



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประสานควบคุมของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้ง
แหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียน

**Coordinated Control of Superconducting Devices for Stabilization Electric Power System
with Renewable Energy Sources**

นายอิสระชัย งามหฐ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประสานควบคุมของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้ง
แหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียน

**Coordinated Control of Superconducting Devices for Stabilization Electric Power System
with Renewable Energy Sources**

นายอิสระชัย งามหฐ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการ (ภาษาไทย) การประสานควบคุมของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียน

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558

ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 500,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2557 ถึง กันยายน 2558

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายอิสระชัย งามหรุ ภาควิวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประสานการควบคุมอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดได้แก่ Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) และ Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนจำพวกลมและแสงอาทิตย์ โดยจะทำการหาค่าที่เหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ของ SMES ได้แก่ค่าตัวเหนี่ยวนำยิ่งยวด ขนาดพลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นในการทำเสถียรภาพ ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ส่วนค่าพารามิเตอร์ของ SFCL ได้แก่ ค่าความต้านทานที่เหมาะสม และค่าพลังงานสูญเสียในตัวต้านทานที่น้อยสุด เพื่อแก้ปัญหาต่างๆด้านเสถียรภาพระบบได้แก่การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งจ่ายพลังลมและแสงอาทิตย์ การลดกระแสผิดพลาดเมื่อเกิดลัดวงจรในระบบ การเพิ่มความสามารถในการขับผ่านความผิดพลาด (Fault ride through capability) ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าพลังลมและแสงอาทิตย์ และการเพิ่มเสถียรภาพในสถานะชั่วคราวของระบบหลังจากเกิดลัดวงจร เป็นต้น งานวิจัยนี้นอกจากจะก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในด้านการทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียนที่ผลิตกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอแล้ว ยังสร้างความมั่นคงทางพลังงานให้กับระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความเป็นอัจฉริยะหรือสมาร์ทกริด (Smart Grid)

คำสำคัญ : ระบบไฟฟ้ากำลัง แหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียน อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด การทำเสถียรภาพและควบคุม

Research Title: Coordinated Control of Superconducting Devices for Stabilization of Electric Power System with Renewable Energy Sources

Researcher: Issarachai Ngamroo

Faculty: Engineering

Department: Electrical Engineering

ABSTRACT

This research proposes the coordinated control of superconducting devices, i.e. Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) and Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) for stability improvement of the power system integrated with renewable energy sources, i.e. wind and solar farms. The inevitable problems of wind and solar farms are the output power fluctuation and the fault-ride through capability. To handle both problems, the parameters of SMES such as the inductance of the superconducting coil, the sufficient initial stored energy used for stabilization, and parameters of active and reactive power controllers are optimized. For the SFCL parameters, the resistance or the inductance of SFCL is optimally tuned. This research project not only contributes the new knowledge of power system stabilizing control under the scenarios of renewable energy sources, but also establishes the system security towards the smart grid.

Keywords: Electric power system, Renewable energy source, Superconducting devices, Power system stabilizing control

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยประเภทเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

อิสรหทัย งามหนู

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	7
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	8
1.4 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	8
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	9
1.6 ขั้นตอนของการวิจัย.....	10
บทที่ 2 หลักการควบคุมกัณฑ์ลมหที่ไ้เครื่องกำเนดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	11
2.1 กัณฑ์ลมหที่ไ้เครื่องกำเนดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	11
2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ.....	18
2.3 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค.....	20
บทที่ 3 การหาขนาดขดลวดตัวนำย้งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกัณฑ์ลมหที่ไ้เครื่องกำเนดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพร่องและลดการแกว่งกำล้งไฟฟ้าที่ไม่สมำเสมอ.....	23
3.1 ระบบกำล้งไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา.....	23
3.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในกรณีศึกษา.....	26
3.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด.....	32
3.4 ผลการจำลองและทดสอบ.....	37
3.5 สรุป.....	59
บทที่ 4 อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบย้งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์แบบอนกประสงค้ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำล้งไฟฟ้าที่มีกัณฑ์ลมหที่ไ้เครื่องกำเนดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่ออยู่.....	61

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ศึกษา.....	61
4.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES, FCL และ SMES-FCL.....	63
4.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด.....	66
4.4 ผลการจำลองและทดสอบ.....	70
4.5 สรุป.....	77
บทที่ 5 การปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของ กังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในระบบดีซีไมโครกริดด้วยอุปกรณ์ สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่เหมาะสมพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแส.....	78
5.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด.....	78
5.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL.....	80
5.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด.....	86
5.4 ผลการจำลองและทดสอบ.....	91
5.5 สรุปผลการทดสอบ.....	97
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	98
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	98
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
บทที่ 7 ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	100
บรรณานุกรม.....	102
ภาคผนวก.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ.....	25
3.2 พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่.....	25
3.3 พารามิเตอร์ของ STATCOM.....	26
3.4 พารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี PSO.....	39
3.5 พารามิเตอร์ตัวควบคุมฟูลไของ Battery และ STATCOM.....	39
3.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของ IAE ของ ΔP	54
3.7 การเปรียบเทียบค่าสูงสุดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์.....	59
4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ.....	62
4.2 พารามิเตอร์ของ FCL SMES และ SMES-FCL.....	72
4.3 ขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES และ SMES-FCL.....	76
5.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ.....	79
5.2 การทำงานของสวิตช์ของดีซีช็อปปเปอร์ใน SMES-FCL.....	83
5.3 พารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL.....	93
5.4 ขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES และ SMES-FCL.....	97

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของกังหันลม DFIG	11
2.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	12
2.3 การควบคุมกังหันลม DFIG ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์	16
2.4 วงจรสมมูลของ Coupling Choke	17
2.5 การควบคุมกังหันลม DFIG ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด	18
2.6 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์	20
2.7 ขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงอนุภาค	23
3.1 ระบบกำลังไฟฟ้า	24
3.2 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งแบตเตอรี่หรือตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ	24
3.3 วงจรไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด	27
3.4 โครงสร้างของแบตเตอรี่	30
3.5 โครงสร้างของ STATCOM	31
3.6 โครงสร้างตัวควบคุมขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสภาวะปกติ	33
3.7 โครงสร้างตัวควบคุมขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสภาวะเกิดความผิดปกติ	33
3.8 โครงสร้างของตัวตรวจจับสภาวะเกิดความผิดปกติ	34
3.9 โครงสร้างตัวควบคุมของแบตเตอรี่	35
3.10 โครงสร้างตัวควบคุมของ STATCOM	35
3.11 ความเร็วลม	38
3.12 การหาค่าคำตอบของแต่ละเทอมของสมการวัตถุประสงค์	38
3.13 การหาค่าคำตอบของ E_{SC0} , I_{SC0} และ L_{SC}	39
3.14 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1	41
3.15 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์	42
3.16 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ที่มีอิทธิพลต่อกำลังไฟฟ้า	43
3.17 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1	44
3.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1	44
3.19 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า	44
3.20 ความเร็วโรเตอร์	45
3.21 ผลต่างระหว่างกำลังทางกล P_m กับกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG}	46

สารบัญรูป(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.22 ผลต่างระหว่างกำลังทางกล P_m กับกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG}	46
3.23 กำลังไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด	46
3.24 กำลังไฟฟ้า	47
3.25 พลังงานไฟฟ้าสะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด	47
3.26 กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์	49
3.27 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด	50
3.28 อธิบายสภาวะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ดีซีบูดีซี	51
3.29 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์	52
3.30 กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A	53
3.31 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบระหว่างแบตเตอรี่กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด	54
3.32 IAE ของกำลังไฟฟ้า ΔP_{Bus1}	54
3.33 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1	55
3.34 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์	56
3.35 กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์	57
3.36 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด	58
3.37 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์	59
4.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้ง SMES-FCL	62
4.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES	63
4.3 วงจรไฟฟ้าของ FCL	64
4.4 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL	65
4.5 โครงสร้างตัวควบคุมของ SMES และ SMES-FCL	66
4.6 ความเร็วลม	71
4.7 การหาค่าคำตอบของ D_k , IAE , E_{SC0} และ L_{SC}	71
4.8 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2	73
4.9 IAE ของผลต่างกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2	73
4.10 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1	75
4.11 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1	75
4.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1	75
4.13 ความเร็วโรเตอร์	76
4.14 พลังงานจลน์ในโรเตอร์	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.1 ระบบดัชนีไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา.....	79
5.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES.....	80
5.3 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL.....	80
5.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะปกติ.....	81
5.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะเกิดความผิดปกติ.....	82
5.6 หลักการทำงานของ SMES-FCL.....	84
5.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES.....	86
5.8 โครงสร้างของตัวควบคุม FCL.....	87
5.9 ความเร็วลม.....	91
5.10 การหาค่าคำตอบของสมการวัตถุประสงค.....	92
5.11 การหาค่าคำตอบของ $1/V_C$, $IAE \Delta P_{Bus4}$, L_{SC} และ E_{SC0}	92
5.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4.....	94
5.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	94
5.14 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	94
5.15 การเปรียบเทียบการลดลงของแรงดันไฟฟ้า.....	95
5.16 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	95
5.17 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	95
5.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	96
5.19 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	96
5.20 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG1.....	96
5.21 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

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

งานวิจัยนี้จะให้ความสนใจกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการแปรรูปพลังงานลมเนื่องจากระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาการติดตั้งฟาร์มกังหันลมทั้งบนบก (Onshore) และนอกชายฝั่งทะเล (Offshore) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและมีอัตราการกำลังการผลิตประมาณ 318 GW ในปลายปี 2013 และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ปี [2] โดยเฉพาะกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งเป็นกังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตกำลังไฟฟ้า และได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอันเนื่องมาจากประโยชน์หลายด้าน เช่น การติดตั้งการลงทุนที่ต่ำ ความสามารถในการควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แยกอิสระต่อกัน [3] ซึ่งการติดตั้งกังหันลม DFIG ในระบบกำลังไฟฟ้าจะส่งผลดีในแง่ของการเพิ่มกำลังการผลิตให้ระบบไฟฟ้าเพื่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งกังหันลม DFIG ยังส่งผลเสียร้ายแรงต่อเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย เนื่องมาจากกังหันลมจะได้รับพลังงานลมที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้กังหันลม DFIG ผลิตกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power Fluctuation) ให้กับระบบ [4, 5] เมื่อการติดตั้งกังหันลมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ระบบเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางส่วนจะต้องปลดตัวเองออกจากระบบ ทำให้ความถี่ระบบจากการรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักในระบบลดน้อยลง ส่งผลให้เมื่อเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบจะนำไปสู่การเสียเสถียรภาพได้ง่าย [6, 7] นอกจากนี้ กังหันลม DFIG ยังมีจุดบกพร่องในโครงสร้างของตัวกังหันลมเอง เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ เนื่องจากกังหันลม 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 การที่กังหันลมจะปลดตัวเองออกจากระบบจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานหรือกฎเกณฑ์ที่ใช้ร่วมกันระหว่างผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าและองค์กรที่ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าและมักเรียกมาตรฐานนี้ว่ามาตรฐาน Grid Code ซึ่งจะกล่าวถึงเมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบจะเกิดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลมมีค่าลดลงเป็นเท่าไรจากค่าแรงดันไฟฟ้าปกติ และระยะเวลาที่เกิดความผิดปกติจนถึงระยะการฟื้นตัวของกังหันลมนานเท่าไร โดยทั้งนี้ทั้งนั้นจะใช้แรงดันไฟฟ้าหน้าบัสของกังหันลมเป็นเกณฑ์ตัดสินว่ากังหันลมจะต้องปลดตัวเองออกจากระบบหรือไม่ [12] ดังนั้น กังหันลมจะต้องทนต่อสภาวะเกิดความผิดปกติหรือข้ามผ่านความผิดปกติ (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 ในการยับยั้งกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นให้ลดน้อยลงด้วยการเพิ่มความต้านทานขึ้นภายในตัวเองเพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติให้กับกังหันลม DFIG แต่ถึงกระนั้น การเพิ่มความ

ด้านทานจะเป็นการสร้างความสูญเสียทางกำลังไฟฟ้า (Power Loss) เมื่อยังจำกัดกระแสฟลัดได้มากเท่าไรก็จะเกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นมากเท่านั้น ดังนั้น ควรจะต้องพิจารณาถึงค่าความต้านทานที่เหมาะสมด้วย เมื่อขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถนำมาเป็นทั้ง SMES และ FCL จึงมีการนำเสนอการร่วมกันของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ใน [17-20] โดยใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันในการทำเสถียรภาพทั้งการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการยับยั้งกระแสฟลัดที่เกิดจากความผิดปกติ โดย SMES จะติดตั้งขนานกับบัสแบบทั่ว ๆ ไป และทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แต่เมื่อมีการทำงานร่วมกันกับ FCL แล้วตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะต่อกับสายส่งอีกด้วยโดยผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบอย่างอัตโนมัติผ่านวงจรเรียงกระแส ซึ่งเปรียบเสมือนการแทรกอินพีแดนซ์เข้าไปในระบบด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อจำกัดกระแสฟลัด นอกจากนี้ ยังมีการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในกังหันลม DFIG ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดใน [21] ด้วยสมรรถนะการสะสมพลังงานไฟฟ้าและการตอบสนองที่รวดเร็วของขดลวดตัวนำยิ่งยวด ทำให้การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงทั้งทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์เป็นไปได้อย่างอิสระต่อกัน ส่งผลให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ได้จากภายใน ยิ่งไปกว่านั้น ใน [22] ยังนำเสนอการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในกังหันลม DFIG ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดด้วยโครงสร้างแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage Source Topology) และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current Source Topology) ในสภาวะปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แต่เมื่อเกิดสถานะความผิดปกติในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อไปยังทางด้านโรเตอร์หรือสเตเตอร์เพื่อใช้จำกัดกระแสเกินที่เกิดทางด้านโรเตอร์หรือสเตเตอร์ ซึ่งผลลัพธ์ยังแสดงว่าการเชื่อมต่อขดลวดตัวนำยิ่งยวดในลักษณะอนุกรมกับทางด้านสเตเตอร์จะทำได้ความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติได้ดีกว่าการเชื่อมต่ออนุกรมกับทางด้านโรเตอร์ แต่อย่างไรก็ตาม ใน [21, 22] ก็ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิโอะที่ใช้นั้นมีความเหมาะสม

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในลักษณะการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยจะมุ่งเน้นเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ทั้งในระบบไฟฟ้ากระแสสลับและระบบไฟฟ้าดีซีไมโครกริด โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวควบคุมฟิโอะในการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำการออกแบบเนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานได้ง่ายและไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มสมรรถนะให้กับการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้จะทำการออกแบบขนาดค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิโอะให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) [23] ไปพร้อม ๆ กันภายใต้วัตถุประสงค์ที่กำหนดและเป็นไปอย่างอัตโนมัติ

โดยในการศึกษาจะนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน 3 ระบบ คือ 1) นำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ติดตั้งภายในกังหันลม DFIG เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของ

กำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ 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 การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ

ในปัจจุบัน กำลังการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานลมมีเพิ่มขึ้นอย่างสูงในระบบกำลังไฟฟ้า โดยมียอดการติดตั้งกำลังการผลิตของกังหันลมประมาณ 280 GW ในปลายปี 2012 [24] โดยเฉพาะกังหันลม DFIG มักจะได้รับความนิยมอย่างกว้าง เพราะประโยชน์อันหลากหลาย เช่น การติดตั้งการลงทุนที่ต่ำ ขนาดพิกัดคอนเวอร์เตอร์ที่เล็ก และการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แยกอิสระต่อกัน [3] เว้นเสียแต่ว่า กังหันลม DFIG ยังต้องเผชิญกับปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ 2 ประการ คือ ความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ และการเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า [4] สำหรับปัญหาการข้ามผ่านความผิดปกติมีสาเหตุมาจากการเกิดความผิดปกติในระบบ ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าลดลง (Voltage Dip) หน้าบัสของกังหันลม และยังส่งผลกระทบต่อภายในกังหันลมให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกินทั้งในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ และยังสร้างปัญหาให้คอนเวอร์เตอร์เสียหาย [9] เพื่อป้องกันปัญหาเหล่านี้กังหันลม DFIG จะต้องปลดตัวออกจากระบบ ซึ่งถ้าเป็นฟาร์มกังหันลมที่มีขนาดใหญ่การปลดตัวออกจากระบบจะนำไปสู่การสร้างปัญหาที่ร้ายแรงให้กับเสถียรภาพระบบไฟฟ้าได้ และปัญหาอีกประการของกังหันลม DFIG เมื่อทำงานในสภาวะปกติกังหันลม DFIG จะผลิตกำลังไฟฟ้าที่แกว่ง ซึ่งปัญหานี้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง เสถียรภาพทางความถี่ และเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า [7]

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] จะจำกัดกระแสฟลด์เพื่อปรับปรุงความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG แต่อย่างไรก็ตาม การจำกัดกระแสฟลด์นั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในรูปแบบของตัวต้านทานซึ่งควรพิจารณาในส่วนนี้ และใน [17-20] จะเป็นการใช้ SMES-FCL โดยในสถานะปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเป็นตัวสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะแทรกเข้าไปในระบบเพื่อจำกัดกระแสฟลด์ผ่านทางวงจรเรียงกระแส และใน [15] SMES จะทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าและชดเชยแรงดันไฟฟ้าด้วยการต่ออินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมและแบบขนาน ดังนั้น จะสามารถเพิ่มความหน่วงให้กับระบบเมื่อเกิดความผิดปกติและช่วงลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าได้ เมื่อนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในกังหันลม DFIG ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดใน [21] จะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากภายในกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมากกว่านั้นการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในกังหันลมใน [22] ยังใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการจำกัดกระแสฟลด์ทั้งทางด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์ได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามทั้ง [21, 22] ยังไม่สามารถยืนยันถึงความเหมาะสมของขนาดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมที่ติดตั้งภายในกังหันลม DFIG สำหรับการปรับปรุงความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ในสถานะการทำงานปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวสะสมพลังงานเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบอย่างฉับพลันขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่ยับยั้งกระแสไฟฟ้าเกินในสเตเตอร์และโรเตอร์ และยังยับยั้งแรงดันไฟฟ้าเกินในดีซีลิงค์อีกด้วย และในงานวิจัยนี้ยังค้นหาขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสมโดยใช้วิธีฝูงอนุภาคไปพร้อม ๆ กัน โดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [31] จะแสดงให้เห็นว่าขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมที่ติดตั้งภายใน

กังหันลม DFIG จะให้ประสิทธิผลที่เหนือกว่าทั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ไม่เหมาะสม แบตเตอรี่ และ STATCOM

1.1.2 อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟลด์แบบอเนกประสงค์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่ออยู่

ในปัจจุบัน การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานลมมีบทบาทอย่างมากในระบบกำลังไฟฟ้าทั่วโลก และในปลายปี 2013 กำลังการผลิตของกังหันลมทั่วโลกจะมีอยู่ประมาณ 318 GW [2] โดยกังหันลม DFIG มีผู้ผลิตให้ความสนใจอย่างมาก เพราะกังหันลมชนิดนี้มีประโยชน์หลายอย่าง เช่น การควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ และการติดตั้งการลงทุนที่ต่ำ [3] แต่อย่างไรก็ตาม กังหันลม DFIG จะต้องเผชิญกับปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จากปัญหาเสถียรภาพชั่วคราว การข้ามผ่านความผิดปกติ และการเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ในสภาวะปกติการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG จะสร้างความเสียหายให้กับเสถียรภาพของระบบ [5] และเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบจะเกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงที่หน้าบัสของกังหันลม DFIG และเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเกินในโรเตอร์ของกังหันลม ส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์ได้รับความเสียหาย [10] เพื่อป้องกันปัญหานี้กังหันลม DFIG จึงปลดตัวออกจากระบบถ้าในกรณีของฟาร์มกังหันลมที่มีขนาดใหญ่และเกิดการปลดตัวออกจากระบบอาจจะสร้างปัญหาเสถียรภาพให้กับระบบได้อย่างมาก

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

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

1.1.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางในระบบดีซีไมโครกริดด้วยอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่เหมาะสมพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแส

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

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอใน [22, 15] และ [17-20] โดยการใช้งานร่วมกันของ SMES และ FCL เพื่อใช้แก้ปัญหาดังกล่าวในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใน [22] ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะติดตั้งภายในกังหันลม DFIG เพื่อใช้ยับยั้งกระแสเกินและแรงดันไฟฟ้าเกินในช่วงที่เกิดความผิดปกติในระบบ และใน [15] SMES จะมีส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ทั้งการชดเชยแบบอนุกรมและขนานเพื่อใช้ลดการแกว่งทั้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของกังหันลม แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ SMES ใน [22, 15] ไม่สามารถแสดงผลของการลดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลม DFIG ในระหว่างเกิดความผิดปกติได้ ดังนั้น จะไม่สามารถยืนยันได้ว่ากังหันลม DFIG จะสามารถข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านได้ ส่วนใน [17-20] แสดงถึงการใช้งานร่วมกันของ SMES และ FCL เพื่อใช้ยับยั้งกระแสฟลัดด์และลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบที่ไม่ได้ติดตั้งแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ซึ่งในงานวิจัยที่กล่าวมาไม่มีงานวิจัยใดที่จะประยุกต์ใช้งานร่วมกันของ SMES และ FCL เพื่อแก้ปัญหาทั้งการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบดีซีไมโครกริดอยู่เลย

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

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทาง โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการทำเสถียรภาพให้เกิดประโยชน์สูงสุด
2. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

3. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกักเก็บพลังงานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่ออยู่

4. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่เหมาะสมพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสในระบบดิจิทัลไมโครกริดสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บพลังงานกักเก็บพลังงานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

5. เพื่อนำเสนอการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิโอะที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามการแก้ปัญหาอย่างเหมาะสม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บพลังงานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยมีสมมติฐานของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษากักเก็บพลังงานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางจะเชื่อมต่อกับบัสบาร์เพื่อจำลองว่าต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่
2. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะจำลองโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำและไม่คิดผลข้างเคียงของขดลวดตัวนำยิ่งยวด เนื่องจากจะสมมติให้พร้อมสามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าและจำกัดกระแสฟลัดได้ตลอดเวลา
3. คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการศึกษาจะไม่คำนึงถึงการสูญเสียกำลังทางไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบกำลังไฟฟ้าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าเพียงเล็กน้อย

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บพลังงานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางมีแนวคิดและหลักการจากหลายงานวิจัยที่ผ่านมามีดังนี้

1. การใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาใช้แก้ปัญหาค่าการข้ามผ่านความผิดปกติและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บพลังงานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

จากปัญหาของกักเก็บพลังงานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางใน [13-15] ได้มีการนำอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดมาใช้แก้ปัญหาทั้งการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บพลังงาน และใน [16] ใช้ตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดจำกัดกระแสฟลัดประเภทตัวต้านทานมาแก้ปัญหาค่าการข้ามผ่านความผิดปกติของกักเก็บพลังงาน และยังมีการนำข้อดีทั้งสองอุปกรณ์ใน [17-20] เพื่อใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยการใช้ขดลวดร่วมกันในการแก้ปัญหาของ

กัณฑ์ลม จึงเป็นแนวคิดที่มาของการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาออกแบบเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สามารถทั้งทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและยังสามารถใช้จำกัดกระแสฟลัดได้ อีกด้วย และยังต้องการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิไอให้เหมาะสม

2. การนำอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสมาแก้ปัญหของกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ต้องร่วมอยู่ในระบบคิซีไมโครกริด

จากการแก้ปัญหของกัณฑ์ลมที่ผ่านมาใน [17-20] ยังไม่มีงานวิจัยใดที่นำอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสมาใช้ในการทำเสถียรภาพในระบบคิซีไมโครกริด จึงเป็นแนวความคิดที่จะออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่เหมาะสมพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสขึ้นใหม่ในระบบคิซีไมโครกริด

จากแนวคิดที่กล่าวมา งานวิจัยนี้ได้นำมาทดสอบกับการทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยได้แยกพิจารณาหลายระบบ ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 บทที่ 4 และบทที่ 5

1.5 ขอบเขตการวิจัย

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพร่องและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางตามที่งานวิจัยนี้นำเสนอ เพื่อทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [31] รายละเอียดอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพร่องและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ฟิไออย่างเหมาะสม

2. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสเพื่อใช้ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต้องร่วมอยู่ และยังออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ฟิไออย่างเหมาะสม

3. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสในระบบคิซีไมโครกริดสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง และออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ฟิไออย่างเหมาะสม

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอน และรายละเอียดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงที่มา แบบจำลองวงจรทางไฟฟ้าและหลักการควบคุมของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ตัวควบคุมพีไอ และการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟุ้งอนุภาค

บทที่ 3 กล่าวถึงการประยุกต์การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมที่ติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดนำมาออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟลัดที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่ออยู่

บทที่ 5 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดนำมาออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟลัดรุ่นใหม่ในระบบคิซีไมโครกริดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 7 แสดงผลงานวิจัยที่ได้

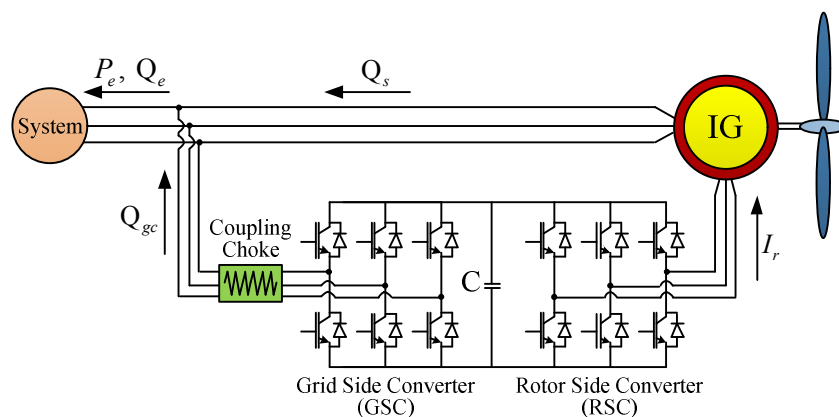
บทที่ 2

หลักการควบคุมกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

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

2.1 กังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

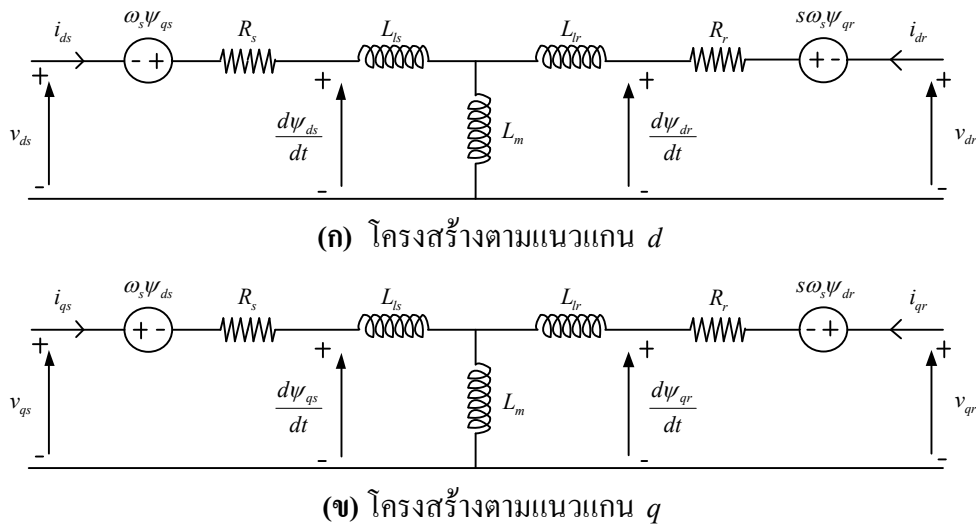
ในปัจจุบัน การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานลมจะได้รับความนิยมอย่างสูงมากขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยมียอดรวมกำลังการผลิตจากพลังงานลมทั่วโลกประมาณ 318 GW ในปลายปี 2013 และคาดว่าจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ปี [2] โดยเฉพาะกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: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



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของกังหันลม DFIG

โดยภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของกังหันลม DFIG ที่ต่อร่วมกับระบบ (System) เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด โดยโครงสร้างหลักของกังหันลมชนิดนี้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Generator: IG) คอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter) คอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด (Grid Side Converter) ตัวเก็บประจุ C และตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ Coupling Choke โดยขดลวดทางสเตเตอร์จะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรงด้วยแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าเดียวกันกับระบบ และขดลวดโรเตอร์จะเชื่อมต่อกับระบบโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมการรับพลังงานจากลมแล้วแปรรูปเป็นกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุด กังหันลมชนิดนี้จึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกได้สูงสุดแม้ว่าความเร็วลมจะไม่คงที่ก็ตาม [8]

การควบคุมของกังหันลม DFIG จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ โดยทั้ง 2 ส่วนการควบคุมจะใช้สมการพื้นฐานการควบคุมที่แตกต่างกัน โดยส่วนของการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์จะอธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 2.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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_{dr} และ v_{qr}	คือแรงดันไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ตามแนวแกน d และ q
i_{ds} และ i_{qs}	คือกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ตามแนวแกน d และ q
i_{dr} และ i_{qr}	คือกระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ตามแนวแกน d และ q
ψ_{ds} และ ψ_{qs}	คือฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ตามแนวแกน d และ q
ψ_{dr} และ ψ_{qr}	คือฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ตามแนวแกน d และ q
s	คือสลิป

n_p	คือจำนวนคู่ขั้ว
T_e	คือแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
L_m	คือค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กในแกน
L_s	คือค่าความเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์
L_r	คือค่าความเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์
L_{ls}	คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์
L_{lr}	คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านโรเตอร์
ω_s	คือความเร็วเชิงโคโรนา
ω_r	คือความเร็วโรเตอร์
ω_{sr}	คือค่าผลต่างระหว่างความเร็วเชิงโคโรนาและความเร็วโรเตอร์ (slip speed)

เนื่องจากขดลวดทางด้านสเตเตอร์เชื่อมต่อกับระบบโดยตรง ส่งผลให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์ (v_s) และความถี่ระบบจะมีค่าเดียวกันกับระบบ ทำให้สมการที่ (2.1) - (2.3) 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

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

เช่นเดียวกันกับสมการที่ (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 ตามภาพที่ 2.1 และเมื่อกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน Q_{gc} มีค่าเป็นศูนย์แล้วจะสามารถเขียนผลรวมกำลังไฟฟ้าเสมือนของกันทั้งลม DFIG ตามภาพที่ 2.1 ได้ดังนี้

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

จากที่กำหนดให้ ψ_s เท่ากับ ψ_{qs} และ v_{qs} มีค่าเป็นศูนย์แล้วจะสามารถหาลำดับกำลังไฟฟ้าเสมือน 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} ซึ่งจะถูกระบุใหม่ให้เป็นกระแสอ้างอิง 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

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

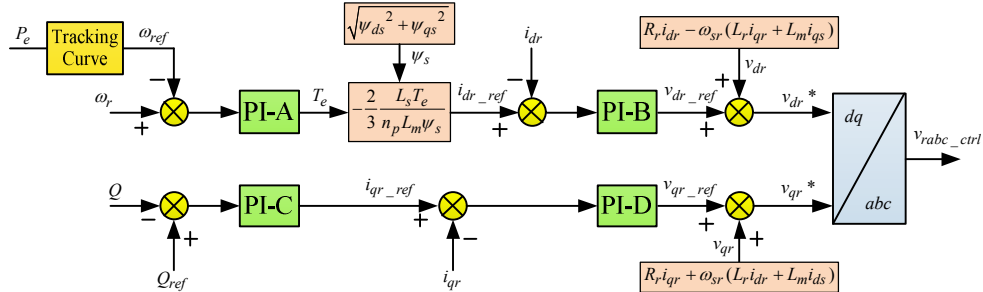
$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_{sr} (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) \quad (2.23)$$

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

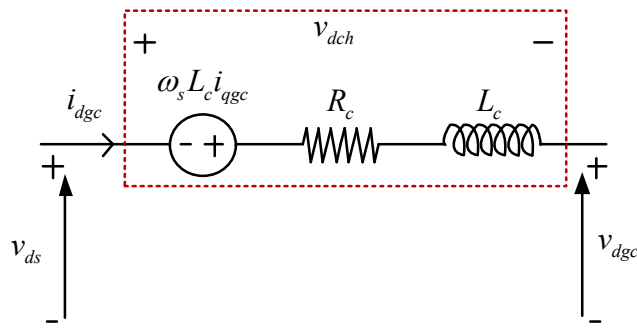
$$v_{dr}^* = v_{dr} + v_{dr_ref} \quad (2.22)$$

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

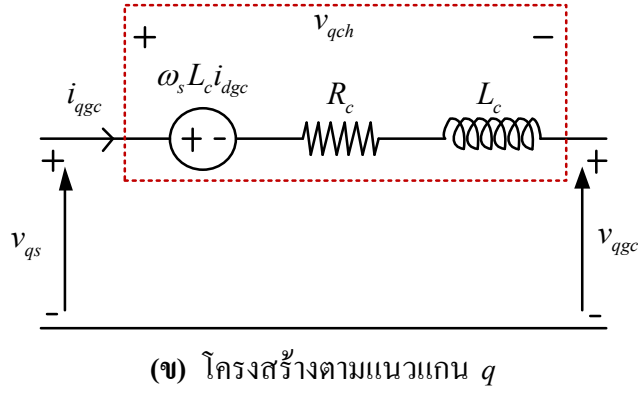
และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง v_{dr}^* และ v_{qr}^* ตามแนวแกน d และ q ตามลำดับนี้จะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าสามเฟส v_{rabc_ctrl} เพื่อใช้สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ด้วยวิธีการสร้างสัญญาณมอดูเลตตามความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) และจากสมการที่ (2.13) - (2.23) สามารถแสดงการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ได้ดังภาพที่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



ภาพที่ 2.3 การควบคุมกึ่งเหนี่ยวนำ DFIG ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์



(ก) โครงสร้างตามแนวแกน d



ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลของ Coupling Choke

และส่วนของการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดจะพิจารณาส่วนของ coupling choke ตามภาพที่ 2.1 และสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 2.4 และเขียนเป็นสมการแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$v_{dgc} = v_{ds} - v_{dch} \quad (2.24)$$

$$v_{qgc} = v_{qs} - v_{qch} \quad (2.25)$$

โดยที่

v_{dgc} และ v_{qgc} คือแรงดันไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดตามแนวแกน d และ q

v_{dch} และ v_{qch} คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของ coupling choke ตามแนวแกน d และ q

R_c คือค่าความต้านทานของ coupling choke

L_c คือค่าความเหนี่ยวนำของ coupling choke

ซึ่งแรงดันไฟฟ้า v_{dch} และ v_{qch} หาค่าได้จากสมการ

$$v_{dch} = R_c i_{dgc} - \omega_s L_c i_{qgc} \quad (2.26)$$

$$v_{qch} = R_c i_{qgc} + \omega_s L_c i_{dgc} \quad (2.27)$$

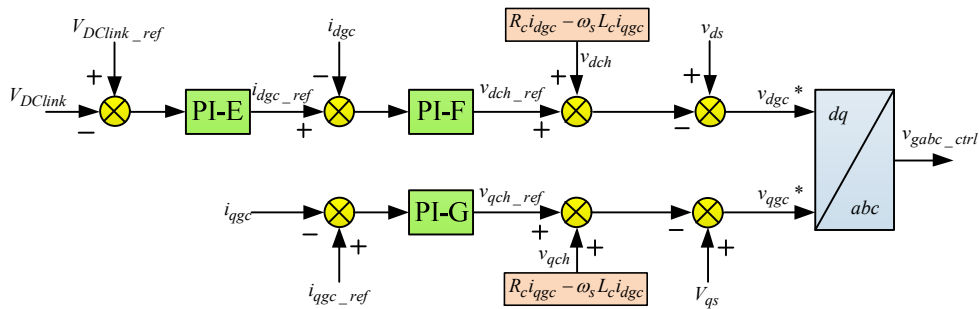
และเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง v_{dch_ref} และ v_{qch_ref} ได้มาจากการควบคุมกระแสไฟฟ้า i_{dgc} และ i_{qgc} ด้วยการเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิง i_{dgc_ref} และ i_{qgc_ref} และกระแสไฟฟ้า i_{dgc_ref} ได้จากการควบคุม

แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ V_{dc} ดังนั้น จากสมการที่ (2.24) - (2.27) สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่คอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด v_{dgc}^* และ v_{qgc}^* ด้วยสมการดังนี้

$$v_{dgc}^* = v_{ds} - v_{dch_ref} - v_{dch} \quad (2.28)$$

$$v_{qgc}^* = v_{qs} - v_{qch_ref} - v_{qch} \quad (2.29)$$

และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง v_{dgc}^* และ v_{qgc}^* ตามแนวแกน d และ q ตามลำดับนี้จะสามารถเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าสามเฟส v_{gabc_ctrl} เพื่อใช้สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ด้วยวิธีการสร้างสัญญาณมอดูเลตตามความกว้างพัลส์ และจากสมการที่ (2.24) - (2.29) สามารถแสดงการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดได้ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การควบคุมกึ่งหันลม DFIG ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด

2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller)

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

ตัวควบคุมพีหรือตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller) จะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งหรือเป็นอัตราขยายค่าหนึ่งที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ขยายสัดส่วนของค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงไปตาม

สัดส่วนของอัตราขยาย โดยการตอบสนองของสัดส่วนจะสามารถแสดงด้วยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยอัตราขยายสัดส่วนตามสมการดังนี้

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

โดยที่

- e คือสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม
- K_p คืออัตราขยายสัดส่วน
- P_{OP} คือสัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบพี
- t คือเวลา

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

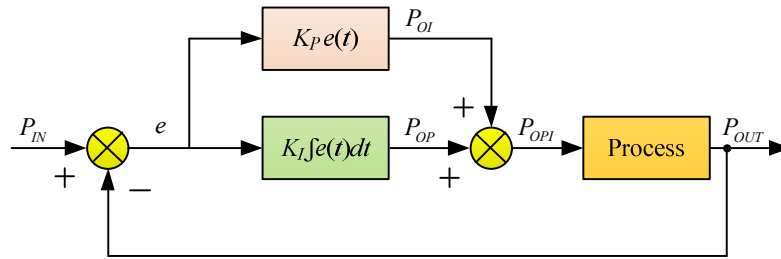
ตัวควบคุมพีไอจะสามารถทำให้การลู่เข้าสู่สมดุลหรือค่าผิดพลาดที่น้อยลงได้อย่างรวดเร็ว โดยส่วนของตัวควบคุมแบบพีจะช่วยให้ขยายค่าผิดพลาดที่เหลืออยู่ให้มากขึ้น และส่วนของตัวควบคุมแบบไอจะเป็นการรวมผลของค่าผิดพลาดที่ผ่านมาและนำมาขยายให้ลู่เข้าสู่ค่าสมดุลได้ไวมากยิ่งขึ้น ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอจะเป็นการนำสมการที่ (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) ได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์

โดยที่

P_{IN} คือสัญญาณเข้าเพื่อความต้องการควบคุมตัวแปรที่กำหนด

P_{OUT} คือสัญญาณออกของผลตอบสนองในกระบวนการ

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค

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

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดอนุภาค n จำนวน จำนวนรอบของการทำงาน NI และกำหนดขอบเขตของการค้นหาตำแหน่งที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

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

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

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

ขั้นตอนที่ 5 กลุ่มอนุภาคใหม่ที่จะกระจายใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคเก่า 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 $g_{best} = g_{new}$

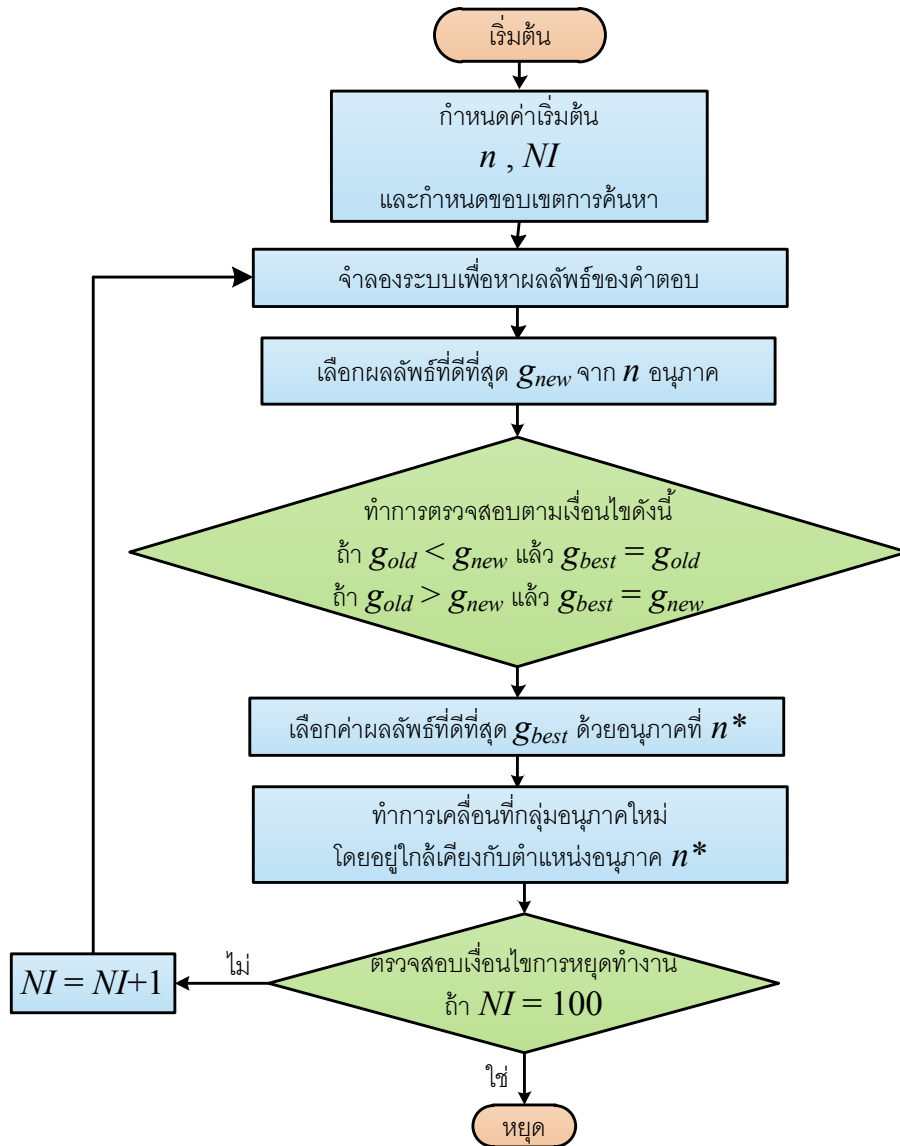
ขั้นตอนที่ 7 ทำการประเมินค่าความเหมาะสมจากอนุภาคแต่ละตัวจากเงื่อนไขตามขั้นตอนที่ 6 แล้วคัดเลือกค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเป็น g_{best} และเป็นอนุภาคตัวที่ n^*

ขั้นตอนที่ 8 ทำการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคใหม่ โดยเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค n จำนวน แบบสุ่มให้อยู่ใกล้บริเวณอนุภาคที่ n^*

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

โดยขั้นตอนของกระบวนการทำงานของวิธีฝูงอนุภาคจะสามารถแสดงเป็นแผนภาพลำดับขั้นตอนการทำงานได้ดังภาพที่ 2.7 และมีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

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



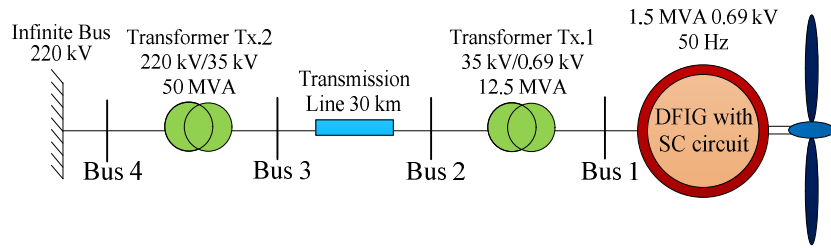
ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงอนุภาค

บทที่ 3

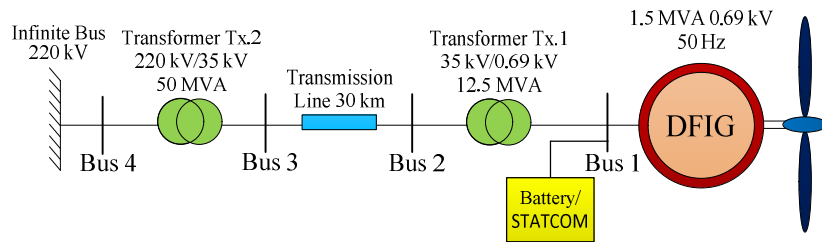
การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการ แกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ

ในบทนี้จะนำเสนอการหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) ที่เหมาะสม ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) เพื่อเพิ่มความสามารถข้ามผ่านความผิดปกติ (Fault Ride Through: FRT) และการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG โดยสถานะปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากกังหันลม DFIG ด้วยการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดิซี (DC to DC Converter) ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าระหว่างขดลวดตัวนำยิ่งยวดกับระบบไฟฟ้าได้ และเมื่อเกิดสถานะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสเพื่อลดการเกิดกระแสไฟฟ้าเกินที่ขดลวดโรเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ และยังลดการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินระหว่างดีซีลิงค์ (DC Link) นอกจากนั้นยังออกแบบให้เหมาะสมที่สุดด้วยการประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อค้นหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นในขดลวดที่จำเป็น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ของคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดิซี ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลม DFIG สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากกังหันลมและยับยั้งกระแสที่เพิ่มสูงขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบได้ดีกว่ากรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดไม่เหมาะสม และยังทดสอบกับอุปกรณ์ตัวเก็บสะสมพลังงานชนิดแบตเตอรี่ (Battery) และตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Static Synchronous Compensator) เพื่อแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถทำเสถียรภาพได้ดีกว่าอุปกรณ์ทั่วไป

3.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา



ภาพที่ 3.1 ระบบกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 3.2 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งแบตเตอรี่หรือตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3.1 [22] โดยกั้นหมันที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ขนาดพิกัด 1.5 MVA จะต่ออยู่กับบัสบนันต์พิกัดแรงดันไฟฟ้า 220 kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Tx.1, Tx.2 และสายส่งยาว 30 km มีพารามิเตอร์ระบบตามตารางที่ 3.1 โดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะถูกติดตั้งระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของกั้นหมัน DFIG ในระบบกำลังไฟฟ้านี้จะใช้ศึกษาสภาวะการทำงานปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ โดยในสภาวะปกติจะจำลองการเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่งเนื่องจากกั้นหมัน DFIG ผลิตกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้ระบบกำลังไฟฟ้าได้รับกำลังไฟฟ้าไม่คงที่และนำไปสู่การเสถียรภาพ และเมื่อจำลองการเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติที่บัสที่ 2 ส่งผลให้เกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าลดลงที่บัส 1 และยังส่งผลกระทบต่อภายในกั้นหมัน DFIG เช่น กระแสไฟฟ้าเกินในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ เกิดแรงดันไฟฟ้าพุ่งขึ้นสูงระหว่างดีซีลิงก์ เป็นต้น เป็นผลให้กั้นหมัน DFIG ต้องปลดตัวเองออกจากระบบเป็นไปตามมาตรฐาน Grid Code ของ Germany EON [12] ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาทั้งสองตามที่กล่าวมาจึงติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของกั้นหมัน DFIG โดยระบบกำลังไฟฟ้านี้จะใช้พารามิเตอร์ระบบตามตารางที่ 3.1 และในภาพที่ 3.2 เป็นระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้จำลองการเปรียบเทียบการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดกับแบตเตอรี่ (Battery) และตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ (Static Synchronous Compensator: STATCOM) โดยแบตเตอรี่จะนำไปเปรียบเทียบภายใต้สภาวะปกติหรือเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และ STATCOM จะถูกเปรียบเทียบในสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ ซึ่งพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่และ STATCOM จะแสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดกำลังไฟฟ้า	1.5 MW
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	0.69 kV
ความถี่ระบบไฟฟ้า	50 Hz
จำนวน pole	2
ค่าความต้านทานของสเตเตอร์และโรเตอร์	0.003, 0.003 pu
ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์และโรเตอร์	0.11, 0.07 pu
ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กไนโตรเจน	2.5 pu
ค่าคงที่ความเฉื่อย	0.685 s
พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับ วงจรเรียงกระแสแบบไดโอด	400 V/600 V
ค่าความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้า	0.005 pu, 0.005 pu
ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า	0.035 pu, 0.035 pu
ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กไนโตรเจนของหม้อแปลงไฟฟ้า	500 pu
สายส่งยาว	30 km

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่

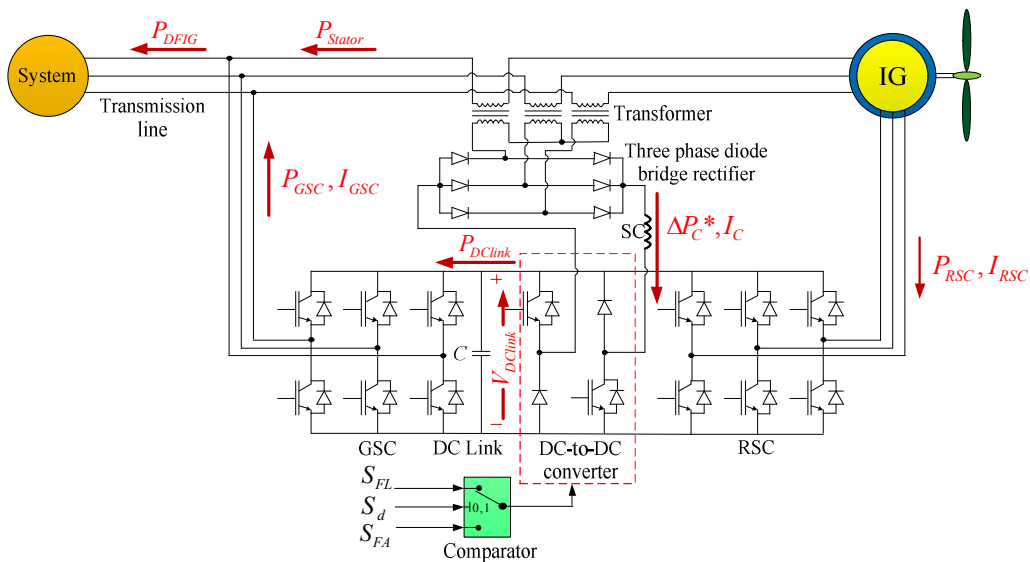
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	1400 V
ขนาดความจุไฟฟ้า	50 Ah
พิกัดแบตเตอรี่	70 kWh
สถานะประจุแบตเตอรี่	50 %
พลังงานสะสมเริ่มต้น	126 MJ
พิกัดขนาดความจุไฟฟ้า	52.08 Ah
แรงดันไฟฟ้าเมื่อชาร์จเต็ม	1633.22 V

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของ STATCOM

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	1400 V
ค่ารีแอ็กแตนซ์	0.0001 H
ค่าความต้านทาน	0.002 Ω
ค่าตัวเก็บประจุ	8000 μF

3.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 โครงสร้างของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งภายในกังหันลม DFIG



ภาพที่ 3.3 วงจรไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด

วงจรไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) ที่ติดตั้งอยู่ภายในกังหันลม DFIG [22] ตามภาพที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ คือคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด (Grid Side Converter: GSC), คอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter: RSC), คอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซี (DC-to-DC Converter), วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์ (Three Phase diode bridge rectifier) และหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) โดยคอนเวอร์เตอร์ GSC และ RSC จะเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage Source Converter) เพื่อควบคุมการทำงานด้านโรเตอร์ของกังหันลม DFIG โดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อดีซีลิงค์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ GSC และ RSC ผ่านคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซี และอีกด้านหนึ่งของขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อกับสายส่งที่เชื่อมต่อกับขดลวดสเตเตอร์ของกังหัน

ลม DFIG ผ่านวงจรเรียงกระแสสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์และหม้อแปลงไฟฟ้า ในสภาวะการทำงานปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวสะสมพลังงานไฟฟ้าโดยการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซีจะสามารถควบคุมการแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบกับขดลวดตัวนำยิ่งยวด ซึ่งทำให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ได้ และเมื่อเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะถูกเชื่อมต่อกับสายส่งอย่างอัตโนมัติ และด้วยการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซียังทำให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดถูกใช้ยับยั้งกระแสเกินที่ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ และยังลดการเกิดแรงดันไฟฟ้าพุ่งขึ้นสูงอย่างฉับพลันในตัวเก็บประจุไฟฟ้า C ที่ดีซีลิงค์อีกด้วย

ตามภาพที่ 3.3 ในสภาวะปกติกังหันลม DFIG จะจ่ายกำลังไฟฟ้าแกว่ง P_{DFIG} ให้กับระบบกำลังไฟฟ้าโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

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

และกำลังไฟฟ้า P_{GSC} เป็นกำลังไฟฟ้าด้านโรเตอร์ที่จ่ายให้กับระบบโดยหาได้จากสมการ

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

เมื่อกำหนดให้

P_{DCLink} คือกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านมาจากกำลังไฟฟ้าด้านโรเตอร์ (P_{RSC})

ΔP_C^* คือกำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ

ซึ่งจากสมการที่ (3.2) สามารถอธิบายได้ว่ากำลังไฟฟ้า P_{GSC} จะเป็นผลรวมของกำลังไฟฟ้า P_{DCLink} กับกำลังไฟฟ้า ΔP_C^* ซึ่งกำลังไฟฟ้า ΔP_C^* จะสามารถควบคุมได้ด้วยคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซี 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

I_C คือกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด

และนำสมการที่ (3.3) แทนในสมการที่ (3.2) จะได้

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

จากสมการที่ (3.3) แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดันไฟฟ้า $\Delta V_C *$ จะเปรียบเสมือนการควบคุมกำลังไฟฟ้า $\Delta P_C *$ ได้โดยตรง และจากสมการที่ (3.4) จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้า P_{GSC} ได้จากการควบคุมแรงดันไฟฟ้า $\Delta V_C *$ ได้โดยตรงเช่นกัน ดังนั้น จากสมการที่ (3.1) เมื่อกังหันลม DFIG จ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์เป็นกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ที่เกิดการแกว่งให้กับระบบ คอนเวอร์ตอร์ดีซิงโครนัสจะทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้า P_{GSC} ให้ชดเชยกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ที่แกว่งให้ลดลงได้ผ่านทางการควบคุมแรงดันไฟฟ้า $\Delta V_C *$ จึงสามารถควบคุมการเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า P_{DFIG} จากกังหันลม DFIG ได้ และเมื่อเกิดสถานะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบกังหันลม DFIG จะต้องมีความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ (Fault Ride Through: FRT) ถึงจะสามารถทนต่อการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้อย่างต่อเนื่อง โดยในสถานะเกิดความผิดปกตินี้จะเกิดกระแสไฟฟ้าสูงทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ และยังเกิดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V_{DCLink}) สูงขึ้นอย่างฉับพลันในดีซีลิงค์จึงเป็นที่มาที่ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาแก้ไขปัญหา โดยทางด้านโรเตอร์จะเป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันด้วยการควบคุมของคอนเวอร์ตอร์ดีซิงโครนัสจากสมการ

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

เมื่อกำหนดให้

ΔV_{DCLink}	คือผลต่างแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์
V_{DCLink}	คือแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์
V_{DCLink_ref}	คือแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง

ซึ่งคอนเวอร์ตอร์ดีซิงโครนัสจะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้า V_{DCLink} เพื่อให้ผลต่างแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (ΔV_{DCLink}) มีค่าน้อยที่สุด และแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้จะถูกสะสมเป็นพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินให้กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด การควบคุมด้วยวิธีนี้ยังส่งผลให้กระแสฟลักซ์ที่ไหลผ่านด้านโรเตอร์นั้นถูกจำกัดอีกด้วย [22] เนื่องจากเมื่อเกิดความผิดปกติกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลเข้าสู่ระบบได้ตามปกติจึงเกิดการสะสมขึ้นในขดลวด แต่ในที่นี้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่สะสมกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเกินในรูปของพลังงานไฟฟ้าให้กับกังหันลม DFIG ส่วนทางด้านสเตเตอร์กระแสฟลักซ์จะถูกจำกัดโดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดผ่านวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์และหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติ [22, 33] โดยสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสถานะเกิดความผิดปกติได้ด้วยสมการ

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} \quad (3.6)$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้า V_L หาได้จาก

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.7)$$

เมื่อกำหนดให้

- Z_L คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด
- V_L คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด
- I_L คือกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด
- L คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

จากภาพที่ 3.3 เมื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดทางด้านสายส่งของหม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถหาค่าได้จากสมการ

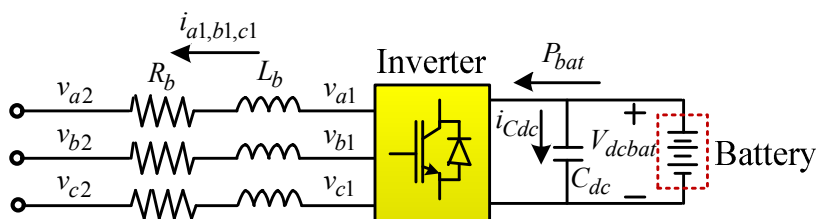
$$Z' = \frac{V_T}{I_T} = \frac{aV_L}{I_L / a} = a^2 Z_L \quad (3.8)$$

เมื่อกำหนดให้

- Z' คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดด้านสายส่งของหม้อแปลง
- V_T คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของหม้อแปลงด้านสายส่ง
- I_T คือกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหม้อแปลงด้านสายส่ง
- a คืออัตราส่วนหม้อแปลง

จากสมการที่ (3.7) ถ้าระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ dI_L/dt จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ส่งผลให้ไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม V_L แต่เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างฉับพลันหรือเกิดกระแสฟลัดไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะสร้างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม V_L อย่างสูง ส่งผลให้เกิดอิมพีแดนซ์ Z_L ตามสมการที่ (3.6) และเมื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จากทางด้านสายส่งที่หม้อแปลงเชื่อมต่ออยู่จะมีอิมพีแดนซ์ Z' เพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนตาม a ตามสมการที่ (3.8) ด้วยการเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์เช่นนี้ จึงทำให้สามารถจำกัดกระแสฟลัดด้านสเตเตอร์ได้อย่างรวดเร็วและเป็นไปอย่างอัตโนมัติ [33]

3.2.2 โครงสร้างของเบตเตอร์



ภาพที่ 3.4 โครงสร้างของแบตเตอรี่

ภาพที่ 3.4 เป็นโครงสร้างของ Battery ที่ใช้ศึกษาจำลองผล [34] ในการแก้ปัญหากำลังไฟฟ้า
แกว่งของกังหัน DFIG โดยวงจรตามภาพที่ 4 สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

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

โดยที่

- v_{a1}, v_{b1}, v_{c1} คือแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ของแบตเตอรี่
- v_{a2}, v_{b2}, v_{c2} คือแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่แบตเตอรี่ต่ออยู่
- L_b, R_b คือตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานที่ขั้วอินเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่

และเปลี่ยนรูปสมการที่ (3.9) ให้อยู่ในรูป dq-axis จะได้

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

จากสมการที่ (3.10) เมื่อ $v_{q2} = 0$ และตัดความต้านทานออกและสมมติอยู่ในสภาวะ steady-state จะ
สามารถเขียนสมการใหม่ได้ตามนี้

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

และ

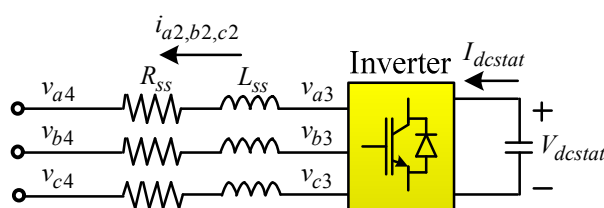
$$V_{q1} = -\omega L_b \cdot i_{d1} \quad (3.12)$$

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

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

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

3.2.3 โครงสร้างของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างของ STATCOM

ในภาพที่ 3.5 เป็นโครงสร้างของ STATCOM ที่ใช้ศึกษาจำลองผลในการแก้ปัญหาการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG [35] โดยจากวงจรไฟฟ้าตามภาพที่ 3.5 สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

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

โดยที่

- v_{a3}, v_{b3}, v_{c3} คือแรงดันที่ขั้วอินเวอร์เตอร์ของ STATCOM
- v_{a4}, v_{b4}, v_{c4} คือแรงดันที่บัสที่ STATCOM ต่ออยู่
- L_{ss}, R_{ss} คือตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานที่ขั้วอินเวอร์เตอร์ของ 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 อยู่ทิศทางแนวเดียวกับแรงดันไฟฟ้า ดังนั้น $v_{q4} = 0$ และจะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง ($P_{STATCOM}$) และกำลังไฟฟ้าเสมือน ($Q_{STATCOM}$) ได้ตามสมการ

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

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

โดยที่

V_{dcstat} คือแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของ STATCOM

I_{dcstat} คือกระแสไฟฟ้าดีซีลิงค์ของ STATCOM

ดังนั้น จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้า ($P_{STATCOM}$) ได้จากการควบคุมกระแส i_{d2} และควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน ($Q_{STATCOM}$) จากการควบคุมกระแส i_{q2} และสมการที่ (3.16) เมื่อไม่คิดค่าความต้านทานและสมมติให้อยู่ในสถานะ 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

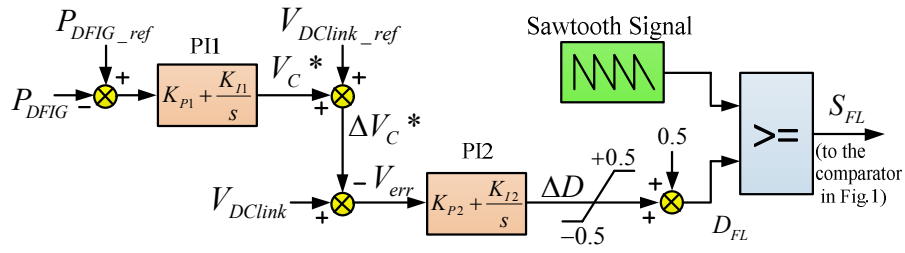
$$V_{d3} = V_{d4} + \omega L_{ss} \cdot i_{q2} \quad (3.20)$$

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

3.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด

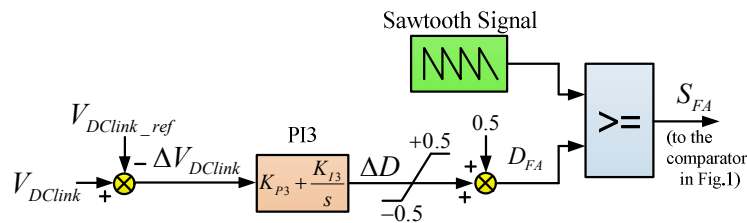
3.3.1 การออกแบบตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์ดีซีฟูลดิซีของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

จากหัวข้อที่ 3.2 จะสามารถนำมาสู่วิธีการออกแบบตัวควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ดีซีฟูลดิซีเพื่อใช้ควบคุมพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวด โดยการออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมจะแบ่งออกเป็น 2 สถานะ คือ สถานะการทำงานปกติ และสถานะเกิดความผิดปกติในระบบ



ภาพที่ 3.6 โครงสร้างตัวควบคุมขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสภาวะปกติ

ในสภาวะการทำงานปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นตัวสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้เก็บสะสมพลังงานหรือชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่กักหนัลด DFIG จ่ายให้กับระบบ ซึ่งจากสมการที่ (3.1) และ (3.4) ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมได้ดังภาพที่ 3.6 โดยการวัดสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริง P_{DFIG} เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง P_{DFIG_ref} ค่าผลต่างนี้จะป้อนให้ตัวควบคุมพีไอ PI1 และเอาต์พุตจะเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_C^* เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง V_{DClink_ref} ซึ่งจะถูกตั้งค่าไว้ที่ 1500 V และผลต่างที่ได้จะเป็นส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ ΔV_C^* จะไปชดเชยกับแรงดันไฟฟ้าจริง V_{DClink} ซึ่งค่าผิดพลาดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเป็นสัญญาณ V_{err} ซึ่งถูกใช้ป้อนให้ตัวควบคุมพีไอ PI2 และเอาต์พุตที่ได้จะเป็นค่าเบี่ยงเบนดิวตี้ไซเคิล (ΔD) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าดิวตี้ไซเคิล D_{FL} และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจึงได้สัญญาณควบคุมสวิตช์ S_{FL} ของคอนเวอร์เตอร์ดีซีบูดี้ซี ซึ่งสัญญาณ S_{FL} จะถูกส่งไปป้อนให้ Comparator ตามภาพที่ 3.3 เพื่อเป็นสัญญาณสวิตช์ควบคุมการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

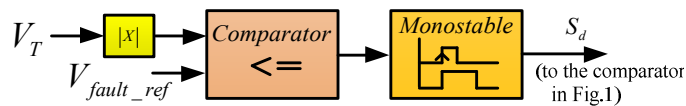


ภาพที่ 3.7 โครงสร้างตัวควบคุมขดลวดตัวนำยิ่งยวดในสภาวะเกิดความผิดปกติ

เมื่อเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบคอนเวอร์เตอร์ดีซีบูดี้ซีจะต้องทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V_{DClink}) ให้คงที่หรือป้องกันการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ดีซีลิงค์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ GSC และ RSC จากสมการที่ 3.5 สามารถออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมได้ดังภาพที่ 3.7 ซึ่งจะวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์จริง (V_{DClink}) เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง (V_{DClink_ref}) ใน

ที่นี้จะถูกตั้งค่าไว้ที่ 1500 V ผลต่างที่ได้จะเป็นอินพุตให้ตัวควบคุมพีไอ PI3 และเอาต์พุตจะเป็นค่าเบี่ยงเบนดิวตี้ไซเคิล (ΔD) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าดิวตี้ไซเคิล D_{FA} และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจึงได้สัญญาณควบคุมสวิตช์ S_{FA} เพื่อใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์ดีซีบูคิซีในสถานะเกิดความผิดปกติ ซึ่งสัญญาณ S_{FA} จะถูกส่งไปเป็นอินพุตให้กับ Comparator ตามภาพที่ 3.2 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ K_{P1} , K_{P2} , K_{P3} , K_{I1} , K_{I2} และ K_{I3} จะต้องได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีออกแบบที่เหมาะสมซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

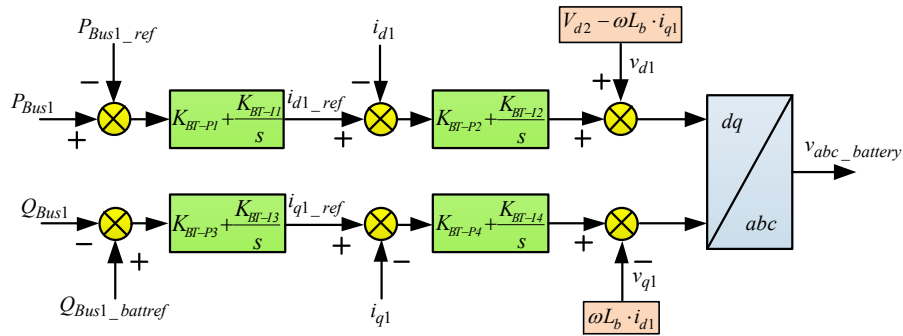
ในการสั่งสวิตช์การทำงานทั้งสองสถานะจำเป็นต้องมีตัววัดเพื่อเลือกสถานะการทำงาน ซึ่งเป็นตัวตรวจจับสถานะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยการตรวจจับสถานะความผิดปกติในที่นี้จะเลือกการตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 หรือที่หน้าบัสกักหนวลม DFIG ซึ่งจะมีโครงสร้างตัวตรวจจับดังภาพที่ 3.8 โดยจะวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_T ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสกักหนวลม 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 ในภาพที่ 3.3 เพื่อเลือกสถานะการทำงานของตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์ดีซีบูคิซี



ภาพที่ 3.8 โครงสร้างของตัวตรวจจับสถานะเกิดความผิดปกติ

3.3.2 การออกแบบตัวควบคุมของแบตเตอรี่

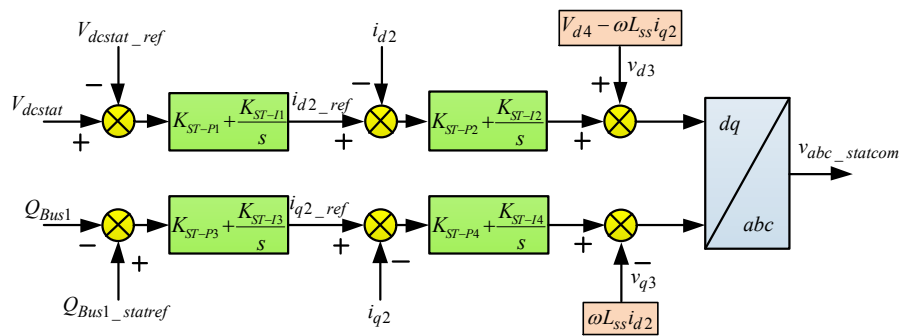
จากสมการที่ (3.11) - (3.14) สามารถนำมาออกแบบตัวควบคุมได้ตามภาพที่ 3.9 โดยแนวแกน กระแส d-axis จะใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และกำลังไฟฟ้าเสมือนจะถูกควบคุมด้วยแนวแกน กระแส q-axis



ภาพที่ 3.9 โครงสร้างตัวควบคุมของแบตเตอรี่

3.3.3 การออกแบบตัวควบคุมของ STATCOM

จากสมการที่ (3.17) - (3.19) สามารถนำมาออกแบบตัวควบคุมได้ตามภาพที่ 3.10 โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของ STATCOM จะถูกควบคุมด้วยกระแสแนวแกน d-axis และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสที่ 1 จะถูกควบคุมด้วยกระแสแนวแกน q-axis



ภาพที่ 3.10 โครงสร้างตัวควบคุมของ STATCOM

3.3.4 เทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวด และพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่เหมาะสมเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG โดยมีวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG การลดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ตีชีลิ่งในสภาวะเกิดความผิดปกติ และการยับยั้งการเกิดกระแสเกินทั้งด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์ของกังหันลม DFIG โดยการพิจารณาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกังหันลม DFIG จ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอให้กับระบบไฟฟ้า จะนำกำลังไฟฟ้าที่แกว่งมาหาพื้นที่ใต้กราฟ โดยใช้วิธีหาค่าที่น้อยที่สุดของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) และ

เช่นเดียวกันการพิจารณาการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ดีไซน์ลิ่งและกระแสเกินที่โรเตอร์จะใช้วิธี IAE ส่วนการพิจารณานาค่าความเหนี่ยวนำ กระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมจะพิจารณาถึงพลังงานสะสมเริ่มต้นน้อยที่สุดที่จะสามารถรักษาเสถียรภาพระบบได้ โดยจะสามารถเขียนฟังก์ชันรวมของสมการวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

หาค่าที่น้อยที่สุดของ

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

โดยที่

ΔP	คือผลต่างกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 กับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง
ΔV_{DC}	คือผลต่างแรงดันไฟฟ้าดีไซน์ลิ่งกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง
ΔI_R	คือผลต่างกระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์กับกระแสไฟฟ้าอ้างอิง
E_{SC0}	คือพลังงานสะสมเริ่มต้น
t_0	คือเวลาเริ่มต้นการจำลอง
t_{sim}	คือเวลาสิ้นสุดการจำลอง
t_{f1}	คือเวลาเริ่มต้นการเกิดความผิดปกติ
t_{f2}	คือเวลาสิ้นสุดการเกิดความผิดปกติ
W_1, W_2, W_3	คือค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting factor)
และ W_4	

และการพิจารณาแต่ละเทอม (Term) จะอธิบายได้ดังนี้

เทอมที่ 1 จะใช้พิจารณาถึงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

เทอมที่ 2 จะใช้พิจารณาถึงการเกิดแรงดันไฟฟ้าดีไซน์ลิ่งเกิน

เทอมที่ 3 จะใช้พิจารณาถึงการเกิดกระแสฟลัดในโรเตอร์

เทอมที่ 4 จะใช้พิจารณาถึงพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

ซึ่งการหาค่าพลังงานสะสมเริ่มต้นสามารถหาค่าได้จาก

$$E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \quad (3.23)$$

โดยที่

L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำ

I_{SC0} คือกระแสเริ่มต้น

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

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

สำหรับการหาคำตอบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (3.22) นี้จะใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เพื่อที่จะปรับค่า $L_{SC}, I_{SC0}, K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}, K_{I1}, K_{I2}$ และ K_{I3} ให้มีความเหมาะสมโดยอัตโนมัติพร้อมกัน และกระบวนการค้นหาคำตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง 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

ส่วนพารามิเตอร์ของกระบวนการวิธี PSO กำหนดดังนี้

จำนวนอนุภาค 50 ตัว

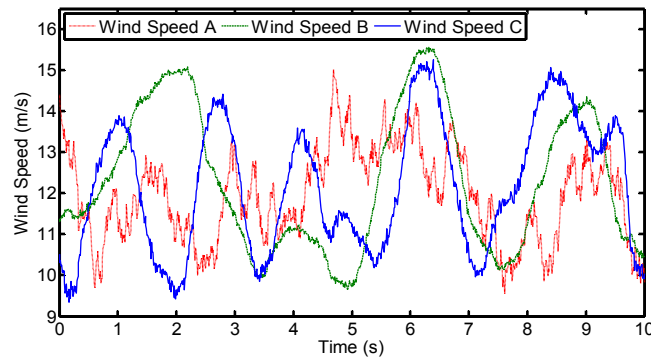
จำนวนรอบของการค้นหา 100 รอบ

ในการศึกษาในบทนี้จะนำกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดเหมาะสมเปรียบเทียบกับขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดไม่เหมาะสมทั้งสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ และยังนำกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดเหมาะสมนี้เปรียบเทียบกับเบตเตอร์ในสภาวะปกติและเปรียบเทียบกับ STATCOM ในสภาวะเกิดความผิดปกติ

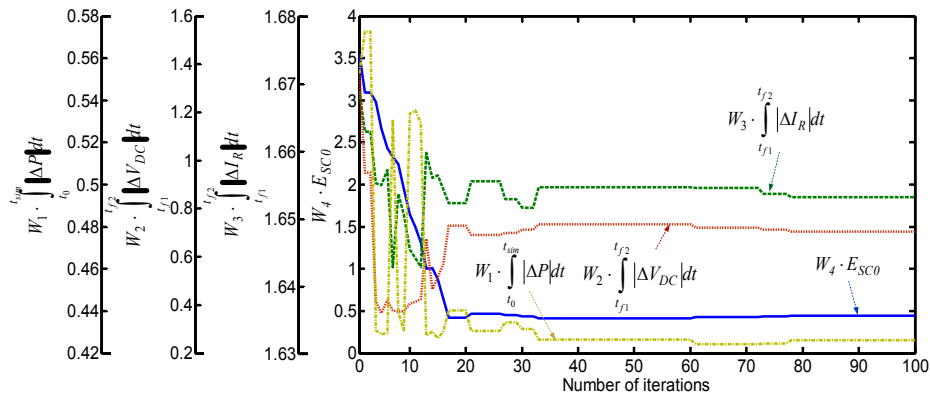
3.4 ผลการจำลองและทดสอบ

ในการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ กระแสเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะใช้โปรแกรม Matlab/SimPowerSystem [31] ในการจำลองระบบดังภาพที่ 3.1 ภายใต้ความเร็วลมดังภาพที่ 3.11 และจำลองการเกิดความผิดปกติที่บัสที่ 2 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 4 s ผลลัพธ์การค้นหาคำตอบของสมการที่ (3.22) สามารถแสดงผลการหาคำตอบแต่ละเทอมได้ดังภาพที่ 3.12 และแสดงการลู่เข้าหาคำตอบของขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด กระแสเริ่มต้น และพลังงานสะสมเริ่มต้นดังภาพที่ 3.13 ผลคำตอบของพารามิเตอร์ที่ค้นหาของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำ

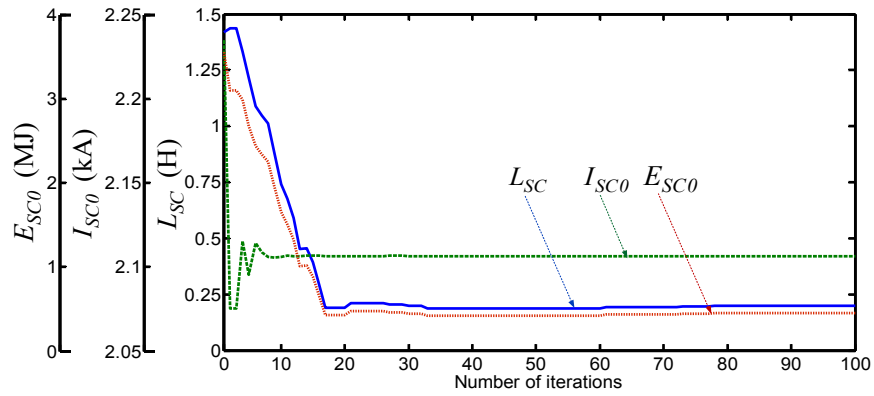
ยังขดที่มีขนาดที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 จะได้ค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) 0.198 H กระแสเริ่มต้น (I_{SC0}) 2.106 kA และพลังงานสะสมเริ่มต้น (E_{SC0}) 0.439 MJ ซึ่งพารามิเตอร์นี้จะใช้เปรียบเทียบกับกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดที่ไม่เหมาะสมด้วยขนาดค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) 5 H กระแสเริ่มต้น (I_{SC0}) 2.106 kA และพลังงานสะสมเริ่มต้น (E_{SC0}) 11.08 MJ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าและพลังงานสะสมเริ่มต้นที่มากกว่า และยังเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่และ STATCOM ซึ่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิโอาของแบตเตอรี่และ STATCOM สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.5 โดยการแสดงผลการทดสอบจะแยกเป็นตัวแทนเปรียบเทียบแต่ละตัว



ภาพที่ 3.11 ความเร็วลม



ภาพที่ 3.12 การหาค่าคำตอบของแต่ละเทอมของสมการวัตถุประสงค์



ภาพที่ 3.13 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ E_{SC0} , I_{SC0} และ L_{SC}

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี PSO

พารามิเตอร์	ขดลวดที่มีขนาดไม่ เหมาะสม	ขดลวดที่มีขนาด เหมาะสม
L_{SC} (H)	5	0.198
I_{SC0} (kA)	2.106	2.106
E_{SC0} (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

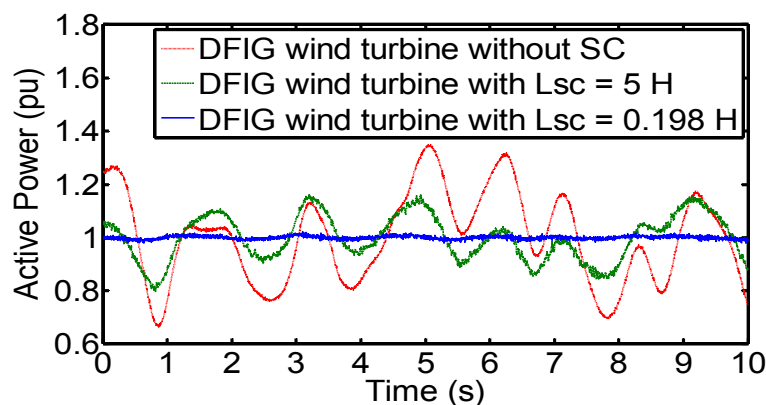
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ตัวควบคุมฟีดแบ็คของ Battery และ STATCOM

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

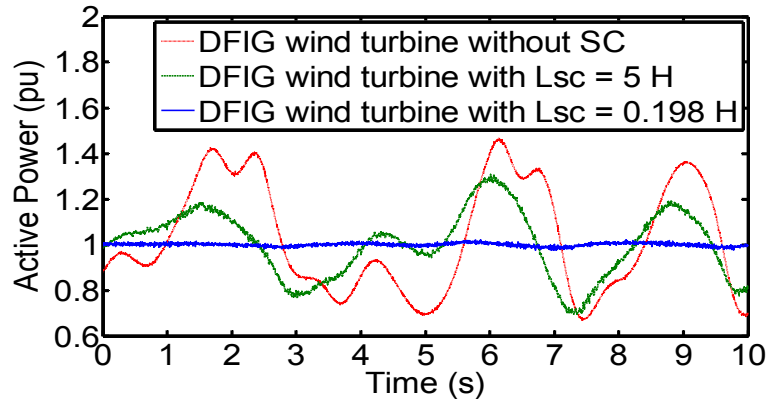
การเปรียบเทียบผลการทดสอบของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมขนาด 0.198 H กับขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ขนาดไม่เหมาะสมขนาด 5 H

การทดสอบในสภาวะปกติการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าจะแสดงได้ดังภาพที่ 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

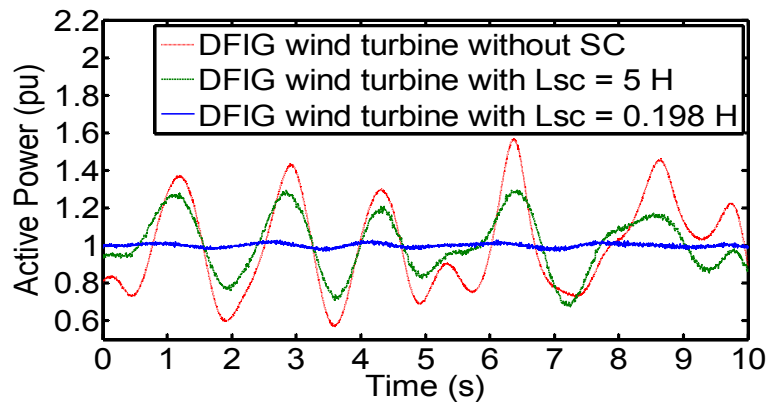
ภาพที่ 3.15 (ก) - (ค) แสดงแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์แต่ละกรณี ซึ่งกรณีกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะมีการแกว่งสอดคล้องกับทิศทางการกำลังไฟฟ้า P_{GSC} ส่วนกรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ขนาด 5 H นั้นจะแกว่งน้อยกว่ากรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H แต่จะแกว่งแบบไม่มีทิศทาง และเมื่อไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเกิดการแกว่งอย่างสูง ซึ่งการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์จะเป็นไปตามการควบคุมสมการที่ (3.4) ให้ไปชดเชยกำลังไฟฟ้าที่แกว่งของกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ซึ่งจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในภาพที่ 3.16 (ก) และ (ข) เป็นการทดสอบในสภาวะความเร็วลม A ในภาพที่ 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) และแสดงได้ดังภาพที่ 3.16 (ข) จะสังเกตได้ว่ากำลังไฟฟ้า P_{GSC} จะมีทิศทางเพิ่มขึ้นและลดลงตามแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์



(ก) กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A

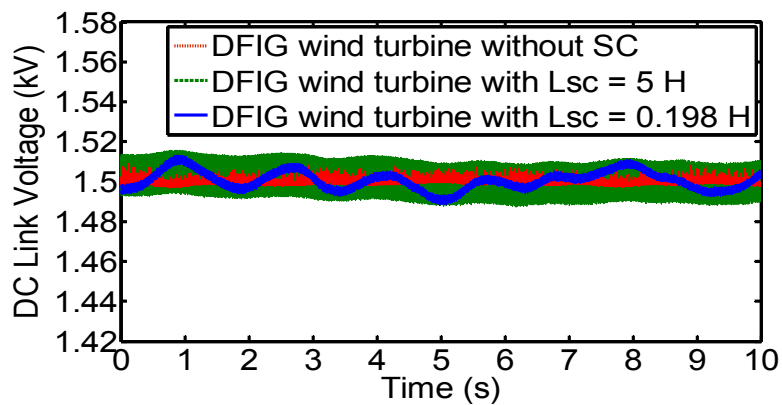


(ข) กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม B

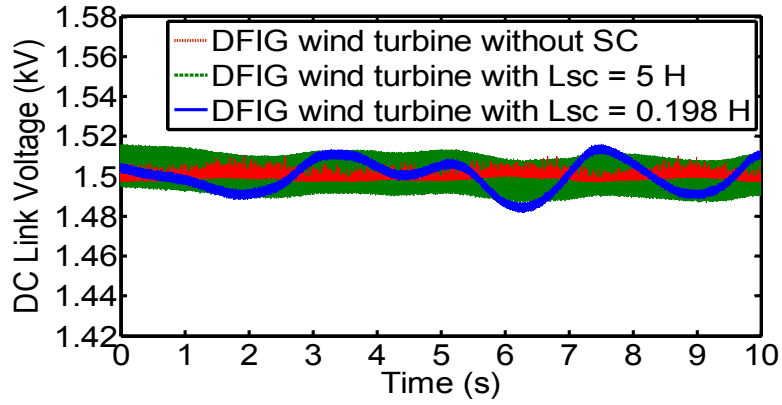


(ค) กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม C

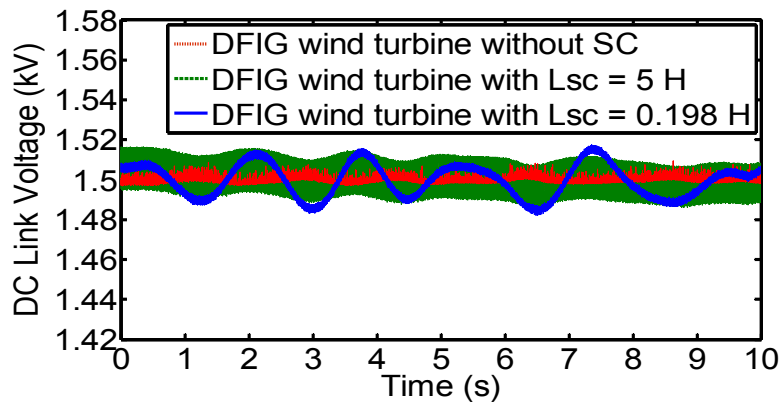
ภาพที่ 3.14 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1



(ง) แรงดันไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A

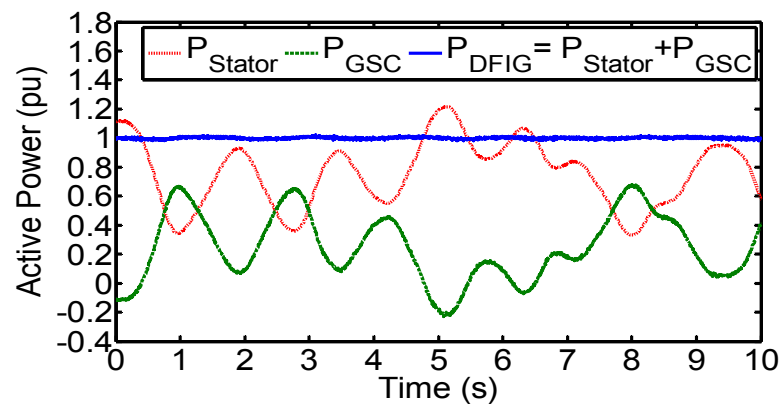


(ข) แรงดันไฟฟ้ากรณีสภาวะความเร็วม B

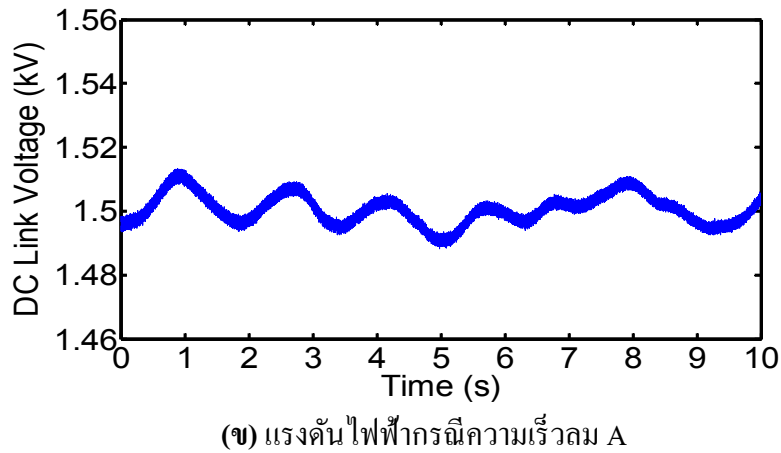


(ค) แรงดันไฟฟ้ากรณีสภาวะความเร็วม C

ภาพที่ 3.15 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงก์



(ก) กำลังไฟฟ้ากรณีสภาวะความเร็วม A

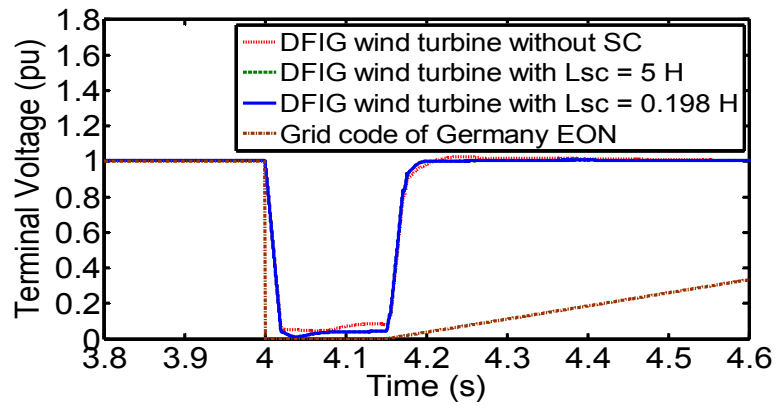


ภาพที่ 3.16 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ที่มีอิทธิพลต่อกำลังไฟฟ้า

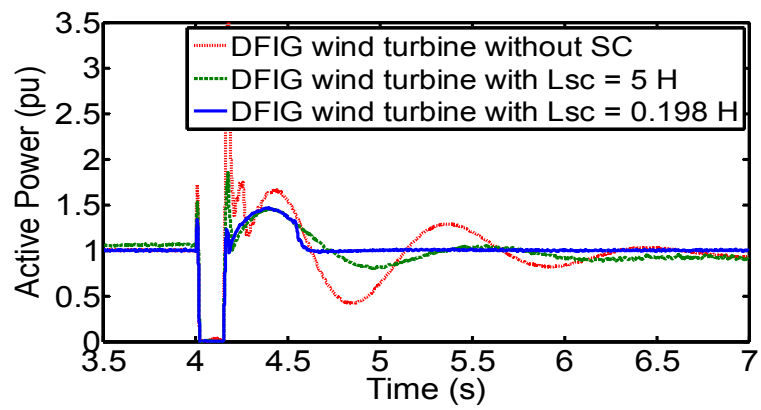
การทดสอบในสภาวะเกิดความผิดปกติในภาพที่ 3.17 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ซึ่งในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติจะเกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงที่หน้าบัสของกังหันลม เมื่อสังเกตจากทุกกรณีไม่ว่าจะกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H ก็ตามแรงดันไฟฟ้ายังคงลดลงเกือบเป็น 0 pu ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ Grid Code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

ภาพที่ 3.18 แสดงกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 สังเกตได้ว่าช่วงที่เกิดความผิดปกติกำลังไฟฟ้าจะลดลงเกือบเป็น 0 pu หลังเกิดความผิดปกติจะเกิดการแกว่งขึ้น ซึ่งหลังเกิดความผิดปกติกำลังไฟฟ้าจะแกว่งอย่างมากในกรณีกังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด และเมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H จะลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าได้เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างมากหรือเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็วกว่ากรณีอื่น ๆ

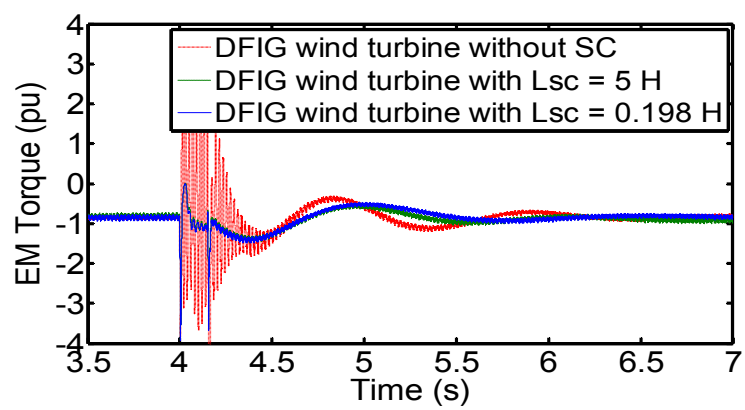
ภาพที่ 3.19 แสดงแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque) จะเกิดการแกว่งอย่างมากในกรณีกังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด และเมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดทั้งขนาด 5 H และ 0.198 H จะสามารถลดการแกว่งของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีและยังเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็ว



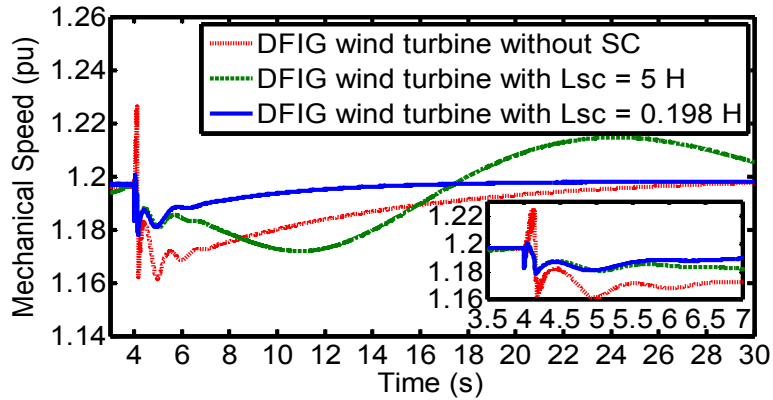
ภาพที่ 3.17 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1



ภาพที่ 3.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1



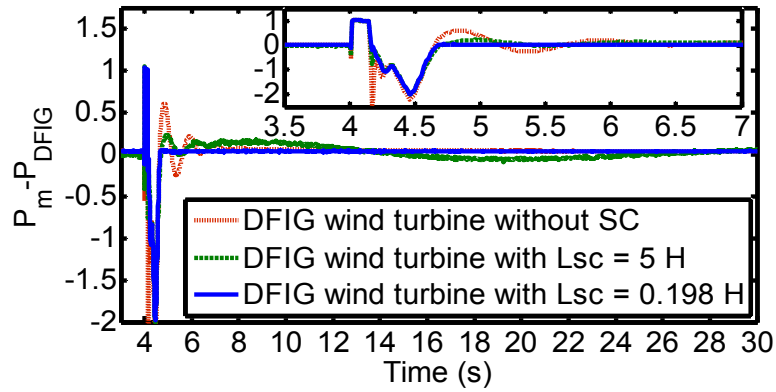
ภาพที่ 3.19 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า



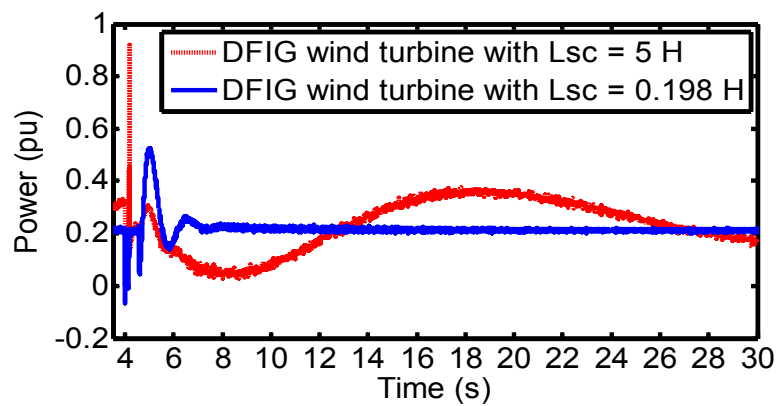
ภาพที่ 3.20 ความเร็วโรเตอร์

ภาพที่ 3.20 แสดงความเร็วโรเตอร์เมื่อเกิดสถานะความผิดปกติในระบบส่งจากกรุปขยายด้านล่างขวาวินาทีที่ 4 กรณีกักหน้ลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดความเร็วโรเตอร์จะแกว่งและใช้เวลานานเมื่อเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกักหน้ลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะเข้าสู่สภาวะได้รวดเร็วกว่ากรณีอื่น ๆ ส่วนในกรณีกักหน้ลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H แม้ว่าช่วงเกิดความผิดปกติจะเกิดความเร็วโรเตอร์แกว่งใกล้เคียงกับกรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H ก็ตาม แต่หลังเคลียร์ความผิดปกติแล้วยังคงเข้าสู่สภาวะปกติได้ช้าและเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการเข้าสู่สภาวะปกติได้ช้าของกรณีกักหน้ลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H นี้เนื่องมาจากกำลังทางกล P_m และกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG} มีค่าไม่เท่ากันหรือไม่เข้าสู่สภาวะสมดุลกัน ทำให้เกิดความเร็วโรเตอร์แกว่งอย่างต่อเนื่องและสามารถแสดงผลต่างกำลังทางกล P_m และกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG} ได้ดังภาพที่ 3.21 สังเกตได้ว่าหลังจากเคลียร์ความผิดปกติวินาทีที่ 4.15 s ทั้งกรณีกักหน้ลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดและกรณีกักหน้ลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะมีค่าเป็นศูนย์และไม่มีการแกว่งของผลต่างนี้ แต่ในกรณีกักหน้ลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H หลังเคลียร์ความผิดปกติยังเกิดการแกว่งของกำลังทางกล P_m และกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG} ซึ่งส่งผลให้ความเร็วโรเตอร์แกว่งอย่างต่อเนื่องดังแสดงในภาพที่ 3.20 การแก้ปัญหาหลังเคลียร์ความผิดปกตินี้ให้กักหน้ลม DFIG สามารถเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็วควบคุมคอนเวอร์เตอร์ดีซีบูตัสจะต้องทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า P_{GSC} เพื่อไปชดเชยให้กำลังไฟฟ้า P_{DFIG} เข้าสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว และแสดงกำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาให้ระบบได้ดังภาพที่ 3.22 ซึ่งกำลังไฟฟ้านี้จะรวมกับกำลังไฟฟ้า P_{GSC} เพื่อไปลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า P_{DFIG} สังเกตได้ว่ากรณีกักหน้ลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H จะจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างไม่สม่ำเสมอทำให้กำลังไฟฟ้า P_{DFIG} ยังคงเกิดการแกว่งอยู่ แต่กรณีกักหน้ลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมามากหลังวินาทีที่ 4.15 s แล้วเข้าสู่สภาวะปกติอย่างไว และจะแสดงให้เห็นการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าหลังเคลียร์ความผิดปกติดังภาพที่ 3.23

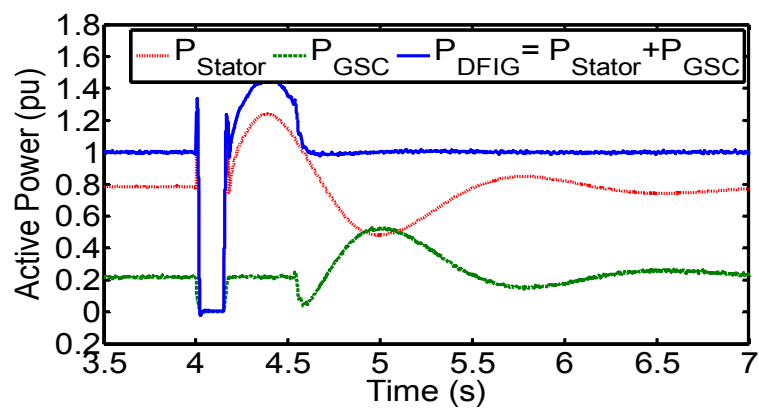
กำลังไฟฟ้า P_{GSC} จะชดเชยกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ผลรวมที่ได้กำลังไฟฟ้า P_{DFIG} จะลดการแกว่งลงและเข้าสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว



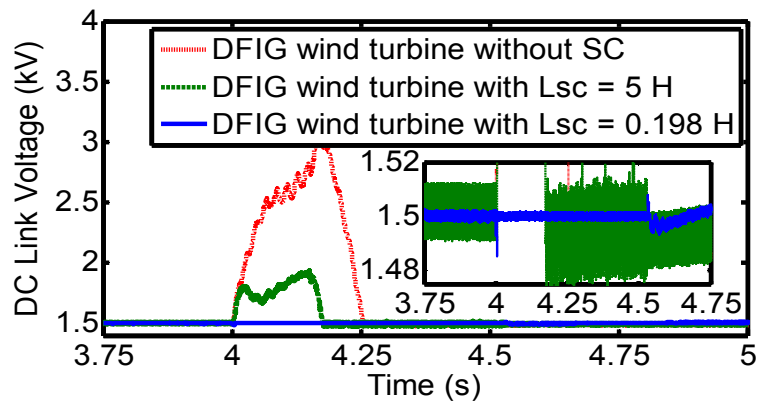
ภาพที่ 3.21 ผลต่างระหว่างกำลังทางกล P_m กับกำลังทางไฟฟ้า P_{DFIG}



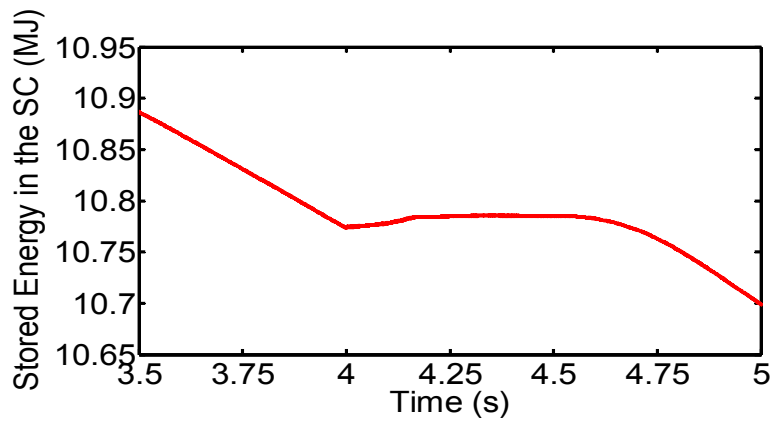
ภาพที่ 3.22 กำลังไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด



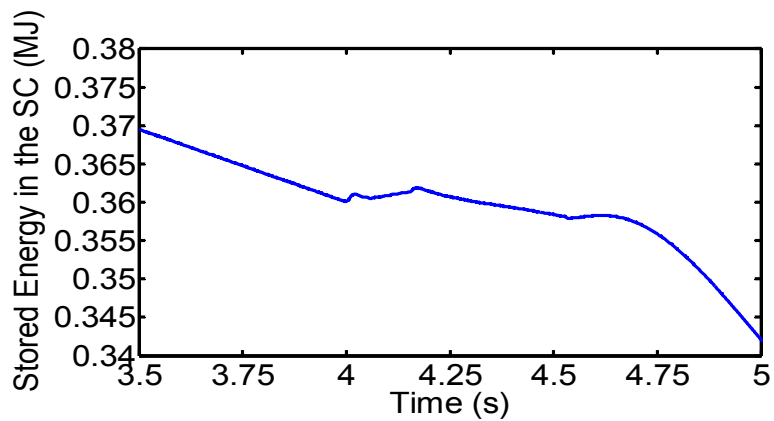
ภาพที่ 3.23 กำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 3.24 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์



(ก) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H



(ข) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

ภาพที่ 3.25 พลังงานไฟฟ้าสะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

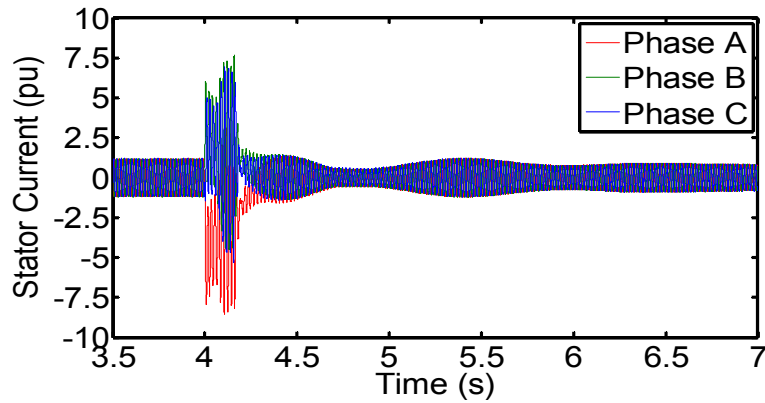
ภาพที่ 3.24 แสดงแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์สังเกตได้ว่ากรณีกักหน้ลม DFIG ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 3000 V เมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด 5 H แรงดันไฟฟ้าจะลดลงมาเหลือประมาณ 2000 V และแรงดันไฟฟ้าเกือบจะคงที่เมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด 0.198 H ซึ่งการควบคุมในช่วงเกิดความผิดปกติจะควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์มีค่าคงที่ที่ 1500 V เมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินนี้จะถูกสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวดดังภาพที่ 3.25 (ก) และ (ข) สังเกตได้ว่าในรูป 3.25 (ก) กรณีกักหน้ลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด 5 H จะสะสมพลังงานในขดลวดตัวนำยิ่งยว่น้อยกว่ากรณีกักหน้ลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด 0.198 H ตามภาพที่ 3.25 (ข) ส่งผลให้การลดการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ได้แตกต่างกัน

ภาพที่ 3.26 แสดงกระแสเตเตอร์เมื่อกักหน้ลม DFIG ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดช่วงเกิดความผิดปกติกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 7.5 pu และเมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H และ 5 H จะสามารถจำกัดกระแสที่เพิ่มขึ้นทางด้านสเตเตอร์ได้เหลือประมาณ 4 pu

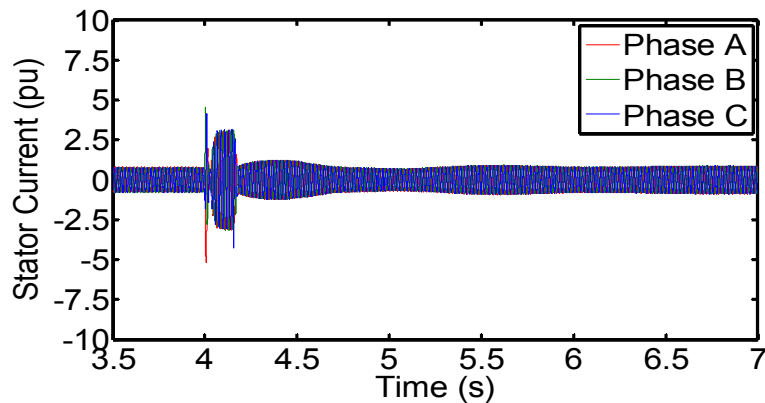
ภาพที่ 3.27 แสดงกระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดช่วงเกิดความผิดปกติทั้งกรณีกักหน้ลม DFIG ไม่ติดตั้งและติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันประมาณ 1 pu แต่เมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H กระแสจะคงที่เสมือนไม่เกิดความผิดปกติในระบบเพียงแค่หลังเคลียร์ความผิดปกติจะเกิดกระแสลดลงเป็นคอขวดและเพิ่มขึ้นก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 3.28 (ก) - (ค) โดยในรูป 3.27 (ค) จะขยายมาเป็นภาพที่ 3.28 (ก) ซึ่งกระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดจะแบ่งเป็น 2 ช่วงการทำงาน คือ A และ B ในช่วง A ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะถูกควบคุมการทำงานตามสภาวะเกิดความผิดปกติ ส่วนในช่วง B ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะถูกควบคุมการทำงานตามสภาวะปกติหรือลดการเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นการทำงานของตัวตรวจจับความผิดปกติจะสร้างสัญญาณสวิตช์ S_d ขึ้นมาดังภาพที่ 3.28 (ข) ซึ่งสัญญาณ S_d ได้มาจากการสร้างสัญญาณจากบล็อกโมโนสเตเบิล ซึ่งในที่นี้จะถูกกำหนดค่าช่วงเวลา A ไว้ที่ 0.52 s ในช่วง A กระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดจะถูกจำกัดด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดและในเวลาเดียวกันภาพที่ 3.28 (ค) แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์จะมีค่าเกือบคงที่ที่ 1500 V และเมื่อสังเกตจากภาพที่ 3.23 กำลังไฟฟ้าทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์จะมีค่าเกือบเป็น 0 pu ซึ่งการกำหนดการทำงานในช่วง A นี้จะครอบคลุมทั้งช่วงเกิดความผิดปกติและหลังเคลียร์ความผิดปกติเล็กน้อยเพื่อคำนึงถึงการป้องกันการเกิดความผิดปกติที่ซ้ำซ้อน และหลังจากเวลาที่ 4.52 วินาที หรือสัญญาณ S_d หยุดทำงานจะเข้าสู่สภาวะปกติตัวควบคุมการทำงานการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าจะกลับมาทำงานในช่วง B เมื่อสังเกตในภาพที่ 3.23 กำลังไฟฟ้า P_{Stator} จะเกิดการแกว่ง ดังนั้น ตัวควบคุมการลดการแกว่งจะเข้ามาควบคุมให้กำลังไฟฟ้า P_{GSC} ชดเชยการแกว่งของกำลังไฟฟ้า P_{Stator} ส่งผลให้กำลังไฟฟ้า P_{DFIG} นั้นกลับมาราบเรียบดังเดิม และเมื่อสังเกตจากเวลาที่ 4.52 s ในภาพที่ 3.28 (ก) กระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดจะมีทิศทางการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้า P_{GSC} อัน

เนื่องจากขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับ P_{Stator} ส่งผลให้กระแสคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดเวลา 4.52 s นั้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นนั่นเอง

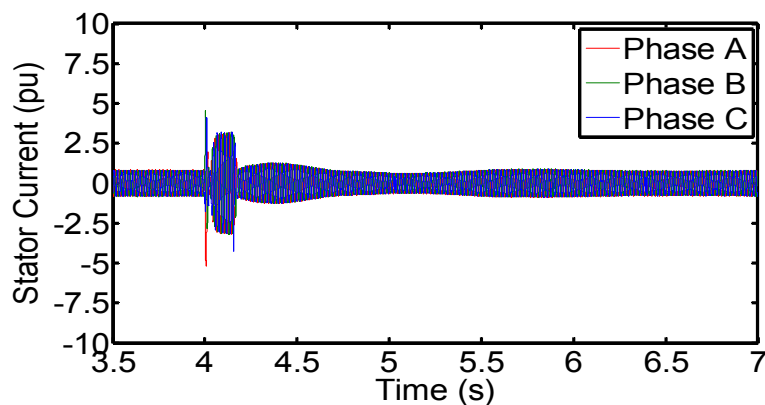
ภาพที่ 3.29 แสดงกระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์เมื่อกักห้ามลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดทั้งขนาด 5 H และ 0.198 H จะสามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเหลือประมาณ 4.5 pu และเมื่อไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 7.5 pu



(ก) กักห้ามลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด

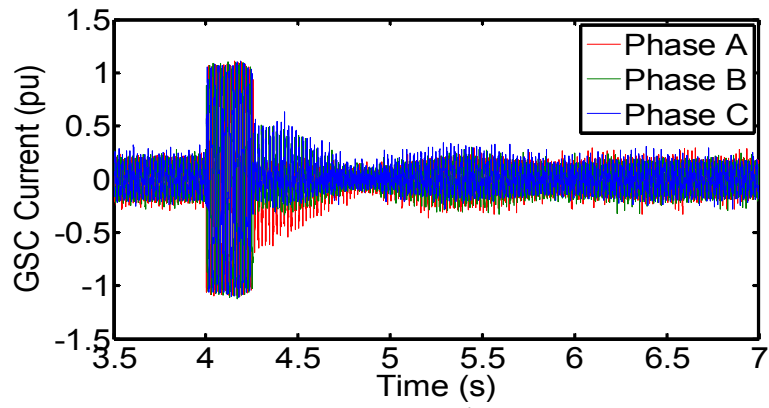


(ข) กักห้ามลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H

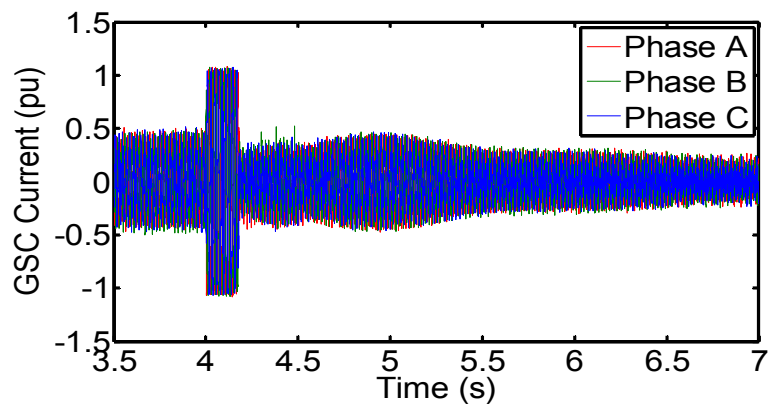


(ค) กักห้ามลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

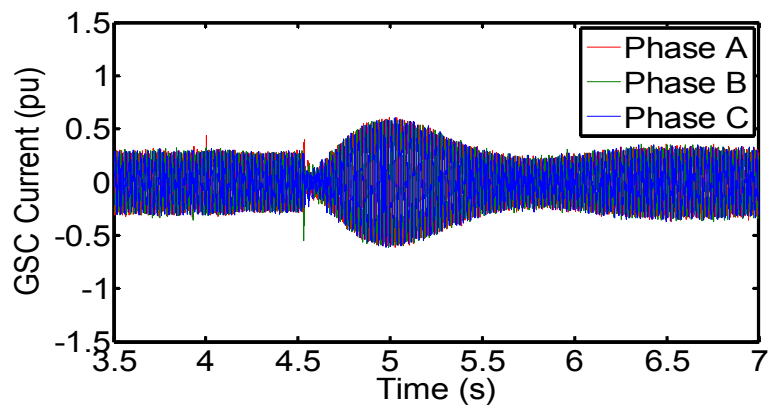
ภาพที่ 3.26 กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์



(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด

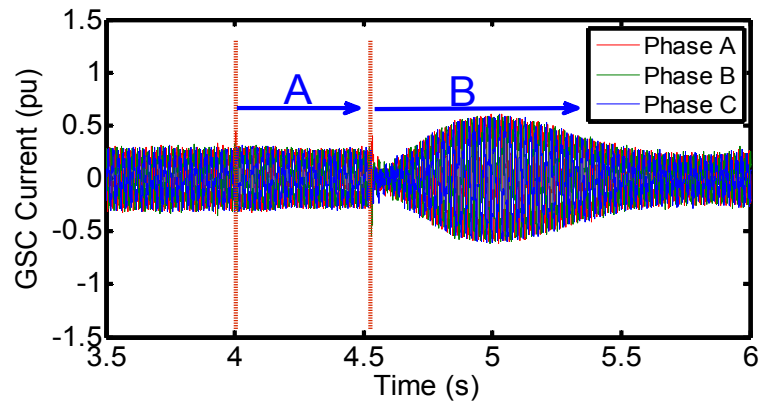


(ข) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H

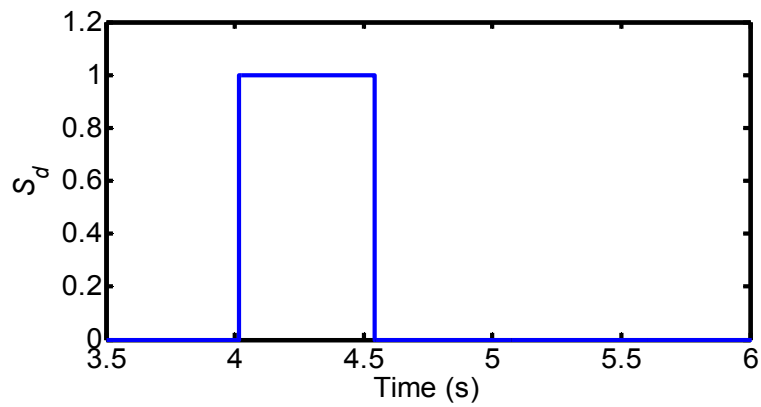


(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

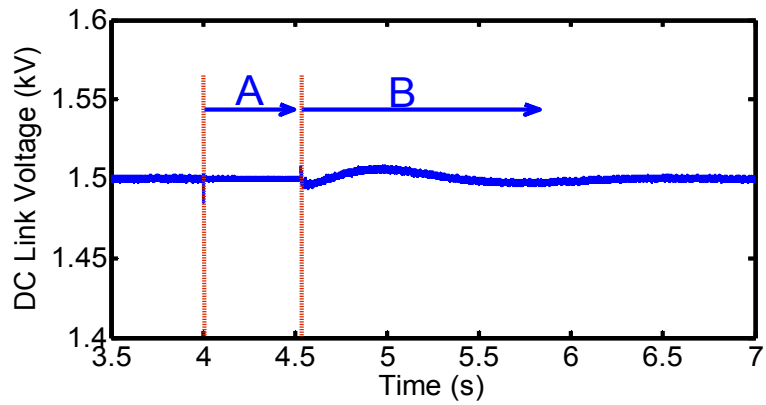
ภาพที่ 3.27 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด



(ก) กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดเมื่อติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

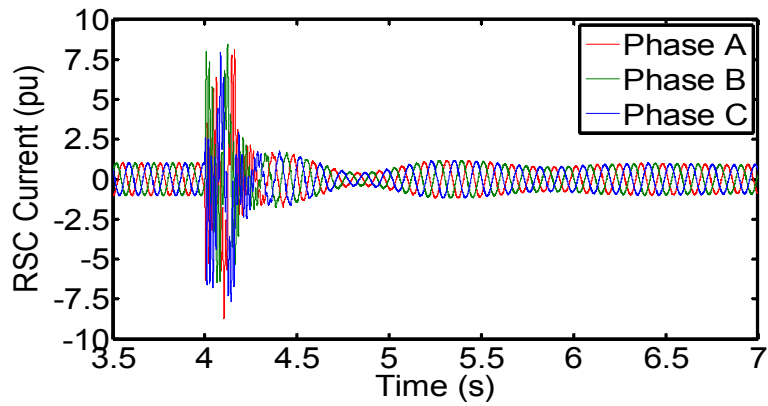


(ข) สัญญาณสวิตช์ S_d

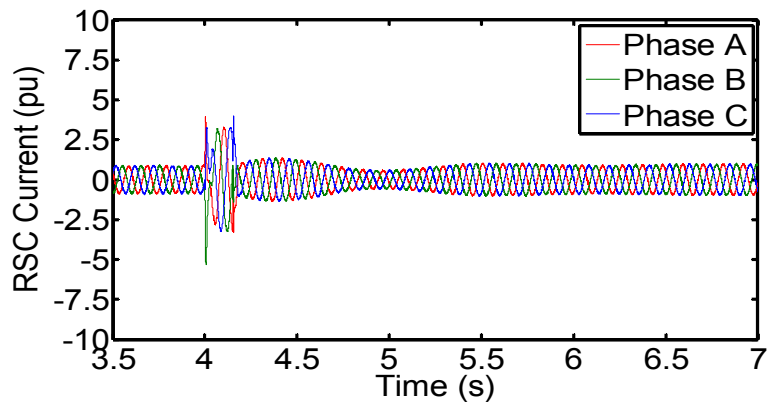


(ค) แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงก์

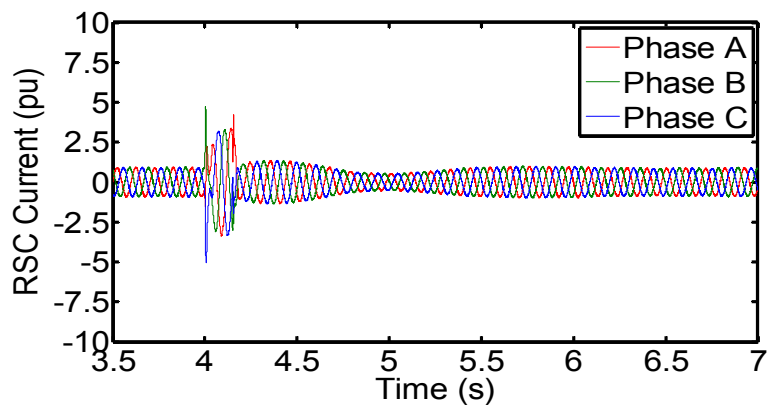
ภาพที่ 3.28 อธิบายสภาวะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ดีซีบูคัส



(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด



(ข) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 5 H



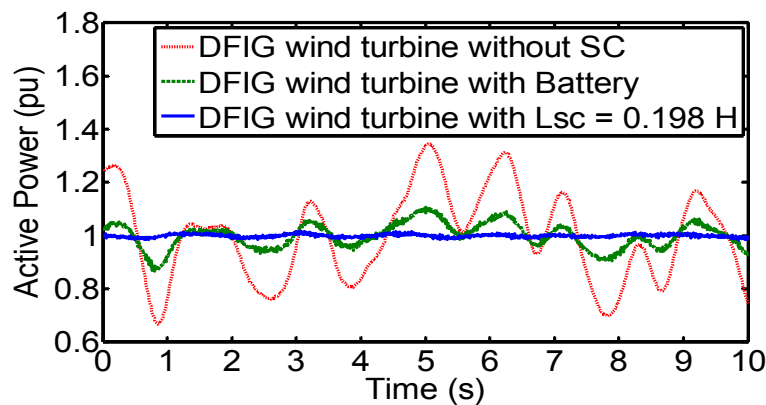
(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

ภาพที่ 3.29 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้าน โรเตอร์

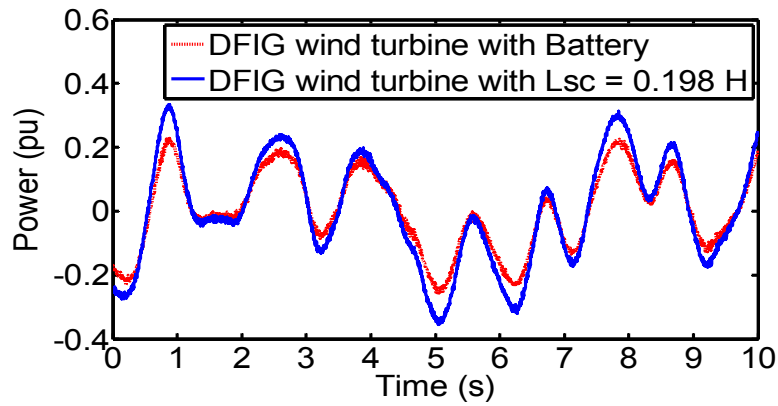
การเปรียบเทียบกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมขนาด 0.198 H กับ แบตเตอรี่จะเปรียบเทียบผลการทดสอบในสภาวะปกติ เพื่อแสดงผลการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ กังหันลม DFIG จ่ายให้กับระบบ

ภาพที่ 3.30 แสดงกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ด้วยการทดสอบภายใต้ความเร็วลม A เมื่อกังหันลม DFIG ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูง และเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่กำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงแต่ยังคงลดการแกว่งได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H ที่สามารถลดการแกว่งได้ดีกว่ากรณีอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 3.31 จะสังเกตได้ชัดเจนว่าการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าของกรณีกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะสามารถทำได้มากกว่าและรวดเร็วกว่าแบตเตอรี่จึงทำให้การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้านั้นกรณีกังหันลม DFIG ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H ทำได้ดีกว่าแบตเตอรี่

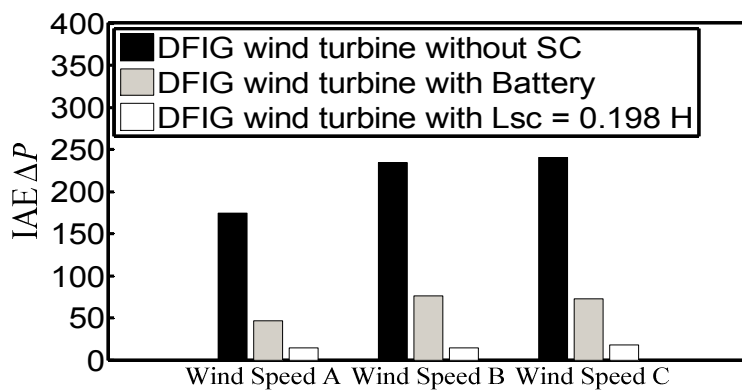
ภาพที่ 3.32 แสดงแผนภูมิแท่งของกำลังไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้ความเร็วลม A, B และ C ไม่ว่าจะความเร็วลมรูปแบบใดกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าการติดตั้งแบตเตอรี่ และเพื่อให้เห็นถึงความชัดเจนจะแสดงเป็นตารางเปรียบเทียบค่า IAE ของกำลังไฟฟ้า ΔP ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ตามตารางที่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



ภาพที่ 3.30 กำลังไฟฟ้ากรณีความเร็วลม A



ภาพที่ 3.31 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบระหว่างแบตเตอรี่กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด



ภาพที่ 3.32 IAE ของกำลังไฟฟ้า ΔP_{Bus1}

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของ IAE ของ ΔP

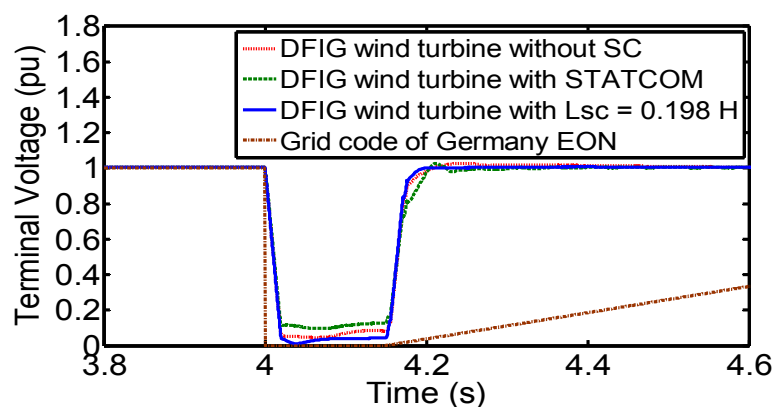
รูปแบบความเร็วลม	กังหันลมที่ไม่ติดตั้ง ขดลวดตัวนำยิ่งยวด	แบตเตอรี่	กังหันลม DFIG ที่ ติดตั้งขดลวดตัวนำ ยิ่งยวดขนาด 0.198 H
ความเร็วลม A	100 %	26.51 %	8.05 %
ความเร็วลม B	100 %	32.34 %	6.23 %
ความเร็วลม C	100 %	30.20 %	7.36 %

การเปรียบเทียบกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมขนาด 0.198 H กับ STATCOM จะเปรียบเทียบผลการทดสอบในสภาวะเกิดความผิดปกติ เพื่อแสดงผลการเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG

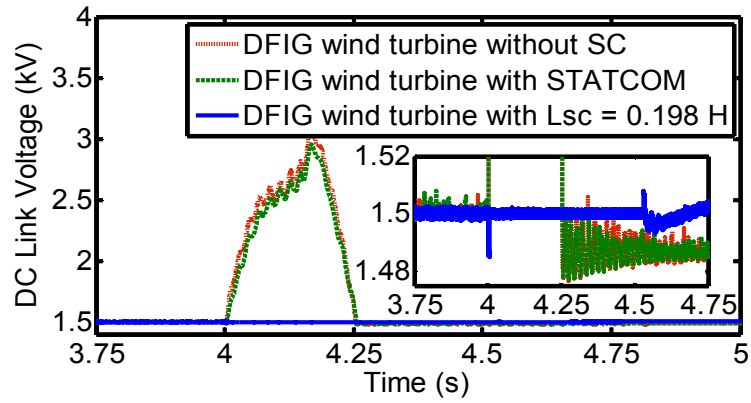
ภาพที่ 3.33 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 สังเกตได้ว่าในทุกกรณีแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเกือบเป็น 0 pu ซึ่งยังคงผ่านมาตรฐาน Grid Code ของ Germany EON [12] กังหันลม DFIG ในทุกกรณีจะต้องทนต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาเสถียรภาพให้กับระบบด้วยการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง

ภาพที่ 3.4 เป็นแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ในกรณีกังหันลม DFIG ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์จะเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 3000 V เช่นเดียวกับกรณีติดตั้ง STATCOM แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ยังคงมีค่าประมาณ 3000 V เช่นเดิม แต่เมื่อกังหันลม DFIG ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะลดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ที่เพิ่มขึ้นเหลือประมาณ 1500 V หรือเกือบคงที่ตามสภาวะปกติ

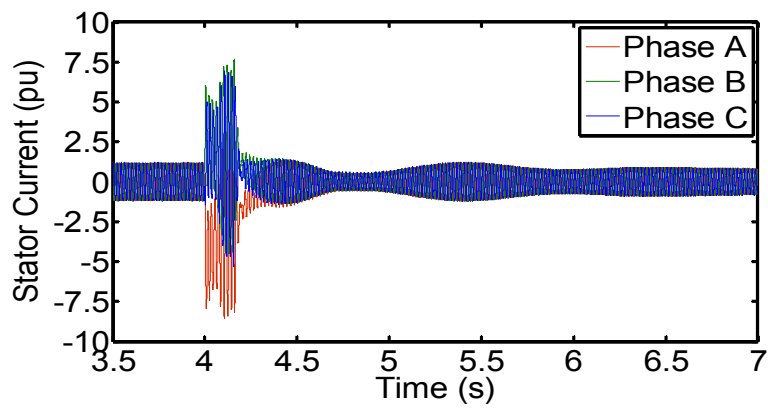
ภาพที่ 3.5 - 3.7 แสดงกระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์, กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด และกระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ ตามลำดับ สังเกตได้ชัดเจนว่าการติดตั้ง STATCOM ไม่สามารถลดกระแสที่เพิ่มขึ้นสูงอย่างฉับพลันนี้ได้ แต่ในทางกลับกันกังหันลม DFIG ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะลดกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันได้อย่างรวดเร็วและสามารถแสดงเป็นตารางการเปรียบเทียบค่าสูงสุดในรูปเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์, กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์, กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด และกระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ได้ดังตารางที่ 3.7 ซึ่งกรณี STATCOM และกังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด จะมีเปอร์เซ็นต์ที่ใกล้เคียง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H จะมีเปอร์เซ็นต์ค่าสูงสุดที่น้อยลงอย่างมาก ผลการทดสอบบ่งบอกได้ว่า STATCOM ไม่สามารถลดการเกิดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์เพิ่มขึ้นอย่างสูงและกระแสไฟฟ้าเกินภายในกังหันลม DFIG ได้ แต่ในตรงกันข้ามการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในกังหันลม DFIG จะสามารถลดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์และกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันภายในกังหันลมได้



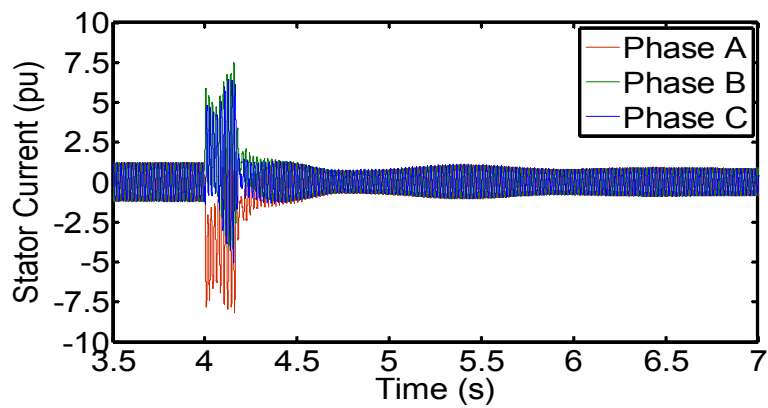
ภาพที่ 3.33 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1



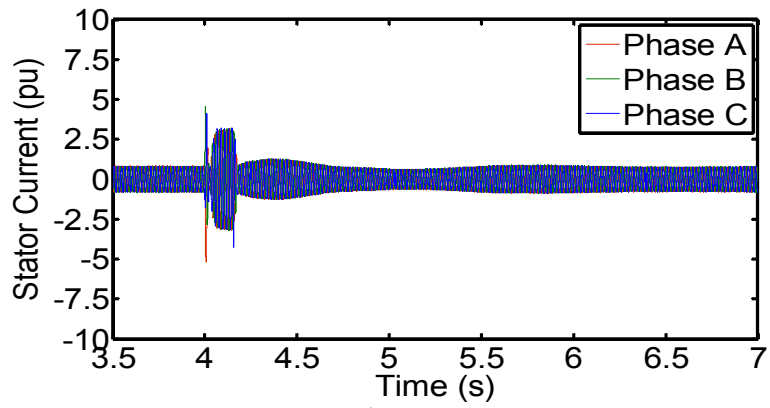
ภาพที่ 3.34 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงก์



(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด

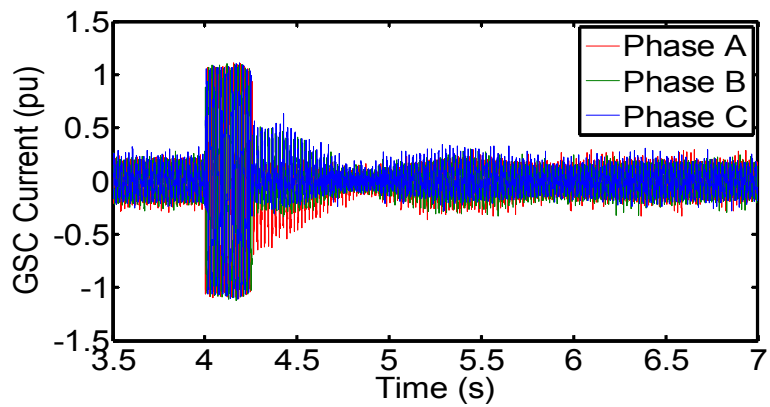


(ข) STATCOM

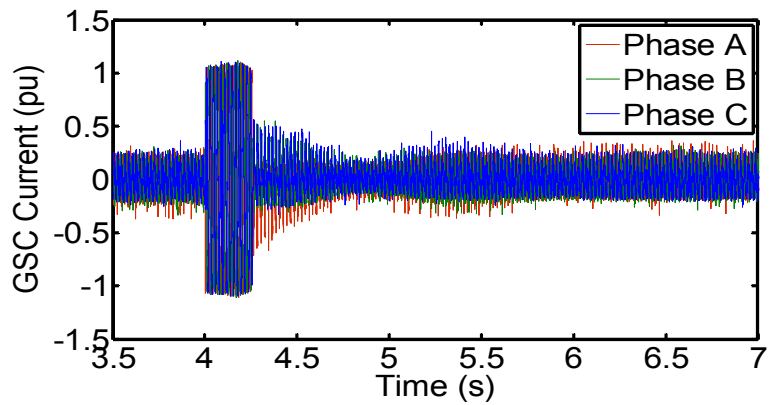


(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

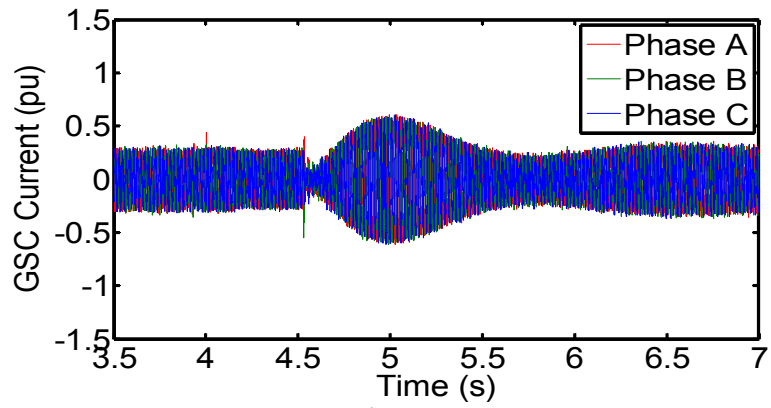
ภาพที่ 3.35 กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์



(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด

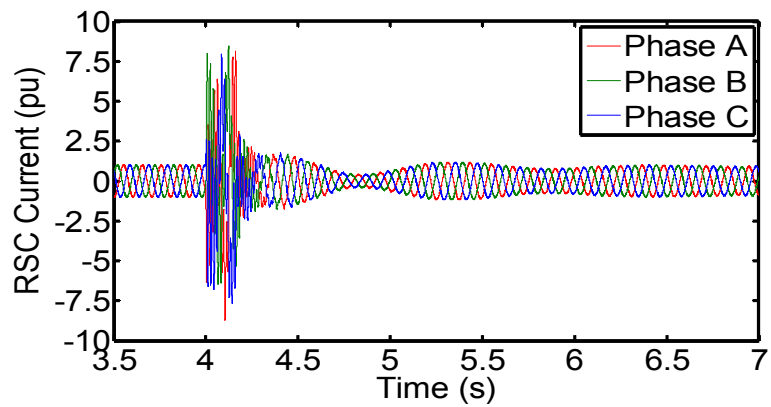


(ข) STATCOM

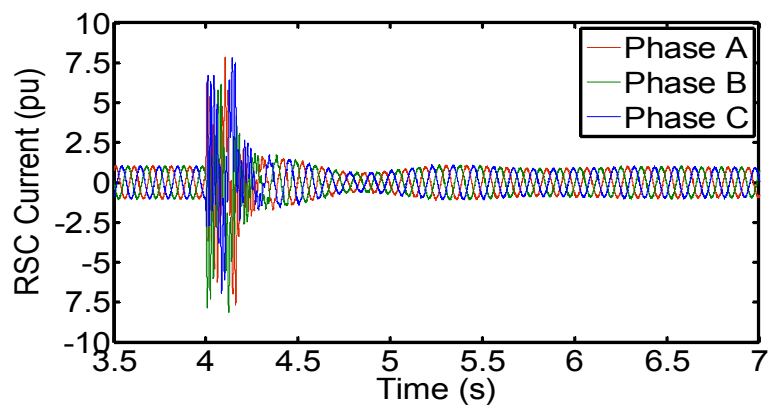


(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

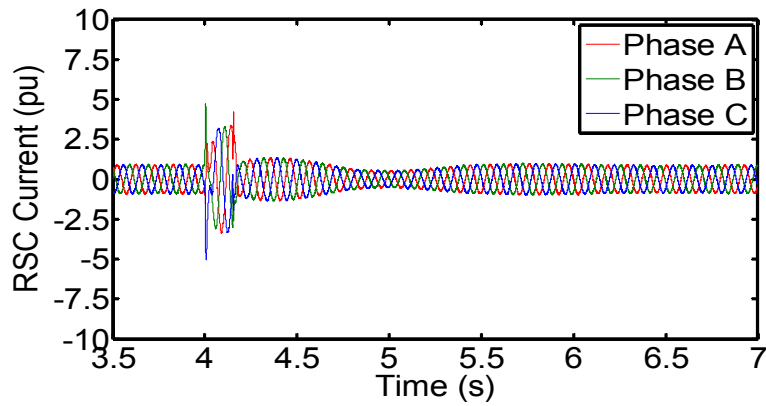
ภาพที่ 3.36 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด



(ก) กังหันลม DFIG ที่ไม่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด



(ข) STATCOM



(ค) กังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดขนาด 0.198 H

ภาพที่ 3.37 กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์

ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบค่าสูงสุดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์

พารามิเตอร์	กังหันลมที่ไม่ติดตั้ง ขดลวดตัวนำยิ่งยวด	STATCOM	กังหันลม DFIG ที่ ติดตั้งขดลวดตัวนำ ยิ่งยวดขนาด 0.198 H
แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (V)	100 %	90.58 %	0.99 %
กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ (pu)	100 %	94.46 %	59.71 %
กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ ด้านกริด (pu)	100 %	96.79 %	35.89 %
กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ ด้านโรเตอร์ (pu)	100 %	92.10 %	53.28 %

3.5 สรุปผลการทดสอบ

ในบทนี้นำเสนอเทคนิคการหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมที่ติดตั้งระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยค่าตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นในขดลวดที่จำเป็น และพารามิเตอร์

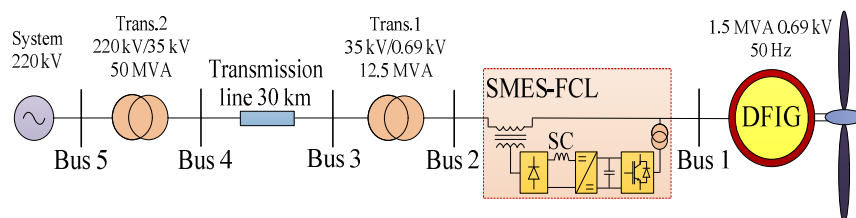
ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ของคอนเวอร์เตอร์ดีซีฟูลดีซีจะได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมพร้อมกันด้วยวิธี PSO ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ากังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมสามารถทำเสถียรภาพทั้งการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหัน DFIG ได้ดีกว่ากังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ไม่เหมาะสม และเมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับเบตเตอร์ การลดการแกว่งของกังหันลม DFIG ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมยังสามารถทำเสถียรภาพได้รวดเร็วกว่าเบตเตอร์อย่างมาก เช่นเดียวกันในผลการจำลองการข้ามผ่านความผิดปกติเมื่อเปรียบเทียบกับ STATCOM การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในกังหันลม DFIG จะสามารถลดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงก์ที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันและกระแสไฟฟ้าเกินได้อย่างรวดเร็ว แต่ในทางตรงกันข้าม STATCOM จะไม่สามารถแก้ปัญหาภายในกังหันลม DFIG นี้ได้เลย

บทที่ 4

อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์แบบ อเนกประสงค์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม ที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่ออยู่

เนื้อหาที่กล่าวในบทนี้จะนำเสนออุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) ที่เหมาะสมด้วยการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) ร่วมกัน เพื่อใช้แก้ปัญหาการข้ามผ่านความผิดปกติและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบที่มีกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ต่อร่วมอยู่ในสถานะปกติ กังหันลม DFIG จะจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอให้กับระบบซึ่งขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) เพื่อใช้ควบคุมการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสฟอลต์ (Fault Current Limiter: FCL) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพชั่วคราวและความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG ในส่วนการออกแบบ SMES-FCL ที่เหมาะสมจะออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) โดยใช้หลักการวิธีฟังก์ชันพลังงานในการออกแบบ ในการทดสอบจะเปรียบเทียบ SMES-FCL กับ SMES และ FCL ด้วยการเปรียบเทียบการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG และผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่า SMES-FCL ด้วยขนาด MW และ MJ ที่น้อยกว่าสามารถให้ผลการทำเสถียรภาพที่ มากกว่า SMES และ FCL

4.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ศึกษา



ภาพที่ 4.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้ง SMES-FCL

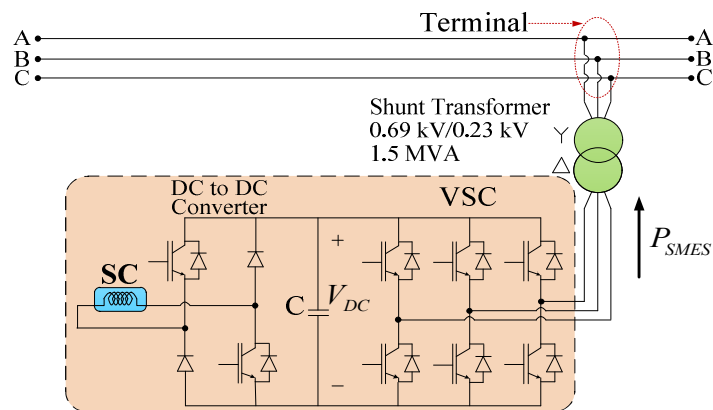
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดกำลังไฟฟ้า	1.5 MW
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	0.69 kV
ความถี่ระบบไฟฟ้า	50 Hz
จำนวน pole	2
ค่าความต้านทานของสเตเตอร์และโรเตอร์	0.003, 0.003 pu
ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์และโรเตอร์	0.11, 0.07 pu
ควาความเหนี่ยวนำแม่เหนใต้ซึ่ง	2.5 pu
ค่าคงที่ความเฉื่อย	0.685 s
สายส่งยาว	30 km

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาจะแสดงดังภาพที่ 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) 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 จ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่

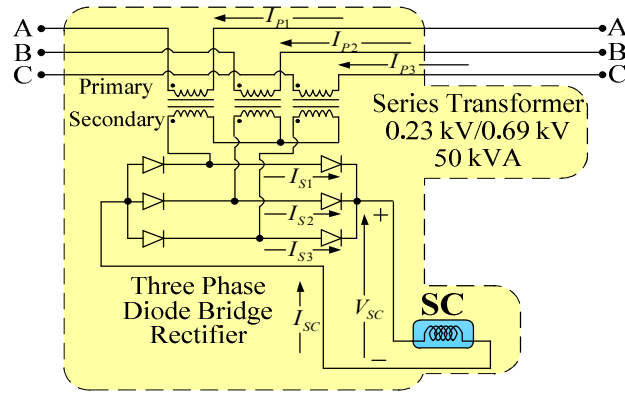
สมมุติให้กับระบบ SMES-FCL ในส่วนของ SMES จะทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นส่วนของ FCL จะทำหน้าที่จำกัดกระแสฟลด์ โดยระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษานี้ตามภาพที่ 4.1 จะใช้จำลองสภาวะปกติที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกังหันลม D F I G และจำลองสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นที่บัสที่ 2 เป็นเวลา 150 m s

4.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES, FCL และ SMES-FCL



ภาพที่ 4.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES

โครงสร้างวงจรทางไฟฟ้าของ SMES ตามภาพที่ 4.2 จะประกอบด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด (SC) คอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซี (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 โดยคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงก์ (V_{DC}) และควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal) ของ SMES ที่ต่ออยู่ ส่วนทางด้านคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซีจะทำหน้าที่ควบคุมพลังงานไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้า P_{SMES} ดังนั้น SMES จะสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ SMES ต่ออยู่ได้ โดยการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และควบคุมการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ผ่านทางด้านคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซี [36]



ภาพที่ 4.3 วงจรไฟฟ้าของ FCL

และโครงสร้างวงจรทางไฟฟ้าของ FCL จะแสดงดังภาพที่ 4.3 [33] ประกอบด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด SC วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์ (Three Phase diode bridge rectifier) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series Transformer) โดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่จำกัดกระแสฟลัดต์เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ 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

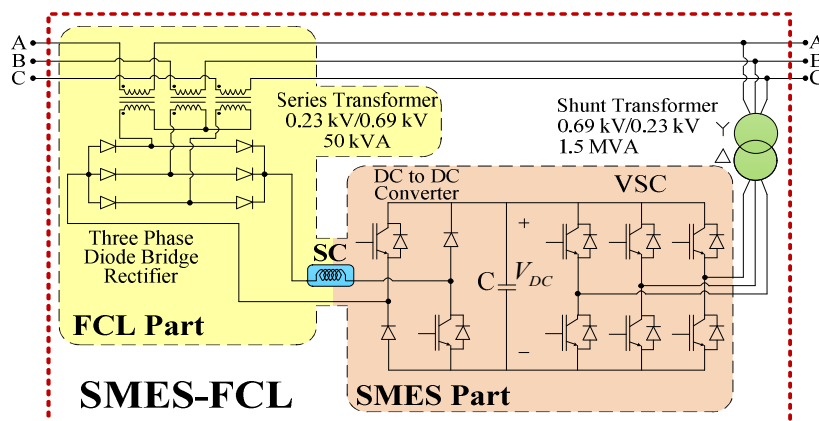
ตามสมการที่ (4.2) และ (4.3) สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติและขดลวดตัวนำยิ่งยวดมีขนาดค่าความเหนี่ยวนำค่อนข้างใหญ่กระแสไฟฟ้า I_{SC} ที่ไหลผ่านขดลวดจะมีคงที่ หรือ dI_{SC}/dt มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้น สมการที่ (4.3) แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม V_{SC} จะมีค่าน้อยมาก แต่ในทางกลับกัน ถ้าเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน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

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

และเมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์จากทางด้านระบบกำลังไฟฟ้าหรือด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุกรมจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

เมื่อกำหนดให้ V_P คือแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นอีกปัจจัยสำคัญในการจำกัดกระแสฟลัดในระบบ ซึ่งการจำกัดกระแสฟลัดของ FCL นี้จะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ



ภาพที่ 4.4 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL

กับกระแสจริง I_d และ I_q แล้วนำไปเป็นอินพุตให้กลับตัวควบคุมฟิโ 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 เพื่อใช้สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ด้วยวิธีการสร้างสัญญาณมอดูเลตตามความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) สัญญาณขับนำสวิตช์นี้จะใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์

ส่วนตัวควบคุมฟิโ PI-5 จะใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่บัสที่ 2 (P_{Bus2}) ด้วยการวัดสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสที่ 2 (P_{Bus2}) เปรียบเทียบกับสัญญาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิง $P_{Bus2-ref}$ โดยผลต่างที่ได้จะเป็นอินพุตให้ตัวควบคุมฟิโ PI-5 และเอาต์พุตที่ได้จะเป็นค่าเบี่ยงเบนคิวดิไซเคิล (ΔD) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าคิวดิไซเคิล D และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจะได้สัญญาณควบคุมสวิตช์สำหรับคอนเวอร์เตอร์ดิซิงกูติซี เมื่อค่าคิวดิไซเคิล D มีค่ามากกว่า 0.5 พลังงานไฟฟ้าจากระบบจะซาร์จสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวด ในทางกลับกัน ถ้าค่าคิวดิไซเคิล D มีค่าน้อยกว่า 0.5 พลังงานไฟฟ้าจะดิซซาร์จออกจากขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปสู่ระบบ

4.3.2 เทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุด

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุดด้วยการค้นหาค่าความเหนี่ยวนำ กระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิโอย่างเหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

เมื่อเกิดความผิดปกติอย่างรุนแรงในระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นสาเหตุให้เกิดพลังงานจลน์สะสมในโรเตอร์ของกังหันลม DFIG และหลังเกิดความผิดปกติพลังงานจลน์จะต้องคายออกสู่ระบบอย่างไรเพื่อให้กังหันลมสามารถกลับสู่สภาวะปกติได้รวดเร็ว เพื่อจะยับยั้งการสะสมเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์ในโรเตอร์ SMES-FCL ในส่วนของ FCL จะทำหน้าที่แทรกหรือเชื่อมต่อแบบอนุกรมกับระบบอย่างอัตโนมัติเพื่อจำกัดกระแสฟลัดและลดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าหน้าบัสของกังหันลมและยังช่วยลดการลดลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมได้อีกด้วย 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
$PE_f(\delta_f)$	คือพลังงานศักย์ที่เวลาเคลียร์ความผิดปกติ

ω_f	คือความเร็วโรเตอร์ที่เวลาเคลียร์ความผิดพลาด
δ_f	คือมุมโรเตอร์ที่เวลาเคลียร์ความผิดพลาด

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

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

โดยที่

M	คือค่าคงที่ความเฉื่อยของโรเตอร์
ω_0	คือความเร็วโรเตอร์ที่เวลาเกิดความผิดพลาด
ω_f	คือความเร็วโรเตอร์ที่เวลาเคลียร์ความผิดพลาด

ในช่วงเกิดความผิดพลาดกำลังทางกลจะสามารถสมมติให้มีค่าคงที่เนื่องจากเป็นระยะเวลาสั้น ๆ และความเร็วโรเตอร์ที่เวลาเคลียร์ความผิดพลาดจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

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

โดยที่

t_f	คือเวลาที่เคลียร์ความผิดพลาดออกจากระบบโดยขึ้นอยู่กับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
α	คืออัตราเร่งของโรเตอร์

ซึ่งอัตราเร่ง α ของโรเตอร์สามารถคำนวณได้จาก

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

โดยที่

P_{mf}	คือกำลังทางกลของกังหันลม DFIG ที่เวลาเกิดความผิดพลาด
P_{ef}	คือกำลังทางไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่เวลาเกิดความผิดพลาด

เมื่อแทนสมการที่ (4.9) ลงใน (4.8) จะได้

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

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

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

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

โดยที่

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

t_0 คือเวลาเริ่มต้นการจำลอง

t_f คือเวลาสิ้นสุดการจำลอง

ส่วนการพิจารณาพลังงานสะสมเริ่มต้น (E_{SC0}) จะหาค่าที่น้อยที่สุดของพลังงานสะสมเริ่มต้นในการทำเสถียรภาพ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อกำหนดให้ I_{SC0} คือกระแสเริ่มต้นที่สะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวด 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] เพื่อที่จะปรับค่า

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 และกระบวนการค้นหาคำตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง 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

ส่วนพารามิเตอร์ของกระบวนการวิธี PSO จะกำหนดไว้ดังนี้

จำนวนอนุภาค 50 ตัว

จำนวนรอบของการค้นหา 100 รอบ

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

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

การหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (4.14) จะใช้วิธี PSO ดังเช่นเดียวกับของ SMES-FCL และมีการกำหนดกระบวนการค้นหาคำตอบของพารามิเตอร์ดังนี้

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

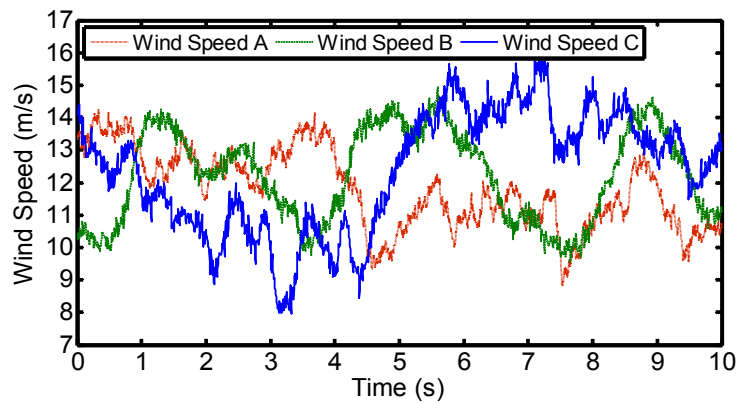
ค่าคงที่ตัวควบคุมไอ K_{I1} , K_{I2} , K_{I3} , K_{I4} และ K_{I5} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 20

และยังนำ SMES-FCL เปรียบเทียบกับ FCL โดย FCL จะมีค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) 20 H

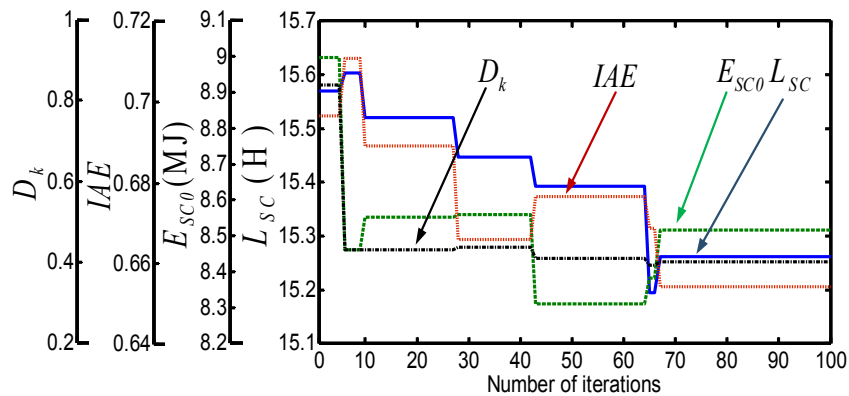
4.4 ผลการจำลองและทดสอบ

ในการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ SMES-FCL จะจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/SimPowerSystem [31] โดยออกแบบภายใต้ความเร็วลม Wind speed A ดังภาพที่ 4.6 และจำลองการเกิดความผิดปกติที่บัสที่ 2 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 3 s ตามระบบกำลังไฟฟ้าภาพที่ 4.1 ผลลัพธ์การ

ค้นหาค่าคำตอบของสมการที่ (4.13) จะสามารถแสดงการลู่เข้าหาค่าคำตอบของค่าน้อยที่สุดของผลคำตอบแต่ละเทอมได้ดังภาพที่ 4.7 และผลคำตอบของพารามิเตอร์ SMES-FCL ที่ค้นหาจะแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับ SMES ซึ่ง SMES จะออกแบบพารามิเตอร์ฟิวส์ด้วยสมการที่ (4.14) และแสดงผลคำตอบตามตารางที่ 4.2 เพียงแต่จะกำหนดขนาดค่าความเหนี่ยวนำและกระแสเริ่มของ SMES นี้ให้มีขนาดที่ใหญ่กว่าและพลังงานสะสมเริ่มต้นมากกว่า SMES-FCL ในการทำเสถียรภาพ และเช่นเดียวกันกับ FCL ที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบก็จะกำหนดค่าความเหนี่ยวนำให้มีขนาดที่ใหญ่กว่า SMES-FCL เช่นกัน



ภาพที่ 4.6 ความเร็วลม

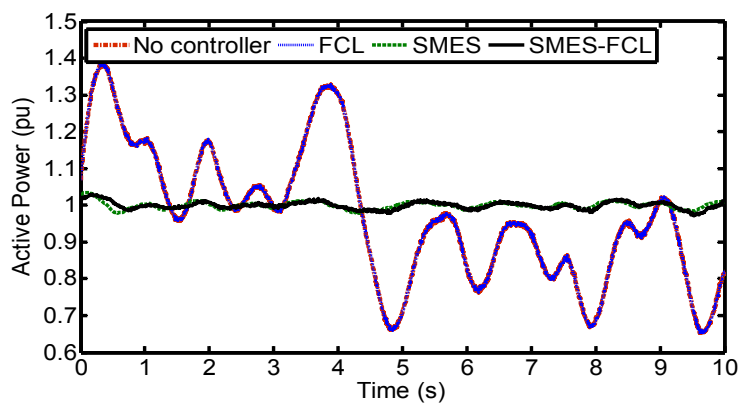


ภาพที่ 4.7 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ D_k , IAE , E_{sc0} และ L_{sc}

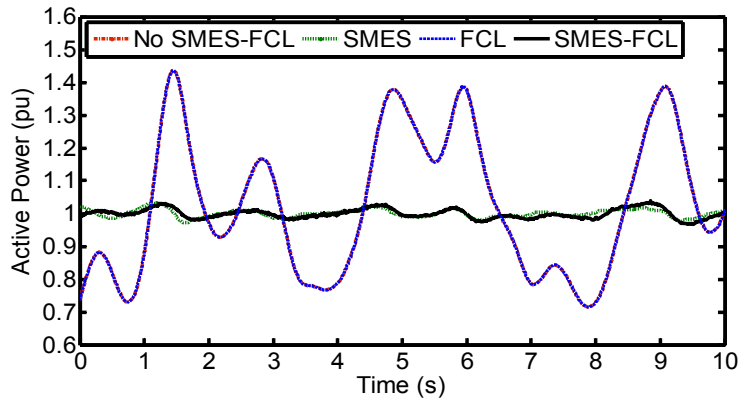
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของ FCL SMES และ SMES-FCL

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

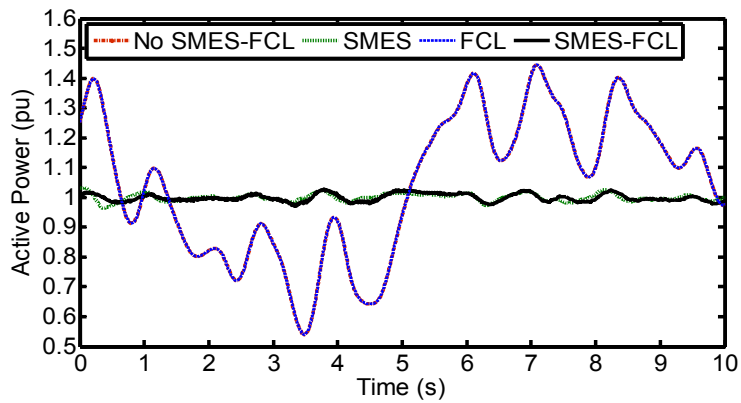
ผลการจำลองระบบในสภาวะปกติที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 4.8 (ก) - (ค) เป็นกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2 ที่จำลองภายใต้ความเร็วลม A, B และ C ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งทุก ๆ ภายได้ความเร็วลมกำลังไฟฟ้าจะแกว่งอย่างสูงเมื่อไม่ติดตั้งตัวควบคุมและติดตั้ง FCL แต่ในทางกลับกันทั้ง SMES และ SMES-FCL สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อแสดงผลการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในรูปแบบแผนภูมิแท่งของ IAE ตามภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ชัดเจนว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ FCL จะเกิดค่า IAE ที่สูงมากและใกล้เคียงกัน ส่วนกรณี SMES และ SMES-FCL ค่าของ IAE จะลดลงอย่างมากและมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น SMES และ SMES-FCL สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน แต่ FCL จะไม่สามารถทำการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องจากไม่สามารถทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าได้



(ก) กรณีความเร็วลม A

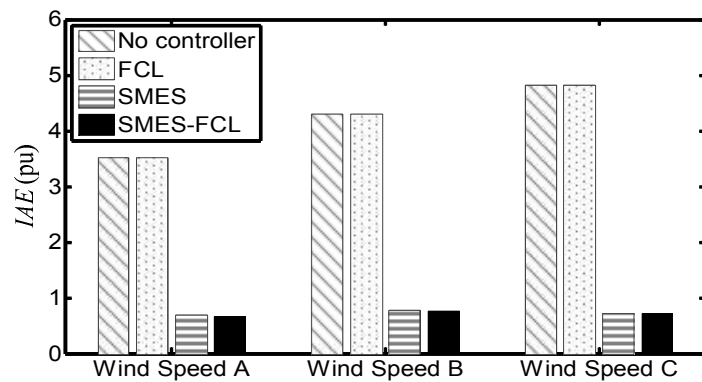


(ข) กรณีความเร็วลม B



(ค) กรณีความเร็วลม C

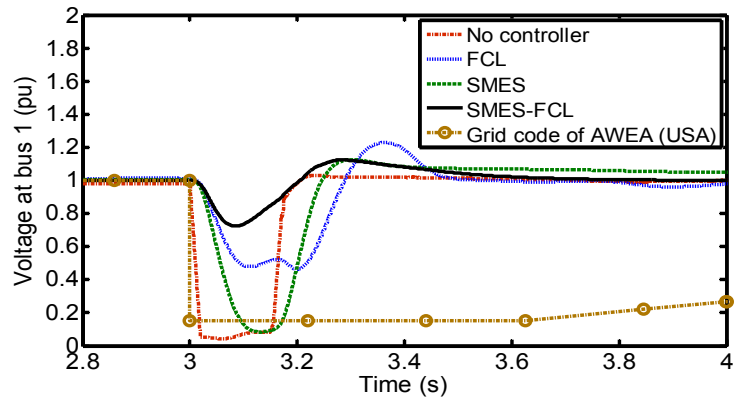
ภาพที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2



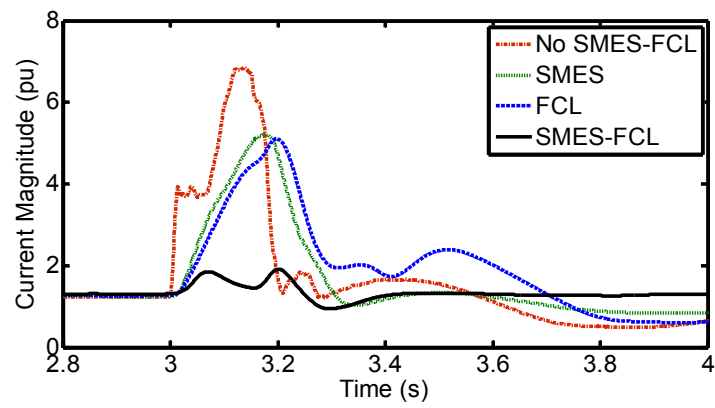
ภาพที่ 4.9 IAE ของผลต่างกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2

ผลการจำลองในสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบแสดงดังภาพที่ 4.10 เป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 โดยแรงดันไฟฟ้าทุกกรณีจะเปรียบเทียบกับมาตรฐาน Grid code ของ AWEA (USA) ซึ่งจะแสดง

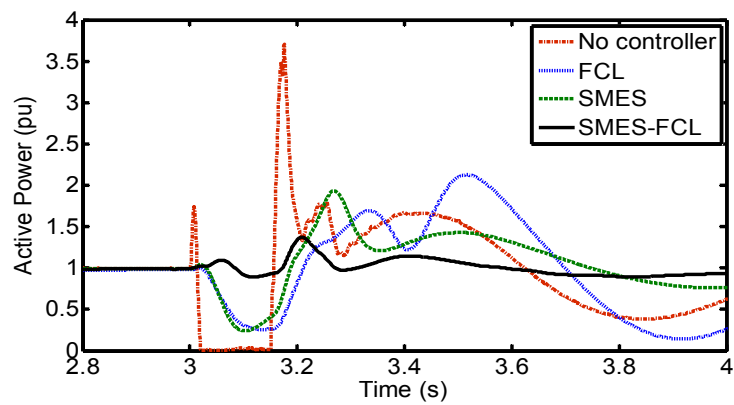
ให้เห็นว่ากังหันลม DFIG จะต้องทนต่อสถานะแรงดันไฟฟ้าลดลง 15 % ของแรงดันไฟฟ้าปกติเป็นระยะเวลา 625 ms ซึ่งกังหันลมจะต้องพยายามต่อกับระบบหรือข้ามผ่านความผิดปกตินี้ไปให้ได้ และสังเกตได้ว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและติดตั้ง SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งจะไม่สามารถผ่านมาตรฐาน Grid code ได้และกังหันลมจะต้องปลดตัวออกจากระบบ ส่วนในกรณีของ FCL แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเหลือประมาณ 0.45 pu และในทำนองเดียวกันกรณีของ SMES-FCL สามารถลดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าเหลือประมาณ 0.7 pu ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงการผ่านมาตรฐาน Grid code นี้ได้ ในภาพที่ 4.11 แสดงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านบัสที่ 1 โดยกรณีของไม่ติดตั้งตัวควบคุมจะเกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงอย่างฉับพลัน และในกรณีของ SMES และ FCL กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะลดลงเหลือประมาณ 5.5 pu แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของ SMES-FCL แล้วกระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดเหลือประมาณ 2 pu ส่วนในภาพที่ 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 และในภาพที่ 4.14 พลังงานจลน์สะสมในโรเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ 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 ในการทำสถิติภาพทั้งการแก้ปัญหาการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการแก้ปัญหของการเกิดความผิดปกติในระบบดังตารางที่ 4.3 เห็นได้ว่า MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES-FCL จะใช้พลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นน้อยกว่า SMES ทั้งที่ขดลวดของ SMES-FCL มีขนาดเล็กกว่า SMES



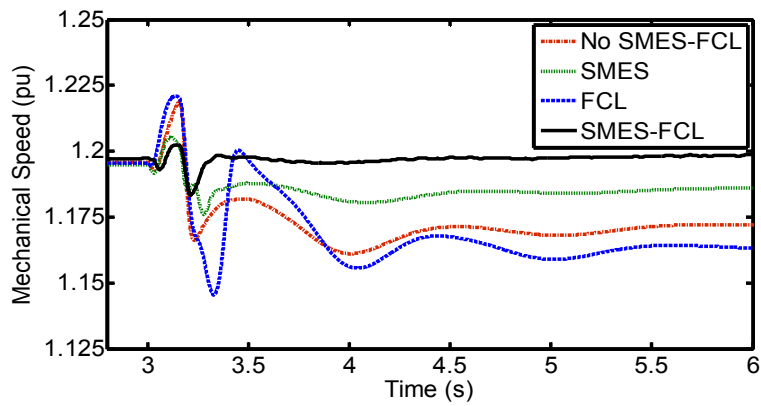
ภาพที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1



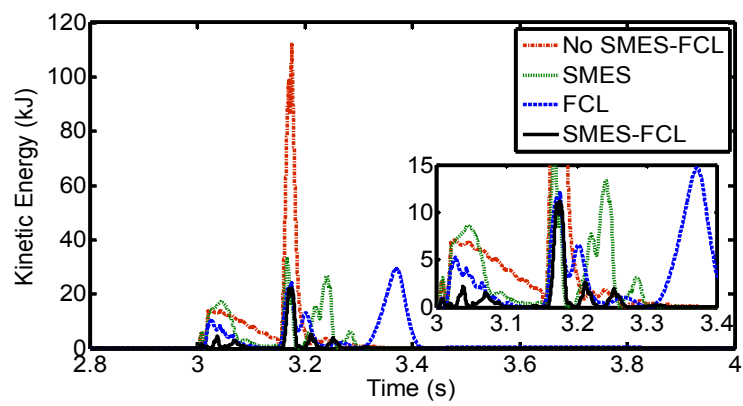
ภาพที่ 4.11 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1



ภาพที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1



ภาพที่ 4.13 ความเร็วโรเตอร์



ภาพที่ 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

4.5 สรุปผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุดในระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่ออยู่ เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG โดยการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ ขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพลังงานสะสมเริ่มต้นอย่างเหมาะสมด้วยการใช้วิธีหลักการฟังก์ชันพลังงานเข้ามาร่วมในการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ และจะหาผลคำตอบด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (PSO) ซึ่งกระบวนการออกแบบอย่างเหมาะสมนี้จะนำไปอย่างอัตโนมัติพร้อม ๆ กัน ผลการจำลองจะแสดงให้เห็นถึงการทำให้เสถียรภาพทั้งสภาวะปกติที่เกิดกำลังไฟฟ้าแกว่งและสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ โดย SMES-FCL จะแสดงถึงการใช้ประโยชน์สูงสุดของการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันทั้งส่วนของ SMES และส่วนของ FCL และจะนำ SMES-FCL นี้เปรียบเทียบกับ SMES และ FCL แบบแยกอิสระต่อกัน ผลการจำลองที่ได้จะแสดงได้อย่างชัดเจนว่า SMES-FCL สามารถทำให้เสถียรภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่าตัวเปรียบเทียบ SMES และ FCL ทั้งที่ขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดเล็กกว่าและขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นน้อยกว่า

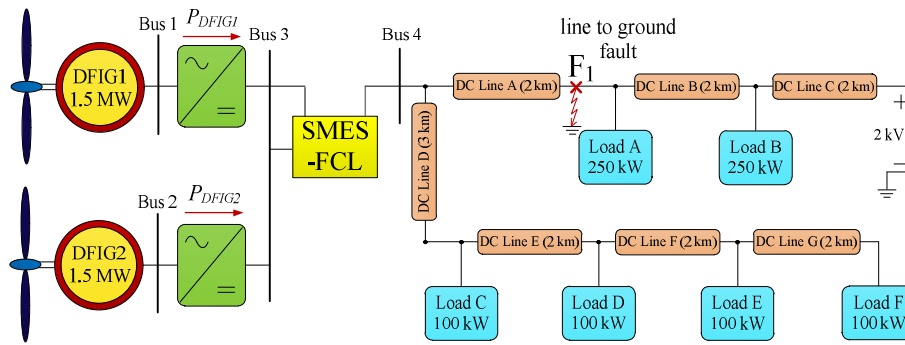
บทที่ 5

การปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของ กำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในระบบดีซีไม โครกริดด้วยอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่เหมาะสมพร้อมด้วยฟังก์ชันการ จำกัดกระแส

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่าน (Low Voltage Ride Through) ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดปกติในระบบดีซีไมโครกริด 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 ในช่วงที่เกิดปัญหาลำดับไฟฟ้าแกว่ง SMES-FCL จะทำหน้าที่คล้ายกับ SMES คือมีหน้าที่สะสมพลังงานทั้งรับและคายกำลังไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติอย่างฉับพลันในระบบดีซีไมโครกริด SMES-FCL จะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสด้วยการต่อวงจรไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) เข้าระบบไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติซึ่งจะเป็นการแก้ปัญหาลดลงของแรงดันไฟฟ้าในระบบ และในขั้นนี้ยังเพิ่มเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ที่เหมาะสมสำหรับระบบไมโครกริดอีกด้วย โดยใช้หลักการวิธีฟังก์ชันพลังงานเพื่อใช้ออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวด SC และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่า SMES-FCL จะมีประสิทธิผลเหนือกว่า SMES แบบดั้งเดิมในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่ออยู่ในระบบดีซีไมโครกริด

5.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด

ระบบกำลังไฟฟ้าดีซีไมโครกริดที่ใช้ศึกษามีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 5.1 ประกอบไปด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ขนาด 1.5 MW จำนวน 2 ชุด คือกังหันลม DFIG1 และกังหันลม DFIG2 มีพารามิเตอร์ตาม [22] อุปกรณ์สะสม



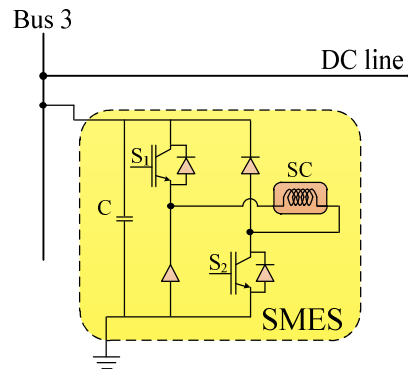
ภาพที่ 5.1 ระบบดิสไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา

พลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟลด์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) สายส่งดิส (DC Line) และโหลด (Load A, Load B, ..., Load F) ในระบบกำลังไฟฟ้านี้จะใช้ศึกษาในสภาวะการทำงานปกติ (Normal State) และสภาวะเกิดความผิดปกติ (Fault State) ขึ้น เมื่อกั้นล้ม DFIG ทั้ง 2 ชุด ผลิตกำลังไฟฟ้า P_{DFIG1} และ P_{DFIG2} ตามภาพที่ 5.1 ในสภาวะปกติจะเกิดปัญหาลำดับไฟฟ้าแกว่งเนื่องมาจากความเร็วลมไม่คงที่ส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพและนำไปสู่ระบบกำลังไฟฟ้าล้มเหลวได้ และเมื่อจำลองการเกิดความผิดปกติที่สายส่งดิสลงกราวด์ (Line to ground fault) ที่จุด F_1 จะส่งผลกระทบต่อให้เกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าลดลงที่บัส 1 และบัส 2 เป็นผลให้กั้นล้ม DFIG ทั้งสองต้องปลดตัวเองออกจากระบบเป็นไปตามมาตรฐาน Grid Code ของ AWEA [12] ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาทั้งสองตามที่กล่าวมาจึงติดตั้ง SMES-FCL ระหว่างบัสที่ 3 กับกั้นล้มทั้งสองชุด โดยระบบกำลังไฟฟ้าดิสไมโครกริดนี้จะใช้พารามิเตอร์ระบบตามตารางที่ 5.1

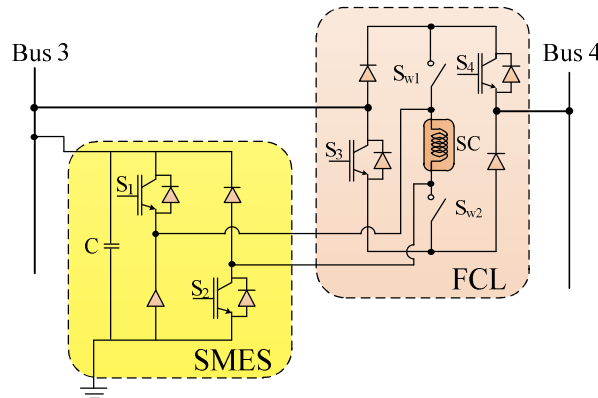
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดกำลังไฟฟ้า	1.5 MW
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	0.69 kV
ความถี่ทางไฟฟ้าของกั้นล้ม DFIG	50 Hz
จำนวน pole	2
ค่าความต้านทานของสเตเตอร์และโรเตอร์	0.003, 0.003 pu
ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์และโรเตอร์	0.11, 0.07 pu
ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก	2.5 pu
ค่าคงที่ความเฉื่อย	0.685 s
ค่าความต้านทานของสายส่ง	0.015 Ω/m

5.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL



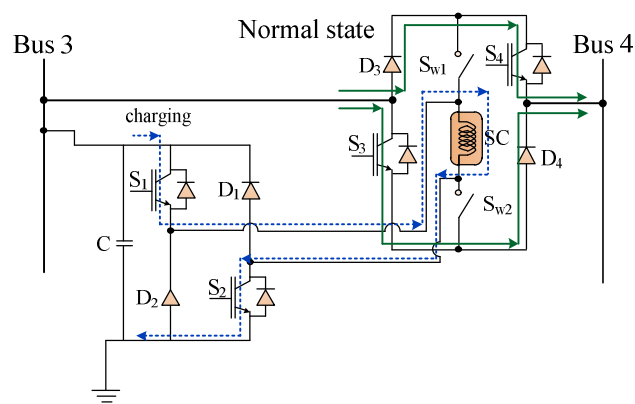
ภาพที่ 5.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES



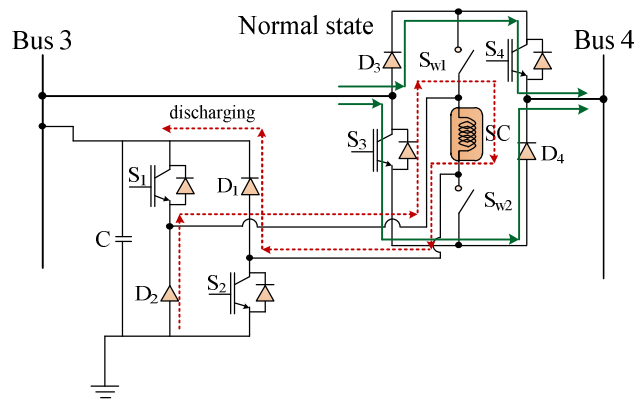
ภาพที่ 5.3 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL

ตามภาพที่ 5.2 เป็นโครงสร้างของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ในระบบดีซีไมโครกริดซึ่งต่ออยู่กับบัสที่ 3 โดย SMES นี้มีหน้าที่หลักคือสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งตามโครงสร้างของ SMES นี้จะถูกนำไปประยุกต์วงจรไฟฟ้าใหม่โดยเพิ่มเติมส่วนของโครงสร้างอุปกรณ์จำกัดกระแส (Fault Current Limiting: FCL) ร่วมเข้ามาเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟลัดด์หรือ SMES-FCL ซึ่งสามารถแสดงวงจรไฟฟ้านี้ได้ดังภาพที่ 5.3 โดย SMES-FCL นี้ต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 4 (เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 5.1) โดยส่วนประกอบของโครงสร้างยังคงแบ่งเป็น SMES และ FCL ซึ่งจะทำงานแยกอิสระต่อกันแต่ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) ยังคงใช้ร่วมกันอยู่ โดยการทำงานของ SMES-FCL จะถูกแบ่งเป็น 2 สถานะคือ สถานะปกติและสถานะเกิดความผิดปกติ

ในสภาวะปกติ SMES-FCL จะทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกังหันลม DFIG ด้วยการทำงานในส่วนของ SMES จากการควบคุมสวิตช์ S_1 และ S_2 ของคอนเวอร์เตอร์จึงสามารถควบคุมการชาร์จและดิสชาร์จกระแสไฟฟ้าได้ และในส่วนของ FCL จะทำงานก็ต่อเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบหรืออยู่ในสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นเอง ซึ่งสวิตช์ S_3 และ S_4 จะหยุดทำงานแต่สวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} จะทำงานแทน การทำงานคู่กันของสวิตช์ S_3 กับ S_4 และสวิตช์ S_{w1} กับ S_{w2} นี้จะเป็นการทำงานเพื่อต่อวงจรไฟฟ้าให้เป็นวงจรบริดจ์ให้สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้กระแสฟลักต์ถูกจำกัดกระแสด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด หลักการทำงานดังกล่าวสามารถนำมาอธิบายเป็นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้



(ก) โหมดชาร์จกระแสไฟฟ้า

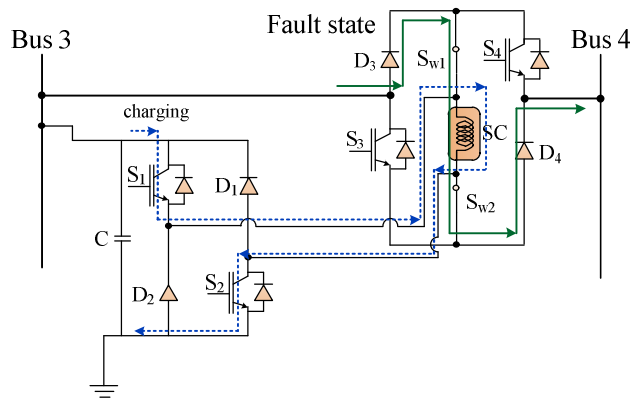


(ข) โหมดดิสชาร์จกระแสไฟฟ้า

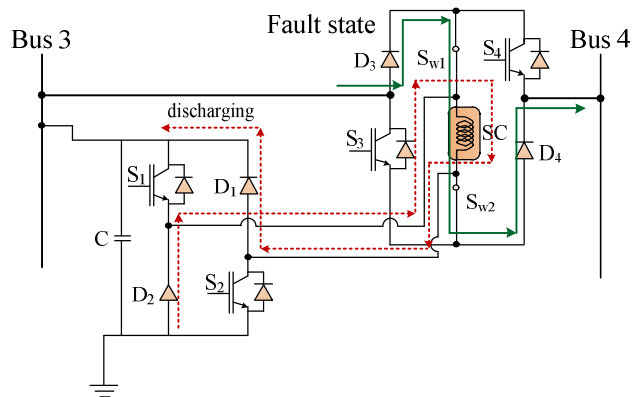
ภาพที่ 5.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติ

เมื่อพิจารณาสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่งขึ้นในระบบตามภาพที่ 5.4 (ก) และ (ข) จะแสดงให้เห็นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน โดยในโหมดของการชาร์จกระแสตาม

ภาพที่ 5.4 (ก) สวิตช์ S_1 และ S_2 จะทำงานเพื่อชาร์จพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวด ส่วนสวิตช์ S_{w1} กับ S_{w2} จะหยุดทำงานหรือเปิดวงจรเพื่อไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด แต่สวิตช์ S_3 กับ S_4 และไดโอด D_3 และ D_4 จะทำงานตามปกติเพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลจากบัสที่ 3 ไปบัสที่ 4 ได้ ดังนั้น โหมดชาร์จพลังงานไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านสวิตช์จากสวิตช์ S_1 ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวดและไหลผ่านสวิตช์ S_2 และเมื่ออยู่ในโหมดดิสชาร์จกระแสไฟฟ้าตามภาพที่ 5.4 (ข) สวิตช์ S_1 และ S_2 จะหยุดทำงานแต่ไดโอด D_1 และ D_2 จะทำงานแทนเพื่อให้สามารถดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวดได้ ส่วนสวิตช์ S_3 กับ S_4 และไดโอด D_3 และ D_4 ยังคงทำงานเช่นเดิมเหมือนในโหมดชาร์จพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น โหมดดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจากไดโอด D_2 ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวดและไหลผ่านไดโอด D_1 ซึ่งหลักการทำงานในสภาวะปกตินี้จะสามารถควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าให้ลดลงได้



(ก) โหมดชาร์จกระแสไฟฟ้า



(ข) โหมดดิสชาร์จกระแสไฟฟ้า

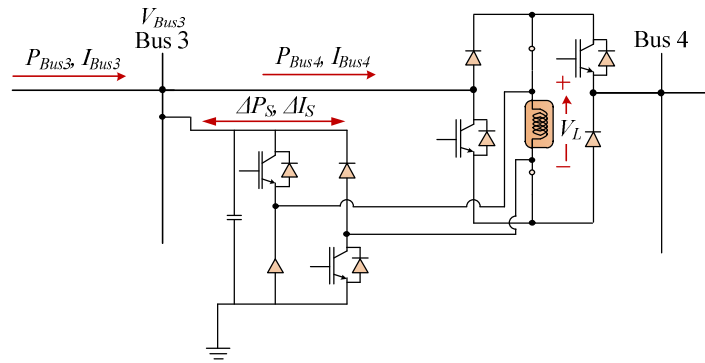
ภาพที่ 5.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะเกิดความผิดปกติ

เมื่อพิจารณาสถานะเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าตามภาพที่ 5.5 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 กับไดโอด D_1 และ D_2 ยังคงทำงานเช่นเดิมและการไหลของกระแสไฟฟ้าทั้งซาร์จและดิสชาร์จยังคงเหมือนสภาวะปกติ เพียงแต่ว่าสวิตช์ 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 ซึ่งเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันหรือเกิดกระแสฟลัดไไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเปรียบเสมือนสร้างอิมพีแดนซ์ที่ตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดขึ้น [33] สามารถสรุปหลักการทำงานของสวิตช์และไดโอดได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การทำงานของสวิตช์ของดีซีช้อปเปอร์ใน SMES-FCL

สวิตช์	สภาวะปกติ		สภาวะเกิดความผิดปกติ	
	โหมคซาร์จ	โหมค ดิสชาร์จ	โหมคซาร์จ	โหมค ดิสชาร์จ
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

จากการอธิบายวงจรไฟฟ้าและหลักการทำงานของ SMES-FCL ตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะสามารถอธิบายถึงการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการจำกัดกระแสไฟฟ้าเป็นสมการได้ดังนี้



ภาพที่ 5.6 หลักการทำงานของ SMES-FCL

จากภาพที่ 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

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

โดยกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า V_{Bus3} และกระแสไฟฟ้า I_{Bus3} ที่ถูกส่งมา ดังนั้น ถ้าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดีซีนี้ให้คงที่ได้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในดีซีไมโครกริดนี้จะไม่เกิดขึ้น แต่แรงดันไฟฟ้าจะเป็นค่า ๆ หนึ่งที่ยอมรับให้มีค่าอยู่ในช่วง ๆ หนึ่งเท่านั้นหรือเป็นค่าที่ถูกกำหนดในการส่งกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ซึ่งจากสมการที่ (5.1) การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะสามารถทำได้เพียงควบคุมกระแสไฟฟ้า I_{Bus3} ที่ส่งผ่านมเท่านั้น 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 นี้ จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 (P_{Bus4}) ให้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้านี้ได้ ดังนั้น คอนเวอร์เตอร์ของ SMES-FCL จะทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าในสายส่งดีซีด้วยการควบคุมกระแส ΔI_S และจากภาพที่ 5.6 การจำกัดกระแสฟอลต์ด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดในดีซีไมโครกริดนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยสมการการหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดจากสมการ [33]

$$Z_L = V_L / I_L \quad (5.5)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดหาได้จากสมการ

$$V_L = L_{SC} dI_L / dt \quad (5.6)$$

เมื่อกำหนดให้

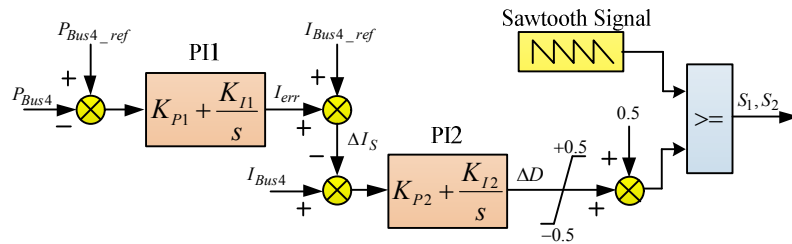
- Z_L คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด
- V_L คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด
- I_L คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด
- L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

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

อิมพีแดนซ์เข้าไปยังในระบบดีซีไมโครกริดอย่างทันทีทันใด ซึ่งทำให้สามารถลดกระแสฟอลต์ที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันได้อย่างรวดเร็ว

5.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด

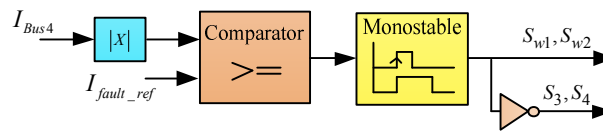
5.3.1 การออกแบบตัวควบคุม



ภาพที่ 5.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES

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

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} จะได้ค่าผลเปรียบเทียบนี้เป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ PI2 และเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ PI2 จะเป็นค่าเบี่ยงเบนคิวดิไซเคล (ΔD) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าคิวดิไซเคล และเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจึงได้สัญญาณควบคุมสวิตช์ IGBT ของสวิตช์ S_1 และ S_2 เนื่องจากการใช้ตัวควบคุมพีไอ PI1 และ PI2 นี้ค่า K_{P1} , K_{P2} , K_{I1} และ K_{I2} ซึ่งเป็นค่าคงที่ของตัวควบคุมพีไอจะต้องได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์นี้อย่างเหมาะสมด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมซึ่งจะกล่าวในภายหลัง



ภาพที่ 5.8 โครงสร้างของตัวควบคุม FCL

ในสภาวะเกิดความผิดปกติต้องการตัวชี้วัดสำหรับการสั่ง 스위ช S_{w1} กับ S_{w2} และ S_3 กับ S_4 เพื่อให้ต่อวงจรบริดจ์ได้สมบูรณ์ จึงต้องเลือกสัญญาณที่สามารถบ่งบอกได้ว่าเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบได้ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และอื่น ๆ ซึ่งในที่นี้ได้ทำการเลือกกระแสไฟฟ้าเนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญและเป็นความต้องการที่อยากจะให้กระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นลดลง ตามภาพที่ 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 เอาท์พุทของบล็อก Comparator จะส่งสัญญาณลอจิก 1 ให้กับบล็อกโมโนสเตเบิล (Monostable) ซึ่งบล็อกโมโนสเตเบิลจะทำหน้าที่ดีเลย์สัญญาณเพื่อป้องกันการเกิดความผิดปกติซ้ำซ้อนในระยะเวลาใกล้เคียงกันและเอาท์พุทที่ได้จะเป็นสัญญาณควบคุมสวิทช์ IGBT S_{w1} กับ S_{w2} และ S_3 กับ S_4

5.3.1 เทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุด

ในบทนี้ได้เพิ่มเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุดในระบบไมโครกริดด้วยการออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวด SC และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิโอยเหมาะสม เพื่อควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการจำกัดกระแสฟลัดด์ที่เกิดขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ การใช้ฟังก์ชันพลังงานในการออกแบบ การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และการหาค่าพลังงานสะสมเริ่มต้นที่น้อยที่สุดที่ใช้ทำเสถียรภาพและสามารถอธิบายวัตถุประสงค์ของการออกแบบเป็นฟังก์ชันสมการได้ดังนี้

หลักการฟังก์ชันพลังงานจะถูกใช้เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ให้เหมาะสมในสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ [37] เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบจะส่งผลให้พลังงานจลน์ที่สะสมในโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG เพิ่มขึ้นอย่างสูง และในเวลาเดียวกันกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสกังหันลม DFIG จะลดลงทันทีทันใด ส่งผลให้กังหันลม DFIG ไม่สามารถข้ามผ่านความผิดปกตินี้ได้ เพื่อที่จะทำให้งังหันลมข้ามผ่านความผิดปกตินี้ ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะแทรกเข้ามาในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งกระแสฟลัดด์และการสะสมพลังงานจลน์ในโรเตอร์ 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

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

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 มีค่าเป็นบวกหมายถึงการสะสมพลังงานและทางตรงกันข้ามถ้ามีค่าเป็นลบหมายถึงการคายพลังงาน ดังนั้น เมื่อ dV/dt มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าพลังงานทั้งหมดมีค่าลดลงหรือพลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะถูกคายพลังงานออกไป 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
P_{mi}	คือกำลังทางกลของกังหันลม DFIG ตัวที่ i
P_{ei}	คือกำลังทางไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ตัวที่ i

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

$$\partial V_K / \partial \omega_i = M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t)) \quad (5.12)$$

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

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

เนื่องจากในสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาสั้น 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 มีค่าเป็นลบมากขึ้นจะแสดงให้เห็นถึงการคายพลังงานจลน์ที่สะสมในโรเตอร์ออกมาได้ไวขึ้นและยังคายพลังงานจลน์ออกมาได้ไวขึ้นระบบก็จะเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

หลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ กังหันลม DFIG จะเข้าสู่สภาวะปกติและส่วนของ SMES จะกลับมาทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเช่นเดิม โดยต้องการให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าลดลงน้อยที่สุด โดยใช้วิธีหาค่าที่น้อยที่สุดของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

โดยที่

t_0 คือเวลาเริ่มต้นจำลองระบบ
 t_s คือเวลาสิ้นสุดจำลองระบบ

และอีกวัตถุประสงค์ของการออกแบบคือการหาค่าพลังงานสะสมเริ่มต้นที่น้อยที่สุดที่ใช้ทำเสถียรภาพ ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดและกระแสเริ่มต้น โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ค่าที่น้อยที่สุดของ } E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \quad (5.17)$$

โดยที่

E_{SC0} คือพลังงานสะสมเริ่มต้น
 L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำ
 I_{SC0} คือกระแสเริ่มต้น

จากสมการที่ (5.15)-(5.17) สามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันสมการวัตถุประสงค์รวมกันได้ดังนี้

$$\text{ค่าที่น้อยที่สุดของ } J = 1/V_C + \int_{t_0}^{t_s} |\Delta P_{Bus4}(t)| dt + E_{SC0} \quad (5.18)$$

สำหรับการหาคำตอบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (5.18) นี้จะใช้วิธี (Particle Swarm Optimization: PSO) [23] เพื่อที่จะปรับค่า L_{SC} , I_{SC0} , K_{P1} , K_{P2} , K_{I1} และ K_{I2} ให้มีความเหมาะสมโดยอัตโนมัติพร้อมกัน และกระบวนการค้นหาคำตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง 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

ส่วนพารามิเตอร์ของกระบวนการวิธี PSO กำหนดดังนี้

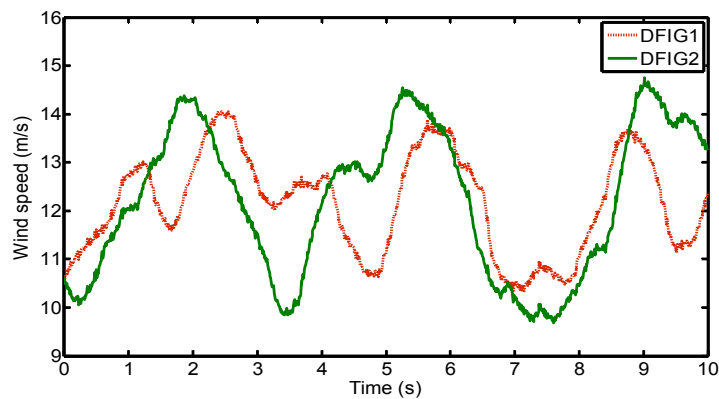
จำนวนอนุภาค 50 ตัว

จำนวนรอบของการค้นหา 100 รอบ

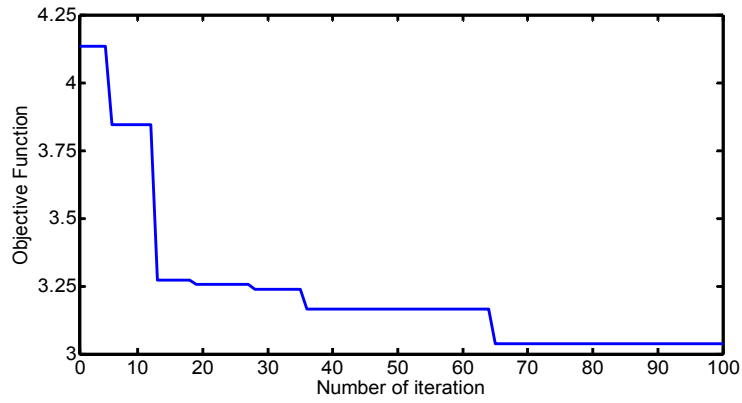
ในการศึกษาครั้งนี้ SMES-FCL ที่นำเสนอจะทำการเปรียบเทียบกับ SMES และระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุม (No controller)

5.4 ผลการจำลองและทดสอบ

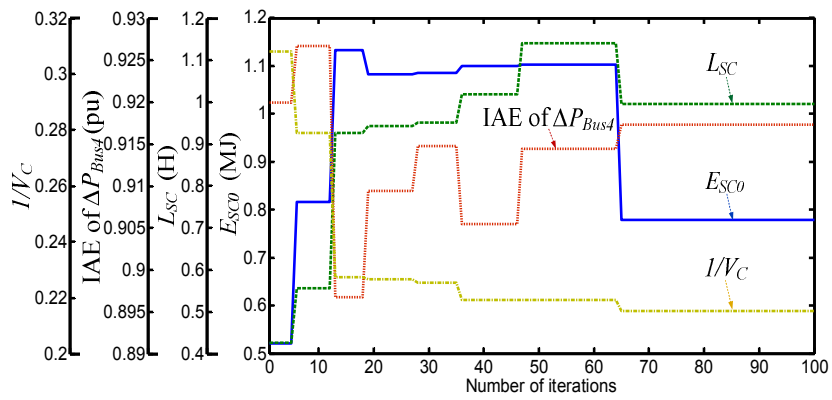
ในการหาค่าความเหนี่ยวนำ กระแสเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิโอะที่เหมาะสมของ SMES-FCL จะใช้โปรแกรม Matlab/SimPowerSystem [31] ในการจำลองระบบดังภาพที่ 5.1 ภายใต้อัตราเร็วลมดังภาพที่ 5.9 และจำลองการเกิดความผิดปกติที่สายส่งดีชีลกราวนที่จุด F_1 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 4 s ผลลัพธ์การค้นหาคำตอบของสมการที่ (5.18) สามารถแสดงการลู่เข้าหาคำตอบของค่าน้อยที่สุดแสดงได้ดังภาพที่ 5.10 และแสดงผลคำตอบแต่ละเทอมได้ดังภาพที่ 5.11 และผลคำตอบของพารามิเตอร์ SMES-FCL ที่ค้นหาแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งพารามิเตอร์นี้จะใช้เปรียบเทียบกับ SMES ที่ใช้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ของกำลังไฟฟ้าตามสมการที่ (5.16) ในการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิโอะของ SMES เพียงแต่นำขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES จะถูกกำหนดให้มีค่าใหญ่กว่าและพลังงานสะสมเริ่มต้นที่มากกว่า SMES-FCL



ภาพที่ 5.9 ความเร็วลม



ภาพที่ 5.10 การหาค่าคำตอบของสมการวัตถุประสงค์



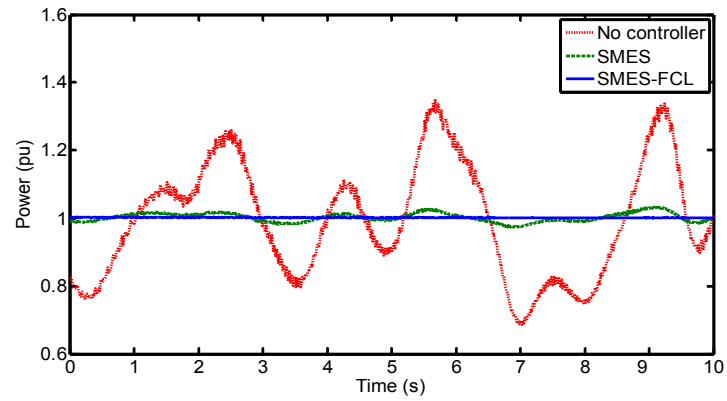
ภาพที่ 5.11 การหาค่าคำตอบของ $1/V_C$, $IAE \Delta P_{Bus4}$, L_{SC} และ E_{SC0}

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL

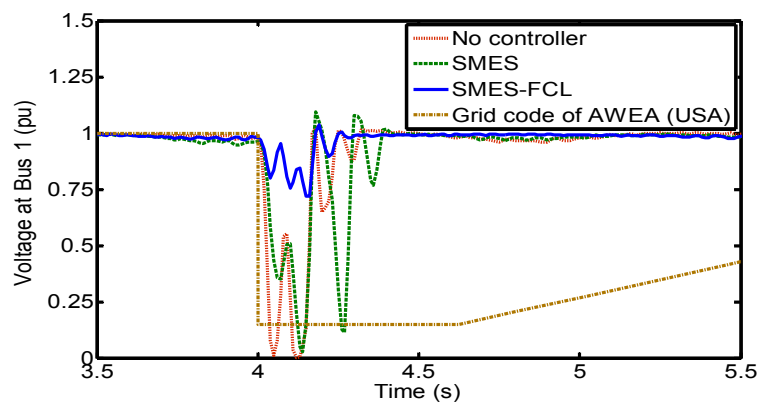
พารามิเตอร์	SMES	SMES-FCL
L_{SC} (H)	2.5	0.99
I_{SC0} (kA)	1.2	1.25
E_{SC0} (MJ)	1.8	0.77
K_{P1}, K_{I1}	9.74, 0.16	12.11, 5.65
K_{P2}, K_{I2}	15.11, 6.21	19.01, 3.22

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

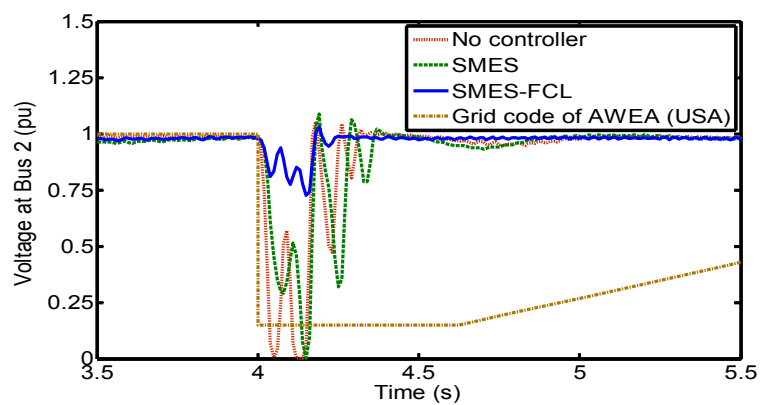
เมื่อเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติหรือสภาวะการแกว่งในระบบจะสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังภาพที่ 5.13 – 5.21 โดยแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และ 2 จะเป็นแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลม DFIG1 และ DFIG2 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 5.13 และ 5.14 จะเห็นได้ว่าทั้งกรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงต่ำสุดประมาณ 0 pu ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกริดโค้ด AWEA (USA) ที่ต้องมีแรงดันไฟฟ้าลดลงไม่ต่ำกว่า 0.15 pu เป็นเวลา 625 ms [12] ส่งผลให้กังหันลมต้องปลดตัวเองออกจากระบบแต่เมื่อติดตั้ง SMES-FCL จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำสุดประมาณ 0.75 pu และเมื่อแสดงเป็นกราฟแผนภูมิแท่งของการลดลงของแรงดันไฟฟ้าแต่ละบัสตามภาพที่ 5.15 แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าปกติจะแสดงถึงการไม่ผ่านมาตรฐานกริดโค้ดจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าทั้งกรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเกินมาตรฐานกริดโค้ดแต่ในกรณี SMES-FCL จะผ่านมาตรฐานกริดโค้ด ในภาพที่ 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 ในภาพที่ 5.18 และ 5.19 จะแสดงให้เห็นถึงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูงในช่วงเกิดฟอลต์เมื่อไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ SMES เมื่อทำการติดตั้ง SMES-FCL จะลดการแกว่งนี้ได้และเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็ว เมื่อแสดงผลการจำลองของความเร็วโรเตอร์ในภาพที่ 5.20 และ 5.21 เห็นได้อย่างชัดเจนว่า SMES-FCL จะลดการแกว่งของความเร็วในโรเตอร์ได้ดีกว่ากรณีอื่น ๆ และสามารถแสดงค่าของพลังงานที่จำเป็นใน SMES-FCL กับ SMES ในการทำเสถียรภาพทั้งการแก้ปัญหาการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการแก้ปัญหาของการเกิดความผิดปกติในระบบดังตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ทั้ง MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES-FCL จะใช้พลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นน้อยกว่า SMES ทั้งที่ขนาดของ SMES-FCL มีขนาดเล็กกว่า SMES



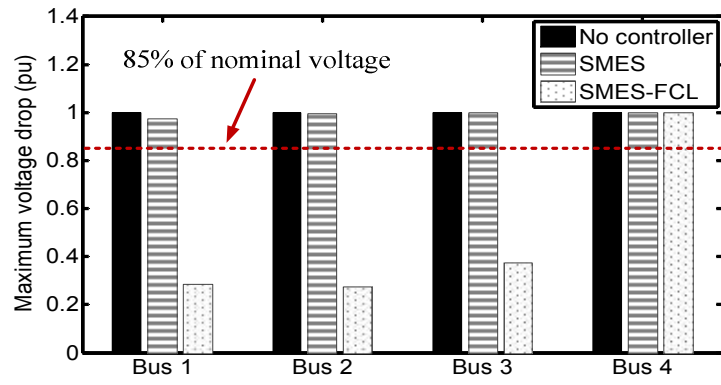
ภาพที่ 5.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4



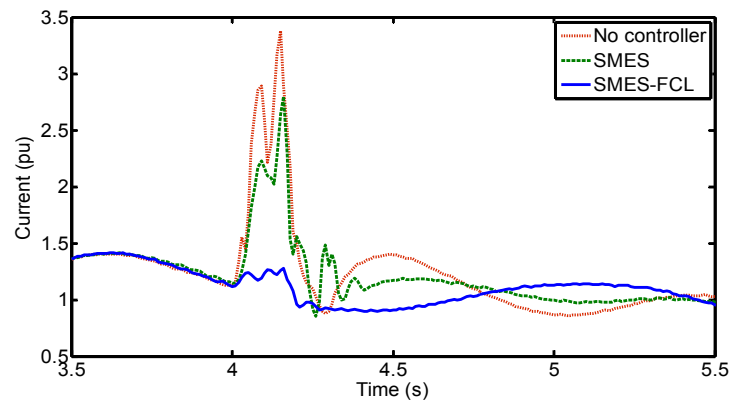
ภาพที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1



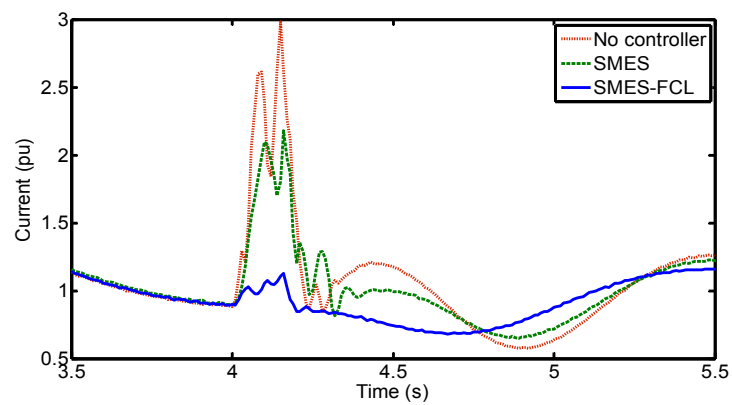
ภาพที่ 5.14 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2



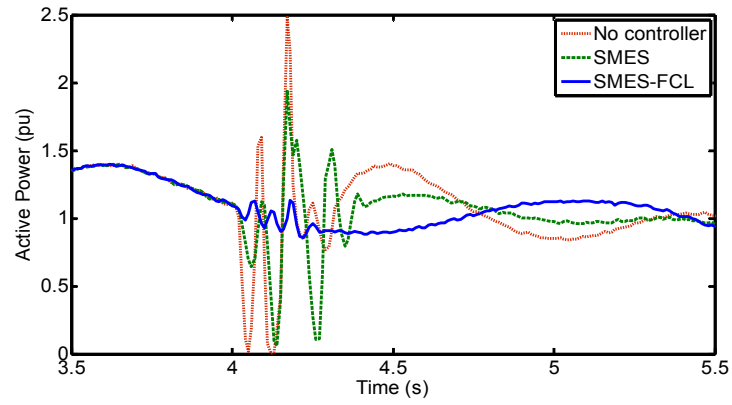
ภาพที่ 5.15 การเปรียบเทียบการลดลงของแรงดันไฟฟ้า



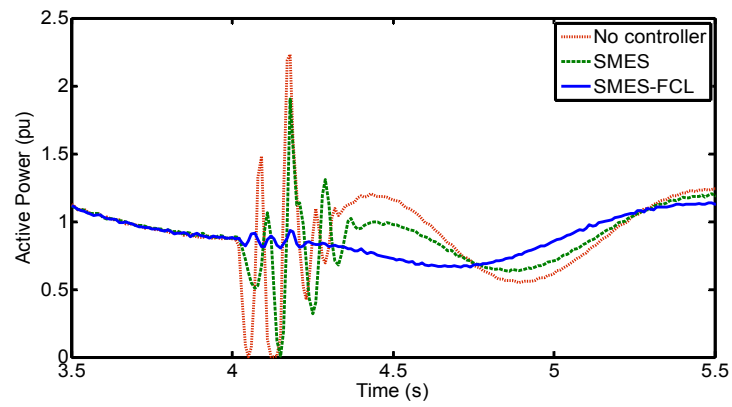
ภาพที่ 5.16 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1



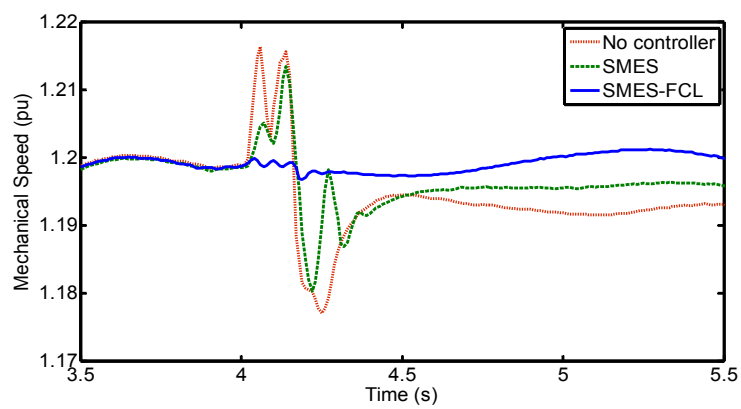
ภาพที่ 5.17 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2



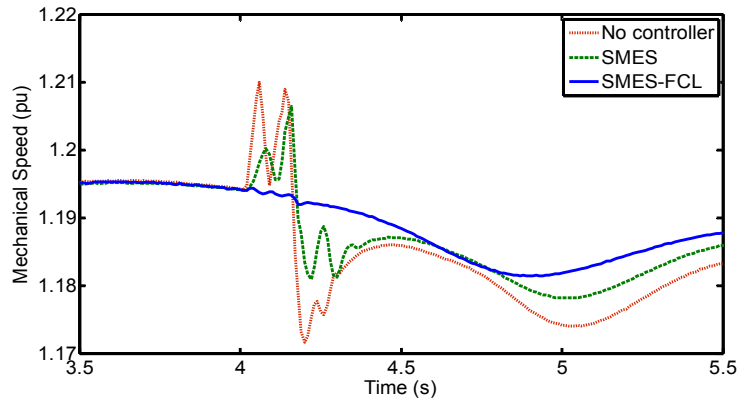
ภาพที่ 5.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1



ภาพที่ 5.19 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2



ภาพที่ 5.20 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG1



ภาพที่ 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 ในระบบดิสชีโมโครกริด ซึ่งมีการพัฒนามาจาก SMES แบบดั้งเดิมเพื่อให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG และยังออกแบบตัวควบคุมพีไอ ขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพลังงานสะสมเริ่มต้นด้วยเทคนิคการทำให้ SMES-FCL เหมาะสมโดยใช้หลักการฟังก์ชันพลังงานเข้ามาช่วยในการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งการออกแบบอย่างเหมาะสมจะเป็นกระบวนการอย่างอัตโนมัติด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (PSO) ผลการจำลองได้แสดงให้เห็นว่าทั้งภายใต้สภาวะปกติที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ SMES-FCL จะสามารถทำเสถียรภาพในระบบดิสชีโมโครกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่า SMES ถึงแม้ว่าขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES-FCL จะมีขนาดเล็กกว่า SMES

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) เพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ที่ต่อร่วมอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดทั้งติดตั้งในกังหันลม DFIG และออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสทั้งในระบบไฟฟ้ากระแสสลับและระบบดิสชีโมโครกริต และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิโอย่างเหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) ทำให้การออกแบบเป็นไปอย่างเหมาะสม ผลการทดสอบสามารถสรุปงานวิจัยออกมาได้ดังต่อไปนี้

- สามารถออกแบบวงจรตัวควบคุมฟิโอย่เพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- สามารถประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งในกังหันลม DFIG และเพิ่มความสามารถข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ได้
- สามารถประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสฟลด์สำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG
- สามารถประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบดิสชีโมโครกริต
- ทำการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ฟิโอย่ได้อย่างเหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

1. ควรนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานทดแทนชนิดอื่น ๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) พลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen) และพลังงานน้ำ

(Hydroelectric Energy) เป็นต้น เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับแหล่งพลังงานอื่น ๆ ก่อนจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบ

2. งานวิจัยนี้ได้ออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในรูปของโดเมนเวลา ทำให้ใช้ระยะเวลานานในการออกแบบ ดังนั้น หากพิจารณาระบบให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่อาจช่วยลดระยะเวลาในการออกแบบให้เร็วขึ้นได้

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

บทที่ 7
ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

บทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

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 Trans. Sustain. Energy, vol. 6, no. 1, pp. 28-42, Oct. 2015. (Impact Factor 2014 = 3.656)
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 Trans. Appl. Supercond., vol. 24, no. 5, Article#: 5700805, Oct. 2014. (Impact Factor 2014 = 1.235)
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 Trans. Appl. Supercond., vol. 24, no. 5, Article#: 5400304, Oct. 2014. (Impact Factor 2014 = 1.235)

บทความการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. 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.
2. 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
3. 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.

บทความการประชุมวิชาการระดับชาติ

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.

บรรณานุกรม

- [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] G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, **Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation**, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [4] H.T. Jadhav and R. Roy, "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] J. Lin, Y. Sun, Y. Song, W. Gao, and P. Soensen, "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] H. Pingping, D. Ming, and L. Binbin, "Study on Transient Stability of Grid-connected Large Scale Wind Power System", **2nd IEEE International Symposium on PEDG**, pp. 621-625, Jun. 2010.
- [7] K. Changling, H. Banakar, B. Shen, and O. Boon-Teck, "Strategies to smooth wind power fluctuations of wind turbine generator," **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 22, no. 2, pp. 341-349, Jun. 2007.
- [8] Y. Zou, M.E. Elbuluk, and Y. Sozer, "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] J. Lopez, P. Sanchis, X. Roboam, and L. Marroyo, "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] D. Xiang, L. Ran, P. Tavner, and S. Yang, "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] Yu Ling and Xu Cai, "Rotor current dynamics of doubly fed induction generators during grid voltage dip and rise," **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, vol. 44, pp.17-24, Jan. 2013.
- [12] J. Schlabbach, "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] M.H. Ali, M. Park, I. Yu, and T. Murata, "Improvement of wind-generator stability by fuzzy-logic-controlled SMES," **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 49, no. 3, pp. 1119-1128, May-June 2013.
- [14] S-T. Kim, B-K. Kang, S-H. Bae, and J-W. Park, "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] T. Kinjo, T. Senjyu, N. Urasaki, and H. Fujita, "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] M.E. Elshiekh, D.A. Mansour, and A.M. Azmy, "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] Z. Wang, G. Zhang, and M. Qiu, "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] G. Zhu, Z. Wang, X. Liu, G. Zhang, and X. Jiang, "Transient behavior research on the combined equipment of SMES-SFCL," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 14, no. 2, pp. 778-781, Jun. 2004.

- [19] G. Zhu, Z. Wang, and G. Zhang, "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] C. Zhao, Z. Wang, D. Zhang, X. Du, W. Guo, L. Xiao, and L. Lin, "Development and test of a superconducting fault current limiter-magnetic energy storage system," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 17, no. 2, pp. 2014-2017, Jun. 2007.
- [21] J. Shi, Y. Tang, Y. Xia, L. Ren, and J. Li, "SMES based system for doubly-fed induction generator in wind power application," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 21, no. 3, pp. 1105-1108, Jun. 2011.
- [22] 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 Convers.**, vol. 27, no. 2, pp. 277-295, Jun. 2012.
- [23] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in **Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks**, 1995, vol. 1, pp. 1942-1948.
- [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] G. Pannell, D.J. Atkinson, and B. Zahawi, "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] S. Semen, J. Niiranen, S. Kanerva, A. Arkkio, and J. Saitz, "Performance study of a doubly fed wind-power induction generator under network disturbance," **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 21, no. 4, pp. 883-890, Dec. 2006.
- [27] A.H.M.A. Rahim, and E.P. Nowicki, "Supercapacitor energy system for fault-ride through of a DFIG wind generation system," **Energy Convers Manage**, vol. 52, pp. 96-102, Jul. 2012.

- [28] S. Zhang, K.J. Tseng, S.S. Choi, T.D. Nguyen and D.L. Yao, "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] W. Qiao, G.K. Venayagamoorthy and R.G. Harley, "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] C. Wessels, F. Gebhardt and F.W. Fuchs, "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] K. Strunz, E. Abbasi, and D. N. Huu, "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] E. R. Lee 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] M. Rezkallah, A. Chandra, B. Singh, and R.Niwas, "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] M. Molinas, J. A. Suul, and T. Undeland, "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] A.M.S. Yunus, M.A.S. Masoum, and A. Abu-Siada, "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] J. Machowski, J. Bialek, and J. Bumby, **Power System Dynamics: Stability and Control**, 2nd ed., West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2008.

ภาคผนวก

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล อิสระชัย งามหฐตำแหน่งปัจจุบัน ศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
PhD	Electrical Engineering	Osaka University	2543
MEng	Electrical Engineering	Osaka University	2540
BEng	Electrical Engineering	KMITL	2535

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ การควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2548	รางวัลทุนวิจัยมูลนิธิโทเรครั้งที่ ๑๒	มูลนิธิโทเร
2549	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2550	Best paper award, The 8 th International Power Engineering Conference (IPEC 2007)	NTU
2552	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2553	Best paper award in electrical power systems, ECTI-CON 2010, Chiangmai, Thailand.	ECTI Association
2554	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34	EAAAT
2555	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35	EAAAT
2556	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 36	EAAAT

2558	Best paper award in electrical power systems, ECTI-CON 2015, Hua Hin, Thailand.	ECTI Association
------	---	------------------

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2537-2543	ทุนรัฐบาลญี่ปุ่น	รัฐบาลญี่ปุ่น
2544-2546	ทุนวิจัยหลังปริญญาเอก	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2547-2549	ทุนพัฒนานักวิจัย (เมธีวิจัย สกว.)	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550-2553	ทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว.)	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550-2552	ทุนวิจัยโครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรม	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2552-2557	ทุนศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการ	กองทุนวิจัย สจล
2554-2556	ทุนพัฒนานักวิจัย	กองทุนวิจัย สจล
2556-2558	ทุนงบประมาณแผ่นดิน	วช.
2557-2560	ทุนวิจัยประยุกต์	กองทุนวิจัย สจล

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่

1. I. Ngamroo and T. Karaipoom, "Cooperative control of SFCL and SMES for enhancing fault ride through capability and smoothing power fluctuation of DFIG wind farm," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, issue 5, October 2014, Article#:5700304. .
2. I. Ngamroo and T. Karaipoom, "Improving low-voltage ride-through performance and alleviating power fluctuation of DFIG wind turbine in DC microgrid by optimal SMES with fault current limiting function," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, issue 5, October 2014, Article#:5700805.
3. J. Pahasa and I. Ngamroo, "Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid," *IEEE Systems Journal*. (In press)

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

ผลงานตีพิมพ์/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

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

อื่นๆ

หนังสือ พลศาสตร์และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Dynamics and Stability) ISBN: 978-616-7367-46-0 วศ.สจล: 244 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 2 เมื่อ 2558, 459 หน้า

Optimal Superconducting Coil Integrated Into DFIG Wind Turbine for Fault Ride Through Capability Enhancement and Output Power Fluctuation Suppression

Tanapon Karaipoom and Issarachai Ngamroo, *Member, IEEE*

Abstract—The vital problems of the grid-connected doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine are the fault ride through (FRT) capability and the output power fluctuation. To tackle these problems, this paper focuses on the optimization of the superconducting coil (SC) integrated into a dc link of the DFIG wind turbine for an enhancement of the FRT capability and a suppression of the output power fluctuation. The dc–dc converter, which is used to control the exchanged energy between the SC and the system, is additionally connected between the grid side converter (GSC) and the rotor side converter. During normal operation, the SC acts as an energy storage device to exchange energy with the system so that the power fluctuation of the DFIG wind turbine can be alleviated. On the other hand, when severe faults occur in the system, the SC is used as the current limiting inductor to suppress both overcurrent in the rotor and stator, and overvoltage in the dc link of the DFIG. In the optimization, the inductance of the SC, the initial necessary stored energy in the SC, and the proportional integral (PI) parameters of the dc–dc converter are tuned simultaneously so that both objectives can be achieved. Simulation study elucidates the control effect of the DFIG wind turbine with the optimal SC.

Index Terms—Doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine, fault current limiter (FCL), fault ride through (FRT) capability, optimization, power fluctuation, static synchronous compensator (STATCOM), superconducting coil (SC).

NOMENCLATURE

Ψ_{ds}	d -axis stator flux linkage.
Ψ_{qs}	q -axis stator flux linkage.
Ψ_s	Stator flux linkage.
ω	Angular speed of the synchronous d – q frame.
ω_r, ω_{ref}	Actual and reference rotor speeds.
ω_s	Synchronous speed of the d – q frame.
ω_{sr}	Angular slip frequency.
ΔD	Deviation of the duty cycle.

ΔI_R

ΔP

ΔP_C^*

ΔV_C^*

ΔV_{dc}

ΔV_{dclink}

C_{dc}

D_{FA}

D_{FL}

E_{SC0}

i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}

i_{a2}, i_{b2}, i_{c2}

i_{Cdc}

i_{d1}, i_{q1}

i_{d1_ref}, i_{q1_ref}

i_{d2}, i_{q2}

i_{d2_ref}, i_{q2_ref}

i_{dcbat}

i_{dgc}

i_{dr}, i_{dr_ref}

i_{ds}, i_{ds_ref}

i_{qgc}

i_{qr}, i_{qr_ref}

i_{qs}, i_{qs_ref}

I_C

Difference between actual and reference values of the grid side converter (GSC) current.

Difference between actual and reference values of the doubly fed induction generator (DFIG) power output.

Power deviation for the compensating dc link by the superconducting coil (SC).

Voltage deviation for the compensating dc link by the SC.

Difference between actual and reference values of the dc-link voltage.

DC-link voltage deviation.

DC capacitor.

Duty cycle for the fault ride through (FRT) enhancement.

Duty cycle for the power smoothing.

Initial stored energy of the SC.

Battery current.

Static synchronous compensator (STATCOM) current.

Capacitor dc current.

d - and q -axis currents between battery and system.

d - and q -axis reference currents between battery and system.

d - and q -axis currents between STATCOM and system.

d - and q -axis reference currents between STATCOM and system.

Battery dc current.

d -axis current of the GSC.

Actual and reference d -axis rotor currents of the DFIG.

Actual and reference d -axis stator currents of the DFIG.

q -axis current of the GSC.

Actual and reference q -axis rotor currents of the DFIG.

Actual and reference q -axis stator currents of the DFIG.

SC current.

Manuscript received November 20, 2013; revised April 01, 2014 and July 14, 2014; accepted September 01, 2014. Date of publication October 01, 2014; date of current version December 12, 2014. This work was supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund under Grant KREF055706. Paper no. TSTE-00490-2013.

The authors are with the School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (e-mail: krpoom@gmail.com; ngamroo@gmail.com).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TSTE.2014.2355423

$I_{\text{fault_ref}}$	Reference fault current.	R_c	Choke resistance.
I_{GSC}	GSC current.	R_r	Rotor resistance.
I_{out}	Actual output current.	R_s	Stator resistance.
I_{RSC}	Rotor side converter current.	S_d	Operating mode switching signal.
I_{SC0}	Initial current of the SC.	S_{FA}	Switching signal for the FRT enhancement.
I_{Stator}	Stator current.		
J	Value of the objective function.	S_{FL}	Switching signal of the controlled switches for smoothing power fluctuation.
J_{best}	Minimum value of objective function at the current iteration.		
J_{old}	Value of the objective function at the previous iteration.	t_0	Initial time of the simulation.
$K_{A-P1}, K_{A-I1},$ $K_{B-P1}, K_{B-I1},$ $K_{C-P1}, K_{C-I1},$ K_{D-P1}, K_{D-I1}	Proportional gains of rotor side converter (RSC) controller.	t_{f1}	Time of the applied fault.
$K_{E-P1}, K_{E-I1},$ $K_{F-P1}, K_{F-I1},$ K_{G-P1}, K_{G-I1}	Proportional gains of GSC controller.	t_{f2}	Time of the fault clearing.
K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}	Proportional gains of the SC controller.	t_{sim}	Final time of the simulation.
K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}	Integral gains of the SC controller.	T_e	Electromagnetic (EM) torque.
$K_{BT-P1}, K_{BT-P2},$ K_{BT-P3}, K_{BT-P4}	Proportional gains of battery.	v_{a1}, v_{b1}, v_{c1}	Battery inverter voltage.
$K_{BT-I1}, K_{BT-I2},$ K_{BT-I3}, K_{BT-I4}	Integral gains of battery.	v_{a2}, v_{b2}, v_{c2}	Battery terminal voltage.
$K_{ST-P1}, K_{ST-P2},$ K_{ST-P3}, K_{ST-P4}	Proportional gains of STATCOM.	v_{a3}, v_{b3}, v_{c3}	Inverter voltage of STATCOM.
$K_{ST-I1}, K_{ST-I2},$ K_{ST-I3}, K_{ST-I4}	Integral gains of STATCOM.	v_{a4}, v_{b4}, v_{c4}	Terminal voltage of STATCOM.
L_b, R_b	Inductance and resistance between battery and system.	$v_{\text{abc_battery}}$	Three phase voltage reference of battery.
L_c	Choke inductance.	$v_{\text{abc_statcom}}$	Three phase voltage reference of STATCOM.
L_i	Isolation transformer magnetizing induction.	v_{d1}, v_{q1}	d - and q -axes of the battery voltage.
L_m	Magnetizing inductance.	v_{d2}	d -axis of the battery terminal voltage.
L_r	Rotor self-inductance.	v_{d3}, v_{q3}	d - and q -axes of the STATCOM voltage.
L_s	Stator self-inductance.	v_{d4}	d -axis of the STATCOM terminal voltage.
L_{SC}	Inductance of the SC.	v_{dcbat}	Voltage across the battery.
$L_{\text{ss}}, R_{\text{ss}}$	Inductance and resistance between STATCOM and system.	v_{dr}, v_{dr_ref}	Actual and reference d -axis rotor voltage of the DFIG.
NI	Iteration number.	v_{dr}^*, v_{qr}^*	d and q axes rotor voltage reference of the rotor side converter.
n	Number of particles in the PSO.	v_{ds}	d -axis stator voltage of the DFIG.
n_p	Number of pole pairs.	v_{ds}^*, v_{qs}^*	d - and q -axis stator voltage reference of the GSC.
P_{bat}	Power output of the battery.	v_{qr}, v_{qr_ref}	Actual and reference q -axis rotor voltage of the DFIG.
$P_{\text{Bus1}}, Q_{\text{Bus1}}$	Active and reactive power at bus 1.	v_{qs}	q -axis stator voltage of the DFIG.
$P_{\text{Bus1_ref}}$	Active power reference of battery at bus 1.	V_C^*	Required voltage compensation by the SC.
$Q_{\text{Bus1_battref}}$	Reactive power references of battery at bus 1.	$V_{\text{dch}}, V_{\text{dch_ref}}$	Actual and reference d -axis choke voltage of the GSC.
P_{dclink}	DC-link power.	V_{dcstat}	DC voltage of STATCOM.
$P_{\text{DFIG}}, P_{\text{DFIG_ref}}$	Actual and reference active power of the DFIG wind turbine.	$V_{\text{dcstat_ref}}$	DC voltage reference of STATCOM.
P_{GSC}	Active power of GSC.	V_{dclink}	DC-link voltage.
P_m	Mechanical power of the DFIG.	$V_{\text{dclink_ref}}$	DC-link voltage reference.
P_{Stator}	Active power of the stator side.	V_{err}	DC voltage error.
Q, Q_{ref}	Actual and reference reactive power.	$V_{\text{gabc_ctrl}}$	Three phase voltage reference of the GSC.
Q_{Bus1}	Reactive power at bus 1.	V_{qch}, V_{qch_ref}	Actual and reference q -axis choke voltages of the GSC.
$Q_{\text{Bus1_statref}}$	Reactive power reference at bus 1 of STATCOM.	$V_{\text{rabc_ctrl}}$	Three phase voltage reference of the rotor side converter.
		V_T	Terminal voltage of the DFIG.
		$V_{\text{fault_Ref}}$	Reference voltage for the fault detection.
		W_1, W_2, W_3, W_4	Weighting factors.

I. INTRODUCTION

NOWADAYS, wind power penetration highly increases in power systems. The total wind power installation was about 280 GW globally by the end of 2012 [1]. Especially, the wind turbine with doubly fed induction generator (DFIG) has been paid attention extensively, because the DFIG has many advantages such as low installation cost, low power rating of converter, and active and reactive power controllability [2]. Nevertheless, the DFIG wind turbine faces two inevitable problems, i.e., the FRT capability and the output power fluctuation [3]. For the FRT problem, because the DFIG wind turbine is very vulnerable to the grid faults, it may not be able to ride through. These faults may result in a large voltage dip at the connection point of the DFIG. Subsequently, the voltage dip will cause the overcurrent in the stator and rotor windings which may be damaged [4]. To protect the DFIG from the grid faults, the disconnection of the DFIG will be performed. As a result, the system stability will be adversely affected. With the high penetration of the grid-connected wind power sources, the FRT capability is significantly required for the DFIG wind turbine to mitigate the system instability. On the other hand, the DFIG wind turbine also suffers from the output power fluctuation problem of during normal operation. This problem negatively influences power quality, stability, and system frequency and voltage [5].

Generally, an enhancement of the FRT capability is the installation of a crowbar circuit across the rotor terminals [6], [7]. When the overcurrent is induced in the rotor winding due to the grid faults, the rotor terminals are short circuited by the crowbar circuit so that the rotor side converter can be isolated. Due to the short circuit by the crowbar, the DFIG is changed to the squirrel cage induction generator, which consumes the reactive power from the grid. To solve this problem, the reactive power sources such as supercapacitor [8], static var compensator [9], and STATCOM [10] are applied to alleviate the large voltage dip of the DFIG terminal so that the DFIG can ride through the faults. In addition, the dynamic voltage restorer [11], which is connected in series with the grid, is used to compensate the line voltage during grid faults so that the FRT capability of the DFIG can be improved. In [12], the superconducting magnetic energy storage (SMES) unit is applied to enhance the FRT capability of wind and photovoltaic generation systems under the instantaneous outage or surge condition. The SMES control effect on the FRT capability is examined when the fault location is far from renewable energy sources. However, when the fault location is adjacent to the SMES unit, the SMES control effect is deteriorated. Consequently, the wind and photovoltaic sources may not be able to ride through the faults. In [13], the resistive type-superconducting fault current limiter (SFCL) is used to reduce the fault current level at the stator side of the DFIG and improve the FRT capability. With increasing the resistance, the further improvement of the FRT capability can be achieved. Nevertheless, the higher the resistive value, the larger power loss will occur. The optimal value of the resistance should be considered.

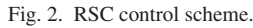
Recently, a superconducting coil (SC) has been installed in the combined SMES and SFCL for limiting fault current and

alleviating power fluctuation [14]–[17]. In these works, the SC in the SMES unit, which is normally installed in parallel with the system bus, is also connected in series with the transmission line via a rectifier. In addition to an energy storage function of the SC during normal operation, when any short circuits occur in the power grid, the SC is automatically connected in series with the transmission line and acts as the fault current limiter. The combined SMES and SFCL are applied to the damping of tie-line power oscillations and the compensation of terminal-bus-voltage fluctuation of the wind turbine generator [18]. In this work, the series and parallel compensation using SMES which is placed at the wind generator terminal bus, is proposed. Besides, in [19], the SMES-based excitation system for the DFIG wind turbine is presented. The SC is installed between the rotor-side converter and the grid-side converter of the DFIG wind turbine via a dc–dc converter. With the high-efficient energy storage and the quick response of the SC, the active power transfer between the rotor side and the grid side can be controlled independently. As a result, the SC can be used to alleviate the output power fluctuation of the DFIG wind turbine. Additionally, various circuits of the DFIG wind turbine incorporated with the SC circuit using current and voltage source topologies have been proposed in [20]. The SC is used to alleviate the output power fluctuation during normal operation of the DFIG. Under the occurrence of the grid faults, the SC is automatically inserted into the stator or rotor circuit and used to limit the stator or rotor overcurrent. This study shows that connecting the SC in series with the stator provides better FRT performance than connecting it in series with the rotor.

Even the DFIG incorporated with the SC circuit presented in [19] and [20] provides the satisfactory control effect, the setting method of system parameters such as the inductance of the SC, the initial stored energy of the SC, and the proportional integral (PI) parameters of converters has not been clearly mentioned. Without appropriate parameters setting, the FRT capability enhancement and the power fluctuation suppression of the DFIG with the SC circuit may not be achieved.

This paper proposes the parameters optimization technique of an SC integrated into the dc link of the DFIG wind turbine for the FRT capability improvement and the output power fluctuation alleviation. During normal operation, the SC, which acts as an energy storage device, is employed to smoothen the output power fluctuation of the DFIG wind turbine. When severe faults occur in the power grid, the SC is used as a fault current limiter to suppress the overcurrent in the stator and rotor circuits and the overvoltage in the dc link. In the optimization, the inductance of the SC, the initial stored energy in the SC, and the PI parameters of dc–dc converter are tuned simultaneously so that both the FRT capability and the suppression of output power fluctuation can be achieved. The optimization problem is solved automatically by a particle swarm optimization (PSO). Simulation study by MATLAB/SimPowerSystems shows that the optimal SC integrated into the DFIG wind turbine provides superior effect on both objectives than nonoptimal SC, battery, and STATCOM.

This paper is organized as follows. First, the DFIG wind turbine with the SC and controllers is described in Section II.



signal of the comparator, which is the switching signal S_d , is obtained from the fault current detection.

II. DFIG WIND TURBINE WITH SC AND CONTROLLERS

A. DFIG Wind Turbine With the SC Circuit

B. DC–DC Converter Controllers

Fig. 4 shows the SC controller for the dc–dc converter, which consists of PI1 and PI2, for smoothing output power fluctuation of the DFIG wind turbine. The input signal of PI1 is the difference between the actual power output of the DFIG and the reference power output of the DFIG. The output signal of PI1 is the change in the dc-link voltage signal, which is proportional to the change in the DFIG power output. Subsequently, adding the output signal of PI1 to the reference dc-link voltage and

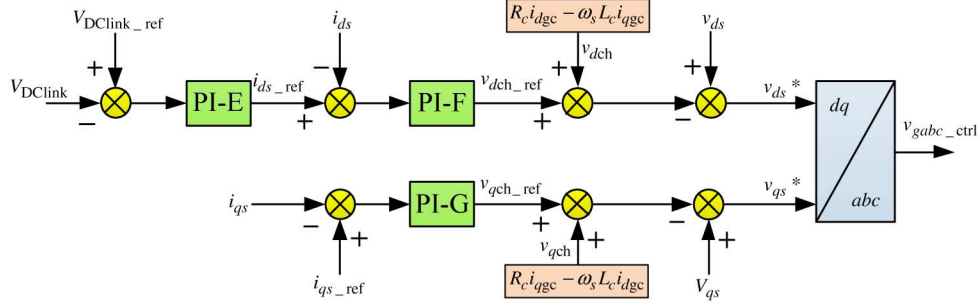


Fig. 3. GSC control scheme.

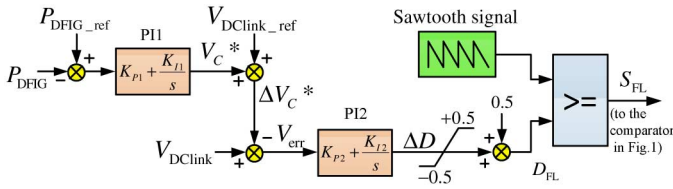


Fig. 4. SC controller for smoothing power fluctuation.

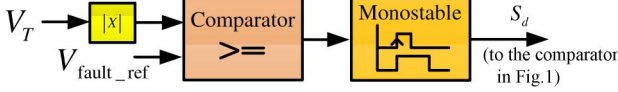


Fig. 5. Fault detection.

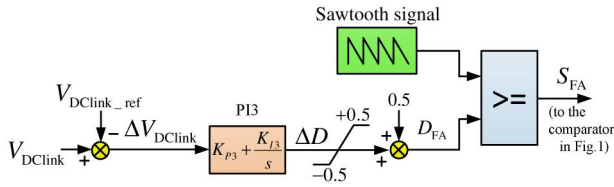


Fig. 6. SC controller during grid faults.

comparing with the actual dc-link voltage, the input signal of PI2, which is the dc voltage error, is obtained. Here, the reference dc-link voltage is set at 1500 V. The output signal of PI2 is the duty cycle deviation which is adjusted by adding 0.5 to get the duty cycle between 0 and 1 for smoothing power fluctuation. Comparing the obtained duty cycle and the sawtooth signal, the driving signal S_{FL} for the controlled switches in the dc–dc converter is achieved. Subsequently, this driving signal is sent to the comparator in Fig. 1.

Here, the cooperative control of GSC and SC controllers is conducted to regulate the dc-link voltage. Accordingly, the power compensation from the SC can be used to alleviate the power fluctuation of the DFIG wind turbine.

As shown in Fig. 1, the power flow relation at normal operation can be expressed by

$$P_{\text{DFIG}} = P_{\text{Stator}} + P_{\text{GSC}}. \quad (1)$$

In addition, P_{GSC} can be shown by

$$P_{\text{GSC}} = P_{\text{dclink}} + \Delta P_G^*. \quad (2)$$

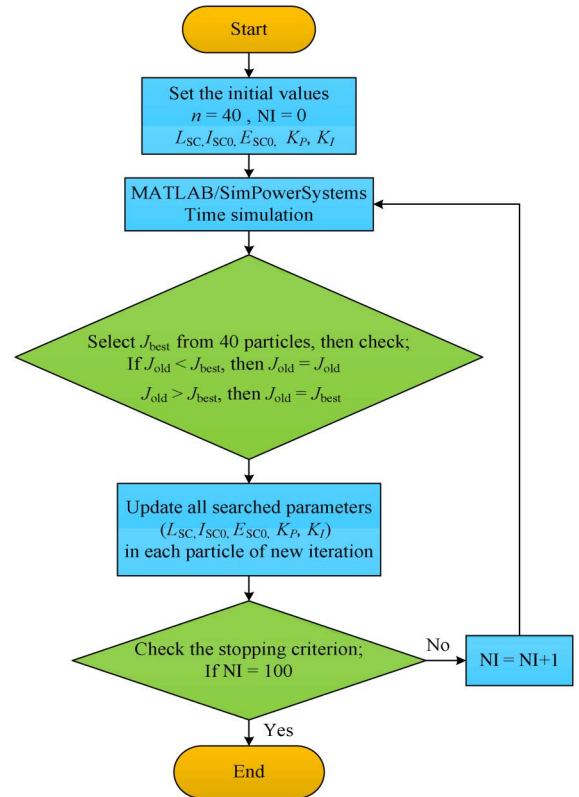


Fig. 7. Flowchart of PSO.

Note that without power compensation from the SC, P_{GSC} is equal to P_{dclink} . Here, ΔP_C^* is expressed by

$$\Delta P_C^* = \Delta V_C^* \cdot I_C. \quad (3)$$

Note that ΔV_C^* can be obtained as shown in Fig. 4. By controlling ΔV_C^* , ΔP_C^* can be modulated to alleviate the fluctuation of P_{DFIG} during normal operation.

The cooperative control of the GSC controller in Fig. 3 and the SC controller for smoothing power fluctuation in Fig. 4 can be explained as follows. When the actual power of the DFIG is lower than the reference power, the SC controller is controlled to supply the stored energy from the SC to the dc link. This causes an increase in the dc-link voltage and the stored energy in the dc link. On the other hand, the GSC controller tries to reduce the dc-link voltage by releasing the increased energy in the dc link to the system. As a result, an increase in

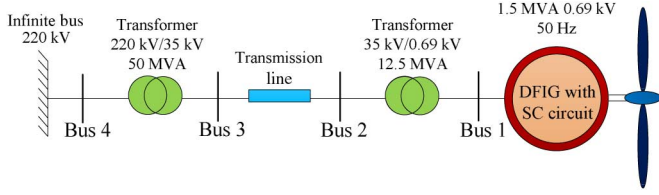


Fig. 8. Study power system.

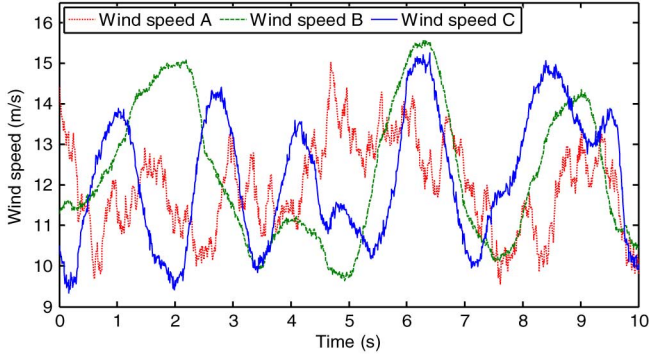


Fig. 9. Wind speeds.

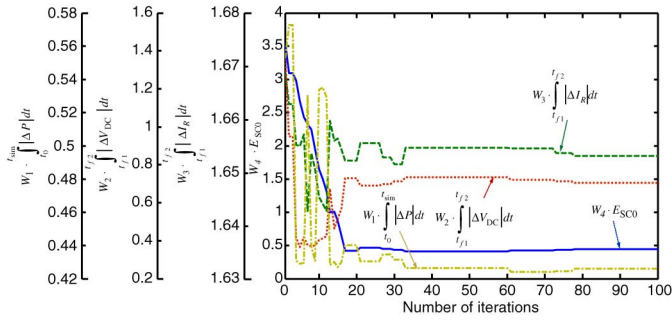


Fig. 10. Convergence curves of four terms in the objective function.

the GSC power can compensate a decrease in the DFIG power. The dc-link voltage can be maintained at the reference dc-link voltage.

Fig. 5 shows the control block of the fault detection based on the terminal voltage of the DFIG. This control block is used to select the operating mode between the smoothing power fluctuation and the enhancing FRT capability. The terminal voltage of the DFIG is compared with the reference voltage to detect the occurrence of fault. Here, the reference voltage is set at 0.9 p.u. When the actual voltage is lower than the reference voltage, the monostable circuit generates the signal S_d to activate the SC controller (PI3) for the FRT enhancement as shown in Fig. 6. Because the PI3 aims to keep the dc-link voltage constant, the difference between the dc-link voltage and the reference dc-link voltage is used as the input signal of PI3. Based on the dc-link voltage error, the stored energy in the SC can be supplied to the dc link so that the voltage deviation of the dc link can be eliminated. The output signal of PI3 is the duty cycle deviation, which is added by 0.5 to get the duty cycle during grid faults for the FRT enhancement. Comparing the duty cycle and the sawtooth signal, the driving signal S_{FA} for the controlled switches

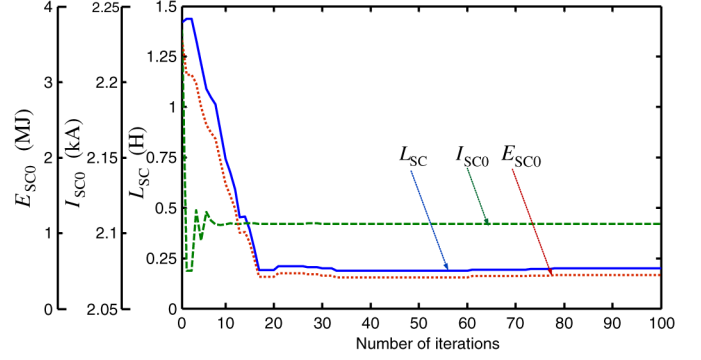


Fig. 11. Convergence curves of the optimized parameters.

in the dc-dc converter is obtained. This driving signal is sent to the comparator in Fig. 1.

The cooperative control of GSC and SC controllers during grid faults aims to keep the dc-link voltage constant by exchanging stored energy with the system. However, when the fault occurs at the DFIG terminal, the GSC cannot exchange energy with the system. As a result, the GSC controller cannot maintain the dc-link voltage during grid faults. After the fault clearing, the GSC absorbs the energy from the system, in order to recover the dc-link voltage to the normal value. To support the GSC controller during grid faults, the SC controller quickly releases the energy stored in the SC to the dc link so that the dc voltage can be kept constant.

III. PROPOSED OPTIMIZATION TECHNIQUE

The SC parameters, i.e., coil inductance, initial coil current, initial stored energy, and parameters of PI1, PI2, and PI3 are optimized so that the following objectives are achieved:

- 1) to alleviate the output power fluctuation of the DFIG wind turbine effectively during normal operation;
- 2) to reduce the overvoltage in the dc link during faults;
- 3) to suppress the overcurrent in both stator and rotor during faults;

The optimization problem can be formulated as follows:

Minimize

$$J = W_1 \cdot \int_{t_0}^{t_{sim}} |\Delta P| dt + W_2 \cdot \int_{t_{f1}}^{t_{f2}} |\Delta V_{dc}| dt + W_3 \cdot \int_{t_{f1}}^{t_{f2}} |\Delta I_R| dt + W_4 \cdot E_{SC0} \quad (4)$$

Subject to $0.001 \leq L_{SC} \leq 10 \text{ H}$

$$1500 \leq I_{SC0} \leq 3000 \text{ A}$$

$$0.001 \leq K_{P1} \leq 1, \quad 0.1 \leq K_{I1} \leq 3$$

$$0.001 \leq K_{P2} \leq 100, \quad 0.001 \leq K_{I2} \leq 1$$

$$0.001 \leq K_{P3} \leq 100, \quad 0.001 \leq K_{I3} \leq 1$$

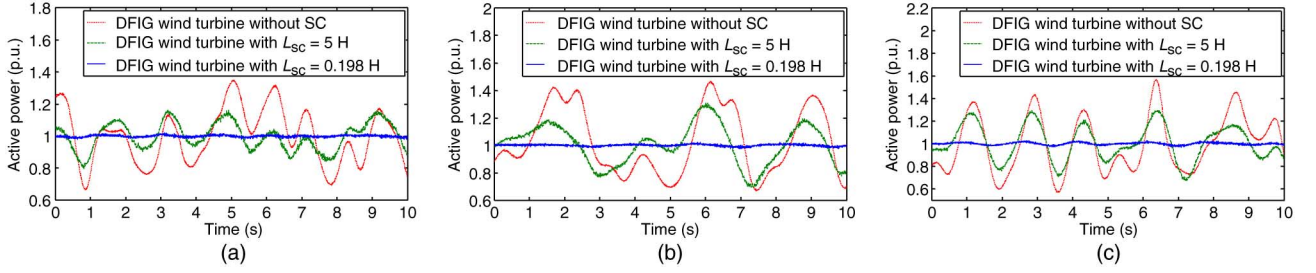


Fig. 12. Active output power of the DFIG wind turbine: (a) wind speed A; (b) wind speed B; and (c) wind speed C.

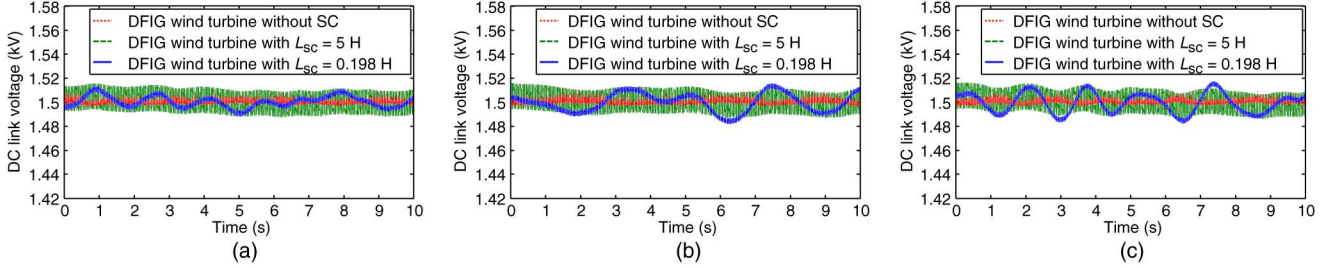


Fig. 13. DC-link voltage: (a) wind speed A; (b) wind speed B; and (c) wind speed C.

where

$$E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2. \quad (5)$$

Here, the weighting factors are set as $W_1 = 0.2$, $W_2 = 0.5$, $W_3 = 0.3$, and $W_4 = 1.0$. Note that the fourth term in the right side of (4) which is the initial stored energy in the SC is mostly influenced by W_4 .

In this study, the PSO [22] is applied to solve (4). Fig. 7 shows the flowchart of PSO that can be explained as follows.

- 1) Set the number of particles = 40 and the initial iteration = 0.
- 2) Perform the time simulation by MATLAB/SimPower Systems.
- 3) Obtain the value of the objective function of each particle from step 2) and select the minimum value.

Then check the condition

If $J_{old} < J_{best}$, then $J_{old} = J_{best}$.

If $J_{old} > J_{best}$, then $J_{old} = J_{best}$.

- 4) Update the parameters of the SC and PI controllers for the next iteration.
- 5) Check the stopping criteria. Here, the number of iteration is set at 100.
- 6) Repeat the optimization until the stopping criteria is reached.

IV. SIMULATION STUDY

Fig. 8 shows the DFIG wind turbine connected to the infinite bus [20]. The DFIG parameters and PI parameters of RSC and GSC controllers are given in Tables A1 and A2, respectively, in the Appendix. The MATLAB/SimPowerSystems is used for optimization and simulation study [23]. The parameters optimization is conducted under the wind speed A as shown

in Fig. 9, whereas the temporary three-phase fault at bus 2 is applied at $t = 4$ s for 150 ms. As a result, the convergence curves of four terms in the objective function and the optimized values of E_{SC0} , I_{SC0} , and L_{SC} are delineated in Figs. 10 and 11, respectively. Based on (5), the optimal L_{SC} is also influenced by W_4 . Accordingly, the convergence curve of L_{SC} is in the same fashion as that of $W_4 \cdot E_{SC0}$.

The optimized results of the SC and PI parameters are given in Tables I and II, respectively. In simulation study, the effect of the DFIG with the optimal SC is compared with that of the DFIG with the nonoptimal SC. Here, the nonoptimal SC is set at 5 H. From Table I, it can be observed that the initial stored energy of the optimal SC is much lower than that of the nonoptimal SC.

First, to evaluate the power smoothing performance of the DFIG with the optimal SC, the simulation study is conducted under the individual wind speeds A, B, and C without applied fault. Fig. 12(a)–(c) shows the active power output of the DFIG wind turbine in case of wind speeds A, B, and C, respectively. For the DFIG without SC, the active power output of the DFIG severely fluctuates. Conversely, the output power fluctuation is suppressed by the DFIG with the nonoptimal SC. Nevertheless, the DFIG with the optimal SC shows superior stabilizing effect on the power fluctuation to the DFIG with the nonoptimal SC. The output power fluctuation of the DFIG is completely eliminated.

Fig. 13(a)–(c) depicts the dc-link voltage in case of wind speeds A, B, and C, respectively. Fig. 14(a) shows P_{Stator} , P_{GSC} , and P_{DFIG} in case of the DFIG with the optimal SC under wind speed A. It can be seen that the P_{GSC} is controlled to compensate the fluctuation of P_{Stator} so that P_{DFIG} is smooth. This simulation result is consistent with (1). Fig. 14(b) shows the dc-link voltage in case of the DFIG with the optimal SC under wind speed A. As in (2) and (3), the dc-link voltage

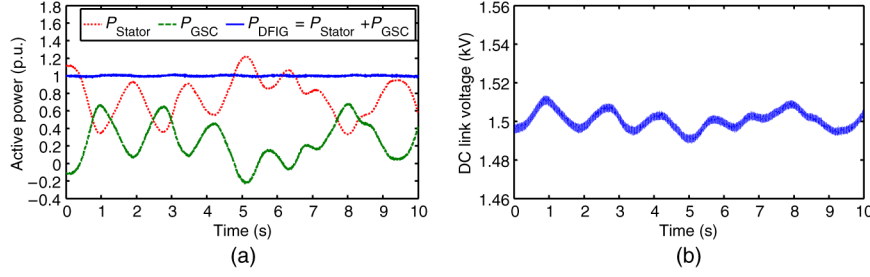


Fig. 14. Results in case of the DFIG with optimal SC under wind speed A: (a) P_{DFIG} , P_{Stator} , and P_{GSC} ; and (b) dc-link voltage.

TABLE I
PARAMETERS OF SC

Parameter	Nonoptimal SC	Optimal SC
L_{SC} (H)	5	0.198
I_{SC0} (kA)	2.106	2.106
E_{SC0} (MJ)	11.08	0.439

TABLE II
PI PARAMETERS OF SC CONTROLLERS

PI parameters	Nonoptimal SC	Optimal SC
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

changes in the same way as P_{GSC} . The GSC controller tries to keep the dc-link voltage constant. These results confirm the cooperative control of the GSC controller and the SC controller during normal operation.

Next, the DFIG with the optimal SC is compared with the battery for the power smoothing effect. Fig. 15(a) shows the DFIG wind turbine system with the battery which is installed at the DFIG terminal. Fig. 15(b) depicts the model of the lead-acid battery [24]. To alleviate the active power output fluctuation of the DFIG at bus 1, the active power and reactive powers at bus 1 are used as input signals of the battery controller as shown in Fig. 15(c). The battery parameters are given in Table A3 in the Appendix. PI parameters of the battery controller are appropriately selected as provided in Table III. Fig. 16(a) shows the active power flow at bus 1 under the wind speed A. In case of without battery and DFIG without SC, the power output of the DFIG largely fluctuates. On the other hand, the battery can effectively alleviate the power fluctuation. Nevertheless, because the control response of the lead-acid battery is slower than that of the optimal SC, the control effect of the battery is lower than that of the optimal SC. Fig. 16(b) shows the power output of battery and the power compensated by the optimal SC. Because the power compensated by the optimal SC is higher and faster than that of the battery, the power smoothing effect of the optimal SC is better than that of the battery.

Besides, the integral absolute error (IAE) of the active power deviation at bus 1 is used to evaluate the control effect of the battery and the optimal SC. Fig. 16(c) depicts the comparison of IAE of ΔP_{Bus1} while Table IV provides the percentage of IAE of ΔP_{Bus1} against three patterns of wind power. Obviously, the percentage of IAE in case of the optimal SC is much lower than that of the battery. This implies the superior power smoothing effect of the optimal SC over the battery. Fig. 16(d) and (e) shows the dc-link voltage and the stored energy in the dc link, respectively. It can be observed that the maximum dc-link voltage is 1513 V while the maximum stored energy is 28.61 kJ.

Next, to evaluate the FRT performance of the DFIG with the SC, the simulation study is carried out under the wind speed A while the temporary three phase fault at bus 2 is applied at $t = 4$ s for 150 ms. Fig. 17(a) depicts the terminal voltage at bus 2. Based on the grid code of Germany EON [25], the wind turbines must tolerate 0% of voltage dip at the connecting bus with duration up to 150 ms. The magnitude of voltages in case of the DFIG wind turbine with SC and without SC decreases to almost zero and recover to the normal value. The DFIG wind turbine with SC and without SC can ride through the fault.

Fig. 17(b) shows the active power output of the DFIG wind turbine. In case of the DFIG without SC, the power largely fluctuates. On the other hand, the DFIG with the optimal SC provides better stabilizing effect than the DFIG with the nonoptimal SC. The power fluctuation quickly reaches the steady state value.

Fig. 17(c) shows the EM torque of the DFIG. In case of the DFIG without SC, the EM torque severely oscillates. In contrast, in case of the DFIG with the nonoptimal SC and the optimal SC, the EM torque oscillation is damped out effectively.

Fig. 17(d) depicts the mechanical speed of the DFIG rotor. In case of the DFIG without SC, the mechanical speed largely fluctuates. The speed fluctuation is suppressed effectively in case of the DFIG with the nonoptimal SC or the optimal SC. In particular, the speed in case of the optimal SC takes shorter time than that in case of the nonoptimal SC to return to the normal value. It can be observed that the DFIG wind turbine takes 20 s to return to its nominal speed. This is because PI parameters of the PI-A controller in the speed control loop of the RSC control scheme as shown in Fig. 2 are set as $K_{A-P1} = 5$ and $K_{A-I1} = 0.025$. It can be proved that the response of the mechanical speed will be faster if K_{A-P1} and K_{A-I1} are set at higher values. Fig. 17(e) depicts the difference between the mechanical power input and the electrical power output. Clearly, after fault clearing, the different power in case of the DFIG with the nonoptimal SC still oscillates while that in case of the DFIG

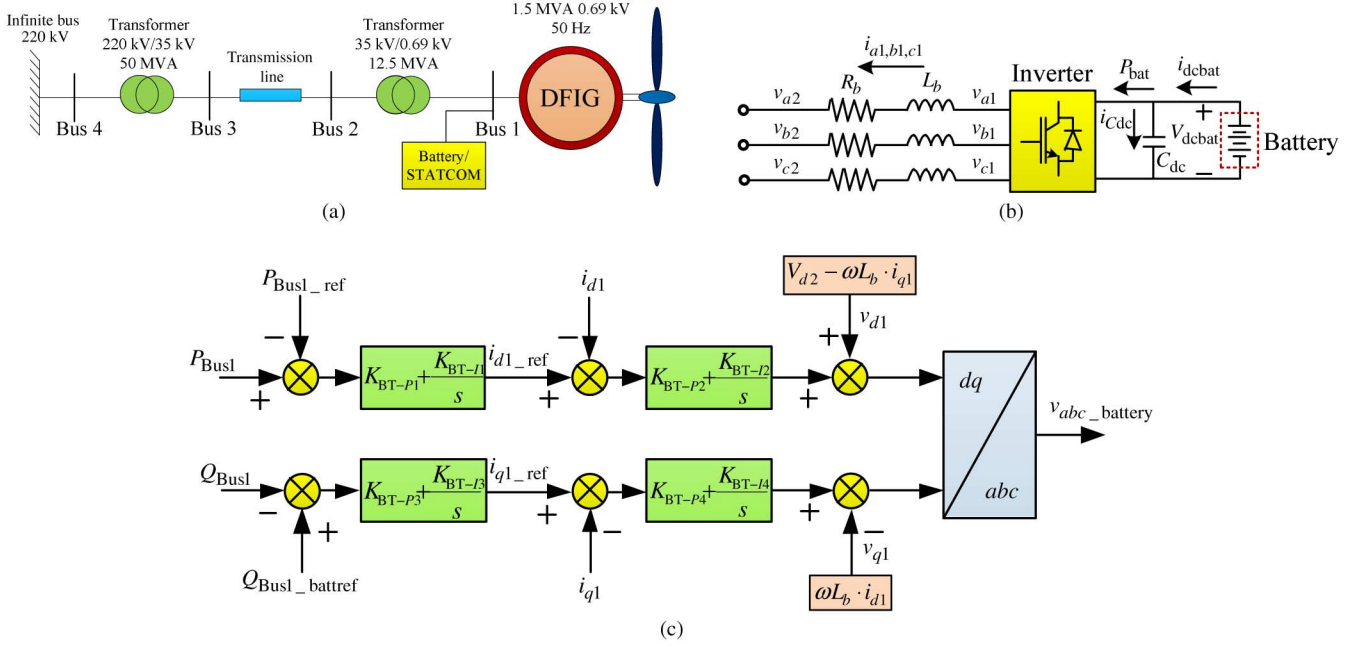


Fig. 15. (a) Battery or STATCOM at the terminal bus of the DFIG wind turbine; (b) battery model; and (c) battery control scheme.

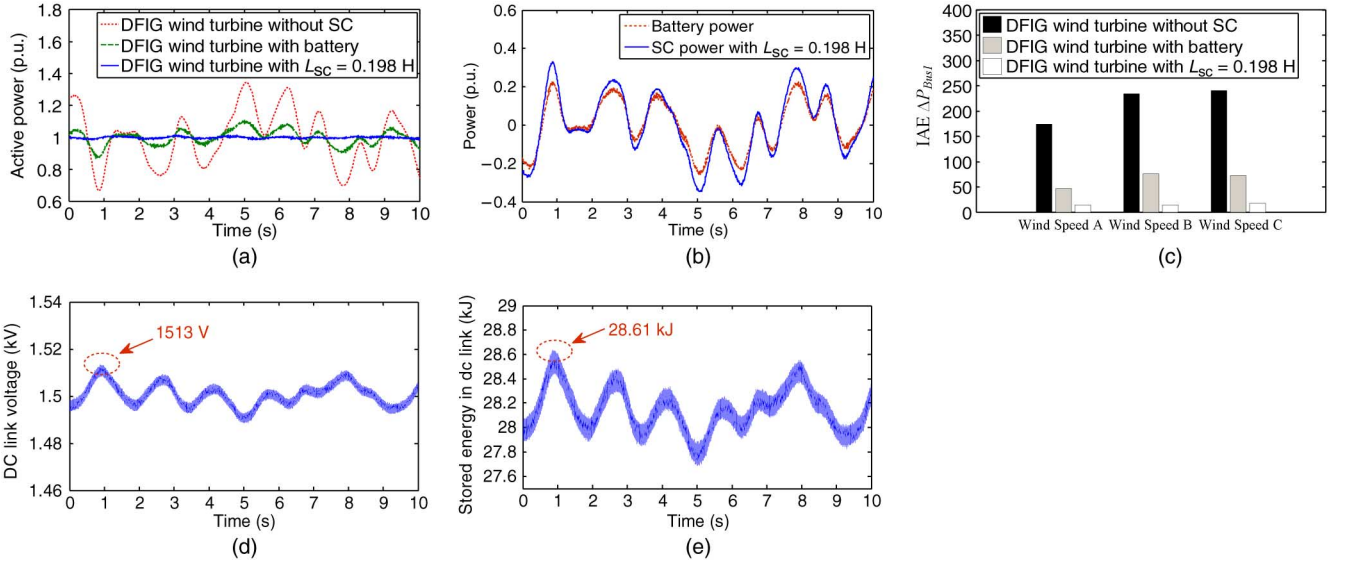


Fig. 16. (a) Active power flow at bus 1 (wind speed A); (b) battery power and SC power (wind speed A); (c) IAE of ΔP_{Bus1} ; (d) dc-link voltage; and (e) stored energy in the dc link.

TABLE III
PI PARAMETERS OF BATTERY AND STATCOM CONTROLLERS

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

TABLE IV
COMPARISON OF THE PERCENTAGE OF IAE OF ΔP_{Bus1}

Wind speed	DFIG wind turbine without SC (%)	Battery (%)	DFIG wind turbine with optimal SC (%)
Wind speed A	100	26.51	8.05
Wind speed B	100	32.34	6.23
Wind speed C	100	30.20	7.36

without SC returns to zero. This causes the oscillation of the mechanical speed in case of the DFIG with the nonoptimal SC. Fig. 17(f) shows the SC power. Because PI parameters of the

SC controller for smoothing power fluctuation in case of the DFIG with the nonoptimal SC are not optimally set, the SC cannot suitably exchange the power with the dc link. The RSC

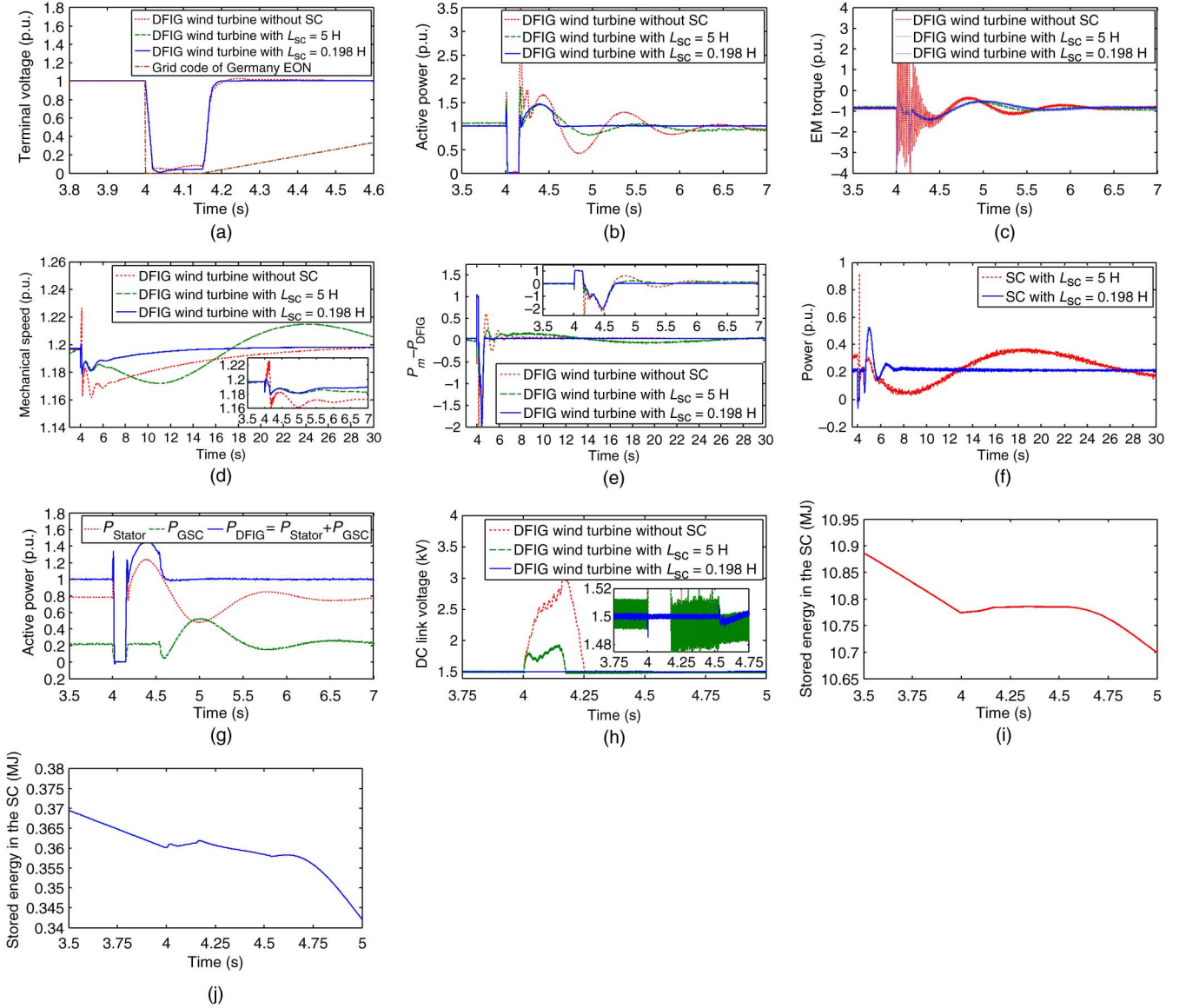


Fig. 17. (a) Terminal voltage of the DFIG; (b) active output power of the DFIG; (c) EM torque of the DFIG; (d) mechanical speed of the DFIG; (e) difference between mechanical power input and electrical power output; (f) power of SC; (g) active power of stator, GSC, and DFIG; (h) dc-link voltage; (i) stored energy in the SC (SC with $L_{SC} = 5$ H); and (j) stored energy in the SC (SC with optimal $L_{SC} = 0.198$ H).

which extracts the power from the dc link cannot provide satisfactory damping effect on the mechanical speed. As a result, the mechanical speed in case of the DFIG with the nonoptimal SC still oscillates. These results signify that the proposed optimization is significantly required for the SC and converter controllers.

Fig. 17(g) shows the active power of stator, GSC, and DFIG with the optimal SC. During faults, all powers drop to zero. After the fault clearing, the DFIG power returns to the normal value by the power supply from the stator and the GSC.

Fig. 17(h) depicts the dc-link voltage of the DFIG. During grid faults, the dc-link voltage in case of the DFIG without SC highly increases. On the other hand, the dc-link voltage can be suppressed by the DFIG with the SC. Particularly, in case of

the DFIG with the optimal SC, the dc-link voltage fluctuation is completely eliminated and almost constant (see the amplified figure). Fig. 17(i) and (j) shows the stored energy in the nonoptimal SC and the optimal SC, respectively. At $t = 4$ s, the stored energy of the SC with the nonoptimal or the optimal L_{SC} increases. This implies that the SC controller during faults can control the SC to absorb the abrupt increase in the energy in the dc link. As a result, the increase in the dc-link voltage can be largely suppressed. These results confirm the cooperative control of the GSC controller and the SC controller during grid faults.

Fig. 18(a)–(c) shows the stator currents of the DFIG in case of without SC, with the nonoptimal SC, and with the optimal SC, respectively. Without SC, the stator current during faults largely increases. On the other hand, the nonoptimal SC and

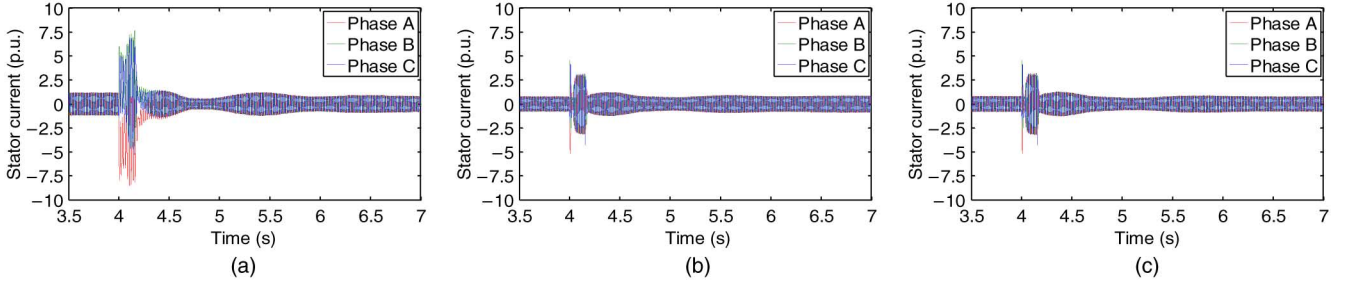


Fig. 18. Stator current: (a) DFIG without SC; (b) DFIG with nonoptimal SC; and (c) DFIG with optimal SC.

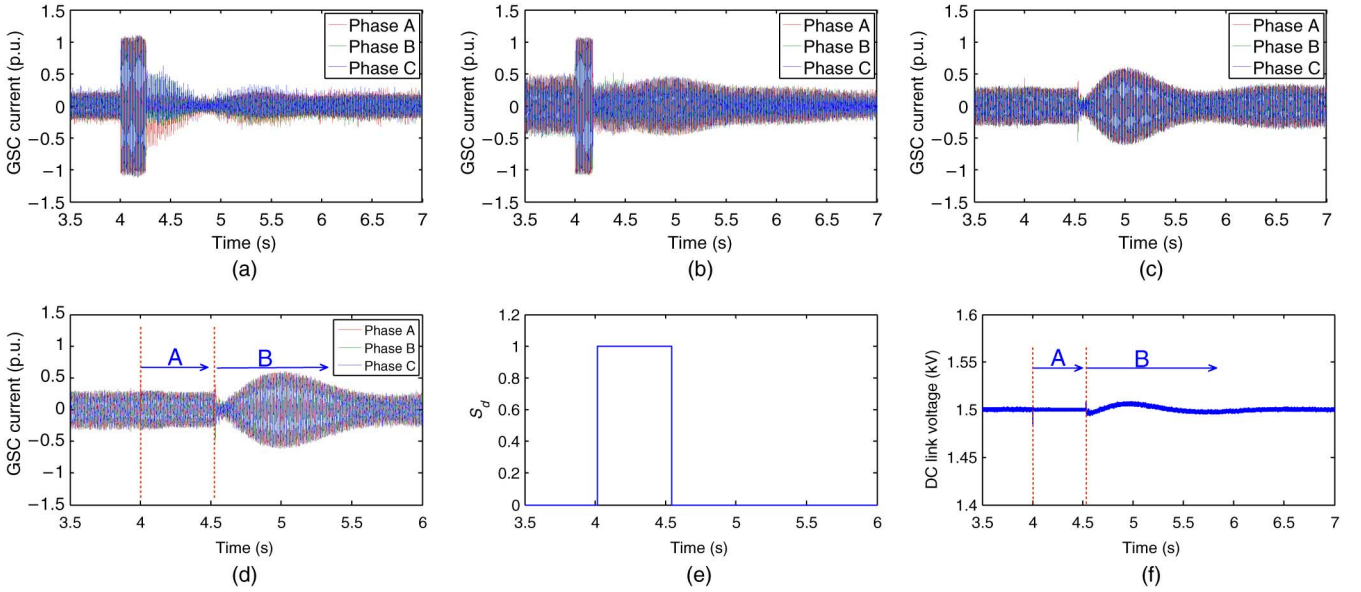


Fig. 19. GSC current: (a) DFIG without SC; (b) DFIG with the nonoptimal SC; (c) DFIG with the optimal SC; (d) amplified GSC current in case of the DFIG with the optimal SC; (e) S_d signal; and (f) dc-link voltage.

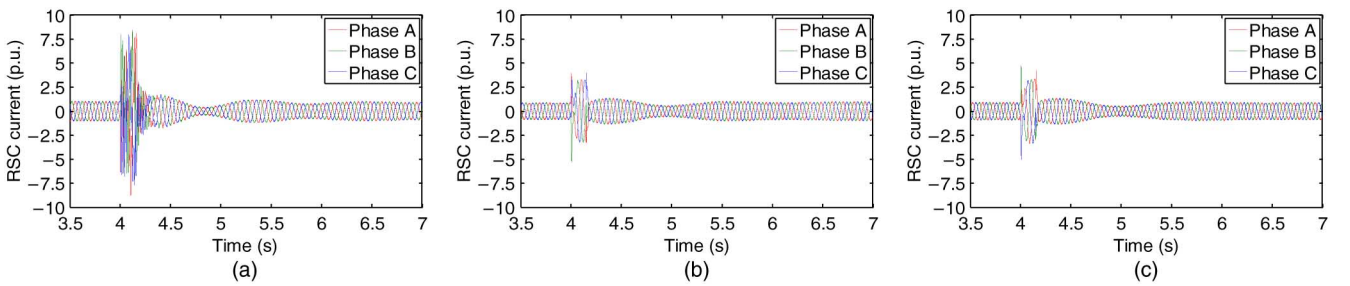


Fig. 20. Rotor side converter current: (a) DFIG without SC; (b) DFIG with the nonoptimal SC; and (c) DFIG with the optimal SC.

the optimal SC can limit the abrupt increase in the stator current effectively.

Fig. 19(a)–(c) shows the GSC currents of DFIG in case of without SC, with the nonoptimal SC, and with the optimal SC, respectively. Without SC, the fault current is very large. The nonoptimal SC is not able to suppress the fault current. On the other hand, the fault current can be reduced effectively by the optimal SC. The reason that Fig. 19(c) is different from Fig. 19(a) and (b) can be explained as follows. Fig. 19(d) shows

the enlargement of Fig. 19(c), which can be divided into two intervals, i.e., A and B. The interval A is under the control of the SC controller during grid faults. On the other hand, the interval B is under the control of the SC controller for smoothing power fluctuation. When the fault occurs, the GSC current is limited by the SC with the command signal S_d from the fault detection. The time duration of the interval A is determined by the monostable block which generates the S_d signal as shown in Fig. 19(e), to initiate the operation of the SC controller

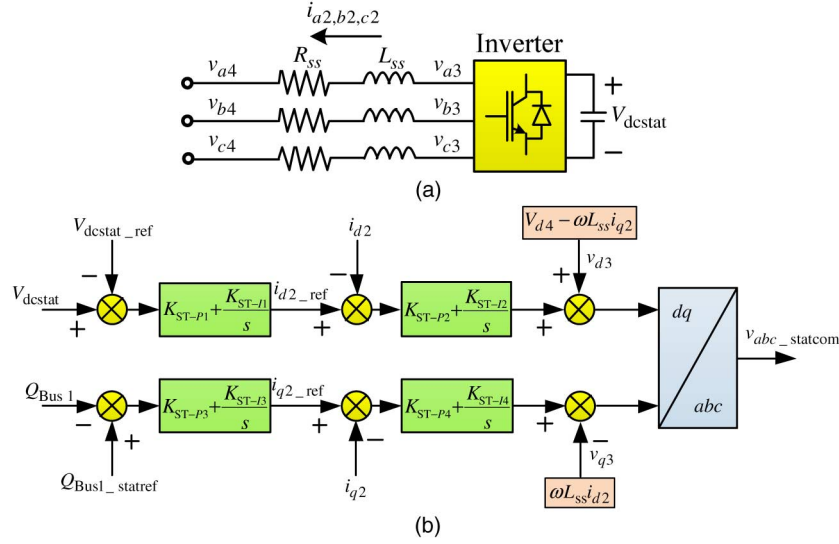


Fig. 21. (a) STATCOM control scheme and (b) STATCOM model.

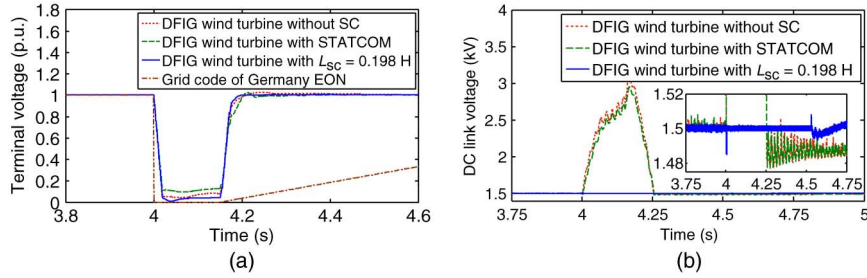


Fig. 22. (a) Terminal voltage of the DFIG and (b) dc-link voltage.

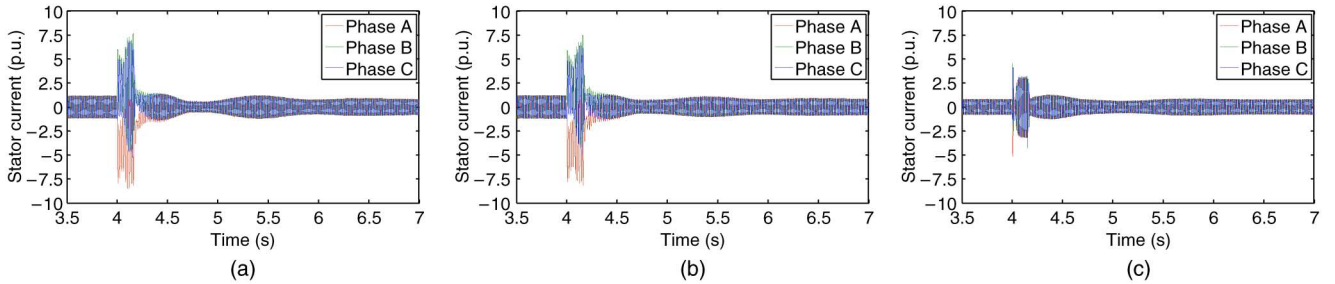


Fig. 23. Stator current: (a) DFIG without SC; (b) DFIG with STATCOM; and (c) DFIG with the optimal SC.

during faults. Here, the time duration of the interval A is set at 0.52 s. Fig. 19(f) shows the dc-link voltage. In the interval A, the dc-link voltage is regulated to keep constant at 1500 V by the SC controller during faults based on the S_d signal. On the other hand, after the termination of the S_d signal, the SC controller for smoothing power fluctuation starts to operate at $t = 4.52$ s. The aim of this controller is to keep the DFIG power output constant. It can be seen that the GSC current in Fig. 19(d) starts to change so that the active power of the GSC can compensate with the stator power as shown in Fig. 17(g). As a result, the fluctuation of the DFIG power output can be eliminated.

Fig. 20(a)–(c) depicts the RSC currents of the DFIG in case of without SC, with the nonoptimal SC, and with the optimal SC, respectively. Clearly, the optimal SC and the nonoptimal SC are able to suppress the rotor overcurrent during faults.

Next, the DFIG with the optimal SC is compared with the STATCOM for the FRT capability enhancement. The STATCOM is also installed at the DFIG terminal as depicted in Fig. 15(a). Fig. 21(a) and (b) shows the STATCOM model [26] and controller, respectively. The STATCOM parameters are given in the Appendix. The PI parameters of the STATCOM controller are appropriately selected as provided in Table III.

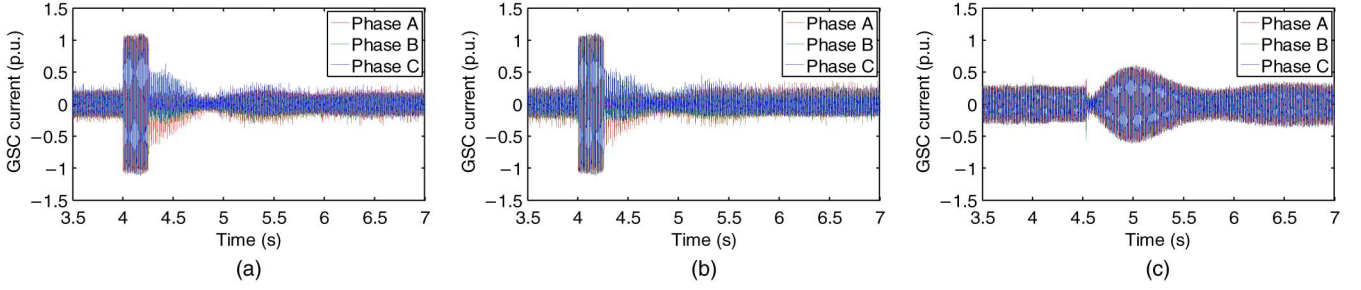


Fig. 24. GSC current (a) DFIG without SC; (b) DFIG with STATCOM; and (c) DFIG with the optimal SC.

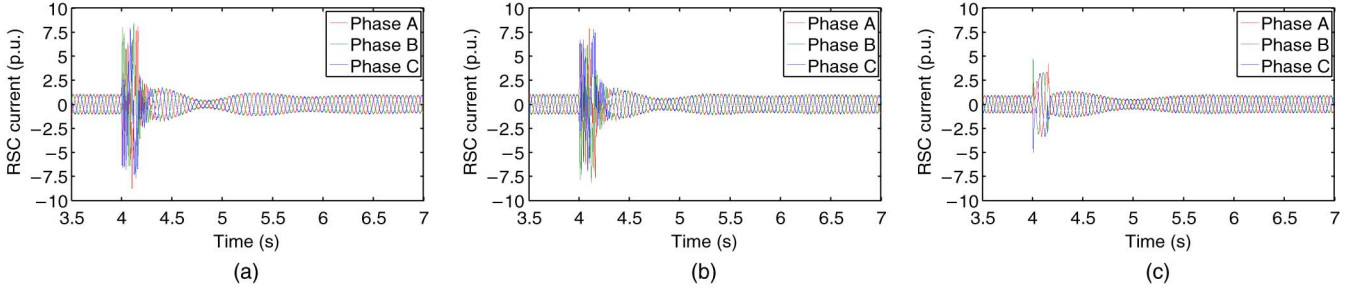


Fig. 25. Rotor side converter current (a) DFIG without SC; (b) DFIG with STATCOM; and (c) DFIG with the optimal SC.

TABLE V
COMPARISON OF PEAK VALUES IN PERCENTAGE

System variables	DFIG wind turbine without SC (%)	STATCOM (%)	DFIG wind turbine with the optimal SC (%)
V_{dlink} (V)	100	90.58	0.99
I_{stator} (p.u.)	100	94.46	59.71
I_{GSC} (p.u.)	100	96.79	35.89
I_{RSC} (p.u.)	100	92.10	53.28

Fig. 22(a) depicts the DFIG terminal voltage with respect to the Germany EON grid code. The DFIG terminal voltages in all cases are in the acceptable range of the grid code. Figs. 22(b), 23–25 show the dc-link voltage, the stator current, the GSC current, and the RSC current, respectively. Because the STATCOM is installed at the DFIG terminal, it cannot reduce the overvoltage and overcurrent in the DFIG circuits. On the other hand, the DFIG with the optimal SC can limit all of them effectively. Table V provides the percentage comparison of the peak values of voltage and current in Figs. 22(b), 23–25. The optimal SC gives the lowest percentage of the peak voltage and current in comparison with the STATCOM and the DFIG wind turbine without SC.

V. CONCLUSION

The new optimization technique of the SC integrated into the dc link of the DFIG wind turbine for augmentation of the FRT capability and suppression of the output power fluctuation is proposed in this paper. New contributions and advantages of the proposed technique are summarized as follows.

- 1) The proposed technique not only guarantees the control effect of the SC for smoothing power fluctuation and enhancing FRT capability, but also provides the economical merit of the SC. Besides, all optimal parameters such as SC inductance, initial stored energy, and PI parameters of dc–dc converter can be optimally and automatically determined without difficulty of trial and error.
- 2) Simulation results clarify that the DFIG wind turbine with the optimal SC provides superior control effect to the DFIG wind turbine with the nonoptimal SC, battery, and STATCOM in terms of power smoothing effect and FRT enhancement. This confirms that the proposed solution is not only theoretically feasible, but also superior to other conventional techniques.
- 3) Although the installation cost of the SC is still expensive, this paper presents the multifunctions and various benefits of the SC integrated into the DFIG wind turbine such as smoothing power fluctuation, solving power quality problem, enhancing FRT capability, limiting fault current, and improving the power system transient stability. It is anticipated that these various benefits can significantly support the implementation of the proposed technique in practice.

For the future work, an experimental study which compares the proposed solution and other techniques in previous literatures will be carried out.

APPENDIX

Tables A1–A4 are as follows.

TABLE A1
PARAMETERS OF DFIG WIND TURBINE

Symbol	Parameter	Value
S	Rated DFIG wind turbine	1.5 MVA
V_{stator}	Stator line voltage	0.69 kV
ω_s	Synchronous speed	314.16 rad/s
n_p	Number of pole pairs	2
R_s, R_r	Stator and rotor resistance	0.003 p.u.
L_s, L_r	Stator and rotor leakage inductance	0.11, 0.07 p.u.
L_m	Magnetizing inductance	2.5 p.u.
S_i	Rated isolation transformer	0.5 MW
V_i	Isolation transformer stator side and diode rectifier side voltage	400 V/600 V
R_{l1}, R_{l2}	Isolation transformer resistance	0.005 p.u., 0.005 p.u.
L_{l1}, L_{l2}	Isolation transformer leakage induction	0.035 p.u., 0.035 p.u.
L_i	Isolation transformer magnetizing induction	500 p.u.

TABLE A2
PI PARAMETERS OF RSC AND GSC CONTROLLERS

PI parameters	Value
K_{A-P1}, K_{A-I1}	5, 0.025
K_{B-P1}, K_{B-I1}	10, 15
K_{C-P1}, K_{C-I1}	5, 10
K_{D-P1}, K_{D-I1}	10, 15
K_{E-P1}, K_{E-I1}	20, 15
K_{F-P1}, K_{F-I1}	50, 20
K_{G-P1}, K_{G-I1}	50, 20

TABLE A3
PARAMETERS OF BATTERY PACK

Parameter	Value
Nominal dc voltage (V)	1400
Rated capacity (Ah)	50
Energy capacity (kWh)	70
Initial state-of-charge (%)	50
Initial energy (MJ)	126
Maximum capacity (Ah)	52.08
Fully charged voltage (V)	1633.22

TABLE A4
PARAMETERS OF STATCOM

Parameter	Value
dc voltage (V)	1500
Series line reactance (H)	0.0001
Series line resistance (Ω)	0.002
dc link capacitance (μF)	8000

REFERENCES

- [1] 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
- [2] G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, *Doubly Fed Induction Machine*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [3] H. T. Jadhav and R. Roy, "A comprehensive review on the grid integration of doubly fed induction generator," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 49, pp. 8–18, Jul. 2013.
- [4] J. Lopez, P. Sanchis, X. Roboam, and L. Marroyo, "Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 3, pp. 709–717, Sep. 2007.
- [5] K. Changling, H. Banakar, B. Shen, and O. Boon-Teck, "Strategies to smooth wind power fluctuations of wind turbine generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 341–349, Jun. 2007.
- [6] G. Pannell, D. J. Atkinson, and B. Zahawi, "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, Sep. 2010.
- [7] S. Semen, J. Niiranen, S. Kanerva, A. Arkkio, and J. Saitz, "Performance study of a doubly fed wind-power induction generator under network disturbance," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 4, pp. 883–890, Dec. 2006.
- [8] A. H. M. A. Rahim and E. P. Nowicki, "Supercapacitor energy system for fault-ride through of a DFIG wind generation system," *Energy Convers. Manage.*, vol. 52, pp. 96–102, Jul. 2012.
- [9] S. Zhang, K. J. Tseng, S. S. Choi, T. D. Nguyen, and D. L. Yao, "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.
- [10] W. Qiao, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, "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.
- [11] C. Wessels, F. Gebhardt, and F. W. Fuchs, "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.
- [12] S.-T. Kim, B.-K. Kang, S.-H. Bae, and J.-W. Park, "Application of SMES and grid code complicity to wind/photovoltaic generation system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Article ID 5000804, Jun. 2013.
- [13] M. E. Elshiekh, D. A. Mansour, and A. M. Azmy, "Improving fault ride-through capability of DFIG-based wind turbine using superconducting fault current limiter," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Article ID 5601204, Jun. 2013.
- [14] Z. Wang, G. Zhang, and M. Qiu, "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.
- [15] G. Zhu, Z. Wang, X. Liu, G. Zhang, and X. Jiang, "Transient behavior research on the combined equipment of SMES-SFCL," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, no. 2, pp. 778–781, Jun. 2004.
- [16] C. Zhao *et al.*, "Development and test of a superconducting fault current limiter-magnetic energy storage system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 2014–2017, Jun. 2007.
- [17] G. Zhu, Z. Wang, and G. Zhang, "Research on a combined device SMES-SFCL based on multi-object optimization," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 2019–2022, Jun. 2005.
- [18] T. Kinjo, T. Senjyu, N. Urasaki, and H. Fujita, "Terminal-voltage and output-power regulation of wind-turbine generator by series and parallel compensation using SMES," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 153, no. 3, pp. 276–282, May 2006.
- [19] J. Shi, Y. Tang, Y. Xia, L. Ren, and J. Li, "SMES based system for doubly-fed induction generator in wind power application," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 1105–1108, Jun. 2011.
- [20] 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 Convers.*, vol. 27, no. 2, pp. 277–295, Jun. 2012.
- [21] Y. Zou, M. E. Elbuluk, and Y. Sozer, "Simulation comparisons and implementation of induction generator wind power systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1119–1128, May/Jun. 2013.
- [22] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, 1995, vol. 1, pp. 1942–1948.
- [23] *MATLAB/SimPowerSystems Version 5.7*. Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2012.

- [24] M. Rezkallah, A. Chandra, B. Singh, and R. Niwas, "Modified PQ control for power quality improvement of standalone hybrid wind diesel battery system," in *Proc. IEEE 5th Power India Conf.*, Dec. 19–22, 2012, pp. 1–6.
- [25] J. Schlabbach, "Low voltage fault ride through criteria for grid connection of wind turbine generators," in *Proc. 5th Int. Conf. Eur. Elect. Market*, 2008, pp. 1–4.
- [26] M. Molinas, J. A. Suul, and T. Undeland, "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.



Tanapon Karaipoom received the B.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 2012. Currently, he is pursuing the Master's degree at the Electrical Engineering Department, KMITL.

His research interests include the application of superconducting magnetic energy storage (SMES) technology for power system stabilization.



Issarachai Ngamroo (M'12) received the B.Eng. degree from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 1992, and the M.Eng. and Ph.D. degrees from Osaka University, Japan, in 1997 and 2000, all in electrical engineering, respectively.

Currently, he is an Associate Professor with the Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, KMITL. His research interests include the areas of power system stability, dynamics, and control.

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

Issarachai Ngamroo and Tanapon Karaipoom

Abstract—The vital problems of doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine are power fluctuation and low-voltage ride-through performance. To tackle both problems, the new circuit configuration and optimization technique of the superconducting magnetic energy storage with fault current limiting function (SMES-FCL) in a DC microgrid are presented. The SMES-FCL circuit mainly consists of two DC choppers with common superconducting coil (SC). During normal operation, the SMES-FCL acts as the SMES unit to suppress the power fluctuation of DFIG. When severe faults occur in the system, the SC is automatically connected to the system and used as the fault current limiter. Consequently, the fault current and the terminal voltage drop of DFIG can be alleviated. The energy function method is used to formulate the optimization problem of SC inductance, initial stored energy, and proportional–integral control parameters of choppers. Simulation study confirms the superior control effect of the SMES-FCL over the conventional SMES.

Index Terms—Doubly fed induction generator wind turbine, energy function method, fault current limiter, optimization, superconducting magnetic energy storage.

I. INTRODUCTION

IN recent years, the variable-speed wind turbine with DFIG has gained popularity as the smart renewable energy source in the DC microgrids [1]. However, the DFIG wind turbine inevitably faces the crucial problems of power fluctuation during normal operation and LVRT during the occurrence of faults [2]. Without effective countermeasures, these problems may seriously jeopardize the power system stability.

In the past, various circuit configurations of the combined SMES and superconducting fault current limiter (SFCL) have been presented [2]–[7] to solve problems in the AC power grid. In [2], the SC is integrated into the rotor side converter of the DFIG so that the internal currents and voltage in the DFIG during faults can be suppressed. In [3], the series and parallel compensation using SMES is used to alleviate power

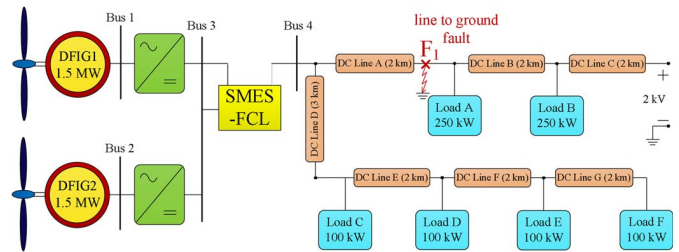


Fig. 1. Study system.

and voltage fluctuations of the wind turbine. However, since the SMES in [2], [3] has no any effect on the alleviation of terminal voltage drop of DFIG during faults, the LVRT capability cannot be guaranteed. In [4]–[7], the combined SMES and SFCL are used to suppress the fault current and smooth the power fluctuation in power systems without renewable energy sources. Nevertheless, there are no any research works which apply the combined SMES and SFCL to overcome both LVRT and power fluctuation problems of DFIG in the DC power grid.

This paper focuses on the new circuit configuration and optimization technique of the SMES with fault current limiting function (SMES-FCL) for improving LVRT capability and smoothing power fluctuation of DFIG wind turbine in a DC microgrid. The control effect of SMES-FCL is evaluated by time simulation study in comparison with the conventional SMES.

II. STUDY SYSTEM AND SMES-FCL

A. Study System

Fig. 1 shows the study DC microgrid which consists of two identical DFIG wind turbines (DFIG1 and DFIG2) with the same MW capacity [2], SMES-FCL, DC lines, and loads. During normal operation, the power outputs of both DFIGs highly fluctuate. On the other hand, when any faults occur near the DFIG bus, the DFIG wind turbines may fail to ride through the low voltage situation and be disconnected from the system. To deal with both problems, the SMES-FCL is placed at the terminal bus 3 of both DFIG wind turbines.

B. SMES-FCL Circuit and Controllers

Fig. 2 depicts the circuit of SMES-FCL which is mainly composed of two DC choppers with the common SC. During

Manuscript received May 23, 2014; accepted June 22, 2014. Date of publication June 25, 2014; date of current version July 9, 2014. This work was supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

The authors are with the School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (e-mail: ngamroo@gmail.com; krpoom@gmail.com).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TASC.2014.2333031

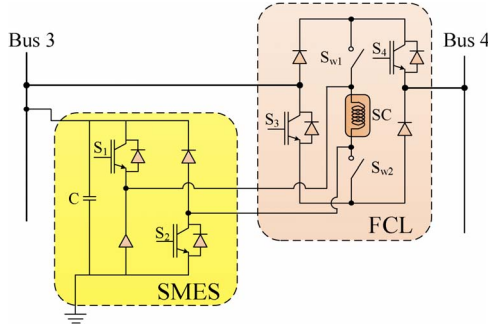


Fig. 2. SMES-FCL circuit.

TABLE I
SWITCHING OPERATION OF DC CHOPPERS OF SMES-FCL

Switches	Normal operation		During faults	
	Charging mode	Discharging mode	Charging mode	Discharging mode
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

normal operation, the SMES-FCL which acts as an SMES unit, is used to smoothen the power fluctuation of DFIG wind turbine by a control of power charging and discharging. During system faults, the SC is automatically connected between bus 3 and bus 4. After limiting the fault current and alleviating the DFIG terminal voltage drop, the SMES-FCL returns to operate as an SMES unit to eliminate the remaining power fluctuation. Table I shows the operation of DC chopper switches of SMES-FCL. Note that the SMES-FCL used in the DC grid does not require the inverter like the SMES in [2], [3] which are used in the AC grid. Besides, the FCL part do not require the series transformer for the impedance transformation like the FCL circuit in [4]–[8] which are used in the AC grid. This significantly simplifies the control technique of the proposed SMES-FCL.

Fig. 3 shows the chopper controller of the SMES part. The control objective is to keep the power flow at bus 4 constant by exchanging the stored energy in the SC with the system. The difference between the actual power at bus 4 (P_{Bus4}) and the reference power at bus 4 (P_{Bus4_ref}) is used as the input signal of the first proportional–integral (PI1) controller. The output signal of PI1 is added to the reference current at bus 4 (I_{Bus4_ref}). The adjusted signal of I_{Bus4_ref} is subtracted from the actual current at bus 4 (I_{Bus4}). As a result, the

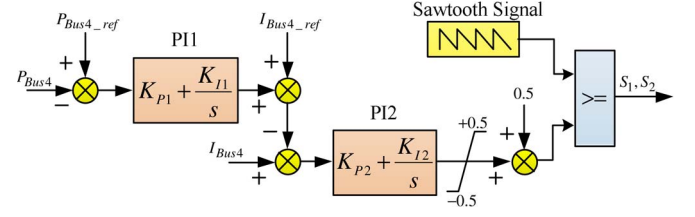


Fig. 3. Chopper controller of the SMES part.

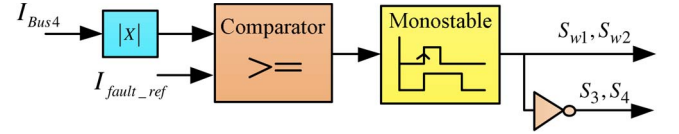


Fig. 4. Chopper controller of the FCL part.

input signal of PI2 is obtained. The output of PI2 is the duty cycle deviation (ΔD). By adding ΔD by 0.5, the duty cycle signal (D) is achieved. Subsequently, the duty cycle signal is compared with the sawtooth signal with 1,985 Hz to generate the gate drive signals of switches S_1 and S_2 of DC chopper. When the duty cycle is greater than 0.5, the electrical energy is charged from the system to the SC. On the other hand, when the duty cycle is less than 0.5, the stored energy in the SC is discharged to the system. In this study, four PI control parameters (K_{Pi} and K_{Ii} , $i = 1, 2$), the initial stored energy in the SC and the SC inductance are optimized simultaneously.

Fig. 4 delineates the chopper controller of the FCL part. The aim is to control the connection of the SC between bus 3 and bus 4 when system faults occur. Here, I_{Bus4} is compared with the reference fault current ($I_{fault_ref} = 3$ kA). When I_{Bus4} is greater than I_{fault_ref} , the monostable circuit sends the turn on signals to S_{w1} and S_{w2} and the turn off signals to S_3 and S_4 . Accordingly, the SC can be automatically connected in series with the DC line.

III. PROPOSED OPTIMIZATION

The energy function method is adopted to formulate the parameters optimization problem of SMES-FCL [9]. When any faults take place in the system, the kinetic energy stored in the rotor and the rotor speed of DFIG highly increase. At the same time, the electrical power output and the terminal voltage of DFIG suddenly drop. To make the DFIG ride through this low voltage situation, the SC is connected in series with the system and acts as the FCL to suppress the increase in both fault current and stored kinetic energy. Consequently, the abrupt decrease in both power output and terminal voltage of DFIG can be alleviated.

The energy function V in this system can be expressed by

$$V = V_K(\omega_1(t), \omega_2(t)) + V_P(\delta_1(t), \delta_2(t)), \quad (1)$$

where V_K is the kinetic energy, V_P is the potential energy, $\omega_1(t)$ and $\omega_2(t)$ are the rotor speeds of DFIG1 and DFIG2, respectively, $\delta_1(t)$ and $\delta_2(t)$ are the rotor angles of DFIG1 and DFIG2, respectively, and t is the time.

The derivative of V with respect to time can be expressed by

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

As described in [9], dV/dt which is the negative value, implies how the total system energy decays. The more negative dV/dt is maximized, the higher and faster system damping can be obtained. Since $d\omega_i/dt = (P_{mi} - P_{ei})/M_i$, where M_i , P_{mi} , and P_{ei} are the inertia constant, the mechanical power, and the electrical power of the i th-DFIG, respectively, substituting $d\omega_i/dt$ into (2) provides

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{P_{mi}}{M_i} + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{dt} \right) - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{1}{M_i} P_{ei}. \quad (3)$$

The kinetic energy function can be shown by

$$V_K = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t))^2, \quad (4)$$

where $\omega_0(t) = (\omega_1(t)M_1 + \omega_2(t)M_2)/(M_1 + M_2)$.

Since $\partial V_K/\partial \omega_i = M_i(\omega_i(t) - \omega_0(t))$, the right side of (3) can be expressed by

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^2 \left((\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{mi} + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{dt} \right) - V_C, \quad (5)$$

where

$$V_C = \sum_{i=1}^2 (\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{ei}. \quad (6)$$

Due to the short period of the fault, δ , P_{mi} , and V_P hardly change. Accordingly, the variation of the first term on the right side of (5) is very small. On the other side, V_C which relies on P_{ei} , directly influences dV/dt . Here, the FCL part is used to maximize V_C by controlling P_{ei} so that dV/dt becomes more negative.

After the control of the FCL part as well as during normal operation, the SMES part alleviates the power fluctuation. Here, the minimization of integral absolute error (IAE) of power deviation at bus 4 (ΔP_{Bus4}) is considered as

$$\int_{t_0}^{t_s} |\Delta P_{Bus4}(t)| dt \rightarrow \text{Minimum}, \quad (7)$$

where t_0 and t_s are the initial and final times of simulation.

Besides, the SC inductance and the initial SC current are optimally tuned so that the initial stored energy in the SC is minimized as

$$E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \rightarrow \text{Minimum}, \quad (8)$$

where E_{SC0} is the initial stored energy, L_{SC} is the SC inductance, and I_{SC0} is the initial SC current.

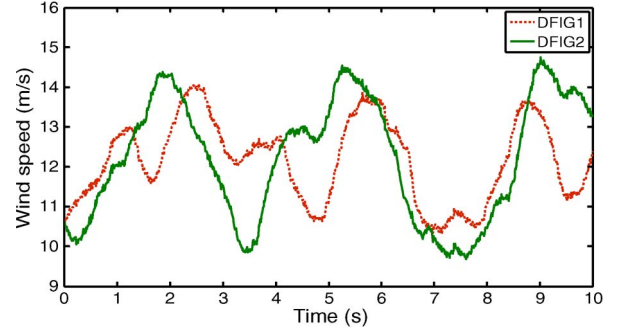


Fig. 5. Wind speeds of DFIG1 and DFIG2.

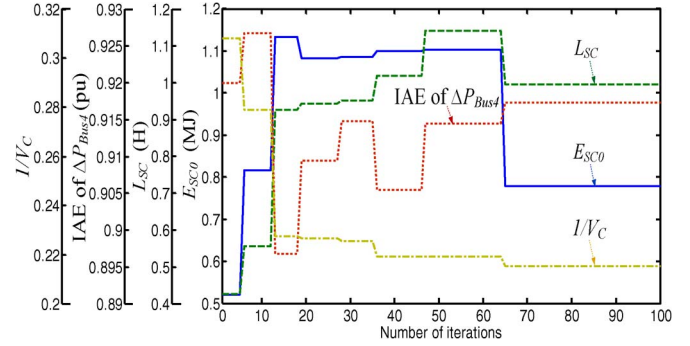


Fig. 6. Convergence curves of $1/V_C$, IAE of ΔP_{Bus4} , L_{SC} , and E_{SC0} .

Based on (5), (7), and (8), the multiobjective optimization problem can be expressed as

$$\text{Minimize } 1/V_C + \int_{t_0}^{t_s} |\Delta P_{Bus4}(t)| dt + E_{SC0}. \quad (9)$$

Subject to

- (a) $0.01 \leq L_{SC} \leq 5$ H, (range of SC inductance),
- (b) $0.01 \leq I_{SC0} \leq 2$ kA, (range of SC current),
- (c) $0.001 \leq K_{P1}, K_{P2}, K_{I1}, K_{I2} \leq 20$, (range of PI gains).

The optimized SMES-FCL is compared with the SMES unit with $L_{SC} = 2.5$ H and $I_{SC0} = 1.2$ kA. The PI controller parameters for the chopper of the SMES unit are optimized by (7) with subject to the constraint (c) in (9). In this work, the particle swarm optimization [10] is used to achieve optimal parameters of the SMES-FCL and the SMES unit.

IV. SIMULATION STUDY

The parameters optimization is conducted by MATLAB/SimPowerSystems [11] under the wind speeds of DFIG1 and DFIG2 in Fig. 5, where $t_0 = 0$ s and $t_s = 10$ s. In addition, the temporary line to ground fault is applied at the point F1 in Fig. 1 at $t = 4.0$ s for 150 ms. As a result, the convergence curves of $1/V_C$, IAE of ΔP_{Bus4} , L_{SC} , and E_{SC0} are shown in Fig. 6. The optimized parameters of SMES-FCL and SMES are provided in Table II. Note that the SC inductance and the initial stored energy of the SC in case of SMES-FCL are lower than those in case of the SMES unit. Fig. 7 depicts the power fluctuation at bus 4 under the wind speeds in Fig. 5 without the fault. In cases of without controller, the power largely fluctuates. On the other hand, both SMES and SMES-FCL are

TABLE II
OPTIMIZED PARAMETERS OF SMES AND SMES-FCL

Parameters	SMES	SMES-FCL
L_{SC} (H)	2.5	0.99
I_{SC0} (kA)	1.2	1.25
E_{SC0} (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

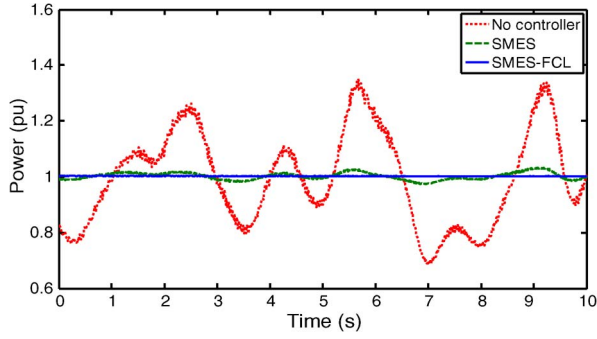


Fig. 7. Power flow at bus 4.

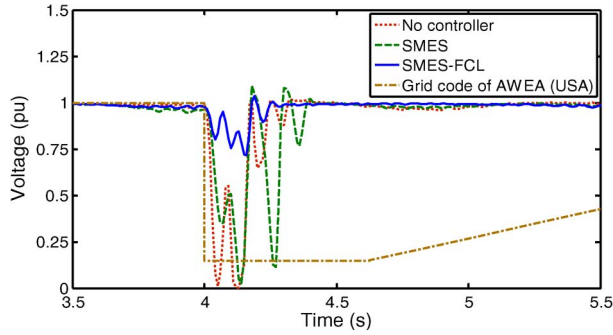


Fig. 8. Terminal voltage of DFIG1 at bus 1.

able to get rid of the power fluctuation effectively. Nevertheless, the SMES-FCL provides better power smoothing effect than the SMES unit.

Fig. 8 shows the terminal voltage of DFIG1 at bus 1 with respect to the allowable voltage criteria of the AWEA grid code of USA [12]. Based on the time duration and the AWEA voltage criteria, the wind turbine must withstand the terminal voltage drop up to 15% of the nominal voltage for 625 ms. In cases of without controller and with SMES, the terminal voltage drop is lower than the acceptable criteria of the grid code. The DFIG1 cannot ride through the fault. In case of SMES-FCL, on the other side, the voltage drop is in the acceptable range of grid code. Subsequently, the voltage fluctuation is completely eliminated. Consequently, the LVRT capability of DFIG1 can be augmented by SMES-FCL. Note that simulation results in case of DFIG2 are in the same fashion as those of DFIG1. Fig. 9 shows the maximum voltage drop during faults. In case of SMES-SFCL, the maximum voltage drops at the DFIG terminal buses 1, 2, and 3 are in the allowable criteria, i.e. at 85% of the nominal voltage.

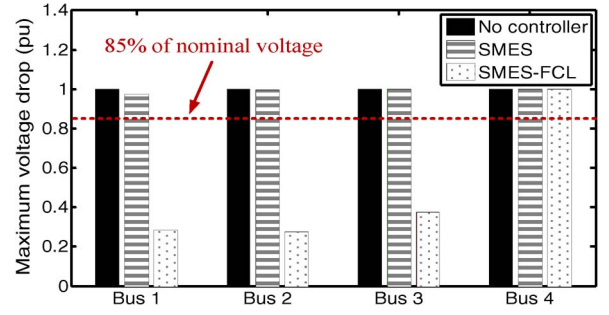


Fig. 9. Maximum voltage drop.

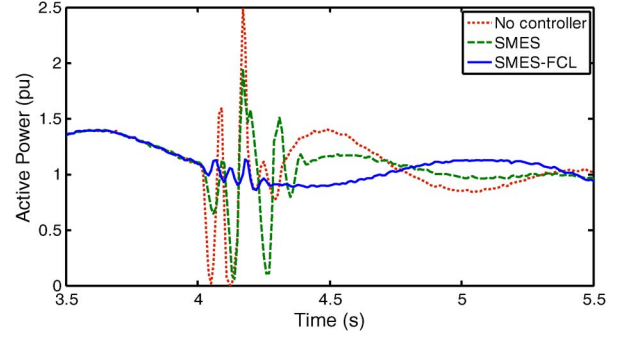


Fig. 10. Power flow at bus 1.

TABLE III
NECESSARY MW AND MJ CAPACITIES OF SMES

Capacity	SMES	SMES-FCL
MW	3.81	2.68
MJ	2.38	1.28

Fig. 10 depicts the power fluctuation at the DFIG1 terminal bus 1. Without any device and with SMES, the transient power drastically fluctuates. Since the fault is adjacent to the SMES location, the SMES control effect is entirely deteriorated. On the contrary, the SMES-FCL can effectively suppress the power fluctuation and damp out the remaining power swing.

Finally, the necessary MW and MJ capacities of the SMES for LVRT enhancement are given in Table III. The MW capacity is obtained from the maximum power output deviation of SMES. The MJ capacity is determined from the maximum difference between the initial stored energy and the energy output of SMES. With the support of the FCL part, the necessary MW and MJ capacities of SMES in case of the SMES-FCL are less than those in case of the SMES unit.

V. CONCLUSION

The SMES-FCL and parameters optimization for enhancing LVRT capability and suppressing power fluctuation of DFIG wind turbine in a DC microgrid is proposed. Study results ensure that the SMES-FCL with lower SC inductance and MW/MJ capacities provides better control effect than the SMES. The SMES-FCL can be expected as the smart device to contribute not only the stabilizing effect, but also the significant economic merit in the future DC power grid.

REFERENCES

- [1] K. Strunz, E. Abbasi, and D. N. Huu, "DC microgrid for wind and solar power integration," *IEEE J. Emerging Sel. Topics Power Electron.*, vol. 2, no. 1, pp. 115–126, Mar. 2014.
- [2] W. Guo, L. Xiao, and S. Dai, "Enhancing low-voltage ride-through capability and smoothing power output 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.
- [3] T. Kinjo, T. Senjyu, N. Urasaki, and H. Fujita, "Terminal-voltage and output-power regulation of wind-turbine generator by series and parallel compensation using SMES," *Proc. Inst. Elect. Eng.—Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 153, no. 3, pp. 276–282, May 2006.
- [4] Z. Wang, G. Zhang, and M. Qiu, "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.
- [5] G. Zhu, Z. Wang, X. Liu, G. Zhang, and X. Jiang, "Transient behavior research on the combined equipment of SMES-SFCL," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, no. 2, pp. 778–781, Jun. 2004.
- [6] G. Zhu, Z. Wang, and G. Zhang, "Research on a combined device SMES-SFCL based on multi-object optimization," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, pt. 2, no. 2, pp. 2019–2022, Jun. 2005.
- [7] C. Zhao *et al.*, "Development and test of a Superconducting Fault Current Limiter-Magnetic Energy Storage (SFCL-MES) system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pt. 2, no. 2, pp. 2014–2017, Jun. 2007.
- [8] E. R. Lee *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.
- [9] J. Machowski, J. Bialek, and J. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.
- [10] J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, Nov. 1995, pp. 1942–1948.
- [11] Mathworks, MATLAB SimPowerSystems, Natick, MA, USA, Oct. 2004.
- [12] J. Schlabbach, "Low voltage fault ride through criteria for grid connection of wind turbine generators," in *Proc. 5th Int. Conf. Eur. Elect. Market*, 2008, pp. 1–4.

Cooperative Control of SFCL and SMES for Enhancing Fault Ride Through Capability and Smoothing Power Fluctuation of DFIG Wind Farm

Issarachai Ngamroo and Tanapon Karaipoom

Abstract—This paper deals with a cooperative control of a resistive type superconducting fault current limiter (SFCL) and a superconducting magnetic energy storage (SMES) for enhancing fault ride through (FRT) capability and smoothing power fluctuation of the doubly fed induction generator (DFIG)-based wind farm. When the system faults occur, the SFCL is used to limit the fault current, alleviate the terminal voltage drop, and transient power fluctuation so that the DFIG can ride through the fault. Subsequently, the remaining power fluctuation is suppressed by the SMES. The resistive value of the SFCL as well as the superconducting coil inductance of the SMES are simultaneously optimized so that a sudden increase in the kinetic energy in the DFIG rotor during faults, an initial stored energy in the SMES coil, an energy loss of the SFCL, and an output power fluctuation of the DFIG are minimum. The superior control effect of the cooperative SFCL and SMES over the individual device is confirmed by simulation study.

Index Terms—Doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine, optimization, superconducting fault current limiter (SFCL), superconducting magnetic energy storage (SMES).

I. INTRODUCTION

RECENTLY, the doubly fed induction generator (DFIG)-based wind farms have been paid attentions extensively due to low cost of installation, controllable power output etc. [1]. Nevertheless, the DFIG faces two unavoidable problems, i.e., output power fluctuation and fault ride through (FRT) capability. The power fluctuation due to intermittent wind speeds may deteriorate power quality and system stability. Besides, the DFIG is vulnerable to the low voltage situation due to system faults. To protect the damage of the DFIG, the DFIG will be tripped from the system. The tripping of large wind farms may cause the system instability.

To overcome both problems, the superconducting magnetic energy storage (SMES) has been applied [2]–[4]. Since the SMES has no any effect on the fault current limitation, the enhancement of the FRT capability by the SMES may be degraded when severe faults are adjacent to the SMES location. On the other hand, the resistive type superconducting fault current limiter (SFCL) has been used to enhance the FRT capability

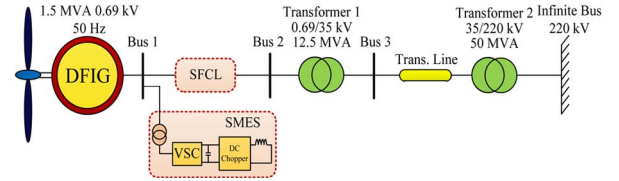


Fig. 1. DFIG wind turbine system with SFCL and SMES.

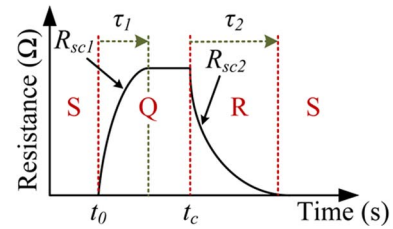


Fig. 2. Characteristic of resistive type SFCL.

of the DFIG wind turbine [5], [6]. Study results show that the higher the value of SFCL resistance, the better improvement of the FRT capability can be achieved. Nevertheless, the high resistance results in the high energy loss during the period of fault current limitation. Additionally, the resistance value of the SFCL in these works is selected based on trial-and-error which cannot guarantee the optimal value. The problems of the high energy loss and the optimal value of the resistance should be taken into account in the selection of the SFCL resistance.

To tackle all shortcomings above, the new optimization technique of the cooperative SFCL and SMES is proposed in this paper. SFCL and SMES models, optimization, and simulation results are described.

II. STUDY SYSTEM AND MODELING

A. Study System

Fig. 1 shows the grid connected-DFIG wind turbine that is used as the study system [7]. The SMES and the resistive type SFCL are installed at the DFIG terminal bus 1.

B. Resistive Type SFCL Model

Fig. 2 depicts the characteristic of the resistive type SFCL which can be represented by a time-variant resistance [5], [8]. First, the SFCL is in a superconducting (S) state and the SFCL resistance is zero. At time $t = t_0$, the quenching (Q) state starts, the resistance of the SFCL increases exponentially by

$$R_{sc1}(t) = R_{m1} (1 - \exp(-t/\tau_1)), \quad (1)$$

Manuscript received June 28, 2014; accepted July 14, 2014. Date of publication July 18, 2014; date of current version August 6, 2014. This work was supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

The authors are with the School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (e-mail: ngamroo@gmail.com; krpoom@gmail.com).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TASC.2014.2340445

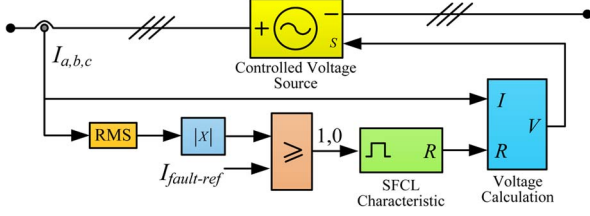


Fig. 3. SFCL model developed in MATLAB/SimPowerSystems.

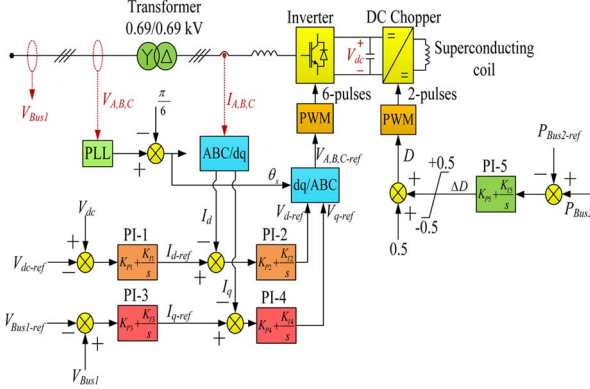


Fig. 4. SMES circuit and control system.

where $R_{sc1}(t)$ is the resistance of the SFCL from the superconducting state to the quenching state, R_{m1} is the maximum resistance, and τ_1 is the time constant of the quenching period. Subsequently, at $t = t_c$, the recovery (R) state starts and the SFCL resistance decreases exponentially by

$$R_{sc2}(t) = R_{m2} (1 - \exp(-t/\tau_2)), \quad (2)$$

where $R_{sc2}(t)$ is the value of SFCL resistance from the quenching state to the superconducting state, R_{m2} is the maximum resistance, and τ_2 is the time constant of the recovery period. Here, τ_1 and τ_2 are set at 1 ms and 50 ms, respectively. Since the quenching period and the recovery period are very short, this study assumes that $R_{m1} = R_{m2} = R_m$.

Fig. 3 shows the SFCL model developed in MATLAB/SimPowerSystems [9]. For the operation of this model, first three phase currents ($I_{a,b,c}$) are measured and used to calculate the RMS current. Subsequently, the RMS current is compared with the fault current reference ($I_{fault-ref}$). If the RMS current is greater than $I_{fault-ref}$, the signal "1" is sent to the SFCL characteristic block. As a result, the SFCL starts to operate. After that, the equivalent voltage drop across the resistance is calculated and sent to the controlled voltage source block. This equivalent voltage is injected to the AC line and shows the fault current limiting effect of the SFCL.

C. SMES Model

Fig. 4 shows the SMES circuit with the voltage source converter (VSC) control system. The SMES circuit is composed of capacitor, DC chopper, and superconducting coil with inductance (L_{SC}). Using the phase lock loop (PLL), the angle of the voltage transformation from three phase voltages (V_a, V_b, V_c) to $d-q$ axis voltages can be obtained. The VSC can be controlled by four proportional integral (PI) controllers. The first PI controller (PI-1) is used to generate the reference value of the direct axis current (I_{d-ref}) from the difference between

the actual dc link voltage (V_{dc}) and the reference value of the dc link voltage (V_{dc-ref}). By comparing I_{d-ref} and the actual current I_d , the obtained result is used as an input signal of the second PI controller (PI-2). After that, the reference value of the direct axis voltage (V_{d-ref}) is obtained from the output signal of PI-2.

In the same way, the reference value of the quadrature axis current (I_{q-ref}) is generated by the third PI controller (PI-3) which uses the difference between the actual voltage at bus 1 (V_{Bus1}) and the reference voltage at bus 1 ($V_{Bus1-ref}$) as an input signal. Subsequently, an input signal of the fourth PI controller (PI-4) is obtained by the difference between I_{q-ref} and the actual quadrature current (I_q). Consequently, the reference signal of the quadrature axis voltage (V_{q-ref}) is achieved as the output signal of PI-4. Both V_{d-ref} and V_{q-ref} are converted to three phase voltage references ($V_{A,B,C-ref}$). Comparing $V_{A,B,C-ref}$ with a triangular carrier waveform with 1980 Hz provides the gate drive signal of controlled switches in the VSC.

The PI-5 controller of DC chopper is used to control the exchange energy between the superconducting coil and the power system. The power error signal which is calculated from the difference between the actual power flow at bus 2 (P_{Bus2}) and the reference active power flow at bus 2 ($P_{Bus2-ref}$) is used as the input of PI-5. The output of the PI-5 is a duty cycle deviation (ΔD) which is added to the reference value (+0.5) to get the duty cycle (D). The electrical energy is charged from the system to the SMES coil when D is greater than 0.5. The energy is discharged from the SMES coil to the system when D is less than 0.5.

In this study, R_m , L_{SC} , and ten PI parameters are simultaneously optimized.

III. PROPOSED OPTIMIZATION

A. Optimization of SFCL

The SFCL optimization is conducted based on the suppression of the abrupt increase in the kinetic energy in the DFIG rotor during faults and the energy loss of the SFCL. As a result, not only the limitation of the fault current, but also the alleviation of the decrease in the terminal voltage and the power output can be obtained. The FRT capability enhancement of the DFIG can be expected.

As mentioned in [10], the first swings of the rotor angle and the rotor speed are minimum when the kinetic energy stored in the rotor during faults is minimized. The stored kinetic energy when the fault is cleared (E_K^f), can be expressed by

$$E_K^f = A(t_f - t_0)^2, \quad (3)$$

where

$$A = M\alpha^2/2, \quad (4)$$

where M is the inertia constant of DFIG rotor, t_0 is the time of the fault occurrence, t_f is the fault clearing time, α is the acceleration of the rotor during faults. The value of α can be approximated by

$$\alpha = (P_m - P_{ef})/M, \quad (5)$$

where P_m and P_{ef} are the mechanical power input and the electrical power output of DFIG at the time of the fault occurrence,

respectively. Here, instead of minimizing E_K^f , the minimization of A is carried out.

In addition, the energy loss of the SFCL during quenching state (E_{SFCL}) which is minimized, can be calculated by

$$E_{SFCL} = \int_{t_0}^{t_f} i^2(t) R_m dt, \quad (6)$$

where $i(t)$ is the current flow through SFCL.

B. Optimization of SMES

After the operation of the SFCL, the SMES is used to eliminate the unbalanced kinetic energy so that the remaining power fluctuation can be suppressed. Besides, during normal operation, the SMES is used to alleviate the output power fluctuation of the DFIG. Here, the minimization of the integral absolute error (IAE) of the power deviation at bus 2 (ΔP_{Bus2}) is considered by

$$IAE = \int_{t_i}^{t_s} |\Delta P_{Bus2}| dt, \quad (7)$$

where t_i and t_s are the initial time and the final time of simulation.

The initial stored energy of the SMES is determined by

$$E_{SC0} = L_{SC} I_{SC0}^2 / 2, \quad (8)$$

where E_{SC0} is the initial stored energy of SMES, and I_{SC0} is the initial coil current. Here, L_{SC} and I_{SC0} are optimized so that the initial stored energy is sufficient for achieving all objectives.

C. Formulation of Optimization Problem of SFCL and SMES

Combining (4), (6), (7), and (8), the optimization problem of SFCL and SMES can be formulated by

$$\text{Minimize } A + E_{SFCL} + IAE + E_{SC0}$$

Subject to

- (a) $0.01 \leq R_m \leq 2 \Omega$ (range of SFCL resistance)
- (b) $0.001 \leq L_{SC} \leq 5 \text{ H}$ (range of SMES coil inductance)
- (c) $0.1 \leq I_{SC0} \leq 5 \text{ kA}$ (range of SMES initial coil current)
- (d) $0.0001 \leq K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}, K_{P4}, K_{P5} \leq 5$ (range of K_P gains)
- (e) $0.0001 \leq K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}, K_{I4}, K_{I5} \leq 10$ (range of K_I gains).

The control effect of the optimized SFCL and SMES is compared with the optimized SFCL or the optimized SMES.

The optimized parameters of the SFCL is conducted by

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } A + E_{SFCL} \\ &\text{Subject to constraints (a).} \end{aligned} \quad (10)$$

The optimized parameters of the SMES is carried out by

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } IAE + E_{SC0} \\ &\text{Subject to constraints (b), (c), (d), and (e).} \end{aligned} \quad (11)$$

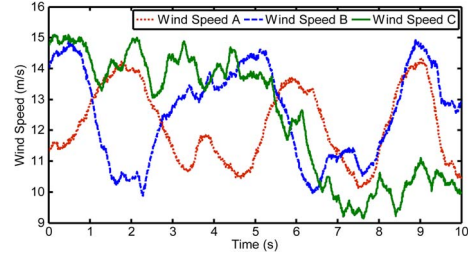


Fig. 5. Wind speed patterns.

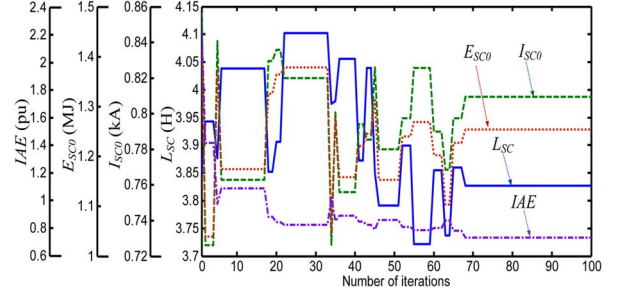


Fig. 6. Convergence curves of IAE , E_{SC0} , I_{SC0} , and L_{SC} .

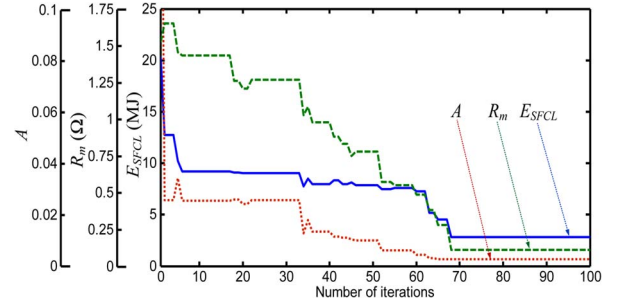


Fig. 7. Convergence curves of A , R_m , and E_{SFCL} .

The particle swarm optimization [11] is used to achieve all optimal parameters.

IV. SIMULATION STUDY

The optimization is carried out under the wind speed pattern A as shown in Fig. 5 and a temporary three phase fault at bus 3 at $t = 3 \text{ s}$ for 150 ms. After the optimization, Figs. 6 and 7 show the convergence curves of IAE , E_{SC0} , I_{SC0} , and L_{SC} as well as those of A , R_m , and E_{SFCL} , respectively. The optimized parameters of all devices are given in Table I. It can be observed that the resistance and the energy loss of the SFCL in case of the SFCL and SMES are lower than those in case of the SFCL. Additionally, the inductance and the initial stored energy of the SMES in case of the SFCL and SMES are lower than those in case of the SMES.

First, the power smoothing effect of the SMES is evaluated under three patterns of the wind speed in Fig. 5. Fig. 8 shows the active power output of the DFIG in case the wind speed A. Fig. 9 depicts the IAE of the power output deviation at bus 2 with respect to three wind patterns. Without any device, the power at bus 2 drastically fluctuates. It can be seen that the SFCL has no any effect on the alleviation of power fluctuation because the SFCL is not able to exchange the energy with the power systems. On the other hand, the SFCL and SMES as well as the SMES are able to alleviate the power fluctuation

TABLE I
OPTIMIZED PARAMETERS OF SFCL AND SMES

Parameters	SFCL	SMES	SFCL and SMES
R_m (Ω)	0.165	-	0.112
E_{SFCL} (MJ)	4.058	-	2.812
L_{SC} (H)	-	4.521	3.827
I_{SC0} (kA)	-	0.826	0.809
E_{SC0} (MJ)	-	1.542	1.252
K_{P1}, K_{I1}	-	4.834, 2.123	2.120, 4.586
K_{P2}, K_{I2}	-	0.367, 6.993	4.103, 7.179
K_{P3}, K_{I3}	-	2.716, 5.090	0.833, 4.592
K_{P4}, K_{I4}	-	0.489, 4.838	0.496, 4.815
K_{P5}, K_{I5}	-	2.971, 5.079	3.092, 0.043

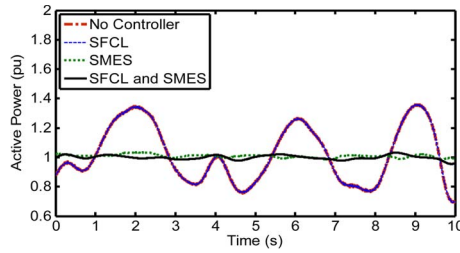


Fig. 8. Active power flow at bus 2 (Wind speed A).

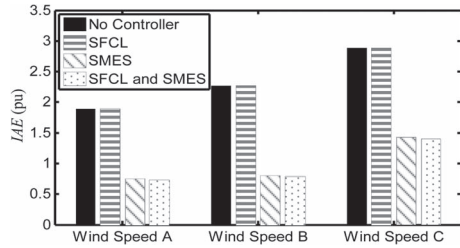


Fig. 9. IAE of power deviation at bus 2.

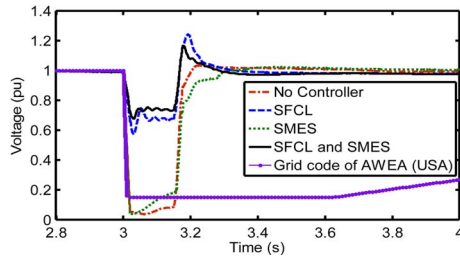


Fig. 10. Terminal voltage of DFIG at bus 1.

effectively. The IAE in case of the SFCL and SMES is almost the same as that in case of the SMES.

Next, the time simulation under a temporary three phase fault at bus 3 at $t = 3$ s for 150 ms is conducted to evaluate the improvement of the FRT capability by the SFCL and SMES. According to the grid code of USA AWEA, the wind turbine must withstand 15% of voltage dip at the connection point with duration of up to 625 ms [12]. Fig. 10 shows the terminal voltage of the DFIG at bus 1. The voltage dips in case of without any device as well as with the SMES are lower than the minimum acceptable voltage of the grid code. This indicates that the DFIG cannot ride through the fault. On the other hand, in case of the SFCL as well as the SFCL and SMES, the voltage dips are still in the acceptable range of the grid code.

TABLE II
NECESSARY MW AND MJ CAPACITIES OF SMES

Capacity	SMES	SMES-FCL
MW	3.561	1.609
MJ	8.06	7.778

Nevertheless, the SFCL and SMES provide better control effect than the SFCL. The cooperative control of SFCL and SMES not only suppresses the transient voltage effectively, but also eliminates the following voltage fluctuation entirely.

Table II shows the comparison results of necessary MW and MJ capacities of the SMES under the applied fault. The MW capacity is calculated from the maximum power output of the SMES. The MJ capacity is determined from the difference between the maximum and the minimum energy outputs of the SMES. With the contribution of the SFCL, necessary MW and MJ capacities of SMES are less than those in case of the only SMES.

V. CONCLUSION

The cooperative control of SFCL and SMES for augmenting FRT capability and suppressing power fluctuation of the DFIG wind turbine is proposed. The parameters optimization of SFCL and SMES is automatically conducted to achieve the desired objectives. Study results confirm that the cooperative SFCL and SMES not only provide superior control effect than the individual device, but also reduce the power and energy capacities of SMES.

REFERENCES

- [1] G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [2] J. Shi, Y. J. Tang, L. Ren, J. D. Li, and S. J. Chen, "Application of SMES in wind farm to improve voltage stability," *Physica C, Supercond.*, vol. 468, no. 15–20, pp. 2100–2103, Sep. 2008.
- [3] S.-T. Kim, B.-K. Kang, S.-H. Bae, and J.-W. Park, "Application of SMES and grid code compliance to wind/photovoltaic generation system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, p. 5000804, Jun. 2013.
- [4] A. M. S. Yunus, M. A. S. Masoum, and A. Abu-Siada, "Application of SMES to enhance the dynamic performance of DFIG during voltage sag and swell," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 4, p. 5702009, Aug. 2013.
- [5] W.-J. Park, B. C. Sung, and J.-W. Park, "The effect of SFCL on electric power grid with wind-turbine generation system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, no. 3, pp. 1177–1181, Jun. 2010.
- [6] M. E. Elshiekh, D. A. Mansour, and A. M. Azmy, "Improving fault ride-through capability of DFIG-based wind turbine using superconducting fault current limiter," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, p. 5601204, Jun. 2013.
- [7] W. Guo, L. Xiao, and S. Dai, "Enhancing low-voltage ride-through capability and smoothing power output 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.
- [8] K. Hongesombut, Y. Mitani, and K. Tsuji, "Optimal location assignment and design of superconducting fault current limiters applied to loop power systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, no. 2, pp. 1828–1831, Jun. 2003.
- [9] MATLAB SimPowerSystems, New York, NY, USA: Mathworks, 2014.
- [10] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [11] J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, Nov. 1995, pp. 1942–1948.
- [12] J. Schlabbach, "Low voltage fault ride through criteria for grid connection of wind turbine generators," in *Proc. 5th Int. Conf. Eur. Elect. Market*, 2008, pp. 1–4.

Enhancement of LVRT Performance and Alleviation of Power Fluctuation of DFIG Wind Turbine in DC Microgrid by SMES

Tanapon Karaipoom, Issarachai Ngamroo
School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
krpoom@gmail.com, ngamroo@gmail.com

Abstract—Recently, a doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine has been extensively paid attentions as a renewable energy source in the DC microgrid. However, the inevitable problems of DFIG wind turbine are low voltage ride through (LVRT) due to the occurrence of faults as well as the power fluctuation. To overcome both problems, a superconducting magnetic energy storage (SMES) unit which is able to provide fast control of active and reactive power, can be used. This paper applies a SMES unit to enhance LVRT performance and alleviate the power fluctuation of DFIG wind turbine in the DC microgrid. The SMES circuit is mainly composed of the DC chopper. The PI controllers of DC chopper are used to control the exchange energy between the superconducting coil and the system. Simulation study using MATLAB/SimPowerSystems ensures the SMES control effect on both enhancing LVRT performance and smoothing power fluctuation of DFIG wind turbine.

Keywords—superconducting magnetic energy storage; low voltage ride through capability; power fluctuation; doubly-fed induction generator wind turbine; dc microgrid

I. STUDY SYSTEM AND PROPOSED SMES CONTROL

Fig. 1 delineates the study DC microgrid. Two DFIG wind turbines (DFIG-A and DFIG-B) are used to supply electric power to loads. At the normal operation, the power output fluctuation from DFIG wind turbines causes the problem of power quality. On the other hand, when the faults such as short circuits take place, the DFIG wind turbine may not ride through the low voltage situation and be disconnected from the system. This tripping of DFIG wind turbine may result in the system instability [1]. To tackle both problems, the SMES unit with the fast control of active and reactive power, can be applied. Here, the SMES unit is installed at bus 1.

Fig. 2 shows the SMES circuit which is composed of capacitor (C), DC chopper, and superconducting coil. Fig. 3 depicts the controller of DC chopper which is used to control the exchange energy between the superconducting coil and the system. The power error signal which is calculated from the difference between the actual power flow through bus 1 (P_{Bus1}) and the reference power flow through bus 1 (P_{Bus1_ref}) is used as the input of PI1 controller. The output of PI1 is the reference current flow through bus 1 (I_{Bus1_ref}). The current error signal

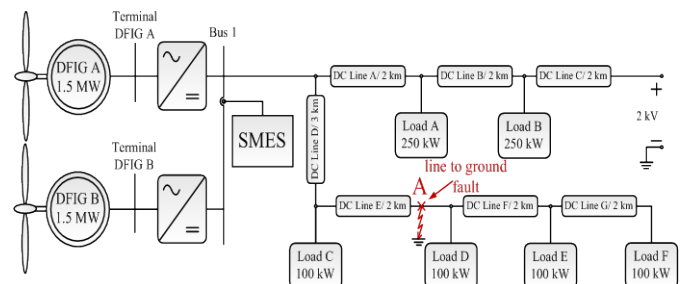


Figure 1. DC microgrid with DFIG wind turbines and SMES.

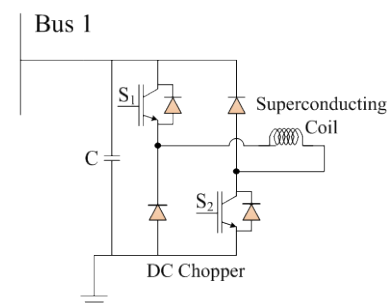


Figure 2. SMES circuit.

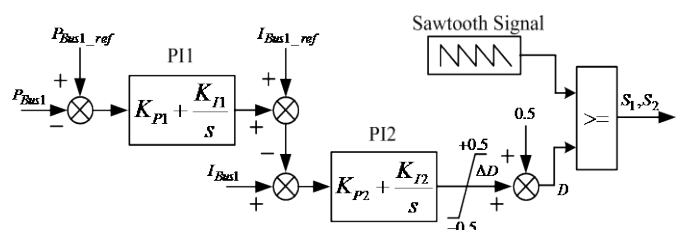


Figure 3. Controller of DC chopper.

which is calculated from the difference between the actual current flow through bus 1 (I_{Bus1}) and I_{Bus1_ref} is used as the input of PI2 controller. The output of the PI2 is a duty cycle deviation (ΔD) which is added to the reference value (+0.5). As a result, the duty cycle (D) is applied to control the chopper so that the energy stored in the superconducting coil can be appropriately exchanged with the system. When the duty cycle is greater than 0.5 (50 %), the current flows through the IGBT

switches S1 and S2. The electrical energy is charged from the system to the superconducting coil. On the contrary, when the duty cycle is less than 0.5, the current flows through two diodes. The energy is discharged from the superconducting coil to the system. By comparing the duty cycle with a triangular carrier waveform with 1980 Hz, the gate drive signals of S1 and S2 can be obtained.

TABLE I. PARAMETERS OF SMES

Coil inductance (H)	2.5	K_{PI}	1.5
Initial coil current (A)	1200	K_{P2}	2.5
Initial stored energy (MJ)	1.8	K_{II}, K_{I2}	5.0

II. SIMULATION RESULTS

In simulation study, the MATLAB/SimPowerSystems is used to evaluate the SMES control effect. The SMES parameters are appropriately selected as given in Table I. Fig. 4 shows the wind speeds of DFIG-A and DFIG-B. Fig. 5 depicts the DC power at bus 1. Without SMES, the power fluctuation is very high. On the other hand, the SMES can alleviate the power fluctuation effectively. The power smoothing effect of SMES can be confirmed.

Next, to evaluate the SMES control effect on the LVRT capability enhancement, it is assumed that the fault to ground occurs at point A in Fig. 1 at $t = 4$ s for 150 ms. Fig. 6 shows the terminal voltage of DFIG-A with respect to the acceptable minimum voltage of AWEA grid code of USA [1]. Without SMES, the terminal voltage drops below the allowable minimum voltage of grid code. The DFIG wind turbine cannot ride through the fault. As a result, the DFIG will be disconnected from the system. In case of SMES, the decrease in the DFIG terminal voltage is in the acceptable range of grid code. Fig. 7 depicts the active power output of DFIG-A. Clearly, the SMES can suppress the transient power fluctuation after the occurrence of fault. Simulation results confirm that the SMES placed at the DFIG terminal not only effectively alleviates the power output fluctuation, but also successfully supports the fault ride through capability of DFIG.

Nevertheless, there are some problems which are necessary to be considered as follows.

- When the fault location is adjacent to the SMES, the SMES control effect on an enhancement of LVRT capability is highly deteriorated. This may cause the large terminal voltage drop of DFIG wind turbine lower than the acceptable range of grid code, and the tripping of DFIG. To handle this problem, the improvement of SMES circuit with fault current limiting function is importantly required.
- Since the SMES parameters in Table I are suitably selected, these parameters cannot guarantee the control effect of SMES at other operating conditions. The optimization technique of SMES parameters such as coil inductance, initial stored energy, and PI parameters of DC chopper is significantly required.

These problems will be solved by the proposed new technique which will be presented in [2].

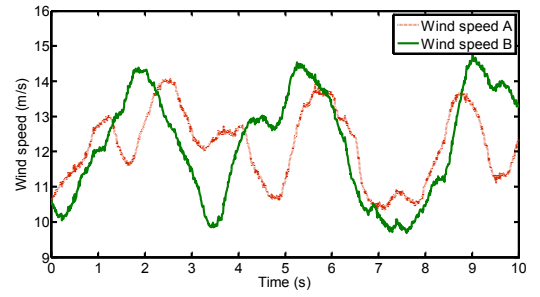


Figure 4. Wind speeds.

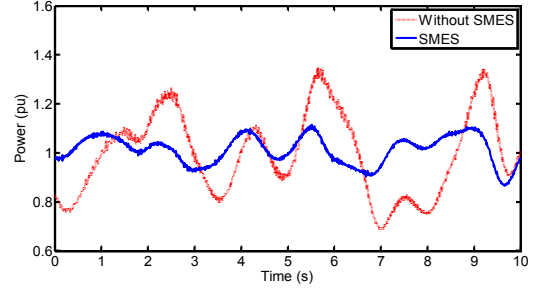


Figure 5. DC power at bus 1.

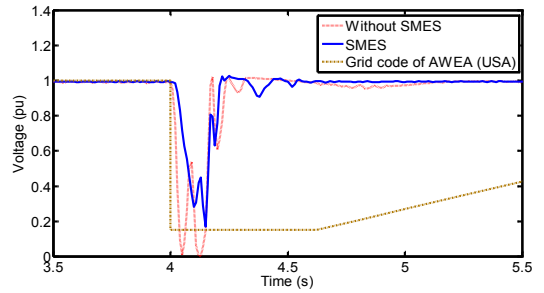


Figure 6. Terminal voltage of DFIG-A.

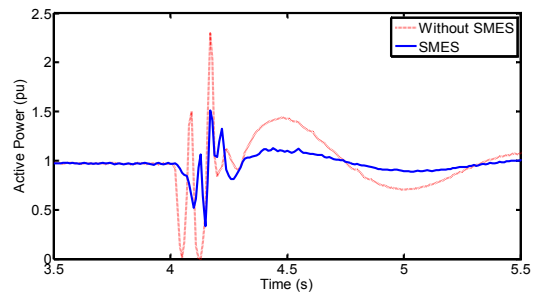


Figure 7. Active power at terminal of DFIG-A.

REFERENCES

- [1] J. Schlabbach, "Low voltage fault ride through criteria for grid connection of wind turbine generators," 5th International Conference on European Electricity Market, pp. 1-4, Lisboa, Portugal, 28-30 May 2008.
- [2] T. K. Araipoom, and I. N. Gamroo, "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. (to be published)

TRANSIENT STABILITY AUGMENTATION OF DFIG BASED-WIND POWER BY SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER

Tanapon Karaipoom and Issarachai Ngamroo

School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand. (e-mail:karaipoom@hotmail.com)

ABSTRACT

Doubly Fed Induction Generators (DFIGs) are nowadays widely used in wind energy conversion systems. However the DFIG is very sensitive to the grid fault. Especially, the terminal voltage drop at DFIG bus due to fault may damage both rotor side and grid side converters because of the over current in the rotor windings. This may result in the system transient instability. This paper applies the resistive type superconducting fault current limiter (RSFCL) to enhance the transient stability of DFIG-based wind system. The golden section optimization is applied to automatically tune the resistive value of the RSFCL by suppressing the increase in kinetic energy stored in the rotor during fault. Simulation results by PSCAD/EMTDC demonstrate that the proposed optimal RSFCL is very effective for transient stability improvement of DFIG system in comparison with the non-optimal RSFCL.

Keywords: Doubly fed induction generator, resistive type superconducting fault current limiter

1. INTRODUCTION

Nowadays, the penetration of wind power generations into power grids increases significantly. Particularly, the doubly fed induction generator (DFIG) is extensively used in the wind energy conversion system [1]. In the DFIG, the stator is connected to grid while the rotor side is fed via the rotor and grid side converters. By controlling the rotor and grid side converters, the maximum efficiency of power conversion of a wind generator can be achieved. With variable speed operation, a DFIG system can harvest more energy from the wind than a fixed-speed wind energy conversion system of the same capacity. The DFIG offer many advantages such as easy implementation of power factor correction, reduced converter rating, low cost and reduced losses. However, the main disadvantage of DFIG is very sensitive to the grid fault which damages the stable system. Especially, the voltage dip damages the rotor side and grid side converters due to over current in the rotor windings [2]. Without the proper countermeasure, the transient stability of DFIG-based wind system may not be maintained.

To enhance the transient stability of DFIG, the resistive type superconducting fault current limiter (RSFCL) has been successfully applied [3,4]. However, the resistive value of RSFCL in these works has not been optimally tuned. This cannot guarantee the stabilizing effect of RSFCL.

To overcome this problem, this paper focuses on an optimization of RSFCL for transient stability enhancement of DFIG-based wind generation system. The optimal resistive value of SFCL is achieved by the golden section optimization based on the suppression of the increase in kinetic energy stored in the rotor during fault. Simulation study using PSCAD/EMTDC confirms that the stabilizing effect of the optimal SFCL is superior to that of the non-optimal SFCL

2. STUDY SYSTEM AND MODELLING

2.1 Study System

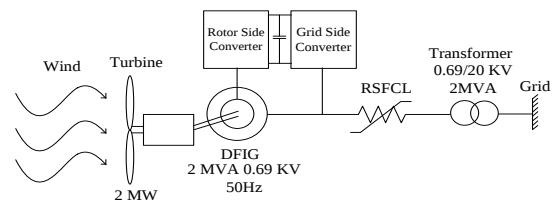


Fig. 1 Diagram of DFIG with installed RSFCL.

TABLE I DFIG PARAMETERS

Rated power	2 MVA
Rated voltage	0.69 kV
Base angular frequency	314.16 rad/s
Stator/Rotor turns ratio	0.4333
Angular moment of inertia	1.99 s
Mechanical damping	0.02 pu
Stator resistance	0.0175 pu
Rotor resistance	0.019 pu
Stator leakage inductance	0.2571 pu
Rotor leakage inductance	0.295 pu
Mutual inductance	6.921 pu
Rated wind speed	12 m/s
Rotor radius	41 m
DC-link capacitor	0.003 F

Fig.1 shows a wind energy conversion system with DFIG connected to an infinite bus. The RSFCL is

connected in series at the terminal the DFIG. The DFIG parameters used in the model are given in Table I.

2.2 RSFCL Model

The simple structure of RSFCL is shown in Fig.2. The RSFCL unit consists of the switch circuit, the resistance variable which is connected in parallel to the superconducting resistor in order to an alternative path to the current during a fault. During fault condition, the switch is opened and the current is limited by resistor. At normal condition, the switch is closed and the current flows via the switch.

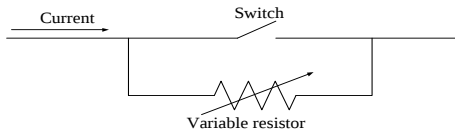


Fig. 2 The structure of RSFCL.

Generally, there are three states of RSFCL operation, i.e. superconducting state, quenching state and recovery state. At the normal condition, the RSFCL operates in the superconducting state. The resistance of RSFCL is zero. During fault, when a fault current reaches the critical current value, the RSFCL will operate in quenching state. The resistance of RSFCL increases exponentially according to

$$R_{sc}(t) = R_{m1} \left(1 - \exp\left(-t/t_1\right) \right) \quad (1)$$

Where R_{m1} is the maximum resistance of RSFCL during normal state, t_1 is the time constant value during superconducting state and quenching state. At quenching state, the RSFCL will be the maximum value R_{m1} . After clearing fault, when the fault current is lower than the recovery current, the resistance of RSFCL will change during recovery state according to

$$R_{sc}(t) = R_{m2} \left(\exp\left(-t/t_2\right) \right) \quad (2)$$

Where R_{m2} is the maximum resistance of SFCL during recovery state, t_2 is the time constant value during recovery state to superconducting state.

Here, the value of maximum resistance of SFCL (R_{m1}, R_{m2}) are set equal to R_m since the quenching state and recovery state are very short period.

3. PROPOSED OPTIMIZATION

3.1 Energy Function Method

The energy function of a multi-machine power system can expressed as [5]

$$V = V_K(\omega) + V_P(\delta) \quad (3)$$

Where V_K is the kinetic energy which is the function of the rotor speed ω , V_P is the potential energy which is the function of the rotor angle δ . The rotor angle and mechanical speed of each generator during fault are δ^f and ω^f , respectively. The energy function during fault is given by

$$V_f = V(\delta^f, \omega^f) \quad (4)$$

If V_f is minimized, the first swing of rotor angle can be reduced. Since the fault duration is very short, the change in δ^f is small so that V_P rarely changes. As a result, the kinetic energy during fault can be assumed to be the energy function during fault, i.e.

$$V_K^f \triangleq V_K(\omega^f) \quad (5)$$

The total kinetic energy can be calculated from

$$V_K = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\omega_i - \omega_0)^2 \quad (6)$$

Where M_i is the moment of inertia constant, ω_0 is speed of inertia center, ω_i is angular speed of each i^{th} generator. When the fault duration is very short, the mechanical power (P_m) can be assumed to be constant.

The mechanical rotor speed during fault ω_i^f can be calculated by

$$\omega_i^f = \omega_i(0) + \alpha_i t_f \quad (7)$$

Where t_f is the fault clearing time, α_i is the acceleration of i^{th} generator and $\omega_i(0)$ is the i^{th} rotor speed at the initial time $t = 0$ s.

The value of α_i can be approximated by

$$\alpha_i = (P_{mi} - P_{fi})/M_i \quad (8)$$

Where M_i is the inertia constant of i^{th} generator, P_{mi} and P_{fi} are mechanical and electrical power during fault of i^{th} generator, respectively. As a result, the kinetic energy during fault V_K^f can be approximated as

$$V_K^f \approx A t_f^2 \quad (9)$$

Where

$$A \triangleq \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\alpha_i - \alpha_0)^2 \quad (10)$$

$$\alpha_0 \triangleq \frac{\sum_{i=1}^n M_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (11)$$

Accordingly, the increase in rotor angle and speed of generator during fault is small when V_K^f is minimal. Here, instead of minimizing V_K^f , the minimization of A will be performed. The optimization problem can be formulated as follows

$$\text{Minimize } A \quad (12)$$

Subject to $R_{m(min)} < R_m < R_{m(max)}$

Where $R_{m(max)}$ and $R_{m(min)}$ are maximum and minimum values of the resistance of RSFCL. This problem is solved by the golden section optimization.

3.2 Golden section optimization

The golden section search [6] is a technique for finding the extreme value of a strictly unimodal function by successively narrowing the range of values inside where the extreme value is known to exist. The golden ratio is often called the golden section. The golden ratio is the ratio of the sum of the quantities to the larger quantity is equal to the ratio of the larger quantity to the smaller one as shown in Fig. 3.

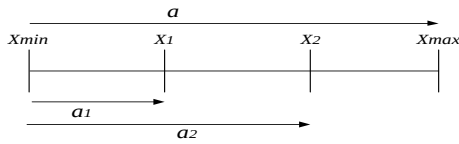


Fig. 3 Interval of a .

The interval a can be expressed as

$$a = a_1 + a_2 \quad (13)$$

$$\varphi = \frac{a}{a_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad (14)$$

Substituting (13) into (14) yields

$$1 + \varphi = \frac{1}{\varphi} \quad (15)$$

Solve for φ

$$\varphi = 0.61803$$

So the ranges of x_1 and x_2 are determined by

$$x_1 = x_{max} - \varphi \cdot (x_{max} - x_{min}) \quad (16)$$

$$x_2 = x_{min} + \varphi \cdot (x_{max} - x_{min}) \quad (17)$$

Where x_{max} and x_{min} are the maximum and minimum values of the range. The error which represents the closeness to the extreme value can be calculated by

$$err = (1 - \varphi) \cdot (x_{max} - x_{min}) \quad (18)$$

This technique can be applied to locate the minimum value by taking the following steps:

1. Define an interval with a single solution inside the range sign of the curvature.
2. Divide interval into 3 point sections by adding two interval between ends.
3. Evaluate the function at the two internal points $x_1 - x_2$ and check condition hence,

If $f(x_1) > f(x_2)$ then the minimum is between x_2 and x_{max}

If $f(x_1) < f(x_2)$ then the minimum is between x_{min} and x_1

4. Divide new smaller interval into 3 sections and start over.

The optimization is carried out until err is less than the tolerance limit. The x_{max} and x_{min} are specified by $R_{m(max)}$ and $R_{m(min)}$, respectively. Fig.4 shows the flowchart of golden section optimization in PSCAD/EMTDC simulation tool.

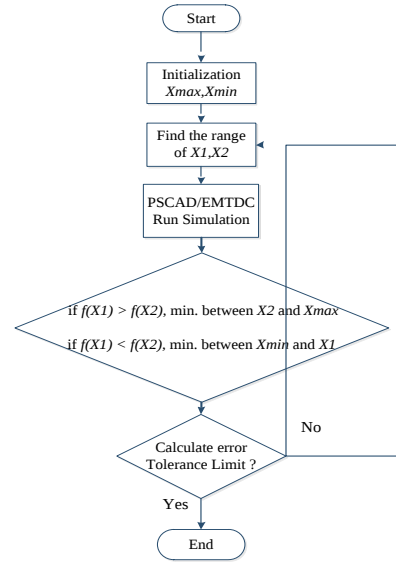


Fig. 4 Flowchart of golden section optimization.

The golden section search is suitable for both discontinuous and continuous functions with single variable. However, it has to search in a narrow range since the considered function may be a non-unimodal function. Here, the search range of RSFCL is set as $0.01 < R_m < 1$.

4. SIMULATION STUDY

After the optimization process, the optimal R_m is obtained at 0.674 pu or 0.1604 Ω . Simulations were performed with a temporary three phase symmetrical circuit fault occurring at the high voltage side of transformer at $t = 1.5$ s for 70 ms. Fig. 5 shows the increase in kinetic energy stored in the rotor during fault. Without RSFCL, the increase in kinetic energy is very large. On the other hand, the kinetic energy is considerably reduced by the optimized RSFCL.

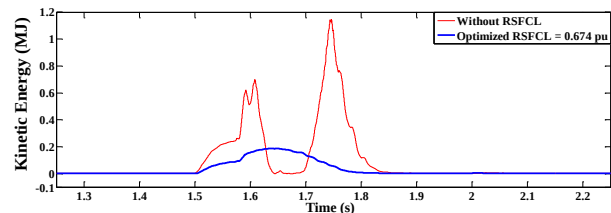


Fig. 5 Kinetic energy stored in a rotor during fault.

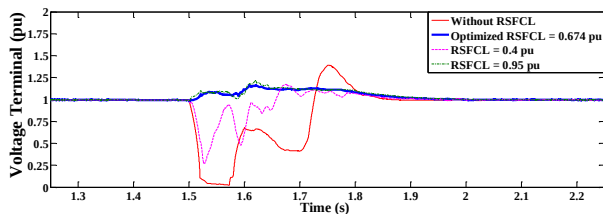


Fig. 6 Voltage terminal of DFIG.

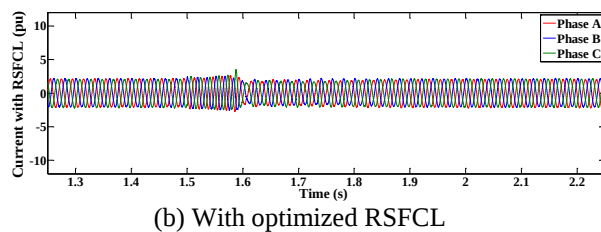
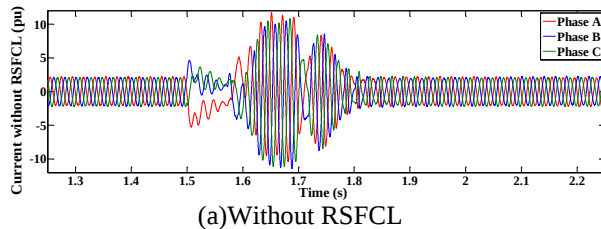


Fig. 7 DFIG current.

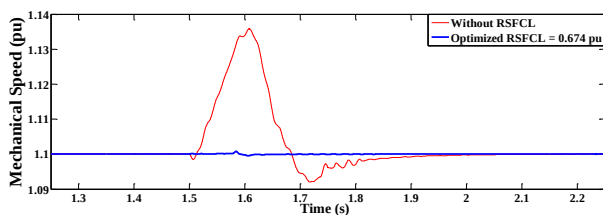


Fig. 8 Mechanical speed of DFIG.

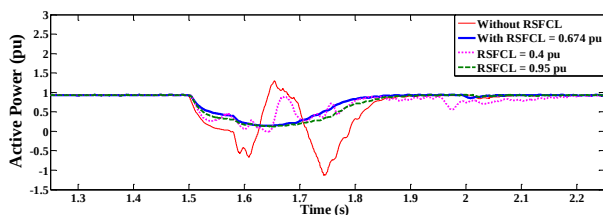


Fig. 9 Active power output of DFIG.

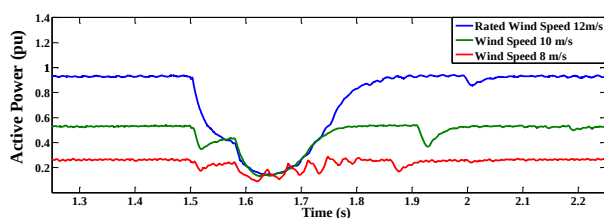


Fig. 10 Active power output of DFIG at different wind speeds.

Fig. 6 depicts the terminal voltage of DFIG. Without RSFCL, the voltage drops largely so that the

DFIG cannot ride through the fault. On the other hand, the optimized RSFCL shows superior low voltage ride through effect over the non-optimal RSFCL. Fig. 7 shows three phase current of DFIG during fault. Clearly, RSFCL is able to reduce the fault current substantially. Fig. 8 indicates the mechanical speed of rotor. Without RSFCL, the rotor speed changes considerably. With RSFCL, the rotor speed is almost constant. Fig. 9 shows the active power output of DFIG. Without RSFCL, the power fluctuation is very severe. The optimized RSFCL shows better damping effect on the active power fluctuation than the non-optimal RSFCL. Fig. 10 depicts the active power output of DFIG under the occurrence of the same fault at 8, 10 and 12 m/s of wind speed. The optimized RSFCL is able to robustly stabilize the active power fluctuation at different wind speed.

5. CONCLUSION

The optimization technique of RSFCL for the transient stability augmentation of the DFIG-based wind energy conversion system has been proposed. The optimization problem is formulated based on the minimization of an increase in kinetic energy stored in the rotor during fault. The golden section optimization is applied to automatically tune the resistance of SFCL. Simulation results ensure that the optimized SFCL not only enhances the fault ride through capability, but also improves the transient stability of DFIG effectively.

REFERENCES

- [1] R. Wegener, S. Soter, "Development of Induction Machines in Wind Power Technology", *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, Vol.2, pp.1490-1495, May 2007.
- [2] Yun Wang, Shuju Hu, Dongli Zhao and Honghua Xu, "Low Voltage Ride Through Solution for Doubly Fed Wind-Power Induction Generator and Experimental Validation", *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp.588 - 592, Oct. 2010.
- [3] Woo-Jae Park, Byung Chul Sung and Jung-Wook Park, "The Effect of SFCL on Electric Power Grid With Wind-Turbine Generation System", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.20, pp.1177-1181, June 2010.
- [4] S. Falahzadeh and H. Heydari, "Study of RSFCL effect to improve the behavior of DFIG during a fault", *Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG)*, pp.86-91, 6-8 March 2012.
- [5] Fang Da-Zhong, T.S. Chung, Zhang Yao, "Corrected transient energy function and its application to transient stability margin assessment", *Fourth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM-97)*, Vol.1, pp.310-313, Nov 1997.
- [6] M. Akhtaruzzaman, A.A. Shafie, T. Ahsan, M.S. Alam, S.M. Raihan, M.K. Hasan and M.B. Haider, "Golden Ratio, the Phi, and Its Geometrical Substantiation", *IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD)*, pp.425-430, Dec. 2011.

Enhancement of Fault Ride Through Capability of DFIG Wind Turbine by Optimal SMES Unit

Tanapon Karaipoom*, Issarachai Ngamroo**

Abstract – This paper presents the optimization of superconducting magnetic energy storage (SMES) for enhancement of the fault ride through (FRT) capability of doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine. Under the occurrence of the severe faults, the DFIG may not be able to ride through the fault and is disconnected from the system. This tripping of DFIG may cause the system instability. To enhance the FRT capability of DFIG, the SMES is applied. Nevertheless, the SMES coil which is one of the vital components, should be carefully specified. Here, the optimization of SMES coil size for necessary stored energy is formulated based on energy function technique. The genetic algorithm is applied to achieve the optimal parameters automatically. Simulation study using PSCAD/EMTDC shows that the FRT capability enhancement of the proposed SMES with optimal coil size is superior to that of the non-optimal SMES with larger coil size. Besides, the transient stabilizing effect of the optimal SMES is higher than that of the non-optimal SMES.

Keywords: doubly fed induction generator, fault ride through, genetic algorithm, superconducting magnetic energy storage.

1. Introduction

Recently, the wind power generators have been installed significantly in many countries. In particular, the wind turbine equipped with doubly fed induction generator (DFIG) is widely used in wind energy conversion systems since the maximum efficiency of power conversion of DFIG can be achieved with variable speed operation [1]. However, a DFIG also suffers from grid faults. When the severe fault occurs, it may cause the large voltage dip at the terminal of DFIG. If the DFIG cannot ride through the fault, the converter of DFIG may get damaged due to the large fault current. To protect the converter from the fault current, the DFIG will be tripped from the grid. The tripping of DFIG may lead to power system instability [2].

To improve the fault ride through capability of DFIG wind turbines, the Superconducting magnetic energy storage (SMES) can be applied. The SMES is the smart energy storage device which is able to control active and

reactive powers quickly and simultaneously [3]. In [4-6], the SMES has been successfully applied to enhancement of FRT capability of DFIG. However, the superconducting coil which is the most vital component of SMES in these works has not been optimally tuned. The non-optimal coil size of SMES may significantly affect the installation cost of SMES.

To tackle this problem, this paper focuses on a new optimization technique of a SMES unit for enhancement of the FRT capability of DFIG based on energy function method. The optimization of the superconducting coil size and necessary initial stored energy of SMES is carried out so that the increase in the kinetic energy stored in the rotor of DFIG during fault is minimized. The genetic algorithm (GA) is used to achieve the optimal parameters. Simulation study using PSCAD/EMTDC confirms that the FRT capability enhancement and transient stabilizing effect of the optimal coil size of SMES is superior to that of the non-optimal SMES.

The organization of this paper is given as follows. First, the study system and modeling is described. Next, the proposed optimization is explained. Subsequently, simulation results are provided. Finally, conclusion is given.

* Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (kpoom@gmail.com)

** Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (ngamroo@gmail.com)

2. Study System and Modeling

2.1 Study System

Fig. 1 depicts the study system of DFIG wind turbine connected to infinite bus. In DFIG, the stator (grid) side is connected to the power system while the rotor side is fed via the rotor and grid side converters, the maximum power can be controlled by the rotor and grid side converters. In normal operation, the rotor side converter is controlled to adjust the speed of the DFIG in order to get maximum power transfer from wind energy, while the grid-side converter controls the dc link capacitor voltage and operation at unity power factor. The DFIG parameters are given in Table I. Here, the SMES is connected to DFIG terminal at bus 1 for the purpose of compensating the active and reactive power for enhancement of fault ride through capability of DFIG.

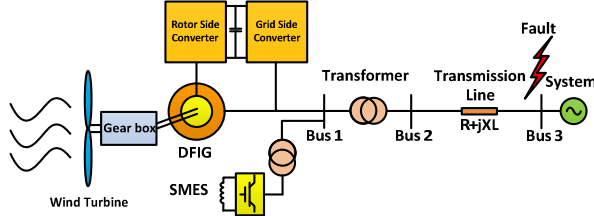


Fig. 1. Diagram of DFIG installed with SMES.

Table 1. DFIG parameters.

Rated power	2 MVA
Rated voltage	0.69 kV
Base angular frequency	314.16 rad/s
Stator/Rotor turns ratio	0.4333
Angular moment of inertia	1.99 s
Mechanical damping	0.02 pu
Stator resistance	0.0175 pu
Rotor resistance	0.019 pu
Stator leakage inductance	0.2571 pu
Rotor leakage inductance	0.295 pu
Mutual inductance	6.921 pu
Rated wind speed	12 m/s
Rotor radius	41 m
DC-link capacitor	7800 μ F

2.2 SMES Model

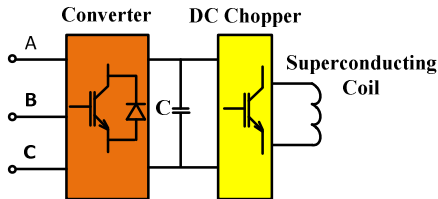


Fig. 2. The structure of SMES.

Fig. 2 shows the structure of SMES which consists of voltage source converter (VSC), capacitor, DC chopper and superconducting coil. The control block diagram of VSC is illustrated in Fig.3. The VSC which is a three phase rectifier-inverter, is connected to ac power system. The phase lock loop (PLL) is used to measure the angle of the transformation from three phase voltage (V_a, V_b, V_c) at the high voltage side of transformer. In the control block there are five proportional-integral (PI) controllers.

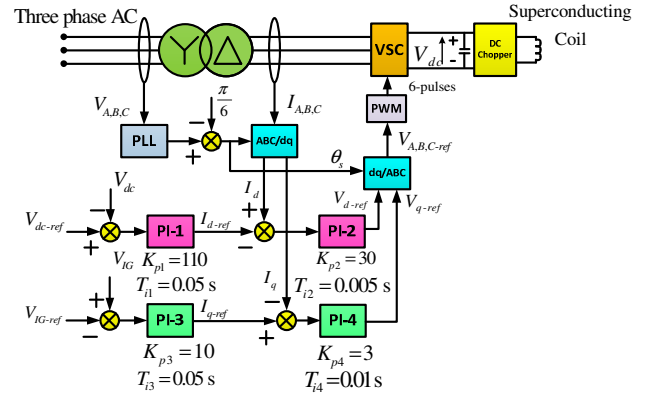


Fig. 3. VSC control block diagram.

The first PI controller (PI-1) is used to produce the reference signal I_{d-ref} based on the signal voltage error which is calculated from the difference between the actual dc link voltage (V_{dc}) and the reference dc link voltage (V_{dc-ref}). Subsequently, I_{d-ref} is compared with the actual current I_d measured from the low voltage side transformer by Park transformation. As a result, the difference between I_d and I_{d-ref} is used as an input of the second PI controller (PI-2). The outputs of PI-2 is the reference signal V_{d-ref} .

In the same fashion, the reference signal I_{q-ref} is generated by the third PI controller (PI-3) which uses the input signal IG voltage error calculated from the difference between the actual value V_{IG} and the reference induction generator (IG) voltage V_{IG-ref} . Subsequently, the difference between I_{q-ref} and the actual current I_q is an input of the forth PI controller (PI-4). As a result, the output signal of PI-4 is the reference signal V_{q-ref} . Both V_{d-ref} and V_{q-ref} are converted to a three phase voltage reference waveform $V_{A,B,C-ref}$ by inverse Park transformation. After that, $V_{A,B,C-ref}$ is compared with a triangular carrier waveform with 1980 Hz for generating the gate drive signal of IGBTs. Here, the tuning of all PI controller parameter is conducted by trial and error method.

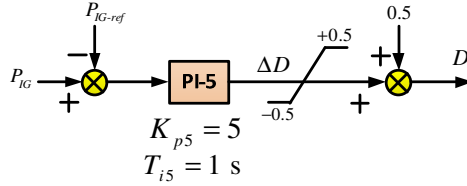


Fig. 4. Control of duty cycle of chopper.

Fig. 4 shows the DC chopper which is employed to control the exchange energy between superconducting coil and system. By appropriate adjusting the duty cycle of the chopper, the dc voltage can be controlled. The difference between the actual power P_{IG} and the reference power P_{IG-ref} which is signal power error, is used as the input PI controller. The output of the fifth PI controller (PI-5) is a duty cycle deviation (ΔD) which is compared with the reference value (+0.5). The duty cycle is applied to control the energy transfer in the SMES coil. When the duty cycle is greater 0.5 (50%), the energy is charged from the system to the SMES coil. On the contrary, if the duty cycle is less than 0.5, the energy is discharged from the SMES coil to the system.

3. Proposed Optimization

The concept of proposed optimization of SMES based on energy function can be explained as follows. When the severe fault occurs in the system, it causes the change in speed and kinetic energy of all generators. To reduce the unbalanced kinetic energy, the power compensation from SMES is used. By energy function method, the optimization problem of coil size and necessary initial stored energy of SMES for enhancement FRT capability can be formulated.

3.1 Energy Function Method

The energy function of a multi-machine power system [7] can be expressed by

$$V = V_K(\omega) + V_P(\delta) \quad (1)$$

Where V_K is the kinetic energy which is the function of the rotor speed (ω), V_P is the potential energy which is the function of the rotor angle (δ). The rotor angle and mechanical speed of each generator during fault are δ^f and ω^f respectively. The energy function during fault is given by

$$V_f = V(\delta^f, \omega^f) \quad (2)$$

If V_f is minimized, the first swing of rotor angle can be reduced. Since the fault duration is very short, the change in δ^f is small so that V_P rarely changes. As a result, the kinetic energy during fault can be assumed to be the energy function during fault, i.e.

$$V_K^f \triangleq V_K(\omega^f) \quad (3)$$

The total kinetic energy can be calculated from

$$V_K = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t))^2 \quad (4)$$

Where M_i is the inertia constant of i^{th} generator, ω_0 is speed of inertia center, ω_i is angular speed of i^{th} generator. When the fault duration is very short, the mechanical power can be assumed to be constant.

The mechanical rotor speed during fault ω_i^f can be calculated by

$$\omega_i^f = \omega_i(0) + \alpha_i t_f \quad (5)$$

Where t_f is the fault clearing time, α_i is the acceleration of i^{th} generator and $\omega_i(0)$ is the i^{th} rotor speed at the initial time $t = 0$ s.

The value of α_i can be approximated by

$$\alpha_i = (P_{mi} - P_{fi}) / M_i \quad (6)$$

Where P_{mi} and P_{fi} are mechanical and electrical power during fault of i^{th} generator, respectively. As a result, the kinetic energy during fault V_K^f can be approximated as

$$V_K^f \approx A t_f^2 \quad (7)$$

Where

$$A \triangleq \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\alpha_i - \alpha_0)^2 \quad (8)$$

$$\alpha_0 \triangleq \frac{\sum_{i=1}^n M_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (9)$$

Accordingly, the increase in rotor angle and speed of generator during fault is small when V_K^f is minimal. Here, instead of minimizing V_K^f the minimization of A will be

conducted. In case of a single DFIG connected to the system, A can be expressed as

$$A \triangleq \frac{1}{2} M \alpha^2 \quad (10)$$

Where α is the rotor acceleration of the DFIG.

3.2 Initial Energy of SMES

The initial stored energy of SMES can be calculated from

$$E_{SMES-0} = \frac{1}{2} L_{SC-0} I_{SC-0}^2 \quad (11)$$

Where E_{SMES-0} is the initial stored energy of SMES, L_{SC-0} is the coil inductance and I_{SC-0} is the initial coil current. Here, L_{SC-0} and I_{SC-0} are optimized so that the initial stored energy of SMES is sufficient for improvement the FRT capability of DFIG.

3.3 Optimization of SMES

In addition to (10) and (11), the integral absolute error (IAE) of DFIG

$$\text{Minimize } A + \frac{1}{2} L_{SC-0} I_{SC-0}^2 + \int_{t_0}^{t_s} |\Delta P_g| dt \quad (12)$$

Subject to

- (a) $0.1 < L_{SC-0} < 2.0$ H (range of SMES coil inductance)
- (b) $5 < I_{SC-0} < 15$ kA (range of SMES initial coil current)

Where t_0 and t_s are the initial time and final time of simulation. To achieve all optimal parameters, the GA [8] is used to solve the optimization problem (12).

4. Simulation Study

The optimization is carried out under the time simulation by PSCAD/EMTDC when the wind speed can be shown in Fig. 5 and a temporary three phase fault is applied at bus 3 at $t = 6$ s for 300 ms. Consequently, the convergence curves of E_{SMES-0} , I_{SC-0} and L_{SC-0} are shown in Fig. 6 while that of A is shown in Fig. 7. Table 2 provides the optimal values of E_{SMES-0} , I_{SC-0} , L_{SC-0} of SMES. In the simulation study, the optimal SMES is compared with the non-optimal SMES. The parameters E_{SMES-0} , I_{SC-0} and L_{SC-0} of the non-optimal SMES are also provided in Table 2. Clearly, the coil size and initial stored energy of the optimal SMES are lower

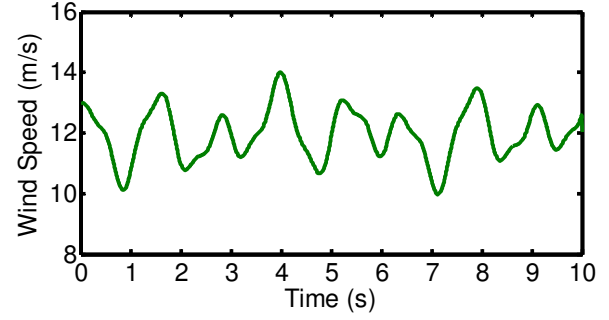


Fig. 5. Wind speed.

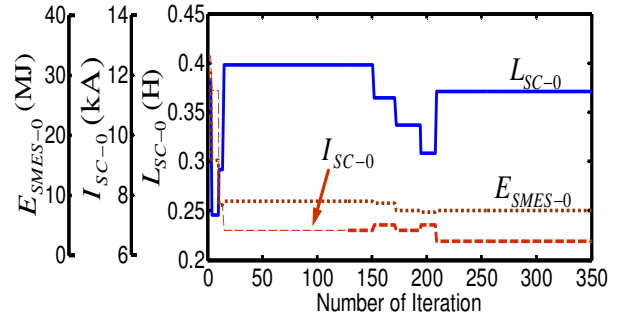


Fig. 6. Convergence curves of E_{SMES-0} , I_{SC-0} and L_{SC-0} .

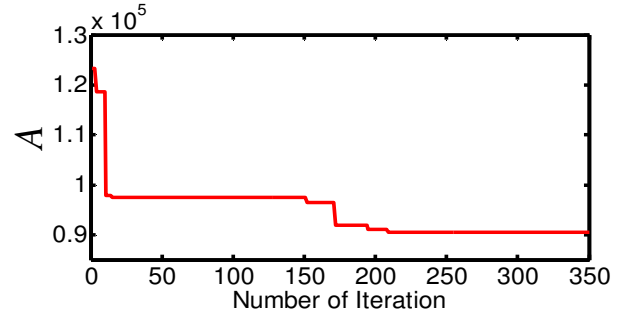


Fig. 7. Convergence curve of A .

Table 2. SMES parameters.

Parameters	Optimal SMES	Non-optimal SMES
Coil size	0.37 H	2 H
Coil current	6.64 kA	6.64 kA
Initial stored energy	8.15 MJ	44.08 MJ

than those of the non-optimal SMES. Simulation results are shown as follows.

Fig.8 shows the increase in kinetic energy stored in the DFIG rotor during fault. The optimal SMES is able to suppress the increase in kinetic energy considerably. On the other hand, the non-optimal SMES cannot reduce the increase in kinetic energy during fault.

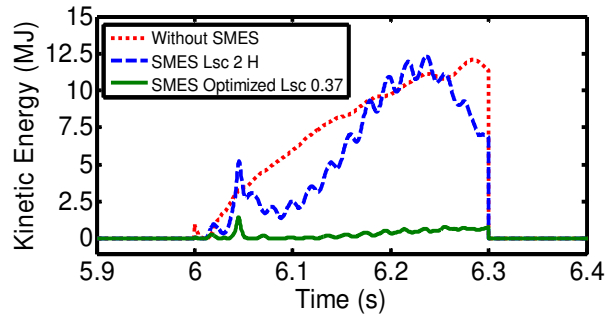


Fig. 8. Kinetic energy.

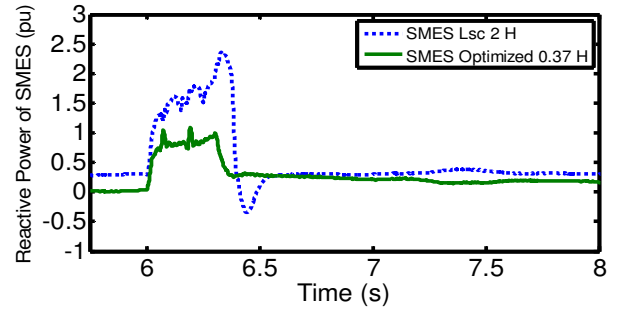


Fig. 12. Reactive power output of SMES.

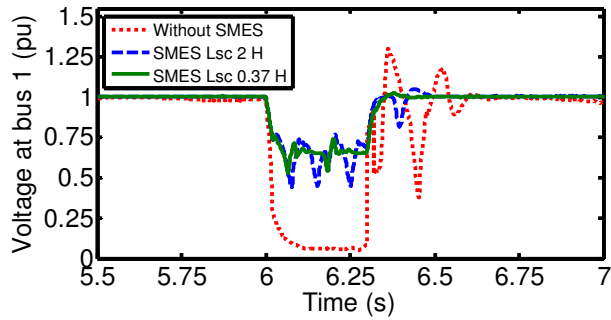


Fig. 9. Voltage at bus 1.

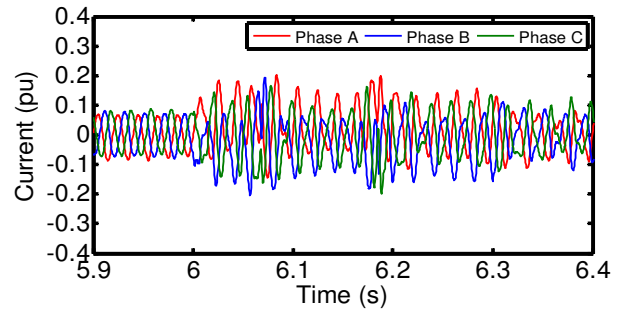


Fig. 13. Current flows in transmission line without SMES.

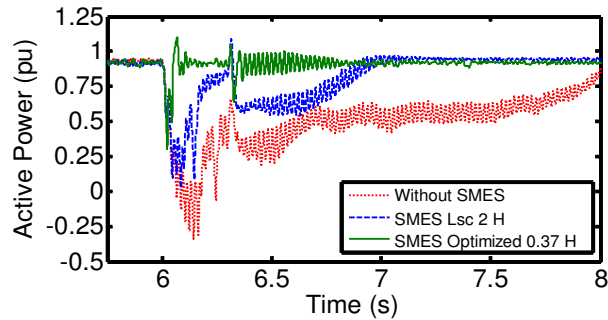


Fig. 10. Active power flow from DFIG.

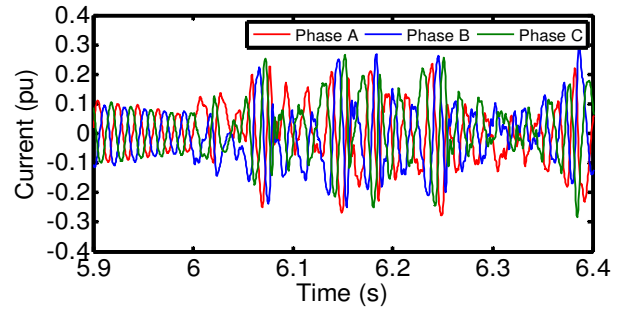


Fig. 14. Current flows in transmission line with the non-optimal SMES.

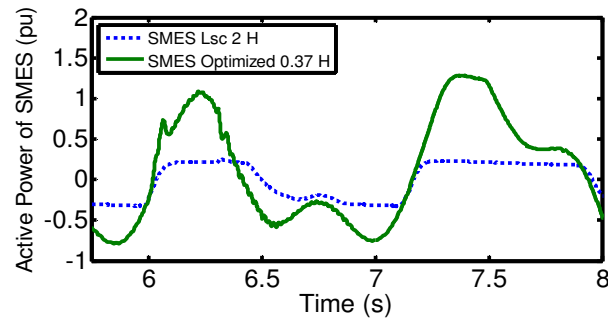


Fig. 11. Active power output of SMES.

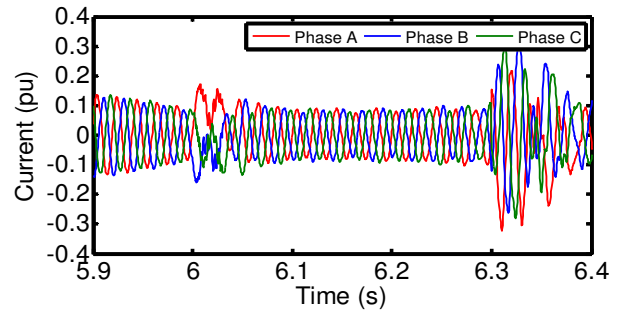


Fig. 15. Current flows in transmission line with the optimized SMES.

Fig. 9 depicts the terminal voltage of DFIG at bus 1. Without SMES the voltage largely drops to about 0.05 pu. In this case, the DFIG cannot ride through the fault and will be tripped from the system. On the other hand, the SMES with either optimal coil or non-optimal coil can alleviate the voltage drop so that the DFIG can ride through the fault. Nevertheless, the voltage stabilizing effect of the optimal SMES is superior to that of the non-optimal SMES.

Fig. 10 shows the active power output of DFIG. When the fault occurs, the power output severely fluctuates in case of without SMES. Obviously, the stabilizing effect of optimal SMES is much superior to that of the non-optimal SMES.

Figs. 11 and 12 depict the active and reactive power outputs of SMES, respectively. The power outputs of the optimal SMES are higher than those of the non-optimal SMES since the optimal SMES with a smaller coil size has to exchange the larger amount electrical energy with the system. Figs. 13-15 show the three phase currents in the transmission line in case of without SMES, non-optimal SMES and optimal SMES, respectively. The three phase current can be largely reduced during fault in case of SMES.

5. Conclusion

This paper proposes the optimization of SMES unit for enhancement of the FRT capability of DFIG wind turbine based on energy function. The SMES coil size for necessary stored energy of SMES is optimized so that the increase in the kinetic energy stored in the rotor of DFIG during fault is suppressed. Using the genetic algorithm, the optimal parameters of SMES can be obtained automatically. Simulation results ensure that the FRT capability improvement and stabilizing effect of the optimal SMES is much superior to those of the non-optimal SMES. The proposed optimization not only guarantees the optimal coil size of SMES for FRT capability enhancement, but also supports the SMES in terms of the economical merit.

Acknowledgements

This work was supported by the King Mongkut's Institute of Technology Research Fund.

References

- [1] Gonzalo Abad, Jesus Lopez, Miguel Rodriguez, Luis Marroyo and Grzegorz Iwanski, *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*: Wiley, 2011.
- [2] Yu Ling and Xu Cai, "Rotor current dynamics of doubly fed induction generators during grid voltage dip and rise," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, pp.17-24, Jan. 2013.
- [3] Y. Mitani, K. Tsuji and Y. Murakami, "Application of Superconducting magnetic energy storage to improve power system dynamic performance," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.3, no.4, pp.1418-1425, 1988.
- [4] J. Shi, Y.J. Tang, L. Ren, J.D. Li and S.J. Chen, "Application of SMES in wind farm to improve voltage stability," *Physica C: Superconductivity*, vol. 468, pp. 2100-2103, September 2008.
- [5] A.H.M.A. Rahim and E.P. Nowicki, "Low voltage performance improvement of a doubly fed wind generator through SMES," in *Proceedings of 25th IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering Conference*, 2012.
- [6] Y. He and H. Shirai, "Dynamic characteristic and fault ride-through capability analysis of DFIG wind farm with SMES unit," in *Proceedings of 2012 International Conference on Electrical Engineering*, No. P-PS2-5, 2012.
- [7] J. Machowski, J. Bialek and J. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*: Wiley, 2008.
- [8] Xin-SheYang, *Engineering Optimization An Introduction with Metaheuristic Application*, 2010, 173-179.

Tanapon Karaipoom



He received bachelor of electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand in 2012. Currently, he is a master course student in electrical engineering department at KMITL. His research interests are in the application of superconducting magnetic energy storage (SMES) technology for power system stabilization.



Issarachai Ngamroo

He received Ph.D. degree in electrical engineering from Osaka University, Japan in 2000. Currently, he is an associate professor of electrical engineering department, faculty of engineering, KMITL. His research interests are in the areas of power system stability, dynamics & control.

การหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ

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

ชนพนธ์ กรัยภูมิ¹ และ อิศระชัย งามหุ¹

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

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

PW011

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีหาขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งเชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอและเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ ในที่นี้จะประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อค้นหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานเริ่มต้นที่สะสมในขดลวดที่จำเป็น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟีดแบ็กของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง สามารถลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอที่เกิดจากกังหันลมและลดกระแสที่เพิ่มขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติของสามเฟสในระบบได้ดีกว่ากรณีขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดไม่เหมาะสม คำสำคัญ: กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง, ตัวจำกัดกระแสลัดวงจร, ความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ, 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

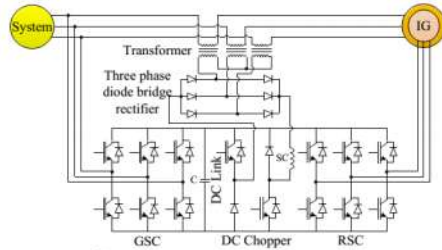
1. คำนำ

ในปัจจุบันกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) เป็นที่นิยมติดตั้งเนื่องจาก DFIG สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอได้และมีต้นทุนในการติดตั้งต่ำ อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากกังหันลมจะไม่สม่ำเสมอ ตามความเร็วลมที่ไม่คงที่ นอกจากนี้ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบจะส่งผลกระทบต่อควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสของ DFIG ที่ต่อกับระบบ และทำให้เกิดกระแสเพิ่มขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งทางด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์ [1] โดยเฉพาะด้านโรเตอร์ที่มีคอนเวอร์เตอร์ซึ่งใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าอาจสูญเสียการควบคุม ส่งผลให้กังหันลมปลดตัวเองออกจากระบบเพื่อป้องกันความเสียหายจากความผิดปกติในระบบ

เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้าและการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลมชนิด DFIG เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil, SC) เข้าไประหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดและคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ของ DFIG [2] ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SC ที่ติดตั้งเข้าไป อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการลงทุนติดตั้ง SC มีราคาสูงและการติดตั้งขนาดของ SC ที่ไม่เหมาะสมเข้าไป จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการควบคุมลดลงซึ่งในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้หา SC ที่มีขนาดที่เหมาะสม

บทความนี้เสนอวิธีการหาความเหนี่ยวนำของ SC ที่มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อติดตั้งในดีซีลิงก์ (DC link) ในกังหันลมชนิด DFIG เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอและลดความรุนแรงของกระแสที่เพิ่มขึ้นใน DFIG ขณะเกิดความผิดปกติของสามเฟสในระบบ นอกจากนี้ยังหาพลังงานสะสมเริ่มต้นใน SC และพารามิเตอร์ควบคุมฟีดแบ็กของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-to-DC Converter) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุม ในที่นี้จะใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) เพื่อแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสม ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า SC ที่มีขนาดของความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งใน DFIG สามารถแก้ปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอและการข้ามผ่านความผิดปกติของสามเฟสได้เหนือกว่า SC ที่มีขนาดของความเหนี่ยวนำที่ไม่เหมาะสม

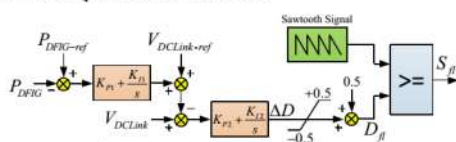
2. โครงสร้างระบบกังหันลมชนิด DFIG ที่ติดตั้ง SC



รูปที่ 1 โครงสร้างกังหันลมชนิด DFIG ติดตั้ง SC

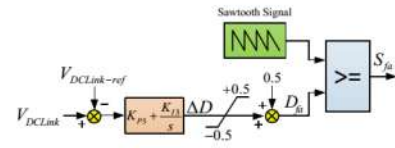
รูปที่ 1 แสดงการติดตั้ง SC เข้าไปด้านดีซีเพื่อเชื่อมระหว่างคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter, RSC) และคอนเวอร์เตอร์ด้านกริด (Grid Side Converter, GSC) [2] โดยมีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ควบคุมพลังงานเข้าไปและออกจาก SC ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์นี้เป็นตัวควบคุมการรับและคายพลังงานของ SC เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกังหันลม นอกจากนี้วงจรเรียงกระแสชนิดสามเฟสแบบบริดจ์ (Three phase diode bridge rectifier) และหม้อแปลงไฟฟ้ายังทำหน้าที่ต่อ SC เข้าไปกับระบบ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสลัดวงจร (Fault current limiter) ที่เพิ่มสูงขึ้นทางด้านโรเตอร์และสเตเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ในที่นี้จะหาค่าความเหนี่ยวนำของ SC ที่เหมาะสมเพื่อใช้แก้ปัญหาการลัดวงจรไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและจำกัดกระแสลัดวงจร

3. ตัวควบคุมดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์



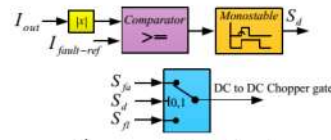
รูปที่ 2 ตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่ง

กรณีการลดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอที่เกิดจากกังหันลมจะใช้ตัวควบคุมพีไอสองตัว ตามรูปที่ 2 ตัวควบคุมพีไอตัวที่หนึ่ง (PI 1) จะควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอโดยเปรียบเทียบสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริง (P_{DFIG}) กับสัญญาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ($P_{DFIG-ref}$) และเอาต์พุตที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์อ้างอิง ($V_{DCLink-ref}$) เอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์ที่เปลี่ยนแปลงไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์จริง (V_{DCLink}) แล้วนำไปเข้าตัวควบคุมพีไอตัวที่สอง (PI 2) จะได้เอาต์พุตเป็นรอบการทำงาน (D_β) และนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย (sawtooth signal) จะได้สัญญาณ (S_β) ขั้วขาเกทของอุปกรณ์สวิตชิ่ง IGBT ในกรณีเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่ง



รูปที่ 3 ตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดความผิดปกติของสามเฟส

กรณีเกิดความผิดปกติของสามเฟสจะเกิดกระแสเกินทั้งด้านโรเตอร์และสเตเตอร์ และจะเกิดแรงดันเกินที่ดีซีลิงก์ทำให้สูญเสียการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์และสร้างความเสียหายให้กับคอนเวอร์เตอร์อีกด้วย ดังนั้น ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์จะต้องควบคุมให้แรงดันดีซีลิงก์เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด รูปที่ 3 แสดงตัวควบคุมพีไอที่สาม (PI 3) เริ่มจากวัดสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์จริง (V_{DCLink}) เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันดีซีลิงก์อ้างอิง ($V_{DCLink-ref}$) เข้าตัวควบคุม PI 3 จะได้เอาต์พุตเป็นรอบการทำงาน (D_β) และนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยจะได้สัญญาณ (S_β) ขั้วขาเกทของอุปกรณ์สวิตชิ่ง IGBT ในกรณีเกิดความผิดปกติ



รูปที่ 4 ระบบตรวจจับความผิดปกติ

ในการควบคุมสองกรณีนี้จะต้องมีตัวตรวจจับกระแสผิดปกติ (Fault Current Detection) เพื่อใช้ในการสั่งสวิตช์เปลี่ยนโหมดทั้งสองกรณี ระบบตรวจจับความผิดปกติเป็นดังรูปที่ 4 ซึ่งจะวัดกระแสเอาต์พุต (I_{out}) ที่จุดต่อร่วมของกังหันลมชนิด DFIG เป็นอินพุตของตัวเปรียบเทียบ (Comparator) ซึ่งจะเปรียบเทียบกับกระแสลัดวงจรอ้างอิง ($I_{fault-ref}$) เพื่อวัดว่ากระแสที่ไหลนั้นเป็นกระแสลัดวงจรหรือไม่ แล้วผ่านตัวกักสัญญาณ (Monostable) เพื่อใช้ในการกักสัญญาณในกรณีที่ความผิดปกตินั้นกลับมาอีกครั้งหรือไม่สามารถเคลียร์ความผิดปกติได้ จึงได้สัญญาณเปลี่ยนโหมดระหว่างกรณีการแกว่งกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและกรณีเกิดความผิดปกติของสามเฟส (S_β)

4. การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ SC และตัวควบคุมพีไอ

ในที่นี้จะทำการหาขนาด กระแสเริ่มต้น และพลังงานเริ่มต้นที่เหมาะสมของ SC และพารามิเตอร์พีไอที่เหมาะสมของ PI 1 PI 2 และ PI 3 พร้อมกันโดยมีจุดประสงค์ดังนี้

1. เพื่อให้ตัวควบคุมมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอด้านออกของกังหันลมชนิด DFIG
2. เพื่อลดแรงดันเกินในดีซีลิงก์ขณะเกิดความผิดปกติ

3. เพื่อลดกระแสเกินทั้งด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์ขณะเกิดความคิดพ่วง

จากจุดประสงค์ต่างๆ สามารถนำมาตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมและเงื่อนไขได้ดังนี้

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

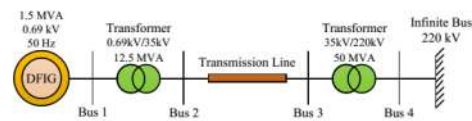
$$\text{Subject to } 0.001 \leq L_{SC} \leq 10 \text{ H}, 1500 \leq I_{SC} \leq 3000 \text{ A}$$

$$0.001 \leq K_{p1} \leq 1, 0.1 \leq K_{p2} \leq 3$$

$$0.001 \leq K_{p3}, K_{p4} \leq 100, 0.001 \leq K_{I1}, K_{I2} \leq 1$$

เมื่อ ΔP คือค่าความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริงกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ΔV คือค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จริงกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ ΔI คือค่าความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จริงกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิงของโรเตอร์ L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำของ SC I_{SC} คือค่ากระแสเริ่มต้นของ SC t_0 คือเวลาเริ่มต้นของการจำลอง t_{f1} คือจุดเวลาสิ้นสุดของการจำลอง t_{f2} คือเวลาเกิดความคิดพ่วงสามเฟส t_{f3} คือเวลาเคลียร์ความคิดพ่วงสามเฟส ในที่นี้ทำการแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสม (1) โดยใช้ PSO [3] ให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของ SC และตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

5. ผลการจำลอง



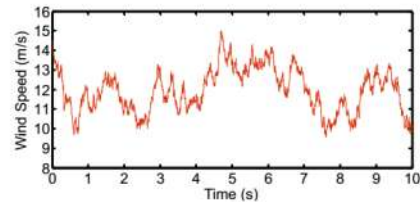
รูปที่ 5 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 5 แสดงระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ กังหันลมชนิด DFIG หม้อแปลงไฟฟ้า สายส่ง และสับนัตต์ พารามิเตอร์ของระบบกำลังไฟฟ้าได้แสดงจาก [2]

ผลการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ SC ด้วยวิธี PSO นั้นจะอยู่ภายใต้ความเร็วลมไม่คงที่ดังรูปที่ 6 และความคิดพ่วงสามเฟสลงดินที่บัส 2 ที่เวลา 4 s เป็นเวลา 150 ms ซึ่งได้ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 1 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzy logic ดังตารางที่ 2 เส้นโค้งการเข้าสู่ค่าคงที่ที่เหมาะสมของพลังงานเริ่มต้น (E_{SC}) กระแสเริ่มต้น (I_{SC}) และค่าความเหนี่ยวนำ (L_{SC}) ของ SC แสดงได้ดังรูปที่ 7 การจำลองทางคอมพิวเตอร์จะเปรียบเทียบกับ DFIG ซึ่งติดตั้ง SC ที่มีขนาดความเหนี่ยวนำเท่ากับ 5 H โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีแรกเป็นผลการจำลองในกรณีการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเนื่องจากกังหันลม รูปที่ 6 แสดงความเร็วลมไม่คงที่ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าด้านออกไม่สม่ำเสมอตามดังรูปที่ 8 ในกรณีที่

ไม่ได้ติดตั้ง SC กำลังไฟฟ้าจะแกว่งอย่างรุนแรง เมื่อติดตั้ง SC ขนาด 5 H การแกว่งกำลังไฟฟ้าจะลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ขนาด SC และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy logic ที่เหมาะสม การแกว่งกำลังไฟฟ้าจะลดลงอย่างชัดเจน



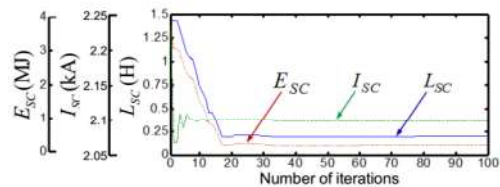
รูปที่ 6 ความเร็วลม

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของ SC

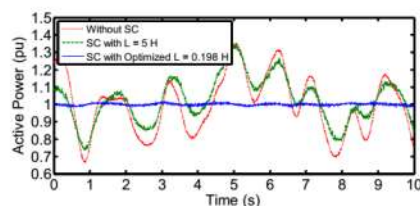
พารามิเตอร์	Non-optimal SC	Optimal SC
ค่าความเหนี่ยวนำ	5 H	0.198 H
ค่ากระแสเริ่มต้น	2.106 kA	2.106 kA
ค่าพลังงานเริ่มต้น	11.08 MJ	0.439 MJ

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzy logic

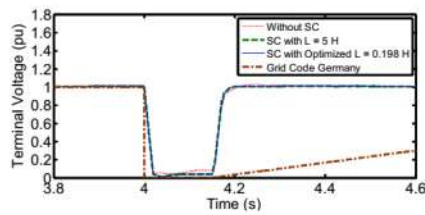
พารามิเตอร์	Non-optimal SC	Optimal SC
K_{p1}, K_{I1}	0.005, 0.0025	0.0425, 1.9811
K_{p2}, K_{I2}	0.5, 0.1	9.4074, 0.9683
K_{p3}, K_{I3}	0.0005, 0.001	49.186, 0.5042



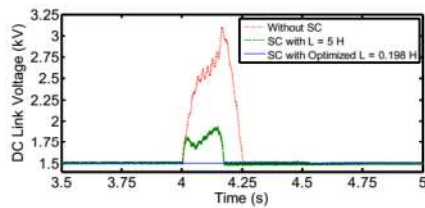
รูปที่ 7 เส้นโค้งการเข้าสู่ค่าคงที่ของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม



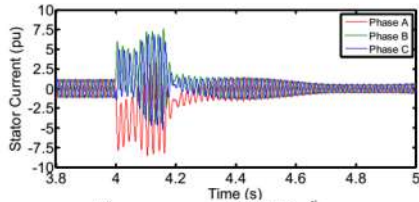
รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าที่บัส 1



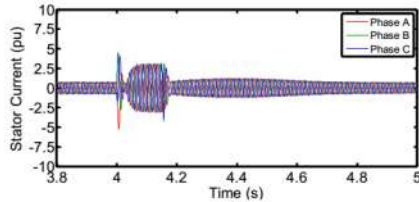
รูปที่ 9 แรงดันที่บัส 1



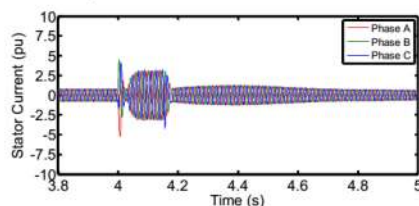
รูปที่ 10 แรงดันดีซีลิงก์



รูปที่ 11 กระแสสเตเตอร์ (ไม่ได้ติดตั้ง SC)



รูปที่ 12 กระแสสเตเตอร์ (ติดตั้ง SC ที่ 5 H)



รูปที่ 13 กระแสสเตเตอร์ (ติดตั้ง SC ที่เหมาะสม)

กรณีสอง สมมติให้เกิดความผิดปกติของสามเฟสลงดินที่บัส 2 ที่เวลา 4 s เป็นเวลา 150 ms รูปที่ 9 แสดงแรงดันที่บัส 1 ทั้งกรณีที่ไม่มี SC และมี SC เท่ากับ 5 H และ SC ที่เหมาะสม จะเห็นว่าแรงดันตกลง

เกือบเป็นศูนย์ ในที่นี้จะอ้างอิงกริดโค้ด Germany EON [4] ที่กำหนดว่า กังหันลมจะต้องทนต่อแรงดันที่จุดต่อกับระบบซึ่งตกลงเป็น 0 % ของแรงดันปรกติเป็นเวลา 150 ms ดังนั้นกังหันลมนี้ยังคงอยู่ต่อกับกริดและข้ามผ่านความผิดปกติได้

รูปที่ 10 แสดงแรงดันดีซีลิงก์ในขณะที่เกิดความผิดปกติ เมื่อไม่มี SC แรงดันที่ดีซีลิงก์จะมีค่าสูงกว่า 3000 V และเมื่อติดตั้ง SC แรงดันดีซีลิงก์จะลดลงเหลือประมาณ 1750 V แต่เมื่อใช้ค่าขนาด SC และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิโอดีที่เหมาะสมแรงดันดีซีลิงก์กลับมีค่าที่คลอที่ 1500 V และเมื่อสังเกตรูปที่ 11, 12 และ 13 แสดงกระแสสเตเตอร์ทั้งสามเฟสกรณีไม่ได้ติดตั้ง SC, ติด SC ที่ 5 H และติดตั้ง SC ที่เหมาะสม ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อไม่ได้ติดตั้ง SC กระแสที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความผิดปกติจะมีค่าสูงมาก แต่เมื่อมีการติดตั้ง SC ที่ 5 H หรือ SC ที่ค่าเหมาะสม กระแสสเตเตอร์จะลดลงอย่างมาก ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า SC ที่เหมาะสมซึ่งมีความเหนียวแน่นที่ต่ำกว่ามีประสิทธิผลในการลดกระแสเกินในสเตเตอร์ได้ใกล้เคียงกับ SC ที่ 5 H

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการหาขนาดความเหนียวแน่นที่เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับติดตั้งในกังหันลมชนิด DFIG และพารามิเตอร์ฟิโอดีของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกที่ไม่สม่ำเสมอและเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค ผลการศึกษานี้ยืนยันได้ว่า ตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดความเหนียวแน่นที่เหมาะสมและพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิโอดีที่เหมาะสมสามารถลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าด้านออกของ DFIG ในสภาวะปกติและลดกระแสที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดความผิดปกติของสามเฟสของกังหันลมชนิด DFIG ได้มีประสิทธิผลเหนือกว่าตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่กว่า และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิโอดีที่ไม่เหมาะสม

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.

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ