

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำเสถียรภาพโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะด้วย  
ตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดที่ออกแบบอย่างเหมาะสม

SMART GRID STABILIZATION BY SUPERCONDUCTING MAGNETIC  
ENERGY STORAGE WITH OPTIMAL DESIGN



T128569



ฉพ.  
2/114/1  
2555

ทำ en

เลขหมู่.....**128569**  
เลขทะเบียน.....  
วัน, เดือน, ปี.....**5 11 2556**

.b. 128569  
.i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ..... KMITL-2012-EN-D-018-191 .....ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SMART GRID STABILIZATION BY SUPERCONDUCTING MAGNETIC  
ENERGY STORAGE WITH OPTIMAL DESIGN**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2012**

**KMITL-2012-EN-D-018-191**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำเสถียรภาพโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะด้วยตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดที่ออกแบบอย่างเหมาะสม
นักศึกษา	นายมงคล แซ่เจีย
รหัสประจำตัว	52610108
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิสระชัย งามหุ

### บทคัดย่อ

ปัจจุบัน วิกฤตพลังงานและภาวะโลกร้อนทำให้ความมั่นคงทางด้านพลังงานเป็นปัญหาที่ท้าทายอย่างยิ่ง เพื่อแก้ไขปัญหาลักษณะนี้ได้มีการนำแนวคิดของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะหรือสมาร์ทกริดเข้ามาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การติดตั้งแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียน เช่น กังหันลม พลังแสงอาทิตย์ เป็นต้น เป็นจำนวนมากในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นแบบแผนที่สำคัญของสมาร์ทกริด อีกด้านหนึ่ง เมื่อเร็วๆ นี้ ได้มีแนวโน้มของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างเนื่องจากปัญหาการแกว่งระหว่างพื้นที่ด้วยความถี่ต่ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบ วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบอย่างเหมาะสมของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด (SMES) เป็นตัวทำเสถียรภาพอัจฉริยะเพื่อทำเสถียรภาพสมาร์ทกริด โดยจะหาค่าขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสม ขนาดพลังงานสะสมที่เหมาะสม และพารามิเตอร์ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมของ SMES พร้อมกันอย่างอัตโนมัติ ในที่นี้จะประยุกต์ใช้ SMES ที่ออกแบบอย่างเหมาะสมไปแก้ปัญหาเสถียรภาพระบบดังนี้ เริ่มจากการออกแบบ SMES ที่เหมาะสมเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอในไมโครกริดเนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียน ต่อมาจะศึกษาการประยุกต์ใช้ SMES หลายตัวที่ออกแบบอย่างเหมาะสมเพื่อลดปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้าเนื่องจากพาร์มกังหันลมในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงชนิดทกพื้นที่ สุดท้ายจะประยุกต์ใช้ SMES ที่ออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีควบคุมเสถียรภาพอย่างคงทนในพื้นที่กว้างซึ่งใช้หน่วยวัดเฟสเซอร์ที่เข้าจังหวะเพื่อแก้ปัญหาเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยง ในการศึกษาจะกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของ SMES ให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน เช่น ตัวควบคุมสัดส่วน-อินทิกรัล หรือตัวชดเชยเฟสหน้า/ล้าหลังซึ่งมีสัญญาณเข้าเดียว แล้วจึงทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ผลการจำลองศึกษาแสดงประสิทธิภาพของการทำเสถียรภาพของ SMES ที่นำเสนอ

Thesis	SMART GRID STABILIZATION BY SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE WITH OPTIMAL DESIGN
Student	Mr.Mongkol Saejia
Student ID.	52610108
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Issarachai Ngamroo

## ABSTRACT

Due to energy crisis and global warming, the energy security is the challenging problem nowadays. To tackle this problem, the smart grid concept has been widely applied. Especially, the large installation of renewable energy sources such as wind power, solar power etc., in the power grids is the vital strategy of the smart grid. However, these intermittent power sources may cause the severe power fluctuation which results in the power system instability. On the other hand, recently the wide area blackouts due to inter-area low frequency oscillations tend to increase dramatically. To enhance the system stability, this thesis proposes the optimal design of superconducting magnetic energy storage (SMES) as a smart stabilizing device for smart grid stabilization. The optimization of superconducting coil size, stored energy capacity and power controller parameters are simultaneously and automatically performed. In this study, the SMES with optimal design are applied to solve three stability problems in the smart grid. First, the optimal SMES unit is used to alleviate power fluctuation due to renewable energy sources in the microgrid. Second, the multiple SMES units with optimal design are employed to suppress the power fluctuation in a six-area interconnected power system with wind farm. Third, the wide area robust stabilizing control of multiple SMES units based on synchronized phasor measurement units in the interconnected power system is carried out. The structure of active and reactive power controllers of SMES for parameter optimization is specified as the practical proportional-integral or phase lead/lag compensator with single input. Simulation study confirms the stabilizing effect of the proposed SMES.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิสระชัย งามหฺรุ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

สุดท้ายต้องขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาในห้องแล็บได้แก่ ดร.สิทธิเดช ดร.จงลักษณ์ ฟ้าอัน บี แบงก์ บิ๊ก ต๋อ ออฟ เก้า เรืองยศ และอื่นๆที่ไม่อาจเอ่ยนามได้หมด ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และอ.บุญยเกียรติ แสงวัฒน์ ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

มงคล แซ่เจี๋ย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา .....	6
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	6
1.5 ขอบเขตการวิจัย .....	7
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา .....	7
บทที่ 2 การออกแบบตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดด้วยวิธีการ ทำให้เหมาะสมเพื่อทำเสถียรภาพระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ.....	9
2.1 ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ.....	9
2.2 ความเป็นมาและส่วนประกอบของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบ ตัวนำยิ่งยวด.....	10
2.3 แบบจำลองของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด.....	17
2.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	20
2.5 วิธีกลุ่มอนุภาค.....	23
บทที่ 3 การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนใน ระบบไมโครกริดด้วยตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดที่ออกแบบ อย่างเหมาะสม.....	28
3.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา.....	28
3.2 การออกแบบ SMES ด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	30
3.3 ผลการจำลองการทำงาน.....	32
3.4 สรุป.....	38

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าบนระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่มีแหล่งพลังงานลมขนาดใหญ่ด้วยตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดที่ออกแบบอย่างเหมาะสม.....	39
4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่ใช้ในการศึกษา.....	39
4.2 การออกแบบ SMES ด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	41
4.3 ผลการจำลองการทำงาน.....	43
4.4 สรุป.....	52
บทที่ 5 การทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างด้วยตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดที่พิจารณาความไม่แน่นอนของระบบและเวลาหน่วงจากการสื่อสาร.....	54
5.1 ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่ใช้ในการศึกษา.....	54
5.2 แบบจำลองระบบควบคุมไฟฟ้ากำลัง.....	55
5.3 การลดอันดับของสมการระบบ.....	57
5.4 การออกแบบตัวควบคุมคงทนด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	59
5.5 การจำลองระบบที่ใช้ศึกษา.....	62
5.6 สรุป.....	73
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	102

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าพารามิเตอร์มูลฐานของ SMES.....	32
3.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมตามสมการที่ (3.4).....	32
4.1 ค่าพารามิเตอร์มูลฐานของ SMES ทั้งสองชนิด.....	44
4.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมในสมการที่ (4.4).....	44
5.1 กรณีที่ใช้ศึกษาการทำงานของระบบในสถานการณ์ต่างๆ (ค่าฐาน 1000 MVA).....	62
5.2 ค่าเจาะจงและอัตราส่วนการหน่วงในแต่ละกรณีที่ใช้ศึกษาการทำงานของระบบ.....	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การติดตั้ง SMES ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ.....	9
2.2 ตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด.....	11
2.3 แผนผังเฟส (phase diagram) ของสารตัวนำยิ่งยวด.....	12
2.4 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของลวดตัวนำยิ่งยวดกับตัวนำทั่วไปที่อุณหภูมิวิกฤติ.....	12
2.5 องค์ประกอบของระบบ SMES.....	12
2.6 แผงผังวงจรไฟฟ้าของระบบ SMES.....	13
2.7 โครงสร้างขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES.....	13
2.8 โครงสร้างของวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าด้วยทรินสเตอร์.....	14
2.9 โครงสร้างของวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าชนิดแหล่งกำเนิดแรงดัน.....	14
2.10 โครงสร้างของวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าชนิดแหล่งกำเนิดกระแส.....	14
2.11 ส่วนประกอบของ SMES อย่างง่าย.....	15
2.12 แบบจำลอง SMES.....	17
2.13 แผนผังลำดับของการหาค่าที่เหมาะสม.....	21
2.14 ลักษณะการอาศัยอยู่ร่วมกันของฝูงปลาหรือฝูงนกเพื่อหาแหล่งอาหาร.....	23
2.15 แผนผังอัลกอริทึมการทำงานของวิธีกลุ่มอนุภาค.....	25
2.16 วิธีในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของวิธีกลุ่มอนุภาค.....	26
2.17 ลักษณะในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของวิธีกลุ่มอนุภาค.....	27
3.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา.....	28
3.2 แบบจำลอง SMES ที่ใช้ในการศึกษา.....	29
3.3 รูปแบบของกำลังไฟฟ้าจริงของกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายให้แก่ระบบไมโครกริด.....	31
3.4 กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 2 สำหรับกรณีที่ 1.....	33
3.5 กำลังไฟฟ้านำออกของ SMES สำหรับกรณีที่ 1.....	33
3.6 กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES สำหรับกรณีที่ 1.....	34
3.7 กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2.....	34
3.8 กำลังไฟฟ้านำออกของ SMES สำหรับกรณีที่ 2.....	35
3.9 กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES สำหรับกรณีที่ 2.....	35
3.10 กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3.....	36
3.11 กำลังไฟฟ้านำออกของ SMES สำหรับกรณีที่ 3.....	36
3.12 กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES สำหรับกรณีที่ 3.....	37
3.13 ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 2.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่ใช้ในการศึกษา.....	39
4.2 แบบจำลอง SMES ที่ใช้ในการศึกษา.....	40
4.3 รูปแบบของกำลังไฟฟ้าจริงจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่จ่ายให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง.....	42
4.4 การลู่เข้าหาคำตอบเมื่อทำการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสม.....	43
4.5 ค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 1.....	45
4.6 ค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 2.....	45
4.7 ค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 3.....	46
4.8 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 1.....	47
4.9 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 2 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 1.....	47
4.10 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 2.....	48
4.11 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 2 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 2.....	48
4.12 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 3.....	49
4.13 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 2 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 3.....	49
4.14 ฟังก์ชันการกระจายของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 1.....	50
4.15 ฟังก์ชันการกระจายของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 2.....	51
4.16 ฟังก์ชันการกระจายของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 3.....	51
4.17 ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1.....	52
5.1 ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่ใช้ในการศึกษา.....	54
5.2 ระบบควบคุมไฟฟ้ากำลังที่ใช้ศึกษาโดยพิจารณาเวลาหน่วง.....	55
5.3 แบบจำลอง SMES ที่ใช้ในการศึกษา.....	57
5.4 อันดับของระบบลดอันดับเทียบกับค่า Normalized Hankel Singular Value (HSV).....	58
5.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเต็มอันดับและลดอันดับ.....	58
เอก 5.6 ระบบควบคุมไฟฟ้ากำลังที่มีทอมความไม่แน่นอนระบบและเวลาหน่วงจากการสื่อสาร.....	59

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับที่พิจารณาความไม่แน่นอน.....	59
5.8 พื้นที่เสถียรภาพ D .....	61
5.9 ตำแหน่งของค่าเจาะจงในโหมดเฉพาะพื้นที่ ระหว่างพื้นที่และโหมดการกระตุ้นในกรณีที่ 1.....	61
5.10 การเคลื่อนที่ของโหมดเด่นทั้งสองโหมด.....	64
5.11 เวลาหน่วงจากการสื่อสารที่เกิดขึ้นทางด้านรับ ( $T_{d2}$ ) ของสัญญาณ $\Delta P_{tie11-1}$ ในกรณีที่ 1.....	66
5.12 ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วเครื่องกำเนิดทั้งหมดพื้นที่ในกรณีที่ 1 .....	67
5.13 ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วเครื่องกำเนิดทั้งหมดพื้นที่ในกรณีที่ 2 .....	68
5.14 ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วเครื่องกำเนิดทั้งหมดพื้นที่ในกรณีที่ 3 .....	69
5.15 ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วเครื่องกำเนิดทั้งหมดพื้นที่ในกรณีที่ 4 .....	70
5.16 กำลังไฟฟ้าจริงด้านออกของ SMES ทั้งสองตัวในกรณีที่ 4 .....	71
5.17 ปริมาณกระแสด้านออกของ SMES ทั้งสองตัวในกรณีที่ 4 .....	72



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้าเพื่อการอยู่อาศัยและดำเนินกิจกรรมทางสังคมนับวันมีแต่จะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรอีกทั้งการพัฒนาและขยายตัวทางเศรษฐกิจของแต่ละประเทศส่งผลให้เกิดการเพิ่มกำลังการผลิตทั้งในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรม นอกจากนี้สภาพอากาศทั่วโลกทวีความรุนแรงมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากภาวะโลกร้อน ทำให้อุณหภูมิในฤดูหนาวของหลายประเทศลดต่ำลงผิดปกติ แต่ในฤดูร้อนกลับมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากยิ่งเป็นตัวเร่งให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าพุ่งขึ้นจากภาวะปกติ แม้ว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าของประชากรทั่วโลกจะเพิ่มมากขึ้น แต่ทรัพยากรทางด้านพลังงาน เช่น น้ำมัน, ถ่านหิน, ลิกไนต์ หรือก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีปริมาณจำกัดกำลังจะหมดไป การสร้างโรงไฟฟ้าขึ้นใหม่เพื่อตอบสนองความต้องการก็เป็นไปได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดด้านกฎหมายสิ่งแวดล้อม ทำให้การขออนุญาตสร้างโรงไฟฟ้าเป็นไปด้วยความล่าช้าและมีต้นทุนสูงเพราะต้องติดตั้งเทคโนโลยีเพื่อลดค่ามลพิษเพิ่มเติมเพื่อให้ผ่านเกณฑ์ที่เข้มงวด ส่วนการพึ่งพาไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตไฟฟ้าที่ก่อมลพิษน้อย ก็ได้รับการต่อต้านจากประชาชนทั่วทุกมุมโลก ทั้งนี้เนื่องจากประชาชนต่างก็ตระหนักถึงภัยอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากการรั่วไหลของกัมมันตภาพรังสีจากแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่จะมีต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมโดยส่งผลกระทบระยะเวลานานหลายชั่วอายุคน ดังเช่น เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นที่โรงไฟฟ้าเชอร์โนบิลเมื่อปี พ.ศ. 2522 หรือล่าสุดการระเบิดของโรงไฟฟ้าฟูกูชิมะไดอิจิหลังเกิดเหตุการณ์สึนามิเมื่อปี พ.ศ.2554

ด้วยข้อจำกัดต่างๆในการเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าดังที่กล่าวไว้ข้างต้นทำให้วิศวกรพยายามหาวิธีการแก้ไขปัญหาค่าความไม่สมดุลย์ของความต้องการใช้ไฟฟ้ากับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ แนวทางที่ใช้ในปัจจุบันคือพยายามเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ส่วนอีกแนวทางหนึ่งเป็นการเพิ่มการเชื่อมต่อสายส่งเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากพื้นที่หนึ่งไปสู่อีกพื้นที่หนึ่งที่อยู่ห่างไกลออกไป ทั้งสองแนวทางแม้ว่าจะช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าได้แต่ก็มีความเสี่ยงอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นตามมาซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง นั่นคือ การเกิดการแคว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบเนื่องจากการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่ให้กำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ [1] ส่วนอีกปัญหาหนึ่งเกิดจากการขยายระบบส่งและการเพิ่มปริมาณการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ที่สูงขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟ [2] การดำเนินการเช่นนี้ย่อมจะทำให้การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังเข้าใกล้ขีดจำกัดด้านเสถียรภาพมากขึ้น จากภาวะความเสี่ยงทั้งสองย่อมจะก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากมายที่จะตามมาหากเกิดความผิดปกติขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งในระบบจนทำให้ระบบป้องกันทำการตัดวงจรส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากระบบเป็นลูกโซ่ส่งผลให้เกิดไฟฟ้ดับเป็นบริเวณกว้าง ดังเช่น เหตุการณ์ไฟฟ้ดับถึง 2 ครั้งใหญ่ๆเมื่อปี พ.ศ.2546 ครั้งแรกเป็นไฟฟ้ดับครั้งใหญ่ที่สุดในประวัติศาสตร์ของสหรัฐอเมริกาเกิดขึ้นบริเวณทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือและบางส่วนของแคนาดา [3]- [4] ครั้งที่สองเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้ดับครั้งใหญ่ที่สุดของประเทศอิตาลี [5]-[6] หรือเมื่อปี พ.ศ.2549 เกิดไฟฟ้ดับในหลายพื้นที่ทั่วยุโรปตะวันตกโดยเริ่มขึ้นที่เยอรมนีแล้วขยายไปยังฝรั่งเศส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิตาลี เบลเยียม และสเปน สุดท้ายเมื่อปี พ.ศ. 2554 เกิดไฟฟ้าดับครั้งใหญ่ในรัฐทางตอนใต้ของสหรัฐอเมริกาแล้วส่งผลกระทบต่อถึงเม็กซิโก

ดังนั้นปัญหาเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังจึงเป็นปัญหาที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การนำเทคโนโลยีโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะและระบบเฝ้าระวังพื้นที่กว้างมาใช้งานจะช่วยให้การจัดการระบบไฟฟ้ากำลังเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การติดตั้งอุปกรณ์ทำเสถียรภาพบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น มีนักวิจัยหลายท่านเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพด้วยการใช้อุปกรณ์ประเภทต่างๆ ดังเช่น การใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิต (static var compensator: SVC) ร่วมกับตัวรีกซาระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (automatic voltage regulator: AVR) [7] หรือการใช้อิเล็กโทรไลเซอร์ (electrolyzer) ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) [8] เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมในระบบไมโครกริด นอกจากนี้มีการนำตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิต [9], ตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (power system stabilizer: PSS) [10], ตัวเก็บประจุอนุกรมที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (thyristor-controlled series capacitor: TCSC) [11], ตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่รวมเป็นหนึ่ง (unified power flow controller: UPFC) [12] หรือตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด (superconductivity magnetic energy storage : SMES) [13] เพื่อแก้ไขปัญหาการแกว่งระหว่างพื้นที่ในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้าง

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ปรากฏจะพบว่า SMES เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่สามารถทำเสถียรภาพให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังได้ดีกว่าอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานชนิดอื่นๆภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน [14] เพราะ SMES สามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจาก SMES มีราคาแพงจึงไม่ค่อยมีโอกาสได้พบเห็นการนำ SMES มาใช้งานมากนัก ขณะนี้มีนักวิจัยจำนวนมากพยายามพัฒนาตัวนำยิ่งยวดให้มีราคาถูกลง ดังนั้นในอนาคตข้างหน้าการนำ SMES มาใช้งานจะแพร่หลายมากขึ้น สำหรับประเทศไทยมีนักวิจัยจำนวนมากไม่มากนักที่ทำการศึกษาด้านเทคโนโลยีด้านตัวนำยิ่งยวด โดยเกือบทั้งหมดเป็นงานวิจัยทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนงานวิจัยตัวนำยิ่งยวดเพื่อใช้ในงานด้านไฟฟ้ากำลังนั้นพบว่ามีน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะต้นทุนการวิจัย SMES มีมูลค่าสูง แต่ในอนาคตข้างหน้าเมื่อตัวนำยิ่งยวดถูกพัฒนาให้มีราคาถูกลงแล้วมีความเป็นไปได้ที่จะมีการนำ SMES เข้ามาใช้งานในประเทศไทย ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความจำเป็นต่อการศึกษาและวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังแล้ว จึงควรทำการศึกษาด้านเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับ SMES เพื่อรองรับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของอุปกรณ์ชนิดนี้ที่จะมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายต่อไปในอนาคตอันใกล้

วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอการนำ SMES ไปใช้แก้ไขปัญหเสถียรภาพบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะด้วยการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES ให้มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพการทำงานของระบบและมีโครงสร้างเฉพาะเจาะจงเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้มีขนาดเหมาะสมกับการใช้งานไปพร้อมๆกันเพื่อช่วยลดต้นทุนการสร้าง SMES ซึ่งเป็นข้อดีของการนำ SMES มาใช้งาน ในที่นี่ได้แบ่งปัญหาที่ใช้ศึกษาออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ๆดังนี้

1) การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในระบบไมโครกริดด้วย SMES

ในอนาคตข้างหน้าจำนวนประชากรแต่ละภูมิภาคจะเพิ่มสูงขึ้นทำให้ที่อยู่อาศัยต้องกระจายตัวออกไปสู่นอกเมือง การขยายระบบสาธารณูปโภคโดยเฉพาะการสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอแก่ความต้องการเป็นไปได้อย่างขึ้น เนื่องจากเกิดการต่อต้านของประชาชนจากปัญหาเรื่องมลพิษและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นมีนักวิจัยหลายท่านพยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้นด้วยการสร้างระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนแยกอิสระเพื่อจ่ายให้แก่พื้นที่อยู่อาศัยที่กระจายตัวอยู่นอกเมือง ระบบนี้มีชื่อเรียกว่าระบบไมโครกริด (Microgrid) [15] ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งของการแก้ไขปัญหาที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แต่การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนก็จะเกิดปัญหาเสถียรภาพต่อระบบ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนมีค่าไม่สม่ำเสมอ ทำให้กำลังไฟฟ้าในระบบแกว่งจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบและผู้ใช้ไฟได้

มีนักวิจัยหลายท่านพยายามนำเสนอวิธีการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดหลายวิธี อาทิเช่น [16] นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าชนิดพีไอดี (PID) เพื่อควบคุมการรับหรือจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้แก่ระบบไมโครกริด การออกแบบใช้เทคนิคการกำหนดการวางตำแหน่งโพลของระบบให้อยู่ในบริเวณที่ต้องการทำให้การหน่วงของระบบดีขึ้น [17] นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม SMES โดยแยกการควบคุมเป็นสามระดับด้วยวิธีค่าเฉลี่ยตัวแปรสถานะ (state-space averaging method) นอกจากนี้ยังใช้วิธีการควบคุมกระแสแบบแยกอิสระตามแกนหมุนเชิงโคโรนัส ยิ่งไปกว่านั้นได้ทำการควบคุมแรงดันที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์เพื่อให้แรงดันมีลักษณะสมมาตรสามเฟส แต่ทั้ง [16] และ [17] ไม่ได้กล่าวถึงการออกแบบขนาดความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES ส่วน [18] นำเสนอการออกแบบ SMES ที่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการหาค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ SMES จะต้องรับหรือจ่ายออกมาเพื่อเสริมหรือหักล้างกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมจึงทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผ่านการชดเชยด้วย SMES มีความราบเรียบขึ้น นอกจากนี้ยังได้พิจารณาถึงความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES ที่มีขนาดเหมาะสมอีกด้วย ในการออกแบบจะใช้วิธีการปรับค่าแบบลองผิดลองถูกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบนความถี่ไฟฟ้าของระบบเป็นดัชนีชี้วัด

จากงานวิจัยต่างๆที่นำเสนอวิธีการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดด้วย SMES ทำให้เกิดแนวคิดใหม่ในการออกแบบ SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสม ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบ SMES ด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ SMES สามารถลดความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดให้มีค่าต่ำสุดในขณะที่ขดลวดของ SMES มีขนาดเหมาะสม นอกจากนี้เพื่อให้สามารถนำตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES ไปใช้งานได้จริงจึงได้กำหนดตัวควบคุมให้มีโครงสร้างเป็นแบบพีไอ ในการออกแบบ SMES จะสร้างเป็นปัญหาที่เหมาะสมแล้วทำการหาคำตอบด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค วิธีการออกแบบที่นำเสนอจะทำให้ต้นทุนการสร้าง SMES มีมูลค่าต่ำลงแต่ยังคงมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี

2) การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างด้วย SMES

ในปัจจุบันนี้การแข่งขันทางเศรษฐกิจของแต่ละประเทศทำให้ทุกภาคส่วนต่างมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น แต่การตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าวไม่สามารถดำเนินการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวิธีการเดิมนั้นคือการสร้างโรงไฟฟ้าแห่งใหม่ เนื่องจากข้อจำกัดของปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดไปอีกทั้งปัญหาภาวะโลกร้อนที่ส่งผลต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์ทวีความรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนจึงเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาความขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าที่กำลังประสบอยู่ แต่การดำเนินการดังกล่าวก่อให้เกิดภาวะเสี่ยงต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้นั้นคือจะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียน เมื่อทำการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้ให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าในระบบเกิดการแกว่งจนอาจส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพและนำไปสู่เหตุการณ์ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ทำเสถียรภาพให้แก่ระบบเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

มีบทความวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอวิธีการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้วย SMES โดยใช้วิธีการต่างๆกัน เช่น [19] นำเสนอวิธีการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมด้วย SMES โดยออกแบบตัวควบคุมการหน่วงมีโครงสร้างแบบพีโอดีด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าเฉพาะของระบบ (system eigen values) ควบคู่กับการพิจารณาความสามารถในการลดการแกว่งของแรงดันที่บัสและกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งของระบบให้มีค่าต่ำสุด [20] นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES ที่มีโครงสร้างแบบนำหน้า/ล่าหลัง เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมด้วยการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้อัตราหน่วงในโหมดเด่นของการแกว่งกำลังไฟฟ้า (dominant power oscillation mode) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนด นอกจากนี้ยังต้องการให้ค่าดัชนีความคงทนในรูปของผลคูณส่วนเพื่อเสถียรภาพ (multiplicative stability margin: MSM) มีค่าต่ำสุดอีกด้วย ส่วน [21] เสนอการนำ SMES มาใช้ลดการแกว่งของแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมกับระบบด้วยการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงด้านนอกที่ SMES ต้องจ่ายออกมาซึ่งในที่นี้ได้นำเสนออยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (simple moving average: SMA) และวิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential moving average: EMA) จากผลที่ได้พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงด้านนอกที่คำนวณด้วยวิธี EMA จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าวิธี SMA ทั้งนี้ [19] - [21] ไม่ได้กล่าวถึงการออกแบบขนาดความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมขนาดใหญ่ด้วย SMES เนื่องจากระบบที่ใช้ศึกษาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังด้านตะวันตกของประเทศญี่ปุ่นซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้ง SMES มากกว่าหนึ่งตัวเพื่อให้สามารถลดการแกว่งของระบบได้อย่างทั่วถึง แต่การออกแบบ SMES จำนวนหลายตัวสำหรับติดตั้งในระบบจะต้องออกแบบให้ SMES ทุกตัวสามารถทำงานสัมพันธ์กันได้ การออกแบบจึงมีความยุ่งยากกว่าการออกแบบ SMES เพื่อติดตั้งในระบบเพียงตัวเดียว ในที่นี้ได้ทำการออกแบบ SMES จำนวนสองตัวสำหรับลดการแกว่งให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างโดยสร้างเป็นสมการปัญหาที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในระบบมีค่าต่ำสุดในขณะเดียวกันขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะต้องมีขนาดเหมาะสมด้วยเพื่อให้ต้นทุนการสร้าง SMES มีมูลค่าต่ำ แต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพการทำงานของ SMES ที่ออกแบบจะต้องใกล้เคียงกับ SMES ที่มีขดลวดตัวนำขนาดใหญ่ สำหรับการออกแบบ SMES ได้ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมและขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES ทั้งสองตัวไปพร้อมๆกันโดยได้กำหนดให้ตัวควบคุมมีโครงสร้างเฉพาะแบบพีโอเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นเป็นประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) การทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างด้วย SMES

จากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้ต้องเพิ่มการเชื่อมต่อสายส่งจากพื้นที่หนึ่งไปสู่อีกพื้นที่หนึ่งซึ่งห่างไกลออกไปเพื่อให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการ การเชื่อมโยงระบบโดยขยายพื้นที่การจ่ายกำลังไฟฟ้าไกลออกไปจะทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟาระหว่างพื้นที่ได้ หากระบบไฟฟ้ากำลังเกิดความผิดปกติขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งในระบบก็จะทำให้ระบบป้องกันทำงานตัดวงจรส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปเรื่อยออกไปจากระบบซึ่งจะทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง การแก้ไขปัญหาดังกล่าววิศวกรได้นำความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการสื่อสาร, ระบบควบคุม และอุปกรณ์วัดมาบูรณาการเข้าด้วยกันเป็นระบบเฝ้าระวังพื้นที่กว้างทำให้สามารถนำข้อมูลระหว่างพื้นที่มาใช้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังจากศูนย์กลางการควบคุม ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ข้อมูลเฉพาะพื้นที่แต่เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามการรับส่งสัญญาณจากจุดใดจุดหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังไปสู่ศูนย์กลางการควบคุมจะเกิดเวลาหน่วงจากการสื่อสาร ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเวลาหน่วงนี้สามารถทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้หากไม่นำค่าเวลาหน่วงนี้มาพิจารณาในการออกแบบตัวควบคุม

ด้วยเหตุนี้มีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับอุปกรณ์ทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาเวลาหน่วงจากการสื่อสารหลายวิธีด้วยกัน ดังเช่น [22] นำเสนอการออกแบบตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (PSS) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างด้วยการออกแบบให้ PSS สามารถทำงานได้สองระดับการควบคุม กล่าวคือสามารถทำงานได้ทั้งในโหมดเฉพาะพื้นที่และโหมดควบคุมจากศูนย์กลาง ทั้งนี้ในการออกแบบ PSS ได้ใช้แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังลดอันดับที่รวมเวลาหน่วงจากการสื่อสารแล้วทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำให้ค่าดัชนีประสิทธิภาพควอดราติกซ์ (quadratic performance index) มีค่าต่ำสุด หรือ [23] นำเสนอการออกแบบ PSS ที่ควบคุมจากศูนย์กลางสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างโดยใช้วิธีตารางอัตราขยาย (gain scheduling) จากผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมคงทนที่ออกแบบโดยวิธีการควบคุม  $H_{\infty}$  ซึ่งพบว่าวิธีตารางอัตราขยายจะให้ผลตอบสนองที่มีรูปร่างคงเดิมแม้ว่าเวลาหน่วงจากการสื่อสารมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ใช้ในการออกแบบ สุดท้าย [24] นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิตเพื่อทำเสถียรภาพให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาผลกระทบของเวลาหน่วงจากการสื่อสาร โดยออกแบบตัวชดเชยเฟสเพื่อชดเชยเวลาหน่วงจากการสื่อสาร ทั้งนี้ในการออกแบบดังกล่าวจะใช้ระบบประมาณที่มีอันดับต่ำด้วยวิธีการประมาณแพด (Pade approximation)

จากวิธีการออกแบบตัวควบคุมของอุปกรณ์ทำเสถียรภาพชนิดต่างๆที่นำเสนอมาเพื่อแก้ไขปัญหาเสถียรภาพบนระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาเวลาหน่วงจากการสื่อสาร เมื่อพิจารณาถึงข้อดีของแต่ละวิธีทำให้สามารถพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES แนวทางใหม่ได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบคงทนของ SMES ที่ควบคุมจากศูนย์กลางโดยออกแบบให้ตัวควบคุมมีโครงสร้างเฉพาะเจาะจงเป็นแบบนำหน้า/ล่าหลังอันดับหนึ่งเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ในทางปฏิบัติ การออกแบบตัวควบคุมได้ใช้ทฤษฎีการควบคุมคงทน  $H_{\infty}$  โดยแทนความไม่แน่นอนจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะการทำงานในระบบและเวลาหน่วงจากการสื่อสารด้วยแบบจำลองความไม่แน่นอนชนิดไร้โครงสร้างแล้วทำการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้นำ SMES ที่ออกแบบไว้ไปใช้ศึกษาการทำเสถียรภาพให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างด้านตะวันตกของประเทศไทย

ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าและขนาดความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดสำหรับลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในระบบไมโครกริด
2. เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าและขนาดความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดสำหรับลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้าง
3. เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าคงทนของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดโดยวิธีการควบคุม  $H_\infty$  สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาเวลาหน่วงจากการสื่อสาร

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในการศึกษาวิธีการออกแบบตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดเพื่อติดตั้งในระบบไมโครกริดและระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างได้กำหนดสมมุติฐานของการศึกษาดังนี้

1. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมและแสงอาทิตย์มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามแบบจำลองที่อ้างอิงจาก [25]
2. การเปลี่ยนแปลงของเวลาหน่วงจากการสื่อสารมีการกระจายแบบเกาส์
3. ความไม่แน่นอนของระบบและเวลาหน่วงจากการสื่อสารสามารถแทนได้ด้วยความไม่แน่นอนแบบไร้โครงสร้าง (unstructured uncertainty)

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การออกแบบตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดสำหรับการทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังมีทฤษฎีหรือแนวความคิดดังนี้

1. แนวความคิดการออกแบบ SMES ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด

เนื่องจากระบบที่ใช้ศึกษาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งแทนด้วยสมการพลวัตที่มีอันดับสูง ดังนั้นการออกแบบ SMES จึงมีความซับซ้อน การออกแบบโดยใช้ความชำนาญในการคาดเดาคำตอบหรือการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงกราฟอาจจะไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะแก้ไขปัญหาคำตอบที่มีความซับซ้อนได้ ดังนั้นการใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น [26] ในที่นี้จึงนำวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดมาช่วยออกแบบ SMES โดยระเบียบขั้นตอนวิธีการจะให้หลักการของการคำนวณอย่างมีระบบแบบแผนและมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีการควบคุม  $H_\infty$

ทฤษฎีการควบคุม  $H_\infty$  [27] เป็นทฤษฎีหนึ่งที่น่ามาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากตัวควบคุมที่ได้จะมีสมรรถนะและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบสูง อย่างไรก็ตามตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบโดยทฤษฎีนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนที่มีโครงสร้างลักษณะเฉพาะเจาะจงด้วยวิธีการควบคุม  $H_\infty$  สำหรับออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดเพื่อนำไปใช้แก้ไขปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาผลกระทบของเวลาหน่วงจากการสื่อสาร

ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ทฤษฎีกลุ่มอนุภาค (PSO)

ทฤษฎีกลุ่มอนุภาคเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสม โดยอาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร [28] ซึ่งได้แนวความคิดจากการเลียนแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของสัตว์ที่อาศัยอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่ม เช่น ผึ้งนกหรือฝูงปลา เป็นต้น ทฤษฎีกลุ่มอนุภาคนี้อาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้ง่าย, มีคุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีมาก และมีประสิทธิภาพในการคำนวณสูง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำทฤษฎีกลุ่มอนุภาคมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าและขนาดความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดด้วยโปรแกรม Matlab และ Dymola ร่วมกับ Object Stab [29]
2. ทำการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าและขนาดความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบไมโครกริดที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมและแสงอาทิตย์
3. ทำการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าและขนาดความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมขนาดใหญ่
4. ทำการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาผลกระทบของเวลาหน่วงจากการสื่อสาร

### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 บทโดยมีรายละเอียดของแต่ละบทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ, ประวัติและที่มาของการสร้างตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด, แนวความคิดการออกแบบตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดด้วยวิธีการทำให้เหมาะสม และการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค

บทที่ 3 กล่าวถึงการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมและแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริดโดยทำการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าและขนาดความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด

บทที่ 4 กล่าวถึงการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างโดยทำการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าและขนาดความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด

บทที่ 5 กล่าวถึงการทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างด้วยตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดที่สั่งการควบคุมจากศูนย์กลาง ในที่นี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าเป็นแบบคงทนด้วยวิธีการควบคุม  $H_\infty$  โดยพิจารณาผลกระทบของเวลาหน่วงจากการสื่อสาร

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# การออกแบบตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด ด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมเพื่อทำเสถียรภาพ ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด (SMES) โดยเริ่มต้นจากความเป็นมา, ส่วนประกอบและแบบจำลองของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด หลังจากนั้นกล่าวถึงแนวคิดในการออกแบบทางวิศวกรรมด้วยวิธีทำให้เหมาะสม สุดท้ายจะอธิบายวิธีกลุ่มอนุภาคซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด

### 2.1 ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ



รูปที่ 2.1 การติดตั้ง SMES ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ[30-31]

ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันเป็นการส่งกำลังไฟฟ้าแบบทิศทางเดียวจากผู้ผลิตมายังผู้บริโภค โดยผ่านสายส่งระยะไกลก่อให้เกิดความสูญเสียในระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมากประกอบกับความตื่นตัวทั่วโลกในเรื่องของการขาดแคลนทรัพยากรพลังงานและปัญหาสภาวะโลกร้อนอันเป็นผลมาจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน โดยผู้ดูแลเนื้อหาเอกสารนี้จะไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมากจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการผลักดันให้มีงานวิจัยและการลงทุนในโครงการผลิตไฟฟ้ารูปแบบใหม่ โดยผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลม, พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและมีอยู่อย่างไม่จำกัด นอกจากนี้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนสามารถติดตั้งในสถานที่ไม่ห่างไกลจากผู้ใช้ไฟมากนักและเป็นการกระจายแหล่งพลังงานเพื่อลดความสูญเสียในระบบส่ง ระบบไฟฟ้ารูปแบบใหม่นี้ คือ ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) [32-33] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมาบริหารจัดการด้านการควบคุมการผลิต การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ทำให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อบริษัทไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาด หรือแหล่งผลิตไฟฟ้ากระจายตัว (Distributed Generation : DG)

แต่พลังงานหมุนเวียนที่นำมาใช้ผลิตไฟฟ้านั้นเป็นแหล่งกำเนิดที่ให้ค่าพลังงานไม่สม่ำเสมอ ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าไม่คงที่ตามไปด้วย เมื่อนำแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบจะทำให้กำลังไฟฟ้าในระบบเกิดการแกว่ง นอกจากนี้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้านั้นวันมีแต่จะเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสวนทางกับการสร้างโรงไฟฟ้าแห่งใหม่ทำได้ยากเนื่องจากติดปัญหาข้อกฎหมายสิ่งแวดล้อมและสถานที่การก่อสร้าง การขยายระบบส่งไปยังพื้นที่ใช้ไฟที่อยู่ไกลออกไปเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าจึงเป็นหนทางที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่การขยายระบบส่งจะทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ได้หากเกิดความผิดปกติขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งในระบบ ดังนั้นเมื่อระบบไฟฟ้ากำลังต้องทำงานใกล้ค่าพิกัดอีกทั้งยังเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนหรือการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ในระบบ ทำให้การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังจะอยู่ใกล้ขอบเขตเสถียรภาพซึ่งเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพของระบบจนเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างดังที่เคยเกิดขึ้นในหลายๆประเทศ ด้วยเหตุนี้การติดตั้งอุปกรณ์ทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพราะจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำ SMES มาใช้ทำเสถียรภาพให้แก่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะเพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่จากการขยายระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด (Superconductivity Magnetic Energy Storage : SMES) ให้ผลตอบสนองในการรับหรือจ่ายพลังงานได้อย่างรวดเร็วจึงมีความสามารถในการทำเสถียรภาพให้แก่ระบบได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับอุปกรณ์สะสมพลังงานชนิดอื่นๆ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ SMES สำหรับติดตั้งในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

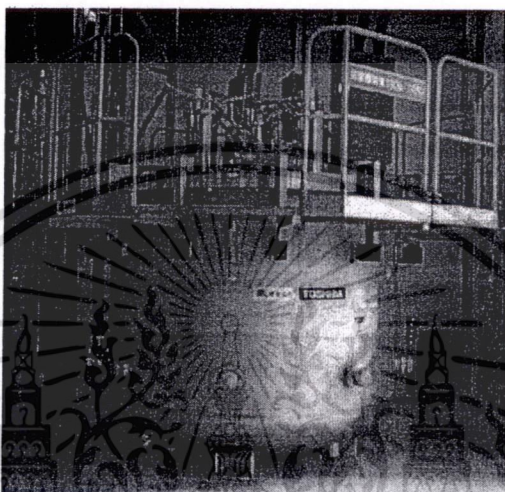
## 2.2 ความเป็นมาและส่วนประกอบของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด

ตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage) มีชื่อย่อว่า SMES ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานที่สามารถจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าได้อย่างทันทีทันใดทำให้สามารถนำมาใช้ทำเสถียรภาพให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังได้เป็นอย่างดี

แนวคิดในการสร้าง SMES ตัวแรกนั้นถูกนำเสนอโดยชาวฝรั่งเศสชื่อ Ferrier เมื่อปีค.ศ. 1969 เพื่อต้องการสร้างอุปกรณ์เก็บพลังงานในหลอดตัวนำทอรอยด์ขนาดใหญ่สำหรับเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อยแล้วค่อยจ่ายพลังงานไฟฟ้านี้ออกมาในช่วงที่มี

เอพลังงานเป็น... ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง แต่โครงการดังกล่าวได้ถูกปฏิเสธเนื่องจากมูลค่าของโครงการสูงมาก ต่อมาในปีค.ศ.1971 ได้มีการสร้างต้นแบบ SMES ตัวแรกเป็นผลสำเร็จที่มหาวิทยาลัยวิสคอนซิน ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อทำการศึกษาวิจัยพฤติกรรมการทำงานในการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ สำหรับ SMES ตัวแรกที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้งานจริงในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขึ้นในปีค.ศ.1981 SMES ตัวนี้ถูกติดตั้งโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นโดยเป็นระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 500 kV เป็นสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างรัฐแคลิฟอร์เนียกับนอร์ทเวสต์



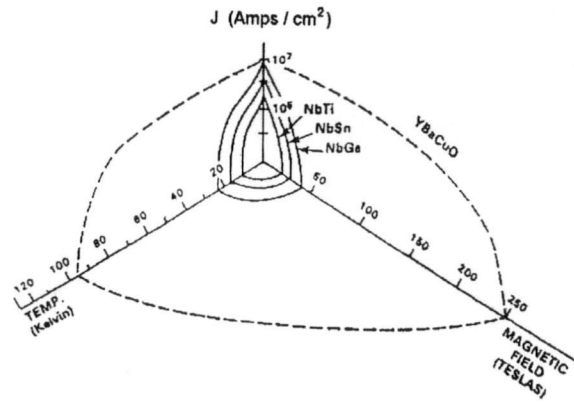
รูปที่ 2.2 ตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด [34]

ถัดมาในปีค.ศ.1986 บริษัทฮิตาชิ ประเทศญี่ปุ่นได้ทำการสร้างและทดสอบ SMES ขนาด 5 MJ โดยเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังที่ระดับแรงดัน 6.6 kV เพื่อศึกษาการทำเสถียรภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ส่วนในปีค.ศ.1998 ได้มีการพัฒนา SMES ให้มีศักยภาพการทำงานสูงขึ้น โดยกลุ่มวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับตัวนำยิ่งยวด (International Superconductivity Technology Center : ISTECH) ของประเทศญี่ปุ่น จะพบว่าการศึกษาเพื่อพัฒนา SMES เป็นไปอย่างต่อเนื่องและคาดว่าในอนาคต SMES จะเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทต่อระบบไฟฟ้ากำลังอย่างมาก

SMES เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานที่เก็บพลังงานในรูปแบบแม่เหล็กซึ่งเกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นขดลวดตัวนำดังกล่าวจะต้องมีสภาพเป็นตัวนำยิ่งยวดเพื่อให้พลังงานที่เก็บสะสมไว้ไม่สูญเสียเป็นความร้อน แต่ขดลวดตัวนำจะมีสภาพเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ก็ต่อเมื่อต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมด้วยปัจจัยทางฟิสิกส์ 3 ประการดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วย

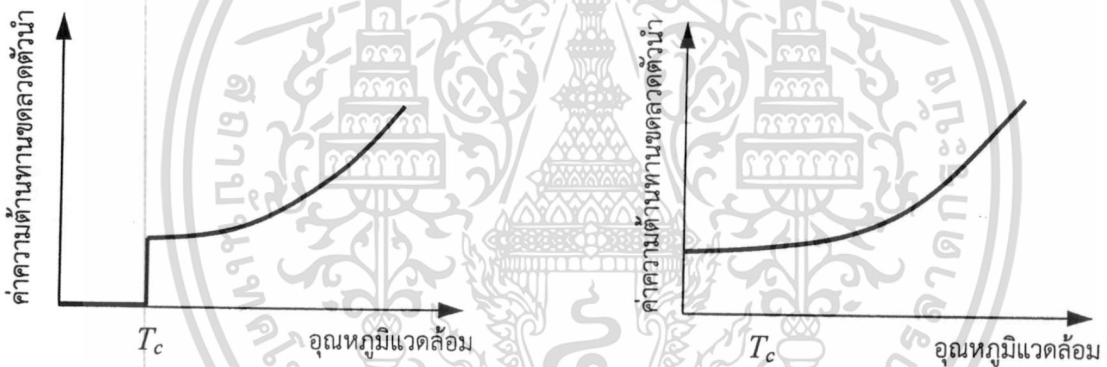
- 1) อุณหภูมิแวดล้อมต้องมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature :  $T_c$ )
- 2) ค่าความหนาแน่นกระแสในขดลวดตัวนำต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นวิกฤติ (critical current density :  $J_c$ )
- 3) ค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดตัวนำต้องมีค่าน้อยกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติ (critical Magnetic field :  $H_c$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

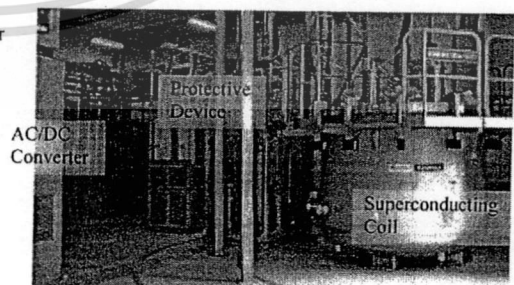
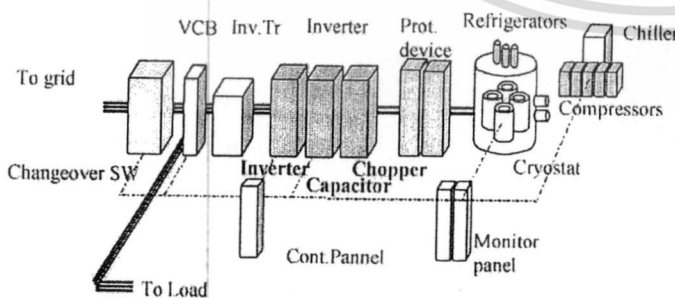


รูปที่ 2.3 แผนผังเฟส (phase diagram) ของสารตัวนำยิ่งยวด [35]

เมื่อสภาพแวดล้อมของลวดตัวนำสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งสามประการข้างต้น ลวดตัวนำจะอยู่ในสภาพเป็นตัวนำยิ่งยวดที่มีความต้านทานเป็นศูนย์ซึ่งจะแตกต่างจากคุณลักษณะของโลหะตัวนำทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของลวดตัวนำยิ่งยวดกับตัวนำทั่วไปที่อุณหภูมิวิกฤติ



2.5(ก) ผังโครงสร้างของระบบ SMES [34]

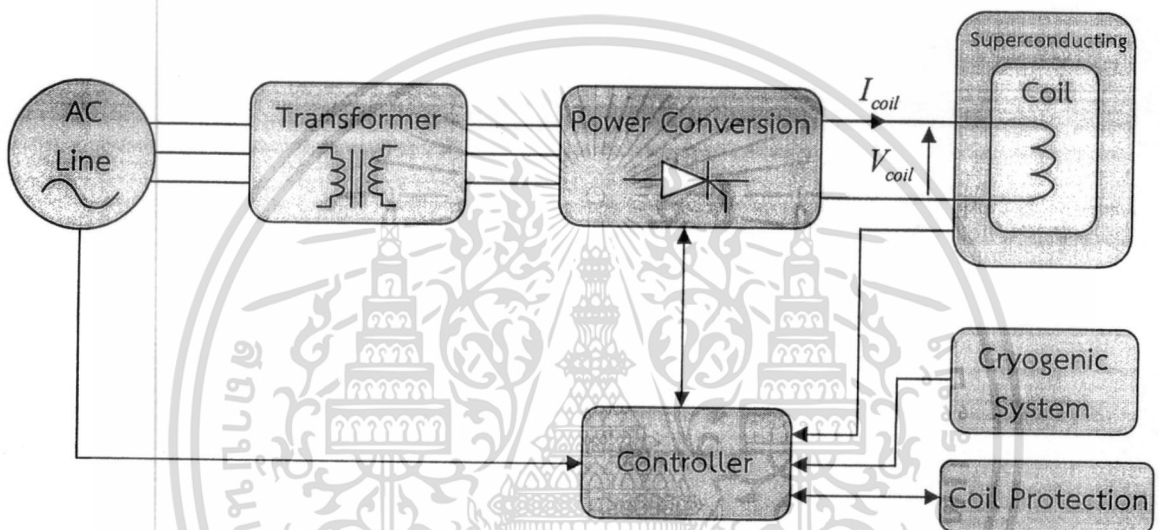
2.5(ข) อุปกรณ์จริงของระบบ SMES [36]

รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของระบบ SMES

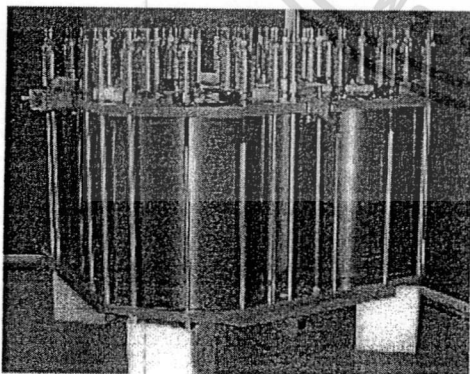
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SMES ประกอบด้วย 4 ส่วนใหญ่ๆได้แก่ ขดลวดตัวนำยิ่งยวด, เครื่องทำความเย็น, ระบบควบคุมและวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.6

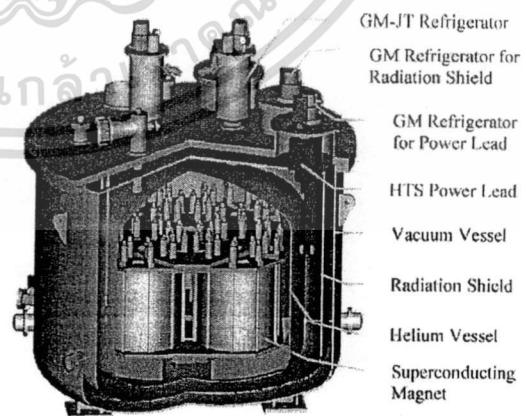
ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (superconducting coils) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อพร้อมที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกไปสู่ระบบเมื่อเกิดเหตุขัดข้องต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังเช่น แรงดันไฟฟ้าตกหรือเกิดการแกว่ง, เกิดไฟฟ้าลัดวงจร เป็นต้น โดยทั่วไปขดลวดตัวนำที่นำมาใช้งานผลิตจากโลหะผสมระหว่างไนโอเบียมกับไททาเนียม (NbTi) โดยขดลวดตัวนำของ SMES จะมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 แต่ขดลวดตัวนำจะอยู่ในสภาพเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ต้องเก็บอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำ ดังนั้นขดลวดตัวนำจะถูกเก็บไว้ในถังสุญญากาศที่เป็นระบบปิดเพื่อรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้



รูปที่ 2.6 แผงผังวงจรไฟฟ้าของระบบ SMES



2.7 (ก) ขดลวดตัวนำยิ่งยวด SMES [34]



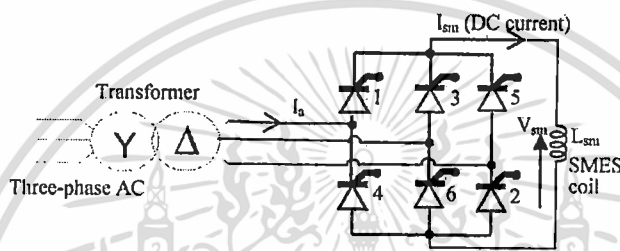
2.7 (ข) ภาพตัดขวางภายในของ SMES [34]

### รูปที่ 2.7 โครงสร้างขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES

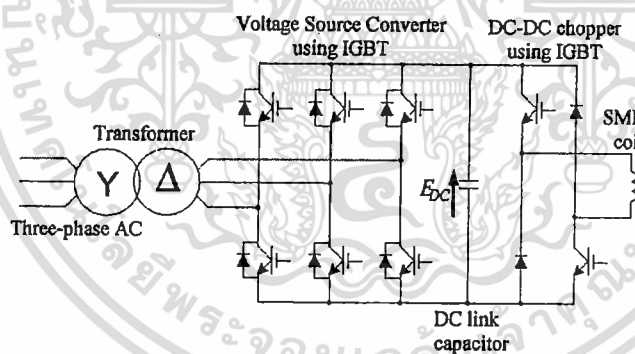
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องทำความเย็น (refrigeration system) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับถังสุญญากาศเพื่อทำหน้าที่ส่งถ่ายสารทำความเย็นเพื่อช่วยรักษาระดับอุณหภูมิของลวดตัวนำให้อยู่ใกล้จุดเดือดของฮีเลียมเหลวซึ่งมีค่าประมาณ 4.2 องศาเคลวิน ( $K$ )

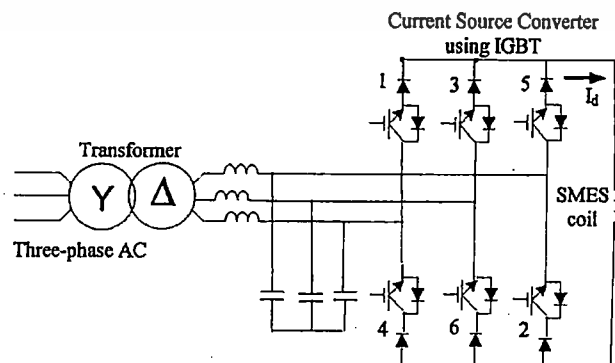
ระบบควบคุม (control system) ทำหน้าที่ควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบเพื่อให้ SMES สามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบไฟฟ้าสามารถรักษาภาวะการทำงานที่เป็นปกติไว้ได้ นอกจากนี้ระบบควบคุมจะต้องควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกในขดลวดตัวนำยิ่งยวดด้วยเพื่อให้พลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมในขดลวดอยู่ในขอบเขตที่ออกแบบไว้ ดังนั้นระบบควบคุมจะต้องประมวลผลสัญญาณที่ได้รับจากส่วนต่างๆ ได้แก่ สัญญาณจากขดลวดตัวนำยิ่งยวด, เครื่องทำความเย็น และวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าด้วยไทรสเตอร์ [37]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าชนิดแหล่งกำเนิดแรงดัน [37]

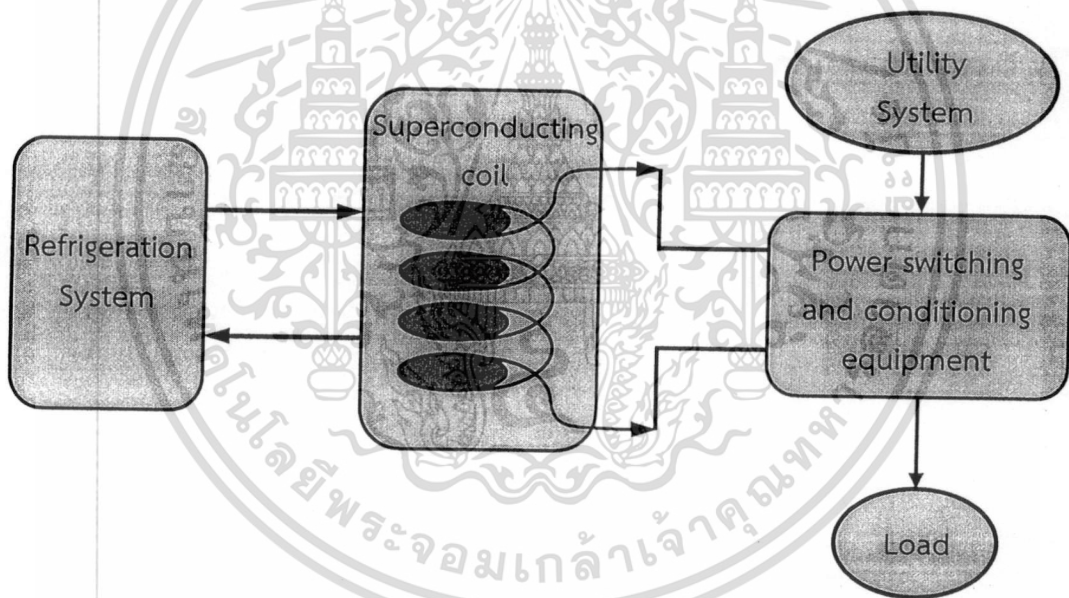


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าชนิดแหล่งกำเนิดกระแส [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแปลงพลังงานไฟฟ้า (power switching and conditioning equipment) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดตัวนำเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นเมื่อนำ SMES ไปเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับจึงจำเป็นต้องมีอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงรูปแบบกำลังไฟฟ้า วงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิดใหญ่ๆได้แก่ วงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor-based converter), วงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าชนิดแหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage source converter), วงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าชนิดแหล่งกำเนิดกระแส (Current source converter) ดังรูปที่ 2.8-2.10

สำหรับวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าด้วยไทรสเตอร์ใช้สำหรับควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเป็นหลัก และสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากลักษณะการควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนแยกอิสระจากกันได้ ส่วนวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าชนิดแหล่งกำเนิดแรงดันและวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าชนิดแหล่งกำเนิดกระแสนั้นใช้สวิตซ์ที่สามารถควบคุมการทำงานได้อย่างมีอิสระจึงทำให้วงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าสามารถควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างมีอิสระ



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของ SMES อย่างง่าย

ในการทำงานของ SMES สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.11 โดยเริ่มจากการนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันต่ำในหลักร้อยโวลต์ที่ได้จากการลดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงผ่านหม้อแปลงและวงจรแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายพลังงานให้แก่ขดลวดตัวนำยิ่งยวด ปริมาณพลังงานที่เก็บสะสมในขดลวดคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$E_{sm} = \frac{1}{2} L_{sm} I_{sm}^2 \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $E_{sm}$  เป็นพลังงานที่เก็บสะสมในขดลวดตัวนำ (J)

$L_{sm}$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (H)

$I_{sm}$  เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด (A)

หลังจากนั้นพลังงานจะถูกเก็บสะสมไว้ในรูปของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง ไหลวนอยู่ในขดลวดตลอดเวลา เนื่องจากลวดตัวนำอยู่ในสภาพเป็นตัวนำยิ่งยวดทำให้ค่าความต้านทานของขดลวดมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงไม่เกิดการสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนในขดลวด เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดเหตุขัดข้องและจำเป็นต้องเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบอย่างทันทีทันใด SMES จะทำหน้าที่จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเข้ามาเก็บอยู่ในขดลวดผ่านวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับในช่วงเวลาและปริมาณที่เหมาะสมเพื่อทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพกลับเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติอย่างรวดเร็ว

เนื่องจาก SMES ไม่เกิดการสูญเสียจากการเก็บพลังงาน ดังนั้น SMES จึงเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงมีค่าประมาณ 95-98 % ความสูญเสียจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณกระแสในขดลวดตัวนำยิ่งยวดมีการเปลี่ยนแปลงนั่นคือในช่วงที่มีการรับหรือจ่ายพลังงานออกจากขดลวดในช่วงเวลาดังกล่าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กนั้นหมายถึงความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นจากการสูญเสียฮิสเทอรีซิสและการสูญเสียกระแสไหลวนแต่การสูญเสียทั้งสองมีปริมาณไม่มากนัก ส่วนการสูญเสียที่เกิดขึ้นและมีปริมาณมากเป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรแปลงพลังงานและการสูญเสียจากระบบทำความเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิของขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้มีอุณหภูมิเหมาะสม

ในปัจจุบันนักวิจัยสามารถสร้าง SMES ที่มีพิกัดถึง 10 MW นอกจากนี้ยังมีกลุ่มวิจัยที่กำลังสร้าง SMES ให้มีพิกัดกำลังที่สูงขึ้นในระดับหลักร้อยกิโลวัตต์ [38-39] ส่วนการผลิต SMES ในเชิงพาณิชย์นั้นคาดว่า SMES ที่มีจำหน่ายจะมีพิกัดประมาณ 1-10 MW ส่วนใหญ่จะนำ SMES ไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมไฟฟ้าต่างๆ เช่น ใช้ทำเสถียรภาพให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง, สำหรับลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า, เพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า, รักษาคุณภาพไฟฟ้า, เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง เป็นต้น [34],[36]

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีด้านตัวนำยิ่งยวดและอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้ SMES ได้ถูกพัฒนาให้มีศักยภาพสูงขึ้นได้แก่ สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีกำลังสูงขึ้น, ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น, ประสิทธิภาพสูงขึ้นและควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ทั้งรับหรือจ่าย ดังนั้น SMES จึงเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่มีศักยภาพสูงกว่าอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น แบตเตอรี่เคมี (chemical battery), ตัวเก็บพลังงานวัฏจักรหมุน (flywheels), หรือ บั๊มน้ำสะสมพลังงาน (hydro-pumped storage) ด้วยเหตุนี้ SMES มีโอกาสที่จะเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่มีนัยสำคัญในอนาคต

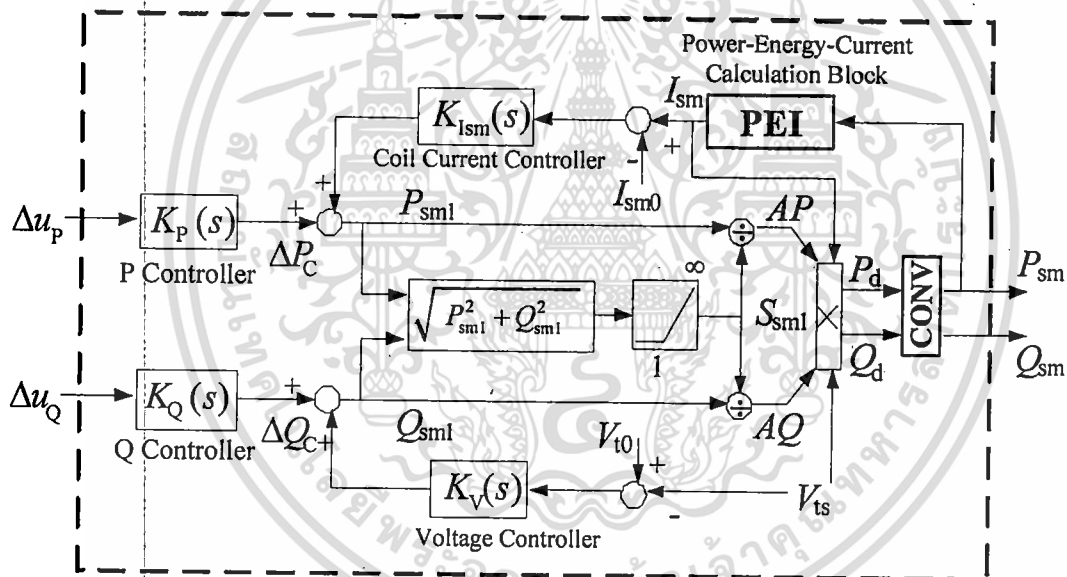
อย่างไรก็ตามต้นทุนในการสร้าง SMES ยังมีราคาสูงมาก จากข้อมูลเมื่อปีค.ศ. 2010 [37],[40] ได้ทำการประเมินราคา SMES โดยแยกประเมินองค์ประกอบหลักของ SMES ออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานกับส่วนที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ในส่วนที่เก็บสะสมพลังงานจะประกอบด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด ระบบทำความเย็น อุปกรณ์ป้องกันและควบคุมทั้งหมดมีมูลค่าประมาณ 85,000-125,000 ดอลลาร์ต่อเมกะจูลล์ (MJ) ส่วนที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตซ์ อุปกรณ์ป้องกันและควบคุมซึ่งมีมูลค่าประมาณ 150-250 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ (kW) สาเหตุที่ราคาประเมินของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามียังมีช่วงราคาค่อนข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างทั้งนี้ขึ้นกับการใช้งานของ SMES กล่าวคือถ้านำ SMES ไปต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจะมีสองส่วนได้แก่ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงไฟกระแสตรงเป็นกระแสสลับกับวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟกระแสตรงเป็นกระแสตรง แต่ถ้านำ SMES ไปต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงก็จะมีเฉพาะวงจรแปลงไฟจากกระแสตรงเป็นกระแสตรงเท่านั้น

แม้ว่า SMES จะมีราคาแพงมากแต่ด้วยคุณลักษณะเด่นที่สามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว มีการสูญเสียต่ำ จึงทำให้ SMES ยังเป็นอุปกรณ์ทำเสถียรภาพที่ได้รับความสนใจและมีการวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน แนวทางในการลดต้นทุนการผลิต SMES ยังคงเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจมาก สิ่งที่น่าวิจัยกำลังศึกษาและพัฒนาแนวทางการลดต้นทุนในปัจจุบันได้แก่ การพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้มีราคาลดลง การใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น การพัฒนาวัสดุที่ทำให้ทำตัวนำยิ่งยวดให้มีราคาถูกและการออกแบบ SMES ให้มีขนาดเหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับแนวทางหลังสุดนี้เป็นหัวข้อวิจัยที่ใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้

### 2.3 แบบจำลองของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด



รูปที่ 2.12 แบบจำลอง SMES

สำหรับแบบจำลองของ SMES [41] ที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.12 จากรูปจะพบว่าแบบจำลอง SMES ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่  $K_p(s)$  และ  $K_q(s)$  เป็นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ SMES รับเข้าหรือจ่ายออกตามลำดับ การกำหนดให้ตัวควบคุมมีโครงสร้างเป็นรูปแบบใดขึ้นอยู่กับการใช้งานอีกทั้งตัวควบคุมที่ออกแบบจะต้องสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมให้มีรูปแบบที่นิยมใช้งานกันเช่น ตัวควบคุมที่มีโครงสร้างแบบพีไอดังสมการที่ (2.2) - (2.3) ซึ่งในที่นี้จะนำไปใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดและระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่จะกล่าวต่อไปในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
128569 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_p(s) = K_{pp} \left( 1 + \frac{1}{T_{ip}s} \right) \quad (2.2)$$

$$K_q(s) = K_{pq} \left( 1 + \frac{1}{T_{iq}s} \right) \quad (2.3)$$

โดยที่  $K_{pp}$  และ  $K_{pq}$  เป็นค่าอัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ

$T_{ip}$  และ  $T_{iq}$  เป็นค่าอัตราขยายอินทิกรัลของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ

และใช้ตัวควบคุมที่มีโครงสร้างแบบนำหน้า/ล่าหลังอันดับหนึ่งซึ่งในที่นี้จะนำไปใช้แก้ไขปัญหาการแกว่งระหว่างพื้นที่ของระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างดังสมการที่ (2.4) - (2.5) ที่จะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป

$$K_{pi}(s) = \frac{K_{i1}(1+T_{i1}s)}{(1+T_{i2}s)} \quad (2.4)$$

$$K_{qi}(s) = \frac{K_{i2}(1+T_{i3}s)}{(1+T_{i4}s)} \quad (2.5)$$

โดยที่  $K_{pi}(s)$  และ  $K_{qi}(s)$  แทนตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES ตัวที่  $i$ ;  $i=1, 2$

$K_{i1}$  และ  $K_{i2}$  เป็นอัตราขยายตัวควบคุม,  $T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}, T_{i4}$  เป็นค่าเวลาหน่วง

การนำ SMES ไปใช้งานเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าหรือใช้ทำเสถียรภาพให้แก่ระบบจะต้องนำสัญญาณที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของระบบป้อนให้แก่ตัวควบคุมซึ่งในที่นี้คือสัญญาณ  $\Delta u_p$  และ  $\Delta u_q$  โดยทั่วไปแล้วจะทำการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่ติดตั้ง SMES เป็นสัญญาณด้านเข้าของตัวควบคุมทั้งสองตามลำดับ ดังนั้นการเลือกตำแหน่งที่จะติดตั้ง SMES จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องพิจารณา สำหรับจุดที่จะติดตั้ง SMES เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนมักจะติดตั้ง SMES ที่บัสเดียวกับบัสที่เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ส่วนการติดตั้ง SMES ในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างจะทำการคำนวณเรขาคณิตเพื่อหาตำแหน่งที่มีนัยสำคัญต่อการทำเสถียรภาพให้แก่ระบบ [42]

จากรูปที่ 2.12 จะพบว่าภายใน SMES ยังประกอบด้วยตัวควบคุมอีก 2 ตัว ได้แก่  $K_v(s)$  เป็นตัวควบคุมแรงดันที่บัส ณ จุดที่ติดตั้งซึ่งมีค่าเป็น

$$K_v(s) = K_{vsm}(V_{io} - V_{is}) \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $K_{Vsm}$  เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมแรงดัน,  $V_{io}$  เป็นค่าแรงดันอ้างอิง ณ บัสที่ติดตั้ง SMES (pu),  $V_{is}$  เป็นค่าแรงดันจริง ณ บัสที่ติดตั้ง SMES (pu)

ส่วนตัวควบคุมอีกตัวคือ  $K_{ism}(s)$  เป็นตัวควบคุมกระแสในขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งมีค่าดังนี้

$$K_{ism}(s) = \left( K_p + \frac{1}{T_I s} \right) K_{sm} (I_{sm} - I_{smo}) \quad (2.7)$$

โดยที่  $K_p$  เป็นอัตราขยายสัดส่วนโดยตรง,  $T_I$  เป็นค่าคงที่เวลาของตัวควบคุมอินทิเกรท,  $K_{sm}$  เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมกระแสในขดลวด,  $I_{sm}$  เป็นปริมาณกระแสที่ไหลในขดลวด (pu),  $I_{smo}$  เป็นปริมาณกระแสอ้างอิง

ในทางปฏิบัติจะทำการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดไม่ให้มีค่าต่ำจนถึงศูนย์เพื่อป้องกันการเกิดสถานะ SMES ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้เมื่อเกิดความผิดปกติกับระบบไฟฟ้ากำลังและจำกัดกระแสไม่ให้มีค่าสูงกว่าค่าขอบเขตสูงสุดเพื่อไม่ให้ขดลวดเสียดคุณสมบัติการเป็นตัวนำยิ่งยวด ดังนั้นด้วยข้อจำกัดในทางปฏิบัติจึงได้กำหนดขอบเขตค่ากระแสที่ไหลในขดลวดไม่ให้ต่ำกว่า  $0.30I_{smo}$  ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด ( $I_{sm\_min}$ ) และสูงกว่า  $1.38I_{smo}$  ซึ่งเป็นค่าสูงสุด ( $I_{sm\_max}$ ) [43]

จากรูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรม PEI เป็นส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณหากระแส  $I_{sm}$  จากค่ากำลังไฟฟ้าจริง  $P_{sm}$  โดยมีสมการการคำนวณดังนี้

$$E_{out} = \int P_{sm} dt \cdot S_{sm,base} \quad (2.8)$$

$$I_{sm} = \sqrt{I_{smo}^2 - 2E_{out} / (I_{sm} \cdot I_{sm,base}^2)} \quad (2.9)$$

โดยที่  $E_{out}$  เป็นค่าพลังงานด้านออกของ SMES ( $J$ ),  $I_{sm,base}$  เป็นค่าฐานกระแส SMES ( $A$ ),  $L_{sm}$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด SMES ( $H$ ),  $P_{sm}$  เป็นกำลังไฟฟ้าจริงด้านออกของ SMES (pu),  $Q_{sm}$  เป็นกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES (pu),  $S_{sm,base}$  เป็นค่าฐานกำลังไฟฟ้า

ทั้งนี้ค่าพลังงานที่เก็บอยู่ภายในขดลวดตัวนำยิ่งยวด ( $E_{sm}$ ) และค่าพลังงานเริ่มต้นที่เก็บภายในขดลวด ( $E_{smo}$ ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_{sm} = E_{smo} - E_{out} \quad (2.10)$$

$$E_{smo} = 0.5L_{sm}I_{smo}^2 \cdot I_{sm,base}^2 \quad (2.11)$$

นอกจากนี้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนด้านออกที่ต้องจ่ายออกไปสู่ระบบ ( $P_d$  และ  $Q_d$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_d = V_{ts} I_{sm} AP \quad (2.12)$$

$$Q_d = V_{ts} I_{sm} AQ \quad (2.13)$$

โดยที่  $AP$  และ  $AQ$  เป็นค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ

ในที่นี้ไม่คิดการสูญเสียเนื่องจากการแปลงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนด้านออกของ SMES ( $P_{sm}$  และ  $Q_{sm}$ ) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ออกจากวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าของ SMES (Converter : CONV) จึงมีค่าเท่ากับ ซึ่งวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าของ SMES จะแทนด้วยฟังก์ชันโอนย้ายอันดับหนึ่งดังนี้

$$CONV = 1/(1+T_c s) \quad (2.14)$$

โดยที่  $T_c$  เป็นค่าคงตัวเวลาของวงจรแปลงกำลังไฟฟ้า (s)

## 2.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุด

เนื่องจากระบบที่ใช้ศึกษาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งแทนด้วยสมการพลวัตที่มีอันดับสูง ดังนั้นการออกแบบ SMES จึงมีความซับซ้อน เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดมาช่วยออกแบบ SMES [26] โดยทั่วไปปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรมนั้นมักมีมากกว่าหนึ่งตัวแปร การแก้ปัญหาโดยการใช้ความชำนาญในการคาดเดาค่าตอบหรือการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงกราฟ อาจจะไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะแก้โจทย์ปัญหาการออกแบบหลายตัวแปรที่มีเงื่อนไขบังคับต่างๆรวมอยู่ด้วย ดังนั้นการใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น โดยระเบียบขั้นตอนวิธีการจะให้หลักการของการคำนวณอย่างมีระบบแบบแผนและมีประสิทธิภาพ เมื่อถูกนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็จะได้รับคำตอบที่รวดเร็วและคล่องตัวมากยิ่งขึ้น

จากแผนผังรูปที่ 2.13 ก่อนที่จะดำเนินการขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดในลำดับที่ 3 จะต้องพิจารณาและทำความเข้าใจปัญหาเสียก่อน โดยเป็นการศึกษาเพื่อให้ได้มาซึ่งแบบจำลองของระบบนั่นเอง จากนั้นทำการกำหนดตัวแปรออกแบบและเงื่อนไขบังคับ หลังจากนั้นเป็นการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยรายละเอียดของเทอมต่างๆมีความหมายดังนี้

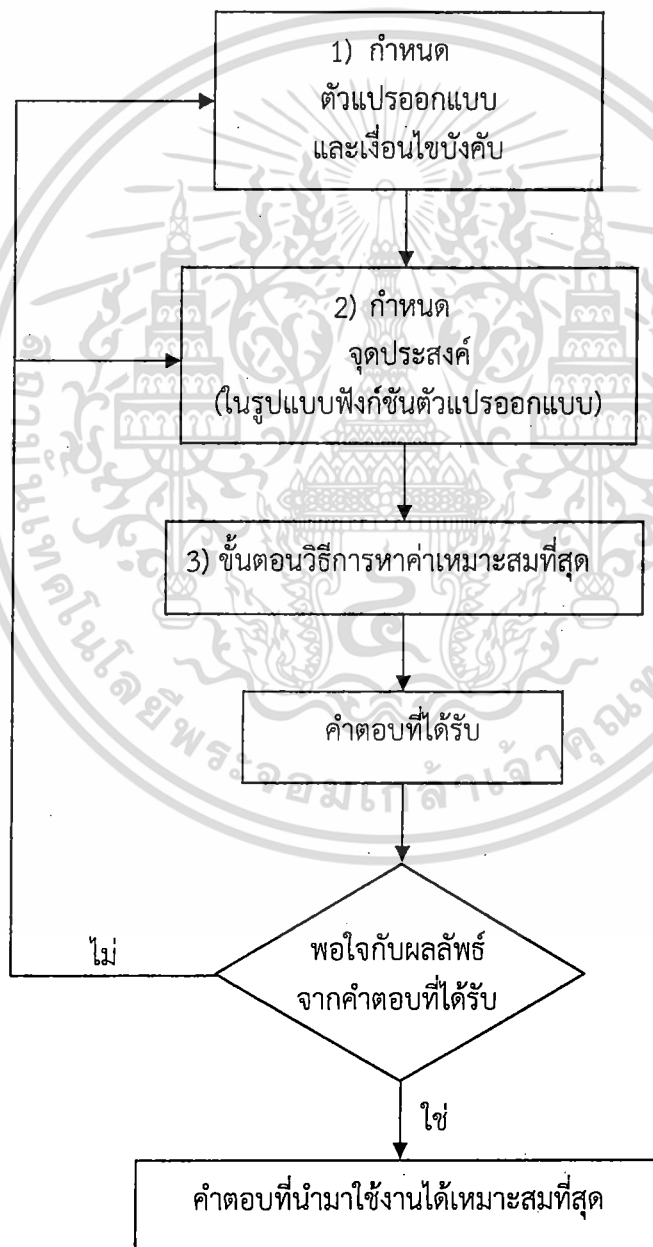
ตัวแปรออกแบบ (Design variables) คือ ตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าหรือควบคุมได้ในระหว่างขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งจะช่วยให้เป้าหมายหรือฟังก์ชันจุดประสงค์เปลี่ยนแปลงได้ โดยปกติปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดมักเกี่ยวข้องกับตัวแปรออกแบบมากกว่าหนึ่งตัวแปร ดังนั้นสิ่งสำคัญคือการคัดเลือกตัวแปรออกแบบจะต้องเป็นตัวแปรที่มีผลต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด นอกจากนี้ตัวแปรออกแบบไม่ควรจะมีจำนวนมากเกินความจำเป็นเพราะทำให้ประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการได้มาซึ่งคำตอบก็จะลดลง

เงื่อนไขบังคับ (Constraints) คือ ขอบเขตหรือเงื่อนไขที่กำหนดให้แก่ตัวแปรออกแบบ เนื่องจากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับตัวพารามิเตอร์อื่นๆหรือเป็นข้อจำกัดทางกายภาพ, การจำกัดด้วยทรัพยากรต่างๆ จนทำให้ตัวแปรออกแบบมีค่าอยู่ในช่วงที่จำกัด เงื่อนไขบังคับสามารถเขียนทั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในของรูปสมการหรือสมการ การลดจำนวนของเงื่อนไขบังคับนั้นเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยาก แต่ถ้าสามารถตัดเงื่อนไขบังคับที่ไม่สำคัญออกได้ก็จะช่วยให้ประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการคำนวณดีขึ้น

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function) คือ การกำหนดจุดประสงค์ของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งอยู่ในเทอมของตัวแปรออกแบบและพารามิเตอร์ต่างๆ โดยมากฟังก์ชันจุดประสงค์จะเกี่ยวข้องกับการหาค่าต่ำสุดหรือการหาค่าสูงสุดของจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ การกำหนดจุดประสงค์จะต้องแสดงเป็นปริมาณ แต่มีบางจุดประสงค์ไม่สามารถจำแนกให้เห็นออกเป็นปริมาณได้ ดังนั้นในกรณีเช่นนี้การประมาณค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์จำเป็นต้องมีตัวแทนที่สะท้อนถึงจุดประสงค์ที่ต้องการ การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรจะต้องเลือกให้ผลการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดบรรลุวัตถุประสงค์ตามเป้าหมายที่วางไว้



รูปที่ 2.13 แผนผังลำดับของการหาค่าเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้รับคำตอบจากการดำเนินการหาค่าเหมาะสมที่สุดแล้ว จำเป็นต้องทำการตรวจสอบคำตอบที่ได้รับก่อนที่จะนำไปใช้งานว่าสามารถนำไปปฏิบัติจริงได้หรือไม่ เหมาะสมกับจุดประสงค์อื่นที่ไม่ได้พิจารณาหรือไม่ ถ้าคำตอบไม่สามารถนำไปใช้งานได้ก็ควรพิจารณาแก้ไขเปลี่ยนแปลงตัวแปรออกแบบ, เงื่อนไขบังคับ, ฟังก์ชันจุดประสงค์หรือทั้งหมด

ปัญหาการออกแบบเชิงวิศวกรรมหรือในด้านอื่นๆมักจะเป็นการหาค่าจุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุดของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์โดยที่มีเงื่อนไขบังคับอันเนื่องมาจากข้อจำกัดต่างๆของการออกแบบ ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีเงื่อนไขบังคับซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบมาตรฐานทั่วไปได้ดังนี้

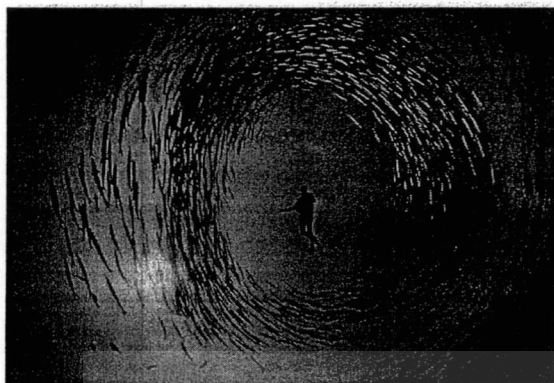
$$\begin{aligned}
 \text{หาค่าต่ำสุด (Minimization)} \quad & f(x_n) \quad ; \quad n=1, 2, \dots, N \\
 \text{เงื่อนไขบังคับ (subject to)} \quad & g_i(x_n) \geq 0 \quad ; \quad i=1, 2, \dots, I \\
 & h_j(x_n) = 0 \quad ; \quad j=1, 2, \dots, J \\
 & x_n^L \leq x_n \leq x_n^H \quad ; \quad i=1, 2, \dots, I
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

โดยที่  $x_n$  เป็นตัวแปรออกแบบ

จากรูปแบบมาตรฐานทั่วไปของปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดจะเห็นว่าฟังก์ชันจุดประสงค์  $f(x_n)$  จะถูกกำหนดให้หาค่าต่ำสุดโดยต้องพิจารณาเงื่อนไขบังคับที่อยู่ในรูปทั้งสมการและอสมการเข้ามาร่วมด้วย นอกจากนี้ตัวแปรออกแบบ  $x_n$  อาจจะถูกจำกัดด้วยขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามข้อจำกัดในการใช้งาน

สำหรับการหาค่าตัวแปรออกแบบของปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้นในสมัยแรกๆจะประยุกต์ใช้ความรู้พื้นฐานทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจุดเหมาะสมที่สุด โดยเริ่มจากจุดที่เป็นค่าเริ่มต้นแล้วจึงค่อยเคลื่อนย้ายจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่ดีกว่า หลังจากนั้นได้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามพัฒนาวิธีการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ช่วงหลังๆวิธีการที่นำเสนอมักจะสังเกตจากปรากฏการณ์ของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ตามธรรมชาติแล้วนำมาดัดแปลงเป็นกระบวนการแก้ไขปัญหา อาทิเช่น วิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1975 โดย John Holland, วิธีฝูงมด (ant colony) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1992 โดย Marco Dorigo และวิธีกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1995 โดย Kennedy และ Eberhart สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการออกแบบ SMES ที่มีความเหมาะสมสำหรับทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้าด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

## 2.5 วิธีกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 2.14 ลักษณะการอาศัยอยู่ร่วมกันของฝูงปลาหรือฝูงนกเพื่อหาแหล่งอาหาร [44-45]

วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) หรือใช้ชื่อย่อว่า PSO [28], [46] เป็นอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แก้ไขปัญหาค่าเหมาะสม ซึ่งเป็นอัลกอริทึมเชิงประชากรอีกรูปแบบหนึ่งที่อนุภาคในกลุ่มประชากรร่วมมือกันในการแก้ไขปัญห โดยอาศัยวิธีการเข้าหาคำตอบโดยเริ่มต้นจากการสื่อสารของอนุภาคต่ออนุภาคในกลุ่มย่อยแล้วขยายจากกลุ่มย่อยรวมเป็นกลุ่มใหญ่ ซึ่งมีที่มาจากการเล่นแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของฝูงปลาหรือฝูงนกดังแสดงในรูปที่ 2.14

วิธีกลุ่มอนุภาคได้มีการนำเสนอในปี ค.ศ. 1995 โดย James Kennedy และ Russell Eberhart โดยเป็นอัลกอริทึมที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันวิธีกลุ่มอนุภาคนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) ในหลายๆแขนงวิชา รวมถึงปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ปัญหาการเลือกจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ (Economic Dispatch), ปัญหาการควบคุมที่เหมาะสม (Optimal Control) ปัญหาการวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Planning) และปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมอื่นๆ

สำหรับกระบวนการหรือตัวดำเนินการ (Operators) ของวิธีกลุ่มอนุภาคนี้จะเป็นอัลกอริทึมของการเรียนรู้ในการเคลื่อนที่เพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งของตัวเองไปตามอนุภาคแวดล้อมที่อยู่ในตำแหน่งที่ดีและเหมาะสมกว่า การปรับตำแหน่งของแต่ละอนุภาคจะเปลี่ยนตามข้อมูลสภาพแวดล้อมที่เคลื่อนผ่านเข้ามา กับข้อมูลที่ได้จากภายในกลุ่มด้วยตัวเอง จนกระทั่งแต่ละอนุภาคอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมและมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันแล้วก็จะหยุดการปรับเปลี่ยนทิศทาง จนหยุดการเคลื่อนที่ในที่สุด ข้อมูลของแต่ละอนุภาคจะประกอบด้วยค่าความเร็วในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งตามสมการที่ 2.16 และค่าตำแหน่งใหม่ของอนุภาคหลังปรับเปลี่ยนตำแหน่งตามสมการที่ 2.17

$$v_i^{(k+1)} = \omega \cdot v_i^k + c_1 \cdot rand_1 \cdot (Pbest_i - x_i^k) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (Gbest_i - x_i^k) \quad (2.16)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^k + v_i^{(k+1)} \quad (2.17)$$

โดยที่  $v_i^{(k+1)}$  คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคที่  $i$  ในรอบการทำงานที่  $k+1$

$v_i^k$  คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคที่  $i$  ในรอบการทำงานที่  $k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$x_i^{(k+1)}$  คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่  $i$  ในรอบการทำงานที่  $k+1$

$x_i^k$  คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่  $i$  ในรอบการทำงานที่  $k$

$\omega$  คือ ค่าน้ำหนักความเฉื่อย

$c_1, c_2$  คือ ค่าคงที่ความเร็ว

$rand_1, rand_2$  คือ ตัวเลขสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1

$Pbest_i$  คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค  $i$

$Gbest_i$  คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดในทุก ๆ อนุภาค

จากสมการที่ (2.16) แสดงถึงการปรับความเร็ว  $v_i^{(k+1)}$  เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละอนุภาคตามองค์ประกอบเวกเตอร์ซึ่งมีองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกประกอบด้วยค่าน้ำหนักความเฉื่อย  $\omega$  คูณกับความเร็วของอนุภาคเดิม  $v_i^k$  เป็นการทำให้คำตอบเกิดความหลากหลายไม่ติดอยู่กับคำตอบเดิมๆ ส่วนที่สองเป็นส่วนที่แต่ละอนุภาคปรับตัวเองเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด โดยเปรียบเทียบตัวเองในปัจจุบันกับค่าของอนุภาคที่ดีที่สุดที่ตำแหน่งปัจจุบันหรือค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่เรียกว่า  $Pbest_i$  ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่แต่ละอนุภาคปรับค่าความเหมาะสมของตัวเองในปัจจุบันกับค่าที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาคที่เรียกว่า  $Gbest_i$  ในส่วนของเทอมที่สองของสมการที่ (2.16) มีชื่อเรียกว่าองค์ประกอบเชิงปริชาวน (Cognitive Component) และเทอมสุดท้ายมีชื่อเรียกว่าองค์ประกอบทางสังคม (Social Component) ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้นแต่ละองค์ประกอบของอนุภาคที่ได้คือตัวแปรของปัญหาที่ต้องค้นหา ส่วนองค์ประกอบเชิงปริชาวนแทนประสบการณ์จากการค้นหาคำตอบของแต่ละอนุภาค ในขณะที่องค์ประกอบเชิงสังคมแทนประสบการณ์จากการค้นหาของกลุ่มอนุภาค

ดังนั้นหลักการพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค เป็นอัลกอริทึมเชิงประชากรที่แต่ละอนุภาคย่อย ๆ (Individual Particle) ของกลุ่มประชากรทำงานร่วมกันเพื่อแก้ไขปัญหา สิ่งที่น่าสนใจในวิธีกลุ่มอนุภาค คือความเรียบง่ายของอัลกอริทึม ทำให้การนำไปใช้งานจริงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงด้วยแผนผังการทำงานในรูปที่ 2.15

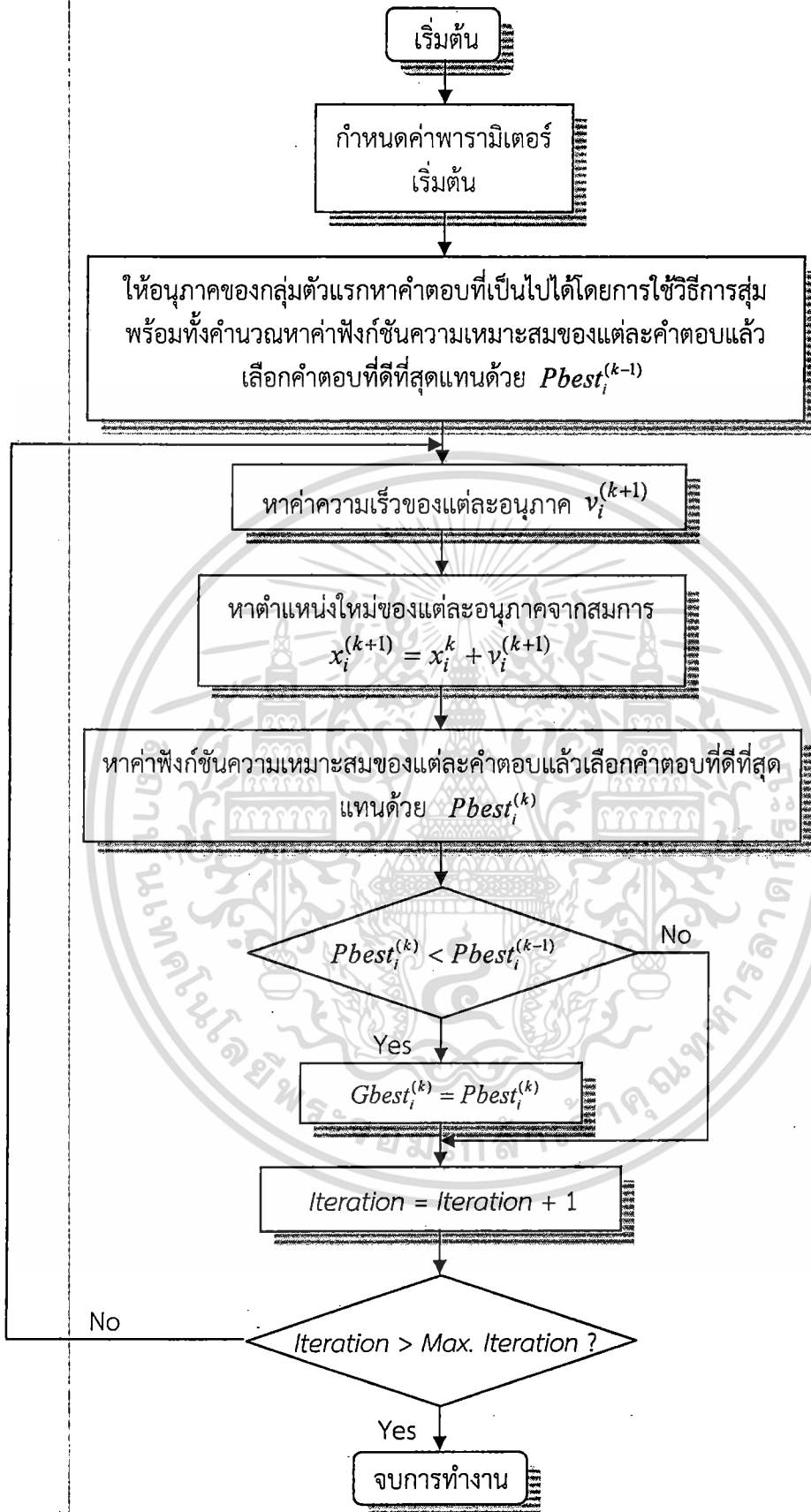
จากรูปที่ 2.15 แสดงขั้นตอนการทำงานของวิธีกลุ่มอนุภาคซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เริ่มจากการกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นแล้วทำการสุ่มตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคในกลุ่มประชากร ตำแหน่งของอนุภาคมีมิติเท่ากับ  $N$  ซึ่งเป็นขนาดของตัวแปรในปัญหาที่ต้องการค้นหา ดังนั้นขนาดของอนุภาคใน  $x_i^k$  จึงมีขนาดเท่ากับ  $N$  หลังจากนั้นทำการสุ่มค่าความเร็ว  $v_i^k$  ของแต่ละอนุภาคซึ่งมีจำนวนเท่ากับ  $N$  ด้วย ค่าความเร็วนี้จะเป็นความเร็วของแต่ละตัวแปรในอนุภาค ดังนั้นตำแหน่งใหม่ของอนุภาคจะเปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมด้วยความเร็ว  $v_i^k$

2. ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของฟังก์ชันเป้าหมาย (Fitness Function) ของแต่ละอนุภาค ซึ่งการประเมินค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหาค่าความเหมาะสมหลังจากนั้นจึงทำการพิจารณาและดำเนินการดังนี้

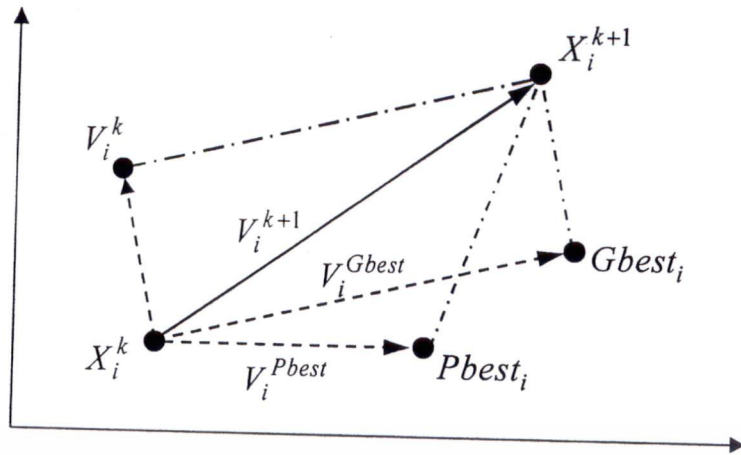
- 2.1 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาค  $x_i^k$  มีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า  $Pbest_i^k$  (Personal Best Fitness) ให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมและตำแหน่งอนุภาคไว้ใน  $Pbest_i^k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แผนผังอัลกอริทึมการทำงานของวิธีก่อนอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วิธีในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของวิถีกลุ่มอนุภาค

2.2 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาค  $x_i^k$  มีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของทั้งกลุ่มอนุภาค ให้ทำการบันทึกตำแหน่งของอนุภาคนี้ไว้ โดยเรียกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (Global Best Fitness) หรือ  $Gbest_i^k$

3. ทำการปรับค่าความเร็วตามสมการที่ (2.16) และปรับค่าตัวแปรตำแหน่งของอนุภาคตามสมการที่ (2.17) หลังจากนั้นทำการประเมินค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้แล้วกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งครบรอบการทำงาน จึงนำคำตอบที่เป็น  $Gbest_i^k$  เป็นคำตอบของปัญหา

ในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค ณ ตำแหน่งปัจจุบันไปยังตำแหน่งใหม่ที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่านั้นเกิดจากการอาศัยข้อมูลของอนุภาคข้างเคียงที่มีค่าดีกว่าประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.16 นอกจากนี้ลักษณะในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของวิถีกลุ่มอนุภาคนั้นจะมีรูปแบบโครงสร้างพื้นฐาน (Topologies) ที่สำคัญอยู่ 4 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.17 จากรูปที่ 2.17 จะพบว่าโครงสร้างแบบ  $Gbest$  จะให้คำตอบแบบวงกว้างที่ดีที่สุด

จากอัลกอริทึมของวิถีกลุ่มอนุภาคจะพบว่า การกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ มีผลต่อพฤติกรรมในการค้นหาคำตอบ ดังนั้นการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมกับปัญหาที่แก้ไขจะช่วยให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับแนวทางในการกำหนดค่าตัวแปรของวิถีกลุ่มอนุภาคมีข้อเสนอ ดังนี้

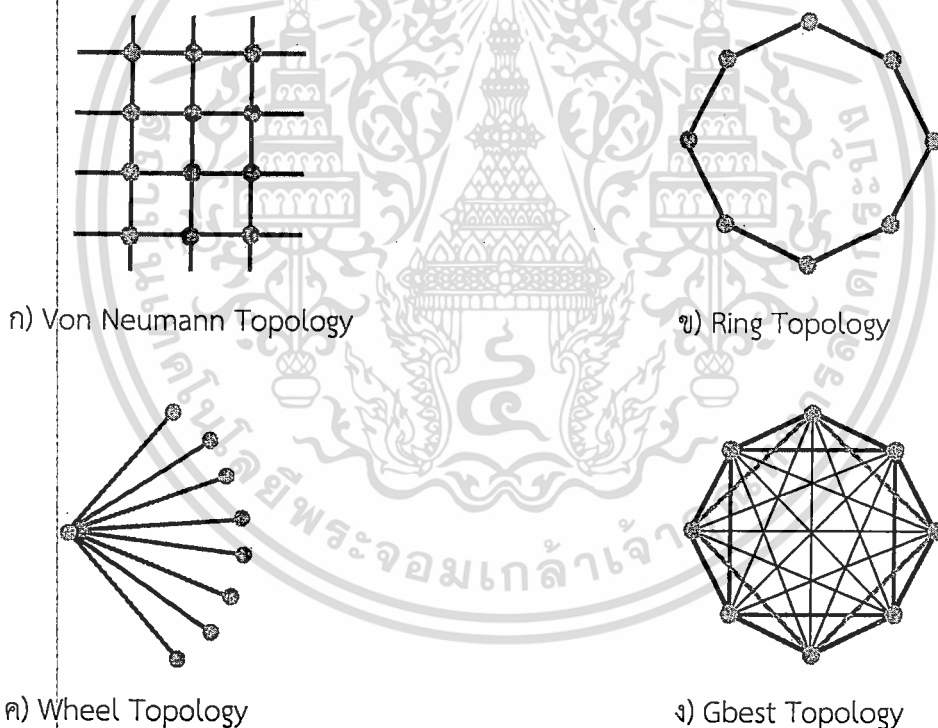
1) ค่าน้ำหนักความเฉื่อย (Inertia Weight) หรือ  $\omega$  เป็นค่าที่ใช้สำหรับลดความเร็วของอนุภาคเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของกลุ่ม เราสามารถออกแบบค่า  $\omega$  ให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคลดการกวัดแกว่งลงได้ ดังนั้นค่าน้ำหนักความเฉื่อยที่เหมาะสมจะทำให้เกิดความสมดุลระหว่างการค้นหาคำตอบเฉพาะที่และคำตอบจากขอบเขตทั้งหมด โดยทั่วไปขอบเขตของค่าน้ำหนักความเฉื่อยจะถูกกำหนดไว้ระหว่าง 0.4 ถึง 0.9 Vanden Bergh ได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์ว่าถ้าต้องการรับประกันให้เกิดการลู่เข้าหาคำตอบของกลุ่มอนุภาคควรปรับค่าน้ำหนักความเฉื่อย  $\omega$  และค่าคงที่ความเร่ง  $c_1, c_2$  ให้มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.18)

$$\omega > \frac{1}{2}(c_1 + c_2) - 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ (2.18) ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ค่าคงที่ความเร่ง (Acceleration Constant) หรือค่าความเร่ง  $c_1, c_2$  จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการหาค่าตอบ ทั้งนี้ค่า  $c_1$  เป็นพารามิเตอร์เชิงปริชาน (Cognitive Parameter) ใช้สำหรับกำหนดลักษณะการเดินของอนุภาคที่เป็น  $Pbest_i^k$  หรือค่าตอบที่ดีที่สุดของตำแหน่งปัจจุบัน ถ้าค่า  $c_1$  มีค่ามากจะทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการกวัดแกว่ง (Oscillate) ในขณะที่  $c_1$  ที่มีค่าน้อยจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่อย่างเรียบๆ (Smooth) ในขณะที่  $c_2$  เป็นพารามิเตอร์ทางสังคม (Social Parameter) ใช้สำหรับกำหนดลักษณะการเดินของอนุภาคเช่นเดียวกันแต่จะมีผลกับค่าตอบที่เป็น  $Gbest_i^k$

ดังนั้นการกำหนดค่าคงที่ความเร่งจะมีผลต่อการลู่เข้าหาค่าตอบของอนุภาค ถ้ากำหนดให้  $c_1 > c_2$  จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่รอบ ๆ ค่าตอบที่เป็นค่าตอบเฉพาะที่ (Local) แต่ถ้ากำหนด  $c_1 < c_2$  จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่รอบค่าตอบที่ดีที่สุด (Global) โดยปกติจะกำหนดค่าไว้ให้เป็นบวกทั้งคู่ Kennedy ได้ทำการศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการกำหนดค่า  $c_1$  และ  $c_2$  ที่แตกต่างกันแล้วนำเสนอผลที่ได้ว่าอนุภาคจะเคลื่อนเข้าหาค่าตอบที่เหมาะสมถ้ากำหนดค่าความเร่งตามสมการ  $c_1 + c_2 \leq 4$  แต่ถ้ากำหนดให้  $c_1 + c_2 > 4$  จะส่งผลให้ความเร็วและตำแหน่งมีค่าเป็นอนันต์



รูปที่ 2.17 ลักษณะในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของวิถีกลุ่มอนุภาค

3) ค่าตัวเลขสุ่ม (Random Number) หรือค่าตัวเลขสุ่ม  $rand_1, rand_2$  เป็นส่วนประกอบของสมการเชิงปริชานและส่วนประกอบทางสังคมตามลำดับ โดยปกติตัวเลขจากการสุ่มจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และค่าที่ได้จากการสุ่มจะทำการสุ่มใหม่อีกครั้งในทุก ๆ รอบการทำงาน

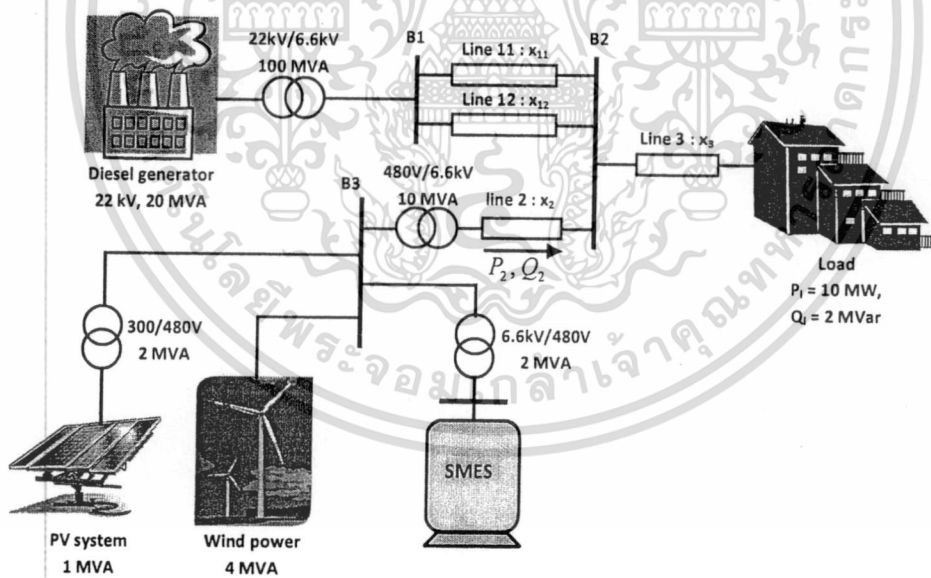
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า พลังงานหมุนเวียนในระบบไมโครกริดด้วยตัวเก็บสะสมพลังงาน แม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดที่ออกแบบอย่างเหมาะสม

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES โดยคำนึงถึงขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับติดตั้งในระบบไมโครกริดเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ยิ่งไปกว่านั้นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้างดกล่าวได้ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างเป็นตัวควบคุมพีไอ (PI) ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยอาศัยการทำให้ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดและความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES มีค่าต่ำสุด จึงทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอและขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีค่าเหมาะสมไปพร้อมๆกันโดยวิธีกลุ่มอนุภาค จากผลการจำลองการทำงานพบว่า SMES ที่ออกแบบตามวิธีที่นำเสนอสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในระบบไมโครกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 3.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา

ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลขนาด 20 MVA, กังหันลมขนาด 4 MVA, เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MVA, และโหลดขนาด 10 MW [47] สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลใช้แบบจำลองเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอันดับสาม และใช้ตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติกับตัวขับเคลื่อนกำลังด้วยแบบจำลองอันดับหนึ่ง ส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เพื่อต้องการให้ SMES สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในที่นี่จึงใช้การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายส่งเส้นที่ 2 ( $P_2$  และ  $Q_2$ ) เป็นสัญญาณด้านเข้าของตัวควบคุมทั้งสองตามลำดับ

แบบจำลอง SMES ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้พิจารณาถึงความเป็นจริงในทางปฏิบัติด้วย โดยจะทำการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดไม่ให้มีค่าต่ำจนถึงศูนย์เพื่อป้องกันการเกิดสถานะ SMES ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้เมื่อเกิดความผิดปกติกับระบบและจำกัดกระแสไม่ให้มีค่าสูงกว่าค่าขอบเขตสูงสุดเพื่อไม่ให้ขดลวดเสียดคุณสมบัติการเป็นตัวนำยิ่งยวด ดังนั้นด้วยข้อจำกัดในทางปฏิบัติจึงได้กำหนดขอบเขตค่ากระแสที่ไหลในขดลวดไม่ให้ต่ำกว่า  $0.30I_{sm0}$  ซึ่งเป็นค่ากระแสต่ำสุด ( $I_{sm\_min}$ ) และไม่ให้มีค่าเกินกว่า  $1.38I_{sm0}$  ซึ่งเป็นค่ากระแสสูงสุด ( $I_{sm\_max}$ ) [43]

### 3.2 การออกแบบ SMES ด้วยวิธีที่นำเสนอ

แนวคิดในการออกแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ SMES ที่มีขนาดเหมาะสมกับระบบที่ใช้ศึกษาและสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ข้างต้นจะขอกล่าวถึงค่านิยามสองตัวที่จะใช้อ้างอิงต่อไปได้แก่

1) ค่าความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(1/2)L_{sm}I_{sm0}^2$  ดังนั้นเพื่อให้ได้ SMES ที่มีขนาดเหมาะสมจะต้องทำการออกแบบขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด  $L_{sm}$  และกระแสตั้งต้น  $I_{sm0}$  ที่มีขนาดเหมาะสมไปพร้อมๆกัน

2) การเปรียบเทียบการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานะต่างๆจำเป็นต้องมีดัชนีที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ในที่นี่จะใช้ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ในสายส่งที่ 2 เป็นดัชนีชี้วัด กล่าวคือถ้าค่าความแปรปรวนนี้มีค่าต่ำแสดงว่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบมีค่าลดลง สำหรับนิยามของค่าความแปรปรวน [50] แสดงดังสมการที่ (3.3)

$$Variance = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.3)$$

โดยที่  $n$  เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์

$x_i$  เป็นค่าของข้อมูล

$\bar{x}$  เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

และ  $i$  เป็นดัชนีระบุลำดับที่ของข้อมูล

ในที่นี่  $x_i$  คือชุดข้อมูลของค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายส่งเส้นที่ 2 ดังนั้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับใช้หาค่าขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด, ค่ากระแสตั้งต้นของ SMES และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\text{Minimize } \frac{1}{2} L_{sm} I_{sm0}^2 + \text{Variance} \{P_2, Q_2\} \quad (3.4)$$

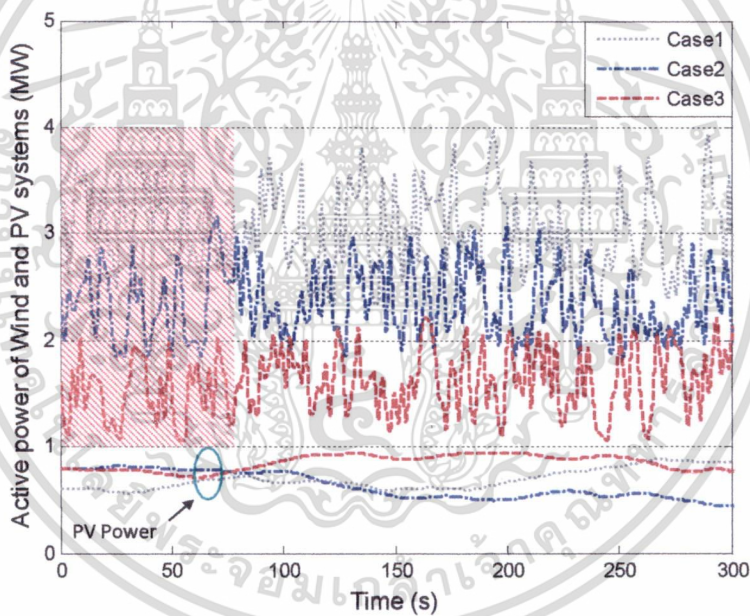
$$\text{Subject to } K_{min} < K_{pP} < K_{max}, T_{min} < T_{iP} < T_{max},$$

$$K_{min} < K_{pQ} < K_{max}, T_{min} < T_{iQ} < T_{max}$$

$$1 < L_{sm} < 10 \text{ H}, 1.5 < I_{sm0} < 3.5 \text{ kA}$$

โดยที่  $K_{min}$  และ  $K_{max}$  เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดของค่าอัตราขยายสัดส่วนตัวควบคุมพีไอ  
 $T_{min}$  และ  $T_{max}$  เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดของค่าอัตราขยายอินทิกรัลตัวควบคุมพีไอ

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสมการที่ (3.4) จะพบว่าในเทอมแรกเป็นค่าพลังงานสะสมตั้งต้นที่เก็บใน SMES ซึ่งมีค่าขึ้นกับขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและค่ากระแสตั้งต้น ส่วนเทอมที่สองเป็นค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายส่งเส้นที่ 2 ( $P_2$  และ  $Q_2$ ) ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 รูปแบบของกำลังไฟฟ้าจริงของกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายให้แก่ระบบไมโครกริด

สำหรับขั้นตอนในการหาค่าเหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค[46] มีรายละเอียดดังนี้

- 1) สร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับวิธีกลุ่มอนุภาค
- 2) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของอนุภาคด้วยการสุ่มตำแหน่งและค่าความเร็ว
- 3) คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับแต่ละกลุ่มอนุภาคโดยมีรูปแบบของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์เป็นดังกรณีที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.3
- 4) ปรับเปลี่ยนค่าความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคใหม่และเพิ่มจำนวนครั้งที่ของรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) เมื่อจำนวนครั้งที่ของรอบการค้นหาค่าสูงสุดที่ตั้งไว้ให้หยุดการทำงาน แต่ถ้ายังไม่ถึงรอบสูงสุดให้กลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 3

### 3.3 ผลการจำลองการทำงาน

หลังจากทำการออกแบบ SMES ด้วยวิธีที่นำเสนอแล้วจะนำ SMES ที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการทำงานในระบบไมโครกริด ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ของ SMES ที่ออกแบบไว้แสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมและขนาดขดลวดของ SMES ที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาคนั้น ในที่นี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาคดังนี้  $K_{\min} = 1, K_{\max} = 30, T_{\min} = 0.001, T_{\max} = 1$ , ขนาดของกลุ่มอนุภาคเท่ากับ 25, จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาเท่ากับ 100, ค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวประกอบถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.4 และ 0.9 ตามลำดับ ผลลัพธ์จากการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมและขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES ที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 3.2 จะพบว่าค่าพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES ที่มีขนาดเหมาะสมคำนวณได้จาก  $0.5L_{sm}I_{sm0}^2 = 0.5 \times 3.98 \times (2.91)^2 = 16.81$  MJ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ SMES ที่มีพลังงานสะสมตั้งต้นเท่ากันแต่ไม่ได้ออกแบบขนาดของขดลวดอย่างเหมาะสมซึ่งในที่นี้กำหนดให้ SMES ที่นำมาเปรียบเทียบกับมีขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดเท่ากับ 10 H จะได้ค่ากระแสตั้งต้นเท่ากับ 1.83 kA ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H จะมีเพียงเทอมที่สองของสมการที่ (3.4) ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โอดีดังแสดงในตารางที่ 3.2

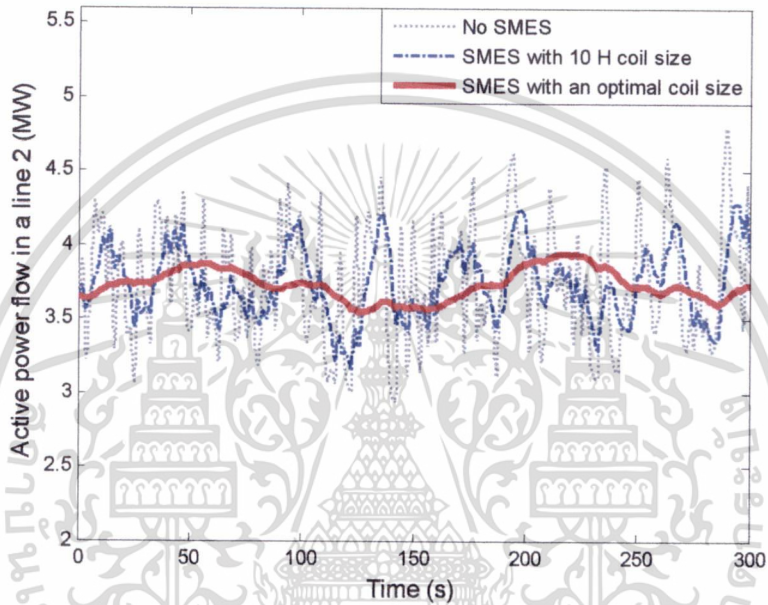
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์มูลฐานของ SMES

ค่าฐานของระบบ : $S_{sm,base} = 2 \text{ MVA}, V_{tbase} = 480 \text{ V}, I_{sm,base} = 4.17 \text{ kA}$
$K_{PR} = 40, T_I = 0.4, K_{sm} = 1.0, K_{Vsm} = 1.0, T_C = 0.01, V_{t0} = 0.95 \text{ pu}$

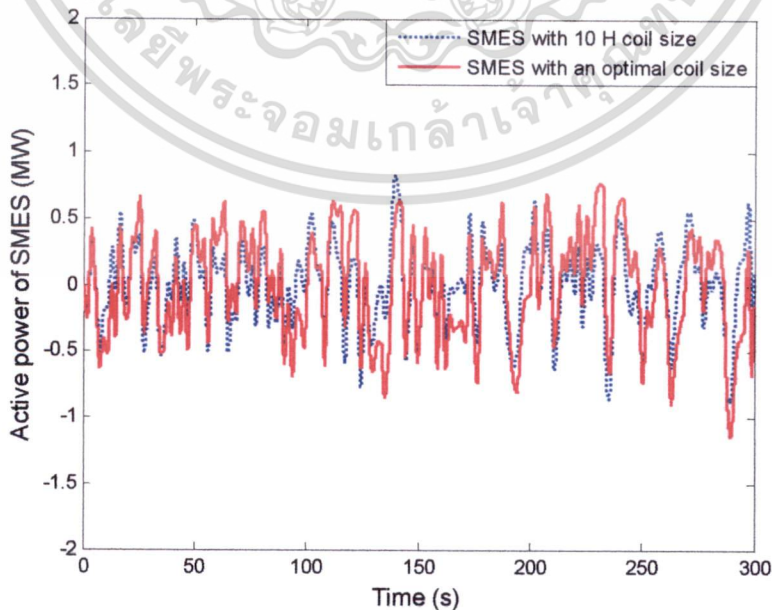
ตารางที่ 3.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมตามสมการที่ (3.4)

ชนิดของ SMES	$L_{sm}$ (H)	$I_{sm0}$ (kA)	ค่าตัวควบคุม กำลังไฟฟ้าจริง		ค่าตัวควบคุม กำลังไฟฟ้าเสมือน	
			$K_{pP}$	$T_{iP}$	$K_{pQ}$	$T_{iQ}$
SMES ที่มีขดลวด ขนาด 10 H	10.00	1.83	25.3927	0.3060	16.1532	0.1743
SMES ที่มีขดลวด ขนาดเหมาะสม	3.98	2.91	24.5282	0.0136	16.0862	0.0416

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ SMES ที่ได้ออกแบบไว้ ในที่นี่ได้ทำการสร้างรูปแบบของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ 3 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อจ่ายให้แก่ระบบไมโครกริด ผลการทดสอบที่ได้สำหรับกรณีที่ 1 ดังปรากฏในรูปที่ 3.4 ซึ่งแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 2 จะพบว่าสำหรับระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง SMES ค่ากำลังไฟฟ้าในสายส่งจะแกว่งตามการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ ในทางกลับกันระบบที่ติดตั้ง SMES สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าลงได้ แต่ระบบที่ติดตั้ง SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมจะลดการแกว่งได้ดีกว่า SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H



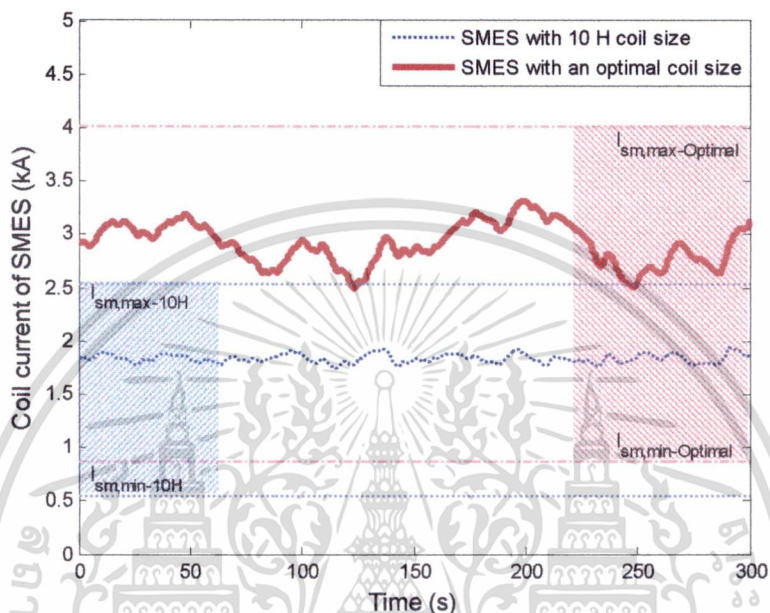
รูปที่ 3.4 กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 2 สำหรับกรณีที่ 1



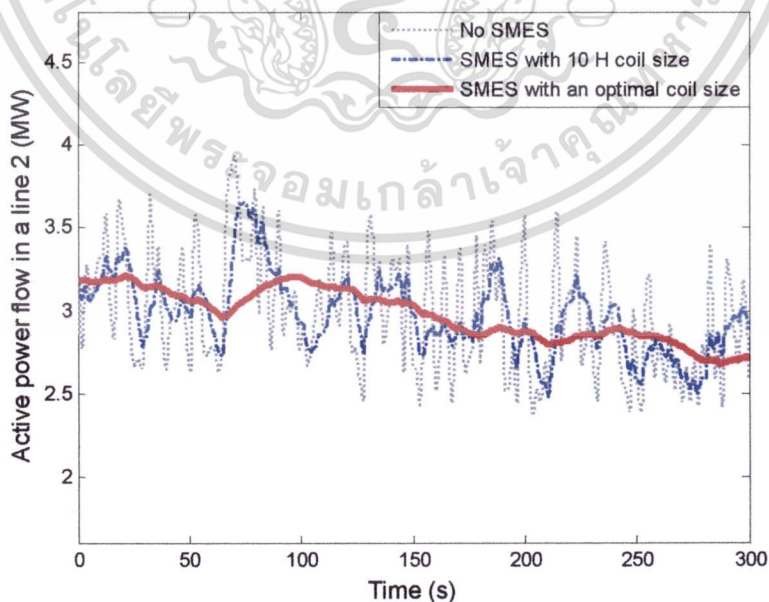
รูปที่ 3.5 กำลังไฟฟ้าด้านออกของ SMES สำหรับกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 และ 3.6 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ SMES จ่ายให้แก่ระบบไมโครกริดและค่ากระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับกรณีที่ 1 จะสังเกตเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกและกระแสในขดลวดของ SMES ที่มีขนาดเหมาะสมจะแกว่งสูงกว่า SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H ทั้งนี้เนื่องจาก SMES ที่มีขดลวดขนาดเล็กจะต้องทำการแลกเปลี่ยนพลังงานที่มีปริมาณเท่ากันด้วยความรวดเร็วกว่า SMES ที่มีขนาดใหญ่

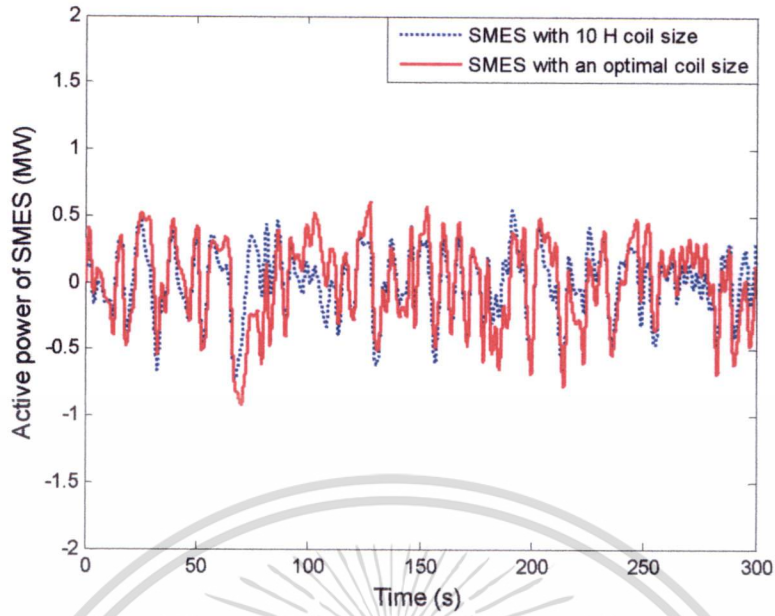


รูปที่ 3.6 กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES สำหรับกรณีที่ 1

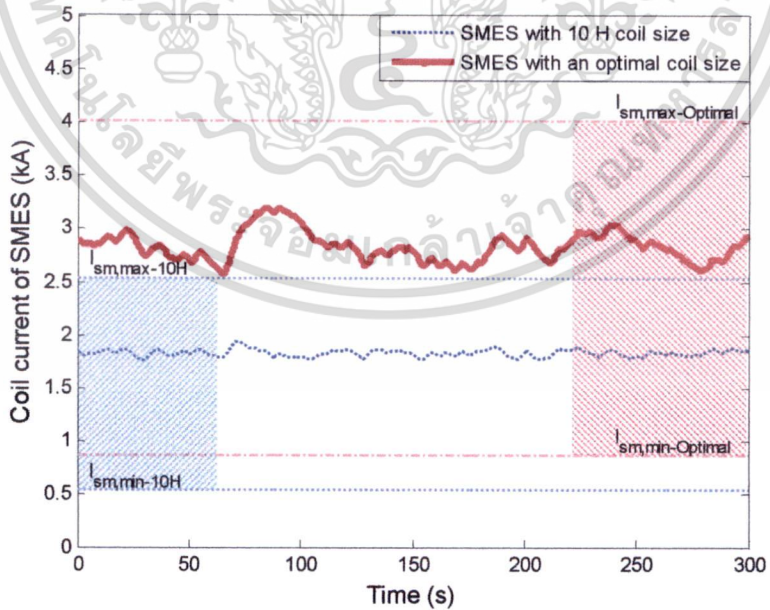


รูปที่ 3.7 กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

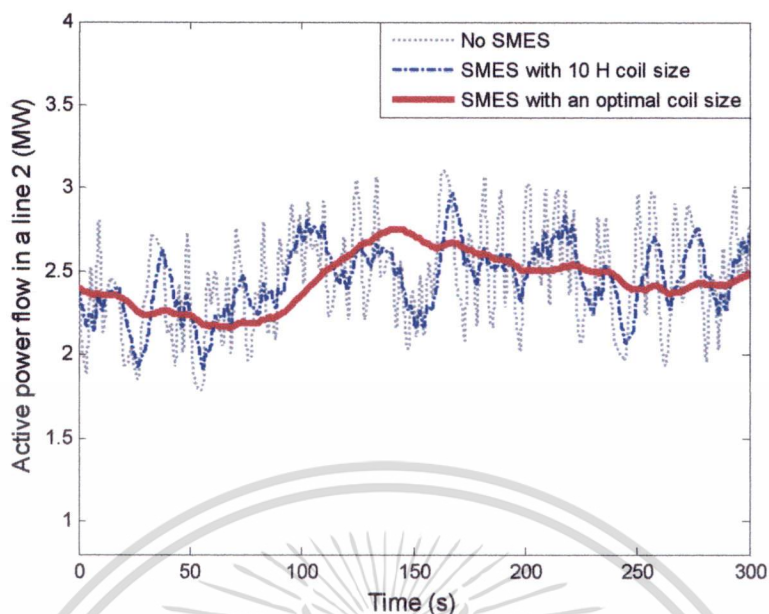


รูปที่ 3.8 กำลังไฟฟ้าด้านออกของ SMES สำหรับกรณีที่ 2

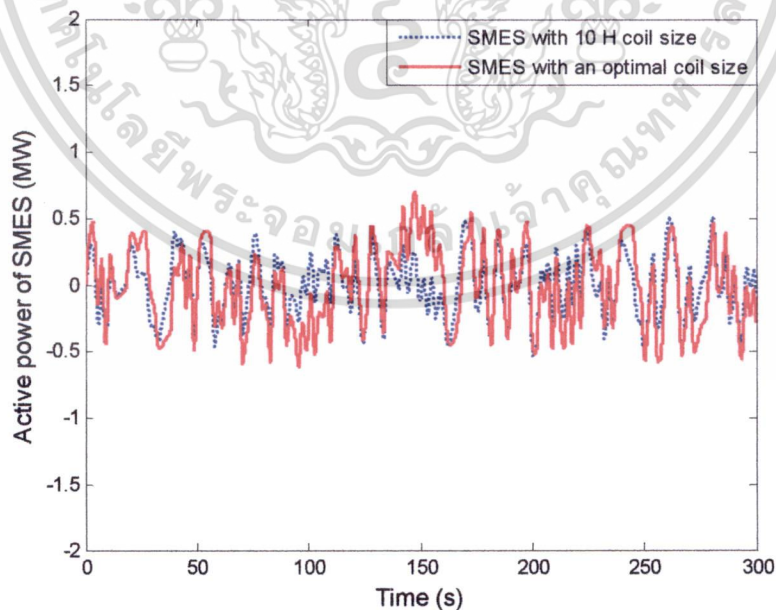


รูปที่ 3.9 กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES สำหรับกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

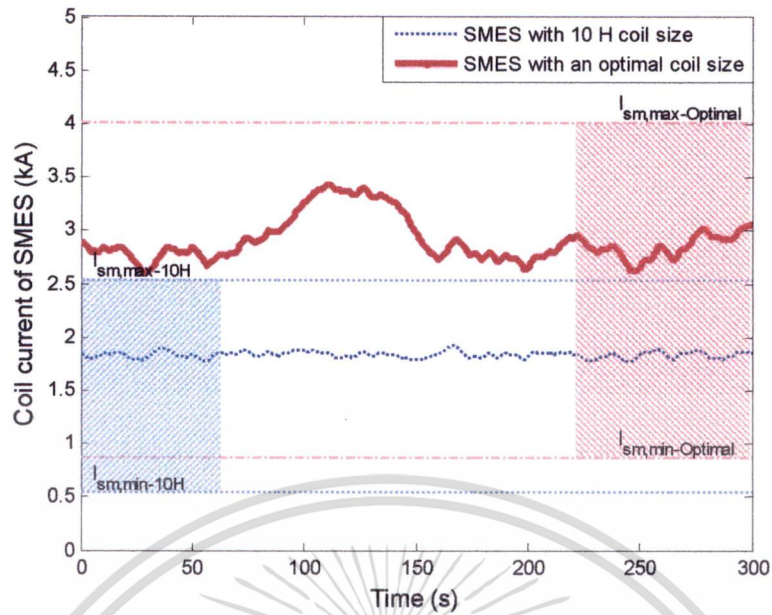


รูปที่ 3.10 กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3

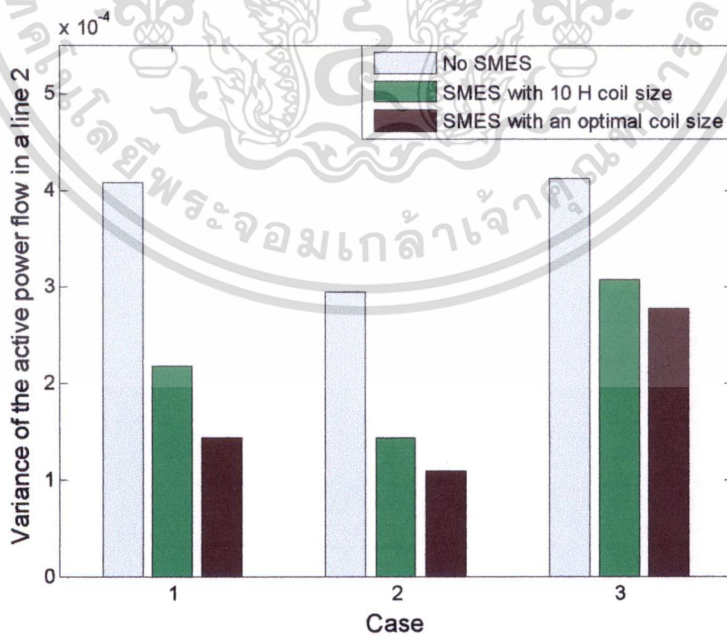


รูปที่ 3.11 กำลังไฟฟ้าด้านออกของ SMES สำหรับกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES สำหรับกรณีที่ 3



รูปที่ 3.13 ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเส้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนกรณีที่ 2 และ 3 ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.7-3.9 และ 3.10-3.12 ตามลำดับ จะพบว่า SMES ที่ออกแบบตามวิธีที่นำเสนอซึ่งมีขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่า SMES ที่มีขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ใหญ่กว่าอย่างเห็นได้ชัด สุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 2 ของทั้งสามกรณีดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะพบว่ากำลังไฟฟ้าในระบบที่ติดตั้ง SMES ที่ออกแบบตามวิธีที่นำเสนอมีค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H ภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน ทำให้สรุปได้ว่า SMES ที่มีค่าพลังงานสะสมตั้งต้นเท่ากันแต่ออกแบบให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดมีขนาดเหมาะสมจะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่า SMES ที่มีขดลวดขนาดใหญ่กว่า

### 3.4 สรุป

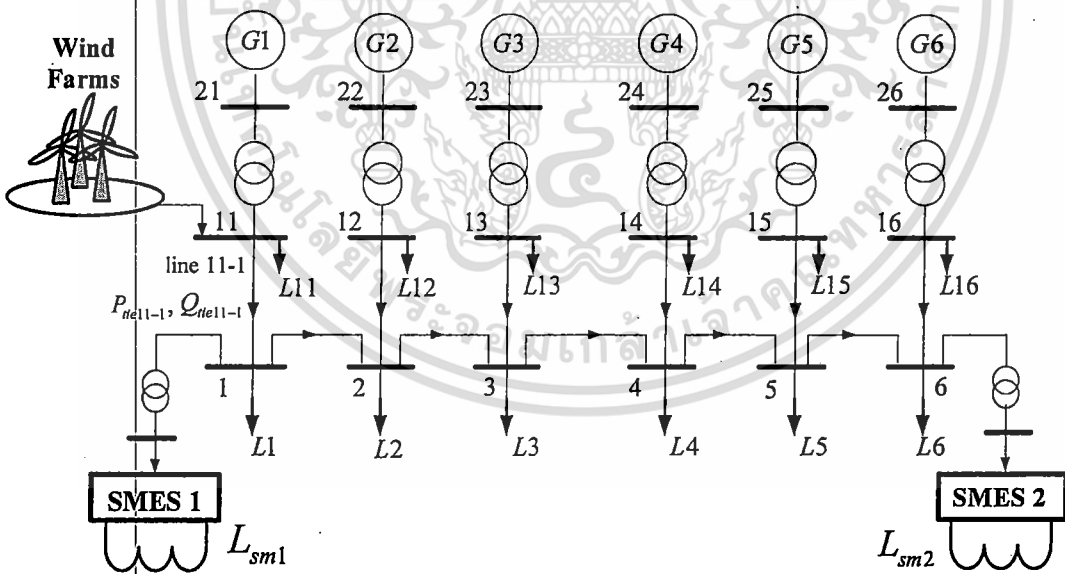
บทนี้ได้นำเสนอการออกแบบ SMES ที่คำนึงถึงขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้มีขนาดเหมาะสมเพื่อใช้สำหรับลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริด โดยได้ออกแบบตัวควบคุมให้มีโครงสร้างเป็นแบบพีโอเพื่อให้เหมาะสำหรับนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอและขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดได้ถูกออกแบบเพื่อให้ค่าพิกัดพลังงานสะสมตั้งต้นและค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดด้วยการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค จากผลการจำลองการทำงานที่แสดงจะพบว่าระบบที่ติดตั้ง SMES ซึ่งถูกออกแบบตามวิธีที่นำเสนอสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์จะมีรูปแบบที่หลากหลาย และจากผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง SMES จำนวนสองตัวที่มีขนาดความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นเท่ากันแต่ขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดแตกต่างกัน จะพบว่า SMES ที่นำเสนอแม้ว่าจะมีขนาดของขดลวดที่เล็กกว่าแต่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าไปพร้อมกับขนาดความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES ทำให้ SMES ที่นำเสนอมีขนาดที่เหมาะสมและสามารถทำงานสัมพันธ์กับตัวควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 4

# การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่มีแหล่งพลังงานลมขนาดใหญ่ด้วยตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดที่ออกแบบอย่างเหมาะสม

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES จำนวนสองตัวโดยออกแบบให้ขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดมีขนาดเหมาะสมสำหรับทำเสถียรภาพพลวัตเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานลมขนาดใหญ่โดยติดตั้งบนระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้าง นอกจากนี้ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าง่ายดังกล่าวได้ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างเป็นตัวควบคุมพีไอ (PI) ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในระบบและความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES มีค่าต่ำที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอและขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีค่าเหมาะสมไปพร้อมๆกัน จากผลการจำลองการทำงานพบว่า SMES ที่ออกแบบตามวิธีที่นำเสนอสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานลมขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

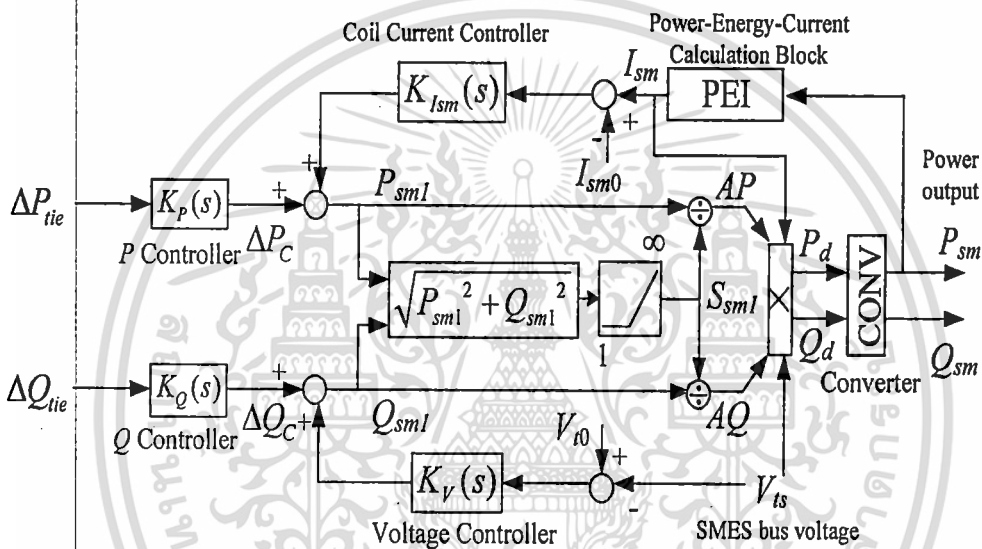
### 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่ใช้ในการศึกษา

ระบบที่ใช้ศึกษาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังทางภาคตะวันตกของประเทศไทยมีขนาดหกพื้นที่ [51] ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แต่ละพื้นที่เรียงลำดับจากซ้ายไปขวาเป็นพื้นที่ที่ 1 ถึง 6 โดยมีขนาดพิกัดค่าฐานกำลังของแต่ละพื้นที่เป็น (20 : 13.5 : 6.75 : 40 : 6.75 : 33) x 1,000 MVA ตามลำดับ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ที่จะส่งผ่านสายส่งสองวงจรเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ผ่านบัส 1 จนถึงบัส 6 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้แบบจำลองขนาด 5 อันดับ [52] แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมขนาด 500 MW ติดตั้งในพื้นที่ที่ 1 ในพื้นที่นี้จะใช้แบบจำลองทำการสุ่มค่าสำหรับแทนค่ากำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมผลิตได้ [53] แต่เนื่องจากพลังงานลมที่ซบักหันลมมีค่าไม่สม่ำเสมอส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบมีค่าไม่คงที่ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังไฟฟ้าในระบบเกิดการแกว่งเพื่อลดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมจึงทำการติดตั้ง SMES จำนวน 2 ตัวในพื้นที่ที่ 1 และพื้นที่ที่ 6 โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์เรซิดิว (residue) SMES แต่ละตัวมีความเหนียวนำของขดลวดขนาด 10 H, ขนาดพิกัดทางไฟฟ้าเท่ากับ 40 kA, 800 MJ, 1000 MVA [20] SMES ที่มีค่าความเหนียวนำขดลวด 10 H จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ SMES ที่มีค่าความเหนียวนำขดลวดขนาดเหมาะสมโดยวิธีการออกแบบที่จะนำเสนอต่อไป



รูปที่ 4.2 แบบจำลอง SMES ที่ใช้ในการศึกษา

จากแบบจำลอง SMES จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่  $K_P(s)$  และ  $K_Q(s)$  เป็นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ,  $K_V(s)$  เป็นตัวควบคุมระดับแรงดันที่บัส ณ จุดที่ติดตั้ง SMES,  $K_{Ism}(s)$  เป็นตัวควบคุมกระแสในขดลวดตัวนำยิ่งยวด, PEI เป็นส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณหาการกระแส  $I_{sm}$  จากค่ากำลังไฟฟ้าจริง  $P_{sm}$  และ CONV เป็นวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าของ SMES ส่วนรายละเอียดอื่นๆ ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3 แบบจำลองของ SMES

สำหรับตัวควบคุม  $K_{Pi}(s)$  และ  $K_{Qi}(s)$  เป็นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับที่จะทำการออกแบบ โดยที่  $i$  คือลำดับ SMES ตัวที่ 1 และ 2 ในที่นี้กำหนดให้มีโครงสร้างเป็นตัวควบคุมพีไอ ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2)

$$K_{Pi}(s) = K_{P_{Ci}}(1 + (1/T_{Pi}s)) \quad (4.1)$$

$$K_{Qi}(s) = K_{Q_{Ci}}(1 + (1/T_{Qi}s)) \quad (4.2)$$

โดยที่  $K_{PCI}$  และ  $K_{QCi}$  เป็นค่าอัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ

$T_{Pi}$  และ  $T_{Qi}$  เป็นค่าอัตราขยายอินทิกรัลของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับ

เพื่อต้องการให้ SMES ทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ในที่นี้จึงใช้การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นสัญญาณด้านเข้าของตัวควบคุมทั้งสองตามลำดับ

แบบจำลอง SMES ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้พิจารณาถึงความเป็นจริงในทางปฏิบัติด้วย โดยจะทำการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำยิ่งยวดไม่ให้มีค่าต่ำจนถึงศูนย์เพื่อป้องกันการเกิดสภาวะ SMES ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้เมื่อเกิดความผิดปกติกับระบบ และจำกัดกระแสไม่ให้มีค่าสูงกว่าค่าขอบเขตสูงสุดเพื่อไม่ให้ขดลวดเสียดคุณสมบัติการเป็นตัวนำยิ่งยวด ดังนั้นด้วยข้อจำกัดในทางปฏิบัติจึงได้กำหนดขอบเขตค่ากระแสที่ไหลในขดลวดไม่ให้ต่ำกว่า  $0.30I_{sm0}$  ซึ่งเป็นค่ากระแสต่ำสุด ( $I_{sm\_min}$ ) และไม่ให้มีค่าเกินกว่า  $1.38I_{sm0}$  ซึ่งเป็นค่ากระแสสูงสุด ( $I_{sm\_max}$ ) [20]

#### 4.2 การออกแบบ SMES ด้วยวิธีที่นำเสนอ

แนวคิดในการออกแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ SMES มีขนาดเหมาะสมกับระบบที่ใช้ศึกษาและสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ข้างต้นจะขอกำหนดถึงค่านิยามสองตัวที่จะใช้อ้างอิงต่อไปได้แก่

1) ค่าความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(1/2)L_{sm}I_{sm0}^2$  ทั้งนี้เพื่อให้ได้ SMES มีขนาดความจุพลังงานสะสมตั้งต้นที่เหมาะสมทั้งสองตัวและสามารถทำงานสัมพันธ์กันได้ จะต้องทำการออกแบบขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด  $L_{smi}$  และกระแสตั้งต้น  $I_{sm0-i}$ ,  $i=1, 2$  ที่มีขนาดเหมาะสมไปพร้อมๆกัน โดยที่  $i$  เป็นตัวเลขระบุตำแหน่งของ SMES ตัวที่ 1 และ 2

2) การเปรียบเทียบการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆจำเป็นต้องมีดัชนีที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ในที่นี้จะใช้ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายส่งที่ 11-1 ( $P_{iell-1}$  และ  $Q_{iell-1}$ ) เป็นดัชนีชี้วัด เนื่องจากกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นนี้ใกล้กับจุดเชื่อมต่อของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลม ดังนั้นถ้าค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นนี้มีค่าต่ำแสดงว่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบมีค่าลดลง สำหรับนิยามของค่าความแปรปรวน [50] มีค่าดังสมการที่ (4.3)

$$Variance = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.3)$$

โดยที่  $n$  เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์

$x_i$  เป็นค่าของข้อมูล

$\bar{x}$  เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $i$  เป็นดัชนีระบุลำดับที่ของข้อมูล

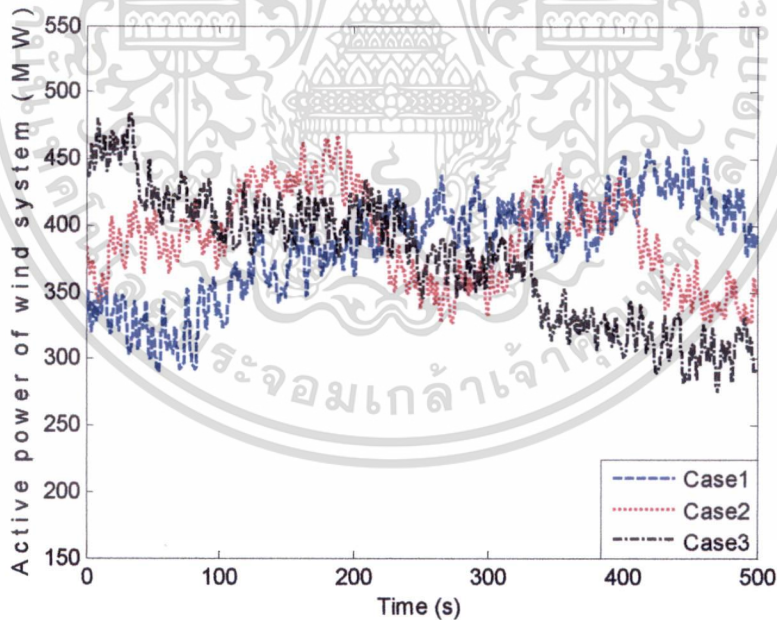
ในที่นี้  $x_i$  คือชุดข้อมูลของค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายส่งเส้นที่ 11-1 ดังนั้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับใช้หาค่าขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด, ค่ากระแสตั้งต้นของ SMES, และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่มีโครงสร้างแบบพีไอสามารถหาได้จากสมการที่ (4.4)

$$\text{Minimize} \quad \frac{1}{2} L_{sm1} I_{sm0-1}^2 + \frac{1}{2} L_{sm2} I_{sm0-2}^2 + \text{Var}\{P_{tie11-1}\} + \text{Var}\{Q_{tie11-1}\} \quad (4.4)$$

- Subject to
- (a)  $1 < K_{PCi} < 20, 1 < T_{Pi} < 30$
  - (b)  $1 < K_{QCi} < 20, 1 < T_{Qi} < 30$
  - (c)  $1 < L_{smi} < 10 \text{ H}$
  - (d)  $4 < I_{sm0-i} < 40 \text{ kA}, i = 1, 2$

โดยที่  $L_{smi}$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด SMES ตัวที่  $i$

$I_{sm0-i}$  เป็นค่ากระแสตั้งต้นของขดลวด SMES ตัวที่  $i$



รูปที่ 4.3 รูปแบบของกำลังไฟฟ้าจริงจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมที่จ่ายให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง

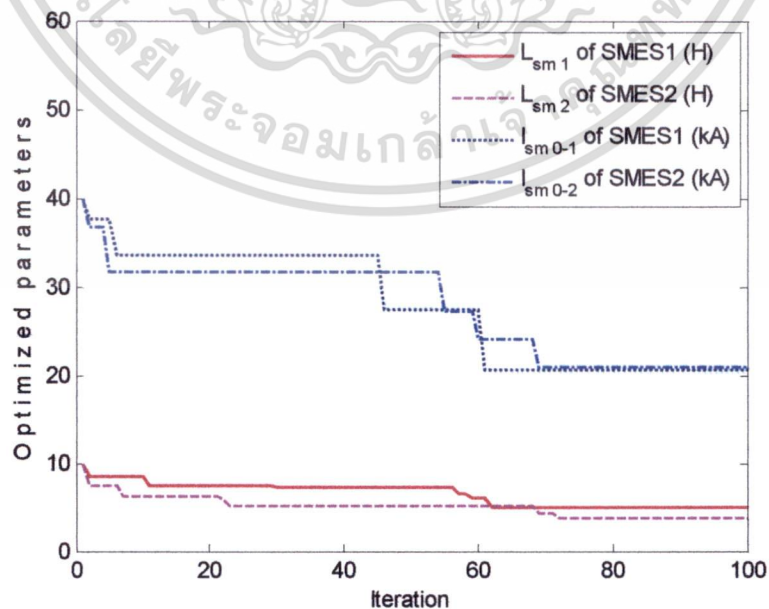
จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสมการที่ (4.4) จะพบว่าในเทอมแรกและเทอมที่สองเป็นค่าพลังงานสะสมตั้งต้นที่เก็บในขดลวด SMES ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ซึ่งมีค่าขึ้นกับขนาดของขดลวดตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งยวดและค่ากระแสตั้งต้นตามลำดับ ส่วนเทอมที่สามและเทอมที่สี่เป็นค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายส่งเส้นที่ 11-1 ตามลำดับ

### 4.3 ผลการจำลองการทำงาน

ในการออกแบบ SMES จะกำหนดให้ระบบทำงานโดยส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 ( $P_{tie11-1}$ ) มีขนาดเท่ากับ 2.5 pu ซึ่งเป็นการทำงานในสภาวะโหลดขนาดกลางและแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบโดยมีรูปคลื่นแบบกรณี 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 หลังจากทำการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค [46] โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกลุ่มอนุภาคดังนี้ : ขนาดของกลุ่มอนุภาคเท่ากับ 25, จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาเท่ากับ 100, ค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวประกอบถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.4 และ 0.9 ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 เป็นการลู่เข้าหาค่าตอบที่เหมาะสมซึ่งได้แก่ ขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและค่ากระแสตั้งต้นที่เหมาะสมของ SMES ทั้งสองตัวที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่มีโครงสร้างแบบพีไอไปพร้อมๆกัน สำหรับการออกแบบ SMES ที่มีค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ( $L_{sm}$ ) ขนาด 10 H และมีค่ากระแสตั้งต้น ( $I_{sm0}$ ) เท่ากับ 25.51 kA นั้นจะแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมโดยพิจารณาเฉพาะเทอมที่สามและเทอมที่สี่ซึ่งเป็นการทำให้ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายส่งเส้นที่ 11-1 มีค่าต่ำสุดเท่านั้น ผลที่ได้จากการออกแบบ SMES ทั้งสองประเภทสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 จากผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมจะสังเกตเห็นว่าทั้งค่า  $L_{sm}$  และ  $I_{sm0}$  ของ SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมจะมีค่าต่ำกว่า SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H นั้นแสดงให้เห็นว่า SMES ที่ติดตั้งในระบบตามที่นำเสนอใน [20] สามารถออกแบบให้มีขนาดของค่าพลังงานสะสมตั้งต้นลดลงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.4 การลู่เข้าหาค่าตอบเมื่อทำการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมโดยใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณที่ต่ำกว่า ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์มูลฐานของ SMES ทั้งสองชนิด

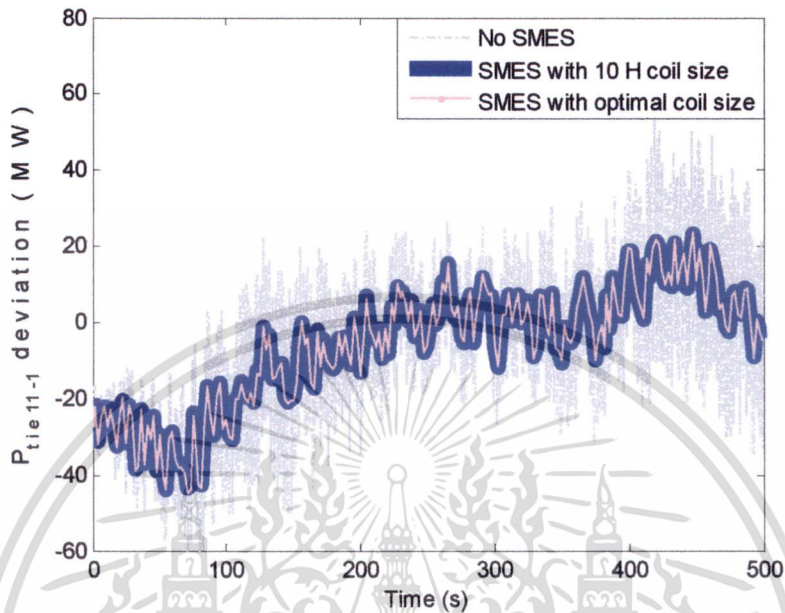
ค่าฐานของระบบ : $S_{sm,base} = 1,000 \text{ MVA}$ , $V_{tbase} = 25 \text{ kV}$ , $I_{sm,base} = 40 \text{ kA}$
$K_{PR} = 40$ , $T_I = 0.4$ , $K_{sm} = 1.0$ , $K_{Vsm} = 1.0$ , $T_C = 0.01$ , $V_{t0} = 0.95 \text{ pu}$

ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมในสมการที่ (4.4)

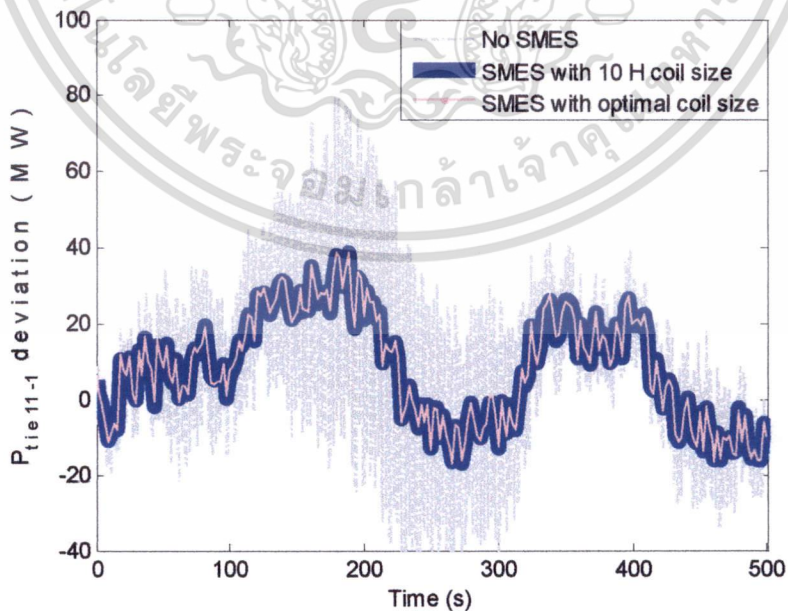
ชนิดของ SMES		ค่าพารามิเตอร์ของ SMES แต่ละชนิด
SMES ที่มีขดลวด ขนาด 10 H	SMES1	$K_{p1}(s) = 4.2370(1 + (1/18.5113s))$ $K_{Q1}(s) = 9.0487(1 + (1/19.5087s))$ $L_{sm1} = 10 \text{ H}$ , $I_{sm0\_1} = 25.51 \text{ kA}$
	SMES2	$K_{p2}(s) = 8.2029(1 + (1/17.4434s))$ $K_{Q2}(s) = 4.1099(1 + (1/16.0563s))$ $L_{sm2} = 10 \text{ H}$ , $I_{sm0\_2} = 25.51 \text{ kA}$
SMES ที่มีขดลวด ขนาดเหมาะสม	SMES1	$K_{p1}(s) = 7.1464(1 + (1/12.5386s))$ $K_{Q1}(s) = 7.0749(1 + (1/23.7185s))$ $L_{sm1} = 4.98 \text{ H}$ , $I_{sm0\_1} = 20.64 \text{ kA}$
	SMES2	$K_{p2}(s) = 12.3548(1 + (1/15.8625s))$ $K_{Q2}(s) = 5.1728(1 + (1/20.3887s))$ $L_{sm2} = 3.85 \text{ H}$ , $I_{sm0\_2} = 21.04 \text{ kA}$

สำหรับการทดสอบความสามารถในการทำงานของ SMES ทั้งสองประเภทตามที่ได้ออกแบบไว้เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้าง ในที่นี้ได้ทำการจำลองกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมให้มีรูปคลื่นแตกต่างกัน 3 กรณีดังแสดงในรูปที่ 4.4 เพื่อจ่ายให้แก่ระบบ โดยกำหนดให้ระบบทำงานขณะที่กำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 ( $P_{tie11-1}$ ) มีขนาดเท่ากับ 2.5 pu ซึ่งเป็นการทำงานในสภาวะโหลดขนาดกลาง จากผลที่ได้กรณีแรกแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมมีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 1 จะพบว่าระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง SMES เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งอย่างรุนแรง ในทางกลับกันเมื่อติดตั้ง SMES ให้แก่ระบบไม่ว่าจะเป็น SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H หรือ SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมก็จะสามารถทำให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบลดลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าผลการทำเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าของ SMES ทั้งสองประเภทให้ผลใกล้เคียงกัน ในกรณีถัดมาเมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลมนมีรูปคลื่นแบบกรณีสี่ 2 และ 3 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ จะพบว่าผลการทำเสถียรภาพของ SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมและ SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H ให้ผลดีใกล้เคียงกัน

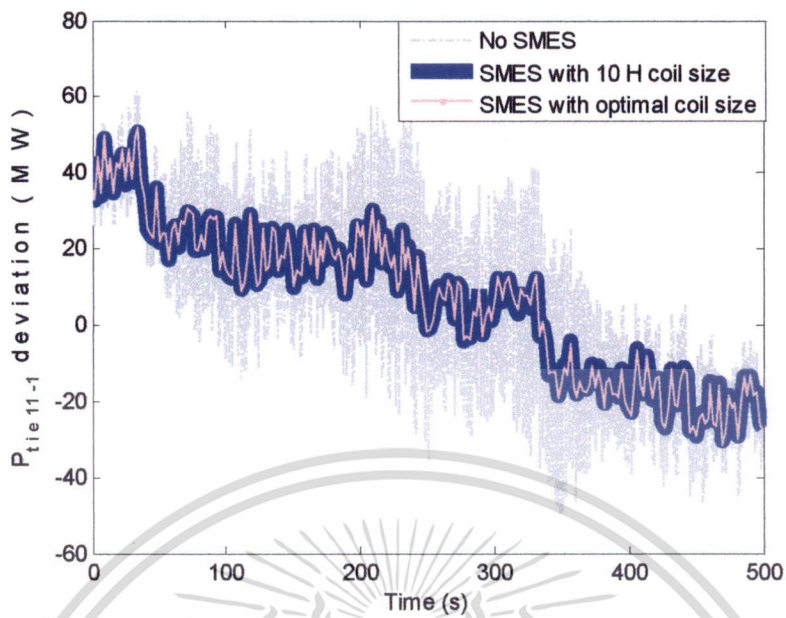


รูปที่ 4.5 ค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลมนมีรูปคลื่นแบบกรณีสี่ 1



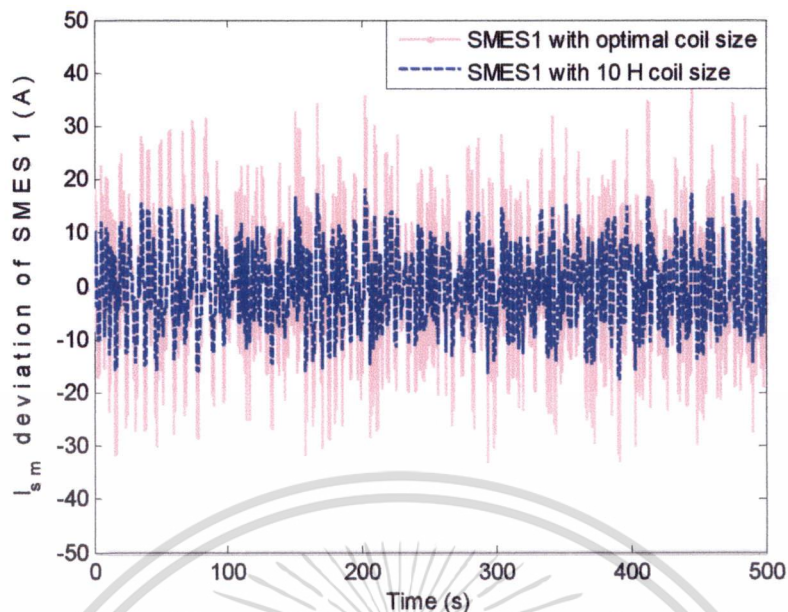
รูปที่ 4.6 ค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ มีรูปคลื่นแบบกรณีสี่ 2 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

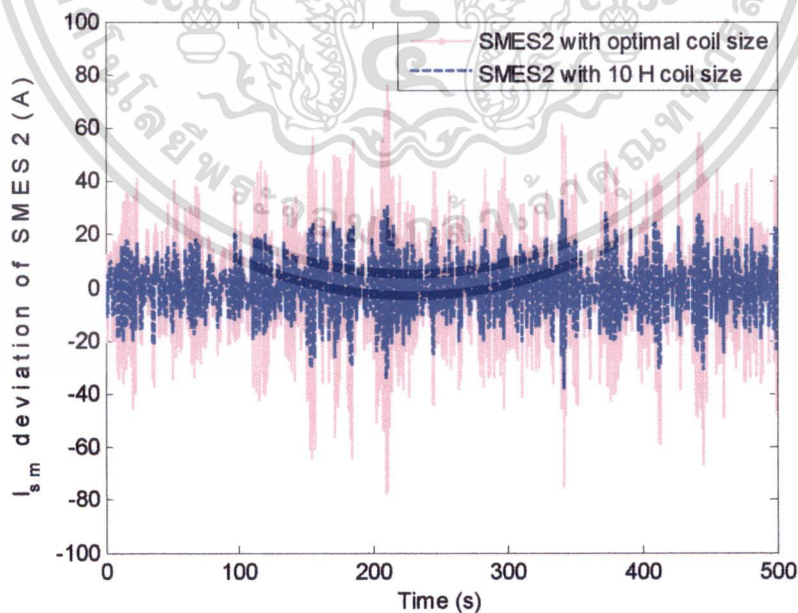


รูปที่ 4.7 ค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 3

ส่วนรูปที่ 4.8-4.13 เป็นการเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ( $I_{sm} - I_{sm0}$ ) ของ SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมและ SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลมมีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 1-3 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าค่าเบี่ยงเบนของกระแสในขดลวด SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมมีการเบี่ยงเบนมากกว่า SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H นั้นแสดงให้เห็นว่า SMES ที่มีขดลวดขนาดเล็กจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากับระบบมากกว่า SMES ที่มีขดลวดขนาดใหญ่กว่า

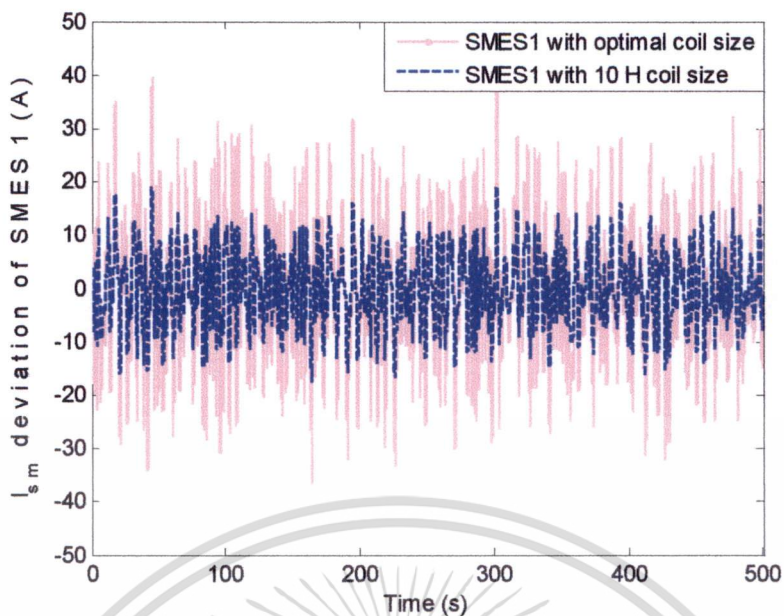


รูปที่ 4.8 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 1

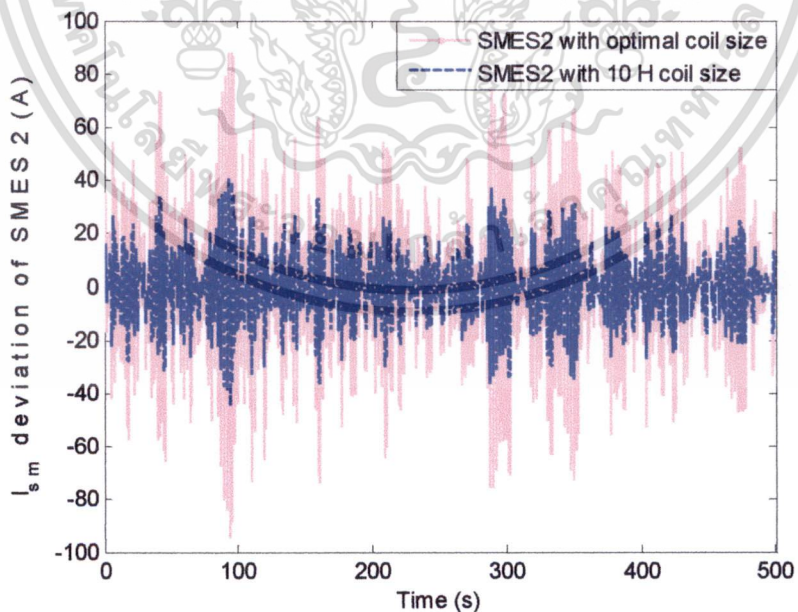


รูปที่ 4.9 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 2 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

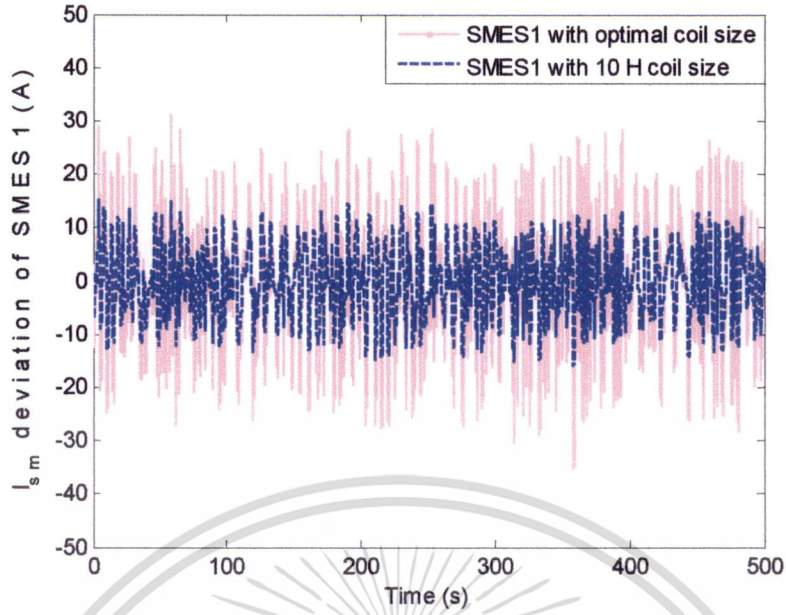


รูปที่ 4.10 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีสี่ที่ 2

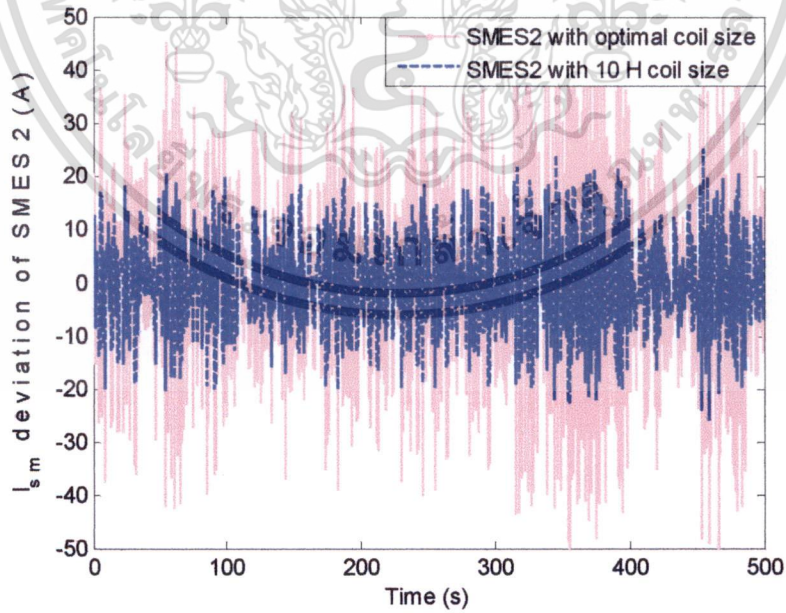


รูปที่ 4.11 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 2 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีสี่ที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



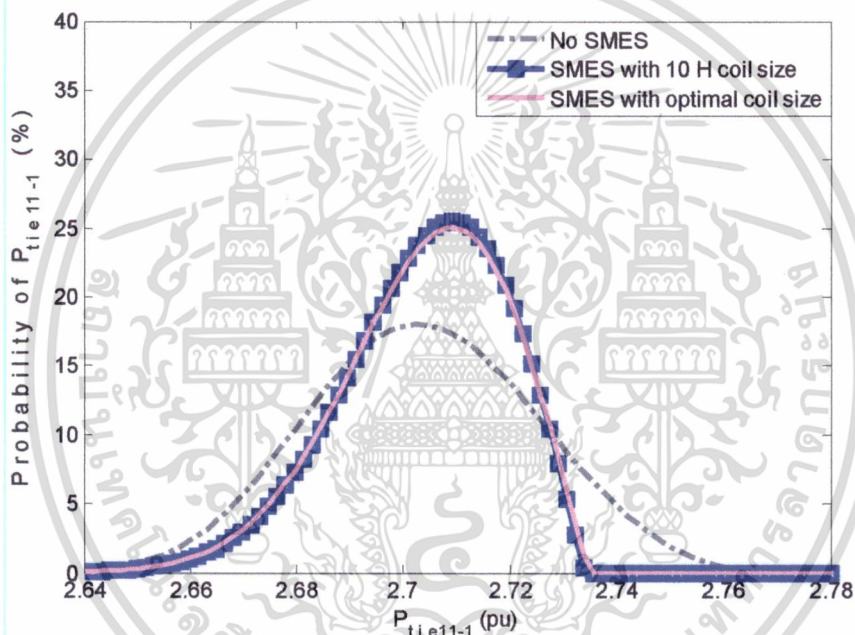
รูปที่ 4.12 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 3



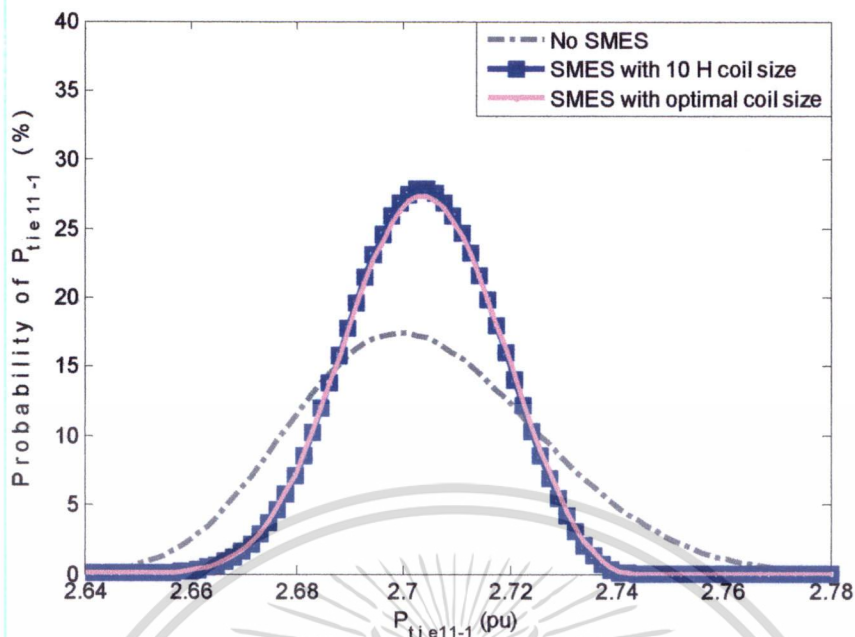
รูปที่ 4.13 ค่าเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าในขดลวด SMES ตัวที่ 2 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

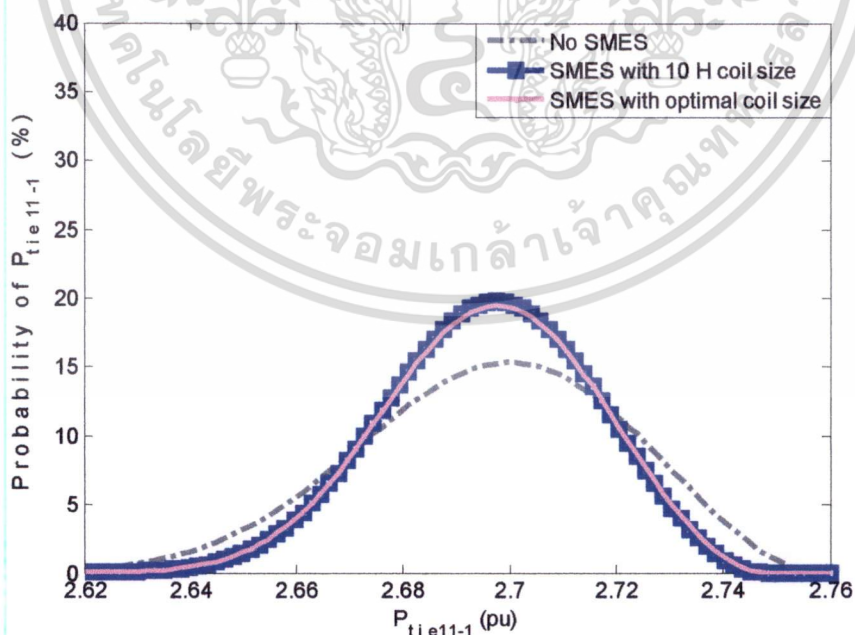
รูปที่ 4.14-4.16 แสดงฟังก์ชันการกระจายของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 ( $P_{tie11-1}$ ) เมื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีรูปคลื่นแบบกรณี 1-3 ตามลำดับ จะพบว่าฟังก์ชันการกระจายของกำลังไฟฟ้าทั้งในกรณีของ SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมและ SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H จะมีลักษณะการกระจายเหมือนกัน ย่อมแสดงให้เห็นว่า SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H ซึ่งมีขนาดของขดลวดใหญ่กว่าถึงสองเท่า ในทางกลับกันพบว่าฟังก์ชันการกระจายของกำลังไฟฟ้าในระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง SMES จะมีค่ายอดของฟังก์ชันที่ต่ำกว่าและฐานจะแผ่ออกไปกว้างกว่าค่าฟังก์ชันการกระจายของระบบที่มีการติดตั้ง SMES นั้นแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีการติดตั้ง SMES สามารถลดการแกว่งหรือการกระจายของกำลังไฟฟ้าในระบบได้ดีกว่าระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง SMES



รูปที่ 4.14 ฟังก์ชันการกระจายของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีรูปคลื่นแบบกรณี 1



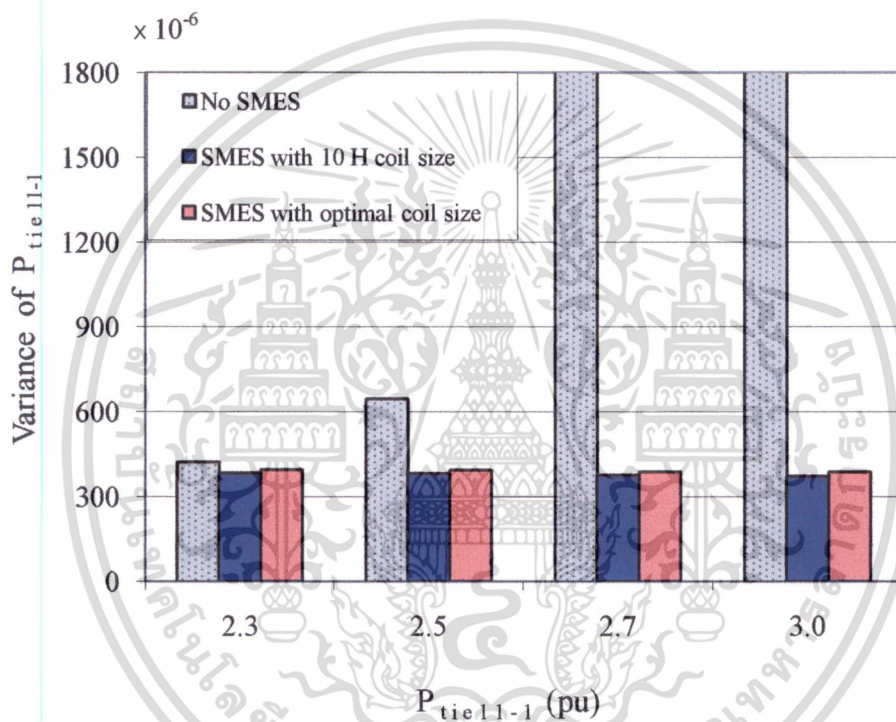
รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันการกระจายของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 2



รูปที่ 4.16 ฟังก์ชันการกระจายของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เมื่อกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม มีรูปคลื่นแบบกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายรูปที่ 4.17 แสดงค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 ( $P_{tie11-1}$ ) เมื่อระบบมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1 เพิ่มสูงขึ้นจาก 2.3 pu จนถึง 3.0 pu โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีรูปคลื่นแบบกรณที่ 3 ให้แก่ระบบ พบว่าระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง SMES จะมีค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันสำหรับระบบที่มีการติดตั้ง SMES ทั้ง SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H และ SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสม พบว่าค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ แม้ว่าระบบจะมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นก็ตาม นั่นแสดงให้เห็นว่า SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมสามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานต่างๆได้และยังมีประสิทธิภาพการทำงานได้ดีเช่นเดียวกับ SMES ที่มีขดลวดขนาด 10 H



รูปที่ 4.17 ค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่ 11-1

#### 4.4 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการออกแบบ SMES จำนวน 2 ตัวที่ติดตั้งบนระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่มีการต่อเชื่อมกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมขนาดใหญ่ โดยการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อให้ขนาดความจุพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES ทั้งสองตัวและค่าความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าในระบบมีค่าต่ำสุด ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบพีไอและขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดเหมาะสมจากผลการจำลองการทำงานพบว่าระบบที่ติดตั้ง SMES ที่มีขดลวดขนาดเหมาะสมสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบได้ดีพอๆกับ SMES ที่มีขดลวดขนาดใหญ่ ย่อมแสดงให้เห็นว่าการออกแบบ SMES ด้วยวิธีที่นำเสนอไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงแต่จะได้ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติเท่านั้น แต่ยังสามารถ  
ออกแบบให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดของ SMES มีขนาดลดลงทำให้ต้นทุนการสร้าง SMES มีราคาถูกลง



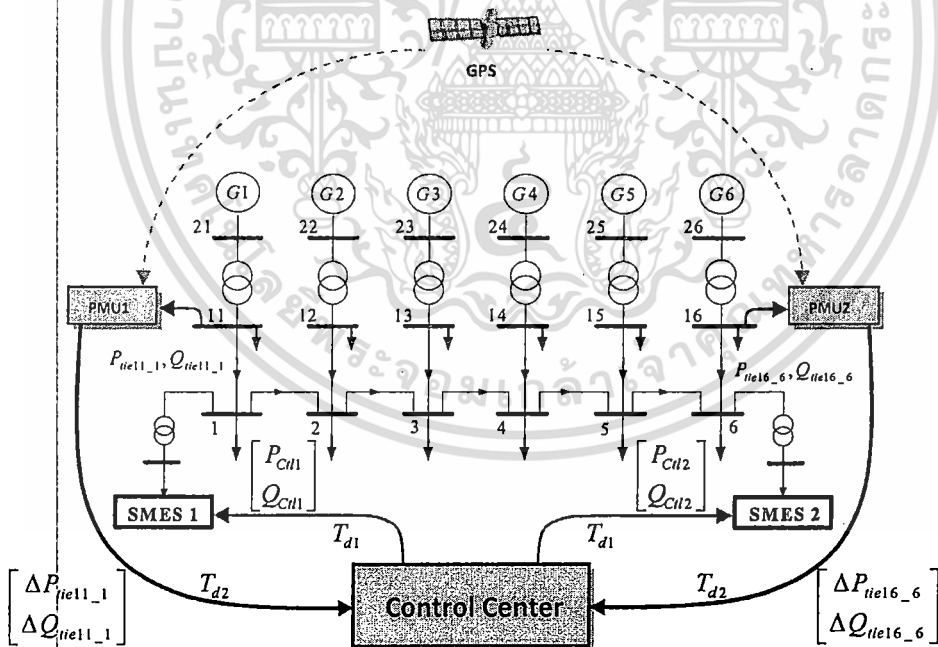
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างด้วยตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดที่พิจารณาความไม่แน่นอนของระบบและเวลาหน่วงจากการสื่อสาร

บทนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมคงทนที่ควบคุมจากศูนย์กลางของตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดเพื่อทำเสถียรภาพให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาความไม่แน่นอนของระบบและเวลาหน่วงจากการสื่อสาร โดยการแทนความไม่แน่นอนจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะการทำงานและเวลาหน่วงจากการสื่อสารด้วยแบบจำลองชนิดไรโรโครงสร้าง โดยทำการออกแบบด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคงทนที่มีประสิทธิภาพการหน่วงที่ดีและมีส่วนเพื่อเสถียรภาพคงทนสูง จากการจำลองการทำงานด้วยระบบไฟฟ้ากำลังทางภาคตะวันตกของประเทศญี่ปุ่นขนาดหกพื้นที่แสดงให้เห็นถึงความคงทนของตัวควบคุมที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีดั้งเดิม

### 5.1 ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 5.1 ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่ใช้ในการศึกษา

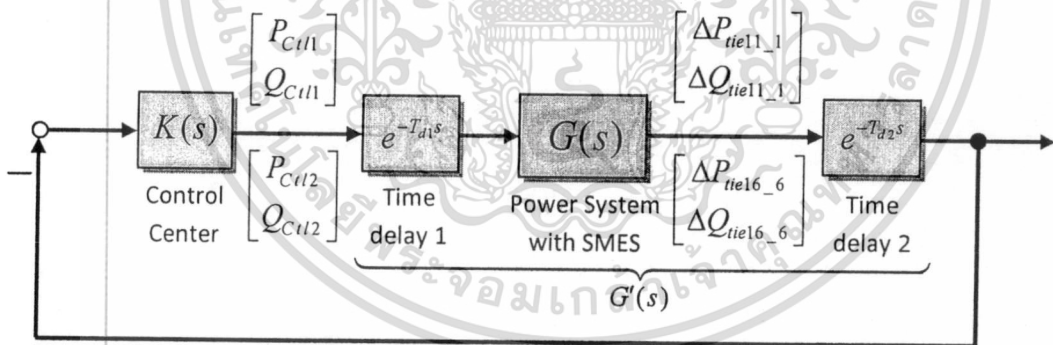
ระบบที่ใช้ศึกษาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังทางภาคตะวันตกของประเทศญี่ปุ่นขนาดหกพื้นที่ [51] ดังแสดงในรูปที่ 5.1 แต่ละพื้นที่เรียงลำดับจากซ้ายไปขวาเป็นพื้นที่ที่ 1 ถึง 6 โดยมีขนาดพิกัดค่าฐานกำลังของแต่ละพื้นที่เป็น  $(20 : 13.5 : 6.75 : 40 : 6.75 : 33) \times 1,000$  MVA ตามลำดับ การเอ็กส์ปอร์ตเป็นเอ็กส์ปอร์ตพลังงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ที่จะส่งผ่านสายส่งสองวงจรเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ผ่านบัส 1 จนถึงบัส 6 ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้แบบจำลองขนาด 5 อันดับ จากการวิเคราะห์โหมตพบว่าระบบที่ใช้ศึกษามีโหมตเด่นของการแกว่งระหว่างพื้นที่จำนวนสองโหมต โหมตแรกเกิดจากการแกว่งระหว่างเครื่องกำเนิดที่อยู่ปลายสุดของแต่ละฝั่งนั่นคือ G1 กับ G6 ส่วนอีกโหมตเกิดจากการแกว่งของเครื่องกำเนิดที่อยู่ปลายสุดของแต่ละฝั่งกับเครื่องกำเนิดที่อยู่ตรงกลางนั่นคือ G1 กับ G4 และ G4 กับ G6

สำหรับตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมของการติดตั้ง SMES ให้แก่ระบบพิจารณาจากการวิเคราะห์เรซิดิว (residue) จะพบว่าพื้นที่ที่ 1 และพื้นที่ที่ 6 เหมาะสำหรับการติดตั้ง SMES [51] เพื่อใช้ในการทำเสถียรภาพให้แก่ระบบโดย SMES แต่ละตัวจะมีขนาดพิกัด 40 kA, 800 MJ, 1000 MVA [42] นอกจากนี้สัญญาณควบคุมที่นำมาป้อนเข้าให้แก่ SMES แต่ละตัวได้จากเครื่องวัดเฟสเซอร์ (Phasor Measurement Units : PMU) [55] ที่ติดตั้งที่บัส 11 และบัส 16 โดยจะทำการวัดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ส่งจากบัส 11 ไปบัส 1 ( $\Delta P_{tie11\_1}, \Delta Q_{tie11\_1}$ ) และจากบัส 16 ไปบัส 6 ( $\Delta P_{tie16\_6}, \Delta Q_{tie16\_6}$ )

สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกส่งผ่านระบบสื่อสารไปยังศูนย์กลางการควบคุมทำให้เกิดเวลาหน่วง  $T_{d2}$  เมื่อทำการประมวลผลเพื่อหาสัญญาณควบคุม SMES แล้วสัญญาณควบคุม ( $P_{C_{11i}}, Q_{C_{11i}}, i=1,2$ ) จะถูกส่งผ่านระบบสื่อสารไปยัง SMES แต่ละตัวซึ่งจะเกิดเวลาหน่วง  $T_{d1}$  ในที่นี้พิจารณาระบบสื่อสารเป็นชนิดสื่อสารผ่านดาวเทียมที่มีเวลาหน่วงประมาณ 200 ms ต่อการส่งสัญญาณหนึ่งเที่ยวการสื่อสาร [56]

## 5.2 แบบจำลองระบบควบคุมไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 5.2 ระบบควบคุมไฟฟ้ากำลังที่ใช้ศึกษาโดยพิจารณาเวลาหน่วง

จากระบบที่ใช้ศึกษาในรูปที่ 5.1 เมื่อนำมาเขียนเป็นระบบควบคุมป้อนกลับจะได้ดังรูปที่ 5.2 โดย  $G(s)$  แทนฟังก์ชันโอนย้ายของระบบไฟฟ้ากำลังที่รวม SMES,  $K(s)$  แทนฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุม SMES ที่อยู่ที่ศูนย์กลางการควบคุมซึ่งจะประกอบด้วยตัวควบคุมสองชุดแยกตาม SMES แต่ละตัวดังนี้

$$K(s) = \begin{bmatrix} K_{SMES1}(s) \\ K_{SMES2}(s) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $K_{SMES1}(s)$  และ  $K_{SMES2}(s)$  เป็นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES1 และ SMES2 ตามลำดับ

ทั้งนี้ตัวควบคุมของ SMES แต่ละตัวยังประกอบด้วยตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าสองชุดแยกตามชนิดของกำลังไฟฟ้านี้

$$K_{SMESi}(s) = \begin{bmatrix} K_{Pi}(s) \\ K_{Qi}(s) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

โดยที่  $K_{Pi}(s)$  และ  $K_{Qi}(s)$  เป็นตัวควบคุมของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามลำดับของ SMES ตัวที่  $i; i=1,2$

เพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติจะเลือกใช้ตัวควบคุมที่มีโครงสร้างเป็นตัวควบคุมนำหน้า/ล่าหลังอันดับหนึ่งดังสมการ

$$K_{Pi}(s) = \frac{K_{i1}(1+T_{i1}s)}{(1+T_{i2}s)} \quad (5.3)$$

$$K_{Qi}(s) = \frac{K_{i2}(1+T_{i3}s)}{(1+T_{i4}s)} \quad (5.4)$$

โดยที่  $K_{Pi}(s)$  และ  $K_{Qi}(s)$  แทนตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES ตัวที่  $i; i=1,2$   $K_{i1}$  และ  $K_{i2}$  เป็นอัตราขยายตัวควบคุม,  $T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}, T_{i4}$  เป็นค่าเวลาหน่วง ดังนั้นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจึงมีทั้งหมด 12 ตัว

จากรูปที่ 5.2 ผลจากเวลาหน่วงของการสื่อสารจะถูกแทนด้วยเทอม  $e^{-T_d s}$  โดยที่  $T_d$  แทนค่าเวลาหน่วง เพื่อความสะดวกในการออกแบบในที่นี้เทอมเวลาหน่วงจะถูกประมาณเป็นฟังก์ชันโอนย้ายอันดับหนึ่งด้วยวิธีการประมาณแพด (Pade approximation) ดังสมการ

$$e^{-T_d s} \approx \frac{1 - \frac{T_d}{2}s}{1 + \frac{T_d}{2}s} \quad (5.5)$$

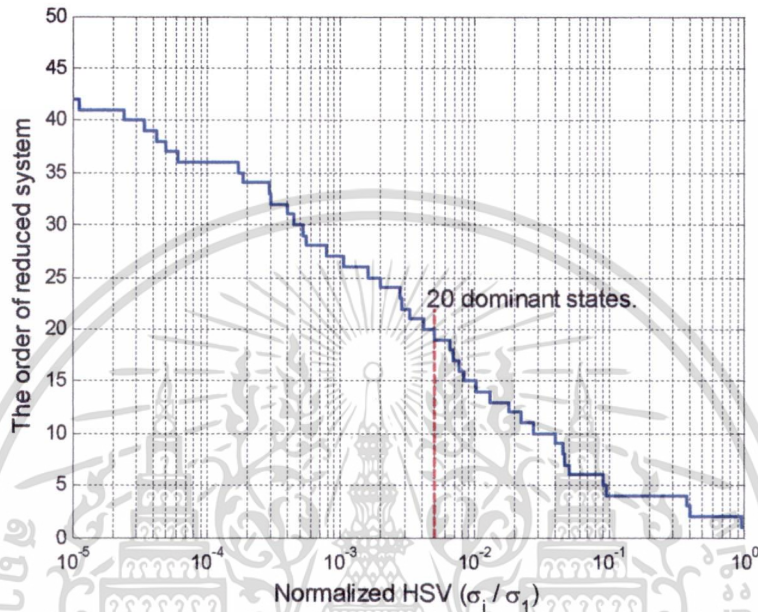
ทั้งนี้ในรูปที่ 5.2 ฟังก์ชันโอนย้าย  $G'(s)$  จะแสดงถึงระบบไฟฟ้ากำลังที่รวมเวลาหน่วงจากการสื่อสารทั้งสองเข้าไว้ด้วยกัน

ส่วนแบบจำลองของ SMES ที่ใช้ศึกษามีโครงสร้างดังรูปที่ 5.2 สัญญาณด้านเข้าของ SMES แต่ละตัวได้จากสัญญาณควบคุมที่ส่งมาจากศูนย์กลางการควบคุม จากรูปจะพบว่าภายใน SMES ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่  $K_{Pi}(s)$  และ  $K_{Qi}(s)$  เป็นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือน

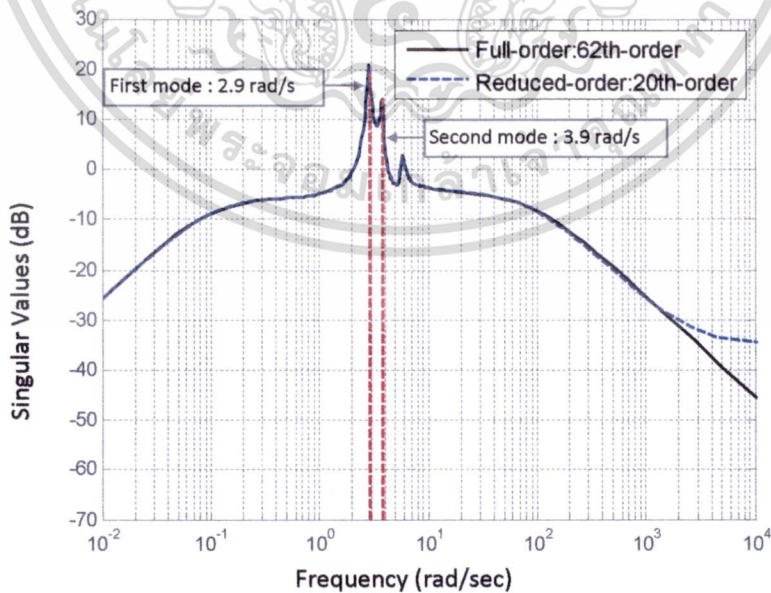
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อันดับเทียบกับระบบเต็มอันดับให้มีความใกล้เคียงในช่วงความถี่ที่มีนัยสำคัญซึ่งในที่นี้คือช่วงความถี่ของโหมดเด่นของการแกว่งระหว่างพื้นที่ สำหรับกรณีนี้เลือกอันดับของระบบลดอันดับเป็น 20  $\{G'_R(s)\}$  เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.5 ที่แสดงผลตอบสนองความถี่ของระบบเต็มอันดับและลดอันดับ จะพบว่าระบบทั้งสองมีผลตอบสนองความถี่ที่ใกล้เคียงกันมากโดยเฉพาะในช่วงความถี่ของโหมดเด่น



รูปที่ 5.4 อันดับของระบบลดอันดับเทียบกับค่า Normalized Hankel Singular-Value (HSV)



รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเต็มอันดับและลดอันดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากบล็อกไดอะแกรมพบว่า

$$\begin{bmatrix} u_{\Delta i} \\ u_{\Delta o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_{il} & \Delta_{iA} \\ \Delta_A & \Delta_{iO} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{\Delta i} \\ y_{\Delta o} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

และ

$$y_{\Delta i} = -K(Gy_{\Delta i} + u_{\Delta o}) + u_{\Delta i} \quad (5.7)$$

$$y_{\Delta o} = G(-Ky_{\Delta o} + u_{\Delta i}) + u_{\Delta o} \quad (5.8)$$

เมื่อทำการจัดรูปจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} y_{\Delta i} \\ y_{\Delta o} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_I & -KS \\ SG & S \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} u_{\Delta i} \\ u_{\Delta o} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

โดยที่  $S = (I + GK)^{-1}$ ,  $S_I = (I + KG)^{-1}$

$M$  เป็นเมตริกซ์ของระบบ  $G$  กับตัวควบคุม  $K$

จากรูปที่ 5.7 เป็นระบบควบคุมป้อนกลับที่รวมระบบและตัวควบคุมเข้าไว้ด้วยกันมีโครงสร้างเป็น  $M\Delta$  เมื่ออาศัยทฤษฎีบทอัตราขยายขนาดเล็ก (small gain theorem) [27] ทำให้ได้อสมการที่เป็นเงื่อนไขเสถียรภาพคงทนของระบบสำหรับการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES ได้ดังนี้

$$\|\Delta\|_{\infty} < \frac{1}{\|M\|_{\infty}}, \quad \forall \omega \quad (5.10)$$

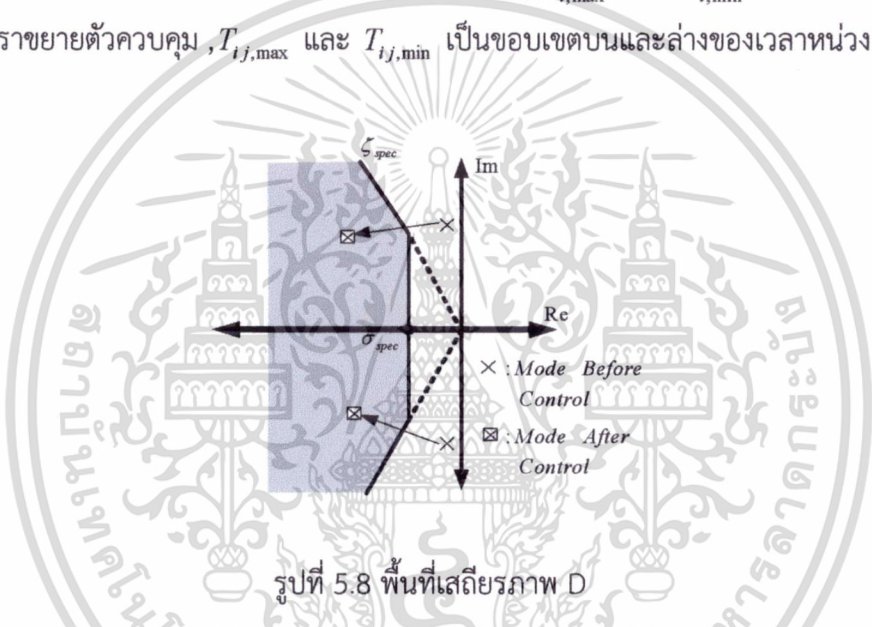
จากอสมการที่ (5.10) เทอมด้านขวามือแสดงถึงส่วนเผื่อเสถียรภาพคงทนเพื่อรองรับต่อความไม่แน่นอนต่างๆที่อาจเกิดขึ้นกับระบบ ดังนั้นการทำให้ขนาดของเทอม  $\|M\|_{\infty}$  มีขนาดน้อยที่สุดจะทำให้ส่วนเผื่อเสถียรภาพคงทนมีขอบเขตกว้างขึ้น จากแนวคิดข้างต้นสามารถนำไปสร้างเป็นปัญหาค่าเหมาะสมสำหรับออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมคงทนของ SMES ได้ดังนี้

Minimize 
$$\left\| \begin{bmatrix} S_I & -KS \\ SG & S \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \tag{5.11}$$

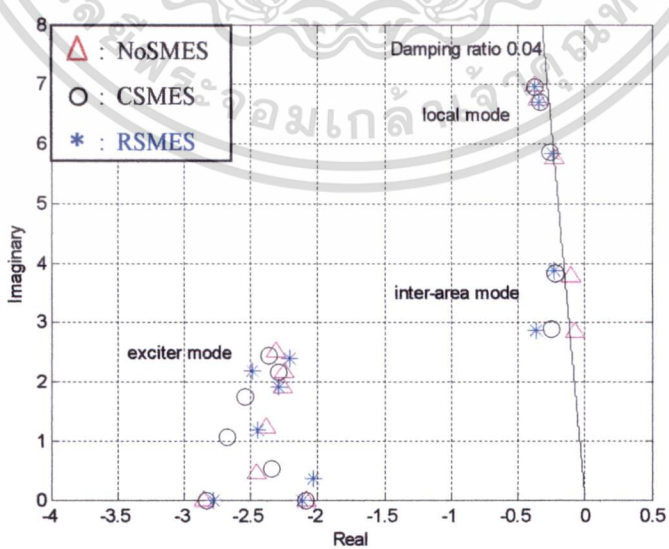
Subject to 
$$\zeta \geq \zeta_{spec}, \sigma \geq \sigma_{spec},$$

$$K_{i,min} \leq K_i \leq K_{i,max}, T_{ij,min} \leq T_{ij} \leq T_{ij,max} \quad i=1,2, j=1,2$$

โดยที่  $S = (I + GK)^{-1}, S_I = (I + KG)^{-1}, \|\cdot\|_{\infty}$  เป็นค่านอร์มอนันต์ (Infinite norm) ของฟังก์ชันโอนย้าย,  $\zeta$  และ  $\zeta_{spec}$  เป็นค่าจริงและค่าที่กำหนดไว้ของอัตราหน่วงในโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ตามลำดับ,  $\sigma$  และ  $\sigma_{spec}$  เป็นค่าจริงและค่าที่กำหนดไว้ของส่วนจริงค่าเจาะจง (eigenvalue) ในโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ตามลำดับ,  $K_{i,max}$  และ  $K_{i,min}$  เป็นขอบเขตบนและล่างของอัตราขยายตัวควบคุม,  $T_{ij,max}$  และ  $T_{ij,min}$  เป็นขอบเขตบนและล่างของเวลาหน่วง



รูปที่ 5.8 พื้นที่เสถียรภาพ D



รูปที่ 5.9 ตำแหน่งของค่าเจาะจงในโหมดเฉพาะพื้นที่, ระหว่างพื้นที่และโหมดการกระตุ้นในกรณีที่ 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของปัญหาค่าเหมาะสมข้างต้นไม่เพียงแต่ทำให้ตัวควบคุมมีความคงทนต่อความไม่แน่นอนต่างๆที่เกิดขึ้นแต่ยังเป็นการย้ายตำแหน่งของโหมดการแกว่งที่เป็นโหมดเด่นทั้งสองโหมดให้ไปอยู่ภายในพื้นที่เสถียรภาพ D (พื้นที่สีเทา) ดังรูปที่ 5.8 ปัญหาค่าเหมาะสมนี้จะถูกแก้ไขโดยวิธีกลุ่มอนุภาค [46]

ตารางที่ 5.1 กรณีที่ใช้ศึกษาการทำงานของระบบในสถานการณ์ต่างๆ (ค่าฐาน 1000 MVA)

กรณี	$\Delta P_{rel1-1}$ (pu)	เวลาหน่วงรวม (ms) ( $T_{d1} + T_{d2}$ )	โครงสร้างของ ระบบไฟฟ้ากำลัง	สถานการณ์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับ ระบบไฟฟ้ากำลัง
1	4.6	400	อยู่ในสภาพปกติ	เกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงดินที่บัส 2 ณ เวลา 2.0 s เป็นระยะเวลา 50 ms แล้วความผิดปกติที่เกิดขึ้นก็หายไปเอง
2	5.0	500	อยู่ในสภาพปกติ	เกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่สายส่งหนึ่งวงจรระหว่างบัส 2 และ 3 ที่เวลา 2.0 s. แล้วสายส่งที่เกิดความผิดปกติก็ถูกเปิดออกที่เวลา 2.05 s. หลังจากนั้นสายส่งก็ไม่ถูกต่อกลับคืน
3	5.4	550	อยู่ในสภาพปกติ	เหมือนกรณีที่ 2
4	5.8	550	สายส่งหนึ่งวงจรระหว่างบัส 2 และ 3 ถูกเปิดออก	เหมือนกรณีที่ 1

### 5.5 การจำลองระบบที่ใช้ศึกษา

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคได้ตั้งข้อกำหนดในการออกแบบดังนี้ :  $\zeta_{spec} = 0.04, \sigma_{spec} = -0.1, K_{i,min} = 1.0, K_{i,max} = 10, T_{ij,min} = 0.001$  และ  $T_{ij,max} = 1.0$ , จำนวนอนุภาคเท่ากับ 24, จำนวนรอบในการค้นหาค่าตอบเท่ากับ 100, อัตราแรงเข้าหาค่าตอบเท่ากับ 2, ค่าถ่วงน้ำหนักสูงสุดและต่ำสุดตั้งไว้ที่ 0.4 และ 0.9 ตามลำดับ ส่วนจุดทำงานที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแสดงรายละเอียดในกรณีที่ 1 ดังที่ปรากฏในตารางที่ 5.1 จากผลการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมจะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมคงทนของ SMES ซึ่งต่อไปจะใช้ชื่อย่อว่า RSMES (Robust SMES) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RSMES1:

$$K_{p1}(s) = 7.1471 \frac{1+0.2239s}{1+0.1653s} \quad (5.12)$$

$$K_{Q1}(s) = 1.1103 \frac{1+0.9864s}{1+0.0213s} \quad (5.13)$$

RSMES2:

$$K_{p2}(s) = 9.0228 \frac{1+0.9346s}{1+0.3472s} \quad (5.14)$$

$$K_{Q2}(s) = 1.8480 \frac{1+0.7783s}{1+0.5222s} \quad (5.15)$$

ในการศึกษาได้นำตัวควบคุมคงทนที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีดั้งเดิม [58] ที่ไม่คิดเงื่อนไขเสถียรภาพคงทนแต่ในการออกแบบยังคงใช้ข้อกำหนดการออกแบบของค่าอัตราห่วงและส่วนจริงของค่าเจาะจงเช่นเดียวกับที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมคงทน ปัญหาค่าเหมาะสมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีดั้งเดิมเป็นไปตามสมการ (5.11) ดังนี้

$$\text{Minimize } J = \sum_{\zeta \leq \zeta_{spec}} |\zeta_{spec} - \zeta| + \sum_{\sigma \geq \sigma_{spec}} |\sigma_{spec} - \sigma| \quad (5.16)$$

$$\text{Subject to } K_{i,\min} \leq K_i \leq K_{i,\max}, T_{ij,\min} \leq T_{ij} \leq T_{ij,\max}, \quad ; i=1,2, j=1,2$$

เมื่อทำการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมในการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีดั้งเดิมจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังสมการด้านล่างซึ่งต่อไปจะใช้ชื่อว่า CSMES (Conventional SMES)

CSMES1:

$$K_{p1}(s) = 6.5273 \frac{1+0.7485s}{1+0.2242s} \quad (5.17)$$

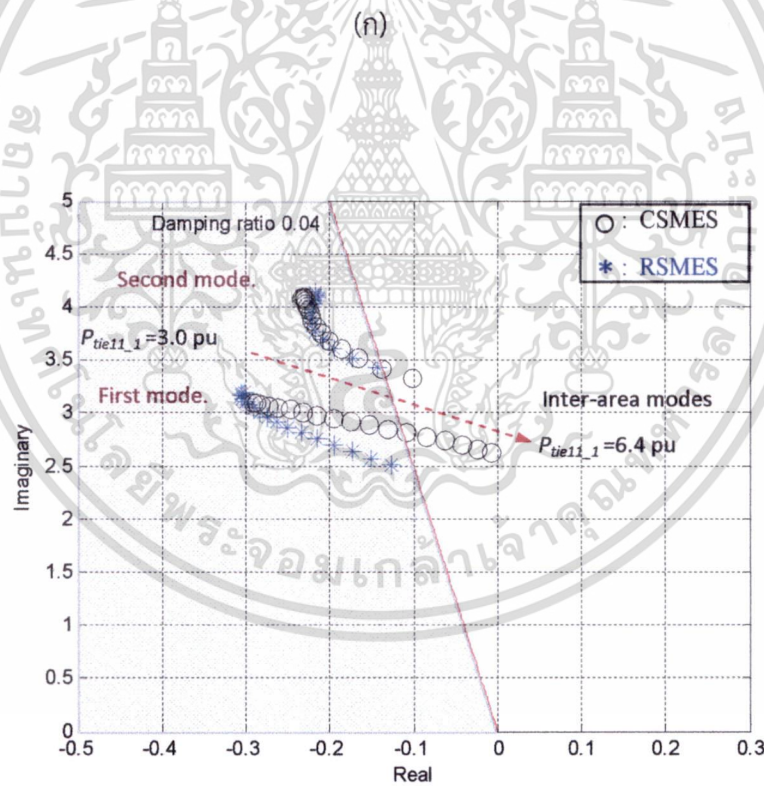
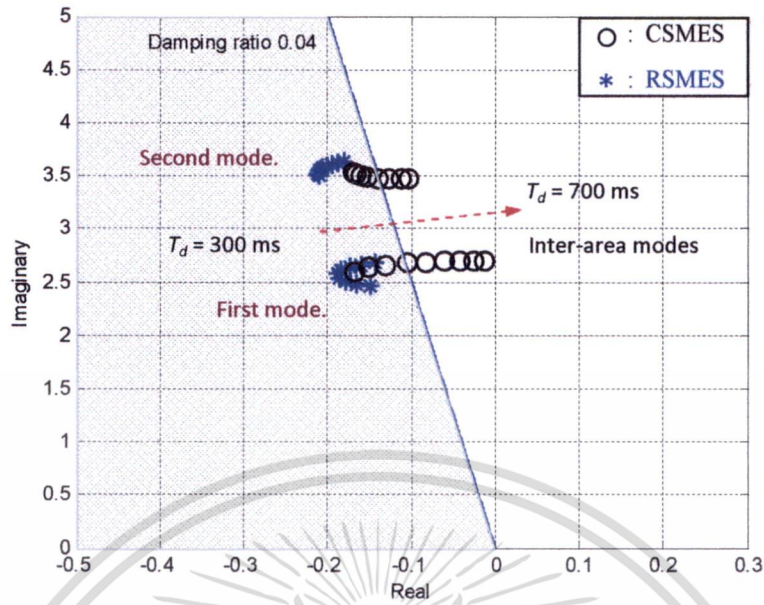
$$K_{Q1}(s) = 3.1575 \frac{1+0.7022s}{1+0.1787s} \quad (5.18)$$

CSMES2:

$$K_{p2}(s) = 3.9479 \frac{1+0.9338s}{1+0.1636s} \quad (5.19)$$

$$K_{Q2}(s) = 1.1936 \frac{1+0.7220s}{1+0.2783s} \quad (5.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 5.10 การเคลื่อนที่ของโหมดเด่นทั้งสองโหมดเมื่อ

(ก) มีการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาหน่วงในช่วง 300-700 ms. ที่ค่ากำลังไฟฟ้าส่งจ่าย  $P_{tie11\_1} = 6.0$  pu

(ข) มีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าส่งจ่ายในช่วง 3.0-6.4 pu. ที่ค่าเวลาหน่วง  $T_{d1} + T_{d2} = 600$  ms.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง CSMES และ RSMES ที่ได้ เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อดูค่าเจาะจงในโหมดเฉพาะพื้นที่, ระหว่างพื้นที่และโหมดการกระตุ้นในกรณีที่ 1 ของระบบไม่มี SMES (No SMES), ระบบCSMES และ RSMES ดังในรูปที่ 5.9 พบว่าค่าเจาะจงในโหมดระหว่างพื้นที่ของระบบ CSMES และ RSMES ถูกย้ายไปอยู่ในพื้นที่เสถียรภาพ D ตามที่ออกแบบไว้ ส่วนโหมดเฉพาะพื้นที่และโหมดการกระตุ้นของระบบ CSMES และ RSMES อยู่ในตำแหน่งเดียวกับระบบ No SMES นั้นแสดงว่าทั้งระบบ CSMES และ RSMES ไม่มีผลกระทบต่อทั้งสองโหมด และเมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อดูค่าเจาะจงและอัตราส่วนการหน่วงของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่ในสถานการณ์จำลองทั้ง 4 กรณีดังแสดงในตารางที่ 5.2 จะพบว่าในกรณีที่ 1 ระบบ No SMES จะมีอัตราส่วนการหน่วงต่ำและลดลงอย่างรวดเร็วจนขาดเสถียรภาพในกรณีที่ 3 และ 4 สำหรับระบบ CSMES และ RSMES จะพบว่าในกรณีที่ 1 ระบบทั้งสองมีข้อกำหนดตามที่ออกแบบไว้ ส่วนกรณีที่ 2 และ 3 อัตราหน่วงของ CSMES จะลดลงอย่างรวดเร็วและขาดเสถียรภาพในกรณีที่ 4 ซึ่งอยู่ภายใต้สถานการณ์ที่รุนแรงในทางกลับกันตัวควบคุม RSMES สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบในทุกกรณีได้เป็นอย่างดี

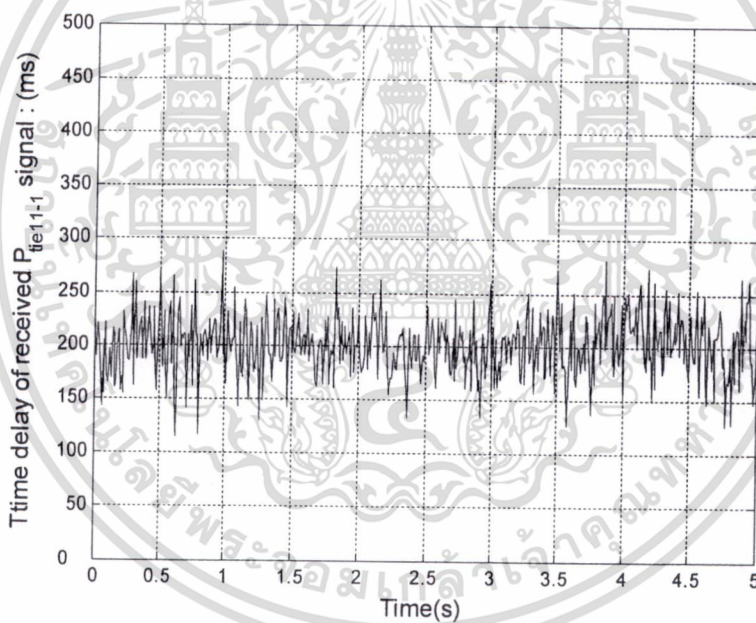
ตารางที่ 5.2 ค่าเจาะจงและอัตราส่วนการหน่วงในแต่ละกรณีที่ใช้ศึกษาการทำงานของระบบ

กรณีที่	No SMES		CSMES		RSMES	
	ค่าเจาะจง	อัตราส่วนการหน่วง	ค่าเจาะจง	อัตราส่วนการหน่วง	ค่าเจาะจง	อัตราส่วนการหน่วง
1	$-0.0800 \pm 2.8456i$	0.0281	$-0.2477 \pm 2.8899i$	0.0854	$-0.3693 \pm 2.8588i$	0.1281
	$-0.1058 \pm 3.7778i$	0.0280	$-0.2180 \pm 3.8200i$	0.0570	$-0.2360 \pm 3.8666i$	0.0609
2	$-0.0163 \pm 2.7429i$	0.0060	$-0.1592 \pm 2.8546i$	0.0557	$-0.2812 \pm 2.8400i$	0.0985
	$-0.1149 \pm 3.8098i$	0.0301	$-0.2310 \pm 3.8610i$	0.0597	$-0.2518 \pm 3.9397i$	0.0638
3	$0.0090 \pm 2.6530i$	-0.0034	$-0.1213 \pm 2.7953i$	0.0433	$-0.2571 \pm 2.7617i$	0.0927
	$-0.0853 \pm 3.6673i$	0.0232	$-0.2004 \pm 3.6999i$	0.0541	$-0.2225 \pm 3.7835i$	0.0587
4	$0.1309 \pm 2.1707i$	-0.0602	$0.0193 \pm 2.3613i$	-0.0082	$-0.0450 \pm 2.2309i$	0.0202
	$-0.0672 \pm 3.4840i$	0.0193	$-0.2002 \pm 3.4629i$	0.0577	$-0.2646 \pm 3.5903i$	0.0735

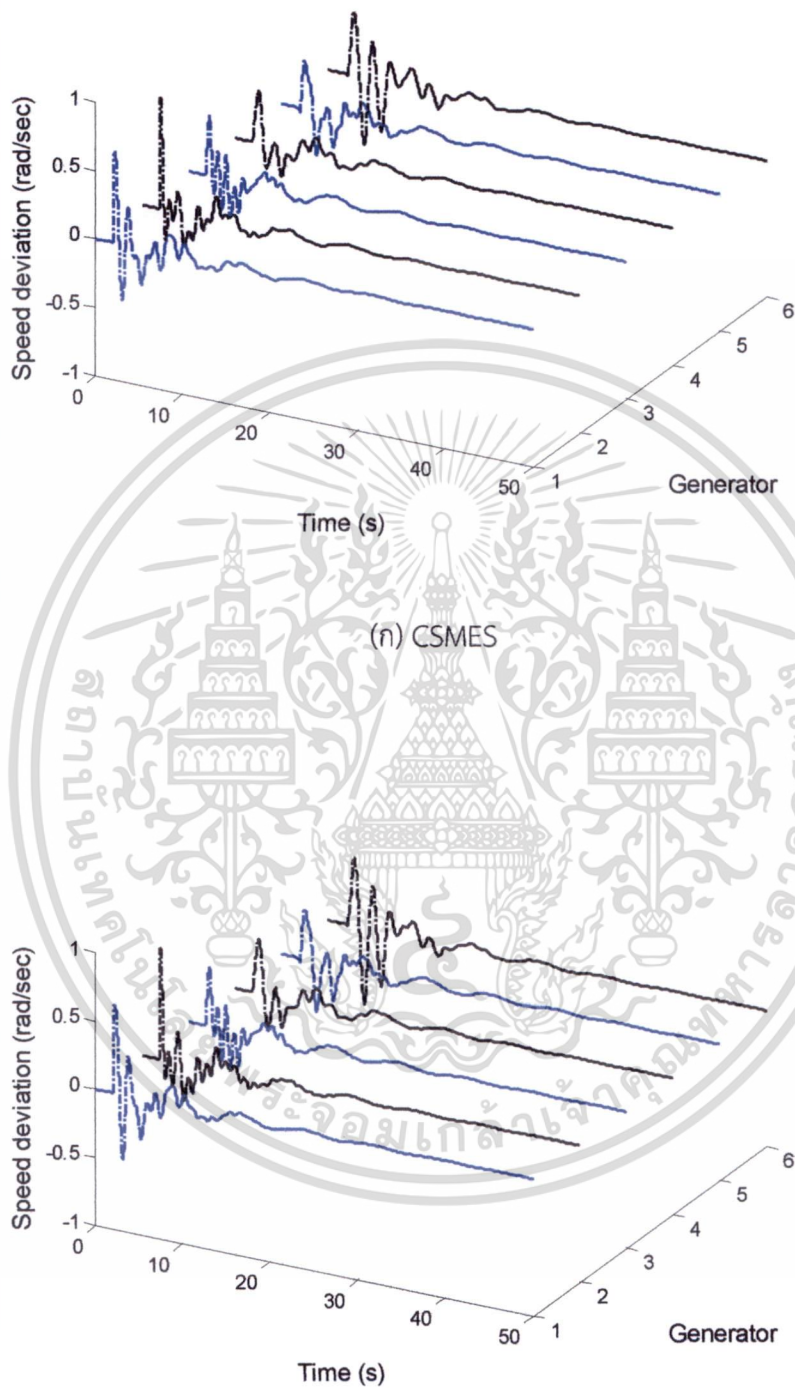
เมื่อพิจารณาตำแหน่งของโหมดเด่นของการแกว่งระหว่างพื้นที่ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเวลาหน่วงจากการสื่อสารตั้งแต่ 300 ms ไปจนถึง 700 ms ภายใต้สภาวะที่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงและกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจาก 3.0 pu จนถึง 6.4 pu ในสภาวะที่เวลาหน่วงจากการสื่อสารมีค่า 600 ms. ซึ่งคลาดเคลื่อนจากที่ออกแบบไว้มากดังแสดงในรูปที่ 5.10(ก) และ 5.10(ข) ตามลำดับ จะพบว่าโหมดเด่นในกรณีของ RSMES ยังคงอยู่ภายในพื้นที่เสถียรภาพ D (พื้นที่สีเขียว) แต่กรณีของ CSMES โหมดเด่นจะเคลื่อนออกจากพื้นที่เสถียรภาพ D เข้าสู่พื้นที่การทำงานไม่เสถียรภาพ เมื่อระบบทำงานภายใต้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงและเกิดเวลาหน่วงจากการสื่อสารที่มีค่ามาก ระบบที่ใช้ตัวควบคุม CSMES จะมีประสิทธิภาพในการหน่วงของโหมดเด่นลดลงและขาดเสถียรภาพในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองสถานการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นจำนวน 4 กรณีดังตารางที่ 5.1 เพื่อดูผลตอบสนองเชิงเวลาของตัวควบคุมทั้งสองโดยสังเกตจากการแกว่งของความเร็วเครื่องกำเนิดของทั้งหกพื้นที่ ทั้งนี้เวลาหน่วงจากการสื่อสารมีค่าไม่คงตัว ดังนั้นในการจำลองทั้ง 4 กรณีจึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาหน่วงโดยมีการกระจายแบบเกาส์ที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.001 สำหรับในกรณีที่ 1 รูปที่ 5.11 แสดงค่าเวลาหน่วงจากการสื่อสารที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาจะพบว่าทั้ง CSMES และ RSMES สามารถหน่วงการแกว่งของระบบให้กลับเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็วภายหลังจากเกิดการลัดวงจรที่บัส 2 ดังในรูปที่ 5.12 ส่วนกรณีที่ 2 เมื่อจุดทำงานเปลี่ยนไปจากสภาวะที่ใช้ในการออกแบบจะพบว่า RSMES สามารถควบคุมการแกว่งของระบบได้รวดเร็วกว่า CSMES ดังแสดงในรูปที่ 5.13 สำหรับกรณีที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่รุนแรงจะพบว่า CSMES ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ ความเร็วของเครื่องกำเนิดทั้งหกพื้นที่เกิดการแกว่งอย่างรุนแรงจนไม่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ แต่ RSMES ยังคงสามารถควบคุมเสถียรภาพของระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้เป็นอย่างดี ดังปรากฏในรูปที่ 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ



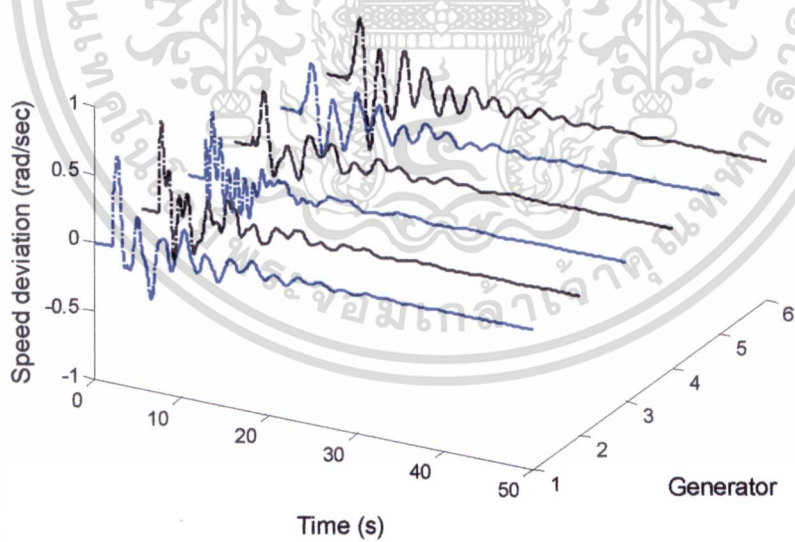
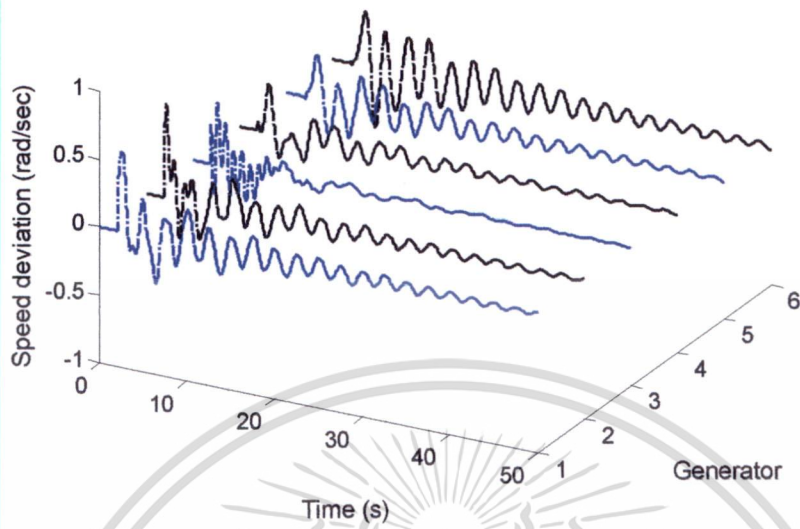
รูปที่ 5.11 เวลาหน่วงจากการสื่อสารที่เกิดขึ้นทางด้านรับ ( $T_{d2}$ ) ของสัญญาณ  $\Delta P_{ie11-1}$  ในกรณีที่ 1



(ข) RSMES

รูปที่ 5.12 ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วเครื่องกำเนิดทั้งหกพื้นที่ในกรณีที่ 1 :  
(ก) CSMES และ (ข) RSMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

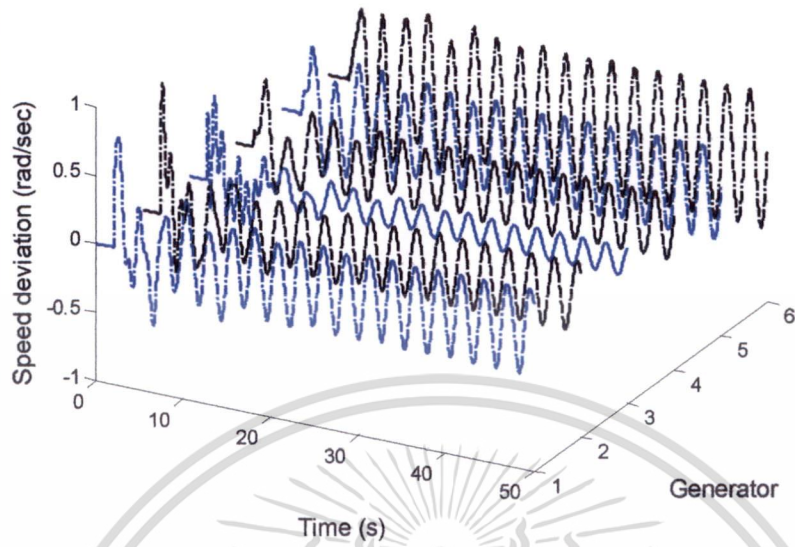


(ข) RSMES

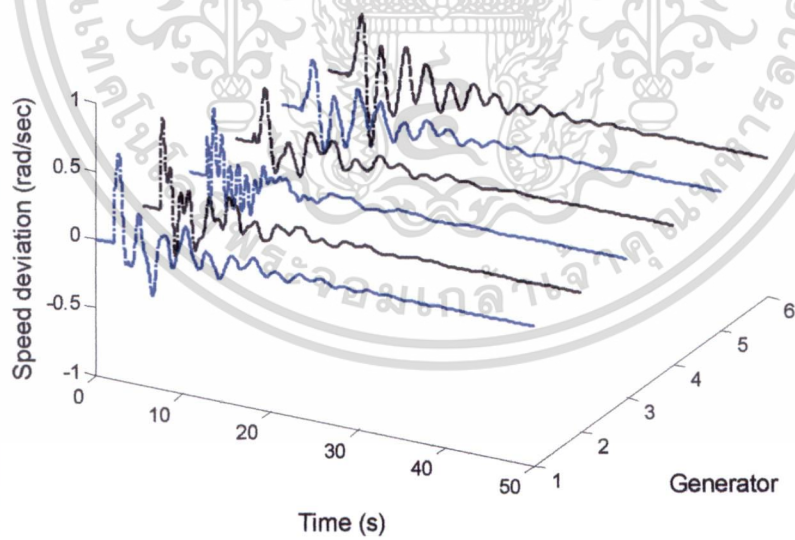
รูปที่ 5.13 ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วเครื่องกำเนิดทั้งหกพื้นที่ในกรณีที่ 2 :

(ก) CSMES และ (ข) RSMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) CSMES

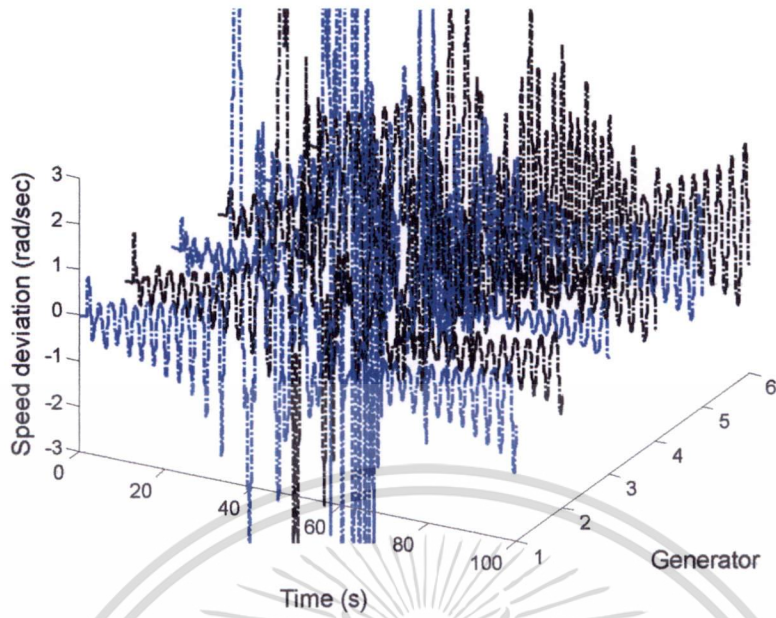


(ข) RSMES

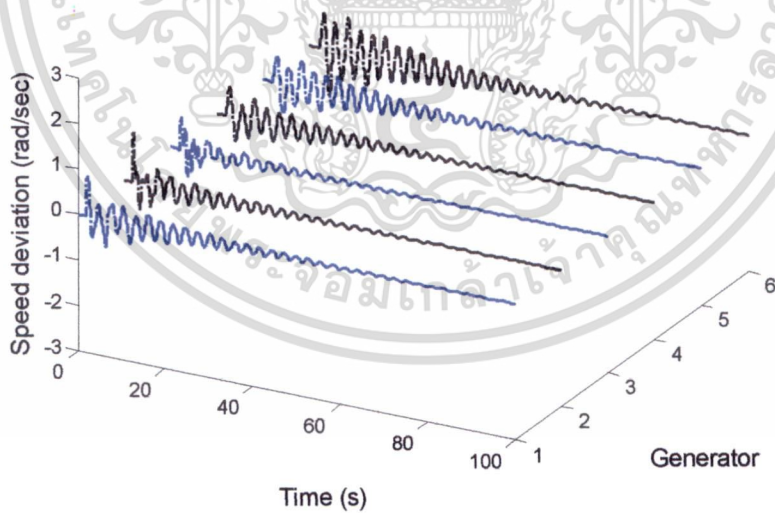
รูปที่ 5.14 ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วเครื่องกำเนิดทั้งหกพื้นที่ในกรณีที่ 3 :

(ก) CSMES และ (ข) RSMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) CSMES

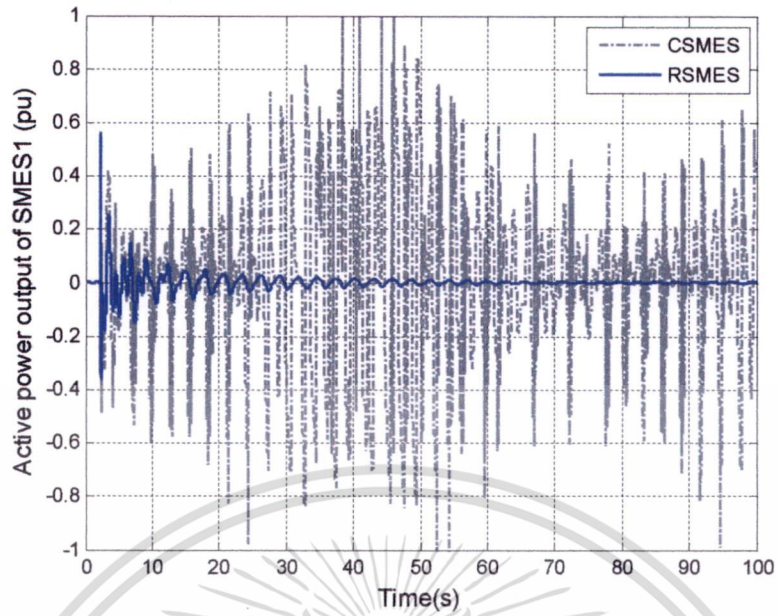


(ข) RSMES

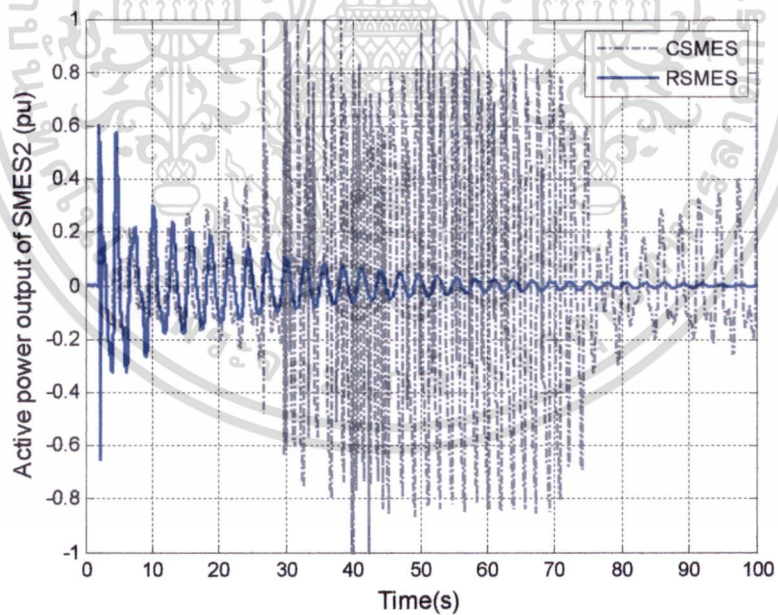
รูปที่ 5.15 ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วเครื่องกำเนิดทั้งหกพื้นที่ในกรณีที่ 4 :

(ก) CSMES และ (ข) RSMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



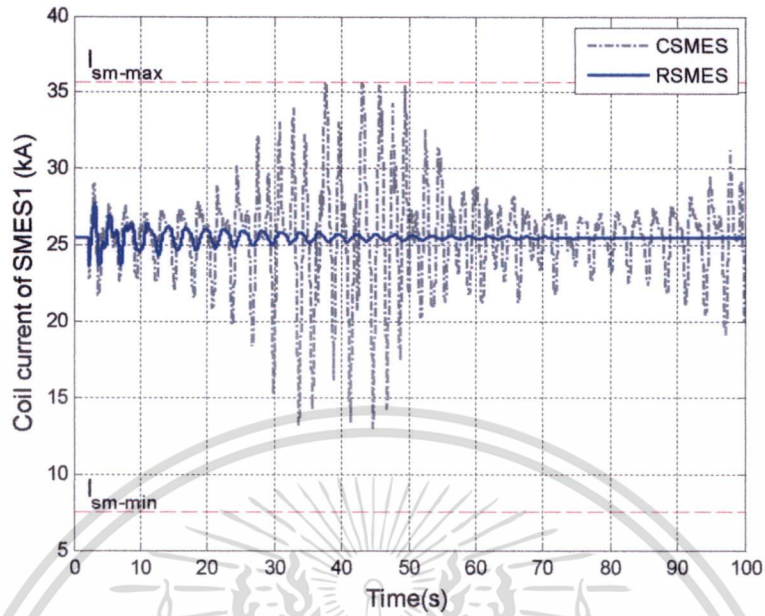
(ก) SMES 1



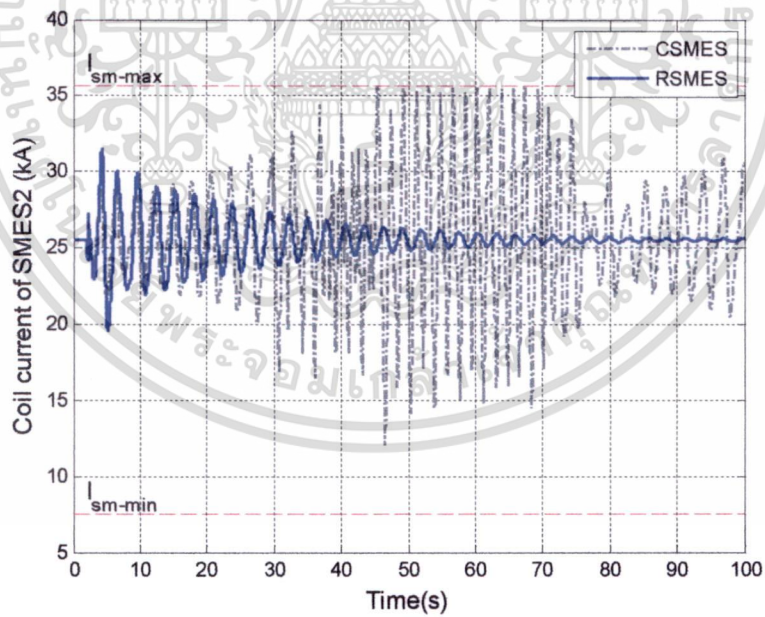
(ข) SMES 2

รูปที่ 5.16 กำลังไฟฟ้าจริงด้านออกของ SMES ทั้งสองตัวในกรณีที่ 4 :  
(ก) SMES 1 และ (ข) SMES 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) SMES 1



(ข) SMES 2

รูปที่ 5.17 ปริมาณกระแสด้านออกของ SMES ทั้งสองตัวในกรณีที่ 4 :

(ก) SMES 1 และ (ข) SMES 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.16 แสดงรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าจริงด้านออกของ SMES1 และ SMES2 ที่เกิดขึ้นในกรณี ที่ 4 จะสังเกตเห็นว่า CSMES ไม่สามารถควบคุมการส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังได้อีกต่อไป ในขณะที่ RSMES ยังคงสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีจนระบบเข้าสู่สภาวะปกติ ส่วนรูปที่ 5.17 เป็น รูปของกระแสในขดลวดตัวนำยิ่งยวด จะพบว่าปริมาณกระแสในขดลวดกรณี CSMES จะแกว่งอย่าง รุนแรงและมีค่าสูงจนถึงค่าขอบเขตกระแสสูงสุด แต่กรณี RSMES ปริมาณกระแสในขดลวดจะแกว่ง ในช่วงแรกแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในที่สุดอีกทั้งปริมาณกระแสในขดลวดมีค่าไม่เกินขอบเขตค่าต่ำสุด และสูงสุดที่กำหนดไว้ นั่นแสดงให้เห็นว่า CSMES เสียเสถียรภาพในการควบคุมระบบแต่ RSMES ยังคงรักษาเสถียรภาพการทำงานของระบบไว้ได้

## 5.6 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมคงทนที่ควบคุมจากศูนย์กลางของตัวเก็บสะสม พลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาเวลาหน่วงจากการ สื่อสาร โดยการแทนความไม่แน่นอนจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานและเวลาหน่วงจากการ สื่อสารด้วยความไม่แน่นอนแบบไร้โครงสร้างแล้วทำการออกแบบ SMES ด้วยวิธีการทำให้เหมาะสม ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคงทน จากทดสอบ SMES ที่ออกแบบด้วย วิธีการที่นำเสนอกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดหกพื้นที่ทางภาคตะวันตกของประเทศไทยปูนจะพบว่า SMES ที่ออกแบบนั้นสามารถทำเสถียรภาพให้แก่ระบบได้เป็นอย่างดีโดยมีความคงทนต่อการ เปลี่ยนแปลงระบบ สภาวะการทำงานและเวลาหน่วงจากการสื่อสารในหลายๆสถานการณ์

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการทำเสถียรภาพโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะด้วยตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบตัวนำยิ่งยวด (SMES) ที่ออกแบบอย่างเหมาะสม โดยแยกพิจารณาปัญหาออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริด การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยง และการทำเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังชนิดพื้นที่กว้างโดยพิจารณาผลกระทบของเวลาหน่วงจากการสื่อสาร สำหรับการแก้ไขปัญหาค่าต่ำสุดโดยมีขนาดความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อให้ SMES ที่ออกแบบมีต้นทุนการผลิตต่ำแต่ยังคงประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีเมื่อเทียบกับ SMES ที่มีขนาดความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นใหญ่กว่า สำหรับการทำให้เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาผลกระทบจากเวลาการสื่อสารได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม SMES แบบคงทนด้วยวิธีการควบคุม  $H_\infty$  โดยจำลองความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบและเวลาหน่วงจากการสื่อสารด้วยความไม่แน่นอนชนิดไร้โครงสร้าง ในการออกแบบ SMES ด้วยวิธีที่นำเสนอได้นั้นได้สร้างเป็นสมการปัญหาค่าเหมาะสมแล้วทำการแก้ไขปัญหาโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค ทั้งนี้ได้กำหนดให้ตัวควบคุมมีโครงสร้างเฉพาะเจาะจงเพื่อให้ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES สามารถนำไปใช้งานได้ในทางปฏิบัติ ด้วยวิธีที่นำเสนอพอจะสรุปข้อดีได้ดังนี้

- การแทนแบบจำลองระบบด้วยสมการลดอันดับช่วยให้การคำนวณมีความรวดเร็วขึ้นแต่ยังคงให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องเมื่อเทียบกับการใช้สมการเต็มอันดับ
- การออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าและขนาดความจุของพลังงานสะสมตั้งต้นของ SMES ไปพร้อมๆกันนอกจากจะช่วยลดต้นทุนการสร้าง SMES แล้วยังทำให้ SMES ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีเมื่อเทียบกับ SMES ที่มีขนาดความจุของพลังงานตั้งต้นขนาดใหญ่กว่า
- โครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้ในการออกแบบเป็นโครงสร้างแบบพีไอหรือโครงสร้างแบบนำหน้า/ล่าหลังซึ่งเป็นโครงสร้างอย่างง่ายสามารถนำไปใช้งานได้ในทางปฏิบัติ
- การออกแบบ SMES ด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมช่วยลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ระบบลงได้ ในที่นี้ระบบที่ใช้ศึกษาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นแบบจำลองพลวัตที่มีหลายอันดับ ดังนั้นด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถออกแบบ SMES ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใกล้เคียงกับระบบจริงได้แม้ว่าจะมีความสลับซับซ้อน

เมื่อนำ SMES ที่ออกแบบตามวิธีที่นำเสนอไปทำเสถียรภาพให้แก่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะจะพบว่า SMES ที่ออกแบบไว้สามารถทำเสถียรภาพให้แก่ระบบได้เป็นอย่างดีและมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบ สภาวะการทำงานและพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีลักษณะแตกต่างกัน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

1. การออกแบบ SMES เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดและระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่เกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนต้องใช้ทั้งโปรแกรม Matlab และ Dymola ทำงานเชื่อมโยงกันทำให้เวลาในการจำลองการทำงานเนิ่นช้า ดังนั้นควรจะพัฒนาโปรแกรมให้สามารถจำลองการทำงานทั้งระบบบนโปรแกรม Matlab จะช่วยลดเวลาการประมวลผลได้
2. ควรพัฒนาแบบจำลองของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง
3. ควรพัฒนาแบบจำลองของ SMES ให้มีความใกล้เคียงกับ SMES ที่ใช้งานจริงจะช่วยให้การจำลองการทำงานใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น
4. ในการศึกษาปัญหาเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่กว้างที่พิจารณาเวลาหน่วงจากการสื่อสารควรจะพัฒนาโปรแกรมจำลองการทำงานเป็นระบบสัญญาณเวลาเต็มหน่วย (discrete-time system) จะทำให้การศึกษาใกล้เคียงกับระบบจริงมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [2] G. Rogers, *Power system oscillations*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000.
- [3] G. Anderson, P. Donalek, R. Farmer, N. Hatziaargyriou, I. Kamwa, P. Kundur, N. Martins, J. Paserba, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, R. Schulz, A. Stankovic, C. Taylor, V. Vittal, "Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 20, no. 4, pp.1922-1928, 2005.
- [4] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. (2004), **Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: Causes and recommendations** [Online]. Available: <http://www.nerc.com>.
- [5] S. Corsi and C. Sabelli, "General blackout in Italy Sunday September 28<sup>th</sup>, 2003, h 03:28:00," *Proceeding of IEEE PES General Meeting*, Denver, CO, 2004.
- [6] "Final report of the investigation committee on the 28 September 2003 blackout in Italy," UCTE, 2004.
- [7] S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and S. Kaitwanidvilai, "Coordinated SVC and AVR for robust voltage control in a hybrid wind-diesel system," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, Issue 12, pp. 2383-2393, 2010.
- [8] S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and S. Kaitwanidvilai, "Application of electrolyzer system to enhance frequency stabilization effect of microturbine in a microgrid system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, Issue 17, pp. 7131-7142, 2009.
- [9] Y. Chang, Z. Xu, G. Cheng and J. Xie, "A Novel SVC Supplementary Controller Based on Wide Area Signals," in *Proc. IEEE Conference*, pp.1-6, 2006.
- [10] C. Liu, R. Yokoyama, and V. Silva, "Optimal Allocation and Design of PSSs for Damping of Low-Frequency Oscillations in Multi-Regional Interconnected Power System," *Proceeding of IEEE PES Transmission and Distribution Conference*, 2005.
- [11] L. Fan, A. Feliachi, K. Schoder, "Selection and design of a TCSC control signal in damping power system inter-area oscillations for multiple operating conditions," *Electric Power Systems Research*, vol. 62, pp.127-137, 2002.
- [12] C. D. Schauder, L. Gyugyi, M. R. Lund, D. M. Hamai, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, A. Edris, "Operation of the unified power flow controller (UPFC) under practical constraints," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp.630-639, 1998.

- [13] D. S. Padimiti and B. H. Chowdhury, "Superconducting magnetic energy storage system (SMES) for improved dynamic system performance," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp.1–6, 2007.
- [14] P.F. Ribeiro, B.K. Johnson, M.L. Crow, A. Arsoy and Y. Liu, "Energy Storage Systems for Advanced Power Applications," *Proceeding of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp.1744-1756, 2001.
- [15] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol.5 pp. 78-94, 2007.
- [16] L. Wang, S. Chen, W. Lee and Z. Chen, "Dynamic Stability Enhancement and Power Flow Control of a Hybrid Wind and Marine-Current Farm Using SMES," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, pp.626-639, 2009.
- [17] M. G. Molina and P. E. Mercado, "Power Flow Stabilization and Control of Microgrid with Wind Generation by Superconducting Magnetic Energy Storage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 910-922, 2011.
- [18] T. Asao, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, M. Kubo, A. Kuwayama, T. Matsumoto, "Smoothing Control of Wind Power Generator Output by Superconducting Magnetic Energy Storage System," *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2007.
- [19] L. Wang, S. Chen, W. Lee and Z. Chen, "Design of a Damping Controller for a SMES Unit to Suppress Tie-Line Active-Power Fluctuations of a Large-Scale Wind Farm," *Power Systems Conference and Exposition*, pp.1-7, 2009.
- [20] S. Dechanupaprittha, K. Hongesombut, M. Watanabe, Y. Mitani, I. Ngamroo, "Stabilization of Tie-Line Power Flow by Robust SMES Controller for Interconnected Power System With Wind Farms," *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp.2365-2368, 2007.
- [21] M. Sheikh, S. M. Muyeen, R. Takahashi, T. Murata and J. Tamura, "Minimization of Fluctuations of Output Power and Terminal Voltage of Wind Generator by Using STATCOM/SMES," *IEEE Bucharest power tech conference*, pp.1-6, 2009.
- [22] D. Dotta, A. Silva, and I. C. Decker, "Wide-Area Measurements-Based Two-Level Control Design Considering Signal Transmission Delay," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 24, no. 1, pp.208-215, 2009.
- [23] H. Wu, K. S. Tsakalis, G. T. Heydt, "Evaluation of Time Delay Effects to Wide-Area Power System Stabilizer Design," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 19, no. 4, pp.1935-1941, 2004.
- [24] Y. Yuan, G. Li, L. Cheng, Y. Sun, J. Zhang, and P. Wang, "A phase compensator for SVC supplementary control to eliminate time delay by wide area signal input," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, pp.163–169, 2010.

- [25] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato and T. Funabashi, "A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp.406-414, 2005.
- [26] E. Chong and S.H. Zak, *An Introduction to Optimization*, John Wiley & Sons, 1996.
- [27] S. Skogestad and I. Postlethwaite, "Multivariable Feedback Control: Analysis and Design," 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley, 2005.
- [28] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," *IEEE Neural Networks*, vol. 4, pp.1942-1948, 1995.
- [29] M. Larsson, "ObjectStab – an educational tool for power system stability studies," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 19, no. 1, pp.56-63, 2004.
- [30] Available at: <<http://us.arevablog.com/2009/05/04/image-of-the-day/>>
- [31] Available at: <<http://www.thegreenitreview.com/2009/09/sprint-smart-grid-support.html>>
- [32] M. Glinkowski, J. Hou, G. Rackliffe, "Advances in Wind Energy Technologies in the Context of Smart Grid," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp.1083-1097, 2011.
- [33] M. Kezunovic, V Vittal, S. Meliopoulos, T. Mount, "The Big Picture: Smart Research for Large-Scale Integrated Smart Grid Solutions," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, no. 4, pp.22-34, 2012.
- [34] S. Nagaya, N. Hirano, M. Kondo, T. Tanaka, H. Nakabayashi, K. Shikimachi, S. Hanai, J. Inagaki, S. Ioka, and S. Kawashima, "Development and Performance Results of 5 MVA SMES for Bridging Instantaneous Voltage Dips," *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 14, no. 2, pp.699-704, 2004.
- [35] Available at: <<http://www.futurescience.com/manual/sc1000.html>>
- [36] S. Nagaya, N. Hirano, H. Moriguchi, K. Shikimachi, H. Nakabayashi, S. Hanai, J. Inagaki, S. Ioka, and S. Kawashima, "Field Test Results of the 5 MVA SMES System for Bridging Instantaneous Voltage Dips," *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 16, no. 2, pp.632-635, 2006.
- [37] M. H. Ali, B. Wu, and R. A. Dougal, "An overview of SMES applications in power and energy systems," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 1, no. 1, pp.38-47, 2010.
- [38] K. Yoshida et al., "Conceptual design of superconducting system for JT-60SA," *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 18, no. 2, pp.441-446, 2008.
- [39] H. Tsuji et al., "Progress of the ITER central solenoid model coil program," *Nuclear Fusion*, vol. 41, pp.645-651, 2001.

- [40] S. Nomura et al., "Technical and cost evaluation on SMES for electric power compensation," *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 20, no. 3, pp.1373-1378, 2010.
- [41] T. Ise, Y. Murakami, K. Tsuji, "Simultaneous active and reactive power control of superconducting magnetic energy storage to improve power system dynamic performance," *IEEE Transaction on Power Deliv.*, vol. 1, no. 1, pp.143-150, 1986.
- [42] N. Martin and L.T.G. Lima, "Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillation in large power systems," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 5, no. 4, pp.1455-1469, 1990.
- [43] C.J. Wu, Y.S. Lee, "Application of superconducting magnetic energy storage unit to improve the damping of synchronous generator," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 6, no. 4, pp.573-578, 1991.
- [44] Available at: <<http://pixdaus.com/swarm/items/tag/swarm/>>
- [45] Available at: <<http://www.earthweek.com/2008/ew080926/ew080926c.html>>
- [46] B. Birge, "PSOt - a particle swarm optimization toolbox for use with Matlab," in *Proc. Swarm Intelligence Symposium*, pp.182-186, 2003.
- [47] D. Hayashi, T. Senjyu, R. Sakamoto, N. Urasaki, T. Funabashi, H. Sekine, "Generating power leveling of renewable energy for small power system in isolated island," *Proc. IEEE Intel. Syst. Appli. to Power Syst. Int. Conf.*, pp.379-384, 2005.
- [48] X. Li, Y.J. Song, S. B. Han, "Study on Power Quality Control in Multiple Renewable Energy Hybrid MicroGrid System," *Power Tech Conf.*, pp.2000 - 2005, 2007.
- [49] I. Ngamroo, A.N. Cuk Supriyadi, S. Dechanupaprittha, Y. Mitani, "Power oscillation suppression by robust SMES in power system with large wind power penetration," *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, vol. 469, no. 1, pp.44-51, 2009.
- [50] H. Kume, *Statistical Methods for Quality Improvement*, AOTS publisher, 1989
- [51] Technical Committee of the Institute of Electrical Engineering of Japan (IEEJ). Japanese Power System Models. Available at :<http://www.iee.or.jp/pes/model/english/index.html>
- [52] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 1994.
- [53] A. Muhammad *et al.* (2011, August), "Comparison of wind farm aggregate models for transient stability studies," *Power Systems Computation Conf.* [Online]. Available: [http://www.pscc-central.org/uploads/tx\\_ethpublications/fp157\\_01.pdf](http://www.pscc-central.org/uploads/tx_ethpublications/fp157_01.pdf)

- [54] I. Ngamroo, C.S. Ali Nanda, S. Dechanupaprittha, M. Watanabe, Y. Mitani, "A robust SMES controller design for stabilization of inter-area oscillations based on wide area synchronized phasor measurements," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 12, pp. 1738-1749, 2009.
- [55] A.G. Phadke, J.S. Thorp, *Synchronized phasor measurements and their applications*, Springer, 2008.
- [56] B. Naduvathuparambil, M.C. Valenti, A. Feliachi, "Communication delays in wide area measurement systems," in *Proc. the 34th Southeastern Symposium on System Theory*, pp.118-122, 2002.
- [57] A.C. Antoulas, *Approximation of Large-Scale Dynamical Systems*, SIAM. Publications, 2005.
- [58] Y.L. Abdel-Magid and M.A. Abido, "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 18, no. 3, pp.1125-1132, 2003.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

## International Journal

1. 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, pp.5701504, 2012.
2. M. Saejia and I. Ngamroo, "Stabilization of Microgrid with Intermittent Renewable Energy Sources by SMES with Optimal Coil Size", *Physica C*, vol.471, pp.1385–1389, 2011.
3. M. Saejia and I. Ngamroo, "A Robust Centralized SMES Controller Design Based on WAMS Considering System and Communication Delay Uncertainties", *Electric Power Systems Research*, vol.81, pp. 846-852, 2010.

## International Conference

1. M. Saejia and I. Ngamroo, "Design of Robust Centralized PSS based on WAMS Considering System and Signal Transmission Delay Uncertainties", *Power and Energy Systems (AsiaPES)*, 2010.
2. M. Saejia and I. Ngamroo, "Wide Area Robust TCSC Controller Design Considering Communication Delay Uncertainty", *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pp. 996-1000, 2010.

# IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY

A PUBLICATION OF THE IEEE COUNCIL ON SUPERCONDUCTIVITY

JUNE 2012

VOLUME 22

NUMBER 3

ITASE9

(ISSN 1558-2515)

## THE TWENTY-SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNET TECHNOLOGY

Hosted by Parc Chanot,  
Marseille, France, September 12–16, 2011

MT-22—Conference Chairs* Introduction .....	<i>N. Mitchell</i>	0000201
MT-22—2011 Conference Organization .....		0100104
MT-22—2011 Technical Editors .....		0100104
MT-22—2011 Sponsors .....		0100104
MT-22—2011 Exhibitors .....		0100104
The IEEE Council on Superconductivity Awards for Contributions in the Field of Applied Superconductivity (2011) .....		0200102
MT-22—Obituary—Milan Polak .....		0300101
<b>PAPERS</b>		
<b>Superconducting RF</b>		
Magnetic Properties of Shielding Materials for Superconducting Cavities .....	<i>M. Masuzawa, A. Terashima, and K. Tsuchiya</i>	3500104
<b>Transportation and Levitation</b>		
A Study on the Loss in a Superconducting Magnet by the Control Current in a Hybrid Electro-Magnetic Suspension System .....	<i>Y. H. Kim, J. Y. Jang, H. C. Jo, S. Choi, J. B. Na, C. Y. Lee, J.-B. Song, H. Lee, T. K. Ko, and Y. J. Hwang</i>	3600105
A Study on the Shape of Iron-Core for a Hybrid Electro-Magnetic Suspension System .....	<i>Y. J. Hwang, J. Y. Jang, S. Choi, J. B. Na, H. C. Jo, C. Y. Lee, and T. K. Ko</i>	3600204
Levitation Force for Evaluation of the High Temperature Superconducting Maglev Vehicle Under Derailment .....	<i>D. H. Jiang, J. S. Wang, G. T. Ma, Y. Y. Xu, Q. X. Lin, J. Zheng, and S. Y. Wang</i>	3600304
Improvement of Magnetic Levitation Properties on Levitation System Using GdBCO Bulk Superconductors .....	<i>T. Takao, N. Tanoue, S. Kameyama, T. Doi, and H. Kamijo</i>	3600404
Design, Fabrication, and Operating Test of the Prototype HTS Electromagnet for EMS-Based Maglev .....	<i>C. Y. Lee, J. M. Jo, Y. J. Han, Y. D. Chung, Y. S. Yoon, S. Choi, Y. J. Hwang, H. C. Jo, J. Y. Jang, and T. K. Ko</i>	3600504
Effect of the Damper Coils on the Guideway Displacement in the Superconducting Magnetically Levitated Bogie .....	<i>S. Ohashi</i>	3600604
Levitation Performance of a Magnetized Bulk YBCO With Different Demagnetization Processes .....	<i>W. Liu, J. Wang, C. Ye, G. Ma, J. Zheng, and S. Wang</i>	3600704
Vibration Transmission Analysis on a Superconducting Seismic Isolation Device With PM and Copper Plate Systems .....	<i>S. Sasaki, K. Shimada, T. Katana, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, N. Kawai, and K. Yasui</i>	3600804



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Construction, Testing and Operation of a 1 MJ HTS Magnet at a 10.5 kV Superconducting Power Substation .....	5700504
..... J. Zhang, S. Dai, D. Zhang, Z. Wang, F. Zhang, N. Song, X. Xu, Z. Zhang, Z. Zhu, Z. Gao, L. Lin, and L. Xiao	
Experimental Investigation Into the Characteristics of Micro-SMES' Magnet .....	5700604
..... B. Wei, P. Chen, M. Qiu, H. Zhang, J. Zhu, Y. Yang, and X. Lai	
SMES Optimization for High Energy Densities .....	5700704
J. M. Rey, T. Lecrevisse, V. Reinbold, C. Trophime, X. Chaud, F. Debray, S. Semperger, M. Devaux, and C. Pes	
Control and Test of a 0.5 MVA/1 MJ SMES .....	5700804
W. Guo, L. Xiao, S. Dai, Q. Ren, G. Zhang, J. Zhang, N. Song, Z. Gao, Z. Zhu, Z. Zhang, Q. Qiu, L. Lin, and S. Guoliu	
Design of HTS Toroidal Magnets for a 5 MJ SMES .....	5700904
.. S. Lee, K.-P. Yi, S. H. Park, J.-K. Lee, W.-S. Kim, C. Park, J.-H. Bae, K.-C. Seong, I. Park, K. Choi, and S. Hahn	
A Study on Optimal Sizing of Superconducting Magnetic Energy Storage in Distribution Power System .....	5701004
..... B.-K. Kang, S.-T. Kim, B.-C. Sung, and J.-W. Park	
Transient Stability Analysis of SMES for Smart Grid With Vehicle-to-Grid Operation .....	5701105
..... D. Wu, K. T. Chau, C. Liu, S. Gao, and F. Li	
Power Compensation and Power Quality Improvement Based on Multiple-Channel Current Source Converter Fed	
HT SMES .....	5701204
Z. Wang, K. T. Chau, B. Yuwen, Z. Zhang, and F. Li	
Energy Function Based SMES Controller for Transient Stability Enhancement .....	5701304
J. Shi, Y. Tang, Y. Xia, L. Ren, J. Li, and F. Jiao	
The Beneficial Role of SMES Coil in DC Lines as an Energy Buffer for Integrating Large Scale Wind Power .....	5701404
..... T. Nam, J. W. Shim, and K. Hur	
Alleviation of Power Fluctuation in Interconnected Power Systems With Wind Farm by SMES With Optimal Coil	
Size .....	5701504
M. Saejia and I. Ngamroo	
Design Study of SMES System Cooled by Thermo-Siphon With Liquid Hydrogen for Effective use of Renewable	
Energy .....	5701604
T. Shintomi, Y. Makida, T. Hamajima, S. Tsuda, D. Miyagi, T. Takao, N. Tanoue, N. Ota, K. Munakata, and Y. Miwa	
Application of SMES and Fuel Cell System Combined With Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy	
Control .....	5701704
T. Hamajima, H. Amata, T. Iwasaki, N. Atomura, M. Tsuda, D. Miyagi, T. Shintomi, Y. Makida, T. Takao, K. Munakata, and M. Kajiwara	
SMES Control for Power Grid Integrating Renewable Generation and Electric Vehicles .....	5701804
S. Gao, K. T. Chau, C. Liu, D. Wu, and J. Li	
Compensation for the Power Fluctuation of the Large Scale Wind Farm Using Hybrid Energy Storage Applications ..	
..... H. Lee, B. Y. Shin, S. Han, S. Jung, B. Park, and G. Jang	5701904
<b>Transportation</b>	
A Measurement of HTS Cable Power Loss in a Sweeping Magnetic Field .....	5800105
..... H. Piekarz, S. Hays, J. Blowers, and V. Shiltsev	
New HTS 2G Round Wires .....	5800204
C. E. Bruzek, A. Allais, S. Morice, C.-F. Theune, S. Petit, M. Mikolajczyk, N. Dechoux, C. Jimenez, E. Sarigiannidou, L. Porcar, J.-L. Soubeyroux, P. Odier, and T. Waeckerle	
Study of AC Losses in a 1-m Long, HTS Power Cable Made From Wide 2G Tapes .....	5800304
J. Voccio, J.-H. Kim, and S. Pamidi	
Development of a 10 kA HTS DC Power Cable .....	5800404
L. Xiao, S. Dai, L. Lin, Y. Teng, H. Zhang, X. Liang, Z. Gao, D. Zhang, N. Song, Z. Zhu, F. Zhang, Z. Zhang, X. Li, Z. Cao, X. Xu, W. Zhou, and Y. Lin	
Design of a Termination for the HTS Power Cable .....	5800504
L. Ren, Y. Tang, J. Shi, and F. Jiao	
Current Margin of 66 kV Class HTS Power Cable Against Fault Current .....	5800604
X. Wang, K. Kojima, M. Kanemitsu, A. Ishiyama, M. Ohya, K. Ohmatsu, O. Maruyama, and T. Ohkuma	
Expanded Adoption of HTS Cables in a Metropolitan Area and its Potential Impact on the Neighboring Electric	
Power Grid .....	5800704
H. J. Kim and K. Hur	
Installation and Power Grid Demonstration of a 22.9kV, 50 MVA, High Temperature Superconducting Cable for	
KEPCO .....	5800804
S.-H. Sohn, H.-S. Yang, J.-H. Lim, S.-R. Oh, S.-W. Yim, S.-K. Lee, H.-M. Jang, and S.-D. Hwang	
Overcurrent Tests and Numerical Simulations on a 66-kV-Class RE123 High-Temperature Superconducting Model	
Cable .....	5800904
X. Wang, A. Ishiyama, M. Ohya, O. Maruyama, and T. Ohkuma	
Current Margin of 275 KV Class HTS Power Cable With Joint Against Fault Current .....	5801004
X. Wang, Y. Kamiya, A. Ishiyama, M. Yagi, O. Maruyama, and T. Ohkuma	
Electrical Characteristics of 2G HTS Tapes Under DC Current With AC Ripple .....	5801104
J.-H. Kim and S. Pamidi	
Harmonic Current Based Loss Characteristics Analysis of HTS DC Model Cable Using Calorimetric Method .....	5801204
S.-K. Kim, S. Kim, J.-G. Kim, M. Park, I.-K. Yu, Y. H. Choi, and H. Lee	
Loss Characteristic Analysis of HTS DC Power Cable Using LCC Based DC Transmission System .....	5801304
J.-G. Kim, S.-K. Kim, M. Park, I.-K. Yu, H. Lee, Y.-G. Kim, H.-M. Kim, Y.-J. Won, K.-W. Jeong, and B. Yang	
<b>Niobium-Based Wires and Tapes</b>	
First Performance Test of Ceramic-insulated Nb <sub>3</sub> Sn Conductors .....	6000104
..... E. Rochepault, W. M. de Rapper, P. Vadrine, F. Rondeaux, and F. Bouillault	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Alleviation of Power Fluctuation in Interconnected Power Systems With Wind Farm by SMES With Optimal Coil Size

Mongkol Saejia and Issarachai Ngamroo

**Abstract**—The large penetration of wind power into interconnected power systems causes the severe power fluctuation in tie-lines. To alleviate power fluctuation, the superconducting magnetic energy storage (SMES) can be applied. Nevertheless, the installation of SMES is quite costly. Especially, the superconducting coil size which is the vital part of SMES, must be carefully specified. This paper proposes a new optimization technique of power controller parameters and coil sizes of multiple SMES units for alleviation of tie-line power fluctuation in interconnected power systems with wind farms. The structure of active and reactive power controllers of SMES is the proportional-integral (PI). Based on the minimization of the variance of tie-line power fluctuation and the initial stored energy of a SMES unit, the optimal PI parameters and coil size can be automatically tuned by a particle swarm optimization. Simulation study in the West Japan interconnected systems confirms that the proposed SMES with optimal coil size is able to effectively and robustly suppress power fluctuation against various wind power patterns and heavy power flow levels.

**Index Terms**—Particle swarm optimization, power fluctuation, superconducting magnetic energy storage, wind power.

## I. INTRODUCTION

RECENTLY, the wind power penetration into power systems has considerably increased, because wind energy is clean, inexhaustible, and eco-friendly. However, the wind power generation may cause power fluctuation in tie-lines and eventually system instability. To alleviate power fluctuation, a superconducting magnetic energy storage (SMES) unit, which is able to exchange active and reactive powers rapidly with the power systems, has been successfully applied [1]. Nevertheless, the installation cost of SMES is very high. Especially, the superconducting coil should be suitably selected. In [1], the selection of suitable coil size has not been taken into account in the design of SMES power controllers. This cannot guarantee the optimal coil size of SMES. A SMES unit with optimal coil size which provides satisfactory stabilizing effect, is highly expected.

This paper presents a new optimization technique of multiple SMES units with optimal coil sizes for alleviation of power fluctuation in interconnected power systems with wind farms. The

Manuscript received September 07, 2011; accepted November 29, 2011. Date of publication December 09, 2011; date of current version May 24, 2012. 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: samongkol@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.2011.2178984

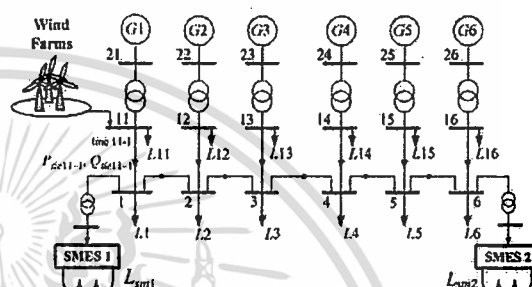


Fig. 1. Six-area interconnected power system with wind farms and SMESs.

proportional-integral (PI) structure is used for active and reactive power controllers of SMES. The PI control parameters and the coil size are optimized so that the variance of power fluctuation in tie-lines and the initial stored energy in a SMES coil are minimal. Simulation studies in the six-area interconnected power system with wind farms under different patterns of wind power and power flow levels are carried out to verify the stabilizing effect of the SMES with optimal coil size in comparison with the SMES with large coil size.

## II. STUDY SYSTEM AND MODELING

### A. Study System

Fig. 1 shows the 60 Hz six-area interconnected power system of Western Japan [2]. The area capacity ratio of areas 1 to 6 ( $G1, G2, \dots, G6$ ) is 20:13:7:40:7:33. Each area is represented by the 5th-order generator model equipped with the 1st-order exciter and governor [3]. The wind farms are located in area 1 and have the maximum generation capacity of 500 MW. This results in the power fluctuation in tie-lines. The wind farms consist of several different sizes and types. Due to the number of wind turbines and the inertia of the rotating wings, the wind turbines with same characteristic can be sorted. It is assumed that all sorted wind turbines receive the same wind speed or an average speed. Therefore, all wind turbines can be modeled by a single equivalent wind turbine or a single average active power source [4]. To suppress the power fluctuation, two SMES units are installed at bus 1 and bus 6 [1]. Each SMES has a specification as follows: 10 H of coil inductance, 800 MJ of energy capacity, 40 kA of rated coil current, and 1,000 MVA of apparent power capacity [1]. The SMES with 10 H coil size will be compared with the proposed SMES with optimal coil size.

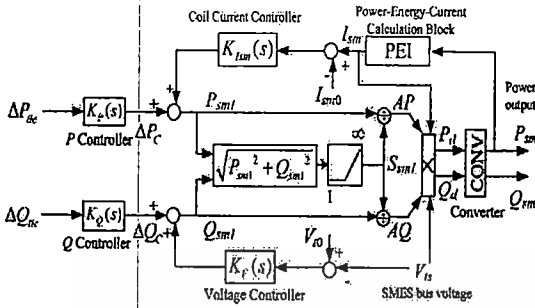


Fig. 2. SMES model with active and reactive controllers.

### B. SMES Control Scheme

Fig. 2 shows the SMES model with active and reactive power ( $P-Q$ ) controls. In the model,  $K_{P_i}(s)$  and  $K_{Q_i}(s)$  are the  $P$  and  $Q$  controllers of SMES $_i$  ( $i = 1, 2$ ) which are represented by PI controller as

$$K_{P_i}(s) = K_{P_{C_i}} \left( 1 + \frac{1}{T_{P_i}s} \right) \quad (1)$$

$$K_{Q_i}(s) = K_{Q_{C_i}} \left( 1 + \frac{1}{T_{Q_i}s} \right) \quad (2)$$

where,  $K_{P_{C_i}}$  and  $K_{Q_{C_i}}$  are proportional gains,  $T_{P_i}$  and  $T_{Q_i}$  are integral gains. The input signals of  $P$  and  $Q$  controllers of SMES1 and SMES2 are active power deviation ( $\Delta P_{tie}$ ) and reactive power deviation ( $\Delta Q_{tie}$ ) in a tie-line from bus 11 to bus 1 (line 11-1) and from bus 16 to bus 6, respectively.

In this model, the effect of the SMES coil current ( $I_{sm}$ ) is considered, since the dynamic behavior of  $I_{sm}$  significantly affects the overall performance of SMES. As shown in Fig. 2, the coil current controller ( $K_{I_{sm}}(s)$ ) can be expressed by

$$K_{I_{sm}}(s) = (K_{P_R} + 1/(T_I s)) K_{sm}(I_{sm} - I_{sm0}) \quad (3)$$

where,  $I_{sm0}$  is the initial coil current or the reference value for the close loop control of  $I_{sm}$ ,  $K_{P_R}$  and  $K_{sm}$  are controller gains, and  $T_I$  is a time constant. Both  $I_{sm}$  and  $I_{sm0}$  are the per unit value.  $I_{sm}$  is controlled to be equal to  $I_{sm0}$  by  $K_{I_{sm}}(s)$ .  $I_{sm0}$  also implies that the SMES has already an initial stored energy in the coil. In practice,  $I_{sm}$  can be measured directly. Besides,  $I_{sm}$  is not allowed to reach zero to prevent the possibility of discontinuous conduction under unexpected disturbances. On the contrary, high  $I_{sm}$  which is above the maximum allowable limit, may lead to loss of superconducting properties. Based on the hardware operational constraints, the lower and upper coil current limits are considered and assigned as  $0.30 I_{sm0}$  and  $1.38 I_{sm0}$ , respectively [1]. Here,  $I_{sm}$  can be calculated from the Power-Energy-Current (PEI) block which has a relation as

$$I_{sm} = \sqrt{I_{sm0}^2 - \frac{2E_{out}}{L_{sm} I_{sm,base}^2}} \quad (4)$$

$$E_{out} = \int P_{sm} dt \cdot S_{sm,base} \quad (5)$$

where,  $L_{sm}$  is the SMES coil inductance (H),  $E_{out}$  is the instantaneous energy output (J),  $P_{sm}$  is the active power output (pu),  $S_{sm,base}$  and  $I_{sm,base}$  are the SMES MVA capacity and

the SMES rated current (A), respectively. Note that,  $S_{sm,base}$  and  $I_{sm,base}$  which are equal to 1000 MVA and 40 kA respectively, are selected as the MVA base and the current base of the power system. Using (4), the energy stored in a SMES unit  $E_{sm}$  (J) and the initial energy stored  $E_{sm0}$  (J) can be determined by

$$E_{sm} = E_{sm0} - E_{out} \quad (6)$$

$$E_{sm0} = 0.5 L_{sm} I_{sm0-act}^2 \quad (7)$$

where,  $I_{sm0-act} (= I_{sm0} \times I_{sm,base})$  is the actual value of the initial coil current (A). Besides, the voltage controller is

$$K_V(s) = K_{V_{sm}}(V_{i0} - V_{is}) \quad (8)$$

where,  $K_{V_{sm}}$  is the gain,  $V_{i0}$  and  $V_{is}$  are the reference and the actual voltages at the SMES bus, respectively. The desired active and reactive powers ( $P_d$  and  $Q_d$ ) can be calculated by

$$P_d = V_{is} I_{sm} AP \quad (9)$$

$$Q_d = V_{is} I_{sm} AQ \quad (10)$$

where,  $V_{is} I_{sm}$  is the estimated apparent power output,  $AP$  and  $AQ$  are the active power fraction and reactive power fraction, respectively. Note that,  $AP$  is achieved by the combined output signals from the control loops of coil current and active power while  $AQ$  is obtained by the combined output signals from the control loops of terminal voltage and reactive power. In Fig. 2,  $P_{sm}$  and  $Q_{sm}$  are the power outputs of the SMES converter ( $CONV$ ). The converter transfer function with time constant  $T_c$  can be represented by

$$CONV = 1/(1 + T_c s) \quad (11)$$

For each SMES unit, the PI parameters in (1) and (2),  $L_{sm}$  and  $I_{sm0-act}$  in (7) are tuned by the proposed optimization.

### III. PROPOSED PARAMETERS OPTIMIZATION

The objectives of parameters optimization are as follows.

- 1) To achieve the sufficient initial stored energy in the SMES coil. The values of  $L_{sm}$  and  $I_{sm0-act}$  in (7) are optimized so that the initial stored energy is minimal and sufficient for alleviating the power fluctuation.
- 2) To attain the satisfactory stabilizing effect of SMES. If the variance of power fluctuation in the line 11-1 is minimized, the power fluctuation will be alleviated. The variance ( $Var$ ) of time series data  $x$  is defined by [5]

$$Var\{x\} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (12)$$

where,  $n$  is the number of data,  $x_i$  is the time series data of active and reactive power flows in the line 11-1 ( $P_{tie11-1}$  and  $Q_{tie11-1}$ ),  $\bar{x}$  is the average value of the data, and  $i$  is the counter. Accordingly, the multi-objective optimization problem can be expressed as

$$\text{Minimize} \quad \frac{1}{2} L_{sm1} I_{sm0-act1}^2 + \frac{1}{2} L_{sm2} I_{sm0-act2}^2 + Var\{P_{tie11-1}\} + Var\{Q_{tie11-1}\}$$

subject to

- (a)  $1 < K_{P_{C_i}} < 20$ ,  $1 < T_{P_i} < 30$ , (Range of control parameters)
- (b)  $1 < K_{Q_{C_i}} < 20$ ,  $1 < T_{Q_i} < 30$ , (Range of control parameters)

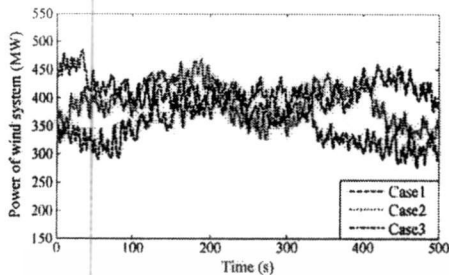


Fig. 3. Patterns of wind power generation.

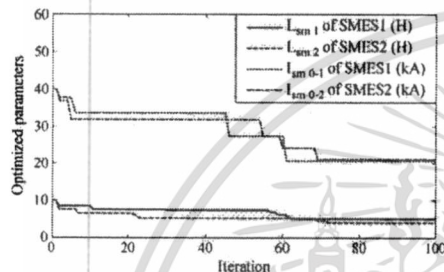


Fig. 4. Convergence curves of optimized parameters.

- (c)  $1 < L_{smi} < 10$  H, (Range of coil inductance)  
 (c)  $4 < I_{sm0-i} < 40$  kA, (Range of initial coil current),  $i = 1, 2$

(13)

where,  $L_{smi}$  is the coil inductance of SMES $i$  and  $I_{sm0-i}$  is the initial coil current of SMES $i$ . In (13), the first and second terms represent the initial stored energy of SMES1 and SMES2, respectively. The third and fourth terms are the variance of active and reactive power flows in the line 11-1, respectively. The particle swarm optimization [6] is used to solve for all optimal parameters in (13).

#### IV. SIMULATION STUDY

The constant values of the SMES model in Fig. 2 are given as  $K_{PR} = 40$ ,  $T_I = 0.4$ ,  $K_{sm} = 1$ ,  $K_{V_{sm}} = 10$ ,  $T_c = 0.01$ , and  $V_{t0} = 0.95$  pu. The parameters optimization is carried out when  $P_{tie11-1} = 2.5$  pu and the wind power case 1 as shown in Fig. 3 is applied to the system. Fig. 4 shows the convergence curve of optimized parameters. Here, the SMES with optimal coil size is compared with the SMES with  $L_{sm} = 10$  H and  $I_{sm0} = 25.51$  kA [1] which is optimized by the third and fourth terms in (13), and constraints (a) and (b). Consequently, the optimized results are given in Table I. After optimization, both  $L_{smi}$  and  $I_{sm0-i}$  of SMES with optimal coil size are less than those of SMES with 10 H. This indicates that the lower initial stored energy is required for SMES with optimal coil size.

The stabilizing effect of the SMES with optimal coil size is evaluated under three cases of wind power pattern as illustrated in Fig. 3 and  $P_{tie11-1} = 2.5$  pu. Fig. 5 depicts the power deviation in the line 11-1 for wind power case 1. Without SMES, the power flow severely fluctuates. On the other hand, a SMES unit with either optimal coil size or 10 H coil size can suppress power fluctuation considerably. The stabilizing effect of the SMES with optimal coil size is almost the same as the SMES with 10

TABLE I  
OPTIMIZED PARAMETERS RESULT

Type of SMES	Optimized Parameters	
SMES with 10H coil size	$K_{P1}(s) = 4.2370(1 + (1/18.5113s))$	
	$K_{Q1}(s) = 9.0487(1 + (1/19.5087s))$	
	$I_{sm1} = 10$ H, $I_{sm0-1} = 25.51$ kA	
	$K_{P2}(s) = 8.2029(1 + (1/17.4434s))$	
SMES with optimal coil size	$K_{Q2}(s) = 4.1099(1 + (1/16.0563s))$	
	$I_{sm2} = 10$ H, $I_{sm0-2} = 25.51$ kA	
	$K_{P1}(s) = 7.1464(1 + (1/12.5386s))$	
	$K_{Q1}(s) = 7.0749(1 + (1/23.7185s))$	
SMES with optimal coil size	$I_{sm1} = 4.98$ H, $I_{sm0-1} = 20.64$ kA	
	$K_{P2}(s) = 12.3548(1 + (1/15.8625s))$	
	SMES2	$K_{Q2}(s) = 5.1728(1 + (1/20.3887s))$
		$I_{sm2} = 3.85$ H, $I_{sm0-2} = 21.04$ kA

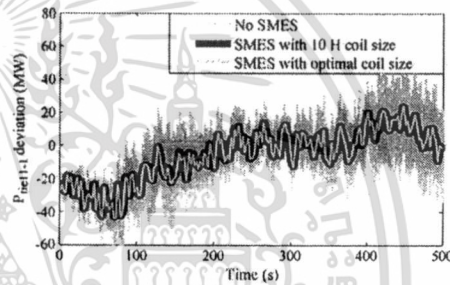


Fig. 5. Active power deviation in the line 11-1 for wind power case 1.

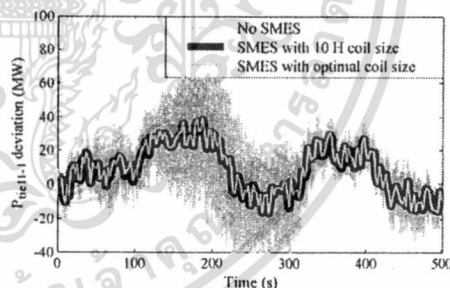


Fig. 6. Active power deviation in the line 11-1 for wind power case 2.

H coil size. For wind power cases 2 as depicted in Fig. 6, the stabilizing effect of the SMES with optimal coil size is hardly different from the SMES with 10 H coil size.

Figs. 7 and 8 show the coil current deviation ( $I_{sm-i} - I_{sm0-i}$ ,  $i = 1, 2$ ) for wind power case 2 of SMES1 and SMES2, respectively. Clearly, the coil current deviation of SMES with optimal coil size is larger than that of SMES with 10 H coil size. This is due to the fact that the SMES with a smaller coil size has to exchange the larger amount electrical energy with the system.

Fig. 9 illustrates the distribution function [5] of  $P_{tie11-1}$  for wind power case 2. The distribution functions of SMES with 10 H and optimal coil size are almost identical. On the contrary, the distribution function in case of no SMES has a lower peak and spreads out from its mean value farther than those of both

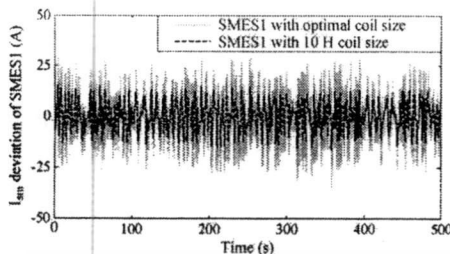


Fig. 7. Coil current deviation of SMES1 for wind power case 2.

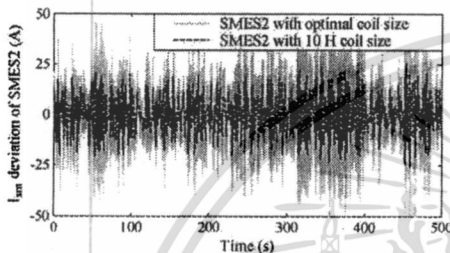
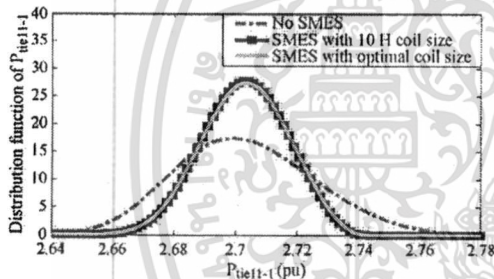
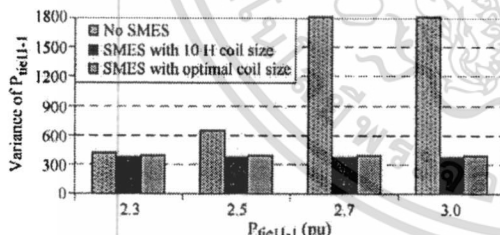


Fig. 8. Coil current deviation of SMES2 for wind power case 2.

Fig. 9. Distribution function of  $P_{tie11-1}$  for wind power case 2.Fig. 10. Variance of  $P_{tie11-1}$  for wind power case 3.

SMES cases. This signifies that the spread of power fluctuation from its mean value in case of SMES with 10 H and optimal coil size is lower than that of no SMES.

Finally, the variance of  $P_{tie11-1}$  for wind power case 3 when the initial  $P_{tie11-1}$  gradually increases, is shown in Fig. 10. Without SMES, the variance dramatically increases. On the other hand, the variances of SMES with 10 H and optimal coil size hardly change. This implies that the SMES with optimal coil size is very robust against the heavy power flow levels, like the SMES with 10 H coil size.

Although the initial energy storage values of the optimized SMES (0.852 GJ + 1.061 GJ) in Table I is very high, the implementation of such storage level is possible for nowadays technology. As an example, the total energy stored in the magnet of the Large Hadron Collider (LHC) which is the world's largest and highest energy particle accelerator developed by the European Organization for Nuclear Research (CERN) [7], is 10 GJ. In addition, the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) plans to complete the JT-60SA [8] and ITER-CS [9] projects of superconducting coil with stored energy of 1.5 GJ and 6 GJ in 2014 and 2015, respectively.

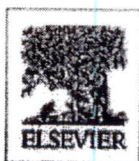
For the costs of SMES, they are estimated as 1970 USD/kWh in the 100 MW/500 kWh SMES case [10]. These costs include capital cost and operating cost for 30 years. If the 1 GWh class SMES system is composed of several middle class SMES systems, the capital cost of SMES can be reduced by the effect of mass production. Moreover, the SMES can be applied to solve other power system problems such as frequency control, power quality, load fluctuation, and load leveling etc. Accordingly, the proposed SMES with optimal coil size is very challenge for practical realization.

## V. CONCLUSION

A new optimization technique of multiple SMES units with optimal coil sizes for alleviation of power fluctuation in interconnected power systems with wind farms has been presented. The optimal control parameters and coil sizes of SMES units can be achieved based on the minimization of a variance of power fluctuation and an initial stored energy in a SMES coil. Simulation results clearly confirm the control effect of the SMES with optimal coil size. The proposed optimization not only creates a practical controller with high performance for SMES, but also makes a SMES unit more economical. A SMES unit optimized by the proposed method can be expected as the smart storage device to handle the large wind power penetration into the future power grid.

## REFERENCES

- [1] S. Dechanupaprittha *et al.*, "Stabilization of tie-line power flow by robust SMES controller for interconnected power system with wind farms," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 2365–2368, Jun. 2007.
- [2] Technical Committee of the Institute of Electrical Engineering of Japan (IEEJ), "Japanese power system models," [Online]. Available: <http://www.iee.or.jp/pcs/model/english/index.html>
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw Hill, 1994.
- [4] A. Muhammad *et al.*, "Comparison of wind farm aggregate models for transient stability studies," in *Proc. Power Syst. Comput. Conf.*, Aug. 2011 [Online]. Available: [http://www.pssc-central.org/uploads/tx\\_ethpublications/tp157\\_01.pdf](http://www.pssc-central.org/uploads/tx_ethpublications/tp157_01.pdf)
- [5] H. Kume, *Statistical Methods for Quality Improvement*. Tokyo, Japan: AOTS, 1989.
- [6] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948.
- [7] [Online]. Available: <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>
- [8] K. Yoshida *et al.*, "Conceptual design of superconducting system for JT-60SA," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, pp. 441–446, Jun. 2008.
- [9] H. Tsuji *et al.*, "Progress of the ITER central solenoid model coil program," *Nuclear Fusion*, vol. 41, pp. 645–651, May 2001.
- [10] S. Nomura *et al.*, "Technical and cost evaluation on SMES for electric power compensation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, pp. 1373–1378, Jun. 2010.



Volume 471, Issues 21–22, November 2011

ISSN 0921-4534

# PHYSICA

# C

## SUPERCONDUCTIVITY AND ITS APPLICATIONS


 I-S 2010

 Proceedings of the 23rd International Symposium on  
Superconductivity (ISS 2010)

### Advances in Superconductivity XXIII

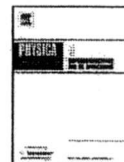
 Tsukuba International Congress Center  
Tsukuba, Japan  
November 1–3, 2010

Guest Editors:

 Atsushi Ishiyama  
Koichi Nakao

 Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
**SciVerse ScienceDirect**
<http://www.elsevier.com/locate/physc>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Stabilization of microgrid with intermittent renewable energy sources by SMES with optimal coil size

M. Saejia \*, I. Ngamroo

School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Available online 14 May 2011

#### Keywords:

Superconducting magnetic energy storage  
Microgrid  
Renewable energy sources  
Particle swarm optimization

### ABSTRACT

It is well known that the superconducting coil is the vital part of a superconducting magnetic energy storage (SMES) unit. This paper deals with the power controller design of a SMES unit with an optimal coil size for stabilization of an isolated microgrid. The study microgrid consists of renewable energy sources with intermittent power outputs i.e., wind and photovoltaic. Since power generations from such renewable sources are unpredictable and variable, these result in power fluctuations in a microgrid. To stabilize power fluctuations, a SMES unit with a fast control of active and reactive power can be applied. The structure of a power controller is the practical proportional-integral (PI). Based on the minimization of the variance of power fluctuations from renewable sources as well as the initial stored energy of SMES, the optimal PI parameters and coil size are automatically and simultaneously tuned by a particle swarm optimization. Simulation studies show that the proposed SMES controller with an optimal coil size is able to effectively alleviate power fluctuations under various power patterns from intermittent renewable sources.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

Nowadays, the international community recognizes the critical problem of energy shortage and global warming. Therefore, many countries endeavor to utilize environmental friendly renewable energy sources, such as sunlight, wind and geothermal heat for electric power generations. Such renewable sources are suitable for power generations in the remote areas which are not connected to the utility grid. Particularly, wind and photovoltaic (PV) power generations are considered economically for supply of electrical energy to a small isolated power system or a microgrid [1] where the wind speed is considerable and the solar irradiation has a good level [2].

However, wind and PV are very intermittent in nature. The power generations from wind and PV may cause a serious problem of power fluctuations in a microgrid [3]. To alleviate power fluctuations, a superconducting magnetic energy storage (SMES) unit, which is able to supply/absorb active power and reactive power rapidly, can be applied [4]. Nevertheless, the installation cost of SMES is very high. Especially, the superconducting coil size which is the important part of SMES, should be suitably selected. A SMES unit with an optimal coil size which provides satisfactory stabilizing effect, is highly expected.

This paper proposes a new power controller design of a SMES unit with an optimal coil size for stabilization of power fluctuations in a microgrid included with intermittent wind and PV power generations. The structure of a power controller is the practical proportional-integral (PI). Based on the minimization of the initial stored energy of SMES and the variance of power fluctuations generated from wind and PV, the PI controller parameters and the optimal coil size of a SMES unit can be automatically tuned by a particle swarm optimization (PSO) [5]. Simulation studies under various patterns of wind and PV power are carried out to verify the stabilizing effect of the designed SMES with an optimal coil size in comparison with the SMES with a large coil size.

### 2. Study system and modeling

The study microgrid system in Fig. 1 consists of a 20 MVA diesel generator, a 4 MVA wind power, a 1 MVA PV, and a 10 MW load [6]. In general, the power capacity of all sources is designed to be greater than the load power. Under any operating conditions, the load power may vary below the maximum capacity. The diesel generator which is a synchronous generator is represented by a 3rd-order model. It is equipped with a simplified 1st-order automatic voltage regulator and a governor. The wind and PV power generations at bus B3 are modeled by the random active power source [3]. In order to alleviate power fluctuations from wind and PV, a SMES unit is installed at bus B3. Fig. 2 shows a SMES

\* Corresponding author. Tel./fax: +66 2329 8330.

E-mail address: [samongkol@gmail.com](mailto:samongkol@gmail.com) (M. Saejia).

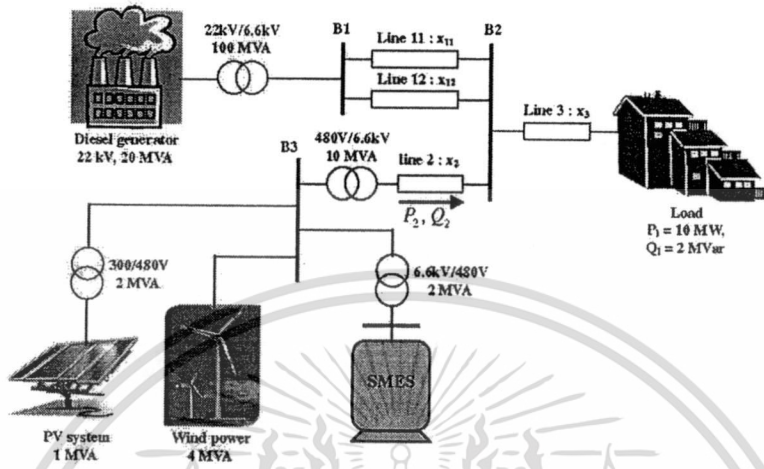


Fig. 1. A study microgrid system.

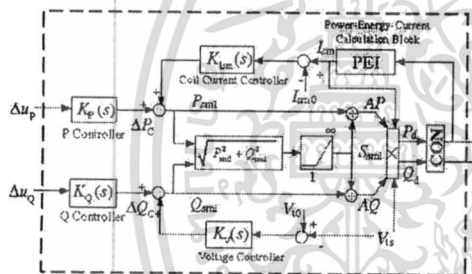


Fig. 2. SMES control scheme.

model with a simultaneous active and reactive power modulation control scheme [7].

In the model,  $K_p(s)$  and  $K_q(s)$  are active and reactive power controllers, respectively, which are represented by a PI controller as

$$K_p(s) = K_{pp} \left( 1 + \frac{1}{T_{ip}s} \right) \tag{1}$$

$$K_q(s) = K_{pq} \left( 1 + \frac{1}{T_{iq}s} \right) \tag{2}$$

where  $K_{pp}$  and  $K_{pq}$  are proportional gains of active power controller (P controller) and reactive power controller (Q controller), respectively;  $T_{ip}$  and  $T_{iq}$  are integral gains of P and Q power controllers, respectively. The input signals of P and Q controllers are active and reactive power deviations in the line 2, respectively.

As shown in Fig. 2,  $K_{ism}(s)$  which is the SMES coil current controller, can be represented by

$$K_{ism}(s) = \left( K_{pr} + \frac{1}{T_{is}} \right) K_{sm} (I_{sm} - I_{sm0}) \tag{3}$$

where  $K_{pr}$  is the proportional gain;  $T_{is}$  is the integral gain;  $K_{sm}$  is a SMES coil controller gain;  $I_{sm}$  is a SMES coil currents (per unit pu);  $I_{sm0}$  is an initial value of SMES coil currents (pu). In the SMES model, the effect of  $I_{sm}$  is considered, since the dynamic behavior of  $I_{sm}$  significantly affects the overall performance of SMES. In practice,  $I_{sm}$  is not allowed to reach zero to prevent the possibility of discontinuous conduction under unexpected disturbances. On the

other hand, high  $I_{sm}$  which is above the maximum allowable limit, may lead to loss of superconducting properties. Based on the hardware operational constraints, the lower and upper coil current limits are considered and assigned as  $0.30I_{sm0}$  and  $1.38I_{sm0}$  respectively [8]. Here,  $I_{sm}$  can be calculated from the Power-Energy-Current (PEI) block which has a relation as

$$I_{sm} = \sqrt{I_{sm0}^2 - 2E_{out} / (L_{sm} I_{sm,base}^2)} \tag{4}$$

$$E_{out} = \int P_{sm} dt \cdot S_{sm,base} \tag{5}$$

where  $E_{out}$  is the SMES energy output (J);  $L_{sm}$  is the SMES coil inductance (H);  $I_{sm,base}$  is the SMES current base (A);  $P_{sm}$  is the SMES active power output (pu) and  $S_{sm,base}$  is the SMES MVA base. Using Eqs. (4) and (5), the energy stored in a SMES unit ( $E_{sm}$ ) and the initial energy stored ( $E_{sm0}$ ) can be determined by

$$E_{sm} = E_{sm0} - E_{out} \tag{6}$$

$$E_{sm0} = (1/2) L_{sm} I_{sm0}^2 \cdot I_{sm,base}^2 \tag{7}$$

Besides,  $K_v(s)$  which is the voltage controller, can be represented by

$$K_v(s) = K_{vsm} (V_{10} - V_{ts}) \tag{8}$$

where  $K_{vsm}$  is the controller gain;  $V_{10}$  is an initial value of a terminal bus voltage of SMES unit (pu); and  $V_{ts}$  is a bus voltage of SMES (pu). The desired active and reactive power output of SMES ( $P_d$  and  $Q_d$ ) can be expressed as

$$P_d = V_{ts} I_{sm} AP \tag{9}$$

$$Q_d = V_{ts} I_{sm} AQ \tag{10}$$

where AP and AQ are the active and reactive power fractions, respectively. The SMES active and reactive power outputs ( $P_{sm}$  and  $Q_{sm}$ ) are the output of the SMES controlled converter (CONV). The converter with time constant  $T_c$  can be represented by

$$CONV = 1 / (1 + T_c s) \tag{11}$$

### 3. Proposed control design

The control design objective is to obtain a SMES unit with a sufficient stored energy and a satisfactory stabilizing performance.

To achieve both objectives, the design concept can be explained as follows.

1. Since the initial stored energy of SMES is determined by  $(1/2)L_{sm}i_{sm0}^2$ , to achieve the sufficient initial stored energy of SMES,  $L_{sm}$  and  $i_{sm0}$  are optimized;
2. To enhance the stabilizing performance, the variance of power fluctuations from wind and PV power in a line 2 is considered. If the variance of power fluctuations can be minimized, power fluctuations will be reduced. As given in [9], the variance of time series data is defined by:

$$\text{Variance} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (12)$$

where  $n$  is the number of data,  $x_i$  is the data,  $\bar{x}$  is the average value,  $i$  is the counter. Here,  $x_i$  is the time-series data of active and reactive power flows in a line 2.

Based on the above concept, a coil size, an initial coil current and PI parameters are optimized simultaneously by the following optimization problem:

$$\text{Minimize } \frac{1}{2}L_{sm}i_{sm0}^2 + \text{Variance}\{P_2, Q_2\} \quad (13)$$

$$\text{Subject to } K_{pi} < K_{pi} < K_{max}, T_{min} < T_{ip} < T_{max},$$

$$K_{min} < K_{pq} < K_{max}, T_{min} < T_{iq} < T_{max}$$

$$1 < L_{sm} < 10 \text{ H}, 1.5 < i_{sm0} < 3.5 \text{ kA}$$

In the objective function Eq. (13), the first term represents the initial stored energy of SMES which is a function of a coil inductance and an initial coil current. The second term is a variance of active and reactive power flows in a line 2 ( $P_2$  and  $Q_2$ ), respectively. For the constraint,  $K_{min}$  and  $K_{max}$  are the minimum and maximum values of the proportional gain of the PI controller, respectively;  $T_{min}$  and  $T_{max}$  are the minimum and maximum values of the integral gain of the PI controller, respectively. The optimization procedure using PSO [5] can be described as follows:

- Step 1. Generate the objective function for PSO.
- Step 2. Initialize a population of the particles with random positions and velocities.

Step 3. Evaluate the objective function for each particle when the wind and PV power pattern in a line 2 of case 1 is applied to the system as shown in Fig. 3.

Table 1  
SMES parameters.

Base values:  $S_{sm,base} = 2 \text{ MVA}$ ,  $V_{sm,base} = 480 \text{ V}$ ,  $i_{sm,base} = 4.17 \text{ kA}$   
 $K_{PR} = 40$ ,  $T_I = 0.4$ ,  $K_{sm} = 1.0$ ,  $K_{Vsm} = 1.0$ ,  $T_C = 0.01$ ,  $V_{sm} = 0.95 \text{ pu}$

Table 2  
Optimization result.

Type of SMES	$L_{sm}$ (H)	$i_{sm0}$ (kA)	P controller		Q controller	
			$K_{pi}$	$T_{ip}$	$K_{pq}$	$T_{iq}$
SMES with 10 H coil size	10.00	1.83	25.3927	0.3060	16.1532	0.1743
Proposed SMES with an optimal coil size	3.98	2.91	24.5282	0.0136	16.0862	0.0416

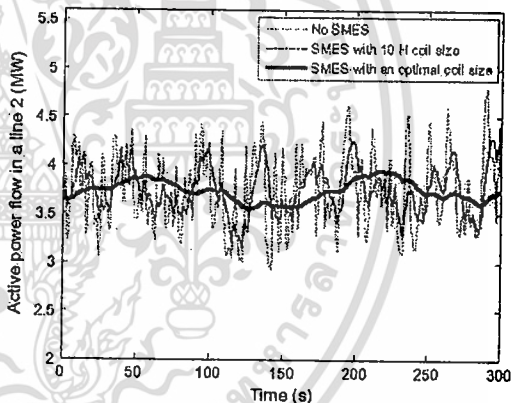


Fig. 4. Active power flow in a line 2 of case 1.

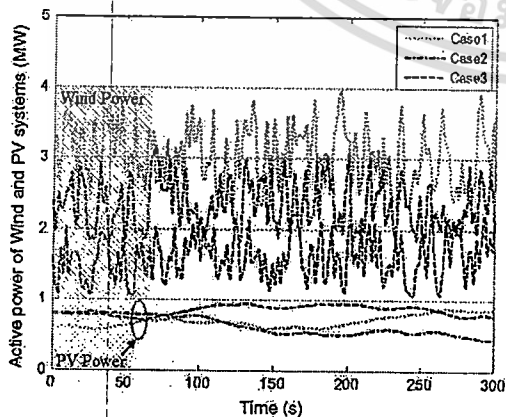


Fig. 3. Patterns of wind and PV power.

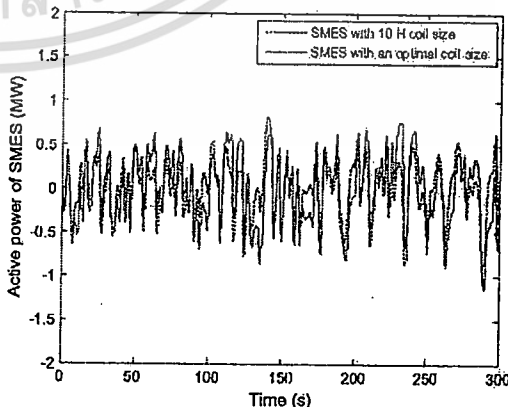


Fig. 5. Active power output of SMES of case 1.

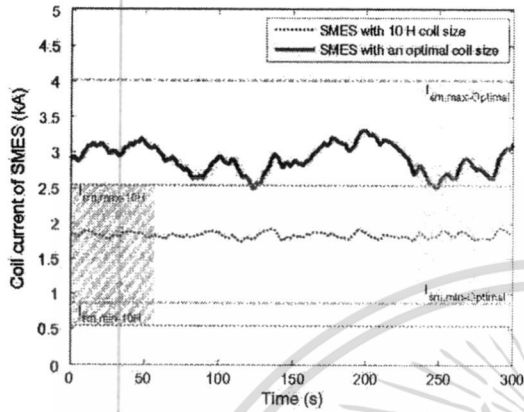


Fig. 6. Coil current of case 1.

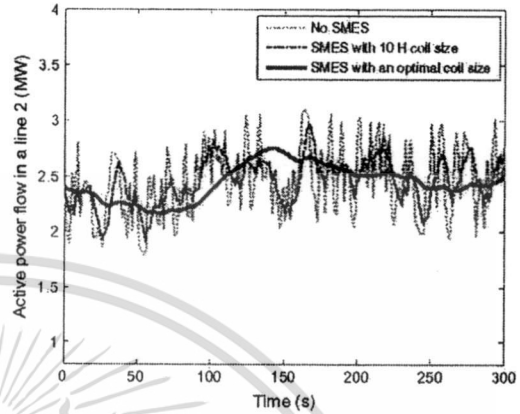


Fig. 8. Active power flow in a line 2 of case 3.

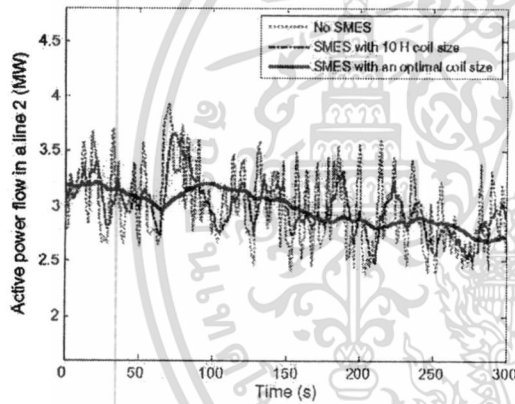


Fig. 7. Active power flow in a line 2 of case 2.

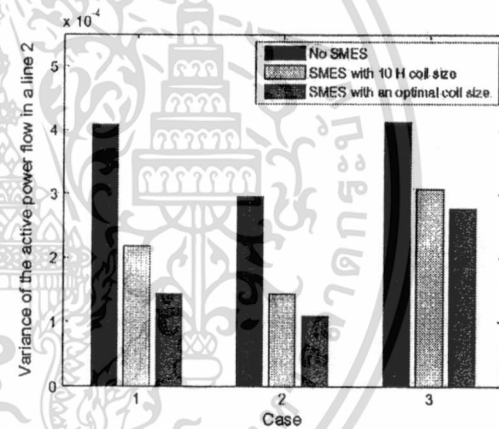


Fig. 9. Variance of the active power flow in a line 2.

Step 4. Update the velocity and position of particle and increase the iteration.

Step 5. When the maximum number of iterations is arrived, stop the process. Otherwise go to step 3.

4. Simulation studies

Simulation studies in the microgrid shown in Fig. 1 are carried out to examine the performance of the designed controller of a SMES with an optimal coil size. The SMES parameters are shown in Table 1. In the optimization, the parameters of PSO are set as follows:  $K_{min} = 1$ ,  $K_{max} = 30$ ,  $T_{min} = 0.001$ ,  $T_{max} = 1$ , PSO size = 25, maximum iteration = 100, the maximum and minimum inertia weight factors are set at 0.4 and 0.9 respectively. As a result, the optimized parameters of a SMES with an optimal coil size are given in Table 2. Note that, the SMES parameters are optimized by the off-line tuning which took about forty minutes per round. As a result, the optimized controller parameters are fixed during any operating conditions. Accordingly, the proposed SMES control can be implemented on real time. Based on Table 2, the initial stored energy of a SMES unit can be calculated from  $0.5L_{sm}I_{sm0}^2 = 0.5 \times 3.98 \times (2.91)^2 = 16.81$  MJ. The designed SMES is compared with the SMES with the same initial stored energy. The inductance

of the compared SMES is suitably set at 10 H. Thus, the initial value of a coil current is equal to 1.83 kA. The PI parameters of the compared SMES are optimized by only the second term in Eq. (13). This compared SMES is referred to as "SMES with 10 H coil size". Consequently, the PI parameters of a SMES with 10 H coil size are given in Table 2.

To evaluate the stabilizing effect of the designed SMES, three cases of wind and PV power with different patterns are generated as illustrated in Fig. 3. To make clear about the dynamic characteristic of the system, 300 s of simulation results are shown.

For case 1, the active power flow in a line 2 is depicted in Fig. 4. Without SMES, the power flow severely fluctuates due to the random power from wind and PV. On the other hand, a SMES unit with either an optimal coil size or a 10 H coil size, can alleviate power fluctuations. Nevertheless, the stabilizing effect of the SMES with an optimal coil size is higher than that of the SMES with 10 H coil size.

Figs. 5 and 6 show the active power output of SMES and the coil current in case 1, respectively. The coil current of SMES with either coil size fluctuates in its allowable limit ( $0.30I_{sm0} < I_{sm} < 1.38I_{sm0}$ ). It can be observed that the fluctuation of an active power output and a coil current of a SMES unit with an optimal coil size is higher

than that of a SMES unit with 10 H coil size. This is because the fact that the SMES with a smaller coil size has to exchange the same amount energy with the system by the larger coil current. Besides, in cases 2 and 3 as depicted in Figs. 7 and 8 respectively, the proposed SMES with an optimal coil size still shows superior damping effect over the SMES with 10 H coil size.

Finally, the variance of the active power flow in a line 2 is shown in Fig. 9. The variance in case of the proposed SMES with an optimal coil size is less than that of the SMES with 10 H coil size under any wind and PV power patterns. These study results signify that even two SMES units have the same initial stored energy, a SMES unit with a larger coil size cannot show satisfactory stabilizing effect as the proposed SMES with an optimal coil size.

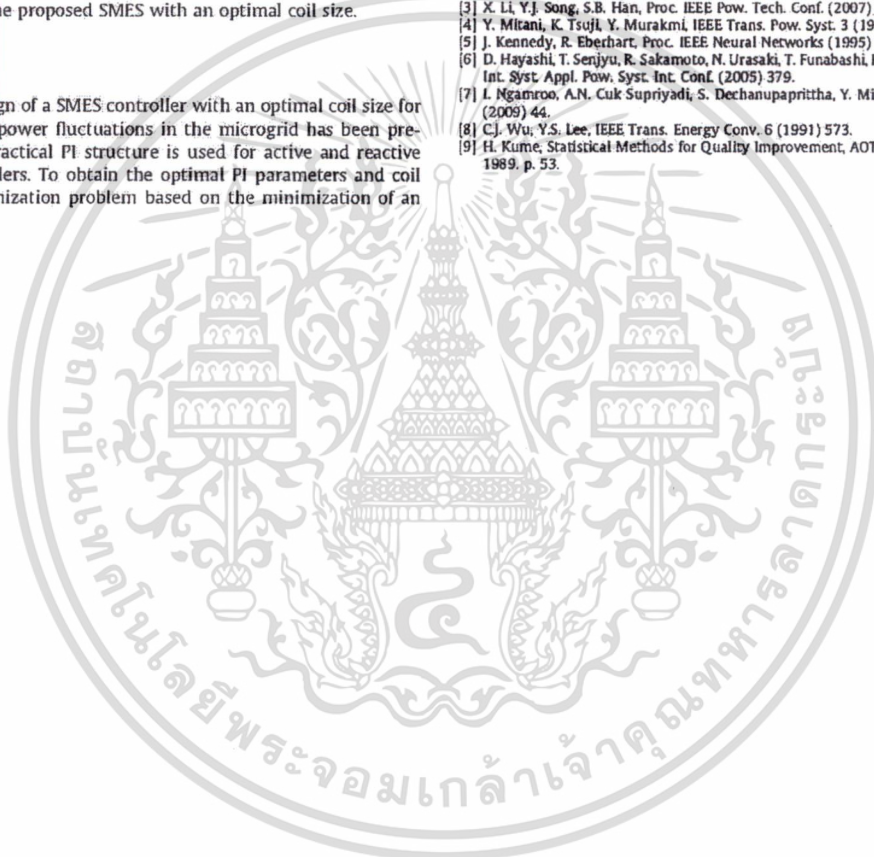
## 5. Conclusion

A new design of a SMES controller with an optimal coil size for alleviation of power fluctuations in the microgrid has been presented. The practical PI structure is used for active and reactive power controllers. To obtain the optimal PI parameters and coil size, the optimization problem based on the minimization of an

initial stored energy and a variance of power fluctuations has been solved by a PSO. Simulation results clearly confirm that the stabilizing performance of the proposed SMES controller with an optimal coil size is much superior to that of the SMES controller with large coil size under various patterns of wind and PV power generations.

## References

- [1] N. Hatzigiorgiou, H. Asono, R. Iravani, C. Marnay, IEEE Pow. Energy Mag. 6 (2008) 78.
- [2] M.R. Patel, Wind and Solar Power Systems, Design, Analysis and Operation, CRC Press, Florida, 2006. p. 257.
- [3] X. Li, Y.J. Song, S.B. Han, Proc. IEEE Pow. Tech. Conf. (2007) 2000.
- [4] Y. Mitani, K. Tsuji, Y. Murakami, IEEE Trans. Pow. Syst. 3 (1988) 1418.
- [5] J. Kennedy, R. Eberhart, Proc. IEEE Neural Networks (1995) 1942.
- [6] D. Hayashi, T. Senjyu, R. Sakamoto, N. Urasaki, T. Funabashi, H. Sekine, Proc. IEEE Int. Syst. Appl. Pow. Syst. Int. Conf. (2005) 379.
- [7] I. Ngamroo, A.N. Cuk Supriyadi, S. Dechanupaprittha, Y. Mitani, Physica C 469 (2009) 44.
- [8] C.J. Wu, Y.S. Lee, IEEE Trans. Energy Conv. 6 (1991) 573.
- [9] H. Kume, Statistical Methods for Quality Improvement, AOTS publisher, Tokyo, 1989. p. 53.



# ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH

An international journal devoted to research and new applications in generation, transmission, distribution and utilization of electrical power

Volume 81 (2011)

## Editor-in-Chief

C.A. Nucci

## Editor

L. Goel

## Associate Editor

J.D. Morgan

## Editor-in-Chief Emeritus

B.D. Russell

## Executive Editor

C.R. Haden

## Founding Editor-in-Chief

M.E. Council

## Editorial Advisory Panel

A. Borghetti (*Italy*)

C. Canizares (*Canada*)

A.J. Conejo (*Spain*)

O. Fosso (*Norway*)

A. Ghosh (*Australia*)

M.H. Haque (*Singapore*)

T.A. Haskew (*USA*)

N. Hatzigiorgiou (*Greece*)

N. Jenkins (*UK*)

M. Kezunović (*USA*)

W. Li (*Canada*)

O.P. Malik (*Canada*)

M. Matos (*Portugal*)

J. Milanović (*UK*)

A.G. Phadke (*USA*)

H.B. Püttgen (*USA*)

G. Radman (*USA*)

M. Shahidehpour (*USA*)

G. Sheblé (*USA*)

T. Sidhu (*Canada*)

R. Smith (*USA*)

E. Strangas (*USA*)

G. Strbac (*UK*)

K.J. Tseng (*Singapore*)

E.A. Udren (*USA*)

C. Vournas (*Greece*)

N. Watson (*New Zealand*)

B.F. Wollenberg (*USA*)

W. Youyi (*Singapore*)

C.-W. Yu (*Hong Kong*)



ELSEVIER

AMSTERDAM-BOSTON-LONDON-NEW YORK-OXFORD-PARIS-PHILADELPHIA-SAN DIEGO-ST. LOUIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Contents lists available at ScienceDirect

Electric Power Systems Research

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/epsr](http://www.elsevier.com/locate/epsr)

## A robust centralized SMES controller design based on WAMS considering system and communication delay uncertainties

Mongkol Saejia<sup>\*</sup>, Issarachai Ngamroo

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 9 July 2010  
Received in revised form 26 October 2010  
Accepted 17 November 2010  
Available online 17 December 2010

#### Keywords:

Wide area measurement system  
Phasor measurement unit  
System uncertainty  
Superconducting magnetic energy storage  
Inter-area oscillation

### ABSTRACT

It is well known that the communication delay due to the phasor measurement in wide area monitoring system (WAMS) as well as various system operating conditions such as heavy line flows and unpredictable network structures, may deteriorate the wide-area stabilizing control effect. To overcome this problem, the inverse input and output multiplicative model is proposed to represent unstructured uncertainties due to system operations and communication delay in the robust centralized damping controller design of superconducting magnetic energy storage (SMES) based on WAMS. The structure of centralized controller for SMES is the practical 1st-order lead/lag compensator. To automatically tune the control parameters, the optimization problem based on the enhancement of damping performance and system robust stability margin is achieved by particle swarm optimization. Simulation studies in the West Japan six-area interconnected system confirm that the proposed robust SMES centralized controller is superior to the conventional SMES centralized controller in terms of damping performance and robustness against system and time delay uncertainties.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

At present, the wide-area disturbances tend to occur in many interconnected power systems around the world [1,2]. Such disturbances not only cause the undamped inter-area power oscillations, but also result in the cascade tripping and the partial or complete blackouts. To overcome this problem, much attention had been paid to the wide area monitoring system (WAMS) based on the phasor measurement unit (PMU) synchronized by global position system (GPS) [3].

Especially, the wide-area stabilizing control application has been successfully performed by power system stabilizer [4], flexible ac transmission systems devices [5], and high voltage direct current transmission [6]. Among of the stabilizing devices, superconducting magnetic energy storage (SMES) has been expected as a smart storage device. With proper control, an SMES is able to supply and absorb active and reactive power quickly and simultaneously [7]. The authors have proposed the SMES control based on the recorded PMU data without considering time delay to damp out the inter-area oscillations in the interconnected power system [8].

However, it has been found that the communication delay in wide-area stabilizing control may cause the system instability

[9,10]. Accordingly, the time delay has been taken into account in the design of power system damping controller [10–12]. Nevertheless, the controllers in these works have been designed based on the single value of time delay. As a result, when the time delay deviates from the designed value due to various operating conditions, the uncertainty in time delay may deteriorate the stabilizing effect of the designed controller. Additionally, unpredictable network configuration, various generating and loading conditions etc., cause system uncertainties. The damping controller designed without considering such uncertainties may fail to damp out the power oscillations.

To tackle the above situation, this paper proposes the inverse input and output multiplicative model to represent unstructured uncertainties due to communication delay and system operating conditions in the robust centralized damping controller design of SMES based on WAMS. Here, the practical 1st-order lead/lag compensator is selected as the structure of centralized controller. Based on the proposed uncertainty model, the parameters optimization of the lead/lag compensator can be formulated based on the improvement of system robust stability margin and damping performance. Solving the problem by particle swarm optimization (PSO), the optimal control parameters can be obtained. Simulation studies in the six-area interconnected power system have been carried out to confirm the superior robustness of the proposed SMES controller against system and time delay uncertainties in comparison to the conventional SMES controller.

<sup>\*</sup> Corresponding author. Tel.: +66 23264550; fax: +66 23264550.  
E-mail address: [samongkol@gmail.com](mailto:samongkol@gmail.com) (M. Saejia).

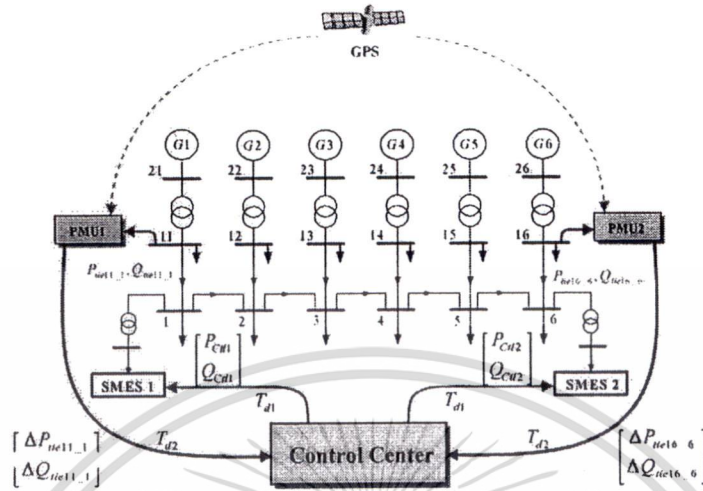


Fig. 1. Six-area interconnected power system with centralized control of SMES.

2. Problem formulation

2.1. Study system

The study system represents the 60 Hz six-area interconnected power system of Western Japan [13] as depicted in Fig. 1. The area capacity is 20:13.5:6.75:40:6.75:33 with 1000 MVA base. Therefore, the total system capacity is 120,000 MVA. For two SMES units, the total capacity is  $2 \times 1000 = 2000$  MVA. Note that the capacity of two SMES units is equivalent to 1/60 of the total system capacity.

Each transmission line is double circuit. Each area is described by the 5th-order synchronous generator model. A simplified 1st order of automatic voltage regulator and governor are equipped with each generator.

Based on modal analysis results in Ref. [13], there are two dominant inter-area oscillation modes with poor damping in this system. The first mode is associated with the oscillation between both end generators (G1 and G6) while the second mode is associated between both end and middle generators (G1 and G4, G4 and G6). By the residue method in Ref. [14], areas 1 and 6 are selected as the suitable location of SMES for stability enhancement. The capacity of SMES is given in Table 1 [8]. In addition, two PMUs are installed at buses 11 and 16 to measure active and reactive power deviations in a tie-line from bus 11 to bus 1 ( $\Delta P_{tie11,1}$ ,  $\Delta Q_{tie11,1}$ ) and from bus 16 to bus 6 ( $\Delta P_{tie16,6}$ ,  $\Delta Q_{tie16,6}$ ). These power deviation signals are transmitted to control center with the received time delay  $T_{d2}$ . After the controller processing, the active and reactive power control signals ( $P_{Cti}$ ,  $Q_{Cti}$ ,  $i = 1, 2$ ) from control center are sent to each SMES unit with the transmitted time delay  $T_{d1}$ . Normally, it is better and more accurate for control center to use voltage and current samples than power. Since the SMES model adopted in this paper

uses the active and reactive power deviations as the input signals, the power data are used for control center. The calculation time of power data is assumed to be included in the time delay. In this work, it is assumed that the data transfer is performed by satellite communications. This time delay is included the communication link and processing time which has about 200 ms for one way ( $T_d$ ) [9].

2.2. System model

The system in Fig. 1 can be represented by feedback control system with time delays as depicted in Fig. 2.  $G(s)$  is the transfer function of power system with SMES.  $K(s)$  is the transfer function of the centralized controller located at the control center which is defined by

$$K(s) = \begin{bmatrix} K_{SMES1}(s) \\ K_{SMES2}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

where  $K_{SMES1}(s)$  and  $K_{SMES2}(s)$  are the power controller of SMES1 and SMES2, respectively. Besides,  $K_{SMES}(s)$ ,  $i = 1, 2$  consists of power controllers as

$$K_{SMES}(s) = \begin{bmatrix} K_{Pi}(s) \\ K_{Qi}(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

where  $K_{Pi}(s)$  and  $K_{Qi}(s)$  are the active and reactive power controllers, respectively. The structure of each power controller is the 1st-order

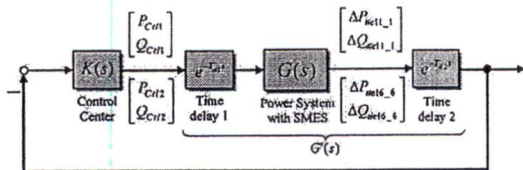


Fig. 2. Feedback control system with time delay.

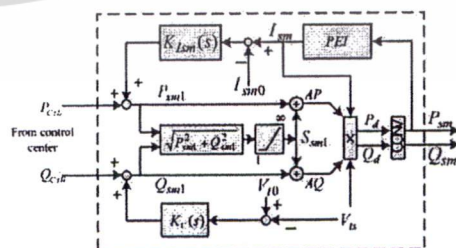


Fig. 3. The SMES model and control scheme.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1  
Capacity of a SMES unit.

Power capacity = 1000 MVA, energy capacity = 800 MJ, rated voltage = 25 kV, rated current = 40 kA, inductance = 10 H

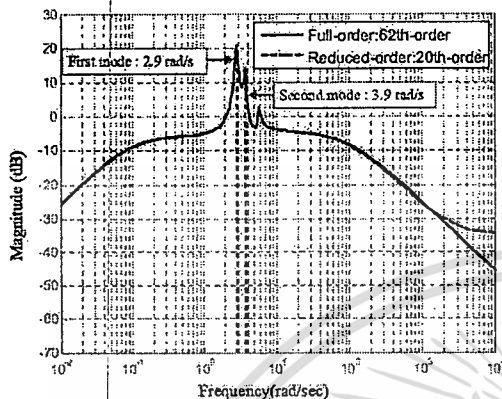


Fig. 4. Frequency response of full-order and reduced-order systems.

lead/lag compensator as

$$K_P(s) = \frac{K_{P1}(1 + T_{P1}s)}{(1 + T_{P2}s)} \quad (3)$$

$$K_Q(s) = \frac{K_{Q1}(1 + T_{Q3}s)}{(1 + T_{Q4}s)} \quad (4)$$

where  $K_{P1}$  and  $K_{Q1}$  are controller gains and  $T_{P1}, T_{P2}, T_{Q3}, T_{Q4}$  are time constants. Totally there are 12 control parameters for two SMES units. All parameters are optimized by the proposed method. The input signals of  $K_P(s)$  and  $K_Q(s)$  are the active and reactive power deviations in the corresponding tie-line, respectively.

As shown in Fig. 2, the time delay effect can be represented by  $e^{-T_d s}$ , where  $T_d$  is time delay. Here, the time delay term is approximated by Pade approximation which is represented by the 1st-order polynomial as

$$e^{-T_d s} \approx \frac{1 - (T_d/2)s}{1 + (T_d/2)s} \quad (5)$$

As indicated in Fig. 2,  $G(s)$  is the transfer function of the system embedded with the time delay effect.

2.3. SMES model

The SMES model with simultaneous active and reactive power modulation control as shown in Fig. 3 is used in this study [8]. The input signals of each SMES unit are sent from the control center. In the SMES model,  $K_V(s)$  is the bus voltage controller and  $K_{Ism}(s)$  is the coil current controller.

2.4. Model reduction

As shown in Fig. 2, after both time delay terms are integrated into the power system model  $G(s)$  with SMES, the order of the overall system  $G(s)$  is 62. Here,  $G(s)$  is defined as the nominal plant model included with communication delay. To simplify the parameters optimization of centralized controller, the balanced realization [15,16] is applied to reduce the order of the system.

The appropriate reduced order is a user-specified quantity that determines the trade-off between accuracy and complexity. The accuracy of the reduced-order system can be evaluated by comparing the frequency response between the full-order system and

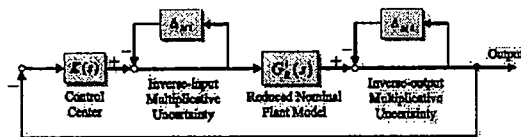


Fig. 5. Feedback control system with inverse input and output multiplicative perturbations.

the reduced-order system from the plot of frequency response. In this case, the order of reduced model is selected at 20. The reduced nominal plant model is referred to as  $G_r(s)$ . The plots of frequency response of 20th-order system and the full-order system are illustrated in Fig. 4. There are two dominant modes in the vicinity of the inter-area oscillation frequency. Clearly, the first and second dominant inter-area oscillation modes of the reduced order model have the same oscillation frequency and magnitude as those of the full order model. The resonance frequency of both reduced and full model occurs at about 2.9 and 3.9 rad/s, respectively.

3. Proposed robust controller design

Since the communication delay and system operating conditions can be varied from the normal operating point, these unstructured uncertainties can be represented by  $\Delta_{M1}$  and  $\Delta_{M2}$  at the input and output of  $G_r(s)$  as shown in Fig. 5, respectively.  $\Delta_{M1}$  and  $\Delta_{M2}$  are defined as the inverse multiplicative input and output perturbations, respectively [15]. Note that without exact mathematical expressions, this uncertainty model is able to represent all possible uncertainties in the system. Based on the small gain theorem, the robust stability condition against all possible system uncertainties is given by

$$\|I + K(s)\| \|I + \Delta_{M1}\|^{-1} \|e^{-T_d s} G(s)\| \|I + \Delta_{M2}\|^{-1} > 0 \quad (6)$$

then,

$$\|\Delta_t\|_\infty < \frac{1}{\|I + L(s)\|_\infty^{-1}} \quad (7)$$

where  $\Delta_t$  is the all possible system uncertainties: ( $\Delta_t = \Delta_{M1} + \Delta_{M2} + \Delta_{M1} \Delta_{M2}$ ) and  $L(s) = K(s) \{e^{-T_d s} G(s)\}$ .

The right hand side of (7) implies the size of system uncertainties or the robust stability margin against system uncertainties. By minimizing  $\|I + L(s)\|_\infty^{-1}$ , the robust stability margin of the closed-loop system is a maximum. This concept can be applied to formulate the optimization problem as

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \|I + L(s)\|_\infty^{-1} \\ & \text{Subject to} \quad \zeta \geq \zeta_{spec}, \sigma \geq \sigma_{spec} \\ & \quad K_{i, \min} \leq K_i \leq K_{i, \max}, T_{ij, \min} \leq T_{ij} \leq T_{ij, \max}; \\ & \quad i = 1, 2, j = 1, 2 \end{aligned} \quad (8)$$

where  $\|\cdot\|_\infty$  is the infinite norm of transfer function,  $\zeta$  and  $\zeta_{spec}$  are the actual and desired damping ratio of the dominant inter-area modes, respectively;  $\sigma$  and  $\sigma_{spec}$  are the actual and desired real part of the eigenvalue corresponding to the dominant modes;  $K_{i, \max}$  and  $K_{i, \min}$  are the maximum and minimum controller gains, respectively;  $T_{ij, \max}$  and  $T_{ij, \min}$  are the maximum and minimum time constants, respectively. The optimization objective is not only to improve the robustness of the controller but also to move the

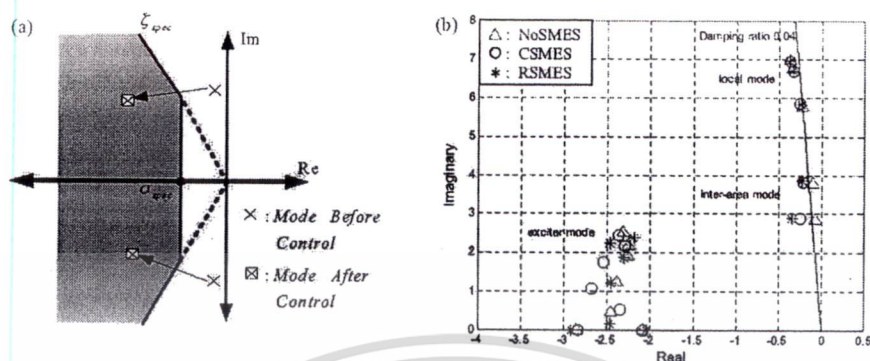


Fig. 6. (a) D-stability region and (b) Eigenvalues corresponding to local, inter-area and exciter modes in case 1.

dominant inter-area modes to the D-stability region as illustrated in Fig. 6(a). This optimization problem is solved by PSO [17].

4. Simulation studies

For parameters optimization by PSO, the design specification and range of search parameters are set as follows:  $\zeta_{spec} = 0.04$ ,  $\sigma_{spec} = -0.1$ ,  $K_{Lmin} = 1.0$ ,  $K_{Lmax} = 10$ ,  $T_{ij,min} = 0.001$  and  $T_{ij,max} = 1.0$ , number of particles = 24, maximum iterations = 100, acceleration factors = 2, and the minimum and maximum inertia weights are set at 0.4 and 0.9, respectively. The optimization is carried out based on the normal operating condition in case 1 as described in Table 2. The uncertainty handling information given in Table 2 consists of four items as follows.

1. Uncertainty due to power flow in a tie-line 11-1. This can be shown by the tie-line active power deviation ( $\Delta P_{tie11-1}$ ) from the normal power flow.
2. Uncertainty due to communication time delay ( $\Delta T_d$ ). This is the deviation of time delay from the initial time delay. In this paper, the initial time delay is set at 200 ms.
3. Uncertainty due to the network structure.
4. Uncertainty due to the applied disturbance.

As a result, the robust centralized controllers of SMES which is referred to as "RSMES", are obtained as

$$K_{P1}(s) = 6.7785 \frac{1 + 0.3529s}{1 + 0.2449s} \tag{9}$$

$$K_{Q1}(s) = 1.5625 \frac{1 + 0.7336s}{1 + 0.0254s} \tag{10}$$

RSMES2:

$$K_{P2}(s) = 9.5808 \frac{1 + 0.9066s}{1 + 0.3568s} \tag{11}$$

$$K_{Q2}(s) = 1.2134 \frac{1 + 0.9361s}{1 + 0.6487s} \tag{12}$$

The robustness of RSMES is compared with the SMES centralized controller designed without considering the robustness which is referred as "CSMES". The CSMES is designed to yield the damping ratio and the real part of the dominant inter-area mode same as the design specification of RSMES. The optimization problem of CSMES is formulated as [18]

$$\text{Minimize } J = \sum_{\zeta \leq \zeta_{spec}} |\zeta_{spec} - \zeta| + \sum_{\sigma \geq \sigma_{spec}} |\sigma_{spec} - \sigma| \tag{13}$$

Subject to:  $K_{Lmin} \leq K_L \leq K_{Lmax}$ ,  $T_{ij,min} \leq T_{ij} \leq T_{ij,max}$ ;  $i = 1, 2$ ,  $j = 1, 2$

Note that, the objective of the optimization problem (13) is to move the dominant inter-area oscillation modes to D-stability region as shown in Fig. 6(a). Solving (13) by PSO, the CSMES centralized controllers are obtained as

CSMES1:

$$K_{P1}(s) = 6.5273 \frac{1 + 0.7485s}{1 + 0.2242s} \tag{14}$$

$$K_{Q1}(s) = 3.1575 \frac{1 + 0.7022s}{1 + 0.1787s} \tag{15}$$

CSMES2:

$$K_{P2}(s) = 3.9479 \frac{1 + 0.9338s}{1 + 0.1636s} \tag{16}$$

Table 2  
Operating conditions (1000 MVA base).

Case	$P_{tie11-1}$ (pu)	Time delay, $T_d$ (ms)	Uncertainty handling information			
			$\Delta P_{tie11-1}$ (pu)	$\Delta T_d$ (ms)	Network structure	Applied disturbance
1	4.6	200	0	0	No change	A temporary 3 phase fault at bus 2 at time = 2.0s for 50ms.
2	5.0	250	0.4	50	No change	The fault is cleared naturally A 3 phase fault occurs at one line between bus 2 and 3 at time = 2.0 s. The faulted line is opened at time = 2.05 s and not reclosed
3	5.4	275	0.8	75	No change	Same as case 2
4	5.8	275	1.2	75	One circuit of line between bus 2 and 3 is opened	Same as case 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

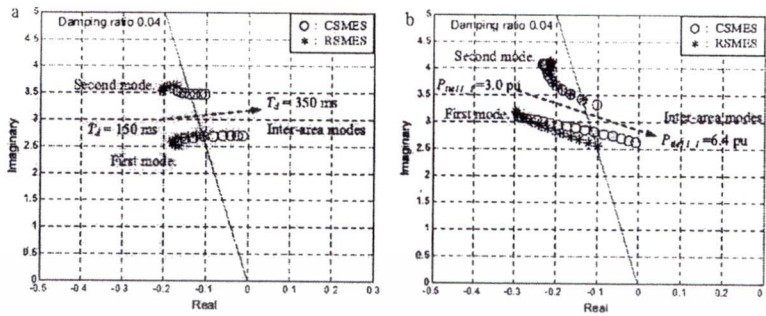


Fig. 7. Locus of two dominant inter-area modes when (a) at  $P_{de11-1} = 6.0$  pu, vary  $T_d$  from 150 to 350 ms and (b) at  $T_d = 300$  ms, vary  $P_{de11-1}$  from 3.0 to 6.4 pu.

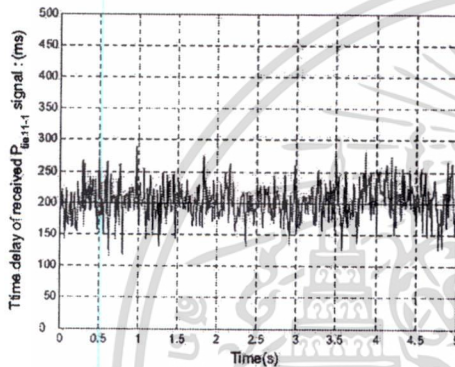


Fig. 8. Varying received time delay ( $T_d$ ) of  $\Delta P_{de11-1}$  signal in case 1 (mean = 200 ms).

$$K_{Q2}(s) = 1.1936 \frac{1 + 0.7220s}{1 + 0.2783s} \quad (17)$$

First, the eigenvalue analysis in the full-order system model is carried out for four case studies. The plot of eigenvalues corresponding to local, inter-area, and exciter modes in case 1 of NoSMES, CSMES and RSMES is shown in Fig. 6(b). It can be observed that two dominant inter-area modes can be moved to the desired D-stability region by both CSMES and RSMES. For the positions of local modes in case of CSMES and RSMES, they are almost the

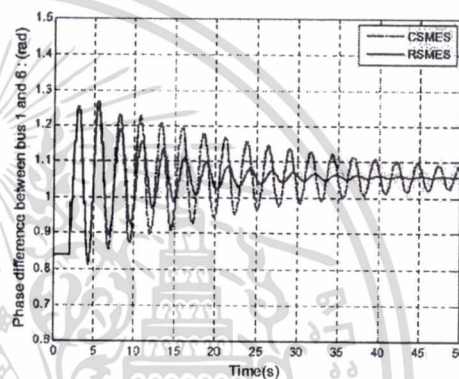


Fig. 10. Phase difference between bus 1 and bus 6 in case 2 when  $P_{de11-1} = 5.0$  pu,  $T_d = 250$  ms, network no change and applied  $3\phi$  fault at line between bus 2 and bus 4.

same as that of NoSMES case. Accordingly, both CSMES and RSMES have no effect on the local mode. For the exciter mode, both CSMES and RSMES cause them to slightly move in the stable region. Consequently, the SMES controllers designed in the simplified model rarely provide negative impacts on other modes.

Next, the eigenvalue and damping ratio of two dominant inter-area modes of four case studies are provided in Table 3. Without

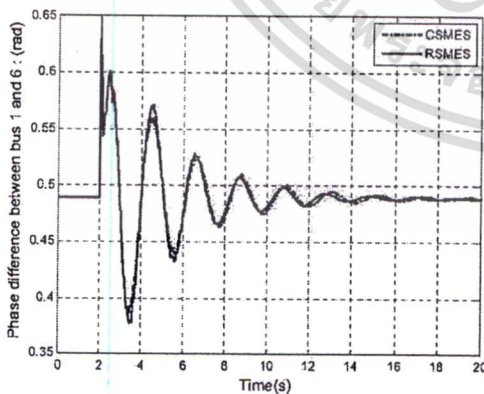


Fig. 9. Phase difference between bus 1 and bus 6 in case 1 when  $P_{de11-1} = 4.6$  pu,  $T_d = 200$  ms, network no change and applied  $3\phi$  fault at bus 2.

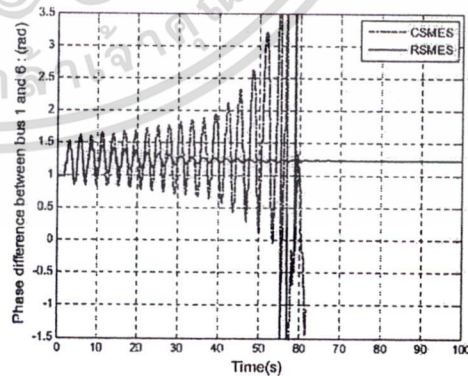


Fig. 11. Phase difference between bus 1 and bus 6 in case 3 when  $P_{de11-1} = 5.4$  pu,  $T_d = 275$  ms, network no change and applied  $3\phi$  fault at line between bus 2 and bus 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] H. Wu, et al., Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design, *IEEE Trans. Power Syst.* 19 (4) (2004) 1935–1941.
- [11] Y. Yuan, et al., A phase compensator for SVC supplementary control to eliminate time delay by wide area signal, *Elect. Power Energy Syst.* 32 (3) (2009) 163–169.
- [12] D. Dotta, A.S. e Silva, L.C. Decker, Wide-area measurements-based two-level control design considering signal transmission delay, *IEEE Trans. Power Syst.* 24 (1) (2009) 208–216.
- [13] Technical Committee of the Institute of Electrical Engineers of Japan. Available from: <http://www.ieee.or.jp/pes/model/english/index.html>.
- [14] N. Martin, L.T.C. Lima, Determination of suitable locations for power system stabilizers and SVC for damping electromechanical oscillation in large power systems, *IEEE Trans. Power Syst.* 5 (4) (1990) 1455–1469.
- [15] S. Skogestad, I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*, John Wiley and Sons Ltd., 2005.
- [16] A.C. Antoulas, *Approximation of Large-Scale Dynamical Systems*, SIAM Publications, 2005.
- [17] B. Birge, PSO—a particle swarm optimization toolbox for use with Matlab, in: *Proceedings of Swarm Intelligence Symp.*, 2003, pp. 182–186.
- [18] Y.L. Abdel-Magid, M.A. Abido, Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms, *IEEE Trans. Power Syst.* 18 (3) (2003) 1125–1132.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายมงคล แซ่เจี๋ย  
วัน เดือน ปีเกิด 18 สิงหาคม 2519  
ประวัติการศึกษา 2540 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
2546 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย  
พ.ศ.2540-2543 ตำแหน่งวิศวกร บริษัทปูนซิเมนต์ไทย จำกัด  
พ.ศ.2546-2549 ตำแหน่งอาจารย์สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร  
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์  
พ.ศ.2549-ปัจจุบัน ตำแหน่งอาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้