

การทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียนด้วย
ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีความสามารถข้ามผ่านความผิดปกติ

STABILIZATION OF POWER SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY USING
SUPERCONDUCTING COIL WITH FAULT RIDE THROUGH CAPABILITY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-198

การทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียนด้วย
ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีความสามารถข้ามผ่านความผิดปกติ

STABILIZATION OF POWER SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY USING
SUPERCONDUCTING COIL WITH FAULT RIDE THROUGH CAPABILITY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STABILIZATION OF POWER SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY USING
SUPERCONDUCTING COIL WITH FAULT RIDE THROUGH CAPABILITY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-020-198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียนด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีความสามารถข้ามผ่านความผิดปกติ
Thesis Title Stabilization of Power System with Renewable Energy using Superconducting Coil with Fault Ride Through Capability
นักศึกษา นายวรภัทร พนาเจริญวงศ์
รหัสประจำตัว 58601167
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.อิสระชัย งามทรู
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-198

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|----------------|--|
| ผศ.ดร.สัญญาชัย | เดชาณุภาพฤทธา |  |
| ดร.ภาพ | จันทร์เจริญสุข |  |
| ดร.วรุตม์ | สุอำพัน |  |
| ผศ.ดร.วรวรรณ | นาคะวิโร |  |
| ศ.ดร.อิสระชัย | งามทรู |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น **ฉบับตี** คณะวิศวกรรมศาสตร์ ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 นำไปใช้

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งผลิตพลังงานหมุนเวียนด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด |
| นักศึกษา | วรภัทร พนาเจริญวงศ์ |
| รหัสประจำตัว | 58601167 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| พ.ศ. | 2560 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ศ.ดร. อิศระชัย งามหฺร |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด เพื่อแก้ปัญหาค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้า การข้ามผ่านความผิดพลาด และการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซึ่งโครนัสที่เกิดขึ้นในระบบที่มีแหล่งผลิตพลังงานหมุนเวียน ในการศึกษานี้ได้ทำการออกแบบขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค ประกอบด้วยการนำไปใช้งาน 3 รูปแบบ เริ่มจาก การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและจำกัดกระแสฟอลต์ การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีทั้งฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมเชื่อมต่อเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาด และสุดท้ายการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในฟาร์มโซลาร์เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาด และลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซึ่งโครนัส ผลการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลที่ดีกว่าของการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเมื่อเทียบกับการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่หน้าที่เป็นเพียงตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด

| | |
|-----------------------|---|
| Thesis | STABILIZATION OF POWER SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY USING SUPERCONDUCTING COIL WITH FAULT RIDE THROUGH CAPABILITY |
| Student | Mr. Worapat Panacharoenwong |
| Student ID. | 58601167 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Electrical Engineering |
| Year | 2017 |
| Thesis Advisor | Prof. Dr. Issarachai Ngamroo |

ABSTRACT

This thesis proposes the application of superconducting coil (SC) to alleviate power fluctuation, enhance fault ride through capability and mitigate the subsynchronous oscillations of power systems with renewable energy sources. The optimal turning of the controller parameters and inductance of SC is carried out by particle swarm optimization. To demonstrate the performance of the proposed method, three applications of superconducting coil are conducted as follows. First, the superconducting magnetic energy storage with fault current limiting function (SMES-FCL) in the DC side of high voltage direct current (HVDC) transmission for smoothing power fluctuation and limit the fault current in the DC side. Next, the SMES-FCL installed at point of common coupling (PCC) bus with wind and solar farms is used to improve fault ride through capability and alleviate power fluctuation. Finally, the superconducting coil integrated into DC-link of solar generator is applied to damp the subsynchronous resonance. Study results confirm the SC performance for each application.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการศึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ บุคลากร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดระยะเวลาของการศึกษา

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการ Electrical Power Applications Research Laboratory (EPARL) ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

ที่สำคัญข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง พร้อมทั้งเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วรภัทร พนาเจริญวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ | 1 |
| 1.1.1 การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบส่งไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่ง..... | 2 |
| 1.1.2 การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งในระบบไฟฟ้าที่มีฟาร์มโซล่าและฟาร์ม กังหันลมเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ..... | 3 |
| 1.1.3 การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในฟาร์มโซล่าเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานและ ลดการสิ้นเปลืองที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส..... | 4 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา | 5 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา | 6 |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย | 6 |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย..... | 7 |
| 1.6 ขั้นตอนการศึกษา..... | 7 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 8 |
| 2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังแสงอาทิตย์..... | 8 |
| 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยกังหันลม | 11 |
| 2.3 ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง..... | 15 |
| 2.4 ปรากฏการณ์การสิ้นเปลืองที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส | 18 |
| 2.5 อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กด้วยตัวนำยิ่งยวด | 20 |
| 2.6 ตัวควบคุมแบบพีไอ | 26 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.7 ตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตาม | 27 |
| 2.8 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค | 28 |
| บทที่ 3_การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่ง | 31 |
| 3.1 แบบจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง | 32 |
| 3.2 โครงสร้างและการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบ HVDC | 33 |
| 3.2.1 โครงสร้างวงจรของขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบ HVDC..... | 33 |
| 3.2.2 การทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดในระบบ HVDC..... | 33 |
| 3.3 การออกแบบตัวควบคุมและการทำให้เหมาะสม | 38 |
| 3.3.1 การออกแบบตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์ | 38 |
| 3.3.2 เทคนิคการทำให้เหมาะสมสำหรับขดลวดตัวนำยิ่งยวดและตัวควบคุม | 39 |
| 3.4 ผลการจำลอง..... | 41 |
| 3.5 สรุป | 49 |
| บทที่ 4 การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งในระบบไฟฟ้าที่มี ฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด..... | 30 |
| 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษา..... | 51 |
| 4.2 โครงสร้างวงจรและการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบ AC..... | 52 |
| 4.3 การออกแบบตัวควบคุมและการทำให้เหมาะสม..... | 55 |
| 4.3.1 การออกแบบตัวควบคุมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด | 55 |
| 4.3.2 การออกแบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดและตัวควบคุมด้วยวิธีการทำให้เหมาะสม | 56 |
| 4.4 ผลการจำลอง..... | 58 |
| 4.5 สรุป | 65 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----|
| บทที่ 5 การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในฟาร์มโซล่าเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานและลดการสิ้น พ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส..... | 66 |
| 5.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE Second Benchmark ที่ใช้ในการศึกษา | 66 |
| 5.2 โครงสร้างและการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในฟาร์มโซล่า | 68 |
| 5.3 ตัวควบคุมและการทำให้เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในฟาร์มโซล่า | 70 |
| 5.3.1 การออกแบบตัวควบคุมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในฟาร์มโซล่า | 70 |
| 5.3.2 การทำให้เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและตัวควบคุมภายในฟาร์มโซล่า | 72 |
| 5.4 ผลการจำลอง | 74 |
| 5.5 สรุป | 84 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ..... | 865 |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย..... | 865 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ..... | 86 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 77 |
| ภาคผนวก..... | 91 |
| ภาคผนวก ก..... | 92 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 97 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.1 การทำงานของสวิตช์สำหรับวงจรส่วนของFCL..... | 35 |
| 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL สำหรับระบบ HVDC..... | 42 |
| 3.3 กำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการทำเสถียรภาพสำหรับระบบ HVDC..... | 49 |
| 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL..... | 59 |
| 4.2 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการทำเสถียรภาพ..... | 65 |
| 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและตัวควบคุม..... | 76 |
| 5.2 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการลดการสั่นพ้อง..... | 84 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 กำลังติดตั้งรวมในแต่ละปีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังแสงอาทิตย์..... | 8 |
| 2.2 วงจรสมมูลของโมดูล..... | 9 |
| 2.3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์..... | 10 |
| 2.4 แบบจำลองของระบบฟาร์มโซลาร์..... | 11 |
| 2.5 กำลังติดตั้งรวมในแต่ละปีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานลม..... | 11 |
| 2.6 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง..... | 12 |
| 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังผลิต..... | 14 |
| 2.8 แบบจำลองของระบบฟาร์มกังหันลม..... | 15 |
| 2.9 รูปแบบการใช้งานระบบ HVDC..... | 16 |
| 2.10 โครงสร้างคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันแบบ MMC..... | 17 |
| 2.11 แบบจำลอง IEEE Second Benchmark model..... | 19 |
| 2.12 อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กที่ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด SMES..... | 20 |
| 2.13 แบบแผนการติดตั้งอุปกรณ์ SMES..... | 21 |
| 2.14 โครงสร้างของขดลวดตัวนำยิ่งยวด..... | 22 |
| 2.15 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าและพลังงานต่อน้ำหนัก..... | 23 |
| 2.16 กราฟแสดงเวลาการดีสชาร์จและกำลังไฟฟ้า..... | 23 |
| 2.17 การเปรียบเทียบราคาประจำปี..... | 24 |
| 2.18 แบบจำลองของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด..... | 25 |
| 2.19 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์..... | 26 |
| 2.20 โครงสร้างตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตาม..... | 27 |
| 2.21 แผนผังการทำงานของวิกิกลุ่มอนุภาค..... | 29 |
| 3.1 ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC)..... | 32 |
| 3.2 โครงสร้างของวงจร SMES-FCL..... | 33 |
| 3.3 การทำงานในสภาวะปกติขณะชาร์จกระแสไฟฟ้า..... | 34 |
| 3.4 การทำงานในสภาวะปกติขณะดีสชาร์จกระแสไฟฟ้า..... | 34 |
| 3.5 การทำงานในสภาวะเกิดความผิดปกติ..... | 35 |
| 3.6 หลักการทำงานของ SMES-FCL..... | 36 |
| 3.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES..... | 38 |
| 3.8 โครงสร้างของตัวควบคุม FCL..... | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.9 ความเร็วลม..... | 41 |
| 3.10 เส้นโค้งการลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... | 42 |
| 3.11 กำลังไฟฟ้าที่สถานี B (ความเร็วลม A)..... | 43 |
| 3.12 กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ (ความเร็วลม A)..... | 43 |
| 3.13 กำลังไฟฟ้าที่สถานี B (ความเร็วลม B)..... | 43 |
| 3.14 กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ (ความเร็วลม B)..... | 44 |
| 3.15 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด A)..... | 45 |
| 3.16 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด B)..... | 45 |
| 3.17 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด C)..... | 45 |
| 3.18 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม B และ ความผิดพลาดที่จุด A)..... | 46 |
| 3.19 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม B และ ความผิดพลาดที่จุด B)..... | 46 |
| 3.20 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม B และ ความผิดพลาดที่จุด C)..... | 46 |
| 3.21 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด A)..... | 47 |
| 3.22 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด B)..... | 47 |
| 3.23 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด C)..... | 47 |
| 3.24 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม B และ ความผิดพลาดที่จุด A)..... | 48 |
| 3.25 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม B และ ความผิดพลาดที่จุด B)..... | 48 |
| 3.26 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A (ความเร็วลม B และ ความผิดพลาดที่จุด C)..... | 48 |
| 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้ง SMES-FCL..... | 51 |
| 4.2 โครงสร้างของวงจร SMES-FCL..... | 52 |
| 4.3 โครงสร้างของวงจร SMES-FCL ส่วนวงจร SMES..... | 52 |
| 4.4 โครงสร้างของวงจร SMES-FCL ในส่วนวงจร FCL..... | 53 |
| 4.5 โครงสร้างตัวควบคุมของวงจร SMES-FCL..... | 55 |
| 4.6 ความเร็วลม..... | 58 |
| 4.7 ความเข้มแสง..... | 59 |
| 4.8 เส้นโค้งการลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... | 59 |
| 4.9 กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1 (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 60 |
| 4.10 กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 60 |
| 4.11 แรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 61 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.12 แรงดันไฟฟ้าที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 61 |
| 4.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัส Wind (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 62 |
| 4.14 กระแสไฟฟ้าที่บัส PCC (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 62 |
| 4.15 กระแสไฟฟ้าที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 62 |
| 4.16 กระแสไฟฟ้าที่บัส Wind (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 63 |
| 4.17 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ภายในฟาร์มโซล่า (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 63 |
| 4.18 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ภายในกังหันลม DFIG (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 63 |
| 4.19 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 64 |
| 4.20 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 64 |
| 4.21 อิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 64 |
| 5.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE Second Benchmark ร่วมกับฟาร์มโซล่า..... | 66 |
| 5.2 โครงสร้างของฟาร์มโซล่าที่ติดตั้งวงจร SC-FCL ภายใน..... | 68 |
| 5.3 โครงสร้างของวงจร SC-FCL ส่วนวงจร SMES..... | 68 |
| 5.4 โครงสร้างของวงจร SC-FCL ส่วนวงจร FCL..... | 69 |
| 5.5 โครงสร้างตัวควบคุมของฟาร์มโซล่าร่วมกับวงจร SC-FCL..... | 70 |
| 5.6 โครงสร้างตัวควบคุม SSR Damping..... | 70 |
| 5.7 ความเข้มแสง..... | 74 |
| 5.8 องค์ประกอบความถี่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมเทียบกับความถี่มูลฐานของเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูงที่ระดับกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่างๆ..... | 75 |
| 5.9 องค์ประกอบความถี่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมเทียบกับความถี่มูลฐานของเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูงที่ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ต่างๆ..... | 75 |
| 5.10 เส้นโค้งการลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... | 75 |
| 5.11 กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 77 |
| 5.12 กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 77 |
| 5.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 77 |
| 5.14 กระแสไฟฟ้าที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 78 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.15 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 79 |
| 5.16 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 79 |
| 5.17 อิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B..... | 79 |
| 5.18 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ก) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ข) ที่เทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำ (ค) ที่เทอร์ไบน์ส่วนความดันสูง..... | 80 |
| 5.19 องค์ประกอบความถี่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมเทียบกับความถี่มูลฐานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ข) ที่เทอร์ไบน์แรงดันต่ำ (ค) ที่เทอร์ไบน์แรงดันสูง..... | 82 |
| 5.20 แรงบิดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ก) ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำ (ข) ระหว่างเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำกับเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูง..... | 82 |
| 5.21 องค์ประกอบความถี่ของแรงบิดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับความถี่มูลฐาน (ก) ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำ (ข) ระหว่างเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำกับเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูง..... | 83 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานที่หลายประเทศทั่วโลกให้ความสนใจโดยเฉพาะพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์เป็นต้น [1,2] และมีการนำมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรมนุษย์ การพัฒนาทางเทคโนโลยี และการเติบโตของอุตสาหกรรม ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ จึงมีการสร้างฟาร์มกังหันลม (Wind Farm) และฟาร์มโซลาร์ (Solar Farm) ขึ้นอย่างต่อเนื่องในหลากหลายระดับกำลังผลิตเช่นระดับเมกะวัตต์ ระดับสิบล้านวัตต์ หรือกระทั่งระดับร้อยเมกะวัตต์ ซึ่งสามารถส่งกำลังไฟฟ้าสู่ระบบผ่านระบบส่งกำลังไฟฟ้าทั้งกระแสสลับ และระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ต้องส่งระยะทางไกลหรือส่งในพื้นที่ระหว่างนอกชายฝั่งกับบนแผ่นดิน [3] อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตด้วยพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้มีความไม่สม่ำเสมอซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในเวลานั้นส่งผลให้คุณภาพไฟฟ้าในระบบต่ำลง [4,5] อีกทั้งเมื่อเกิดความผิดปกติอย่างรุนแรงขึ้นในระบบ ฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมที่เชื่อมต่ออยู่อาจเป็นอันตรายจากกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างมากและไม่สามารถข้ามผ่านสถานการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วตกได้ทำให้ต้องตัดการเชื่อมต่อออกจากระบบไฟฟ้า ซึ่งมีการกำหนดช่วงของแรงดันที่ยอมรับได้เรียกว่ากริดโค้ด (Grid Code) [6] และยังมีโอกาสเกิดเหตุการณ์ที่เรียกว่าการสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัสภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Sub Synchronous Resonance: SSR) ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าเกิดความเสียหายและทำให้ต้องหยุดการผลิตเพื่อซ่อมบำรุง [7]

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวได้มีการนำเสนอขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) มาใช้เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานโดยการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างตัวอุปกรณ์กับระบบได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ [8-13] และยังมีการนำ SC มาใช้เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสฟอลต์แบบตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Fault Current Limiter: SFCL) ทำหน้าที่ในการจำกัดกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นทั้งในระบบกระแสตรงและระบบกระแสสลับ [12-19] นอกจากนี้ยังมีการใช้อุปกรณ์สะสมพลังงานแบบยิ่งยวดเพื่อใช้ในการลดการสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส [20] อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาใช้แก้ปัญหาเพียงอย่างเดียวหนึ่ง จึงจำเป็นต้องมี

การพัฒนาต่อยอดเพื่อให้การใช้งานขดลวดตัวนำยิ่งยวดเกิดประโยชน์สูงสุด เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เป็นทั้งอุปกรณ์สะสมพลังงาน และอุปกรณ์จำกัดกระแสฟอลต์สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับและระบบไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเป็นพื้นฐานในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ อีกทั้งยังเพิ่มตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตามเพื่อเพิ่มความสามารถในการลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส นอกจากนี้ยังใช้วิธีการทำให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคช่วยในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกกำหนดเพื่อให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดและอุปกรณ์ทำงานด้วยประสิทธิภาพสูงสุด

โดยในการศึกษานำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต่างกัน 3 ระบบ คือ 1) นำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด ที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์ซึ่งติดตั้งภายในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและจำกัดกระแสฟอลต์ 2) นำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์ติดตั้งในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่มีฟาร์มกังหันลมและฟาร์มโซลาร์เชื่อมต่ออยู่เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ 3) นำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์และลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัสติดตั้งภายในฟาร์มโซลาร์ที่เชื่อมต่อกับระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ และลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัสด้วย โดยมีรายละเอียดและที่มาของปัญหาในแต่ละระบบดังนี้

1.1.1 การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่ง

ปัจจุบันมีการนำพลังงานลมซึ่งเป็นพลังสะอาดมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นโดยส่วนหนึ่งเป็นฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งซึ่งส่งกำลังไฟฟ้าด้วยระบบส่งกระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current Transmission System: HVDC) โดยมีการแปลงด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter: VSC) อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่ฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งผลิตได้มีความไม่สม่ำเสมอซึ่งส่งผลให้คุณภาพไฟฟ้าในระบบต่ำลงนอกจากนี้เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบอาจส่งผลให้ VSC สูญเสียการควบคุมและเป็นอันตรายต่อสายส่งดีซีซึ่งส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพ [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อแก้ปัญหาข้างต้นมีงานวิจัย [12,13] ได้ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดเข้าไปในระบบ HVDC ทางด้านดีซีเพื่อแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ และ [16-19] ได้มีการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่เรียกว่า อุปกรณ์จำกัดกระแสฟอลต์แบบตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Fault Current Limiter: SFCL) เข้าไปในระบบ HVDC เพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาใช้แก้ปัญหาเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาต่อยอดการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

วิทยานิพนธ์นำเสนอการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดโดยดัดแปลงวงจรให้เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถการจำกัดกระแสผิดพลาด อีกทั้งเพิ่มประสิทธิผลในการทำงานของอุปกรณ์ ในที่นี้จะใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

1.1.2 การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งในระบบไฟฟ้าที่มีฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลมเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด

ในปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมมานิยมใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีการสร้างฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) เป็นที่นิยมติดตั้งเนื่องจากสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงตามความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอ มีต้นทุนในการติดตั้งต่ำ มีความสามารถในการควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้และความสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟแยกอิสระจากกัน ถึงแม้ว่าทั้งพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมจะมีข้อดีหลายอย่าง แต่ก็มีข้อเสียคือไม่สามารถคาดเดาแสงอาทิตย์และความเร็วลมได้จึงเกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมา [22,23] นอกจากนี้เมื่อเกิดความผิดพลาดอย่างรุนแรงในระบบฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลมอาจไม่สามารถข้ามผ่านสถานการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วต่ำได้ เพื่อป้องกันการตัดวงจรของฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลมออกจากระบบขณะที่เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วตกซึ่งจะส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบ [24]

เพื่อแก้ปัญหาจึงติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดเข้าไปที่บัสเชื่อมต่อบรรยากาศเนื่องจากมีความสามารถในการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าในปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่น้อยเนื่องจากไม่มีความต้านทาน โดย [25,26] ได้เสนอโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด และ [27] อุปกรณ์จำกัดกระแสฟอลต์ที่ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันเพื่อใช้ในการจำกัด

กระแสฟอลต์และลดการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกในระบบไฟฟ้าแต่ยังไม่ได้ประยุกต์ใช้แก้ปัญหาเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตพลังงานหมุนเวียนจำพวกฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมต่ออยู่อีก ทั้งยังไม่ได้พิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างของอุปกรณ์ในการควบคุมอย่างเหมาะสม

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการปรับปรุงการควบคุมของวงจรสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด ที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค เพื่อใช้ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมต่ออยู่

1.1.3 การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในฟาร์มโซลาร์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงาน และลดการสิ้นเปลืองที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีการต่อตัวชดเชยอนุกรมชนิดตัวเก็บประจุ (Series Compensation Capacitors) เข้าไปที่สายส่งของระบบไฟฟ้าเพื่อช่วยแก้ปัญหาในด้านของแรงดันตก รวมถึงช่วยเพิ่มความสามารถของสายส่งในการส่งกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้นได้ แต่ในทางกลับกันหากตัวชดเชยอนุกรมที่ต่อเข้าไปนั้นมีค่าที่ไม่เหมาะสมทำให้ความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้า (Natural Frequency) ไปตรงกับโหมดการสั่นทางกลของเพลลาภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการสั่นที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส (Sub-synchronous Resonance: SSR) ส่งผลให้เพลลาภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำเกิดการแตกหักและชำรุดเสียหายได้ โดยในปี 1970 ได้เกิดเหตุการณ์ SSR นี้ขึ้นที่โรงไฟฟ้า Mohave Power Plant ประเทศสหรัฐอเมริกาทำให้ต้องปิดเพื่อซ่อมบำรุงเป็นเวลาหลายเดือน และยังคงเกิดเหตุการณ์เดิมซ้ำขึ้นอีกครั้งในปี 1971 [7] นอกจากนี้หากในบริเวณนั้นมีฟาร์มโซลาร์อยู่ซึ่งมีการสร้างอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [10,22] ด้วยบริเวณนั้นจะมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมออยู่ทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าต่ำลง นอกจากนี้เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบซึ่งเป็นสาเหตุในการกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ SSR แล้วยังทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วต่ำได้ ซึ่งหากต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่มีการกำหนด (Grid Code) ทำให้ต้องตัดการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งปัญหาที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ล้วนส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้

เพื่อแก้ปัญหาปรากฏการณ์ SSR งานวิจัย [20] ใช้อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Super Conducting Magnetic Energy Storage: SMES) ในการลดผลของปรากฏการณ์ SSR ที่เกิดขึ้นมีงานวิจัย [8,9] ใช้อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ในการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเกิน และ [15] ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดในระบบที่ติดตั้งฟาร์มโซลาร์ ซึ่งเป็นกรนำ SMES มาแก้ปัญหาใช้เฉพาะอย่างรวมถึงยังไม่ได้พิจารณาถึงการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์และลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส ที่ติดตั้งภายในฟาร์มโซลาร์รวมทั้งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการปรับปรุงและรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตพลังงานหมุนเวียนเชื่อมต่ออยู่ โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

1. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการทำเสถียรภาพต่อระบบ
2. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์สำหรับระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลม ในการจำกัดกระแสผิดพลาดและลดแกว่งของกำลังไฟฟ้า
3. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการออกแบบอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลม ในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด
4. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการออกแบบติดตั้งภายในฟาร์มโซลาร์ ในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด และลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด และลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. แบบจำลองพาร์มิโซล่า พาร์มิกังหันลมที่ใช้ในการศึกษาจะเชื่อมต่อกับบัสอนันต์เพื่อจำลองว่าต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่
2. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจำลองโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำและไม่คิดผลข้างเคียงของขดลวดตัวนำยิ่งยวด เนื่องจากสมมติให้พร้อมสำหรับสะสมพลังงานและจำกัดกระแสฟลัดต์ได้ตลอดเวลา
3. พาร์มิโซล่าที่เชื่อมต่อในระบบ IEEE Second Benchmark ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบโดยรวม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับปรับปรุงและรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตพลังงานหมุนเวียนเชื่อมต่ออยู่มีทฤษฎีและแนวความคิดดังนี้

1. การใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่สามารถแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า รวมทั้งเพิ่มความสามารถในการจำกัดกระแสฟลัดต์
2. การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในพาร์มิโซล่า รวมถึงเพิ่มความสามารถในการลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส
3. การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค ซึ่งทฤษฎีกลุ่มอนุภาคเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม โดยอาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร [28] ซึ่งได้แนวความคิดจากการเลียนแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของสัตว์ที่อาศัยอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม เช่น ผึ้งนกหรือฝูงปลา เป็นต้น ทฤษฎีนี้นำไปประยุกต์ใช้ง่าย มีคุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดี และมีประสิทธิภาพในการคำนวณ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำทฤษฎีกลุ่มอนุภาคมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และตัวควบคุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับปรับปรุงและรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าตามที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [29] โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิจารณาเพียงผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
2. การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในระบบไฟฟ้านั้นมีฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลมอยู่ในพื้นที่เดียวกันและจุดที่ติดตั้งครอบคลุมฟาร์มทั้งสองชนิด
3. การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำและฟาร์มโซล่าเชื่อมต่อกันในพื้นที่เดียวกัน และเป็นระบบทดสอบ IEEE Second Benchmark model

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอนและรายละเอียดต่างๆแบ่งออกเป็น 6 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังแสงอาทิตย์ที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยกังหันลม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด ตัวควบคุมแบบพีไอ ตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตาม และการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

บทที่ 3 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่ง

บทที่ 4 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งในระบบไฟฟ้าที่มีฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลมเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด

บทที่ 5 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในฟาร์มโซล่าเพื่อสมรรถนะการทำงานและลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

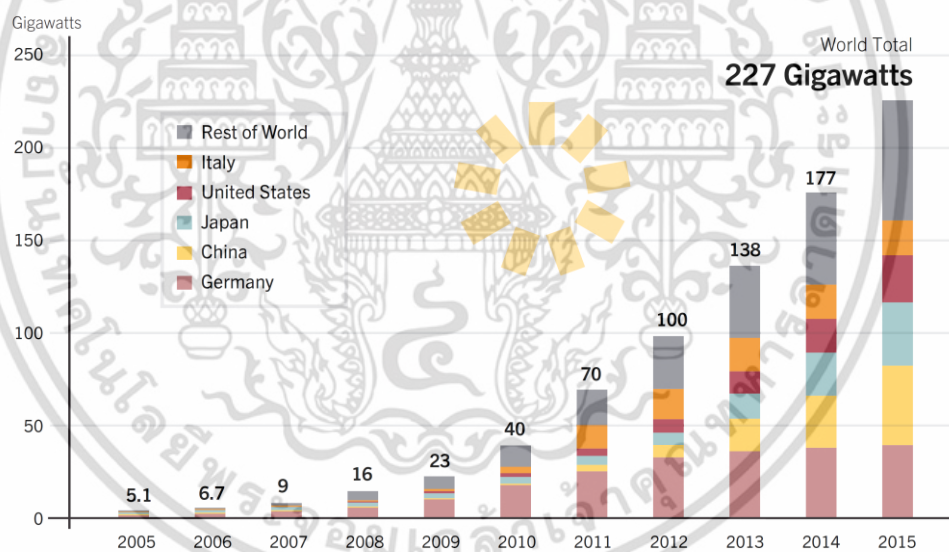
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังแสงอาทิตย์ที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยกังหันลม ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด ตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสสน่าและตาม รวมถึงถึงเทคนิคการออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีแบบกลุ่มอนุภาค

2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในตัวเลือกของพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมอย่างมาก โดยมีการติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทุกปี [2] โดยในปี ค.ศ. 2015 มีกำลังติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) รวมถึงถึง 227 GW ดังรูปที่ 2.1

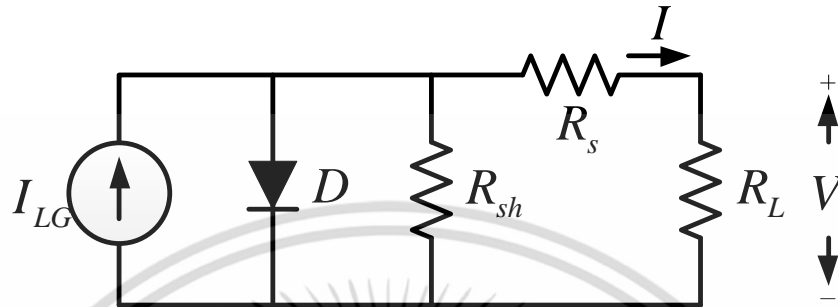


รูปที่ 2.1 กำลังติดตั้งรวมในแต่ละปีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังแสงอาทิตย์ [2]

โดยโครงสร้างของ PV มีลักษณะโครงสร้างแบบรอยต่อพีเอ็น (P-N junction) ของสารกึ่งตัวนำ เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและประจุบวกขึ้นได้แก่อิเล็กตรอนและโฮล โครงสร้างรอยต่อของสารพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าขึ้นภายในเซลล์เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก ปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว เมื่อต่อครบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น โดยเซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ประกอบด้วยรอยต่อพีเอ็น 1 ชุด เรียกว่า 1 เซลล์ (Cell) เมื่อต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น สามารถนำเซลล์มา ต่ออนุกรมหรือขนานกันได้ เรียกว่า โมดูล (Module) และเมื่อต้องการใช้งานเป็นระบบการผลิตไฟฟ้า ขนาดใหญ่ขึ้นต้องนำโมดูลมาต่อกันเป็นแผง เรียกว่า อะเรย์ (Array) [30]



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของโมดูล

รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองของ PV ด้วยวงจรสมมูลเหมือนตัวไดโอดเนื่องจากมีกราฟ คุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเหมือนกับไดโอดเมื่ออยู่ในช่วงเวลาไร้แสง และผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับแสง โดยที่กระแสไฟฟ้าของวงจรสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$I = I_{LG} - I_{OS} \left\{ \exp\left[\frac{q}{AkT}(V + IR_s)\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

กำหนดให้ I คือกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต V คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต I_{LG} คือกระแสไฟฟ้าที่ได้จากความเข้มแสง I_{OS} คือกระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิมิตัว q คือประจุของอิเล็กตรอน A, B คือเพคเตอร์จินตภาพ K คือค่าคงที่ Boltzmann's T คืออุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) R_s คือความต้านทานอนุกรม และ R_{sh} คือความต้านทานขนาน

จากสมการที่ 2.1 กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิมิตัว และกระแสไฟฟ้าที่ได้จากความเข้มแสง สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$I_{OS} = I_{OR} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{qE_{Go}}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.2)$$

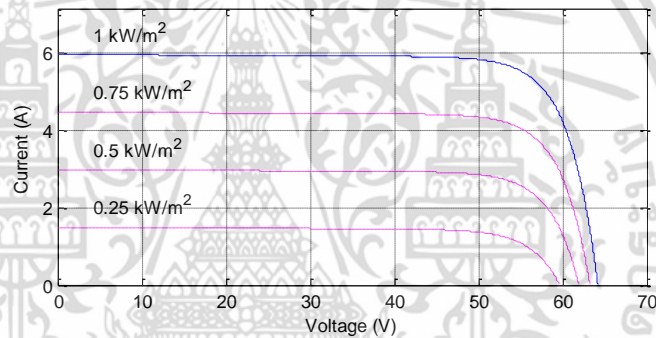
และ

$$I_{LG} = [I_{SCR} + K_I(T - 25)] \lambda / 100 \quad (2.3)$$

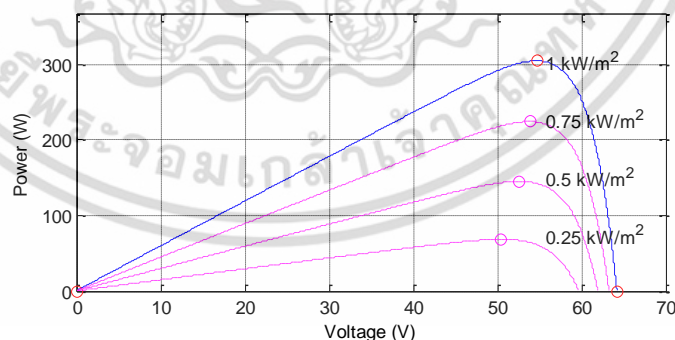
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ I_{OR} คือกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้องอ้างอิง T_r คืออุณหภูมิห้องอ้างอิง E_{GO} คือแถบช่องว่างพลังงาน I_{SCR} คือกระแสลัดวงจรที่อุณหภูมิ 25 °C และ 1000 W/m² K_T คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิกระแสลัดวงจร I_{SCR} และ λ คือความเข้มแสง (W/m²)

จากความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถแสดงได้ด้วยกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve) และเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (P-V Curve) ซึ่งกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตแปรผันตรงกับความเข้มแสงดังรูปที่ 2.3 ที่ความเข้มแสงเท่ากัน แต่กำลังไฟฟ้าในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ดังนั้นจำเป็นต้องมีตัวติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) เพื่อควบคุมให้ทำงานที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีอินครีเมนเทิลคอนดักแตนซ์ (Incremental Conductance) [31] ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานทั่วไปที่นิยมใช้กัน



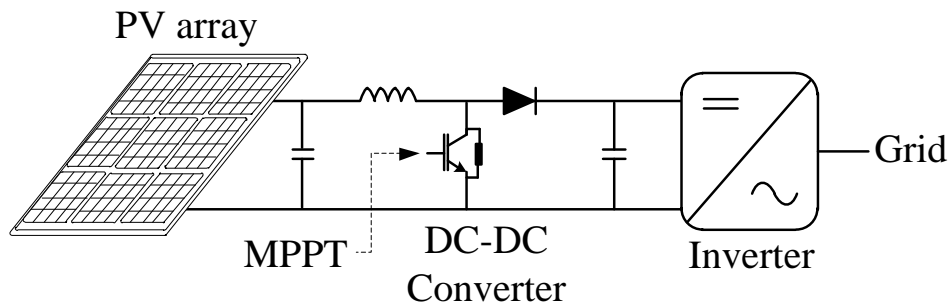
(ก) เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve)



(ข) เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V Curve)

รูปที่ 2.3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

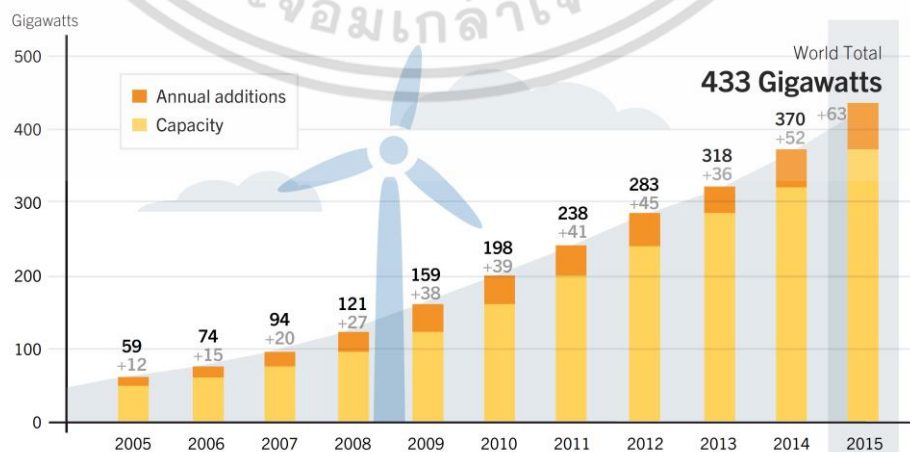


รูปที่ 2.4 แบบจำลองของระบบฟาร์มโซล่า

รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองของระบบ PV ขนาดใหญ่ ซึ่งประกอบด้วย PV array ภายในคือการนำโมดูลมาต่อกัน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากความเข้มแสงที่ได้รับ ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC converter) ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จาก PV array ให้มีแรงดันไฟฟ้าตามที่ต้องการ โดยสัญญาณ MPPT ต้องการ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยสัญญาณที่ส่งมาจาก MPPT อยู่ในรูปแบบของดิฟเฟอเรนเชียล และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทำหน้าที่เชื่อมต่อระบบ PV เข้ากับกริด โดยแปลงไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าตรงเป็นกระแสไฟฟ้าสลับ

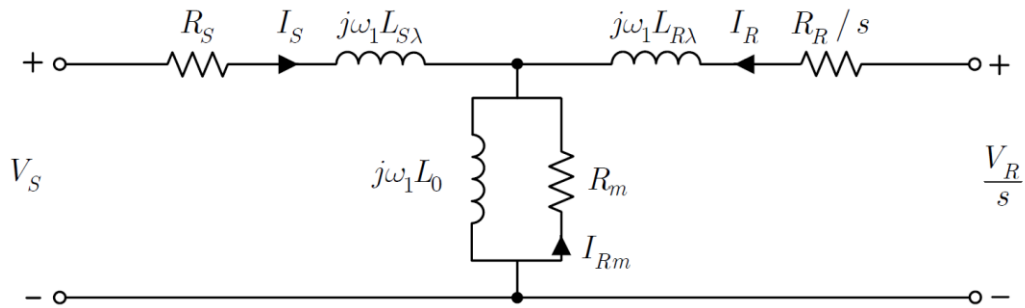
2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยกังหันลม

พลังงานลมเป็นพลังงานอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยมีอัตราการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเพิ่มขึ้นทุกปีดังรูปที่ 2.5 โดยเฉพาะกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) [1] เป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีประโยชน์หลายอย่างเช่น การลงทุนในการติดตั้งต่ำ ใช้พิกัดของคอนเวอร์เตอร์ต่ำ สามารถควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าวจรแยกอิสระจากกันได้ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 กำลังติดตั้งรวมในแต่ละปีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานลม [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

รูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก จากกฎของเคอร์ซอร์ฟจะได้สมการแรงดันด้านสเตเตอร์ V_S ดังสมการที่ 2.4

$$V_S = R_S I_S + j\omega_1 L_{S\lambda} I_S + j\omega_1 L_0 (I_S + I_R + I_{Rm}) \quad (2.4)$$

และสมการแรงดันด้านโรเตอร์ V_R ดังสมการ 2.5

$$\frac{V_R}{s} = \frac{R_R}{s} I_R + j\omega_1 L_{R\lambda} I_R + j\omega_1 L_0 (I_S + I_R + I_{Rm}) \quad (2.5)$$

$$0 = R_m I_{Rm} + j\omega_1 L_0 (I_S + I_R + I_{Rm}) \quad (2.6)$$

สมการสลิป s ดังสมการที่ 2.7

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (2.7)$$

กำหนดให้ ω_I คือ ความถี่ของระบบจำหน่าย ω_r คือ ความถี่เนื่องจากความเร็วรอบของโรเตอร์และ ω_2 คือความถี่สลิปหรือความถี่บนโรเตอร์ โดยฟลักซ์ในช่องอากาศ ฟลักซ์ที่สเตเตอร์และ 0 ฟลักซ์ที่โรเตอร์ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.8 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ

$$\psi_m = L_0 (I_S + I_R + I_{Rm}) \quad (2.8)$$

$$\psi_S = L_{S\lambda} I_S + L_0 (I_S + I_R + I_{Rm}) = L_{S\lambda} I_S + \psi_m \quad (2.9)$$

$$\psi_R = L_{R\lambda} I_R + L_0 (I_S + I_R + I_{Rm}) = L_{R\lambda} I_R + \psi_m \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ 2.9 ลงในสมการที่ 2.4 จะได้สมการที่ 2.11

$$V_S = R_S I_S + j\omega_1 \psi_S \quad (2.11)$$

แทนสมการที่ 2.10 ลงในสมการที่ 2.5 จะได้สมการที่ 2.12

$$\frac{V_R}{S} = \frac{R_R}{S} I_R + j\omega_1 \psi_R \quad (2.12)$$

แทนสมการที่ 2.8 ลงในสมการที่ 2.6 จะได้สมการที่ 2.13

$$0 = R_m I_{Rm} + j\omega_1 \psi_m \quad (2.13)$$

สมการการสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แสดงดังสมการที่ 2.14

$$P_{loss} = 3(R_S |I_S|^2 + R_R |I_R|^2 + R_m |I_{Rm}|^2) \quad (2.14)$$

แรงบิดทางไฟฟ้า (Electro-mechanical Torque) T_e แสดงดังสมการที่ 2.15

$$T_e = 3n_p \text{Im}[\psi_m I_R^*] = 3n_p [\psi_R I_R^*] \quad (2.15)$$

กำหนดให้ n_p คือ จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก

การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางสามารถพิจารณาได้จากกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) ที่สเตเตอร์ S_S และกำลังไฟฟ้าปรากฏที่โรเตอร์ S_R แสดงในสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17 ตามลำดับ

$$S_S = 3V_S I_S^* = 3V_S |I_S|^2 + j3\omega_1 L_{S\lambda} |I_S|^2 + j3\omega_1 \psi_m I_S^* \quad (2.16)$$

$$S_R = 3V_R I_R^* = 3V_R |I_R|^2 + j3\omega_1 L_{R\lambda} |I_R|^2 + j3\omega_1 \psi_m I_R^* \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.16 และ 2.17 เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$S_S = 3R_S |I_S|^2 + j3\omega_1 L_{S\lambda} |I_S|^2 + j3\omega_1 \frac{|\psi_m|^2}{L_m} + 3R_m |I_{Rm}|^2 - j3\omega_1 \psi_m I_R^* \quad (2.18)$$

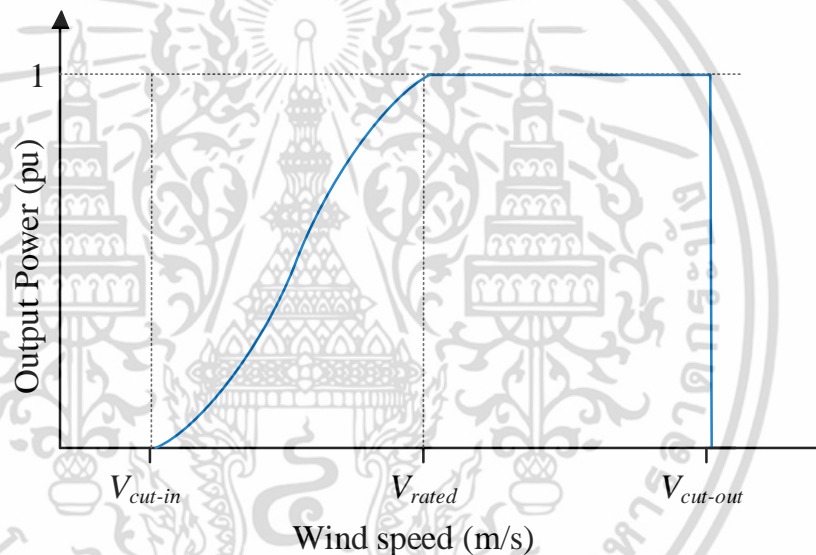
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากสมการที่ 2.17 และสมการที่ 2.18 กำลังไฟฟ้าของสเตเตอร์และโรเตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.19 และสมการที่ 2.20

$$\begin{aligned} P_S &= \text{Re}[S_S] = 3R_S |I_S|^2 + 3R_m |I_{Rm}|^2 + 3\omega_1 \text{Im}[\psi_m I_R^*] \\ &\approx 3\omega_1 \text{Im}[\psi_m I_R^*] \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} P_R &= \text{Re}[S_R] = 3R_R |I_R|^2 - 3\omega_1 s \text{Im}[\psi_m I_R^*] \\ &\approx -3s\omega_1 \text{Im}[\psi_m I_R^*] \end{aligned} \quad (2.20)$$

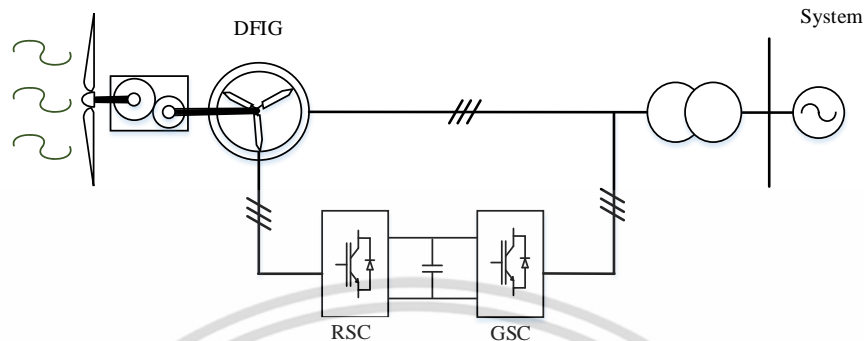
ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่จะส่งออกสู่ระบบไฟฟ้า คือผลรวมกำลังไฟฟ้าของสเตเตอร์และกำลังไฟฟ้าของโรเตอร์



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังผลิต

รูปที่ 2.7 แสดงการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นช่วงตามความเร็วลม ซึ่งกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังผลิตที่ได้จะเห็นว่าค่าความเร็วลมสามค่าคือความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มต้นผลิตไฟฟ้าได้ V_{cut-in} (Cut-in Wind Speed) ความเร็วลมพิกัดของกังหันลม V_{rated} (Rated Wind Speed) และความเร็วลมค่ามากที่สุดที่กังหันลมยังคงผลิตไฟฟ้าได้ $V_{cut-out}$ (Cut-out Wind Speed) ทำให้แบ่งช่วงการทำงานออกเป็นสี่ช่วง ช่วงที่หนึ่งจะไม่มีการผลิตไฟฟ้าจนกระทั่งความเร็วลมมีค่าเท่ากับค่า V_{cut-in} ช่วงต่อมาเป็นช่วงที่ความเร็วลมอยู่ในช่วงระหว่าง V_{cut-in} และ V_{rated} กังหันลมจะเริ่มผลิตไฟฟ้าโดยกำลังไฟฟ้าผลิตที่ได้จะสัมพันธ์กับความเร็วลมในช่วงที่สามความเร็วลมเข้าสู่ค่า V_{rated} แต่ยังไม่เกิน $V_{cut-out}$ กังหันลมยังคงทำงานที่ค่าพิกัดถึงแม้ว่า

ความเร็วลมยังคงเพิ่มขึ้น จนกระทั่งช่วงที่ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเกินค่า $V_{cut-out}$ กังหันลมจึงจะหยุดการทำงานเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ต่างๆชำรุดเสียหาย



รูปที่ 2.8 แบบจำลองของระบบฟาร์มกังหันลม

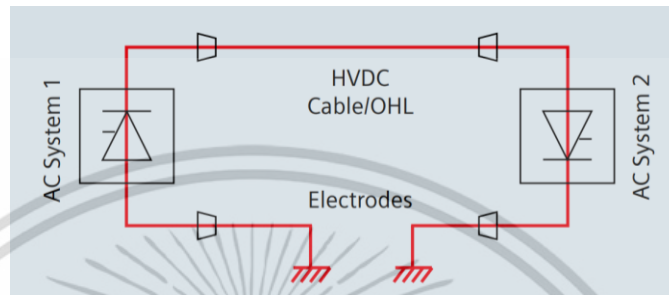
รูปที่ 2.8 แสดงแบบจำลองของระบบกังหันลมแบบDFIG ซึ่งประกอบด้วย กังหันลมซึ่งต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง DFIG ผ่านชุดเกียร์เพิ่มความเร็วรอบ โดยสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อกับคอนเวอร์เตอร์ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Rotor Side Converter: RSC) ตัวเก็บประจุและคอนเวอร์เตอร์ด้านระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Grid Side Converter: GSC) ก่อนจะเข้าสู่ระบบไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าตามลำดับ

2.3 ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

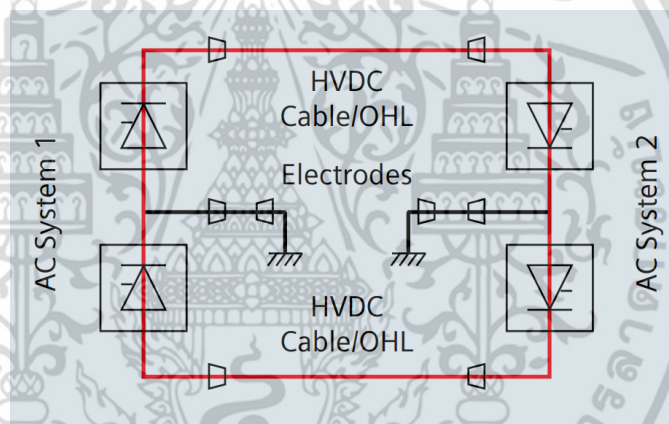
โดยปกติแล้วในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าจะส่งกำลังไฟฟ้าผ่านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง (High Voltage Alternating Current: HVAC) เพราะการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเรื่องง่ายโดยการใช้หม้อแปลง ดังนั้นระบบจะไม่ซับซ้อน ไม่ต้องการการดูแลรักษามากมายแต่การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านไฟฟ้ากระแสสลับก็มีข้อด้อยหลายประการดังนี้ เกิดค่าความเหนี่ยวนำ (Inductive) และค่าความจุ (Capacitive) ของสายโอเวอร์เฮดและสายเคเบิลที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสายมีความยาวมากขึ้น ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของระยะการส่งกำลังไฟฟ้า ไม่สามารถต่อระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองระบบที่มีความถี่ต่างกันเข้าด้วยกันได้ ไม่สามารถเชื่อมต่อระบบเข้าด้วยกันโดยตรงได้เพราะระบบอาจจะขาดเสถียรภาพ จึงมีการสร้างระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current: HVDC) ซึ่งมีการคิดค้นและพัฒนา มาตั้งแต่ปี ค.ศ.1929

โดยข้อดีของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ HVDC มีดังนี้ สามารถเชื่อมระบบไฟฟ้ากระแสสลับต่างระบบที่มีความถี่ต่างกันได้โดยไม่ต้องทำการซิงโครไนซ์ ไม่เกิดปัญหาค่าความเหนี่ยวนำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

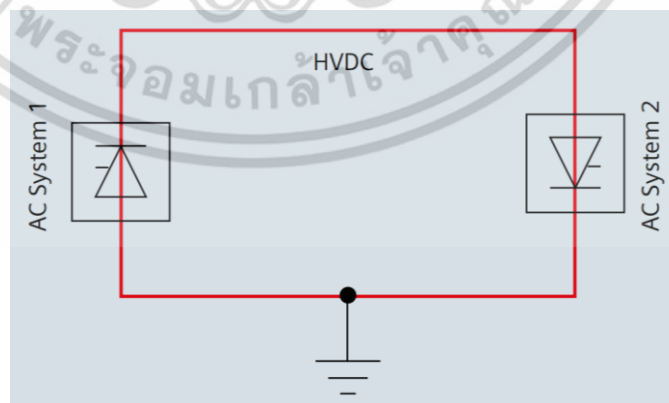
(Inductive) และค่าความจุ (Capacitive) ของสายเคเบิลทำให้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งจ่ายได้หรือความยาวของสายเคเบิล สามารถควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้าได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ การเดินสายระยะทางไกล และการเดินสายใต้น้ำหรือใต้พื้นดินระบบ HVDC จะมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าระบบ HVAC เมื่อเกิดความผิดปกติจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบอื่น ผลกระทบต่อสัญญาณวิทยุต่ำ



(ก) แบบโมโนโพลาร์ (Monopolar)



(ข) แบบไบโพลาร์ (Bipolar)



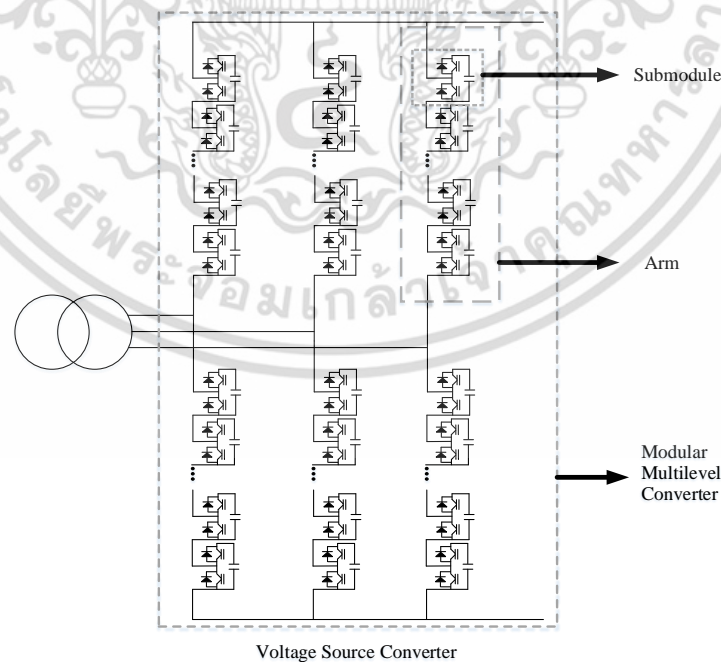
(ค) แบบแบล็คทูแบล็ค (Black-to-Black)

รูปที่ 29 รูปแบบการใช้งานระบบ HVDC [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบการใช้งานระบบ HVDC ในการเชื่อมต่อเพื่อส่งกำลังไฟฟ้ามีดังนี้ แบบ โมโนโพลาร์ (Monopolar) ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัวอยู่ต่างสถานีกันโดยมีสายส่งเชื่อมต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองใช้สำหรับส่งกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกล แบบไบโพลาร์ (Bipolar) เป็นการรวมโครงสร้างแบบโมโนโพลาร์ 2 โครงสร้างทำให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นโดยแต่ละอันมีขั้วตรงข้ามกันและสามารถทำงานแยกจากกันได้ แบบแบล็คทูแบล็ค (Black-to-Black) ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัวอยู่ในสถานีเดียวกันโดยไม่มีสายส่งมีจุดประสงค์เพื่อเชื่อมต่อบริเวณที่มีความถี่ต่างกัน

สถานีแปลงไฟฟ้า HVDC มีอุปกรณ์หลายตัวที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นฟ้ากระแสตรง อุปกรณ์หลักของสถานีคือ คอนเวอร์เตอร์วาล์ว (converter valve) โดยแบ่งออกเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Converter: CSC) และคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter: VSC) โดยวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งมีโครงสร้างภายในเป็น IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ต่อกันเป็นชุดขั้วโมดูล (Submodule) และชุดขั้วโมดูลจะถูกต่อกันหลายชุดขั้วโมดูลเป็นแขน (Arm) ให้เหมาะสมกับแรงดันและสภาวะในการใช้งาน แล้วนำแขนหลายอันมาต่อกันเป็นคอนเวอร์เตอร์เรียกว่า MMC (Modular Multilevel Converter) เพื่อให้ได้แรงดันสูงตามที่ระบบ HVDC ต้องการ[37] ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันแบบ MMC

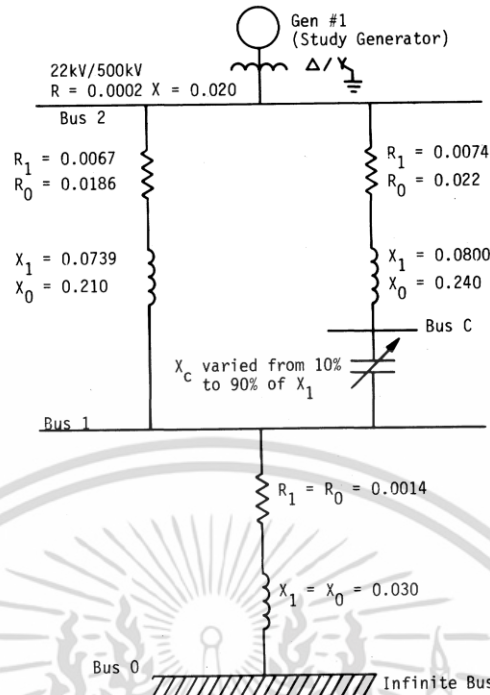
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของระบบ HVDC แบบ VSC มีดังต่อไปนี้ การแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรงเกิดฮาร์มอนิกน้อย ไม่เกิดการโอเวอร์โหลดขณะใช้งาน ใช้พื้นที่น้อยในการสร้างสถานีแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้อิสระ สามารถใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบทั่วไปได้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตอนแวลต์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสได้

ในปัจจุบันมีการใช้งานระบบ HVDC แบบ VSC หลายที่ทั่วโลกเช่น Troll A offshore ประเทศ Norway พิกัดกำลัง 84 MW 60 kV ด้วยสายเคเบิลใต้น้ำระยะทาง 70 km Gotland HVDC light ประเทศ Sweden พิกัดกำลัง 50 MW 80 kV ด้วยสายเคเบิลใต้น้ำระยะทาง 70 km MurrLink ประเทศ Australia พิกัดกำลัง 220 MW 150 kV ด้วยสายเคเบิลใต้ดินระยะทาง 180 km Valhall offshore ประเทศ Norway พิกัดกำลัง 78 MW 150 kV ด้วยสายเคเบิลใต้น้ำระยะทาง 292 km Trans Bay Cable ประเทศ USA พิกัดกำลัง 400 MW 200 kV ด้วยสายเคเบิลใต้น้ำระยะทาง 80 km เป็นต้น [38]

2.4 ปรากฏการณ์การสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีการต่อตัวชดเชยอนุกรมชนิดตัวเก็บประจุ (Series Compensation Capacitors) เข้าไปที่สายส่งของระบบไฟฟ้าเพื่อช่วยแก้ปัญหาในด้านการตกของแรงดันไฟฟ้ารวมทั้งยังเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถของสายส่งในการส่งกำลังไฟฟ้าให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกันหากตัวชดเชยอนุกรมที่ต่อเข้าไบนั้นมีค่าที่ไม่เหมาะสมทำให้ความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้า (Natural Frequency) ไปตรงกับโหมดการสั่นทางกลของเพลลาภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส (Sub-synchronous Resonance: SSR) ซึ่งส่งผลให้เพลลาภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำเกิดการแตกหักและชำรุดเสียหายได้ โดยในปี 1970 ได้เกิดเหตุการณ์ SSR นี้ขึ้นที่โรงไฟฟ้า Mohave Power Plant ประเทศสหรัฐอเมริกาทำให้ต้องปิดเพื่อซ่อมบำรุงเป็นเวลาหลายเดือน และยังเกิดเหตุการณ์เดิมซ้ำขึ้นอีกครั้งในปี 1971 [7] จากเหตุการณ์ในครั้งนี้จึงได้มีการศึกษาวิจัยถึงสาเหตุและได้มีการสร้างแบบจำลองระบบสำหรับศึกษาปรากฏการณ์นี้ขึ้นโดยใช้ชื่อว่า IEEE First Benchmark model และ IEEE Second Benchmark ซึ่งแบบจำลองจะประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อกับกริดผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า 2 เส้น โดยสายส่งเส้นที่ 1 มีตัวชดเชยอนุกรมชนิดตัวเก็บประจุซึ่งสามารถปรับค่าได้แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แบบจำลอง IEEE Second Benchmark model [36]

จากการศึกษาปรากฏการณ์การสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซึ่งโครนัสด้วยแบบจำลอง IEEE Second Benchmark model อธิบายได้ว่าในระบบที่มีการติดตั้งตัวชดเชยอนุกรมชนิดตัวเก็บประจุ จะหาความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 2.21

$$f_n = f_s \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \tag{2.21}$$

กำหนดให้ f_n คือความถี่ธรรมชาติของระบบ f_s คือความถี่มูลฐานของระบบ X_C คือค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของระบบ X_L คือค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของระบบ

ซึ่งหากตัวเก็บประจุนี้มีค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ X_C ที่ไม่เหมาะสมทำให้ความถี่ธรรมชาติของระบบไปตรงกับโหมดการแกว่งของเพลลาภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้างสมการ 2.22

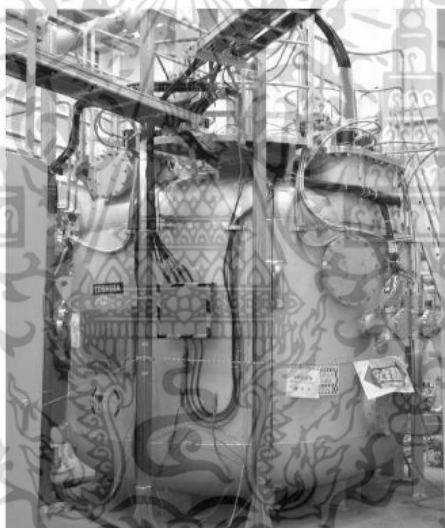
$$f_n = f_s - f_m \tag{2.22}$$

กำหนดให้ f_m คือความถี่ทางกลของเพลลาในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อเกิดความผิดปกติหรือขึ้นในระบบไฟฟ้าซึ่งกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบจะมีองค์ประกอบหนึ่งของความถี่ที่มีความถี่ธรรมชาติโดยกระแสที่เกิดขึ้นนี้ไปเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิดระหว่างเฟลาภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นทำให้เฟลาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหายหากจากการบิด

2.5 อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กด้วยตัวนำยิ่งยวด

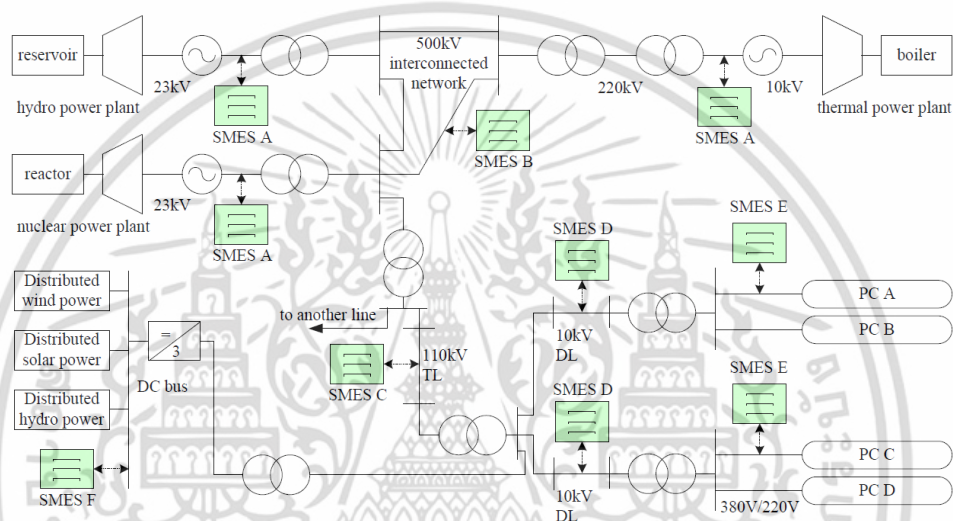
อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กที่ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (superconducting magnetic energy storage: SMES) ดังรูปที่ 2.12 มีสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากโดยเก็บในรูปของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าภายในขดลวดตัวนำยิ่งยวด และสามารถจ่ายพลังงานที่เก็บไว้เมื่อมีต้องการ ในปัจจุบันมีการวิจัยในการนำเทคโนโลยีขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับทำ SMES มากขึ้นทั้งจากการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ ในภาคอุตสาหกรรม และเทคโนโลยีนี้ได้มีการนำไปใช้ในทางปฏิบัติจากขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ [8-13]



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กที่ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด SMES

การค้นพบและเริ่มศึกษา SMES เริ่มตั้งแต่ช่วงต้นของคริสต์ศตวรรษที่ 1960 ขดลวดตัวนำยิ่งยวดแบบอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductors: LTS) โดยการใช้งาน LTS SMES ต้องทำความเย็นให้ถึง 4.2K เพื่อให้ LTS ทำงานได้ ต่อมา มีการค้นพบขดลวดตัวนำยิ่งยวดแบบอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductors: HTS) ที่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าโดยอยู่ที่ 77K นำกระแสได้มากกว่า และค่าใช้จ่ายในการสร้างน้อยกว่า ในปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุตัวนำยิ่งยวด โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุ HTS มีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้งานได้ดีในระดับที่ใหญ่ขึ้น มีการสร้าง SMES และทดสอบสำหรับใช้ในทางปฏิบัติในระบบไฟฟ้ามากขึ้น เช่น นำมาใช้ลดการสั้นของความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้า ใช้ป้องกันแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราว รักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ขดเซยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดัน และป้องกันโหลดที่สำคัญเป็นต้น [33,34] ตัวอย่างโครงการที่มีการนำ SMES มาใช้เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีพัฒนาอุปกรณ์ SMES ในขนาด 30MJ ใน Los Alamos National Laboratory และ ขนาด 100 MJ ที่University of Florida และใช้สำหรับทางการค้าโดย American Superconductor Co. (AMSC) ในประเทศญี่ปุ่นที่Chubu Electric Power Co. มีขนาด 7.34 MJ ในประเทศจีนที่Chinese Academy of Sciences มีขนาด 2MJ ในประเทศเกาหลีใต้ที่Korean Electric Research Institute มีขนาด 3MJ และในประเทศอิตาลีที่ Ansaldo Ricerche spa มีขนาด 2.6 MJ เป็นต้น



รูปที่ 2.13 แบบแผนการติดตั้งอุปกรณ์ SMES [9]

ในรูปที่ 2.13 เป็นแบบแผนที่สามารถนำอุปกรณ์ SMES ไปติดตั้งที่จุดต่างๆในระบบไฟฟ้า เพื่อช่วยในแก้ปัญหาซึ่งอธิบายได้ดังนี้

SMES A ที่ติดใกล้กับแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่จากส่วนกลาง ใช้ในการรักษาเสถียรภาพ และสมดุลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมา

SMES B ที่ติดระหว่างจุดเชื่อมต่อโครงข่าย ใช้ในการคาสเกตกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากระบบผลิต ส่วนกลางต่างๆและลดการสั้นของความถี่ต่ำ

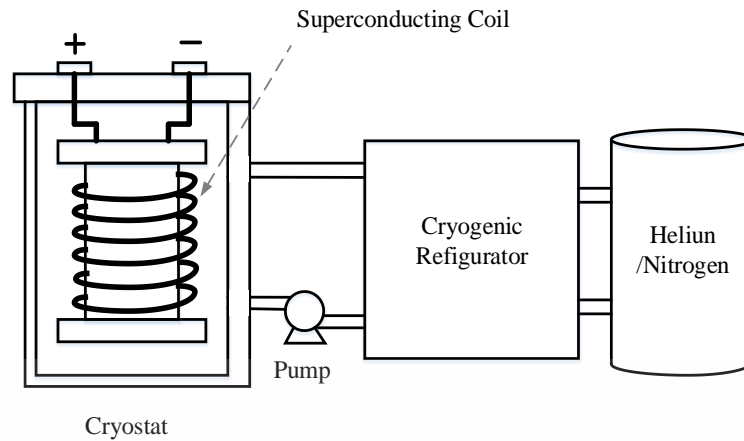
SMES C ที่ติดบนสายส่ง ใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

SMES D ที่ติดบนสายจำหน่าย ใช้ในการเพิ่มคุณภาพของกำลังไฟฟ้า

SMES E ที่ติดด้านผู้ใช้ไฟฟ้า ใช้สำหรับป้องกันโหลดที่สำคัญ

SMES F ที่ติดที่แหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ใช้ในการคงกำลังไฟฟ้าด้านออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

ในรูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของขดลวดตัวนำยิ่งยวดประกอบด้วยส่วนประกอบดังต่อไปนี้

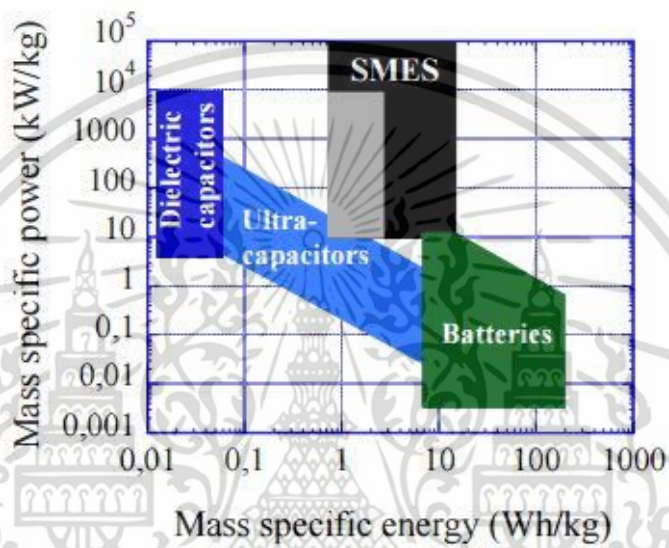
1. ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน เพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกไปสู่ระบบเมื่อมีความต้องการโดยทั่วไปจะเก็บไว้ในถังสุญญากาศ
2. เครื่องรักษาอุณหภูมิ (Cryostat) เป็นถังสุญญากาศทำหน้าที่เป็นระบบปิดเพื่อรักษาอุณหภูมิของขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ เพื่อคงสถานะเป็นตัวนำยิ่งยวด
3. เครื่องทำความเย็น (Cryogenic Refrigerator) ทำหน้าที่ทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งโดยทั่วไปใช้ฮีเลียมหรือไนโตรเจนเป็นสารทำความเย็น
4. ปั๊ม (Pump) ทำหน้าที่หมุนเวียนสารทำความเย็นภายในระบบทำความเย็น
5. ถังเก็บสารทำความเย็น ใช้เก็บสารที่ใช้ในการทำความเย็น

โดยพลังงานสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวดแสดงดังสมการที่ 2.23

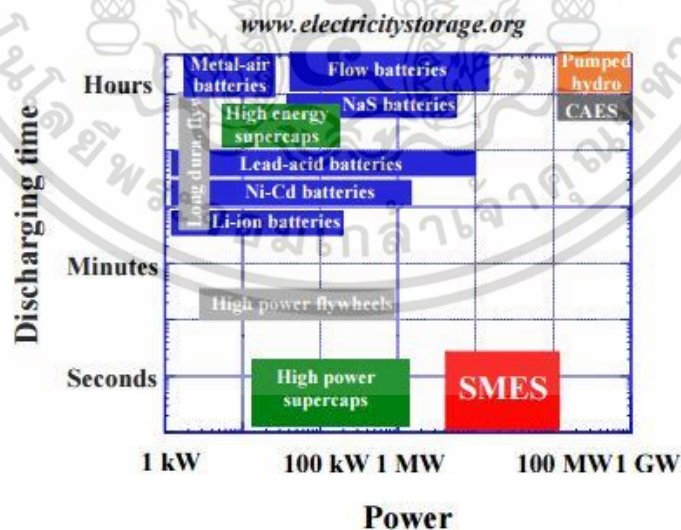
$$E_{SC} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC}^2 \quad (2.23)$$

กำหนดให้ E_{SC} คือพลังงานสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวด (J) L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H) I_{SC} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด (A)

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีตัวนำยิ่งยวดและอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้ SMES มีศักยภาพสูงขึ้น ดังนั้น SMES จึงเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่มีศักยภาพสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์อื่นดังรูปที่ 2.15 แสดงกำลังไฟฟ้าและพลังงานต่อน้ำหนักของ SMES เปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ (Battery) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) SMES ในกรอบสี่เทาเป็นส่วนที่ในปัจจุบันสามารถทำได้แล้ว ซึ่งมีเมื่อเปรียบเทียบในปริมาณและน้ำหนักที่เท่ากัน SMES สามารถให้กำลังไฟฟ้าได้สูงกว่า แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุ ส่วนในกรอบสีดำคือศักยภาพของ SMES ที่เป็นไปได้ตามทฤษฎีซึ่งสามารถพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต



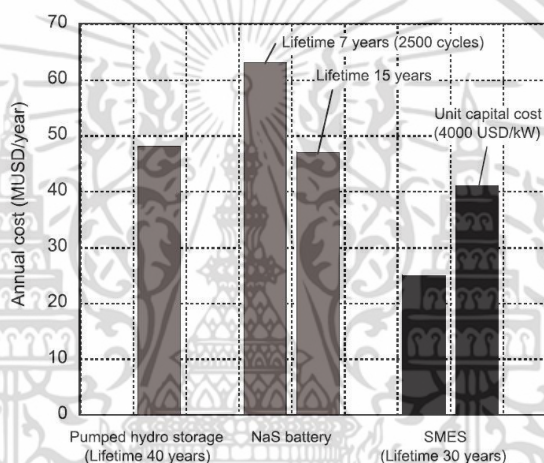
รูปที่ 2.15 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าและพลังงานต่อน้ำหนัก [39]



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงเวลาการดิสชาร์จและกำลังไฟฟ้า [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

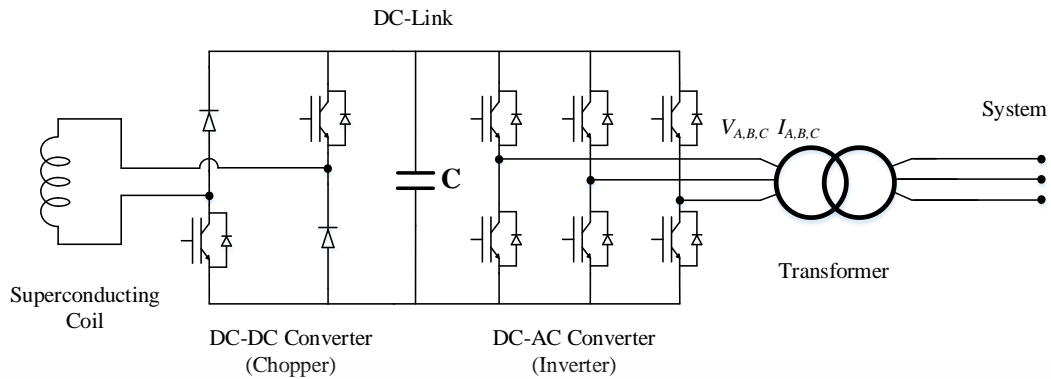
ในรูปที่ 2.16 แสดงการเปรียบเทียบช่วงของกำลังไฟฟ้าและเวลาในการดิสชาร์จของอุปกรณ์เก็บพลังงานต่างๆ ซึ่งเห็นได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้าของ SMES สูงถึง 100 MW และใช้ระยะเวลาในการดิสชาร์จในหลักวินาที พลังงานที่ถูกเก็บไว้ในขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถดิสชาร์จพลังงานได้ในปริมาณมากและใช้เวลาในการดิสชาร์จสั้น แต่ในระหว่างการดิสชาร์จหรือชาร์จพลังงาน มีพลังงานบางส่วนที่สูญเสียไปเนื่องจากความร้อนของอุปกรณ์สวิตชิงและความสูญเสียของกระแสเอ็ดดี้ (Eddy Current Losses) ของเครื่องทำความเย็น แต่ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่เก็บไว้ใน SMES ซึ่งถ้ามีการออกแบบที่ดีและเหมาะสม SMES สามารถแปลงพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเก็บพลังงานอื่น เช่น แบตเตอรี่ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานอยู่ที่ 70 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ป้อนน้ำประสิทธิภาพการแปลงพลังงานอยู่ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ ตัวเก็บประจุประสิทธิภาพอยู่ที่ 90 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ฯลฯ



รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบราคาประจำปี

สำหรับราคาของอุปกรณ์ SMES จากข้อมูลปี ค.ศ. 2010 ได้มีการทำราคาประเมินของ SMES โดยแยกประเมินองค์ประกอบหลักเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานและส่วนที่ทำหน้าที่แปลงพลังงาน ในส่วนที่เก็บสะสมพลังงานประกอบด้วย ขดลวดตัวนำ ระบบทำความเย็น อุปกรณ์ป้องกันและควบคุมทั้งหมด มีการประเมินราคาอยู่ที่ 85,000 ถึง 125,000 ดอลลาร์ต่อเมกะจูล (MJ) และราคาของระบบแปลงกำลังไฟฟ้าที่ใช้กับ SMES ราคาประเมินอยู่ที่ 150 ถึง 250 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ (kW) ซึ่งราคาในการประเมินขึ้นอยู่กับระบบที่นำ SMES ไปติดตั้ง และยังมีราคาประเมินประจำปีซึ่งเปรียบเทียบกับระหว่าง SMES ป้อนน้ำสะสมพลังงาน (Pumped Hydro Storage) แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS Battery) ดังรูปที่ 2.17 เป็นการประเมินจากระบบตัวเก็บพลังงาน 1 กิกะวัตต์ชั่วโมง (GWh) โดยประเมินราคาจาก อายุการใช้งาน ค่าบำรุงรักษาและราคาของตัวเก็บพลังงาน ซึ่ง SMES มีราคาที่ต่ำที่สุด [40] ซึ่งในอนาคตคาดการณ์ได้ว่าการนำ SMES เข้ามาใช้ในระบบจะมีเพิ่มขึ้นอย่างมาก ด้วยข้อดีด้านคุณสมบัติเฉพาะตัวของ SMES และเรื่องของราคา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แบบจำลองของอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด

ในรูปที่ 2.18 เป็นแบบจำลองการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปใช้งานเป็น SMES นั้นต้องเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยในวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter: VSC) และมีระบบควบคุมในการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ ซึ่งวงจรแบบ VSC ประกอบด้วยวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าระหว่างขดลวดตัวนำยิ่งยวดกับระบบไฟฟ้าที่จะนำ SMES ไปต่อ วงจรเชื่อมโยงทางดีซี (DC-link) ทำหน้าที่เชื่อมระหว่างวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์และดีซีทูเอซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-AC Converter) และหม้อแปลงไฟฟ้า

แบบจำลองของ SMES ที่ใช้ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ มีวิธีการควบคุมแบบ VSC อธิบายได้ดังนี้ จากการแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟส $V_{A,B,C}$ และกระแสไฟฟ้าสามเฟส $I_{A,B,C}$ ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในแนวแกน d และแกน q ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos wt & \cos(wt - 120^\circ) & \cos(wt + 120^\circ) \\ -\sin wt & -\sin(wt - 120^\circ) & -\sin(wt + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

และ

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos wt & \cos(wt - 120^\circ) & \cos(wt + 120^\circ) \\ -\sin wt & -\sin(wt - 120^\circ) & -\sin(wt + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

กำหนดให้ V_d คือแรงดันไฟฟ้าแกน d V_q คือแรงดันไฟฟ้าแกน q I_d คือกระแสไฟฟ้าแกน d และ I_q คือกระแสไฟฟ้าแกน q

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ P และรีแอกทีฟ Q ของอินเวอร์เตอร์เป็นตามสมการที่ 2.26 และ 2.27

$$P = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad (2.26)$$

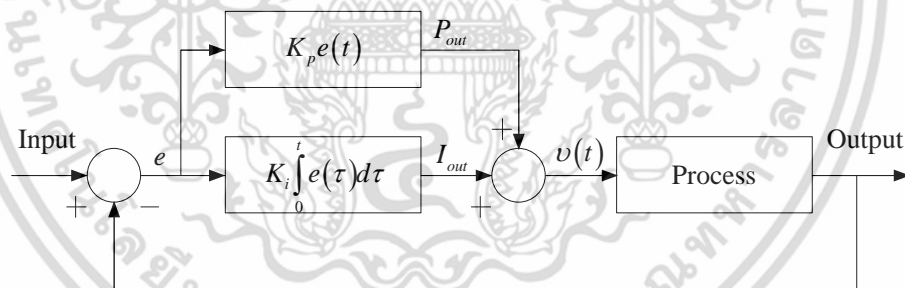
$$Q = \frac{3}{2}(V_q I_d - V_d I_q) \quad (2.27)$$

กำหนดให้ใช้กรอบอ้างอิง dq ตรงกับกรอบอ้างอิงของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสทำให้ V_d มีค่าเท่ากับขนาดของ แรงดันไฟฟ้า และ V_q มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการที่ 2.26 และ 2.27 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ 2.28 และ 2.29

$$P = \frac{3}{2} V_d I_d \quad (2.28)$$

$$Q = -\frac{3}{2} V_d I_q \quad (2.29)$$

2.6 ตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 2.19 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์

รูปที่ 2.19 คือตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) หรือตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional Integral Controller) เป็นตัวควบคุมที่ความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยระบบที่ใช้มักเป็นระบบที่ควบคุมง่ายไม่ซับซ้อน โดยค่าที่นำมาใช้ในการควบคุมพีไอเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความแตกต่างของค่าที่ต้องการกับค่าที่วัดมาได้ เพื่อใช้ควบคุมให้ค่าเป็นไปตามต้องการ ตัวควบคุมพีไอแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวควบคุมพีหรือตัวควบคุมสัดส่วนและ ตัวควบคุมไอหรือตัวควบคุมปริพันธ์

ตัวควบคุมสัดส่วน (Proportional Controller) เป็นค่าคงที่หรืออัตราขยาย เพื่อขยายขนาดค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการตอบสนองสัดส่วนสามารถแสดงด้วยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยอัตราขยายสัดส่วนดังสมการที่ 2.28

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.28)$$

ส่วนตัวควบคุมปริพันธ์ (Integral Controller) เป็นสัดส่วนของความผิดพลาดและช่วงเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลาถูกคูณด้วยค่าปริพันธ์ดังสมการที่ 2.29

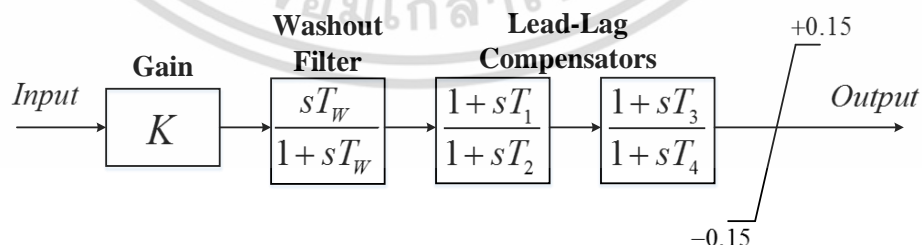
$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.29)$$

กำหนดให้ P_{out} คือสัญญาณเอาต์พุตของเทอมสัดส่วน K_p คืออัตราส่วนขยาย e คือค่าความผิดพลาด t คือเวลา I_{out} คือสัญญาณเอาต์พุตของเทอมปริพันธ์ K_i คืออัตราขยายปริพันธ์ และ τ คือตัวแปรใช้ในการอินทิเกรต

เมื่อนำสมการ 2.28 และ 2.29 มารวมกันจะได้สัญญาณด้านออกของตัวควบคุมพีไอ v ดังสมการที่ 2.30

$$v(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.30)$$

2.7 ตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตาม



รูปที่ 2.20 โครงสร้างตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.20 แสดงแบบจำลองของตัวควบคุมชดเชยเฟสนำและตาม ซึ่งประกอบด้วย อัตราขยาย (Gain) มีค่า K ทำหน้าที่ขยายสัญญาณสำหรับทำเสถียรภาพ ตัวกรองความถี่ (Washout Filter) มีค่า T_w เป็นค่าคงที่ทางเวลาทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงผ่านเพื่อกำจัดสัญญาณที่สถานะคงตัวออก ตัวควบคุมชดเชยเฟสนำและตาม (Lead-Lag Compensators) มีค่า T_1, T_2, T_3, T_4 เป็นค่าคงที่ทางเวลาทำหน้าที่ชดเชยมุมมีค่าด้วยกัน โดยตัวควบคุมนี้ใช้สำหรับ ปรับปรุงผลตอบสนองในสถานะชั่วคราว ด้วยการเพิ่มโพลและซีโรเข้าไปในระบบโดยจะทำการปรับปรุง ผลตอบสนองในสถานะชั่วคราวด้วยตัวชดเชยเฟสนำก่อนแล้วจึงปรับปรุงค่าความผิดพลาดในสถานะคง ตัวด้วยตัวควบคุมเฟสตาม [32]

2.8 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

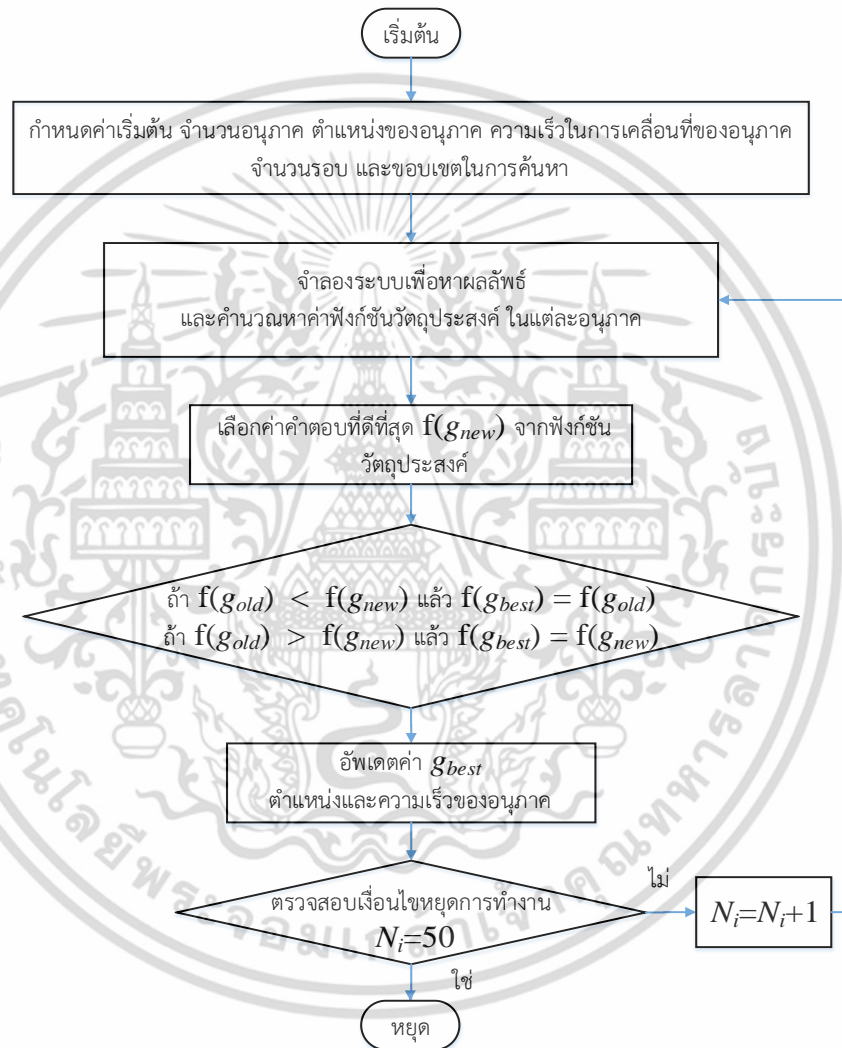
วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [28] ถูก พัฒนาโดย Kennedy และ Eberhart ซึ่งได้แนวความคิดจากพฤติกรรมเคลื่อนที่เพื่อหาอาหาร ของฝูงสัตว์ (Swarm) เช่น ฝูงนก ฝูงปลา เพื่อหาแหล่งอาหารที่ไม่สามารถระบุได้โดยการเคลื่อนที่แบ่ง ออกเป็นสองแบบ คือการเคลื่อนที่ไปเป็นฝูง และการเคลื่อนที่ที่สามารถแยกตัวออกจากฝูงแล้วรวมตัว กลับเข้ามาในฝูงอีกครั้ง การเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคนี้อาจพิจารณาเป็นพฤติกรรมทางสังคมได้ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของผลตอบสนองด้วยจำนวนของอนุภาค (Particle) เช่นในฝูงสัตว์ สัตว์แต่ละตัว จะต้องตามหาจุดหมายในทิศทางต่างๆ หลังจากสื่อสารกันในฝูงแล้วจะสามารถระบุตำแหน่งของสัตว์ ตัวที่ดีที่สุดได้ หลังจากทั้งหมดที่ได้รับข้อมูลนี้ สัตว์ตัวอื่นในฝูงก็จะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของสัตว์ตัวที่ อยู่ในตำแหน่งดีที่สุดซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งและความเร็วของสัตว์แต่ละตัว กระบวนการนี้ถูกทำซ้ำ จนกระทั่งถึงแหล่งอาหารหรือจุดหมายที่ต้องการ

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของฝูงสัตว์กับแนวคิดการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค แทนด้วย ตัวแปลได้ดังนี้ จำนวนสัตว์ทั้งหมดที่อยู่ในฝูงแทนด้วยจำนวนอนุภาค (number of particle) n ตัว ตำแหน่งเริ่มต้นของสัตว์ตัวที่ i แทนด้วยตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค x_i ; ความเร็วเริ่มต้นของสัตว์แต่ละ ตัวแทนด้วย v_i ; ตำแหน่งของอาหารแทนด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยตำแหน่งของสัตว์ตัวที่ใกล้ จุดหมายที่สุดในกลุ่มแทนด้วย g_{best} และตำแหน่งของตัวเองที่ใกล้จุดหมายที่สุดในรอบการเคลื่อนที่ นั้นแทนด้วย p_{best} ก่อนที่สัตว์แต่ละตัวจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ในรอบถัดไป จะต้องคำนวณ ความเร็วและตำแหน่งที่จะเคลื่อนที่ไปจากสมการที่ 2.31 และ 2.32

$$v_i^{m+1} = v_i^m + \alpha \varepsilon_1 [g_{best} - x_i^m] + \beta \varepsilon_2 [p_{best} - x_i^m] \quad (2.31)$$

$$x_i^{m+1} = x_i^m + v_i^{m+1} \quad (2.32)$$

กำหนดให้ x คือตำแหน่งของอนุภาค v คือความเร็วของอนุภาค α และ β คือค่าคงที่ความเร่ง ε_1 และ ε_2 คือเวกเตอร์สุ่ม มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 m คือรอบการคำนวณ i คือลำดับของอนุภาค



รูปที่ 2.21 แผนผังการทำงานของวิธีกลุ่มอนุภาค

จากรูปที่ 2.21 แสดงแผนผังการทำงานของวิธีการกลุ่มอนุภาค กำหนดให้ N_i คือจำนวนรอบในการคำนวณรอบปัจจุบัน $f(g_{new})$ คือค่าคำตอบที่ดีที่สุดจากทุกอนุภาคในรอบการคำนวณปัจจุบัน $f(g_{old})$ คือค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณก่อนหน้า $f(g_{best})$ คือค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ซึ่งสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กำหนดจำนวนอนุภาค ตำแหน่งของอนุภาค ความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาค จำนวนรอบการคำนวณ และกำหนดขอบเขตของตำแหน่งในการค้นหา
2. จำลองระบบเพื่อหาผลลัพธ์จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการเคลื่อนที่สำหรับทุกอนุภาค โดยค่าที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณนั้นๆจะถูกเก็บไว้ในเป็นค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน $f(g_{new})$
3. นำค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบันมาเปรียบเทียบกับหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง $f(g_{best})$ และตำแหน่งของอนุภาคที่ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด จากเงื่อนไขว่า ถ้า ค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณก่อนหน้า น้อยกว่าค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน แล้วค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง จะมีค่าเท่ากับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณก่อนหน้า แต่ถ้าค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณก่อนหน้า มากกว่าค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน แล้วค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง จะมีค่าเท่ากับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน
4. เมื่อได้ค่าคำตอบที่ดีที่สุดและตำแหน่งของอนุภาคที่แท้จริงแล้ว แต่ละอนุภาคจะเคลื่อนไปยังตำแหน่งใหม่ตามสมการที่ 2.31 และ 2.32
5. ตรวจสอบเงื่อนไขหยุดการทำงาน โดยตั้งจำนวนรอบไว้ที่ 50 รอบ ซึ่งหากยังไม่ครบตามที่กำหนดแต่ละอนุภาคจะถูกนำไปทำการใหม่ตั้งแต่ข้อที่ 2 แต่หากครบตามที่กำหนดแล้วจะหยุดการทำงานและได้ค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดจากค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

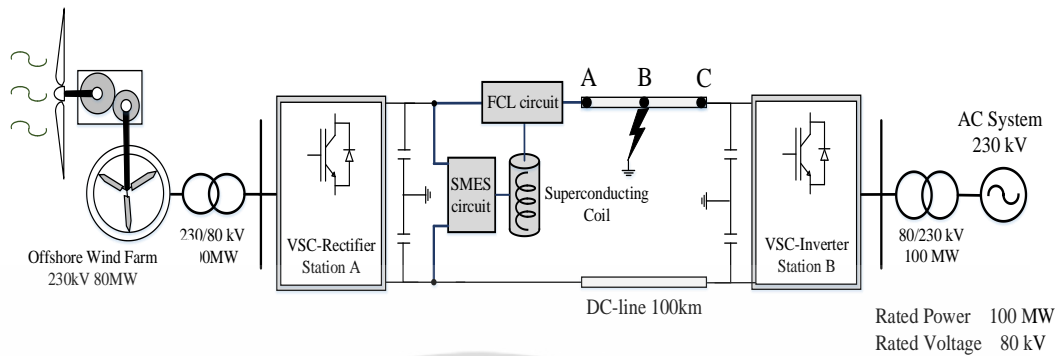
บทที่ 3

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลม นอกชายฝั่ง

ในบทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดโดยออกแบบวงจรและระบบควบคุมสำหรับติดตั้งที่ด้านดีซีฝั่งสถานีแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current Transmission System: HVDC) ที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter: VSC) ที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่ง (Offshore Wind Farm) ควบคุมการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดด้วยวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์สองวงจรคือวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดทำหน้าที่เป็นตัวเก็บสะสมพลังงาน และวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสฟอลต์ โดยในสภาวะปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแบบยิ่งยวด (superconducting magnetic energy storage: SMES) ในการชาร์จและดิสชาร์จกำลังไฟฟ้าเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอจากฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งช่วยให้กำลังไฟฟ้าด้านออกจากระบบส่งไฟฟ้า HVDC สม่ำเสมอขึ้น เมื่อเกิดความผิดปกติหรือขึ้นในระบบวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์อีกวงจรจะทำการเชื่อมต่อขดลวดตัวนำยิ่งยวดเข้าไปอนุกรมกับสายส่งดีซี เพื่อให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์ในการจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Fault Current Limiter: SFCL) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ในการแปลงไฟฟ้าแบบ VSC และสายส่งดีซี จึงเรียกอุปกรณ์นี้ว่า อุปกรณ์สะสมพลังงานแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage with Fault Current Limiter: SMES-FCL) นอกจากนี้ยังใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมในการหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับตัวควบคุมด้วย เพื่อให้อุปกรณ์ที่ออกแบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 แบบจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

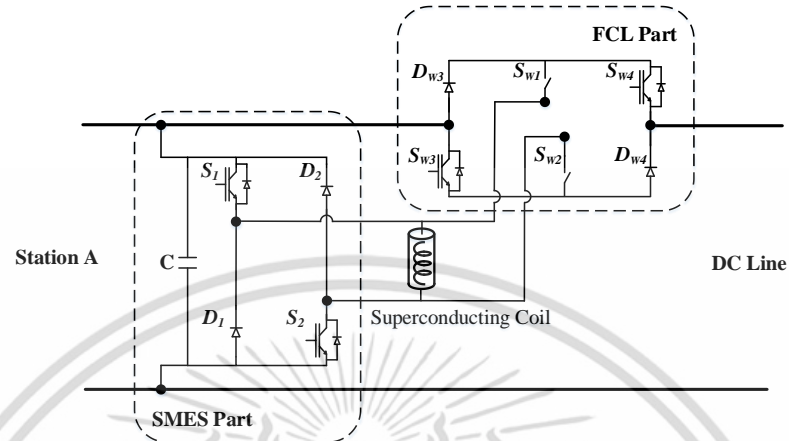


รูปที่ 3.1 ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC)

รูปที่ 3.1 แสดงระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบ HVDC ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งขนาด 80 MW 230 V เป็นแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้า สถานีแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (VSC-Rectifier A) พิกัดกำลัง 100 MW 80 kV ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในระดับแรงดันสูงเพื่อใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้า สายส่งดีซี (DC line) ระยะทาง 100 km สถานีแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (VSC-Inverter Station B) พิกัดกำลัง 100 MW 80 kV ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อส่งเข้าสู่ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ต่อไป นอกจากนี้ยังใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) ติดตั้งเป็นตัวเก็บสะสมพลังงานแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Magnetic Energy Storage with Fault Current Limiter) ไว้ที่สถานี A เพื่อใช้แก้ปัญหาที่จะเกิดขึ้นในระบบ HVDC โดยแบ่งเป็นการศึกษาออกเป็นสองสถานะ คือสถานะปกติและสถานะเกิดความผิดปกติ โดยในสถานะปกติฟาร์มกังหันลมจะผลิตกำลังไฟฟ้าแต่เนื่องจากความเร็วลมที่ไม่คงที่ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาไม่สม่ำเสมอหรือมีการแกว่งขึ้น ส่วนสถานะเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นโดยในที่นี้จะศึกษาความผิดปกติในด้านดีซีเป็นเวลา 150 ms โดยแบ่งจุดที่เกิดความผิดปกติเป็น 3 จุด A ต้นสายส่ง B กึ่งกลางสาย และ C ปลายสายส่ง ตามลำดับ ทำให้เกิดกระแสฟอลต์ที่สูงขึ้นซึ่งจะเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ในสถานีแปลงไฟฟ้าและสายส่งในระบบ HVDC

3.2 โครงสร้างและการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบ HVDC

3.2.1 โครงสร้างวงจรของขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบ HVDC

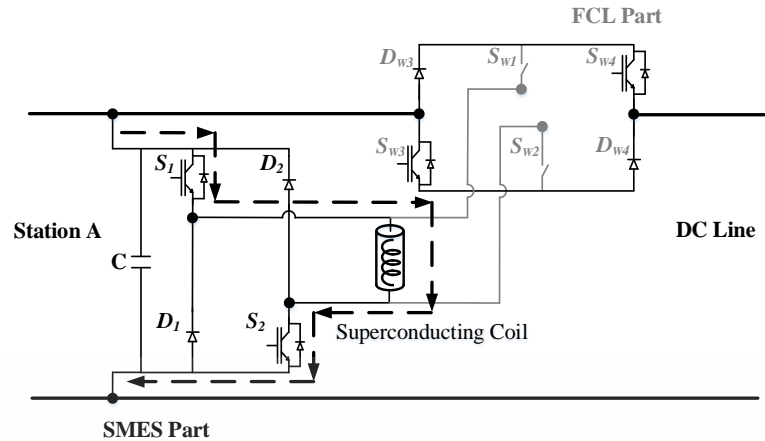


รูปที่ 3.2 โครงสร้างวงจร SMES-FCL

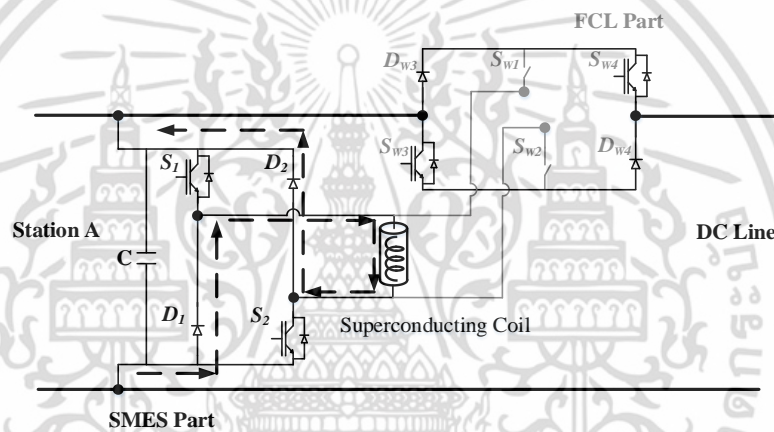
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างวงจรของขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการทำเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟอลต์ SMES-FCL สำหรับระบบ HVDC ที่นำไปติดตั้งระหว่างด้านออกของสถานี A กับสายส่งดีซี โดยแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงาน (SMES Part) และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ในการจำกัดกระแสฟอลต์ (FCL Part) ซึ่งทำงานแยกอิสระจากกันแต่ยังคงใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) ร่วมกัน

3.2.2 การทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดในระบบ HVDC

การทำงานของ SMES-FCL สามารถแบ่งเป็น 2 สภาวะคือ การทำงานในสภาวะปกติและการทำงานในสภาวะเกิดความผิดปกติ โดยในสภาวะปกติ SMES-FCL จะทำหน้าที่ในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากฟาร์มกังหันลม คือการทำงานในส่วนของ SMES โดยการชาร์จและดิสชาร์จกระแสไฟฟ้า จากการควบคุมด้วยสวิตช์ S_1 และ S_2 และในสภาวะเกิดความผิดปกติ SMES-FCL จะทำหน้าที่ในการจำกัดกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้น จากการควบคุมด้วยสวิตช์ S_{w1} S_{w2} S_{w3} และ S_{w4} เป็นการต่อวงจรสำหรับการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดเข้าไปอนุกรมกับสายส่งดีซี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



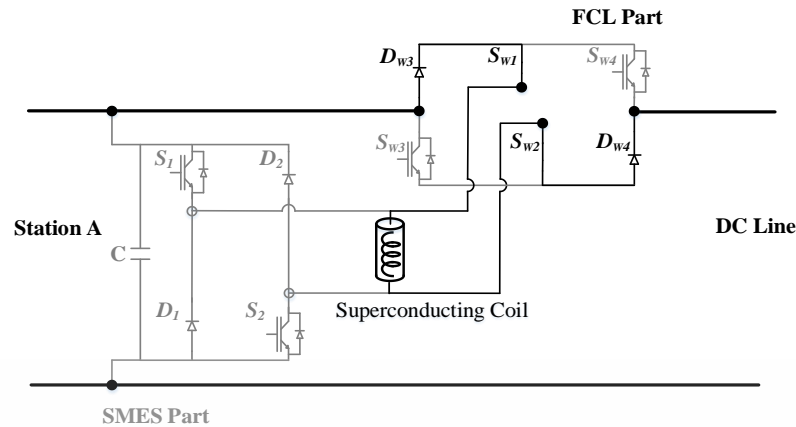
รูปที่ 3.3 การทำงานในสภาวะปกติขณะชาร์จกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 การทำงานในสภาวะปกติขณะดิสชาร์จกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงทิศทางของกระแสของการทำงานในสภาวะปกติหรือการทำงานใน ส่วนของ SMES สวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} จะยังไม่ทำงานแต่สวิตช์ S_{w3} S_{w4} และไดโอด D_{w3} D_{w4} ทำงานปกติเพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลจากสถานี A ไปยังสถานี B ได้ ส่วนในการชาร์จและ ดิสชาร์จกระแสไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลม ซึ่งขณะชาร์จกระแสไฟฟ้า สวิตช์ S_1 และ S_2 จะทำงานเพื่อชาร์จกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดตัวนำยิ่งยวด โดยกระแสไฟฟ้าจะไหล ผ่านสวิตช์ S_1 ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวด และไหลผ่านสวิตช์ S_2 ส่วนขณะดิสชาร์จกระแสไฟฟ้า สวิตช์ S_1 และ S_2 จะหยุดทำงานแต่ไดโอด D_1 และ D_2 จะทำงานแทนเพื่อให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด ดิสชาร์จกระแสไฟฟ้าออกสู่ระบบ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจากไดโอด D_1 ไปยังขดลวดตัวนำ ยิ่งยวดและผ่านไดโอด D_2 ออกสู่ระบบซึ่งการทำงานในส่วนของ SMES ในสภาวะปกติจะช่วยควบคุม การแกว่งของกำลังไฟฟ้าให้ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



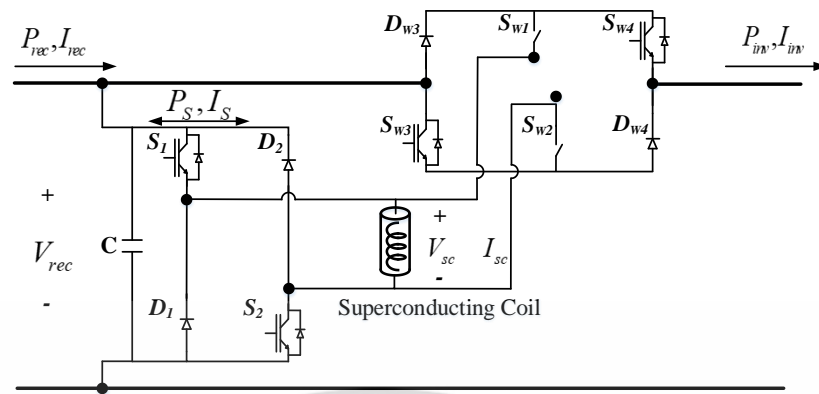
รูปที่ 3.5 การทำงานในสภาวะเกิดความผิดปกติ

รูปที่ 3.5 แสดงการทำงานของวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติหรือการทำงานในส่วนของ FCL โดยเมื่อเกิดความผิดปกติซึ่งดินขึ้นสวิตช์ S_{w3} และ S_{w4} จะหยุดทำงานแล้ว S_{w1} และ S_{w2} จะทำงานแทนเพื่อเชื่อมต่อขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปอนุกรมกับสายส่งดีซี ทำให้กระแสที่ไหลออกจาก สถานี A ไปยังสถานี B ผ่านไดโอด D_{w3} และสวิตช์ S_{w1} ไปยังขดลวดตัวนำยิ่งยวด และไหลผ่านสวิตช์ S_{w2} และไดโอด D_{w4} ซึ่งเมื่อเกิดกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันหรือเกิดกระแสฟลोटต์ผ่านขดลวดตัวนำ ยิ่งยวดจะเปรียบเสมือนเป็นการสร้างอิมพีแดนซ์ขึ้นที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดขึ้นทำให้สามารถลดกระแส ฟลोटต์ลงได้ [33] สามารถสรุปการทำงานของสวิตช์และไดโอดได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การทำงานของสวิตช์สำหรับวงจร SMES-FCL

| สวิตช์ | สภาวะปกติ | | ขณะเกิดความผิดปกติ | |
|----------|--------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | ชาร์จพลังงาน | ดีสชาร์จพลังงาน | ชาร์จพลังงาน | ดีสชาร์จพลังงาน |
| S_1 | on | off | on | off |
| S_2 | on | off | on | off |
| D_1 | off | on | off | on |
| D_2 | off | on | off | on |
| S_{w3} | on | on | off | off |
| S_{w4} | on | on | off | off |
| D_{w3} | on | on | on | on |
| D_{w4} | on | on | on | on |
| S_{w1} | off | off | on | on |
| S_{w2} | off | off | on | on |

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 หลักการทำงานของ SMES-FCL

จากรูปที่ 3.6 กำหนดให้ P_{rec} คือกำลังไฟฟ้าฝั่งสถานี A I_{rec} คือกระแสไฟฟ้าฝั่งสถานี A V_{rec} คือแรงดันไฟฟ้าฝั่งสถานี A P_{inv} คือกำลังไฟฟ้าฝั่งสถานี B I_{inv} คือกระแสไฟฟ้าฝั่งสถานี B P_S คือกำลังไฟฟ้าของ SMES-FCL I_S คือกระแสไฟฟ้าของ SMES-FCL จากการอธิบายวงจรและหลักการทำงานของ SMES-FCL นั้นสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

เมื่อไม่คิดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าที่ออกจากฝั่งสถานี A ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ออกจากฝั่งสถานี A หาได้จากสมการที่ 3.1

$$P_{rec} = V_{rec} I_{rec} \quad (3.1)$$

ในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าทำโดยการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ออกจากสถานี A ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่สถานีแปลง B หาได้จากสมการ 3.2

$$P_{inv} = P_{rec} + P_S \quad (3.2)$$

เมื่อกำหนดให้ กำลังไฟฟ้า P_S มีค่าเป็นบวกเมื่อ SMES-FCL ดิสชาร์จกำลังไฟฟ้า และมีค่าเป็นลบเมื่อ ชาร์จกำลังไฟฟ้า และสามารถหากำลังไฟฟ้าของ SMES-FCL ได้จากสมการ 3.3

$$P_S = V_{rec} I_S \quad (3.3)$$

แทนสมการที่ 3.3 ลงในสมการที่ 3.2 จะได้สมการที่ 3.4

$$P_{inv} = P_{rec} + V_{rec} I_S \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าการควบคุมกระแสไฟฟ้า I_S ที่ไหลเข้าหรือไหลออกจาก SMES-FCL จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จะส่งไปยังสถานี B ทำให้สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นวงจรคอนเวอร์เตอร์ของ SMES-FCL จะทำหน้าที่ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าผ่านการควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป

ในส่วนของการจำกัดกระแสฟลด์ด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถอธิบายด้วยสมการการหาค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ 3.5

$$Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (3.5)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดหาได้จากสมการที่ 3.6

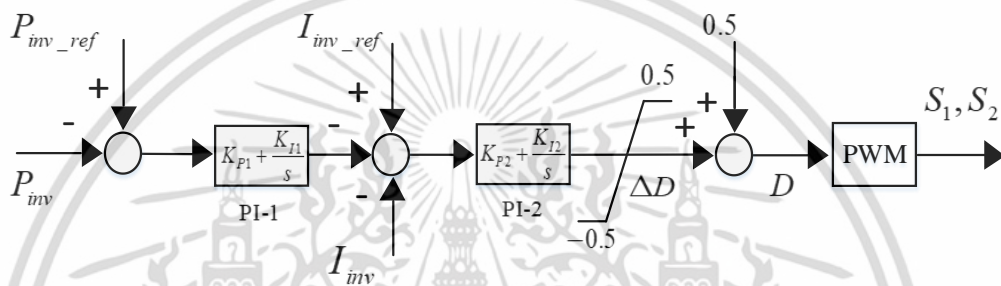
$$V_{SC} = L_{SC} \frac{dI_{SC}}{dt} \quad (3.6)$$

กำหนดให้ Z_{SC} คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Ω) V_{SC} คือแรงดันตกคร่อมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (V) I_{SC} คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (A) และ L_{SC} คือความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H) ตามอุดมคติการไหลของกระแสไฟฟ้าดีซีเมื่อไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันเทอมอนุพันธ์ของกระแส ในสมการที่ 3.6 จะมีค่าเป็นศูนย์ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นศูนย์ซึ่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ในสมการที่ 3.5 เป็นศูนย์เช่นกัน ในทางกลับกันหากกระแสไฟฟ้าเกิดการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดเทอมอนุพันธ์ของกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอิมพีแดนซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบเมื่อใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการจำกัดกระแสฟลด์เปรียบเสมือนการเพิ่มอิมพีแดนซ์เข้าไปยังระบบอย่างทันทีทันใดซึ่งจะทำให้ลดกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันได้

3.3 การออกแบบตัวควบคุมและการทำให้เหมาะสม

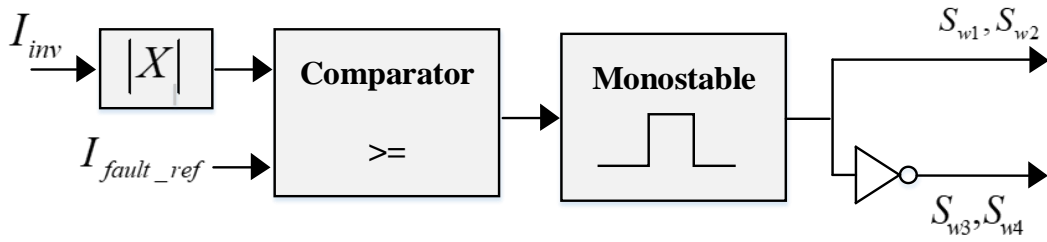
3.3.1 การออกแบบตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์

จากโครงสร้างและการทำงานในหัวข้อ 3.2 สามารถออกแบบตัวควบคุมสำหรับคอนเวอร์เตอร์ของ SMES-FCL โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือตัวควบคุมสำหรับคอนเวอร์เตอร์ในส่วนของ SMES และตัวควบคุมสำหรับคอนเวอร์เตอร์ในส่วนของ FCL ซึ่งอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของตัวควบคุม SMES

รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุม SMES มีจุดประสงค์ในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า จึงทำการวัดสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่ด้านออกของวงจร SMES-FCL ซึ่งมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงสถานะ B P_{inv} มาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง P_{inv_ref} เพื่อใช้เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 1 (PI-1) ผลที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงของกระแส I_{inv_ref} เป็นผลต่างของกระแสจากนั้นนำไปลบออกจากสัญญาณของกระแสที่วัดได้จากด้านออกของอุปกรณ์ SMES-FCL ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าจริงสถานะเปลี่ยนแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ I_{inv} เพื่อใช้เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอที่ 2 (PI-2) ผลที่ได้คือค่าการเปลี่ยนแปลงของดิวตี้ไซเคิล ΔD จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าดิวตี้ไซเคิลอ้างอิงที่ 0.5 ได้เป็นค่าดิวตี้ไซเคิล D นำไปสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมสวิตช์ S_1, S_2 ซึ่งอธิบายค่า D ได้ว่าหากค่า D มากกว่า 0.5 จะเป็นการชาร์จพลังงานเข้าสู่ขดลวดตัวนำยิ่งยวด แต่หากค่า D น้อยกว่า 0.5 จะเป็นการดิสชาร์จพลังงานออกจากขดลวดตัวนำยิ่งยวด



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของตัวควบคุม FCL

รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุม FCL มีจุดประสงค์ในการต่อวงจรเพื่อนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดเข้าไปอนุกรมกับสายส่งดีซีเพื่อจำกัดกระแสฟอลต์เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ โดยในที่นี้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวบ่งบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังต้องการให้กระแสลดลงด้วย จึงใช้สัญญาณกระแสที่วัดจากด้านออกของอุปกรณ์ SMES-FCL ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่สถานี B I_{inv} เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง I_{fault_ref} ที่ตั้งค่าไว้ที่ 1.5 pu. เมื่อค่าสัญญาณ I_{inv} มากกว่าค่าสัญญาณ I_{fault_ref} วงจรโมโนสเตเบิลและจะสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อให้สวิตช์ S_{w1}, S_{w2} ปิดวงจรและสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อให้สวิตช์ S_{w3}, S_{w4} เปิดวงจรซึ่งทำให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถเข้าไปเชื่อมต่อแบบอนุกรมกับสายส่งดีซีได้อย่างอัตโนมัติ โดยมีการดีเลย์สัญญาณเพื่อป้องกันการเกิดความผิดปกติซ้ำซ้อนในระยะเวลาใกล้เคียงกัน

3.3.2 เทคนิคการทำให้เหมาะสมสำหรับขดลวดตัวนำยิ่งยวดและตัวควบคุม

การทำให้เหมาะสมของอุปกรณ์ SMES-FCL ด้วยการหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งเกี่ยวเนื่องกับพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอเพื่อให้การใช้งาน SMES-FCL เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีวัตถุประสงค์ในการทำให้เหมาะสมดังนี้ ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติ ลดขนาดกระแสฟอลต์ขณะเกิดความผิดปกติ และลดขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดใน SMES-FCL อธิบายดังต่อไปนี้

การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าขณะสภาวะการทำงานปกติของขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งทำหน้าที่รักษากำลังไฟฟ้าที่จะส่งไปยังสถานี B P_{inv} ให้สม่ำเสมอ โดยการทำให้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ของการเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าที่สถานีแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ IAE_p มีค่าต่ำที่สุดดังสมการที่ 3.7

$$IAE_p = \int_{t_0}^{t_f} |\Delta P| dt \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ΔP หาจากสมการที่ 3.8

$$\Delta P = P_{inv} - P_{inv_ref} \quad (3.8)$$

กำหนดให้ P_{inv} คือกำลังไฟฟ้าที่สถานี B P_{inv_ref} คือกำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ต้องการ

การลดขนาดกระแสฟอลต์ขณะเกิดความผิดปกติที่บ่งบอกถึงความผิดปกติได้นอกจากกระแสไฟฟ้าแล้ว ยังมีแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีความสะดวกในการวัดดังนั้นจึงใช้เป็นตัวระบุ โดยการทำให้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) ของการเบี่ยงเบนแรงดันที่สถานี A IAE_V มีค่าต่ำที่สุดดังสมการที่ 3.9

$$IAE_V = \int_{t_0}^{t_f} |\Delta V| dt \quad (3.9)$$

โดยที่ ΔV หาจากสมการที่ 3.10

$$\Delta V = V_{rec} - V_{rec_ref} \quad (3.10)$$

กำหนดให้ V_{rec} คือแรงดันไฟฟ้าฝั่งสถานี A V_{rec_ref} คือแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง t_0 คือเวลาเริ่มต้นของการจำลอง (s) t_f คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

การลดขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานที่สะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวด โดยถ้าทำให้พลังงานสะสมในตอนเริ่มต้นต่ำที่สุดโดยที่ยังทำให้อุปกรณ์สามารถเสถียรภาพได้ก็จะทำให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดมีขนาดเล็กลงด้วยเช่นกันดังสมการที่ 3.11

$$E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \quad (3.11)$$

กำหนดให้ E_{SC0} คือพลังงานสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวดเริ่มต้น (J) L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H) I_{SC0} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเริ่มต้น (A)

จากสมการที่ 3.7 3.9 และ 3.11 สามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการทำให้เหมาะสมได้ดังสมการที่ 3.12

$$F = w_1 \bullet IAE_P + w_2 \bullet IAE_V + w_3 \bullet E_{SC0} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมการ 3.12 จะถูกทำให้มีค่าน้อยที่สุดในกระบวนการทำให้เหมาะสม เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ L_{SC} I_{SC0} K_{P1} K_{I1} K_{P2} และ K_{I2} ให้มีความเหมาะสมพร้อมกัน โดยกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ไว้ดังนี้

ขอบเขตของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด L_{SC} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 H

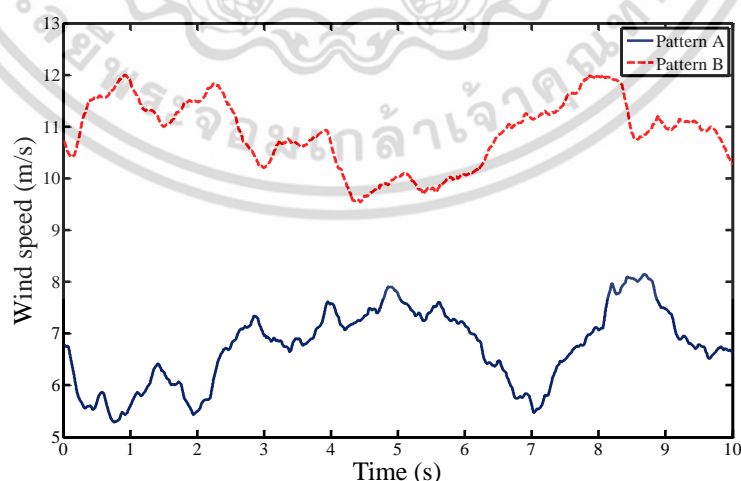
ขอบเขตของค่ากระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด I_{SC0} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 kA

ขอบเขตของค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{P1} K_{I1} K_{P2} และ K_{I2} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 30

ค่าถ่วงน้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำหนดค่าโดย w_1 เท่ากับ 0.4 w_2 เท่ากับ 1 และ w_3 เท่ากับ 0.004 จำนวนอนุภาค 40 อนุภาค จำนวนรอบ 50 รอบ เพื่อหาค่าตอบในกระบวนการทำให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

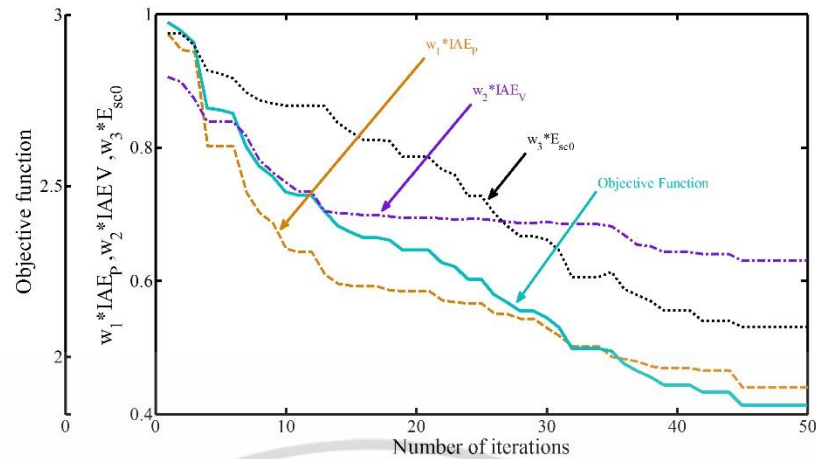
3.4 ผลการจำลอง

การศึกษาในบทนี้จากการออกแบบอุปกรณ์ SMES-FCL ที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งนำไปติดตั้งภายในระบบ HVDC (With optimal SMES-FCL) และหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคภายใต้รูปแบบความเร็วลม A ซึ่งเป็นความเร็วลมที่มีค่าต่ำดังรูปที่ 3.9 และเกิดความผิดพลาดที่สายส่งดีซีลิงดินจุด A เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 5 s ผลลัพธ์แสดงด้วยกราฟเส้นโค้งการลู่เข้าหาค่าตอบของการทำให้เหมาะสม ดังรูปที่ 3.10 เป็นกรณีที่น่าเสนอโดยจะทำการเปรียบเทียบกับระบบ HVDC ที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ (No device) และระบบ HVDC ที่ติดตั้ง SMES-FCL (With non-optimal SMES-FCL) โดยค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ทั้ง กรณี non-optimal SMES และ optimal SMES-FCL ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.9 ความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

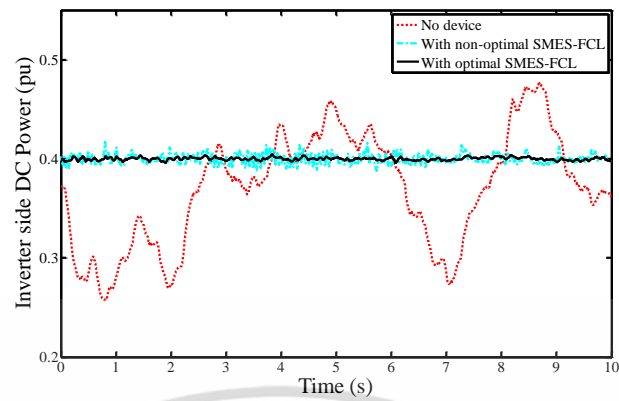


รูปที่ 3.10 เส้นโค้งการลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

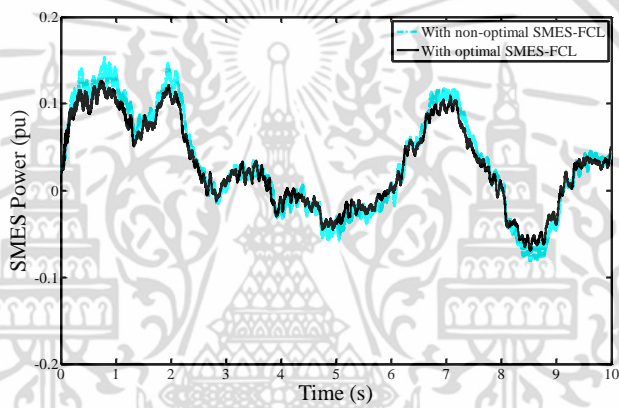
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL สำหรับระบบ HVDC

| พารามิเตอร์ | non-optimal SMES-FCL | optimal SMES-FCL |
|------------------|----------------------|------------------|
| L_{sc} (H) | 7.0 | 6.53 |
| I_{sc0} (kA) | 5.7 | 4.12 |
| E_{sc0} (MJ) | 113.7 | 55.42 |
| K_{P1}, K_{I1} | 0.8, 10 | 1.27, 17.52 |
| K_{P2}, K_{I2} | 1.2, 10 | 5.6, 0.13 |

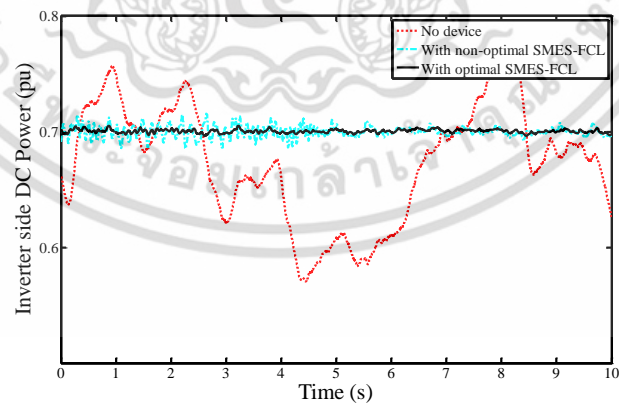
โดยผลการจำลองระบบระบบในสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะแสดงกราฟกำลังไฟฟ้าที่สถานี B ดังรูปที่ 3.11 สำหรับรูปแบบความเร็วลม A (ความเร็วลมต่ำ) โดยรักษา กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.4 pu และรูปที่ 3.13 สำหรับรูปแบบความเร็วลม B (ความเร็วลมสูง) โดยรักษา กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.7 pu และกราฟกำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้สำหรับทั้งสองรูปแบบดังรูปที่ 3.12 และ 3.14 จะเห็นได้ว่า กรณีระบบ HVDC ที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ (No device) นั้นกำลังไฟฟ้า ที่สถานี B ซึ่งจะส่งไปยังระบบไฟฟ้านั้นมีการแกว่ง ส่วนกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL ที่มี ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด นั้นกำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงและมีความสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.11 กำลังไฟฟ้าที่สถานี B (ความเร็วลม A)

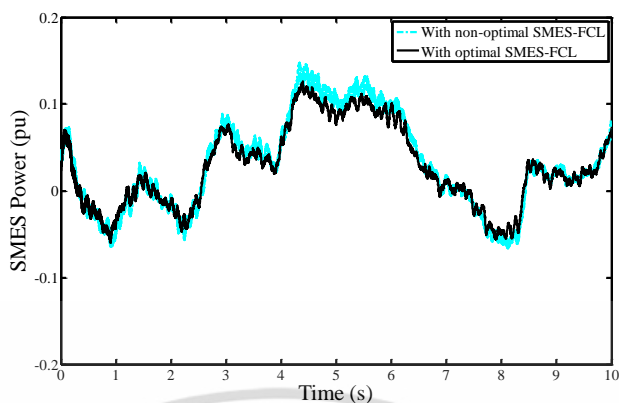


รูปที่ 3.12 กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ (ความเร็วลม A)



รูปที่ 3.13 กำลังไฟฟ้าที่สถานี B (ความเร็วลม B)

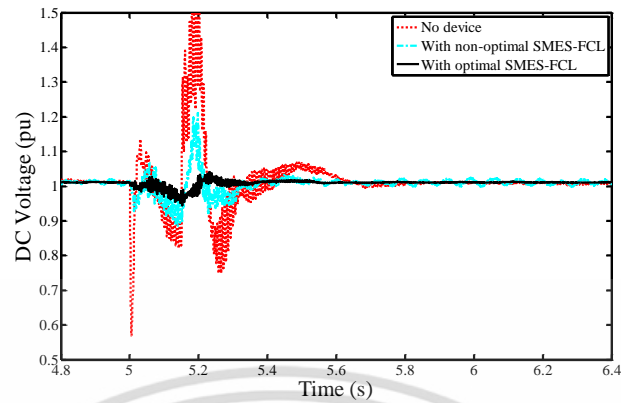
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



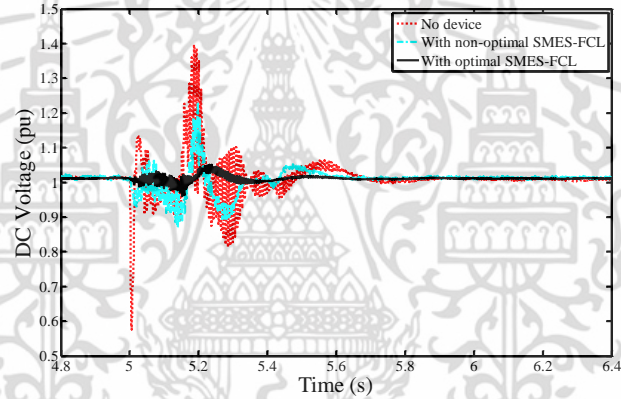
รูปที่ 3.14 กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ (ความเร็วลม B)

การทดสอบในสภาวะเกิดความผิดปกติเมื่อระบบ HVDC เกิดความผิดปกติซึ่งลงดินเป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 5 s ที่จุด A B และ C ภายใต้รูปแบบความเร็วลม A และ B โดยแรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A แสดงในรูปที่ 3.15 ถึง 3.20 จะเห็นได้ว่าขณะที่เกิดความผิดปกติ กรณีที่ No device เกิดแรงดันตกและมีการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าดีซีซึ่งเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ภายในระบบได้ ส่วนกรณี With non-optimal SMES-FCL เกิดแรงดันตกที่น้อยลงแต่ยังมีการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าดีซี และกรณี With optimal SMES-FCL นั้นเกิดแรงดันตกที่น้อยมากและการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าดีซีที่น้อยลงมากอีกด้วย

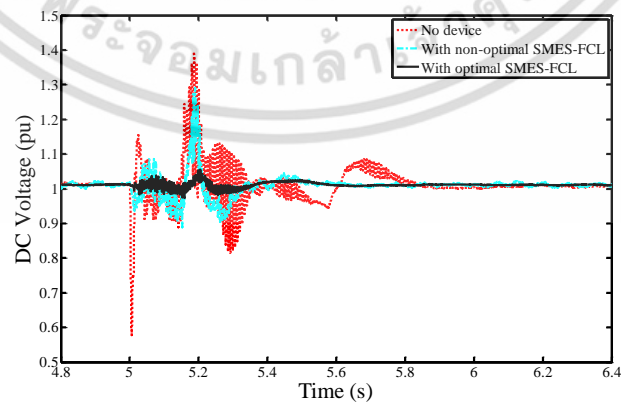
ส่วนกระแสไฟฟ้าดีซีสถานี A แสดงในรูปที่ 3.21 ถึง 3.26 จะเห็นได้ว่าขณะที่เกิดความผิดปกติ กรณี No device จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าสูงซึ่งเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ภายในระบบ กรณี With non-optimal SMES-FCL กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นถูกจำกัดโดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งมีค่าลดลง ส่วนกรณี With optimal SMES-FCL นั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นถูกจำกัดโดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งมีค่าลดลงมากที่สุด จากการเกิดความผิดปกติซึ่งทั้ง 3 จุดจะเห็นได้ว่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่จุด A มีความรุนแรงของกระแสไฟฟ้ามากที่สุดแต่ตำแหน่ง C เกิดการแกว่งและใช้เวลานานที่สุดในการกลับเข้าสู่สภาวะปกติ



รูปที่ 3.15 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด A)

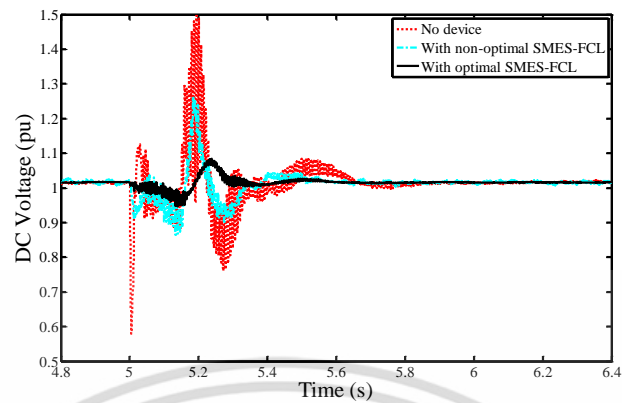


รูปที่ 3.16 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด B)

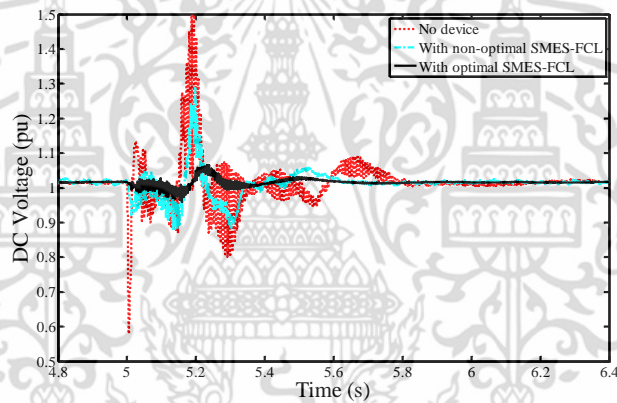


รูปที่ 3.17 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด C)

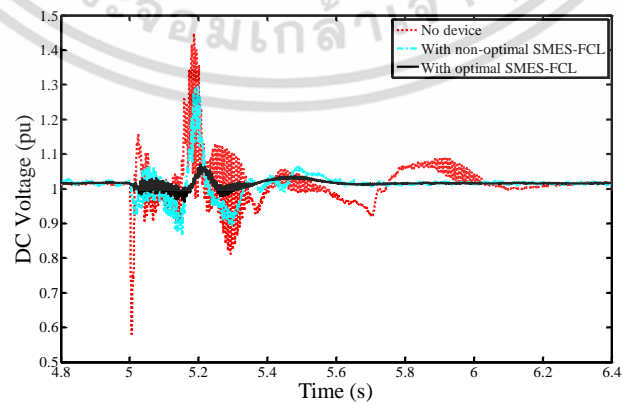
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม B และ ความผิดปกติจุด A)



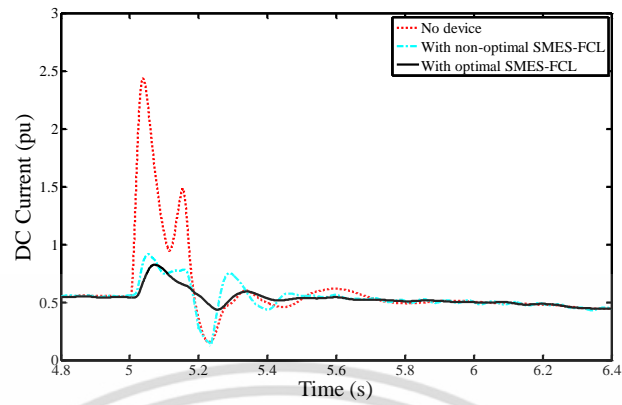
รูปที่ 3.19 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม B และ ความผิดปกติจุด B)



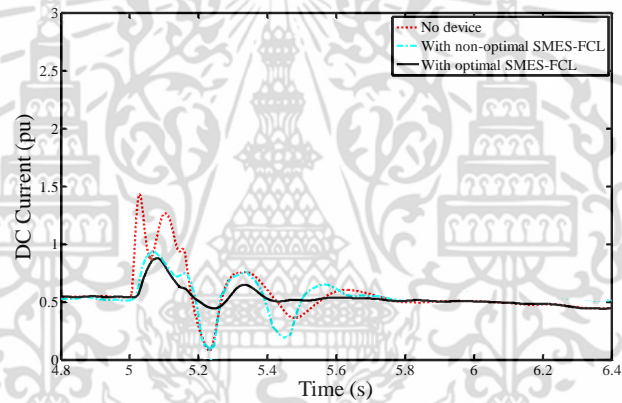
รูปที่ 3.20 แรงดันไฟฟ้าดีซีที่สถานี A

(ความเร็วลม B และ ความผิดปกติจุด C)

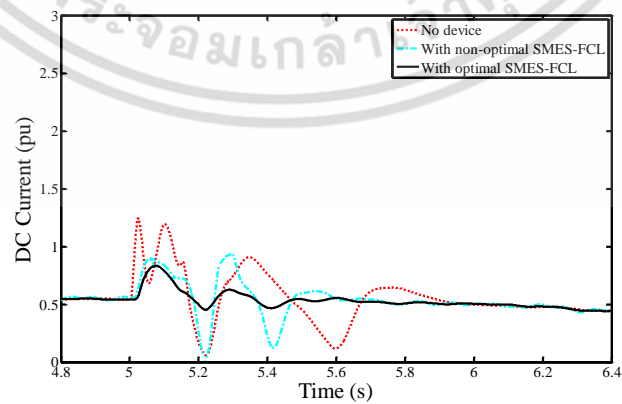
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด A)

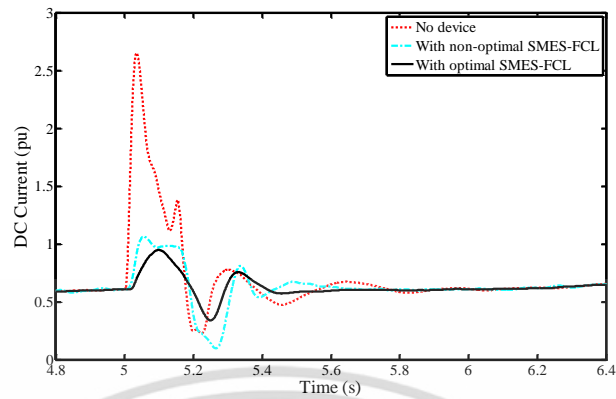


รูปที่ 3.22 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด B)

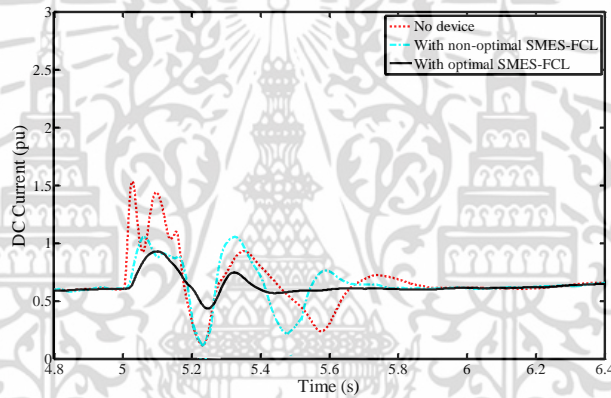


รูปที่ 3.23 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม A และ ความผิดพลาดที่จุด C)

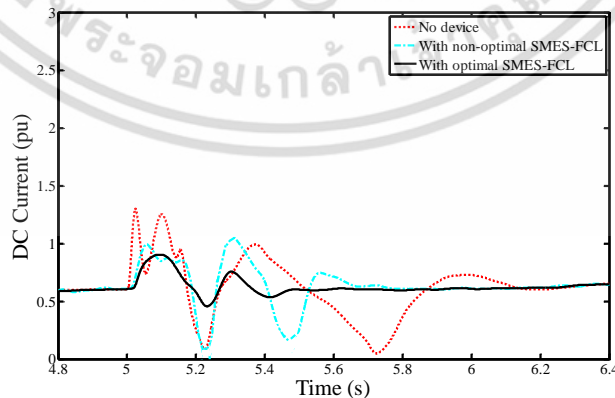
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม B และ ความผิดปกติจุด A)



รูปที่ 3.25 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม B และ ความผิดปกติจุด B)



รูปที่ 3.26 กระแสไฟฟ้าดีซีที่สถานี A
(ความเร็วลม B และ ความผิดปกติจุด C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 กำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการทำเสถียรภาพสำหรับระบบ HVDC

| | non-optimal SMES-FCL | optimal SMES-FCL |
|----------|----------------------|------------------|
| P (MW) | 14 | 12.0 |
| E (MJ) | 117.3 | 99.5 |

ตารางที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานกรณี non-optimal SMES-FCL และกรณี optimal SMES-FCL ที่ใช้ในการทำเสถียรภาพจะเห็นได้ว่า กรณี optimal SMES-FCL นอกจากสามารถทำเสถียรภาพได้ดีกว่าแล้วยังใช้ทั้งกำลังไฟฟ้าและพลังงานน้อยกว่า

3.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรและการควบคุมโดยใช้ชุดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์ SMES-FCL สำหรับติดตั้งในระบบ HVDC เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและจำกัดกระแสฟลด์เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น โดยแบ่งโครงสร้างและการควบคุมเป็น 2 ส่วน คือส่วน SMES และส่วน FCL ที่ใช้ชุดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกัน อีกทั้งยังใช้วิธีการทำให้เหมาะสมสำหรับหาค่าพารามิเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า optimal SMES-FCL สามารถทำงานในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าทั้งในช่วงที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงและในช่วงที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าต่ำและสามารถจำกัดกระแสฟลด์ได้ดี อีกทั้งยังส่งผลช่วยให้การแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดความผิดปกติด้วย นอกจากนี้เมื่อเทียบการทำงานกับ non-optimal SMES-FCL เห็นได้ว่า optimal SMES-FCL สามารถทำงานได้ดีกว่าทุกประการแล้วยังใช้ขนาดชุดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เล็กกว่าอีกด้วย



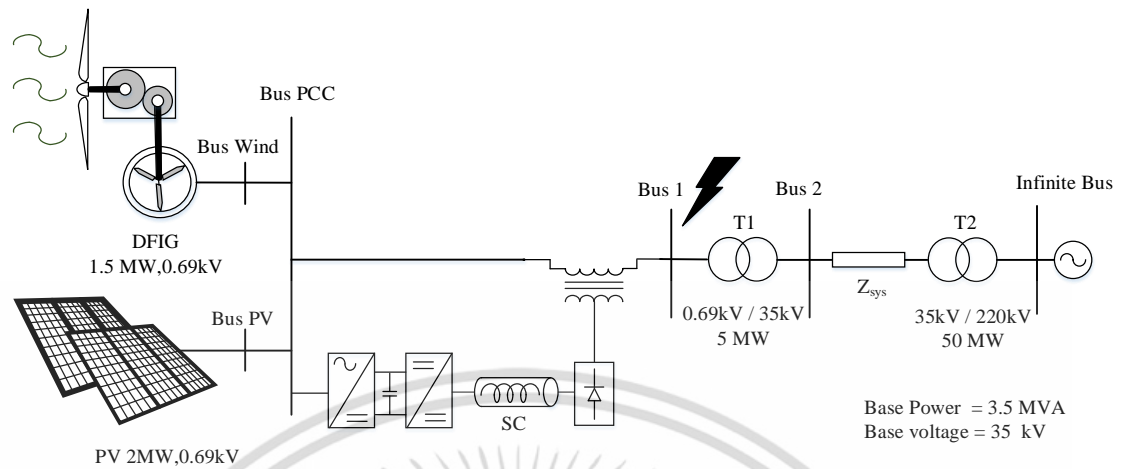
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งในระบบไฟฟ้าที่มี ฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลมเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้าม ผ่านความผิดปกติ

ในบทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันจำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Energy Storage with Fault Current Limiting: SMES-FCL) และระบบควบคุม สำหรับติดตั้งในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลมเชื่อมต่อกันอยู่ เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลม และปัญหาการข้ามผ่านความผิดปกติ โดยในสภาวะปกติขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแบบยิ่งยวด (superconducting magnetic energy storage: SMES) ในการชาร์จและดิสชาร์จเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสฟอลต์ (Superconducting Fault Current Limiter: SFCL) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพชั่วคราวและความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติของทั้งฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลมที่เชื่อมต่อกันอยู่ อีกทั้งค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับตัวควบคุมถูกหาด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค ผลการจำลองแสดงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ SMES-FCL ในการรักษาเสถียรภาพเทียบกับ SMES ที่ถูกทำให้เหมาะสมด้วยวิธีเดียวกันและติดตั้งที่จุดเดียวกันในระบบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

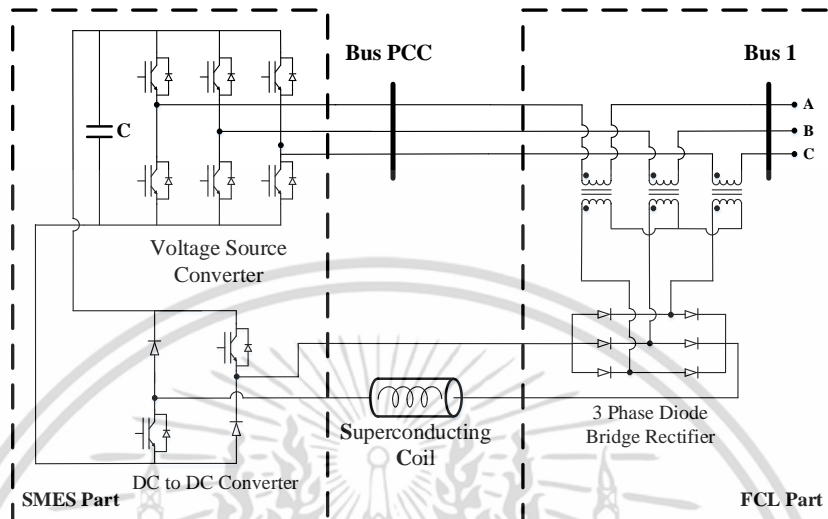
4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้ง SMES-FCL

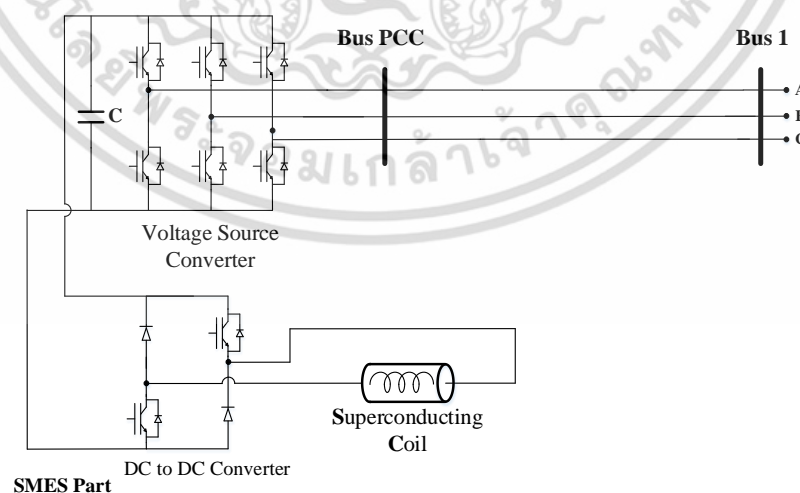
รูปที่ 4.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL ซึ่งประกอบด้วยฟาร์มโซลาร์ ขนาด 2 MW 0.69 kV และฟาร์มกังหันลมชนิด DFIG ขนาด 1.5 MW 0.69 kV ต่อรวมกันที่บัส PCC เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าสู่ระบบไฟฟ้าภาคแรงดัน 220 kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า T1 T2 และสายส่งยาว 30 km โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 สภาวะ คือสภาวะปกติฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลม ผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอให้กับระบบเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นกับสภาพแวดล้อม ขณะนั้น (ความเร็วลมและความเข้มแสง) ซึ่งทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบต่ำลง และสภาวะเกิดความผิดปกติทำให้เกิดกระแสที่สูงขึ้นและแรงดันที่ตกลงซึ่งส่งผลกระทบต่อฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมทำให้ต้องตัดการเชื่อมต่อหากแรงดันไฟฟ้าที่บัส Wind และบัส PV ต่ำกว่ามาตรฐานกริด โค้ด [6] โดยฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมต้องทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ต่ออยู่ตกลงเหลือ 25 % ของแรงดันไฟฟ้าปกติ เป็นเวลา 750 ms เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าวจึงติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL เข้าไป ระหว่างบัส PCC และบัส 1 เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติและเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติขณะเกิดความผิดปกติ

4.2 โครงสร้างวงจรและการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับระบบ AC



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของวงจร SMES-FCL

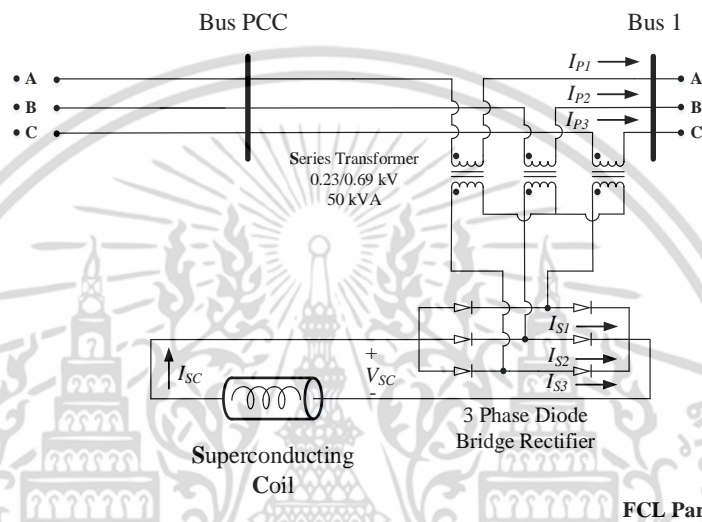
รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างวงจรของขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการทำเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแบบยิ่งยวดที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแสฟลัด SMES-FCL โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงาน (SMES Part) และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ในการจำกัดกระแสฟลัด (FCL Part) โดยใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกัน



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของวงจร SMES-FCL ส่วนวงจร SMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของวงจร SMES-FCL ในส่วนวงจร SMES ซึ่งประกอบด้วย ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) มีหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน วงจรดีซีทูดิซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) มีหน้าที่ควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด ตัวเก็บประจุ (C) ที่หน้าที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรดีซีทูดิซีคอนเวอร์เตอร์และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter: VSC) มีหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันดีซีที่จุดเชื่อมต่อตรงตัวเก็บประจุ [34]



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของวงจร SMES-FCL ในส่วนวงจร FCL

รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างของวงจร SMES-FCL ในส่วนวงจร FCL ซึ่งประกอบด้วย ขดลวดตัวนำยิ่งยวดทำหน้าที่ในการจำกัดกระแสฟลัดต์เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์ (3 Phase Diode Bridge Rectifier) ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงซึ่งจะไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด หม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series Transformer) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าโดยด้านปฐมภูมิต่อกับระบบไฟฟ้าโดยตรงส่วนด้านทุติยภูมิ ต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์

เมื่อกำหนดให้กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิในแต่ละเฟส คือ I_{P1} , I_{P2} และ I_{P3} และกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิในแต่ละเฟส คือ I_{S1} , I_{S2} และ I_{S3} และกำหนดให้อัตราส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าคือ a สามารถเขียนสมการอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{I_{P1}}{I_{S1}} = \frac{I_{P2}}{I_{S2}} = \frac{I_{P3}}{I_{S3}} = \frac{1}{a} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (I_{SC}) สามารถหาได้จาก

$$I_{SC} = \sqrt{2}I_S = a\sqrt{2}I_P \quad (4.2)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V_{SC}) สามารถหาได้จาก

$$V_{SC} = L_{SC} \frac{dI_{SC}}{dt} \quad (4.3)$$

อิมพีแดนซ์ (Z_{SC}) สามารถหาได้จาก

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

จากสมการที่ 4.2 4.3 และ 4.4 ถ้าระบบไฟฟ้าที่สภาวะปกติกระแสไฟฟ้า I_{SC} ที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะมีค่าคงที่ ทำให้ dI_{SC}/dt มีค่าใกล้เคียงศูนย์ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด V_{SC} มีค่าน้อยมาก แต่ถ้าเกิดความผิดปกติขึ้นกระแสไฟฟ้า I_{SC} ที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้แรงดันตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด V_{SC} มีค่าสูงขึ้นอย่างทันทีทันใดเปรียบเสมือนทำให้เกิดอิมพีแดนซ์ขึ้นด้วย

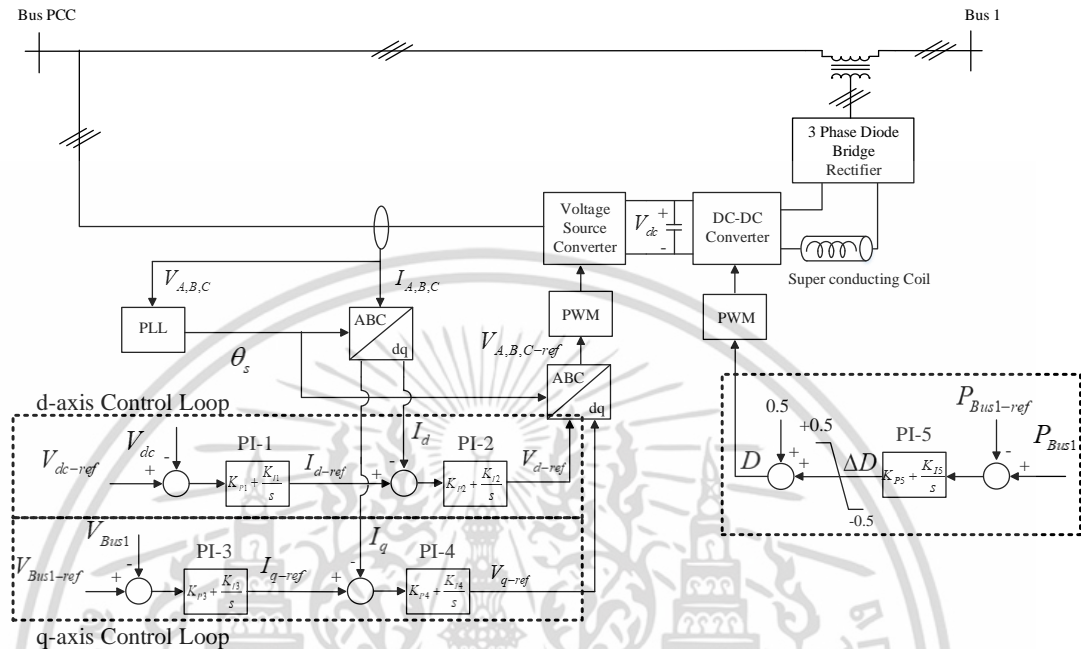
เมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุกรม สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.5) และกำหนดให้ V_P คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (V)

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

จะเห็นได้ว่าการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในส่วนของวงจร FCL จะจำกัดกระแสฟลตในระบบที่เกิดขึ้นอย่างอัตโนมัติ

4.3 การออกแบบตัวควบคุมและการทำให้เหมาะสม

4.3.1 การออกแบบตัวควบคุมของขดลวดตัวนำยิ่งยวด



รูปที่ 4.5 โครงสร้างตัวควบคุมของวงจร SMES-FCL

รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมของ SMES-FCL โดยแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter: VSC) และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมวงจรดีซีฟิวตีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) โดยใช้สัญญาณแรงดันสามเฟส ($V_{A,B,C}$) เป็นสัญญาณเข้าสำหรับเฟสล็อกลูป (Phase Lock Loop: PLL) ผลที่ได้คือมุม θ_s ซึ่งนำไปใช้ในการแปลงกระแสสามเฟส ($I_{A,B,C}$) ให้เป็นกระแสที่อยู่ในแกน d และแกน q (I_d, I_q) ซึ่งนำไปใช้ต่อไป

โดยการควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันแบ่งการควบคุมย่อยเป็น 2 ส่วน คือการควบคุมในแนวแกน d (d-axis Control Loop) ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซี (V_{dc}) และการควบคุมในแนวแกน q ทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันที่บัส 1 ในส่วนการควบคุมในแนวแกน d จะใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าดีซี (V_{dc}) เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าดีซีอ้างอิง (V_{dc-ref}) เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอ ตัวที่ 1 (PI-1) ผลที่ได้คือสัญญาณอ้างอิงของกระแสในแนวแกน d (I_{d-ref}) นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสในแนวแกน d ผลต่างจะที่ได้เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 2 (PI-2) ผลที่ได้คือสัญญาณแรงดันอ้างอิงในแนวแกน d (V_{d-ref}) ส่วนการควบคุมใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน q (q-axis Control Loop) ใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 (V_{Bus1}) เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันอ้างอิง ($V_{Bus1-ref}$) เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 3 (PI-3) ผลที่ได้คือสัญญาณอ้างอิงของกระแสในแนวแกน q (I_{q-ref}) นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสในแนวแกน q ผลต่างจะที่ได้เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 4 (PI-2) ผลที่ได้คือสัญญาณแรงดันอ้างอิงในแนวแกน q (V_{q-ref}) ซึ่งสัญญาณแรงดันอ้างอิงในแนวแกน d และ สัญญาณแรงดันอ้างอิงในแนวแกน q จะแปลงกลับเป็นสัญญาณแรงดันอ้างอิงสามเฟส ($V_{A,B,C-ref}$) เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณขับเกทของสวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันด้วยวิธีพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse width modulation: PWM)

ส่วนการควบคุมวงจรถิซิทรีคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่บัส 1 โดยการชาร์จหรือดิสชาร์จพลังงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวด โดยใช้สัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1 (P_{Bus1}) เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ($P_{Bus1-ref}$) เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 5 (PI-5) ผลที่ได้คือค่าการเปลี่ยนแปลงของดิวตี้ไซเคิล (ΔD) นำมาเปรียบเทียบกับค่าดิวตี้ไซเคิลอ้างอิงที่ 0.5 ได้เป็นค่าดิวตี้ไซเคิล (D) โดยที่ค่าดิวตี้มากกว่า 0.5 จะเป็นการชาร์จพลังงานให้กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด หากค่าดิวตี้น้อยกว่า 0.5 จะเป็นการดิสชาร์จพลังงานให้กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด

4.3.2 การออกแบบขดลวดตัวนำยิ่งยวดและตัวควบคุมด้วยวิธีการทำให้เหมาะสม

การทำให้เหมาะสมของอุปกรณ์ SMES-FCL ด้วยการหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งเกี่ยวเนื่องกับพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอเพื่อให้การใช้งาน SMES-FCL เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีวัตถุประสงค์ในการทำให้เหมาะสมดังนี้ ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติ ลดขนาดของกระแสฟลัดเพื่อข้ามผ่านความผิดพลาด และลดขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ใช้

การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าขณะสภาวะการทำงานปกติของขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งทำหน้าที่รักษากำลังไฟฟ้าที่บัส 1 (P_{Bus1}) ให้คงที่ โดยการทำให้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ของการเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าที่สถานีแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ IAE_P มีค่าต่ำที่สุดดังสมการที่ 4.6

$$IAE_P = \int_{t_0}^{t_f} |P_{Bus1} - P_{Bus1-ref}| dt \quad (4.6)$$

กำหนดให้ P_{Bus1} คือกำลังไฟฟ้าที่บัส 1 $P_{Bus1-ref}$ คือกำลังไฟฟ้าอ้างอิง t_0 คือเวลาเริ่มต้น

ของการจำลอง (s) t_f คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดขนาดกระแสฟอลต์ขณะเกิดความผิดปกตินอกจากกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นแล้วแล้วยังมีการตกของแรงดันไฟฟ้าด้วยซึ่งที่มีกริดโค้ดกำหนดช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับได้อยู่ตั้งนั้นเพื่อป้องกันการตัดการเชื่อมต่อและเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติของฟาร์มโซล่าและฟาร์มกังหันลม ดังนั้นจึงต้องการทำให้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) ของการเบี่ยงเบนแรงดันที่บัส 1 IAE_V มีค่าต่ำที่สุดดังสมการที่ 3.9

$$IAE_V = \int_{t_0}^{t_f} |V_{Bus1} - V_{Bus1-ref}| dt \quad (4.7)$$

กำหนดให้ V_{PV} คือแรงดันไฟฟ้าที่บัส PV V_{PV-ref} คือแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง t_0 คือเวลาเริ่มต้นของการจำลอง (s) t_f คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

การลดขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานที่สะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวดโดยถ้าทำให้พลังงานสะสมในตอนเริ่มต้นต่ำที่สุดโดยที่ยังทำให้อุปกรณ์สามารถเสถียรภาพได้ก็จะทำให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดมีขนาดเล็กลงด้วยเช่นกันดังสมการที่ 4.8

$$E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \quad (4.8)$$

กำหนดให้ E_{SC0} คือพลังงานสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวดเริ่มต้น (J) L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H) I_{SC0} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเริ่มต้น (A)

จากสมการที่ 4.6 4.7 และ 4.8 สามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) F สำหรับการทำให้เหมาะสมได้ดังสมการที่ 4.9

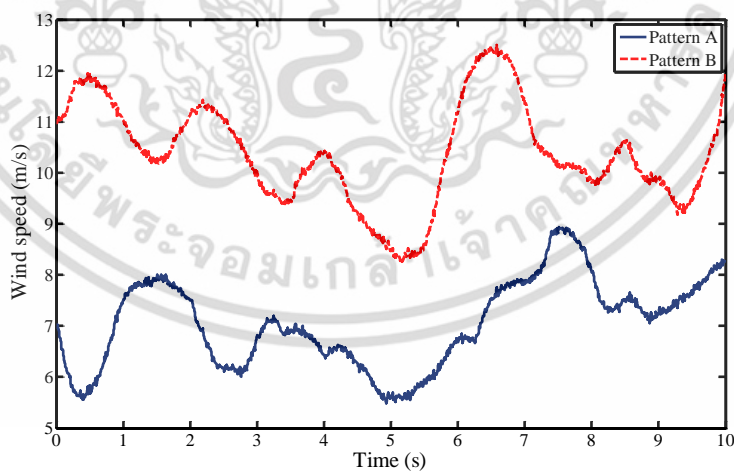
$$F = w_1 \bullet IAE_P + w_2 \bullet IAE_V + w_3 \bullet E_{SC0} \quad (4.9)$$

โดยในกระบวนการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคจะค้นหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด L_{SC} ค่ากระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด I_{SC0} ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ดังนี้ $K_{P1}, K_{P2}, \dots, K_{P5}$ และ $K_{I1}, K_{I2}, \dots, K_{I5}$ ที่เหมาะสมที่ทำให้ สมการที่ 4.9 มีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำหนดค่าโดย w_1 เท่ากับ 0.1 w_2 เท่ากับ 1 และ w_3 เท่ากับ 0.002 จำนวนอนุภาค 40 อนุภาค จำนวนรอบ 50 รอบ และขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ดังนี้

ขอบเขตของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด L_{SC} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 H
 ขอบเขตของค่ากระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด I_{SC0} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 kA
 ขอบเขตของค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ $K_{P1}, K_{P2}, \dots, K_{P5}$ อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 30
 ขอบเขตของค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ $K_{I1}, K_{I2}, \dots, K_{I5}$ อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 30

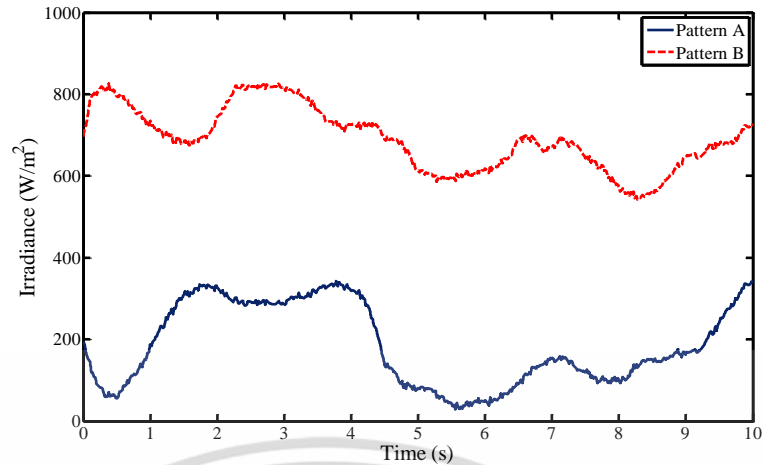
4.4 ผลการจำลอง

การศึกษาในบทนี้จากการออกแบบ SMES-FCL ที่กล่าวมาข้างต้นนำไปติดตั้งระหว่างบัส PCC กับบัส 1 ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลม (With SMES-FCL) เป็นกรณีที่น่าเสนอโดยจะทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการติดอุปกรณ์ (No device) และระบบที่ติดตั้ง SMES แบบปกติ (With SMES) ที่ติดตั้งที่จุดเดียวกันถูกทำให้เหมาะสมด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวกัน และเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystem จากการทำให้เหมาะสมในหัวข้อ 4.3.2 ภายใต้รูปแบบความเร็วลมและความเข้มแสง A ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ เกิดความผิดปกติที่บัส 1 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 3 s ผลลัพธ์แสดงด้วยกราฟเส้นโค้งการลู่เข้าหาค่าตอบของการทำให้เหมาะสม ดังรูปที่ 4.8 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ถูกทำให้เหมาะสมแล้วของอุปกรณ์ทั้ง กรณี SMES และ SMES-FCL ดังตารางที่ 4.1

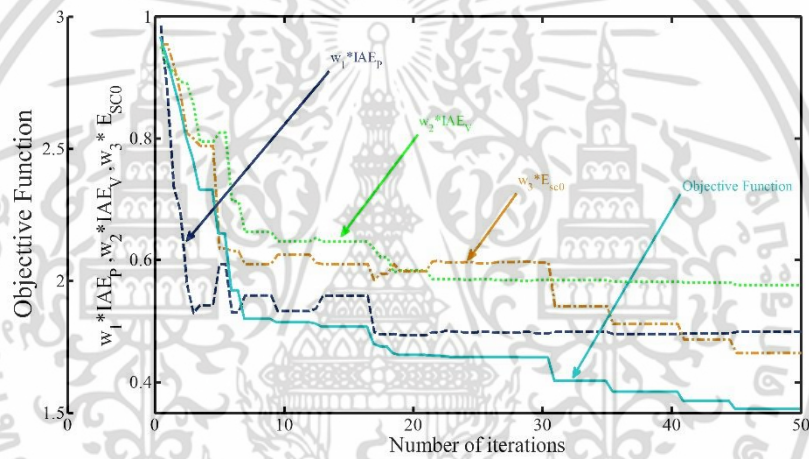


รูปที่ 4.6 ความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความเข้มแสง



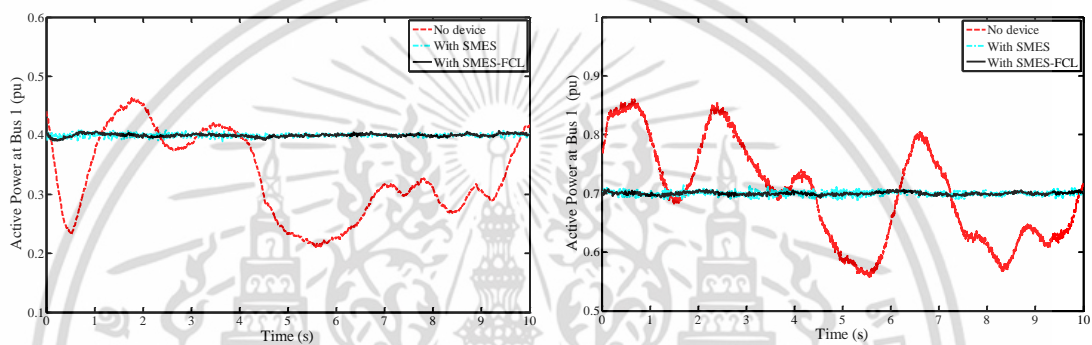
รูปที่ 4.8 เส้นโค้งการลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของ SMES และ SMES-FCL

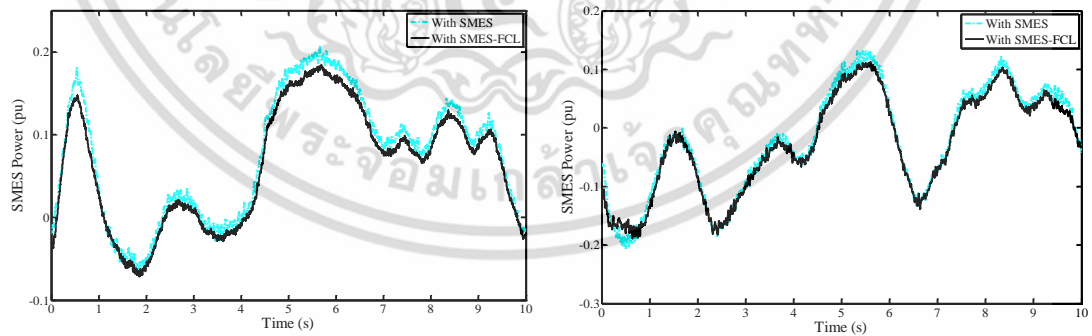
| พารามิเตอร์ | SMES | SMES-FCL |
|------------------|------------|--------------|
| L_{sc} (H) | 5.46 | 3.97 |
| I_{sc0} (kA) | 2.21 | 1.89 |
| E_{SC0} (MJ) | 13.33 | 7.09 |
| K_{P1}, K_{I1} | 5.793 7.77 | 16.18, 8.78 |
| K_{P2}, K_{I2} | 8.13 18.66 | 19.21, 22.52 |
| K_{P3}, K_{I3} | 4.42 18.76 | 1.99, 15.75 |
| K_{P4}, K_{I4} | 5.47 7.12 | 26.31, 14.41 |
| K_{P5}, K_{I5} | 1.66 27.37 | 0.82, 15.39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลการจำลองในสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะแสดงกราฟ กำลังไฟฟ้าที่บัส 1 ดังรูปที่ 4.9 (ก) สำหรับรูปแบบความเร็วลมและความเข้มแสง A โดยรักษา กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.4 pu และรูปที่ 4.9 (ข) สำหรับรูปแบบความเร็วลมและความเข้มแสง B โดยรักษา กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.7 pu และกราฟกำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ดังรูปที่ 4.10 (ก) และ 4.10 (ข) สำหรับความเร็วลมและความเข้มแสง A และ B ตามลำดับ จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า กรณีที่ไม่ได้ ติดตั้งอุปกรณ์ (No device) กำลังไฟฟ้าที่บัส 1 ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลม ผลิตออกมามีการแกว่งอย่างมาก ส่วนกรณีติดตั้ง SMES แบบปกติ (With SMES) และกรณีที่ติดตั้ง SMES-FCL (With SMES-FCL) กำลังไฟฟ้าจะแกว่งน้อยลงมากและอยู่ในระดับที่กำหนดไว้



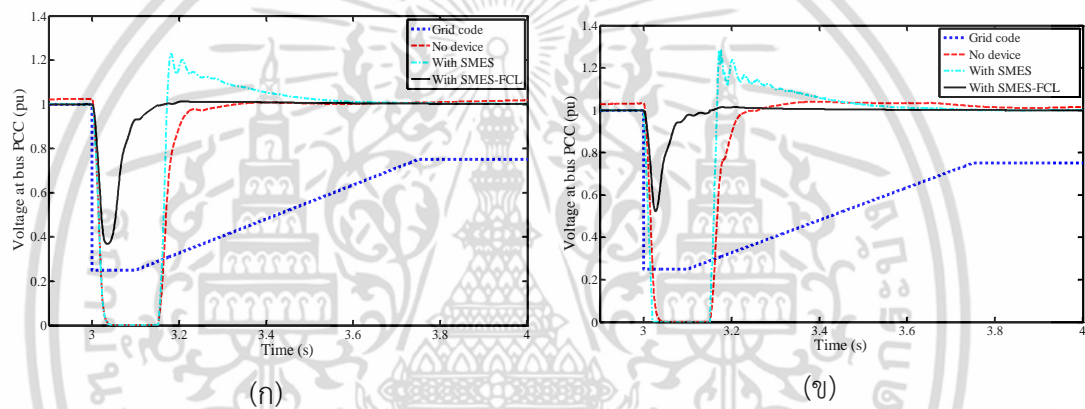
(ก) (ข)
รูปที่ 4.9 กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1 (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B



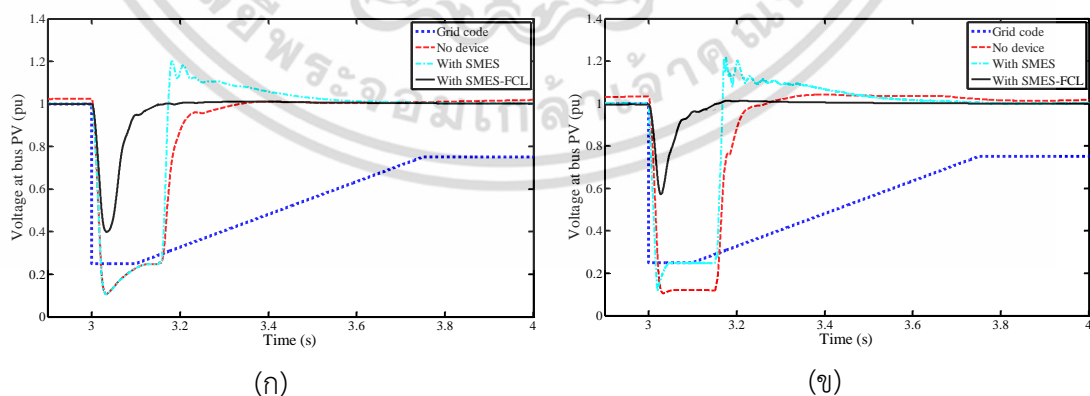
(ก) (ข)
รูปที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบในสภาวะเกิดความผิดปกติเมื่อเกิดความผิดปกติ 3 เฟส ชั้นที่บัส 1 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 3 s ภายใต้ความเร็วลมและความเข้มแสง A และ B โดยในรูปที่ 4.11-4.13 แสดงกราฟแรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC บัส PV และบัส Wind เทียบกับกริดโค้ดตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส PV และบัส Wind สำหรับกรณี ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ (No device) และกรณีที่ติดตั้ง SMES แบบปกติ (With SMES) ตกลงอย่างมากและต่ำกว่าค่าที่กริดโค้ด [6] กำหนดคือต้องสามารถทนต่อสภาวะแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ต่ออยู่ตกลงเหลือ 25 % ของแรงดันไฟฟ้าปกติ เป็นเวลา 750 ms ทำให้ทั้ง 2 กรณีนี้ไม่สามารถข้ามผ่านความผิดปกติได้ ส่วนในกรณีที่ติดตั้ง SMES-FCL (With SMES-FCL) นั้นการตกของแรงดันยังอยู่ในช่วงที่กริดโค้ดกำหนดซึ่งสามารถข้ามผ่านความผิดปกติที่เกิดขึ้นนี้ได้

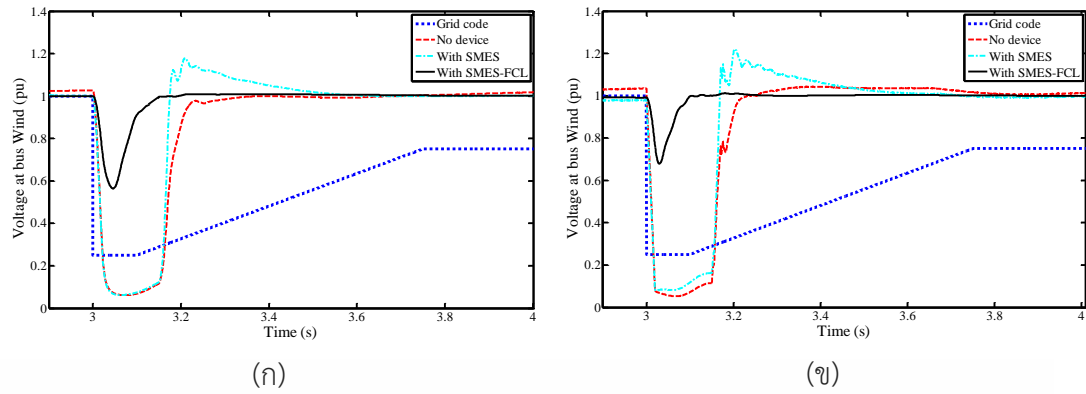


รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B



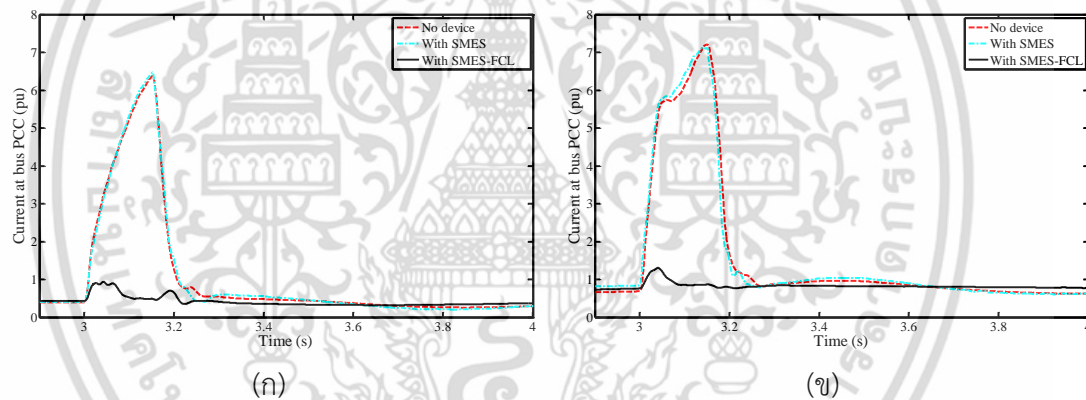
รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

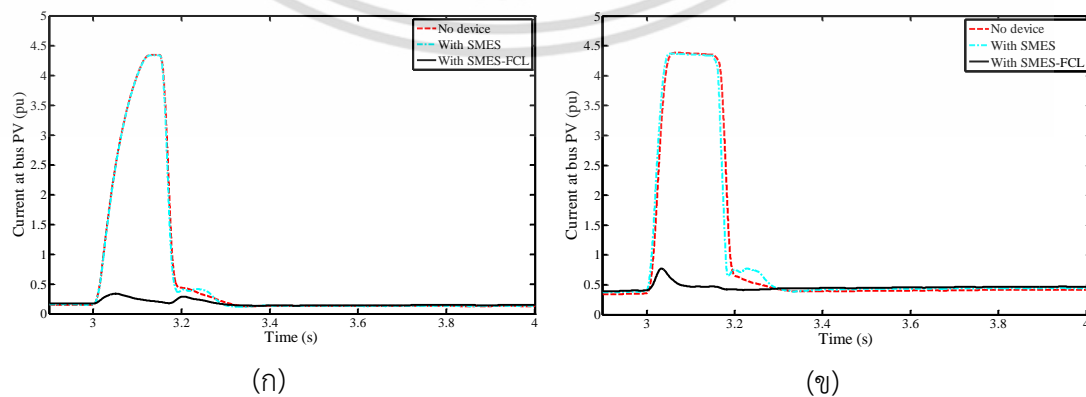


รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัส Wind (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

ในรูปที่ 4.14 -4.16 แสดงกราฟกระแสไฟฟ้าที่บัส PCC บัส PV และบัส Wind กรณีที่ติดตั้ง SMES-FCL สามารถลดกระแสฟอลต์ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งต่างกับอีก 2 กรณีที่ติดตั้ง SMES ที่เกิดกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมาก

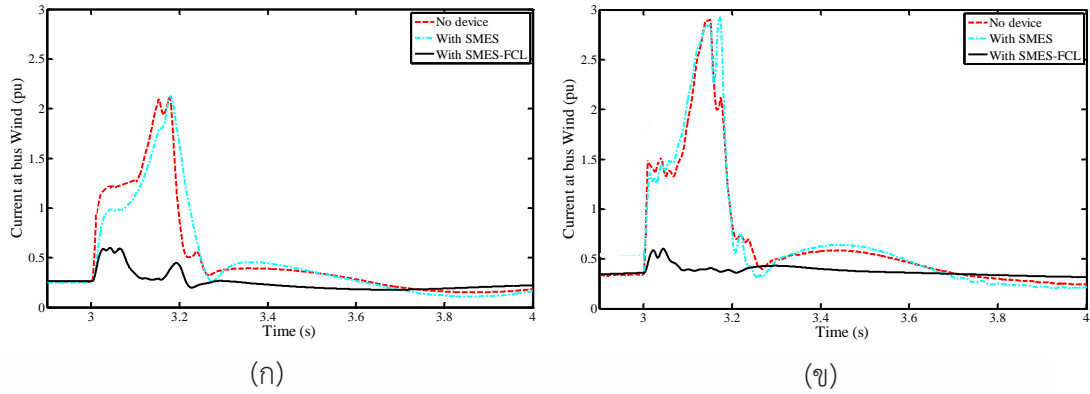


รูปที่ 4.14 กระแสไฟฟ้าที่บัส PCC (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B



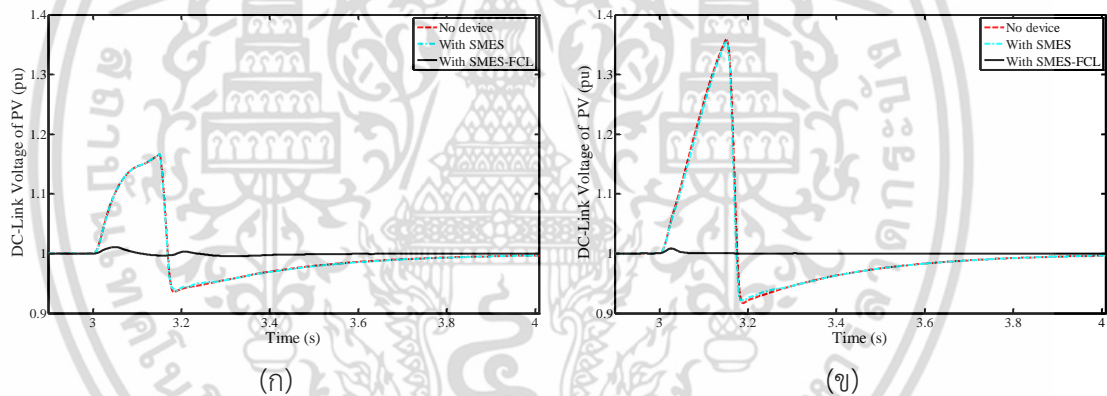
รูปที่ 4.15 กระแสไฟฟ้าที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

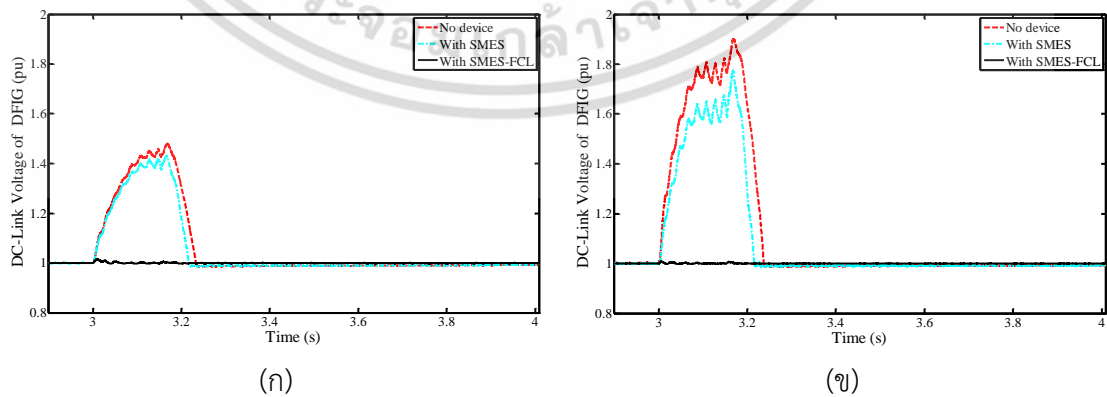


รูปที่ 4.16 กระแสไฟฟ้าที่บัส Wind (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

ในรูปที่ 4.17-4.18 แสดงแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ภายในฟาร์มโซลาร์ และภายในกังหันลม DFIG ซึ่งในกรณีไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์และกรณีที่ติดตั้ง SMES เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างฉับพลันในช่วงที่เกิดความผิดพลาดซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในเสียหายได้หากแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์สูงเกินไป แต่ในกรณีติดตั้ง SMES-FCL แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์แทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

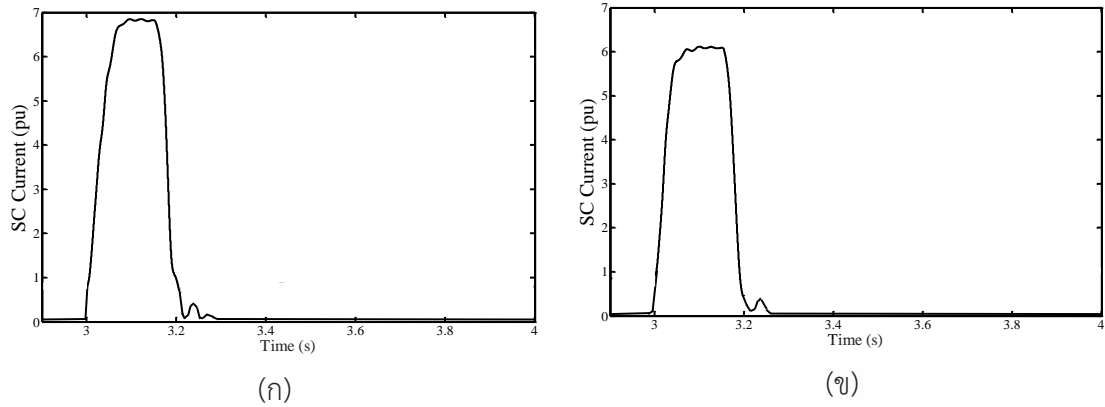


รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ภายในฟาร์มโซลาร์ (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

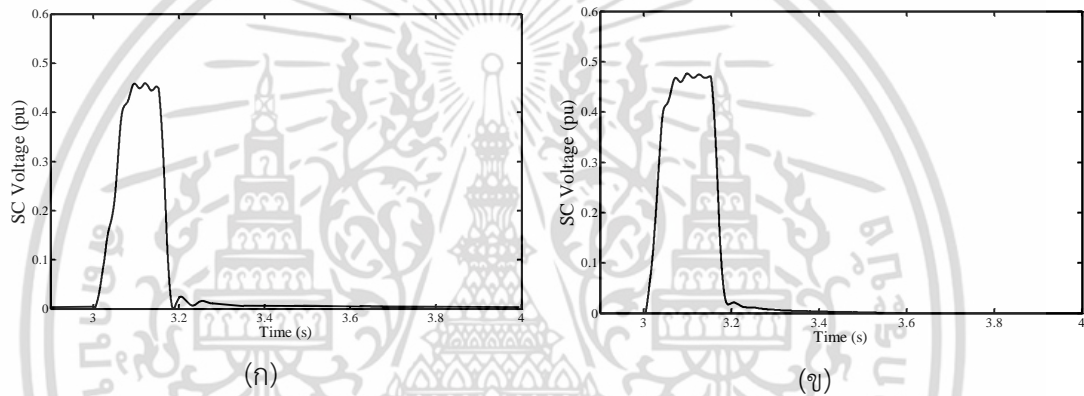


รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ภายในกังหันลม DFIG (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

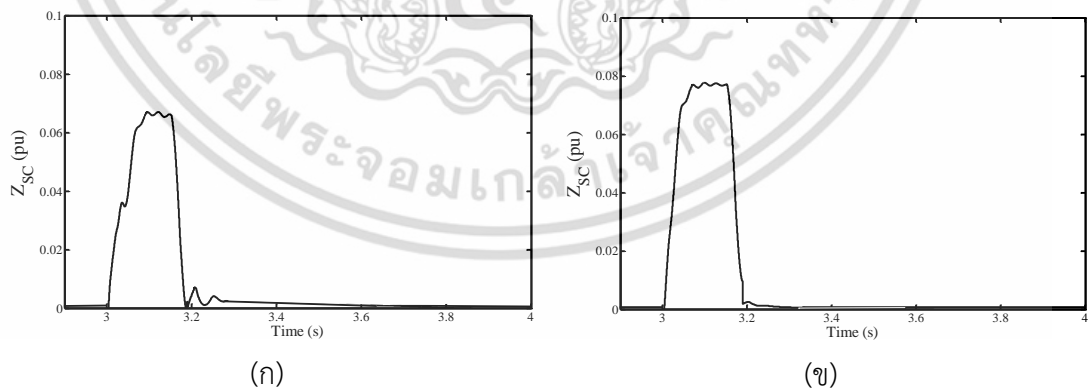
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B



รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B



รูปที่ 4.21 อิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.19 แสดงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดกรณีติดตั้ง SMES-FCL ขณะเกิดความผิดปกติจะเห็นได้ว่าเกิดกระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างฉับพลันไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 4.3 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดแสดงดังรูปที่ 4.20 โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยลดการตกของแรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC ในช่วงที่เกิดความผิดปกติทำให้รักษาแรงดันให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของกริดโค้ด อีกทั้งผลจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เกิดขึ้นเปรียบเสมือนเป็นการสร้างอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดขึ้นตามสมการที่ 4.4 ซึ่งแรงดันตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดและอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยในการจำกัดกระแสฟลัดที่เกิดขึ้น โดยอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดแสดงดังรูปที่ 4.21 และมีค่าอิมพีแดนซ์พื้นฐาน (Z_{base}) เท่ากับ 350 Ω

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการทำเสถียรภาพ

| | SMES | SMES-FCL |
|----------|-------|----------|
| P (MW) | 0.82 | 0.75 |
| E (MJ) | 12.21 | 8.46 |

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานกรณี SMES และกรณี SMES-FCL ที่ใช้ในการทำเสถียรภาพจะเห็นได้ว่า กรณี SMES-FCL นอกจากสามารถทำเสถียรภาพได้ดีกว่าแล้วยังใช้ทั้งกำลังไฟฟ้าและพลังงานน้อยกว่า

4.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรและการควบคุมโดยใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์ SMES-FCL สำหรับติดตั้งสำหรับติดตั้งในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมเชื่อมต่อกัน เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ อีกทั้งยังใช้วิธีการทำให้เหมาะสมสำหรับหาค่าพารามิเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า SMES-FCL สามารถทำงานในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าทั้งในช่วงที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงและในช่วงที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าต่ำได้ดีสามารถจำกัดกระแสฟลัดและลดการตกลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมทำให้สามารถข้ามผ่านความผิดปกติได้เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น ซึ่ง SMES ไม่สามารถทำได้นอกจากนี้การใช้วิธีการทำให้เหมาะสมยังทำให้ลดขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เล็กลงและใช้พลังงานเริ่มต้นซึ่งเพียงพอต่อการทำเสถียรภาพน้อยลงและน้อยกว่า SMES แบบปกติที่ใช้วิธีการทำให้เหมาะสมแบบเดียวกันอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

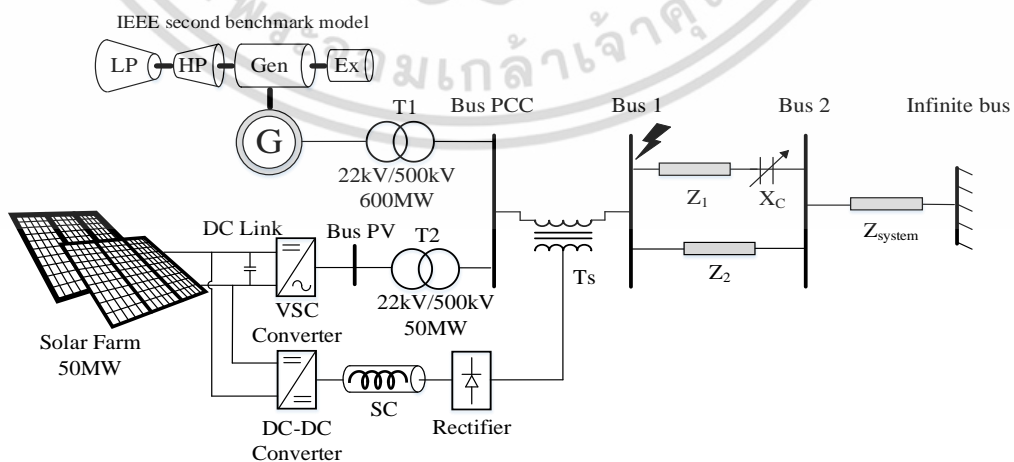


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในฟาร์มโซล่าเพื่อเพิ่ม สมรรถนะการทำงานและลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่า ซิงโครนัส

ในบทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) ติดตั้งภายในฟาร์มโซล่าในระบบ IEEE Second Benchmark [36] ที่จุดเชื่อมต่อดีซีลิงค์ (DC Link) โดยใช้วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) เพื่อใช้งานเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากฟาร์มโซล่าใน นอกจากนี้ยังออกแบบโครงสร้างวงจรและและการควบคุมให้มีความสามารถในการจำกัดกระแสฟอลต์ (Fault Current Limiting) เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นรวมถึงลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส (Sub-synchronous Resonance Damping) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งถูกกระตุ้นจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ร่วมกับตัวควบคุมการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัสที่ใช้ตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตาม (Lead-Lag Controller) ในการควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ อีกทั้งใช้วิธีการทำให้เหมาะสมในการหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุม เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากที่สุดโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE Second Benchmark ที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 5.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE Second Benchmark ร่วมกับฟาร์มโซล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

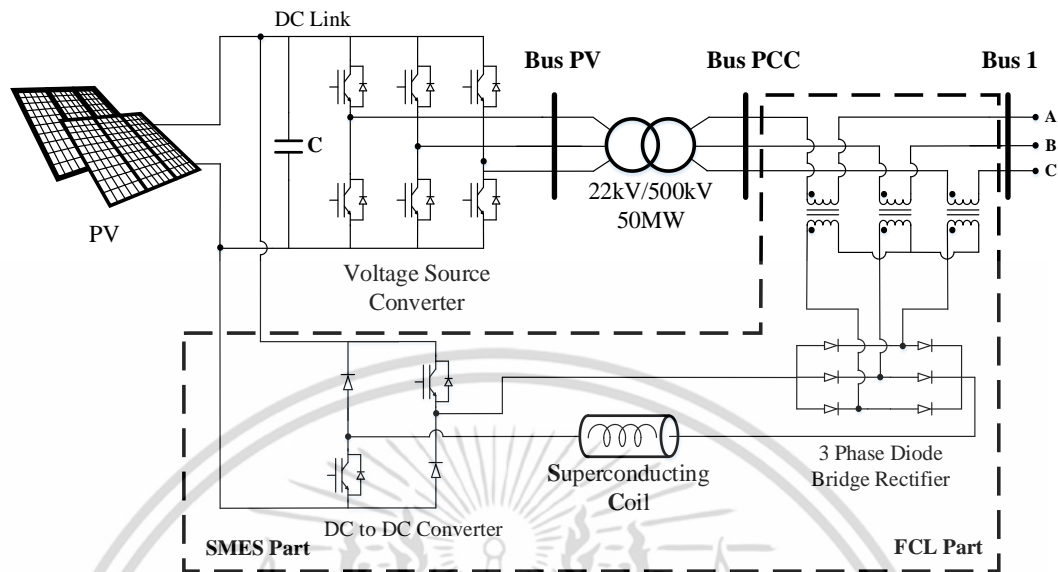
รูปที่ 5.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาซึ่งเป็นระบบ IEEE Second Benchmark [35] ซึ่งเป็นระบบ 60 Hz ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ ขนาด 600 MW 22 kV เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าสู่ระบบไฟฟ้าผ่านสายส่ง 2 เส้น Z_1 และ Z_2 โดยมีตัวชดเชยอนุกรมชนิดตัวเก็บประจุ (Series Compensation Capacitors) ซึ่งมีค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ X_C อยู่ที่ 55 % ของค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ X_L ของสายส่ง Z_1 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดความถี่ธรรมชาติของระบบจากสมการดังสมการที่ 5.1 และมีฟาร์มโซล่า ขนาด 50 MW ซึ่งภายในมีการติดตั้งอุปกรณ์ SC-FCL เชื่อมต่อรวมอยู่ด้วยที่บัส PCC โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 สภาวะ คือสภาวะปกติฟาร์มโซล่าผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นกับความเข้มแสงขณะนั้น และสภาวะเกิดความผิดพลาดซึ่งทำให้เกิดกระแสที่สูงขึ้นและแรงดันที่ตกลงอย่างฉับพลันซึ่งส่งผลกระทบต่อฟาร์มโซล่าทำให้ต้องตัดการเชื่อมต่อออกหากแรงดันไฟฟ้าที่บัส PV ต่ำกว่ามาตรฐานกริดโค้ด [6] นอกจากนี้กระแสฟลัดด์ที่เกิดขึ้นในระบบจะมีองค์ประกอบหนึ่งของความถี่ที่มีความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้าไปตรงกับโหมดการแกว่งของเพลลาภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้างานการ 5.2 เป็นทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส (Sub-synchronous Resonance: SSR) โดยกระแสที่เกิดขึ้นนี้ไปเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิดระหว่างเพลลาภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นทำให้เพลลาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหายจากการบิด [36]

$$f_n = f_s \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (5.1)$$

$$f_n = f_s - f_m \quad (5.2)$$

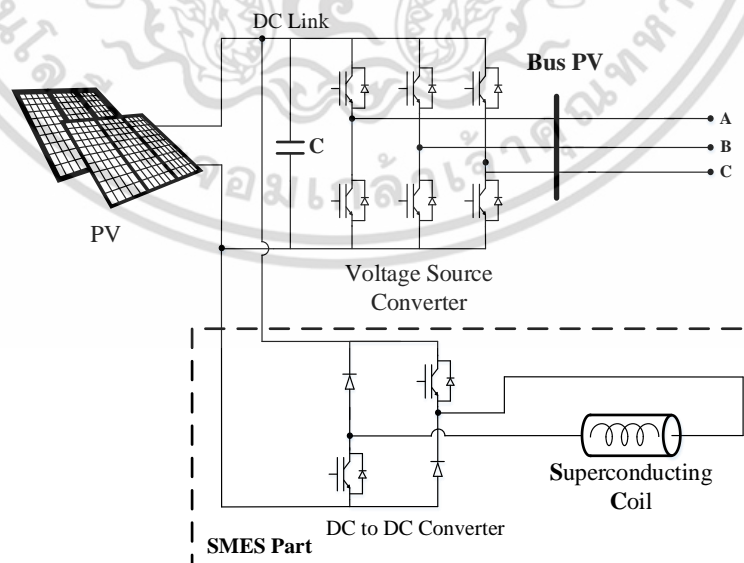
กำหนดให้ f_n คือความถี่ธรรมชาติของระบบ f_s คือความถี่มูลฐานของระบบ X_C คือค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของระบบ X_L คือค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของระบบ และ f_m คือความถี่ทางกลของเพลลาในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5.2 โครงสร้างและการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในฟาร์มโซล่า



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของฟาร์มโซล่าที่ติดตั้งวงจร SC-FCL ภายใน

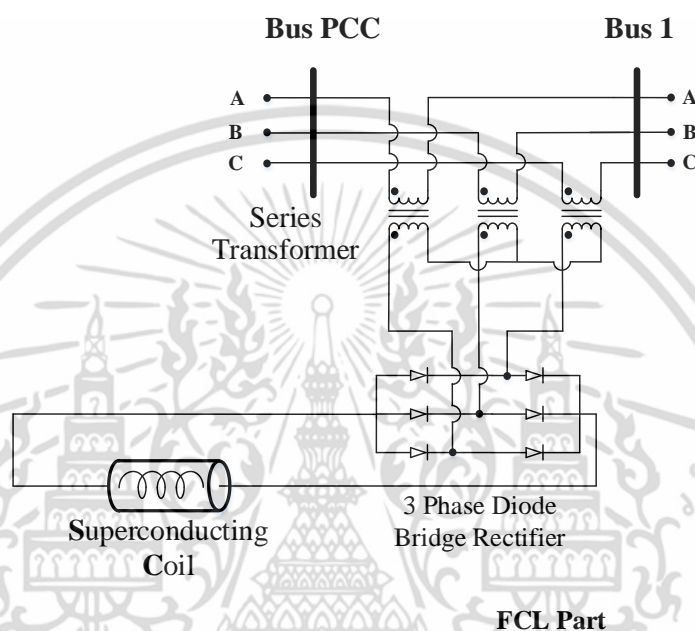
รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้างของวงจรภายในฟาร์มโซล่าที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่จุดเชื่อมต่อดีซีเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่บัส PV ในสภาวะปกติ ข้ามผ่านความผิดพลาดและลดเมื่อเกิดโดยแบ่งการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส ในสภาวะเกิดความผิดพลาด โดยแบ่งโครงสร้างเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงาน (SMES Part) และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ในการจำกัดกระแสฟลด์ (FCL Part)



รูปที่ 5.3 โครงสร้างของวงจร SC-FCL ส่วนวงจร SMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.3 แสดงโครงสร้างของวงจร SC-FCL ในส่วนวงจร SMES ซึ่งประกอบด้วย ขดลวดตัวนำยิ่งยวด มีหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน วงจรดิสทริบูตซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) มีหน้าที่ควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าของขดลวดตัวนำยิ่งยวด ซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับจุดเชื่อมต่อดีซี (DC link) ของฟาร์มโซลาร์

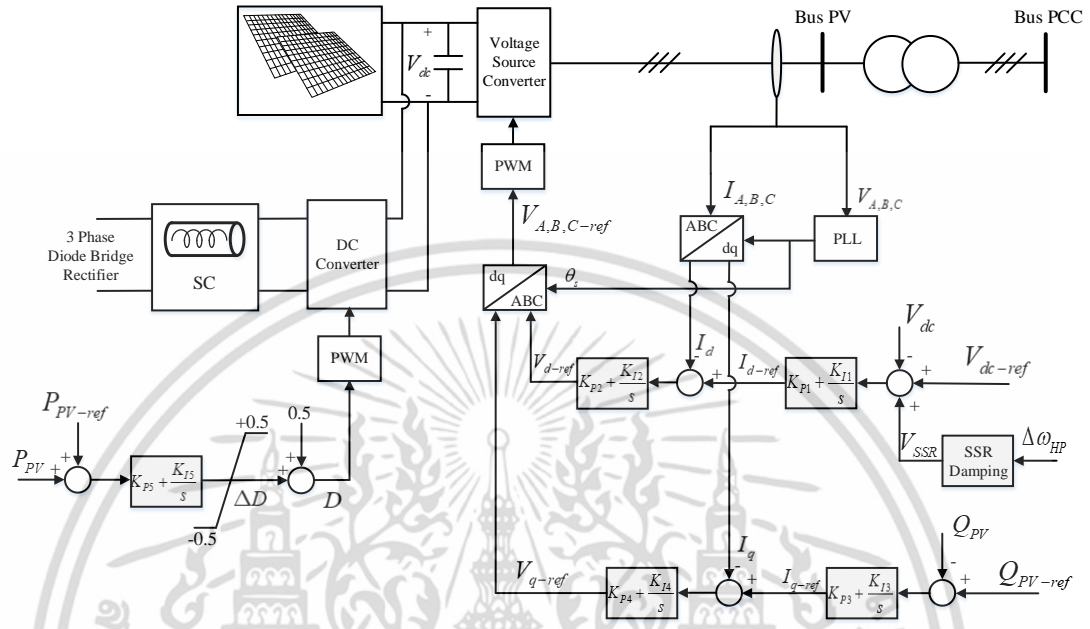


รูปที่ 5.4 โครงสร้างของวงจร SC-FCL ส่วนวงจร FCL

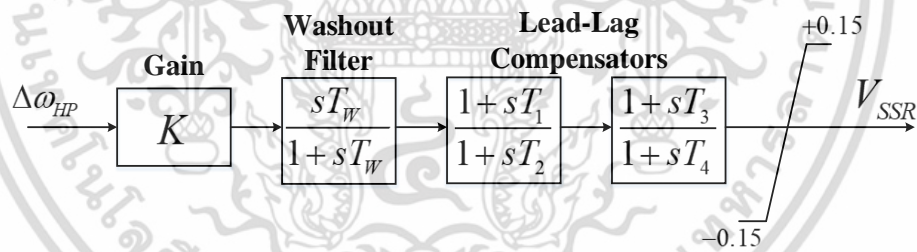
รูปที่ 5.4 แสดงโครงสร้างของวงจร SC-FCL ในส่วนวงจร FCL ซึ่งประกอบด้วย ขดลวดตัวนำยิ่งยวดทำหน้าที่ในการจำกัดกระแสฟลลด์เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์ (3 Phase Diode Bridge Rectifier) ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงซึ่งจะไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด หม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series Transformer) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าโดยต้านปฏิกิริยาต่อกับระบบไฟฟ้าโดยตรงส่วนด้านทุติยภูมิ ต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสไดโอดแบบบริดจ์ โดยจะทำงานอย่างอัตโนมัติเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น ซึ่งการทำงานได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2

5.3 ตัวควบคุมและการทำให้เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในฟาร์มโซล่า

5.3.1 การออกแบบตัวควบคุมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในฟาร์มโซล่า



รูปที่ 5.5 โครงสร้างตัวควบคุมของฟาร์มโซลาร์ร่วมกับวงจร SC-FCL



รูปที่ 5.6 โครงสร้างตัวควบคุม SSR Damping

รูปที่ 5.5 แสดงโครงสร้างตัวควบคุมของฟาร์มโซล่าและวงจร SC-FCL โดยแบ่งการควบคุมออกเป็น 3 ส่วนคือส่วนที่ทำหน้าที่ลดการสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซึ่งโครนัสโดยใช้ตัวควบคุม SSR Damping ส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter: VSC) ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส PV ส่วนสุดท้ายที่ทำหน้าที่ควบคุมวงจรดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส PV สำหรับลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ทำหน้าที่ลดการสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส จะใช้ตัวควบคุม SSR Damping ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งภายในประกอบด้วย อัตราขยาย (Gain) ตัวกรองความถี่ (Washout Filter) และตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตาม (Lead-Lag Compensators) โดยสัญญาณที่ใช้ในการควบคุม คือ สัญญาณอัตราการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมเนื่องจากเป็นสัญญาณที่วัดและสามารถบ่งบอกถึงการสั่งพ้องที่เกิดขึ้นได้ทันทีที่จะใช้สัญญาณของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมที่เทอร์ไบน์ส่วนความดันสูง (High Pressure Turbine) $\Delta\omega_{HP}$ เนื่องจากเป็นสัญญาณมีขนาดของการแกว่งสูงที่สุด เริ่มจากขยายสัญญาณ $\Delta\omega_{HP}$ ที่เข้ามาด้วยอัตราขยายจากนั้นผ่านตัวกรองความถี่เพื่อกรองความถี่ของสัญญาณ $\Delta\omega_{HP}$ ที่สภาวะคงตัวออกก่อนเข้าสู่ตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตามผลที่ได้คือสัญญาณแรงดัน (V_{SSR}) นำไปใช้ในการควบคุมในแนวแกน d ของการควบคุมวงจรถอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันต่อไป

ส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมวงจรถอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันแบ่งการควบคุมย่อยเป็น 2 ส่วน คือการควบคุมในแนวแกน d (d-axis Control Loop) ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันดีซี V_{dc} และการควบคุมในแนวแกน q ทำหน้าที่ในการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัส PV ในส่วนการควบคุมในแนวแกน d ใช้สัญญาณแรงดันดีซี V_{dc} เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันดีซีอ้างอิง V_{dc-ref} เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 1 (PI-1) ผลที่ได้คือสัญญาณอ้างอิงของกระแสในแนวแกน d I_{d-ref} นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสในแนวแกน d ผลต่างจะได้เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 2 (PI-2) ผลที่ได้คือสัญญาณแรงดันอ้างอิงในแนวแกน d V_{d-ref} ส่วนการควบคุมในแนวแกน q (q-axis Control Loop) ใช้สัญญาณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัส PV Q_{PV} เปรียบเทียบกับสัญญาณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟอ้างอิง Q_{PV-ref} เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 3 (PI-3) ผลที่ได้คือสัญญาณอ้างอิงของกระแสในแนวแกน q I_{q-ref} นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสในแนวแกน q ผลต่างจะได้เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 4 (PI-2) ผลที่ได้คือสัญญาณแรงดันอ้างอิงในแนวแกน q V_{q-ref} ซึ่งสัญญาณแรงดันอ้างอิงในแนวแกน d และ สัญญาณแรงดันอ้างอิงในแนวแกน q จะนำไปแปลงกลับเป็นสัญญาณแรงดันอ้างอิงสามเฟส $V_{A,B,C-ref}$ และนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณขับเกทของสวิตช์ในวงจรถอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันด้วยวิธีพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse width modulation: PWM)

ส่วนที่ทำหน้าที่การควบคุมวงจรดีซีบูตีซีคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่บัส 1 โดยการชาร์จหรือดิสชาร์จพลังงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวด โดยใช้สัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1 P_{PV} เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง P_{PV-ref} เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 5 (PI-5) ผลที่ได้คือค่าการเปลี่ยนแปลงของดิวตี้ไซเคิล ΔD นำไปเปรียบเทียบกับค่าดิวตี้ไซเคิลอ้างอิงที่ 0.5 ได้เป็นค่าดิวตี้ไซเคิล D โดยค่าดิวตี้มากกว่า 0.5 จะเป็นการชาร์จพลังงานให้กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด หากค่าดิวตี้น้อยกว่า 0.5 จะเป็นการดิสชาร์จพลังงานให้กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด

5.3.2 การทำให้เหมาะสมของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและตัวควบคุมภายในฟาร์มโซล่า

การทำให้เหมาะสมของฟาร์มโซลาร์ร่วมกับวงจร SC-FCL ด้วยการหาค่าความเหนียวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งเกี่ยวเนื่องกับพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุม SSR เพื่อให้การใช้งานเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีวัตถุประสงค์ในการทำให้เหมาะสมดังนี้ ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและการตกของแรงดันไฟฟ้าที่บัส PV ลดผลของการสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส และลดขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ใช้

การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ออกจากบัส PV ให้น้อยที่สุด และต้องการให้แรงดันไฟฟ้าที่บัส PV อยู่ในขอบเขตของกริดโค้ดและตกน้อยที่สุด ดังนั้นจึงต้องการทำให้ค่าของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ ของการเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่บัส PV IAE_{PV} มีค่าต่ำที่สุด ดังสมการที่ 5.1

$$IAE_{PV} = \int_{t_0}^{t_s} (|P_{PV} - P_{PV-ref}| + |V_{PV} - V_{PV-ref}|) dt \quad (5.1)$$

กำหนดให้ P_{PV} คือกำลังไฟฟ้าที่บัส PV P_{PV-ref} คือกำลังไฟฟ้าอ้างอิง V_{PV} คือแรงดันไฟฟ้าที่บัส PV V_{PV-ref} คือแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง t_0 คือเวลาเริ่มต้นของการจำลอง (s) t_f คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

การลดผลของการสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส โดยการทำให้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ของการเบี่ยงเบนอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมของเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูง IAE_{dw} ให้มีค่าต่ำสุดดังสมการที่ 5.2

$$IAE_{dw} = \int_{t_0}^{t_s} (|\Delta\omega_{HP}|) dt \quad (5.2)$$

กำหนดให้ $\Delta\omega_{HP}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมของเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูง t_0

คือเวลาเริ่มต้นของการจำลอง (s) t_f คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานที่สะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวด โดยถ้าทำให้พลังงานสะสมในตอนเริ่มต้นต่ำที่สุดโดยที่ยังทำให้อุปกรณ์สามารถเสถียรภาพได้ก็จะทำให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดมีขนาดเล็กลงด้วยเช่นกันดังสมการที่ 5.3

$$E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \quad (5.3)$$

กำหนดให้ E_{SC0} คือพลังงานสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวดเริ่มต้น (J) L_{SC} คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H) I_{SC0} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเริ่มต้น (A)

จากสมการที่ 5.1 5.2 และ 5.3 สามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) F สำหรับการทำให้เหมาะสมได้ดังสมการที่ 5.4

$$F = w_1 \bullet IAE_{PV} + w_2 \bullet IAE_{dw} + w_3 \bullet E_{SC0} \quad (5.4)$$

โดยในกระบวนการทำให้เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคจะค้นหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด L_{SC} ค่ากระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด I_{SC0} ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ดังนี้ K_{P5} และ K_{I5} ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม SSR Damping T_1, T_2, T_3, T_4 ที่เหมาะสมที่ทำให้ สมการที่ 5.4 มีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำหนดค่าโดย w_1 เท่ากับ 0.08 w_2 เท่ากับ 1 และ w_3 เท่ากับ 0.001 จำนวนอนุภาค 40 อนุภาค จำนวนรอบ 50 รอบ และขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ไว้ดังนี้

ขอบเขตของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด L_{SC} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 H

ขอบเขตของค่ากระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด I_{SC0} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 kA

ขอบเขตของค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{P5} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 30

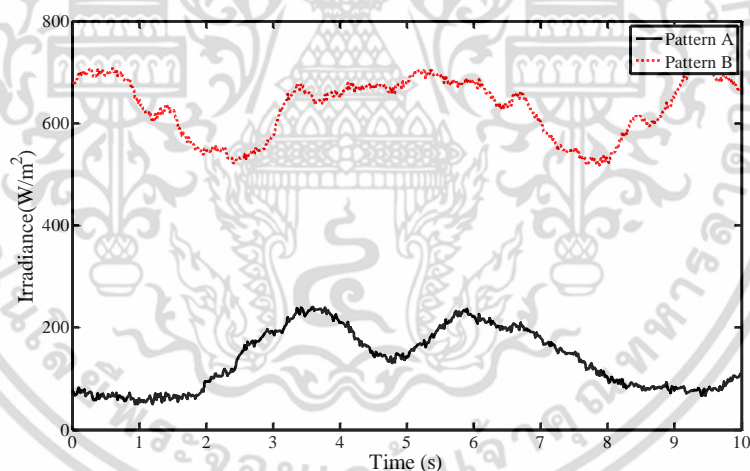
ขอบเขตของค่าคงที่ตัวควบคุมพีไอ K_{I5} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 30

ขอบเขตของค่าคงที่ตัวควบคุม SSR Damping K อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 30

ขอบเขตของค่าคงที่ตัวควบคุม SSR Damping T_1, T_2, T_3, T_4 อยู่ในช่วง 0.001 ถึง 1

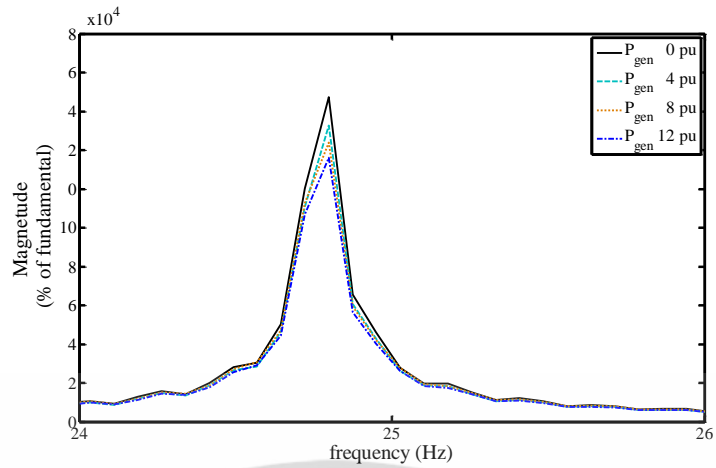
5.4 ผลการจำลอง

การศึกษาในบทนี้จากการออกแบบวงจร SC-FCL ร่วมกับฟาร์มโซลาร์ (PV with SC-FCL) ในระบบ IEEE Second Benchmark เป็นกรณีที่น่าเสนอโดยจะทำการเปรียบเทียบกับฟาร์มโซลาร์ที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ใด (PV) และฟาร์มโซลาร์ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายใน (PV with SC) โดยทุกกรณีถูกทำให้เหมาะสมด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และภายใต้สภาวะเดียวกัน จากการทำให้เหมาะสมในหัวข้อ 5.3.2 ภายใต้รูปแบบความเข้มแสง A ดังรูปที่ 5.7 เกิดความผิดพลาด 3 เฟส ที่บัส 1 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 1 s ระดับกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_{gen} ที่ 0 pu และ ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ X_C ของตัวชดเชยอนุกรมชนิดตัวเก็บประจุที่ 55 % จากผลวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงฟูรีเย ดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 จะเห็นได้ว่า P_{gen} ที่ 0 pu และ X_C ที่ 55 % ทำให้เกิดการสั่นพ้องรุนแรงที่สุด ผลลัพธ์แสดงด้วยกราฟเส้นโค้งการลู่เข้าหาค่าตอบของการทำให้เหมาะสม ดังรูปที่ 5.10 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ถูกทำให้เหมาะสมแล้วของอุปกรณ์ทั้ง กรณี PV with SMES และ PV with SC-FCL ดังตารางที่ 5.1

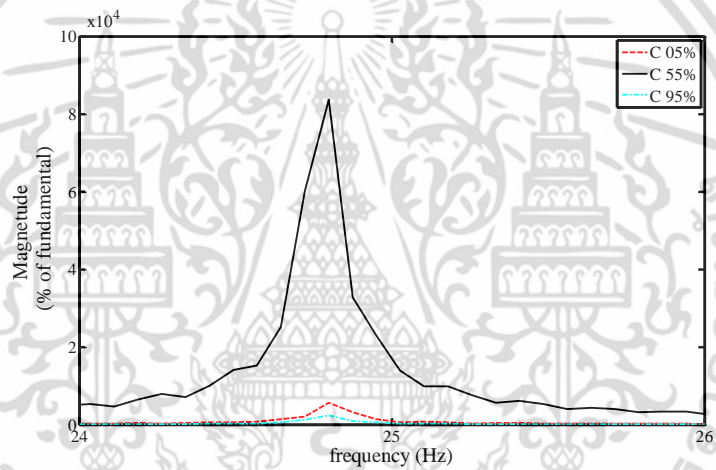


รูปที่ 5.7 ความเข้มแสง

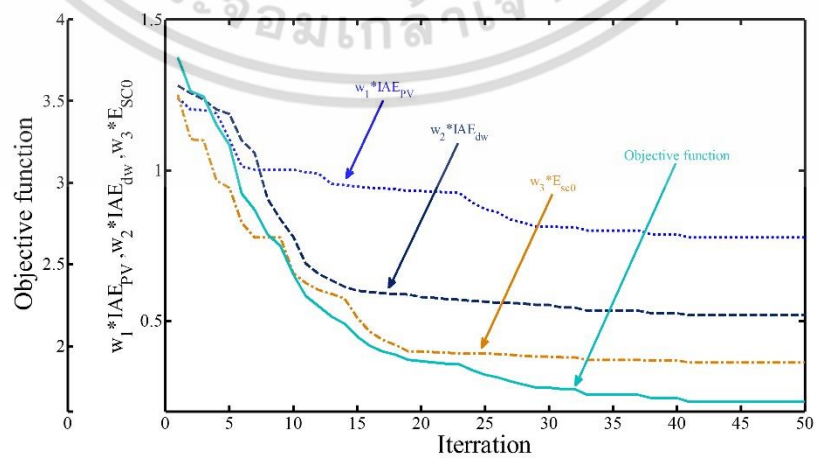
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 องค์ประกอบความถี่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมเทียบกับความถี่มูลฐานของเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูงที่ระดับกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 5.9 องค์ประกอบความถี่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมเทียบกับความถี่มูลฐานของเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูงที่ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ต่างๆ



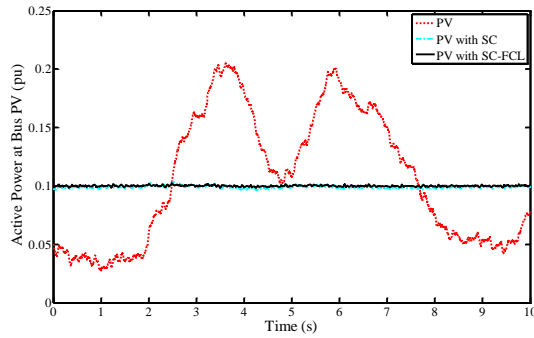
รูปที่ 5.10 เส้นโค้งการลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

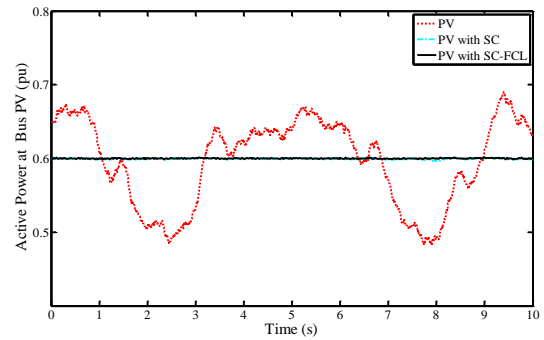
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและตัวควบคุม

| พารามิเตอร์ | | PV With SC | PV With SC-FCL | |
|-------------|------------------|------------------|----------------|-------------|
| ขดลวด | L_{sc} (H) | 3.535 | 3.321 | |
| ตัวนำ | I_{sc0} (kA) | 3.105 | 2.794 | |
| ยิ่งยวด | E_{SC0} (MJ) | 19.40 | 12.96 | |
| ตัวควบคุม | K_{P1}, K_{I1} | 5.51, 10.01 | 4.51, 14.35 | |
| | K_{P2}, K_{I2} | 2.45, 26.17 | 2.57, 28.91 | |
| | พีไอ | K_{P3}, K_{I3} | 4.96, 24.87 | 0.35, 5.48 |
| | ตัวที่ 1-5 | K_{P4}, K_{I4} | 25.04, 1.32 | 16.71, 4.86 |
| | | K_{P5}, K_{I5} | 0.92, 12.10 | 0.81, 10.02 |
| ตัวควบคุม | K | 25.61 | 14.85 | |
| SSR | T_1, T_2 | 0.642, 0.423 | 0.184, 0.054 | |
| Damping | T_3, T_4 | 0.922, 0.556 | 0.405, 0.312 | |

โดยผลการจำลองในสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะแสดงกราฟกำลังไฟฟ้าที่บัส PV ดังรูปที่ 5.11 (ก) สำหรับรูปแบบความเข้มแสง A (ความเข้มแสงต่ำ) โดยรักษากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.1 pu และรูปที่ 5.11 (ข) (ความเข้มแสงสูง) สำหรับรูปแบบความเข้มแสง B โดยรักษากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.6 pu กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ดังรูปที่ 5.12 (ก) และ 5.12 (ข) สำหรับความเข้มแสง A และ B ตามลำดับ จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า กรณีฟาร์มโซล่าที่ไม่มีติดตั้งอุปกรณ์ใด (PV) กำลังไฟฟ้าที่บัส PV ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ฟาร์มโซล่าผลิตจะมีการแกว่งที่เป็นรูปแบบเดียวกับความเข้มแสง ส่วนกรณีฟาร์มโซล่าที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายใน (PV with SC) และกรณีฟาร์มโซล่าร่วมกับวงจร SC-FCL (PV with SC-FCL) สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่บัส PV ได้และมีความสม่ำเสมออยู่ในระดับที่กำหนด

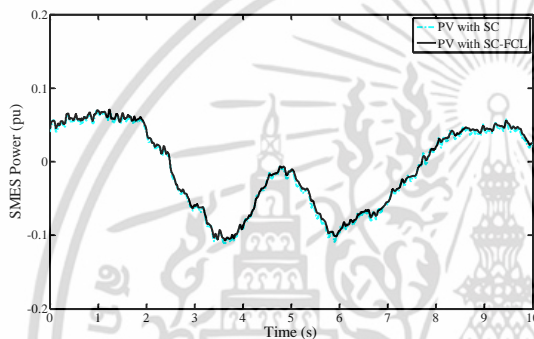


(ก)

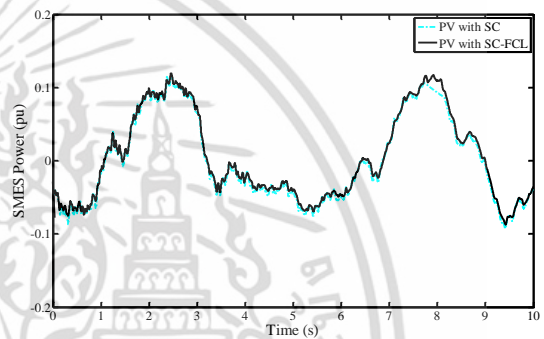


(ข)

รูปที่ 5.11 กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B



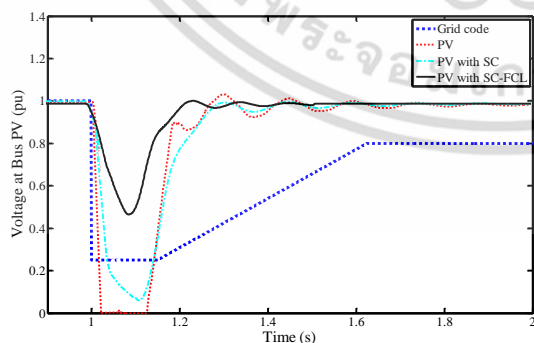
(ก)



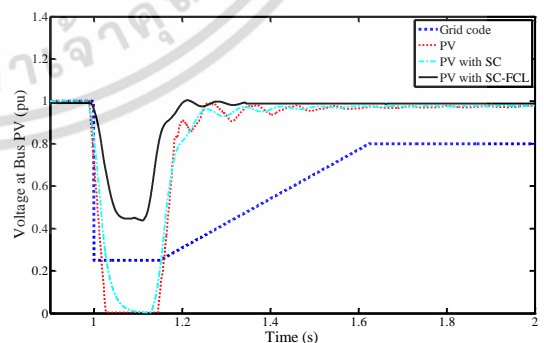
(ข)

รูปที่ 5.12 กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

การทดสอบในสภาวะเกิดความผิดปกติ สำหรับการเกิดความผิดปกติ 3 เฟส ที่บัส 1 เป็นเวลา 150 ms ที่เวลา 1 s ภายใต้รูปแบบความเข้มแสง A และ B



(ก)

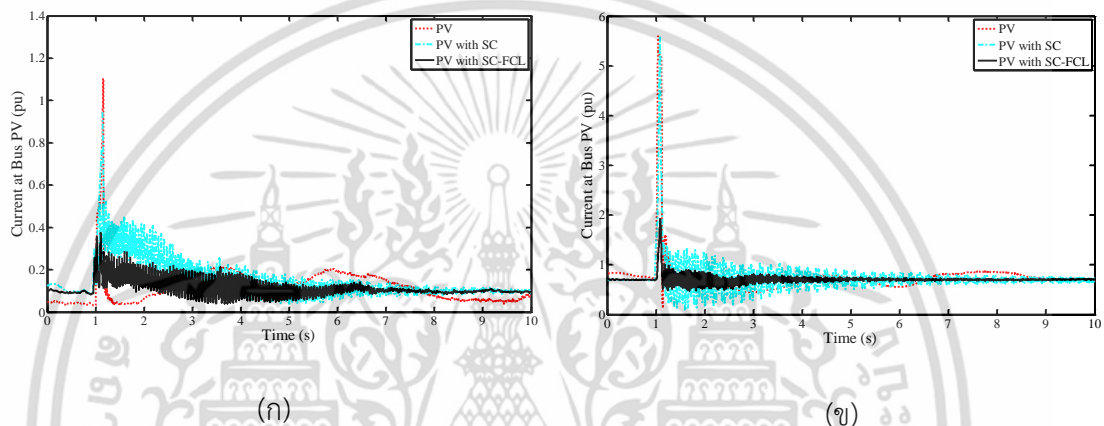


(ข)

รูปที่ 5.13 แรงแดันไฟฟ้าที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

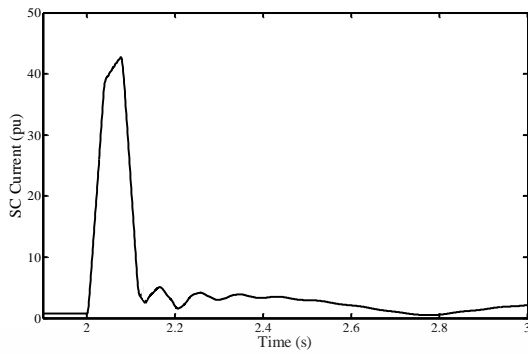
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.13 (ก) และ 5.13 (ข) แสดงกราฟแรงดันไฟฟ้าที่บัส PV เทียบกับกริดโค้ดสำหรับรูปแบบความเข้มแสง A และ B ตามลำดับจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส PV สำหรับกรณี PV และ PV with SC แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าค่าที่กริดโค้ด [6] กำหนดคือต้องสามารถทนต่อสถานะแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ต่ออยู่ตกลงเหลือ 25 % ของแรงดันไฟฟ้าปกติ เป็นเวลา 750 ms ซึ่งทำให้ฟาร์มโซล่าไม่สามารถข้ามผ่านความผิดปกติที่เกิดขึ้นนี้ได้จึงต้องตัดการเชื่อมต่อออกจากระบบ สำหรับกรณี PV with SC-FCL สามารถช่วยลดการตกของแรงดันได้และยังอยู่ในช่วงที่กริดโค้ดกำหนดซึ่งสามารถข้ามผ่านความผิดปกติที่เกิดขึ้นนี้ได้

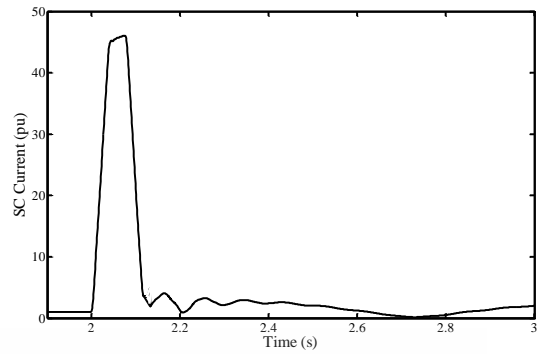


รูปที่ 5.14 กระแสไฟฟ้าที่บัส PV (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

ในรูปที่ 5.14 (ก) และ 5.14 (ข) แสดงกราฟกระแสไฟฟ้าที่ บัส PV สำหรับรูปแบบความเข้มแสง A และ B ตามลำดับในกรณี PV with SC-FCL สามารถลดกระแสฟลัดที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างฉับพลันได้ซึ่งต่างจากในกรณี PV และ PV with SC ไม่สามารถทำได้ และในส่วนปรากฏการณ์การสั้นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าเชิงโคโรนัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นผลสืบเนื่องมาจากความผิดปกติที่เกิดขึ้น ในกรณี PV with SC-FCL และ PV with SC จะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าในรูปแบบที่เป็นการชดเชยเพื่อลดองค์ประกอบของความถี่ที่ทำให้เกิดการสั้นพ้องทำให้ผลของปรากฏการณ์การสั้นพ้องลดลงและกลับเข้าสู่สภาวะปกติทำให้สามารถป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้รับความเสียหาย ซึ่งกรณี PV ไม่สามารถทำได้และทำให้การสั้นพ้องรุนแรงขึ้นตามเวลาทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้ ซึ่งจากกราฟกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 5.14 ช่วงหลังจากเกิดความผิดปกติจะเห็นว่ากรณี PV with SC-FCL ขนาดของกระแสที่ใช้เพื่อช่วยลดการสั้นพ้องมีขนาดที่น้อยกว่ากรณี PV with SC และยังช่วยลดการสั้นพ้องได้ดีกว่าอีกด้วย

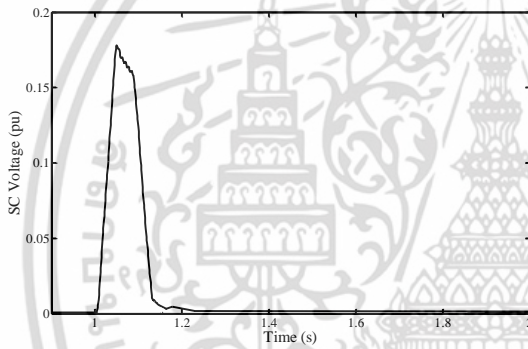


(ก)

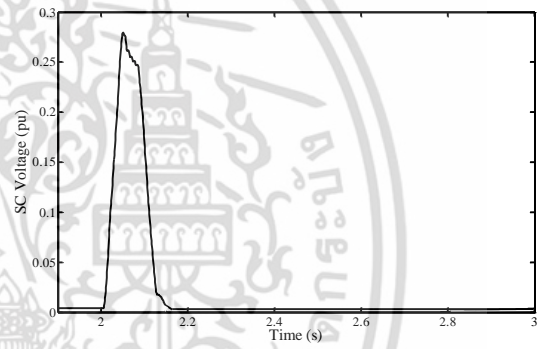


(ข)

รูปที่ 5.15 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

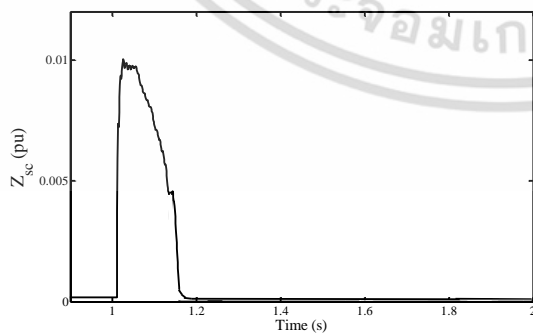


(ก)

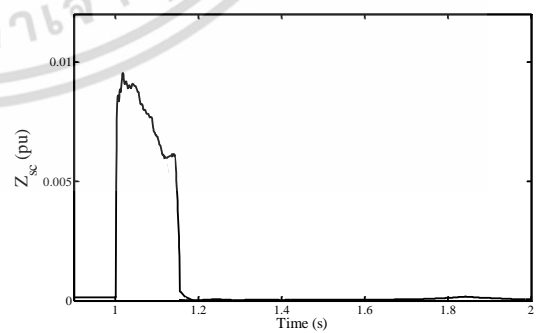


(ข)

รูปที่ 5.16 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B



(ก)

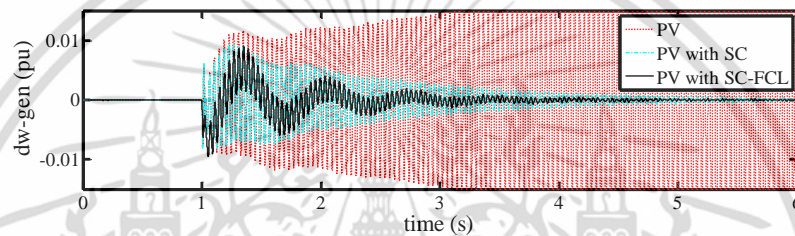


(ข)

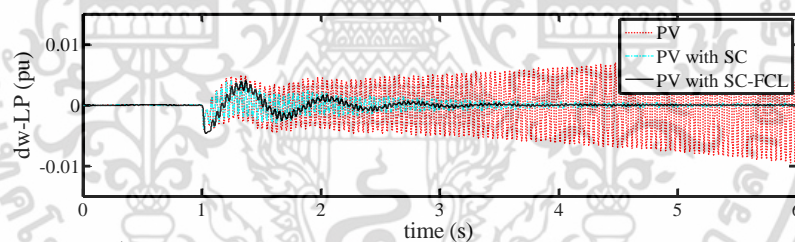
รูปที่ 5.17 อิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

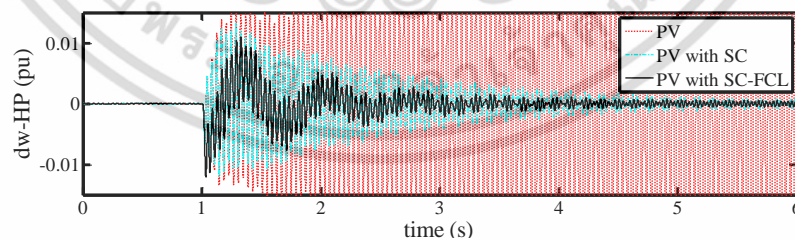
ในรูปที่ 5.15 แสดงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดกรณีฟาร์มโซล่าที่ติดตั้ง SC-FCL ขณะเกิดความผิดปกติจะเห็นได้ว่าเกิดกระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างฉับพลันไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 4.3 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดแสดงดังรูปที่ 5.16 โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยลดการตกของแรงดันไฟฟ้าที่บัส PV ในช่วงที่เกิดความผิดปกติทำให้รักษาแรงดันให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของกริดโค้ด อีกทั้งผลจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เกิดขึ้นเปรียบเสมือนเป็นการสร้างอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดขึ้นตามสมการที่ 4.4 ซึ่งแรงดันตกคร่อมขดลวดตัวนำยิ่งยวดและอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยในการจำกัดกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยอิมพีแดนซ์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดแสดงดังรูปที่ 5.17 และมีค่าอิมพีแดนซ์พื้นฐาน (Z_{base}) เท่ากับ 5000 Ω



(ก)



(ข)



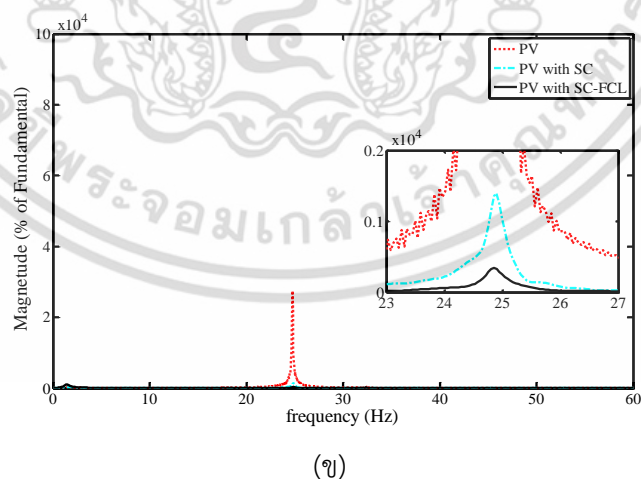
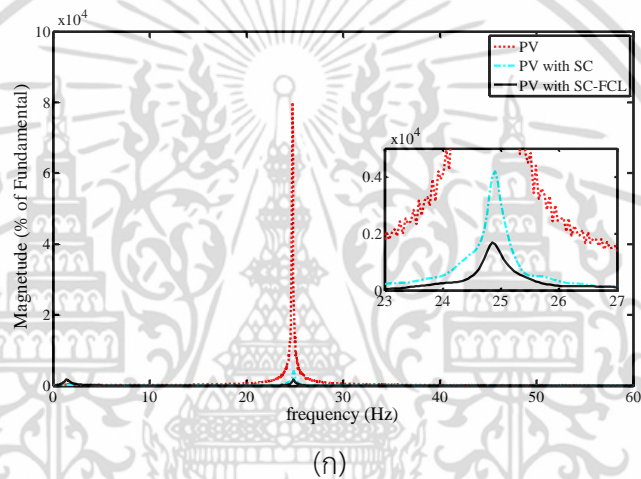
(ค)

รูปที่ 5.18 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

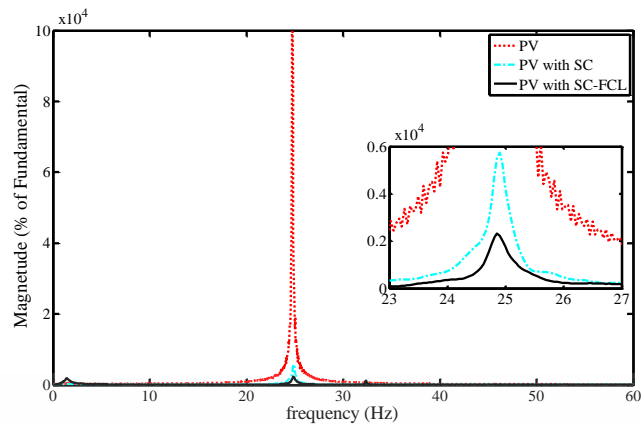
(ก) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ข) ที่เทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำ (ค) ที่เทอร์ไบน์ส่วนความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.18 (ก) 5.18 (ข) และ 5.18 (ค) แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ที่เทอร์โบइनส่วนความดันต่ำ (Low Pressure Turbine) และที่เทอร์โบइनส่วนความดันสูง (High Pressure Turbine) ตามลำดับจะเห็นได้ว่าในสภาวะปกติช่วงเวลา 0-1 s อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเป็น 0 คือมีความเร็วเชิงมุมคงที่ แต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบที่เวลา 1 s ทำให้ความเร็วเชิงมุมภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาดังในกรณี PV ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ตรงกันข้ามกับกรณี PV with SC-FCL ที่นำเสนอสามารถลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้จนกลับเข้าสู่สภาวะปกติคือมีค่าเป็น 0 ทำให้ไม่เกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและทำได้ดีกว่ากรณี PV with SC



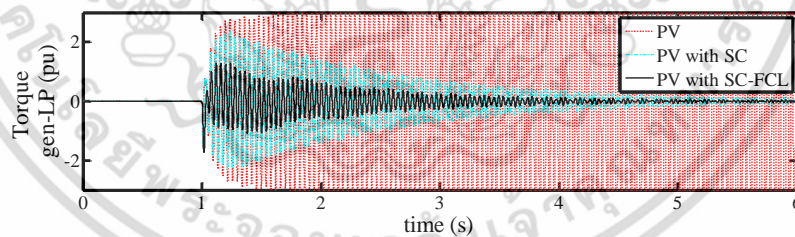
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



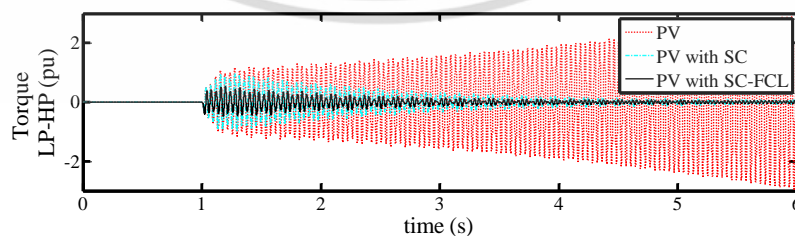
(ค)

รูปที่ 5.19 องค์ประกอบความถี่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมเทียบกับความถี่มูลฐานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ข) ที่เทอร์โบอินส่วนความดันต่ำ (ค) ที่เทอร์โบอินส่วนความดันสูง

รูปที่ 5.19 (ก) 5.19 (ข) และ 5.19 (ค) แสดงองค์ประกอบความถี่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมเทียบกับความถี่มูลฐาน จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงฟูรีเย (Fast Fourier Transform: FFT) ของสัญญาณอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่เทอร์โบอินส่วนความดันต่ำ และที่เทอร์โบอินส่วนความดันสูงตามลำดับ ผลที่ได้จะเห็นว่าม้องค์ประกอบของความถี่ที่ 25 Hz เกิดขึ้นซึ่งมีค่าสูงมากในกรณี PV ตรงกันข้ามกับกรณี PV with SC และ PV with SC-FCL ซึ่งมีความสามารถในการลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมทำให้องค์ประกอบของความถี่ที่ 25 Hz เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย



(ก)



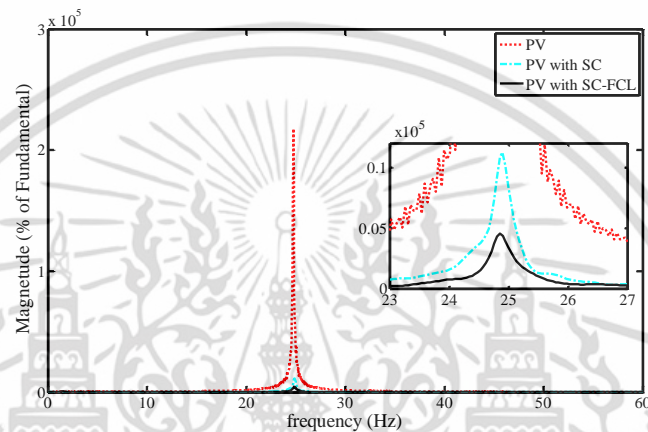
(ข)

รูปที่ 5.20 แรงบิดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

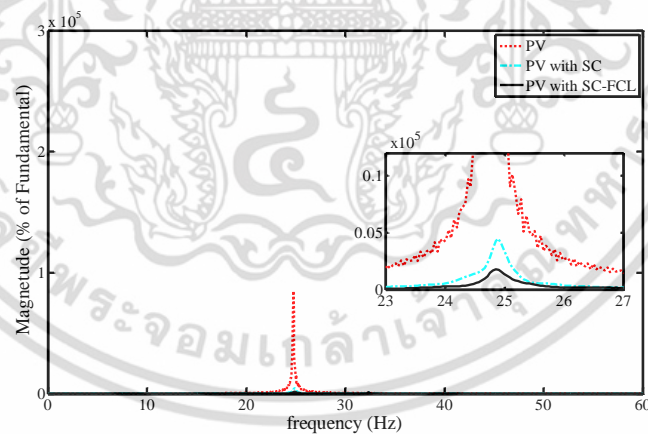
(ก) ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเทอร์โบอินส่วนความดันต่ำ (ข) ระหว่างเทอร์โบอินส่วนความดันต่ำกับเทอร์โบอินส่วนความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.20 (ก) และ 5.20 (ข) แสดงแรงบิดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำ และระหว่างเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำกับเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูงตามลำดับในสภาวะปกติช่วงเวลา 0-1 s จะไม่เกิดแรงบิดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำ และแรงบิดระหว่างเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำกับเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูงขึ้นแต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบที่เวลา 1 s ทำให้เกิดแรงบิดนี้ขึ้นซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากความเร็วเชิงมุมภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละที่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามเวลา ในกรณี PV ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณี PV with SC-FCL และกรณี PV with SC



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.21 องค์ประกอบความถี่ของแรงบิดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับความถี่มูลฐาน
(ก) ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำ (ข) ระหว่างเทอร์ไบน์ส่วนความดันต่ำกับเทอร์ไบน์ส่วนความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.21 (ก) และ 5.21(ข) แสดงองค์ประกอบความถี่ของแรงบิดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเทอร์โบइनส่วนความดันต่ำ และระหว่างเทอร์โบइनส่วนความดันต่ำกับเทอร์โบइनส่วนความดันสูงตามลำดับจะเห็นได้ว่ามีองค์ประกอบของความถี่ที่ 25 Hz เกิดขึ้นซึ่งมีค่าสูงมากเช่นเดียวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุม ในกรณี PV ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณี PV with SC และ PV with SC-FCL ที่มีองค์ประกอบของความถี่ที่ 25 Hz เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการลดการสั่นพ้อง

| | PV with SC | PV with SC-FCL |
|----------|------------|----------------|
| P (MW) | 17.5 | 12.5 |
| E (MJ) | 102.0 | 97.3 |

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานกรณี PV with SC และกรณี PV with SC-FCL ที่ใช้ในการทำเสถียรภาพจะเห็นได้ว่า กรณี PV with SC-FCL นอกจากสามารถทำเสถียรภาพได้ดีกว่าแล้วยังใช้ทั้งกำลังไฟฟ้าและพลังงานน้อยกว่า

5.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรและการควบคุมโดยใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในฟาร์มโซลาร์เพื่อแก้ปัญหการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด และลดการสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซึ่งโครนัสรวมถึงใช้วิธีการทำให้เหมาะสมสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งภายในฟาร์มโซลาร์ สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ฟาร์มโซลาร์ผลิตได้ทั้งในช่วงที่มารผลิตกำลังไฟฟ้าสูงและช่วงที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าต่ำ สามารถจำกัดกระแสฟอลต์และลดการตกลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของฟาร์มโซลาร์ทำให้เพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดได้ และยังสามารถลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วและแรงบิดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์การสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำกว่าซึ่งโครนัสได้ นอกจากนี้การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดไว้ภายในยังช่วยลดจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและหม้อแปลงที่ต้องใช้หากเทียบกับอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดทั่วไปทำให้ลดต้นทุนในการติดตั้ง และการทำให้เหมาะสมยังลดขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เล็กลงโดยที่ยังเพียงพอต่อการทำเสถียรภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า จำกัดกระแสฟลด์รวมถึงการเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด และลดการสิ้นเปลืองที่ความถี่ต่ำกว่าซิงโครนัส (ระบบ IEEE Second Benchmark) รวมถึงการใช้วิธีทำให้เหมาะสมสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและตัวควบคุมจากผลการจำลองสรุปได้ดังนี้

1. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ออกแบบเป็น SMES-FCL สำหรับติดตั้งในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีในช่วงที่ฟาร์มกังหันลมมีการผลิตไฟฟ้าสูงและต่ำรวมถึงช่วยจำกัดกระแสฟลด์ที่เกิดจากความผิดพลาดดีซีที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดของสายส่งดีซี และมีประสิทธิภาพในการทำงานที่มากกว่าอีกทั้งมีขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับ SMES

2. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ออกแบบเป็น SMES-FCL สำหรับติดตั้งในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีฟาร์มโซลาร์และฟาร์มกังหันลมนอกจากสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าแล้วยังช่วยลดกระแสฟลด์ที่เพิ่มขึ้นและลดการตกของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเมื่อเกิดความผิดพลาดอย่างรุนแรงขึ้นซึ่ง SMES ไม่สามารถทำได้

3. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ออกแบบเป็น SC-FCL สำหรับติดตั้งภายในฟาร์มโซลาร์ที่เชื่อมต่อในระบบ IEEE Second Benchmark นอกจากสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากฟาร์มโซลาร์และเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด แล้วยังสามารถช่วยลดการสิ้นเปลืองที่ความถี่ซิงโครนัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบได้ด้วย และการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในฟาร์มโซลาร์ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน) และขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ต้องใช้เมื่อเทียบกับวงจร SMES ทั่วไป และยังมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีกว่าอีกด้วย

4. การใช้วิธีการทำให้เหมาะสมสามารถใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมและขนาด

ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุม และขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นการออกแบบภายใต้สภาวะเดียวแล้วนำไปทดสอบที่สภาวะอื่นแม้ว่าในการออกแบบสามารถรองรับการทำงานที่สภาวะอื่นที่ทำการทดสอบ แต่หากระบบมีการเปลี่ยนแปลงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากตัวควบคุมที่ออกแบบอาจไม่สามารถทำงานได้ดีดังนั้นการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive control) ซึ่งสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้เองเมื่อระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงมีความน่าสนใจในการนำมาใช้ร่วมกับตัวควบคุมเดิมเพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกสภาวะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. 2017. **GLOBAL WIND STATISTICS 2016**. Brussels : GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL
- [2] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT**. Paris : Renewable Energy Policy Network
- [3] Yousef Pipelzadeh, Balarko Chaudhuri “Coordinated Control of Offshore Wind Farm and Onshore HVDC Converter for Effective Power Oscillation Damping,” **IEEE Trans. Power Syst.**, vol 32, no. 3, 2017. pp. 1860-1872
- [4] Shah R. Bansal R.C. et al “A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration,” **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 41, no. 3, 2015. pp. 1423-1436.
- [5] Xiaodong Liang. “Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources,” **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 53, no. 2, 2017. pp. 885-866
- [6] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Paul Sørensen, Nicolaos Antonio Cutululis. “Mapping of grid faults and grid codes”, **Risø National Laboratory Technical University of Denmark**, 2007
- [7] IEEE Committee Report, “Reader’s Guide to Subsynchronous Resonance”, **IEEE Trans. on Power Systems**, Vol. 7, No. 1, pp 150-157, Feb.1992
- [8] Shinichi Nomura., Hirotaka Chikaraichi. Hiroaki Tsutsui., and Ryuichi Shimada, “Feasibility Study on Large Scale SMES for Daily Load Leveling Using Force-Balanced Helical Coil,” **IEEE Trans. On Appl. Supercond.**, vol. 23, no. 3, 2013
- [9] Mohd. Hasan Ali, Bin Wu, and Roger A. Dougal, “An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems,” **IEEE Trans. On Sustainable Energy**, vol. 1, no. 1, 2010
- [10] Chen X.Y. Jin J.X. Xin Y. Shu B. Tang C.L. Zhu Y.P. Sun R.M. “Integrated SMES technology for modern power system and future smart grid,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 24, 2014. pp. 3801606.
- [11] Hasanien H.M. “A set-membership affine projection algorithm-based adaptive-controlled SMES units for wind farms output power smoothing,” **IEEE Trans. Sustainable Energy.**, vol. 5, 2014. pp. 1226-1233.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Taesik Nam, Jae Woong Shim, Kyeon Hur, “The Beneficial Role of SMES Coil in DC Lines as an Energy Buffer for Integrating Large Scale Wind Power,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 22,no. 3, Jun. 2012
- [13] Zarchi Linn, Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, Toshifumi Ise, “Comparison of Power Converter Circuits for HVDC with SMES,” **Proc. Power Electronics and Applications (EPE 2011)** , pp. 1-4, Sep. 2011.
- [14] Dong-Hee Choi, Jae-Ik Yoo Dondmin Kim and Soo Hyong Lee, “Analysis on Effect of SFCL Applied to an Isolated Microgrid with a Dynamic Load Model,” **IEEE Trans. On Appl. Supercond.**, vol. 27, no. 4, 2017 pp. 3800304
- [15] Lei Chen, Hongkun Chen, Jun Yang, et. “Comparison of Superconducting Fault Limiter and Dynamic Voltage Restorer for LVRT Improvement of High Penetration Microgrid,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, Vol. 27, no.4, 2017 pp. 3800607
- [16] Qingqing Yang,Simon Le Blond et. “Design and Application of Superconducting Fault Current Limiter in Multiterminal HVDC System,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 27, no. 4, 2017 pp. 3800805
- [17] Changqi Wang, Bin Li, Jiawei He and Ying Xin, “Design and Application of the SFCL in the Modular Multilevel Converter Base DC System,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 27, no. 4, 2017 pp. 3800504
- [18] Siyuan Liang, Yuejin Tang et. “Study on the Current Limiting Performance of a Novel SFCL in DC System,” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 27, no. 4., 2017
- [19] Wajid Ahmed, Premila Manohar, “DC Line Protection for VSC-HVDC System,” **IEEE International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems.**, Dec. 2012
- [20] Mohsen Farahani, “A new control strategy of SMES for mitigating subsynchronous oscillations,” **Physica C.**, Vol.483, pp.34–39, 2012
- [21] J. Yang, J. Zheng, G. Tang, and Z. He, “Characteristics and recovery performance of VSC-HVDC DC transmission line fault,” **Proc. Power Electronics and Applications (EPE 2011)** , pp. 1-4, Sep. 2011
- [22] Shah R. Mithulananthan N. Bansal R.C. Ramachandaramurthy V.K. “A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration,” **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 41, 2015. pp. 51-59.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] Abdul Motin Howlader, Tomonobu Senjyu, and Ahmd Yousuf Saber, "An Integrated Power Smoothing Control for a Grid-Interactive Wind Farm Considering Wake Effects," **IEEE Systems journal**, vol. 9, no. 3, 2015
- [24] Perpinias I.I. Papanikolaou N.P. Tatakis E.C. "Fault ride through concept in low voltage distributed photovoltaic generators for various dispersion and penetration scenarios," **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 12, 2015. pp. 15-25.
- [25] Lei Chen, Huiwen He, Lin Zhu et. "Coordinated Control of SFCL and SMES for Transient Performance Improvement of Microgrid With Multiple DG Units," **Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering**, vol. 39, no. 2, 2016
- [26] Caihong Zhao, Zikai Wang, Dong Zhang et. "Development and Test of Superconducting Fault Current Limiter-Magnetic Energy Storage (SFCL-MES) System," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol.17, no. 2, 2007
- [27] M. Elshiekh, D. Mansour, and A. Azmy, "Improving fault ride-through capability of DFIG-based wind turbine using superconducting fault current limiter," **IEEE Trans. on Appl. Supercond.**, vol. 23, no. 3, pp. 5 601 204–5 601 204, June 2013.
- [28] Kennedy J. and Eberhart R. "Particle swarm optimization," **In Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.**, vol. 1, 1995. pp. 1942-1948.
- [29] MATLAB/SimPowerSystems Version 5.7 Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2012
- [30] Gevorkian P. Solar. 2007. **Power in Building Design: The Engineer's Complete Design Resource**. McGraw-Hill
- [31] Putri R.I. Wibowo S.Rifa'l M. "Maximum power point tracking for photovoltaic using incremental conductance method," **Energy Procedia**, vol. 68, 2015. pp. 22-30
- [32] Norman S. Nise. 2011. **Control System Engineering 6th edition**. California State : Wiley & Sons.
- [33] Lee E. R. et. al. "Test of DC Reactor Type Fault Current Limiter Using SMES Magnet for Optimal Design," **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, vol. 12, no. 1, pp. 850-853, 2002

- [34] Yunus A.M.S., Masoum M.A.S. and Abu-Siada A. "Application of SMES to Enhance the Dynamic Performance of DFIG During Voltage sag and swell," **IEEE Trans. On Appl. Supercond.**, vol. 22, no. 4, 2012, pp. 5702009
- [35] R.G. Farmer "SECOND BENCHMARK MODEL FOR COMPUTER SIMULATION OF SUBSYNCHRONOUS RESONANCE," **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 104, no. 5, 1985, pp. 1057-1066
- [36] P. M. Anderson, B. L. Agrawal, J. E. Van Ness **SUBSYNCHRONOUS RESONANCE IN POWER SYSTEMS**,. New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, inc.
- [37] M. Davies, M. Dommaschk, J. Dorn, J. Lang, D. Retzmann, D. Soerangr **HVDC PLUS – Basics and Principle of Operation Erlangen** : Siemens AG
- [38] N. Flourentzou, V. G. Agelidis, and G. D. Demetriades, "VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview," **IEEE Trans. on Power Elec.**, vol. 24, 2009, pp.592-602
- [39] Tixador P. "Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective," **IEEE/CSC&ESAS European Supercond. News Forum**, no. 3, 2008
- [40] Nomura S. Shintomi T. Akita S. Nitta T. Shimada R. Meguro S. "Technical and Cost Evaluation on SMES for Electric Power Compensation" **IEEE Trans. On Appl. Supercond.**, vol. 20, 2010. pp. 1373-1378



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความทางวิชาการระดับชาติ (National Conference)

1. W. Panachoenwong and I. Ngamroo, “Optimization Parameter PI Controller of Superconducting Magnetic Energy Storage unit installed same area of solar and wind farm for Alleviation of Power Fluctuation” 38th Electrical Engineering Conference (EECON38), 18-20 December 2015, Ayutthaya, Thailand.
2. W. Panachoenwong and I. Ngamroo, “Application of Superconducting Coil in HVDC Transmission Connected with Offshore Wind Farm to Smoothing Output Fluctuation and Limiting Fault Current” 39th Electrical Engineering Conference (EECON39), 2-4 December 2016, Phetchaburi, Thailand.

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและจำกัดกระแสผิดพลาด

Application of Superconducting Coil in HVDC Transmission Connected with Offshore Wind Farm to Smoothing Output Fluctuation and Limiting Fault Current

วรภัทร พนาจริยวงศ์ และ อิศระชัย งามพร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง worapat.power@gmail.com

PW023

บทคัดย่อ

ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงแรงดันสูงที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่ง คือมีกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมออีกทั้งยังมีโอกาสเกิดความคิดหรืออีกด้วยซึ่งส่งผลเสียคือคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว บทความนี้จึงนำเสนอการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เชื่อมต่อกับตู้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงทางด้านดิสชีด้วยวงจรซีโอพีเออร์สองวงจร เพื่อทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเก็บสะสมพลังงานและตัวจำกัดกระแสผิดพลาด (SMES-FCL) ซึ่งถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ไอทีใช้สำหรับมีเตอร์ที่ปรับอย่างเหมาะสม ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลมที่ติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL แล้วสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและจำกัดกระแสผิดพลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงแรงดันสูง กำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ขดลวดตัวนำยิ่งยวด ตัวเก็บสะสมพลังงาน ตัวจำกัดกระแสผิดพลาด

Abstract

The main problems of an offshore wind farm connected to high voltage direct current (HVDC) transmission are power fluctuation and faults. To solve the problems, the superconducting magnetic energy storage with fault current limiting function (SMES-FCL) in the DC side of HVDC is presented. The SMES-FCL circuit consists of two DC choppers with common superconducting coil (SC) and operates by PI controller which suitable adjusted parameter. Simulation results show that the SC in the SMES-FCL not only provides power smoothing effect, but also limits the fault current in the DC side.

Keywords: high voltage direct current (HVDC), power fluctuation, superconducting coil, superconducting magnetic energy storage

1. บทนำ

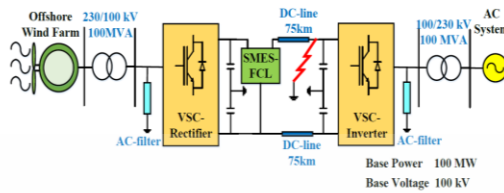
ปัจจุบัน ความสนใจต่อปัญหาการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนเพิ่มสูงขึ้น จึงได้มีการนำพลังงานหมุนเวียน เช่นพลังงานลม ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ในปี 2015 มีการติดตั้งฟาร์มกังหันลมเพิ่มขึ้นถึง 61GW [1] โดยส่วนหนึ่งเป็นฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งซึ่งส่งกำลังไฟฟ้าด้วยระบบส่งกระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission System.) โดยใช้การแปลงแบบ VSC (Voltage Source Converter) อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งผลิตจากฟาร์มกังหันลมส่งผลให้คุณภาพไฟฟ้าในระบบต่ำลงนอกจากนี้เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบงานทำให้ VSC สูญเสียการควบคุมและเป็นอันตรายต่อสายส่งดีซีส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพ [2]

เพื่อแก้ปัญหาข้างต้นจึงมีการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil, SC) มาประยุกต์ใช้ โดยที่ผ่านมานิววิจัย [3,4] ได้ประยุกต์ใช้ SC เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานที่เรียกว่าอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กที่ไอทีนำยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) เข้าไปในระบบ VSC- HVDC ทางด้านDC เพื่อแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ [5] ได้มีการประยุกต์ใช้ SC เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสผิดพลาดซึ่งเรียกว่าอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าผิดพลาด โดยใช้ตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Fault Current Limiter, SFCL) เข้าไปในระบบ VSC- HVDC เพื่อจำกัดกระแสผิดพลาดในระบบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าว SC มาใช้แก้ปัญหาเพียงอย่างเดียวหนึ่งจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาต่อโดยการนำ SC เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

บทความนี้จึงนำเสนอการประยุกต์การติดตั้ง SC ในระบบ VSC- HVDC โดยติดตั้งแปลงวงจรให้ SC สามารถใช้เป็นที่อุปกรณ์สะสมพลังงานและอุปกรณ์จำกัดกระแส (Superconducting Magnetic Energy Storage with Fault Current Limiting, SMES-FCL) เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถจำกัดกระแสผิดพลาด โดยทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

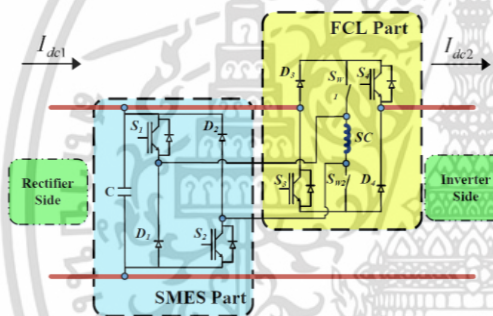
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ศึกษา



รูปที่ 1 ระบบVSC-HVDCพาริมขนาด 100 MW เชื่อมต่อกวิด

รูปที่ 1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาซึ่งประกอบด้วยพาริมกังหันลมขนาด 80 MW 230 kV เชื่อมต่อกับกริดด้วยระบบส่งแบบ VSC-HVDC ขนาด 100 MW 100kV ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL ที่ด้าน DC เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอที่ผลิตจากพาริมกังหันลมและความผิดพลาดทางด้านลิซึ



รูปที่ 2 วงจร SMES-FCL

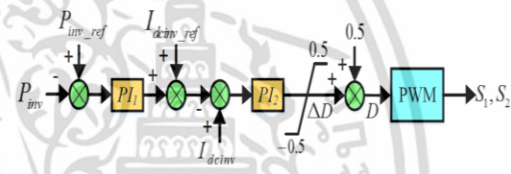
ตารางที่ 1 การทำงานของสวิตช์สำหรับวงจรรีโพลอร์

| สวิตช์ | สภาวะปกติ | | ขณะเกิดความผิดพลาด | |
|----------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | โหมดชาร์จพลังงาน | โหมดดิสชาร์จพลังงาน | โหมดชาร์จพลังงาน | โหมดดิสชาร์จพลังงาน |
| S_1 | on | off | on | off |
| S_2 | on | off | off | off |
| D_1 | off | on | off | on |
| D_2 | off | on | off | on |
| S_3 | on | on | off | off |
| S_4 | on | on | off | off |
| D_3 | on | on | on | on |
| D_4 | on | on | on | on |
| S_{w1} | off | off | on | on |
| S_{w2} | off | off | on | on |

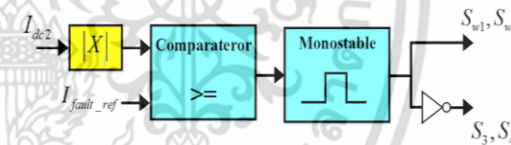
3. โครงสร้างวงจรSMES-FCL

รูปที่ 2 แสดงวงจร SMES-FCL ที่นำเสนอโดยติดตั้งด้านลิซึ ของระบบVSC-HVDC ควบคุมการทำงานด้วยวงจรรีโพลอร์สองวงจรคือ วงจรรีโพลอร์สำหรับให้ SC ทำหน้าที่เป็นตัวสะสมพลังงาน และวงจรรีโพลอร์สำหรับให้ SC ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสลัดวงจร ในสภาวะปกติวงจร SMES-FCL จะทำหน้าที่เป็น SMES ชาร์จและดิสชาร์จพลังงานเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพาริมกังหันลม หากเกิดความผิดพลาดในระบบขึ้นสวิตช์จะทำการเชื่อมต่อก SC เข้าไปเชื่อมต่อกับบอกรับกับสายส่งลิซึ ระหว่างด้านวงจรเรียงกระแสและด้านวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น หลังจากจำกัดกระแสลัดวงจรแล้ว SMES-FCL จะสวิตช์กลับมาทำหน้าที่เป็น SMES ดังเดิม ตารางที่ 1 แสดงการทำงานของสวิตช์สำหรับวงจรรีโพลอร์ ของ SMES-FCL ในสภาวะปกติและในขณะที่เกิดความผิดพลาดขึ้นในสายส่งลิซึ

4. การควบคุมวงจรSMES-FCL



รูปที่ 3 การสร้างสัญญาณควบคุมสำหรับส่วนของSMES



รูปที่ 4 การสร้างสัญญาณควบคุมสำหรับส่วนของFCL

รูปที่ 3 แสดงการสร้างสัญญาณควบคุมSMES-FCLสำหรับส่วนที่ทำหน้าที่เป็นSMES เพื่อรักษาการส่งกำลังไฟฟ้าให้สม่ำเสมอโดยการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างระบบกับ SC โดยใช้สัญญาณของกำลังไฟฟ้าด้านวงจรอินเวอร์เตอร์ (P_{inv}) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงของกำลังไฟฟ้าที่ต้องการรักษา (P_{inv_ref}) เพื่อใช้เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมที่ไอที1 (PI1) ผลที่ได้จะถูกนำมารวมกับสัญญาณอ้างอิงของกระแส (I_{dc2_ref}) จากนั้นนำไปลบออกจากสัญญาณของกระแสที่วัดได้จากด้านวงจรอินเวอร์เตอร์ (I_{dc2}) เพื่อใช้เป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมที่ไอที2 (PI2) ผลที่ได้คือค่าการเปลี่ยนแปลงของดิวิดีไซเคิล (ΔD) จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าดิวิดีไซเคิลอ้างอิงที่ 0.5 ได้เป็นค่าดิวิดีไซเคิล (D) นำไปสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมสำหรับสวิตช์ S_1, S_2 ซึ่งอธิบายค่า D ได้ว่า หากค่า D มากกว่า 0.5 จะเป็นการชาร์จพลังงานเข้าสู่ SC แต่หากค่า D น้อยกว่า 0.5 จะเป็นการดิสชาร์จพลังงานออกจาก SC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

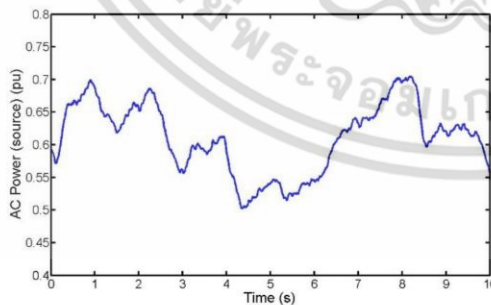
รูปที่ 4 แสดงการสร้างสัญญาณควบคุม SMES-FCL สำหรับส่วนที่ทำหน้าที่เป็น FCL เพื่อเชื่อมต่อ SC เข้าไปเชื่อมต่อบนกรณกับสายส่ง DC ระหว่างด้านวงจรเรียงกระแสกับด้านวงจรถืออินเวอร์เตอร์ในขณะที่เกิดความผิดปกติหรือการวัดสัญญาณกระแสที่ด้านออกของ SMES-FCL (I_{dc}) เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ด้านออกของ SMES-FCL ($I_{fault_ref} = 2.0$ pu) เมื่อค่าสัญญาณ I_{dc} มากกว่าค่าสัญญาณ I_{fault_ref} วงจรโมโนสเตเบิลจะสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อให้สวิตช์ S_{u1}, S_{u2} ปิดวงจรและสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อให้สวิตช์ S_{v1}, S_{v2} เปิดวงจรซึ่งทำให้ SC สามารถเข้าไปเชื่อมต่อบนกรณกับสายส่งได้โดยอัตโนมัติ

5. ผลการจำลองคอมพิวเตอร์

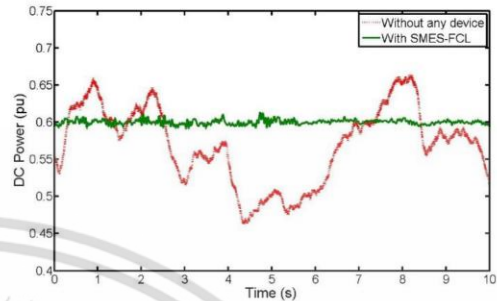
ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ จะใช้โปรแกรม MATLAB Simulink/SimPowerSystems โดยมีรูปแบบกำลังไฟฟ้าที่ไม่สมมาตรซึ่งผลิตออกมาจากฟาร์มกังหันลมดังรูปที่ 5 เมื่อเกิดความผิดปกติซึ่งด้านคลื่นด้านอินเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 1 ที่เวลา 5 s เป็นเวลา 150 ms ซึ่งในการจำลองจะเปรียบเทียบระหว่างระบบ VSC-HVDC ที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ SMES-FCL และระบบ VSC-HVDC ที่ติดตั้งอุปกรณ์แล้ว โดยตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ถูกรับอย่างเหมาะสมของอุปกรณ์ SMES-FCL L_{sc}, I_{sc0}, E_{sc0} คือค่าความเหนี่ยวนำ ค่ากระแสเริ่มต้น และค่าพลังงานเริ่มต้นของ SC ดังต่อไปนี้ KP_1, KI_1, KP_2, KI_2 คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอทีและ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ SMES-FCL

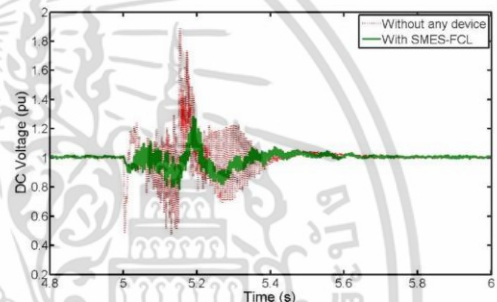
| Parameters | SMES-FCL |
|----------------|-----------|
| L_{sc} (H) | 8 |
| I_{sc0} (kA) | 3.8 |
| E_{sc0} (MJ) | 57.76 |
| KP_1, KI_1 | 1.5, 15.5 |
| KP_2, KI_2 | 6, 0.2 |



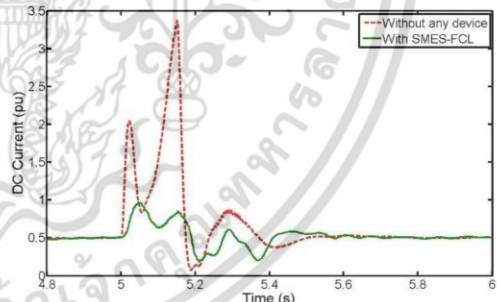
รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากฟาร์มกังหันลม



รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้ที่ลัดขั้วด้านวงจรถืออินเวอร์เตอร์



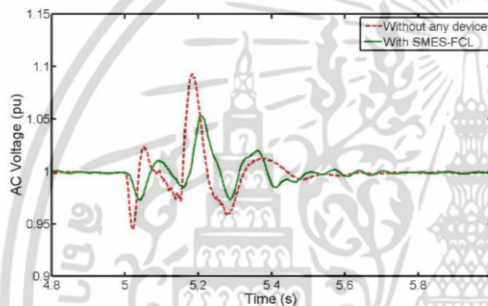
รูปที่ 7 แรงดันไฟฟ้าลัดขั้วด้านวงจรถือกระแส



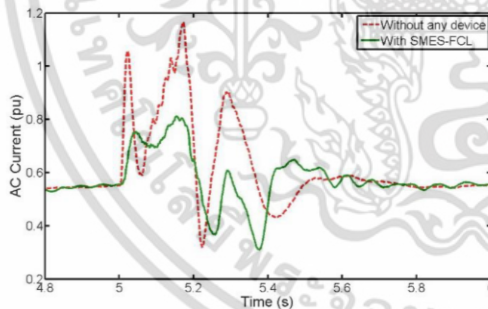
รูปที่ 8 กระแสไฟฟ้ที่ลัดขั้วด้านวงจรถือกระแส

รูปที่ 6 แสดงผลการจำลองของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจรถืออินเวอร์เตอร์ในสภาวะปกติจะเห็นได้ว่ากรณีที่ไม่มีติดตั้งอุปกรณ์กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่วงจรถืออินเวอร์เตอร์มีค่าไม่สมมาตรซึ่งเป็นผลจากกำลังไฟฟ้าที่ฟาร์มกังหันลมผลิตส่งเข้าสู่ระบบ ในทางกลับกันกรณีที่มีติดตั้ง SMES-FCL สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากฟาร์มกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพผลในทันทีให้รักษาระดับกำลังไฟฟ้าที่ 0.6 pu ส่งผลให้คุณภาพของกำลังไฟฟ้าในระบบดีขึ้นอย่างชัดเจน

รูปที่ 7 แสดงผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าคิซีของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบ VSC-HVDC ด้านวงรีเรียงกระแสจะเกิดความผิดปกติจะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์เกิดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าคิซีชั่วขณะซึ่งเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ภายในระบบได้ในทางกลับกันกรณีที่ติดตั้ง SMES-FCL สามารถช่วยลดค่าพิคของแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน รูปที่ 8 แสดงกระแสไฟฟ้าคิซี ที่ออกจากวงรีเรียงกระแสจะเกิดความผิดปกติในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จะเห็นได้ว่าเกิดกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่และรุนแรง ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่ติดตั้ง SMES-FCL กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดย SMES-FCL ที่ถูกเชื่อมต่อเข้าไปกับสายส่งคิซี



รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าคิซีด้านวงรีเรียงกระแส



รูปที่ 10 กระแสไฟฟ้าคิซีด้านวงรีเรียงกระแส

รูปที่ 9 แสดงผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าคิซี ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบ VSC-HVDC ด้านวงรีเรียงกระแสจะเกิดความผิดปกติจะเห็นได้ว่ากรณีติดตั้ง SMES-FCL สามารถช่วยลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นได้ รูปที่ 10 แสดงผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าคิซีที่เข้าสู่วงรีเรียงกระแสจะเกิดความผิดปกติในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ผลกระทบที่ส่งมาถึงกระแสไฟฟ้าคิซีมีความรุนแรงมากกว่ากรณีที่ติดตั้ง SMES-FCL เข้าไปในระบบแล้ว

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ SC เป็น SMES-FCL สำหรับติดตั้งในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบ VSC-HVDC ที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่ง เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากฟาร์มกังหันลมและป้องกันสายส่งจากความผิดปกติของคิซีที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติ และลดขนาดกระแสไฟฟ้าคิซีที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดความผิดปกติของคิซีอีกทั้งผลจากการติดตั้ง SMES-FCL ยังส่งผลช่วยให้การแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นชั่วขณะและกระแสไฟฟ้าทางคิซีลดลงอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Global status of wind power in 2015, "Global Wind Report Annual Market Update 2015," 2015.
- [2] J. Yang, J. Zheng, G. Tang, and Z. He, "Characteristics and recovery performance of VSC-HVDC DC transmission line fault," Proc. Power and Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-4, Apr. 2010.
- [3] Zarchi Linn, Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, Toshifumi Ise, "Application of VSC-HVDC with Shunt Connected SMES for Compensation of Power Fluctuation," IEEJ Trans. Ind. Appl., vol. 132, no. 4, pp. 464-472, 2012
- [4] Taesik Nam, Jae Woong Shim, Kyeon Hur, "The Beneficial Role of SMES Coil in DC Lines as an Energy Buffer for Integrating Large Scale Wind Power," IEEE Trans. Appl. Superconductivity., vol. 22, no. 3, Jun. 2012
- [5] Wajid Ahmed, Premila Manohar, "DC Line Protection for VSC-HVDC System," IEEE International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems., Dec. 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล วรภัทร พนาเจริญวงศ์
 วัน เดือน ปีเกิด 13 มีนาคม 2536 ที่ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 ที่อยู่ 118 ถ.เสรีไทย 63 แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว จ.กรุงเทพฯ 10230

ประวัติการศึกษา 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้