v_{qch} \tag{2.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller)

ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) หรือตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional Integral Controller) มักจะเป็นระบบที่ควบคุมง่ายและไม่มีความซับซ้อนมาก ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอจะเป็นการนำอัตราขยายมารวมกับการสะสมความผิดพลาดของข้อมูลที่ผ่านมา และเมื่อนำตัวควบคุมนี้ไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมวิธีอื่น ๆ จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอจะมีความง่ายและไม่ยุ่งยากในการนำไปประยุกต์ใช้ [13-15] ทำให้มีคณนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยค่าที่นำมาใช้ในการควบคุมมักจะเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าความต้องการของตัวแปรนั้นที่ต้องการให้เป็น ซึ่งสามารถอธิบายตัวควบคุมแบบพีไอได้ดังนี้

ตัวควบคุมพีหรือตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller) จะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งหรือเป็นอัตราขยายค่าหนึ่งที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ขยายสัดส่วนของค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของอัตราขยาย โดยการตอบสนองของสัดส่วนจะสามารถแสดงด้วยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยอัตราขยายสัดส่วนตามสมการดังนี้

$$P_{OP} = K_p e(t) \quad (2.30)$$

โดยที่

e	คือสัญญาณอินพุตของของตัวควบคุม
K_p	คืออัตราขยายสัดส่วน
P_{OP}	คือสัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบพี
t	คือเวลา (s)

ตัวควบคุมไอหรือตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Controller) จะเป็นสัดส่วนของความผิดพลาดตามระยะเวลาของความผิดพลาด โดยจะแสดงเป็นผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา ปริพันธ์ของความผิดพลาดหรือค่าความผิดพลาดที่สะสมตามระยะเวลาและคูณด้วยอัตราขยายปริพันธ์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{OI} = K_I \int e(t) dt \quad (2.31)$$

โดยที่

K_I	คืออัตราขยายปริพันธ์
P_{OI}	คือสัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบไอ

ตัวควบคุมพีไอจะสามารถทำให้การลู่เข้าสู่สมดุลหรือค่าผิดพลาดที่น้อยลงได้อย่างรวดเร็ว โดยส่วนของตัวควบคุมแบบพีจะช่วยให้อัตราขยายค่าผิดพลาดที่เหลืออยู่ให้มากขึ้น และส่วนของตัวควบคุมแบบไอจะเป็นการรวมผลของค่าผิดพลาดที่ผ่านมาและนำมาขยายให้ลู่เข้าสู่ค่าสมดุลได้ไวมากยิ่งขึ้น ซึ่ง

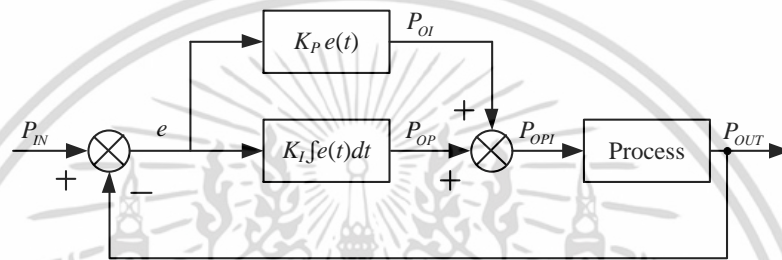
ตัวควบคุมแบบพีไอจะเป็นการนำสมการที่ (2.30) และ (2.31) รวมกัน และเขียนเป็นสมการผลรวมได้ดังนี้

$$P_{OPi} = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (2.32)$$

โดยที่

P_{OPi} คือสัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบพีไอ

และสามารถแสดงโครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอตามสมการที่ (2.32) ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์

โดยที่

P_{IN} คือสัญญาณขาเข้าเพื่อความต้องการควบคุมตัวแปรที่กำหนด

P_{OUT} คือสัญญาณขาออกของผลตอบสนองในกระบวนการ

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค

วิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) [23] เป็นวิธีการหาค่าอย่างเหมาะสมวิธีหนึ่ง โดยเลียนแบบพฤติกรรมของฝูงสัตว์ที่อาศัยกันเป็นกลุ่ม ๆ เสมือนเป็นอนุภาคที่อยู่ร่วมกัน ซึ่งแต่ละอนุภาคจะถูกกระจายเพื่อค้นหาหรือผลคำตอบด้วยทิศทางแบบสุ่ม เมื่อได้ผลคำตอบที่ดีที่สุดแล้วกลุ่มอนุภาคจะเคลื่อนที่เพื่อหาค่าตอบในพื้นที่ถัดไปอย่างมีทิศทาง โดยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคจะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนของการเคลื่อนที่แบบสุ่ม และส่วนของการเคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง โดยมีหลักการทำงานของวิธีฝูงอนุภาคในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดอนุภาค n จำนวน จำนวนรอบของการทำงาน N_r และกำหนดขอบเขตของการค้นหาตำแหน่งที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 สุ่มหาผลลัพธ์เริ่มต้นจากอนุภาค n จำนวน และนำผลลัพธ์ของอนุภาคที่สำรวจแต่ละอนุภาคมาหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่สุ่มมาได้เป็น g_{best} เพื่อพิจารณาว่าอนุภาคไหนให้คำตอบที่ดีที่สุด โดยเรียงผลคำตอบจากมากมาหาน้อย

ขั้นตอนที่ 3 เลือกผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมที่สุดหรือมีค่าผลลัพธ์ต่ำสุดจากการเรียงผลคำตอบจากมากไปหาน้อย โดยจะกำหนดให้อนุภาค n^* เป็นอนุภาคที่อยู่บนตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่า g_{best} ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนที่ 4 นำอนุภาค n^* มากำหนดกลุ่มอนุภาคใหม่ โดยกลุ่มอนุภาคใหม่นี้อยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง n^* ซึ่งเสมือนการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคอย่างมีทิศทาง แต่ส่วนของอนุภาคแต่ละตัวจะยังคงเคลื่อนที่กระจายแบบสุ่ม

ขั้นตอนที่ 5 กลุ่มอนุภาคใหม่ที่กระจายใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคเก่า n^* จะทำการหาผลลัพธ์ใหม่ที่ดีที่สุดเป็น g_{new} จาก n อนุภาค

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อได้ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด g_{new} จากอนุภาคใหม่ n อนุภาค จะทำการเปรียบเทียบกับค่าผลลัพธ์เก่าที่ดีที่สุด g_{old} จากเงื่อนไขดังนี้

ถ้า $g_{old} < g_{new}$ แล้ว $g_{best} = g_{old}$

ถ้า $g_{old} > g_{new}$ แล้ว $g_{best} = g_{new}$

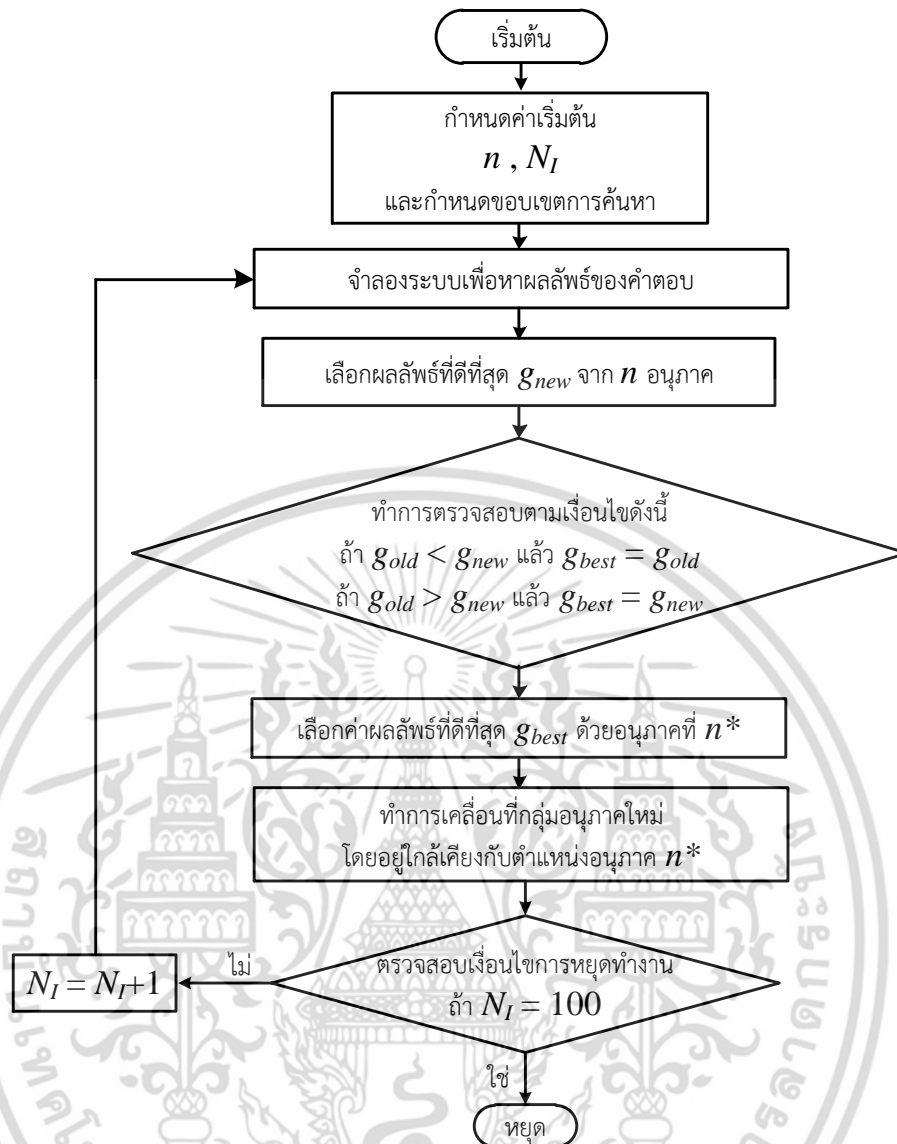
ขั้นตอนที่ 7 ทำการประเมินค่าความเหมาะสมจากอนุภาคแต่ละตัวจากเงื่อนไขตามขั้นตอนที่ 6 แล้วคัดเลือกค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเป็น g_{best} และเป็นอนุภาคตัวที่ n^*

ขั้นตอนที่ 8 ทำการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคใหม่ โดยเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค n จำนวน แบบสุ่มให้อยู่ใกล้บริเวณอนุภาคที่ n^*

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดทำงานตามจำนวนรอบที่ต้องการ โดยในที่นี้จะกำหนดค่ารอบการทำงาน (N_i) ไว้ที่ 100 รอบ ถ้าจำนวนรอบการทำงานไม่ถึง 100 รอบ จะกลับเข้าสู่การทำงานขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าจำนวนรอบการทำงานถึงค่าที่กำหนดไว้จะหยุดการค้นหาผลลัพธ์ทันที และจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดคือค่า g_{best}

โดยขั้นตอนของกระบวนการทำงานของวิธีฝูงอนุภาคจะสามารถแสดงเป็นแผนภาพลำดับขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 2.7 และมีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

n	คือจำนวนอนุภาค
n^*	คืออนุภาคที่ทำให้เกิดผลคำตอบที่ดีที่สุด
g_{new}	คือผลคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมาจาก n อนุภาค
g_{old}	คือผลคำตอบเก่าที่ดีที่สุด
g_{best}	คือผลคำตอบที่ได้จากการเปรียบเทียบผลคำตอบใหม่และผลคำตอบเก่าที่ดีที่สุด
N_i	คือจำนวนรอบของการค้นหา (Iteration)



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

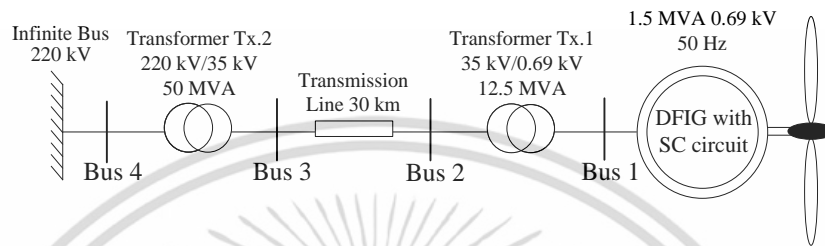
บทที่ 3

การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลม DFIG เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ

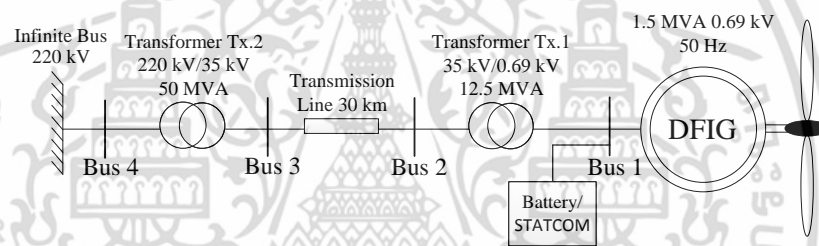
ในบทนี้จะนำเสนอการหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) ที่เหมาะสมซึ่งเชื่อมต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ (Fault Ride Through: FRT) และการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG โดยสมภาวะปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากกังหันลม DFIG ด้วยการควบคุมของดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC to DC Converter) ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าระหว่างขดลวดตัวนำยิ่งยวดกับระบบไฟฟ้าได้ และเมื่อเกิดสมภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสเพื่อลดการเกิดกระแสไฟฟ้าเกินที่ขดลวดโรเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ และยังลดการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินระหว่างดีซีลิงก์ (DC Link) นอกจากนี้ยังออกแบบให้เหมาะสมที่สุดด้วยการประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อค้นหาค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นในขดลวดที่จำเป็น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ของดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลม DFIG สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากกังหันลมและยับยั้งกระแสไฟฟ้าเกินในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบได้ดีกว่ากรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดไม่เหมาะสม และยังทดสอบกับอุปกรณ์ตัวเก็บสะสมพลังงานชนิดแบตเตอรี่ (Battery) และตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Static Synchronous Compensator) เพื่อแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถทำเสถียรภาพได้ดีกว่าอุปกรณ์ทั่ว ๆ ไป

3.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1 [22] โดยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ขนาดพิกัด 1.5 MVA จะต่ออยู่กับบัสอนันต์พิกัดแรงดันไฟฟ้า 220 kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Tx.1, Tx.2 และสายส่งยาว 30 km มีพารามิเตอร์ระบบตามตารางที่ 3.1 โดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะถูกติดตั้งระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของกังหันลม DFIG ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในกังหันลม



รูปที่ 3.2 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งแบตเตอรี่หรือตัวชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

ในระบบกำลังไฟฟ้านี้จะใช้ศึกษาสภาวะการทำงานปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ โดยในสภาวะปกติจะจำลองการเกิดกำลังไฟฟ้าแคว่งเนื่องจากกังหันลม DFIG ผลิตกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้ระบบกำลังไฟฟ้าได้รับกำลังไฟฟ้าไม่คงที่และนำไปสู่การเสียดังคุณภาพ และเมื่อจำลองการเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติที่บัสที่ 2 ส่งผลให้เกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าลดลงที่บัส 1 และยังคงผลกระทบภายในกังหันลม DFIG เช่น กระแสไฟฟ้าเกินในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ เกิดแรงดันไฟฟ้าพุ่งขึ้นสูงระหว่างดีซีลิงค์ เป็นต้น เป็นผลให้กังหันลม DFIG ต้องปลดตัวเองออกจากระบบเป็นไปตามมาตรฐาน Grid Code ของ Germany EON [12] ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาทั้งสองตามที่กล่าวมาจึงติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของกังหันลม DFIG

และในรูปที่ 3.2 เป็นระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้จำลองการเปรียบเทียบการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดกับแบตเตอรี่ (Battery) และตัวชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Static Synchronous Compensator: STATCOM) โดยแบตเตอรี่จะนำไปเปรียบเทียบภายใต้สภาวะปกติหรือเกิดการแคว่งของกำลังไฟฟ้า และ STATCOM จะถูกเปรียบเทียบในสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ ซึ่งพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่และ STATCOM จะแสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดกำลังไฟฟ้า (P)	1.5 MW
พิกัดแรงดันไฟฟ้า (V)	0.69 kV
ความถี่ระบบไฟฟ้า (f)	50 Hz
จำนวน pole (n_p)	2
ค่าความต้านทานของสเตเตอร์และโรเตอร์ (R_s, R_r)	0.003, 0.003 pu
ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์และโรเตอร์ (L_s, L_r)	0.11, 0.07 pu
ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กเนโตซิง (L_m)	2.5 pu
ค่าคงที่ความเฉื่อย (H)	0.685 s
พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับวงจรเรียงกระแสแบบไดโอด (V_{TRP}, V_{TRs})	400 V/600 V
ค่าความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้า (R_{Tr})	0.005 pu, 0.005 pu
ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า (L_{Tr})	0.035 pu, 0.035 pu
ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กเนโตซิงของหม้อแปลงไฟฟ้า (L_{Trm})	500 pu
สายส่งยาว (l)	30 km

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดแรงดันไฟฟ้า (V_b)	1,400 V
ขนาดความจุไฟฟ้า (I_{cap})	50 Ah
พิกัดแบตเตอรี่ (P_b)	70 kWh
สถานะประจุแบตเตอรี่ (SOC)	50 %
พลังงานสะสมเริ่มต้น (W_{ini})	126 MJ
พิกัดขนาดความจุไฟฟ้า (I_{max})	52.08 Ah
แรงดันไฟฟ้าเมื่อชาร์จเต็ม ($V_{c,max}$)	1633.22 V

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของ STATCOM

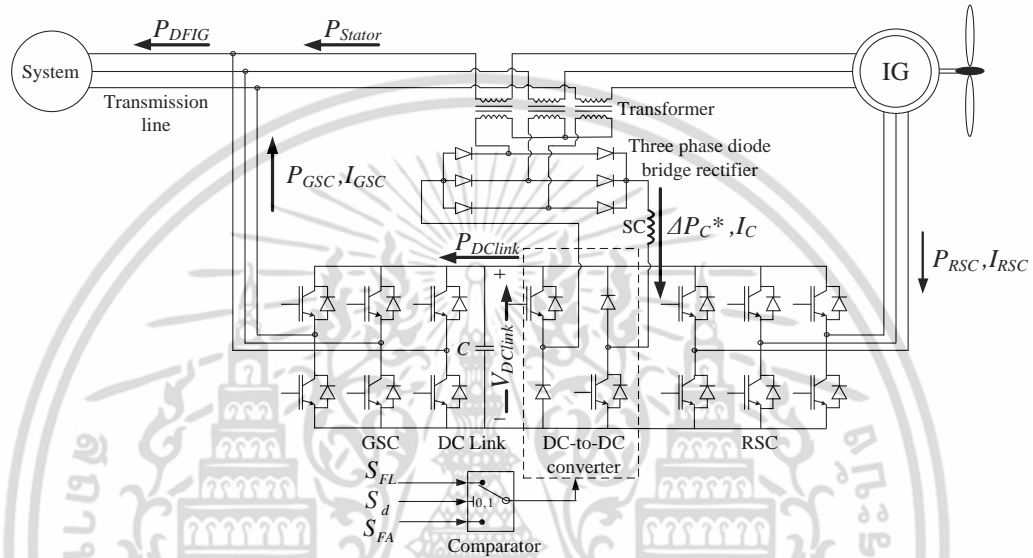
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดแรงดันไฟฟ้า (V_{stat})	1,400 V
ค่าความเหนี่ยวนำ (L_{ss})	0.0001 H
ค่าความต้านทาน (R_{ss})	0.002 Ω
ค่าตัวเก็บประจุ (C_{stat})	8000 μ F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในกรณีศึกษา

3.2.1 โครงสร้างของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งภายในกังหันลม DFIG

วงจรไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) ที่ติดตั้งอยู่ในกังหันลม DFIG [22] ตามรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ คือคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด (Grid Side Converter: GSC), คอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter: RSC), ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-to-DC Converter), วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์ (Three Phase diode bridge rectifier) และหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)



รูปที่ 3.3 วงจรไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด

โดยคอนเวอร์เตอร์ GSC และ RSC จะเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage Source Converter) เพื่อควบคุมการทำงานด้านโรเตอร์ของกังหันลม DFIG โดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อดีซีลิงค์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ GSC และ RSC ผ่านดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ และอีกด้านหนึ่งของขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อกับสายส่งที่เชื่อมต่อกับขดลวดสเตเตอร์ของกังหันลม DFIG ผ่านวงจรเรียงกระแสสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์และหม้อแปลงไฟฟ้า ในสภาวะการทำงานปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวสะสมพลังงานไฟฟ้าโดยการควบคุมของดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์จะสามารถควบคุมการแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบกับขดลวดตัวนำยิ่งยวด ซึ่งทำให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ได้ และเมื่อเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะถูกเชื่อมต่อกับสายส่งอย่างอัตโนมัติ และด้วยการควบคุมของดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ยังทำให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดถูกใช้ยับยั้งกระแสเกินที่ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ และยังลดการเกิดแรงดันไฟฟ้าพุ่งขึ้นสูงอย่างฉับพลันในตัวเก็บประจุไฟฟ้า C ที่ดีซีลิงค์อีกด้วย

ตามรูปที่ 3.3 ในสภาวะปกติกังหันลม DFIG จะจ่ายกำลังไฟฟ้าแกว่ง P_{DFIG} ให้กับระบบกำลังไฟฟ้าโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_{DFIG} = P_{Stator} + P_{GSC} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกำลังไฟฟ้า P_{GSC} เป็นกำลังไฟฟ้าด้านโรเตอร์ที่จ่ายให้กับระบบโดยหาได้จากสมการ

$$P_{GSC} = P_{DClink} + \Delta P_C^* \quad (3.2)$$

เมื่อกำหนดให้

P_{DClink} คือกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านมาจากกำลังไฟฟ้าด้านโรเตอร์ (P_{RSC}) (W)

ΔP_C^* คือกำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ (W)

ซึ่งจากสมการที่ (3.2) สามารถอธิบายได้ว่ากำลังไฟฟ้า P_{GSC} จะเป็นผลรวมของกำลังไฟฟ้า P_{DClink} กับกำลังไฟฟ้า ΔP_C^* ซึ่งกำลังไฟฟ้า ΔP_C^* จะสามารถควบคุมได้ด้วยดีซีทูดิซีคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้น ถ้าไม่มีกำลังไฟฟ้า ΔP_C^* แล้วกำลังไฟฟ้า P_{GSC} จะมีค่าเท่ากับ P_{DClink} และเราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้า ΔP_C^* จากสมการ

$$\Delta P_C^* = \Delta V_C^* \cdot I_C \quad (3.3)$$

เมื่อกำหนดให้

ΔV_C^* คือส่วนต่างของแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V)

I_C คือกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (A)

และนำสมการที่ (3.3) แทนในสมการที่ (3.2) จะได้

$$P_{GSC} = P_{DClink} + \Delta V_C^* \cdot I_C \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.3) แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ΔV_C^* จะเปรียบเสมือนการควบคุมกำลังไฟฟ้า ΔP_C^* ได้โดยตรง และจากสมการที่ (3.4) จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้า P_{GSC} ได้จากการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ΔV_C^* ได้โดยตรงเช่นกัน ดังนั้น จากสมการที่ (3.1) เมื่อกังหันลม DFIG จ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์เป็นกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ที่เกิดการแกว่งให้กับระบบ ดีซีทูดิซีคอนเวอร์เตอร์ก็จะทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้า P_{GSC} ให้ชดเชยกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ที่แกว่งให้ลดลงได้ผ่านทาง การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ΔV_C^* จึงสามารถควบคุมการเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า P_{DFIG} จากกังหันลม DFIG ได้

และเมื่อเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบกังหันลม DFIG จะต้องมีความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ (Fault Ride Through: FRT) ถึงจะสามารถทนต่อการเชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้อย่างต่อเนื่อง โดยในสภาวะเกิดความผิดปกตินี้จะเกิดกระแสไฟฟ้าสูงทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ และยังเกิดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V_{DClink}) สูงขึ้นอย่างฉับพลันในดีซีลิงค์ จึงเป็นที่มาที่ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาแก้ไขปัญหา โดยทางด้านโรเตอร์จะเป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันด้วยการควบคุมของดีซีทูดิซีคอนเวอร์เตอร์

จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_{DCLink} = V_{DCLink} - V_{DCLink_ref} \quad (3.5)$$

เมื่อกำหนดให้

ΔV_{DCLink}	คือผลต่างแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V)
V_{DCLink}	คือแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V)
V_{DCLink_ref}	คือแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง (V)

ซึ่งดีซีฟลูตตี้คอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V_{DCLink}) เพื่อให้ผลต่างแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (ΔV_{DCLink}) มีค่าน้อยที่สุด และแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้จะถูกสะสมเป็นพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินให้กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด การควบคุมด้วยวิธีนี้ยังส่งผลให้กระแสฟลัดที่ไหลผ่านด้านโรเตอร์นั้นถูกจำกัดอีกด้วย [22] เนื่องจากเมื่อเกิดความผิดปกติกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลเข้าสู่ระบบได้ตามปกติ จึงเกิดการสะสมขึ้นในขดลวด แต่ในที่นี้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าที่เกินให้กับกังหันลม DFIG ส่วนทางด้านสเตเตอร์กระแสฟลัดจะถูกจำกัดโดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดผ่านวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์และหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติ [22, 33] โดยสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสภาวะเกิดความผิดปกติได้ด้วยสมการ

$$Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (3.6)$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้า V_{SC} หาค่าได้จาก

$$V_{SC} = L_{SC} \frac{dI_{SC}}{dt} \quad (3.7)$$

เมื่อกำหนดให้

Z_{SC}	คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Ω)
V_{SC}	คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (V)
I_{SC}	คือกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (A)
L_{SC}	คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H)

จากรูปที่ 3.3 เมื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดทางด้านสายส่งของหม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$Z' = \frac{V_T}{I_T} = \frac{aV_{SC}}{I_{SC}/a} = a^2 Z_{SC} \quad (3.8)$$

เมื่อกำหนดให้

Z' คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดด้านสายส่งของหม้อแปลง (Ω)

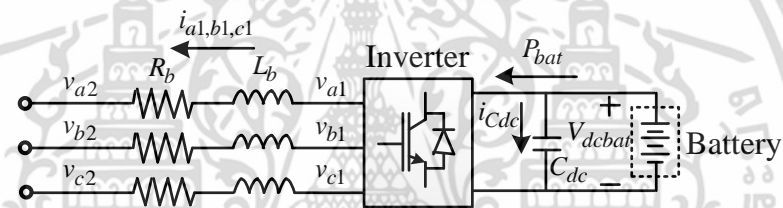
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- V_T คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของหม้อแปลงด้านสายส่ง (V)
- I_T คือกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหม้อแปลงด้านสายส่ง (A)
- a คืออัตราส่วนหม้อแปลง

จากสมการที่ (3.7) ถ้าระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ dI_{sc}/dt จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ส่งผลให้ไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม V_{sc} แต่เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างฉับพลันหรือเกิดกระแสฟลัดท์ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะสร้างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม V_{sc} อย่างสูง ส่งผลให้เกิดอิมพีแดนซ์ Z_{sc} ตามสมการที่ (3.6) และเมื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จากทางด้านสายส่งที่หม้อแปลงเชื่อมต่ออยู่จะมีอิมพีแดนซ์ Z' เพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนตาม a ตามสมการที่ (3.8) ด้วยการเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์เช่นนี้ จึงทำให้สามารถจำกัดกระแสฟลัดท์ด้านสเตเตอร์ได้อย่างรวดเร็วและเป็นไปอย่างอัตโนมัติ [33]

3.2.2 โครงสร้างของแบตเตอรี่

โครงสร้างของ Battery ที่ใช้ศึกษาจำลองผล [34] แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 เพื่อใช้ในการแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าแฉ่งของกังหันลม DFIG



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของแบตเตอรี่

และสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{a2} \\ v_{b2} \\ v_{c2} \end{bmatrix} - R_b \cdot \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} - L_b \cdot \begin{bmatrix} di_{a1} / dt \\ di_{b1} / dt \\ di_{c1} / dt \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

โดยที่

- v_{a1}, v_{b1}, v_{c1} คือแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ของแบตเตอรี่ (V)
- v_{a2}, v_{b2}, v_{c2} คือแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่แบตเตอรี่ต่ออยู่ (V)
- L_b, R_b คือค่าความเหนี่ยวนำ (H) และค่าความต้านทาน (Ω) ที่ขั้วอินเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่

และเปลี่ยนรูปสมการที่ (3.9) ให้อยู่ในรูป dq-axis จะได้

$$\begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{d2} \\ v_{q2} \end{bmatrix} - R_b \cdot \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} - L_b \cdot \begin{bmatrix} di_{d1} / dt \\ di_{q1} / dt \end{bmatrix} - L_b \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.10) ตามการควบคุมแบบเวกเตอร์คอลโทโรล v_{d2} จะมีค่าเท่ากับขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบและ v_{q2} จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และตัดความต้านทานออกและสมมติอยู่ในสภาวะ steady-state จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ตามนี้

$$V_{d1} = V_{d2} - \omega L_b \cdot i_{q1} \quad (3.11)$$

และ

$$V_{q1} = -\omega L_b \cdot i_{d1} \quad (3.12)$$

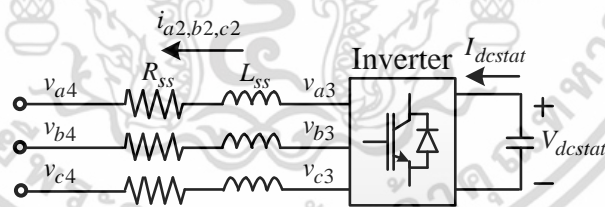
และจะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P_{bat}) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q_{bat}) ของแบตเตอรี่ [34] ได้จากสมการ

$$P_{bat} = v_{dcbat} \left(i_{Cdc} - C_{dc} \frac{dv_{dcbat}}{dt} \right) = \frac{3}{2} v_{d1} i_{d1} \quad (3.13)$$

$$Q_{bat} = -\frac{3}{2} v_{d2} i_{q1} \quad (3.14)$$

3.2.3 โครงสร้างของตัวขดเคเบิลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

โครงสร้างของ STATCOM ที่ใช้ศึกษาจำลองผลในการแก้ปัญหาการข้ามผ่านความผิดพลาดของกังหันลม DFIG [35] จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของ STATCOM

และสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{a4} \\ v_{b4} \\ v_{c4} \end{bmatrix} = R_{ss} \cdot \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + L_{ss} \cdot \begin{bmatrix} di_{a2} / dt \\ di_{b2} / dt \\ di_{c2} / dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{a3} \\ v_{b3} \\ v_{c3} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

โดยที่

v_{a3}, v_{b3}, v_{c3} คือแรงดันที่ขั้วอินเวอร์เตอร์ของ STATCOM (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

v_{d4}, v_{b4}, v_{c4} คือแรงดันที่บัสที่ STATCOM ต่ออยู่ (V)
 L_{ss}, R_{ss} คือค่าความเหนี่ยวนำ (H) และค่าความต้านทาน (Ω) ที่ขั้วอินเวอร์เตอร์ของ STATCOM

เราสามารถแปลงสมการที่ (3.15) ให้อยู่ในรูปแกน dq-axis ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{d4} \\ v_{q4} \end{bmatrix} = R_{ss} \cdot \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} + L_{ss} \cdot \begin{bmatrix} di_{d2} / dt \\ di_{q2} / dt \end{bmatrix} + L_{ss} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{d3} \\ v_{q3} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

ถ้ากำหนดให้แกน d-axis อยู่ที่ทิศทางแนวเดียวกับแรงดันไฟฟ้าของระบบ ดังนั้น $v_{q4} = 0$ และจะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง ($P_{STATCOM}$) และกำลังไฟฟ้าเสมือน ($Q_{STATCOM}$) ได้ตามสมการ

$$P_{STATCOM} = \frac{3}{2} v_{d4} i_{d2} = V_{dstat} I_{dstat} \quad (3.17)$$

$$Q_{STATCOM} = -\frac{3}{2} v_{d4} i_{q2} \quad (3.18)$$

โดยที่

V_{dstat} คือแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของ STATCOM (V)

I_{dstat} คือกระแสไฟฟ้าดีซีลิงค์ของ STATCOM (A)

ดังนั้น จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้า ($P_{STATCOM}$) ได้จากการควบคุมกระแส i_{d2} และควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน ($Q_{STATCOM}$) จากการควบคุมกระแส i_{q2} และสมการที่ (3.16) เมื่อไม่คิดค่าความต้านทานและสมมติให้อยู่ในสภาวะ steady-state จะสามารถเขียนสมการที่ (3.16) ใหม่ได้ตามนี้

$$\begin{bmatrix} v_{d4} \\ 0 \end{bmatrix} = L_{ss} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{d3} \\ v_{q3} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

และจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

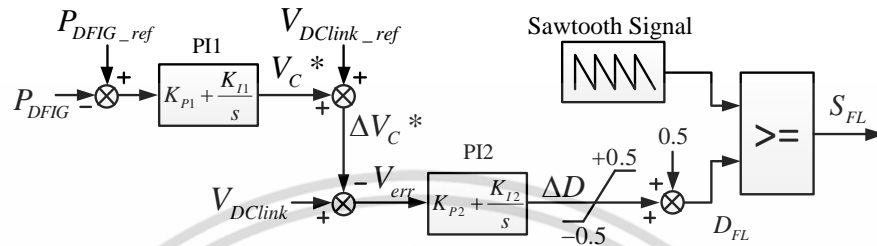
$$V_{d3} = V_{d4} + \omega L_{ss} \cdot i_{q2} \quad (3.20)$$

$$V_{q3} = -\omega L_{ss} \cdot i_{d2} \quad (3.21)$$

3.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด

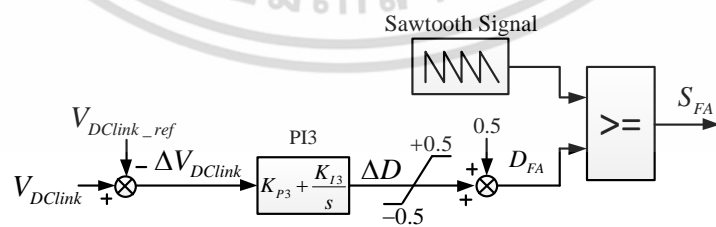
3.3.1 การออกแบบตัวควบคุมดีซีฟูลติซีคอนเวอร์เตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

จากหัวข้อที่ 3.2 จะสามารถนำมาสู่วิธีการออกแบบตัวควบคุมให้ดีซีฟูลติซีคอนเวอร์เตอร์เพื่อใช้ควบคุมพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวด โดยการออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมจะแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะการทำงานปกติ และสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ



รูปที่ 3.6 โครงสร้างตัวควบคุมขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสภาวะปกติ

ในสภาวะการทำงานปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้เก็บสะสมพลังงานหรือชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่กักเก็บใน DFIG กระจายให้กับระบบ ซึ่งจากสมการที่ (3.1) และ (3.4) ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 3.6 โดยการวัดสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริง P_{DFIG} เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง P_{DFIG_ref} ค่าผลต่างนี้จะป้อนอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ PI1 และเอาต์พุตจะเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_C^* เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง V_{DClink_ref} ซึ่งจะถูกตั้งค่าไว้ที่ 1,500 V และผลต่างที่ได้จะเป็นส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ ΔV_C^* จะไปชดเชยกับแรงดันไฟฟ้าจริง V_{DClink} ซึ่งค่าผิดพลาดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเป็นสัญญาณ V_{err} ซึ่งถูกใช้ป้อนอินพุตให้ตัวควบคุมพีไอ PI2 และเอาต์พุตที่ได้จะเป็นค่าเบี่ยงเบนดิวตีไซเคิล (ΔD) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าดิวตีไซเคิล D_{FL} และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจึงได้สัญญาณควบคุมสวิตช์ S_{FL} ของดีซีฟูลติซีคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสัญญาณ S_{FL} จะถูกส่งไปป้อนอินพุตให้กับ Comparator ตามรูปที่ 3.3 เพื่อเป็นสัญญาณสวิตช์ควบคุมการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า



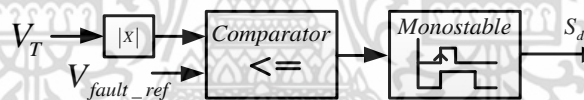
รูปที่ 3.7 โครงสร้างตัวควบคุมขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสภาวะเกิดความผิดปกติ

เมื่อเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบดีซีฟูลติซีคอนเวอร์เตอร์จะต้องทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V_{DClink}) ให้คงที่หรือป้องกันการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ดีซีลิงค์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ GSC และ RSC จากสมการที่ 3.5 สามารถออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน เมื่อผู้ใดได้เห็นเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์จริง (V_{DClink}) เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง (V_{DClink_ref}) ในที่นี้จะถูกตั้งค่าไว้ที่ 1,500 V ผลต่างที่ได้จะเป็นอินพุตให้ตัวควบคุมพีไอ PI3 และเอาต์พุตจะเป็นค่าเบี่ยงเบนดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าดิฟเฟอเรนเชียล D_{FA} และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจึงได้สัญญาณควบคุมสวิตช์ S_{FA} เพื่อใช้ควบคุมดิซิปูตีซีคอนเวอร์เตอร์ในสถานะเกิดความผิดปกติ ซึ่งสัญญาณ S_{FA} จะถูกส่งไปเป็นอินพุตให้กับ Comparator ตามรูปที่ 3.3 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ K_{P1} , K_{P2} , K_{P3} , K_{I1} , K_{I2} และ K_{I3} จะต้องได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีออกแบบที่เหมาะสมซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

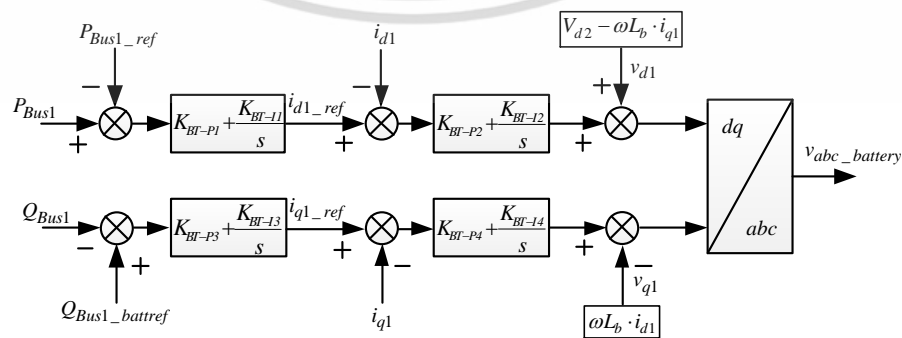
ในการสั่งสวิตช์การทำงานทั้งสองสถานะจำเป็นต้องมีตัวชี้วัดเพื่อเลือกสถานะการทำงาน ซึ่งเป็นตัวตรวจจับสถานะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยการตรวจจับสถานะความผิดปกติในที่นี้จะเลือกการตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 หรือที่หน้าบัสกั้นหั่นลม DFIG ซึ่งจะมีโครงสร้างตัวตรวจจับดังรูปที่ 3.8 โดยจะวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_T ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสกั้นหั่นลม DFIG เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง V_{fault_ref} ซึ่งในที่นี้ถูกตั้งไว้ที่ 0.9 pu เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้า V_T จะลดลงอย่างมากทำให้มีค่าน้อยกว่า V_{fault_ref} ส่งผลให้บล็อก Comparator จะส่งสัญญาณลอจิก 1 ให้กับบล็อกโมโนสเตเบิล (Monostable) ซึ่งบล็อกโมโนสเตเบิลจะทำหน้าที่ดีเลย์สัญญาณเพื่อป้องกันการเกิดความผิดปกติซ้ำซ้อนในระยะเวลาใกล้เคียงและเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณ S_d ซึ่งจะถูกส่งไปเป็นอินพุตให้ Comparator ในรูปที่ 3.3 เพื่อเลือกสถานะการทำงานของตัวควบคุมดิซิปูตีซีคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของตัวตรวจจับสถานะเกิดความผิดปกติ

3.3.2 การออกแบบตัวควบคุมของแบตเตอรี่

จากสมการที่ (3.11) - (3.14) สามารถนำมาออกแบบตัวควบคุมได้ตามรูปที่ 3.9 โดยแนวแกนกระแส d-axis จะใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และกำลังไฟฟ้าเสมือนจะถูกควบคุมด้วยแนวแกนกระแส q-axis

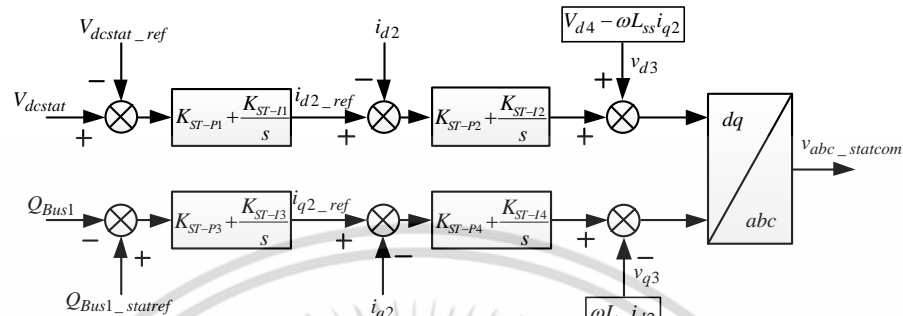


รูปที่ 3.9 โครงสร้างตัวควบคุมของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การออกแบบตัวควบคุมของ STATCOM

จากสมการที่ (3.17) - (3.21) สามารถนำมาออกแบบตัวควบคุมได้ตามรูปที่ 3.10 โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของ STATCOM จะถูกควบคุมด้วยกระแสแนวแกน d-axis และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสที่ 1 จะถูกควบคุมด้วยกระแสแนวแกน q-axis



รูปที่ 3.10 โครงสร้างตัวควบคุมของ STATCOM

3.3.4 เทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวด และพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ใช้อย่างเหมาะสม เพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดของกังหันลม DFIG โดยมีวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG การลดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ตีซีลิงค์ในสภาวะเกิดความผิดพลาด และการยับยั้งการเกิดกระแสเกินทั้งด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์ของกังหันลม DFIG โดยการพิจารณาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกังหันลม DFIG จ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอให้กับระบบไฟฟ้า จะนำกำลังไฟฟ้าที่แกว่งมาหาพื้นที่ใต้กราฟ โดยใช้วิธีหาค่าที่น้อยที่สุดของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) และเช่นเดียวกันการพิจารณาการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ตีซีลิงค์และกระแสเกินที่โรเตอร์จะใช้วิธี IAE ส่วนการพิจารณาขนาดค่าความเหนี่ยวนำ กระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมจะพิจารณาถึงพลังงานสะสมเริ่มต้นน้อยที่สุดที่จะสามารถรักษาเสถียรภาพระบบได้ โดยจะสามารถเขียนฟังก์ชันรวมของสมการวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

หาค่าที่น้อยที่สุดของ

$$J = W_1 \cdot \underbrace{\int_{t_0}^{t_{sim}} |\Delta P| dt}_{\text{Term 1}} + W_2 \cdot \underbrace{\int_{t_{f1}}^{t_{f2}} |\Delta V_{DC}| dt}_{\text{Term 2}} + W_3 \cdot \underbrace{\int_{t_{f1}}^{t_{f2}} |\Delta I_R| dt}_{\text{Term 3}} + W_4 \cdot \underbrace{E_{SC0}}_{\text{Term 4}} \quad (3.22)$$

โดยที่

- ΔP คือผลต่างกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 กับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง (W)
- ΔV_{DC} คือผลต่างแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (V)
- ΔI_R คือผลต่างกระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์กับกระแสไฟฟ้าอ้างอิง (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E_{sc0}	คือพลังงานสะสมเริ่มต้น (J)
t_0	คือเวลาเริ่มต้นการจำลอง (s)
t_{sim}	คือเวลาสิ้นสุดการจำลอง (s)
t_{f1}	คือเวลาเริ่มต้นการเกิดความผิดพลาด (s)
t_{f2}	คือเวลาสิ้นสุดการเกิดความผิดพลาด (s)
W_1, W_2, W_3	คือค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting factor)
และ W_4	

และการพิจารณาแต่ละเทอม (Term) จะอธิบายได้ดังนี้

- เทอมที่ 1 จะใช้พิจารณาถึงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า
- เทอมที่ 2 จะใช้พิจารณาถึงการเกิดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์เกิน
- เทอมที่ 3 จะใช้พิจารณาถึงการเกิดกระแสฟลัดในโรเตอร์
- เทอมที่ 4 จะใช้พิจารณาถึงพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

ซึ่งการหาค่าพลังงานสะสมเริ่มต้นสามารถหาค่าได้จาก

$$E_{sc0} = \frac{1}{2} L_{sc} I_{sc0}^2 \quad (3.23)$$

โดยที่

L_{sc}	คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H)
I_{sc0}	คือกระแสเริ่มต้น (A)

โดยแต่ละเทอมจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก W_1, W_2, W_3 และ W_4 เป็นตัวคูณร่วมให้กับแต่ละเทอมของสมการจุดประสงค์ J เพื่อลำดับความสำคัญของแต่ละเทอม โดยในที่นี้จะลำดับให้เทอมของพลังงานสะสมเริ่มต้นมีความสำคัญเป็นอันดับแรก และจะกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักแต่ละเทอมได้ดังนี้

$$W_1 = 0.2, W_2 = 0.5, W_3 = 0.3, \text{ และ } W_4 = 1.0$$

สำหรับการหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (3.22) นี้จะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เพื่อที่จะปรับหาค่า $L_{sc}, I_{sc0}, K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}, K_{I1}, K_{I2}$ และ K_{I3} ให้มีความเหมาะสมโดยอัตโนมัติพร้อมกัน และกระบวนการค้นหาค่าตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการออกแบบไว้ดังนี้

ค่าความเหนี่ยวนำทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 10 H

ค่ากระแสเริ่มต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 1.5 ถึง 3 kA

ค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{P1} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 1

ค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{I1} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 3

ค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{P2} และ K_{P3} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 100

ค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{I2} และ K_{I3} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 1

ส่วนพารามิเตอร์ของขบวนการวิธี PSO กำหนดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

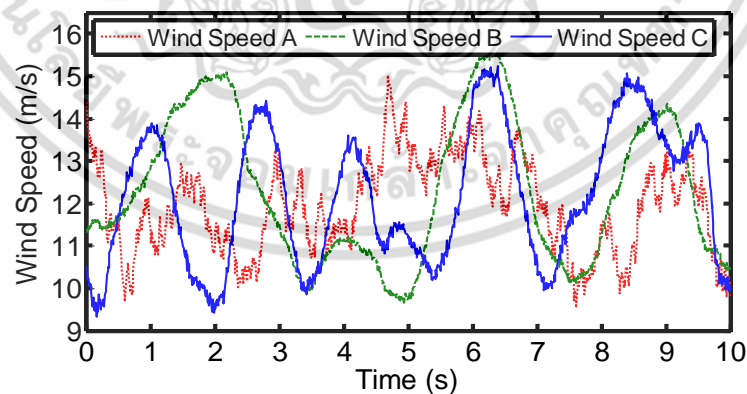
จำนวนอนุภาค 50 ตัว

จำนวนรอบของการค้นหา 100 รอบ

ในการศึกษาในบทนี้จะนำกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดเหมาะสมเปรียบเทียบกับขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดไม่เหมาะสมทั้งสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ และยังนำกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดเหมาะสมนี้เปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ในสภาวะปกติและเปรียบเทียบกับ STATCOM ในสภาวะเกิดความผิดปกติ

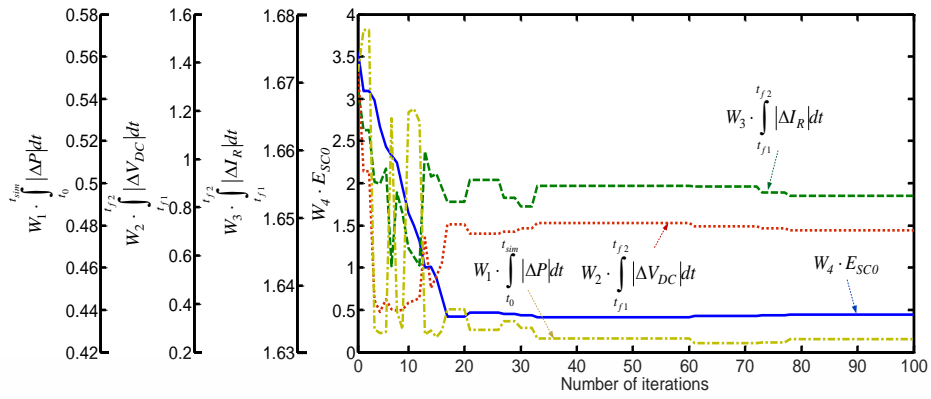
3.4 ผลการจำลองและทดสอบ

ในการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ กระแสเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะใช้โปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [31] ในการจำลองระบบดังรูปที่ 3.1 ภายใต้ความเร็วลมดังรูปที่ 3.11 และจำลองการเกิดความผิดปกติที่บัสที่ 2 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 4 s ผลลัพธ์การค้นหาค่าคำตอบของสมการที่ (3.22) สามารถแสดงผลการลู่เข้าหาค่าคำตอบแต่ละเทอมได้ดังรูปที่ 3.12 และแสดงการลู่เข้าหาค่าคำตอบของขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด กระแสเริ่มต้น และพลังงานสะสมเริ่มต้นดังรูปที่ 3.13 ผลคำตอบของพารามิเตอร์ที่ค้นหาของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 จะได้ค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) 0.198 H กระแสเริ่มต้น (I_{SC0}) 2.106 kA และพลังงานสะสมเริ่มต้น (E_{SC0}) 0.439 MJ ซึ่งพารามิเตอร์นี้จะใช้เปรียบเทียบกับกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดที่ไม่เหมาะสมด้วยขนาดค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) 5 H กระแสเริ่มต้น (I_{SC0}) 2.106 kA และพลังงานสะสมเริ่มต้น (E_{SC0}) 11.08 MJ ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่าและพลังงานสะสมเริ่มต้นที่มากกว่า และยังเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่และ STATCOM ซึ่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของแบตเตอรี่และ STATCOM สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.5 โดยการแสดงผลการทดสอบจะแยกเป็นตัวเปรียบเทียบแต่ละตัวและแบ่งออกเป็น 3 กรณี

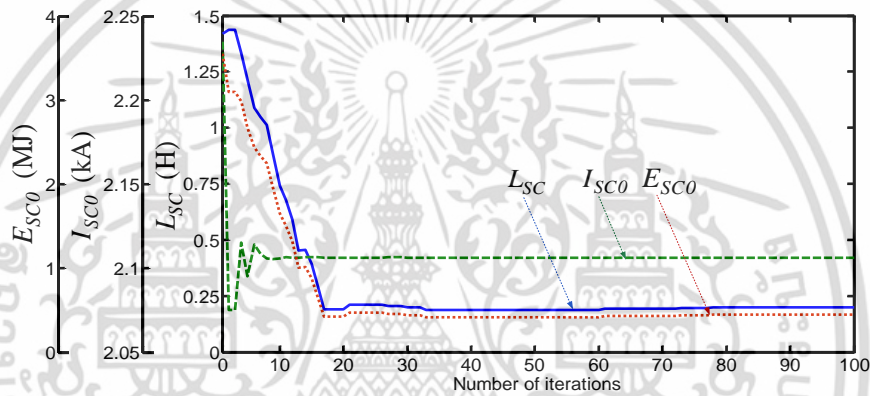


รูปที่ 3.11 ความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของแต่ละเทอมของสมการวัตถุประสงค์



รูปที่ 3.13 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ E_{SCO} , I_{SCO} และ L_{SC}

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี PSO

พารามิเตอร์	ขดลวดที่มีขนาดไม่เหมาะสม	
	เหมาะสม	เหมาะสม
L_{SC} (H)	5	0.198
I_{SCO} (kA)	2.106	2.106
E_{SCO} (MJ)	11.08	0.439
K_{P1}, K_{I1}	0.01, 0.05	0.0425, 1.9811
K_{P2}, K_{I2}	0.5, 0.1	9.4074, 0.9683
K_{P3}, K_{I3}	0.0005, 0.001	49.186, 0.5042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

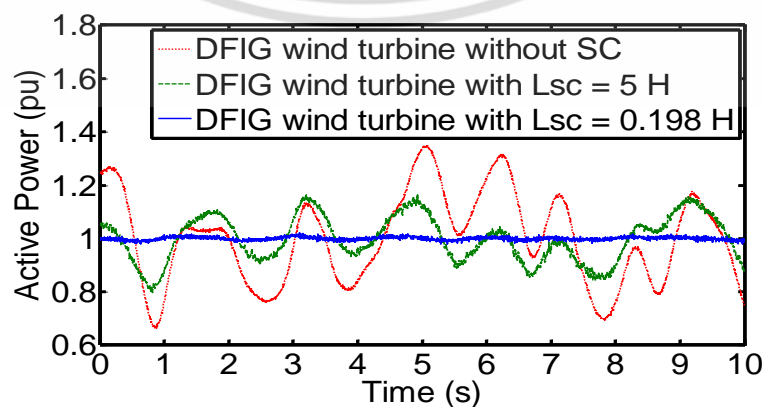
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของ Battery และ STATCOM

Battery	STATCOM
$K_{BT-P1} = 2.5, K_{BT-I1} = 5$	$K_{ST-P1} = 10, K_{ST-I1} = 15$
$K_{BT-P2} = 5, K_{BT-I2} = 8$	$K_{ST-P2} = 3, K_{ST-I2} = 5$
$K_{BT-P3} = 2, K_{BT-I3} = 15$	$K_{ST-P3} = 4, K_{ST-I3} = 10$
$K_{BT-P4} = 5, K_{BT-I4} = 10$	$K_{ST-P4} = 5, K_{ST-I4} = 15$

กรณีที่ 1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมขนาด 0.198 H กับขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ขนาดไม่เหมาะสมขนาด 5 H

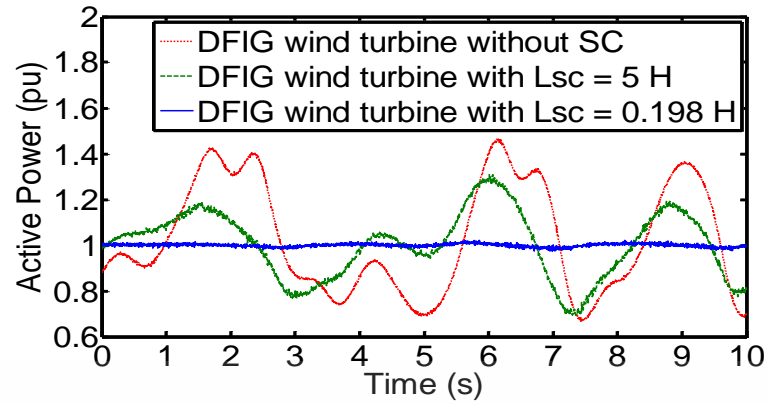
การทดสอบในสภาวะปกติการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 (ก) - (ค) เป็นกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 หรือหน้าบัสกังหันลม DFIG แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการทดสอบที่ความเร็วลม (Wind Speed) A, B และ C การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้ากรณีกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่ากรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ขนาด 5 H และไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด

รูปที่ 3.15 (ก) - (ค) แสดงแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์แต่ละกรณี ซึ่งกรณีกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะมีการแกว่งสอดคล้องกับทิศทางของกำลังไฟฟ้า P_{GSC} ส่วนกรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ขนาด 5 H นั้นจะแกว่งน้อยกว่ากรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H แต่จะแกว่งแบบไม่มีทิศทาง และเมื่อไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเกิดการแกว่งอย่างสูง ซึ่งการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์จะเป็นไปตามการควบคุมสมการที่ (3.4) ให้ไปชดเชยกำลังไฟฟ้าที่แกว่งของกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ซึ่งจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในรูปที่ 3.16 (ก) และ (ข) เป็นการทดสอบในสภาวะความเร็วลม A ในรูปที่ 3.16 (ก) จะแสดงกำลังไฟฟ้าที่กังหันลมจ่ายให้กับระบบ โดยกำลังไฟฟ้า P_{Stator} และ P_{GSC} รวมกันจะได้กำลังไฟฟ้า P_{DFIG} เป็นไปตามสมการที่ (3.1) เห็นได้ว่าการควบคุมกำลังไฟฟ้า P_{GSC} จะสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้า P_{Stator} เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ได้ โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้า P_{GSC} จะสามารถควบคุมผ่านแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ตามสมการที่ (3.4) และแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 (ข) จะสังเกตเห็นว่ากำลังไฟฟ้า P_{GSC} จะมีทิศทางเพิ่มขึ้นและลดลงตามแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์

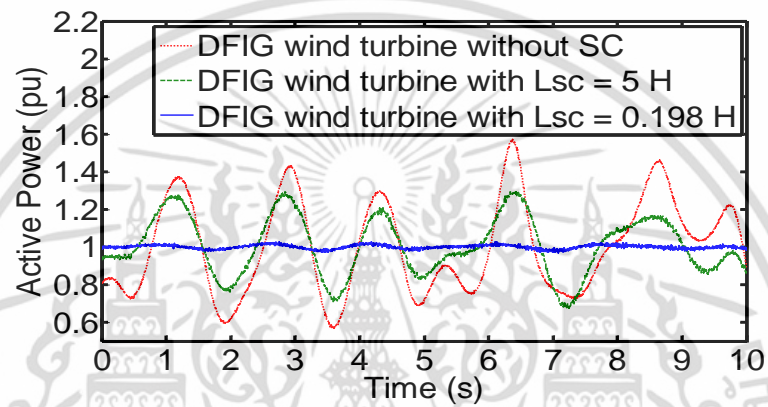


(ก) กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

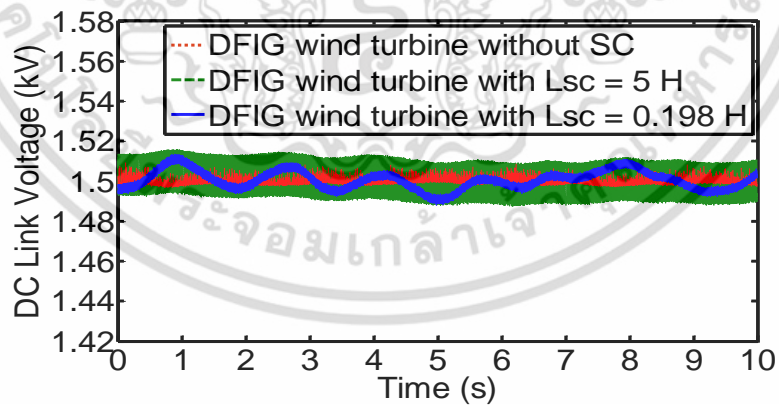


(ข) กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม B



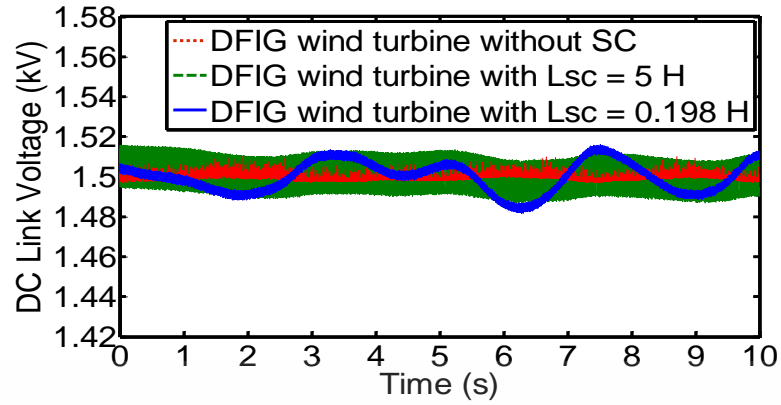
(ค) กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม C

รูปที่ 3.14 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1

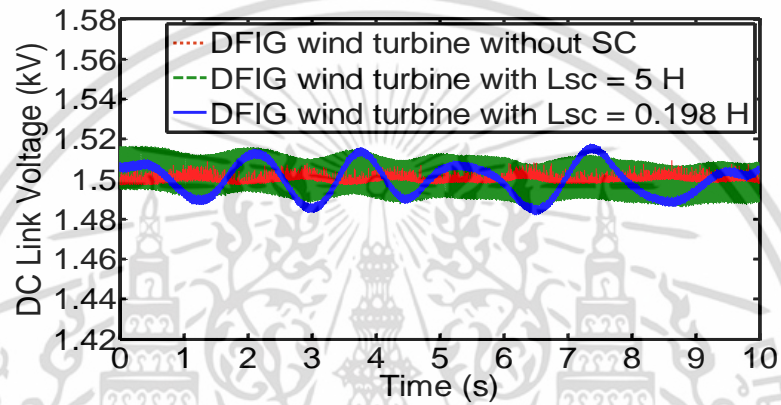


(ก) แรงดันไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

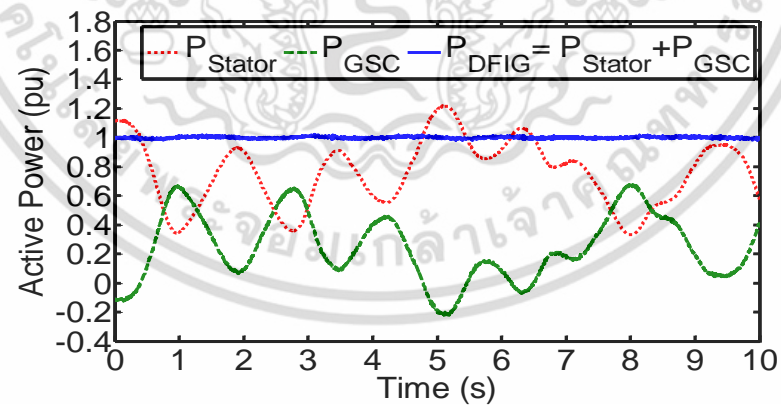


(ข) แรงดันไฟฟ้ากรณีความเร็วลม B



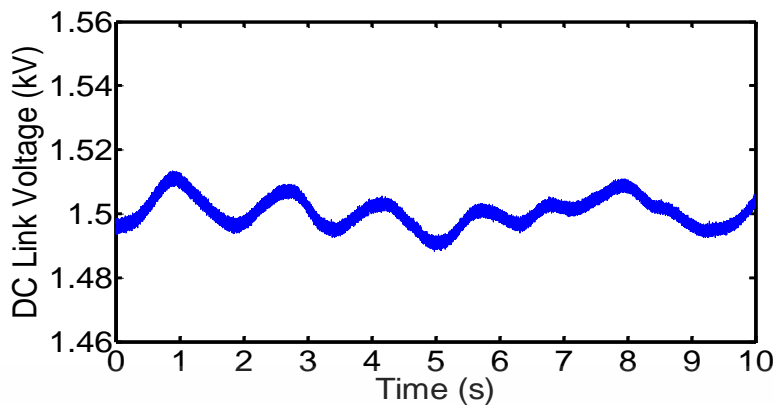
(ค) แรงดันไฟฟ้ากรณีความเร็วลม C

รูปที่ 3.15 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์



(ก) กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



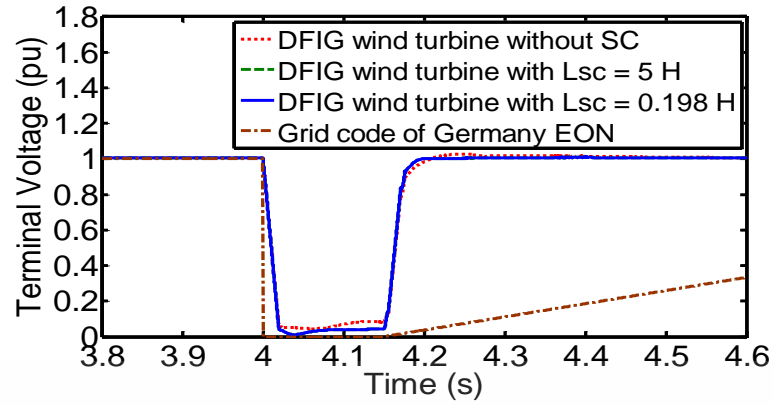
(ข) แรงดันไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A

รูปที่ 3.16 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ที่มีอิทธิพลต่อกำลังไฟฟ้า

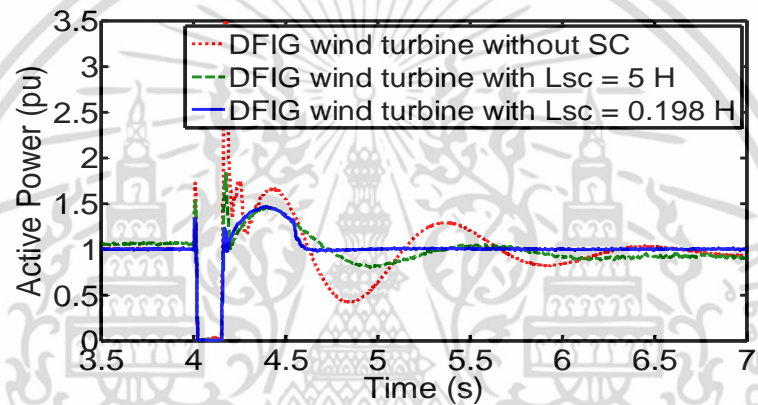
การทดสอบในสภาวะเกิดความผิดพลาดในรูปที่ 3.17 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ซึ่งในช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดจะเกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงที่หน้าบัสของกังหันลม เมื่อสังเกตจากทุกกรณีไม่ว่าจะกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H ก็ตามแรงดันไฟฟ้ายังคงลดลงเกือบเป็น 0 pu ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ Grid Code ของ Germany EON [12] กังหันลมจะต้องทนอยู่กับระบบที่แรงดันไฟฟ้า 0 % ของแรงดันไฟฟ้าปกติเป็นเวลา 150 ms ในที่นี้กังหันลม DFIG ทุกกรณียังคงผ่านมาตรฐานซึ่งจะต้องต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง โดยกังหันลมจะต้องทนสภาวะเกิดความผิดพลาดในระบบหรือข้ามผ่านความผิดพลาดนี้ไปให้ได้

รูปที่ 3.18 แสดงกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 สังเกตได้ว่าช่วงที่เกิดความผิดพลาดกำลังไฟฟ้าจะลดลงเกือบเป็น 0 pu หลังเกิดความผิดพลาดจะเกิดการแกว่งขึ้น ซึ่งหลังเกิดความผิดพลาดกำลังไฟฟ้าจะแกว่งอย่างมากในกรณีกังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด และเมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H จะลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าได้เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างมากหรือเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็วกว่ากรณีอื่น ๆ

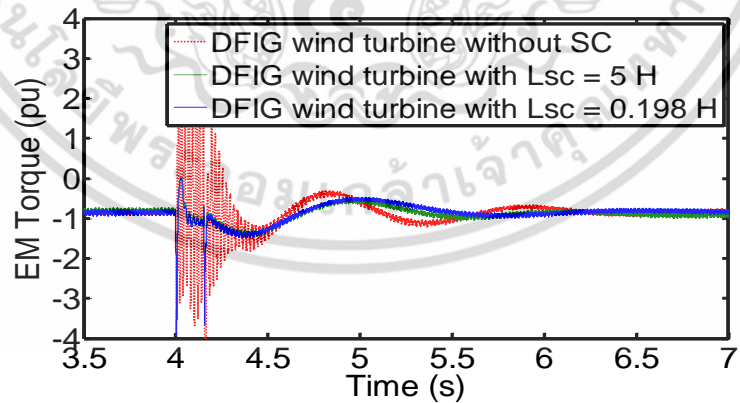
รูปที่ 3.19 แสดงแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque) จะเกิดการแกว่งอย่างมากในกรณีกังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด และเมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดทั้งขนาด 5 H และ 0.198 H จะสามารถลดการแกว่งของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีและยังเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็ว



รูปที่ 3.17 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1

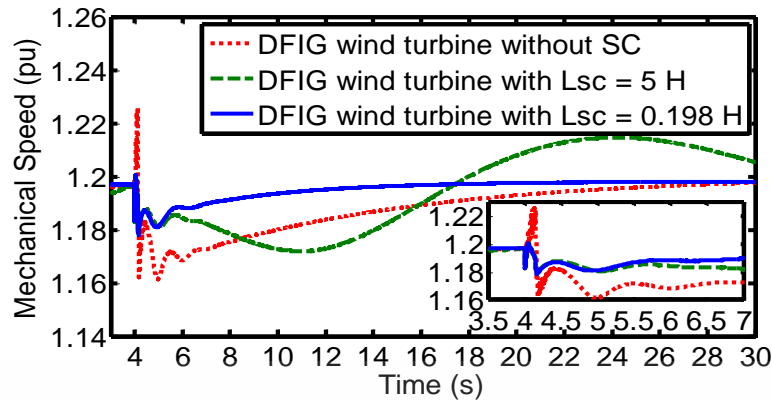


รูปที่ 3.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1



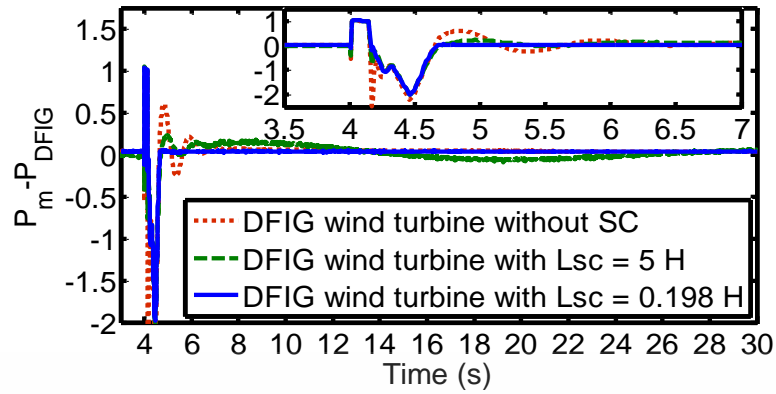
รูปที่ 3.19 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

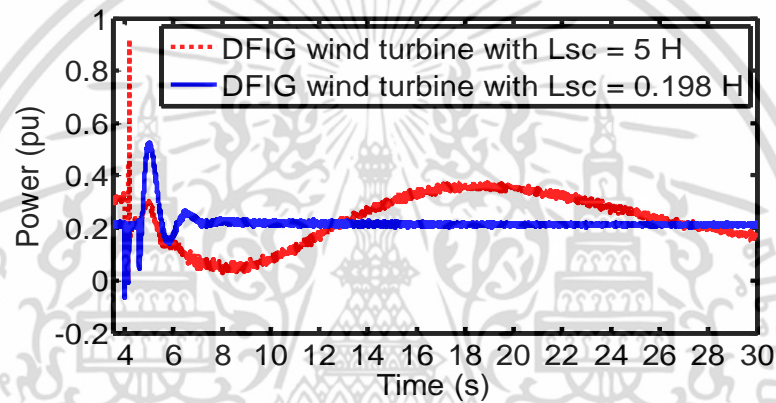


รูปที่ 3.20 ความเร็วโรเตอร์

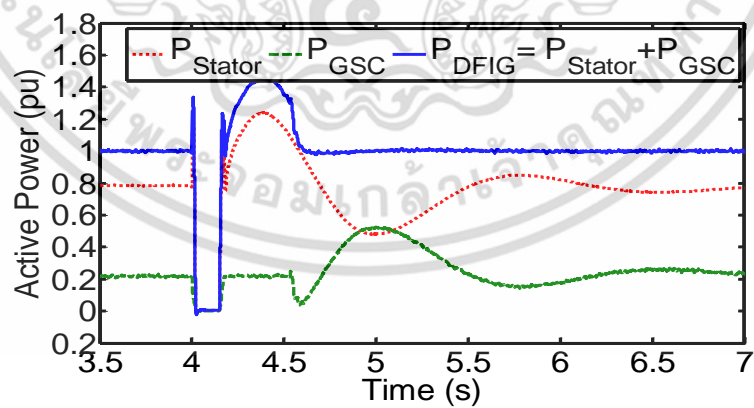
รูปที่ 3.20 แสดงความเร็วโรเตอร์เมื่อเกิดสถานะความผิดพลาดขึ้นในระบบสังเกตจากรูปขยายด้านล่างขวาวินาทีที่ 4 กรณีกักหนลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดความเร็วโรเตอร์จะแกว่งและใช้เวลานานเมื่อเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกักหนลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะเข้าสู่สภาวะได้รวดเร็วกว่ากรณีอื่น ๆ ส่วนในกรณีกักหนลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H แม้ว่าช่วงเกิดความผิดพลาดจะเกิดความเร็วโรเตอร์แกว่งใกล้เคียงกับกรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H ก็ตาม แต่หลังเคลียร์ความผิดพลาดแล้วยังคงเข้าสู่สภาวะปกติได้ช้าและเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการเข้าสู่สภาวะปกติได้ช้าของกรณีกักหนลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H นี้เนื่องมาจากกำลังทางกล P_m และกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG} มีค่าไม่เท่ากันหรือไม่เข้าสู่สภาวะสมดุลกัน ทำให้เกิดความเร็วโรเตอร์แกว่งอย่างต่อเนื่องและสามารถแสดงผลต่างกำลังทางกล P_m และกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG} ได้ดังรูปที่ 3.21 สังเกตได้ว่าหลังจากเคลียร์ความผิดพลาดวินาทีที่ 4.15 s ทั้งกรณีกักหนลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดและกรณีกักหนลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะมีค่าเป็นศูนย์และไม่มี การแกว่งของผลต่างนี้ แต่ในกรณีกักหนลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H หลังเคลียร์ความผิดพลาดยังเกิดการแกว่งของกำลังทางกล P_m และกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG} ซึ่งส่งผลให้ความเร็วโรเตอร์แกว่งอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3.20 การแก้ปัญหาหลังเคลียร์ความผิดพลาดนี้ให้กักหนลม DFIG สามารถเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็วตัวควบคุมดีซีบูตัสเตอร์จะต้องทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า P_{GSC} เพื่อไปชดเชยให้กำลังไฟฟ้า P_{DFIG} เข้าสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว และแสดงกำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาให้ระบบได้ดังรูปที่ 3.22 ซึ่งกำลังไฟฟ้านี้จะรวมกับกำลังไฟฟ้า P_{GSC} เพื่อไปลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า P_{DFIG} สังเกตได้ว่ากรณีกักหนลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H จะจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างไม่สม่ำเสมอทำให้กำลังไฟฟ้า P_{DFIG} ยังคงเกิดการแกว่งอยู่ แต่กรณีกักหนลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาหลังจากวินาทีที่ 4.15 s แล้วเข้าสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว และจะแสดงให้เห็นการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าหลังเคลียร์ความผิดพลาดดังรูปที่ 3.23 กำลังไฟฟ้า P_{GSC} จะชดเชยกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ผลรวมที่ได้กำลังไฟฟ้า P_{DFIG} จะลดการแกว่งลงและเข้าสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 3.21 ผลต่างระหว่างกำลังทางกล P_m กับกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG}

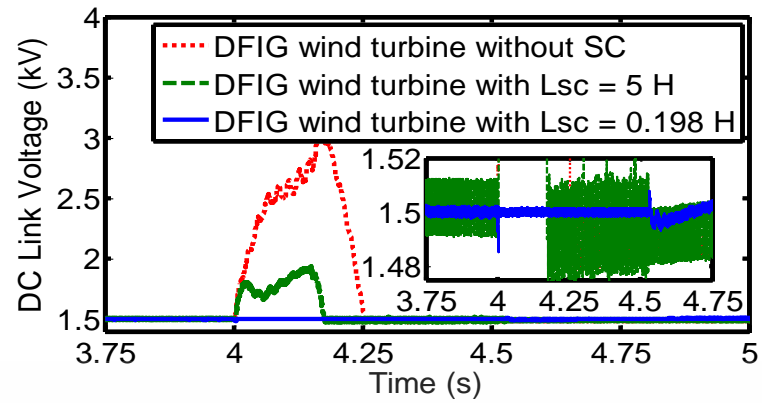


รูปที่ 3.22 กำลังไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

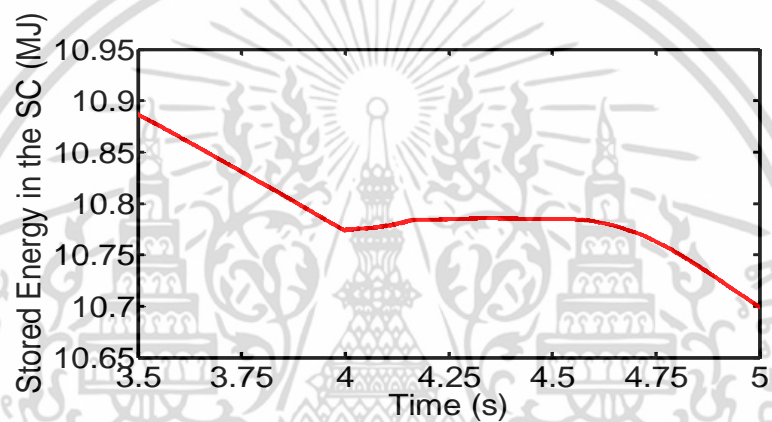


รูปที่ 3.23 กำลังไฟฟ้า

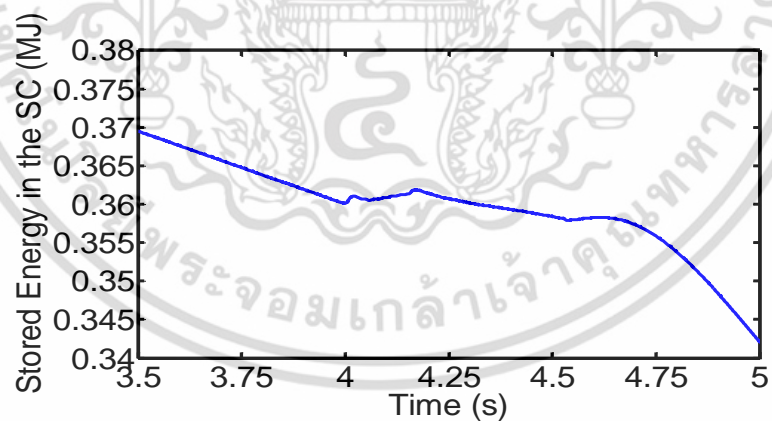
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์



(ก) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H



(ข) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

รูปที่ 3.25 พลังงานไฟฟ้าสะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

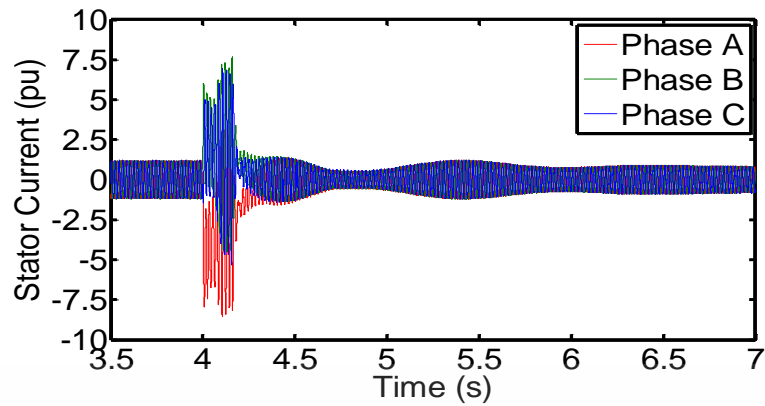
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.24 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ซีลิ่งค์สังเกตได้ว่ากรณีกึ่งหันลม DFIG ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 3,000 V เมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด 5 H แรงดันไฟฟ้าจะลดลงมาเหลือประมาณ 2,000 V และแรงดันไฟฟ้าเกือบจะคงที่เมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด 0.198 H ซึ่งการควบคุมในช่วงเกิดความผิดพลาดนี้จะควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ซีลิ่งค์มีค่าคงที่ที่ 1,500 V เมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินนี้จะถูกสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวดดังรูปที่ 3.25 (ก) และ (ข) สังเกตได้ว่าในรูป 3.25 (ก) กรณีกึ่งหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด 5 H จะสะสมพลังงานในขดลวดตัวนำยิ่งยวดน้อยกว่ากรณีกึ่งหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด 0.198 H ตามรูปที่ 3.25 (ข) ส่งผลให้การลดการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่ซีลิ่งค์ได้แตกต่างกัน

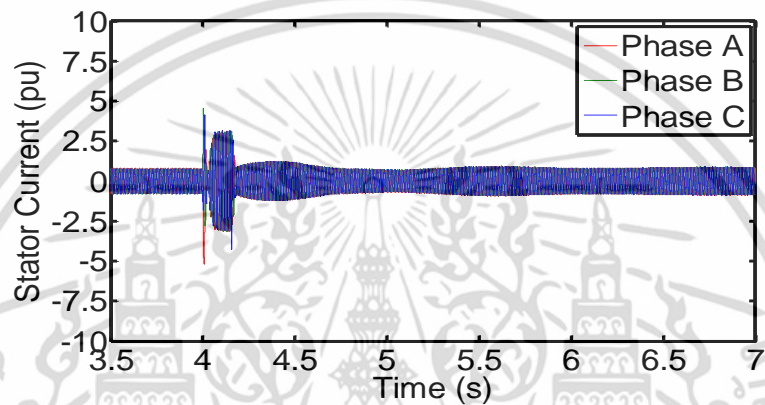
รูปที่ 3.26 (ก) - (ค) แสดงกระแสสเตเตอร์เมื่อกึ่งหันลม DFIG ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดช่วงเกิดความผิดพลาดกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 7.5 pu และเมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H และ 5 H จะสามารถจำกัดกระแสที่เพิ่มขึ้นทางด้านสเตเตอร์ได้เหลือประมาณ 4 pu

รูปที่ 3.27 (ก) - (ค) แสดงกระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดช่วงเกิดความผิดพลาดทั้งกรณีกึ่งหันลม DFIG ไม่ติดตั้งและติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันประมาณ 1 pu แต่เมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H กระแสจะคงที่เสมือนไม่เกิดความผิดพลาดในระบบเพียงแต่หลังเคลียร์ความผิดพลาดจะเกิดกระแสตกลงเป็นคอขวดและเพิ่มขึ้นก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.28 (ก) - (ค) โดยในรูป 3.27 (ค) จะขยายมาเป็นรูปที่ 3.28 (ก) ซึ่งกระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดจะแบ่งเป็น 2 ช่วงการทำงาน คือ A และ B ในช่วง A ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะถูกควบคุมการทำงานตามสภาวะเกิดความผิดพลาด ส่วนในช่วง B ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะถูกควบคุมการทำงานตามสภาวะปกติหรือลดการเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นการทำงานของตัวตรวจจับความผิดพลาดจะสร้างสัญญาณสวิตช์ S_d ขึ้นมาดังรูปที่ 3.28 (ข) ซึ่งสัญญาณ S_d ได้มาจากการสร้างสัญญาณจากบล็อกโมโนสเตเบิล ซึ่งในที่นี้จะถูกกำหนดค่าช่วงเวลา A ไว้ที่ 0.52 s ในช่วง A กระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดจะถูกจำกัดด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดและในเวลาเดียวกันรูปที่ 3.28 (ค) แรงดันไฟฟ้าที่ซีลิ่งค์จะมีค่าเกือบคงที่ที่ 1,500 V และเมื่อสังเกตจากรูปที่ 3.23 กำลังไฟฟ้าทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์จะมีค่าเกือบเป็น 0 pu ซึ่งการกำหนดการทำงานในช่วง A นี้จะครอบคลุมทั้งช่วงเกิดความผิดพลาดและหลังเคลียร์ความผิดพลาดเล็กน้อยเพื่อคำนึงถึงการป้องกันการเกิดความผิดพลาดที่ซ้ำซ้อน และหลังจากเวลาที่ 4.52 วินาที หรือสัญญาณ S_d หยุดทำงานจะเข้าสู่สภาวะปกติตัวควบคุมการทำงานการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าจะกลับมาทำงานในช่วง B เมื่อสังเกตในรูปที่ 3.23 กำลังไฟฟ้า P_{Stator} จะเกิดการแกว่ง ดังนั้น ตัวควบคุมการลดการแกว่งจะเข้ามาควบคุมให้กำลังไฟฟ้า P_{GSC} ขดเซยการแกว่งของกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ส่งผลให้กำลังไฟฟ้า P_{DFIG} นั้นกลับมาราบเรียบดังเดิม และเมื่อสังเกตจากเวลาที่ 4.52 s ในรูปที่ 3.28 (ก) กระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดจะมีทิศทางการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้า P_{GSC} อันเนื่องมาจากขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับ P_{Stator} ส่งผลให้กระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดเวลาที่ 4.52 s นั้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นนั่นเอง

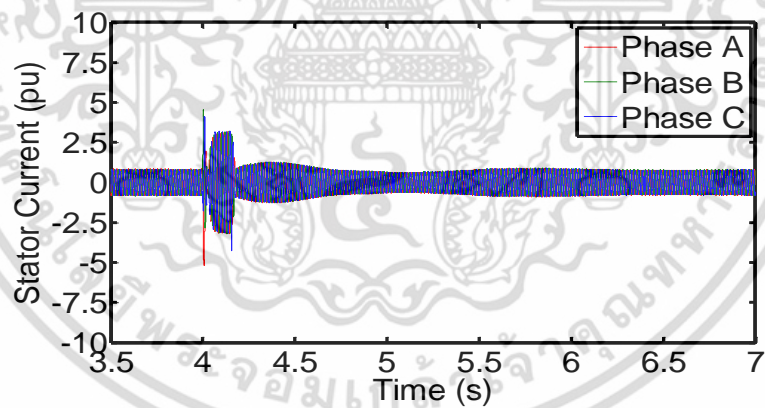
รูปที่ 3.29 (ก) - (ค) แสดงกระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์เมื่อกึ่งหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดทั้งขนาด 5 H และ 0.198 H จะสามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเหลือประมาณ 4.5 pu และเมื่อไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 7.5 pu



(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด



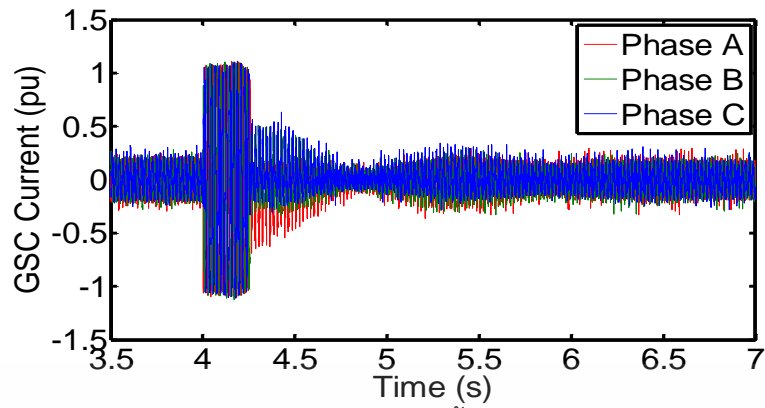
(ข) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H



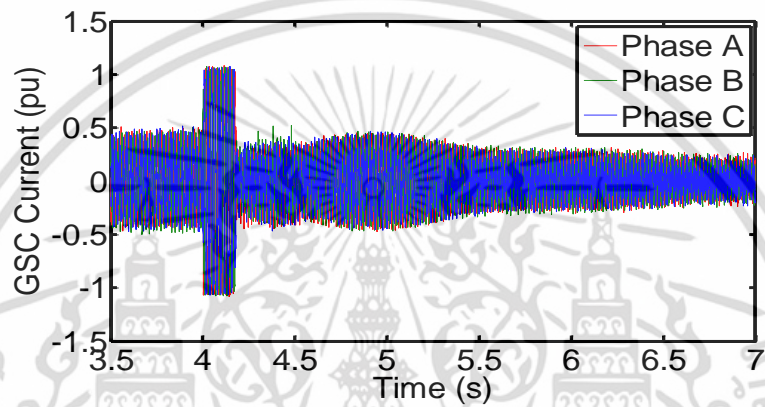
(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

รูปที่ 3.26 กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์

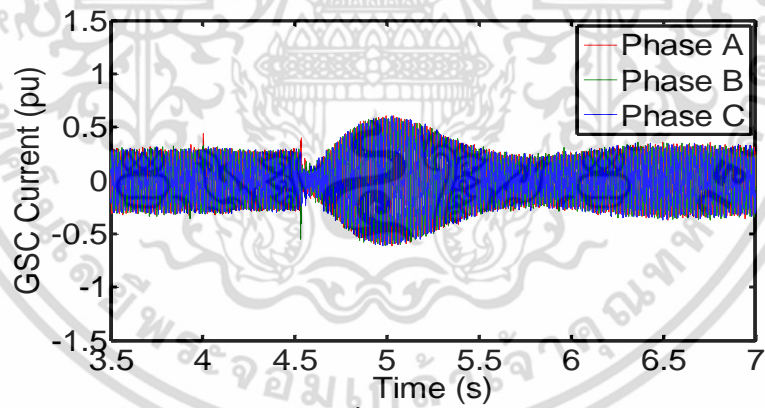
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด



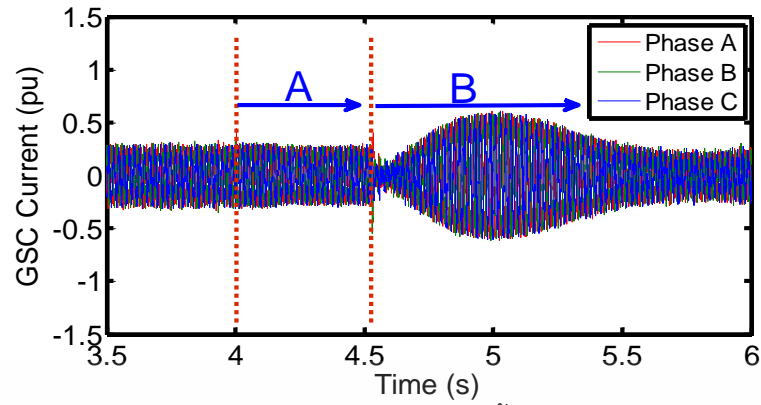
(ข) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H



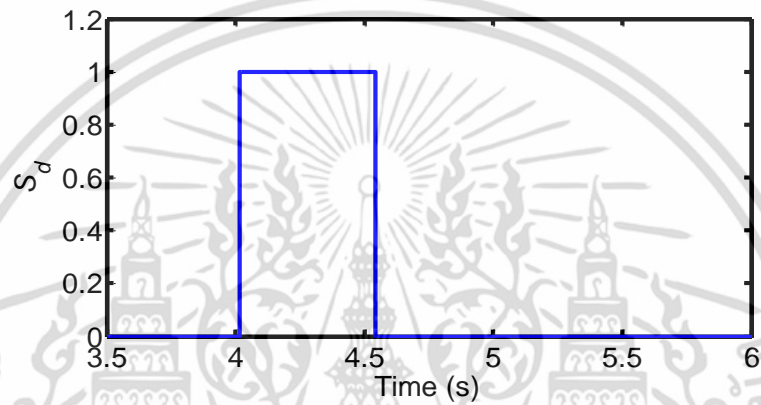
(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

รูปที่ 3.27 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด

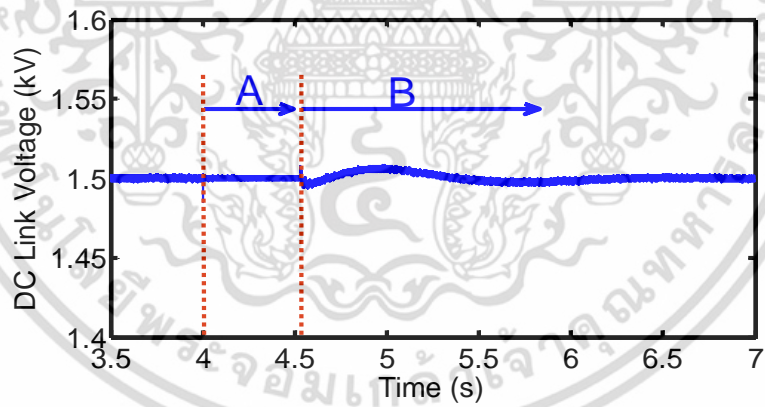
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดเมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H



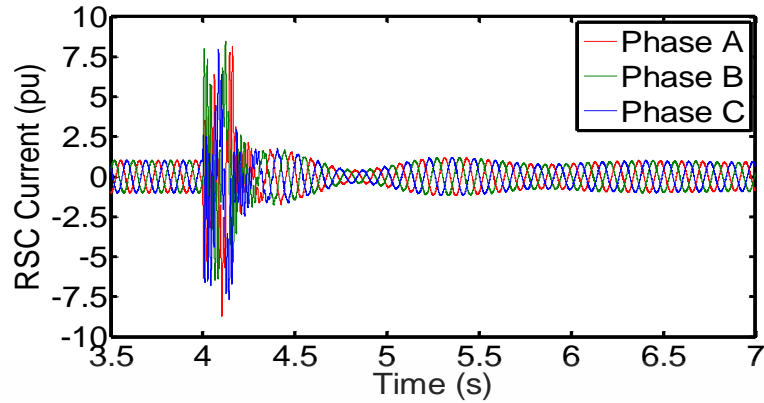
(ข) สัญญาณสวิตช์ S_d



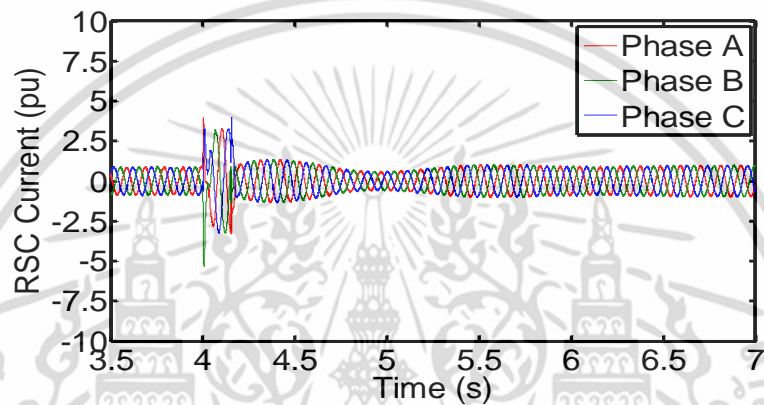
(ค) แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์

รูปที่ 3.28 อธิบายสถานะการทำงานของดีซีบูตตี้คอนเวอร์เตอร์

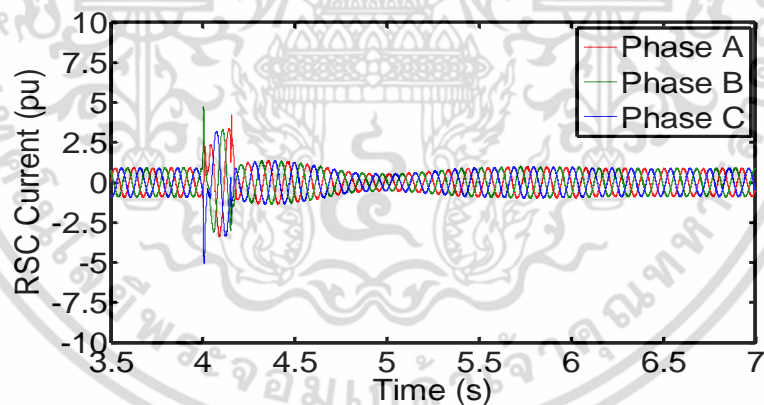
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด



(ข) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H



(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

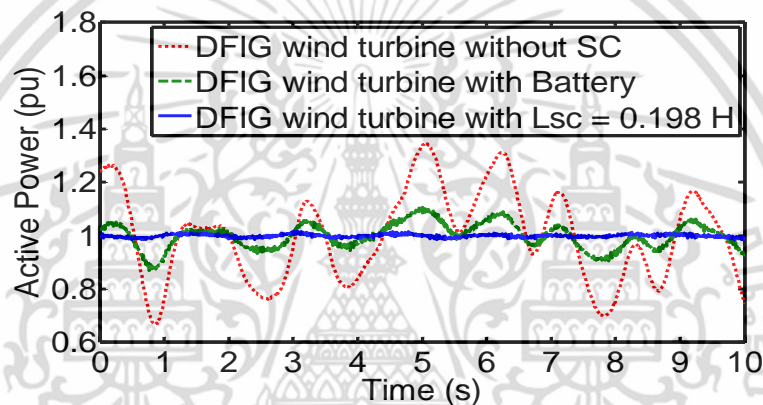
รูปที่ 3.29 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์

กรณีที่ 2 การเปรียบเทียบกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมขนาด 0.198 H กับแบตเตอรี่จะเปรียบเทียบผลการทดสอบในสภาวะปกติ เพื่อแสดงผลการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่กังหันลม DFIG จ่ายให้กับระบบ

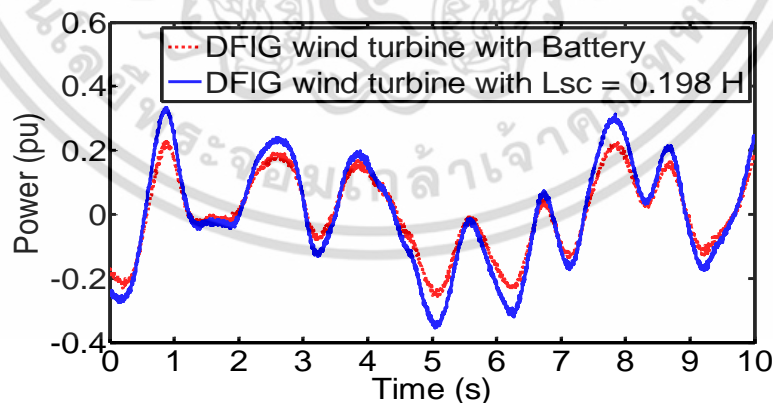
รูปที่ 3.30 แสดงกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ด้วยการทดสอบภายใต้ความเร็วลม A เมื่อกังหันลม DFIG ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูง และเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่กำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงแต่ยังคงลดการแกว่งได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกังหันลม DFIG ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H ที่สามารถลดการแกว่งได้ดีกว่ากรณีอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.31 จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าของกรณีกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะสามารถทำได้มากกว่าและรวดเร็วกว่าแบตเตอรี่จึงทำให้การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้านั้นกรณีกังหันลม DFIG ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H ทำเสถียรภาพได้ดีกว่าแบตเตอรี่

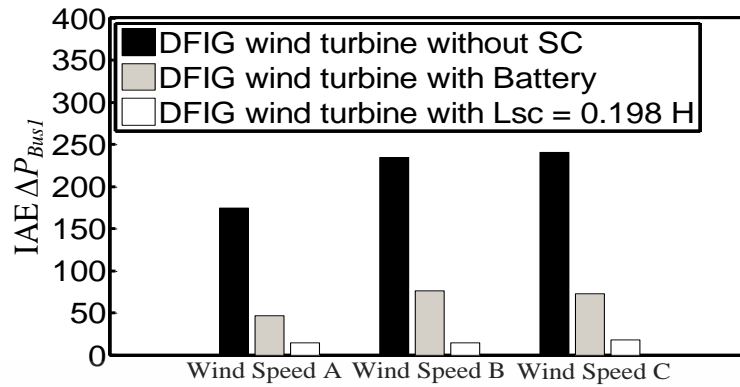
รูปที่ 3.32 แสดงแผ่นภูมิแห่งของ IAE ของกำลังไฟฟ้า ΔP ด้วยการทดสอบภายใต้ความเร็วลม A, B และ C ไม่ว่าจะความเร็วลมรูปแบบใดกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าการติดตั้งแบตเตอรี่ และเพื่อให้เห็นถึงความชัดเจนจะแสดงเป็นตารางเปรียบเทียบค่า IAE ของกำลังไฟฟ้า ΔP ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ตามตารางที่ 3.6 ซึ่งไม่ว่าจะเป็นความเร็วลมรูปแบบใดกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะมีเปอร์เซ็นต์ IAE ของกำลังไฟฟ้า ΔP น้อยกว่าตัวเปรียบเทียบอื่น ๆ



รูปที่ 3.30 กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A



รูปที่ 3.31 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายและรับให้กับระบบของแบตเตอรี่กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด



รูปที่ 3.32 IAE ของกำลังไฟฟ้า ΔP_{Bus1}

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของ IAE ของ ΔP

รูปแบบความเร็วลม	กังหันลมที่ไม่ติดตั้ง ขดลวดตัวนำยิ่งยวด	แบตเตอรี่	กังหันลม DFIG ที่ ติดตั้งขดลวดตัวนำ ยิ่งยวดขนาด 0.198 H
ความเร็วลม A	100 %	26.51 %	8.05 %
ความเร็วลม B	100 %	32.34 %	6.23 %
ความเร็วลม C	100 %	30.20 %	7.36 %

กรณีที่ 3 การเปรียบเทียบกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมขนาด 0.198 H กับ STATCOM จะเปรียบเทียบผลการทดสอบในสภาวะเกิดความผิดปกติ เพื่อแสดงผลการเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG

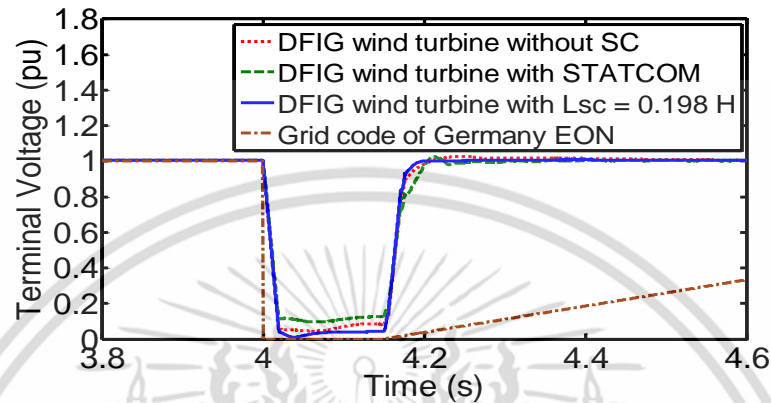
รูปที่ 3.33 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 สังเกตได้ว่าในทุกกรณีแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเกือบเป็น 0 pu ซึ่งยังคงผ่านมาตรฐาน Grid Code ของ Germany EON [12] กังหันลม DFIG ในทุกกรณีจะต้องทนต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาเสถียรภาพให้กับระบบด้วยการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง

รูปที่ 3.34 เป็นแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ในกรณีกังหันลม DFIG ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์จะเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 3,000 V เช่นเดียวกับกรณีติดตั้ง STATCOM แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ยังคงมีค่าประมาณ 3,000 V เช่นเดิม แต่เมื่อกังหันลม DFIG ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะลดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ที่เพิ่มขึ้นเหลือประมาณ 1,500 V หรือเกือบคงที่ตามสภาวะปกติ

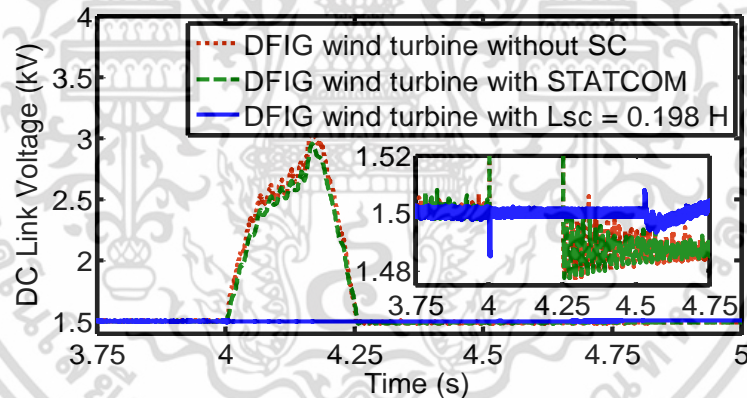
รูปที่ 3.35 - 3.37 แสดงกระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์, กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด และกระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ ตามลำดับ สังเกตได้ชัดเจนว่าการติดตั้ง STATCOM ไม่สามารถลดกระแสที่เพิ่มขึ้นสูงอย่างฉับพลันนี้ได้ แต่ในทางกลับกันกังหันลม DFIG ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะลดกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันได้อย่างรวดเร็ว

และสามารถแสดงเป็นตารางการเปรียบเทียบค่าสูงสุดในรูปเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์, กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์, กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด และกระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ได้ดังตารางที่ 3.7 ซึ่งกรณี STATCOM และกังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

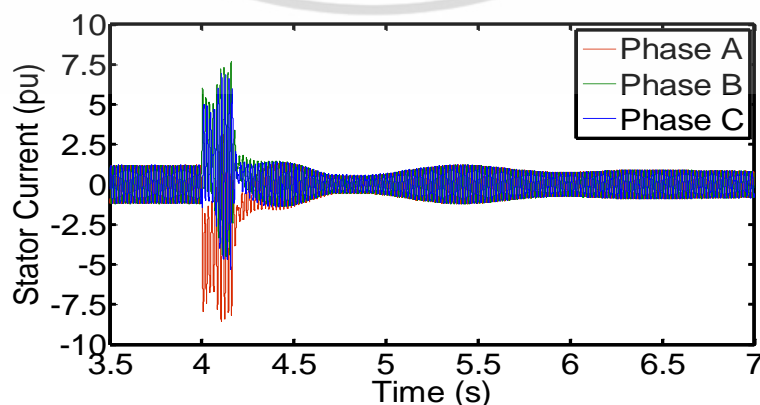
ยิ่งยาว จะมีเปอร์เซ็นต์ที่ใกล้เคียง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยาว ขนาด 0.198 H จะมีเปอร์เซ็นต์ค่าสูงสุดที่น้อยลงมาก ผลการทดสอบบ่งบอกได้ว่า STATCOM ไม่สามารถลดการเกิดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ที่เพิ่มขึ้นอย่างสูงและกระแสไฟฟ้าเกินภายในกังหันลม DFIG ได้ แต่ในตรงกันข้ามการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยาวภายในกังหันลม DFIG จะสามารถลดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์และกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันภายในกังหันลมได้



รูปที่ 3.33 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1

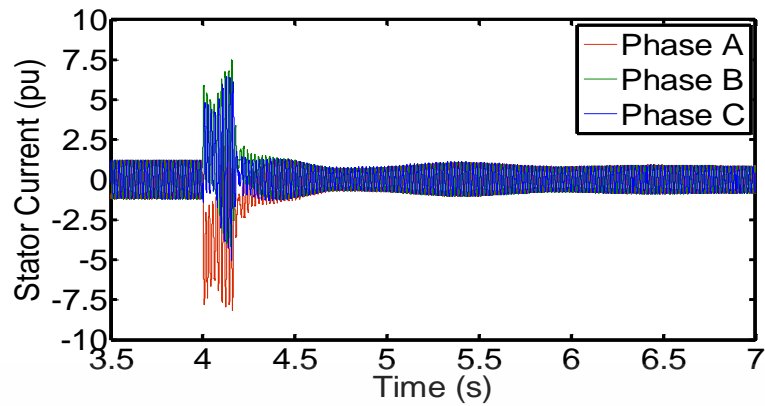


รูปที่ 3.34 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์

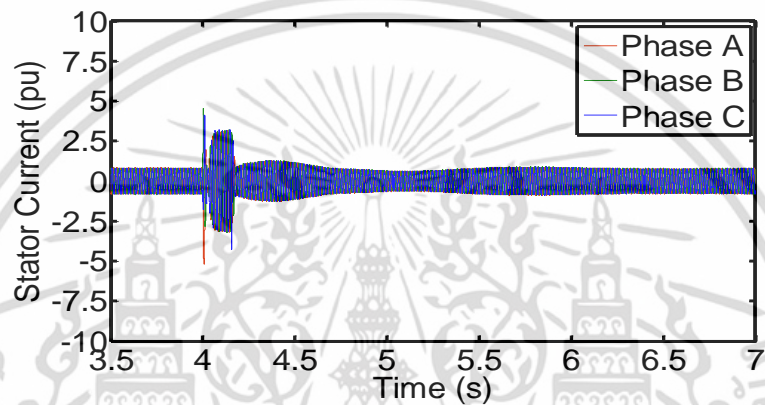


(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

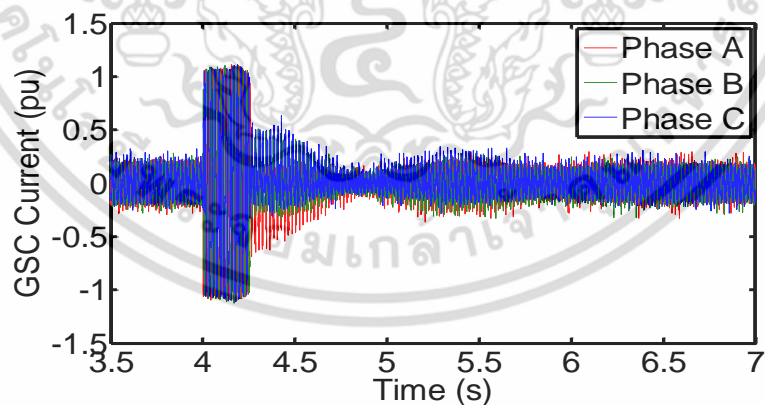


(ข) STATCOM



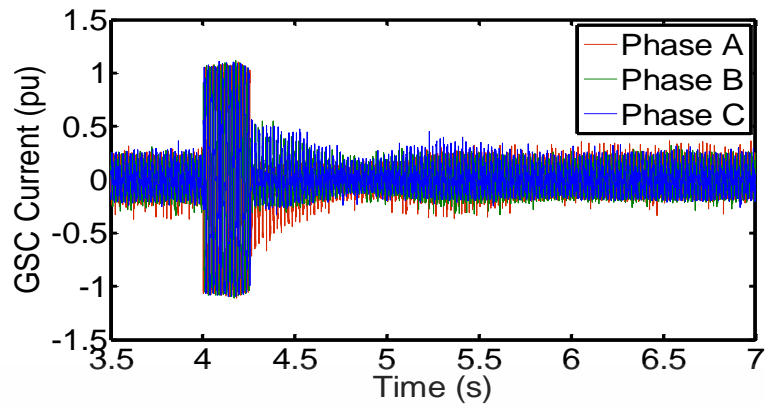
(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำที่ยาวขนาด 0.198 H

รูปที่ 3.35 กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์

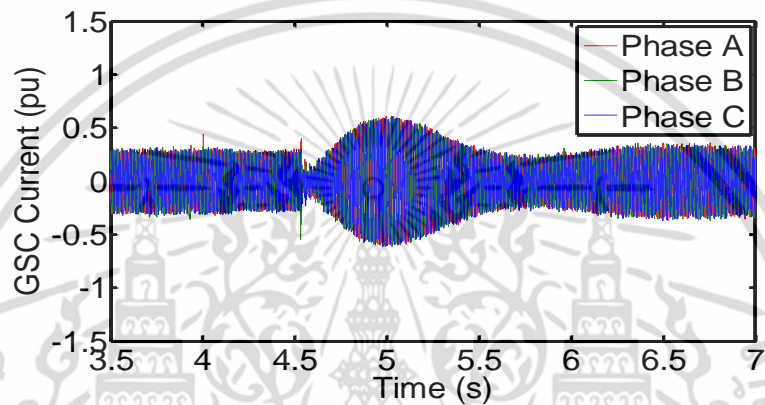


(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำที่ยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

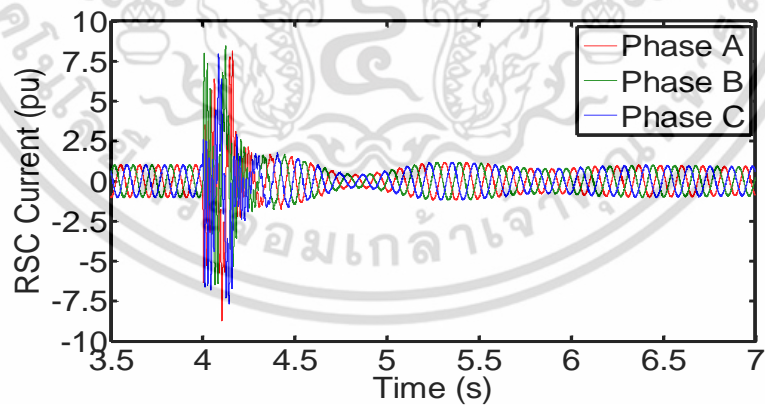


(ข) STATCOM



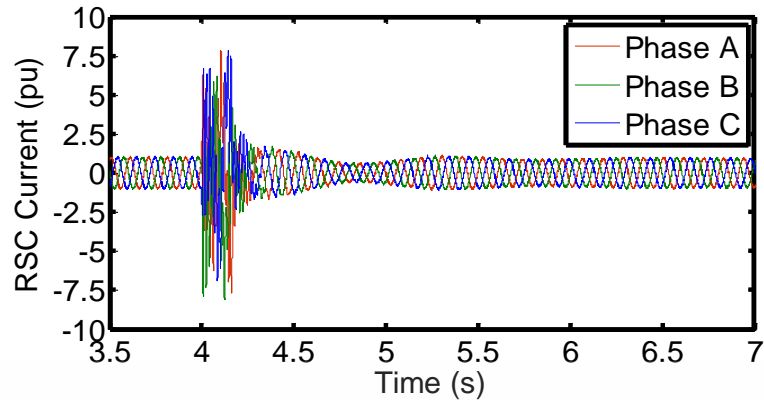
(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

รูปที่ 3.36 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด

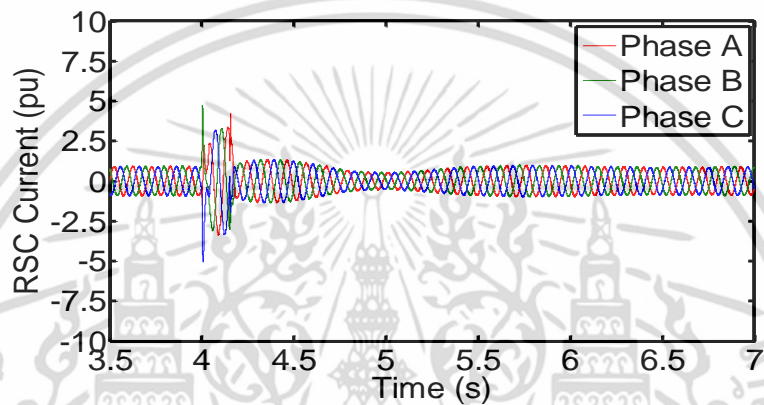


(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) STATCOM



(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

รูปที่ 3.37 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์

ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบค่าสูงสุดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์

พารามิเตอร์	กังหันลมที่ไม่ติดตั้ง ขดลวดตัวนำยิ่งยวด	STATCOM	กังหันลม DFIG ที่ ติดตั้งขดลวดตัวนำ ยิ่งยวดขนาด 0.198 H
แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงก์ (V_{Dlink}) (V)	100 %	90.58 %	0.99 %
กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ (I_{stator}) (pu)	100 %	94.46 %	59.71 %
กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ ด้านกริด (I_{GSC}) (pu)	100 %	96.79 %	35.89 %
กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ ด้านโรเตอร์ (I_{RSC}) (pu)	100 %	92.10 %	53.28 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สรุปผลการทดสอบ

ในบทนี้นำเสนอเทคนิคการหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมที่ติดตั้งระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นในขดลวดที่จำเป็น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ของดีซีฟลูตีสี่คอนเวอร์เตอร์จะได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมพร้อมกันด้วยวิธี PSO ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ากังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมสามารถทำเสถียรภาพทั้งการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหัน DFIG ได้ดีกว่ากังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ไม่เหมาะสม และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองกับแบตเตอรี่ การลดการแกว่งของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมยังสามารถทำเสถียรภาพได้รวดเร็วกว่าแบตเตอรี่อย่างมาก เช่นเดียวกันในผลการจำลองการข้ามผ่านความผิดปกติเมื่อเปรียบเทียบกับ STATCOM การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในกังหันลม DFIG จะสามารถลดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันและกระแสไฟฟ้าเกินได้อย่างรวดเร็ว แต่ในทางตรงกันข้าม STATCOM จะไม่สามารถแก้ปัญหาภายในกังหันลม DFIG นี้ได้เลย

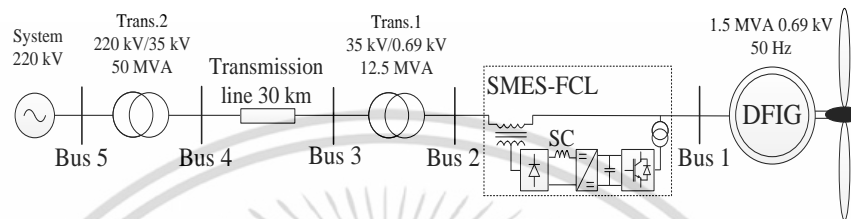
บทที่ 4

อุปกรณ์ SMES-FCL ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพ ของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่อร่วมอยู่

เนื้อหาที่กล่าวในบทนี้จะนำเสนออุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) ที่เหมาะสมด้วยการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) ร่วมกัน เพื่อใช้แก้ปัญหาการข้ามผ่านความผิดพลาดและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบที่มีกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ต่อร่วมอยู่ในสภาวะปกติกังหันลม DFIG จะจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอให้กับระบบซึ่งขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) เพื่อใช้ควบคุมการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสฟอลต์ (Fault Current Limiter: FCL) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพชั่วคราวและความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดของกังหันลม DFIG ในส่วนการออกแบบ SMES-FCL ที่เหมาะสมจะออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) โดยใช้หลักการวิธีฟังก์ชันพลังงานในการออกแบบ ในการทดสอบจะเปรียบเทียบ SMES-FCL กับ SMES และ FCL ด้วยการเปรียบเทียบการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดของกังหันลม DFIG และผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่า SMES-FCL ด้วยขนาด MW และ MJ ที่น้อยกว่าสามารถให้ผลการทำเสถียรภาพที่มากกว่า SMES และ FCL

4.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ศึกษา

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาจะแสดงดังรูปที่ 4.1 [22] จะประกอบด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ขนาดพิกัด 1.5 MVA และอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL)



รูปที่ 4.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้ง SMES-FCL

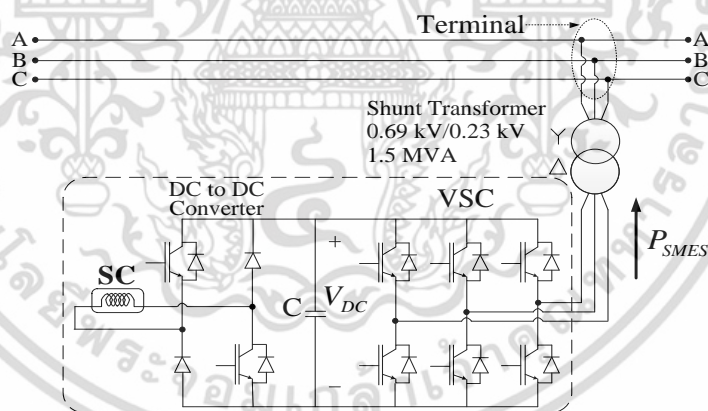
โดยกังหันลม DFIG จะต่อกับระบบไฟฟ้าพิกัดแรงดันไฟฟ้า 220 kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Trans.1 และ Trans.2 และสายส่งยาว 30 km ซึ่งมีพารามิเตอร์ระบบตามตารางที่ 4.1 [22] โดยสถานะปกติกังหันลม DFIG จะจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอให้กับระบบเนื่องจากความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่งและนำไปสู่การเสถียรภาพขึ้นในระบบ และเมื่อเกิดสถานะเกิดความผิดปกติในระบบกังหันลม DFIG จะได้รับผลกระทบจากแรงดันไฟฟ้าหน้าบัสของกังหันลมลดลงและเกิดกระแสไฟฟ้าเกินทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นผลให้กังหันลม DFIG ต้องปลดตัวเองออกจากระบบ ซึ่งการปลดตัวเองของกังหันลมออกจากระบบจะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน Grid Code ในที่นี้จะอ้างถึง Grid Code ของ AWEA (USA) [12] ซึ่งกังหันลมต้องทนต่อสถานะแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ต่ออยู่ลดลง 15 % ของแรงดันไฟฟ้าปกติเป็นระยะเวลา 625 ms เพื่อแก้ปัญหาตามที่กล่าวมา SMES-FCL จะติดตั้งหน้ากังหันลม DFIG ระหว่างบัสที่ 1 และบัสที่ 2 ซึ่ง SMES-FCL จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คืออุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) และอุปกรณ์จำกัดกระแสฟอลต์ (Fault Current Limiter: FCL) แต่ละส่วนจะทำงานแยกอิสระต่อกันแต่ยังคงใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) ร่วมกันอยู่ เมื่อกังหันลม DFIG จ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอให้กับระบบ SMES-FCL ในส่วนของ SMES จะทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นส่วนของ FCL จะทำหน้าที่จำกัดกระแสฟอลต์ โดยระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษานี้ตามรูปที่ 4.1 จะใช้จำลองสถานะปกติที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกังหันลม DFIG และจำลองสถานะเกิดความผิดปกติขึ้นที่บัสที่ 2 เป็นเวลา 150 ms

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดกำลังไฟฟ้า (P)	1.5 MW
พิกัดแรงดันไฟฟ้า (V)	0.69 kV
ความถี่ระบบไฟฟ้า (f)	50 Hz
จำนวน pole (n_p)	2
ค่าความต้านทานของสเตเตอร์และโรเตอร์ (R_s, R_r)	0.003, 0.003 pu
ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์และโรเตอร์ (L_s, L_r)	0.11, 0.07 pu
ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กไนตริง (L_m)	2.5 pu
ค่าคงที่ความเฉื่อย (H)	0.685 s
สายส่งยาว (l)	30 km

4.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES, FCL และ SMES-FCL

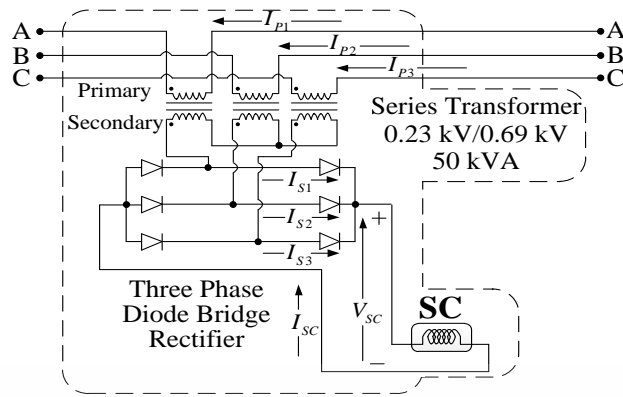
โครงสร้างวงจรทางไฟฟ้าของ SMES ตามรูปที่ 4.2 จะประกอบด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด (SC) ดีซีซูตีสคอนเวอร์เตอร์ (DC to DC Converter) ตัวเก็บประจุ C คอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage source converter: VSC) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบขนาน (Shunt Transformer) ขนาดพิกัด 1.5 MVA อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า 0.69 kV/0.23 kV



รูปที่ 4.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES

โดยคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V_{DC}) และควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal) ของ SMES ที่ต่ออยู่ ส่วนทางด้านดีซีซูตีสคอนเวอร์เตอร์ จะทำหน้าที่ควบคุมพลังงานไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้า P_{SMES} ดังนั้น SMES จะสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ SMES ต่ออยู่ได้โดยการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และควบคุมการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ผ่านทางด้านดีซีซูตีสคอนเวอร์เตอร์ [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 วงจรไฟฟ้าของ FCL

และโครงสร้างวงจรทางไฟฟ้าของ FCL จะแสดงดังรูปที่ 4.3 [33] ประกอบด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด SC วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์ (Three Phase diode bridge rectifier) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series Transformer) โดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่จำกัดกระแสฟอลต์เมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงขึ้นในระบบ วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์จะทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งกระแสไฟฟ้าตรงนี้จะไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด และหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้า โดยหม้อแปลงไฟฟ้าทางขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary) จะต่อกับระบบกำลังไฟฟ้าโดยตรง และขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary) จะต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์ [33] และถ้ากำหนดให้กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (I_p) คือ I_{p1} , I_{p2} และ I_{p3} และกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (I_s) คือ I_{s1} , I_{s2} และ I_{s3} และกำหนดให้อัตราส่วนหม้อแปลงคือ a จะสามารถเขียนสมการอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{I_{p1}}{I_{s1}} = \frac{I_{p2}}{I_{s2}} = \frac{I_{p3}}{I_{s3}} = \frac{1}{a} \quad (4.1)$$

และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (I_{sc}) จะสามารถหาได้จาก

$$I_{sc} = \sqrt{2}I_s = a\sqrt{2}I_p \quad (4.2)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม (V_{sc}) สามารถหาได้จาก

$$V_{sc} = L_{sc} \frac{dI_{sc}}{dt} \quad (4.3)$$

เมื่อกำหนดให้ L_{sc} คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

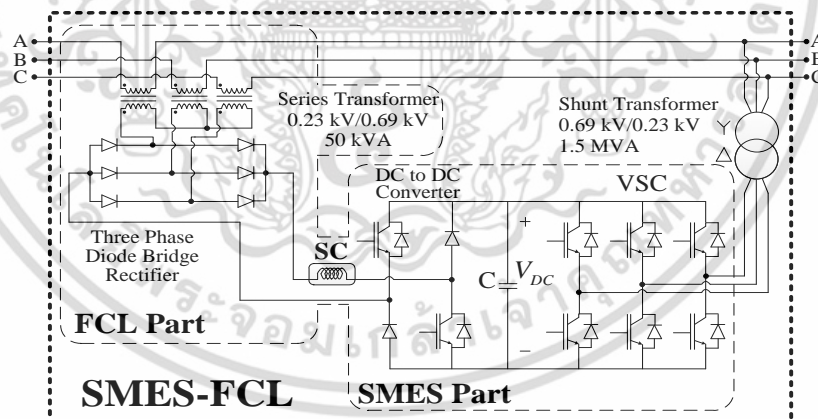
ตามสมการที่ (4.2) และ (4.3) สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติและขดลวดตัวนำยิ่งยวดมีขนาดค่าความเหนี่ยวนำค่อนข้างใหญ่กระแสไฟฟ้า I_{SC} ที่ไหลผ่านขดลวดจะมีคงที่ หรือ dI_{SC}/dt มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้น สมการที่ (4.3) แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม V_{SC} จะมีค่าน้อยมาก แต่ในทางกลับกัน ถ้าเกิดความผิดปกติหรือขึ้นในระบบกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ทำให้กระแสไฟฟ้า I_{SC} มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม V_{SC} จะปรากฏขึ้นในระบบอย่างฉับพลันและเปรียบเสมือนมีอิมพีแดนซ์แทรกเข้าไปในระบบอย่างรวดเร็ว และสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ได้จากสมการ

$$Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (4.4)$$

และเมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์จากทางด้านระบบกำลังไฟฟ้าหรือด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุกรมจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Z' = \frac{V_P}{I_P} = \frac{aV_{SC}}{I_{SC}/a} = a^2 Z_{SC} \quad (4.5)$$

เมื่อกำหนดให้ V_P คือแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (V) ดังนั้น อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นอีกปัจจัยสำคัญในการจำกัดกระแสฟอลต์ในระบบ ซึ่งการจำกัดกระแสฟอลต์ของ FCL นี้จะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ



รูปที่ 4.4 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL

เมื่อนำโครงสร้างของ SMES และ FCL มาประยุกต์ใช้งานร่วมกันเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดของการใช้งานขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นโครงสร้างวงจรทางไฟฟ้าของ SMES-FCL โดยส่วนของ SMES สามารถสะสมพลังงานเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และส่วนของ FCL สามารถจำกัดกระแสฟอลต์เพื่อใช้ยับยั้งกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างฉับพลันในช่วง

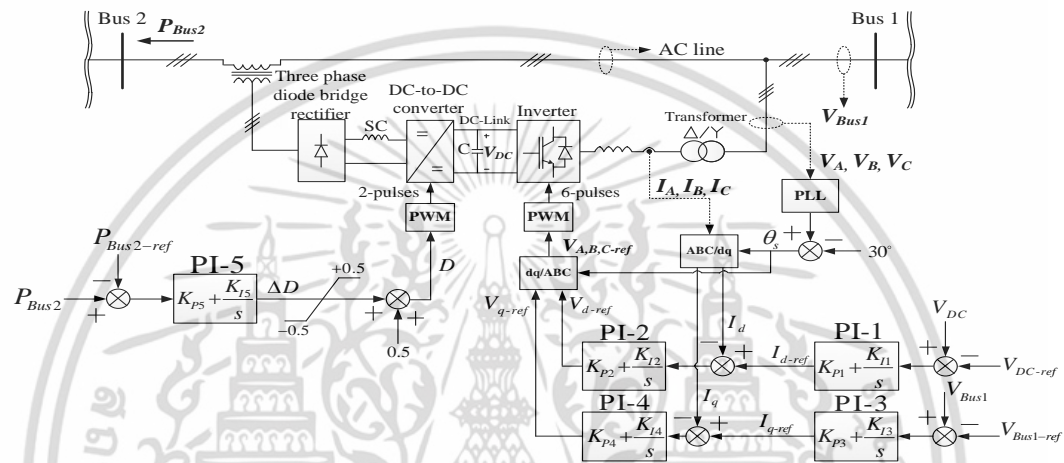
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ ซึ่งโครงสร้างทั้งสองยังคงใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันอยู่ จึงทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดของการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาใช้ทำเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า

4.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด

4.3.1 การออกแบบตัวควบคุม SMES และ SMES-FCL

โดยเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.2 และ 4.4 โครงสร้างของ SMES และ SMES-FCL ยังคงมีส่วนที่คล้ายกัน และเช่นเดียวกันการควบคุมของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) และดีซีบูตีชีคอนเวอร์เตอร์ยังคงเหมือนกันอีกด้วยตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างตัวควบคุมของ SMES และ SMES-FCL

โดยเฟสล็อกลูป (Phase lock loop: PLL) จะใช้วัดสัญญาณมุมของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (V_A, V_B, V_C) ที่ด้านสตาร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าและเอาต์พุตที่ได้จะนำไปหักลบกับมุม 30 องศา และผลต่างนี้จะเป็นมุม θ_s ซึ่งจะเป็นเฟสเดียวกับมุมทางด้านเดลต้าของหม้อแปลงไฟฟ้าและจะใช้เป็นมุม θ_s เป็นมุมอ้างอิงในการแปลงพิกัดจากกระแสไฟฟ้าสามเฟส I_A, I_B และ I_C ไปเป็นกระแสไฟฟ้าสองเฟส I_d และ I_q

โดยตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) PI-1 จะใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V_{DC}) และจะสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง I_{d-ref} ส่วนทางด้านตัวควบคุมพีไอ PI-2 จะใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง I_{q-ref} ซึ่งกระแสไฟฟ้าอ้างอิงทั้ง I_{d-ref} และ I_{q-ref} จะนำไปหักลบกับกระแสจริง I_d และ I_q แล้วนำไปเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ PI-3 และ PI-4 ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จะเป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง V_{d-ref} และ V_{q-ref} และนำไปแปลงสัญญาณกลับเป็นแรงดันไฟฟ้าสามเฟสอ้างอิง $V_{A,B,C-ref}$ และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม (Triangular carrier waveform) ด้วยความถี่ 1980 Hz เพื่อใช้สร้างสัญญาณขับนำสวิทช์ด้วยวิธีการสร้างสัญญาณมอดูเลตตามความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) สัญญาณขับนำสวิทช์นี้จะใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนตัวควบคุมพีไอ PI-5 จะใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่บัสที่ 2 (P_{Bus2}) ด้วยการวัดสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสที่ 2 (P_{Bus2}) เปรียบเทียบกับสัญญาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิง $P_{Bus2-ref}$ โดยผลต่างที่ได้จะเป็นอินพุตให้ตัวควบคุมพีไอ PI-5 และเอาต์พุตที่ได้จะเป็นค่าเบี่ยงเบนดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าดิฟเฟอเรนเชียล D และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจะได้สัญญาณควบคุมสวิตช์สำหรับดิซิปูลิซีคอนเวอร์เตอร์ เมื่อค่าดิฟเฟอเรนเชียล D มีค่ามากกว่า 0.5 พลังงานไฟฟ้าจากระบบจะชาร์จสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวด ในทางกลับกัน ถ้าค่าดิฟเฟอเรนเชียล D มีค่าน้อยกว่า 0.5 พลังงานไฟฟ้าจะดิสชาร์จออกจากขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปสู่ระบบ

4.3.2 เทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุด

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุดด้วยการค้นหาค่าความเหนี่ยวนำ กระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสมโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นอย่างรุนแรงในระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นสาเหตุให้เกิดพลังงานจลน์สะสมในโรเตอร์ของกังหันลม DFIG และหลังเกิดความผิดปกติพลังงานจลน์จะต้องคายออกสู่ระบบ อย่างไรก็ตามเพื่อให้กังหันลมสามารถกลับสู่สภาวะปกติได้รวดเร็ว เพื่อจะยับยั้งการสะสมเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์ในโรเตอร์ SMES-FCL ในส่วนของ FCL จะทำหน้าที่แทรกหรือเชื่อมต่อแบบอนุกรมกับระบบอย่างอัตโนมัติเพื่อจำกัดกระแสฟลัดและลดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าหน้าบัสของกังหันลม และยังช่วยลดการลดลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้ การเพิ่มเสถียรภาพชั่วคราวและความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG จะสามารถทำได้ด้วยการติดตั้ง SMES-FCL

เพื่อให้ตรงตามแนวความคิดข้างต้น หลักการฟังก์ชันพลังงาน [37] จะนำมาใช้ในบทนี้ โดยฟังก์ชันพลังงาน (E_f) ที่เวลาเคลียร์ความผิดปกติจะแสดงด้วยสมการดังนี้

$$E_f = KE_f(\omega_f) + PE_f(\delta_f) \quad (4.6)$$

โดยที่

$KE_f(\omega_f)$	คือพลังงานจลน์ที่เวลาเคลียร์ความผิดปกติ (J)
$PE_f(\delta_f)$	คือพลังงานศักย์ที่เวลาเคลียร์ความผิดปกติ (J)
ω_f	คือความเร็วโรเตอร์ที่เวลาเคลียร์ความผิดปกติ (rpm)
δ_f	คือมุมโรเตอร์ที่เวลาเคลียร์ความผิดปกติ (degree)

ตามสมการที่ (4.6) เมื่อพลังงาน E_f มีค่าน้อยที่สุดแล้วการเพิ่มขึ้นทั้งความเร็วโรเตอร์และมุมของโรเตอร์ก็จะน้อยลงตาม [37] และเนื่องจากเวลาเกิดความผิดปกติจะเป็นช่วงเวลาที่สั้นมาก ๆ ทำให้มุมของโรเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเป็นผลให้พลังงานศักย์ $PE_f(\delta_f)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมโรเตอร์ δ_f จะมีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้น พลังงานจลน์ $KE_f(\omega_f)$ ซึ่งสามารถใช้อธิบายความเร็วโรเตอร์จะนำมาใช้พิจารณาแทนฟังก์ชันพลังงาน E_f และจะสามารถแสดงสมการพลังงานจลน์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$KE_f = \frac{1}{2}M(\omega_f - \omega_0)^2 \quad (4.7)$$

โดยที่

- M คือค่าคงที่ความเฉื่อยของโรเตอร์ (s)
 ω_0 คือความเร็วโรเตอร์ที่เวลาเกิดความผิดพลาด (rpm)
 ω_f คือความเร็วโรเตอร์ที่เวลาเคลียร์ความผิดพลาด (rpm)

ในช่วงเกิดความผิดพลาดกำลังทางกลจะสามารถสมมติให้มีค่าคงที่เนื่องจากเป็นระยะเวลาสั้น ๆ และความเร็วโรเตอร์ที่เวลาเคลียร์ความผิดพลาดจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\omega_f = \omega_0 + \alpha t_f \quad (4.8)$$

โดยที่

- t_f คือเวลาเคลียร์ความผิดพลาดออกจากระบบโดยขึ้นอยู่กับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (s)
 α คืออัตราเร่งของโรเตอร์ (m/s^2)

ซึ่งอัตราเร่ง α ของโรเตอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$\alpha = (P_{mf} - P_{ef}) / M \quad (4.9)$$

โดยที่

- P_{mf} คือกำลังทางกลของกังหันลม DFIG ที่เวลาเกิดความผิดพลาด (W)
 P_{ef} คือกำลังทางไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่เวลาเกิดความผิดพลาด (W)

เมื่อแทนสมการที่ (4.9) ลงใน (4.8) จะได้

$$\omega_f = \omega_0 + \left(\frac{P_{mf} - P_{ef}}{M}\right)t_f \quad (4.10)$$

และแทนสมการที่ (4.10) ลงใน (4.7) จะได้

$$KE_f = \left(\frac{M\alpha^2}{2}\right)t_f^2 = D_k t_f^2 \quad (4.11)$$

เมื่อ D_k คือค่าชี้วัดของการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์สะสมในโรเตอร์ของกังหันลม DFIG ในช่วงเกิดความผิดพลาด ดังนั้น การหาค่าน้อยที่สุดของ D_k จะเป็นการทำให้ฟังก์ชันพลังงาน E_f มีค่าน้อยสุดตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในสภาวะปกติการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะพิจารณาจากวิธีหาค่าที่น้อยที่สุดของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) ของกำลังไฟฟ้าบัสที่ 2 (P_{Bus2}) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } IAE = \int_{t_0}^{t_s} |\Delta P_{Bus2}| dt \quad (4.12)$$

โดยที่

ΔP_{Bus2} คือผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสที่ 2 (P_{Bus2}) และกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ($P_{Bus2-ref}$)

t_0 คือเวลาเริ่มต้นการจำลอง (s)

t_f คือเวลาสิ้นสุดการจำลอง (s)

ส่วนการพิจารณาพลังงานสะสมเริ่มต้น (E_{SC0}) จะหาค่าที่น้อยที่สุดของพลังงานสะสมเริ่มต้นในการทำเสถียรภาพ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \quad (4.13)$$

เมื่อกำหนดให้ I_{SC0} คือกระแสเริ่มต้นที่สะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวด (A) โดยในที่นี้ค่าความเหนี่ยวนำ L_{SC} และกระแสเริ่มต้น I_{SC0} จะถูกค้นหาค่าให้เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะได้ค่าพลังงานสะสมเริ่มต้นที่มีค่าน้อยที่สุด

จากสมการที่ (4.11) - (4.13) สามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันสมการใหม่เป็นฟังก์ชันรวมวัตถุประสงค์เพื่อใช้ออกแบบ SMES-FCL ได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } D_k + IAE + E_{SC0} \quad (4.13)$$

การหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (4.13) จะใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [23] เพื่อที่จะปรับหาค่า L_{SC} , I_{SC0} , K_{P1} , K_{P2} , K_{P3} , K_{P4} , K_{P5} , K_{I1} , K_{I2} , K_{I3} , K_{I4} และ K_{I5} ให้มีความเหมาะสมโดยอัตโนมัติพร้อมกัน และกระบวนการค้นหาค่าตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการออกแบบไว้ดังนี้

ค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) ทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 20 H

ค่ากระแสเริ่มต้น (I_{SC0}) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 10 kA

ค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{P1} , K_{P2} , K_{P3} , K_{P4} และ K_{P5} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 20

ค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{I1} , K_{I2} , K_{I3} , K_{I4} และ K_{I5} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 20

ส่วนพารามิเตอร์ของขบวนการวิธี PSO จะกำหนดไว้ดังนี้

จำนวนอนุภาค 50 ตัว

จำนวนรอบของการค้นหา 100 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาในบทนี้จะนำ SMES-FCL เปรียบเทียบกับไม่ติดตั้งตัวควบคุม (No controller) SMES และ FCL โดย SMES มีค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) 20 H ค่ากระแสเริ่มต้น (I_{SC0}) 1.5 kA และ พารามิเตอร์พีไอจะได้รับการออกแบบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } D_k + IAE \quad (4.14)$$

การหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (4.14) จะใช้วิธี PSO ดังเช่นเดียวกับของ SMES-FCL และ มีการกำหนดกระบวนการค้นหาคำตอบของพารามิเตอร์ดังนี้

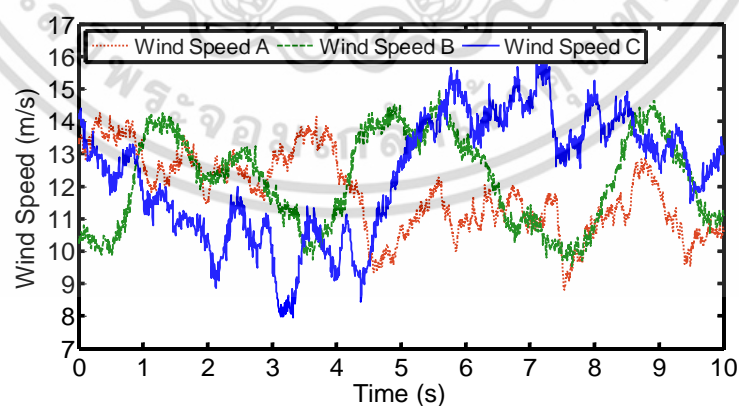
ค่าคงที่ตัวควบคุมพี $K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}, K_{P4}$ และ K_{P5} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 20

ค่าคงที่ตัวควบคุมไอ $K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}, K_{I4}$ และ K_{I5} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 20

และการเปรียบเทียบกับ FCL โดย FCL จะมีค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) 20 H

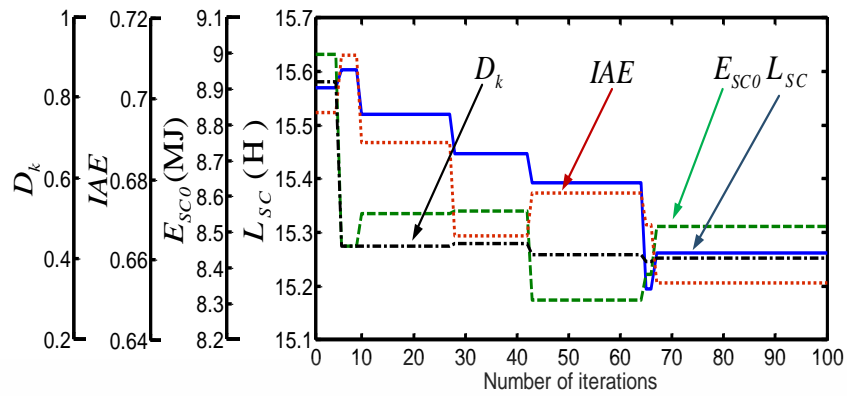
4.4 ผลการจำลองและทดสอบ

ในการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ SMES-FCL จะจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [31] โดยออกแบบภายใต้ความเร็วลม Wind speed A ดังรูปที่ 4.6 และจำลองการเกิดความผิดปกติที่บัสที่ 3 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 3 s ตามระบบกำลังไฟฟ้ารูปที่ 4.1 ผลลัพธ์การค้นหาหาค่าคำตอบของสมการที่ (4.13) จะสามารถแสดงการลู่เข้าหาค่าคำตอบของค่าน้อยที่สุดของผลคำตอบแต่ละเทอมได้ดังรูปที่ 4.7 และผลคำตอบของพารามิเตอร์ SMES-FCL ที่ค้นหาจะแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับ SMES ซึ่ง SMES จะออกแบบพารามิเตอร์พีไอด้วยสมการที่ (4.14) และแสดงผลคำตอบตามตารางที่ 4.2 เพียงแต่จะกำหนดขนาดค่าความเหนี่ยวนำและกระแสเริ่มต้นของ SMES นี้ให้มีขนาดที่ใหญ่กว่าและพลังงานสะสมเริ่มต้นมากกว่า SMES-FCL ในการทำเสถียรภาพ และเช่นเดียวกันกับ FCL ที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับ จะกำหนดค่าความเหนี่ยวนำให้มีขนาดที่ใหญ่กว่า SMES-FCL เช่นกัน



รูปที่ 4.6 ความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

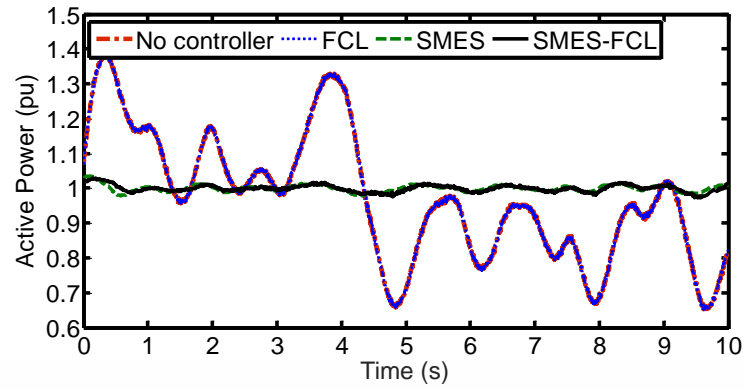


รูปที่ 4.7 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ D_k , IAE , E_{SC0} และ L_{SC}

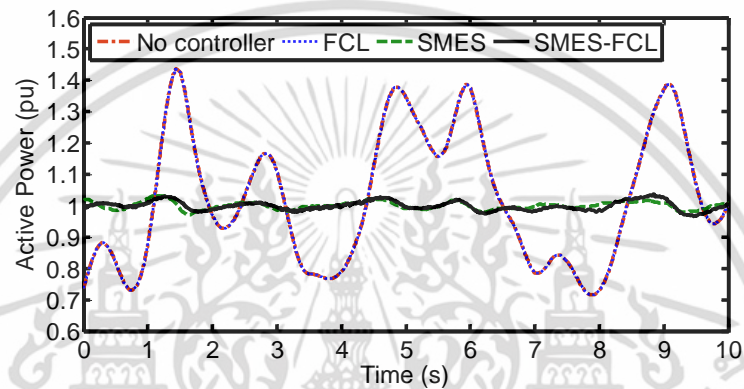
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของ FCL SMES และ SMES-FCL

พารามิเตอร์	FCL	SMES	SMES-FCL
L_{SC} (H)	20	20	15.26
I_{SC0} (kA)	-	1.5	1.0574
E_{SC0} (MJ)	-	22.5	8.53
K_{P1}, K_{I1}	-	6.3649, 11.967	1.1219, 3.4334
K_{P2}, K_{I2}	-	2.5741, 14.203	7.9378, 3.2619
K_{P3}, K_{I3}	-	8.3845, 11.887	0.9771, 6.9519
K_{P4}, K_{I4}	-	3.7713, 4.4561	1.7296, 3.4334
K_{P5}, K_{I5}	-	0.3716, 6.5590	1.2207, 5.4161

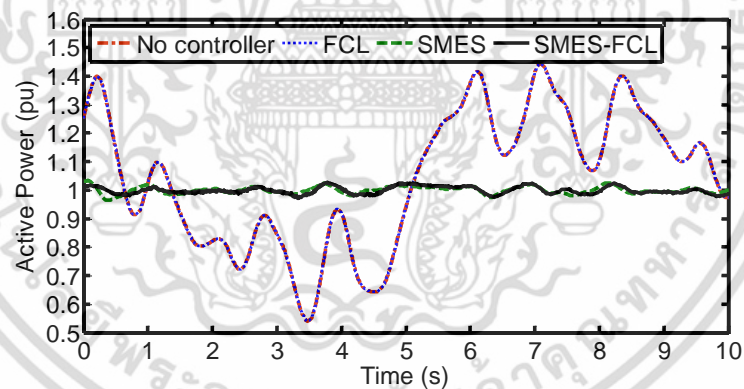
ผลการจำลองระบบในสภาวะปกติที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.8 (ก) - (ค) เป็นกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2 ที่จำลองภายใต้ความเร็วลม A, B และ C ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งทุก ๆ ภายใต้ความเร็วลมกำลังไฟฟ้าจะแกว่งอย่างสูงเมื่อไม่ติดตั้งตัวควบคุมและติดตั้ง FCL แต่ในทางกลับกันทั้ง SMES และ SMES-FCL สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อแสดงผลการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในรูปแบบแผนภูมิแท่งของ IAE ตามรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ชัดเจนว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ FCL จะเกิดค่า IAE ที่สูงมากและใกล้เคียงกัน ส่วนกรณี SMES และ SMES-FCL ค่าของ IAE จะลดลงอย่างมากและมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น SMES และ SMES-FCL สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน แต่ FCL จะไม่สามารถทำการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องมาจากไม่สามารถทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าได้



(ก) กรณีความเร็วลม A



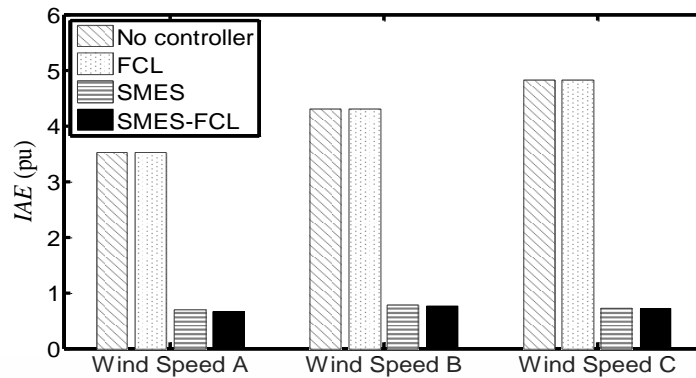
(ข) กรณีความเร็วลม B



(ค) กรณีความเร็วลม C

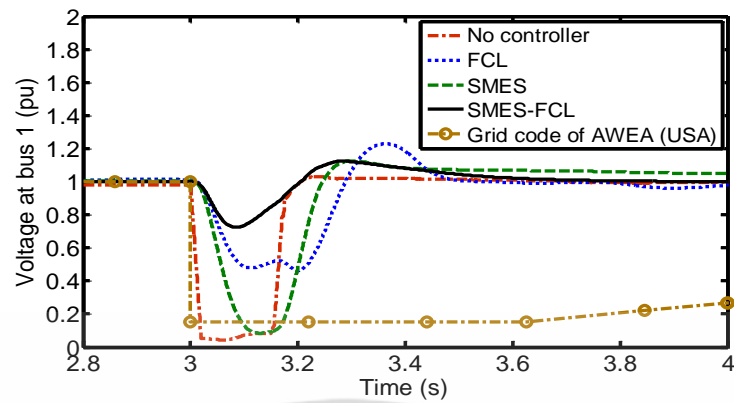
รูปที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

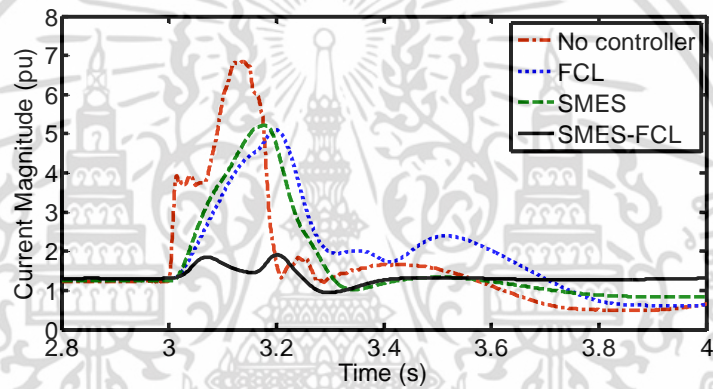


รูปที่ 4.9 IAE ของผลต่างกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2

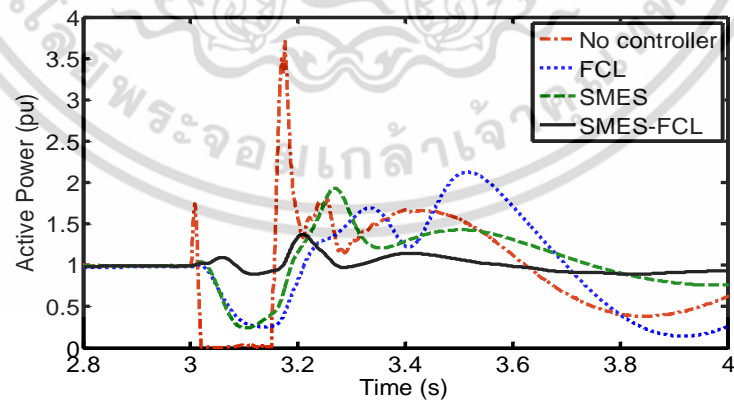
ผลการจำลองในสภาวะเกิดความผิดปกติพ่วงขึ้นในระบบแสดงดังรูปที่ 4.10 เป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 โดยแรงดันไฟฟ้าทุกกรณีจะเปรียบเทียบกับมาตรฐาน Grid Code ของ AWEA (USA) ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่ากังหันลม DFIG จะต้องทนต่อสภาวะแรงดันไฟฟ้าลดลง 15 % ของแรงดันไฟฟ้าปกติเป็นระยะเวลา 625 ms ซึ่งกังหันลมจะต้องพยายามต่อกับระบบหรือข้ามผ่านความผิดปกตินี้ไปให้ได้ และสังเกตได้ว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและติดตั้ง SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งไม่สามารถผ่านมาตรฐาน Grid Code ได้และกังหันลมจะต้องปลดตัวออกจากระบบ ส่วนในกรณีของ FCL แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเหลือประมาณ 0.45 pu และในทำนองเดียวกันกรณีของ SMES-FCL สามารถลดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าเหลือประมาณ 0.7 pu ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงการผ่านมาตรฐาน Grid Code นี้ได้ ในรูปที่ 4.11 แสดงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านบัสที่ 1 โดยกรณีของไม่ติดตั้งตัวควบคุมจะเกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงอย่างฉับพลัน และในกรณีของ SMES และ FCL กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะลดลงเหลือประมาณ 5.5 pu แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของ SMES-FCL แล้วกระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดเหลือประมาณ 2 pu ส่วนในรูปที่ 4.12 แสดงกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ในกรณีของไม่ติดตั้งตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจะลดลงเกือบมีค่าเป็น 0 pu และเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูงหลังเคลียร์ความผิดปกติ และกรณีของ SMES และ FCL กำลังไฟฟ้าจะลดลงเหลือประมาณ 0.25 pu และยังคงเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าหลังเคลียร์ความผิดปกติ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี SMES-FCL กำลังไฟฟ้าจะแกว่งเพียงเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ ความเร็วโรเตอร์จะแสดงดังรูปที่ 4.13 กรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ SMES จะเกิดการแกว่งของความเร็วโรเตอร์อย่างมากและเข้าสู่สภาวะปกติได้ช้า และกรณีติดตั้ง FCL การแกว่งของความเร็วโรเตอร์จะลดลงแต่ยังคงเข้าสู่สภาวะปกติได้ช้า เมื่อเปรียบเทียบกับ SMES-FCL จะเกิดการแกว่งของความเร็วโรเตอร์เพียงเล็กน้อยและเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็ว และในรูปที่ 4.14 พลังงานจลน์สะสมในโรเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงขึ้นในระบบ เมื่อสังเกตจากรูปขยายกรณีของ SMES-FCL จะมีพลังงานจลน์สะสมค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ และเห็นได้ชัดเจนว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมจะเกิดพลังงานจลน์อย่างสูงประมาณ 110 kJ และลดลงเหลือประมาณ 30 kJ ทั้งกรณีของ SMES และ FCL และเหลือประมาณ 25 kJ ในกรณี SMES-FCL และสามารถแสดงค่าพลังงานที่จำเป็นของ SMES-FCL กับ SMES ในการทำเสถียรภาพทั้งการแก้ปัญหาการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการแก้ปัญหาของการเกิดความผิดปกติในระบบดังตารางที่ 4.3 เห็นได้ว่า MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES-FCL จะน้อยกว่าการใช้พลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นน้อยกว่า SMES ทั้งที่ขนาดของ SMES-FCL มีขนาดเล็กกว่า SMES และไม่มีการใช้พลังงานสำรองที่จำเป็นให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1

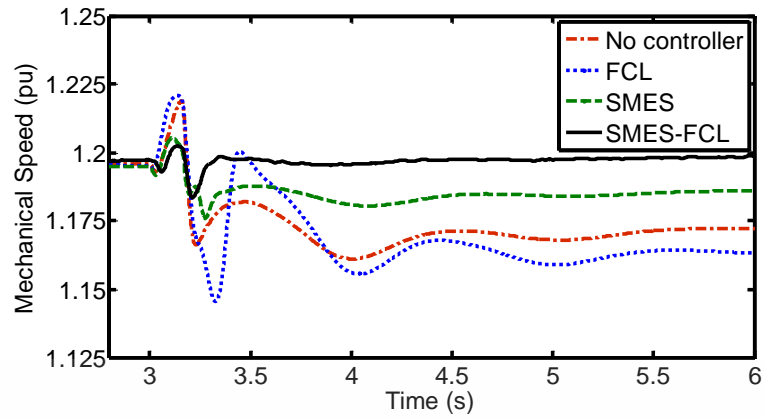


รูปที่ 4.11 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1

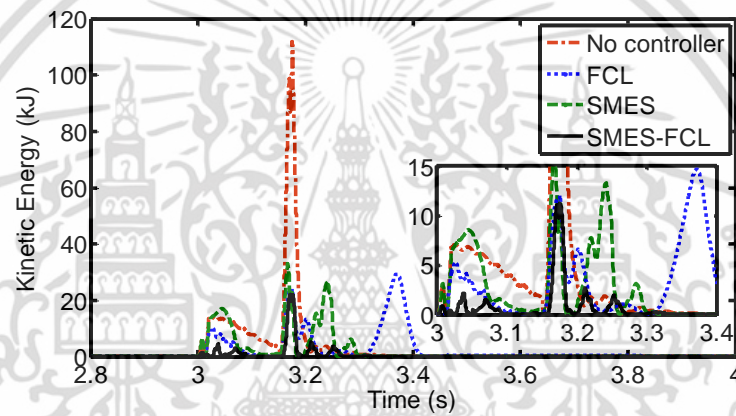


รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ความเร็วโรเตอร์



รูปที่ 4.14 พลังงานจลน์ในโรเตอร์

ตารางที่ 4.3 ขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES และ SMES-FCL

ขนาด	SMES	SMES-FCL
MW	2.487	2.113
MJ	0.678	0.365

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุปผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุดในระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่ออยู่ เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG โดยการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ ขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพลังงานสะสมเริ่มต้นอย่างเหมาะสมด้วยการใช้วิธีหลักการฟังก์ชันพลังงานเข้ามาช่วยในการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ และจะหาผลคำตอบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (PSO) ซึ่งกระบวนการออกแบบอย่างเหมาะสมนี้จะนำไปอย่างอัตโนมัติพร้อม ๆ กัน ผลการจำลองจะแสดงให้เห็นถึงการทำเสถียรภาพทั้งสภาวะปกติที่เกิดกำลังไฟฟ้าแกว่งและสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ โดย SMES-FCL จะแสดงถึงการใช้ประโยชน์สูงสุดของการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันทั้งส่วนของ SMES และส่วนของ FCL และจะนำ SMES-FCL นี้เปรียบเทียบกับ SMES และ FCL แบบแยกอิสระต่อกัน ผลการจำลองที่ได้จะแสดงได้อย่างชัดเจนว่า SMES-FCL สามารถทำเสถียรภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่าตัวเปรียบเทียบ SMES และ FCL ทั้งที่ขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดเล็กกว่าและขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นน้อยกว่า

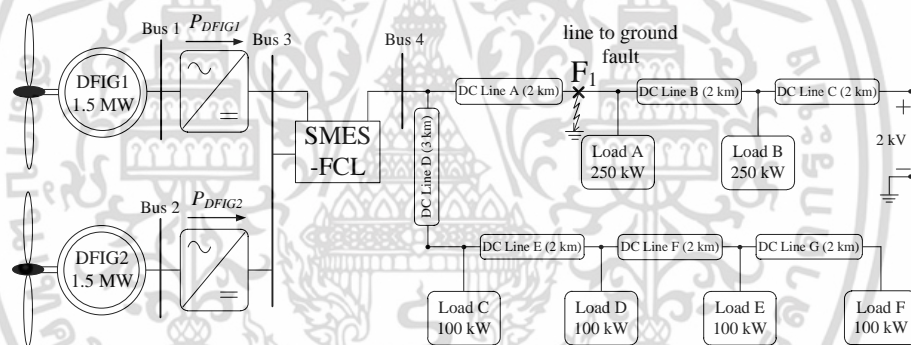
บทที่ 5

การปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบดีซีไมโครกริดด้วยอุปกรณ์ SMES-FCL ที่เหมาะสม

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่าน (Low Voltage Ride Through) ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดในระบบดีซีไมโครกริด และการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องมาจากการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่ไม่คงที่ ซึ่งปัญหาทั้งการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเป็นปัญหาที่มักจะเกิดขึ้นกับกังหันลม DFIG เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ขึ้นใหม่ในระบบดีซีไมโครกริด ซึ่ง SMES นี้จะเพิ่มเติมส่วนของฟังก์ชันการจำกัดกระแสฟอลต์เพื่อสามารถที่จะเป็นทั้งอุปกรณ์ที่ใช้สะสมพลังงานและจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) ไปพร้อม ๆ กัน ในช่วงที่เกิดปัญหา กำลังไฟฟ้าแกว่ง SMES-FCL จะทำหน้าที่คล้ายกับ SMES คือมีหน้าที่สะสมพลังงานทั้งรับและคายกำลังไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดพลาดอย่างฉับพลันในระบบดีซีไมโครกริด SMES-FCL จะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสด้วยการต่อวงจรไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) เข้าระบบไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติซึ่งจะเป็นการแก้ปัญหาการลดลงของแรงดันไฟฟ้าในระบบ และในขั้นนี้ยังเพิ่มเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ที่เหมาะสมสำหรับระบบไมโครกริดอีกด้วย โดยใช้หลักการวิธีฟังก์ชันพลังงานเพื่อใช้ออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่า SMES-FCL จะมีประสิทธิภาพเหนือกว่า SMES แบบดั้งเดิมในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่ออยู่ในระบบดีซีไมโครกริด

5.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด

ระบบกำลังไฟฟ้ายูนิโครกริดที่ใช้ศึกษามีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบไปด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ขนาด 1.5 MW จำนวน 2 ชุด คือกังหันลม DFIG1 และกังหันลม DFIG2 [22] อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) สายส่งดีซี (DC Line) และโหลด (Load A, Load B,... และ Load F) ในระบบกำลังไฟฟ้านี้จะใช้ศึกษาในสภาวะการทำงานปกติ (Normal State) และสภาวะเกิดความผิดปกติ (Fault State) ขึ้น เมื่อกังหันลม DFIG ทั้ง 2 ชุดผลิตกำลังไฟฟ้า P_{DFIG1} และ P_{DFIG2} ตามรูปที่ 5.1 ในสภาวะปกติจะเกิดปัญหากำลังไฟฟ้าแฉ่งเนื่องจากความเร็วลมไม่คงที่ส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพและนำไปสู่ระบบกำลังไฟฟ้าล้มเหลวได้ และเมื่อจำลองการเกิดความผิดปกติที่สายส่งดีซีลงกราวด์ (Line to ground fault) ที่จุด F_1 จะส่งผลกระทบต่อให้เกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าลดลงที่บัส 1 และบัส 2 เป็นผลให้กังหันลม DFIG ทั้งสองต้องปลดตัวเองออกจากระบบเป็นไปตามมาตรฐาน Grid Code ของ AWEA [12] ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาทั้งสองตามที่กล่าวมาจึงติดตั้ง SMES-FCL ระหว่างบัสที่ 3 กับกังหันลมทั้งสองชุด โดยระบบกำลังไฟฟ้ายูนิโครกริดนี้จะใช้พารามิเตอร์ระบบตามตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบดีซีไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา

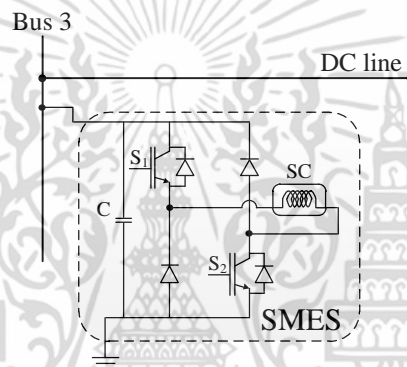
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดกำลังไฟฟ้า (P)	1.5 MW
พิกัดแรงดันไฟฟ้า (V)	0.69 kV
ความถี่ทางไฟฟ้าของกังหันลม DFIG (f)	50 Hz
จำนวน pole (n_p)	2
ค่าความต้านทานของสเตเตอร์และโรเตอร์ (R_s, R_r)	0.003, 0.003 pu
ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์และโรเตอร์ (L_s, L_r)	0.11, 0.07 pu
ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (L_m)	2.5 pu
ค่าคงที่ความเฉื่อย (H)	0.685 s
ค่าความต้านทานของสายส่ง (R_l)	0.015 Ω/m

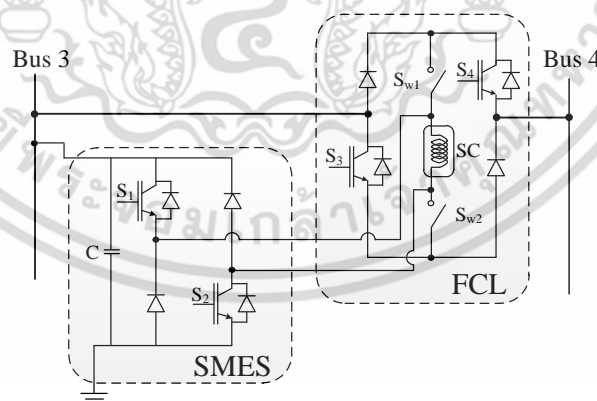
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL

โครงสร้างของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ในระบบดีซีไมโครกริดที่แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งต่ออยู่กับบัสที่ 3 โดย SMES นี้มีหน้าที่หลักคือสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งตามโครงสร้างของ SMES นี้จะถูกนำไปประยุกต์วงจรไฟฟ้าใหม่โดยเพิ่มเติมส่วนของโครงสร้างอุปกรณ์จำกัดกระแส (Fault Current Limiting: FCL) ร่วมเข้ามาเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์หรือ SMES-FCL ซึ่งสามารถแสดงวงจรไฟฟ้านี้ได้ดังรูปที่ 5.3 โดย SMES-FCL นี้ต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 4 (เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.1) โดยส่วนประกอบของโครงสร้างยังคงแบ่งเป็น SMES และ FCL ซึ่งจะทำงานแยกอิสระต่อกันแต่ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) ยังคงใช้ร่วมกันอยู่ โดยการทำงานของ SMES-FCL จะถูกแบ่งเป็น 2 สถานะคือ สถานะปกติและสถานะเกิดความผิดปกติ



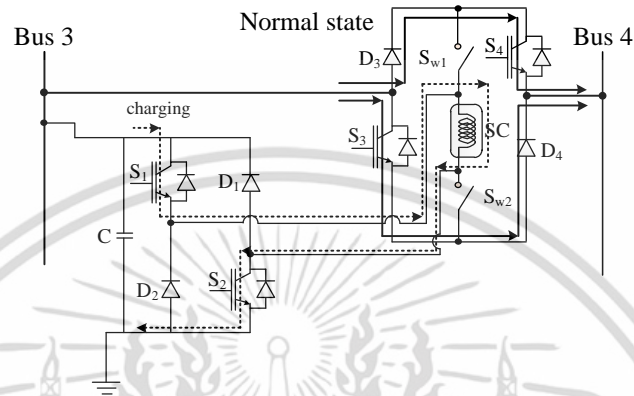
รูปที่ 5.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES



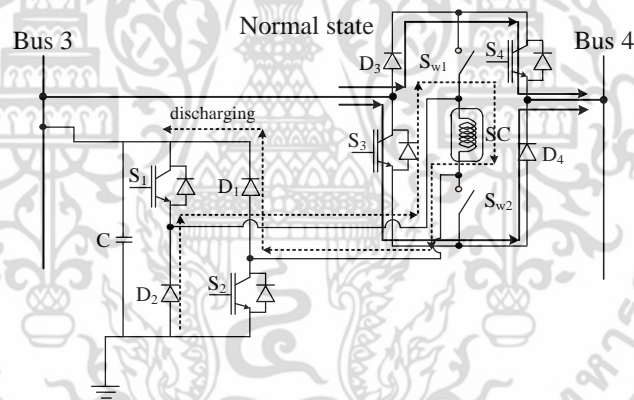
รูปที่ 5.3 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL

ในสถานะปกติ SMES-FCL จะทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกังหันลม DFIG ด้วยการทำงานในส่วนของ SMES จากการควบคุมสวิตช์ S_1 และ S_2 ของคอนเวอร์เตอร์จึงสามารถควบคุมการชาร์จและดิสชาร์จกระแสไฟฟ้าได้ และในส่วนของ FCL จะทำงานก็ต่อเมื่อเกิดความผิดปกติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พร้อมกันในระบบหรืออยู่ในสภาวะเกิดความผิดปกติพร้อมกันเอง ซึ่งสวิตช์ S_3 และ S_4 จะหยุดทำงานแต่ สวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} จะทำงานแทน การทำงานคู่กันของสวิตช์ S_3 กับ S_4 และสวิตช์ S_{w1} กับ S_{w2} นี้จะเป็นการทำงานเพื่อต่อวงจรไฟฟ้าให้เป็นวงจรบริดจ์ให้สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้กระแสฟอลต์ถูกจำกัด กระแสด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด หลักการทำงานดังกล่าวสามารถนำมาอธิบายเป็นทิศทางการไหลของ กระแสไฟฟ้าได้ดังนี้



(ก) โหมดชาร์จกระแสไฟฟ้า



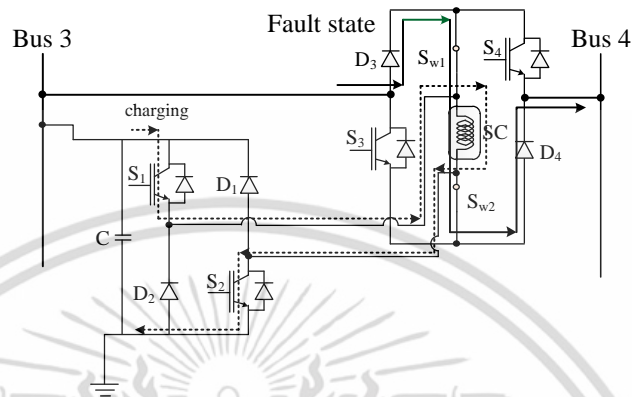
(ข) โหมดดีสชาร์จกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 5.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติ

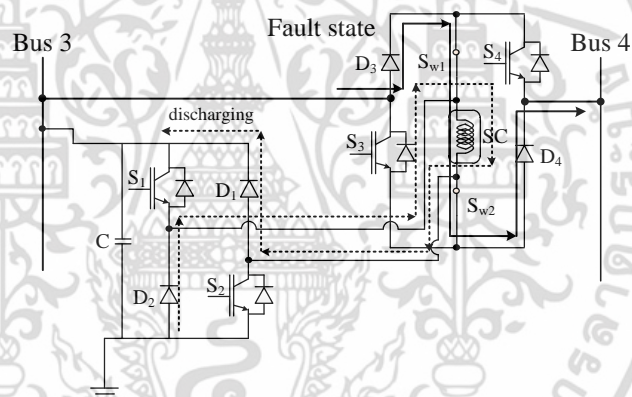
เมื่อพิจารณาสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่งขึ้นในระบบตามรูปที่ 5.4 (ก) และ (ข) จะแสดงให้เห็นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน โดยในโหมดของการชาร์จกระแส ตามรูปที่ 5.4 (ก) สวิตช์ S_1 และ S_2 จะทำงานเพื่อชาร์จพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวด ส่วน สวิตช์ S_{w1} กับ S_{w2} จะหยุดทำงานหรือเปิดวงจรเพื่อไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด แต่สวิตช์ S_3 กับ S_4 และไดโอด D_3 และ D_4 จะทำงานตามปกติเพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหล จากบัสที่ 3 ไปบัสที่ 4 ได้ ดังนั้น โหมดชาร์จพลังงานไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านสวิตช์จากสวิตช์ S_1 ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวดและไหลผ่านสวิตช์ S_2 และเมื่ออยู่ในโหมดดีสชาร์จกระแสไฟฟ้าตามรูป ที่ 5.4 (ข) สวิตช์ S_1 และ S_2 จะหยุดทำงานแต่ไดโอด D_1 และ D_2 จะทำงานแทนเพื่อให้สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวดได้ ส่วนสวิตช์ S_3 กับ S_4 และไดโอด D_3 และ D_4 ยังคงทำงานเช่นเดิมเหมือนในโหมดชาร์จพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น โหมดดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจากไดโอด D_2 ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวดและไหลผ่านไดโอด D_1 ซึ่งหลักการ ทำงานในสภาวะปกตินี้จะสามารถควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าให้ลดลงได้



(ก) โหมดชาร์จกระแสไฟฟ้า



(ข) โหมดดิสชาร์จกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 5.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะเกิดความผิดปกติ

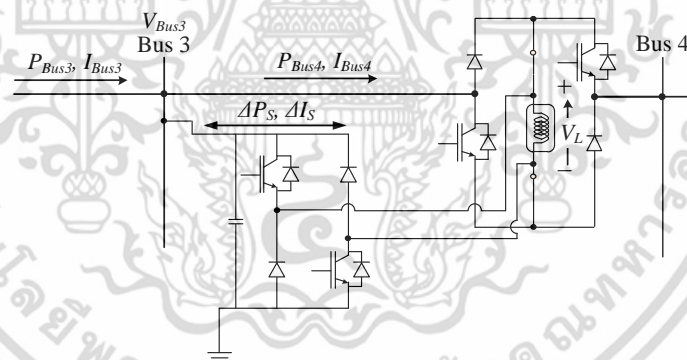
และเมื่อพิจารณาสภาวะเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าตามรูปที่ 5.5 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 กับไดโอด D_1 และ D_2 ยังคงทำงานเช่นเดิมและการไหลของกระแสไฟฟ้าทั้งชาร์จและดิสชาร์จยังคงเหมือนสภาวะปกติ เพียงแต่สวิตช์ S_3 กับ S_4 จะหยุดทำงานและสวิตช์ S_{w1} กับ S_{w2} จะทำงานแทนจึงเกิดเป็นวงจรบริดจ์ขึ้น ดังนั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลจากบัสที่ 3 ไปบัสที่ 4 โดยไหลผ่านไดโอด D_3 และสวิตช์ S_{w1} ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวดและไหลผ่านสวิตช์ S_{w2} และไดโอด D_4 ไปยังบัสที่ 4 ซึ่งเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันหรือเกิดกระแสฟลัดดีไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเปรียบเสมือนสร้างอิมพีแดนซ์ที่ตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดขึ้น [33] สามารถสรุปหลักการการทำงานของสวิตช์และไดโอดได้ดังตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 การทำงานของสวิตช์ของดีซีช้อปเปอร์ใน SMES-FCL

สวิตช์	สภาวะปกติ		สภาวะเกิดความผิดปกติ	
	โหมตชาร์จ	โหมตดิสชาร์จ	โหมตชาร์จ	โหมตดิสชาร์จ
S_1	on	off	on	off
S_2	on	off	on	off
D_1	off	on	off	on
D_2	off	on	off	on
S_3	on	on	off	off
S_4	on	on	off	off
D_3	on	on	on	on
D_4	on	on	on	on
S_{w1}	off	off	on	on
S_{w2}	off	off	on	on

จากการอธิบายวงจรไฟฟ้าและหลักการการทำงานของ SMES-FCL ตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะสามารถอธิบายถึงการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการจำกัดกระแสไฟฟ้าเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 5.6 หลักการทำงานของ SMES-FCL

จากรูปที่ 5.6 เมื่อกำหนดให้

P_{Bus3} , I_{Bus3} และ V_{Bus3} คือกำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าดีซีที่ส่งไปยังบัสที่ 3

P_{Bus4} และ I_{Bus4} คือกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดีซีที่ส่งไปยังบัสที่ 4

ΔP_S และ ΔI_S คือกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดีซีของ SMES-FCL

เมื่อไม่คิดการสูญเสียการส่งกำลังไฟฟ้าในสายส่งสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังบัสที่ 3 ได้จากสมการดังนี้

$$P_{Bus3} = V_{Bus3} I_{Bus3} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า V_{Bus3} และกระแสไฟฟ้า I_{Bus3} ที่ถูกส่งมา ดังนั้น ถ้าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดีซีนี้ให้คงที่ได้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในดีซีไมโครกริดนี้จะไม่เกิดขึ้น แต่แรงดันไฟฟ้าจะเป็นค่า ๆ หนึ่งที่ยอมรับให้มีค่าอยู่ในช่วง ๆ หนึ่งเท่านั้น หรือเป็นค่าที่ถูกกำหนดในการส่งกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ซึ่งจากสมการที่ (5.1) การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะสามารถทำได้เพียงควบคุมกระแสไฟฟ้า I_{Bus3} ที่ส่งผ่านมาเท่านั้น ดังนั้น การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะได้จากการชาร์จและดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าที่ส่งจากบัสที่ 3 ไปยังบัสที่ 4 โดยกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 จะสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_{Bus4} = P_{Bus3} + \Delta P_S \quad (5.2)$$

เมื่อกำหนดให้กำลังไฟฟ้า ΔP_S มีค่าเป็นบวกหรือลบจากการชาร์จและดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าตามลำดับ และสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้า ΔP_S ได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P_S = V_{Bus3} \Delta I_S \quad (5.3)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (5.2) และ (5.3) สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้จากสมการ

$$P_{Bus4} = P_{Bus3} + V_{Bus3} \Delta I_S \quad (5.4)$$

จากสมการที่ (5.4) จะแสดงให้เห็นว่า ถ้าควบคุมกระแสไฟฟ้าดีซี ΔI_S ที่ไหลเข้าและออก SMES-FCL นี้จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 (P_{Bus4}) ให้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้านี้ได้ ดังนั้น คอนเวอร์เตอร์ของ SMES-FCL จะทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าในสายส่งดีซีด้วยการควบคุมกระแส ΔI_S

และจากรูปที่ 5.6 การจำกัดกระแสฟลัดด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดในดีซีไมโครกริดนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด [33] จากสมการ

$$Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (5.5)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดหาได้จากสมการ

$$V_{SC} = L_{SC} \frac{dI_{SC}}{dt} \quad (5.6)$$

เมื่อกำหนดให้

- Z_L คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Ω)
- V_L คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด (V)
- I_L คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (A)
- L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H)

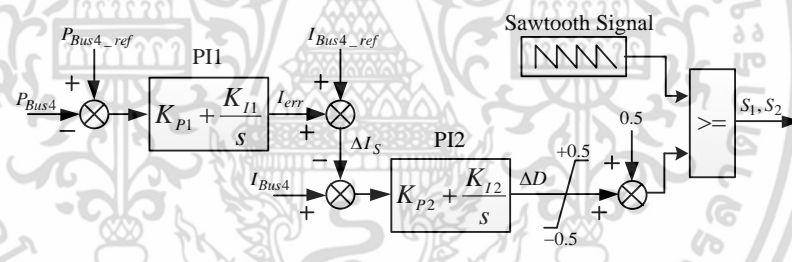
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามอุดมคติการไหลของกระแสไฟฟ้าดีซีเมื่อไม่เกิดการกระเพื่อมหรือการแกว่งของกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้เทอมอนุพันธ์กระแส I_L ในสมการที่ (5.6) มีค่าเป็นศูนย์ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม V_L มีค่าเป็นศูนย์ตามไปด้วยและเช่นเดียวกับค่าอิมพีแดนซ์ Z_L ในสมการที่ (5.5) จะมีค่าเป็นศูนย์ตาม แต่ในทางตรงกันข้ามถ้ากระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันหรือกระแสฟลัดไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดนี้ เทอมอนุพันธ์กระแส I_L จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม V_L เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอิมพีแดนซ์ Z_L จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล [33] ด้วยเหตุนี้ ในสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบเมื่อใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการจำกัดกระแสฟลัดจะเปรียบเสมือนการแทรกอิมพีแดนซ์เข้าไปยังในระบบดีซีไมโครกริดอย่างทันทีทันใด ซึ่งทำให้สามารถลดกระแสฟลัดที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันได้อย่างรวดเร็ว

5.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด

5.3.1 การออกแบบตัวควบคุม

จากหัวข้อที่ 5.2 สามารถนำมาสู่วิธีการออกแบบตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของ SMES-FCL โดยการออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมในส่วนของ SMES จะใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) 2 ตัวควบคุม และโครงสร้างของ FCL จะใช้การตรวจจับกระแสฟลัดซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 และสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

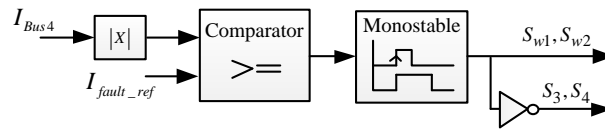


รูปที่ 5.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES

ความต้องการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติที่บัสที่ 4 จึงทำการวัดสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริง P_{Bus4} เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง P_{Bus4_ref} เป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ PI1 ซึ่งในที่นี้จะกำหนดกำลังไฟฟ้าอ้างอิง P_{Bus4_ref} เท่ากับ 1 pu และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมพีไอ PI1 จะเป็นค่ากระแสผิดพลาด I_{err} ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิง I_{Bus4_ref} และผลเปรียบเทียบนี้จะเป็ค่ากระแส ΔI_s ตามสมการที่ (5.4) ซึ่งกระแส ΔI_s นี้จะเป็นตัวบ่งบอกว่ากระแสไฟฟ้าในระบบจะต้องเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นจึงนำกระแส ΔI_s ไปหักลบกับกระแสจริง I_{Bus4} จะได้ค่าผลเปรียบต่างนี้เป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ PI2 และเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ PI2 จะเป็นค่าเบี่ยงเบนดิวิตีไซเคิล (ΔD) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าดิวิตีไซเคิล และเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจึงได้สัญญาณควบคุมสวิตช์ IGBT ของสวิตช์ S_1 และ S_2 เนื่องจากการใช้ตัวควบคุมพีไอ PI1 และ PI2 นี้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K_{p1} , K_{p2} , K_{I1} และ K_{I2} ซึ่งเป็นค่าคงที่ของตัวควบคุมพีไอจะต้องได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์นี้ อย่างเหมาะสมด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมซึ่งจะกล่าวในภายหลัง



รูปที่ 5.8 โครงสร้างของตัวควบคุม FCL

ในสภาวะเกิดความผิดปกติต้องการตัวชี้วัดสำหรับการสั่งสวิตช์ S_{w1} กับ S_{w2} และ S_3 กับ S_4 เพื่อให้ต่อวงจรบริดจ์ได้สมบูรณ์ จึงต้องเลือกสัญญาณที่สามารถบ่งบอกได้ว่าเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบได้ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และอื่น ๆ ซึ่งในที่นี้ได้ทำการเลือกกระแสไฟฟ้าเนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญและเป็นความต้องการที่อยากจะให้กระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นลดลง ตามรูปที่ 5.8 เป็นตัวควบคุมของ FCL โดยวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าจริง I_{Bus4} เปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิง I_{fault_ref} ที่ตั้งค่าไว้ที่ 1.5 pu หรือ 2250 A ถ้ากระแสไฟฟ้า I_{Bus4} มีค่ามากกว่า 1.5 pu เอาต์พุตของบล็อก Comparator จะส่งสัญญาณลอจิก 1 ให้กับบล็อกโมโนสเตเบิล (Monostable) ซึ่งบล็อกโมโนสเตเบิลจะทำหน้าที่ดีเลย์สัญญาณเพื่อป้องกันการเกิดความผิดปกติซ้ำซ้อนในระยะเวลาใกล้เคียงกันและเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณควบคุมสวิตช์ IGBT S_{w1} กับ S_{w2} และ S_3 กับ S_4

5.3.1 เทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุด

ในบทนี้ได้เพิ่มเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุดในระบบไมโครกริดด้วยการออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสม เพื่อควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการจำกัดกระแสฟลด์ที่เกิดขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ การใช้ฟังก์ชันพลังงานในการออกแบบ การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และการหาค่าพลังงานสะสมเริ่มต้นที่น้อยที่สุดที่ใช้ทำเสถียรภาพและสามารถอธิบายวัตถุประสงค์ของการออกแบบเป็นฟังก์ชันสมการได้ดังนี้

หลักการฟังก์ชันพลังงานจะถูกใช้เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ให้เหมาะสมในสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ [37] เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบจะส่งผลให้พลังงานจลน์ที่สะสมในโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG เพิ่มขึ้นอย่างสูง และในเวลาเดียวกันกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสกังหันลม DFIG จะลดลงทันทีทันใด ส่งผลให้กังหันลม DFIG ไม่สามารถข้ามผ่านความผิดปกตินี้ได้ เพื่อที่จะทำให้กังหันลมข้ามผ่านความผิดปกตินี้ ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะแทรกเข้ามาในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวขยับยั้งกระแสฟลด์และการสะสมพลังงานจลน์ในโรเตอร์ และยังมีผลให้กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงนั้นเพิ่มขึ้นได้อีกด้วย ซึ่งสามารถแสดงสมการฟังก์ชันพลังงาน (V) ได้ดังนี้

$$V = V_k (\omega_1(t), \omega_2(t)) + V_p (\delta_1(t), \delta_2(t)) \quad (5.7)$$

เมื่อกำหนดให้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t	คือเวลา (s)
V_K และ V_P	คือพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ (J)
$\omega_1(t)$ และ $\omega_2(t)$	คือความเร็วโรเตอร์ของ DFIG1 และ DFIG2 (rpm)
$\delta_1(t)$ และ $\delta_2(t)$	คือมุมของโรเตอร์ของ DFIG1 และ DFIG2 (degree)

เมื่อทำการอนุพันธ์สมการที่ (5.7) จะได้

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{d\omega_i}{dt} + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{dt} \right) \quad (5.8)$$

จากสมการที่ (5.8) สามารถอธิบายได้ใน [37] ถ้า dV/dt มีค่าเป็นบวกหมายถึงการสะสมพลังงาน และทางตรงกันข้ามถ้ามีค่าเป็นลบหมายถึงการคายพลังงาน ดังนั้น เมื่อ dV/dt มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าพลังงานทั้งหมดมีค่าลดลงหรือพลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะถูกคายพลังงานออกไป ซึ่งถ้า dV/dt มีค่าเป็นลบลดลงจนถึงจุดสูงสุดแล้วแสดงว่าระบบจะมีผลตอบสนองการหน่วงที่มากขึ้นและเร็วขึ้นนั่นเอง จากสมการการแกว่ง

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{(P_{mi} - P_{ei})}{M_i} \quad (5.9)$$

โดยที่

- M_i คือค่าคงที่ความเฉื่อยของกังหันลม DFIG ตัวที่ i (s)
- P_{mi} คือกำลังทางกลของกังหันลม DFIG ตัวที่ i (W)
- P_{ei} คือกำลังทางไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ตัวที่ i (W)

แทนค่าสมการที่ (5.9) ในสมการที่ (5.8) จะได้

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{P_{mi}}{M_i} + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{dt} \right) - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{1}{M_i} P_{ei} \quad (5.10)$$

และฟังก์ชันพลังงานจลน์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_K = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t))^2 \quad (5.11)$$

และเมื่อทำการอนุพันธ์ฟังก์ชันพลังงานจลน์ในสมการที่ (5.11) จะได้

$$\frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} = M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t)) \quad (5.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ $\omega_0(t)$ หาค่าได้จาก

$$\omega_0(t) = \frac{(\omega_1(t)M_1 + \omega_2(t)M_2)}{(M_1 + M_2)} \quad (5.13)$$

และนำสมการที่ (5.12) แทนลงในสมการที่ (5.10) ในเทอมขวาสุดจะได้

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^2 \left((\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{mi} + \frac{\partial V_p}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{dt} \right) - V_C \quad (5.14)$$

โดยที่ V_C หาได้จาก

$$V_C = \sum_{i=1}^2 (\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{ei} \quad (5.15)$$

เนื่องจากในสภาวะเกิดความผิดพลาดในระบบเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ δ , P_{mi} และ V_p จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในระยะเวลาสั้น ๆ จึงสามารถตัดเทอมแรกของสมการที่ (5.14) ทิ้งได้ จึงเหลือเทอม V_C ซึ่งจะแปรผันตรงกับ P_{ei} ที่มีผลโดยตรงต่อ dV/dt ดังนั้น FCL จะช่วยให้ V_C มีค่าเพิ่มขึ้นได้โดยการควบคุม P_{ei} ให้มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่า dV/dt ก็จะมีค่าเป็นลบมากขึ้น เมื่อค่า dV/dt มีค่าเป็นลบมากขึ้นจะแสดงให้เห็นถึงการคายพลังงานจลน์ที่สะสมในโรเตอร์ออกมาได้ไวขึ้นและยิ่งคายพลังงานจลน์ออกมาได้ไวขึ้นระบบก็จะเข้าสู่เสถียรภาพได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

หลังจากเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบกังหันลม DFIG จะเข้าสู่สภาวะปกติและส่วนของ SMES จะกลับมาทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเช่นเดิม โดยต้องการให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าลดลงน้อยที่สุด โดยใช้วิธีหาค่าที่น้อยที่สุดของค่าความผิดพลาดสมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } IAE \Delta P_{Bus4} = \int_{t_0}^{t_s} |\Delta P_{Bus4}(t)| dt \quad (5.16)$$

โดยที่

t_0 คือเวลาเริ่มต้นจำลองระบบ (s)

t_s คือเวลาสิ้นสุดจำลองระบบ (s)

และอีกวัตถุประสงค์ของการออกแบบคือการหาค่าพลังงานสะสมเริ่มต้นที่น้อยที่สุดที่ใช้ทำเสถียรภาพ ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดและกระแสเริ่มต้น โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } E_{sco} = \frac{1}{2} L_{sc} I_{sco}^2 \quad (5.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

E_{SCO}	คือพลังงานสะสมเริ่มต้น (J)
L_{SC}	คือค่าความเหนี่ยวนำ (H)
I_{SCO}	คือกระแสเริ่มต้น (A)

จากสมการที่ (5.15)-(5.17) สามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันสมการวัตถุประสงครวมกันได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } J = 1/V_C + \int_{t_0}^{t_s} |AP_{Bus4}(t)| dt + E_{SCO} \quad (5.18)$$

สำหรับการหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (5.18) นี้จะใช้วิธี (Particle Swarm Optimization: PSO) [23] เพื่อที่จะปรับค่า L_{SC} , I_{SCO} , K_{p1} , K_{p2} , K_{I1} และ K_{I2} ให้มีความเหมาะสมโดยอัตโนมัติพร้อมกัน และกระบวนการค้นหาค่าตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการออกแบบไว้ดังนี้

ค่าความเหนี่ยวนำทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 5 H

ค่ากระแสเริ่มต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 2 kA

ค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{p1} , K_{p2} , K_{I1} และ K_{I2} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 20

ส่วนพารามิเตอร์ของขบวนการวิธี PSO กำหนดดังนี้

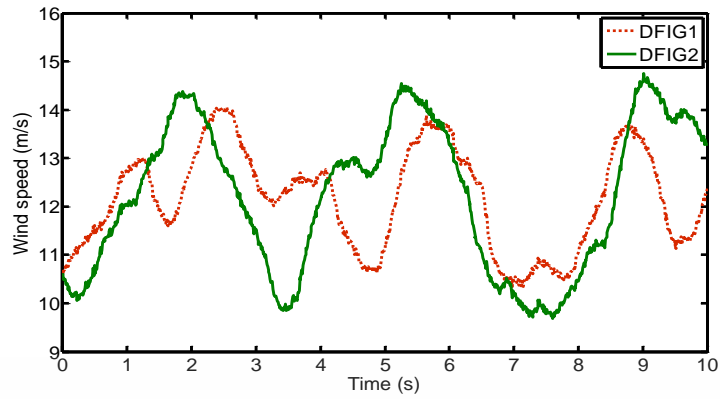
จำนวนอนุภาค 50 ตัว

จำนวนรอบของการค้นหา 100 รอบ

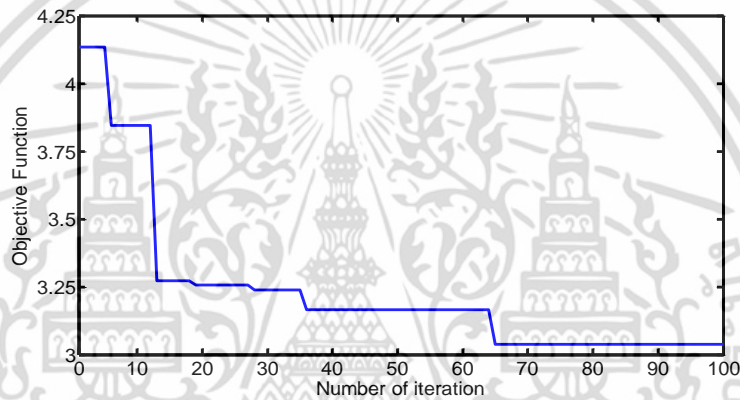
ในการศึกษาครั้งนี้ SMES-FCL ที่นำเสนอจะทำการเปรียบเทียบกับ SMES และระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุม (No controller)

5.4 ผลการจำลองและทดสอบ

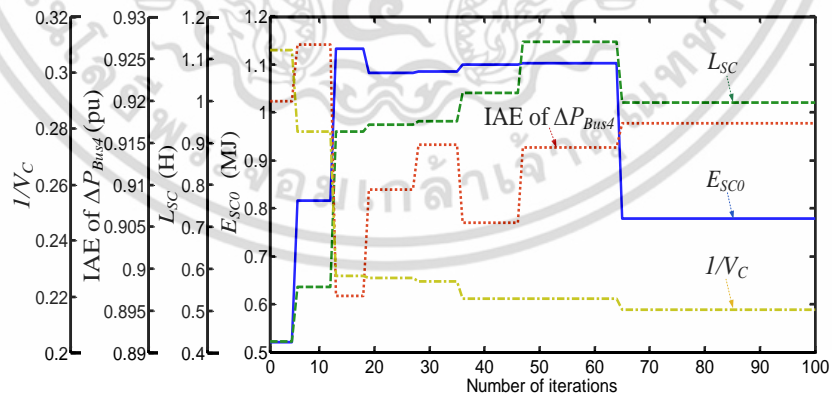
ในการหาค่าความเหนี่ยวนำ กระแสเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมของ SMES-FCL จะใช้โปรแกรม MATLAB/SimPowerSystem [31] ในการจำลองระบบดังรูปที่ 5.1 ภายใต้อัตราเร็วเวลาดังรูปที่ 5.9 และจำลองการเกิดความผิดปกติที่สายส่งดีซีลิงกราวนด์ที่จุด F_1 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 4 s ผลลัพธ์การค้นหาค่าคำตอบของสมการที่ (5.18) สามารถแสดงการลู่เข้าหาค่าตอบของค่าน้อยที่สุดแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 และแสดงผลคำตอบแต่ละเทอมได้ดังรูปที่ 5.11 และผลคำตอบของพารามิเตอร์ SMES-FCL ที่ค้นหาแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งพารามิเตอร์นี้จะใช้เปรียบเทียบกับ SMES ที่ใช้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ของกำลังไฟฟ้าตามสมการที่ (5.16) ในการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของ SMES เพียงแต่ขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES จะถูกกำหนดให้มีค่าใหญ่กว่าและพลังงานสะสมเริ่มต้นที่มากกว่า SMES-FCL



รูปที่ 5.9 ความเร็วลม



รูปที่ 5.10 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของสมการวัตถุประสงค์



รูปที่ 5.11 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ $1/V_C$, $IAE \Delta P_{Bus4}$, L_{SC} และ E_{SC0}

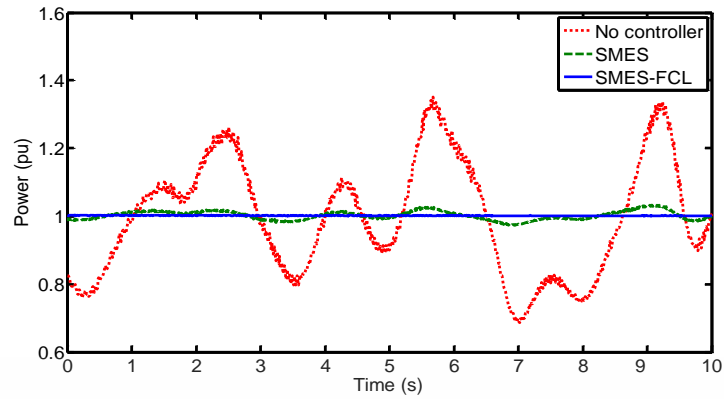
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL

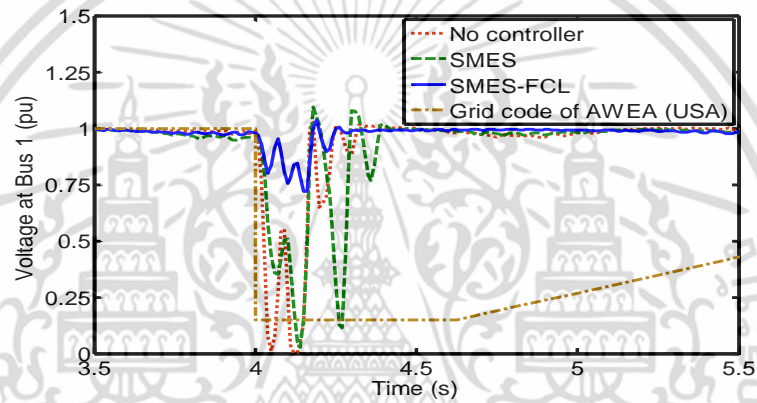
พารามิเตอร์	SMES	SMES-FCL
L_{SC} (H)	2.5	0.99
I_{SCO} (kA)	1.2	1.25
E_{SCO} (MJ)	1.8	0.77
K_{P1}, K_{I1}	9.74, 0.16	12.11, 5.65
K_{P2}, K_{I2}	15.11, 6.21	19.01, 3.22

ผลการจำลองระบบในสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 เป็นกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 ซึ่งกรณีเมื่อระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุมจะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูงตามเส้นประสีแดง และกรณี SMES กำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงอย่างมากแต่ยังแกว่งรอบ ๆ ค่ากำลังไฟฟ้า 1 pu ตามเส้นประสีเขียว และเมื่อติดตั้ง SMES-FCL กำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงกว่ากรณี SMES อย่างมาก

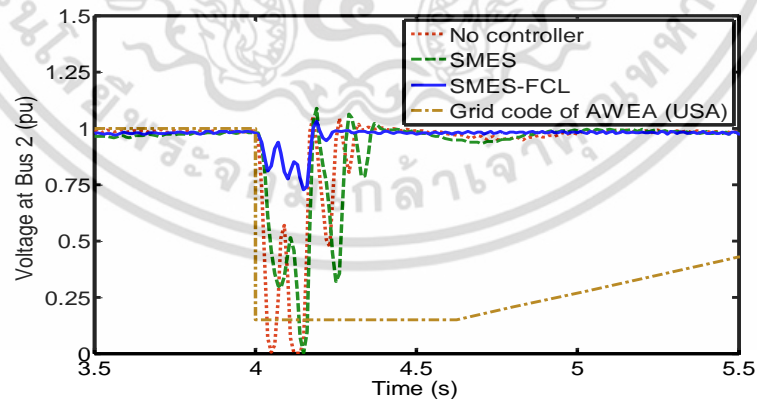
เมื่อเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติหรือการแกว่งในระบบจะสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 5.13 – 5.21 โดยแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และ 2 จะเป็นแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลม DFIG1 และ DFIG2 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 จะเห็นได้ว่าทั้งกรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงต่ำสุดประมาณ 0 pu ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกริดโค้ด AWEA (USA) ที่ต้องมีแรงดันไฟฟ้าลดลงไม่ต่ำกว่า 0.15 pu เป็นเวลา 625 ms [12] ส่งผลให้กังหันลมต้องปลดตัวเองออกจากระบบแต่เมื่อติดตั้ง SMES-FCL จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำสุดประมาณ 0.75 pu และเมื่อแสดงเป็นกราฟแผนภูมิแท่งของการลดลงของแรงดันไฟฟ้าแต่ละบัสตามรูปที่ 5.15 แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าปกติจะแสดงถึงการไม่ผ่านมาตรฐานกริดโค้ดจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าทั้งกรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเกินมาตรฐานกริดโค้ดแต่ในกรณี SMES-FCL จะผ่านมาตรฐานกริดโค้ด ในรูปที่ 5.16 และ 5.17 แสดงถึงกระแสฟอลต์ที่บัสที่ 1 และบัสที่ 2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมกระแสจะพุ่งขึ้นสูงประมาณ 3.25 pu ในบัสที่ 2 และ 3 pu ในบัสที่ 1 แต่เมื่อติดตั้ง SMES-FCL กระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นจะลดลงอย่างมาก ส่วนกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และบัสที่ 2 ในรูปที่ 5.18 และ 5.19 จะแสดงให้เห็นถึงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูงในช่วงเกิดฟอลต์เมื่อไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ SMES เมื่อทำการติดตั้ง SMES-FCL จะลดการแกว่งนี้ได้และเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็ว เมื่อแสดงผลการจำลองของความเร็วโรเตอร์ในรูปที่ 5.20 และ 5.21 เห็นได้อย่างชัดเจนว่า SMES-FCL จะลดการแกว่งของความเร็วโรเตอร์ได้ดีกว่ากรณีอื่น ๆ และสามารถแสดงค่าของพลังงานที่จำเป็นใน SMES-FCL กับ SMES ในการทำเสถียรภาพทั้งการแก้ปัญหาการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการแก้ปัญหาของการเกิดความผิดปกติในระบบดังตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ทั้ง MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES-FCL จะใช้พลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นน้อยกว่า SMES ทั้งที่ขนาดของ SMES-FCL มีขนาดเล็กกว่า SMES



รูปที่ 5.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4

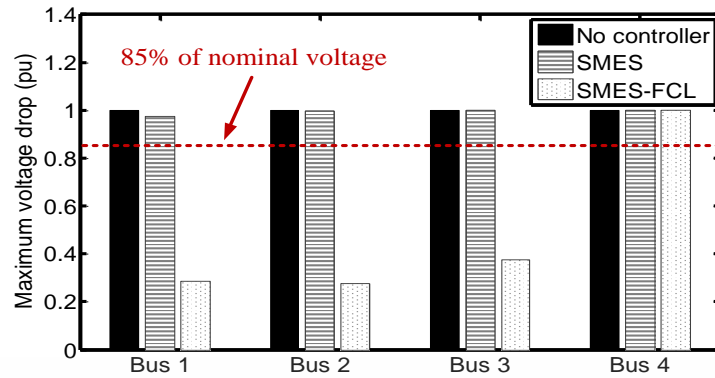


รูปที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1

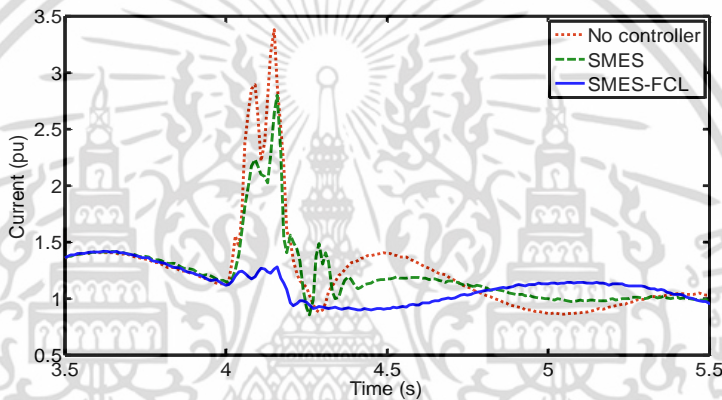


รูปที่ 5.14 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2

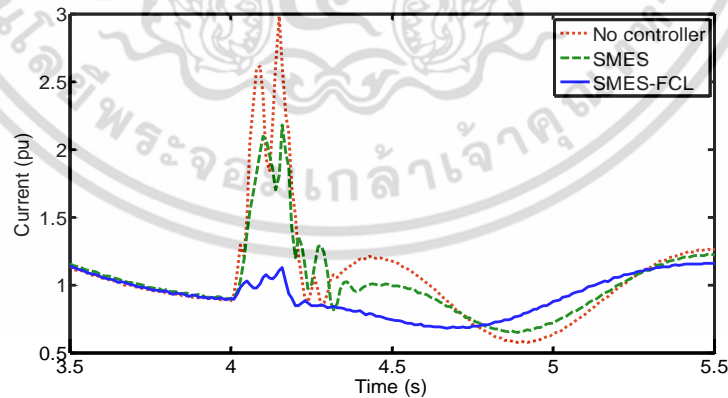
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบการลดลงของแรงดันไฟฟ้า

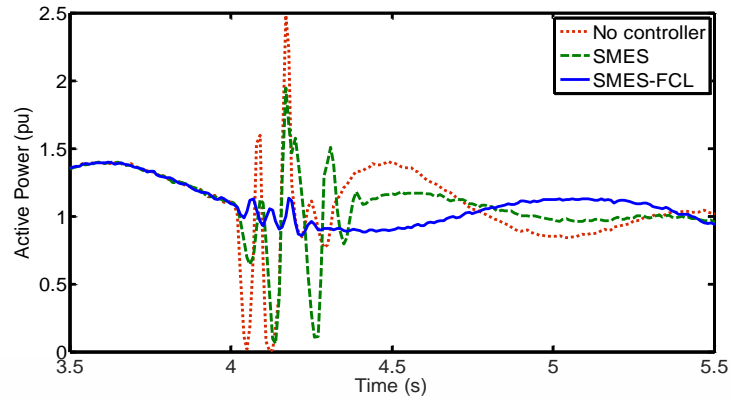


รูปที่ 5.16 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1

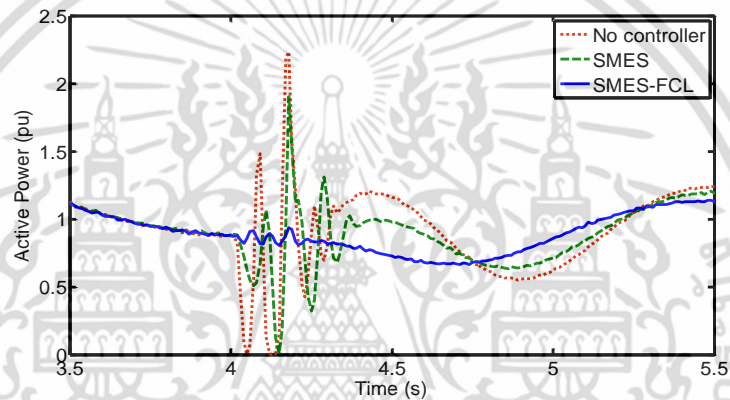


รูปที่ 5.17 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2

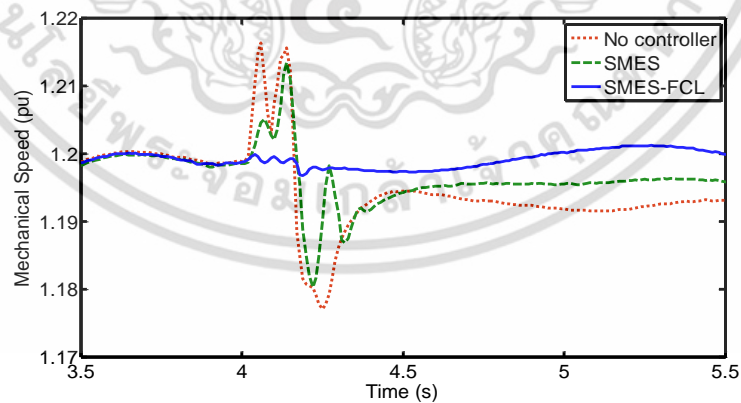
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1

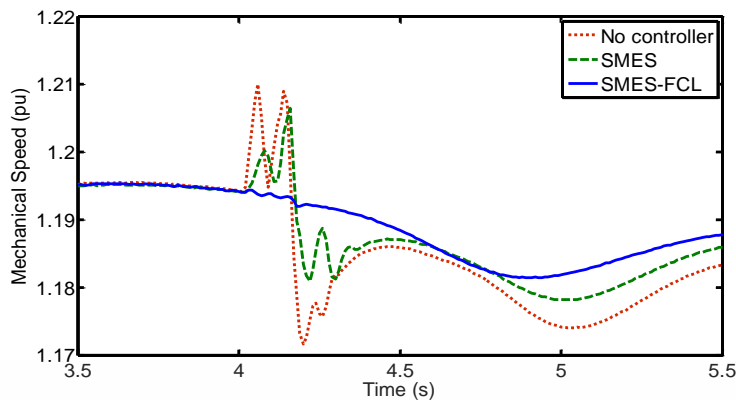


รูปที่ 5.19 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2



รูปที่ 5.20 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG2

ตารางที่ 5.4 ขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES และ SMES-FCL

ขนาด	SMES	SMES-FCL
MW	3.81	2.68
MJ	2.38	1.28

5.4 สรุปผลการทดสอบ

ในบทนี้นำเสนอโครงสร้างของ SMES-FCL ในระบบตีซีโมโครกริต ซึ่งมีการพัฒนามาจาก SMES แบบดั้งเดิมเพื่อให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG และยังออกแบบตัวควบคุมพีไอ ขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพลังงานสะสมเริ่มต้นด้วยเทคนิคการทำให้ SMES-FCL เหมาะสมโดยใช้หลักการฟังก์ชันพลังงานเข้ามาช่วยในการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งการออกแบบอย่างเหมาะสมจะเป็นกระบวนการอย่างอัตโนมัติด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (PSO) ผลการจำลองได้แสดงให้เห็นว่าทั้งภายใต้สภาวะปกติที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ SMES-FCL จะสามารถทำเสถียรภาพในระบบตีซีโมโครกริตได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่า SMES ถึงแม้ว่าขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES-FCL จะมีขนาดเล็กกว่า SMES

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ที่ต่อร่วมอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดทั้งติดตั้งในกังหันลม DFIG และออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสทั้งในระบบไฟฟ้ากระแสสลับและระบบดีซีไมโครกริด และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) ทำให้การออกแบบเป็นไปอย่างเหมาะสม ผลการทดสอบสามารถสรุปงานวิจัยออกมาได้ดังต่อไปนี้

- สามารถออกแบบวงจรตัวควบคุมพีไอเพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- สามารถประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งในกังหันลม DFIG และเพิ่มความสามารถข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ได้
- สามารถประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสพอลต์สำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG
- สามารถประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบดีซีไมโครกริด
- ทำการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์พีไอได้อย่างเหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

1. ควรนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานทดแทนชนิดอื่น ๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) พลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen) และพลังงานน้ำ (Hydroelectric Energy) เป็นต้น เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดกับแหล่งพลังงานอื่น ๆ ก่อนจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบ
2. วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองระบบและออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในรูปของโดเมนเวลาที่เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ทำให้ใช้ระยะเวลาในการออกแบบ ดังนั้น หากพิจารณาระบบให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลาที่เป็นแบบเฟสเซอร์ (Phasor) อาจช่วยลดระยะเวลาในการออกแบบให้เร็วขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทำการออกแบบขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสมเป็นการออกแบบให้เห็นถึงสมรรถนะของการทำเสถียรภาพ โดยการออกแบบภายใต้การศึกษาในกรณีเดียว แล้วนำผลพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ไปทดสอบกับกรณีอื่น ๆ แม้ว่าการออกแบบจะสามารถรองรับกับกรณีอื่น ๆ ที่ทำการทดสอบ แต่ในการออกแบบเพื่อใช้งานจริงอาจจะมีปัจจัยหลาย ๆ อย่างเข้ามาร่วม ดังนั้น ควรจะพิจารณาถึงปัจจัยรอบ ๆ ด้านให้เหมาะสมกับการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้สมเหตุสมผลกับความเป็นจริงในสถานการณ์นั้น ๆ เช่น อุณหภูมิของขดลวดตัวนำยิ่งยวด สภาวะการเป็นขดลวดตัวนำยิ่งยวด เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] International Energy Agency. (2014). Renewable Energy Medium-Term Market Report 2014. France, Paris: **International Energy Agency** [Online]. Available: <http://www.iea.org/Textbase/npsum/MTrenew2014sum.pdf>.
- [2] Global Wind Energy Council. (2013). Global Wind Report Annual Market Update 2013. Brussels, Belgium: **Global Wind Energy Council** [Online]. Available: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report_9-April-2014.pdf.
- [3] Abad G., Lopez J., Rodriguez M., Marroyo L. and Iwanski G. **Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation**, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [4] Jadhav H.T. and Roy R. "A Comprehensive Review on the Grid Integration of Doubly Fed Induction Generator," **Int. J. Elect. Power and Energy Syst.**, vol. 49, pp. 8-18, Jul. 2013.
- [5] Lin J., Sun Y., Song Y., Gao W. and Soensen P. "Wind Power Fluctuation Smoothing Controller Based on Risk Assessment of Grid Frequency Deviation in an Isolated System," **IEEE Trans. Sustainable Energy**, vol. 4, pp. 379-392, Apr. 2003.
- [6] Pingping H., Ming D. and Binbin L. "Study on Transient Stability of Grid-connected Large Scale Wind Power System," **2nd IEEE Int. Conf. Symp. on PEDG**, pp. 621-625, Jun. 2010.
- [7] Changling K., Banakar H., Shen B. and Boon-Teck O. "Strategies to Smooth Wind Power Fluctuations of Wind Turbine Generator," **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 22, no. 2, pp. 341-349, Jun. 2007.
- [8] Zou Y., Elbuluk M.E. and Sozer Y. "Simulation Comparisons and Implementation of Induction Generator Wind Power Systems," **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 49, no. 3, pp. 1119-1128, May-Jun. 2013.
- [9] Lopez J., Sanchis P., Roboam X. and Marroyo L. "Dynamic Behavior of the Doubly Fed Induction Generator During Three-Phase Voltage Dips," **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 22, no. 3, pp. 709-717, Sept. 2007.

- [10] Xiang D., Ran L., Tavner P. and Yang S. "Control of a Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine During Grid Fault Ride-Through," **IEEE Trans. Energy Conv.**, vol. 21, pp. 652-662, Sept. 2006.
- [11] Ling Y. and Cai X. "Rotor Current Dynamics of Doubly Fed Induction Generators During Grid Voltage Dip and Rise," **Int. J. Elect. Power and Energy Syst.**, vol. 44, pp.17-24, Jan. 2013.
- [12] Schlabach J. "Low Voltage Fault Ride Through Criteria for Grid Connection of Wind Turbine Generators," in **Proc. 5th Int. Conf. European Electricity Market**, 2008, pp.1-4.
- [13] Ali M.H., Park M., Yu I. and Murata T. "Improvement of Wind-Generator Stability by Fuzzy-Logic-Controlled SMES," **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 49, no. 3, pp. 1119-1128, May-Jun. 2013.
- [14] Kim S-T., Kang B-K., Bae S-H. and Park J-W. "Application of SMES and Grid Code Compliance to Wind/Photovoltaic Generation System," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 23, no. 3, Article#:5000804, Jun. 2013.
- [15] Kinjo T., Senjyu T., Urasaki N. and Fujita H. "Terminal-Voltage and Output-Power Regulation of Wind-Turbine Generator by Series and Parallel Compensation Using SMES," **IEE Proc. Gen, Trans, Distr.**, vol. 153, no. 3, pp. 276-282, May 2006.
- [16] Elshiekh M.E., Mansour D.A. and Azmy A.M. "Improving Fault Ride-Through Capability of DFIG-Based Wind Turbine Using Superconducting Fault Current Limiter," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 23, no. 3, Article#:5601204, Jun. 2013.
- [17] Wang Z., Zhang G. and Qiu M. "The Feasibility Study on the Combined Equipment Between Micro-SMES and Inductive/Electronic Type Fault Current Limiter," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 13, no. 2, pp. 2116-2119, Jun. 2003.
- [18] Zhu G., Wang Z., Liu X., Zhang G. and Jiang X. "Transient Behavior Research on the Combined Equipment of SMES-SFCL," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 14, no. 2, pp. 778-781, Jun. 2004.
- [19] Zhu G., Wang Z. and Zhang G. "Research on a Combined Device SMES-SFCL Based on Multi-Object Optimization," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 15, no. 2, part 2, pp. 2019-2022, Jun. 2005.

- [20] Zhao C., Wang Z., Zhang D., Du X., Guo W., Xiao L. and Lin L. “Development and Test of a Superconducting Fault Current Limiter-Magnetic Energy Storage (SFCL-MES) System,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 17, no. 2, pp. 2014-2017, Jun. 2007.
- [21] Shi J., Tang Y., Xia Y., Ren L. and Li J. “SMES Based Excitation System for Doubly-Fed Induction Generator in Wind Power Application,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 21, no. 3, pp. 1105-1108, Jun. 2011.
- [22] Guo W., Xiao L. and Dai S. “Enhancing Low-Voltage Ride-Through Capability and Smoothing Output Power of DFIG With a Superconducting Fault-Current Limiter–Magnetic Energy Storage System,” **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 27, no. 2, pp. 277-295, Jun. 2012.
- [23] Kennedy J. and Eberhart R. “Particle Swarm Optimization,” in **Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks**, vol. 1, pp. 1942-1948, Nov.-Dec. 1995.
- [24] **Global Wind Energy Council**. (2012). Global Wind Energy Outlook 2012. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council [Online]. Available: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/11/GWEO_2012_lowRes.pdf.
- [25] Pannell G., Atkinson D.J. and Zahawi B. “Minimum-Threshold Crowbar for a Fault-Ride-Through Grid-Code-Compliant DFIG Wind Turbine,” **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 25, no. 3, pp. 750-759, Sept. 2010.
- [26] Semen S., Niiranen J., Kanerva S., Arkkio A. and Saitz J. “Performance Study of a Doubly Fed Wind-Power Induction Generator Under Network Disturbances,” **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 21, no. 4, pp. 883-890, Dec. 2006.
- [27] Rahim A.H.M.A. and Nowicki E.P. “Supercapacitor Energy System for Fault-Ride Through of a DFIG Wind Generation System,” **Energy Convers. Manage.**, vol. 52, pp. 96-102, Jul. 2012.
- [28] Zhang S., Tseng K.J., Choi S.S., Nguyen T.D. and Yao D.L. “Advanced Control of Series Voltage Compensation to Enhance Wind Turbine Ride Through,” **IEEE Trans. Power Electron.**, vol. 27, no. 2, pp. 763-772, Feb. 2012.
- [29] Qiao W., Venayagamoorthy G.K and Harley R.G. “Real-Time Implementation of a STATCOM on a Wind Farm Equipped with Doubly Fed Induction Generators,” **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 45, no. 1, pp. 98-107, Jan.-Feb. 2009.

- [30] Wessels C., Gebhardt F. and Fuchs F.W. “Fault Ride-Through of a DFIG Wind Turbine Using a Dynamic Voltage Restorer During Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults,” **IEEE Trans. Power Electron.**, vol. 26, no. 3, pp. 807-815, Mar. 2011.
- [31] MATLAB/SimPowerSystems Version 5.7. Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2012.
- [32] Strunz K., Abbasi E. and Huu D. N. “DC Microgrid for Wind and Solar Power Integration,” **IEEE J. Emerging Sel. Topics Power Electron.**, vol. 2, no. 1, pp. 115–126, Mar. 2014.
- [33] Lee E. R. et. al. “Test of DC Reactor Type Fault Current Limiter Using SMES Magnet for Optimal Design,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 12, no. 1, pp. 850–853, Mar. 2002.
- [34] Rezkallah M., Chandra A., Singh B. and Niwas R. “Modified PQ Control for Power Quality Improvement of Standalone Hybrid Wind Diesel Battery System,” in **Proc. 2012 IEEE Fifth Power India Conf.**, pp. 1-6, 19-22 Dec. 2012.
- [35] Molinas M., Suul J. A. and Undeland T. “Low Voltage Ride Through of Wind Farms With Cage Generators: STATCOM Versus SVC,” **IEEE Trans. Power Electron.**, vol. 23, no. 3, pp. 1104-1117, May 2008.
- [36] Yunus A.M.S., Masoum M.A.S. and Abu-Siada A. “Application of SMES to Enhance the Dynamic Performance of DFIG During Voltage Sag and Swell,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 22, no. 4, Article#:5702009, Aug. 2012.
- [37] Machowski J., Bialek J. and Bumby J. **Power System Dynamics: Stability and Control**, 2nd ed., West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

วารสารต่างประเทศ (International Journal)

1. **T. Karaipoom** and I. Ngamroo, "Optimal superconducting coil integrated into DFIG wind turbine for fault ride through capability enhancement and output power fluctuation suppression," IEEE Transactions on Sustainable Energy, Article#: 2355423, Oct. 2014. (IEEE early access articles)
2. I. Ngamroo and **T. Karaipoom**, "Improving low-voltage ride-through performance and alleviating power fluctuation of DFIG wind turbine in DC microgrid by optimal SMES with fault current limiting function," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 24, no. 5, Article#: 5700805, Oct. 2014.
3. I. Ngamroo and **T. Karaipoom**, "Cooperative control of SFCL and SMES for enhancing fault ride through capability and smoothing power fluctuation of DFIG wind farm," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 24, no. 5, Article#: 5400304, Oct. 2014.

บทความทางวิชาการระดับนานาชาติ (International Conference)

1. **T. Karaipoom** and I. Ngamroo, "Enhancement of LVRT performance and alleviation of power fluctuation of DFIG wind turbine by optimal SMES unit," 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD2013), 25-27 Oct. 2013, Beijing, China.
2. **T. Karaipoom** and I. Ngamroo, "Enhancement of LVRT performance and alleviation of power fluctuation of DFIG wind turbine in DC microgrid by SMES," 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD2013), 25-27 Oct. 2013, Beijing, China.
3. **T. Karaipoom** and I. Ngamroo, "Optimization of multipurpose SMES-FCL for stability improvement of power system with DFIG wind turbine," Applied Superconductivity Conference 2014 (ASC 2014), 10-15 Aug. 2014, Charlotte, United States.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. **T. Karaipoom** and I. Ngamroo, “Smart PV solar farm for alleviation of power and voltage fluctuations due to wind farm during nighttime,” Grand Renewable Energy 2014 International Conference and exhibition, 27 Jul.-1 Aug. 2014, Tokyo, Japan.
5. **T. Karaipoom** and I. Ngamroo, “Transient stability augmentation of DFIG based-wind power by superconducting fault current limiter,” 2013 International Electrical Engineering Congress (IEECON2013), 13-15 Mar. 2013, Chiangmai, Thailand.
6. **T. Karaipoom** and I. Ngamroo, “Enhancement of fault ride through capability of DFIG wind turbine by optimal SMES unit,” International Smart Grid Conference & Exhibition 2013 (ISGC&E 2013), 8-11 July 2013, Jeju, Korea.

บทความทางวิชาการระดับชาติ (National Conference)

1. **T. Karaipoom** and I. Ngamroo, “Optimization of superconducting coil installed in DFIG wind turbine for enhancement of fault ride through capability and alleviation of power fluctuation,” 36th Electrical Engineering Conference (EECON-36), 11 - 13 Dec. 2012, Kanchanaburi, Thailand.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36

The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36)

11-13 ธันวาคม 2556
ณ เฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จ.กาญจนบุรี




Volume 2

- (CM) ไฟฟ้าสื่อสาร
- (EL) อิเล็กทรอนิกส์
- (PH) ไฟฟ้านิวเคลียร์
- (CT) ระบบควบคุม และการวัดคุม
- (DS) การประมวล สัญญาณดิจิทัล
- (CP) คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- (GN) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กับวิศวกรรมไฟฟ้า
- (BE) วิศวกรรมชีวการแพทย์

Electrical Engineering Dept.
Faculty of Engineering
Kasetsart University
50 Ngamwongwan Road, Laksi
Chatuchak Bangkok 10900
Tel: 02-797-0999 ext 1503, 1504
Fax: 02-579-7566







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ

Optimization of Superconducting Coil installed in DFIG Wind Turbine for Enhancement of Fault Ride Through Capability and Alleviation of Power Fluctuation

ธนพจน์ ภารัญญู¹ และ อิศระชัย งามหนู¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

E-mail: {krpoom, ngamroo}@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีหาค่าขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งเชื่อมต่อกับขดลวดโรเตอร์ด้านกริดและขดลวดโรเตอร์ด้านโรเตอร์ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอและเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ ในที่นี้จะประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อค้นหาค่าตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานเริ่มต้นที่สะสมในขดลวดที่จำเป็น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีโอของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง สามารถลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอที่ผลิตจากกังหันลมและลดกระแสเพิ่มสูงขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบได้กล่าวถึงขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดไม่เหมาะสม

คำสำคัญ: กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง, ตัวนำยิ่งยวด, วงจรกำลัง, ความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ, วิธีกลุ่มอนุภาค, ขดลวดตัวนำยิ่งยวด

Abstract

This paper proposes an optimization technique for an optimal superconducting coil (SC) installed in the doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine for enhancing fault ride through capability and alleviating power fluctuation. The particle swarm optimization is applied to achieve the optimal SC size, initial stored energy in the SC and proportional-integral parameters of DC-to-DC converters. Simulation study using shows that the smoothing power output effect and fault ride through enhancement of the DFIG with optimal SC is superior to those of the DFIG with non-optimal SC.

Keywords: Doubly fed induction generator wind turbine, Fault current limiter, Fault ride through capability, Particle swarm optimization, Superconducting coil

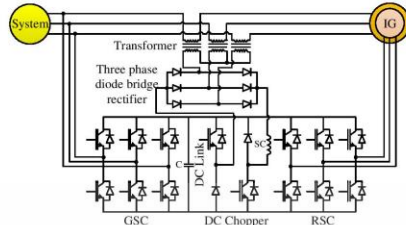
1. คำนำ

ในปัจจุบันกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) เป็นที่นิยมติดตั้งเนื่องจาก DFIG สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอได้และมีต้นทุนในการติดตั้งต่ำ อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากกังหันลมจะไม่สม่ำเสมอ ความเร็วลมที่ไม่คงที่ นอกจากนั้นความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของโรเตอร์ เนื่องจากทำให้เกิดแรงดันตกที่ขดลวด DFIG ที่ต่อกับระบบ และทำให้เกิดกระแสเพิ่มสูงขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งทางด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์ [1] โดยเฉพาะด้านโรเตอร์ที่มีคอนเวอร์เตอร์ซึ่งใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าอาจสูญเสียการควบคุม ส่งผลให้กังหันลมปลดตัวเองออกจากระบบเพื่อป้องกันความเสียหายจากความผิดปกติในระบบ

เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้าและการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลมชนิด DFIG เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil, SC) เข้าไประหว่างขดลวดโรเตอร์ด้านกริดและขดลวดโรเตอร์ด้านโรเตอร์ของ DFIG [2] ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SC ที่ติดตั้งเข้าไปอย่างไรก็ตามเนื่องจากการลงทุนติดตั้ง SC มีราคาสูงและการติดตั้งบนเดือของ SC ที่ไม่เหมาะสมเข้าไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการควบคุมลดลงซึ่งในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้นำ SC ที่มีขนาดที่เหมาะสม

บทความนี้เสนอวิธีการหาขนาดที่เหมาะสมของ SC ที่มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อติดตั้งในดีซีลิงก์ (DC link) ในกังหันลมชนิด DFIG ที่เชื่อมกับขดลวดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอและลดความรุนแรงของกระแสที่เพิ่มขึ้นใน DFIG ขณะเกิดความผิดปกติสามเฟสในระบบ นอกจากนี้ยังหาพลังงานสะสมเริ่มต้นใน SC และพารามิเตอร์ควบคุมพีโอของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-to-DC Converter) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุม ในที่นี้จะใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า SC ที่มีขนาดของขนาดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งใน DFIG สามารถแก้ปัญหาแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอและการข้ามผ่านความผิดปกติสามเฟสได้เนื่องจาก SC ที่มีขนาดของขนาดที่เหมาะสมที่จำเป็น

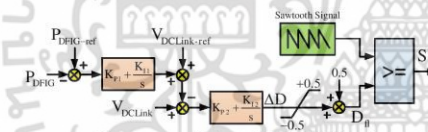
2. โครงสร้างระบบกึ่งหันลมชนิด DFIG ที่ติดตั้ง SC



รูปที่ 1 โครงสร้างกึ่งหันลมชนิด DFIG ที่ติดตั้ง SC

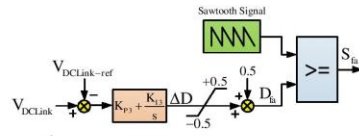
รูปที่ 1 แสดงการติดตั้ง SC เข้าไปด้านดีซีเพื่อเชื่อมต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter, RSC) และคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด (Grid Side Converter, GSC) [2] โดยมีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ควบคุมพลังแม่เหล็กไฟฟ้าและออกจาก SC ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์นี้จะเป็นตัวควบคุมการรับและคายพลังงานของ SC เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกังหันลม นอกจากนี้ยังจะเรียงกระแสขนาดสามเฟสแบบบริดจ์ (Three phase diode bridge rectifier) และหม้อแปลงไฟฟ้ายังทำหน้าที่ต่อ SC เข้าไปกับระบบ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสลัดวงจร (Fault current limiter) ที่เพิ่มสูงขึ้นทั้งทางด้านโรเตอร์และสเตเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้น ในที่นี้จะหาความสัมพันธ์ของ SC ที่เหมาะสมเพื่อใช้แก้ปัญหาพลังงานไฟฟ้าไม่สมดุลและจำกัดกระแสลัดวงจร

3. ตัวควบคุมดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์



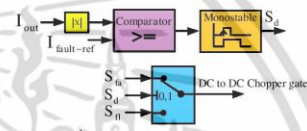
รูปที่ 2 ตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดลัดไฟฟ้าในแกว่ง

กรณีการลัดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สมดุลที่เกิดจากกังหันลมจะใช้ตัวควบคุมพีไอสองตัว ตามรูปที่ 2 ตัวควบคุมพีไอตัวหนึ่ง (PI 1) จะควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไม่สมดุลโดยเปรียบเทียบสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริง (P_{DFIG}) กับสัญญาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ($P_{DFIG-ref}$) และเอาผลลัพธ์ได้นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์อ้างอิง ($V_{DCLink-ref}$) เอาผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์ที่เปลี่ยนแปลงไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์จริง (V_{DCLink}) แล้วนำไปเข้าตัวควบคุมพีไอตัวที่สอง (PI 2) จะได้อาห์พุทเป็นรอบการทำงาน (D_{sc}) และนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย (sawtooth signal) จะได้สัญญาณ (S_{fa}) ขั้วขาขาของอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง IGBT ในกรณีเกิดลัดไฟฟ้าในแกว่ง



รูปที่ 3 ตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดความผิดปกติของสามเฟส

กรณีเกิดความผิดปกติของสามเฟสจะเกิดกระแสเกินทั้งด้านโรเตอร์และสเตเตอร์ และจะเกิดแรงดันเกินที่ดีซีลิงก์ทำให้สูญเสียการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์และสร้างความเสียหายให้กับคอนเวอร์เตอร์อีกด้วย ดังนั้น ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์จะต้องควบคุมให้แรงดันดีซีลิงก์เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด รูปที่ 3 แสดงตัวควบคุมพีไอที่สาม (PI 3) เริ่มจากวัดสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์จริง (V_{DCLink}) เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์อ้างอิง ($V_{DCLink-ref}$) เป็นตัวควบคุม PI 3 จะได้อาห์พุทเป็นรอบการทำงาน (D_{sc}) และนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยจะได้สัญญาณ (S_{fa}) ขั้วขาขาของอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง IGBT ในกรณีเกิดความผิดปกติของ



รูปที่ 4 ระบบตรวจจับความผิดปกติ

ในการควบคุมสองกรณีนี้จะต้องมีตัวตรวจจับกระแสลัดวงจร (Fault Current Detection) เพื่อใช้ในการส่งสวิตซ์เปลี่ยนโหมดทั้งสองกรณี ระบบตรวจจับความผิดปกติเป็นดังรูปที่ 4 ซึ่งจะวัดกระแสเอาห์พุท (I_{out}) ที่จุดต่อร่วมของกังหันลมชนิด DFIG เป็นอินพุทของตัวเปรียบเทียบ (Comparator) ซึ่งจะเปรียบเทียบกับกระแสลัดวงจรอ้างอิง ($I_{fault-ref}$) เพื่อวัดว่ากระแสที่ไหลนั้นเป็นกระแสลัดวงจรหรือไม่ แล้วผ่านตัวคงค่าสัญญาณ (Monostable) เพื่อใช้ในการคงค่าสัญญาณในกรณีที่มีความผิดปกติบนคลื่นมอีกครั้งหรือไม่สามารถเคลียร์ความผิดปกติได้จึงได้สัญญาณเปลี่ยนโหมดระหว่างกรณีการแกว่งกำลังไฟฟ้าไม่สมดุลและกรณีเกิดความผิดปกติของสามเฟส (S_{fa})

4. การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ SC และตัวควบคุมพีไอ

ในที่นี้จะทำการหาขนาดกระแสเริ่มต้น และพลังงานเริ่มต้นที่เหมาะสมของ SC และพารามิเตอร์พีไอที่เหมาะสมของ PI 1 PI 2 และ PI 3 พร้อมกัน โดยมีจุดประสงค์ดังนี้

1. เพื่อให้ตัวควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ไม่สมดุลด้านออกของกังหันลมชนิด DFIG
2. เพื่อลดแรงดันเกินที่ดีซีลิงก์ขณะเกิดความผิดปกติ

3. เพื่อลดกระแสเกินทั้งด้านสวิตเตอร์และด้านโรเตอร์ขณะเกิดลวดลัดพร้อม

จากจุดประสงค์ต่างๆ สามารถนำมาตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมและเงื่อนไขได้ดังนี้

$$\text{Minimize } \int_{t_0}^{t_{lim}} |\Delta P| dt + \int_{t_{r1}}^{t_{r2}} |\Delta V| dt + \int_{t_{f1}}^{t_{f2}} |\Delta I| dt + \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC}^2 \quad (1)$$

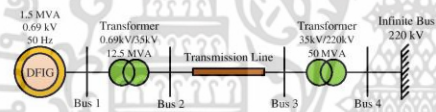
Subject to $0.001 \leq L_{SC} \leq 10 \text{ H}, 1500 \leq I_{SC} \leq 3000 \text{ A}$

$0.001 \leq K_{r1} \leq 1, 0.1 \leq K_{r2} \leq 3$

$0.001 \leq K_{f1} \leq 100, 0.001 \leq K_{f2} \leq 1$

เมื่อ ΔP คือค่าความแตกต่างระหว่างกำลังไฟที่วัดได้จริงกับกำลังไฟที่อ้างอิง ΔV คือค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟที่วัดได้จริงกับแรงดันไฟที่อ้างอิงของแรงดันไฟที่วัดได้จริง ΔI คือค่าความแตกต่างระหว่างกระแสไฟที่วัดได้จริงกับกระแสไฟที่อ้างอิงของโรเตอร์ L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำของ SC I_{SC} คือค่ากระแสเริ่มต้นของ SC t_r คือเวลาเริ่มต้นของการจำลอง t_{lim} คือจุดเวลาสิ้นสุดของการจำลอง t_{r1} คือเวลาเกิดลวดลัดพร้อมเฟส t_{r2} คือเวลาเคลียร์ลวดลัดพร้อมเฟส ในที่นี้ที่ทำการแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสม (1) โดยใช้ PSO [3] ก็ได้ค่าพารามิเตอร์ของ SC และตัวควบคุมฟิวที่เหมาะสมที่สุด

5. ผลการจำลอง



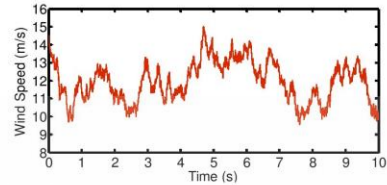
รูปที่ 5 ระบบกำลังไฟที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 5 แสดงระบบกำลังไฟที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ กังหันลมชนิด DFIG หม้อแปลงไฟฟ้า สายส่ง และบัสอนันต์ พารามิเตอร์ของระบบกำลังไฟได้อ้างอิงจาก [2]

ผลการพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ SC ด้วยวิธี PSO นั้นจะอยู่ภายใต้ความเร็วลมไม่คงที่ดังรูปที่ 6 และลวดลัดพร้อมเฟสคลื่นที่บีต 2 ที่เวลา 4 s เป็นเวลา 150 ms ซึ่งได้ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 1 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิวที่เหมาะสมดังตารางที่ 2 เส้นโค้งการเข้าหาค่าที่เหมาะสมของพลังงานเริ่มต้น (E_{SC}) กระแสเริ่มต้น (I_{SC}) และค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) ของ SC แสดงได้ดังรูปที่ 7 การจำลองทางคอมพิวเตอร์จะเปรียบเทียบกับ DFIG ซึ่งติดตั้ง SC ที่มีขนาดความเหนี่ยวนำเท่ากับ 5 H โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีแรกเป็นผลการจำลองในกรณีการลัดวงจรแกว่งกำลังไฟที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากกังหันลม รูปที่ 6 แสดงความเร็วลมไม่คงที่ซึ่งทำให้กำลังไฟที่ได้ออกไม่สม่ำเสมอตามดังรูปที่ 8 ในกรณีที่

ไม่ได้ติดตั้ง SC กำลังไฟที่จะแกว่งอย่างรุนแรง เมื่อติดตั้ง SC ขนาด 5 H การแกว่งกำลังไฟจะลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ขนาด SC และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิวที่เหมาะสม การแกว่งกำลังไฟจะลดลงอย่างชัดเจน



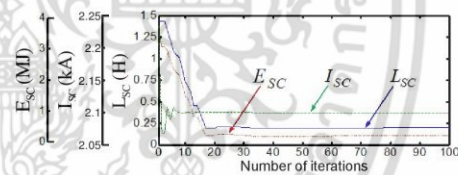
รูปที่ 6 ความเร็วลม

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของ SC

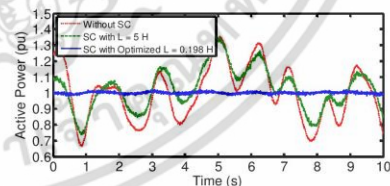
พารามิเตอร์	Non-optimal SC	Optimal SC
ค่าความเหนี่ยวนำ	5 H	0.198 H
ค่ากระแสเริ่มต้น	2.106 kA	2.106 kA
ค่าพลังงานเริ่มต้น	11.08 MJ	0.439 MJ

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิว

พารามิเตอร์	Non-optimal SC	Optimal SC
K_{r1}, K_{r2}	0.005, 0.0025	0.0425, 1.9811
K_{f1}, K_{f2}	0.5, 0.1	9.4074, 0.9683
K_{p1}, K_{p2}	0.0005, 0.001	49.186, 0.5042

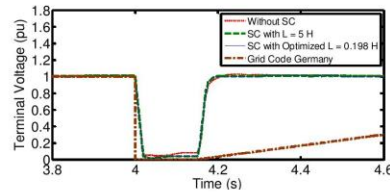


รูปที่ 7 เส้นโค้งการเข้าหาค่าที่เหมาะสม

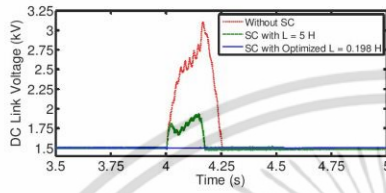


รูปที่ 8 กำลังไฟที่บีต 1

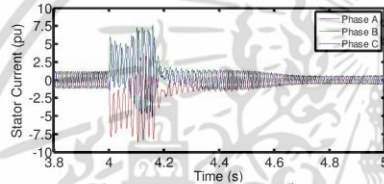
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



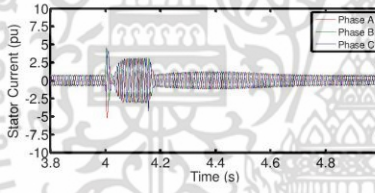
รูปที่ 9 แรงดันที่บัส 1



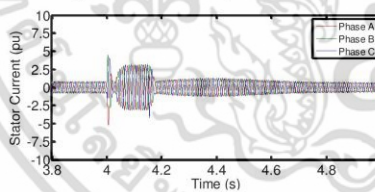
รูปที่ 10 แรงดันดีซีลิงก์



รูปที่ 11 กระแสสเตเตอร์ (ไม่ได้ติดตั้ง SC)



รูปที่ 12 กระแสสเตเตอร์ (ติดตั้ง SC ที่ 5 H)



รูปที่ 13 กระแสสเตเตอร์ (ติดตั้ง SC ที่เหมาะสม)

กรณีสอง สมมติให้เกิดความผิดปกติของสายส่งที่บัส 2 ที่เวลา 4 เป็นเวลา 150 ms รูปที่ 9 แสดงแรงดันบัสที่บัส 1 ทั้งกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง SC และมีการติดตั้ง SC ที่ 5 H และ SC ที่เหมาะสม จะเห็นว่าแรงดันลดลง

เกือบเป็นศูนย์ ในที่นี้จะอ้างอิงกริดโคดี Germany EON [4] ที่กำหนดว่า กังหันลมจะต้องทนต่อแรงดันที่จุดต่อกับระบบซึ่งตกลงเป็น 0 % ของแรงดันปรกติเป็นเวลา 150 ms ดังนั้นกังหันลมนี้ยังคงต่ออยู่กับกริดและข้ามผ่านความผิดปกติได้

รูปที่ 10 แสดงแรงดันดีซีลิงก์ในขณะเกิดความผิดปกติ เมื่อไม่มี SC แรงดันดีซีลิงก์จะตกลงเหลือประมาณ 1750 V แต่เมื่อใช้ค่าขนาด SC และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โอที่เหมาะสมแรงดันดีซีลิงก์กลับมีค่าคงที่ตลอดที่ 1500 V และเมื่อสังเกตรูปที่ 11, 12 และ 13 แสดงกระแสสเตเตอร์ทั้งสามเฟสกรณีไม่ได้ติดตั้ง SC, ติด SC ที่ 5 H และติด SC ที่เหมาะสม ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อไม่ได้ติดตั้ง SC กระแสที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความผิดปกติจะมีค่าสูงมาก แต่เมื่อมีการติดตั้ง SC ที่ 5 H หรือ SC ที่ค่าเหมาะสม กระแสสเตเตอร์จะลดลงอย่างมาก ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า SC ที่เหมาะสมซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ำกว่ามีประสิทธิผลในการลดกระแสดีเอ็นในสเตเตอร์ได้ใกล้เคียงกับ SC ที่ 5 H

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการหาขนาดความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับติดตั้งในกังหันลมชนิด DFIG และพารามิเตอร์ที่โอของดีซีลิงก์คอนเวอร์เตอร์เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟที่ได้นอกที่โอที่ไม่มีเสถียรและเพิ่มความสามารถข้ามผ่านความผิดปกติด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค ผลการศึกษานี้ยืนยันได้ว่า ตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมและพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่โอที่เหมาะสมสามารถลดการแกว่งกำลังไฟที่ได้นอกของ DFIG ในสภาวะปรกติและลดกระแสที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดความผิดปกติของสายส่งกังหันลมชนิด DFIG ได้มีประสิทธิภาพเหนือกว่าตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่กว่าและพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่โอที่ไม่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Zhang, X. Cai and J. Guo, "Dynamic responses of DFIG fault currents under constant AC excitation condition," Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf, pp.1-4, 2009.
- [2] W. Guo, L. Xiao, and S. Dai, "Enhancing low-voltage ride-through capability and smoothing output power of DFIG with a superconducting fault-current limiter-magnetic energy storage system," IEEE Trans. Energy Conv., Vol.27, pp.277-295, 2012.
- [3] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, Vol.1, pp.1942-1948, 1995.
- [4] J. Schlabbach, "Low voltage fault ride through criteria for grid connection of wind turbine generators," Proc. 5th Int. Conf. European Electricity Market, pp.1-4, 2008.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายธนพนธ์ การัยภูมิ
 วัน เดือน ปีเกิด 28 กรกฎาคม 2532 ที่ กรุงเทพมหานคร
 ที่อยู่ 59/141 หมู่ 7 ต.หันตรา อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000

ประวัติการศึกษา 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทุนและรางวัล

- 2556 ทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2556 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน จาก สทพ.
 2556 ทุนสนับสนุนการเสนอผลงานทางวิชาการ
 2557 ทุนสนับสนุนการเสนอผลงานทางวิชาการ
 2557 ทุนสนับสนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับปริญญาโท จากสำนักงานกองทุน สจล.
 2556 ได้รับรางวัลบทความดีเด่น ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 36 (EECON 36) ในหัวข้อเรื่อง “Optimization of superconducting coil installed in DFIG wind turbine for enhancement of fault ride through capability and alleviation of power fluctuation”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้