



รายงานการวิจัย

การประสานควบคุมของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้า
กำลังที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียน

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

นายอิสระชัย งามหุ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัย

การประสานควบคุมของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้า
กำลังที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียน

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

นายอิสระชัย งามหุ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

12697801

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การประสานควบคุมของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียน

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2557

ประจำปีงบประมาณ 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 1,289,500 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2557 ถึง กันยายน 2559

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นาย อิศระชัย งามหรุ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ : ระบบไฟฟ้ากำลัง แหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียน อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด การทำเสถียรภาพและควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

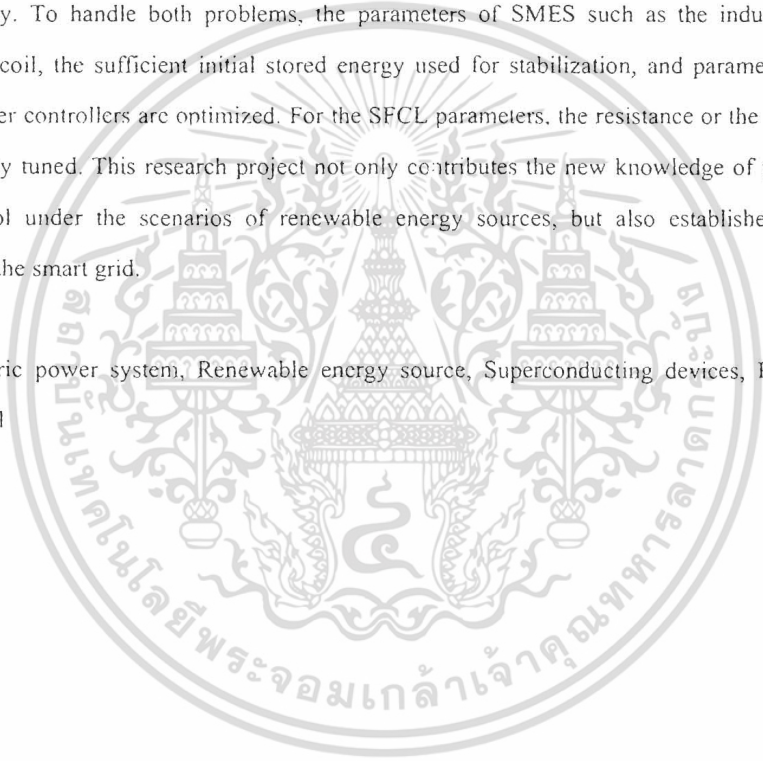
Researcher: Issarachai Ngamroo

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.

2557

อิสระชัย งามหรรุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านความผิดพลาดและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของ กังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในระบบดีซีไมโครกริดด้วยอุปกรณ์ รวม SMES และ SFCL	5
2.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด.....	5
2.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ SMES-FCL.....	7
2.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ.....	13
2.4 ผลการจำลองและทดสอบ.....	17
บทที่ 3 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	24
บทที่ 4 ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	25
บรรณานุกรม	26
ภาคผนวก	28
ประวัตินักวิจัย	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ.....	6
2.2 การทำงานของสวิตช์ของดีซีชอปเปอร์ในอุปกรณ์ SMES-FCL.....	10
2.3 พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ SMES และ SMES-FCL.....	19
2.4 พลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นของอุปกรณ์ SMES และ SMES-FCL.....	23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ระบบคีชีโม โครกริดที่ใช้ในการศึกษา	6
2.2 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ SMES	7
2.3 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ SMES-FCL	7
2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติ	8
2.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะเกิดความผิดปกติ	9
2.6 หลักการทำงานของอุปกรณ์ SMES-FCL	11
2.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES	13
2.8 โครงสร้างของตัวควบคุม FCL	13
2.9 ความเร็วลม	18
2.10 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของสมการวัดประสงค์	18
2.11 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ V/V_{base} , $I_{sc}/I_{sc,base}$ และ $E_{sc}/E_{sc,base}$	19
2.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4	20
2.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1	20
2.14 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2	21
2.15 การเปรียบเทียบการลดลงของแรงดันไฟฟ้า	21
2.16 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1	21
2.17 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2	22
2.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1	22
2.19 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2	22
2.20 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG1	23
2.21 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG2	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบัน ความต้องการพลังงานที่สูงขึ้นก่อให้เกิดวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ นอกจากนี้ สภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงจักรไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล ระบบขนส่ง และ โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ยังทำให้เกิดผลกระทบด้านลบอย่างรุนแรงต่อสภาพแวดล้อม ความเป็นอยู่ของมนุษย์ สังคม เศรษฐกิจ ตลอดจนการพัฒนาประเทศ ดังนั้นทั่วโลกจึงให้ความสนใจอย่างมากต่อการแก้ปัญหาวิกฤตพลังงานและสภาวะโลกร้อน ไม่ว่าจะเป็นการร่วมกันประหยัดพลังงาน การใช้ทรัพยากรพลังงานอย่างมีคุณค่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวางยุทธศาสตร์เพื่อหาแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น แสงอาทิตย์ ลม แหล่งน้ำขนาดเล็ก ชีวมวล และ โคลเจนเนอเรชัน เป็นต้น เพื่อผลิตไฟฟ้าจ่ายเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง [1, 2].

สำหรับประเทศไทย ส่วนของระบบโยงาพและแอมพลิ่งวาง กระทบวางพลังงาน ได้กำหนดแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2555-2573 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 (Power Development Plan 2012, PDP2010) [3] จะติดตั้งแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนขนาด 20,546.3 MW หรือ 29 % ของกำลังการผลิตทั้งหมด) ในปี 2573 โดยมีแหล่งจ่ายพลังงานลมและแสงอาทิตย์จำนวน 3,802 MW และ 1,973 MW ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อแหล่งพลังงานหมุนเวียนจำพวกลมและแสงอาทิตย์ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับสภาพอากาศมีส่วนการผลิตไฟเข้ามาในระบบเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ [4-6] เช่น การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง การแกว่งของความถี่ระบบ คุณภาพของกำลังไฟฟ้า แรงดันที่ไม่สม่ำเสมอในระบบจำหน่าย และขนาดของกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น

ยกตัวอย่างปัญหาผลกระทบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยพลังลมที่เกิดขึ้นในยุโรป ระบบไฟฟ้ากำลังของแต่ละประเทศในยุโรปเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งเชื่อมโยงจึงทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมมีขนาดใหญ่มาก นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานลมเป็นจำนวนมากโดยไม่ได้เตรียมมาตรการเพื่อลดผลกระทบของแหล่งพลังงานลมต่อระบบไว้อย่างดีพอ จึงส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆขึ้นตามมา เช่น ในวันที่ 4 พฤศจิกายน ปี 2006 ได้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างทั่วยุโรป [7] โดยสาเหตุส่วนหนึ่งนั้นเกิดจากการคาดคะเนขนาดของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานลมซึ่งทำได้ยาก เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบจึงทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพเป็นผลให้เกิดไฟฟ้าดับ ดังนั้น ในปัจจุบันประเทศในยุโรปจึงเริ่มออกมาตรการต่างๆมาเพื่อป้องกันและเพิ่มเสถียรภาพระบบให้มากขึ้น

สำหรับประเทศไทย จากแผน PDP2010 จะมีการติดตั้งแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังลมและแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้น ผลกระทบของแหล่งจ่ายพลังลมและแสงอาทิตย์ต่อระบบไฟฟ้ากำลังนั้นก็มีแนวโน้มสูงขึ้นในอนาคต จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาปัญหาผลกระทบของแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเหล่านี้เพื่อหามาตรการป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นในระบบอย่างจริงจัง

เมื่อไม่นานมานี้ อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด (Superconducting devices) ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจาก อุปกรณ์เหล่านี้มีประสิทธิผลในการแก้ปัญหาด้านเสถียรภาพระบบไฟฟ้าสูงกว่าอุปกรณ์ทำเสถียรภาพอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตัวสะสมพลังงานแบบตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) และตัวจำกัดกระแสลัดพ่วงแบบตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Fault Current Limiter, SFCL) SMES เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนด้านออกได้อย่างเป็นอิสระและรวดเร็ว [8,9] ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบเพื่อเพิ่มเสถียรภาพลวดของระบบไฟฟ้ากำลังได้ ส่วน SFCL นั้นเป็นอุปกรณ์ที่สามารถต่อความต้านทานหรือความเหนี่ยวนำเข้าไปอนุกรมกับสายส่งเพื่อจำกัดกระแสลัดพ่วงได้ในช่วงที่เกิดการลัดวงจรในระบบจึงช่วยปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวให้ดีขึ้นได้ [10, 11]

อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดทั้งสองนี้สามารถแก้ปัญหาด้านเสถียรภาพได้เฉพาะด้าน กล่าวคือ SMES ใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพพลศาสตร์และลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดี ในขณะที่ SFCL สามารถจำกัดกระแสลัดพ่วงได้อย่างทันทีทันใดหลังเกิดความผิดปกติขึ้นจึงเหมาะกับการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราว [12] ดังนั้น การนำอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดทั้งสองนี้มาประยุกต์ใช้พร้อมกันจะทำให้แก้ปัญหาเสถียรภาพได้กว้างขวางขึ้น นอกจากนี้ เพื่อให้อุปกรณ์ทั้งสองทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องออกแบบหาขนาดพิกัดกำลัง พลังงาน และค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมอย่างเหมาะสม

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการประสานการควบคุมอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดได้แก่ SMES และ SFCL เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนจำพวกลมและแสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าที่เหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ของ SMES ได้แก่ค่าตัวเหนี่ยวนำยิ่งยวด ขนาดพลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นในการทำเสถียรภาพ ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ส่วนค่าพารามิเตอร์ของ SFCL ได้แก่ ค่าความต้านทานที่เหมาะสม และค่าพลังงานสูญเสียในตัวต้านทานที่น้อยสุด เพื่อแก้ปัญหาต่างๆด้านเสถียรภาพระบบได้แก่การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งจ่ายพลังลมและแสงอาทิตย์ การลัดกระแสลัดพ่วงเมื่อเกิดลัดวงจรในระบบ การเพิ่มความสามารถในการขับผ่านความผิดปกติ (Fault ride through capability) ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าพลังลมและแสงอาทิตย์ และการเพิ่มเสถียรภาพในสถานะชั่วคราวของระบบหลังจากเกิดลัดวงจร เป็นต้น โครงการวิจัยนี้นอกจากจะก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในด้านการทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียนที่ผลิตกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอแล้ว ยังสร้างความมั่นคงทางพลังงานให้กับระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความเป็นอัจฉริยะหรือเป็นสมาร์ทกริด (Smart Grid)

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) นำเสนอวิธีการประสานควบคุมแนวใหม่ของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดให้แก่ SMES และ SFCL เพื่อแก้ปัญหาด้านเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วย พลังลมและแสงอาทิตย์
- 2) นำเสนอเทคนิคใหม่ในการทำให้เหมาะสมของ SMES และ SFCL
- 3) ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมที่นำเสนอในระบบไมโครกริดและระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดที่นำมาพิจารณาคือ SMES และ SFCL
- 2) การศึกษาจะใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ Digilent ที่จะจัดซื้อ เพื่อออกแบบ SMES และ SFCL
- 3) แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนที่พิจารณาคือพลังงานลมและแสงอาทิตย์
- 4) ระบบที่ใช้ศึกษาจะเป็นแบบไมโครกริดและระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยง

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาระบบไมโครกริดซึ่งติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียนพลังงานลมและแสงอาทิตย์ที่จะนำมาทดสอบ สร้างแบบจำลองระบบ
- 2) ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยการพิจารณาความผิดพลาดสามเฟสที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบ เพื่อทำความเข้าใจด้านเสถียรภาพชั่วคราวของระบบ และพิจารณาผลกระทบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียนต่อการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ
- 3) ศึกษาแบบจำลอง SMES และ SFCL เพื่อนำมาติดตั้งในระบบ ทำการทดสอบการทำงานด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์
- 4) ศึกษาเทคนิคใหม่เพื่อใช้สร้างปัญหาการทำให้เหมาะสมของพารามิเตอร์ของ SMES และ SFCL
- 5) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมของ SMES และ SFCL ในระบบไฟฟ้ากำลังศึกษา
- 6) เปรียบเทียบ SMES และ SFCL ที่ทำให้เหมาะสมด้วยวิธีที่นำเสนอกับ SMES และ SFCL ที่ทำให้เหมาะสมแบบดั้งเดิม ในด้านการทำเสถียรภาพระบบด้วยวิธีต่อไปนี้
 - 6.1) การจำลองทางคอมพิวเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบไม่เชิงเส้นภายใต้การเกิดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมุนเวียนรูปแบบต่างๆ และเมื่อเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลัดวงจรที่ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อประเมินสมรรถนะการทำเสถียรภาพระบบของ SMES และ SFCL ที่นำเสนอและที่เปรียบเทียบ

6.2) ประเมินพลังงานสะสมเริ่มต้นของ SMES ที่จำเป็นในการทำเสถียรภาพในกรณี SMES และ SFCL ที่นำเสนอและที่เปรียบเทียบ

6.3) ประเมินพลังงานสูญเสียในสถานะสูญเสียความเป็นตัวนำยิ่งยวดของ SFCL ในกรณี SMES และ SFCL ที่นำเสนอและที่เปรียบเทียบ

7) สรุปผลการศึกษา เพื่อเขียนบทความวิจัยส่งวารสารวิชาการนานาชาติ การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ และการประชุมระดับชาติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) งานวิจัยนี้สามารถตีพิมพ์เป็นบทความฉบับเต็ม (Full paper) ในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI
- 2) องค์ความรู้ใหม่ในการประสานควบคุมระหว่าง SMES และ SFCL เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง
- 3) เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาโท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

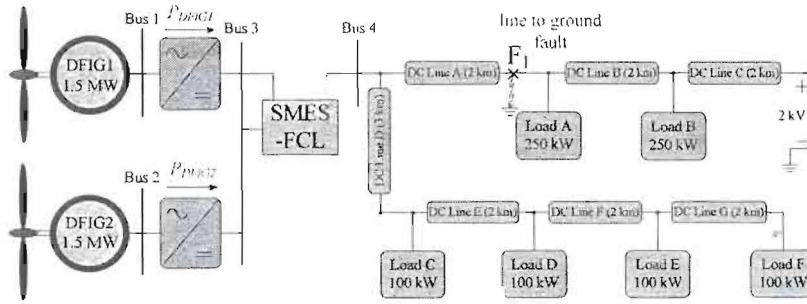
บทที่ 2

การปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านความผิดปกติและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในระบบดีซีไมโครกริดด้วย อุปกรณ์รวม SMES และ SFCL

เนื้อหาในบทนี้เป็น การนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่าน (Low Voltage Ride Through) ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดปกติในระบบดีซีไมโครกริดและการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องมาจากการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่ไม่คงที่ ซึ่งปัญหาทั้งการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเป็นปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับกังหันลม DFIG เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ขึ้นใหม่ในระบบดีซีไมโครกริด ซึ่ง SMES นี้จะเพิ่มเติมส่วนของฟังก์ชันการจำกัดกระแสเพื่อลดผลกระทบที่จะเป็นทั้งอุปกรณ์ที่ใช้สะสมพลังงานและจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) ไปพร้อมๆ กัน ในช่วงที่เกิดปัญหา กำลังไฟฟ้าแกว่ง SMES-FCL จะทำหน้าที่คล้ายกับ SMES คือมีหน้าที่สะสมพลังงานทั้งรับและคายกำลังไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติอย่างฉับพลันในระบบดีซีไมโครกริด SMES-FCL จะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสด้วยการต่อวงจรไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) เข้าระบบไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติซึ่งจะเป็นการแก้ปัญหาการลดลงของแรงดันไฟฟ้าในระบบและในที่ยังเพิ่มเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของ SMES-FCL ในระบบไมโครกริดอีกด้วย โดยใช้หลักการวิธีฟังก์ชันพลังงานเพื่อใช้ออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวด SC และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่า SMES-FCL จะมีประสิทธิภาพเหนือกว่า SMES แบบดั้งเดิมในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่ออยู่ในระบบดีซีไมโครกริด

2.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด

ระบบกำลังไฟฟ้าดีซีไมโครกริดที่ใช้ศึกษามีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.1 ประกอบไปด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ขนาด 1.5 MW จำนวน 2 ชุด คือกังหันลม DFIG1 และกังหันลม DFIG2 มีพารามิเตอร์ตาม [13] อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) สายส่งดีซี (DC Line) และ โหลด



ภาพที่ 2.1 ระบบดีซีไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา

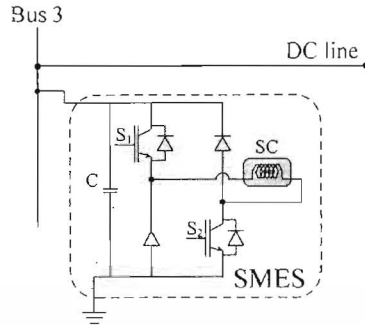
(Load A, Load B, ... , Load F) ในระบบกำลังไฟฟ้านี้จะใช้ศึกษาในสภาวะการทำงานปกติ(Normal State) และสภาวะเกิดความผิดปกติ (Fault State) ขึ้น เมื่อกังหันลม DFIG ทั้ง 2 ชุด ผลิตกำลังไฟฟ้า P_{DFIG1} และ P_{DFIG2} ตามภาพที่ 2.1 ในสภาวะปกติจะเกิดปัญหาลำดับไฟฟ้านี้เนื่องจากความเร็วลมไม่คงที่ส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพและนำไปสู่ระบบกำลังไฟฟ้าล้มเหลวได้และเมื่อจำลองการเกิดความผิดปกติที่สายส่งดีซีลิงกราวนด์ (Line to ground fault) ที่จุด F₁ จะส่งผลกระทบต่อให้เกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าลดลงที่บัส 1 และบัส 2 เป็นผลให้กังหันลม DFIG ทั้งสองต้องปลดตัวเองออกจากระบบเป็นไปตามมาตรฐาน Grid Code ของ AWEA[13] ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาทั้งสองตามที่กล่าวมาจึงติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL ระหว่างบัสที่ 3 กับกังหันลมทั้งสองชุด โดยระบบกำลังไฟฟ้าดีซีไมโครกริดนี้ จะใช้พารามิเตอร์ระบบตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ

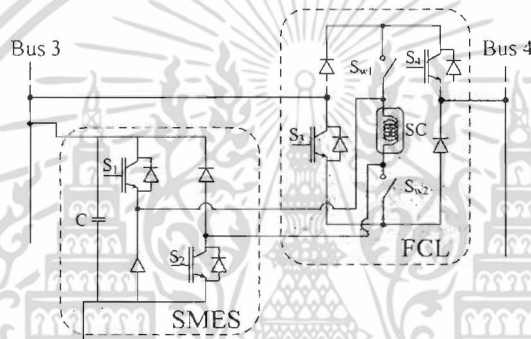
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
พิกัดกำลังไฟฟ้า	1.5MW
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	0.69 kV
ความถี่ทางไฟฟ้าของกังหันลม DFIG	50 Hz
จำนวน pole	2
ค่าความต้านทานของสเตเตอร์และ โรเตอร์	0.003, 0.003pu
ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์และ โรเตอร์	0.11, 0.07pu
ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กใน ไคซิ่ง	2.5 pu
ค่าคงที่ความเฉื่อย	0.685 s
ค่าความต้านทานของสายส่ง	0.015 Ω/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ SMES-FCL



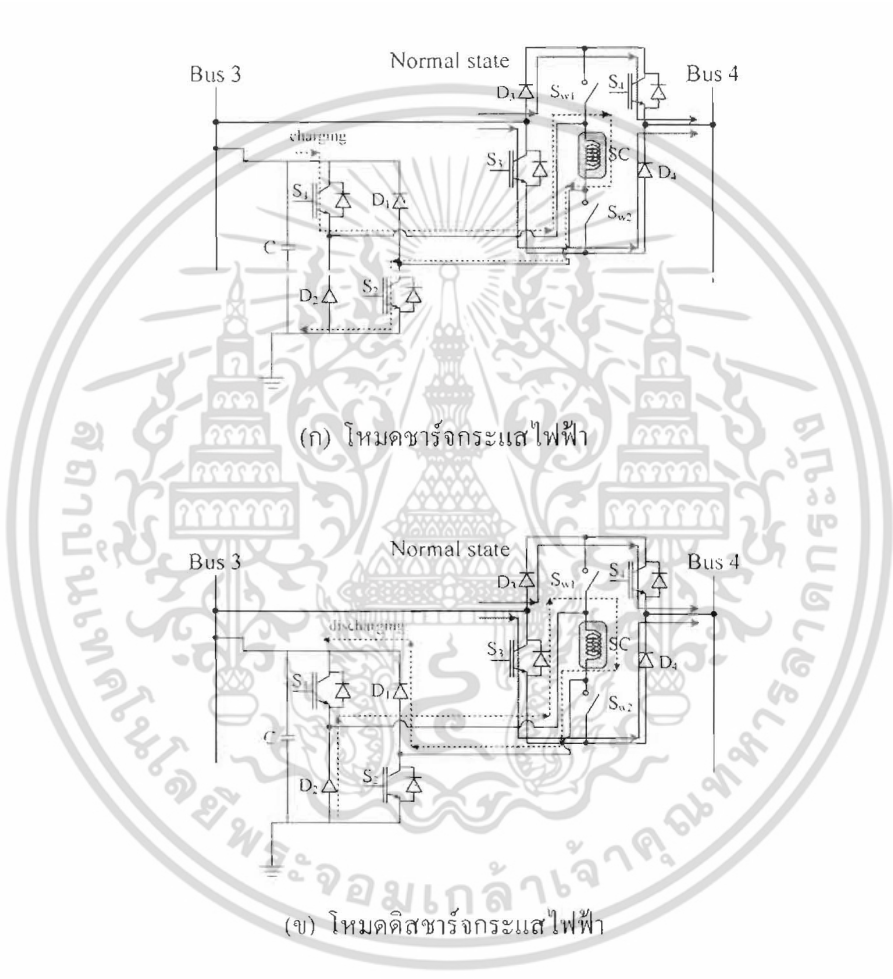
ภาพที่ 2.2 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ SMES



ภาพที่ 2.3 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ SMES-FCL

ตามภาพที่ 2.2 เป็น โครงสร้างของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ในระบบดีซีไม่ โครกริดซึ่งต่ออยู่กับบัสที่ 3 โดยSMES นี้มีหน้าที่หลักคือสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งตามโครงสร้างของSMES นี้จะถูกนำไปประยุกต์วงจรไฟฟ้าใหม่โดยเพิ่มเติมส่วนของโครงสร้างอุปกรณ์จำกัดกระแส(Fault Current Limiting:FCL) ร่วมเข้ามาเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์หรือ SMES-FCL ซึ่งสามารถแสดงวงจร ไฟฟ้านี้ได้ดังภาพที่ 2.3 โดย SMES-FCLนี้ต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 4(เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 2.1)โดยส่วนประกอบของโครงสร้างยังคงแบ่งเป็น SMES และFCL ซึ่งจะทำงานแยกอิสระต่อกันแต่จะคลวดตัวนำยิ่งยวด(Superconducting Coil: SC)ยังคงใช้ร่วมกันอยู่ โดยการทำงานของ SMES-FCL จะถูกแบ่งเป็น 2 สภาวะคือ สภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ

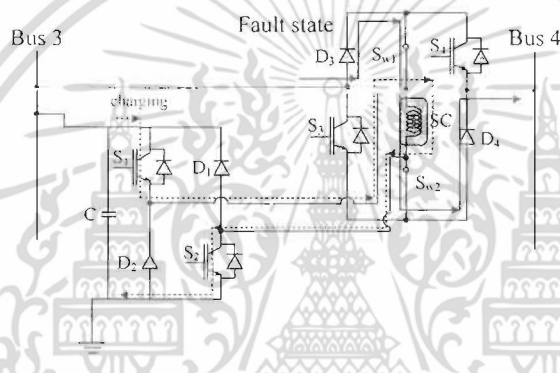
ในสภาวะปกติ SMES-FCL จะทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกังหันลม DFIG ด้วยการทำงานในส่วนของ SMES จากการควบคุมสวิตช์ S_1 และ S_2 ของคอนเวอร์เตอร์จึงสามารถควบคุมการชาร์จและดิสชาร์จกระแสไฟฟ้าได้และในส่วนของ FCL จะทำงานก็ต่อเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบหรืออยู่ในสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นเอง ซึ่งสวิตช์ 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 ซึ่งส่งผลให้กระแสฟลัดถูกจำกัดกระแสด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดหลักการการทำงานดังกล่าวสามารถนำมาอธิบายเป็นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้



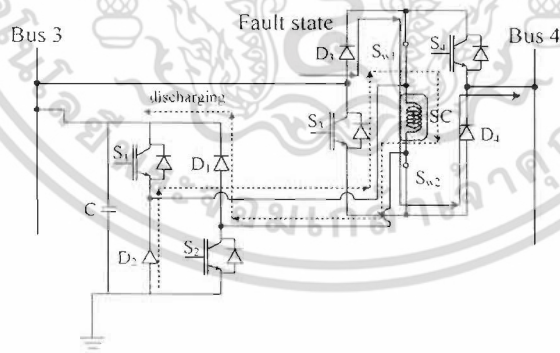
ภาพที่ 2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติ

เมื่อพิจารณาสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่งขึ้นในระบบตามภาพที่ 2.4 (ก) และ (ข) จะแสดงให้เห็นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน โดยในโหมดของการชาร์จกระแสตาม

ภาพที่ 2.4 (ก) สวิตช์ S_1 และ S_2 จะทำงานเพื่อชาร์จพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวด ส่วนสวิตช์ S_{u1} และ S_{u2} จะหยุดทำงานหรือเปิดวงจรเพื่อไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด แต่สวิตช์ S_1 และ S_2 และ ไดโอด D_1 และ D_2 จะทำงานตามปกติเพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลจากบัสที่ 3 ไปบัสที่ 4 ได้ ดังนั้น โหมดชาร์จพลังงานไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านสวิตช์จากสวิตช์ S_1 ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวด และไหลผ่านสวิตช์ S_2 และเมื่ออยู่ในโหมดดิสชาร์จกระแสไฟฟ้าตามภาพที่ 2.4 (ข) สวิตช์ S_1 และ S_2 จะหยุดทำงานแต่ไดโอด D_1 และ D_2 จะทำงานแทนเพื่อให้สามารถดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวดได้ ส่วนสวิตช์ S_1 และ S_2 และ ไดโอด D_1 และ D_2 ยังคงทำงานเช่นเดิมเหมือนในโหมดชาร์จพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น โหมดดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจากไดโอด D_2 ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวดและไหลผ่านไดโอด D_1 ซึ่งหลักการทำงานในสภาวะปกตินี้จะสามารถควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าให้ลดลงได้



(ก) โหมดชาร์จกระแสไฟฟ้า



(ข) โหมดดิสชาร์จกระแสไฟฟ้า

ภาพที่ 2.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะเกิดความผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

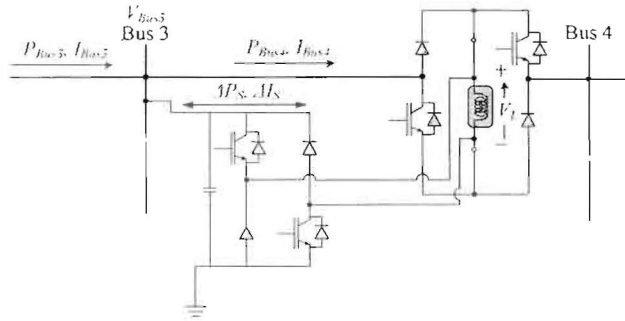
และเมื่อพิจารณาภาวะเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าตามภาพที่ 2.5 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 กับไดโอด D_1 และ D_2 ยังคงทำงานเช่นเดิมและการไหลของกระแสไฟฟ้าทั้งซาร์จและคิซาร์จยังคงเหมือนสภาวะปกติ เพียงแต่สวิตช์ S_1 และ S_2 จะหยุดทำงานและสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} จะทำงานแทนจึงเกิดเป็นวงจรบริดจ์ขึ้น ดังนั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลจากบัสที่ 3 ไปบัสที่ 4 โดยไหลผ่านไดโอด D_1 และสวิตช์ S_{w1} ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวดและไหลผ่านสวิตช์ S_{w2} และไดโอด D_2 ไปยังบัสที่ 4 ซึ่งเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันหรือเกิดกระแสฟลัดไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเปรียบเสมือนสร้างอิมพีแดนซ์ที่ตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดขึ้น [14] - [18] สามารถสรุปหลักการการทำงานของสวิตช์และไดโอดได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การทำงานของสวิตช์ของคิซาร์จขอปเปอร์ในอุปกรณ์ SMES-FCL

สวิตช์	สภาวะปกติ		สภาวะเกิดความผิดปกติ	
	โหมดซาร์จ	โหมดคิซาร์จ	โหมดซาร์จ	โหมดคิซาร์จ
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

จากกรอธิบายวงจรไฟฟ้าและหลักการการทำงานของอุปกรณ์ SMES-FCL ตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะสามารถอธิบายถึงการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการจำกัดกระแสไฟฟ้าเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 หลักการทำงานของอุปกรณ์ SMES-FCL

จากภาพที่ 2.6 เมื่อกำหนดให้

P_{Bus3} , I_{Bus3} และ V_{Bus3} คือกำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและแรงดัน ไฟฟ้าดีซีที่ส่งไปยังบัสที่ 3

P_{Bus4} และ I_{Bus4} คือกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดีซีที่ส่งไปยังบัสที่ 4

ΔP_s และ ΔI_s คือกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดีซีที่ไหลเข้าออกอุปกรณ์ SMES-FCL

เมื่อไม่เกิดการสูญเสียการส่งกำลังไฟฟ้าในสายส่งสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังบัสที่ 3 ได้จากสมการดังนี้

$$P_{Bus3} = V_{Bus3} I_{Bus3} \tag{2.1}$$

โดยกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า V_{Bus3} และกระแสไฟฟ้า I_{Bus3} ที่ถูกส่งมา ดังนั้น ถ้าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดีซีนี้ให้คงที่ได้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในดีซีไมโครกริดนี้จะไม่เกิดขึ้น แต่แรงดันไฟฟ้าจะเป็นค่าๆ หนึ่งที่ยอมรับให้มีค่าอยู่ในช่วงๆ หนึ่งเท่านั้นหรือเป็นค่าที่ถูกกำหนดในการส่งกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ซึ่งจากสมการที่ (2.1) การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะสามารถทำได้เพียงควบคุมกระแสไฟฟ้า I_{Bus3} ที่ส่งผ่านมาเท่านั้น ดังนั้น การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะได้จากการชาร์จและดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าที่ส่งจากบัสที่ 3 ไปยังบัสที่ 4 โดยกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 จะสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_{Bus4} = P_{Bus3} + \Delta P_s \tag{2.2}$$

เมื่อกำหนดให้กำลังไฟฟ้า ΔP_s มีค่าเป็นบวกหรือลบจากการชาร์จและดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้า ตามลำดับและสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้า ΔP_s ได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P_s = V_{Bus3} \Delta I_s \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้จากสมการ

$$P_{Bus4} = P_{Bus3} + V_{Bus3} \Delta I_5 \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) จะแสดงให้เห็นว่า ถ้าควบคุมกระแสไฟฟ้าดีซี ΔI_5 ที่ไหลเข้าและออกอุปกรณ์ SMES-FCL นี้จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 (P_{Bus4}) ให้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้านี้ได้ ดังนั้น คอนเวอร์เตอร์ของอุปกรณ์ SMES-FCL จะทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าในสายส่งดีซีด้วยการควบคุมกระแส ΔI_5

และจากภาพที่ 2.6 การจำกัดกระแสฟลัดด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดในดีซีโมโครกริดนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยสมการการหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดจากสมการ

$$Z_L = V_L / I_L \quad (2.5)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด [18] หาได้จากสมการ

$$V_L = L_{sc} di_L / dt \quad (2.6)$$

เมื่อกำหนดให้

Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

V_L คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด

I_L คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด

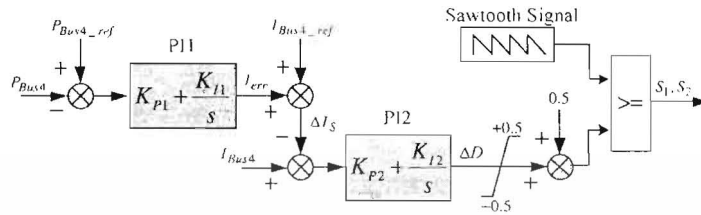
L_{sc} คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

ตามอุดมคติการไหลของกระแสไฟฟ้าดีซีเมื่อไม่เกิดการกระเพื่อมหรือการแกว่งของกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้เทอมอนุพันธ์กระแส I_L ในสมการที่ (2.6) มีค่าเป็นศูนย์ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม V_L มีค่าเป็นศูนย์ตามไปด้วยและเช่นเดียวกับค่าอิมพีแดนซ์ Z_L ในสมการที่ (2.5) จะมีค่าเป็นศูนย์ตามแต่ในทางตรงกันข้ามถ้ากระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันหรือกระแสฟลัดไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดนี้เทอมอนุพันธ์กระแส I_L จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม V_L เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอิมพีแดนซ์ Z_L จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล [18] ด้วยเหตุนี้ ในสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบเมื่อใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการจำกัดกระแสฟลัดจะเปรียบเสมือนการแทรกอิมพีแดนซ์เข้าไปยังในระบบดีซีโมโครกริดอย่างทันทีทันใด ซึ่งทำให้สามารถลดกระแสฟลัดที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ

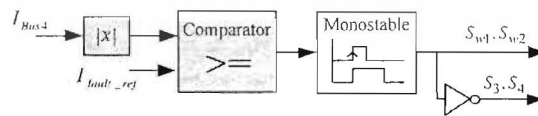
2.3.1 การออกแบบตัวควบคุม



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES

จากหัวข้อที่ 5.2 สามารถนำมาสู่วิธีการออกแบบตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของอุปกรณ์ SMES-FCL โดยการออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมในส่วนของ SMES จะใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) 2 ตัวควบคุม และ โครงสร้างของ FCL จะใช้การตรวจจับกระแสฟลัดซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.7 และสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

ความต้องการลดการแกว่งของกำลังไฟในสถานะปกติที่บัสที่ 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} และผลเปรียบเทียบนี้จะเป็นค่ากระแส ΔI_s ตามสมการที่ (2.4) ซึ่งกระแส ΔI_s นี้จะเป็นตัวบ่งบอกว่ากระแสในระบบจะต้องเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นจึงนำกระแส ΔI_s ไปหักลบกับกระแสจริง I_{Bus4} จะได้ค่าผลเปรียบเทียบนี้เป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ PI2 และเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ PI2 จะเป็นค่าเบี่ยงเบนคิวดิไซเคล (ΔD) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าคิวดิไซเคลและเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจึงได้สัญญาณควบคุมสวิตช์ IGBT ของสวิตช์ S_1 และ S_2 เนื่องจากการใช้ตัวควบคุมพีไอ PI และ PI2 นี้ค่า K_{P1} , K_{P2} , K_{I1} และ K_{I2} จะต้องได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์นี้ที่เหมาะสมด้วยวิธีเพิ่มประสิทธิภาพซึ่งจะกล่าวในภายหลัง



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของตัว ควบคุม FCL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาวะเกิดความผิดปกติพร้อมต้องการตัววัดสำหรับการสั่งสวิตช์ S_{w1} กับ S_{w2} และ S_3 กับ S_4 เพื่อให้ตัววงจรบริดจ์ได้สมบรูณ์ จึงต้องเลือกสัญญาณที่สามารถบ่งบอกได้ว่าเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบได้ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และอื่นๆ ซึ่งในที่นี้ได้ทำการเลือกกระแสไฟฟ้าเนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญและเป็นความต้องการที่อยากจะให้กระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นลดลง ตามภาพที่ 2.8 เป็นตัวควบคุมของ FCL โดยวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าจริง I_{Bus} เปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิง I_{fault_ref} ที่ตั้งค่าไว้ที่ 1.5 pu หรือ 2250 A ถ้ากระแสไฟฟ้า I_{Bus} มีค่ามากกว่า 1.5 pu เอาท์พุทของบล็อก Comparator จะส่งสัญญาณ Logic 1 ให้กับบล็อกโมโนสเตเบิล (Monostable) ซึ่งบล็อกโมโนสเตเบิลจะทำหน้าที่ดีเลย์สัญญาณเพื่อป้องกันการเกิดความผิดปกติซ้ำซ้อนในระยะเวลาใกล้เคียงกันและเอาท์พุทที่ได้จะเป็นสัญญาณควบคุมสวิตช์ IGBT S_{w1} กับ S_{w2} และ S_3 กับ S_4

2.3.2 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ SMES-FCL

ในบทนี้ได้เพิ่มเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ SMES-FCL ในระบบไมโครกริดด้วยการออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวด SC และพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่อย่างเหมาะสม เพื่อควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการจำกัดกระแสฟลัดด์ที่เกิดขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ การใช้ฟังก์ชันพลังงานในออกแบบความต้องการให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด และการหาพลังงานสะสมเริ่มต้นที่น้อยที่สุดที่ใช้ทำเสถียรภาพและสามารถอธิบายวัตถุประสงค์ของการออกแบบเป็นฟังก์ชันสมการได้ดังนี้

หลักการฟังก์ชันพลังงานจะถูกใช้เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ [19] เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบจะส่งผลให้พลังงานจลน์ที่สะสมในโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG เพิ่มขึ้นอย่างสูง และในเวลาเดียวกันกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสกังหันลม DFIG จะลดลงทันทีทันใด ส่งผลให้กังหันลม DFIG ไม่สามารถข้ามผ่านความผิดปกตินี้ได้ เพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์ข้ามผ่านความผิดปกตินี้ ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะแทรกเข้ามาในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวขยับกระแสฟลัดด์และการสะสมพลังงานจลน์ในโรเตอร์ และยังมีผลให้กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงนั้นเพิ่มขึ้นได้อีกด้วย ซึ่งสามารถแสดงสมการฟังก์ชันพลังงานได้ดังนี้

$$V = V_k(\omega_1(t), \omega_2(t)) + V_p(\delta_1(t), \delta_2(t)) \quad (2.7)$$

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 (2.7) จะได้

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial V_k}{\partial \omega_i} \frac{d\omega_i}{dt} + \frac{\partial V_p}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{dt} \right) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) สามารถอธิบายได้ว่า ถ้า dV/dt มีค่าเป็นบวกหมายถึงการสะสมพลังงานและทางตรงกันข้ามถ้ามีค่าเป็นลบหมายถึงการคายพลังงาน ดังนั้น เมื่อ dV/dt มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าพลังงานทั้งหมดมีค่าลดลงหรือพลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะถูกคายพลังงานออกไป ซึ่งถ้า dV/dt มีค่าเป็นลบลดลงจนถึงจุดสูงสุดแล้วแสดงว่าระบบจะมีผลตอบสนองการหน่วงที่มากขึ้นและเร็วขึ้นนั่นเอง จากสมการการแกว่ง

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{(P_m - P_e)}{M_i} \quad (2.9)$$

โดยที่

M_i คือค่าคงที่ความเฉื่อยของกังหันลม DFIG ตัวที่ i

P_m คือกำลังทางกลของกังหันลม DFIG ตัวที่ i

P_e คือกำลังทางไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ตัวที่ i

แทนค่าสมการที่ (2.9) ในสมการที่ (2.8) จะได้

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial V_k}{\partial \omega_i} \frac{P_m}{M_i} + \frac{\partial V_p}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{dt} \right) - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial V_k}{\partial \omega_i} \frac{1}{M_i} P_e \quad (2.10)$$

และฟังก์ชันพลังงานจลน์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_k = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t))^2 \quad (2.11)$$

และเมื่อทำการอนุพันธ์ฟังก์ชันพลังงานจลน์ในสมการที่ (2.11) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\partial V_c / \partial \omega_i = M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t)) \quad (2.12)$$

เมื่อกำหนดให้ $\omega_0(t)$ หาค่าได้จาก

$$\omega_0(t) = \frac{(\omega_1(t)M_1 + \omega_2(t)M_2)}{(M_1 + M_2)} \quad (2.13)$$

และนำสมการที่ (2.12) แทนลงในสมการที่ (2.10) ในทอมขวาสุดจะได้

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^2 \left((\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{mi} + \frac{\partial V_p}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{dt} \right) - V_c \quad (2.14)$$

โดยที่ V_c หาได้จาก

$$V_c = \sum_{i=1}^2 (\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{ci} \quad (2.15)$$

เนื่องจากในสภาวะเกิดความผิดพลาดในระบบเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ δ , P_{mi} และ V_p จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในระยะเวลาสั้นๆ จึงสามารถตัดเทอมแรกของสมการที่ (2.14) ที่ได้จึงเหลือเทอม V_c ซึ่งจะแปรผันตรงกับ P_{ci} ที่มีผลโดยตรงต่อ dV/dt ดังนั้น อุปกรณ์ FCL จะช่วยให้ V_c มีค่าเพิ่มขึ้นได้โดยการควบคุม P_{ci} ให้มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่า dV/dt ก็จะมีค่าเป็นลบมากขึ้น เมื่อค่า dV/dt มีค่าเป็นลบมากขึ้นจะแสดงให้เห็นถึงการคายพลังงานจลน์ที่สะสมในโรเตอร์ออกมาได้ไวขึ้นและยิ่งคายพลังงานจลน์ออกมาได้ไวขึ้นระบบก็จะเข้าสู่เสถียรภาพได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

หลังจากเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ กังหันลม DFIG จะเข้าสู่สภาวะปกติและส่วนของ อุปกรณ์ SMES จะกลับมาทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเช่นเดิมโดยต้องการให้การแกว่งของกำลังไฟฟาลดลงน้อยที่สุด โดยใช้วิธีหาค่าที่น้อยที่สุดของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ IAE } \Delta P_{B.S.4} = \int_{t_0}^{t_f} |\Delta P_{B.S.4}(t)| dt \quad (2.16)$$

โดยที่

t_0 คือเวลาเริ่มต้นจำลองระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t_c คือเวลาสิ้นสุดจำลองระบบ

และอีกวัตถุประสงค์ของการออกแบบคือการหาค่าพลังงานสะสมเริ่มต้นที่น้อยที่สุดที่ใช้ทำเสถียรภาพ ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดและกระแสเริ่มต้น โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \quad (2.17)$$

โดยที่

E_{SC0} คือพลังงานสะสมเริ่มต้น

L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำ

I_{SC0} คือกระแสเริ่มต้น

จากวัตถุประสงค์ทั้งสามข้อที่กล่าวมานำมาเขียนเป็นฟังก์ชันสมการวัตถุประสงค์รวมกันได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } J = 1/V_C + \int_{t_0}^{t_c} |\Delta P_{BES4}(t)| dt + E_{SC0} \quad (2.18)$$

สำหรับการหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (2.18) นี้จะใช้วิธี PSO เพื่อที่จะปรับหาค่า L_{SC} , I_{SC0} , K_{P1} , K_{P2} , K_{I1} และ K_{I2} ให้มีความเหมาะสมโดยอัตโนมัติพร้อมกัน และกระบวนการค้นหาค่าตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบไว้ดังนี้

ค่าความเหนี่ยวนำทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 5 H

ค่ากระแสเริ่มต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 2kA

ค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{P1} , K_{P2} , K_{I1} และ K_{I2} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.001 ถึง 20

ส่วนพารามิเตอร์ของขบวนการวิธี PSO กำหนดดังนี้

จำนวนอนุภาค 50 ตัว

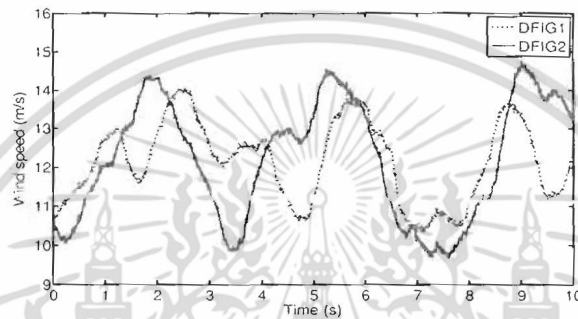
จำนวนรอบของการค้นหา 100 รอบ

ในการศึกษาครั้งนี้ อุปกรณ์ SMES-FCL ที่นำเสนอ นั้นจะทำการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ SMES และระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม (No controller)

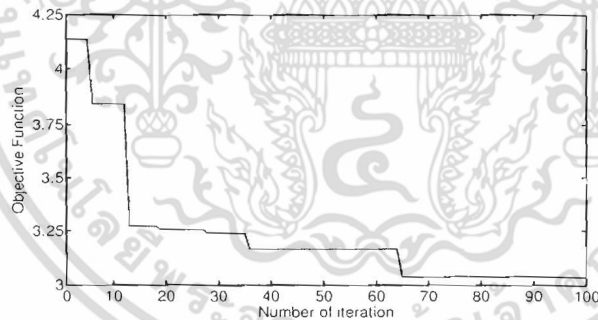
2.4 ผลการจำลองและทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่าความเหนี่ยวนำกระแสเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมของ อุปกรณ์ SMES-FCL จะใช้โปรแกรม Matlab/SimPowerSystem [20] ในการจำลองระบบดังภาพที่ 2.1 ภายใต้ความเร็วลมดังภาพที่ 2.9 และจำลองการเกิดความผิดพลาดที่สายส่งดีซีซึ่งกราวด์ที่จุด F₁ เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 4 s ผลลัพธ์การค้นหาค่าคำตอบของสมการที่ (2.18) สามารถแสดงการลู่เข้าหาค่าตอบของ ค่าน้อยที่สุดแสดงได้ดังภาพที่ 2.10 และแสดงผลคำตอบแต่ละเทอมได้ดังภาพที่ 2.11 และผลคำตอบของ พารามิเตอร์อุปกรณ์ SMES-FCL ที่ค้นหาแสดงได้ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งพารามิเตอร์นี้จะใช้เปรียบเทียบกับ อุปกรณ์ SMES ที่ใช้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ของกำลังไฟฟ้าตามสมการที่ (2.16) ในการ ออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของอุปกรณ์ SMES เพียงแต่ขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดของอุปกรณ์ SMES จะถูกกำหนดให้มีค่าใหญ่กว่าและพลังงานสะสมเริ่มต้นที่มากกว่าอุปกรณ์ SMES-FCL

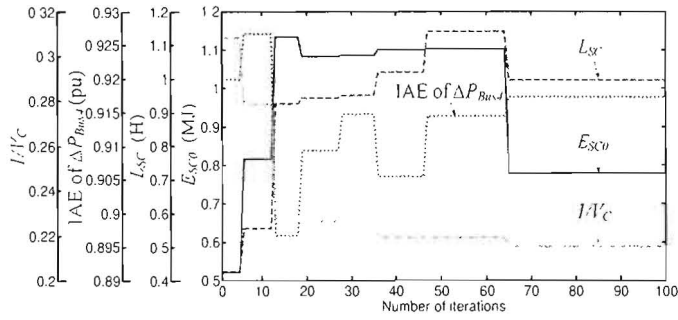


ภาพที่ 2.9 ความเร็วลม



ภาพที่ 2.10 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของสมการวัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ I/V_C , $IAE \Delta P_{Bus4}$, L_{SC} และ E_{SC0}

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ SMES และ SMES-FCL

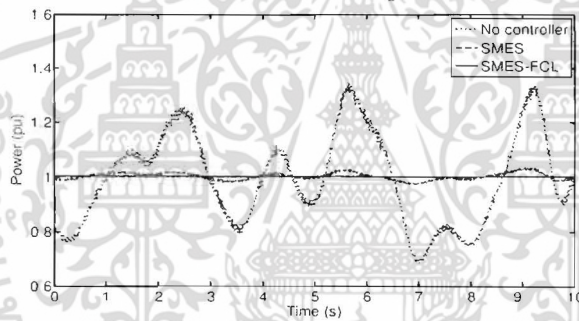
พารามิเตอร์	SMES	SMES-FCL
L_{SC} (H)	2.5	0.99
I_{SC0} (kA)	1.2	1.25
E_{SC0} (MJ)	1.8	0.77
K_{p1}, K_{I1}	9.74, 0.16	12.11, 5.65
K_{p2}, K_{I2}	15.11, 6.21	19.01, 3.22

ผลการจำลองระบบในสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะแสดงได้ดังภาพที่ 2.12 เป็นกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 ซึ่งกรณีเมื่อระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมจะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูงตามเส้นประสีแดง และกรณีอุปกรณ์ SMES กำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงอย่างมากแต่ยังแกว่งรอบๆค่ากำลังไฟฟ้า 1 pu ตามเส้นประสีเขียว และเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL กำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงกว่ากรณี SMES อย่างมาก

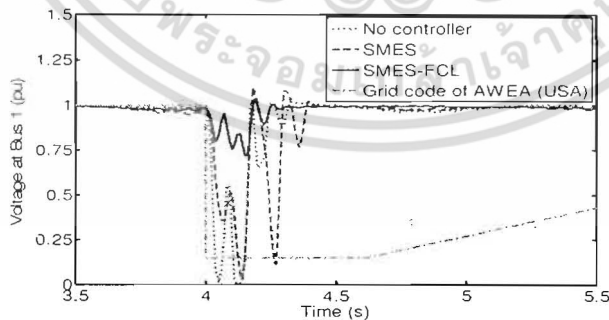
เมื่อเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบจะสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังภาพที่ 2.13 – 5.21 โดยแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และ 2 จะเป็นแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลม DFIG1 และ DFIG2 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 2.13 และ 5.14 จะเห็นได้ว่าทั้งกรณีไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและ SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงต่ำสุดประมาณ 0 pu ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกริดโค้ด AWEA (USA) ที่ต้องมีแรงดันไฟฟ้าลดลงไม่ต่ำกว่า 0.15 pu เป็นเวลา 625ms [21] ส่งผลให้กังหันลมต้องปลดตัวเองออกจากระบบ แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำสุดประมาณ 0.75pu และเมื่อแสดงเป็นกราฟแท่งของการลดลงของแรงดันไฟฟ้าแต่ละบัสตามภาพที่ 2.15 แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงมากกว่า 85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าปกติจะแสดงถึงการไม่ผ่านมาตรฐานกริด โคลจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าทั้งกรณีไม่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและ SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเกินมาตรฐานกริดโค้ดแต่ในกรณี SMES-FCL จะผ่านมาตรฐานกริดโค้ด ในภาพที่ 2.16 และ 5.17 แสดงถึงกระแสฟอลต์ที่บัสที่ 1 และบัสที่ 2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากรณีไม่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมกระแสจะพุ่งขึ้นสูงประมาณ 3.25 pu ในบัสที่ 2 และ 3 pu ในบัสที่ 1 แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL กระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นจะลดลงอย่างมาก ส่วนกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และบัสที่ 2 ในภาพที่ 2.18 และ 5.19 จะแสดงให้เห็นถึงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูงในช่วงเกิดฟอลต์เมื่อไม่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและ SMES เมื่อทำการติดตั้ง SMES-FCL จะลดการแกว่งนี้ได้และเข้าสู่ภาวะปกติได้อย่างรวดเร็ว เมื่อแสดงผลการจำลองของความเร็วโรเตอร์ในภาพที่ 2.20 และ 5.21 เห็นได้อย่างชัดเจนว่า SMES-FCL จะลดการแกว่งของความเร็วในโรเตอร์ได้เร็วกว่ากรณีอื่นๆ และสามารถแสดงค่าของพลังงานสะสมใน SMES-FCL กับ SMES ในการทำเสถียรภาพทั้งการแก้ปัญหาการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการแก้ปัญหาของการเกิดความผิดพลาดในระบบดังตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ทั้ง MW และ MJ ของ SMES-FCL จะใช้พลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นน้อยกว่า SMES ทั้งที่ขดลวดของ SMES-FCL มีขนาดเล็กกว่า SMES

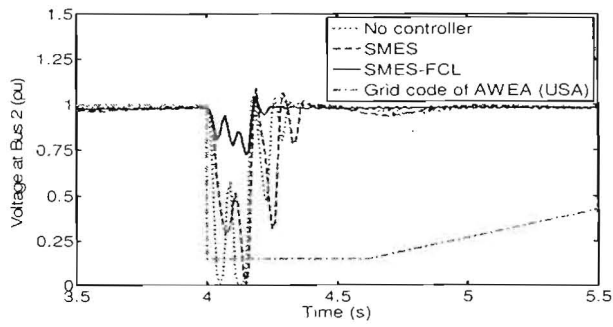


ภาพที่ 2.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4

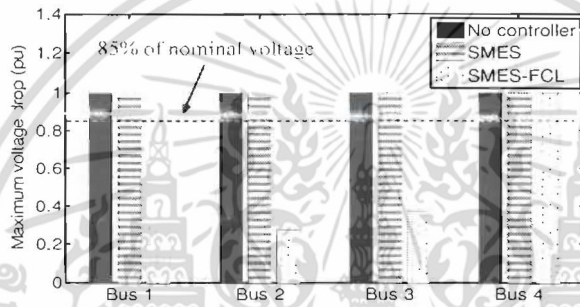


ภาพที่ 2.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1

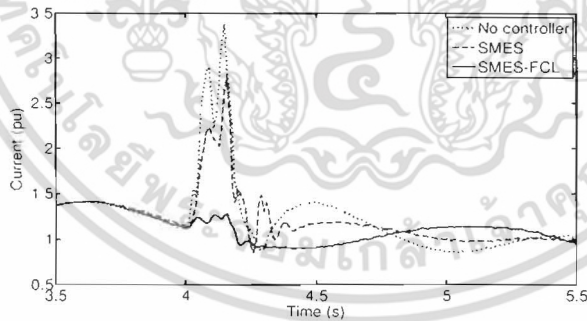
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.14 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2

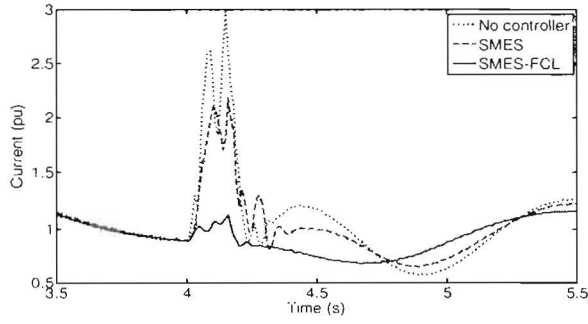


ภาพที่ 2.15 การเปรียบเทียบการลดลงของแรงดันไฟฟ้า

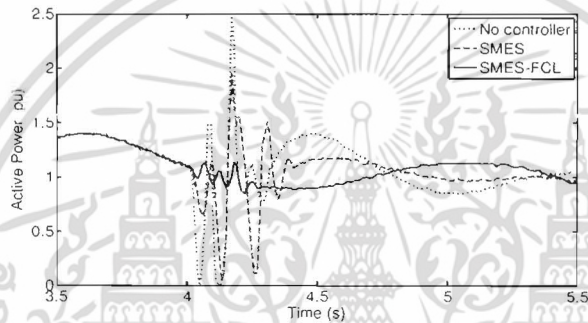


ภาพที่ 2.16 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1

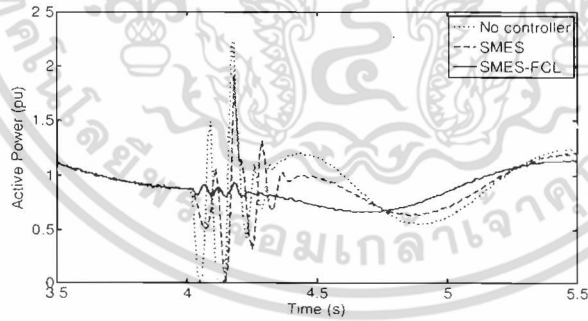
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2

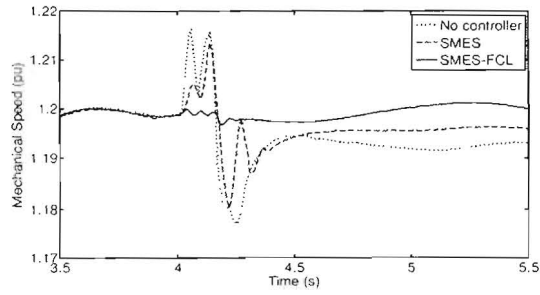


ภาพที่ 2.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1

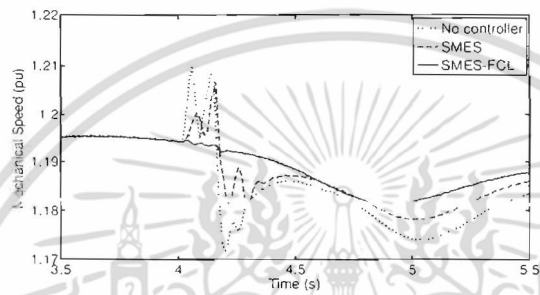


ภาพที่ 2.19 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.20 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG1



ภาพที่ 2.21 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG2

ตารางที่ 2.4 พลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นของอุปกรณ์ SMES และ SMES-FCL

ขนาด	SMES	SMES-FCL
MW	3.81	2.68
MJ	2.38	1.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอโครงสร้างของอุปกรณ์ SMES-FCL ในระบบดีซีไมโครกริด ซึ่งมีการพัฒนามาจากอุปกรณ์ SMES แบบดั้งเดิมเพื่อให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG และยังสามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอ ขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพลังงานสะสมเริ่มต้นด้วยเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ SMES-FCL โดยใช้หลักการฟังก์ชันพลังงานเข้าร่วมในการออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งการออกแบบอย่างเหมาะสมจะเป็นกระบวนการอย่างอัตโนมัติด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (PSO) ผลการจำลองได้แสดงให้เห็นว่าทั้งภายใต้สภาวะปกติที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ อุปกรณ์ SMES-FCL จะสามารถทำเสถียรภาพในระบบดีซีไมโครกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่าอุปกรณ์ SMES ถึงแม้ว่าขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็น MW/MJ ของอุปกรณ์ SMES-FCL จะน้อยกว่าที่เลือกใช้อุปกรณ์ SMES

ในการศึกษาต่อไป จะพิจารณาการควบคุมประสานอุปกรณ์ SMES-FCL ในระบบเอซีไมโครกริด เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าและปรับปรุงการข้ามผ่านความผิดปกติของกังหันลม DFIG



บทที่ 4
ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. 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.

(Impact Factor 2013 = 1.324)

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. T. Karaipoom and I. Ngamroo (2013). Enhancement of LVRT performance and alleviation of power fluctuation of DFIG wind turbine in DC microgrid by SMES. *Proc. 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD2013)*. Oct. 25-27, 2013, Beijing, China, pp.207-208.

ได้เนบบทควมในภคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] World Energy Outlook 2012, International Energy Agency (IEA). (<http://www.ica.org/>)
- [2] G. Boyle, Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, Oxford University Press, USA, 3rd edition, 2012.
- [3] แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2555-2573 (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ดาวน์โหลดได้ที่ <http://www.eppo.go.th/index-T.html>
- [4] T. Ackermann, Wind power in power systems, Wiley, 2nd edition, 2012.
- [5] M.H.J. Bollen and F. Hassan, Integration of distributed generation in the power system, Wiley, 2011.
- [6] N. Jenkins, G. Strbac and J. Ekanayake, Distributed generation, The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [7] A. Yokoyama "A large-capacity of wind power generations from power system viewpoints." The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.129, No.5, pp.299-302, 2009.
- [8] T. Ise, Y. Murakami, and K. Tsuji, "Simultaneous active and reactive power control of superconducting magnetic energy storage using GTO converter." IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.1, Issue 1, pp.143-150, 1986.
- [9] Y. Mitani, K. Tsuji, and Y. Murakami, "Application of superconducting magnet energy storage to improve power system dynamic performance." IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, Issue 4, pp.1418-1425, 1988.
- [10] S.S. Kalsi, Applications of high temperature superconductors to electric power equipment, IEEE PRESS, 2011.
- [11] E. Thuries, et al., "Towards the superconducting fault current limiter." IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.6, No.2, pp.143-150, 1986.
- [12] 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, pp.5600805, June 2012.
- [13] 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.

- [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] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] J. Machowski, J. Bialek, and J. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.
- [20] Mathworks, *MATLAB SimPowerSystems*, Natick, MA, USA, Oct. 2004.
- [21] 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.

ภาคผนวก

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล อิศระชัย งามหรุ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

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

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ การควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

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

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่

1. 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).
2. 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.
3. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. J. 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.
5. J. 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.
6. M. Saejia and J. 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.
7. J. 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)

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

อื่นๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

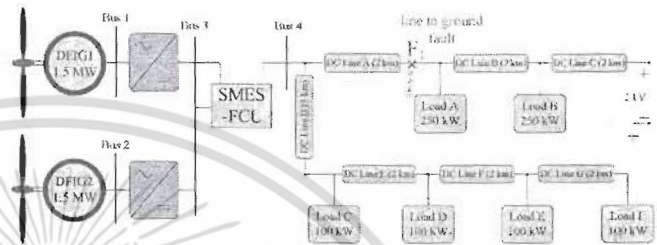


Fig. 1. Study system.

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

1051-8223 © 2014 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.

See http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html for more information.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

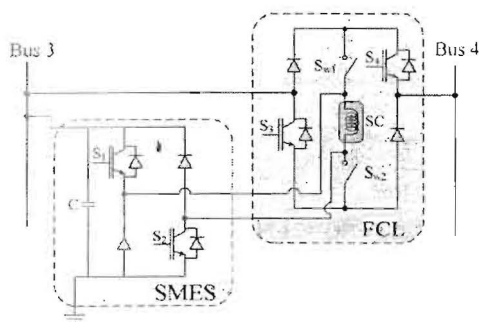


Fig. 2. SMES-FCL circuit.

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 (PI) 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

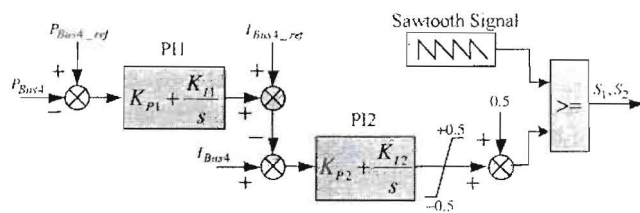


Fig. 3. Chopper controller of the SMES part.

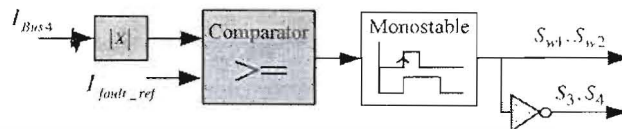


Fig. 4. Chopper controller of the FCL part.

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 S1 and S2 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_{P_i} and K_{I_i} , $i = 1, 2$), 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

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.

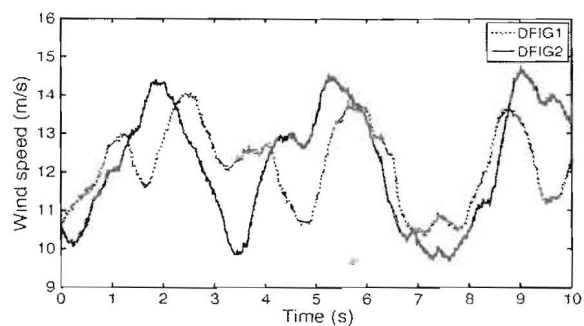


Fig. 5. Wind speeds of DFIG1 and DFIG2.

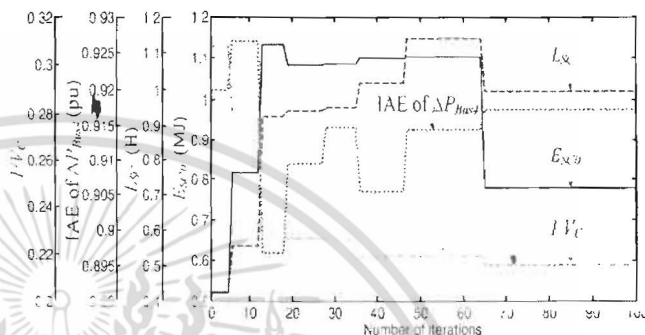


Fig. 6. Convergence curves of $1/V_C$, IAE of ΔP_{Bus4} , L_{SC} , and E_{SC0} .

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

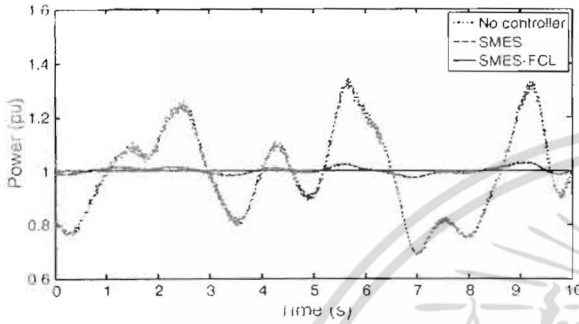


Fig. 7. Power flow at bus 4.

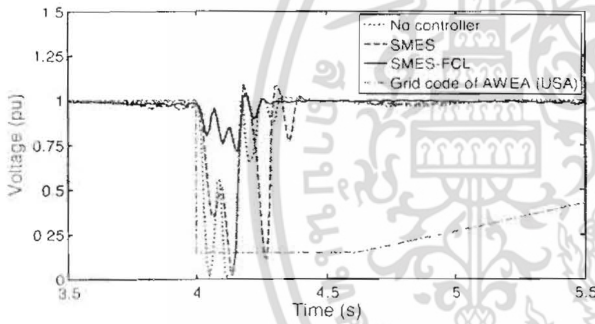


Fig. 8. Terminal voltage of DFIG1 at bus 1.

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-FCL, 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.

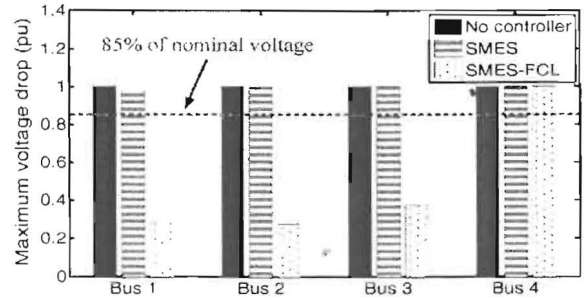


Fig. 9. Maximum voltage drop.

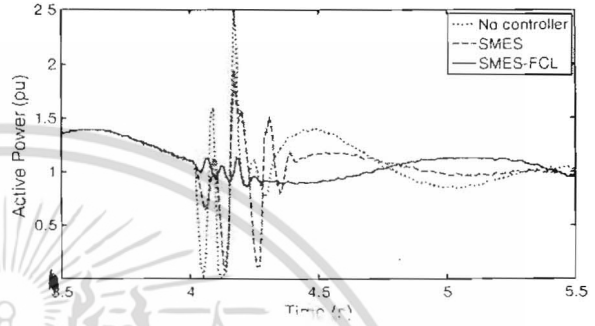


Fig. 10. Power flow at bus 1.

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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REFERENCES

- [1] K. Stranz, E. Ahlasi, 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, J. 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. Schlabback, "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.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

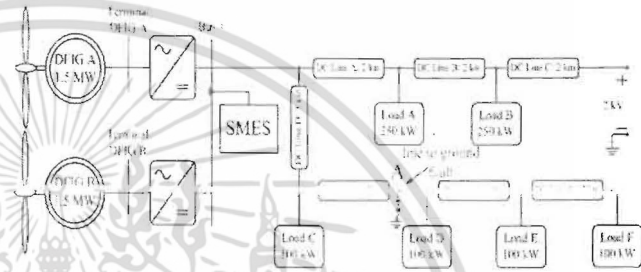


Figure 1. DC microgrid with DFIG wind turbines and SMES.

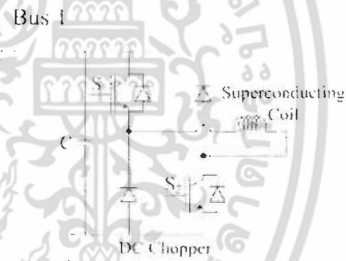


Figure 2. SMES circuit.

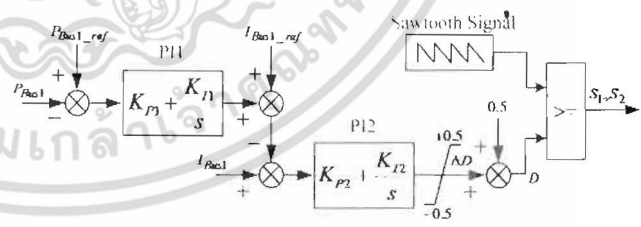


Figure 3. Controller of DC chopper.

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_{PV}	2.5
Initial stored energy (MJ)	1.8	K_{II}, K_{ID}	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].

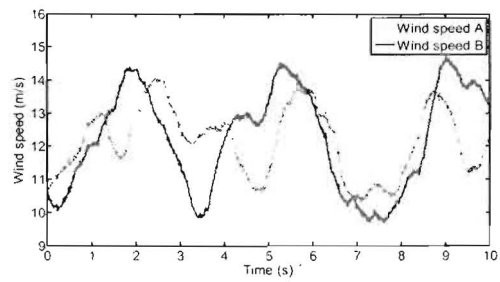


Figure 4. Wind speeds.

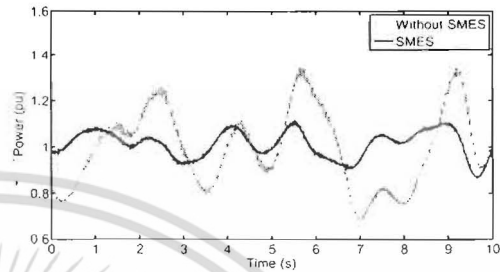


Figure 5. DC power at bus 1.

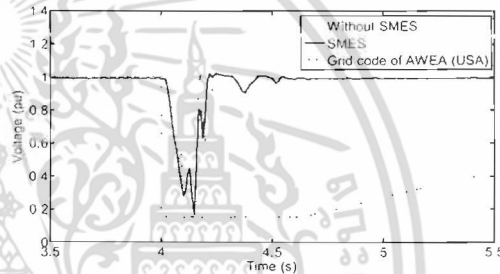


Figure 6. Terminal voltage of DFIG-A.

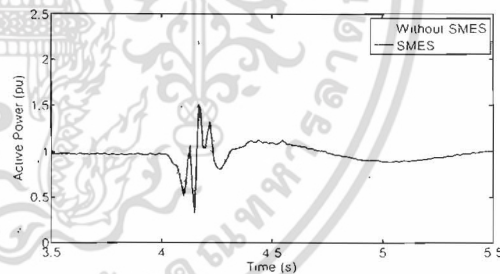


Figure 7. Active power at terminal of DFIG-A.

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. Karaipoom, and I. Ngamroo, "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)