

การเพิ่มสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์  
ด้วยการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสม

ENHANCEMENT OF OPERATING PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC  
GENERATORS BY INSTALLATION OF OPTIMAL SUPERCONDUCTING COIL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2560  
KMITL-2017-EN-M-020-046

การเพิ่มสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์  
ด้วยการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสม

ENHANCEMENT OF OPERATING PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC  
GENERATORS BY INSTALLATION OF OPTIMAL SUPERCONDUCTING COIL



T148663



วรพงษ์ กรีอัมพร

WORAPONG KREEUMPORN

เลขหมู่  
เลขทะเบียน 148663  
รับเดือนปี 114 พ.ศ. 2560

b. 00265033  
1.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2017-EN-M-020-046

ENHANCEMENT OF OPERATING PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC  
GENERATORS BY INSTALLATION OF OPTIMAL SUPERCONDUCTING COIL



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-020-046

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 การเพิ่มสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้ง  
ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสม

Thesis Title Enhancement of Operating Performance of Photovoltaic Generators by  
Installation of Optimal Superconducting Coil

นักศึกษา นายวรพงษ์ กริอัมพร






รหัสประจำตัว 57601094

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-046

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สัญญาชัย	เดชานุกาพฤธา	
รศ.ดร.สมยศ	เกียรติวณิชวิไล	
ดร.วรุฒม์	สุอำพัน	
ผศ.ดร.วรวรรณ	นาคะวิโร	
ศ.ดร.อิสระชัย	งามหรุ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 09.00-11.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสม
นักศึกษา	นาย วรพงษ์ กร้ออัมพร
รหัสประจำตัว	57601094
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร. อิศระชัย งามหรุ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic generators : PV)

การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดใน PV ส่งผลให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกของ PV ได้ด้วยการควบคุมอินเวอร์เตอร์

ในที่นี้ ได้ศึกษาการใช้ PV ที่ติดตั้ง SC สำหรับสองหัวข้อคือ

1. การเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกของ PV
2. การควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายซึ่งติดตั้งกลุ่มรถยนต์ไฟฟ้า

ในการศึกษานี้ การออกแบบระบบที่นำเสนอจะถูกออกแบบโดยการหาค่าที่เหมาะสมของความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์ ด้วยวิธีแบบกลุ่มอนุภาค ผลการทดสอบด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า PV ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในนั้นให้ประสิทธิผลการควบคุมเหนือกว่าอุปกรณ์สะสมพลังงานแม่เหล็กด้วยตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งที่บัสของ PV

Thesis	ENHANCEMENT OF OPERATING PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC GENERATORS BY INSTALLATION OF OPTIMAL SUPERCONDUCTING COIL
Student	Mr. Worapong Kreeumporn
Student ID.	57601094
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

## ABSTRACT

This thesis proposes the application of optimal superconducting coil (SC) integrated into the photovoltaic generators (PV) to enhance the fault ride through capability and alleviate power fluctuations. With the SC, the PV power output can be controlled by the inverter. Here, two applications of the PV with internal SC are studied.

1. Enhancement of fault ride through and alleviation of output power fluctuation of PV.
2. Voltage regulation in the distribution system with plug-in hybrid electric vehicles.

In this study, the optimization of the SC inductance, the initial stored energy and the proportional-integral (PI) control parameters of converters are conducted by the particle swarm optimization. Simulation shows that the PV with the internal SC provides superior control performance to the superconducting magnetic energy storage located at the PV bus terminal.

## กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณ อาจารย์ บุคลากร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดระยะเวลาของการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการ Electrical Power Applications Research Laboratory (EPARL) ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

ที่สำคัญข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง พร้อมทั้งเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ข้าพเจ้าได้เคยถูกอบรมสั่งสอน ได้รับการประสาทวิชาความรู้ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า แต่หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใดข้าพเจ้าต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

วรพงษ์ กรีอัมพร

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อ เพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า.....	2
1.1.2 การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อ ทำให้กำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับ รถยนต์ ไฟฟ้า.....	3
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....	4
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของการศึกษา .....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา .....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	6
2.2 ตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด .....	8
2.3 ตัวควบคุมแบบพีไอ .....	14
2.4 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค .....	15
2.4.1 วิธีการปรับตำแหน่งของอนุภาค.....	15

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.2 ขั้นตอนและวิธีการหาคำตอบ.....	16
บทที่ 3 การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า.....	18
3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบฟาร์มเดี่ยว .....	18
3.1.1 ระบบศึกษา .....	18
3.1.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SC.....	19
3.1.3 การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์ .....	22
3.1.4 การออกแบบตัวควบคุมดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์.....	23
3.1.5 เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมและขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เหมาะสม .....	24
3.1.6 ผลการจำลอง.....	26
3.1.7 สรุป .....	30
3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลายฟาร์ม.....	31
3.2.1 ระบบศึกษา .....	31
3.2.2 แบบจำลองวงจรทางไฟฟ้าของ SC.....	32
3.2.3 การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์ .....	33
3.2.4 การออกแบบตัวควบคุมดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์ .....	33
3.2.5 ผลการจำลอง.....	35
3.2.6 สรุป .....	39
บทที่ 4 การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อให้ กำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า.....	40
4.1 ระบบศึกษา.....	40

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบให้เหมาะสม.....	42
4.3.1 การออกแบบตัวควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์.....	42
4.3.2 การออกแบบตัวควบคุมของดีซีบูตัสคอนเวอร์เตอร์.....	43
4.4 เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมและขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เหมาะสม .....	43
4.4.1 ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า.....	43
4.4.2 หาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ต่ำสุด ที่ทำให้พลังงานสะสม เริ่มต้นต่ำสุด .....	44
4.4.3 สมการของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม.....	44
4.5 ผลการจำลอง.....	45
4.6 สรุป.....	50
บทที่ 5 .....	51
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก ก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	64

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV.....	19
3.2 พารามิเตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด.....	27
3.3 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ.....	27
3.4 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV.....	32
3.5 พารามิเตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด.....	36
3.6 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ.....	36
4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV.....	41
4.2 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์และดีซีบูตีซีคอนเวอร์เตอร์.....	46
4.3 พารามิเตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **vii** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของโมดูล.....	6
2.2 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.3 แบบจำลองของระบบ PV.....	8
2.4 SMES.....	9
2.5 SMES เชื่อมต่อกับกริด.....	9
2.6 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าและพลังงานต่อน้ำหนัก.....	11
2.7 กราฟแสดงเวลาการดิสชาร์จและกำลังไฟฟ้า.....	11
2.8 การเปรียบเทียบราคาประจำปี.....	12
2.9 การควบคุมของอินเวอร์เตอร์.....	13
2.10 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์.....	15
2.11 การเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	16
2.12 แผนผังการหาคำตอบด้วยวิธีการแบบกลุ่มอนุภาค.....	17
3.1 ระบบศึกษา.....	18
3.2 วงจรไฟฟ้าของ SC.....	20
3.3 วงจรไฟฟ้าของ SC ที่ใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า.....	20
3.4 วงจรไฟฟ้าของ SC ที่ใช้เพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ.....	21
3.5 ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	22
3.6 ระบบควบคุมของดีซีบูตัสอินเวอร์เตอร์.....	23
3.7 รูปแบบความเข้มแสงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	26
3.8 เส้นโค้งลู่เข้า.....	26
3.9 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้การจำลองของความเข้มแสง A.....	27
3.10 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้การจำลองของความเข้มแสง B.....	28
3.11 แรงดันไฟฟ้าบัสที่ 1.....	28
3.12 กระแสไฟฟ้าบัสที่ 1.....	29
3.13 กำลังไฟฟ้าบัสที่ 1.....	29
3.14 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์.....	29
3.15 อิมพีแดนซ์ระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ขณะเกิดความผิดปกติ.....	30
3.16 ระบบโซล่าฟาร์ม.....	31
3.17 ระบบศึกษา.....	31
3.18 วงจร SC.....	32
3.19 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	33
3.20 ระบบควบคุมดีซี-ดีซีอินเวอร์เตอร์.....	33
3.21 รูปแบบความเข้มแสงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	35
3.22 เส้นโค้งลู่เข้า.....	35
3.23 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้การจำลองของความเข้มแสง A.....	36
3.24 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้การจำลองของความเข้มแสง B.....	37

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรี โดยสงวนลิขสิทธิ์และสงวนไว้เพื่อประโยชน์ส่วนรวม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 แรงดันไฟฟ้าบัสที่ 1 .....	37
3.26 กระแสไฟฟ้าบัสที่ 1 .....	38
3.27 กำลังไฟฟ้าบัสที่ 1 .....	38
3.28 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ .....	38
3.29 อิมพีแดนซ์ระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ขณะเกิดความผิดปกติ .....	39
4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดแบบร่วมกัน .....	40
4.2 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า .....	41
4.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	42
4.4 การควบคุมดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด .....	43
4.5 ความเข้มแสงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	45
4.6 ความต้องการโหลดและการชาร์จกำลังไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า .....	45
4.7 เส้นโค้งลู่อเข้า .....	45
4.8 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 1 .....	47
4.9 แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสในกรณีที่ 1 .....	47
4.10 แรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสในกรณีที่ 1 .....	47
4.11 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 1 .....	48
4.12 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 2 .....	48
4.13 แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสในกรณีที่ 2 .....	49
4.14 แรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสในกรณีที่ 2 .....	49
4.15 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 2 .....	49

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ด้วยแนวโน้มของจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นและเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างรวดเร็ว ความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงเพิ่มมากขึ้น จำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งแหล่งผลิตพลังงานที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นถ่านหิน แก๊สธรรมชาติหรือน้ำมัน ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก มลพิษต่างๆส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เริ่มมีการนำแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เป็นพลังงานทดแทนเข้ามาใช้ร่วมกันในระบบ ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับการนำมาเป็นแหล่งพลังงาน[1] ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) เป็นพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เพราะ ใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าเป็นแสงอาทิตย์ ซึ่งมีอยู่อย่างไม่จำกัด ประกอบกับข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น อายุการใช้งานยาวนาน การบำรุงรักษาน้อย ไม่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก เป็นต้น[2] แต่อย่างไรก็ตาม PV ต้องประสบปัญหากับการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท ปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินและปัญหาการข้ามผ่านความผิดพลาดเนื่องจากกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของ PV เปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศ[3-4] กำลังไฟฟ้าเอาท์พุทไม่เพียงแต่ทำให้เกิดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าแต่ยังเป็นสาเหตุของการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินขึ้นในระบบ นอกเหนือจากนี้ เมื่อเกิดความผิดพลาดอย่างรุนแรงขึ้นในระบบ PV อาจไม่สามารถข้ามผ่านสถานการณ์แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วครู่ได้ ซึ่งมีการกำหนดช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับได้ ขณะที่เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบอยู่ในรูปแบบของกริดโถกซ์ เพื่อป้องกันการตัดวงจรของ PV ออกจากระบบ ขณะแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วครู่กว่ากริดโถกซ์ ซึ่งการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า รวมทั้งการตัดวงจรของ PV ออกจากระบบ นั้นล้วนแล้วแต่ส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานประเภทต่างๆ เข้ามาแก้ปัญหาของ PV ดังเช่น การใช้แบตเตอรี่ (Battery) แก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกิน [5-6] หรือการใช้อัลตราคาปาซิเตอร์ (Ultra-Capacitor) ร่วมกับแบตเตอรี่ แก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า[7] การใช้ตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) แก้ปัญหาขดเคี้ยวการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเกิน[8] และมีการนำ SMES มาใช้เพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดในระบบที่ติดตั้งกั้นลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์[9] ซึ่งเมื่อพิจารณาด้านคุณสมบัติและความต้องการของฟังก์ชันในการใช้งาน SMES มีคุณสมบัติที่ดีกว่า เช่น การควบคุมการรับส่งกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟได้ในปริมาณที่มากกว่าเมื่อใช้เวลาเท่ากัน มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ประสิทธิภาพสูง เป็นต้น รวมถึงสามารถแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกิน รวมทั้งเพิ่มความสามารถของการข้ามผ่านความผิดพลาดได้อีกด้วย แต่ด้วยเนื่องจากเทคโนโลยียังคงมีราคาค่อนข้างสูง เพราะ SMES ประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คอนเวอร์เตอร์ (Converter) และขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) แต่สามารถลดต้นทุนของราคาได้ โดยใช้เพียง SC และชุดคอนเวอร์เตอร์เท่านั้น ในการทำเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงลดงบประมาณที่ใช้ในการติดตั้ง SMES โดยการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในรูปแบบที่นำเสนอ ใช้เพียงคอนเวอร์เตอร์และขดลวดตัวนำยิ่งยวดเท่านั้น ซึ่งตัวควบคุมของชุดควบคุมการทำงานของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีการติดตั้งในรูปแบบที่นำเสนอใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพราะเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานง่ายและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มสมรรถนะให้กับการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งาน ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมพีไอถูกออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาตามสถานการณ์ต่างๆ

โดยในการศึกษานี้ นำการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในรูปแบบที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้ในการควบคุม 2 ระบบ คือ 1) การนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และ 2) การนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า

### 1.1.1 การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

ในปัจจุบันมีการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) มาติดตั้งกับระบบไฟฟ้ากันอย่างมากมาย เนื่องจากข้อดีของ PV มีข้อดี เช่น ไม่มีการปล่อยแก๊สที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ไม่มีต้นทุนเชื้อเพลิงและแหล่งทรัพยากรที่ใช้ผลิตกำลังไฟฟ้านั้นมีจำนวนมาก ฯลฯ ในปี 2015 ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของ PV ทั่วโลกประมาณ 229 GW[10] อย่างไรก็ตาม PV ต้องประสบปัญหาเกี่ยวกับความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท [11], [12] เนื่องจากกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของ PV เปลี่ยนแปลงตามสภาวะอากาศ การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทส่งผลเสียต่อคุณภาพของกำลังไฟฟ้า นอกเหนือจากนี้ เมื่อเกิดความผิดพลาดอย่างรุนแรงในระบบ PV อาจไม่สามารถข้ามผ่านสถานการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่ำได้ เพื่อป้องกันการตัดวงจรของ PV ออกจากระบบขณะที่เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วตก ซึ่งการตัดวงจรของ PV ส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบ [13]

ในปัจจุบันตัวเก็บสะสมพลังงานสนามแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) กำลังได้รับความสนใจในการใช้เป็นอุปกรณ์ที่ทำเสถียรภาพของพลังงานในอนาคต เนื่องจากเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่ชาญฉลาด[14] ซึ่ง SMES มีข้อดีหลายประการเช่น สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟได้ มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ฯลฯ[15] และ SMES ถูกนำมาใช้งานในการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังมากมาย เช่น ควบคุมความถี่การทำให้เสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง และปรับปรุงคุณภาพของกำลังไฟฟ้า[16-18] เป็นต้น ในระบบ PV มีการนำ SMES มาใช้ลดเคชการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของ PV[19],[20] นอกจากนี้ SMES ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด ภายใต้สภาวะเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตามการเกิดความผิดพลาดที่ไม่คาดคิดขึ้นที่บริเวณใกล้เคียงกับจุดที่ติดตั้ง SMES ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมของ SMES ลดต่ำลง ซึ่งการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coil: SC) ติดตั้งภายในร่วมกับดีซีลิงค์ (DC link) ของอินเวอร์เตอร์ (inverter) ของ PV[21] ประสิทธิภาพในการควบคุมของ SC และระบบ PV ภายใต้การทำงานสภาวะปกติหรือสภาวะเกิดความผิดปกติสามารถทำได้

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะการทำงานปกติ พร้อมทั้งนำเสนอวงจร SC การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ (Converter) และนำเสนอเทคนิคการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของ SC พลังงานสะสมเริ่มต้นและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม และเปรียบเทียบกับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดด้วยผลการจำลอง

1.1.2 การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า

ปัจจุบันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) และปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอิน (Plug-in Hybrid Electrical Vehicles: PHEVs) ถูกติดตั้งเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตไม่เพียงทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าแต่ยังเป็นสาเหตุของปัญหาการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า[22] ในทางกลับกันรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในระบบการขนส่ง[23] นอกเหนือจากนี้ การชาร์จกำลังไฟฟ้าของ PHEVs ไม่เพียงแต่เพิ่มค่าสูงสุดของโหลดและการสูญเสียกำลังไฟฟ้าแต่ยังทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบตกลงด้วย[24] ปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

ในงานวิจัยต่างๆก่อนหน้านี้ การติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Stored: SMES) ที่บริเวณขั้วของ PV ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าว[25] SMES ด้วยขนาดที่เหมาะสมถูกนำมาใช้เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของ PV ส่วนในบทความวิจัย [8] ประสิทธิภาพของ SMES ในการปรับปรุงเสถียรภาพ การรักษาแรงดันไฟฟ้าและใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มี PV และ PHEVs เชื่อมเข้ากับระบบ ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้เป็นระบบแบบแยกอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ระหว่าง SMES และ PV ในทางกลับกันมีการเสนอการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกัน ซึ่งติดตั้งเข้ากับดีซีลิงค์ (DC link) ภายในของ PV ด้วยดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มี PHEVs[26]

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในระบบ PV เพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มี PHEVs และโหลดเชื่อมต่ออยู่ พร้อมทั้งอธิบายวงจรทางไฟฟ้าของ SC ที่นำเสนอรวมถึงวิธีการหาค่าที่เหมาะสม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมของวิธีที่นำเสนอด้วยผลการจำลอง

## 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เพื่อนำเสนอความสามารถของขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการทำเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในการเพิ่มความสามารถของการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า
3. เพื่อประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อทำกำลังไฟฟ้าให้เรียบและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่มีรถยนต์ไฟฟ้า
4. เพื่อนำเสนอการออกแบบขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และ พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามการแก้ปัญหาของ สถานการณ์ต่างๆอย่างเหมาะสม

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีสมมติฐานของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เชื่อมต่อกับบัสบนันต์เพื่อจำลองว่าต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่
2. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจำลองโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำและไม่คิดผลข้างเคียงของขดลวดตัวนำยิ่งยวด เนื่องจากสมมติให้พร้อมสามารถสะสมพลังงานและจำกัดกระแสความผิดพลาดได้ตลอดเวลา
3. คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการศึกษาไม่คำนึงถึงค่าความสูญเสียกำลังทางไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบในระบบไฟฟ้ากำลังการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพียงเล็กน้อย

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาศึกษาการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มี ทฤษฎีและแนวความคิดดังนี้

1. การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด แก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจากปัญหาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้มีการนำตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดมาแก้ปัญหาทั้งการข้ามผ่านความผิดพลาด ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความสามารถของขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการทำเสถียรภาพในระบบร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จึงเป็นแนวคิดที่มาของการออกแบบการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดมาภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดในรูปแบบที่นำเสนอสามารถทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและยังสามารถใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดได้อีกด้วย พร้อมทั้งออกแบบขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นและพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสม
2. ทฤษฎีกลุ่มอนุภาคเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม โดยอาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร[27] ซึ่งได้แนวความคิดจากการเลียนแบบพฤติกรรมกรหา

อาหารของสัตว์ที่อาศัยอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม เช่น ผึ้งนกหรือฝูงปลา เป็นต้น ทฤษฎีกลุ่มอนุภาคนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้ง่าย มีคุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ดี และมีประสิทธิภาพในการคำนวณ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำทฤษฎีกลุ่มอนุภาคมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และตัวควบคุมพีไอ

### 1.5 ขอบเขตของการศึกษา

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ เพื่อทำเสถียรภาพภายใต้การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems[28] รายละเอียดอธิบายได้ดังนี้

1. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและออกแบบขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสม
2. ประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่มีรถยนต์ไฟฟ้า รวมถึงออกแบบขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสม

### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนและรายละเอียดต่างๆ แบ่งออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด ตัวควบคุมพีไอและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

บทที่ 3 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าเรียบและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่มีรถยนต์ไฟฟ้า

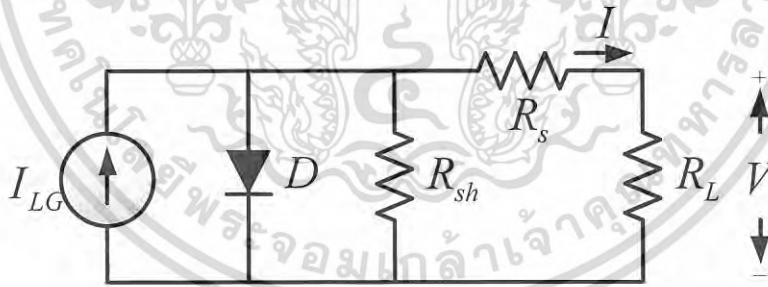
บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงโครงสร้างและหลักการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด ตัวควบคุมพีไอและไนท์บายบัพที่อธิบายถึงเทคนิคการออกแบบพารามิเตอร์อย่างเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

### 2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ปัจจุบันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) เป็นหนึ่งในตัวเลือกของพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากผู้คนเริ่มให้ความสำคัญกับปัญหาของสิ่งแวดล้อมที่ได้รับผลกระทบจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติหรือน้ำมัน สิ่งเหล่านี้นำไปสู่ การเกิดภาวะเรือนกระจก ทรัพยากรธรรมชาติด้านพลังงานลดน้อยลง เป็นต้น ซึ่งพลังงานที่ได้จาก PV สามารถตอบโจทย์การแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ เพราะเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ไม่ส่งผลกระทบต่อภาวะเรือนกระจก ใช้เชื้อเพลิงจากธรรมชาติได้อย่างคุ้มค่า อายุการใช้งานยาวนาน ต้องการการบำรุงรักษาน้อย โดยขบวนการผลิตกำลังไฟฟ้าของ PV เกิดจากแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งโครงสร้างของ PV ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ ไดโอดรอยต่อพีเอ็น (P-N junction) ของสารกึ่งตัวนำ เซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ประกอบด้วยรอยต่อพีเอ็น 1 ชุดเรียกว่า 1 เซลล์ (Cell) เมื่อต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นสามารถนำเซลล์มาต่ออนุกรมหรือขนานกันได้ เรียกว่า โมดูล (Module) และเมื่อต้องการใช้งานเป็นระบบการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ขึ้นต้องนำโมดูลมาต่อกันเป็นแผง เรียกว่า อะเรย์ (Array)



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของโมดูล

โดยทั่วไปแบบจำลองของ PV มีวงจรสมมูลเสมือนตัวไดโอดดังรูปที่ 2.1[29] เพราะกราฟคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเหมือนกับไดโอดเมื่ออยู่ในช่วงเวลาไร้แสงและผลิตรกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับแสง โดยที่กระแสไฟฟ้าเอาท์พุทของวงจรสามารถหาได้จากสมการ (2.1)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้	$I$	คือ กระแสไฟฟ้าเอาท์พุท
	$V$	คือ แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท
	$I_{LG}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากความเข้มแสง
	$I_{OS}$	คือ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิมิตัว
	$q$	คือ ประจุของอิเล็กตรอน
	$A, B$	คือ เฟคเตอร์จินตภาพ
	$K$	คือ ค่าคงที่ Boltzmann's
	$T$	คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )
	$R_s$	คือ ความต้านทานอนุกรม
	$R_{sh}$	คือ ความต้านทานขนาน

จาก (2.1) กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิมิตัว กระแสไฟฟ้าที่ได้จากความเข้มแสงสามารถหาได้จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ

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

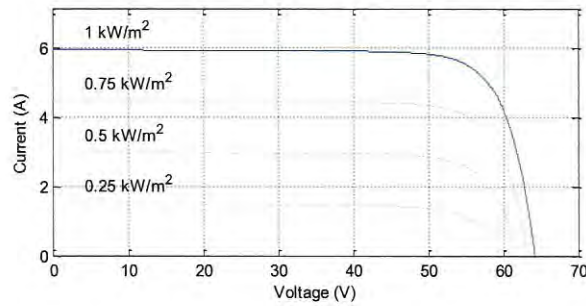
และ

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

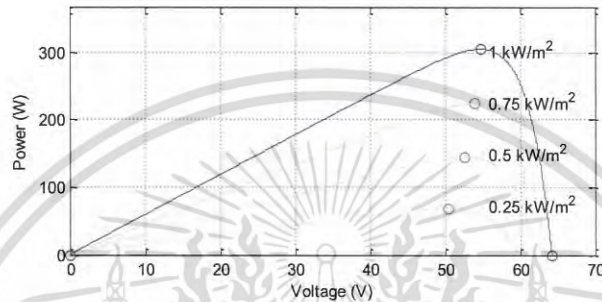
กำหนดให้	$I_{OR}$	คือ กระแสไฟฟ้าอิมิตัวที่อุณหภูมิห้องอ้างอิง
	$T_r$	คือ อุณหภูมิห้องอ้างอิง
	$E_{GO}$	คือ แถบช่องว่างพลังงาน
	$I_{SCR}$	คือ กระแสลัดวงจรที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}C$ และ 1000 $W/m^2$
	$K_I$	คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิกระแสลัดวงจร $I_{SCR}$
	$\lambda$	คือ ความเข้มแสง ( $W/m^2$ )

กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve) และเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (P-V Curve) ซึ่งกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทแปรผันตรงกับความเข้มแสงดังรูปที่ 2.2 ที่ความเข้มแสงเท่ากัน แต่กำลังไฟฟ้าในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ดังนั้นจำเป็นต้องมีตัวติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) เพื่อควบคุมให้ทำงานที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีอินครีเมนเทิลคอนดักแตนซ์ (Incremental Conductance)[30] ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานทั่วไปที่นิยมใช้กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

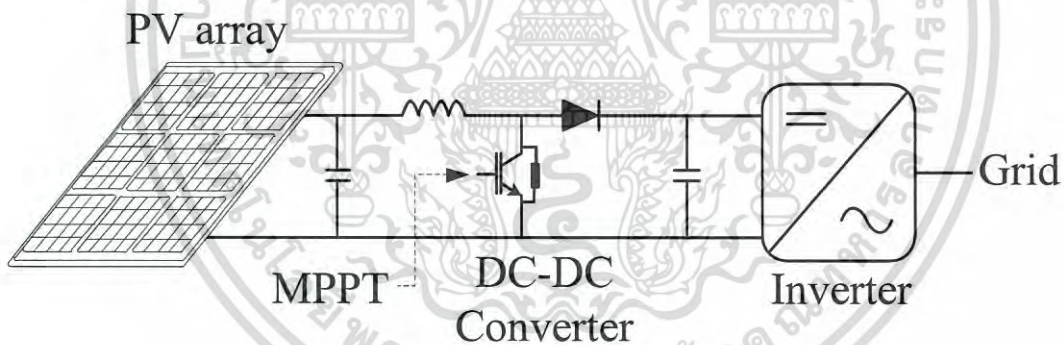


(ก) เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve)



(ข) เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V Curve)

รูปที่ 2.2 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของระบบ PV

รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองของระบบ PV ขนาดใหญ่ ซึ่งประกอบด้วย PV array ภายในคือ การนำโมดูลมาต่อกัน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากความเข้มแสงที่ได้รับ ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC converter) ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าเอาพุตที่ได้จาก PV array ให้มีแรงดันไฟฟ้าตามที่สัญญาณ MPPT ต้องการ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยสัญญาณที่ส่งมาจาก MPPT อยู่ในรูปแบบของตัวตัสเซิล และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทำหน้าที่เชื่อมต่อบนระบบ PV เข้ากับกริด โดยแปลงไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าตรงเป็นกระแสไฟฟ้าสลับ

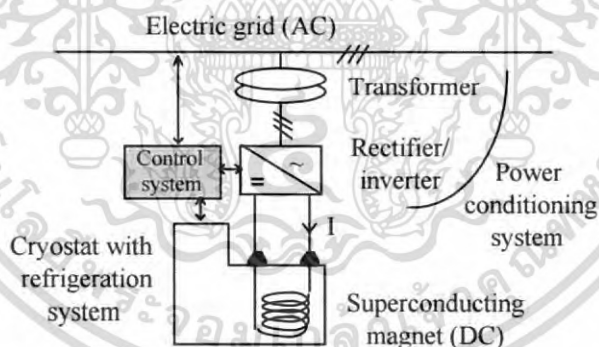
## 2.2 ตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด

เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานที่อยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.4 สามารถรับและส่งกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟได้ ซึ่งการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดในการเก็บพลังงานในรูปแบบสนามแม่เหล็กถูกค้นพบในปี คศ. 1970 โดยชาวฝรั่งเศสชื่อ Ferrier[31] และอุปกรณ์เก็บสะสมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนโวลสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นานมานี้เทคโนโลยีนี้กำลังถูกนำมาใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ถูกใช้ครั้งแรกเพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งใช้งานอยู่เป็นเวลาประมาณ 1 ปี ที่สถานีไฟฟ้าย่อยโทโคมาของบอนเนวิลล์เพาเวอร์แอดมินิสเตชัน รัฐวอชิงตัน ในประเทศสหรัฐอเมริกา ช่วงปี ค.ศ. 1981-1989[32] และในปี ค.ศ.1998 ได้มีการพัฒนา SMES ให้มีศักยภาพการทำงานสูงขึ้น โดยกลุ่มวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับตัวนำยิ่งยวด (International Superconductivity Technology Center: ISTEC) ของญี่ปุ่นในปี ค.ศ. 2000 มีการติดตั้ง SMES 6 หน่วยทางตอนเหนือของรัฐวิสคอนซิน (Wisconsin) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบ จะเห็นได้ว่า SMES ได้รับการวิจัยและพัฒนา รวมถึงมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 2.4 SMES



รูปที่ 2.5 SMES เชื่อมต่อกับกริด[34]

โดยพลังงานสะสมของ SMES เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายใต้สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ ดังนั้นขดลวดตัวนำดังกล่าวต้องมีสภาพเป็นตัวนำยิ่งยวดเพื่อให้พลังงานที่เก็บสะสมไม่สูญเสียเป็นความร้อน แต่ขดลวดตัวนำจะมีสภาพเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ก็ต่อเมื่อต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ประกอบด้วยปัจจัยทางกายภาพ 3 ประการ ได้แก่[33]

1. อุณหภูมิแวดล้อมต้องมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (Critical Temperature)
2. ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในขดลวดต้องมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นวิกฤติ (Critical Current Density)
3. ค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดตัวนำต้องมีค่าน้อยกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติ (Critical Magnetic Field)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบหลักของ SMES 4 ส่วน ได้แก่ ขดลวดตัวนำยิ่งยวด ระบบทำความเย็น ระบบปรับกำลังไฟฟ้าและระบบควบคุม

1. ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อพร้อมจ่ายกำลังไฟฟ้าออกไปสู่ระบบเมื่อเกิดเหตุการณ์ไม่คาดคิดขึ้น เช่น แรงดันไฟฟ้าตกหรือเกิดการแกว่ง เกิดไฟฟ้าลัดวงจร เป็นต้น โดยทั่วไปต้องเก็บไว้ในถังสุญญากาศที่เป็นระบบปิดเพื่อรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้
2. ระบบทำความเย็น (Refrigeration System) ประกอบด้วย เครื่องตัดตัวที่จุดเยือกแข็ง ปัมสุญญากาศ เครื่องทำความเย็น โดยระบบทำความเย็นมีหน้าที่ทำความเย็นเพื่อช่วยรักษาระดับอุณหภูมิของขดลวดตัวนำให้อยู่ใกล้จุดเดือดของฮีเลียมเหลวซึ่งมีค่าประมาณ 4.2 องศาเคลวิน (K)
3. ระบบควบคุม (Control System) คือ ระบบควบคุมต่างๆ เช่น ตัวควบคุมอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ ตัวควบคุมการทำความเย็น
4. ระบบปรับกำลังไฟฟ้า (Power Conditioning System) เป็นส่วนที่เชื่อมระหว่างขดลวดตัวนำยิ่งยวดกับโหลดหรือกริด โดยใช้อินเวอร์เตอร์เชื่อมระบบไฟฟ้าด้านกระแสสลับเข้ากับกระแสตรง และใช้ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรในการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างขดลวดตัวนำยิ่งยวดกับกริด ซึ่งในส่วนของโครงสร้างระบบปรับกำลังไฟฟ้ามี่ทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ โครงสร้างของวงจรแปลงด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor) โครงสร้างของวงจรแปลงด้วยแหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage Source Control: VSC) และโครงสร้างของวงจรแปลงด้วยแหล่งกำเนิดกระแส (Current Source Control: CSC)

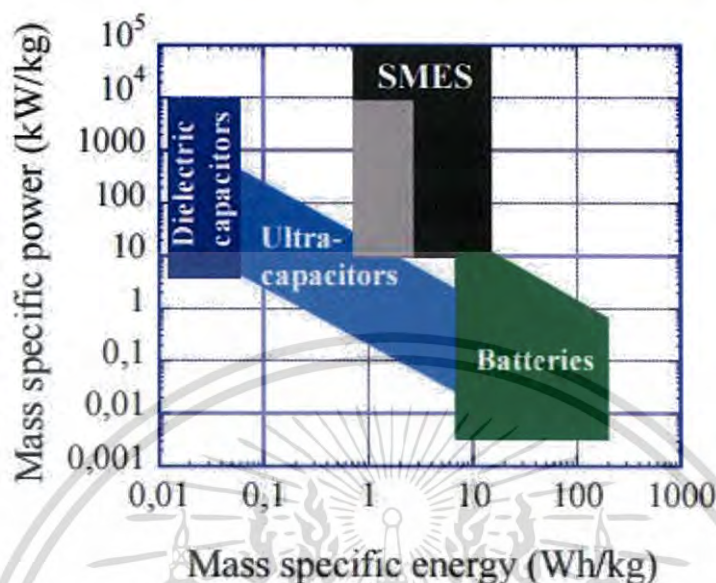
ในการทำงานของ SMES เมื่อเชื่อมต่อกับกริด โดยผ่านอินเวอร์เตอร์และดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ พลังงานที่ถูกเก็บในขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นดังสมการที่ (2.4) ซึ่งจะถูเก็บสะสมไว้ในรูปแบบของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงไหลวนอยู่ในขดลวดตลอดเวลา เนื่องจากขดลวดอยู่ในสภาพเป็นตัวนำยิ่งยวดทำให้ค่าความต้านทานของขดลวดมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงไม่เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนในขดลวด เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดเหตุขัดข้องและจำเป็นต้องเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบอย่างทันทีทันใด SMES จะทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าเข้าหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากขดลวดโดยผ่านวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับในช่วงเวลาและปริมาณที่เหมาะสมเพื่อทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพกลับสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว

$$E_{sc} = \frac{1}{2} L_{sc} I_{sc}^2 \quad (2.4)$$

กำหนดให้	$E_{sc}$	คือ พลังงานสะสมในขดลวดตัวนำยิ่งยวด (J)
	$L_{sc}$	คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H)
	$I_{sc}$	คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด (A)

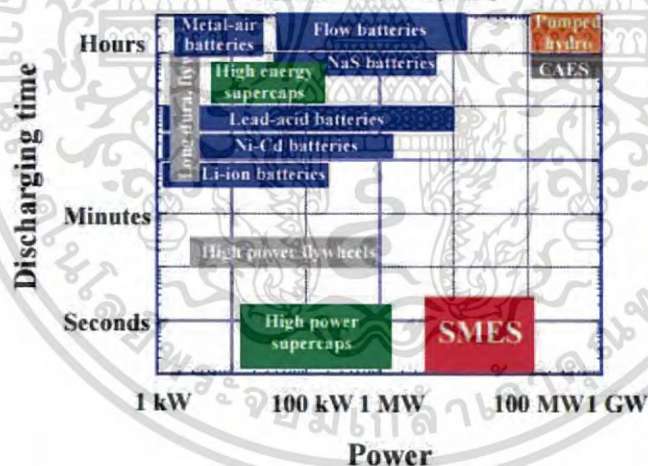
ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีขดลวดตัวนำยิ่งยวดและอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้ SMES มีศักยภาพสูงขึ้น สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีกำลังสูงขึ้น ผลตอบสนองเร็วขึ้น ประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้น SMES จึงเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่มีศักยภาพสูงกว่าอุปกรณ์อื่นๆ รูปที่ 2.6 แสดงกำลังไฟฟ้าและพลังงานต่อน้ำหนักของ SMES เปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ (Battery) และตัวเก็บเอกสารเป็นเอกสารทวงถามเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักอ่านเห็นว่าเนื้อหาไม่ถูกต้องใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุ (Capacitor) ในรูป SMES ในกรอบสี่เหลี่ยมเป็นส่วนที่ในปัจจุบันสามารถทำได้แล้ว ซึ่งมีเมื่อเปรียบเทียบกับในปริมาณที่น้ำหนักเท่ากัน SMES ให้กำลังไฟฟ้าได้สูงและในกรอบสี่เหลี่ยมคือช่วงของ SMES ที่เป็นไปได้ตามทฤษฎี แต่ยังคงต้องการวิจัยและพัฒนาต่อไปอีก



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าและพลังงานต่อน้ำหนัก[34]

[www.electricitystorage.org](http://www.electricitystorage.org)

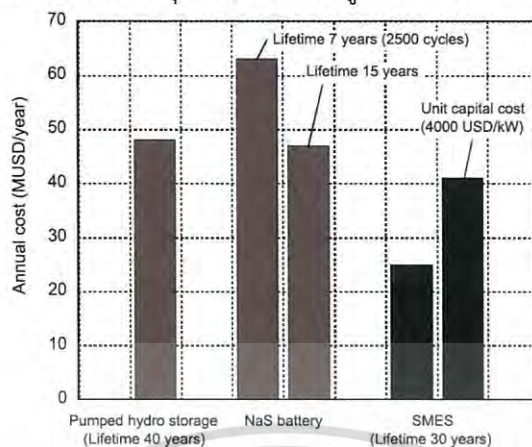


รูปที่ 2.7 กราฟแสดงเวลาการดิสชาร์จและกำลังไฟฟ้า[34]

รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบช่วงของกำลังไฟฟ้าและเวลาในการดิสชาร์จของอุปกรณ์เก็บพลังงานต่างๆ ซึ่งเห็นได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้าของ SMES สูงถึง 100 MW พลังงานที่ถูกเก็บไว้ในขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถดิสชาร์จพลังงานได้ในปริมาณมากและใช้เวลาในการดิสชาร์จสั้น แต่ในระหว่างการดิสชาร์จหรือชาร์จพลังงาน มีพลังงานบางส่วนที่สูญเสียไปเนื่องจากความร้อนของอุปกรณ์สวิตซ์และความสูญเสียของกระแสเอ็ดดี้ (Eddy Current Losses) ของเครื่องทำความเย็น แต่ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่เก็บไว้ใน SMES ซึ่งถ้า SMES ได้รับการออกแบบที่เหมาะสมประสิทธิภาพอาจสูงได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเก็บพลังงานอื่น เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานอยู่ที่ 70 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ป้อนน้ำประสิทธิภาพการแปลงพลังงานอยู่ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ ตัวเก็บประจุประสิทธิภาพอยู่ที่ 90 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ฯลฯ

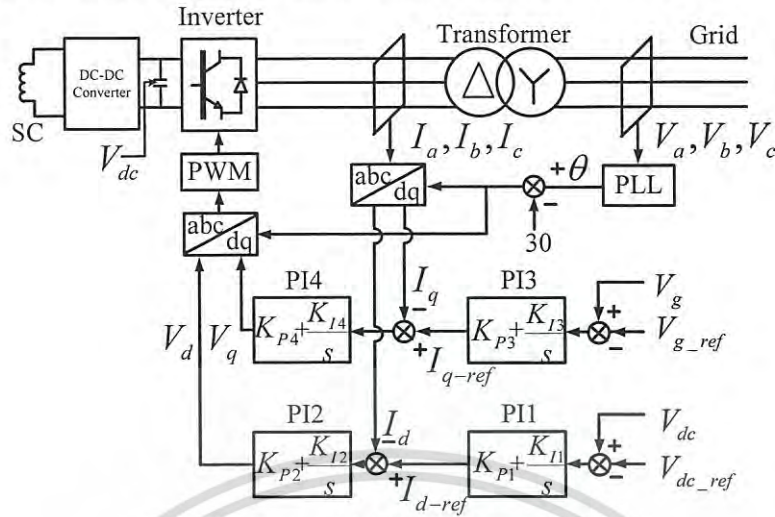


รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบราคาประจำปี

ส่วนในเรื่องราคาของระบบ 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) ช่วงการประเมินในส่วนของการแปลงพลังงานกว้าง เนื่องจากขึ้นอยู่กับระบบที่นำ SMES ไปติดตั้ง ยกตัวอย่างเช่น หากนำ SMES ไปใช้งานในระบบ AC วงจรแปลงกำลังไฟฟ้าไม่เพียงใช้แต่ดีซีทูดี้ซีคอนเวอร์เตอร์ยังต้องการอินเวอร์เตอร์ เพื่อเชื่อมระบบเข้าด้วยกันระหว่าง AC และ DC ซึ่งหากเป็นการใช้งานของ SMES ในระบบที่เป็น DC ใช้เพียงแคดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์เท่านั้น ราคาในส่วนนี้ก็จะต่ำลง และยังมีมีการประเมินราคาประจำปีซึ่งเปรียบเทียบระหว่าง SMES ป้อนน้ำสะสมพลังงาน (Pumped Hydro Storage) แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS Battery) ดังรูปที่ 2.8 เป็นการประเมินจากระบบตัวเก็บพลังงาน 1 กิกะวัตต์ชั่วโมง (GWh) โดยประเมินราคาจาก อายุการใช้งาน ค่าบำรุงรักษาและราคาของตัวเก็บพลังงาน ซึ่ง SMES มีราคาต่ำที่สุด[35] ซึ่งในอนาคตคาดการณ์ได้ว่าการนำ SMES เข้ามาใช้ในระบบจะมีเพิ่มขึ้นอย่างมาก ด้วยข้อดีทางด้านเทคนิคของ SMES และทางเศรษฐศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 แบบจำลองของตัวเก็บสะสมพลังงานสนามแม่เหล็กแบบยิ่งยวด



รูปที่ 2.9 การควบคุมของอินเวอร์เตอร์

แบบจำลองของ SMES ที่ใช้ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ อินเวอร์เตอร์ใช้การควบคุมแบบ VSC โดยวิธีการควบคุมอธิบายได้ดังนี้ แปลงแรงดันไฟฟ้า ( $V_a, V_b, V_c$ ) และกระแสไฟฟ้า ( $I_a, I_b, I_c$ ) 3 เฟส ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแกนตรง ( $d$ ) และแกนตั้งฉาก ( $q$ ) จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

และ

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

- กำหนดให้  $V_d$  คือ แรงดันไฟฟ้าแกน  $d$
- $V_q$  คือ แรงดันไฟฟ้าแกน  $q$
- $I_d$  คือ กระแสไฟฟ้าแกน  $d$
- $I_q$  คือ กระแสไฟฟ้าแกน  $q$

ในการควบคุมแอกทีฟ ( $P$ ) และรีแอกทีฟ ( $Q$ ) ของอินเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$P = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad (2.7)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_q I_d - V_d I_q) \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมแบบ VSC กำหนดให้  $V_q$  เป็นศูนย์ ดังนั้นสมการที่ (2.7) และ (2.8) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (2.9) และ (2.10)

$$P = \frac{3}{2} V_d I_d \quad (2.9)$$

$$Q = -\frac{3}{2} V_d I_q \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) สามารถแสดงการควบคุมของอินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งกระแสไฟฟ้าแกนตรง ( $I_d$ ) ถูกควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้าแกนตรงอ้างอิง ( $I_{d-ref}$ ) เพื่อควบคุมการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์และรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ดิสซิ่งค์ ( $V_{dc}$ ) ขณะที่กระแสไฟฟ้าแกนตั้งฉาก ( $I_q$ ) ถูกควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้าแกนตั้งฉากอ้างอิง ( $I_{q-ref}$ ) เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าที่กริด ( $V_g$ )

### 2.3 ตัวควบคุมแบบพีไอ

ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) หรือตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional Integral Controller) เป็นตัวควบคุมที่มีความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยระบบที่ใช้มักเป็นระบบที่ควบคุมง่ายไม่ซับซ้อน โดยค่าที่นำมาใช้ในการควบคุมพีไอเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความแตกต่างของค่าที่ต้องการควบคุมกับค่าที่รับหรือวัดมาได้ เพื่อใช้ควบคุมให้ค่าเป็นไปตามต้องการ ตัวควบคุมพีไอแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวควบคุมพีไอหรือตัวควบคุมสัดส่วน ตัวควบคุมไอหรือตัวควบคุมปริพันธ์

ตัวควบคุมพีไอหรือตัวควบคุมสัดส่วน (Proportional Controller) เป็นค่าคงที่หรืออัตราขยาย เพื่อขยายขนาดค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการตอบสนองสัดส่วนสามารถแสดงด้วยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยอัตราขยายสัดส่วนตามสมการ (2.11)

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.11)$$

กำหนดให้	$P_{out}$	คือ สัญญาณเอาต์พุตของเทอมสัดส่วน
	$K_p$	คือ อัตราส่วนขยาย
	$e$	คือ ค่าความผิดพลาด
	$t$	คือ เวลา

ตัวควบคุมไอหรือตัวควบคุมปริพันธ์ (Integral Controller) เป็นสัดส่วนของความผิดพลาดและช่วงเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลาถูกคูณด้วยค่าปริพันธ์ดังสมการ (2.12)

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.12)$$

กำหนดให้	$I_{out}$	คือ สัญญาณเอาต์พุตของเทอมปริพันธ์
	$K_i$	คือ อัตราขยายปริพันธ์
	$e$	คือ ค่าความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

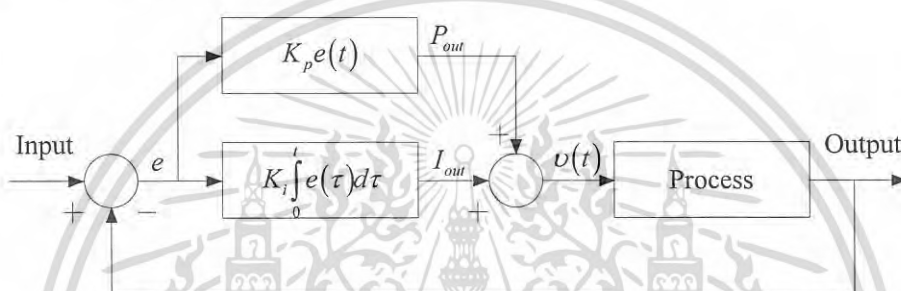
$t$  คือ เวลา  
 $\tau$  คือ ตัวแปรใช้ในการอินทิเกรต

ซึ่งตัวควบคุมพีไอเป็นการนำสมการ (2.11) และ (2.12) รวมกันดังสมการ (2.13)

$$v(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.13)$$

กำหนดให้  $v$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ

และสามารถแสดงโครงสร้างของสมการ (2.13) ได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์

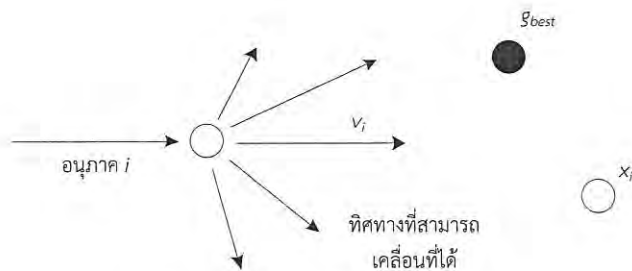
## 2.4 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เป็นการหาค่าตอบที่เหมาะสม ซึ่งได้แนวความคิดจากพฤติกรรมการหาอาหารตามธรรมชาติของฝูงสัตว์ เช่น ฝูงนก ฝูงปลา ซึ่งพฤติกรรมที่น่าสนใจของสัตว์เหล่านี้ คือ การอยู่รวมกันเป็นกลุ่มและสังคัมการอยู่เป็นกลุ่มอาศัยการปรับตัวด้วยตัวเองตามสภาพแวดล้อม โดยอาศัยการเรียนรู้คุณลักษณะที่เหมาะสมของการอยู่รวมกันภายในกลุ่ม เริ่มต้นจากปฏิสัมพันธ์จากกลุ่มย่อยๆ ไปสู่กลุ่มใหญ่ ซึ่งในปี ค.ศ. 1995 Kennedy และ Eberhart[27] ได้เสนอวิธีแบบกลุ่มอนุภาคนี้เป็นครั้งแรก โดยใช้หลักการในการหาค่าตอบด้วยการเรียนรู้และปรับตำแหน่งของอนุภาค จนกระทั่งอนุภาคหยุดเคลื่อนที่และอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม

### 2.4.1 วิธีการปรับตำแหน่งของอนุภาค

จากที่กล่าวมาพื้นฐานแนวความคิดของวิธีแบบกลุ่มอนุภาคสามารถเปรียบเป็นพฤติกรรมของสัตว์ได้ว่า สัตว์แต่ละตัวในฝูงเสมือนเป็นตำแหน่งของอนุภาค ตำแหน่งของค่าตอบที่เหมาะสมเปรียบเหมือนตำแหน่งของอาหาร โดยสัตว์แต่ละตัวกระจายตัวกันเดินทางเพื่อหาอาหาร หากสัตว์ตัวใดพบอาหารจะสื่อสารกับสัตว์ตัวอื่นๆ ในฝูง เพื่อแสดงตำแหน่งและถ้าตัวใดพบแหล่งอาหารที่มีจำนวนอาหารมากที่สุด ฝูงสัตว์จะเคลื่อนที่ไปยังที่ตำแหน่งของแหล่งอาหารนั้น เปรียบได้กับการพบค่าตอบที่เหมาะสมที่สุด สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การเคลื่อนที่ของอนุภาค

เมื่ออนุภาค  $i$  พบตำแหน่ง  $x_i$  จะทำการอัปเดตตำแหน่งของตัวเอง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งของอนุภาคตัวอื่น เพื่อหาตำแหน่งที่ดีที่สุด  $g_{best}$  ในรอบการคำนวณนั้นๆ และนำตำแหน่งที่ดีที่สุดของรอบการคำนวณเก่ามาเปรียบเทียบกับรอบการคำนวณใหม่ เพื่อคัดเลือกค่าที่ดีที่สุด ซึ่งทุกครั้งที่จบรอบการคำนวณ การเคลื่อนที่ของอนุภาค  $v_i$  จะถูกอัปเดต เพื่อเป็นทิศทางเคลื่อนที่ใหม่ของอนุภาคในรอบถัดไป การเคลื่อนที่ของอนุภาคและตำแหน่งใหม่ของอนุภาคสามารถแทนด้วยสมการ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ[35]

$$v_i^{m+1} = v_i^m + \alpha \varepsilon_1 [g_{best} - x_i^m] + \beta \varepsilon_2 [g_{best} - x_i^m] \tag{2.14}$$

และ

$$x_i^{m+1} = x_i^m + v_i^{m+1} \tag{2.15}$$

กำหนดให้

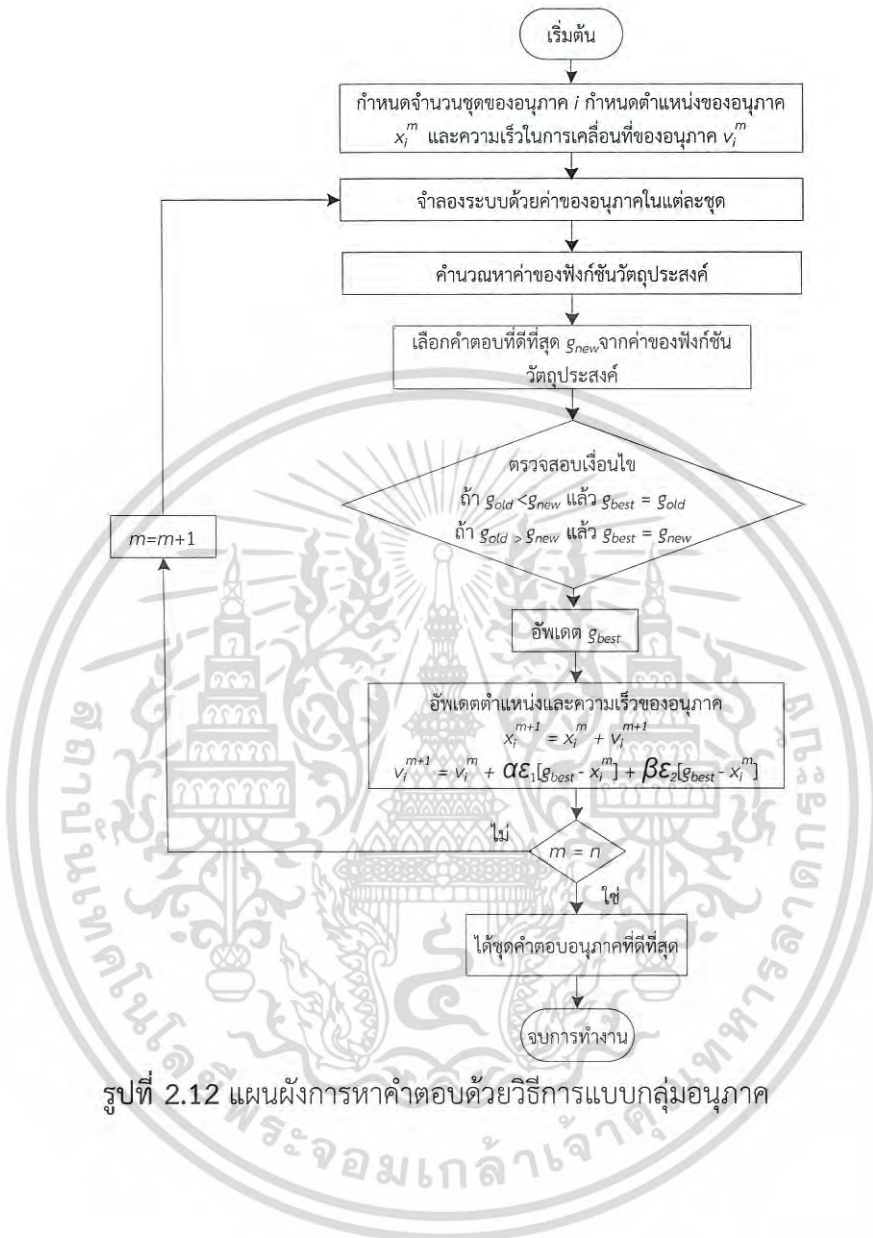
- $\alpha, \beta$  คือ ค่าคงที่ความแม่นยำ
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  คือ เวกเตอร์สุ่ม มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1
- $m$  คือ ตัวเลขบอกรอบการคำนวณ
- $i$  คือ ตัวเลขบอกลำดับของอนุภาค

#### 2.4.2 ขั้นตอนและวิธีการหาคำตอบ

1. กำหนดจำนวน  $i$  ตำแหน่ง  $x_i$  และความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาค  $v_i$  รวมทั้งจำนวนรอบการคำนวณ  $m$  และกำหนดขอบเขตของตำแหน่งที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
2. จำลองเพื่อหาผลลัพธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากอนุภาค  $i$  จำนวน และนำผลลัพธ์ของอนุภาคแต่ละตัวมาเปรียบเทียบกับกัน โดยค่าผลลัพธ์ของตำแหน่งใดที่ให้ผลลัพธ์ค่าที่ดีที่สุดคือผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในรอบนั้นๆ  $g_{new}$
3. นำผลลัพธ์มาตรวจสอบเงื่อนไขเพื่อหาตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุด ถ้าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเก่า  $g_{old}$  น้อยกว่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดใหม่  $g_{new}$  แล้ว ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของการหาคำตอบ  $g_{best}$  จะเท่ากับผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเก่า แต่ถ้าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเก่ามากกว่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดใหม่ แล้วผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของการหาคำตอบเท่ากับผลลัพธ์ที่ดีที่สุดใหม่
4. ทำการอัปเดตค่าของผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของการหาคำตอบ ตำแหน่งและความเร็วของอนุภาค
5. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนรอบของการคำนวณ  $m$  โดยตั้งจำนวนรอบไว้ที่ 50 รอบ ซึ่งหากไม่ครบตามจำนวนที่กำหนดให้เข้าทำการคำนวณตามข้อที่ 2 แต่หากครบตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดแล้วให้หยุดการทำงานและได้ค่าตำแหน่งที่ดีที่สุด โดยขั้นตอนการหาคำตอบแสดงดังแผนผังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนผังการหาคำตอบด้วยวิธีการแบบกลุ่มอนุภาค

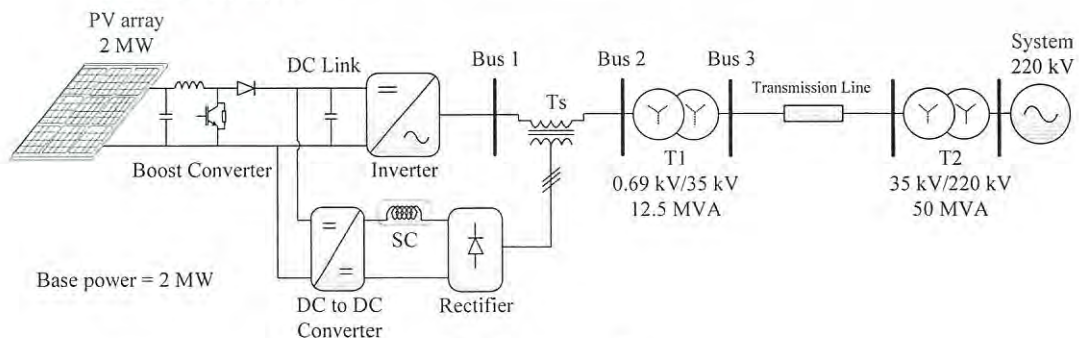
### บทที่ 3

## การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

บทนี้นำเสนอการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) เข้ากับดีซีลิงค์ (DC link) ภายในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) โดยใช้ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC to DC converter) และวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ซึ่งขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถเชื่อมต่อระหว่างดีซีลิงค์ของ PV และขั้วไฟฟ้าของ PV ด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current: AC) โดยไม่ใช้อินเวอร์เตอร์เหมือนกับการติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานสนามแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ SC ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บพลังงาน เพื่อให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV สม่าเสมอ เมื่อเกิดความผิดพลาดขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เชื่อมต่อกับบัส AC ที่ขั้วของ PV ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสความผิดพลาดโดยอัตโนมัติ ส่งผลให้ความรุนแรงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความผิดพลาด การตกของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ PV ลดน้อยลงและสามารถข้ามผ่านความผิดพลาดได้ ซึ่งตัวควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของ PV และดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดใช้ตัวควบคุมพีไอ (Proportional Integral Controller) และเพื่อให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดสามารถแลกเปลี่ยนพลังงานสะสมกับกำลังไฟฟ้าที่กริดได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมถึงสมรรถนะในการข้ามผ่านความผิดพลาดเพิ่มขึ้น ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจะถูกออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสม พร้อมทั้งแสดงประสิทธิภาพการควบคุมของ PV ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดเปรียบเทียบกับ PV ที่ติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวดด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยรูปแบบฟาร์มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำการติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในที่นำเสนอแบ่งฟาร์มเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบฟาร์มเดี่ยว และ แบบหลายฟาร์ม

### 3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบฟาร์มเดี่ยว

#### 3.1.1 ระบบศึกษา



รูปที่ 3.1 ระบบศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1 คือ ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) ขนาดพิกัด 2 MW เชื่อมต่อกับกริด

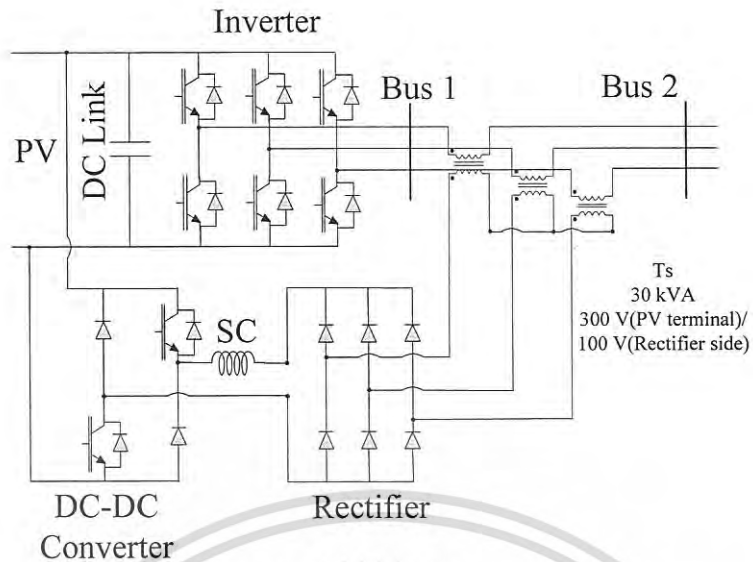
โดย PV เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าพิกัดแรงดันไฟฟ้า 220 kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า T1 และ T2 ผ่านสายส่งยาว 30 km ซึ่งพารามิเตอร์ในการจำลองของ PV ตามตารางที่ 3.1 โดยสภาวะปกติกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก PV ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้ามักมีการแกว่งและส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบ และเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ PV จะได้รับผลกระทบทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสของ PV ลดต่ำลง และทำการตัดวงจรออกจากระบบหากแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่ามาตรฐานกริดโค้ดของอิตาลีเลียน (Italian Grid Code)[37] ซึ่ง PV ต้องทนต่อสภาวะแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่ออยู่ลดลงจนถึง 20 % ของแรงดันไฟฟ้าปกติ เป็นเวลา 500 ms เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) เข้ากับดีซีลิงค์ของ PV ด้วยดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC to DC Converter) และเชื่อมต่อกับด้านไฟฟ้ากระแสสลับโดยผ่านวงจรเรียงกระแส 3 เฟส (Rectifier) และหม้อแปลงไฟฟ้า Ts ซึ่งเชื่อมอยู่ระหว่างบัสที่ 1 และบัสที่ 2 และในส่วนของวงจร SC ที่ติดตั้งแบ่งหน้าที่เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทำหน้าที่ชดเชยการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV และส่วนที่ 2 เพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ โดยระบบที่ใช้ในการศึกษาตามรูปที่ 3.1 จำลองสภาวะปกติที่เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจาก PV และจำลองสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบที่บัส 3 เป็นเวลา 150 ms

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโมดูล PV	305.23 W
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร $V_{oc}$	64.2 V
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร $I_{sc}$	5.96 A
แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด $V_{pmax}$	54.7 V
กระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด $I_{pmax}$	5.58 A
พิกัดกำลังไฟฟารวม (P)	2 MW
จำนวนโมดูลที่ต่ออนุกรม	26
จำนวนโมดูลที่ต่อขนาน	255

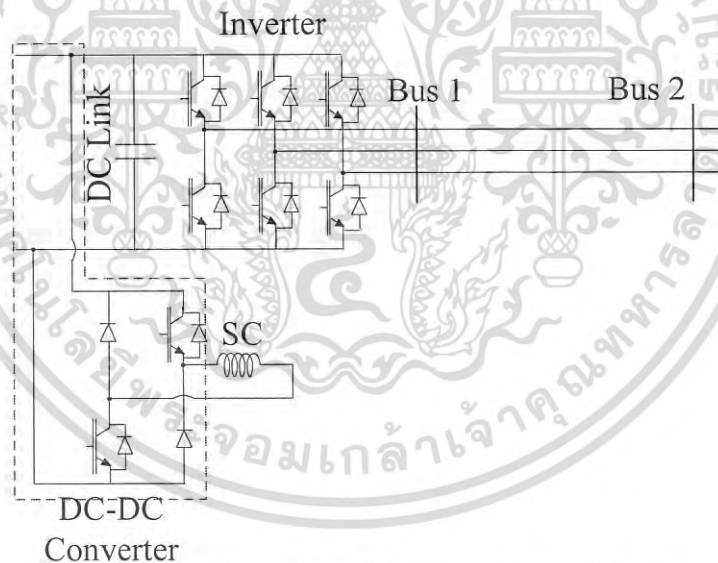
### 3.1.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของ SC

โครงสร้างวงจรไฟฟ้าของ SC ตามรูปที่ 3.2 ซึ่งติดตั้งในระบบ PV เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติของและแก้ไขปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า PV โดยแบ่งการทำงานของวงจรในการทำงานได้ออกเป็น 2 ส่วนคือ ทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติ



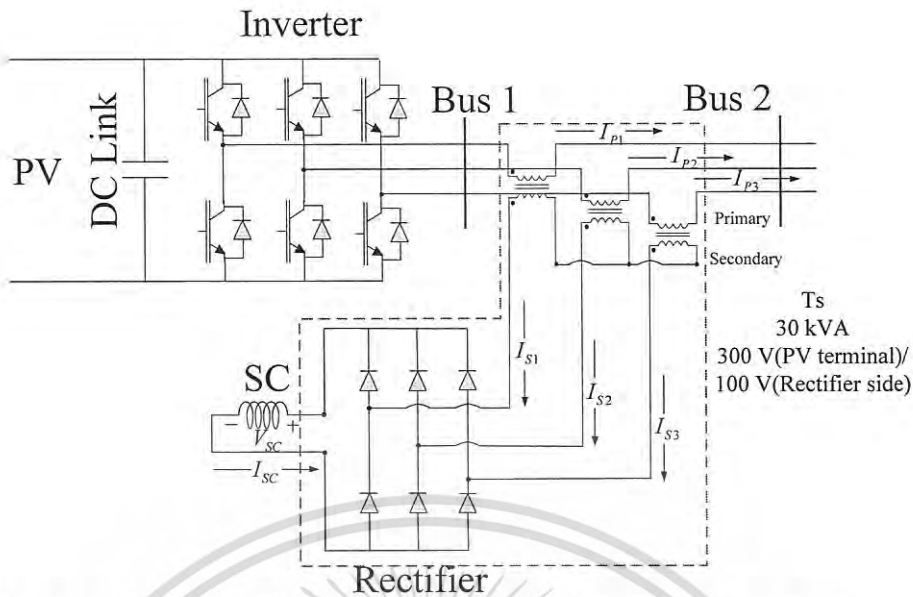
รูปที่ 3.2 วงจรไฟฟ้าของ SC

ส่วนของโครงสร้างวงจรไฟฟ้าของ SC ที่ใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ตามรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด (SC) ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) โดยดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าของ SC ซึ่งเป็นการทำงานในสภาวะปกติ



รูปที่ 3.3 วงจรไฟฟ้าของ SC ที่ใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรไฟฟ้าของ SC ที่ใช้เพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาด[38]

โครงสร้างวงจรไฟฟ้าของ SC ส่วนที่ทำหน้าที่เพิ่มความสามารถข้ามผ่านความผิดพลาด แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 วงจร SC ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส (Rectifier) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุกรม (Ts) ขนาดพิกัด 30 kVA อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า 300V/100V โดยขดลวดตัวนำยิ่งยวดทำหน้าที่จำกัดกระแสฟลัดต์เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน SC และหม้อแปลงทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้า โดยหม้อแปลงไฟฟ้าทางขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary) ต่อเข้ากับระบบกำลังไฟฟ้าโดยตรง และขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary) ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส

โดยกำหนดให้กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิในแต่ละเฟส ( $I_p$ ) คือ  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$  และ  $I_{p3}$  และกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิในแต่ละเฟส ( $I_s$ ) คือ  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$  และ  $I_{s3}$  และกำหนดให้อัตราส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าคือ  $a$  สามารถเขียนสมการอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{I_{p1}}{I_{s1}} = \frac{I_{p2}}{I_{s2}} = \frac{I_{p3}}{I_{s3}} = \frac{1}{a} \quad (3.1)$$

และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำยิ่งยวด ( $I_{sc}$ ) สามารถหาได้จาก

$$I_{sc} = \sqrt{2}I_s = a\sqrt{2}I_p \quad (3.2)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $V_{sc}$ ) สามารถหาได้จาก

$$V_{sc} = L_{sc} \frac{dI_{sc}}{dt} \quad (3.3)$$

กำหนดให้  $L_{sc}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามสมการที่ (3.2) และ (3.3) สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าระบบไฟฟ้าที่สภาวะปกติกระแสไฟฟ้า  $I_{SC}$  ที่ไหลผ่าน SC จะมีค่าคงที่ หรือ  $di_{SC}/dt$  มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้นสมการที่ (3.3) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $V_{SC}$  จะมีค่าน้อยมาก รวมถึงค่าอิมพีแดนซ์ของ SC มีค่าเท่ากันศูนย์ ในทางกลับกัน ถ้าเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน SC จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้า  $I_{SC}$  เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $V_{SC}$  ที่สูงมาก ค่าอิมพีแดนซ์ของ SC มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก ตามสมการที่ (3.4)

$$Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \tag{3.4}$$

เมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุกรม สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.5)

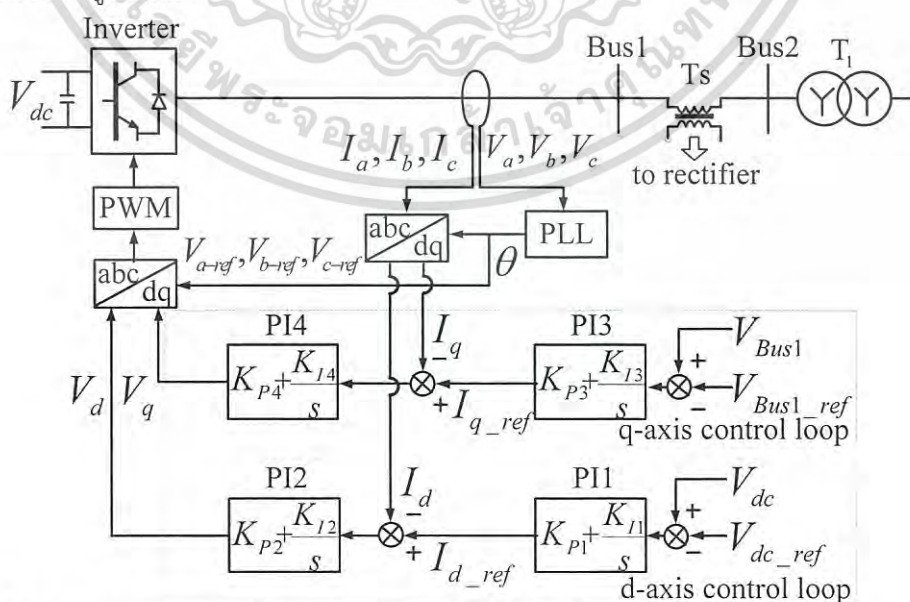
$$Z' = \frac{V_p}{I_p} = \frac{aV_{SC}}{I_{SC}/a} = a^2 Z_{SC} \tag{3.5}$$

กำหนดให้  $V_p$  คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (V)

ดังนั้น อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการจำกัดกระแสฟอลต์ในระบบ ซึ่งการจำกัดกระแสฟอลต์ในระบบเป็นไปอย่างอัตโนมัติ

### 3.1.3 การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ในระบบ PV การส่งกำลังไฟฟ้าให้กับระบบต้องผ่านอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ดังเช่นในรูปที่ 3.1 ซึ่งอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับของระบบไฟฟ้ากำลังกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงของ PV เพื่อที่จะสามารถส่งผ่านพลังงานจาก PV ให้กับระบบได้ การควบคุมอินเวอร์เตอร์ทำได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

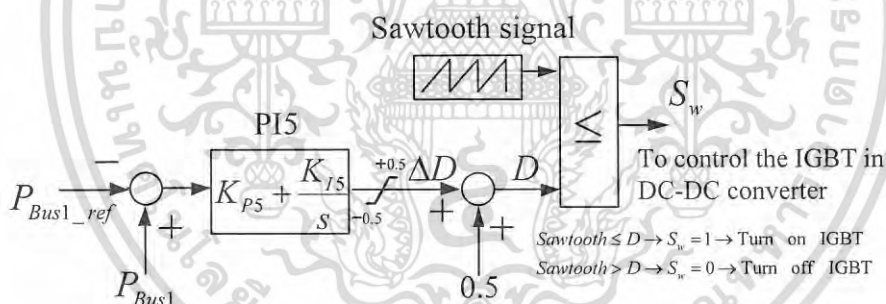
โดยเฟสล็อกคูล (Phase Lock Loop: PLL) ใช้วัดมุมของการแปลงจากค่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส  $V_a, V_b, V_c$  ด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า T1 สัญญาณเอาต์พุตของเฟสล็อกคูลเป็นสัญญาณมุม  $\theta$  ซึ่งใช้สำหรับแปลงตัวแปรเฟส  $a, b, c$  ไปเป็นตัวแปรของแกนตรง  $d$  และแกนตั้งฉาก  $q$

ตัวควบคุมพีไอที่ 1 (PI1) ใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์  $V_{dc}$  และสร้างสัญญาณอ้างอิงของกระแสไฟฟ้าในแกนตรง  $I_{d\_ref}$  นำไปเทียบกับกระแสไฟฟ้าจริงในแกนตรง  $I_d$  ที่ได้มาจากการแปลงกระแสไฟฟ้า 3 เฟส  $I_a, I_b, I_c$  ซึ่งวัดค่าจากด้านแรงดันต่ำของ T1 สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในแกนตรง  $V_{d\_ref}$  ซึ่งเป็นเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอที่ 2 PI2 ที่ทำหน้าที่ควบคุม  $V_{dc}$

ตัวควบคุมพีไอที่ 3 (PI3) ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1  $V_{Bus1}$  ซึ่งสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแกนตั้งฉาก  $I_{q\_ref}$  ขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตระหว่างแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 1  $V_{Bus1}$  และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสที่ 1  $V_{Bus1\_ref}$  ตัวควบคุมพีไอที่ 4 (PI4) สร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในแกนตั้งฉาก  $V_{q\_ref}$  ทั้ง  $V_{d\_ref}$  และ  $V_{q\_ref}$  ถูกเปลี่ยนกลับเป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเฟส  $V_{a\_ref}, V_{b\_ref}, V_{c\_ref}$  หลังจากนั้น แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 3 เฟสนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยที่ความถี่ 2500 เฮิรตซ์ เพื่อสร้างสัญญาณขับเกตของสวิตช์ควบคุมสำหรับควบคุมพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse width modulation: PWM) ของอินเวอร์เตอร์

### 3.1.4 การออกแบบตัวควบคุมดีซีฟีดแบ็คคอนเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.3 ชุดดีซีฟีดแบ็คคอนเวอร์เตอร์ของวงจร SC ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างขดลวดตัวนำยิ่งยวดกับกริด เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต สามารถควบคุมได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบควบคุมของดีซีฟีดแบ็คคอนเวอร์เตอร์

ตัวควบคุมพีไอ 5 (PI5) ซึ่งควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่บัส 1  $P_{Bus1}$  โดยการปรับค่าความเบี่ยงเบนของดิวิตีไซเคิล  $\Delta D$  ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมพีไอ 5 สร้างสัญญาณความเบี่ยงเบนของดิวิตีไซเคิล ซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตระหว่างกำลังไฟฟ้าบัสที่ 1  $P_{Bus1}$  และกำลังไฟฟ้าอ้างอิงบัสที่ 1  $P_{Bus1\_ref}$  ตามลำดับ โดยดิวิตีไซเคิล  $D$  ใช้สำหรับการควบคุม PWM ของดีซีฟีดแบ็คคอนเวอร์เตอร์ เมื่อดิวิตีไซเคิลมากกว่า 0.5 พลังงานถูกชาร์จจากกริดเข้าสู่ขดลวดตัวนำยิ่งยวด เมื่อดิวิตีไซเคิลน้อยกว่า 0.5 พลังงานดิสชาร์จออกจากขดลวดตัวนำยิ่งยวดสู่กริด

### 3.1.5 เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมและขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้เหมาะสม

ในหัวข้อนี้นำเสนอเทคนิคการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์ และดีซีบูตีซีคอนเวอร์เตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้มีความเหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดของ PV
2. เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV
3. ลดขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้มีขนาดเล็กและใช้พลังงานเริ่มต้นของ SC ในการทำเสถียรภาพต่ำสุด

โดยแบ่งการพิจารณาในแต่ละเทอมได้เป็นดังนี้

#### 3.1.5.1 การเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดให้ดีขึ้น

เมื่อเกิดความผิดพลาดใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นสาเหตุทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตกอย่างมาก เพื่อปรับปรุงความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการทำให้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) ของการเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วบัสที่ 1 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระหว่างเกิดความผิดพลาด  $IAE\Delta V_{Bus1}$  ต่ำที่สุด ตามสมการด้านล่าง

$$IAE\Delta V_{Bus1} = \int_{t_0}^{t_f} |V_{Bus1\_ref} - V_{Bus1}| dt \quad (3.6)$$

กำหนดให้

$V_{Bus1}$	คือ แรงดันไฟฟ้าบัสที่ 1
$V_{Bus1\_ref}$	คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสที่ 1
$t_0$	คือ เวลาเริ่มต้นของการจำลอง (s)
$t_f$	คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

ซึ่งในการศึกษา ใช้แรงดันไฟฟ้ากริดโค้ดที่ยอมรับ [37] โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต้องสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไม่ให้ตกเกิน 80 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าปกติเป็นเวลา 500 ms

#### 3.1.5.2 การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

ขณะสภาวะการทำงานปกติของขดลวดตัวนำยิ่งยวดซึ่งทำหน้าที่รักษากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์คงที่ โดยการทำให้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ของการเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าจริงบัสที่ 1  $IAE\Delta P_{Bus1}$  ต่ำที่สุด ดังสมการด้านล่าง

$$IAE\Delta P_{Bus1} = \int_{t_0}^{t_f} |P_{Bus1\_ref} - P_{Bus1}| dt \quad (3.7)$$

กำหนดให้

$P_{Bus1}$	คือ กำลังไฟฟ้าบัสที่ 1
$P_{Bus1\_ref}$	คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงบัสที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $t_0$  คือ เวลาเริ่มต้นของการจำลอง (s)  
 $t_f$  คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

### 3.1.5.3 หาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ต่ำสุดที่ทำให้พลังงานสะสมเริ่มต้นต่ำสุด

พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด  $E_{SC0}$  แทนด้วยสมการ

$$E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \quad (3.8)$$

- กำหนดให้  $L_{SC}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (H)  
 $I_{SC0}$  คือ ค่ากระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด (A)  
 ค่าของ  $L_{SC}$  นั้นถูกทำการหาค่าให้ต่ำสุด เพื่อให้ได้พลังงานสะสมเริ่มต้นต่ำสุดในการทำเสถียรภาพ

### 3.1.5.4 สมการของปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม

โดยสมการดังกล่าวสร้างจากการนำสมการที่ (3.6) (3.7) และ (3.8) มารวมกันได้เป็นตั้งสมการที่ (3.9)

$$F = w_1 \cdot IAE\Delta V_{Bus1} + w_2 \cdot IAE\Delta P_{Bus1} + w_3 \cdot E_{SC0} \quad (3.9)$$

ซึ่งสมการที่ (3.9) จะถูกทำให้ค่าต่ำที่สุดเพื่อให้ได้ระบบที่ออกแบบ ได้ผลตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยมีพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบ คือ พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอทั้ง 10 ตัว  $K_{P_i}$  และ  $K_{I_i} = 1, \dots, 5$  ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดพร้อมกับพลังงานสะสมเริ่มต้น

- 1)  $0.01 \leq L_{SC} \leq 15$  H (ขอบเขตของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด)
- 2)  $0.01 \leq I_{SC0} \leq 5$  kA (ขอบเขตของค่ากระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด)
- 3)  $0.01 \leq K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}, K_{P4}, K_{P5} \leq 20$  (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ)
- 4)  $0.01 \leq K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}, K_{I4}, K_{I5} \leq 20$  (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ)

ค่าถ่วงน้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำหนดโดยการคำนวณค่าคำตอบของแต่ละพจน์ของสมการปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม ให้มีค่าอยู่ในระดับเดียวกัน โดยพจน์ที่ 1 และ 2 มีหน่วยที่ใช้ในการหาค่าตอบเป็น pu ซึ่งค่าคำตอบอยู่ในระดับหลักหน่วย และในพจน์ที่ 3 เป็นพจน์ของพลังงานซึ่งอยู่ในระดับเมกะจูล ค่าคำตอบอยู่ในระดับ 10 ยกกำลัง 6 โดยค่าที่ใช้กับแต่ละพจน์เป็นดังนี้  $w_1$  เท่ากับ 4  $w_2$  เท่ากับ 5 และ  $w_3$  เท่ากับ  $(1/15) \times 10^{-6}$  ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมใช้วิธีแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [15] เพื่อหาค่าตอบใน (3.9)

ในการศึกษาครั้งนี้ ระบบที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายใน PV แบบหลายฟาร์มและทำการออกแบบด้วยวิธีที่น่าเสนอจะถูกนำไปทำการเปรียบเทียบกับระบบ PV ที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานใดและระบบ PV ที่ติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด ซึ่งติดตั้งเข้ากับบัสที่ 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

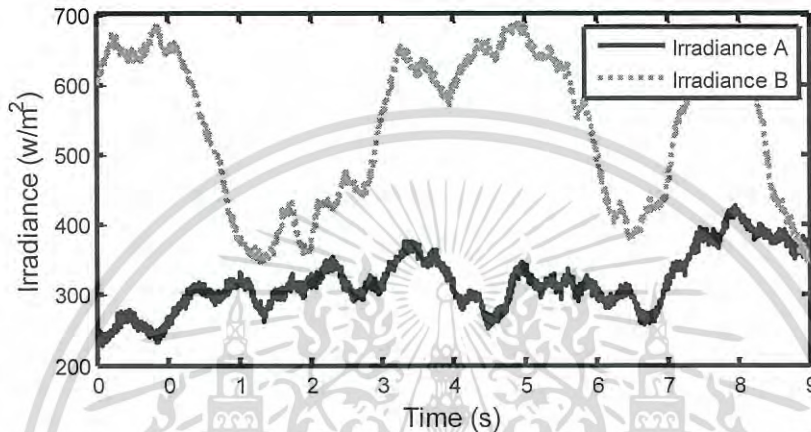
และออกแบบด้วยวัตถุประสงค์เดียวกัน โดยใช้สมการ (3.9) หาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO และเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystem โดยในแต่ละระบบแทนด้วยสัญลักษณ์

ระบบ PV ที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานใด แทนด้วย PV

ระบบ PV ที่ติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด แทนด้วย PV with SMES

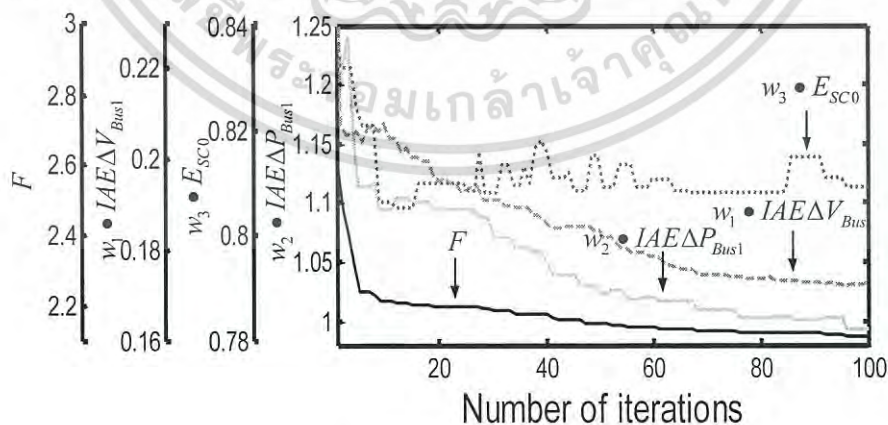
ระบบ PV ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด แทนด้วย PV with SC

### 3.1.6 ผลการจำลอง



รูปที่ 3.7 รูปแบบความเข้มแสงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การปรับตั้งค่าอย่างเหมาะสมของพารามิเตอร์ขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายใต้กรณีของความเข้มแสง A แสดงด้วยรูปที่ 3.7 ขณะที่ความผิดพลาด 3 เฟสเกิดขึ้นช่วงเวลาที่บัส 3 ณ เวลาที่ 3 วินาทีเป็นเวลา 150 มิลลิวินาที โดยปกติความเข้มแสงสูงสุดที่ตกกระทบพื้นโลกประมาณ 700 วัตต์ต่อตารางเมตร[39],[40] เนื่องจากต้องการออกแบบระบบให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งภายใน PV สามารถรักษาเสถียรภาพได้ แม้ PV จะมีการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ จึงใช้ความเข้มแสงรูปแบบ A ที่มีลักษณะความเข้มแสงที่ต่ำในการหาค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 3.8 เส้นโค้งลู่เข้า

รูปที่ 3.8 แสดงกราฟเส้นโค้งลู่เข้าของแต่ละพจน์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในการศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมของระบบที่ทำกรออกแบบ โดยเปรียบเทียบระบบ PV PV with SC และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PV with SMES ตามลำดับ ซึ่งค่าที่เหมาะสมของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมในการทำเสถียรภาพ และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของกรณี PV with SC และกรณี PV with SMES แสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ

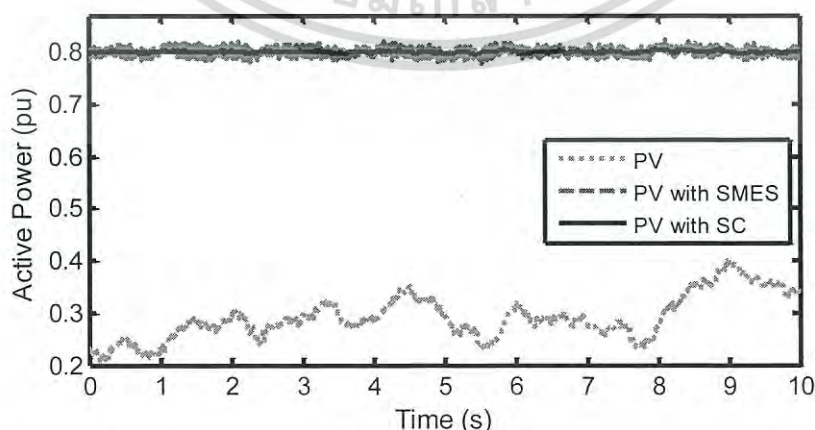
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

ตัวแปร	PV with SC	PV with SMES
$L_{SC}$ (H)	7.62	12.02
$I_{SC0}$ (kA)	1.79	1.77
$E_{SC0}$ (MJ)	12.20	18.82

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ

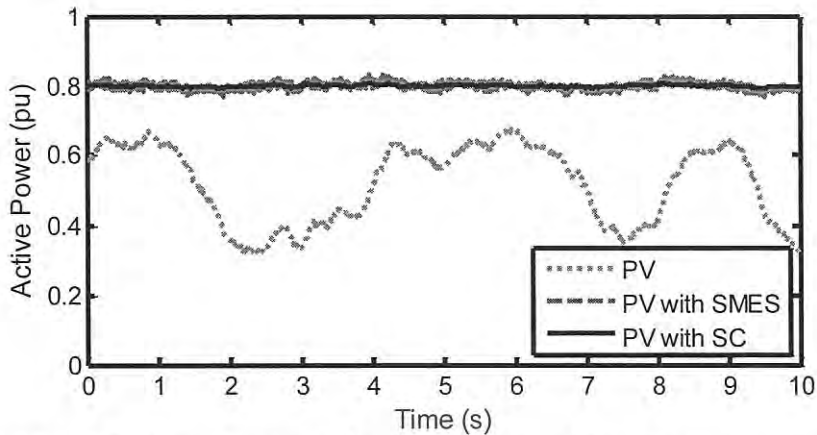
ตัวควบคุมพีไอ	PV with SC	PV with SMES
$K_{P1}, K_{I1}$	4.31, 5.49	19.5, 0.56
$K_{P2}, K_{I2}$	18.54, 9.74	13.53, 5.31
$K_{P3}, K_{I3}$	11.23, 8.28	5.12, 7.35
$K_{P4}, K_{I4}$	7.47, 14.60	0.36, 11.25
$K_{P5}, K_{I5}$	1.08, 18.52	0.50, 5.13

พารามิเตอร์ในตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าทั้งค่าความเหนี่ยวนำและพลังงานสะสมเริ่มต้นของกรณี PV with SC ที่ต่ำกว่ากรณี PV with SMES ซึ่งการแสดงผลสมรรถนะในการทำให้กำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอของกรณี PV with SC ใช้ความเข้มแสงในการทดสอบทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ A และ B แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ที่บัส 1 ภายใต้การจำลองของความเข้มแสงในรูปแบบ A และ B แสดงดังรูปที่ 3.9, 3.10 ตามลำดับ



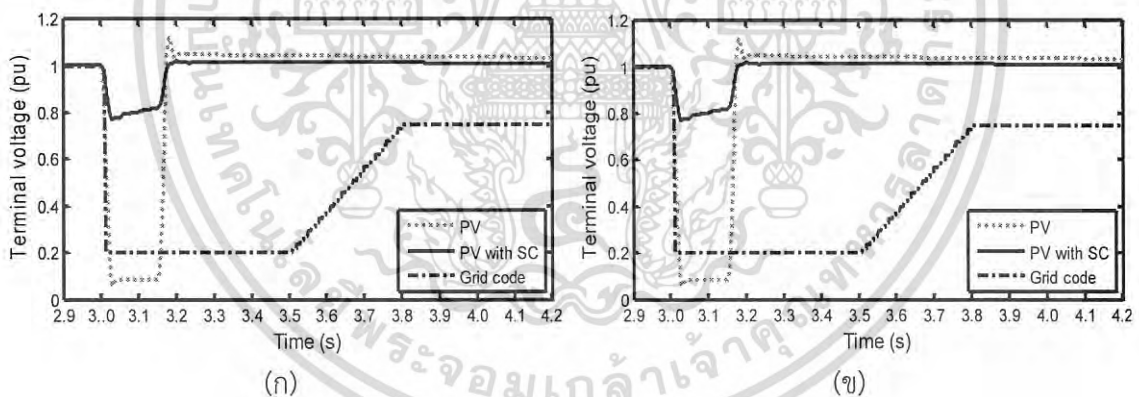
รูปที่ 3.9 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้การจำลองของความเข้มแสง A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้การจำลองของความเข้มแสง B

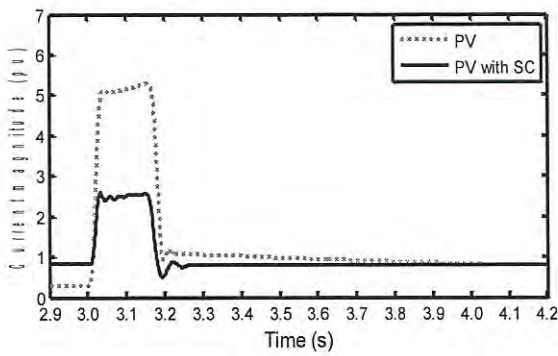
ซึ่งภายใต้การจำลองของความเข้มแสงรูปแบบ A กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีของ PV มีลักษณะคล้ายกับความเข้มแสง A ในทางกลับกันในกรณีของ PV with SC และ PV with SMES สามารถชดเชยพลังงานทำให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีลักษณะคงที่สม่ำเสมอได้ ซึ่งกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นไปตามค่าของกำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ตั้งไว้ คือ 0.8 pu และลักษณะกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มแสง B ทั้งกรณีของ PV with SC และ PV with SMES ที่มีลักษณะของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสม่ำเสมอและมีการเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อย



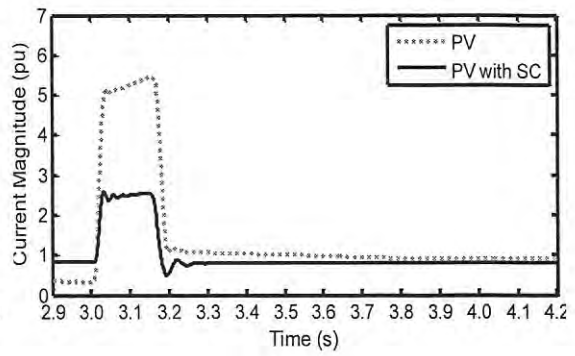
รูปที่ 3.11 แรงดันไฟฟ้าบัสที่ 1 (ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B

ในส่วนของการเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบศึกษาที่เกิดความผิดพลาด 3 เฟส ขึ้นที่บัส 3 ที่เวลา 3 วินาทีเป็นเวลา 150 มิลลิวินาที ภายใต้การจำลองของความเข้มแสงแดด A และ B เป็นการเปรียบเทียบเฉพาะกรณี PV และกรณี PV with SC เนื่องจากศึกษาของบทนี้กำหนดให้ SMES ไม่ทำงานในช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ ซึ่งในกรณีของ PV with SMES จะมีการตอบสนองในขณะที่เกิดความผิดพลาดเช่นเดียวกับกรณี PV ซึ่งรูปที่ 3.11 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากริดโค้ด โดยในส่วนของกรณีของ PV แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของบัสที่ 1 ตกลงอย่างเห็นได้ชัด ไม่สามารถผ่านช่วงกำหนดที่กริดโค้ดยอมรับได้ ส่งผลให้กรณี PV ไม่สามารถข้ามผ่านความผิดพลาดได้ ซึ่งตรงข้ามกับกรณีของ PV with SC แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสามารถผ่านกริดโค้ดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



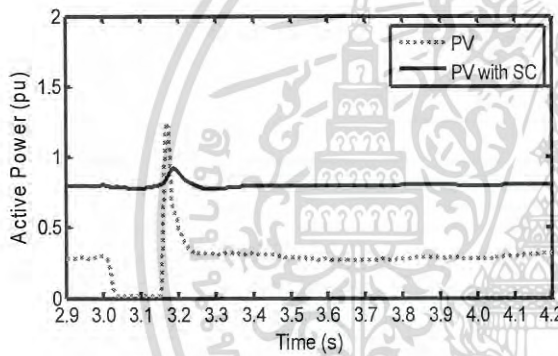
(ก)



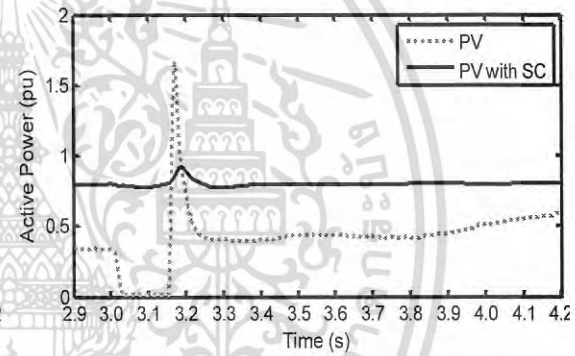
(ข)

รูปที่ 3.12 กระแสไฟฟ้าบัสที่ 1 (ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B

รูปที่ 3.12 อธิบายถึงกระแสไฟฟ้าที่บัส 1 กรณี PV with SC สามารถจำกัดกระแสลัดวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับกรณี PV รูปที่ 3.13 แสดงกำลังไฟฟ้าบัสที่ 1 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในกรณีของ PV แต่ในกรณี PV with SC การแกว่งนั้นลดลงอย่างมาก ซึ่งเห็นได้จากเส้นกราฟมีความสม่ำเสมอและเกือบคงที่เป็นเส้นตรง

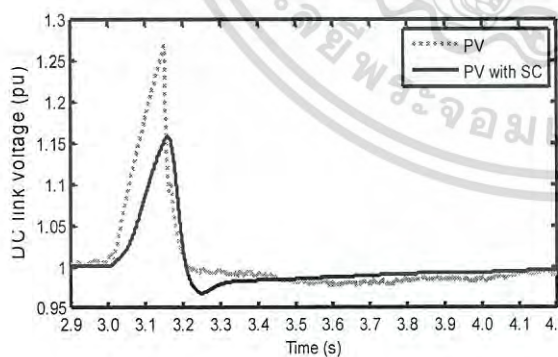


(ก)

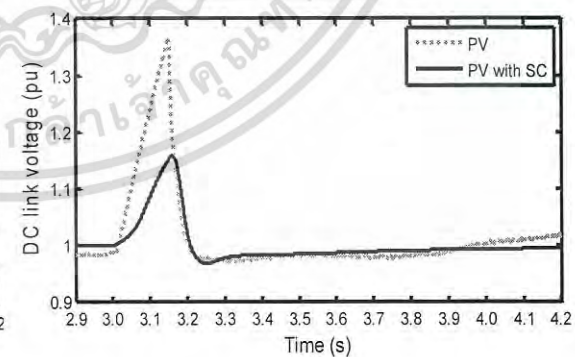


(ข)

รูปที่ 3.13 กำลังไฟฟ้าบัสที่ 1 (ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B



(ก)



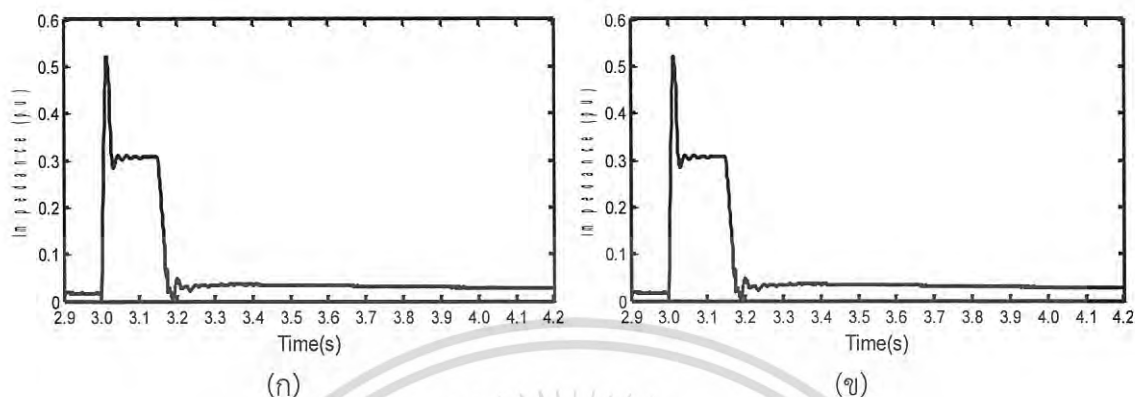
(ข)

รูปที่ 3.14 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B

ในรูปที่ 3.14 แสดงแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในกรณีของ PV แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์มีการเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน ตรงข้ามกับกรณีของ PV with SC ที่สามารถลดการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าได้อย่างทันท่วงทีและมีประสิทธิภาพ ในส่วนของอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ปรากฏด้าน AC ระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ในขณะเกิดความผิดพลาด แสดงดังรูปที่ 3.15 อิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นสูงในช่วงเวลาแรกที่เกิดความผิดพลาดและลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยค่าอิมพีแดนซ์พื้นฐาน ( $Z_{base}$ ) มีค่าเท่ากับ  $0.2381 \Omega$



รูปที่ 3.15 อิมพีแดนซ์ระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ขณะเกิดความผิดพลาด

(ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B

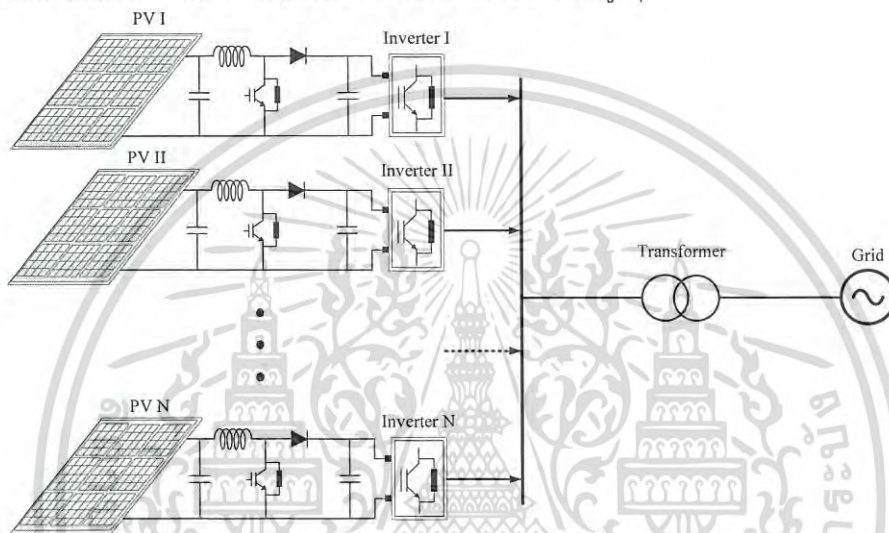
### 3.1.7 สรุป

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดด้วยวงจรที่นำเสนอและนำไปติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จากกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถชดเชยการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต จำกัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและลดการตกของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วได้
2. การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ โดยใช้หลักการทำให้ค่าต่ำสุดของการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าตก และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดนั้นสามารถทำงานได้ดีในความเข้มแสงรูปแบบต่างๆ รวมทั้งในสภาวะเกิดความผิดพลาดด้วย
3. ผลการศึกษายืนยันได้ว่า PV with SC ใช้ค่าความเหนี่ยวนำน้อยกว่ากรณี PV with SMES แต่ให้สมรรถนะที่ดีกว่าและความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดของ PV with SC สามารถผ่านกริดได้ทุกเงื่อนไขของการเกิดความผิดพลาด

### 3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลายฟาร์ม

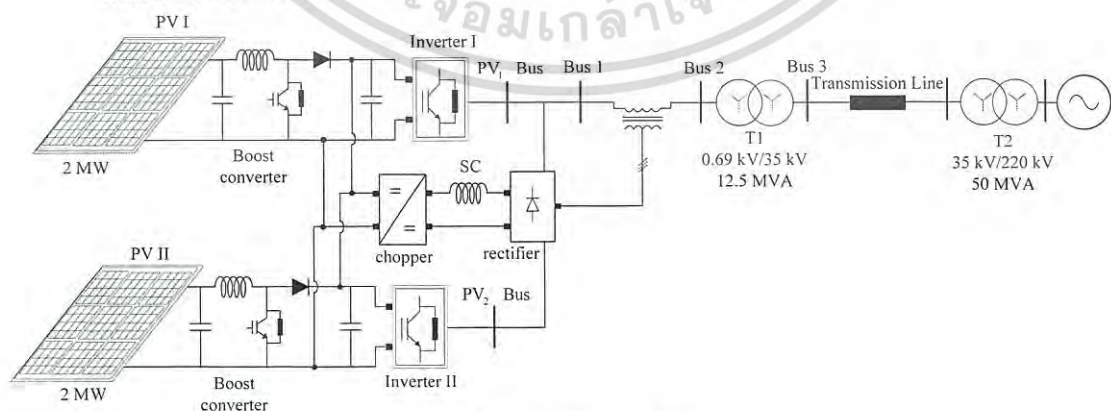
ระบบโซล่าฟาร์ม (Solar Farm System) หรือที่เรียกว่าโรงงานผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Power Station) เป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่ออกแบบมาสำหรับผลิตกำลังไฟฟ้าจำนวนมากโดยมีพิกัดที่สูง ในระดับเมกะวัตต์ (MW) เมื่อต้องการใช้กำลังการผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มากขึ้น ระบบของ PV ต้องมีขนาดพิกัดที่ใหญ่ขึ้น ย่อมมีการติดตั้งจำนวน PV ที่มากขึ้น จึงแบ่งพื้นที่เป็นหน่วยย่อย เพื่อสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละหน่วยแล้วนำมารวมกันเป็นระบบ PV ขนาดใหญ่ เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าให้กับระบบดังรูปที่ 3.16 ซึ่งหัวข้อนี้จะแสดงการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันของ PV เพื่อลดปัญหาเรื่องของงบประมาณที่สูงของ SC และเพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานของ SC ให้ได้ประโยชน์สูงสุด



รูปที่ 3.16 ระบบโซล่าฟาร์ม

โดยระบบที่ใช้ศึกษาและออกแบบเป็นระบบ PV 2 ฟาร์มที่ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกัน เพื่อทำเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV และเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดพลาดให้กับ PV

#### 3.2.1 ระบบศึกษา



รูปที่ 3.17 ระบบศึกษา

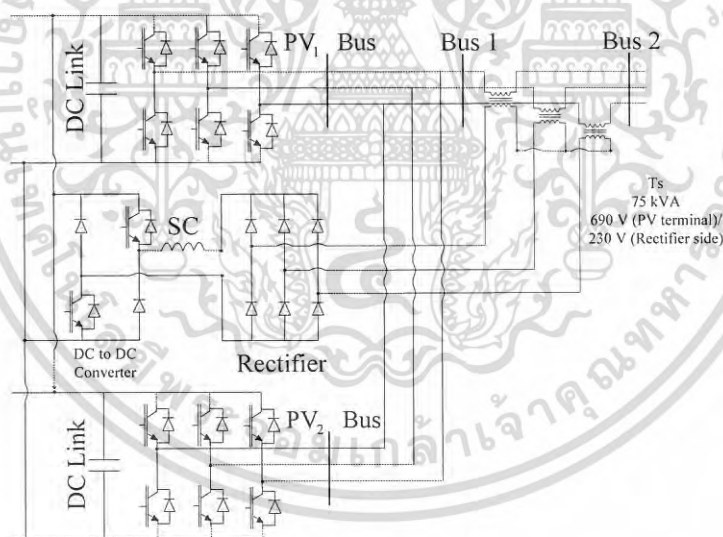
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.17 คือ ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) ขนาดพิกัดแต่ละฟาร์ม 2 MW จำนวน 2 ฟาร์มเชื่อมต่อกับระบบโดยพารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโมดูล PV	305.23 W
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร $V_{oc}$	64.2 V
กระแสไฟฟ้ลัดวงจร $I_{sc}$	5.96 A
แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด $V_{pmax}$	54.7 V
กระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด $I_{pmax}$	5.58 A
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวม (P)	2 MW
จำนวนโมดูลที่ต่ออนุกรม	26
จำนวนโมดูลที่ต่อขนาน	255

### 3.2.2 แบบจำลองวงจรทางไฟฟ้าของ SC

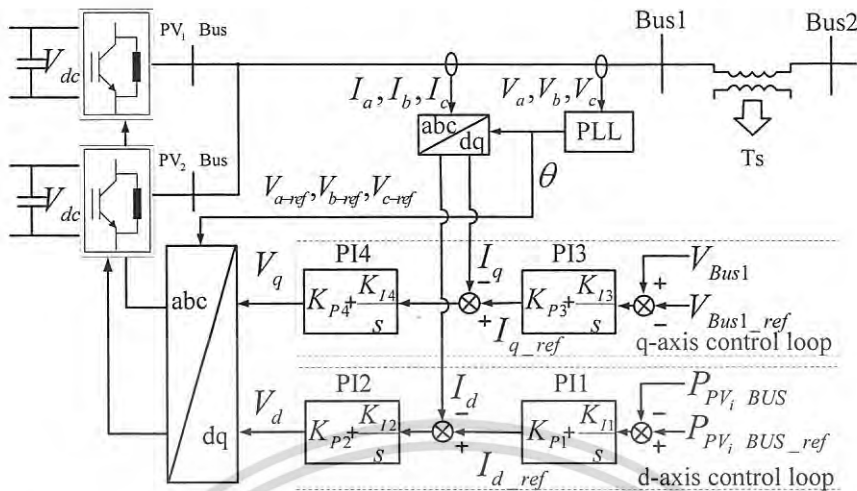


รูปที่ 3.18 วงจร SC

รูปที่ 3.18 แสดงวงจรของขดลวดตัวนำยิ่งยวดเชื่อมต่อกับดีซีลิงค์แต่ละตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ และเชื่อมต่อกับด้านไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า  $T_s$  ขนาดพิกัด 75 kVA ซึ่งหลักการทำงานได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



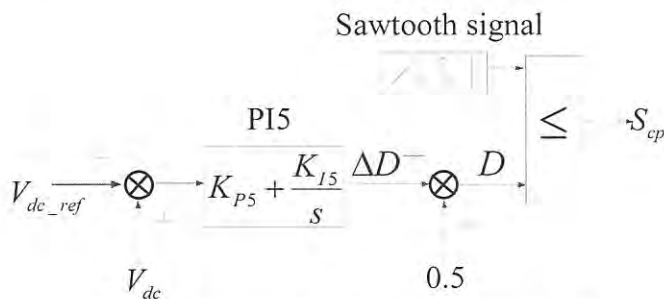
รูปที่ 3.19 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

รูปที่ 3.19 แสดงระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop: PLL) ใช้วัดมุมของการแปลงจากค่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส  $V_a, V_b, V_c$  ด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า T1 สัญญาณเอาร์ทัพของเฟสล็อกคูลูปเป็นสัญญาณมุม  $\theta$  ซึ่งใช้สำหรับแปลงตัวแปรเฟส  $a, b, c$  ไปเป็นตัวแปรของแกนตรง  $d$  และแกนตั้งฉาก  $q$

ตัวควบคุมพีไอที่ 1 (PI1) ใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาร์ทัพ  $P_{PV_i BUS}$  โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิง  $P_{PV_i BUS\_ref}$  ได้เอาร์ทัพเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงแกนตรง  $I_{d\_ref}$  แล้วนำไปเทียบกับกระแสไฟฟ้าจริงในแกนตรง  $I_d$  ที่ได้มาจากการแปลงกระแสไฟฟ้า 3 เฟส  $I_a, I_b, I_c$  ซึ่งวัดค่าจากด้านแรงดันต่ำของ T1 แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในแกนตรง  $V_{d\_ref}$  ซึ่งเป็นเอาร์ทัพของตัวควบคุมพีไอที่ 2 (PI2) ที่ทำหน้าที่ควบคุม  $P_{PV_i BUS}$

ตัวควบคุมพีไอที่ 3 (PI3) ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1  $V_{Bus1}$  ซึ่งสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแกนตั้งฉาก  $I_q$  ขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตระหว่าง  $V_{Bus1}$  และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสที่ 1  $V_{Bus1\_ref}$  ตัวควบคุมพีไอที่ 4 (PI4) สร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในแกนตั้งฉาก  $V_{q\_ref}$  ทั้ง  $V_{d\_ref}$  และ  $V_{q\_ref}$  ถูกเปลี่ยนกลับเป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเฟส  $V_{a\_ref}, V_{b\_ref}, V_{c\_ref}$  หลังจากนั้น แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 3 เฟสนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยที่มีความถี่ 2500 เฮิรตซ์ เพื่อสร้างสัญญาณขับเกตของสวิทช์ควบคุมสำหรับควบคุมพัลส์วิตท์มอดูเลชั่น (Pulse width modulation: PWM) ของอินเวอร์เตอร์

3.2.4 การออกแบบตัวควบคุมดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.20 ระบบควบคุมดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.20 แสดงการควบคุมของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ โดยตัวควบคุมพีไอที่ 5 (PI5) ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์  $V_{dc}$  ซึ่งถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง  $V_{dc\_ref}$  สร้างเอาท์พุทเป็นสัญญาณความเบี่ยงเบนของดิวิตีไซเคิล  $\Delta D$  เพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ โดยดิวิตีไซเคิล  $D$  ใช้สำหรับการควบคุม PWM ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ เมื่อดิวิตีไซเคิลมากกว่า 0.5 พลังงานถูกชาร์จเข้าสู่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ ถ้าหากดิวิตีไซเคิลน้อยกว่า 0.5 พลังงานดิสชาร์จออกจากขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์

โดยในการออกแบบตัวควบคุมพีไอและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด ใช้หลักการวัตถุประสงค์และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.1.5 ซึ่งขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอทั้ง 18 ตัว  $K_{pi}$  และ  $K_{ji}, i=1, \dots, 5$  ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดพร้อมกับพลังงานสะสมเริ่มต้น ในการหาค่าที่เหมาะสม กำหนดดังต่อไปนี้

- 1)  $0.01 \leq L_{sc} \leq 10 \text{ H}$  (ขอบเขตของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด)
- 2)  $0.01 \leq I_{sc0} \leq 5 \text{ kA}$  (ขอบเขตของค่ากระแสเริ่มต้นขดลวดของตัวนำยิ่งยวด)
- 3)  $0.01 \leq K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}, K_{p4}, K_{p5} \leq 20$  (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ)
- 4)  $0.01 \leq K_{i1}, K_{i2}, K_{i3}, K_{i4}, K_{i5} \leq 20$  (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ)

ค่าถ่วงน้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำหนดโดยการคำนวณค่าคำตอบของแต่ละพจน์ของสมการปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม ให้มีค่าอยู่ในระดับเดียวกัน โดยพจน์ที่ 1 และ 2 มีหน่วยที่ใช้ในการหาค่าตอบเป็น pu ซึ่งค่าคำตอบอยู่ในระดับหลักหน่วย และในพจน์ที่ 3 เป็นพจน์ของพลังงานซึ่งอยู่ในระดับเมกะจูล ค่าคำตอบอยู่ในระดับ 10 ยกกำลัง 6 โดยค่าที่ใช้กับแต่ละพจน์เป็นดังนี้  $w_1$  เท่ากับ 4  $w_2$  เท่ากับ 5 และ  $w_3$  เท่ากับ  $(1/20) \times 10^{-6}$

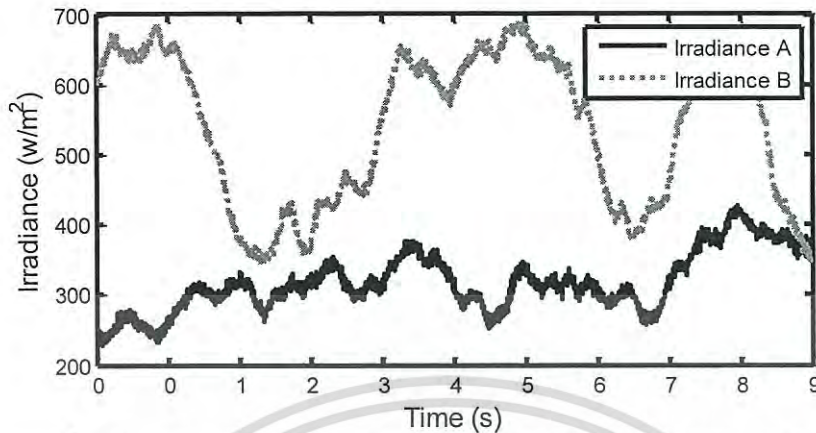
ในการศึกษาครั้งนี้ ระบบที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายใน PV และทำการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอจะถูกนำไปทำการเปรียบเทียบกับระบบ PV ที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานใดและระบบ PV ที่ติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด ซึ่งติดตั้งเข้ากับบัสที่ 1 และออกแบบด้วยวัตถุประสงค์เดียวกัน โดยใช้สมการ (3.9) หาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO และเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystem โดยในแต่ละระบบแทนด้วยสัญลักษณ์

ระบบ PV ที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานใด แทนด้วย PV

ระบบ PV ที่ติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด แทนด้วย PV with SMES

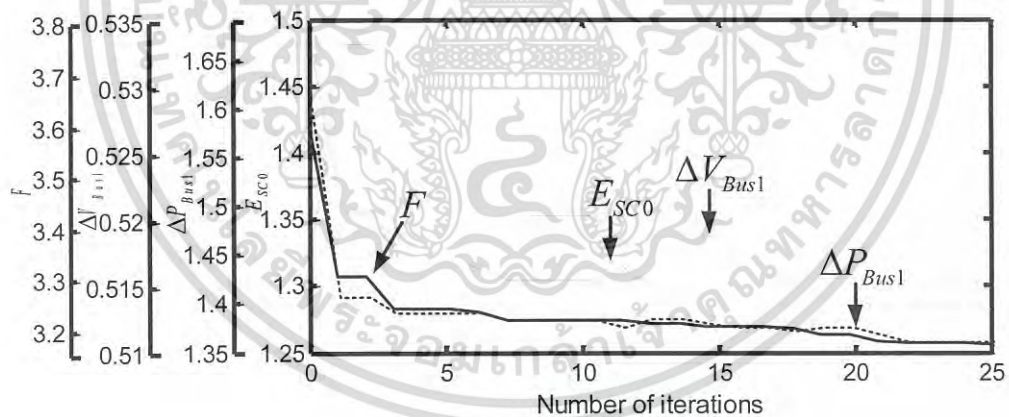
ระบบ PV ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด แทนด้วย PV with SC

## 3.2.5 ผลการจำลอง



รูปที่ 3.21 รูปแบบความเข้มแสงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การปรับตั้งค่าอย่างเหมาะสมของพารามิเตอร์ขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายใต้กรณีของความเข้มแสง A แสดงด้วยรูปที่ 3.21 ขณะที่ความผิดพลาด 3 เฟสเกิดขึ้นช่วงเวลาที่บัส 3 ณ เวลาที่ 3 วินาทีเป็นเวลา 150 มิลลิวินาที ในการออกแบบโดยใช้ความเข้มแสง A ที่มีความเข้มแสงต่ำ เนื่องจากต้องการออกแบบระบบให้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งภายในสามารถรักษาเสถียรภาพได้ แม้ PV จะมีการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ต่ำก็ตาม



รูปที่ 3.22 เส้นโค้งลู่เข้า

รูปที่ 3.22 แสดงกราฟเส้นโค้งลู่เข้าของแต่ละพจน์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในการศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมของระบบที่ทำการออกแบบ โดยเปรียบเทียบระบบ PV PV with SC และ PV with SMES ตามลำดับ ซึ่งค่าที่เหมาะสมของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมในการทำเสถียรภาพ และพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ไอของกรณี PV with SC และกรณี PV with SMES แสดงดังตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.6 ตามลำดับ

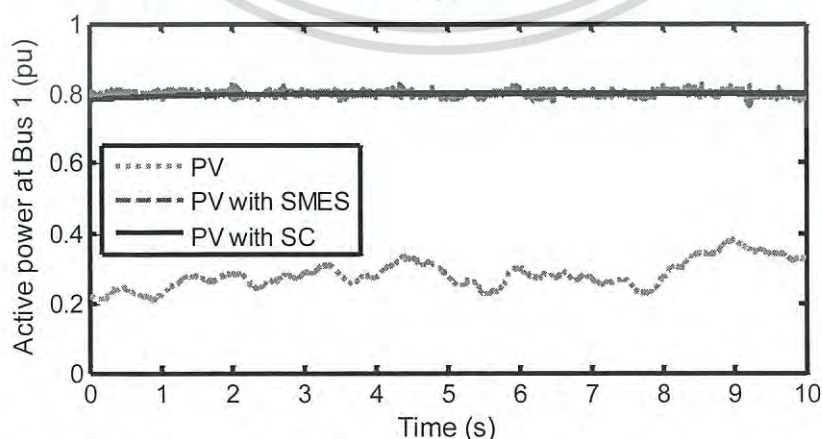
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

ตัวแปร	PV with SC	PV with SMES
$L_{SC}$ (H)	3.18	9.56
$I_{SC0}$ (kA)	4.03	2.51
$E_{SC0}$ (MJ)	25.84	30.11

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ

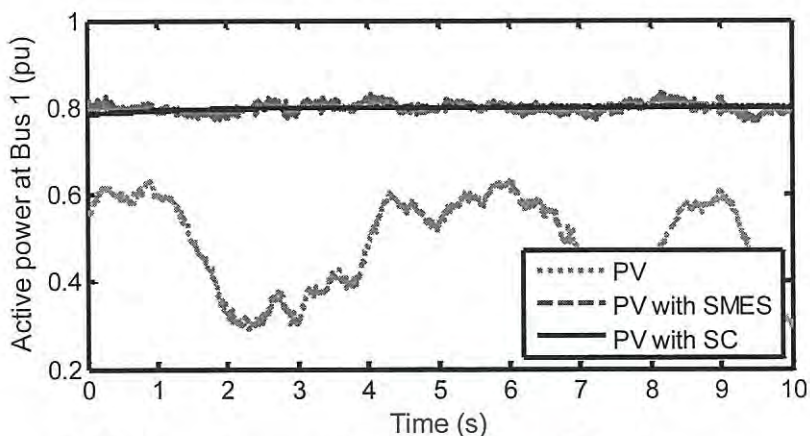
ตัวควบคุมพีไอ	PV with SC		PV with SMES
	PV <sub>1</sub> inverter	PV <sub>2</sub> inverter	
$K_{P1}, K_{I1}$	12.50 11.04	6.25 12.90	4.82 5.51
$K_{P2}, K_{I2}$	11.62 15.85	15.70 12.55	17.63 11.70
$K_{P3}, K_{I3}$	14.09 5.39	17.90 12.17	10.98 7.97
$K_{P4}, K_{I4}$	4.43 13.33	8.44 9.99	8.11 14.39
$K_{P5}, K_{I5}$	15.11 9.58		0.56 4.99

พารามิเตอร์ในตารางที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าทั้งค่าความเหนี่ยวนำและพลังงานสะสมเริ่มต้นของกรณี PV with SC ที่ต่ำกว่ากรณี PV with SMES ซึ่งการแสดงผลสมรรถนะในการทำให้กำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอของกรณี PV with SC ใช้ความเข้มแสงในการทดสอบทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ A และ B แสดงดังรูปที่ 3.21 โดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ที่บัส 1 ภายใต้การจำลองของความเข้มแสงในรูปแบบ A และ B แสดงดังรูปที่ 3.23 และ 3.24 ตามลำดับ



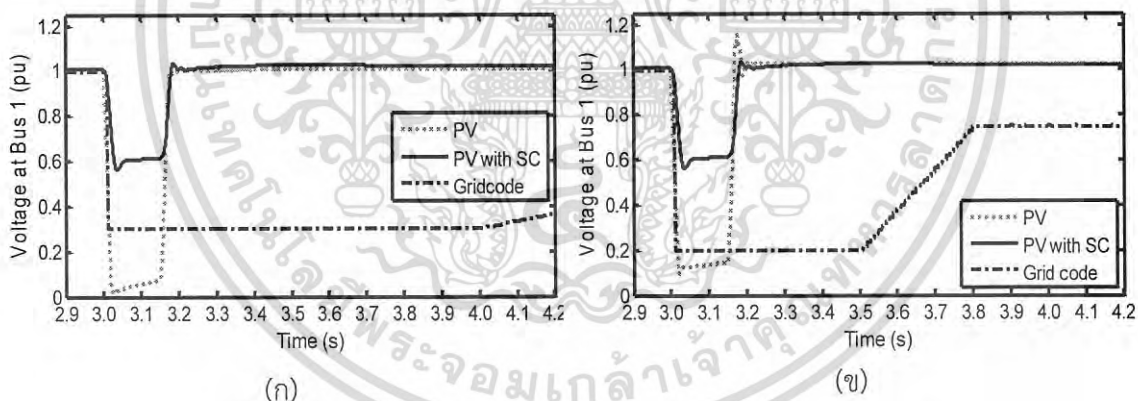
รูปที่ 3.23 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้การจำลองของความเข้มแสง A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้การจำลองของความเข้มแสง B

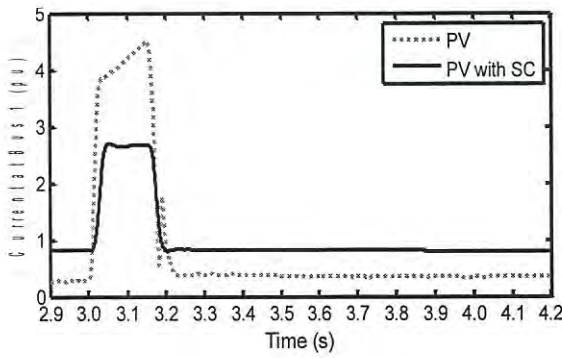
ซึ่งภายใต้การจำลองของความเข้มแสงรูปแบบ A กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีของ PV มีลักษณะคล้ายกับความเข้มแสง A ในทางกลับกันในกรณีของ PV with SC และ PV with SMES สามารถชดเชยพลังงานทำให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีลักษณะคงที่สม่ำเสมอได้ ซึ่งกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นไปตามค่าของกำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ตั้งไว้ คือ 0.8 pu และลักษณะกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มแสง B ทั้งกรณีของ PV with SC และ PV with SMES ที่มีลักษณะของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสม่ำเสมอและมีการเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อย



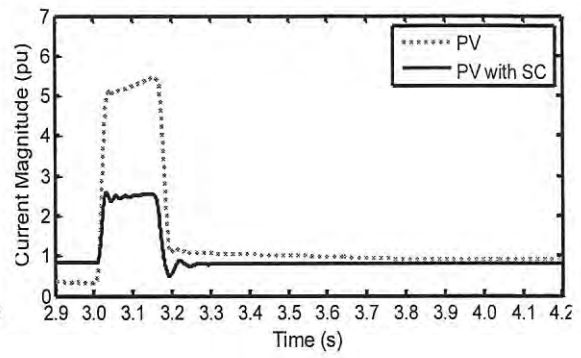
รูปที่ 3.25 แรงดันไฟฟ้าบัสที่ 1 (ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B

ในส่วนของการเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบศึกษาที่เกิดความผิดพลาด 3 เฟส ชั้นที่บัส 3 ที่เวลา 3 วินาทีเป็นเวลา 150 มิลลิวินาที ภายใต้การจำลองของความเข้มแสงแดด A และ B เป็นการเปรียบเทียบเฉพาะกรณี PV และกรณี PV with SC เนื่องจากศึกษาของบทนี้กำหนดให้ SMES ไม่ทำงานในช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ ซึ่งในกรณีของ PV with SMES จะมีการตอบสนองในขณะที่เกิดความผิดพลาดเช่นเดียวกับกรณี PV ซึ่งรูปที่ 3.25 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากริดโค้ด โดยในส่วนของกรณีของ PV แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของบัสที่ 1 ตกลงอย่างเห็นได้ชัด ไม่สามารถผ่านช่วงกำหนดที่กริดโค้ดยอมรับได้ ส่งผลให้กรณี PV ไม่สามารถข้ามผ่านความผิดพลาดได้ ซึ่งตรงข้ามกับกรณีของ PV with SC แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสามารถผ่านกริดโค้ดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



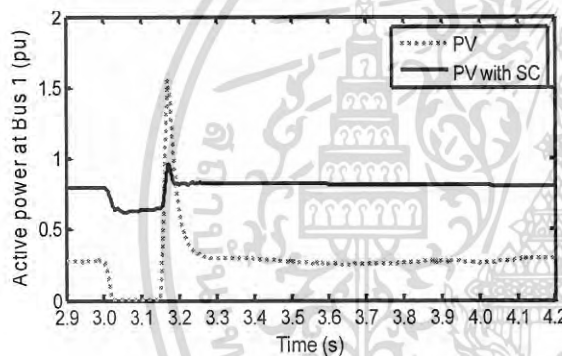
(ก)



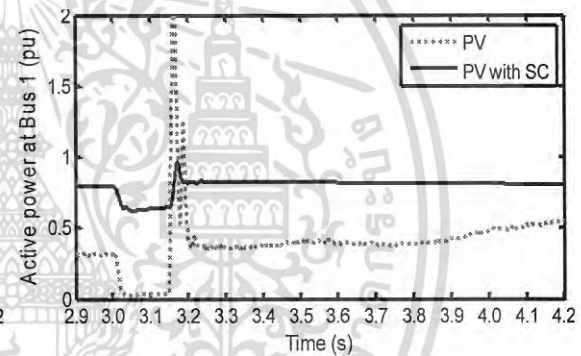
(ข)

รูปที่ 3.26 กระแสไฟฟ้าบัสที่ 1 (ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B

รูปที่ 3.26 อธิบายถึงกระแสไฟฟ้าที่บัส 1 กรณี PV with SC สามารถจำกัดกระแสลัดวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับกรณี PV รูปที่ 3.27 แสดงกำลังไฟฟ้าบัสที่ 1 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในกรณีของ PV แต่ในกรณี PV with SC การแกว่งนั้นลดลงอย่างมาก ซึ่งเห็นได้จากเส้นกราฟมีความสม่ำเสมอและเกือบคงที่เป็นเส้นตรง

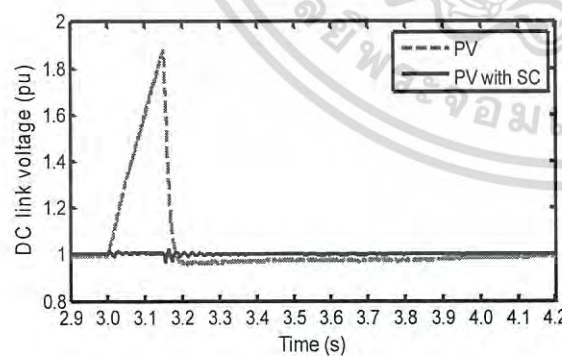


(ก)

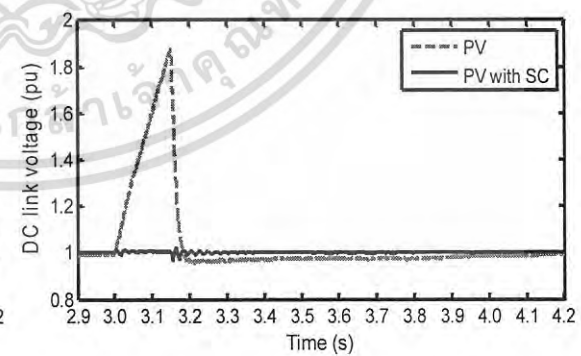


(ข)

รูปที่ 3.27 กำลังไฟฟ้าบัสที่ 1 (ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B



(ก)

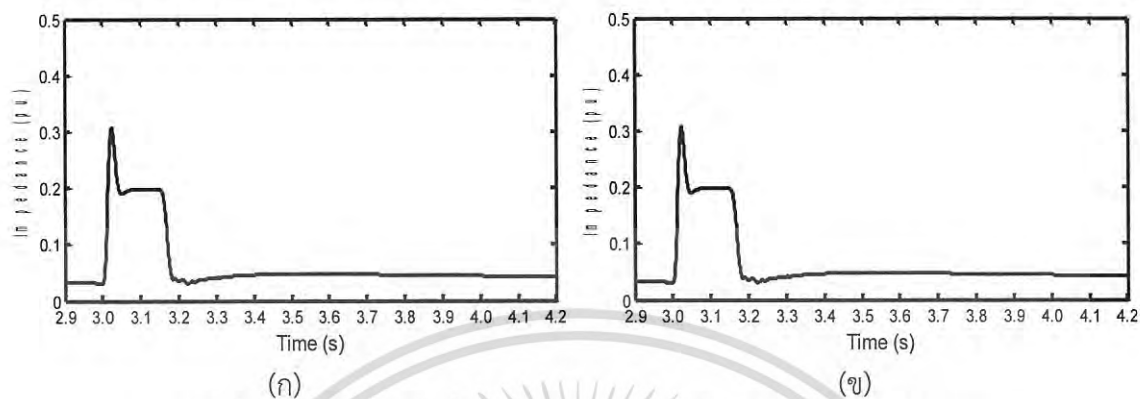


(ข)

รูปที่ 3.28 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ (ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B

รูปที่ 3.28 แสดงแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในกรณีของ PV แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์มีการเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน ตรงข้ามกับกรณีของ PV with SC ที่สามารถลดการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าได้อย่างทันท่วงทีและมีประสิทธิภาพ ในส่วนของอิมพีแดนซ์ของขดลวด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำยิ่งยวดที่ปรากฏด้าน AC ระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ในขณะที่เกิดความผิดปกติ แสดงดังรูปที่ 3.29 อิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นสูงในช่วงเวลาแรกที่เกิดความผิดปกติและลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยค่าอิมพีแดนซ์พื้นฐาน ( $Z_{base}$ ) มีค่าเท่ากับ  $0.1587 \Omega$



รูปที่ 3.29 อิมพีแดนซ์ระหว่างบัสที่ 1 และ 2 ขณะเกิดความผิดปกติ

(ก) ความเข้มแสง A (ข) ความเข้มแสง B

### 3.2.6 สรุป

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่นำเสนอติดตั้งเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกันสำหรับการเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบ 2 ฟาร์ม จากกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

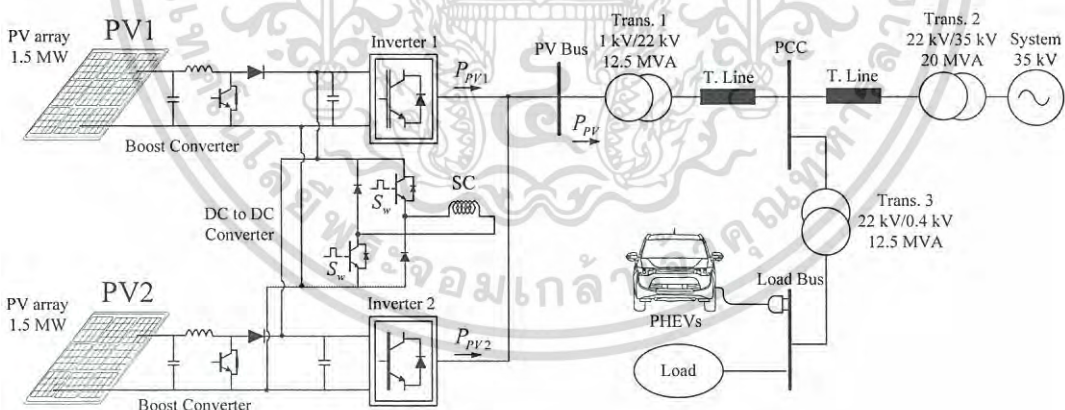
1. ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบไฟฟ้าสามารถลดเซกการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต จำกัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและลดการตกของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วได้
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถใช้งานขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกัน ในการทำเสถียรภาพได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดจำนวน SC และต้นทุนที่ใช้กับระบบ PV ได้อีกด้วย
3. จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ากรณีของ PV with SC ใช้ค่าความเหนี่ยวนำและพลังงานสะสมเริ่มต้นที่ต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพมากกว่ากรณีของ PV with SMES และความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติของ PV with SC ผ่านกริดได้ทุกเงื่อนไขของการเกิดความผิดปกติ

## บทที่ 4

# การติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า

บทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil : SC) ในรูปแบบใหม่ ซึ่งติดตั้ง SC ระหว่างดีซีลิงค์ (DC link) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) เพื่อแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในระบบ ด้วยการใช้ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) เป็นวงจรเชื่อมต่อ ซึ่ง SC สามารถใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ร่วมกับ PV ได้ นอกจากนั้น PV ที่ใช้ SC ร่วมกันยังสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบได้อีกด้วย อินเวอร์เตอร์และดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ของ PV ใช้การควบคุมจากตัวควบคุมพีไอ (PI controller) พร้อมกับออกแบบเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอและความเหนี่ยวนำของ SC เพื่อทำให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเกินน้อยที่สุด ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า PV ที่ติดตั้ง SC ร่วมกัน มีขนาดของค่าความเหนี่ยวนำของ SC ที่น้อยกว่า และให้ประสิทธิภาพการทำให้กำลังไฟฟ้าเรียบจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเหมือนกับการติดตั้ง SMES ที่ขั้วของ PV นอกจากนี้ยังให้ประสิทธิภาพการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีกว่า SMES

### 4.1 ระบบศึกษา



รูปที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดแบบร่วมกัน

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับที่ PV บัส พารามิเตอร์ของ PV แต่ละตัวตามตารางที่ 4.1 ขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอิน (Plug-in Hybrid Electrical Vehicles: PHEVs) และโหลดต่อที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถยนต์ไฟฟ้าและโหลด กำลังไฟฟ้าเอาท์พุทจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นสาเหตุทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการยินยอมจากผู้เกี่ยวข้อง หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

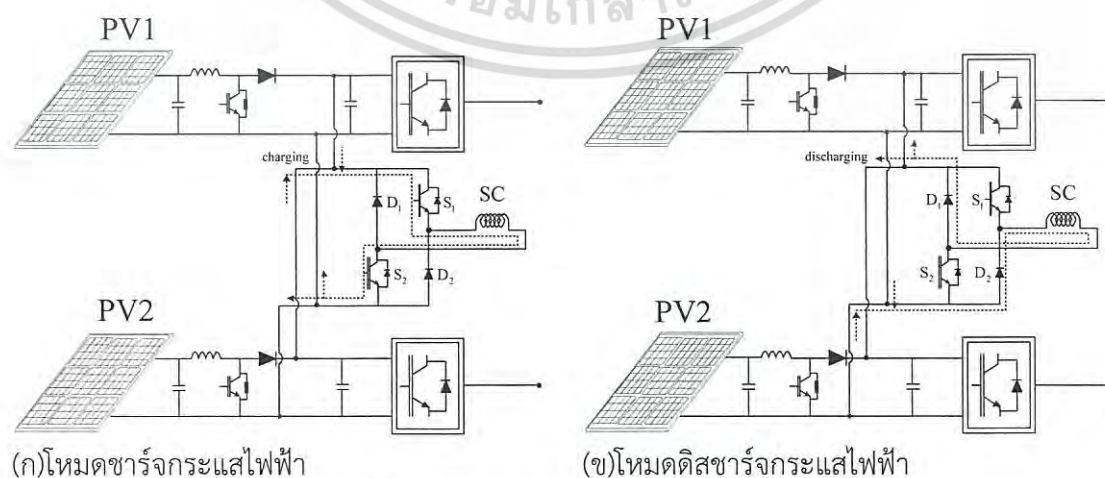
การแกว่งของกำลังไฟฟ้าและทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาพของอากาศ และหากในระบบมีการเชื่อมต่อของ PHEVs กับระบบเพื่อชาร์จพลังงาน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกที่บัส PCC ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกินอาจทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต่อกับระบบเสียหายได้ ดังนั้นจำเป็นต้องรักษาและควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ในมาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า [8] ซึ่งทั้งปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่งผลเสียต่อทั้งคุณภาพและเสถียรภาพไฟฟ้าของระบบ

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโมดูล PV	305.23 W
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร $V_{oc}$	64.2 V
กระแสไฟฟ้ลัดวงจร $I_{sc}$	5.96 A
แรงดันไฟฟ้าที่กําลังไฟฟ้าสูงสุด $V_{Pmax}$	54.7 V
กระแสไฟฟ้าที่กําลังไฟฟ้าสูงสุด $I_{Pmax}$	5.58 A
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวม (P)	1.5 MW
จำนวนโมดูลที่ต่ออนุกรม	11
จำนวนโมดูลที่ต่อขนาน	447

#### 4.2 วงจรทางไฟฟ้าของ SC

โครงสร้างของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ใช้ในระบบ มีหน้าที่เก็บและจ่ายพลังงานเพื่อชดเชยการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ซึ่ง SC ติดตั้งอยู่ระหว่างดีซีลิงค์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยผ่านวงจรดีซีบูตัสคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งการควบคุมการทำงานในการชาร์จและดีสชาร์จพลังงานของ SC กับ PV ด้วยสัญญาณสวิตช์  $S_w$  ซึ่งหลักการทำงานสามารถอธิบายการเป็นการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.2



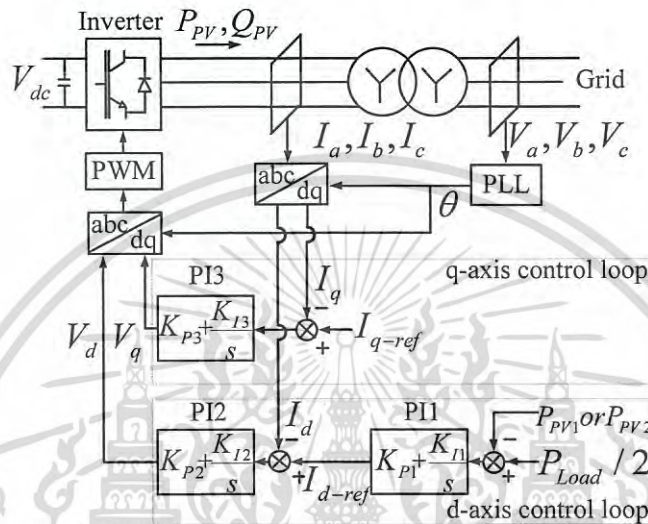
รูปที่ 4.2 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) โดยในโหมดของการชาร์จกระแสไฟฟ้า สวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  ทำงาน พลังงานจะถูกชาร์จและเก็บไว้ในขดลวดตัวนำยิ่งยวด และในโหมดของการดิสชาร์จกระแสไฟฟ้า สวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  ไม่ทำงาน กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทางไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  แทนเพื่อทำการดิสชาร์จพลังงานออกจากขดลวดตัวนำยิ่งยวด

#### 4.3 การออกแบบตัวควบคุมและเทคนิคการออกแบบที่เหมาะสม

##### 4.3.1 การออกแบบตัวควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

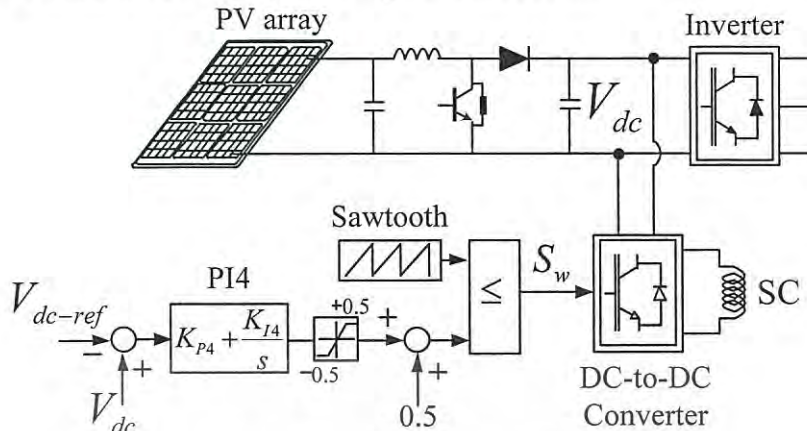


รูปที่ 4.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

รูปที่ 4.3 อธิบายการควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของ PV ใช้เฟสล็อกคูล (Phase Lock Loop : PLL) ในการวัดมุมของการแปลงจากแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( $V_a, V_b, V_c$ ) สัญญาณเอาต์พุตของเฟสล็อกคูลคือมุม  $\theta$  ซึ่งใช้สำหรับการแปลงตัวแปรเฟส ( $a, b, c$ ) ไปเป็นตัวแปรแกนตรง ( $d$ ) และแกนตั้งฉาก ( $q$ )

การควบคุมอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยลูปควบคุมแกน  $d$  และลูปควบคุมแกน  $q$  ในลูปควบคุมแกน  $d$  คือ เอาต์พุตกำลังไฟฟ้าจริงของ PV1 และ PV2 ( $P_{PV}$ ) ถูกควบคุมให้เท่ากับความต้องการโหลดรวม ( $P_{Load}$ ) ด้วยตัวควบคุมพีไอที่ 1 (PI1) สมมติให้ PV แต่ละตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าครึ่งหนึ่งของความต้องการโหลดรวม  $P_{PV1} = P_{PV2} = P_{Load} / 2$  สัญญาณอ้างอิงของกระแสไฟฟ้าแกน  $d$  ( $I_{d-ref}$ ) รับค่ามาจาก PI1 แล้วเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าจริงในแกน  $d$  ( $I_d$ ) ความแตกต่างระหว่าง  $I_{d-ref}$  และ  $I_d$  นำไปเป็นสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมพีไอที่ 2 (PI2) ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าแกน  $d$  ( $V_{d-ref}$ ) สร้างมาจาก PI2 ในลูปควบคุมแกน  $q$  ตัวควบคุมพีไอที่ 3 (PI3) ใช้ควบคุมเอาต์พุตของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของ PV ซึ่งสัญญาณอินพุตของ PI3 เป็นค่าความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงแกน  $q$  ( $I_{q-ref}$ ) และกระแสไฟฟ้าแกน  $q$  ( $I_q$ ) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าแกน  $q$  ( $V_q$ ) สามารถสร้างมาจาก PI3 ในการศึกษานี้เอาต์พุตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมีค่าเป็นศูนย์ นั่นหมายความว่า  $I_{q-ref}$  เท่ากับศูนย์

### 4.3.2 การออกแบบตัวควบคุมของดีซีดีซีคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.4 การควบคุมดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

รูปที่ 4.4 แสดงตัวควบคุมพีไอของดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ซึ่งใช้แทนด้วยตัวควบคุมพีไอที่ 4 (PI4) ซึ่งทำหน้าที่รักษาแรงดันดีซีลิงค์ ( $V_{dc}$ ) ของ PV สัญญาณเอาต์พุตของ PI4 เป็นค่าการเบี่ยงเบนของตัวดีไอเซลล์ ( $\Delta D$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับความต่างระหว่าง  $V_{dc}$  และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงดีซีลิงค์ ( $V_{dc-ref}$ ) ตัวดีไอเซลล์ ( $D$ ) ถูกสร้างด้วยการบวกค่า 0.5 กับ  $\Delta D$  สัญญาณขั้วเกต ( $S_w$ ) ของสวิตช์ในดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์สร้างด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณพื้นเล็ยกับตัวดีไอเซลล์

### 4.4 เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมและขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสม

ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ความเหนียวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดและพลังงานสะสมเริ่มต้นให้มีความเหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบ ดังนี้

1. สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ได้
2. สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดได้
3. ลดขนาดของขดลวดตัวนำยิ่งยวดให้มีขนาดเล็กและใช้พลังงานเริ่มต้นของ SC ในการทำเสถียรภาพต่ำสุด

#### 4.4.1 ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

ในการออกแบบต้องการทำให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ออกจาก PV น้อยที่สุด และต้องการให้แรงดันไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐานและมีการแกว่งน้อยที่สุด ซึ่งออกแบบได้โดยใช้ การทำให้ต่ำสุดของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) ของการเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัส ถูกพิจารณาตามสมการด้านล่าง

$$IAE_{PCC} = \int_{t_0}^{t_f} (|P_{PV} - P_{Load}| + |V_{PCC-ref} - V_{PCC}|) dt \quad (4.1)$$

กำหนดให้	$P_{PV}$	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV
	$P_{Load}$	คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ
	$V_{PCC}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC
	$V_{PCC-ref}$	คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่บัส PCC
	$t_0$	คือ เวลาเริ่มต้นของการจำลอง (s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t_s$  คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้มาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า KEPCO ซึ่งต้องรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC ให้อยู่ในช่วง  $\pm 3\%$  ของแรงดันไฟฟ้าปกติ[8]

4.4.2 หาค่าความเหนียวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ต่ำสุดที่ทำให้พลังงานสะสมเริ่มต้นต่ำสุด

พลังงานสะสมของ SC ( $E_{SC0}$ ) ซึ่งสมการของพลังงานสามารถเขียนแทนได้ดังนี้

$$E_{SC0} = \frac{1}{2} L_{SC} I_{SC0}^2 \quad (4.2)$$

กำหนดให้  $L_{SC}$  คือ ค่าความเหนียวนำของ SC (H)

$I_{SC0}$  คือ ค่ากระแสเริ่มต้นของ SC (A)

4.4.3 สมการของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม

ในการออกแบบระบบให้มีความเหมาะสม สามารถทำได้ด้วยการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งได้จากการรวมรวมกันของ (4.1) และ (4.2) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = IAE_{PCC} + E_{SC0} \quad (4.3)$$

ซึ่งสมการ (4.3) จะถูกทำให้ค่าต่ำที่สุดเพื่อให้ได้ระบบที่ออกแบบตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการด้วยวิธี PSO โดยมีพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบ ประกอบด้วย พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอทั้ง 10 ตัว  $K_{P_i}$  และ  $K_{I_i}$ ,  $i = 1, \dots, 5$  ค่าความเหนียวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวดพร้อมกับพลังงานสะสมเริ่มต้น

- 1)  $0.01 \leq L_{SC} \leq 10$  H (ขอบเขตของค่าความเหนียวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด)
- 2)  $0.01 \leq I_{SC0} \leq 10$  kA (ขอบเขตของค่ากระแสเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด)
- 3)  $0.01 \leq K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}, K_{P4}, K_{P5} \leq 10$  (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ)
- 4)  $0.01 \leq K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}, K_{I4}, K_{I5} \leq 15$  (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ)

ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ จะทำการเปรียบเทียบกับระบบ PV ที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน และระบบ PV ที่ติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด ที่ PV บัส ซึ่งใช้การออกแบบเช่นเดียวกับระบบที่นำเสนอ โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทนในแต่ละระบบเป็นดังนี้

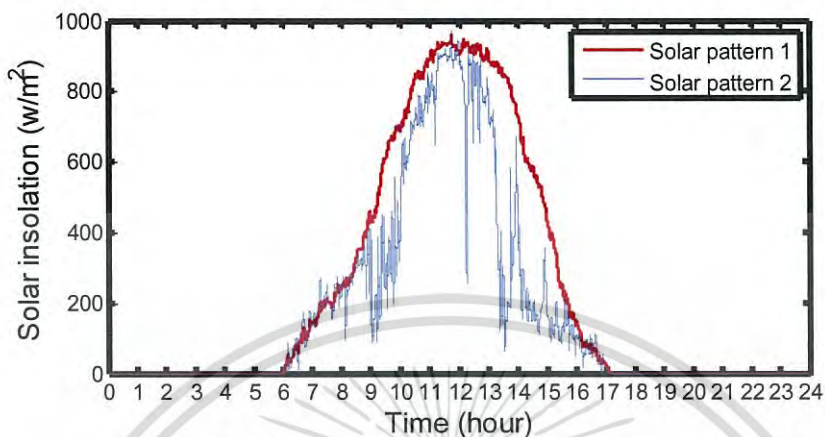
ระบบ PV ที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน แทนด้วย PV

ระบบ PV ที่ติดตั้งตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด แทนด้วย PV with SMES

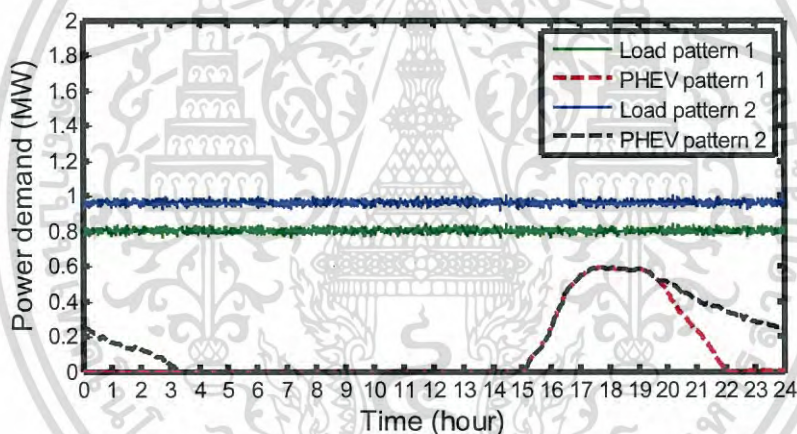
ระบบ PV ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวด แทนด้วย PV with SC

#### 4.5 ผลการจำลอง

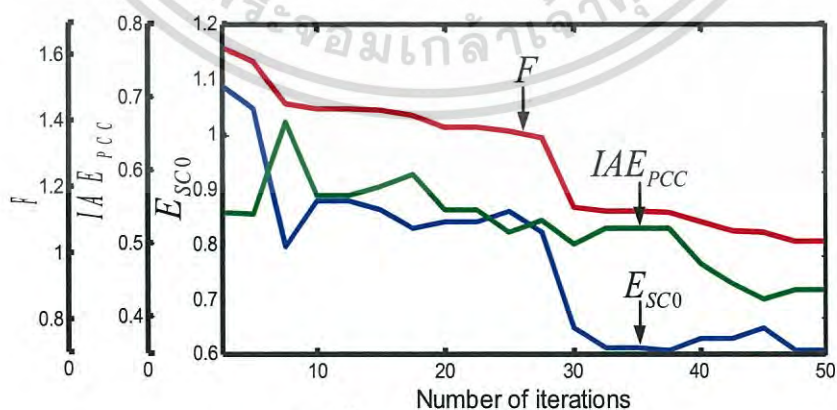
การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ตัวควบคุมของ PV with SC และ PV with SMES ใช้ความเข้มแสง โหลดและการชาร์จของรถยนต์ไฟฟ้าในรูปแบบที่ 1 ในรูปที่ 4.5 ส่วนความต้องการของโหลดและการชาร์จของรถยนต์ไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ความเข้มแสงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.6 ความต้องการโหลดและการชาร์จกำลังไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 เส้นโค้งลู่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงกราฟผู้เข้าของค่าตอบของฟังก์ชัน  $F$   $I_{AE_{PCC}}$  และ  $E_{SCO}$  ของกรณี PV with SC ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ที่ทำการหาค่าที่เหมาะสมของกรณี PV with SC และกรณี PV with SMES ตามลำดับ ทั้งค่าความเหนียวและพลังงานสะสมเริ่มต้น SC ซึ่งในกรณีของ PV with SC มีค่าที่น้อยกว่ากรณี PV with SMES

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์และดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

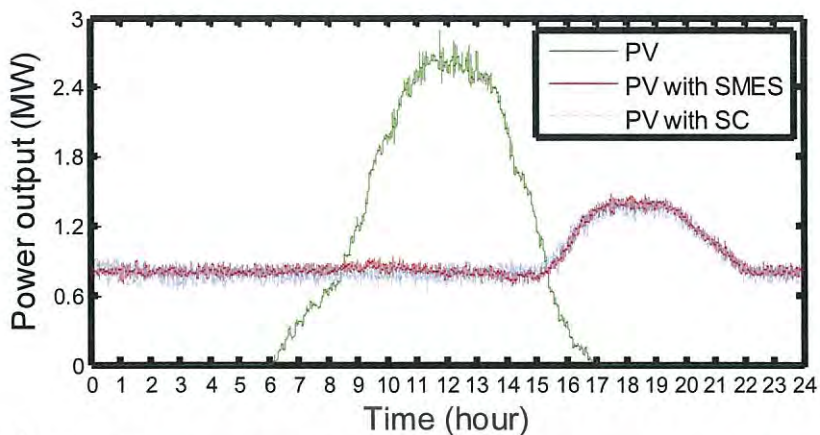
ตัวควบคุมพีไอ	PV with SC		PV with SMES
	PV1	PV2	
$K_{P1}, K_{I1}$	3.96 , 7.91	7.47 , 5.60	6.10, 9.83
$K_{P2}, K_{I2}$	4.27 , 7.37	6.91 , 7.13	1.97, 1.16
$K_{P3}, K_{I3}$	6.35 , 9.03	1.65 , 4.66	3.97, 11.37
$K_{P4}, K_{I4}$	4.53 , 9.66		4.53, 4.76
$K_{P5}, K_{I5}$	-		1.06, 7.75

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของขดลวดตัวนำยิ่งยวด

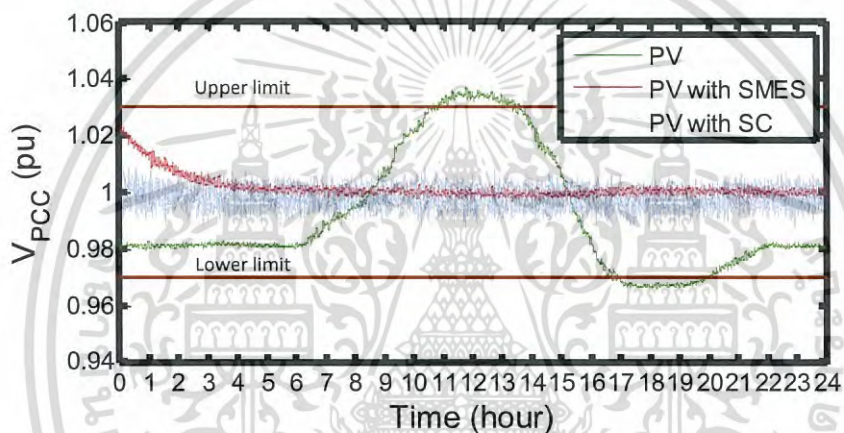
ตัวแปร	PV with SC	PV with SMES
$L_{SC}(H)$	2.71	6.43
$I_{SCO}(kA)$	3.3	2.73
$E_0(MJ)$	15.07	23.96

การจำลองศึกษาภายใต้สถานการณ์ 2 รูปแบบ ประกอบด้วย ความต้องการโหลด การชาร์จของรถยนต์ไฟฟ้าในหนึ่งวันแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ข้อสำคัญในรูปแบบที่ 2 ความเข้มแสงมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ความต้องการโหลดเพิ่มขึ้นและระยะเวลาการชาร์จของรถยนต์ไฟฟ้านานขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 1 ผลการจำลองในรูปแบบที่ 4.8-4.11 ภายใต้ความเข้มแสงรูปแบบที่ 1 และความต้องการโหลดรวมกับรถยนต์ไฟฟ้ารูปแบบที่ 1 ผลของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV แสดงดังรูปที่ 4.8 ในกรณีของ PV with SC และกรณี PV with SMES สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ให้จ่ายได้ตามความต้องการโหลด แต่กลับกันกรณีของ PV กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV มีลักษณะคล้ายความเข้มแสงที่ได้รับ

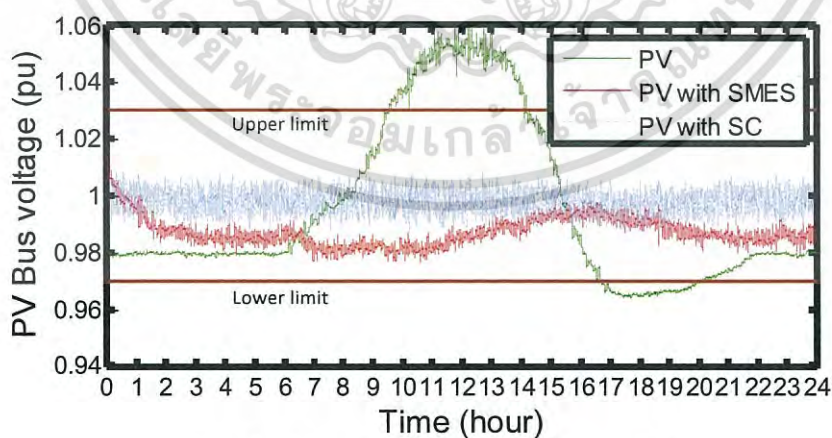
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 1

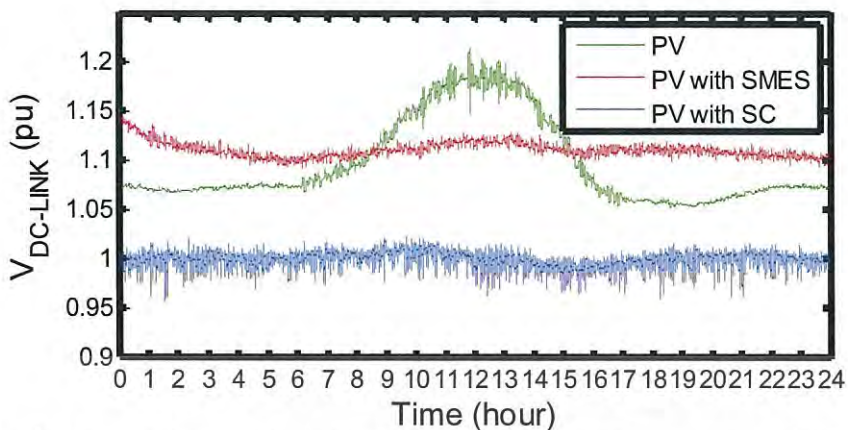


รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสในกรณีที่ 1



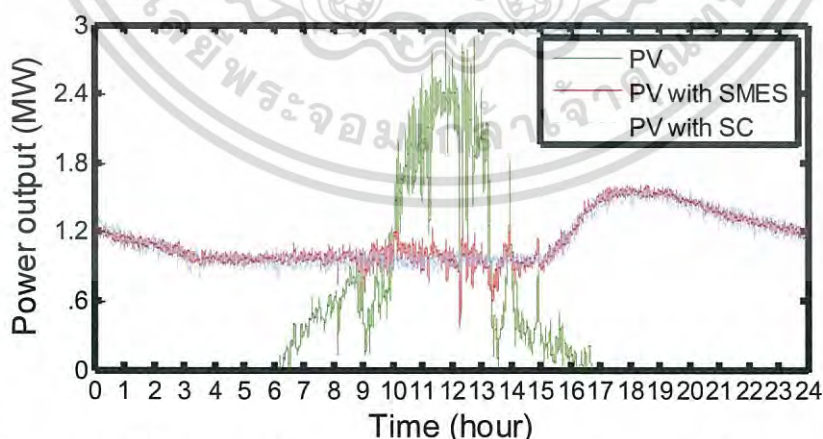
รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



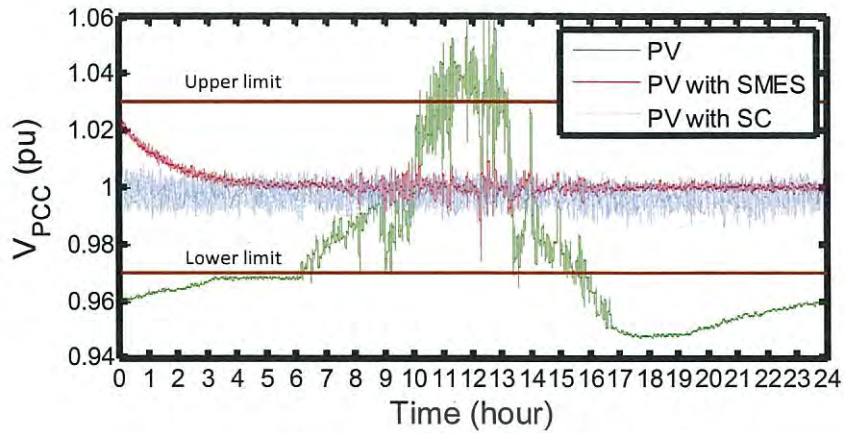
รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 1

แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัส ดังในรูปที่ 4.9 กรณีของ PV with SC และกรณี PV with SMES สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่มาตรฐานของ KEPCO กำหนดได้ แต่ในกรณีของ PV with SC มีลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เรียบเนื่องจากปัญหาของความถี่สวิตชิงที่ใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์ และดีซีฟูดซีคอนเวอร์เตอร์นั้นต่ำเกินไป ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มความถี่สวิตชิง เพื่อให้การจ่ายกำลังไฟฟ้าของ PV ทำได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสเรียบขึ้น และในส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสกรณีของ PV เกิดปัญหาทั้งแรงดันไฟฟ้าเกินช่วงที่กำหนดเนื่องจาก PV ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในปริมาณมากเกินความต้องการของโหลด และแรงดันไฟฟ้าตกต่ำกว่าช่วงที่กำหนด เพราะมีการชาร์จจรรยาต์ไฟฟ้าเข้ากับระบบ ซึ่ง KEPCO กำหนดมาตรฐานแรงดันไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงได้อยู่ในช่วง  $\pm 3\%$  ของแรงดันไฟฟ้าปกติ และในรูปที่ 4.10 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ PV บัส มีเพียงกรณีของ PV with SC ที่สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าให้ให้อยู่ที่ 1 pu ได้ ในส่วนของแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์กรณี PV with SC สามารถรักษาแรงดันดีซีลิงค์ให้คงที่ได้

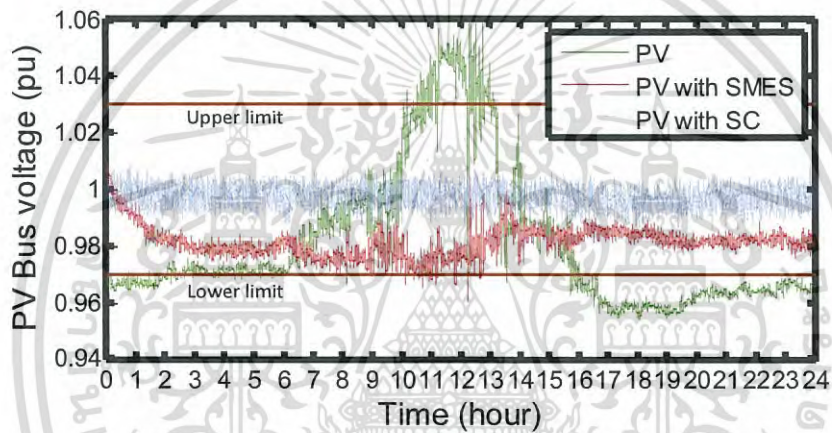


รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 2

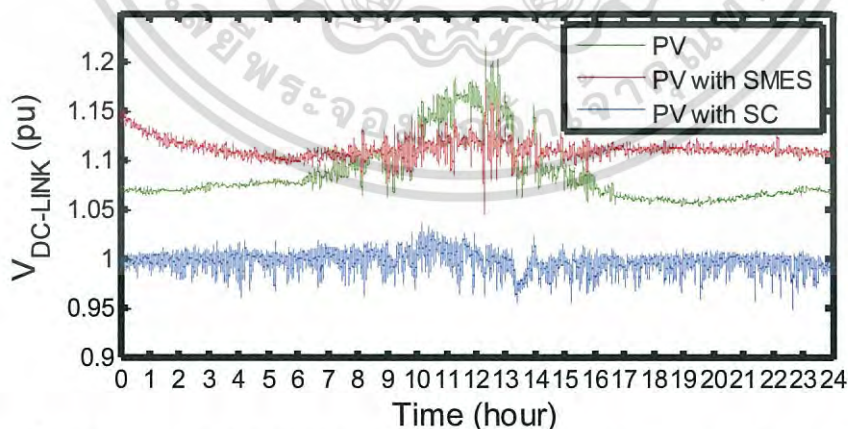
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสในกรณีที่ 2



รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสในกรณีที่ 2



รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 2

รูปที่ 4.12-4.15 ภายใต้อารมณ์แบบความเข้มแสงที่ 2 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV แรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC แรงดันไฟฟ้าที่บัส PV และแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของ PV ภายใต้อารมณ์แบบความเข้มแสง รูปแบบนี้ 2 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในกรณีของ PV เปลี่ยนแปลงเหมือนกับอารมณ์แบบความเข้มแสง ในทางตรงกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าม การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในกรณีของ PV with SC และ PV with SMES กลับคงที่ นั้นสามารถอธิบายได้ว่ากำลังไฟฟ้าของ PV ผลิตตามความต้องการของโหลด สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นขณะที่กำลังไฟฟ้าของ PV ผลิตได้ในปริมาณมาก ซึ่งต่อมาแรงดันไฟฟ้าตกเกิดจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าเป็นจำนวนมากในกรณีของ PV ในทางตรงกันข้าม แรงดันไฟฟ้าที่ PCC สามารถรักษาและคงไว้ที่ช่วงขอบเขตของแรงดันที่ยอมรับได้ในกรณีของ PV with SC และ PV with SMES สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสและแรงดันไฟฟ้าที่ซีลิ่งของ PV แกว่งในกรณีของ PV ส่วนกรณีของ PV with SMES แรงดันไฟฟ้าตกที่ PV บัสและมีแรงดันไฟฟ้าเกินที่ซีลิ่งเกิดขึ้น ตั้งแต่อินเวอร์เตอร์และการควบคุมดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ของ SMES ถูกออกแบบให้ควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของ PV แรงดันไฟฟ้าที่ PCC และแรงดันไฟฟ้าที่ซีลิ่งของ SMES แต่ไม่สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสและดีซีลิ่งของ PV ได้ กลับกันกรณีของ PV with SC สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าไม่เฉพาะแต่แรงดันไฟฟ้าภายในของ PV แต่ยังสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าของระบบได้ด้วย

#### 4.6 สรุป

บทความวิจัยนี้ นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ติดตั้งอยู่ระหว่างดีซีลิ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายซึ่งเชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย ผลศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. การเชื่อมกันของขดลวดตัวนำยิ่งยวดระหว่างดีซีลิ่งของ PV ด้วยดีซีทูดีซี คอนเวอร์เตอร์ให้ประโยชน์ของการใช้อินเวอร์เตอร์ของ PV และ SC ร่วมกัน
2. ใช้หลักการของการหาค่าต่ำที่สุดของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ในการหาค่าที่เหมาะสมของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งถูกดำเนินการแบบอัตโนมัติ
3. ผลการศึกษายืนยันได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดร่วมกันไม่เพียงส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่น่าพอใจในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว ยังสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ด้วย
4. ค่าความเหนี่ยวนำและพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวดในกรณีของ PV with SC มีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 กรณี

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) เพื่อเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) ที่ต่อรวมอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งนำ SC ติดตั้งภายใน PV โดยแยกเป็น 2 หัวข้อ คือ

1. การประยุกต์ใช้ SC ติดตั้งภายใน PV เพื่อแก้ปัญหาค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด ซึ่งรูปแบบของระบบ PV ประกอบด้วยแบบฟาร์มเดี่ยวและแบบหลายฟาร์ม โดยในกรณีของรูปแบบหลายฟาร์มการติดตั้ง SC เป็นลักษณะของการใช้งาน SC ร่วมกันของ PV

2. การประยุกต์ใช้ SC ติดตั้งภายใน PV ที่มีรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินและโหลดเชื่อมต่ออยู่กับระบบ เพื่อแก้ไขปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ PV ให้อยู่ในช่วงที่มาตรฐานแรงดันไฟฟ้ายอมรับได้

ซึ่งทั้ง 2 หัวข้อ มีการออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆ ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ และผลจากการจำลองสามารถสรุปผลของงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. การติดตั้ง SC เข้ากับดีซีลิงค์ภายในของ PV สามารถลดราคาต้นทุนได้ เนื่องจากลดจำนวนชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งาน
2. การประยุกต์ใช้ SC ติดตั้งภายใน PV ทั้งในรูปแบบฟาร์มเดี่ยวและรูปแบบหลายฟาร์มสามารถแสดงประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีกว่าทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดพลาด และยังใช้พลังงานสะสมเริ่มต้นที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ
3. SC ที่ติดตั้งกับระบบ PV ที่ประกอบด้วยรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินและโหลดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง แสดงสมรรถนะที่ยอดเยี่ยมในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก PV ได้และยังรักษาแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมให้อยู่ในขอบเขตของมาตรฐานแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดได้ อีกทั้งยังสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของ PV ให้ได้ตามความต้องการ
4. ทำการออกแบบขนาดขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์พีไอได้อย่างเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

1. ควรนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบที่ติดตั้งพลังงานทดแทนแบบผสมผสาน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้สามารถใช้งานขดลวดตัวนำยิ่งยวดได้อย่างหลากหลายมากยิ่งขึ้น
2. ในการทำการออกแบบขดลวดตัวนำยิ่งยวด พลังงานสะสมเริ่มต้น และพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสมเป็นการออกแบบให้เห็นถึงสมรรถนะของการทำเสถียรภาพ โดยออกแบบภายใต้กรณีศึกษาเดียว แล้วนำพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ไปทดสอบกับกรณีอื่นๆ แต่ในการออกแบบเพื่อใช้งานจริงอาจมีปัจจัยรอบๆด้านที่ต้องพิจารณาเพื่อออกแบบการควบคุมได้อย่างเหมาะสม เช่น อุณหภูมิของขดลวดตัวนำยิ่งยวด สภาพะการเป็นขดลวดตัวนำยิ่งยวด เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Yu F. R. Zhang P. Xiao W. and Choudhury P. "Communication Systems for Grid Integration of Renewable Energy Resource", **IEEE Network**, vol. 25, no.5, 2011. pp.22-29.
- [2] Wang K. Ciucu F. Lin C. and Low S.H. "A Stochastic Power Network Calculus for Integrating Renewable Energy Sources into the Power Grid", **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, vol. 30 no. 6, 2012. pp. 1037 - 1048.
- [3] 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.
- [4] Wang Z. Zou Z. and Zheng Y. "Design and control of a photovoltaic energy and SMES hybrid system with current-source grid inverter," **IEEE Trans. Appl. Supercond**, vol. 23, no. 3, 2013. pp. 5701505.
- [5] Lei M. Yang Z. Wang Y. Xu H. Meng L. Vasquez Guerrero J.M. "A MPC Based ESS Control Method for PV Power Smoothing Applications," **IEEE Trans. On Power Electronics**, 2017. pp. 1.
- [6] Bitencourt L. Schetinger A.M. et al "Maximum PV Penetration Under Voltage Constraints Considering Optimal Sizing of BESS on Brazilian Secondary Distribution Network," **IEEE Latin America Trans.**, vol.14, no. 9, 2016. pp. 4063-4069.
- [7] Jayalakshmi N.S. Gaonkar D.N. Vikash Kumar J. and Karthik R.P. "Battery-Ultracapacitor Storage Devices to Mitigate Power Fluctuations for Grid Connected PV System," **Annual IEEE INDICON**, 2015.
- [8] "Effect of a SMES in Power Distribution Network with PV System and PBEVs," **IEEE Trans. On Appl. Supercond.**, vol. 23, no. 3, 2013. pp. 5700104.
- [9] "Application of SMES and Grid Code Compliance to Wind/Photovoltaic Generation System," **IEEE Trans. On Appl. Supercond.**, vol. 23, no. 3, 2013. pp. 5000804.
- [10] "Global Market Outlook for Solar Power 2016-2020." [Online]. Available: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>.
- [11] Shivashankar S. Mekhilef S. Mokhlis H. Karimi M. "Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources – A review," **Renewable and Sustainable Energy Review**, vol. 59, 2016. pp. 1170-1184.
- [12] 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Ali M.H. Wu B. Dougal R.A. "An overview of SMES applications in power and energy systems," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 1, 2010. pp. 38-47.
- [16] Farahani M. Ganjefar S. "Solving LFC problem in an interconnected power system using superconducting magnetic energy storage," *Physica C: Supercond.*, vol. 487, 2013. pp. 60-66.
- [17] 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.
- [18] Z. Wang, K.T. Chau, B. Yuwen, Z. Zhang, F. Li "Power compensation and power quality improvement based on multiple-channel current source converter fed HT SMES," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, 2012. pp. 5701204.
- [19] Seo H.R. Kim A.R. Park M. Yu I.K. "Power quality enhancement of renewable energy source power network using SMES system," *Physica C: Supercond.*, vol. 471, 2011. pp. 1409-1412.
- [20] Tam K.S. Kumar P. "Enhancing the utilization of photovoltaic power generation by superconductive magnetic energy storage," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 4, 1989. pp. 314-321.
- [21] Wang Z. Zou Z. and Zheng Y. "Design and control of a photovoltaic energy and SMES hybrid system with current-source grid inverter," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, 2013. pp. 5701505.
- [22] Hara R. Kita H. Tanabe T. Sugihara H. Kuwayama A. and Miwa S. "Testing the technologies," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, no. 3, 2009. pp. 77-85.
- [23] Voelcker J. "One million plug-in cars by 2015?," *IEEE Spectr.*, vol. 48, no. 4, 2011. pp. 11-13.
- [24] Zhang, W. and Liu, Y. "Reactive Power Optimization Based on PSO in a Practical Power System." In *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 239-243, 2004.
- [25] Zhang P. Qian K. Zhou C. Stewart B. G. and Hepburn D. M "A methodology for optimization of power systems demand due to electric vehicle charging load," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, 2012. pp. 1628-1636.

- [26] Kreeumporn W. and Ngamroo I. "Integrated superconducting coil into PV generator for power smoothing and voltage regulation," in *Proc. IEEE Int. Conf. ASEMD*, 2015. pp. 159-160.
- [27] Kennedy J. and Eberhart R. "Particle swarm optimization," In *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, vol. 1, 1995. pp. 1942-1948.
- [28] MATLAB/SimPowerSystems Version 5.7 Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2012.
- [29] Gevorkian P. *Solar Power in Building Design: The Engineer's Complete Design Resource*. McGraw-Hill, 2007.
- [30] Putri R.I. Wibowo S. Rifa'I M. "Maximum power point tracking for photovoltaic using incremental conductance method," *Energy Procedia*, vol. 68, 2015. pp. 22-30.
- [31] "SMES Energy storage." [Online] Available: <http://www.supraconductivite.fr/en/index.php#applications-electricite-smes>
- [32] Shaw J.J. Gendron R.F. Bertsekas D.P. "Optimal Scheduling of Large Hydrothermal Power Systems," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 5, 1985. pp. 32.
- [33] Available: <http://www.futurescience.com/manual/sc1000.html>
- [34] Tixador P. "Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective," *IEEE/CSC&ESAS European Supercond. News Forum*, no. 3, 2008.
- [35] 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.
- [36] *Engineering Optimization An Introduction with Metaheuristic Application* Xin She Yang, United Kingdom: WILEY, Inc., 2010
- [37] Kim S.T. Kang B.K. Bae S.H. "Application of SMES and Grid Code Compliance to Wind/Photovoltaic Generation System," *IEEE Trans. On Applied Supercond.*, vol. 23, 2013. pp. 5000804.
- [38] Lee E.R. Lee S. Lee C. Suh H.J. Bae D.K. Kim H.M. Yoon Y.S. Ko T.K. "Test of DC Reactor Type Fault Current Limiter Using SMES Magnet for Optimal Design," *IEEE Trans. On Appl. Supercond.*, vol. 12, no. 1, 2002. pp. 850-853.
- [39] Shakya A. Michael S. Saunders C. "Solar Irradiance Forecasting in Remote Microgrids Using Markov Switching Model," *IEEE Trans. On Sustainable Energy*, vol. 8, no. 3, 2017. pp. 895-905.
- [40] Salim M.S. Najim J.M. Salih S.M. "Maximum power analysis of photovoltaic module in Ramadi city," *International Journal of Energy and Environment*, vol. 4, no. 6, 2013. pp. 1013-1024.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

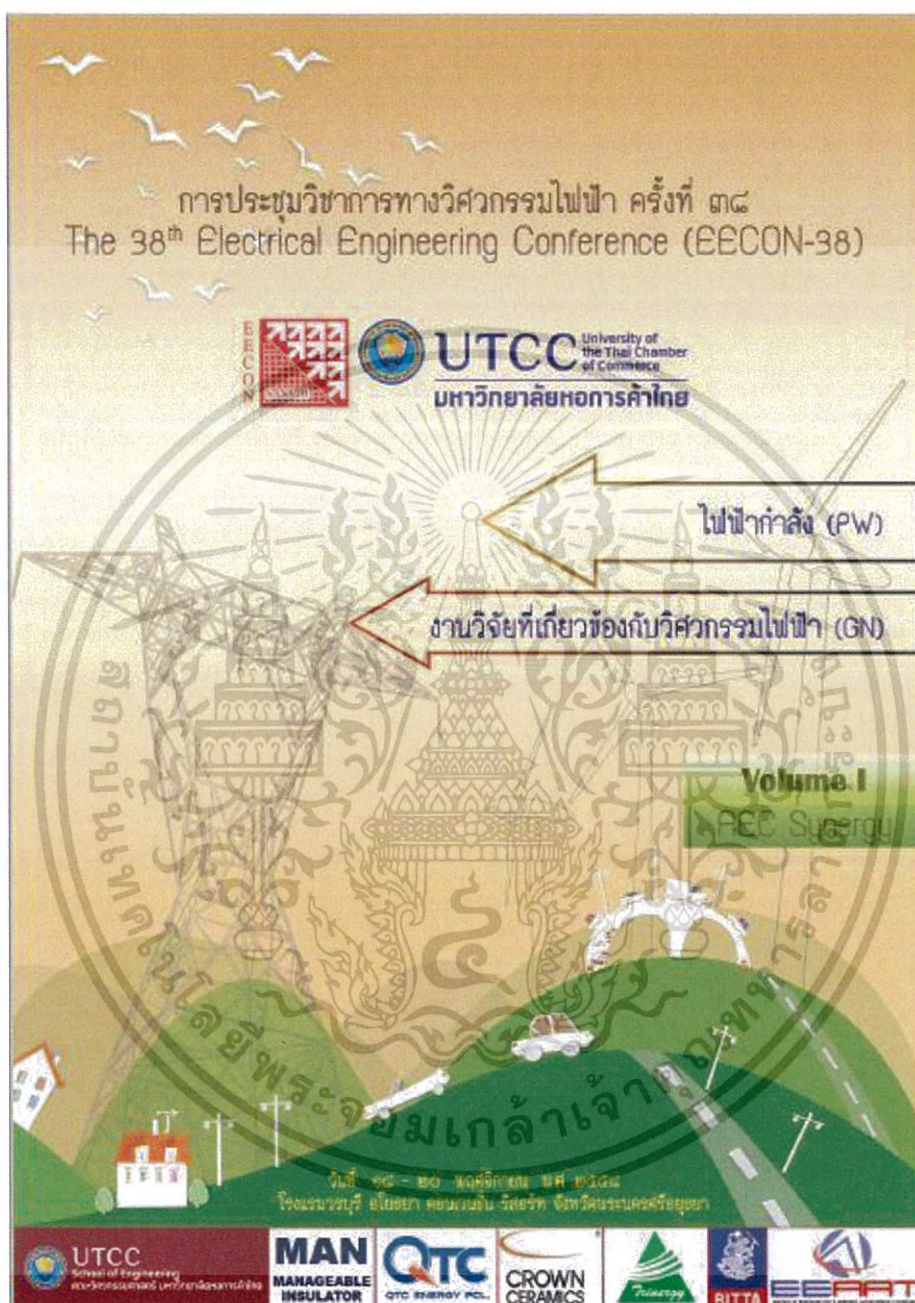


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และรางวัล

1. W. Kreeumporn and I. Ngamroo, "Optimal Superconducting Coil Integrated Into PV Generators for Smoothing Power and Regulating Voltage in Distribution System With PHEVs", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.26, Issue.7, Oct. 2016.
2. W. Kreeumporn and I. Ngamroo, "Integrated Superconducting Coil into PV Generator for Power Smoothing and Voltage Regulation", Proceedings of IEEE International Conf. On Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD2015), pp.159-160, 20-23 Nov. 2015, Shanghai, China.
3. วรพงษ์ กรีอัมพร วรภัทร พนาเจริญวงศ์ และ อิศระชัย งามหรุ, "การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้า", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38 (EECON-38), หน้า.113-116, 18-20 พ.ย. 2558, พระนครศรีอยุธยา, ประเทศไทย.
4. บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON 38) หัวข้อเรื่อง "การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาดและลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้า"



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุง  
ความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติและลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้า  
Application of Optimal Superconducting Coil integrated into PV Power Generator to Enhancing Fault  
Ride Through Capability and Smoothing Output Power Fluctuation

วรพงษ์ ธีรวัชร วรภัทร พนมเจริญวงศ์ และ อิศระชัย จมพร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: stworapong@gmail.com

### บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันดีว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังแสงอาทิตย์ต้องประสบกับปัญหาการข้ามผ่านความผิดปกติของกำลังไฟฟ้าด้านออกที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว บทความนี้นำเสนอการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวดเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และสายส่งไฟฟ้าเอชไอเพื่อทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเก็บสะสมพลังงานและเป็นตัวจำกัดกระแสผิดปกติ ในที่นี้จะหาค่าที่เหมาะสมของค่าความเหนี่ยวนำและพลังงานสะสมเริ่มต้นของขดลวดตัวนำยิ่งยวด ตัวควบคุมที่โอของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อให้ได้ทั้งสองวัตถุประสงค์ ผลการจำลองคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมไม่เพียงให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าและยังใช้พลังงานที่ต่ำกว่าขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่กว่า

คำสำคัญ: ขดลวดตัวนำยิ่งยวด การหาค่าที่เหมาะสม ความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ กำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

### Abstract

The fault ride through (FRT) capability and power fluctuation are critical problems of the photovoltaic (PV) generator. To overcome these problems, this paper presents the application of the superconducting coil (SC) connected between the DC link of the PV generator and the AC transmission line. The optimization of the SC inductance, the initial stored energy in the SC, the PI controllers of the de-dc converter and the inverter are simultaneously performed by the particle swarm optimization. Simulation results shows that the optimal SC not only provides the superior control, but also requires the lower energy used for control in comparison with the larger SC size.

**Keywords:** Superconducting coil, optimization, fault ride through capability, power fluctuation

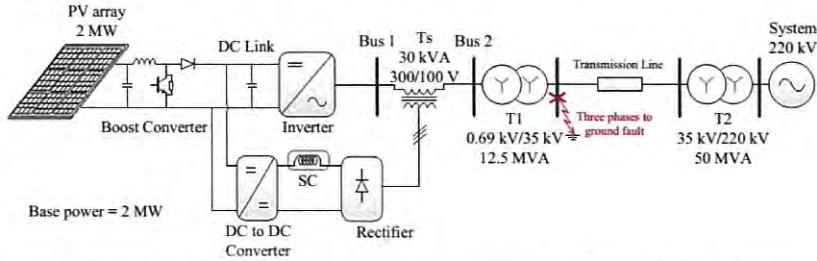
### 1. บทนำ

ปัจจุบัน การติดตั้งฟาร์มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังแสงอาทิตย์ (Photovoltaic generator, PV) เพิ่มขึ้นอย่างมากทั่วโลก เช่น ฟาร์ม PV บาเวเรียที่เยอรมนีซึ่งมีขนาด 10,615 MW และจากการสำรวจล่าสุดปี 2014 กำลังไฟฟ้ารวมทั่วโลกของ PV รวมแล้วมีขนาดถึง 180,000 MW [1] ฟาร์ม PV นั้นนอกจากจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งผลิตจาก PV ส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบกำลัง นอกจากนี้เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบจนทำให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อกริดตกลงต่ำกว่ามาตรฐานที่ยอมรับได้จะส่งผลให้ PV ถูกตัดออกจากระบบจึงส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ [2]

เพื่อแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ได้มีการนำขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil, SC) เข้ามาประยุกต์ใช้ โดยที่ผ่านมานี้ในบทความที่ [3] ได้ติดตั้ง SC กับอินเวอร์เตอร์ร่วมกับ PV ต่ออยู่เป็นตัวเก็บสะสมพลังงาน ในบทความที่ [4] ได้ติดตั้ง SC กับชุดอินเวอร์เตอร์ใน PV ทางด้านดีซี PV อย่างไรก็ตาม งานวิจัยทั้งสองยังไม่ได้พิจารณาในเรื่องความสามารถในการข้ามผ่านความผิดปกติและวิธีการหาค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของ SC จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาต่อยอดใช้ประโยชน์ SC ให้ได้สูงสุด

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์การติดตั้ง SC กับ PV เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านออกและเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ ในที่นี้จะติดตั้ง SC ระหว่างดีซีลิงก์ของ PV ด้วยดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ และสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับด้วยหม้อแปลงและวงจรเรียงกระแสสามเฟส จากนั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมของอินเวอร์เตอร์ ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ ขนาดความเหนี่ยวนำและกระแสของ SC และพลังงานสะสมเริ่มต้นที่เหมาะสม ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าให้ต่ำสุดและเพิ่มความสามารถการข้ามผ่านความผิดปกติ แล้วทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบระหว่าง PV ที่ติดตั้ง SC ที่ทำให้เหมาะสมกับ SC ที่มีขนาดใหญ่กว่า

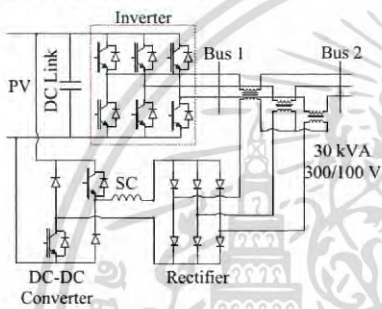
2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ศึกษา



รูปที่ 1. ระบบโซลาร์ฟาร์มขนาด 2 MW เชื่อมต่อกับกริด

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย PV ขนาด 2 MW เชื่อมต่อกับกริด PV ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ และ SC

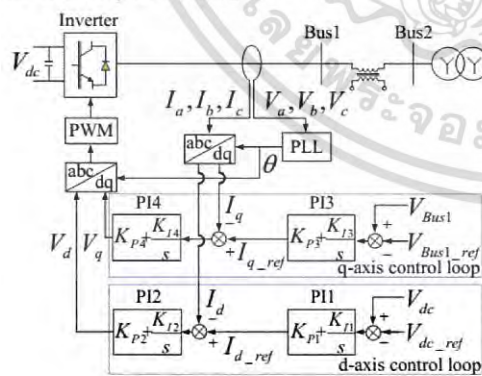
3. โครงสร้างวงจร SC ที่นำเสนอ



รูปที่ 2. วงจร SC

รูปที่ 2 แสดงวงจร SC ที่นำเสนอโดยติดตั้ง SC เข้ากับดีซีลิงค์ของ PV ด้วยดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมการแลกเปลี่ยนพลังงานภายใน SC เพื่อลดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอของ PV ในสภาวะปกติ และมีวงจรเรียงกระแส (rectifier) เชื่อมต่อกับหม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัวคือไปยังสายส่งเชื่อมแต่ละเส้นทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรจำกัดกระแสสลับพร้อม

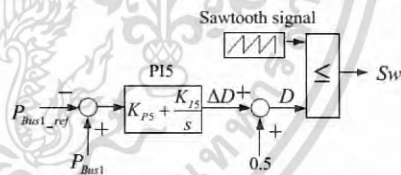
4. การควบคุมอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3. โครงสร้างการควบคุมอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อแลกเปลี่ยนพลังงานสะสมใน SC กับระบบในการชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ การควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบ่งเป็นสองวงรอบคือ วงรอบ  $d$  และ  $q$  การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงจะคำนึงการด้วยวงรอบการควบคุม  $d$  และการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะขึ้นอยู่กับวงรอบการควบคุม  $q$  ในวงรอบการควบคุม  $d$  จะนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ ( $V_{dc}$ ) เทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงดีซีลิงค์ ( $V_{dc\_ref}$ ) แล้วส่งสัญญาณผ่านตัวควบคุมที่โอ 1 (PI1) ไปคำนวณหากระแสไฟฟ้าอ้างอิงแกน  $d$  และผ่านตัวควบคุมที่โอ 2 (PI2) ได้แรงดันไฟฟ้าแกน  $d$  ( $V_d$ ) ในวงรอบการควบคุม  $q$  จะนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 1 ( $V_{Bus1}$ ) มาเทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 1 อ้างอิง ( $V_{Bus1\_ref}$ ) ผ่านตัวควบคุมที่โอ 3 (PI3) เพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงแกน  $q$  แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่ากระแสในแกน  $q$  แล้วผ่านไปที่โอ 4 (PI4) เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าแกน  $q$  ( $V_q$ ) [5] จากนั้นแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $d-q$  เป็นเฟส  $a-b-c$  เพื่อสร้างเป็นสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ไปควบคุมอินเวอร์เตอร์ต่อไป

5. การควบคุมดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4. การสร้างสัญญาณควบคุมดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์

ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในของ SC วงจรทำงานด้วยสัญญาณควบคุม ( $S_w$ ) ที่สร้างจากตัวควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4 เริ่มจากนำกำลังไฟฟ้าที่บัส 1 ( $P_{Bus1}$ ) มาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{Bus1\_ref}$ ) แล้วส่งผ่านตัวควบคุมที่โอ 5 (PI5) แล้วนำสัญญาณที่ได้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย (sawtooth signal) ได้เป็น duty cycle การทำงานของ duty cycle อธิบายได้ดังนี้

- duty cycle < 0.5 SC จ่ายพลังงาน
- duty cycle = 0.5 SC ไม่จ่ายและไม่สะสมพลังงาน
- duty cycle > 0.5 SC สะสมพลังงาน

## 6. วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ในที่นี้จะหาค่าพารามิเตอร์ที่โอที่เหมาะสมของตัวควบคุมของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์และตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำ และกระแสเริ่มต้นของ SC โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก PV ให้น้อยที่สุด
2. เพื่อลดการตกลงของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ขณะเกิดความผิดปกติพร้อมให้ได้ตามกริดโค้ดที่กำหนดไว้ใน [2] คือ แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วห้ามต่ำกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าปกติ
3. เพื่อลดพลังงานสะสมเริ่มต้น ( $E_p$ ) ของ SC ให้น้อยที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสร้างปัญหาการทำให้เหมาะสมได้ดังนี้

$$\text{Minimize} \int_{t_b}^{t_f} |\Delta P_{Bus1}| dt + \int_{t_{ro}}^{t_{ry}} |\Delta V_{Bus1}| dt + \frac{1}{2} L_{sc} I_{sc}^2 \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \quad 0.01 \leq K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}, K_{p4}, K_{p5} \leq 20$$

$$0.01 \leq K_{i1}, K_{i2}, K_{i3}, K_{i4}, K_{i5} \leq 20$$

$$0.01 \leq L_{sc} \leq 15, 0.01 \leq I_{sc} \leq 5$$

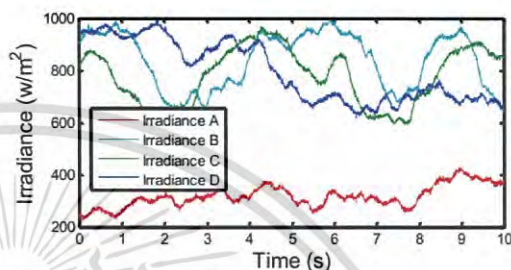
เมื่อ  $\Delta P_{Bus1}$  คือ ผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่วัดจริงที่บัส 1 และกำลังไฟฟ้าอ้างอิง  $\Delta V_{Bus1}$  คือผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่วัดจริงที่บัส 1 กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $L_{sc}$  คือค่าความเหนี่ยวนำของ SC  $I_{sc}$  คือ กระแสใน SC  $t_b$  คือเวลาเริ่มต้นที่ใช้ในการจำลอง  $t_f$  คือเวลาสุดท้ายของการจำลอง  $t_{ro}$  คือเวลาที่เกิดความผิดปกติพร้อม  $t_{ry}$  คือ เวลาที่กำจัดความผิดปกติพร้อม  $K_i$  คือ อัตราขยายสัดส่วน  $K_p$  คือ อัตราขยายปริพันธ์ ในที่นี้จะใช้ PSO [6] เพื่อแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสม (1) ซึ่งใช้จำนวนประชากร 32 ค่าและจำนวนรอบในการคำนวณ 100 รอบ

## 7. ผลการจำลองคอมพิวเตอร์

ในที่นี้จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมภายใต้ความเข้มของแสงแดดรูปแบบ A ซึ่งมีความเข้มแสงต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อเกิดความผิดปกติ 3 เฟสลงดินที่หม้อแปลงไฟฟ้าที่บัส 2 ดังแสดงในรูปที่ 1 ที่เวลา 3 s เป็นเวลา 150 ms ซึ่งในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมระหว่าง PV ที่ติดตั้ง SC ที่ทำให้เหมาะสม (Optimal case) และ PV ที่ติดตั้ง SC ที่มีขนาดใหญ่กว่า (Non-optimal case) ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โอ ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ค่าความเหนี่ยวนำ ค่ากระแสใน SC และพลังงานสะสมเริ่มต้นของ SC สังเกตได้ว่า หลังงานเริ่มต้นที่ใช้ในการควบคุมของ SC ที่เหมาะสมมีค่าต่ำกว่า SC ที่มีขนาดใหญ่กว่า

รูปที่ 6, 7, 8 และ 9 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากฟาร์มโซลาร์ภายใต้ความเข้มแสง (Irradiance) A, B, C และ D ตามลำดับ ในกรณีความเข้มแสง A จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก PV ที่ไม่ติดตั้ง SC กำลังไฟฟ้านั้นมีค่าต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ 0.8 pu ในทางตรงกันข้ามกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก PV ที่ติดตั้ง SC มีค่าเข้าใกล้ 0.8 pu โดยในกรณี SC

ที่มีค่า  $L_{sc}$  ที่เหมาะสม สามารถทำให้กำลังไฟฟ้าเรียกว่ากรณี SC ที่มี  $L_{sc}$  ที่ใหญ่กว่า ส่วนในกรณีความเข้มแสง B, C และ D นั้น การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ได้จาก PV ที่ติดตั้ง SC ที่เหมาะสมมีน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณี PV ที่ไม่ติดตั้ง SC และ PV ที่ติดตั้ง SC ที่ใหญ่กว่า



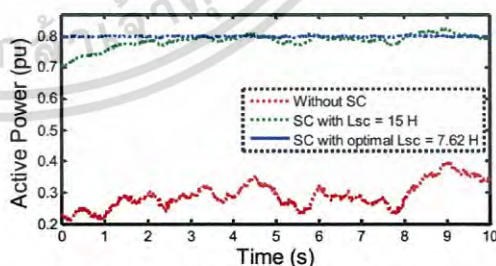
รูปที่ 5. ความเข้มแสง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โอ

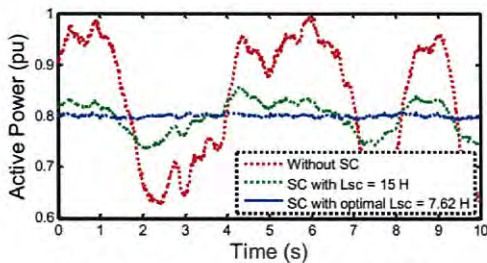
พารามิเตอร์	Non-optimal case	Optimal case
$K_{p1}, K_{i1}$	3, 8	4.31, 5.49
$K_{p2}, K_{i2}$	12, 0.05	18.54, 9.74
$K_{p3}, K_{i3}$	2, 3	11.23, 8.28
$K_{p4}, K_{i4}$	5, 10	7.47, 14.60
$K_{p5}, K_{i5}$	0.5, 1.5	1.08, 18.52

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของ SC

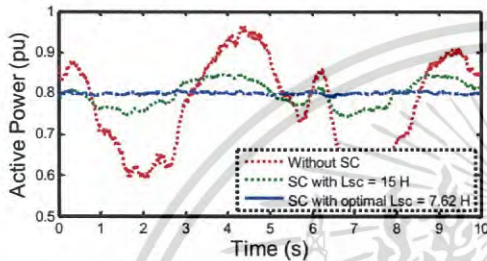
พารามิเตอร์	Non-optimal case	Optimal case
ค่าความเหนี่ยวนำ (H)	15	7.62
ค่ากระแสใน SC (kA)	1.79	1.79
พลังงานเริ่มต้น (MJ)	26.85	12.20



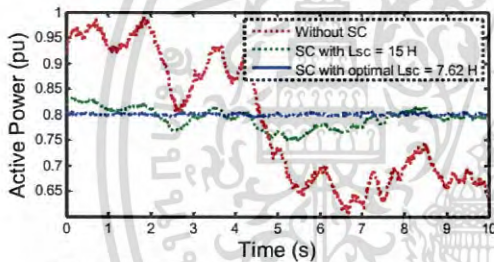
รูปที่ 6. กำลังไฟฟ้าของฟาร์มโซลาร์ภายใต้ความเข้มแสง A



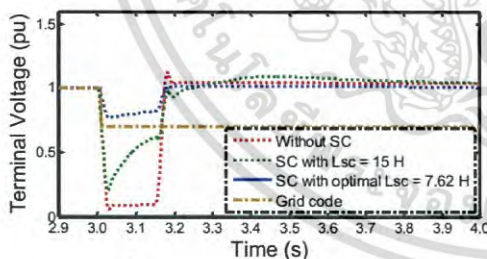
รูปที่ 7. กำลังไฟฟ้าของฟาร์มโซลาร์ภายใต้ความเข้มแสง B



รูปที่ 8. กำลังไฟฟ้าของฟาร์มโซลาร์ภายใต้ความเข้มแสง C



รูปที่ 9. กำลังไฟฟ้าของฟาร์มโซลาร์ภายใต้ความเข้มแสง D



รูปที่ 10. ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1

ในกรณีที่เกิดความผิดปกติ 3 เฟสลงดินหน้าหม้อแปลงบัสที่ 2 ที่เวลา 3 s เป็นเวลา 150 ms รูปที่ 10 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 ในกรณี PV ที่ไม่ติดตั้ง SC และ PV ที่ติดตั้ง SC ที่ใหญ่กว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ลดลงต่ำกว่า 0.7 pu ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ของกริดโคดีที่พิจารณา [2] ส่วนในกรณี PV ที่ติดตั้ง SC ที่เหมาะสม จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ลดลงในช่วงที่ยอมรับได้ของกริดโคดี

## 8. สรุป

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์การติดตั้ง SC กับ PV เพื่อแก้ไขปัญหาความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้า และเพื่อเพิ่มความสามารถข้ามผ่านความผิดปกติ พร้อมกับนำเสนอวิธีการหาค่าของพารามิเตอร์ตัวควบคุม ขนาดของ SC และพลังงานสะสมเริ่มต้นที่เหมาะสม และผลการจำลองที่นำเสนอแสดงให้เห็นได้ว่า PV ที่ติดตั้ง SC ที่เหมาะสมสามารถแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและปัญหาการข้ามผ่านความผิดปกติได้ดีกว่าทั้ง กรณี PV ที่ติดตั้ง SC ที่มีขนาดใหญ่กว่า และกรณี PV ที่ไม่ติดตั้ง SC

## เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>
- [2] Rakibuzzaman Shah, N. Mithulananthan, R.C. ansal and V.K. Ramachandaramurthy, "A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, pp. 1423-1436, 2015.
- [3] Stergios P. Dimakis, Grigoris K. Papagiannis and Georgios C. Christoforidis, "Control strategy to alleviate PV power output fluctuations through a superconducting coil," *IEEE Conf.*, pp.1-6, 2014.
- [4] Zheng Wang, Zhixiang Zou and Yang Zheng "Design and Control of a Photovoltaic Energy and SMES Hybrid System With Current-Source Grid Inverter," *IEEE transaction on Applied Superconductivity*, vol. 23, 2013.
- [5] Bin Wu, *Power Conversion And Control Of Wind Energy Systems*, WILEY, 2011.
- [6] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, Vol.1, pp.1942-1948, 1995.



## การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๘ (EECON-38)

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

๑๘ - ๒๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๘

เกียรติบัตรนี้มอบไว้เพื่อแสดงว่า

วรพงษ์ กรีอัมพร วรภัทร พนาเจริญวงศ์ และ อิศระชัย งามหรุ

ได้รับการคัดเลือกเป็นบทความดีเด่น สาขาไฟฟ้ากำลัง

เรื่อง “การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ด้วยพลังแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงความสามารถในการข้ามผ่านความผิดพลาด

และลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้า”

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุกเชษฐ์ อินทร์เนตร

ประธานคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๘

รองศาสตราจารย์ ดร.อธิตม ฤกษ์บุตร

นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	วรพงษ์ กรีอำพร
วัน เดือน ปีเกิด	23 ตุลาคม 2534 ที่ จังหวัดสมุทรสาคร
ที่อยู่	18/4 หมู่ 1 ต.บางหญ้าแพรก อ.เมืองฯ จ.สมุทรสาคร 74000
ประวัติการศึกษา	2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รางวัล	2558 ได้รับการคัดเลือกเป็นบนบความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง ในการประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON 38) ในหัวข้อเรื่อง “การประยุกต์ใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมซึ่งติดตั้งในเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงความสามารถในการข้ามผ่านความผิด พร้อมและลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้า”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้