



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การหาตำแหน่ง จำนวน และค่าที่เหมาะสมของตัวจำกัดกระแสผิดพ่วงชนิด
ตัวนำยิ่งยวดเพื่อทำเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

An optimization of locations, numbers, and values of superconducting
fault current limiter units for multi-machine power system
transient stabilization

RC H

๐ 464 ก

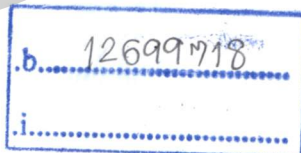
2556

นายอิสระชัย งามทรู

สาขา.....

เลขทะเบียน **137795**

รับเดือน.ปี - 6 ค.ศ. 2558



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณทุนรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การหาตำแหน่ง จำนวน และค่าที่เหมาะสมของตัวจำกัดกระแสผิดพลาดชนิดตัวนำยิ่งยวดเพื่อทำเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

แหล่งเงิน เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายอิสระชัย งามหฐ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีหาตำแหน่ง จำนวนและค่าที่เหมาะสมของตัวจำกัดกระแสผิดพลาดชนิดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting fault current limiter, SFCL) แบบความต้านทาน เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวในระบบหลายเครื่องจักร ในการตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ จะประยุกต์ใช้หลักการของฟังก์ชันพลังงาน (Energy function) เข้ามาร่วมพิจารณากับการทำให้พลังงานสูญเสียในค่าความต้านทานของ SFCL ในช่วงนำสูญเสียความเป็นตัวนำยิ่งยวดให้มิติน้อยที่สุด หลังจากนั้นจะแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization) ให้ได้ผลของตำแหน่ง จำนวนและค่าที่เหมาะสมของ SFCL ที่มีค่าพลังงานสูญเสียต่ำสุด และมีประสิทธิภาพในการทำเสถียรภาพชั่วคราวไม่ว่าจะเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งใดๆ ในระบบ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงประสิทธิภาพในการปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวของ SFCL ที่ทำให้เหมาะสมซึ่งเหนือกว่า SFCL ที่ไม่ได้ทำเหมาะสม

คำสำคัญ : ตัวจำกัดกระแสผิดพลาดชนิดตัวนำยิ่งยวด เสถียรภาพชั่วคราว ฟังก์ชันพลังงาน วิธีกลุ่มอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Research Title: An optimization of locations, numbers, and values of superconducting fault current limiter units for multi-machine power system transient stabilization

Researcher: Issarachai Ngamroo

Faculty: Engineering **Department:** Electrical Engineering

ABSTRACT

It is well known that the resistive type Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) can be effectively applied to augment the power system transient stability. Nevertheless, the challenging problems of SFCL for the transient stability improvement in multimachine power systems are the optimal locations, the optimal number, the optimal resistive values and the high energy dissipation during the quenching state. To cope with all issues, this paper focuses on a new optimization of multiple SFCL units considering the number, the resistive values, the locations and the energy dissipation for a multimachine transient stability enhancement by energy function method. The optimization problem is formulated based on the maximization of the decreasing rate of energy function during fault in combination with the minimization of energy dissipation of SFCL during the quenching state. Solving the problem by particle swarm optimization, all optimal parameters are automatically obtained. Simulation study in a West Japan six-area interconnected power system confirms the superior stabilizing effect of the optimal SFCL units over the non-optimal SFCL units.

Keywords : Energy function method, superconducting fault current limiter, transient stability.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

อิสรรัชย์ งามหรุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การหาตำแหน่ง จำนวน และค่าที่เหมาะสมของตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าพร้อมชนิดตัวนำยิ่งยวด เพื่อทำเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร.....	5
2.1 โครงสร้างของ SFCL.....	5
2.2 ระบบไฟฟ้ากำลังศึกษา.....	7
2.3 วิธีการทำให้เหมาะสมที่นำเสนอ.....	7
2.4 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	9
บทที่ 3 สรุปผลการวิจัย.....	16
บทที่ 4 ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	17
4.1 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	17
บรรณานุกรม.....	18
ภาคผนวก.....	20
ประวัตินักวิจัย.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 อุปกรณ์การจำกัดกระแสลัดวงจร.....	1
1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การจำกัดกระแสลัดวงจรแต่ละชนิด.....	2
2.1 เงื่อนไขการทำงานและการรบกวนระบบ.....	9
2.2 ผลการทำให้เหมาะสม.....	11
2.3 SFCL จำนวน 3 และ 5 ตัวที่ทำให้เหมาะสม.....	15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้าง SFCL	5
2.2 หลักการทำงานของ SFCL	5
2.3 ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงชนิดหกพื้นที่	7
2.4 โพลีชาร์ตของกระบวนการทำให้เหมาะสมที่นำเสนอ	10
2.5 เส้นโค้งการลู่เข้าของ PSFCL ที่ทำให้เหมาะสมจำนวน 4 ตัว	11
2.6 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 1	12
2.7 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 2	12
2.8 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 3	12
2.9 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 1	13
2.10 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 2	13
2.11 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 3	14
2.12 การเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียของ SFCL	14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบัน การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (distributed generations DG) เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน เป็นต้น มีแนวโน้มสูงขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง กลุ่ม DG เหล่านี้ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบในด้านต่างๆ เช่น คุณภาพกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบ กลุ่ม DG จะเป็นแหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร ทำให้กระแสลัดวงจรรวมในระบบสูงขึ้น ส่งผลเสียต่อเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง จนอาจทำให้ระบบป้องกันที่ติดตั้งอยู่ในระบบ ไม่สามารถทนต่อกระแสลัดวงจรขนาดสูงนี้ได้จนทำงานผิดพลาด ส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพ การแก้ไขปัญหานี้ด้วยการติดตั้งระบบป้องกันใหม่ที่ทนต่อกระแสลัดวงจรขนาดสูงนี้จะทำให้เกิดการลงทุนที่สูงมากในระบบ ดังนั้น การแก้ไขปัญหาคด้วยวิธีอื่นๆ จึงเป็นสิ่งท้าทายสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่จะขยายใหญ่ขึ้นในอนาคต เทคโนโลยีการจำกัดกระแสลัดวงจร มีดังนี้ การใช้ฟิวส์ระดับกระแสและแรงดันสูง [1] ตัวจำกัดกระแสลัดวงจร (Is-limiters) [2] รีแอกเตอร์จำกัดกระแส (Current Limiting Reactor) [3] และ Bus splitting [4] เป็นต้น ในที่นี้สามารถแสดงอุปกรณ์การจำกัดกระแสลัดวงจรดังตารางที่ 1.1 และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวจำกัดกระแสแต่ละชนิดดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 อุปกรณ์การจำกัดกระแสลัดวงจร

Passive Increase of impedance at nominal and fault conditions	<ul style="list-style-type: none"> • Splitting of grids • Splitting of busbars • Introduction of higher voltage levels 	Topological measures
	<ul style="list-style-type: none"> • Transformers with increased short-circuit impedance • Fault current limiting reactors 	
Active Small impedance at nominal load fast increase of impedance at fault	<ul style="list-style-type: none"> • High-voltage current limiting fuses • I_r Limiters 	Apparatus measures
	Novel approaches: <ul style="list-style-type: none"> • SCFCL • PTC-resistors • Liquid metal FCL • Solid-state FCL • FCL using EM-forces • Hybrid FCL 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การจำกัดกระแสลัดวงจรแต่ละชนิด

Comparison Of Commercially Available Fault Current Limiting Solutions

Method/Device	Advantages	Disadvantages
Is-Limiter	<ul style="list-style-type: none"> • Cost-effective • Reliable • Proven 	<ul style="list-style-type: none"> • Spare parts required for fast restoration • Protection settings required • DG cannot be credited for post-fault peak service after an external fault
Fuses o Current limiting fuses o Non-current limiting fuses	<ul style="list-style-type: none"> • Simple construction • Proven • Low fixed cost • Self-triggered <p>Applied to current limiting fuses</p> <ul style="list-style-type: none"> • Not sensitive to circuit X/R ratio • Both magnitude and duration limitation 	<ul style="list-style-type: none"> • Service interruption of all downstream load • Replacement efforts • Protection coordination • No magnitude limitation with non-current limiting fuses • DG cannot be credited for post-fault peak service after an external fault
Current Limiting reactors/resistors	<ul style="list-style-type: none"> • Simple • Proven components • Low fixed cost • Reliable 	<ul style="list-style-type: none"> • Power losses • Voltage drops • Limited fault current mitigation capability • Bulky • Potential for impacts on generator stabilities
High Impedance Transformer	<ul style="list-style-type: none"> • Proven • Straightforward solution • Reliable • Intrinsic current limiting capability embedded in the device 	<ul style="list-style-type: none"> • Power losses • Voltage drops • Limited fault current reduction • Relatively costly • Space requirements
Resonance link	<ul style="list-style-type: none"> • Proven components • Resetttable • Self-triggered • Reliable (no moving parts) 	<ul style="list-style-type: none"> • Voltage and power losses • Need for current interrupting device
System Solutions o Bus splitting	<ul style="list-style-type: none"> • No need for current limiting equipment • No replacement parts • Cost-effective solution 	<ul style="list-style-type: none"> • System configuration dependent • May significantly impact system reliability • Bus transfer equipment required to restore service • Customer interruption until bus transfer is completed

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว การติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Fault Current Limiter, SFCL) ในระบบไฟฟ้ากำลังจึงได้รับความสนใจอย่างสูงในปัจจุบัน เนื่องจากเทคโนโลยีของ SFCL ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้จำกัดกระแสลัดวงจรขนาดสูงได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันที่ติดตั้งอยู่ในระบบ ประโยชน์ของ SFCL นั้น นอกจากสามารถจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบและยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพระบบในสถานะชั่วคราวให้ดีขึ้นด้วย

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ SFCL ในระบบไฟฟ้ากำลังในด้านต่างๆ เช่น การจำกัดกระแสลัดวงจร [5,6], การทำงานประสานกับระบบป้องกัน [7] และการปรับปรุงความเชื่อถือได้ระบบ [8] เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ SFCL เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบในสถานะชั่วคราวนั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

บทความที่ [9] ได้ใช้ SFCL เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวของระบบหนึ่งเครื่องจักรต่อกับบัสอนันต์ โดยไม่ได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมของ SFCL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทความที่ [10] นำเสนอการประยุกต์ใช้ SFCL ร่วมกับ SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) เพื่อทำเสถียรภาพชั่วคราวของระบบหนึ่งเครื่องจักรต่อกับบัสอนันต์ โดยไม่ได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมของ SFCL และ SMES

บทความที่ [11] นำเสนอการประยุกต์ใช้ SFCL เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวของระบบหนึ่งเครื่องจักรต่อกับบัสอนันต์ โดยทำการหาค่าที่เหมาะสมของ SFCL ที่ทำให้เวลาการกำจัดฟลัดด์วิกฤติมีค่าสูงสุด แล้วจึงทำการทดสอบด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์และการทดลอง

บทความที่ [12] นำเสนอการหาค่าและค่าที่เหมาะสมของ SFCL คำนวณด้วยการพิจารณาให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งต่ำที่สุด ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบสองพื้นที่สี่เครื่องจักรของ Kundur เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวของระบบเมื่อเกิดความผิดปกติ

บทความที่ [13] นำเสนอการประยุกต์ใช้ SFCL เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวของระบบหนึ่งเครื่องจักรต่อกับบัสอนันต์ โดยทำการหาค่าที่เหมาะสมของ SFCL ด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าเฉพาะ (Eigenvalue) ของโหมดการแกว่ง (Oscillation mode)

บทความที่ [14] นำเสนอการประยุกต์ใช้ SFCL เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวของระบบหนึ่งเครื่องจักรต่อกับบัสอนันต์ โดยทำการหาค่าที่เหมาะสมของ SFCL แบบความต้านทานที่ทำให้พลังงานสูญเสียในสถานะ Quench มีค่าต่ำที่สุด

บทความที่ [15] นำเสนอการประยุกต์ใช้ SFCL เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังชนิดสามเครื่องจักรแบบรูป โดยใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมของ SFCL โดยกำหนดให้มี SFCL หนึ่งตัวติดตั้งในระบบแล้วหาค่าและค่าที่เหมาะสมของ SFCL

จากบทความต่างๆข้างต้น จะเห็นว่ายังไม่มียานวิจัยที่พิจารณาการหาค่าที่เหมาะสมของตำแหน่งจำนวนและค่าที่เหมาะสมของ SFCL พร้อมพิจารณาการทำให้พลังงานสูญเสียในสถานะ Quench ต่ำที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลังชนิดหลายเครื่องจักร งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวคิดใหม่ในการบูรณาการปัญหาทั้งหมดเข้ามาพิจารณาเพื่อหาตัวแปรที่สำคัญต่างๆ ข้างต้นของ SFCL ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการหาค่าและค่าที่เหมาะสมของ SFCL เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพชั่วคราวของระบบหลายเครื่องจักร
- 2) เพื่อประยุกต์หลักการหาค่าที่เหมาะสมในการสร้างปัญหาการทำให้เหมาะสมของ SFCL
- 3) เพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิผลของวิธีการทำให้เหมาะสมของ SFCL ที่นำเสนอในการทำเสถียรภาพชั่วคราว เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ระบบศึกษาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหกเครื่องจักรแบบตามยาว (Longitudinal interconnected six-area power system) ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศญี่ปุ่นตะวันตก
- 2) การศึกษาจะเป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์
- 3) ชนิดของ SFCL ที่ใช้ศึกษาเป็นแบบความต้านทาน

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหกพื้นที่ของญี่ปุ่นตะวันตก แบบจำลอง ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยการพิจารณาความคิดพร้อมสามเหลี่ยมที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบ เพื่อทำความเข้าใจด้านเสถียรภาพชั่วคราวของระบบ
- 2) ศึกษาแบบจำลอง SFCL เพื่อนำมาติดตั้งในระบบ ทำการทดสอบการทำงานด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์
- 3) ศึกษาวิธีฟังก์ชันพลังงาน เพื่อใช้สร้างปัญหาการทำให้เหมาะสมของตำแหน่ง จำนวน และค่าที่เหมาะสมของ SFCL พร้อมพิจารณาพลังงานสูญเสียใน SFCL ในสถานะ Quench
- 4) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์การแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสมของ SFCL ในระบบไฟฟ้ากำลังศึกษา
- 5) นำค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสม มาทดสอบประสิทธิภาพของ SFCL ในกรณีศึกษาต่างๆ ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์
- 6) สรุปผลการศึกษา เพื่อเขียนบทความวิจัยส่งวารสารวิชาการนานาชาติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) งานวิจัยนี้สามารถตีพิมพ์เป็นบทความฉบับเต็ม (Full paper) ในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI
- 2) องค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้วิธีฟังก์ชันพลังงานเพื่อหาตำแหน่ง จำนวนและค่าที่เหมาะสมของ SFCL ชนิดตัวต้านทานเพื่อทำเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้ากำลังชนิดหลายเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

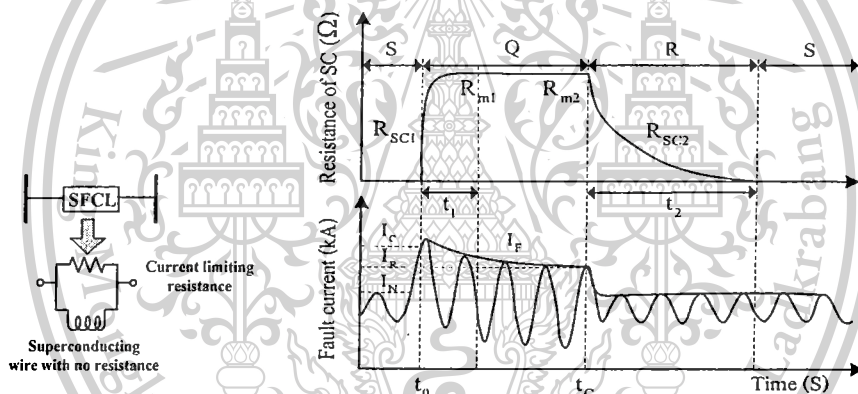
บทที่ 2

การหาตำแหน่ง จำนวน และค่าที่เหมาะสมของตัวจำกัดกระแสผิดพร้อมชนิดตัวนำยิ่งยวด เพื่อทำเสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักร

ในบทนี้ จะอธิบายวิธีหาตำแหน่ง จำนวน และค่าที่เหมาะสมของ SFCL ที่นำเสนอ เริ่มจากอธิบาย โครงสร้างของ SFCL ชนิดความต้านทาน แล้วตามด้วย ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ศึกษา วิธีการทำให้ เหมาะสมที่นำเสนอ และ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

2.1 โครงสร้างของ SFCL

ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของ SFCL ชนิดความต้านทาน (Resistive-type SFCL) ซึ่ง ประกอบด้วยความต้านทานขนานกับขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์



ภาพที่ 2.1 โครงสร้าง SFCL

ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานของ SFCL

นิยามของตัวย่อและตัวแปรในภาพที่ 2

- S : สถานะตัวนำยิ่งยวด (Superconducting state)
- Q : สถานะสูญเสียความเป็นตัวนำยิ่งยวด (Quenching state)
- R : สถานะคืนสภาพสู่ตัวนำยิ่งยวด (Recovery state)
- t_0 : เวลาที่เริ่มสถานะ Quench
- t_c : เวลาที่เริ่มสถานะ Recovery
- t_1 : ค่าเวลาคงตัวจาก สถานะ Superconducting ไปยัง Quench
- t_2 : ค่าเวลาคงตัวจากสถานะ Quench ไปยัง Superconducting
- I_c : กระแสวิกฤติที่สถานะ Quench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- I_R : กระแสวิกฤติที่สถานะ Recovery
 I_N : กระแสปรกติที่ไหลผ่าน SFCL
 I_F : กระแสผิดพลาดที่ไหลผ่าน SFCL
 R_{SC1} : ค่าความต้านทานในสถานะ Quench
 R_{SC2} : ค่าความต้านทานในสถานะ Recovery
 R_{m1} : ค่าความต้านทานสูงสุดในสถานะ Quench
 R_{m2} : ค่าความต้านทานสูงสุดก่อนจะเริ่มสถานะ Recovery

ภาพที่ 2.2 แสดงหลักการทำงานพื้นฐานของ SFCL อธิบายได้ดังนี้

- 1) ในสภาวะปรกติ SFCL จะอยู่ในสถานะตัวนำยิ่งยวด (Superconducting, S) กล่าวคือค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นศูนย์ ทำให้ความต้านทานขนานของ SFCL เป็นศูนย์ กระแสในสภาวะปรกติที่ไหลในระบบ I_N สามารถไหลผ่าน SFCL ได้ ดังนั้น การติดตั้ง SFCL เข้าไปในระบบจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบในสภาวะปรกติ
- 2) เมื่อเกิดสิ่งผิดพลาดขึ้นในระบบทำให้เกิดกระแสผิดพลาด I_F เพิ่มสูงขึ้นมากกว่ากระแสวิกฤติ I_C ที่ตั้งไว้ของ SFCL จะส่งผลให้ SFCL เปลี่ยนจากสถานะ S ไปเป็นสถานะสูญเสียความเป็นตัวนำยิ่งยวด (Quenching state, Q) ที่เวลา t_0 กล่าวคือค่าความต้านทานของ SFCL จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเอ็กซ์โพเนนเชียลด้วยค่าคงตัวเวลา t_1 จากศูนย์, R_{SC1} และไปสิ้นสุดที่ R_{m1} ตามสมการ

$$R_{SC1}(t) = R_{m1}(1 - \exp(-t/t_1)) \quad (2.1)$$

เมื่อ t เป็นค่าเวลาใดๆ

- 3) SFCL จะจำกัด I_F จนกระทั่งเมื่อ I_F ลดลงจนมีค่าน้อยกว่า I_R หลังจากนั้น SFCL จะเริ่มเข้าสู่สถานะคืนสภาพสู่ความเป็นตัวนำยิ่งยวด (Recovery state, R) ที่เวลา t_C ค่าความต้านทานของ SFCL จะลดลงอย่างเอ็กซ์โพเนนเชียลด้วยค่าคงตัวเวลา t_2 จาก R_{m2} , R_{SC2} และเป็นศูนย์อีกครั้งตามสมการ

$$R_{SC2}(t) = R_{m2}(\exp(-t/t_2)) \quad (2.2)$$

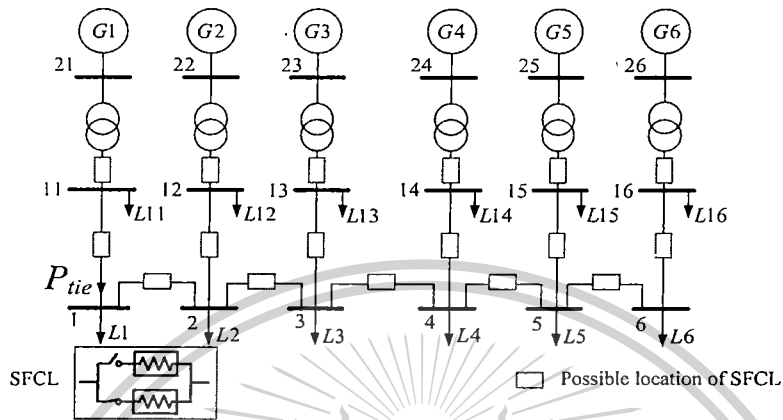
ในที่นี้ เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ จะสมมติให้ $R_{m1} = R_{m2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2 ระบบไฟฟ้ากำลังศึกษา



ภาพที่ 2.3 ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงชนิดหกพื้นที่

ภาพที่ 2.3 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงชนิดหกพื้นที่ซึ่งใช้ในการศึกษา จะเห็นว่าในระบบนี้มีตำแหน่งที่เป็นไปได้ในการติดตั้ง SFCL จำนวน 17 ตำแหน่ง ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าที่เหมาะสมของตำแหน่ง จำนวน ค่าความต้านทาน SFCL เมื่อพิจารณากำลังสูญเสีย

2.3 วิธีการทำให้เหมาะสมที่นำเสนอ

ในที่นี้จะประยุกต์ใช้วิธีฟังก์ชันพลังงานมาเพื่อตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสม เริ่มจากพิจารณาฟังก์ชันพลังงาน

$$V = V_k(\omega) + V_r(\delta) \quad (2.3)$$

$$\underline{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T \quad (2.4)$$

$$\underline{\delta} = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n]^T \quad (2.5)$$

เมื่อ v_k เป็นพลังงานจลน์ v_r เป็นพลังงานศักย์ $\underline{\omega}$ เป็นเวกเตอร์ของความเร็วโรเตอร์ $\underline{\delta}$ เป็นเวกเตอร์ของมุมโรเตอร์ ω_i และ δ_i เป็นความเร็วและมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลำดับที่ i^{th} เมื่อ $i = 1, \dots, n$. และตัวยก T หมายถึงการทรานสโพสของเมตริกซ์

อนุพันธ์ของฟังก์ชันพลังงาน V เทียบเวลาคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \dot{\omega}_i + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \dot{\delta}_i \right) \quad (2.6)$$

เมื่อสัญลักษณ์ “.” แทนอนุพันธ์เทียบกับเวลา ในทางกายภาพ \dot{V} มีค่าเป็นลบแสดงอัตราการลดลงไปของพลังงานเนื่องจากการหน่วง ยิ่งทำให้ \dot{V} เป็นลบมากเท่าใด ก็จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการหน่วงระบบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดลงไปของพลังงานอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเกิดฟอลต์และการหน่วงการแกว่งของโรเตอร์ที่เร็วขึ้น

ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลำดับที่ i^{th} สามารถแสดงได้จากสมการการแกว่ง

$$\dot{\omega}_i = (P_{mi} - P_{ei}) / M_i \quad (2.7)$$

เมื่อ M_i เป็นค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_{mi} และ P_{ei} เป็นกำลังทางกลและกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i^{th} ตามลำดับ แทนสมการ (2.7) ใน (2.6) จะได้

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n \underbrace{\left(\frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{P_{mi}}{M_i} + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \dot{\delta}_i \right)}_{1^{st} \text{ term}} - \sum_{i=1}^n \underbrace{\frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{1}{M_i} P_{ei}}_{2^{nd} \text{ term}} \quad (2.8)$$

จากสมการพลังงานจลน์สะสมในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด

$$V_K(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t))^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\Delta \omega_i(t))^2 \quad (2.9)$$

เนื่องจาก $\partial V_K / \partial \omega_i = M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t))$ สามารถแสดงด้านขวาของ (2.8) ได้คือ

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n \underbrace{\left((\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{mi} + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \dot{\delta}_i \right)}_{1^{st} \text{ term}} - \sum_{i=1}^n \underbrace{(\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{ei}}_{2^{nd} \text{ term}} \quad (2.10)$$

เนื่องจากช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์สั้นมาก การเปลี่ยนแปลงของ δ , P_{mi} และ V_P มีค่าน้อยมาก ดังนั้น พจน์แรกของ (2.10) จึงแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนพจน์ที่สองซึ่งขึ้นอยู่กับ P_{ei} นั้นจะส่งผลกระทบต่อค่าของ \dot{V} อย่างมาก ในที่นี้ จะใช้ SFCL เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของ P_{ei} ในช่วงเกิดฟอลต์ เพื่อให้ค่า \dot{V} เป็นลบมาก ๆ ด้วยการทำให้พจน์ที่สองทางด้านขวาของ (2.10) มีค่ามากที่สุด นอกจากนี้ จะพิจารณาการทำให้พลังงานสูญเสียของ SFCLj ซึ่งแสดงในสมการที่ (2.11) น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$E_{SFCLj} = \int_{t_0}^{t_f} i_j^2(t) R_{nj} dt \rightarrow \text{Minimum} \quad (2.11)$$

เมื่อรวมพจน์ที่สองทางด้านขวาของ (2.8) และ (2.9) สามารถตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมได้คือ

$$\text{Maximize} \left(\sum_{i=1}^n (\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{ei} \right) + \sum_{j=1}^{N_{SFCL}} 1/E_{SFCLj} \quad (2.12)$$

subject to

$$(a) 0.001 \text{ pu} \leq R_{nj} \leq 5 \text{ pu} \text{ (ขอบเขตของ } R_{nj} \text{)}$$

$$(b) 1 \leq N_{SFCL} \leq N_{SFCL(max)} \text{ (จำนวนที่เป็นไปได้ของ SFCL)}$$

$$(c) 1 \leq N_L \leq N_{L(max)} \text{ (ตำแหน่งที่เป็นไปได้ของ SFCL)}$$

เมื่อ N_L เป็นจำนวนสายส่งซึ่งเป็นตำแหน่งติดตั้งของ SFCL

N_{SFCL} เป็นจำนวนของ SFCL ซึ่งติดตั้งในระบบ

$N_{L(max)}$ เป็นจำนวนที่มากที่สุดของ SFCL ที่จะติดตั้งในระบบนี้

เนื่องจาก N_L เท่ากับ N_{SFCL} นอกจากนี้ N_L ยังส่งผลกระทบต่อพจน์ของพลังงานสูญเสียใน (2.11) อีกด้วย ในที่นี้ $N_{L(max)}$ และ $N_{SFCL(max)}$ เท่ากับ 17 และทำการแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) ภาพที่ 2.4 แสดงโพลาร์แกรมของกระบวนการทำให้เหมาะสมที่น่าสนใจ

2.4 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในที่นี้ ทำการแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสม 100 รอบ ภายใต้เงื่อนไขทำงานและโหลดในกรณี 1 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ผลลัพธ์ของตำแหน่ง จำนวน และค่าความต้านทานที่เหมาะสมได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

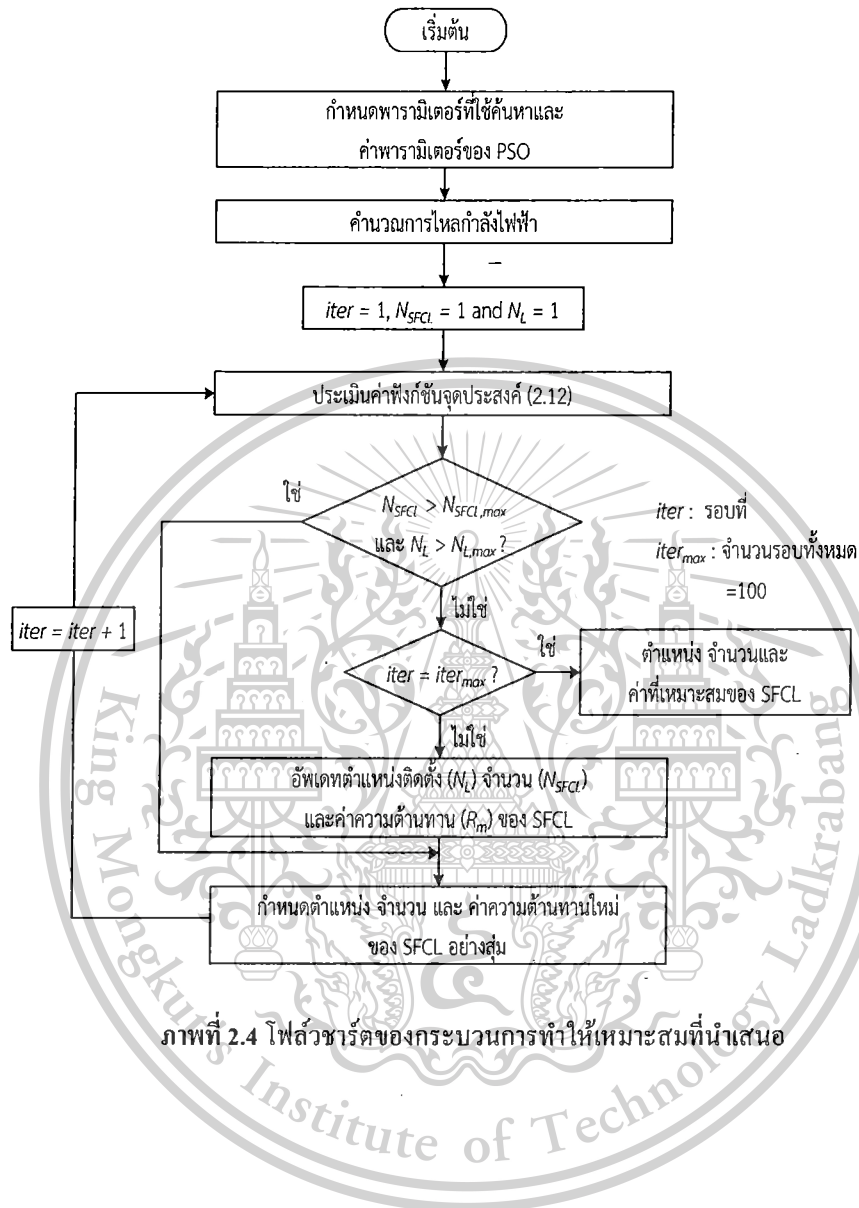
ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการทำงานและการระบบ

กรณีศึกษา	P_{ic} (pu)	ระบบ โครงข่าย	พอลต์ที่เกิดขึ้นในการจำลองไม่เชิงเส้น
1	3.0	ไม่เปลี่ยนแปลง	เกิดลัดวงจรสามเฟสที่บัส 12 ที่เวลา 5 s เป็นเวลา 50 ms
2	3.0	วงจรหนึ่งของสายส่งระหว่างบัส 4 และ บัส 5 ถูกเปิดออก	เกิดลัดวงจรสามเฟสที่บัส 2 ที่เวลา 5 s เป็นเวลา 50 ms
3	3.0	วงจรหนึ่งของสายส่งระหว่างบัส 1 และ บัส 2 ถูกเปิดออก	เกิดลัดวงจรสามเฟสที่บัส 2 ที่เวลา 5 s เป็นเวลา 50 ms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2.4 โฟลว์ชาร์ตของกระบวนการทำให้เหมาะสมที่นำเสนอ

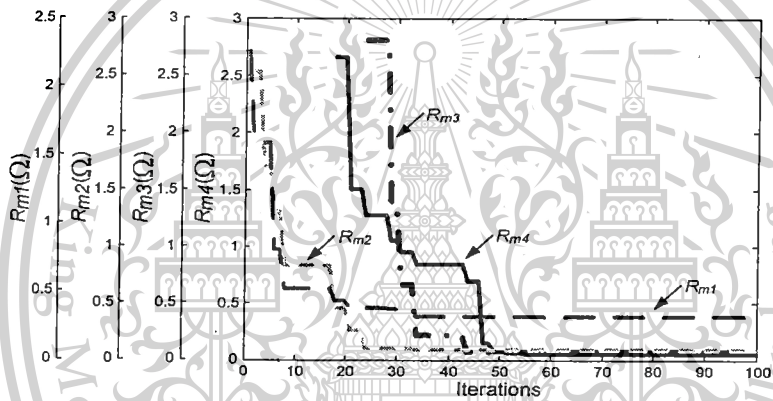
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.2 ผลการทำให้เหมาะสม

ตำแหน่งที่เหมาะสม	PSFCL	CSFCL
สายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ บัสที่ 2	PSFCL1: $R_{m1} = 0.287 \Omega$ $E_{PSFCL1} = 22.857 \text{ MJ}$	CSFCL1: $R_{m1} = 0.374 \Omega$ $E_{CSFCL1} = 58.442 \text{ MJ}$
สายส่งระหว่างบัสที่ 5 และ บัสที่ 6	PSFCL2: $R_{m2} = 0.081 \Omega$ $E_{PSFCL2} = 22.838 \text{ MJ}$	CSFCL2: $R_{m2} = 0.441 \Omega$ $E_{CSFCL2} = 61.588 \text{ MJ}$
สายส่งระหว่างบัสที่ 2 และ บัสที่ 12	PSFCL3: $R_{m3} = 0.064 \Omega$ $E_{PSFCL3} = 49.268 \text{ MJ}$	CSFCL3: $R_{m3} = 0.069 \Omega$ $E_{CSFCL3} = 54.532 \text{ MJ}$
สายส่งระหว่างบัสที่ 5 และ บัสที่ 15	PSFCL4: $R_{m4} = 0.057 \Omega$ $E_{PSFCL4} = 5.918 \text{ MJ}$	CSFCL4: $R_{m4} = 0.062 \Omega$ $E_{CSFCL4} = 20.258 \text{ MJ}$



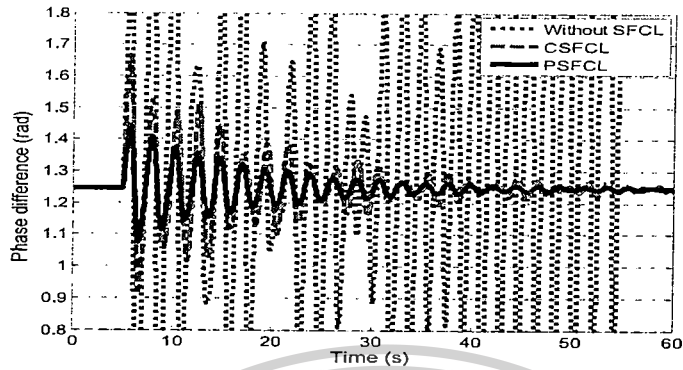
ภาพที่ 2.5 เส้นโค้งการลู่เข้าของ PSFCL ที่ทำให้เหมาะสมจำนวน 4 ตัว

ภาพที่ 2.5 แสดงเส้นโค้งการลู่เข้าของค่าความต้านทานทั้งสี่ตัวที่ทำให้เหมาะสม ในที่นี้จะเรียก SFCL ที่นำเสนอว่า “PSFCL” ในที่นี้จะทำการหา SFCL ที่ทำให้เหมาะสมด้วยจำนวนและตำแหน่งเดียวกันกับ PSFCL โดยสมการ (2.27) โดยไม่พิจารณาพจน์ของพลังงานสูญเสียเพื่อการเปรียบเทียบ ในที่นี้จะเรียก SFCL ที่นำมาเปรียบเทียบว่า “CSFCL” เพื่อพิจารณาผลกระทบของพจน์พลังงานสูญเสียต่อประสิทธิภาพในการทำเสถียรภาพของ SFCL ตารางที่ 2 แสดงผลการทำให้เหมาะสมของ CSFCL ในตารางนี้ ยังได้แสดงพลังงานสูญเสียของ PSFCL และ CSFCL ในช่วงสถานะสูญเสียความเป็นตัวนำยิ่งยวด จะเห็นได้ว่า พลังงานสูญเสียของ PSFCL มีค่าน้อยกว่า CSFCL

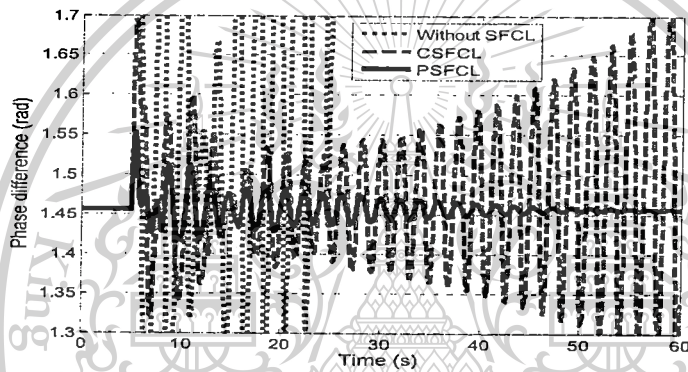
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

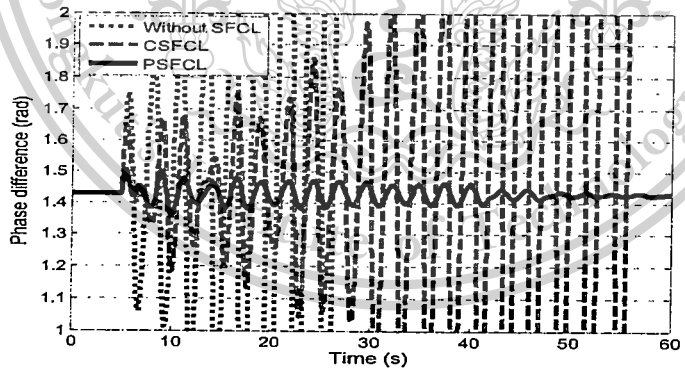
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2.6 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 1



ภาพที่ 2.7 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 2



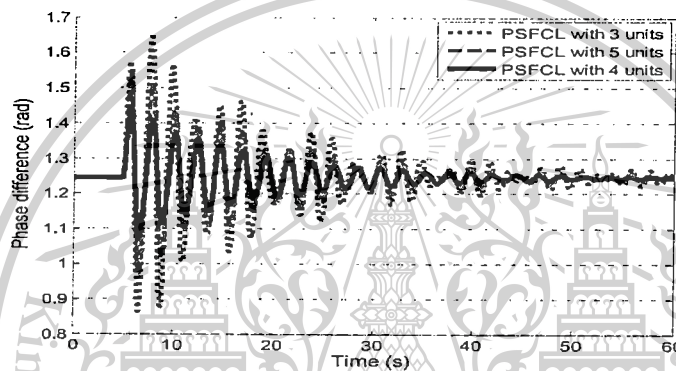
ภาพที่ 2.8 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

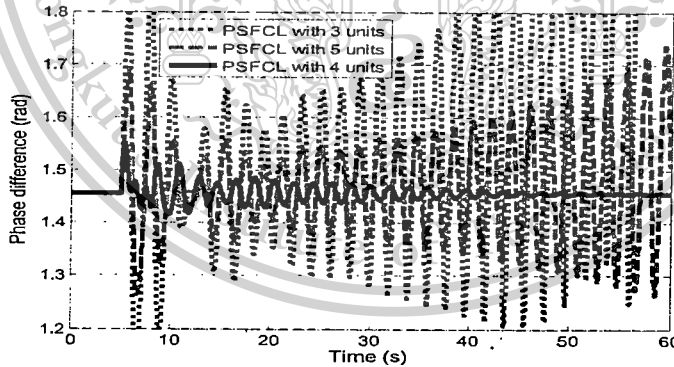
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาพที่ 2.6 – 2.8 แสดงความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 1 ถึง 3 ตามลำดับ ในกรณีที่ติดตั้ง SFCL นั้นระบบสูญเสียเสถียรภาพ ในกรณีที่ 1 PSFCL ให้ผลการทำเสถียรภาพที่เหนือกว่า CSFCL ในกรณีที่ 2 และ 3 CSFCL ไม่สามารถทนทานต่อฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบจนไม่สามารถทำเสถียรภาพระบบได้ พลังงานสูญเสียที่เป็นปริมาณสูงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำเสถียรภาพของ CSFCL ลดลง อีกด้านหนึ่ง PSFC สามารถลดการแกว่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น PSFCL ซึ่งพิจารณาพลังงานสูญเสียในการทำให้เหมาะสมมีประสิทธิภาพเหนือกว่า CSFCL



ภาพที่ 2.9 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 1

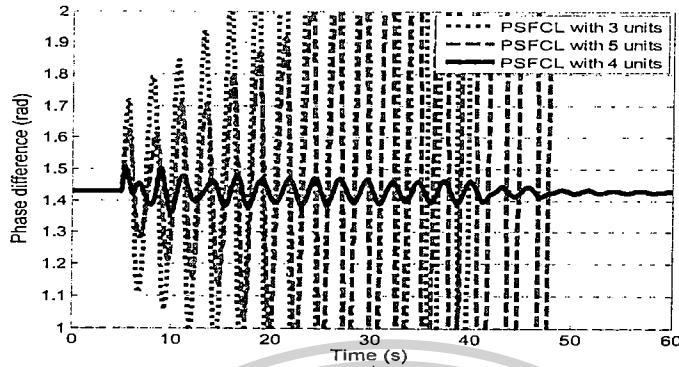


ภาพที่ 2.10 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 2

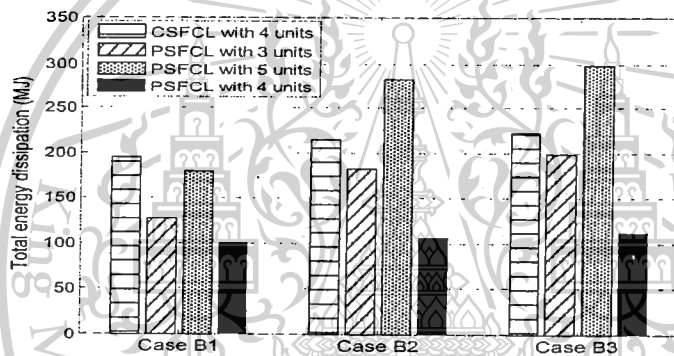
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2.11 ความแตกต่างระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 6 ในกรณี 3



ภาพที่ 2.12 การเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียของ SFCL

เพื่อแสดงให้เห็นว่า PSFCL จำนวน 4 ตัวเป็นจำนวนที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้ จะทำการเปรียบเทียบกับ PSFCL จำนวน 3 และ 5 ตัวที่ทำให้เหมาะสมด้วยฟังก์ชันจุดประสงค์ในสมการ (2.10) และกรณีที่ 2 ตารางที่ 2.3 แสดงผลการทำให้เหมาะสมของ PSFCL ทั้ง 3 และ 5 ตัว ภาพที่ 2.9, 2.10 และ 2.11 แสดงผลเปรียบเทียบการทำเสถียรภาพของ PSFCL จำนวน 3, 4 และ 5 ตัวในกรณีที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ในกรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการทำเสถียรภาพของ PSFCL จำนวน 4 ตัวสูงกว่า PSFCL จำนวน 3 และ 5 ตัว ในกรณีที่ 2 และ 3 PSFCL จำนวน 3 และ 5 ตัวสูญเสียประสิทธิภาพในการทำเสถียรภาพ ในขณะที่ PSFCL จำนวน 4 ตัวยังสามารถลดการแกว่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาพที่ 2.12 เปรียบเทียบพลังงานสูญเสียรวมของ SFCL 3, 4, 5 ตัวในช่วง Quench ทั้งสามกรณี จะเห็นว่าพลังงานสูญเสียรวมในกรณี SFCL 4 ตัวมีค่าน้อยที่สุด ผลการจำลองนี้แสดงให้เห็นว่า PSFCL จำนวน 4 ตัวเป็นจำนวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบนี้ นอกจากนี้จะให้ประสิทธิภาพในการทำเสถียรภาพชั่วคราวที่สูงกว่าแล้วยังให้พลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.3 SFCL จำนวน 3 และ 5 ตัวที่ทำให้เหมาะสม

Three SFCL units	FIVE SFCL UNITS
SFCL3-1 : $R_{m3-1} = 0.318 \Omega$ (line between bus 2 and bus 3) $E_{PSFCL3-1} = 50.411 \text{ MJ}$	SFCL5-1 : $R_{m5-1} = 0.306 \Omega$ (line between bus 2 and bus 3) $E_{PSFCL5-1} = 42.261 \text{ MJ}$
SFCL3-2 : $R_{m3-2} = 0.063 \Omega$ (line between bus 3 and bus 13) $E_{PSFCL3-2} = 55.041 \text{ MJ}$	SFCL5-2 : $R_{m5-2} = 0.099 \Omega$ (line between bus 4 and bus 5) $E_{PSFCL5-2} = 31.123 \text{ MJ}$
SFCL3-3 : $R_{m3-3} = 0.064 \Omega$ (line between bus 5 and bus 15) $E_{PSFCL3-3} = 22.112 \text{ MJ}$	SFCL5-3 : $R_{m5-3} = 0.095 \Omega$ (line between bus 1 and bus 11) $E_{PSFCL5-3} = 30.858 \text{ MJ}$
	SFCL5-4 : $R_{m5-4} = 0.067 \Omega$ (line between bus 4 and bus 14) $E_{PSFCL5-4} = 52.612 \text{ MJ}$
	SFCL5-5 : $R_{m5-5} = 0.068 \Omega$ (line between bus 3 and bus 13) $E_{PSFCL5-5} = 22.658 \text{ MJ}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกวนนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการทำให้เหมาะสมของตำแหน่ง จำนวนและค่าของ SFCL เพื่อทำเสถียรภาพระบบชั่วคราวในระบบหลายเครื่องจักรด้วยหลักการฟังก์ชันพลังงานในการตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ นั้นจะประยุกต์ใช้หลักการของฟังก์ชันพลังงานเข้ามาร่วมพิจารณากับการทำให้พลังงานสูญเสียในค่าความต้านทานของ SFCL ในช่วง Quench ให้มีค่าน้อยที่สุด หลังจากนั้นแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค จะทำให้ได้ผลของตำแหน่ง จำนวนและค่าที่เหมาะสมของ SFCL ที่มีค่าพลังงานสูญเสียต่ำสุด และมีประสิทธิผลในการทำเสถียรภาพชั่วคราวไม่ว่าจะเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งใดๆ ในระบบ ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถที่จะสรุปได้คือจำนวน SFCL ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบหกเครื่องจักรคือ 4 ตัวซึ่งให้ผลประสิทธิผลการทำเสถียรภาพสูงสุดและมีพลังงานสูญเสียต่ำสุดเมื่อเทียบกับ SFCL จำนวน 3 และ 5 ตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

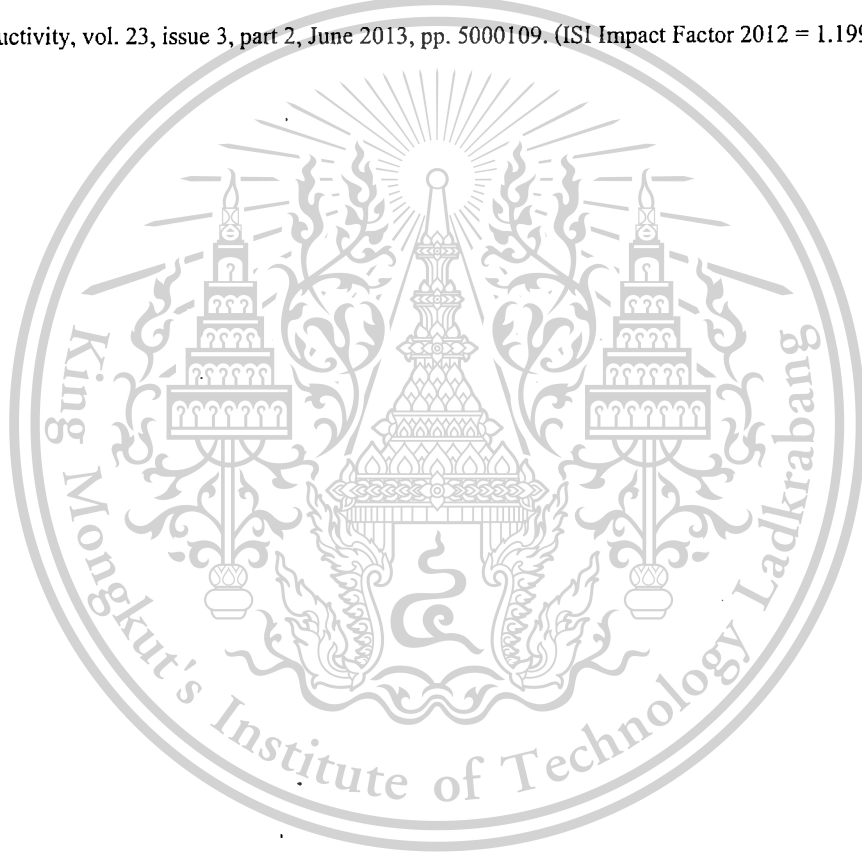
บทที่ 4

ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

4.1 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

Issarachai Ngamroo and Sitthidet Vachirasricirikul, "Optimization of SFCL and SMES units for multimachine transient stabilization based on kinetic energy," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, issue 3, part 2, June 2013, pp. 5000109. (ISI Impact Factor 2012 = 1.199)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

137795

บรรณานุกรม

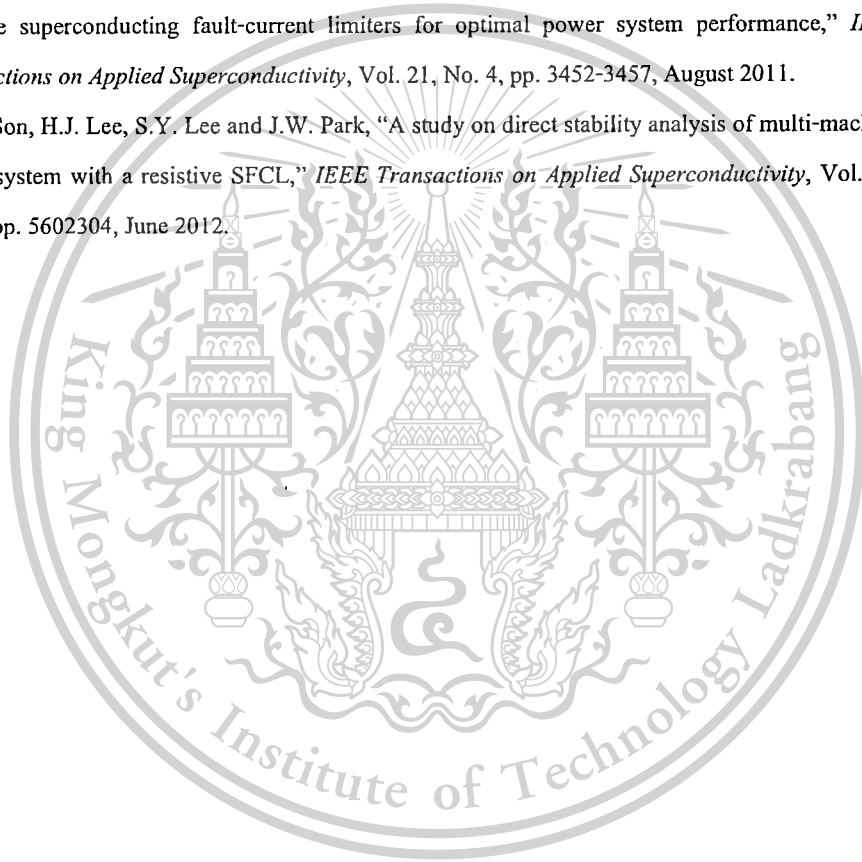
- [1] IEEE Standard Specification for High-Voltage (>1000 V) Distribution Class Current-Limiting Type Fuses and Fuse Disconnecting Switches, IEEE Std C37.47-2011, 2012.
- [2] <http://www.abb.com/product/db0003db004279/c125739900636470c125698c00553a43.aspx>
- [3] IEEE Standard Requirement, Terminology, and Test Code for Dry-Type-Air-Core Series-Connected Reactors, IEEE Std C57.16-1996, 1997.
- [4] C-T. Hsieh and M. Pedram, "Architectural energy optimization by bus splitting," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol.21, Issue 4, pp.408-414, 2002.
- [5] K. Hongesombut, Y. Mitani and K. Tsuji, "Optimal location assignment and design of superconducting fault current limiters applied to loop power systems," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, pp. 1828-1831, June 2003.
- [6] J-H. Teng and C.-N. Lu, "Optimum fault current limiter placement with search space reduction technique," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 4, No. 4, pp. 485-494, 2010.
- [7] W.S Kim, *et al*, "Dynamic characteristics of a 22.9 kV hybrid SFCL for short-circuit test considering a simple coordination of protection system in distribution networks," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 22, No. 3, pp. 5601404, June 2012.
- [8] W.S Kim, *et al*, "Reliability Evaluation of Distribution Network With DG Considering the Reliability of Protective Devices Affected by SFCL," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 22, No. 3, pp. 5601404, June 2012.
- [9] M. Sjostrom, R. Cherkaoui and B. Dutoit "Enhancement of power system transient stability using superconducting fault current limiters," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 9, No. 2, pp. 5601404, June 1999.
- [10] M. Tsuda, Y. Mitani, K. Tsuji and K. Kakihana, "Application of resistor based superconducting fault current limiter to enhancement of power system transient stability," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 11, No. 1, pp. 2122-2125, March 2001.
- [11] B.C. Sung, D.K. Park, J.W. Park and T.K. Ko, "Study on a Series Resistive SFCL to Improve Power System Transient Stability Modeling, Simulation, and Experimental Verification," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 7, pp. 2412-2419, July 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [12] B.C. Sung, D.K. Park, J.W. Park and T.K. Ko, "Study on optimal location of a resistive SFCL applied to an electric power grid," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 19, No. 3, pp. 2048-2052, March 2009.
- [13] B.C. Sung and J.W. Park, "Optimal parameter selection of resistive SFCL applied to a power system using eigenvalue analysis," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 20, No. 3, pp. 1147-1150, June 2010.
- [14] S.M. Blair, C.D. Booth, N.K. Singh, G.M. Burt and C.G. Bright, "Analysis of energy dissipation in resistive superconducting fault-current limiters for optimal power system performance," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 21, No. 4, pp. 3452-3457, August 2011.
- [15] G.T. Son, H.J. Lee, S.Y. Lee and J.W. Park, "A study on direct stability analysis of multi-machine power system with a resistive SFCL," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 22, No. 3, pp. 5602304, June 2012.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Optimized SFCL and SMES Units for Multimachine Transient Stabilization Based on Kinetic Energy Control

Issarachai Ngamroo, *Member, IEEE*, and Sitthidet Vachirasricirikul

Abstract—Power system transient instability due to short circuits may result in loss of synchronism. To improve stability, resistive type superconducting fault current limiter (SFCL) and superconducting magnetic energy storage (SMES) can be effectively used. This paper proposes a new optimization of multiple SFCL and SMES units for transient stabilization in a multimachine power system based on kinetic energy control. Two applications of the proposed optimization are studied in the West Japan six-area interconnected power system. First, the SFCL is applied to solve the inevitable problems of SMES used for transient stability enhancement, i.e., required large power and energy capacities, and fail-operational performance due to the large voltage drop at the SMES bus. When the fault occurs, the SFCL swiftly reduces the increase in the kinetic energy of all generators by limiting the fault current. Subsequently, the SMES handles the remaining unbalanced kinetic energy. The optimization problem of the resistive value of the SFCL is formulated, considering energy dissipation in combination with the power controller parameters of SMES with optimal coil size. A simulation study shows the superior effect of the combined SFCL and SMES over either device separately. With SFCL, the low voltage ride-through capability of SMES can be enhanced. The MW and MJ capacities of the SMES are also significantly reduced. Second, a new optimization of multiple SFCL units considering optimal locations, optimal number, optimal resistive values, and energy dissipation during quenching state is presented. The optimization problem is formulated by maximizing the decreasing rate of energy function during fault in combination with minimizing the energy dissipation of the SFCL during quenching state. A simulation study confirms the superior effect of optimal SFCL units over nonoptimal SFCL units.

Index Terms—Energy function, optimization, power system stability, superconducting fault current limiter, superconducting magnetic energy storage.

I. INTRODUCTION

LARGE disturbances such as short circuits may jeopardize the transient stability of power systems. Without the proper countermeasure, the system may lose synchronism and wide-area blackouts may occur [1]. To improve the transient

stability, the resistive type superconducting fault current limiter [2], [3] and superconducting magnetic energy storage (SMES) can be applied [4], [5]. This paper presents a new optimization technique of multiple SFCL and SMES units based on kinetic energy control. To evaluate the effectiveness of the proposed optimization, two applications are carried out in the West Japan six area interconnected power systems.

In the first application, when the SMES is applied to enhance the transient stability due to severe faults, the unavoidable problems of SMES are the required large power and energy capacities, and low voltage ride-through capability [6]. To overcome these problems, the SFCL has been successfully applied to enhance the SMES control effect in a single-machine infinite bus system [6], [7]. However, the application of multiple SFCL and SMES units for a multimachine transient stability improvement has never been studied. This paper presents a new optimization technique of multiple SFCL and SMES units for a multimachine transient stabilization. The optimization of the resistive values of the SFCL also takes the minimal energy dissipation during quenching state into account. In addition, the coil size and the stabilizing performance of SMES power controllers are optimized. Solving the problem using particle swarm optimization (PSO) [8], all optimal control parameters are obtained simultaneously. A simulation study shows the stabilizing effect of optimized SFCL and SMES units.

For the second application, it is well known that the resistive type SFCL for transient stability improvement in multimachine power systems faces the problems of optimal locations, optimal number, optimal resistive values, and high energy dissipation during quenching state [9]–[12]. All the vital issues aforementioned have never been simultaneously studied in the previous literature. To cope with these issues, a new optimization of multiple SFCL units is proposed. The optimization problem is formulated by maximizing the decreasing rate of energy function during fault in combination with minimizing the energy dissipation of the SFCL during quenching state. The stabilizing effect of optimal SFCL units is confirmed by a simulation study.

II. APPLICATION 1: OPTIMIZED MULTIPLE SFCL AND SMES UNITS FOR TRANSIENT STABILIZATION

A. Study System

Fig. 1 depicts the West Japan six-area interconnected power system that is used as the study system [13]. Each transmission line is a double circuit. The synchronous generator is

Manuscript received October 2, 2012; accepted January 14, 2013. Date of publication January 25, 2013; date of current version February 6, 2013. This work was supported in part by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

I. Ngamroo is with the School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (e-mail: ngamroo@gmail.com).

S. Vachirasricirikul is with the Department of Electrical Engineering, School of Engineering, University of Phayao, Phayao 56000, Thailand (e-mail: sitthidetv@hotmail.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.2013.2240760

1051-8223/\$31.00 © 2013 IEEE

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

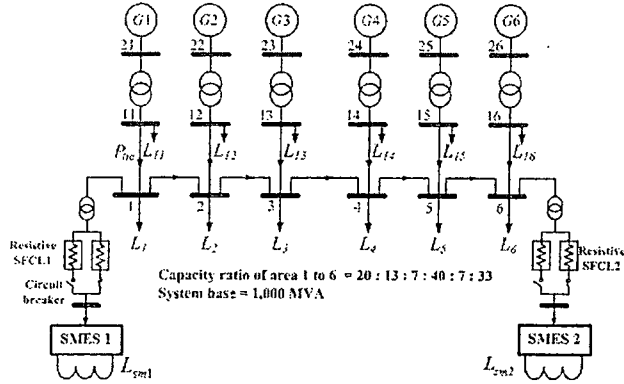


Fig. 1. Six-area interconnected power systems.

represented by the fifth-order Park's model [1]. The exciter and governor are represented by the first-order transfer function [1]. The system base values of power, voltage, current, and impedance are 1,000 MVA, 25 kV, 40 kA, and 0.625Ω , respectively. To augment the transient stability, based on the residue method [14], two units of SMES and SFCL are placed at buses 1 and 6. To avoid the disconnection of SMES from the system, two circuits of SFCL in series with the circuit breaker are connected in parallel. When one SFCL is switched off from the grid after the occurrence of fault to allow the re-cooling, another SFCL with zero resistance is switched on immediately. As a result, the SMES can operate and stabilize the system continuously.

B. Resistive-Type SFCL Model

A time-variant resistance is used to represent the resistive-type SFCL as [9]–[12]

$$R_{SFCLj}(t) = R_{mj} (1 - \exp(-t/T_{SC})), \quad j = 1, 2 \quad (1)$$

where R_{mj} is the optimized resistance of the SFCL $_j$ and T_{SC} is the time constant of the SFCL during transition from the superconducting state to the quenching state, which is assumed to be 1 ms [9]–[12]. In the recovery state, the SFCL resistance exponentially decreases to zero with 50 ms time constant.

C. SMES Model

Fig. 2 shows the SMES model with active and reactive power ($P - Q$) control [15], [16]. In the model, $K_{PK}(s)$ and $K_{QK}(s)$ are the active and the reactive power controllers of the SMES $_k$ ($k = 1, 2$), respectively, which are represented by the first-order lead/lag compensator as

$$K_{PK}(s) = K_{PCk} \left(\frac{(1 + T_{P1k}s)}{(1 + T_{P2k}s)} \right), \quad (2)$$

$$K_{QK}(s) = K_{QCk} \left(\frac{(1 + T_{Q1k}s)}{(1 + T_{Q2k}s)} \right) \quad (3)$$

where K_{PCk} and K_{QCk} are controller gains, and T_{P1k} , T_{P2k} , T_{Q1k} , and T_{Q2k} are time constants. The input signals of $K_{PK}(s)$ and $K_{QK}(s)$ for SMES1 and SMES2 are active power

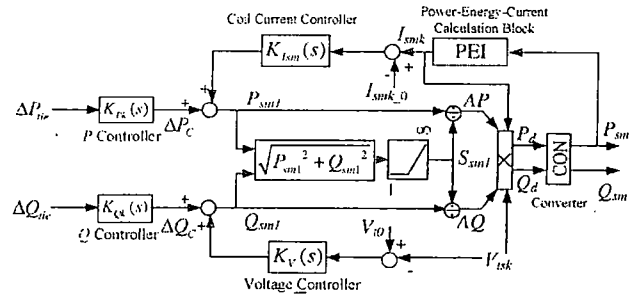


Fig. 2. Block diagram of the SMES control scheme.

deviation (ΔP_{tie}) and reactive power deviation (ΔQ_{tie}) in a tie-line from buses 11 to 1 and from buses 16 to 6, respectively.

In this model, the effect of SMES coil current (I_{smk}) is also considered. The lower and upper current limits are assigned as $0.30I_{smk_0}$ and $1.38I_{smk_0}$, respectively, where I_{smk_0} is the initial coil current. Additionally, the acceptable range of the SMES bus voltage (V_{tsk}) is specified between 0.95 and 1.05 pu.

III. PROPOSED OPTIMIZATION

The proposed optimization concept of SFCL and SMES can be explained as follows. When the fault occurs, the SFCL quickly reduces the fault current and alleviates the change in the electrical power output of generator. As a result, the change in speed and kinetic energy of all generators after the fault is cleared, can be minimized. Subsequently, the SMES eliminates the remaining unbalanced kinetic energy. The formulation of the optimization problem for SFCL and SMES can be explained as follows.

A. Formulation of SFCL Optimization

SFCL optimization is carried out to suppress excessive kinetic energy due to the fault and to minimize the energy dissipation of the SFCL during quenching state. In a power system with n machines, the energy function V can be expressed by [1]

$$V = V_K(\underline{\omega}) + V_P(\underline{\delta}), \quad (4)$$

$$\underline{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T, \quad (5)$$

$$\underline{\delta} = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n]^T \quad (6)$$

where V_K is the kinetic energy, V_P is the potential energy, $\underline{\omega}$ is the vector of rotor speed, $\underline{\delta}$ is the vector of rotor angle, and ω_i and δ_i are the speed and angle of the i th-generator, respectively, where $i = 1, \dots, n$. The superscript T means the matrix transpose.

After the fault occurs, it is assumed that the energy function when the fault is cleared, can be written as

$$V^f = V(\underline{\delta}^f, \underline{\omega}^f) \quad (7)$$

where $\underline{\delta}^f$ and $\underline{\omega}^f$ are the vectors of rotor angle and speed when the fault is cleared, respectively. As mentioned in [1], if V^f is minimized, the first swing of the rotor angle is minimum. Since

the fault duration is very short, the variation of rotor angle in this period is very small. As a result, V_P which depends on the rotor angle, hardly changes. Accordingly, instead of minimizing V^f , the kinetic energy when the fault is cleared, (V_K^f), can be minimized as

$$V_K^f = V_K(\underline{\omega}^f) \rightarrow \text{Minimum} \quad (8)$$

Generally, the kinetic energy V_K can be expressed by

$$\begin{aligned} V_K(\underline{\omega}) &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\omega_i(t) - \omega_0(t))^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\Delta\omega_i(t))^2, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \omega_0(t) &= \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i(t) M_i}{M_T} \\ &= \frac{\omega_1(t) M_1 + \omega_2(t) M_2 + \dots + \omega_n(t) M_n}{M_1 + M_2 + \dots + M_n}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (11)$$

where M_i is the inertia constant of the i th-generator, $\omega_0(t)$ is the speed of the system inertia center, $\Delta\omega_i(t)$ is the speed deviation of the i th-generator, and M_T is the total inertia.

For the short duration of the fault, the electrical power output of each generator is almost constant. Accordingly, the rotor speed of the i th-generator at the time of fault clearing can be calculated from

$$\omega_i^f(t_f) = \omega_i(t_0) + \alpha_i t_f \quad (12)$$

where α_i is the rotor acceleration during the fault, t_0 is the time of fault occurrence, and t_f is the fault clearing time. Here the value of α_i can be calculated from

$$\alpha_i = \frac{(P_{mi} - P_{efi})}{M_i} \quad (13)$$

where P_{mi} and P_{efi} are the mechanical power input and the electrical power output of the i th-generator at the time of fault occurrence, respectively. Consequently, V_K^f can be written as

$$V_K^f \cong A t_f^2, \quad (14)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\alpha_i - \alpha_0)^2 \rightarrow \text{Minimum}, \quad (15)$$

$$\alpha_0 = \sum_{i=1}^n M_i \alpha_i / M_T \quad (16)$$

where α_0 is the acceleration of the system inertia center. Based on (8) and (14), the minimal V_K^f can be achieved by minimizing A in (15). The physical meaning of A is the unbalanced degree of all generator accelerations after the fault occurs. Accordingly, the more A is minimized, the higher the stabilizing effect of the SFCL.

Besides, when the fault occurs, the energy dissipation E_{SFCLj} of SFCLj during the quenching state is minimized as

$$E_{SFCLj} = \int_{t_0}^{t_f} i_j^2(t) R_{mj} dt \rightarrow \text{Minimum} \quad (17)$$

where $i_j(t)$ is the current flow through SFCLj.

B. Formulation of SMES Optimization

After the control of the SFCL, the SMES continues to get rid of the unbalanced kinetic energy. To realize this concept, the P and Q controllers of the SMES in (2) and (3) are optimized so that the integral absolute error of speed deviations of all generators is minimal as

$$\sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_s} |\Delta\omega_i(t)| dt \rightarrow \text{Minimum} \quad (18)$$

where t_s is the final time of simulation.

In addition, the superconducting coil inductance and the initial coil current of the SMES are minimized so that the optimal initial energy capacity of the SMES is achieved as

$$E_{SMESk} = \frac{1}{2} L_{smk} I_{smk_0}^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (19)$$

where E_{SMESk} is the initial stored energy of SMESk, L_{smk} is the coil inductance, and I_{smk_0} is the initial coil current.

C. Simultaneous Optimization of SFCL and SMES

Combining (15), (17)–(19), the multi-objective optimization problem can be formulated as

$$\text{Minimize } A + \sum_{j=1}^2 E_{SFCLj} + \sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_s} |\Delta\omega_i(t)| dt + \sum_{k=1}^2 E_{SMESk} \quad (20)$$

subject to

- $0.0001 \leq R_{mj} \leq 5 \text{ pu}$ ($6.25 \times 10^{-5} \Omega \leq R_{mj} \leq 3.125 \Omega$) (range of SFCL resistance)
- $0.0001 \leq K_{Pk}, K_{Qk} \leq 100$ (range of SMES gain)
- $0.0001 \leq T_{P1k}, T_{P2k}, T_{Q1k}, T_{Q2k} \leq 1$ (range of SMES time constant)
- $0.95 \leq V_{tsk} \leq 1.05 \text{ pu}$ (range of SMES bus voltage)
- $0.3 I_{smk_0} \leq I_{smk} \leq 1.38 I_{smk_0} \text{ pu}$ (range of SMES coil current)
- $0.0001 \leq I_{smk_0} \leq 0.6337 \text{ pu}$ (range of SMES initial coil current)
- $0.0001 \leq L_{smk} \leq 10 \text{ H}$ (range of SMES coil inductance)

This optimization is carried out by nonlinear simulation based on the operating condition and applied disturbance of case A1 in Table I. Note that $t_0 = 5 \text{ s}$, $t_f = 5.05 \text{ s}$, and $t_s = 50 \text{ s}$. Note that all parameters can vary freely within the assumed range and depend on each other.

TABLE I
OPERATING CONDITIONS AND APPLIED FAULTS

Case study	P_{ne} (pu)	Network condition	Applied faults in nonlinear simulation
A1	3.2 (heavy flow)	No change.	3 phase fault at bus 3 for 50 ms.
A2	3.2	One circuit of the line between bus 5 and bus 15 is opened.	3 phase fault at bus 3 for 50 ms.
A3	3.2	One circuit of the line between bus 3 and bus 13 is opened.	3 phase fault at bus 2 for 50 ms.

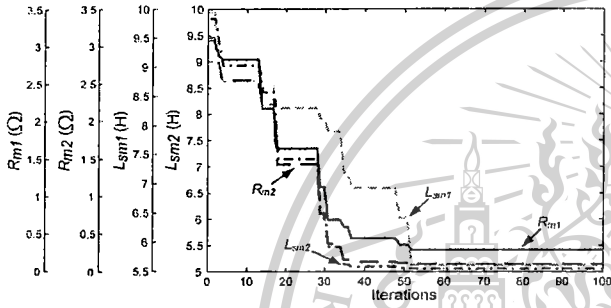


Fig. 3. Convergence curve of the optimized parameters.

The optimized SFCL and SMES (SFCL & SMES) are compared with the individual control of SFCL or SMES. The optimization problem of R_{mj} in the case of SFCL only is given by

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } A \\ & \text{Subject to (a)} \end{aligned} \quad (21)$$

In the case of SMES only, with $L_{smk} = 10$ H and $I_{smk_0} = 0.6377$ pu, the parameters of P and Q controllers are optimized by

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^6 \int_{t_{i1}}^{t_{i2}} |\Delta\omega_i(t)| dt \quad (22)$$

Subject to (b), (c), (d), and (e).

To achieve all optimal parameters, the PSO [8] is used to solve problems (20)–(22).

IV. SIMULATION STUDY

Fig. 3 illustrates the convergence curves of R_{m1} , R_{m2} , L_{sm1} , and L_{sm2} in the case of the optimized SFCL & SMES. Table II gives the optimized results of all devices. The energy dissipation of the SFCL and the initial stored energy of the SMES in the case of SFCL & SMES are lower than those in the case of SFCL only and SMES only, respectively. To evaluate the control effect of the SFCL & SMES, nonlinear simulations are performed for three case studies, as provided in Table I.

TABLE II
OPTIMIZED RESULTS

Device	Optimized Parameters
SFCL	SFCL1: $R_{m1} = 0.258 \Omega$, $E_{SFCL1} = 87.031$ MJ & SFCL2: $R_{m2} = 0.081 \Omega$, $E_{SFCL2} = 14.790$ MJ
SMES	SMES1: $K_{p1}(s) = 25.129((1+0.625s)/(1+0.624s))$ $K_{q1}(s) = 7.054((1+0.590s)/(1+0.296s))$ $L_{sm1} = 5.589$ H, $I_{sm1_0} = 0.401$ pu $E_{SMES1} = 72.128$ MJ SMES2: $K_{p2}(s) = 10.210((1+0.942s)/(1+0.925s))$ $K_{q2}(s) = 0.110((1+0.863s)/(1+0.81s))$ $L_{sm2} = 5.049$ H, $I_{sm2_0} = 0.315$ pu $E_{SMES2} = 40.144$ MJ
SFCL only	SFCL1: $R_{m1} = 0.516 \Omega$, $E_{SFCL1} = 299.795$ MJ SFCL2: $R_{m2} = 0.343 \Omega$, $E_{SFCL2} = 302.987$ MJ
SMES only	SMES1: $K_{p1}(s) = 10.558((1+0.794s)/(1+0.686s))$ $K_{q1}(s) = 3.018((1+0.991s)/(1+0.817s))$ $L_{sm1} = 10$ H, $I_{sm1_0} = 0.6377$ pu $E_{SMES1} = 325.328$ MJ SMES2: $K_{p2}(s) = 12.148((1+0.803s)/(1+0.702s))$ $K_{q2}(s) = 1.618((1+0.795s)/(1+0.715s))$ $L_{sm2} = 10$ H, $I_{sm2_0} = 0.6377$ pu $E_{SMES2} = 325.328$ MJ

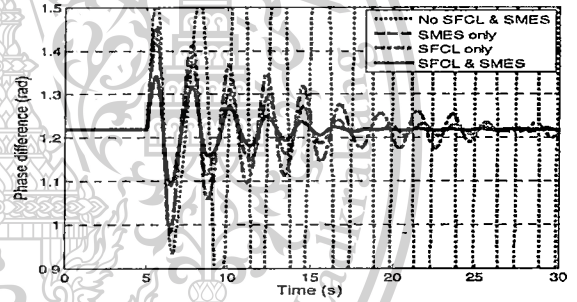


Fig. 4. Phase difference between generators 1 and 6 in case A1.

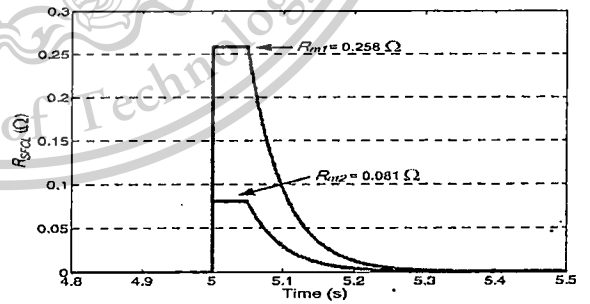


Fig. 5. Change of SFCL resistances in case A1.

Fig. 4 shows the phase difference between the rotor angles of G1 and G6 which implies the most dominant inter-area oscillation in case A1. Without SFCL & SMES, the phase difference severely oscillates and the system is unstable. In the cases of SMES only, SFCL only, and SFCL & SMES, the oscillation is damped out. Clearly, SFCL & SMES provides the best stabilizing effect. Fig. 5 shows the change in resistance of SFCL1 and SFCL2. The SFCL resistances exponentially change as expected. Fig. 6 depicts the current flow at the SMES1 terminal which can be evaluated as the limited current by SFCL1. In case of only SMES1 (no SFCL1), the peak

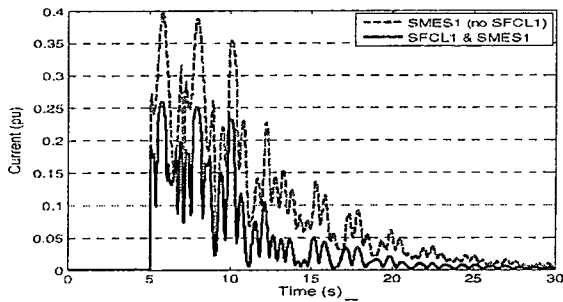


Fig. 6. Current flow through SFCL1 in case A1.

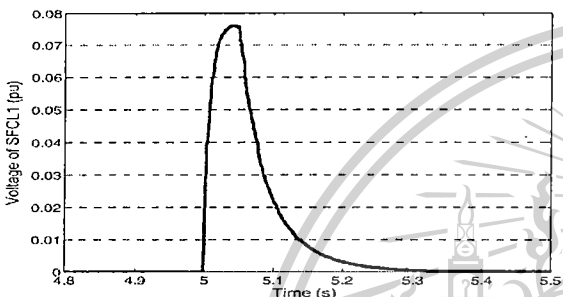


Fig. 7. Voltage across SFCL1 in case A1.

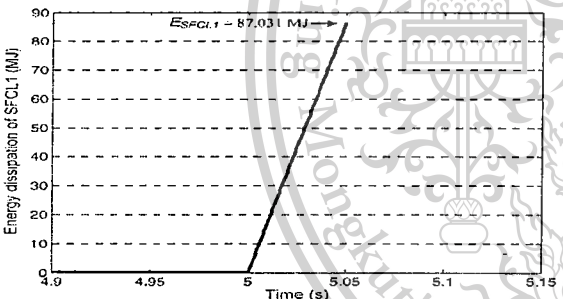


Fig. 8. Energy dissipation of SFCL1.

current is very high. On the other hand, the current is effectively suppressed in case of SFCL1 & SMES1. Fig. 7 shows the voltage across SFCL1. It can be observed that, the voltage is almost constant during the fault period. Fig. 8 depicts the integration result of energy dissipation of SFCL1 by (17) which can be found at the final time of fault period.

Figs. 9–11 show the phase difference, the voltage at SMES1 bus, and the coil current of SMES1 in case A2, respectively. In the case of SMES only, the SMES fails to operate, because the voltage at the SMES bus drops below the acceptable range of constraint (d). As a result, the time simulation of SMES coil current is forced to stop. In practice, the coil current gradually decreases to zero. In the case of SFCL only, the SFCL completely loses stabilizing effect. The system is unstable. On the other hand, SFCL & SMES is able to stabilize the system robustly. The SFCL is able to enhance the low voltage ride-through capability of the SMES. Besides, the variation of the SMES coil current is in the acceptable range as in constraint (e). For case A3, the phase difference, as shown in Fig. 12, is in the same way as case A2.

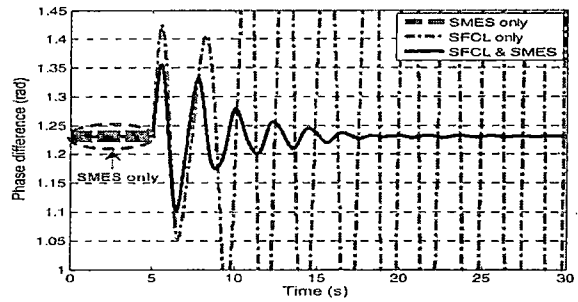


Fig. 9. Phase difference between generators 1 and 6 in case A2.

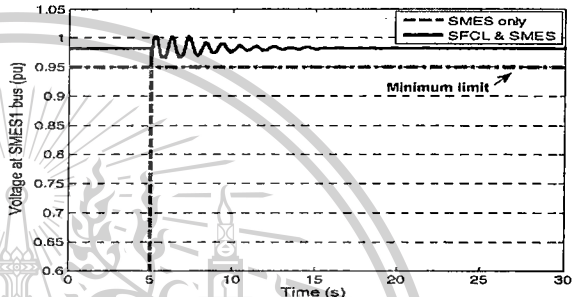


Fig. 10. Voltage at the SMES1 bus in case A2.

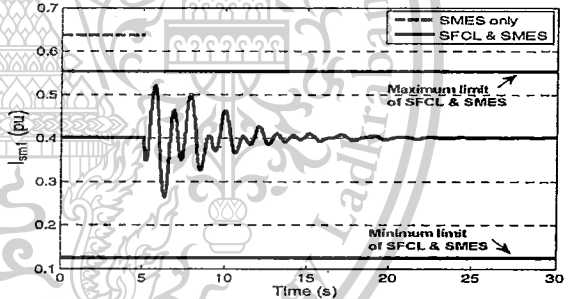


Fig. 11. Coil current of SMES1 in case A2.

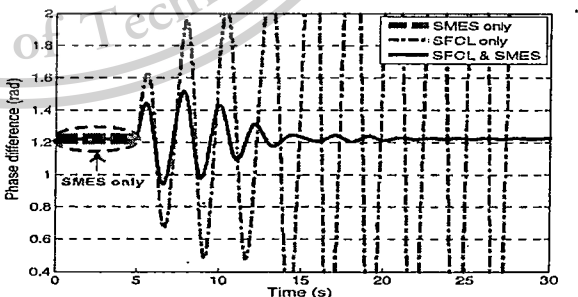


Fig. 12. Phase difference between generators 1 and 6 in case A3.

Table III shows the comparison results of the necessary MW and MJ capacities of the SMES used for system stabilization. The MW capacity is determined by the maximum power output of the SMES, whereas the MJ capacity is calculated from the difference between the maximum and the minimum energy outputs. With the support of the SFCL, the necessary MW and MJ capacities of the SMES are significantly reduced. For cases A2 and A3, the MW and MJ capacities in the case of SMES

TABLE III
COMPARED MW AND MJ CAPACITIES OF SMES

	Case A1		Case A2	Case A3
	SMES only	SFCL & SMES	SFCL & SMES	SFCL & SMES
MW				
SMES1	501.045	337.183	348.204	444.014
SMES2	497.732	100.683	118.511	295.967
MJ				
SMES1	460.527	162.674	163.738	197.044
SMES2	451.561	66.245	67.794	98.828

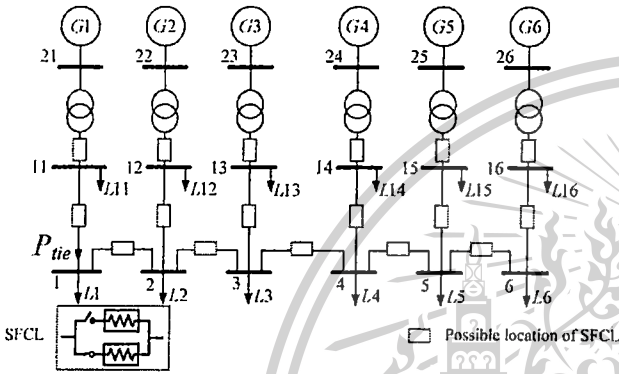


Fig. 13. Six-area interconnected power systems.

only are not provided, because the SMES fails to operate due to the large voltage drop.

V. APPLICATION 2: OPTIMAL SFCL UNITS FOR TRANSIENT STABILIZATION

The six-area interconnected power system in Fig. 13 is used as the study system again. As shown in Fig. 13, there are 17 possible SFCL locations in this system. Here, a new optimization of multiple SFCL units considering optimal locations, optimal number, optimal resistive values, and energy dissipation during quenching state is presented.

VI. PROPOSED OPTIMIZATION

The energy function method is applied to formulate the optimization problem. From (4), the derivative of V with respect to time can be shown by

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \dot{\omega}_i + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \dot{\delta}_i \right) \quad (23)$$

where the symbol “ $\dot{\cdot}$ ” represents the time derivative. Physically, \dot{V} is a negative value that corresponds to the rate at which energy is dissipated by the damping. The more negative \dot{V} is maximized, the higher system damping can be obtained [1]. As a result, the fast dissipation of the energy released by the fault and the quick damping of rotor swings can be achieved.

The speed of the i^{th} -generator can be shown by the swing equation

$$\omega_i = (P_{mi} - P_{ei})/M_i \quad (24)$$

where M_i is the inertia constant of the generator, P_{mi} and P_{ei} are the mechanical power and the electrical power of the i^{th} -generator, respectively. Substituting (24) into (23) yields

$$\dot{V} = \underbrace{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{P_{mi}}{M_i} + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \dot{\delta}_i \right)}_{1^{\text{st}} \text{ term}} - \underbrace{\sum_{i=1}^n \frac{\partial V_K}{\partial \omega_i} \frac{1}{M_i} P_{ei}}_{2^{\text{nd}} \text{ term}} \quad (25)$$

From (9), since $\partial V_K / \partial \omega_i = M_i(\omega_i(t) - \omega_0(t))$, the right side of (25) can be expressed as

$$\dot{V} = \underbrace{\sum_{i=1}^n \left((\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{mi} + \frac{\partial V_P}{\partial \delta_i} \dot{\delta}_i \right)}_{1^{\text{st}} \text{ term}} - \underbrace{\sum_{i=1}^n (\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{ei}}_{2^{\text{nd}} \text{ term}} \quad (26)$$

During a fault with a very short period, the changes in δ , P_{mi} , and V_P are very small. As a result, the first term on the right side of (26) hardly changes. On the other hand, the second term, which depends on P_{ei} , largely affects the value of \dot{V} . Here, the SFCLs are applied to alleviate the change in P_{ei} during the fault so that \dot{V} becomes more negative by maximizing the second term on the right side of (26). Besides, the minimization of energy dissipation of the SFCLj in (17) is considered. Combining the second term on the right side of (17) and (26), the multiobjective optimization problem can be formulated as follows:

$$\text{Maximize} \left(\sum_{i=1}^n (\omega_i(t) - \omega_0(t)) P_{ei} \right) + \sum_{j=1}^{N_{SFCL}} 1/E_{SFCLj} \quad (27)$$

subject to

- $0.001 \text{ pu} \leq R_{mj} \leq 5 \text{ pu}$ (range of R_{mj}),
- $1 \leq N_{SFCLj} \leq N_{SFCL(max)}$ (possible number of SFCL),
- $1 \leq N_L \leq N_{L(max)}$ (possible location of SFCL),

where N_L is the line number which is the location of SFCL, N_{SFCL} is the number of SFCLs to be installed in this system, $N_{L(max)}$ is the maximum number of possible locations of SFCLs, and $N_{SFCL(max)}$ is the maximum number of SFCL. Since N_L is equal to N_{SFCL} , N_L also influences the energy dissipation term in (27). Here, $N_{L(max)}$ and $N_{SFCL(max)}$ are equal to 17. This problem is solved by PSO. Fig. 14 shows the flowchart of the optimization procedure.

VII. SIMULATION STUDY

The optimization of (27) is carried out for 100 iterations under the operating condition and the applied fault of case B1 in Table IV. As a result, four SFCL units are the optimal number with locations and resistive values as given in Table V. Fig. 15 depicts the convergence curves of the optimized four resistive values. The proposed SFCLs are referred to as “PSFCL”. With the same number and locations as PSFCL, the multiple SFCL

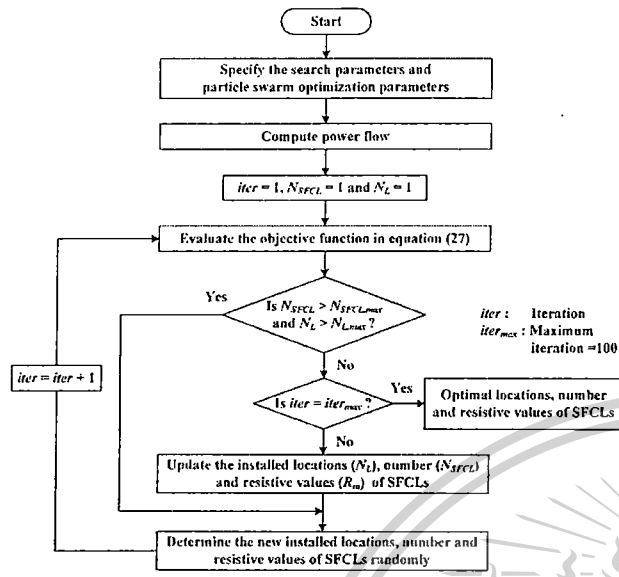


Fig. 14. Flow chart of the computation procedure.

TABLE IV
OPERATING CONDITIONS AND APPLIED FAULTS

Case study	P_{tie} (pu)	Network condition	Applied faults in nonlinear simulation
B1	3.0	No change.	3-phase fault at bus 12 at $t = 5$ s for 50 ms.
B2	3.0	One circuit of the line between bus 4 and bus 5 is opened.	3-phase fault at bus 2 at $t = 5$ s for 50 ms.
B3	3.0	One circuit of the line between bus 1 and bus 2 is opened.	3-phase fault at bus 2 at $t = 5$ s for 50 ms.

TABLE V
OPTIMIZED SFCL UNITS

Optimal Location	PSFCL	CSFCL
Line between bus 1 and bus 2	PSFCL1: $R_{m1} = 0.287 \Omega$ $E_{PSFCL1} = 22.857$ MJ	CSFCL1: $R_{m1} = 0.374 \Omega$ $E_{CSFCL1} = 58.442$ MJ
Line between bus 5 and bus 6	PSFCL2: $R_{m2} = 0.081 \Omega$ $E_{PSFCL2} = 22.838$ MJ	CSFCL2: $R_{m2} = 0.441 \Omega$ $E_{CSFCL2} = 61.588$ MJ
Line between bus 2 and bus 12	PSFCL3: $R_{m3} = 0.064 \Omega$ $E_{PSFCL3} = 49.268$ MJ	CSFCL3: $R_{m3} = 0.069 \Omega$ $E_{CSFCL3} = 54.532$ MJ
Line between bus 5 and bus 15	PSFCL4: $R_{m4} = 0.057 \Omega$ $E_{PSFCL4} = 5.918$ MJ	CSFCL4: $R_{m4} = 0.062 \Omega$ $E_{CSFCL4} = 20.258$ MJ

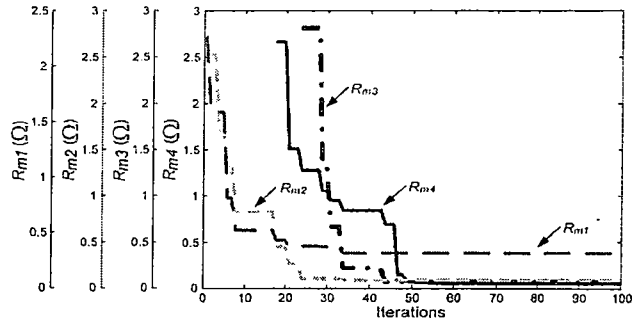


Fig. 15. Convergence curves of the optimized PSFCL with 4 units.

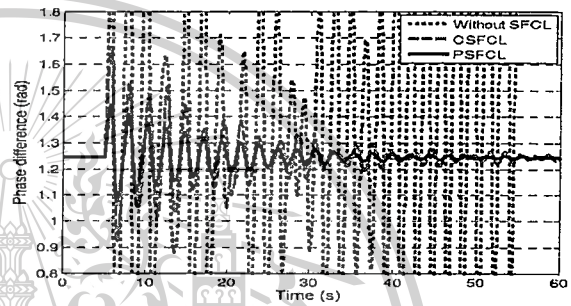


Fig. 16. Phase difference between generators 1 and 6 in case B1.

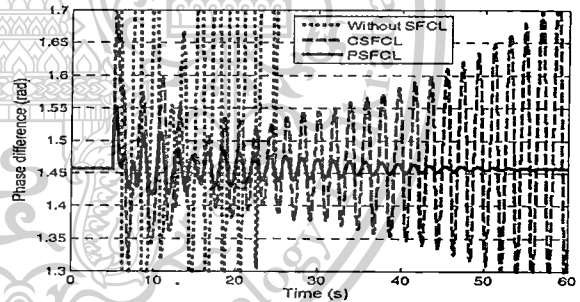


Fig. 17. Phase difference between generators 1 and 6 in case B2.

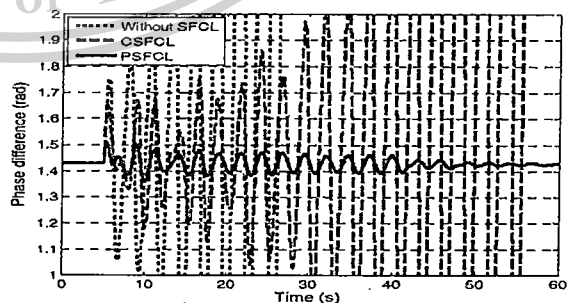


Fig. 18. Phase difference between generators 1 and 6 in case B3.

units optimized by (27) without considering the energy dissipation term are used for comparison purposes. The aim of comparison is to show the impact of the energy dissipation term on the stabilizing effect of SFCL. Table V also shows the optimized values of the compared SFCLs, which are referred to as "CSFCL". Table V also gives the energy dissipation of

PSFCL and CSFCL during quenching state. Obviously, the energy dissipation of PSFCL is lower than that of CSFCL.

Figs. 16–18 show the simulation results of the phase difference between the rotor angles of G1 and G6 in cases B1 to B3, respectively. Without the SFCL, the system is unstable due to the undamped oscillation of phase difference for all cases.

TABLE VI
OPTIMIZED THREE AND FIVE SFCL UNITS

Three SFCL units	Five SFCL units
SFCL3-1 : $R_{m3,1} = 0.318 \Omega$ (line between bus 2 and bus 3) $E_{PSFCL3,1} = 50.411 \text{ MJ}$	SFCL5-1 : $R_{m5,1} = 0.306 \Omega$ (line between bus 2 and bus 3) $E_{PSFCL5,1} = 42.261 \text{ MJ}$
SFCL3-2 : $R_{m3,2} = 0.063 \Omega$ (line between bus 3 and bus 13) $E_{PSFCL3,2} = 55.041 \text{ MJ}$	SFCL5-2 : $R_{m5,2} = 0.099 \Omega$ (line between bus 4 and bus 5) $E_{PSFCL5,2} = 31.123 \text{ MJ}$
SFCL3-3 : $R_{m3,3} = 0.064 \Omega$ (line between bus 5 and bus 15) $E_{PSFCL3,3} = 22.112 \text{ MJ}$	SFCL5-3 : $R_{m5,3} = 0.095 \Omega$ (line between bus 1 and bus 11) $E_{PSFCL5,3} = 30.858 \text{ MJ}$
	SFCL5-4 : $R_{m5,4} = 0.067 \Omega$ (line between bus 4 and bus 14) $E_{PSFCL5,4} = 52.612 \text{ MJ}$
	SFCL5-5 : $R_{m5,5} = 0.068 \Omega$ (line between bus 3 and bus 13) $E_{PSFCL5,5} = 22.658 \text{ MJ}$

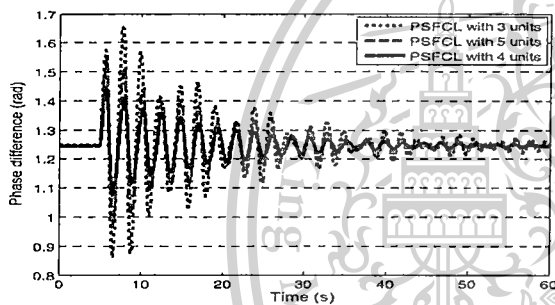


Fig. 19. Phase difference between generators 1 and 6 in case B1.

In case B1, the PSFCL provides a better stabilizing effect than the CSFCL. In cases B2 and B3, the CSFCL cannot tolerate the applied fault and fails to stabilize the system. The high energy dissipation deteriorates the stabilizing effect of CSFCL. On the other hand, the PSFCL is able to damp out the oscillation robustly. The PSFCL, which takes energy dissipation into account, is superior to the CSFCL in terms of stabilizing effect.

Next, to investigate that four units of SFCL (PSFCL with 4 units) are optimal for this system, they are compared with the optimized three and five units of SFCL. Note that three units of SFCL (PSFCL with 3 units) and five units of SFCL (PSFCL with 5 units) are optimized by the same objective function (27) and case study B1. Table VI shows the optimized results. Figs. 19–21 compare the stabilizing effect of the optimized PSFCL with 3, 4, and 5 units for cases B1 to B3, respectively. In case B1, the stabilizing performance of PSFCL with 4 units is better than that of PSFCL with 3 and 5 units. In cases B2 and B3, PSFCL with 3 and 5 units loses stabilizing effect. On the other hand, PSFCL with 4 units is capable of damping the oscillation. Fig. 22 compares the total energy dissipation of SFCLs during quenching state for the three case studies. Obviously, the total energy dissipation of PSFCL with 4 units is minimal. These results confirm that PSFCL with 4 units is the optimal solution for this system. PSFCL with 4 units not only provides superior transient stabilizing effect, but also results in minimal energy dissipation.

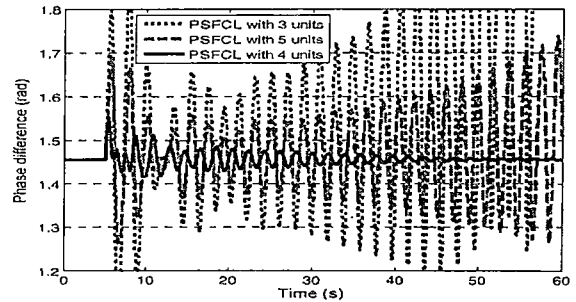


Fig. 20. Phase difference between generators 1 and 6 in case B2.

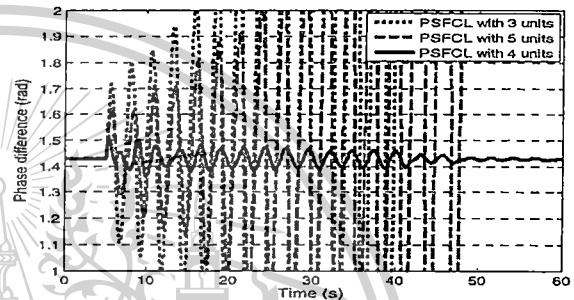


Fig. 21. Phase difference between generators 1 and 6 in case B3.

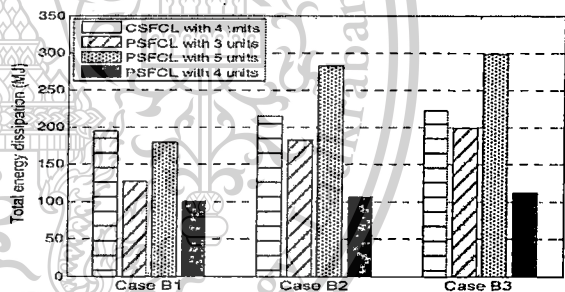


Fig. 22. Comparison of total energy dissipation of SFCLs.

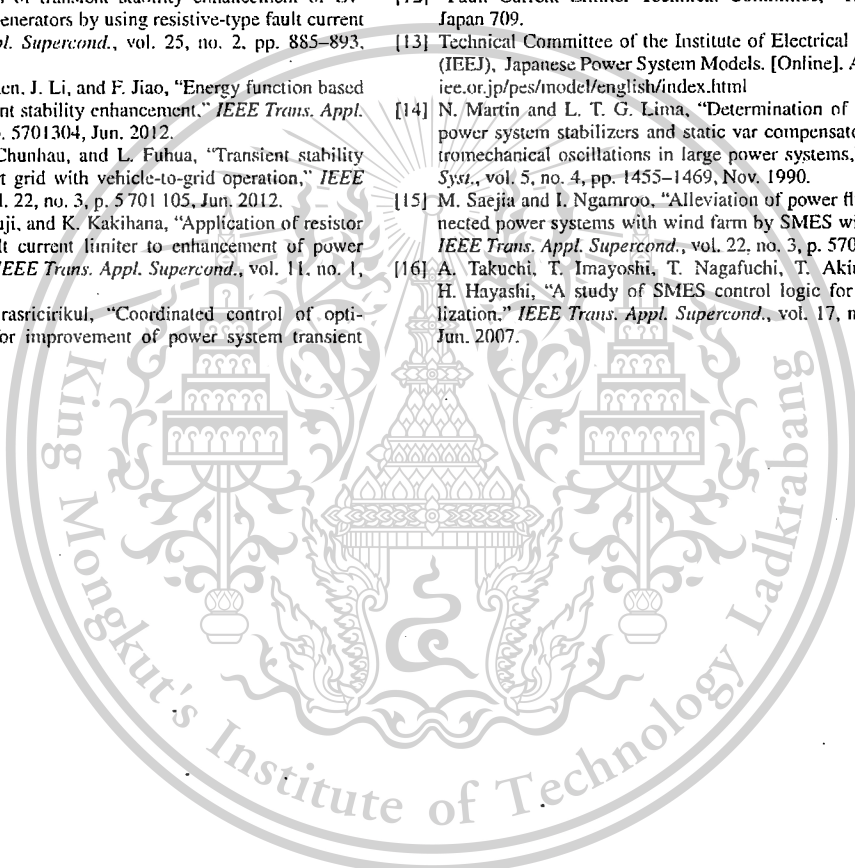
VIII. CONCLUSION

This paper proposes a new optimization of multiple SFCL and SMES units for transient stability augmentation in a multimachine power system based on kinetic energy control. Two applications are studied in the West Japan six area interconnected power system. For the first application, the optimization of SFCL and SMES are presented. The optimal resistive value and minimal energy dissipation of the SFCL as well as the power controller parameters and the optimal coil size of the SMES are taken into account in the optimization. Simulation results confirm that the stabilizing effect of SFCL and SMES is superior to either device separately. With the contribution of the SFCL, the low voltage ride-through capability of the SMES can be enhanced. Besides, the significant reduction of MW and MJ capacities of the SMES are obtained. For the second application, an optimization technique of multiple SFCL units is presented. The optimization is performed based on the reduction rate of energy function during fault and the minimal energy dissipation of SFCL during quenching state. The optimal locations, number, and resistive values of the

SFCL are achieved automatically. The proposed optimization not only solves the difficult problem of SFCL application in multimachine power systems, but also indicates the significant economic merit of using multiple SFCL units.

REFERENCES

- [1] J. Machowski, J. Bialek, and J. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*. New York, NY, USA: Wiley, 2008.
- [2] G. T. Son, H.-J. Lee, S.-Y. Lee, and J.-W. Park, "A study on the direct stability analysis of multi-machine power system with resistive SFCL," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, p. 5602304, Jun. 2012.
- [3] A. S. Emhemed, R. M. Tumilty, N. K. Singh, G. M. Burt, and J. R. McDonald, "Analysis of transient stability enhancement of LV-connected induction microgenerators by using resistive-type fault current limiters," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 2, pp. 885–893, May 2010.
- [4] J. Shi, Y. Tang, Y. Xia, L. Ren, J. Li, and F. Jiao, "Energy function based SMES controller for transient stability enhancement," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, p. 5701304, Jun. 2012.
- [5] W. Diyu, K. T. Chau, L. Chunhau, and L. Fuhua, "Transient stability analysis of SMES for smart grid with vehicle-to-grid operation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, p. 5701105, Jun. 2012.
- [6] M. Tsuda, Y. Mitani, K. Tsuji, and K. Kakihana, "Application of resistor based superconducting fault current limiter to enhancement of power system transient stability," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, no. 1, pp. 2122–2125, Mar. 2001.
- [7] I. Ngamroo and S. Vachirasricirikul, "Coordinated control of optimized SFCL and SMES for improvement of power system transient stability," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, p. 5600805, Jun. 2012.
- [8] J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, Nov. 1995, pp. 1942–1948.
- [9] K. Hongesombut, Y. Mitani, and K. Tsuji, "Optimal location assignment and design of superconducting fault current limiters applied to loop power systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, no. 2, pp. 1828–1831, Jun. 2003.
- [10] B. C. Sung, D. K. Park, J. D. Park, and T. K. Ko, "Study on optimal location of a resistive SFCL applied to an electric power grid," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, no. 3, pp. 2048–2052, Jun. 2009.
- [11] S. M. Bliar, C. D. Booth, N. K. Singh, G. M. Burt, and C. G. Bright, "Analysis of energy dissipation in resistive superconducting fault-current limiters for optimal power system performance," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 4, pp. 3452–3457, Aug. 2011.
- [12] "Fault Current Limiter Technical Committee," 1999, Tech. Rep. IEEE Japan 709.
- [13] Technical Committee of the Institute of Electrical Engineering of Japan (IEEJ), Japanese Power System Models. [Online]. Available: <http://www.iee.or.jp/pes/model/english/index.html>
- [14] N. Martin and L. T. G. Lima, "Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillations in large power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 5, no. 4, pp. 1455–1469, Nov. 1990.
- [15] M. Saejia and I. Ngamroo, "Alleviation of power fluctuation in interconnected power systems with wind farm by SMES with optimal coil size," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, p. 5701504, Jun. 2012.
- [16] A. Takuchi, T. Imayoshi, T. Nagafuchi, T. Akine, N. Yamada, and H. Hayashi, "A study of SMES control logic for power system stabilization," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 2343–2346, Jun. 2007.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล อิศระชัย งามหรุ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีจบ
PhD	Electrical Engineering	Osaka University	2543
M.Eng	Electrical Engineering	Osaka University	2540
B.Eng	Electrical Engineering	KMITL	2535

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ การควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2548	รางวัลทุนวิจัยมูลนิธิโทเรครั้งที่ ๑๒	มูลนิธิโทเร
2549	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2550	Best paper award, The 8 th International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore	The 8 th International Power Engineering Conference, Singapore
2552	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2553	Best paper award in electrical power systems, the 2010 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference, (ECTI-CON 2010, Chiangmai, Thailand.	ECTI Association
2554	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2537- 2543	ทุนรัฐบาลญี่ปุ่น	รัฐบาลญี่ปุ่น
2544- 2546	ทุนวิจัยหลังปริญญาเอก เลขที่ PDF/71/2544	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2547- 2549	ทุนพัฒนานักวิจัย (เมธีวิจัย สกว.) เลขที่ RSA4780015	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550- 2553	ทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว.)	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550- 2552	ทุนวิจัยโครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรม เลขที่ IUG5080015	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่

1. I. Ngamroo and S. Vachirasricirikul (2012). Coordinated control of optimized SFCL and SMES for improvement of power system transient stability. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, issue 3, June 2012, pp.5600805.
2. M. Saejia and I. Ngamroo (2012). Alleviation of power fluctuation in interconnected power systems with wind farm by SMES with optimal coil size. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, issue 3, June 2012, pp.5701504.
3. I. Ngamroo (2011). Simultaneous optimization of SMES coil size and control parameters for robust power system stabilization. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 21, Issue 3, Part 2, June 2011, pp. 1358-1361.
4. S. Vachirasricirikul and I. Ngamroo (2011). Robust controller design of heat pump and plug-in hybrid electric vehicle for frequency control in a smart microgrid based on specified-structure mixed H_2/H_∞ control technique. *Applied Energy*, Vol. 88, Issue 11, November 2011, pp. 3860-3868
5. J. Pahasa and I. Ngamroo (2011). A heuristic training-based least squares support vector machines for power system stabilization by SMES. *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, Issue 11, October 2011, pp. 13987-13993.
6. M. Saejia and I. Ngamroo (2011). A robust centralized SMES controller design based on WAMS considering system and communication delay uncertainties. *Electric Power Systems Research*, Vol.81, Issue.4, April 2011, pp. 846-852.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

7. I. Ngamroo, A. N. Cuk Supriyadi, S. Dechanupaprittha, M. Watanabe and Y. Mitani (2010). Wide area robust SMES controller design using synchronized PMUs for stabilization of interconnected power system with wind farms. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, Vol.5, No.4, July 2010, pp.428-438.
8. I. Ngamroo (2010). Robust SMES controller design based on inverse additive perturbation for stabilization of interconnected power systems with wind farms. *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, Issue 3, March 2010, pp. 459-464.
9. I. Ngamroo (2010). Robust SMES controller design for stabilization of inter-area oscillation considering coil size and system uncertainties. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 470, Issue 22, December 2010, pp. 1986-1993.
10. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and S. Kaitwanidvilai (2009). Robust voltage stabilization in an isolated wind-diesel power system using PSO based-fixed structure H_{∞} loop shaping control. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, Vol.129-B, No.6, June 2009, pp.756-764.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. I. Ngamroo and C. Ratanapornchai (2012). Bidirectional power controller design of PHEV for robust frequency control. *Proceedings of The Fifth IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, (AsiaPES 2012)*, 2-4 April 2012, Phuket, Thailand, no. 768-095.
2. J. Pahasa, K. Hongesombut and I. Ngamroo (2012). PSO-based learning of support vector machines for adaptive TCSC. *Proceedings of The Fifth IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, (AsiaPES 2012)*, 2-4 April 2012, Phuket, Thailand, no. 768-092.
3. I. Ngamroo and A. Kunakorn (2011). Smart grid stabilization based on GPS synchronized wide area phasor measurement. *Proceedings of the 3rd Regional Conference on ICT Application for Industries and Small Companies in ASEAN Countries (RCICT 2011)*, 10-11 March 2011, Vientiane, Lao PDR, No. IT B-05, pp. 98-103.
4. M. Saejia and I. Ngamroo (2010). Design of robust centralized PSS based on WAMS considering system and signal transmission delay uncertainties. *Proceedings of IASTED Technology and Management Conferences 2010, Power and Energy Systems, (AsiaPES 2010)*, 24-26 November 2010, Phuket, Thailand, no. 701-159.
5. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and S. Kaitwanidvilai (2010). Design of robust control and monitoring system for stabilization of frequency fluctuation in a microgrid system. *Proceedings of IASTED Technology and Management Conferences 2010, Power and Energy Systems, (AsiaPES 2010)*, 24-26 November 2010, Phuket, Thailand, no. 701-151.
6. I. Ngamroo, Cuk Supriyadi A.N., S. Dechanupaprittha and Y. Mitani (2009). Stabilization of tie-line power oscillations by robust SMES in interconnected power system with large wind farms. *Proceedings of 2009 IEEE Transmission & Distribution Asia Conference & Exposition*, 26-30 October 2009, Seoul, Korea, Paper no. D20090302-95.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

7. T. Chaiyatham, I. Ngamroo, S. Vachirasricirikul and S. Pothiya (2009). Design of optimal fuzzy logic-PID controller using bee colony optimization for frequency control in an isolated wind-diesel system. *Proceedings of 2009 IEEE Transmission & Distribution Asia Conference & Exposition*, 26-30 October 2009, Seoul, Korea, Paper no. D20090331-212.
8. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai and T. Chaiyatham (2009). Robust frequency stabilization in a microgrid system. *Proceedings of 2009 IEEE Transmission & Distribution Asia Conference & Exposition*, 26-30 October 2009, Seoul, Korea, Paper no. D20090228-74.
9. Cuk Supriyadi A.N., I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, A. Kunakorn, T. Hashiguchi and T. Goda (2008). Design of robust power system stabilizer using genetic algorithm-based fixed-structure H_{∞} loop shaping control. *Proceedings of The 17th World Congress of International Federation of Automatic Control (IFAC2008)*, 6-11 July 2008, Seoul, Korea, Paper ThA1.55, pp.11086-11091.
10. Cuk Supriyadi A.N., I. Ngamroo, A. Kunakorn, S. Dechanupaprittha, M. Watanabe, Y. Mitani, T. Hashiguchi and T. Goda (2008). Inverse additive perturbation-based optimization of robust PSS in an interconnected power system with wind farms. *Proceedings of SICE Annual Conference 2008, International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology*, 20-22 August, Tokyo, Japan, pp.237-240.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

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

อื่นๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.