



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงสมรรถนะการข้ามผ่านสิ่งผิดปกติของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางด้วยอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กที่ใช้ตัวนำยิ่งยวดซึ่งเพิ่มฟังก์ชันการจำกัด

กระแสผิดปกติ

Enhancement of Fault Ride Through Performance of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator by Superconducting Magnetic Energy Storage with Fault Current

Limitation Function

นายอิสระชัย งามหรว

600272804

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณทุนรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการ (ภาษาไทย) การปรับปรุงสมรรถนะการข้ามผ่านสิ่งผิดปกติของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางด้วยอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กที่ใช้ตัวนำยิ่งยวดซึ่งเพิ่มฟังก์ชันการจำกัดกระแสผิดปกติ

แหล่งเงิน เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2557 ถึง กันยายน 2558

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายอิสระชัย งามทร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่าน (Low Voltage Ride Through) ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดปกติในระบบดีซีไมโครกริดและการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องมาจากการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่ไม่คงที่ ซึ่งปัญหาทั้งการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเป็นปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับกังหันลม DFIG เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ขึ้นใหม่ในระบบดีซีไมโครกริด ซึ่ง SMES นี้จะเพิ่มเติมส่วนของฟังก์ชันการจำกัดกระแสฟอลต์เพื่อสามารถที่จะเป็นทั้งอุปกรณ์ที่ใช้สะสมพลังงานและจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) ไปพร้อมๆ กัน ในช่วงที่เกิดปัญหากำลังไฟฟ้าแกว่ง SMES-FCL จะทำหน้าที่คล้ายกับ SMES คือมีหน้าที่สะสมพลังงานทั้งรับและคายกำลังไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติอย่างฉับพลันในระบบดีซีไมโครกริด SMES-FCL จะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสด้วยการต่อวงจรไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) เข้าระบบไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติซึ่งจะเป็นการแก้ปัญหาการลดลงของแรงดันไฟฟ้าในระบบและในที่นี้ยังเพิ่มเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของ SMES-FCL ในระบบไมโครกริดอีกด้วย โดยใช้หลักการวิธีฟังก์ชันพลังงานเพื่อใช้ออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวด SC และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่า SMES-FCL จะมีประสิทธิผลเหนือกว่า SMES แบบดั้งเดิมในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่ออยู่ในระบบดีซีไมโครกริด

คำสำคัญ: กังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด อุปกรณ์จำกัดกระแสฟอลต์ ไมโครกริด การทำให้เหมาะสม

**Research Title:** Enhancement of Fault Ride Through Performance of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator by Superconducting Magnetic Energy Storage with Fault Current Limitation Function

**Researcher:** Issarachai Ngamroo

**Faculty:** Engineering **Department:** Electrical Engineering

### ABSTRACT

The vital problems of doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine are power fluctuation and low-voltage ride-through (LVRT) 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 PI control parameters of choppers. Simulation study confirms the superior control effect of the SMES-FCL over the conventional SMES.

**Keywords:** Doubly-fed induction generator, superconducting magnetic energy storage, fault current limiter, microgrid, optimization

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า  
คุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

อิสรรัชย์ งามหรุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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.....	4
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	6
บทที่ 2 การควบคุมที่นำเสนอ.....	7
2.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด.....	7
2.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL.....	9
2.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสมที่สุด.....	15
2.4 ผลการจำลองและทดสอบ.....	20
บทที่ 3 สรุปผลการวิจัย.....	27
บทที่ 4 ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	28
บรรณานุกรม.....	29
ภาคผนวก.....	33
ประวัตินักวิจัย.....	33

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบ.....	8
2.2 การทำงานของสวิตช์ของดีซีช้อปเปอร์ใน SMES-FCL.....	12
2.3 พารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL.....	21
2.4 ขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES และ SMES-FCL.....	25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ระบบดีซีไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา.....	8
2.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES.....	9
2.3 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL.....	9
2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะปกติ.....	10
2.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะเกิดความผิดปกติ.....	11
2.6 หลักการทำงานของ SMES-FCL.....	13
2.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES.....	15
2.8 โครงสร้างของตัวควบคุม FCL.....	16
2.9 ความเร็วลม.....	20
2.10 การหาค่าค่าคำตอบของสมการวัตถุประสงค์.....	20
2.11 การหาค่าค่าคำตอบของ $1/V_C$ , $IAE \Delta P_{Bus4}$ , $L_{SC}$ และ $E_{SCO}$ .....	21
2.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4.....	22
2.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	22
2.14 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	23
2.15 การเปรียบเทียบการลดลงของแรงดันไฟฟ้า.....	23
2.16 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	23
2.17 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	24
2.18 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1.....	24
2.19 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2.....	24
2.20 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG1.....	25
2.21 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG2.....	25

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

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) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายและมีอัตราการกำลังการผลิตประมาณ 318 GW ในปลายปี 2013 และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ปี [2] โดยเฉพาะกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบิออนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งเป็นกังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตกำลังไฟฟ้า และได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอันเนื่องมาจากประโยชน์หลายด้าน เช่น การติดตั้ง การลงทุนที่ต่ำ ความสามารถในการควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แยกอิสระต่อกัน [3] ซึ่งการติดตั้งกังหันลม DFIG ในระบบกำลังไฟฟ้าจะส่งผลดีในแง่ของการเพิ่มกำลังการผลิตให้ระบบไฟฟ้าเพื่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม การติดตั้งกังหันลม DFIG ยังส่งผลเสียร้ายแรงต่อเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย เนื่องมาจากกังหันลมจะได้รับพลังงานลมที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้กังหันลม DFIG ผลิตกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power Fluctuation) ให้กับระบบ [4, 5] เมื่อการติดตั้งกังหันลมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ระบบเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางส่วนจะต้องปลดตัวเองออกจากระบบ ทำให้ความถี่ระบบจากการรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักในระบบลดน้อยลง ส่งผลให้เมื่อเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบจะนำไปสู่การเสถียรภาพได้ง่าย [6, 7] นอกจากนี้ กังหันลม DFIG ยังมีจุดบกพร่องในโครงสร้างของตัวกังหันลมเอง เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ เนื่องจากกังหันลม DFIG ขดลวดทางด้านสเตเตอร์จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยตรง และขดลวดทางด้านโรเตอร์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter) และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริด (Grid Side Converter) [8] ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์จะอ่อนไหวต่อการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบเมื่อเกิดกระแสฟลัดอย่างฉับพลัน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิน (Overcurrent) ทั้งทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ 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 และยังสามารถกลับมาทำงานในสภาวะปกติได้ดั้งเดิม

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) เมื่อยังจำกัดกระแสฟอลต์ได้มากเท่าไรก็จะเกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นมากเท่านั้น ดังนั้น ควรจะต้องพิจารณาถึงค่าความต้านทานที่เหมาะสมด้วย เมื่อขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถนำมาเป็นทั้ง SMES และ FCL จึงมีการนำเสนอการร่วมกันของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ใน [17-20] โดยใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันในการทำเสถียรภาพทั้งการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการยับยั้งกระแสฟอลต์ที่เกิดจากความผิดปกติ โดย SMES จะติดตั้งขนานกับบัสแบบทั่ว ๆ ไป และทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แต่เมื่อมีการทำงานร่วมกันกับ FCL แล้วตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะต่อกับสายส่งอีกด้วยโดยผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบอย่างอัตโนมัติผ่านวงจรเรียงกระแส ซึ่งเปรียบเสมือนการแทรกซึมที่แดนซ์เข้าไปในระบบด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อจำกัดกระแสฟอลต์ นอกจากนี้ ยังมีการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในกังหันลม DFIG ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดใน [21] ด้วยสมรรถนะการสะสมพลังงานไฟฟ้าและการตอบสนองที่รวดเร็วของขดลวดตัวนำยิ่งยวด ทำให้การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงทั้งทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์เป็นไปได้อย่างอิสระต่อกัน ส่งผลให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ได้จากภายใน ยิ่งไปกว่านั้น ใน [22] ยังนำเสนอการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในกังหันลม DFIG ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านกริดด้วยโครงสร้างแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage Source Topology) และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current Source Topology) ในสภาวะปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แต่เมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเชื่อมต่อไปยังทางด้านโรเตอร์หรือสเตเตอร์เพื่อใช้จำกัดกระแสเกินที่เกิดทางด้านโรเตอร์หรือสเตเตอร์ ซึ่งผลลัพธ์ยังแสดงว่าการเชื่อมต่อขดลวดตัวนำยิ่งยวดในลักษณะอนุกรมกับทางด้านสเตเตอร์จะทำให้ความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติได้ดีกว่าการเชื่อมอนุกรมกับทางด้านโรเตอร์ แต่อย่างไรก็ตาม ใน [21, 22] ก็ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่ใช้นั้นมีความเหมาะสม

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

โดยในการศึกษาจะนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ออกแบบ Superconducting Magnetic Energy Storage-Fault Current Limiter (SMES-FCL) ในระบบดีซีไมโครกริดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ

การข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG และรายละเอียดของที่มา และความสำคัญของปัญหาอธิบายดังต่อไปนี้

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

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอใน [22, 15] และ [17-20] โดยการใช้งานรวมกันของ SMES และ FCL เพื่อใช้แก้ปัญหาดังกล่าวในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใน [22] ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะติดตั้งภายในกังหันลม DFIG เพื่อใช้ขยับช่วงกระแสเกินและแรงดันไฟฟ้าเกินในช่วงที่เกิดความผิดปกติในระบบ และใน [15] SMES จะมีส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ทั้งการชดเชยแบบอนุกรมและขนานเพื่อใช้ลดการแกว่งทั้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของกังหันลม แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ SMES ใน [22, 15] ไม่สามารถแสดงผลของการลดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลม DFIG ในระหว่างเกิดความผิดปกติได้ ดังนั้น จะไม่สามารถยืนยันได้ว่ากังหันลม DFIG จะสามารถข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านได้ ส่วนใน [17-20] แสดงถึงการใช้งานรวมกันของ SMES และ FCL เพื่อใช้ขยับช่วงแอฟลัดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบที่ไม่ได้ติดตั้งแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ซึ่งในงานวิจัยที่กล่าวมาไม่มีงานวิจัยใดที่จะประยุกต์ใช้งานรวมกันของ SMES และ FCL เพื่อแก้ปัญหาทั้งการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบคิซีโมโครกริดอยู่เลย

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

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการทำเสถียรภาพให้เกิดประโยชน์สูงสุด
2. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งในกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิด

ป้อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

3. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกักเก็บลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่ออยู่

4. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่เหมาะสมพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสในระบบคิซีไมโครกริดสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บลมกักเก็บลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

5. เพื่อนำเสนอการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่โอทีที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามการแก้ปัญหาที่เหมาะสม

### 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยมีสมมติฐานของการศึกษาค้างต่อไปนี้

1. แบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษากักเก็บลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางจะเชื่อมต่อกับบัสอนันต์เพื่อจำลองว่าต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

2. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะจำลองโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำและ ไม่คิดผลข้างเคียงของขดลวดตัวนำยิ่งยวด เนื่องจากจะสมมติให้พร้อมสามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าและจำกัดกระแสฟลัดได้ตลอดเวลา

3. คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการศึกษาจะไม่คำนึงถึงการสูญเสียกำลังทางไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบในระบบกำลังไฟฟ้าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าเพียงเล็กน้อย

### 1.4 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางมีแนวคิดและหลักการจากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาดังต่อไปนี้

1. การใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาใช้แก้ปัญหาการข้ามผ่านความผิดพลาดและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

จากปัญหาของกักเก็บลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางใน [13-15] ได้มีการนำอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดมาแก้ปัญหาดังกล่าวทั้งการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกักเก็บลม และใน [16] ใช้ตัวขดลวดตัวนำยิ่งยวดจำกัดกระแสฟลัดประเภทตัวต้านทานมาแก้ปัญหาดังกล่าวการข้ามผ่านความผิดพลาดของกักเก็บลม และยังมีการนำข้อดีทั้งสองอุปกรณ์ใน [17-20] เพื่อใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยการใช้ขดลวดร่วมกันในการแก้ปัญหาของ

กัณฑ์ลม จึงเป็นแนวคิดที่มาของการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาออกแบบเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สามารถทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและยังสามารถใช้จำกัดกระแสฟอลต์ได้อีกด้วย และยังคงการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟีโอให้เหมาะสม

2. การนำอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสแม่เหล็กแก้ปัญหาของกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ็อนสองทางที่ต่อรวมอยู่ในระบบดีซีไมโครกริด

จากการแก้ปัญหาของกัณฑ์ลมที่ผ่านมาใน [17-20] ยังไม่มีงานวิจัยใดที่นำอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสเข้ามาใช้ในการทำเสถียรภาพในระบบดีซีไมโครกริด จึงเป็นแนวความคิดที่จะออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่เหมาะสมพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสขึ้นใหม่ในระบบดีซีไมโครกริด

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ็อนสองทางตามที่งานวิจัยนี้นำเสนอ เพื่อทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [31] รายละเอียดอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ็อนสองทางเพื่อเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ฟีโออย่างเหมาะสม

2. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสเพื่อใช้ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่มีกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ็อนสองทางต่อรวมอยู่ และยังคงออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ฟีโออย่างเหมาะสม

3. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสในระบบดีซีไมโครกริดสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกัณฑ์ลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ็อนสองทาง และออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ฟีโออย่างเหมาะสม

## บทที่ 2

### การควบคุมที่นำเสนอ

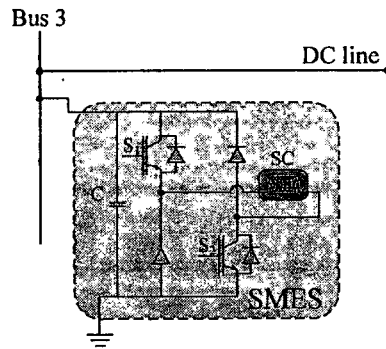
บทนี้เป็นการนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่าน (Low Voltage Ride Through) ของกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดในระบบคิซีไมโครกริด และการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องมาจากการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ที่ไม่คงที่ ซึ่งปัญหาทั้งการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเป็นปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับกังหันลม DFIG เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ขึ้นใหม่ในระบบคิซีไมโครกริด ซึ่ง SMES นี้จะเพิ่มเติมส่วนของฟังก์ชันการจำกัดกระแสฟอลต์เพื่อสามารถที่จะเป็นทั้งอุปกรณ์ที่ใช้สะสมพลังงานและจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) ไปพร้อม ๆ กัน ในช่วงที่เกิดปัญหากำลังไฟฟ้าแกว่ง SMES-FCL จะทำหน้าที่คล้ายกับ SMES คือมีหน้าที่สะสมพลังงานทั้งรับและคายกำลังไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดพลาดอย่างฉับพลันในระบบคิซีไมโครกริด SMES-FCL จะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสด้วยการต่อวงจรไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) เข้าระบบไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติซึ่งจะเป็นการแก้ปัญหาการลดลงของแรงดันไฟฟ้าในระบบ และในที่ยังเพิ่มเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ที่เหมาะสมสำหรับระบบไมโครกริดอีกด้วย โดยใช้หลักการวิธีฟังก์ชันพลังงานเพื่อใช้ออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวด SC และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่า SMES-FCL จะมีประสิทธิผลเหนือกว่า SMES แบบดั้งเดิมในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีกังหันลม DFIG ต่ออยู่ในระบบคิซีไมโครกริด

#### 2.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด

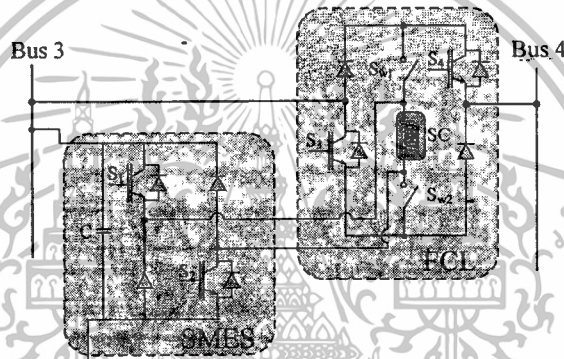
ระบบกำลังไฟฟ้าคิซีไมโครกริดที่ใช้ศึกษา มีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.1 ประกอบไปด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ขนาด 1.5 MW จำนวน 2 ชุด คือกังหันลม DFIG1 และกังหันลม DFIG2 มีพารามิเตอร์ตาม [22] อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage With Fault Current Limiting Function: SMES-FCL) สายส่งคิซี (DC Line) และโหลด (Load A, Load B, ... , Load F) ในระบบกำลังไฟฟ้านี้จะใช้ศึกษาในสภาวะการทำงานปกติ (Normal State) และสภาวะเกิดความผิดพลาด (Fault State) ขึ้น เมื่อกังหันลม DFIG ทั้ง 2 ชุด ผลิตไม่คงที่ส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพและนำไปสู่ระบบกำลังไฟฟ้าล้มเหลวได้ และเมื่อจำลองการเกิด



## 2.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL



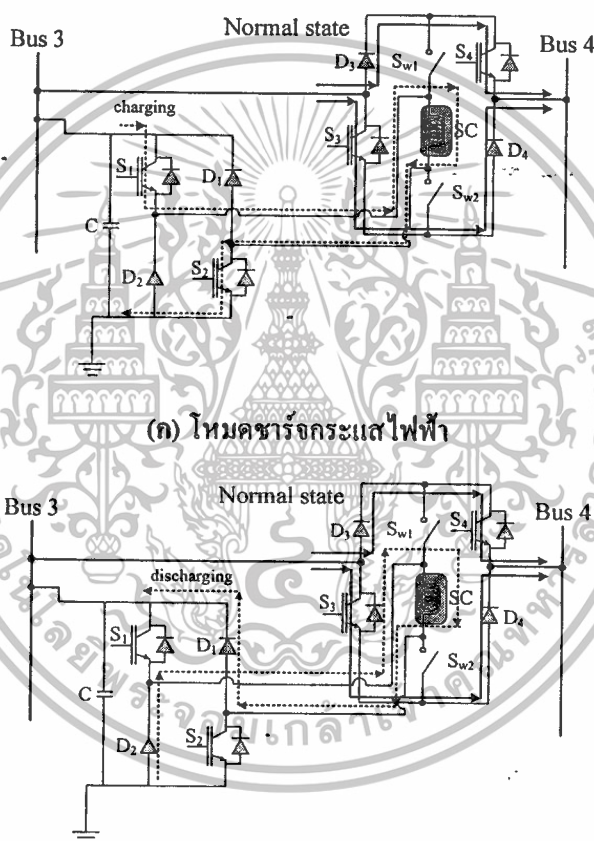
ภาพที่ 2.2 วงจรไฟฟ้าของ SMES



ภาพที่ 2.3 วงจรไฟฟ้าของ SMES-FCL

ตามภาพที่ 2.2 เป็นโครงสร้างของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ในระบบคิซีโมโครกริดซึ่งต่อกับกับบัสที่ 3 โดย SMES นี้มีหน้าที่หลักคือสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งตามโครงสร้างของ SMES นี้จะถูกนำไปประยุกต์วงจรไฟฟ้าใหม่โดยเพิ่มเติมส่วนของโครงสร้างอุปกรณ์จำกัดกระแส (Fault Current Limiting: FCL) ร่วมเข้ามาเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมทั้งฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์หรือ SMES-FCL ซึ่งสามารถแสดงวงจรไฟฟ้านี้ได้ดังภาพที่ 2.3 โดย SMES-FCL นี้ต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 3 กับบัสที่ 4 (เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 2.1) 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  $S_2$  ของคอนเวอร์เตอร์จึงสามารถควบคุมการชาร์จและดิชาร์จกระแสไฟฟ้าได้ 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 ซึ่งส่งผลให้กระแสฟลัดถูกจำกัดกระแสด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด หลักการทำงานดังกล่าวสามารถนำมาอธิบายเป็นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้



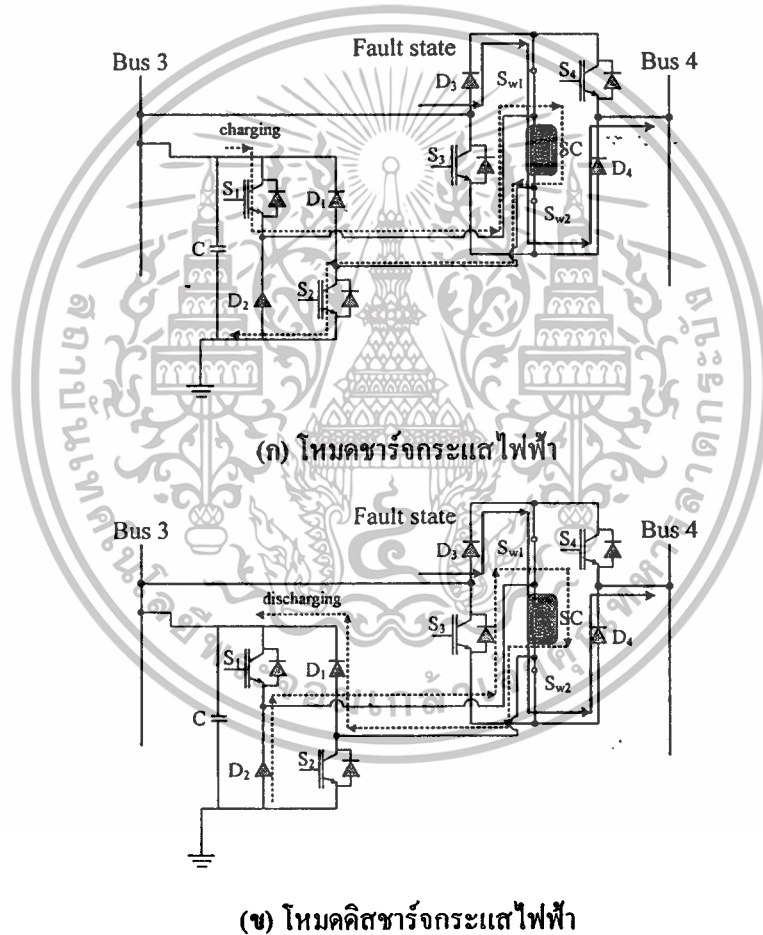
(ก) โหมดชาร์จกระแสไฟฟ้า

(ข) โหมดดิชาร์จกระแสไฟฟ้า

ภาพที่ 2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติ

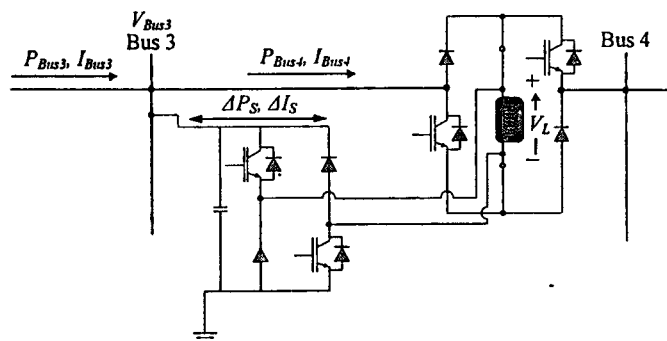
เมื่อพิจารณาสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่งขึ้นในระบบตามภาพที่ 2.4 (ก) และ (ข) จะแสดงให้เห็นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน โดยในโหมดของการชาร์จกระแสตาม

ภาพที่ 2.4 (ก) สวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  จะทำงานเพื่อชาร์จพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวด ส่วนสวิตช์  $S_{w1}$  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  $S_2$  และเมื่ออยู่ในโหมดคิซาร์จกระแสไฟฟ้าตามภาพที่ 2.4 (ข) สวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  จะหยุดทำงานแต่ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  จะทำงานแทนเพื่อให้สามารถคิซาร์จพลังงานไฟฟ้าในขดลวดตัวนำยิ่งยวดได้ ส่วนสวิตช์  $S_3$  กับ  $S_4$  และไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  ยังคงทำงานเช่นเดิมเหมือนในโหมดชาร์จพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น โหมดคิซาร์จพลังงานไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจากไดโอด  $D_2$  ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวดและไหลผ่านไดโอด  $D_1$  ซึ่งหลักการทำงานในสภาวะปกตินี้จะสามารถควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าให้ลดลงได้



ภาพที่ 2.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะเกิดความผิดปกติ





ภาพที่ 2.6 หลักการทำงานของ SMES-FCL

จากภาพที่ 2.6 เมื่อกำหนดให้

$P_{Bus3}$ ,  $I_{Bus3}$  และ  $V_{Bus3}$  คือกำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคิซีที่ส่งไปยังบัสที่ 3

$P_{Bus4}$  และ  $I_{Bus4}$  คือกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าคิซีที่ส่งไปยังบัสที่ 4

$\Delta P_S$  และ  $\Delta I_S$  คือกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าคิซีของ SMES-FCL

เมื่อไม่คิดการสูญเสียการส่งกำลังไฟฟ้าในสายส่งสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังบัสที่ 3 ได้จากสมการดังนี้

$$P_{Bus3} = V_{Bus3} I_{Bus3} \quad (2.1)$$

โดยกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า  $V_{Bus3}$  และกระแสไฟฟ้า  $I_{Bus3}$  ที่ถูกส่งมา ดังนั้น ถ้าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าคิซีนี้ให้คงที่ได้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในคิซีไมโครกริดนี้จะไม่เกิดขึ้น แต่แรงดันไฟฟ้าจะเป็นค่า ๆ หนึ่งที่ยอมรับให้มีค่าอยู่ในช่วง ๆ หนึ่งเท่านั้นหรือเป็นค่าที่ถูกกำหนดในการส่งกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ซึ่งจากสมการที่ (2.1) การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะสามารถทำได้เพียงควบคุมกระแสไฟฟ้า  $I_{Bus3}$  ที่ส่งผ่านมาเท่านั้น ดังนั้น การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะได้จากการชาร์จและดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าที่ส่งจากบัสที่ 3 ไปยังบัสที่ 4 โดยกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_{Bus4} = P_{Bus3} + \Delta P_S \quad (2.2)$$

เมื่อกำหนดให้กำลังไฟฟ้า  $\Delta P_S$  มีค่าเป็นบวกหรือลบจากการชาร์จและดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้า ตามลำดับ และสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้า  $\Delta P_S$  ได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P_S = V_{Bus3} \Delta I_S \quad (2.3)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้จากสมการ

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

จากสมการที่ (2.4) จะแสดงให้เห็นว่า ถ้าควบคุมกระแสไฟฟ้าคิซี  $\Delta I_S$  ที่ไหลเข้าและออก SMES-FCL นี้ จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 ( $P_{Bus4}$ ) ให้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้านี้ได้ ดังนั้น คอนเวอร์เตอร์ของ SMES-FCL จะทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าในสายส่งคิซีด้วยการควบคุมกระแส  $\Delta I_S$  และจากภาพที่ 2.6 การจำกัดกระแสฟอลต์ด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดในคิซีไมโครกริดนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยสมการการหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดจากสมการ [33]

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

และค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดหาได้จากสมการ

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

เมื่อกำหนดให้

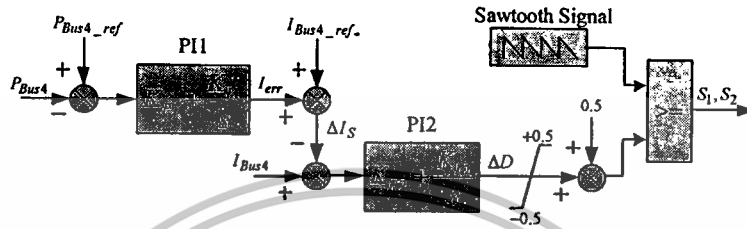
- $Z_L$  คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด
- $V_L$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด
- $I_L$  คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด
- $L_{sc}$  คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

ตามอุดมคติการไหลของกระแสไฟฟ้าคิซีเมื่อไม่เกิดการกระเพื่อมหรือการแกว่งของกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้เทอมอนุพันธ์กระแส  $I_L$  ในสมการที่ (2.6) มีค่าเป็นศูนย์ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม  $V_L$  มีค่าเป็นศูนย์ตามไปด้วยและเช่นเดียวกับค่าอิมพีแดนซ์  $Z_L$  ในสมการที่ (2.5) จะมีค่าเป็นศูนย์ตาม แต่ในทางตรงกันข้ามถ้ากระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันหรือกระแสฟอลต์ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดนี้ เทอมอนุพันธ์กระแส  $I_L$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม  $V_L$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอิมพีแดนซ์  $Z_L$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล ด้วยเหตุนี้ ในสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบเมื่อใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการจำกัดกระแสฟอลต์จะเปรียบเสมือนการแทรก

อิมพีแดนซ์เข้าไปยังในระบบคิซีไม่โครกริดอย่างทันทีทันใด ซึ่งทำให้สามารถลดกระแสฟอลต์ที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันได้อย่างรวดเร็ว

### 2.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด

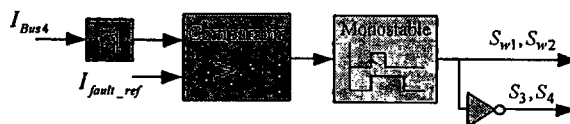
#### 2.3.1 การออกแบบตัวควบคุม



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES

จากหัวข้อที่ 2.2 สามารถนำมาสู่วิธีการออกแบบตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของ SMES-FCL โดยการออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมในส่วนของ SMES จะใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) 2 ตัวควบคุม และโครงสร้างของ FCL จะใช้การตรวจจับกระแสฟอลต์ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.7 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  $\Delta I_s$  ตามสมการที่ (2.4) ซึ่งกระแส  $\Delta I_s$  นี้จะเป็นตัวบ่งบอกว่ากระแสไฟฟ้าในระบบจะต้องเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นจึงนำกระแส  $\Delta I_s$  ไปหักลบกับกระแสจริง  $I_{Bus4}$  จะได้ค่าผลเปรียบต่างนี้เป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ PI2 และเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ PI2 จะเป็นค่าเบี่ยงเบนดิวตี้ไซเคิล ( $\Delta D$ ) และนำไปบวกค่าคงที่ 0.5 ให้เป็นค่าดิวตี้ไซเคิล และเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจึงได้สัญญาณควบคุมสวิตช์ IGBT ของสวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  เนื่องจากการใช้ตัวควบคุมพีไอ PI1 และ PI2 นี้ค่า  $K_{P1}$ ,  $K_{P2}$ ,  $K_{I1}$  และ  $K_{I2}$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ของตัวควบคุมพีไอจะต้องได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์นี้อย่างเหมาะสมด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมซึ่งจะกล่าวในภายหลัง



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของตัวควบคุม FCL

ในสภาวะเกิดความผิดปกติต้องการตัวชี้วัดสำหรับการสั่งสวิตช์  $S_{w1}$  กับ  $S_{w2}$  และ  $S_3$  กับ  $S_4$  เพื่อให้ต่อวงจรบริดจ์ได้สมบูรณ์ จึงต้องเลือกสัญญาณที่สามารถบ่งบอกได้ว่าเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบได้ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และอื่น ๆ ซึ่งในที่นี้ได้ทำการเลือกกระแสไฟฟ้าเนื่องจากเป็นตัววัดที่สำคัญและเป็นความต้องการที่อยากจะให้กระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นลดลง ตามภาพที่ 2.8 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 จะส่งสัญญาณ โวลิจ 1 ให้กับบล็อกโมโนสเตเบิล (Monostable) ซึ่งบล็อกโมโนสเตเบิลจะทำหน้าที่ดีเลย์สัญญาณเพื่อป้องกันการเกิดความผิดปกติซ้ำซ้อนในระยะเวลาใกล้เคียงกันและเอาท์พุทที่ได้จะเป็นสัญญาณควบคุมสวิตช์ IGBT  $S_{w1}$  กับ  $S_{w2}$  และ  $S_3$  กับ  $S_4$

### 2.3.2 เทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุด

ในบทนี้ได้เพิ่มเทคนิคการออกแบบ SMES-FCL ให้เหมาะสมที่สุดในระบบไมโครกริดด้วยการออกแบบการหาค่าความเหนี่ยวนำ พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวด SC และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสม เพื่อควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการจำกัดกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ การใช้ฟังก์ชันพลังงานในการออกแบบ การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และการหาค่าพลังงานสะสมเริ่มต้นที่น้อยที่สุดที่ใช้แทนสลิยรภาพและสามารถอธิบายวัตถุประสงค์ของการออกแบบเป็นฟังก์ชันสมการได้ดังนี้

หลักการฟังก์ชันพลังงานจะถูกใช้เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ให้เหมาะสมในสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบจะส่งผลให้พลังงานจลน์ที่สะสมในโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG เพิ่มขึ้นอย่างสูง และในเวลาเดียวกันกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสกักกันลม DFIG จะลดลงทันทีทันใด ส่งผลให้กังหันลม DFIG ไม่สามารถข้ามผ่านความผิดปกตินี้ได้ เพื่อที่จะทำให้กังหันลมข้ามผ่านความผิดปกตินี้ ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะแทรกเข้ามาในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวขยับยั้งกระแสฟอลต์และการสะสมพลังงานจลน์ในโรเตอร์ และยังมีผลให้กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงนั้นเพิ่มขึ้นได้อีกด้วย ซึ่งสามารถแสดงสมการฟังก์ชันพลังงาน ( $V$ ) ได้ดังนี้

$$V = V_K (\omega_1(t), \omega_2(t)) + V_P (\delta_1(t), \delta_2(t)) \quad (2.7)$$

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) สามารถอธิบายได้ใน [37] ถ้า  $dV/dt$  มีค่าเป็นบวกหมายถึงการสะสมพลังงานและทางตรงกันข้ามถ้ามีค่าเป็นลบหมายถึงการคายพลังงาน ดังนั้น เมื่อ  $dV/dt$  มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าพลังงานทั้งหมดมีค่าลดลงหรือพลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะถูกคายพลังงานออกไป ซึ่งถ้า  $dV/dt$  มีค่าเป็นลบลดลงจนถึงจุดสูงสุดแล้วแสดงว่าระบบจะมีผลตอบสนองการหน่วงที่มากขึ้นและเร็วขึ้นนั่นเอง จากสมการการแกว่ง

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{(P_{mi} - P_{ei})}{M_i} \quad (2.9)$$

โดยที่

$M_i$	คือค่าคงที่ความเฉื่อยของกังหันลม DFIG ตัวที่ $i$
$P_{mi}$	คือกำลังทางกลของกังหันลม DFIG ตัวที่ $i$
$P_{ei}$	คือกำลังทางไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ตัวที่ $i$

แทนค่าสมการที่ (2.9) ในสมการที่ (2.8) จะได้

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^2 \left( \frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{P_{mi}}{M_i} + \frac{\partial V_p}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{dt} \right) - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{1}{M_i} P_{ei} \quad (2.10)$$

และฟังก์ชันพลังงานจลน์สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

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

และเมื่อทำการอนุพันธ์ฟังก์ชันพลังงานจลน์ในสมการที่ (2.11) จะได้

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

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) ในเทอมขวาสุดจะได้

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

โดยที่  $V_C$  หาได้จาก

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

เนื่องจากในสภาวะเกิดความผิดพลาดในระบบเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์  $\delta$ ,  $P_{mi}$  และ  $V_p$  จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในระยะเวลาสั้น ๆ จึงสามารถตัดเทอมแรกของสมการที่ (2.14) ทิ้งได้ จึงเหลือเทอม  $V_C$  ซึ่งจะแปรผันตรงกับ  $P_{ei}$  ที่มีผลโดยตรงต่อ  $dV/dt$  ดังนั้น FCL จะช่วยให้  $V_C$  มีค่าเพิ่มขึ้นได้โดยการควบคุม  $P_{ei}$  ให้มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่า  $dV/dt$  ก็จะมีค่าเป็นลบมากขึ้น เมื่อค่า  $dV/dt$  มีค่าเป็นลบมากขึ้นจะแสดงให้เห็นถึงการคายพลังงานจลน์ที่สะสมในโรเตอร์ออกมาได้ไวขึ้นและยังคายพลังงานจลน์ออกมาได้ไวขึ้นระบบก็จะเข้าสู่เสถียรภาพได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

หลังจากเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ กังหันลม DFIG จะเข้าสู่สภาวะปกติและส่วนของ SMES จะกลับมาทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเช่นเดิม โดยต้องการให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าลดลงน้อยที่สุด โดยใช้วิธีหาค่าที่น้อยที่สุดของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: LAE) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } IAE \Delta P_{Bus4} = \int_{t_0}^{t_s} |\Delta P_{Bus4}(t)| dt \quad (2.16)$$

โดยที่

- $t_0$  คือเวลาเริ่มต้นจำลองระบบ  
 $t_s$  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

จากสมการที่ (2.15)-(2.17) สามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันสมการวัตถุประสงค์รวมกัน ได้ดังนี้

$$\text{หาค่าที่น้อยที่สุดของ } J = 1/V_C + \int_{t_0}^{t_s} |\Delta P_{Bus4}(t)| dt + E_{SC0} \quad (2.18)$$

สำหรับการหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (2.18) นี้จะใช้วิธี (Particle Swarm Optimization: PSO) [23] เพื่อที่จะปรับหาค่า  $L_{SC}$ ,  $I_{SC0}$ ,  $K_{P1}$ ,  $K_{P2}$ ,  $K_{I1}$  และ  $K_{I2}$  ให้มีความเหมาะสม โดยอัตโนมัติพร้อมกัน และกระบวนการค้นหาค่าตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบไว้ดังนี้

ค่าความเหนี่ยวนำทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 5 H

ค่ากระแสเริ่มต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 2 kA

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

ส่วนพารามิเตอร์ของขบวนการวิธี PSO กำหนดดังนี้

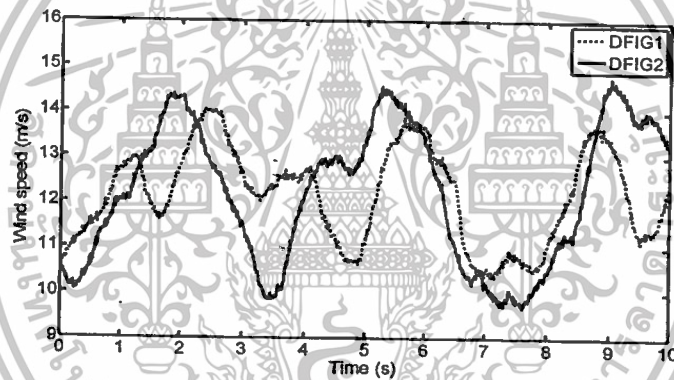
จำนวนอนุภาค 50 ตัว

จำนวนรอบของการค้นหา 100 รอบ

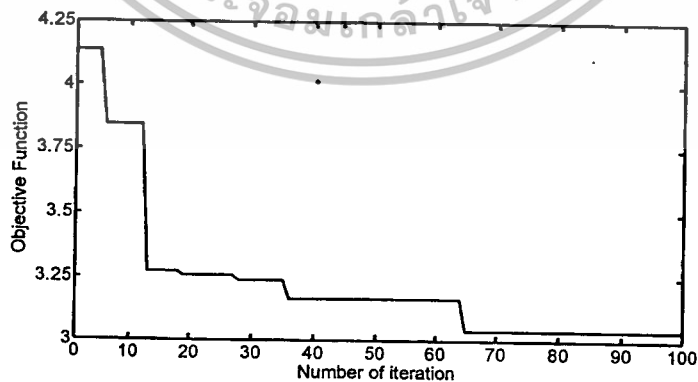
ในการศึกษาครั้งนี้ SMES-FCL ที่นำเสนอจะทำการเปรียบเทียบกับ SMES และระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุม (No controller)

#### 2.4 ผลการจำลองและทดสอบ

ในการหาค่าความเหนียวนำ กระแสเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิวที่ที่เหมาะสมของ SMES-FCL จะใช้โปรแกรม Matlab/SimPowerSystem [31] ในการจำลองระบบดังภาพที่ 2.1 ภายได้ความเร็วลมดังภาพที่ 2.9 และจำลองการเกิดความผิดปกติที่สายส่งดีซีลิงกราวนที่จุด  $F_1$  เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 4 s ผลลัพธ์การหาค่าคำตอบของสมการที่ (2.18) สามารถแสดงการหาค่าคำตอบของค่าน้อยที่สุดแสดงได้ดังภาพที่ 2.10 และแสดงผลคำตอบแต่ละเทอมได้ดังภาพที่ 2.11 และผลคำตอบของพารามิเตอร์ SMES-FCL ที่ค้นหาแสดงได้ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งพารามิเตอร์นี้จะใช้เปรียบเทียบกับ SMES ที่ใช้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ของกำลังไฟฟ้าตามสมการที่ (2.16) ในการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟิวของ SMES เพียงแต่ขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES จะถูกกำหนดให้มีค่าใหญ่กว่าและพลังงานสะสมเริ่มต้นที่มากกว่า SMES-FCL

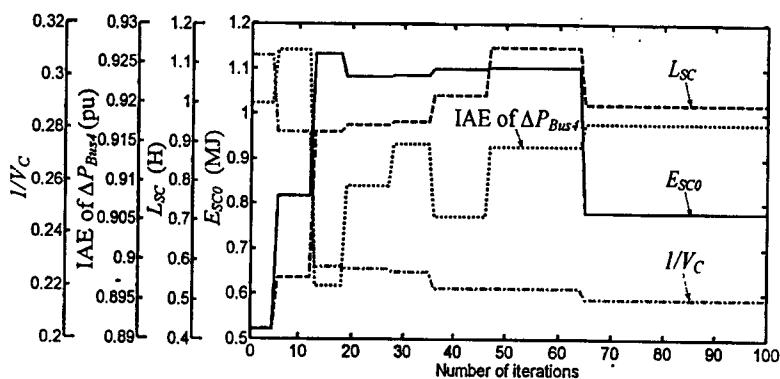


ภาพที่ 2.9 ความเร็วลม



ภาพที่ 2.10 การหาค่าคำตอบของสมการวัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 การลู่เข้าหาค่าคำตอบของ  $1/V_C$ ,  $IAE \Delta P_{Bus4}$ ,  $L_{SC}$  และ  $E_{SCO}$

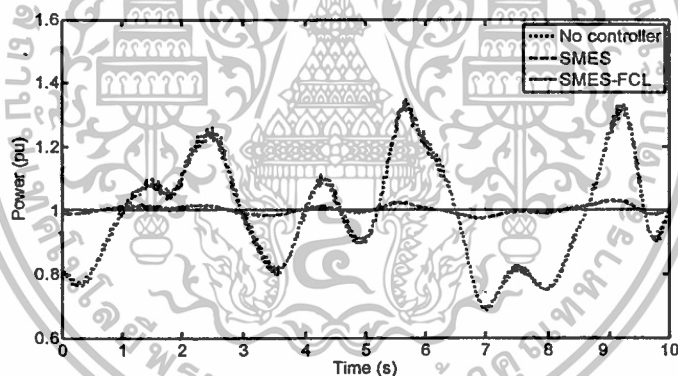
### ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL

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

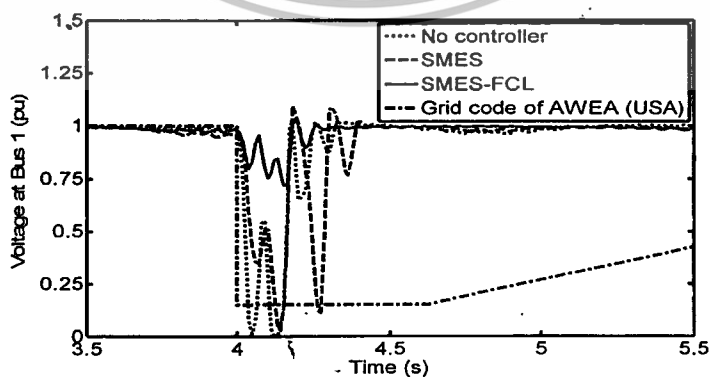
ผลการจำลองระบบในสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะแสดงได้ดังภาพที่ 2.12 เป็นกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4 ซึ่งกรณีเมื่อระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุมจะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูงตามเส้นประสีแดง และกรณี SMES กำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงอย่างมากแต่ยังแกว่งรอบ ๆ ค่ากำลังไฟฟ้า 1 pu ตามเส้นประสีเขียว และเมื่อติดตั้ง SMES-FCL กำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงกว่ากรณี SMES อย่างมาก

เมื่อเกิดสภาวะเกิดความผิดปกติหรือขึ้นในระบบจะสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังภาพที่ 2.13 – 2.21 โดยแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และ 2 จะเป็นแรงดันไฟฟ้าที่หน้าบัสของกังหันลม DFIG1 และ DFIG2 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 2.13 และ 2.14 จะเห็นได้ว่าทั้งกรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงต่ำสุดประมาณ 0 pu ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกริดโค้ด AWEA (USA) ที่ต้องมีแรงดันไฟฟ้าลดลงไม่ต่ำกว่า 0.15 pu เป็นเวลา 625 ms [12] ส่งผลให้กังหันลมต้องปลดตัวออกจาก

ระบบแต่เมื่อติดตั้ง SMES-FCL จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำสุดประมาณ 0.75 pu และเมื่อแสดงเป็นกราฟแผนภูมิแท่งของการลดลงของแรงดันไฟฟ้าแต่ละบัสตามภาพที่ 2.15 แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าปกติจะแสดงถึงการไม่ผ่านมาตรฐานกริด โคอจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าทั้งกรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมและ SMES แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเกินมาตรฐานกริด โคอ์แต่ในกรณี SMES-FCL จะผ่านมาตรฐานกริด โคอ์ ในภาพที่ 2.16 และ 2.17 แสดงถึงกระแสฟอลต์ที่บัสที่ 1 และบัสที่ 2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุมกระแสจะพุ่งขึ้นสูงประมาณ 3.25 pu ในบัสที่ 2 และ 3 pu ในบัสที่ 2 แต่เมื่อติดตั้ง SMES-FCL กระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นจะลดลงอย่างมาก ส่วนกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1 และบัสที่ 2 ในภาพที่ 2.18 และ 2.19 จะแสดงให้เห็นถึงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างสูงในช่วงเกิดฟอลต์เมื่อไม่ติดตั้งควบคุมและ SMES เมื่อทำการติดตั้ง SMES-FCL จะลดการแกว่งนี้ได้และเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็ว เมื่อแสดงผลการจำลองของความเร็วโรเตอร์ในภาพที่ 2.20 และ 2.21 เห็นได้อย่างชัดเจนว่า SMES-FCL จะลดการแกว่งของความเร็วในโรเตอร์ได้ดีกว่ากรณีอื่น ๆ และสามารถแสดงค่าของพลังงานที่จำเป็นใน SMES-FCL กับ SMES ในการทำเสถียรภาพทั้งการแก้ปัญหาการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการแก้ปัญหาของการเกิดความผิดปกติในระบบดังตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ทั้ง MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES-FCL จะใช้พลังงานสะสมเริ่มต้นที่จำเป็นน้อยกว่า SMES ทั้งที่ขลวดของ SMES-FCL มีขนาดเล็กกว่า SMES

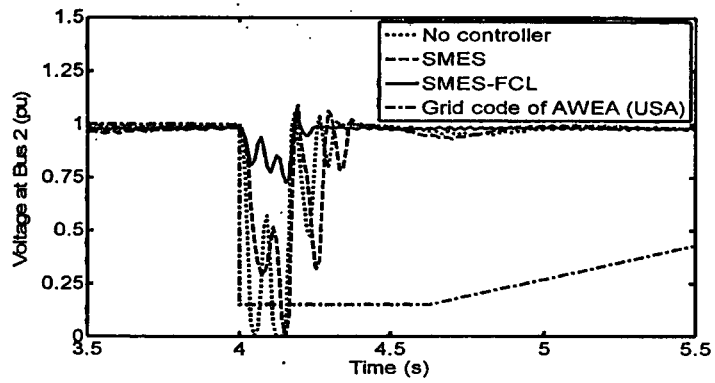


ภาพที่ 2.12 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 4

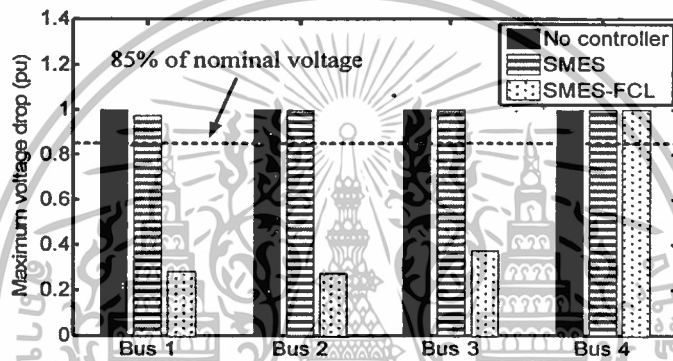


ภาพที่ 2.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1

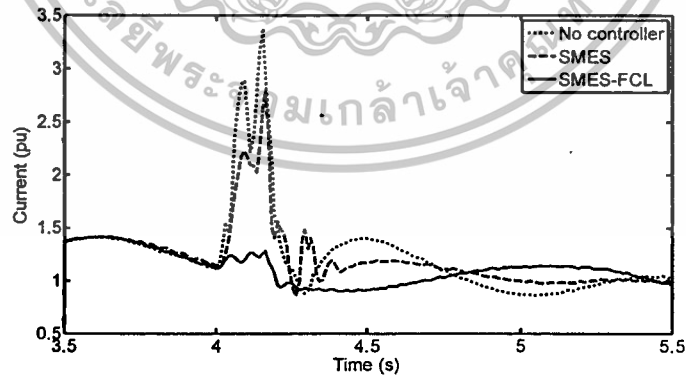
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



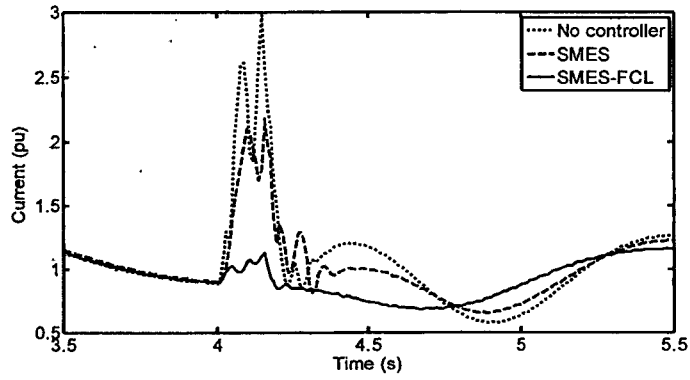
ภาพที่ 2.14 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2



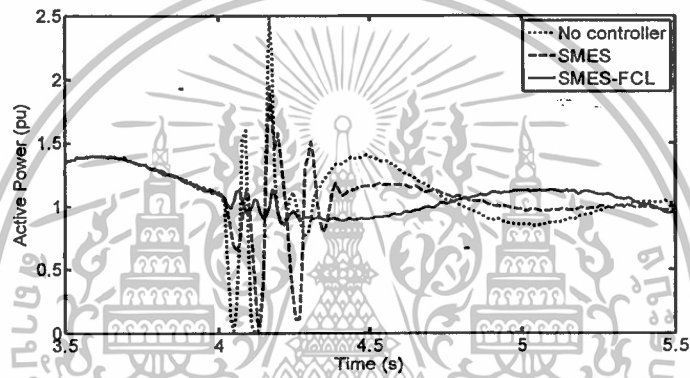
ภาพที่ 2.15 การเปรียบเทียบการลดลงของแรงดันไฟฟ้า



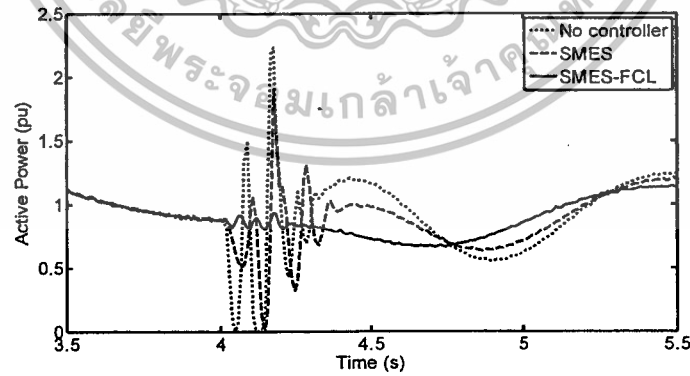
ภาพที่ 2.16 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 1



ภาพที่ 2.17 กระแสไฟฟ้าที่บัสที่ 2

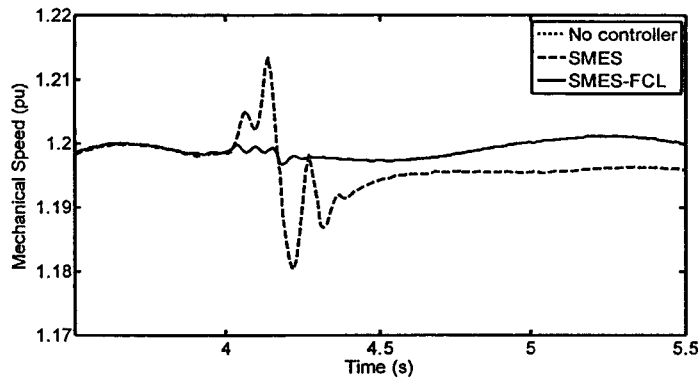


ภาพที่ 2.18 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 1

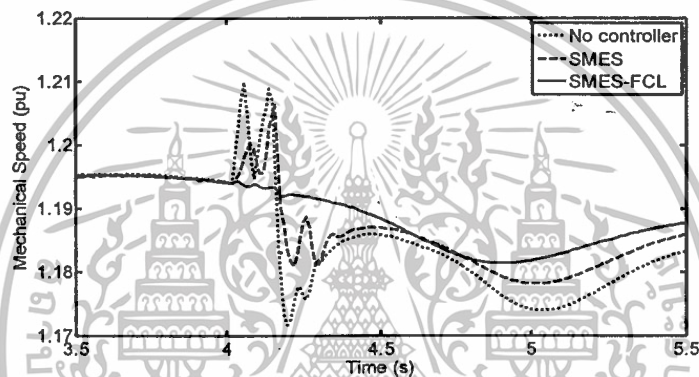


ภาพที่ 2.19 กำลังไฟฟ้าที่บัสที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.20 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG1



ภาพที่ 2.21 ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม DFIG2

ตารางที่ 2.4 ขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES และ SMES-FCL

ขนาด	SMES	SMES-FCL
MW	3.81	2.68
MJ	2.38	1.28

ในบทนี้นำเสนอโครงสร้างของ SMES-FCL ในระบบดีซีไมโครกริด ซึ่งมีการพัฒนามาจาก SMES แบบดั้งเดิมเพื่อให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการข้ามผ่านความถี่ของกังหันลม DFIG และยังออกแบบตัวควบคุมพีไอ ขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพลังงานสะสมเริ่มต้นด้วยเทคนิคการทำให้ SMES-FCL เหมาะสมโดยใช้หลักการฟังก์ชันพลังงานเข้ามาช่วยในการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งการออกแบบอย่างเหมาะสมจะเป็นกระบวนการอย่าง

อัตราโนมิด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (PSO) ผลการจำลองได้แสดงให้เห็นว่าทั้งภายใต้สภาวะปกติที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบ SMES-FCL จะสามารถทำเสถียรภาพในระบบดีซีไมโครกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่า SMES ถึงแม้ว่าขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและขนาด MW และ MJ ที่จำเป็นของ SMES-FCL จะมีขนาดเล็กกว่า SMES



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

## สรุปผลการวิจัย

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

- สามารถออกแบบวงจรตัวควบคุมพีไอเพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- สามารถประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งในกังหันลม DFIG และเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ได้
- สามารถประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดพร้อมด้วยฟังก์ชันการจำกัดกระแสเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการข้ามผ่านแรงดันไฟฟ้าต่ำผ่านและการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG ในระบบคิซีไมโครกริด
- ทำการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์พีไอได้อย่างเหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค

บทที่ 4  
ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

I. Ngamroo and T. Karaipoom, "Improving Low-Voltage Ride-Through Performance and Alleviating Power Fluctuation of DFIG Wind Turbine in DC Microgrid by Optimal SMES with Fault Current Limiting Function," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 5, October 2014, Article#:5700805, ISSN 1051-8223 (Impact Factor 2014 = 1.235)

ได้เนบบทควมในภคคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] **International Energy Agency.** (2014). **RENEWABLE ENERGY Medium-Term Market Report 2014.** France, Paris: International Energy Agency [Online]. Available: <http://www.ica.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](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](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 อิศระชัย งามทร

ตำแหน่งปัจจุบัน 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 <sup>th</sup> 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 (วช) (เมธีวิจัย 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
2558-2559	ทุนงบประมาณแผ่นดิน	วช.

### 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.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ไฟฟ้ายานต์เอเลเมนต์ในแกนอ่านฮาร์ดดิสก์ 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

# 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

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

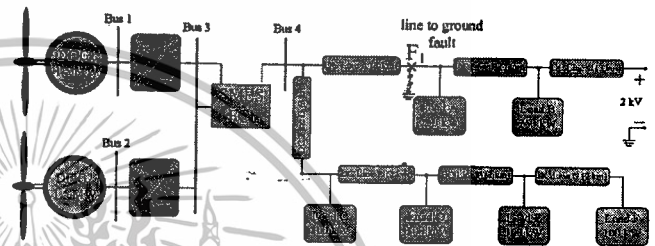


Fig. 1. Study system.

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

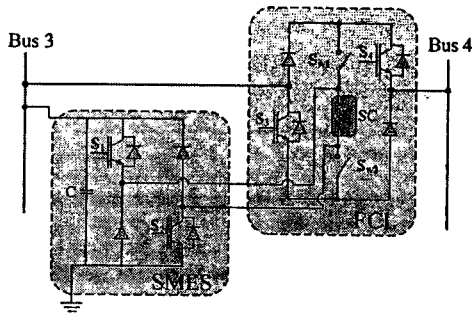


Fig. 2. SMES-FCL circuit.

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

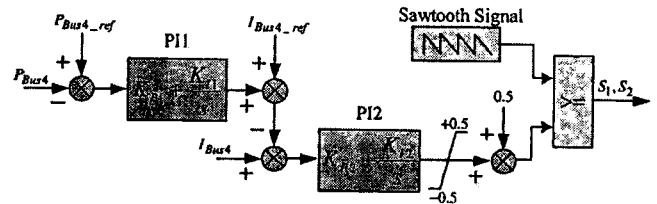


Fig. 3. Upper controller of the SMES part.

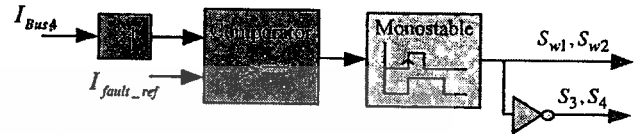


Fig. 4. Chopper controller of the FCL part.

The output of PI2 is the duty cycle deviation ( $\Delta D$ ). By adding  $\Delta D$  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  $S_1$ – $S_2$  of DC chopper.

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 si

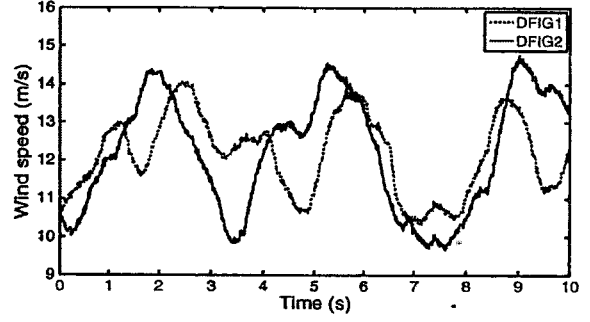


Fig. 5. Wind speeds of DFIG1 and DFIG2.

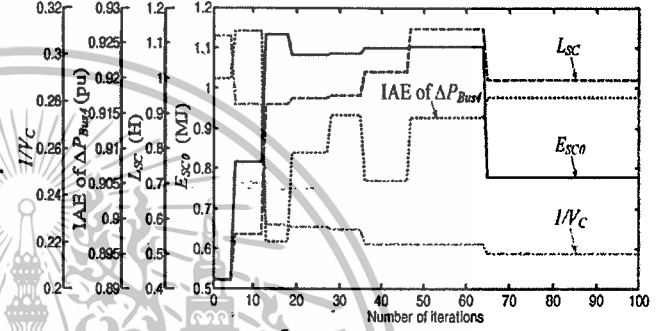


Fig. 6. Convergence curves of  $1/V_C$ , IAE of  $\Delta P_{Bus4}$ ,  $L_{SC}$ , and  $E_{SC0}$ .

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  $\Delta P_{Bus4}$ ,  $L_{SC}$ , 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

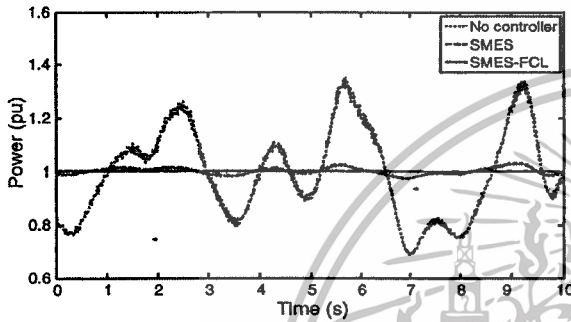


Fig. 7. Power flow at bus 4.

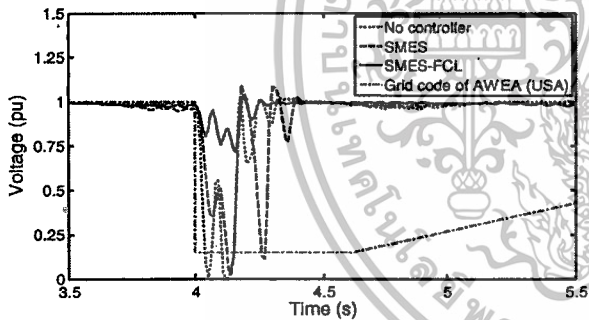


Fig. 8. Terminal voltage of DFIG1 at bus 1.

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-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.

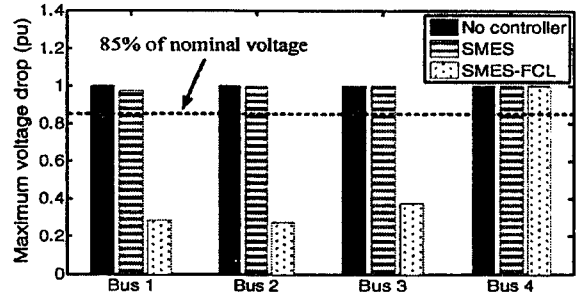


Fig. 9. Maximum voltage drop.

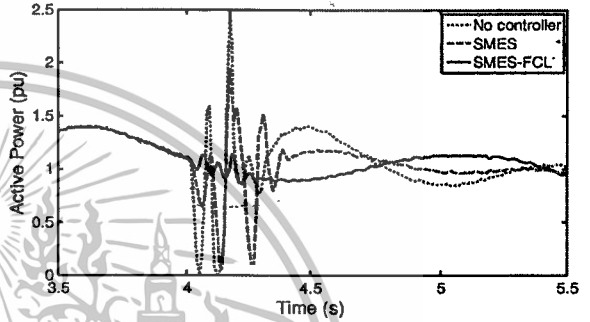


Fig. 10. Power flow at bus 1.

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.

## 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.

