

การปรับปรุงสมรรถนะทางพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน

IMPROVEMENT OF POWER SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE BY
PHOTOVOLTAIC GENERATOR WITH INTERNAL BATTERY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-196

การปรับปรุงสมรรถนะทางพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน

IMPROVEMENT OF POWER SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE BY
PHOTOVOLTAIC GENERATOR WITH INTERNAL BATTERY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-196

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPROVEMENT OF POWER SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE BY
PHOTOVOLTAIC GENERATOR WITH INTERNAL BATTERY



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-020-196

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 การปรับปรุงสมรรถนะทางพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน
Thesis Title Improvement of Power System Dynamic Performance by Photovoltaic Generator with Internal Battery
นักศึกษา นางสาวสุกัญญา โพธิ์สุนทร
รหัสประจำตัว 57601105
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.อิสระชัย งามทร
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-196

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สัญญาชัย เตชานุกาพฤธา	
ดร.ภาพ จันทร์เจริญสุข	
ดร.วรุตม์ สุอำพัน	
ผศ.ดร.วรวรรณ นาคะวิโร	
ศ.ดร.อิสระชัย งามทร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า /
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมรรถนะทางพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน
นักศึกษา	สุกัญญา โปธิสุนทร
รหัสประจำตัว	57601105
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร. อิศระชัย งามหรุ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แบตเตอรี่เพื่อปรับปรุงสมรรถนะทางพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังและ ลดการแกว่งของกำลังไฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic generators : PV) ซึ่ง PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกของ PV ได้ด้วยการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการใช้ PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ สำหรับแก้ไขปัญหาซึ่งแบ่งเป็น 3 หัวข้อ คือ 1. การลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านออกของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน 2. การควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายซึ่งติดตั้งกลุ่มรถยนต์ไฟฟ้า และ 3. การรักษาเสถียรภาพการแกว่งกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ซึ่งในการศึกษานี้ จะดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ในระบบ ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค ผลลัพธ์ที่ได้ทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงให้เห็นว่า PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในให้ผลลัพธ์ในการลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านออกของ PV ได้ดีเมื่อเทียบกับการติดตั้งแบตเตอรี่ที่ขั้วในสถานะปกติ อีกทั้งยังแก้ไขปัญหาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่ติดตั้งรถยนต์ไฟฟ้าได้ และเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบก็สามารถรักษาเสถียรภาพการแกว่งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าได้โดยการติดตั้งตัวหน่วงการแกว่ง และโครงสร้างนี้ทำให้ลดการติดตั้งอินเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่ลงได้ และยังลดจำนวนตัวควบคุมที่ต้องค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมอีกด้วย

Thesis	IMPROVEMENT OF POWER SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE BY PHOTOVOLTAIC GENERATOR WITH INTERNAL BATTERY
Student	Miss Sukanya Pothisoonthorn
Student ID.	57601105
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

ABSTRACT

This thesis proposes the application of battery integrated into the photovoltaic generators (PV) to enhance power system dynamic performance and alleviate power fluctuations. The PV power output of PV with internal battery can be controlled by the inverter. The PV with internal battery is applied in 3 case studies as follows; 1. To suppress the output power fluctuation of renewable energy systems. 2. Voltage regulation in the distribution system with plug-in hybrid electric vehicles. 3. Power swing and voltage stabilization. In this study, the optimization of the proportional-integral (PI) control parameters of PV converters is achieved by the particle swarm optimization. Study results show that the PV with the internal battery provides satisfied control performance in suppressing the output power fluctuation of PV compared with the battery located at the PV bus terminals. Moreover, the voltage regulation in the distribution system with plug-in hybrid electric vehicles can be achieved. During faults, PV with internal battery is able to stabilize the power and voltage swings by integrated power oscillation damper. The PV with internal battery can reduce the inverter installation and also reduce the number of control parameters.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้จากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.อิสระชัย งามทร 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

ที่สำคัญขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ พจน์ โปธิสุนทร และคุณแม่ สุนันทา โปธิสุนทร ที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง พร้อมทั้งเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ ลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา-มารดา ซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุกัญญา โปธิสุนทร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 การใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของ กำลังไฟฟ้าส่งออก และแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากฟาร์มกังหันลมในช่วงกลางคืน.....	3
1.1.2 การใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อให้กำลังไฟฟ้าเรียบ และรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อรถยนต์ไฟฟ้า.....	4
1.1.3 การใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ.....	5
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	6
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	7
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	8
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	9
2.2 แบตเตอรี่.....	14
2.2.1 ชนิดของแบตเตอรี่.....	15
2.2.2 แบบจำลองของแบตเตอรี่.....	18
2.3 ตัวควบคุมแบบพีไอ.....	20
2.4 ตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสและตามอันดับที่สอง.....	21
2.5 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค.....	22
2.5.1 วิธีการปรับตำแหน่งของอนุภาค.....	22
2.5.2 ขั้นตอนและวิธีการหาค่าตอบ.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้านำออก.....	25
3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	26
3.1.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา.....	26
3.1.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของแบตเตอรี่.....	27
3.1.3 วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม.....	28
3.1.3.1 การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์สำหรับ PV	28
3.1.3.2 การออกแบบตัวควบคุมดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์	29
3.1.4 วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม.....	30
3.1.5 ผลการจำลอง.....	31
3.1.6 สรุป.....	34
3.2 ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม..	35
3.2.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา.....	35
3.2.2 การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่.....	35
3.2.2.1 การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์สำหรับ PV	36
3.2.2.2 การออกแบบตัวควบคุมดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่.....	37
3.2.3 วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม.....	37
3.2.4 ผลการจำลอง.....	38
3.2.5 สรุป.....	41
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า.....	42
4.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา.....	43
4.2 การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่.....	44
4.2.1 การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์สำหรับ PV	44
4.2.2 การออกแบบตัวควบคุมดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่.....	45
4.3 วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม.....	46
4.4 ผลการจำลอง.....	46
4.5 สรุป.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า.....	52
5.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา.....	53
5.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	54
5.1.2 ระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	54
5.2 การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่.....	55
5.3 วิธีการออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสม.....	57
5.4 ผลการจำลอง.....	59
5.5 สรุป.....	66
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และรางวัล.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV และแบตเตอรี่.....	27
3.2 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ.....	31
3.3 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ.....	38
4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV และแบตเตอรี่.....	44
4.2 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์และดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์.....	49
5.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV และแบตเตอรี่.....	53
5.2 กรณีศึกษา.....	59
5.3 พารามิเตอร์ของตัวหน่วงการแกว่ง.....	60
5.4 ค่าเวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟลोटต์กรณีที่ 1.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของ PV.....	9
2.2 วงจรสมมูลของโมดูล PV.....	10
2.3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
2.4 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	12
2.5 ตัวอย่างโซลาร์ฟาร์มที่ญี่ปุ่น.....	13
2.6 ระบบเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ติดตั้งจริงที่ญี่ปุ่น.....	13
2.7 วงจรติดตั้งระบบจริงที่ญี่ปุ่น.....	13
2.8 ตัวอย่างโซลาร์ฟาร์มที่เกาะแคริบเบียน.....	14
2.9 วงจรติดตั้งระบบจริงที่เกาะแคริบเบียน.....	14
2.10 เวลาการดีสชาร์จและกำลังไฟฟ้า.....	16
2.11 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์สะสมพลังงานอื่นๆ.....	17
2.12 การเปรียบเทียบราคาของแบตเตอรี่.....	17
2.13 การทำนายราคาของแบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออน.....	17
2.14 การควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่.....	18
2.15 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์.....	21
2.16 โครงสร้างตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตามอันดับที่สอง.....	21
2.17 การเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	23
2.18 แผนผังการหาคำตอบด้วยวิธีการแบบกลุ่มอนุภาค.....	24
3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน.....	26
3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายนอก.....	26
3.3 วงจรไฟฟ้าของแบตเตอรี่ติดตั้งภายในของ PV.....	27
3.4 ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของ PV.....	28
3.5 ระบบควบคุมของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์.....	29
3.6 รูปแบบความเข้มแสงของ PV.....	31
3.7 เส้นโค้งลู่เข้าหาคำตอบของกรณีแบตเตอรี่ภายนอก.....	32
3.8 เส้นโค้งลู่เข้าหาคำตอบของกรณีแบตเตอรี่ภายใน.....	32
3.9 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ภายใต้การจำลองของความเข้มแสง A.....	33
3.10 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ภายใต้การจำลองของความเข้มแสง B.....	33
3.11 กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านอินเวอร์เตอร์.....	33
3.12 ระบบศึกษา.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่ง.....	36
3.14 ตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดแรงดันไฟฟ้าแกว่ง.....	36
3.15 ตัวควบคุมพีไอของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่.....	37
3.16 ความเร็วลม.....	38
3.17 เส้นโค้งการลู่เข้าหาคำตอบของการทำให้เหมาะสม.....	39
3.18 กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1.....	40
3.19 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1.....	40
3.20 กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส 1.....	40
3.21 กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนด้านออกของฟาร์มโซลาร์.....	40
3.22 IAE ของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1.....	41
3.23 IAE ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1.....	41
4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเชื่อมต่อกับ PHEVs.....	43
4.2 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	44
4.3 การควบคุมดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่.....	45
4.4 ความเข้มแสงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	48
4.5 ความต้องการโหลดและการชาร์จกำลังไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า.....	48
4.6 เส้นโค้งลู่เข้าคำตอบกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ที่ขั้วของ PV.....	48
4.7 เส้นโค้งลู่เข้าคำตอบกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน PV.....	48
4.8 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 1.....	49
4.9 แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสในกรณีที่ 1.....	49
4.10 แรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสในกรณีที่ 1.....	50
4.11 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 2.....	50
4.12 แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสในกรณีที่ 2.....	50
4.13 แรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสในกรณีที่ 2.....	50
4.14 การชดเชยกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทั้ง 2 กรณี.....	51
5.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษา.....	53
5.2 ระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	54
5.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	55
5.4 วงจรควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่.....	56
5.5 วงจรตัวหน่วงการแกว่งในรูปควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (P-POD).....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
IX
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 วงจรตัวหน่วงการแกว่งในลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q-POD).....	56
5.7 แผนผังการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค.....	58
5.8 ความเข้มแสงของ PV	59
5.9 เส้นโค้งการลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	60
5.10 กำลังไฟฟ้าที่บัส 1 สำหรับกรณีที่ 1.....	61
5.11 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 สำหรับกรณีที่ 1.....	61
5.12 กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสสำหรับกรณีที่ 1.....	62
5.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 สำหรับกรณีที่ 1.....	62
5.14 กำลังไฟฟ้าจริงของ PV สำหรับกรณีที่ 1.....	62
5.15 กำลังไฟฟ้าเสมือนของ PV สำหรับกรณีที่ 1.....	62
5.16 การชดเชยกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่สำหรับกรณีที่ 1.....	63
5.17 สัญญาณ P-POD สำหรับกรณีที่ 1.....	63
5.18 สัญญาณ Q-POD สำหรับกรณีที่ 1.....	63
5.19 กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ POD ไม่ผ่านการทำให้เหมาะสมในกรณีที่ 1.....	64
5.20 กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ POD มีค่าที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่ 1.....	64
5.21 กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสสำหรับกรณีที่ 2.....	65
5.22 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 สำหรับกรณีที่ 2.....	65
5.23 กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ POD ไม่ผ่านการทำให้เหมาะสมในกรณีที่ 2.....	65
5.24 กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ POD มีค่าที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่ 2.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โลกเราในปัจจุบันนี้มีการพัฒนาก้าวหน้าในด้านเทคโนโลยี และเศรษฐกิจ ตลอดจนจำนวนประชากรโลกเพิ่มมากขึ้น ล้วนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนทำให้แหล่งพลังงานที่มีอยู่ไม่พอใช้เกิดการขาดแคลนพลังงานขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับในบางพื้นที่ หรืออาจนำไปสู่วิกฤตทางด้านพลังงานได้ จึงต้องมีการจัดหากำลังการผลิตพลังงานมากขึ้น แต่การผลิตพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาเชื้อเพลิงจากพลังงานฟอสซิล [1] ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อธรรมชาติ เช่น การปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ส่งผลให้โลกต้องเผชิญกับปัญหาสภาพภูมิอากาศแปรปรวน ดังนั้นเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่น ความมั่นคงด้านพลังงาน และลดมลภาวะในสิ่งแวดล้อม ทำให้แหล่งผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนเข้ามามีบทบาทสำคัญในปัจจุบัน โดยในปัจจุบันมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุผลที่ว่า เป็นพลังงานที่มีอยู่มากมายอย่างไม่จำกัด เข้าถึงได้ง่าย เป็นพลังงานสะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยั่งยืน และข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Generator: PV) เช่น มีอายุการใช้งานยาวนาน การบำรุงรักษาน้อย ไม่สร้างมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น [2] กำลังการผลิตติดตั้งทั่วโลกของ PV ในปี 2016 อยู่ที่ประมาณ 303 GW [3] แต่การผลิตไฟฟ้าของ PV ไม่สามารถคาดเดาได้ โดยจะขึ้นกับสภาพภูมิอากาศซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด ทำให้เกิดปัญหาความผันผวนของการผลิตไฟฟ้า และทำให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้า ซึ่งปัญหาเหล่านี้ทำให้ความมั่นคงของระบบแยลง และอาจนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพของระบบในที่สุด

เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวข้างต้น ในปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์สะสมพลังงานหลายๆ ประเภทมาประยุกต์ใช้ เช่น การใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบฟลายวีล (Flywheel Energy Storage) แก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า [4] การใช้ตัวเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) และขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil: SC) แก้ปัญหาขาดเสถียรภาพการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าเกิน [5] โดยทั่วไปแบตเตอรี่มีความสำคัญสำหรับระบบไฟฟ้าในอนาคตเป็นอย่างมาก และยังสามารถใช้แก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังมากมาย โดยประโยชน์หลักของการติดตั้งแบตเตอรี่เข้าไปในระบบ คือ การให้บริการเสริมแก่ระบบ (Ancillary Service) เช่น มีการนำแบตเตอรี่ที่ติดตั้งที่บัส PV มาใช้เพื่อบรรเทาปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าเกิน [6],[7] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาต่างๆ เพื่อเพิ่มความเชื่อถือให้ระบบ เช่น การรักษาสมดุลของระบบโดยเฉพาะในระบบที่ผลิตไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากพลังงานหมุนเวียนโดยการควบคุมความถี่ (Frequency Regulation) และรักษาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) [8] ซึ่งเมื่อพิจารณาด้านคุณสมบัติของแบตเตอรี่ มีคุณสมบัติที่ดี เช่น มีการตอบสนองที่รวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูง มีราคาถูกกว่าระบบสะสมพลังงานชนิดอื่น และมีหลายขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กระดับกิโลวัตต์ไปจนถึงขนาดใหญ่หลายเมกะวัตต์ [9] เป็นต้น แต่ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแบตเตอรี่ที่สูงเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อลดค่าใช้จ่าย จึงนำแบตเตอรี่ไปติดตั้งที่บัสดีซีของ PV [10] ด้วยโครงสร้างนี้แบตเตอรี่ภายในจะใช้อินเวอร์เตอร์ร่วมกับ PV ทำให้กำลังไฟฟ้าส่งออกของ PV ที่มีแบตเตอรี่ภายในสามารถควบคุมได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงอาทิตย์

มีการนำ PV ที่มีแบตเตอรี่ภายใน ไปใช้ในการแก้ปัญหาหลายอย่างในระบบไฟฟ้า เช่น การปรับปรุงความถี่ในระบบไฟฟ้าผสานร่วมของ PV กับเครื่องผลิตไฟฟ้าดีเซล [11] การรักษาเสถียรภาพความถี่ของระบบไฟฟ้าหลายพื้นที่ [12] การเพิ่มเสถียรภาพสถานะชั่วคราวของระบบกำลังไฟฟ้า [13] การเพิ่มคุณภาพไฟฟ้า [14] การขจัดผลกระทบของการแกว่งแบบไดนามิกในไมโครกริด [15] และการปรับปรุงเสถียรภาพความถี่ และแรงดันของ PV แบตเตอรี่ และโรงไฟฟ้าพลังน้ำในไมโครกริด [16] นอกจากนี้ยังไม่มียานวิจัยใดที่นำแบตเตอรี่ไปติดตั้งภายใน PV ไปประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติ รวมทั้งยังไม่มีมีการพิจารณาการออกแบบค่าที่เหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่ อินเวอร์เตอร์ของ PV เป็นต้น

เพื่อเพิ่มสมรรถนะของ PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในให้มีการประยุกต์ใช้ได้หลากหลายขึ้น จึงนำมาใช้แก้ปัญหาร่วมกันกับเครื่องผลิตไฟฟ้ากังหันลม ระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Synchronous Generator) โดยในสถานะปกติแบตเตอรี่สามารถลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าส่งออกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนได้ และในขณะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ ก็ยังสามารถรักษาเสถียรภาพการแกว่งของระบบได้ นอกเหนือจากนี้ ยังรักษาแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถไฟฟ้าได้ และมีการหาค่าเหมาะสมของพารามิเตอร์ตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์ที่นำมาพิจารณาด้วย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน โดยมี 3 จุดมุ่งหมาย คือ 1. เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าส่งออก 2. เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า และ 3. เพื่อกำจัดการแกว่งกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติ ซึ่งใช้ตัวควบคุมพีไอ สำหรับควบคุมคอนเวอร์เตอร์ต่างๆ ที่ออกแบบ เพราะเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานง่าย และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจะถูกออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด

1.1.1 การใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าส่งออก และแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากฟาร์มกังหันลม

ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม และฟาร์มแสงอาทิตย์มีการใช้งานแพร่หลายทั่วโลก โดยเฉพาะพลังงานลมซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่เติบโตอย่างรวดเร็ว มีการติดตั้งแหล่งผลิตพลังงานลมเพิ่มขึ้นถึง 55 GW ในเวลาเพียง 1 ปี ทำให้กำลังการผลิตพลังงานลมทั่วโลกรวมประมาณ 487 GW ในปี 2016 [17] โดยทั่วไป กังหันลมชนิดความเร็วคงที่โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (Squirrel Cage Induction Generator: SCIG) มีการติดตั้งอย่างแพร่หลาย เพราะมีความทนทาน โครงสร้างไม่ซับซ้อน และราคาถูก แต่อย่างไรก็ตาม กังหันลมชนิดนี้ยังมีข้อเสียคือ มีปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงที่สร้างได้จากกังหันลม และความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนจากกริดทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อกับกริด [18]

ในงานวิจัยที่ [19] ได้มีการแก้ปัญหาการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อกับกริดของฟาร์มกังหันลมชนิดความเร็วคงที่ และฟาร์มโซล่าที่ติดตั้งที่บัสเดียวกันโดยการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของฟาร์มโซล่าด้วยตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ งานวิจัยที่ [20] ได้ใช้ฟาร์มโซล่าที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อแก้ปัญหาการแกว่งแรงดันไฟฟ้า โดยใช้พลังงานสะสมภายในแบตเตอรี่ซึ่งเป็นพลังงานที่เหลือจากการจ่ายโหลด อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ [19] และ [20] ไม่ได้พิจารณาปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้าของกังหันลม และยังไม่ได้นำเสนอวิธีการหาค่าของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสม

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่การใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านออกและแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องมาจากการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมชนิดความเร็วคงที่ซึ่งใช้ SCIG ที่ติดตั้งที่บัสเดียวกัน โดยนำเสนอการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ (Converter) พร้อมทั้งวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอสำหรับอินเวอร์เตอร์ของ PV และตัวควบคุมพีไอของ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัญญาณควบคุม และเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กับระบบที่ไม่ติดตั้งตัวควบคุมพีไอด้วยผลการจำลอง

1.1.2 การใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อให้กำลังไฟฟ้าเรียบและรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า

ปัจจุบันโลกเผชิญปัญหาสภาวะโลกร้อน ซึ่งมีต้นเหตุมาจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบอุตสาหกรรม และการคมนาคม ดังนั้นเพื่อลดมลพิษทางอากาศ ปัจจุบันในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าจึงมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าส่งออกของ PV จะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ซึ่งไม่เพียงแต่ทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าขาออกแต่ยังเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบด้วย (Voltage Rise) [21] และมีการนำรถยนต์ไฟฟ้า(Electrical Vehicles: EVs) เข้ามาใช้อย่างกว้างขวางโดยในปี 2016 มีจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกรวมทั้งสิ้น 2 ล้านคัน โดยเพิ่มขึ้นจากปี 2015 ประมาณ 750,000 คัน[22] แสดงให้เห็นว่ารถยนต์ไฟฟ้าเริ่มมีบทบาทสำคัญต่อระบบคมนาคมมากขึ้น เพื่อลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ และรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด(Plug-in Hybrid Electrical Vehicles: PHEVs) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระบบการขนส่งทั่วโลก[23] เนื่องจากสามารถประหยัดเชื้อเพลิง ลดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม มีความสะดวกและยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่า และราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ไฟฟ้าชนิดแบตเตอรี่ (Battery Electrical Vehicles: BEVs) อีกทั้งปัจจุบันประเทศไทยยังมีนโยบายสนับสนุนส่งเสริมให้เกิดการใช้รถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น [24] การชาร์จกำลังไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไม่เพียงที่จะเพิ่มค่าโหลดสูงสุดแต่ยังส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกลง (Voltage Drop) ในระบบอีกด้วย [25],[26] ปัญหาเหล่านี้ทำให้ลดทอนคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

ในงานวิจัยก่อนหน้า มีการปรับปรุงเรื่องแรงดันไฟฟ้าด้วยการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน และควบคุมการทำงานของ PHEV [27] มีการแก้ปัญหาเรื่องแรงดันไฟฟ้าตกและเกินโดยใช้ระบบ SMES ที่ติดตั้งบริเวณข้างของ PV [28] การชดเชยพลังงานของ SMES สามารถลดความไม่สม่ำเสมอกำลังไฟฟ้าของ PV ได้ โดยยังไม่มีการวิจัยที่เสนอการใช้แบตเตอรี่ซึ่งติดตั้งเข้ากับดีซีลิงค์ภายในของ PV สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และยังใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มี PV และ PHEVs เชื่อมเข้ากับระบบ ด้วยการติดตั้งวงจรแบตเตอรี่ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ทำให้แบตเตอรี่สามารถใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ร่วมกับ PV ได้ และมีการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมของตัวควบคุมของอินเวอร์เตอร์ และดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์อีกด้วย

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่การติดตั้งแบตเตอรี่ร่วมกับ PV และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าส่งออกไม่คงที่ และปัญหาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มี PHEVs และโหลดเชื่อมต่ออยู่ พร้อมอธิบายแบบจำลองการควบคุมแบตเตอรี่และ PV ที่นำเสนอ รวมถึงวิธีการหาค่าที่เหมาะสม และเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการควบคุมที่นำเสนอด้วยผลการจำลอง

1.1.3 การใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ

เมื่อไม่นานมานี้มีการเสนอการประยุกต์ใช้แบบหนึ่งที่มีความซับซ้อนของ PV เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า [29], [30] ตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า (Power Oscillation Damper: POD) จะถูกเพิ่มเข้าไปในลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ PV อินเวอร์เตอร์ การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ PV สามารถนำไปใช้ในการลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของระบบได้ อย่างไรก็ตามมีการยืนยันว่าการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงให้ผลในการรักษาเสถียรภาพได้ดีกว่าการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน [31] ในกรณี PV ที่มีแบตเตอรี่ภายใน กำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนสามารถควบคุมได้พร้อมกันอย่างอิสระ ไม่เพียงแต่ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริงขาออกของ PV เรียบในสภาวะคงตัว แต่ยังสามารถจัดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของระบบ และแรงดันไฟฟ้าจากการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบได้ อย่างไรก็ตาม การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของ PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน และ PODs ในลูปการควบคุมทั้งสองยังไม่เคยใช้ในการแก้ปัญหาการรักษาเสถียรภาพการแกว่งกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ โดยระบบการควบคุมของ PV อินเวอร์เตอร์และแบตเตอรี่จะถูกอธิบาย วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนด้วย PODs สำหรับเสถียรภาพกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ถูกนำเสนอ การออกแบบที่เหมาะสมของ PODs ในทั้งลูปการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือน ดำเนินการบนพื้นฐานของการบรรเทาการแกว่งกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าหลังจากเกิดความผิดปกติของระบบ โดยการศึกษาใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบผลลัพธ์การรักษาเสถียรภาพที่นำเสนอด้วยผลการจำลอง

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาศึกษาการประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ทำให้กำลังไฟฟ้าด้านออกสม่ำเสมอ
2. รักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า และ
3. ลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีความมุ่งหมาย และ วัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ในการทำเสถียรภาพให้เกิดประโยชน์สูงสุด
2. เพื่อประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในสำหรับลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ
3. เพื่อประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในสำหรับทำให้กำลังไฟฟ้าด้านออกสม่ำเสมอ และรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า
4. เพื่อนำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามการแก้ปัญหาของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม

1.3 สมมติฐานการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาศึกษาการประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าด้านออกสม่ำเสมอ รักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า และลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีสมมติฐานของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับบัสบัสบาร์ เพื่อจำลองว่าต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่
2. ผลตอบสนองการควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV และแบตเตอรี่มีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่เร็วกว่าปัญหาที่พิจารณา จึงสมมติได้ว่าสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเพื่อทำเสถียรภาพของระบบได้
3. แบตเตอรี่จำลองโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และสมมติให้พร้อมสามารถสะสมพลังงานและจ่ายพลังงานได้ตลอดเวลา
4. คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการศึกษาไม่คำนึงถึงค่าความสูญเสียกำลังทางไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าด้านออกสม่ำเสมอ รักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า และลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีทฤษฎีและแนวความคิดดังนี้

1. การใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าด้านออกไม่สม่ำเสมอ และแรงดันไฟฟ้า

สาเหตุจากปัญหาของ PV จึงมีการนำแบตเตอรี่มาแก้ปัญหาในการลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านออก รวมทั้งการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกิน และตกเนื่องจากการใช้โหลดแต่ละช่วงเวลาไม่เท่ากัน เพื่อใช้แบตเตอรี่ร่วมกับ PV ให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงเสนอแนวคิดนำแบตเตอรี่มาออกแบบเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าและแก้ไขผลกระทบแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากโหลด พร้อมทั้งออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสม

2. การใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อจัดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพลาด

จากปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพลาด ได้มีการนำตัวหน่วงการแกว่ง (Power oscillation damper: POD) เข้ามาใช้สำหรับลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าในขณะเกิดความผิดพลาด จึงมีแนวคิดที่จะนำอุปกรณ์ตัวหน่วงการแกว่งนี้มาติดตั้งอยู่ในระบบ PV และออกแบบให้สามารถช่วยแก้ไขปัญหาในขณะเกิดความผิดพลาดได้ และในสภาวะปกติก็ยังลดกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอให้ออกได้ด้วย และยังต้องการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสม

จากแนวคิดที่ได้กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้ได้นำมาทดสอบกับการทำเสถียรภาพของระบบโดยได้แยกพิจารณาหลายระบบ ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 บทที่ 4 และบทที่ 5

3. วิธีการหาค่าเหมาะสมสุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO)

วิธีการหาค่าเหมาะสมสุดแบบกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีการที่การหาค่าตอบของปัญหาโดยอาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร[32] ซึ่งมีแนวความคิดมาจากพฤติกรรมทางสังคมของสัตว์ที่อยู่ร่วมกันเป็นกลุ่ม เช่น การหาอาหารของฝูงนกหรือฝูงปลา และวิธีนี้ยังนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้ง่าย ตัวแปรน้อย มีแนวคิดที่ไม่ซับซ้อน มีคุณลักษณะการลู่เข้าหาค่าตอบที่ดี และมีความแม่นยำในการคำนวณ วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ทฤษฎีกลุ่มอนุภาคมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมพีไอ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

การประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าด้านออกสม่ำเสมอ รักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า และลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ เพื่อทำเสถียรภาพภายใต้การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [33] รายละเอียดอธิบายได้ดังนี้

1. ประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าด้านออกสม่ำเสมอและออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสม
2. ประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าเรียบ และรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า รวมถึงออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสม
3. การประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อจัดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติ รวมถึงออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสม

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอนและรายละเอียดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตามอันดับที่สอง และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

บทที่ 3 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าด้านออกสม่ำเสมอ

บทที่ 4 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 5 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

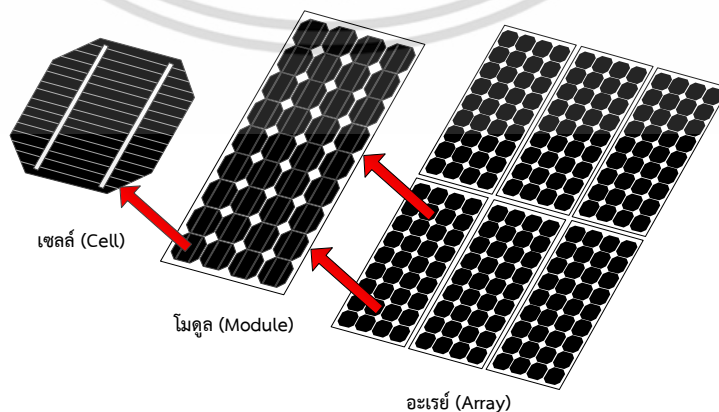
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้นำเสนอโครงสร้างแบบจำลอง และหลักการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตามอันดับที่สอง และในท้ายบทนี้อธิบายถึงเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีแบบกลุ่มอนุภาค

2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

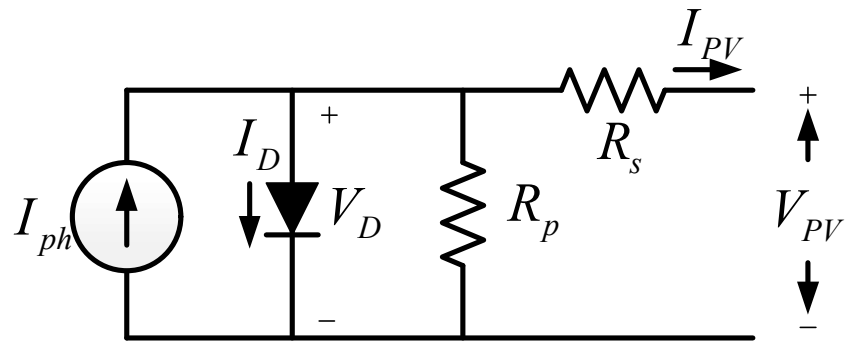
ปัจจุบันมีการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) อย่างกว้างขวาง เนื่องจากทั่วโลกตระหนักถึงปัญหาของสิ่งแวดล้อมที่ได้รับผลกระทบมาจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ และน้ำมันที่มีอย่างจำกัด ทำให้เกิดปัญหาขาดแคลนเชื้อเพลิง การผลิตไฟฟ้าจากแสงแดดไม่สร้างมลภาวะ เป็นพลังงานที่สะอาด ยั่งยืน มีอยู่รอบตัวมากมาย และเข้าถึงได้ง่าย ดังนั้นจึงมีความคาดหวังที่จะนำมาทดแทนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิง

กระบวนการผลิตกำลังไฟฟ้าของ PV เกิดจากแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โครงสร้างของ PV ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็น (P-N junction) ของสารกึ่งตัวนำ เซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ประกอบด้วยรอยต่อพีเอ็น 1 ชุดเรียกว่า 1 เซลล์ (Cell) หากต้องการเพิ่มแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น สามารถนำเซลล์มาต่ออนุกรมหรือขนานกันได้ เรียกว่า โมดูล (Module) และเมื่อต้องการสร้างให้เป็นระบบการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ขึ้นต้องนำโมดูลมาต่อกันเป็นแผง เรียกว่า อะเรย์ (Array) ดังรูปที่ 2.1 ในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ การต่อร่วมกันแบบอนุกรมจะเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ให้สูงขึ้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้านั้น และการต่อแบบขนานจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นขณะที่แรงดันไฟฟ้าคงที่



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ PV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของโมดูล PV

แบบจำลองของ PV สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลเสมือนตัวไดโอดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส แสดงดังรูปที่ 2.2 [34] ซึ่งวงจรของโมดูล PV ประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแส (I_{ph}) ไดโอด ตัวต้านทานภายในที่ต่อขนาน (R_p) และตัวต้านทานภายในที่ต่ออนุกรม (R_s) โดยที่กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรสามารถหาได้จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law: KCL) ซึ่งแสดงดังสมการ (2.1)

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} \quad (2.1)$$

กำหนดให้ I_{PV} คือ กระแสไฟฟ้าขาออกของโมดูล PV

I_D คือ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอด

V_D คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด

เนื่องจากกราฟคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเหมือนกับไดโอดเมื่ออยู่ในช่วงเวลาไร้แสงและผลิตไฟฟ้าเมื่อได้รับแสง สมการที่ (2.1) เมื่อพิจารณาคคุณลักษณะของไดโอดจะสามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดได้จากสมการที่ (2.2)

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

กำหนดให้ I_0 คือ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิ่มตัว

q คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่า 1.6022×10^{-19} คูลอมป์

k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant 1.3806×10^{-23} J/K)

T คือ อุณหภูมิของเซลล์ ($^{\circ}\text{C}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

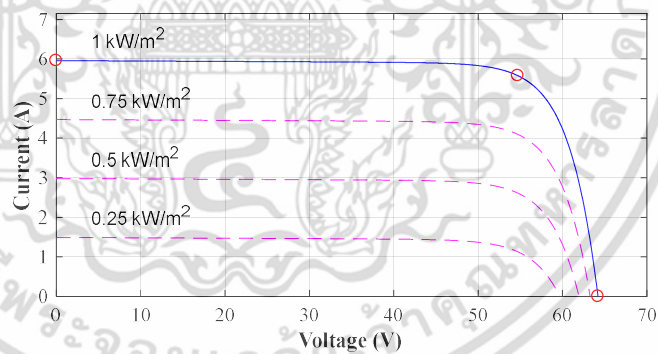
แรงดันขาออกของโมดูล PV (V_{PV}) หาได้จากการใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law: KVL) จะได้สมการที่ (2.3) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูล PV (P_{PV}) จะหาได้ดังสมการที่ (2.4)

$$V_{PV} = V_D - I_{PV} R_s \quad (2.3)$$

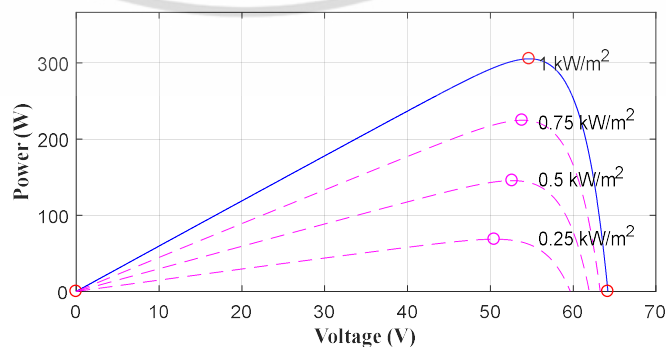
$$P_{PV} = V_{PV} I_{PV} \quad (2.4)$$

เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นโค้งความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve) และเส้นโค้งความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (P-V Curve) แสดงดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ PV ผลิตได้แปรผันตรงกับความเข้มของแสงอาทิตย์ โดยที่ความเข้มแสงเดียวกัน แต่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีเพียงจุดการทำงานเดียวเท่านั้นที่ส่งผลให้ PV สร้างกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ดังนั้นต้องมีชุดติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับ PV (Maximum Power Point Tracking: MPPT) เพื่อควบคุมให้ PV จ่ายที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดตลอด ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีติดตามแบบเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance) [35]

วิธีนี้มีข้อดีคือ ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้ และมีความแม่นยำเมื่อความเข้มแสงแดดเกิดเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และยังเป็นวิธีที่นิยมใช้กัน [36]



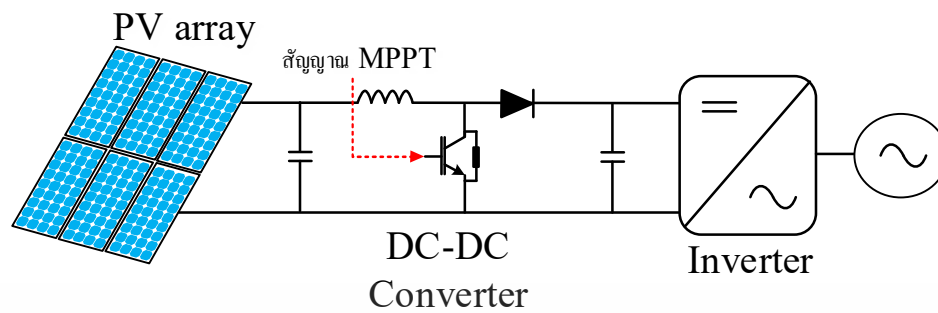
(ก) เส้นโค้งความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve)



(ข) เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V Curve)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 กราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.4 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

รูปที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของ PV ขนาดใหญ่ ได้แก่ PV array ภายในคือการนำโมดูล PV มาต่อกัน ซึ่งทำหน้าที่สร้างกระแสไฟฟ้าจากความเข้มแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC converter) ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าขาออกของ PV array ให้มีแรงดันไฟฟ้าตามที่สัญญาณ MPPT ซึ่งต้องการ ให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทำหน้าที่เชื่อมต่อระบบ PV เข้ากับกริด โดยแปลงไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าตรงเป็นกระแสไฟฟ้าสลับ

ในปัจจุบันฟาร์มแสงอาทิตย์ที่ใหญ่ที่สุดในโลกตั้งอยู่ที่ประเทศจีน ซึ่งมีขนาดพิกัดกำลังถึง 1500 MW ฟาร์มแสงอาทิตย์มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ อยู่เสมอ เช่นล่าสุด มีการสร้างฟาร์มแสงอาทิตย์บนน้ำ หรือจะเป็นความก้าวหน้างานวิจัยที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์จับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพื่อเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) [37] และยังมีการประยุกต์ใช้งานจริงในด้านต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ที่เกาะโอกุโนะชิม่า ประเทศญี่ปุ่นมีการติดตั้ง PV ขนาด 2 MW ดังรูปที่ 2.5 เชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ทำให้เกิดปัญหาความผันผวนของความถี่ในระบบเนื่องจากโรงไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าส่งออกเพื่อตอบสนองต่อเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตอย่างรวดเร็วของ PV ได้ จึงมีการติดตั้งแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน พิกัด 2 MW, 780 kWh ดังรูปที่ 2.6 เพื่อรักษากำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ให้อยู่ในช่วงการแกว่งไม่เกิน 5 kW ต่อวินาที และเป็นแหล่งกำลังไฟสำรองให้ระบบได้ 7 นาที หาก PV หยุดทำงานไปชั่วขณะ รูปที่ 2.7 แสดงวงจรจริงของระบบ [38] และตัวอย่างการใช้งานจริงอีกแห่งหนึ่งคือที่เกาะแคริบเบียน มีเป้าหมายลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องผลิตไฟฟ้าดีเซล จึงติดตั้ง PV ขนาด 1.9 MW ซึ่งเชื่อมต่อกับระบบเดิมคือเครื่องผลิตไฟฟ้าดีเซลขนาด 4 MVA เพื่อรักษาเสถียรภาพของกริดเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของการผลิตไฟฟ้าจาก PV ที่คาดเดาไม่ได้ จะขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับในขณะนั้น จึงติดตั้งแบตเตอรี่ขนาด 1 MW, 570 kWh เพื่อสามารถจัดเก็บ และจัดหาพลังงานให้ระบบ สำหรับรักษาเสถียรภาพทางความถี่ของระบบได้ โดยติดตั้งตัวควบคุมเพื่อควบคุมให้แบตเตอรี่ตอบสนองต่อความต้องการโหลด และความเข้มแสงอาทิตย์โดยอัตโนมัติ รูปตัวอย่างฟาร์ม และระบบใช้งานจริงของระบบแสดงดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

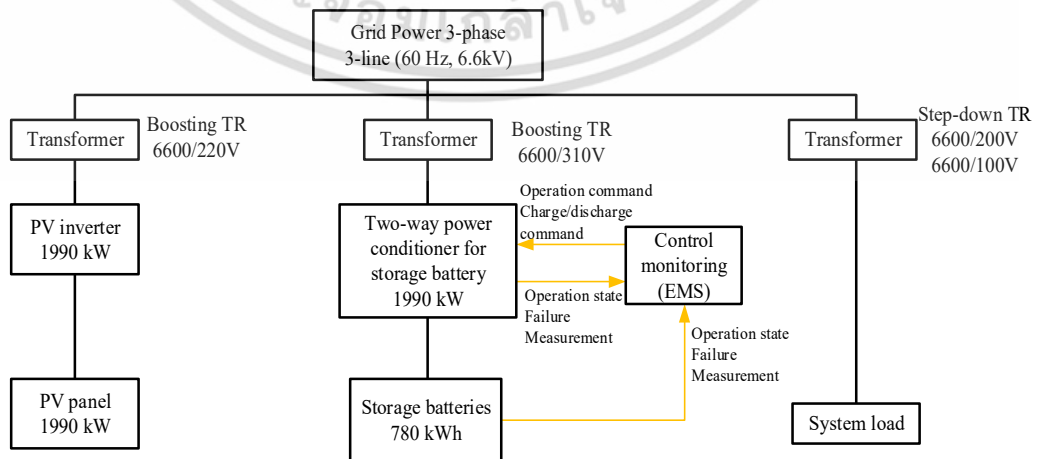
และรูปที่ 2.9 ซึ่งผลลัพธ์ในการติดตั้ง PV และแบตเตอรี่เข้าไปในระบบทำให้ลดปริมาณการปล่อย CO₂ จากเครื่องผลิตไฟฟ้าดีเซลได้ถึง 2240 ตันต่อปี และลดการใช้เชื้อเพลิงถึง 800,000 ลิตร [39]



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโซลาร์ฟาร์มที่ญี่ปุ่น[38]



รูปที่ 2.6 ระบบเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ติดตั้งจริงที่ญี่ปุ่น[38]

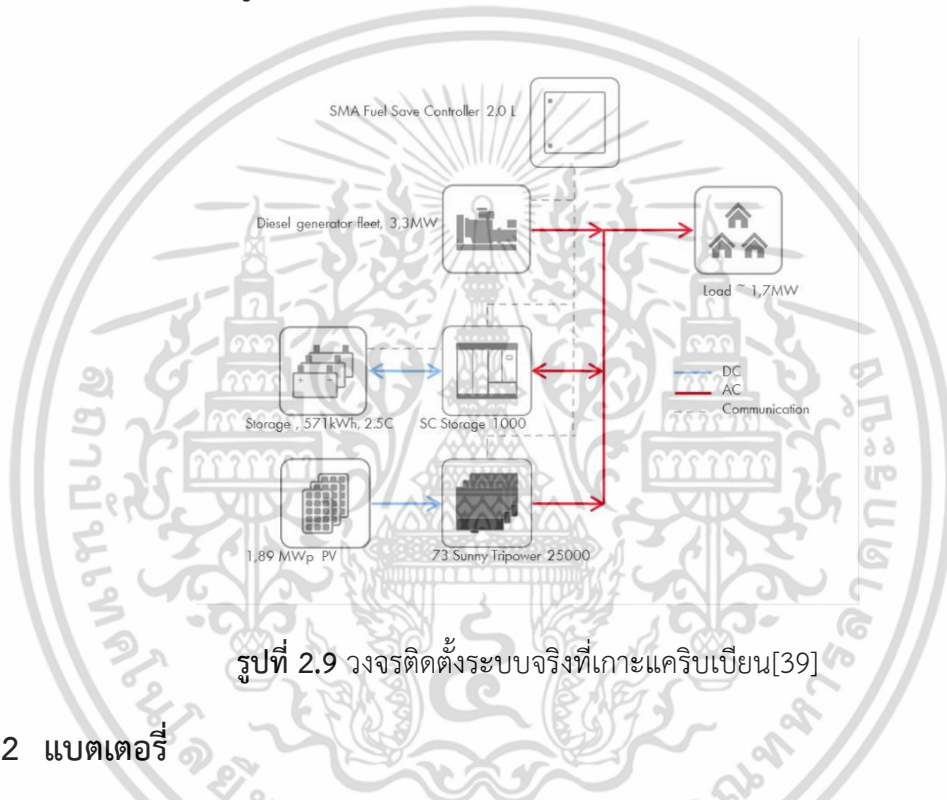


รูปที่ 2.7 วงจรติดตั้งระบบจริงที่ญี่ปุ่น[38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโซลาร์ฟาร์มที่เกาะแคริบเบียน[39]



รูปที่ 2.9 วงจรติดตั้งระบบจริงที่เกาะแคริบเบียน[39]

2.2 แบตเตอรี่

ในปัจจุบันมีการนำองค์ความรู้เทคโนโลยีทางวิศวกรรมเข้ามาผสมผสานกับระบบพลังงานทดแทน เป็นแรงกระตุ้นที่สำคัญในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนด้วยแบตเตอรี่ การพัฒนาเทคโนโลยีการสะสมพลังงานของแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพมีความสำคัญในการเพิ่มความมั่นคง และความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า ข้อดีหลัก ๆ ของการติดตั้งระบบสะสมพลังงานคือ สามารถช่วยลดการก่อสร้างโรงไฟฟ้าสำรองเนื่องมาจากผลกระทบจากช่วงเวลาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด ช่วยลดค่าความสูญเสียจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ โดยลดช่วงเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับให้สั้นลง ข้อดีของการผลิตไฟฟ้าด้วยการพึ่งพาแสงแดดและพลังงานลม คือ การไม่สามารถคาดเดาความเร็วของลมที่พัดผ่านแต่ละช่วงเวลา และรังสีจากแสงแดด ซึ่งทำให้เกิดความผันผวนของการผลิตไฟฟ้า ซึ่งการใช้แบตเตอรี่ติดตั้งในระบบจะส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีความยืดหยุ่น สามารถสะสมพลังงานให้เพียงพอต่อโหลดได้ตลอดทั้งวัน และบริหารจัดการพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ก่อให้เกิดพลังงานสูญเสียสำหรับในกรณีที่เกิดไฟฟ้ามากเกินไป การใช้โหลดไฟฟ้า สังเกตได้ว่าระบบสะสมพลังงานกลายเป็นกุญแจสำคัญทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และการสร้างระบบไฟฟ้าที่ยั่งยืน

ระบบสะสมพลังงานชนิดแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานในรูปแบบไฟฟ้าเคมี โดยใช้หลักการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในปัจจุบันมีการนำแบตเตอรี่มาใช้ในระบบสะสมพลังงานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีต้นทุนถูกลงและยังมีการพัฒนาประสิทธิภาพในการสะสมพลังงานให้สูงขึ้น ในปัจจุบันมีแบตเตอรี่ที่นิยมนำมาใช้งานร่วมกับ PV หลายชนิด เช่น แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม และแบตเตอรี่โซเดียม-ซัลเฟอร์ เป็นต้น

2.2.1 ชนิดของแบตเตอรี่

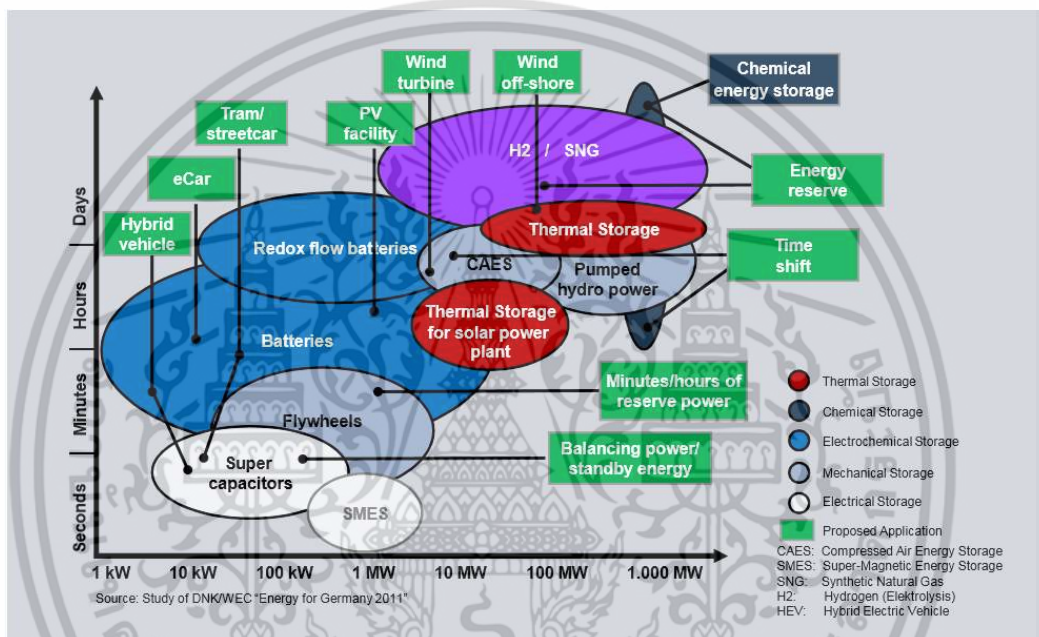
แบตเตอรี่ที่นิยมใช้กันส่วนมากในปัจจุบัน คือ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead Acid) และ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-Ion) ซึ่งทั้งสองชนิดนี้ มีการใช้งานมายาวนาน และมีการพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานหลากหลายรูปแบบ เช่น นำมาสะสมพลังงานให้กับระบบไฟฟ้าทั่วไป เช่น ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าฉุกเฉิน ระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบแยกอิสระ ระบบสะสมพลังงานสำหรับลดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานลม รวมถึงการจุดติดเครื่องยนต์ของยานพาหนะ เป็นต้น ถัดไปจะกล่าวถึงข้อดีข้อเสียของแบตเตอรี่แต่ละชนิด [40],[41]

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด มีอัตราการคายประจุไฟฟ้าต่ำ แต่การคายประจุไฟฟ้าสูง ๆ จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง มีความน่าเชื่อถือสูง มีประสิทธิภาพอยู่ประมาณ 80% และทนทานต่อการกระชากไฟฟ้าส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองและการแก้ไขคุณภาพไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดนี้มีต้นทุนถูกกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ อายุการใช้งานน้อยประมาณ 1500 ไซเคิล มีความหนาแน่นทางพลังงานต่ำทำให้ขนาดแบตเตอรี่ใหญ่ตามมาเมื่อต้องการใช้ที่พิกัดสูงๆ ต้องการการบำรุงรักษาที่ดีและระบบการจัดการความร้อนเมื่อใช้งาน เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพต่ำที่อุณหภูมิเย็น

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน เนื่องจากมีความหนาแน่นทางพลังงานสูงทำให้ลดขนาดของแบตเตอรี่ลงได้ และยังมีความสำคัญกับเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานในอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ได้ อุปกรณ์พกพา เช่น มือถือ คอมพิวเตอร์แบบพกพา รถยนต์ไฟฟ้า และยังมีแนวโน้มไปช่วยในการจัดพลังงาน รักษาประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงอยู่ที่ 95% มีอายุการใช้งานนาน 5000 ไซเคิล

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม มีความหนาแน่นพลังงานและอายุการใช้งานมากกว่า แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ใช้เวลาในการชาร์จประจุน้อยกว่า อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ชนิดนี้ ก็มีข้อเสียคือ จะต้องใช้ประจุให้หมดก่อนที่ชาร์จประจุใหม่ และมีปัญหาในด้านการทำงานที่อุณหภูมิสูง และแคดเมียมก็เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

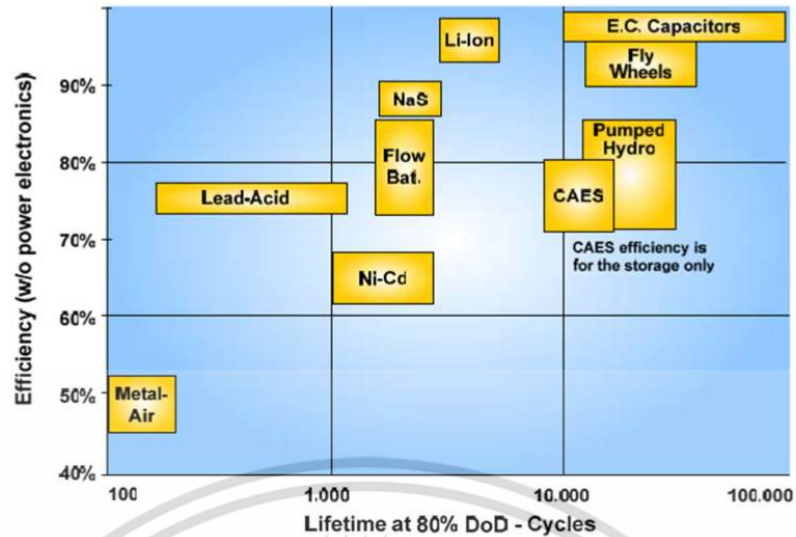
แบตเตอรี่โซเดียม-ซัลเฟอร์เป็นแบตเตอรี่ที่พัฒนาขึ้นเพื่อที่จะลบลจุดบกพร่องในเรื่องของความหนาแน่นพลังงานที่ต่ำของแบตเตอรี่ ที่ไม่เพียงพอสำหรับความต้องการของรถไฟฟ้าสมรรถนะสูง แม้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้กันอย่างกว้างขวางนัก เนื่องจากการทำงานที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 350°C เพื่อให้ไอเล็กโทโรไลต์ที่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องหลอมละลายและนำไฟฟ้าได้ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นพลังงานสูงมาก (150-240 W/kg) สามารถชาร์จประจุได้รวดเร็ว แต่ราคาในการสร้างสูงเนื่องจากมีความหนาแน่นทางพลังงานสูง มีประสิทธิภาพที่ดี มีอายุการใช้งานยาวนานถึง 4500 ไซเคิล แต่มีข้อเสียคือต้องใช้แหล่งความร้อนในการช่วยสะสมพลังงานไฟฟ้า



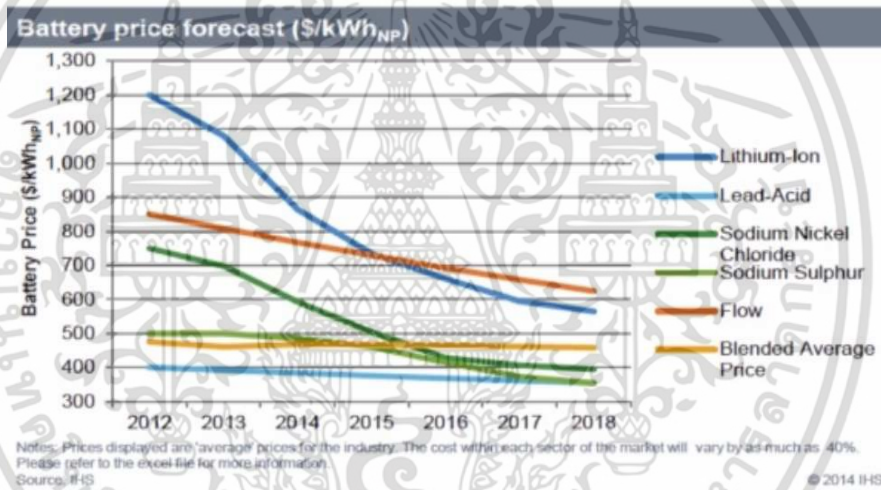
รูปที่ 2.10 เวลาการดิสชาร์จและกำลังไฟฟ้า[42]

ในรูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบช่วงของกำลังไฟฟ้าและเวลาในการดิสชาร์จของอุปกรณ์สะสมพลังงานชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีขอบเขตกว้าง มีหลายขนาดให้เราเลือกตั้งแต่หลักกิโลวัตต์ไปจนถึงหลายเมกะวัตต์ และใช้ระยะเวลาในการดิสชาร์จพลังงานมีตั้งแต่ใช้เพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆไม่กี่นาที หรืออาจจะใช้ระยะยาวนานเป็นชั่วโมงหรือยาวนานเป็นวันเพื่อเป็นแหล่งกำลังไฟฟ้าสำรอง ซึ่งทำให้สามารถบริหารจัดการพลังงานที่สะสมไว้ในแบตเตอรี่ได้โดยเลือกพิกัดกำลังและพิกัดพลังงานของแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับการใช้งาน และแบตเตอรี่สามารถแปลงพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 65 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ที่แสดงดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์สะสมพลังงานอื่นๆ[42]



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบราคาของแบตเตอรี่ [43]



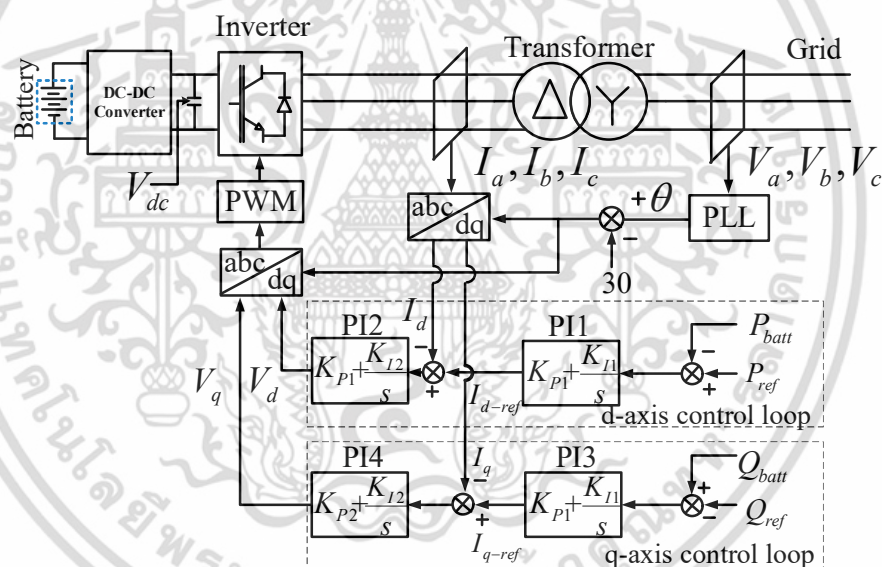
รูปที่ 2.13 การทำนายราคาของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในเรื่องราคาของระบบแบตเตอรี่จะแสดงในรูปที่ 2.12 จากข้อมูลปี ค.ศ. 2014 ได้มีข้อมูล และการคาดการณ์ราคาของแบตเตอรี่ตั้งแต่ปี 2012 จนถึงปี 2018 จะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน มีแนวโน้มของราคาลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1200 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ เหลือประมาณ 600 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ แต่ราคาของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ซึ่งมีราคาประมาณ 400 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ ราคากลับลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ข้อมูลในปี 2016 จากรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นว่าราคาของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออนในอนาคตมีแนวโน้มที่จะถูกลงเรื่อยๆ แต่ประสิทธิภาพก็มากขึ้นเนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังคงมีการพัฒนาอยู่ และในอนาคตอาจจะมีราคาใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ซึ่งน่าจะทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้มากยิ่งขึ้น

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน มีประสิทธิภาพสูงกว่า 90% และมีอายุการใช้งานนานกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ และยังมีการพัฒนาต่อในอนาคต ประกอบกับราคาของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีแนวโน้มลดลง ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้

2.2.2 แบบจำลองของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.14 การควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่

แบบจำลองของแบตเตอรี่ที่ติดตั้งที่ขั้วของ PV สำหรับการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 2.14 อินเวอร์เตอร์ใช้การควบคุมแบบแรงดัน (VSC) โดยวิธีการควบคุมอธิบายได้ดังนี้ แปลงแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (V_a, V_b, V_c) และกระแสไฟฟ้า 3 เฟส (I_a, I_b, I_c) ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแกนตรง (Direct Axis: d) และแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis: q) จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos wt & \cos(wt-120^\circ) & \cos(wt+120^\circ) \\ -\sin wt & -\sin(wt-120^\circ) & -\sin(wt+120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

และ

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos wt & \cos(wt-120^\circ) & \cos(wt+120^\circ) \\ -\sin wt & -\sin(wt-120^\circ) & -\sin(wt+120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

กำหนดให้ V_d คือ แรงดันไฟฟ้าในแนวแกน d

V_q คือ แรงดันไฟฟ้าในแนวแกน q

I_d คือ กระแสไฟฟ้าในแนวแกน d

I_q คือ กระแสไฟฟ้าในแนวแกน q

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ของอินเวอร์เตอร์เป็นตามสมการที่ (2.7) และ (2.8)

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

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

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}) เพื่อควบคุมการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงของอินเวอร์เตอร์ ขณะที่กระแสไฟฟ้าแกนตั้งฉาก (I_q) ถูกควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้าแกนตั้งฉากอ้างอิง (I_{q-ref}) เพื่อควบคุมการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่กริด (V_g)

2.3 ตัวควบคุมแบบพีไอ

ระบบควบคุมแบบใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) หรือตัวควบคุมแบบปรับสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional Integral Controller) เป็นตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ และมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยระบบที่ใช้มักเป็นระบบที่ควบคุมง่ายไม่ซับซ้อน โดยค่าที่นำมาใช้ในการควบคุมพีไอเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความแตกต่างของค่าที่ต้องการควบคุมกับค่าที่รับหรือวัดมาได้ เพื่อใช้ควบคุมให้ค่าเป็นไปตามต้องการ ตัวควบคุมพีไอแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวควบคุมพีหรือตัวควบคุมสัดส่วนสัญญาณ และตัวควบคุมไอ หรือตัวควบคุมปริพันธ์

ตัวควบคุมพีหรือตัวควบคุมสัดส่วน (Proportional Controller) เป็นค่าคงที่หรืออัตราขยาย ใช้เพื่อขยายขนาดค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงไป เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบ โดยการตอบสนองสัดส่วนสามารถแสดงด้วยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยอัตราขยายสัดส่วนตามสมการ (2.11)

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

โดยที่ P_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน
 K_p คือ อัตราส่วนขยาย
 e คือ ค่าความผิดพลาด
 t คือ เวลา

ตัวควบคุมไอหรือตัวควบคุมปริพันธ์ (Integral Controller) เป็นสัดส่วนของความผิดพลาด และช่วงเวลาของความผิดพลาด ใช้จัดค่าความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวของระบบให้หมดไป ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลาถูกคูณด้วยค่าปริพันธ์ดังสมการ (2.12)

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

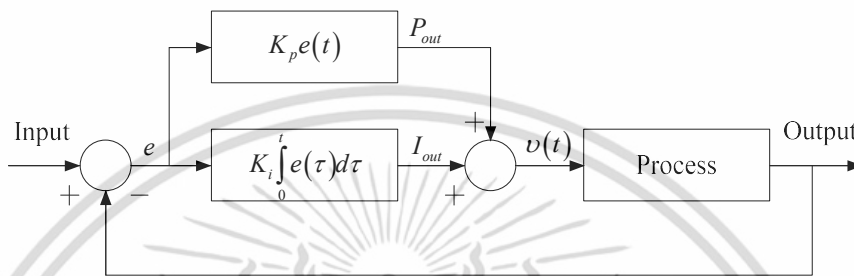
โดยที่ I_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์
 K_i คือ อัตราขยายปริพันธ์
 e คือ ค่าความผิดพลาด
 t คือ เวลา
 τ คือ ตัวแปรใช้ในการอินทิเกรต

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

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

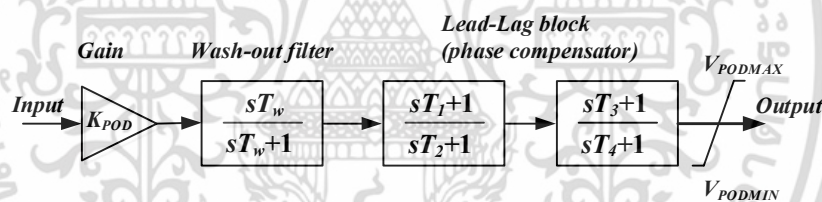
โดยที่ v คือ สัญญาณขาออกของตัวควบคุมพีไอ

และสามารถแสดงโครงสร้างของสมการ (2.13) ได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์

2.4 ตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตามอันดับที่สอง



รูปที่ 2.16 โครงสร้างตัวควบคุมแบบชดเชยเฟสนำและตามอันดับที่สอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โครงสร้างของตัวหน่วงการแกว่งกำลัง (Power oscillation damper, POD) ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีโครงสร้างแบบชดเชยเฟสนำและตามอันดับที่สอง โดยพารามิเตอร์ ของตัวหน่วงการแกว่งประกอบด้วย อัตราขยายสำหรับเสถียรภาพ (K_{POD}), ค่าคงที่เวลาสำหรับกรองสัญญาณความถี่สูง (T_w) ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 10 s ค่าคงที่เวลาสำหรับทำเสถียรภาพลำดับที่ 1 ถึง ลำดับที่ 4 (T_1, T_2, T_3, T_4) โดยสัญญาณขาเข้าของ POD คือสัญญาณที่ตรวจวัดเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง สัญญาณทำเสถียรภาพขาออกของ POD จะถูกส่งไปยังลูบควบคุมสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ โดยสัญญาณขาออกจะถูกจำกัดโดยตัวจำกัดขอบเขตบน ($V_{POD MAX}$) และขอบเขตล่าง ($V_{POD MIN}$) ที่สภาวะปกติสัญญาณทำเสถียรภาพขาออกของ POD มีค่าเป็น 0 และในขณะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ POD จะถูกออกแบบให้ขจัดความผิดปกติที่เกิดขึ้นเช่น เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นระบบจะถูกควบคุมจนกว่าสัญญาณขาเข้าของ POD จะกลับสู่สภาวะปกติอีกครั้ง จึงสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

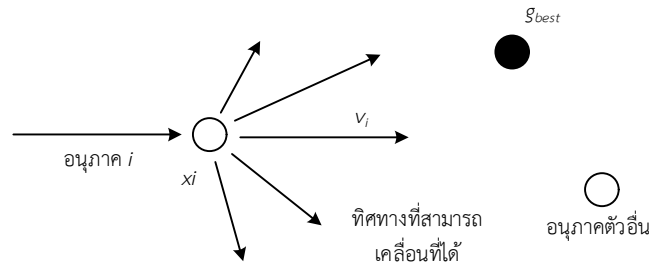
2.5 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

โดยทั่วไปปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรมมักมีมากกว่าหนึ่งตัวแปร การแก้ปัญหาโดยใช้ความชำนาญในการคาดเดาคำตอบหรือการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงกราฟอาจไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดหลายตัวแปรที่มีเงื่อนไขต่างๆรวมอยู่ด้วย ดังนั้นการใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งมีขั้นตอนหลักการคำนวณอย่างมีระบบและมีประสิทธิภาพ และเมื่อถูกนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็จะได้รับคำตอบที่รวดเร็วและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่ม ซึ่งมีแรงบรรดาลใจมาจากพฤติกรรมทางสังคมของสัตว์ เช่น การหาอาหารตามธรรมชาติของฝูงสัตว์ต่างๆ เช่น การเคลื่อนที่ของฝูงนกในการหาอาหารที่มีลักษณะการเคลื่อนไหวที่สอดคล้องกันในฝูงขณะหาอาหาร โดยการส่งสัญญาณสื่อสารกันภายในกลุ่มเพื่อให้รู้ตำแหน่งของอาหาร และทำการเคลื่อนที่ไปยังแหล่งอาหารที่ได้รับข้อมูล ซึ่งพฤติกรรมที่น่าสนใจของสัตว์เหล่านี้ คือ การอยู่รวมกันเป็นกลุ่มจะอาศัยการปรับตัวด้วยตัวเองตามสภาพแวดล้อม โดยอาศัยการเรียนรู้คุณลักษณะที่เหมาะสมของการอยู่รวมกันภายในกลุ่ม เริ่มต้นจากปฏิสัมพันธ์จากกลุ่มย่อยๆ ไปสู่กลุ่มใหญ่ ในปี ค.ศ. 1995 Kennedy และ Eberhart[32] ได้เสนอวิธีแบบกลุ่มอนุภาคนี้เป็นครั้งแรก โดยใช้หลักการในการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเรียนรู้และปรับตำแหน่งของอนุภาค จนกระทั่งอนุภาคหยุดเคลื่อนที่และอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่ง PSO เป็นวิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดที่มีประสิทธิภาพ มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ และปัญหาทางวิศวกรรมมากมาย เช่น แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimal solution) ปัญหาการเลือกจ่ายพลังงานโดยคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ (Economic dispatch) ปัญหาการวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system planning) และปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมอื่นๆ เนื่องจาก PSO มีแนวคิดไม่ซับซ้อนเข้าใจง่าย มีตัวแปรน้อย [45] ดังนั้น PSO จึงถูกนำมาใช้หาค่าเหมาะสมที่สุดในวิทยานิพนธ์นี้

2.5.1 วิธีการปรับตำแหน่งของอนุภาค

วิธีแบบกลุ่มอนุภาคเป็นกระบวนการเรียนรู้ในการเคลื่อนที่เพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งของตัวเองไปตามอนุภาคแวดล้อมที่อยู่ในตำแหน่งที่ดีและเหมาะสมกว่า ซึ่งการปรับตำแหน่งของแต่ละอนุภาคจะเปลี่ยนตามข้อมูลสภาพแวดล้อมที่เคลื่อนที่ผ่านกับข้อมูลที่ได้รับภายในกลุ่มด้วยกัน จนกระทั่งแต่ละอนุภาคอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเปรียบได้กับการพบคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งสามารถจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของอนุภาค

จากรูปที่ 2.17 เมื่ออนุภาค i เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง x_i จะทำการอัปเดตตำแหน่งของตัวเอง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งของอนุภาคตัวอื่น เพื่อหาตำแหน่งที่ดีที่สุดกลุ่ม (g_{best}) และตำแหน่งที่ดีที่สุดของตัวเอง (p_{best}) ในรอบการคำนวณนั้นๆ และนำค่าคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการคำนวณเก่ามาเปรียบเทียบกับรอบการคำนวณใหม่ (Fitness function: $F(g)$) เพื่อคัดเลือกค่าที่ดีที่สุด ซึ่งทุกครั้งที่จบรอบการคำนวณ ความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาค v_i จะถูกอัปเดต เพื่อเป็นทิศทางในการเคลื่อนที่ใหม่ของอนุภาคในรอบถัดไป การเคลื่อนที่ของอนุภาค และตำแหน่งใหม่ของอนุภาคสามารถแทนด้วยสมการ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ

$$v_i^{N+1} = v_i^N + \alpha \varepsilon_1 [g_{best} - x_i^N] + \beta \varepsilon_2 [p_{best} - x_i^N] \quad (2.14)$$

$$x_i^{N+1} = x_i^N + v_i^{N+1} \quad (2.15)$$

โดยที่ α, β คือ แฟคเตอร์การเรียนรู้ (learning factors)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ คือ เวกเตอร์สุ่ม มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

N คือ ตัวเลขบอกรอบการคำนวณ

i คือ ตัวเลขบอกลำดับของอนุภาค

2.5.2 ขั้นตอนและวิธีการหาคำตอบ

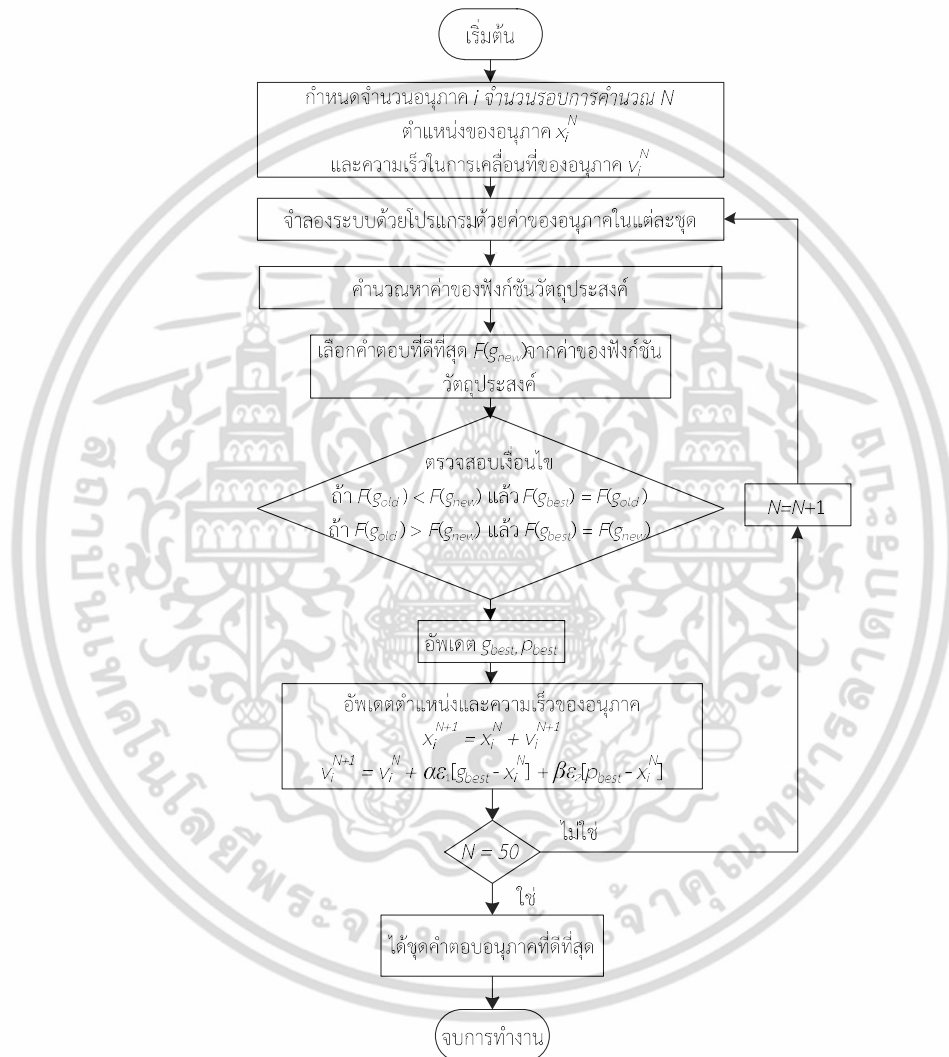
1. กำหนดค่าเริ่มต้นซึ่งประกอบด้วย จำนวนอนุภาค (i) จำนวนรอบการคำนวณ (N) ตำแหน่ง (x_i) และความเร็วการเคลื่อนที่ (v_i) เริ่มต้นของอนุภาค รวมทั้งกำหนดขอบเขตของตำแหน่งที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

2. จำลองระบบในโปรแกรมเพื่อหาผลลัพธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอนุภาค i จำนวน และนำผลลัพธ์ของแต่ละอนุภาคมาเปรียบเทียบกับ ค่าผลลัพธ์ของตำแหน่งใดที่ให้ผลลัพธ์น้อยที่สุดคือ ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณนั้นๆ

3. นำค่าผลลัพธ์มาตรวจสอบเงื่อนไขเพื่อหาตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของการหาคำตอบ ถ้าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดตัวเก่า ($F(g_{old})$) น้อยกว่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดตัวใหม่ ($F(g_{new})$) แล้ว ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของการหาคำตอบ ($F(g_{best})$) จะเท่ากับผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเก่า แต่ถ้าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดตัวใหม่น้อยกว่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดตัวเก่า แล้วผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของการหาคำตอบเท่ากับผลลัพธ์ที่ดีที่สุดตัวใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนเป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการอัปเดตค่าของผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของการหาคำตอบ ตำแหน่ง และความเร็วของอนุภาค
5. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดทำงาน ซึ่งจำนวนรอบของการคำนวณ N ตั้งไว้ที่ 50 รอบ ซึ่งหากไม่ครบตามจำนวนที่กำหนดให้ทำการคำนวณซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 2 แต่หากครบตามกำหนดแล้วให้หยุดการทำงาน และจะได้รับค่าตำแหน่งที่ดีที่สุด โดยขั้นตอนการหาคำตอบแสดงดังแผนผังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แผนผังการหาคำตอบด้วยวิธีการแบบกลุ่มอนุภาค

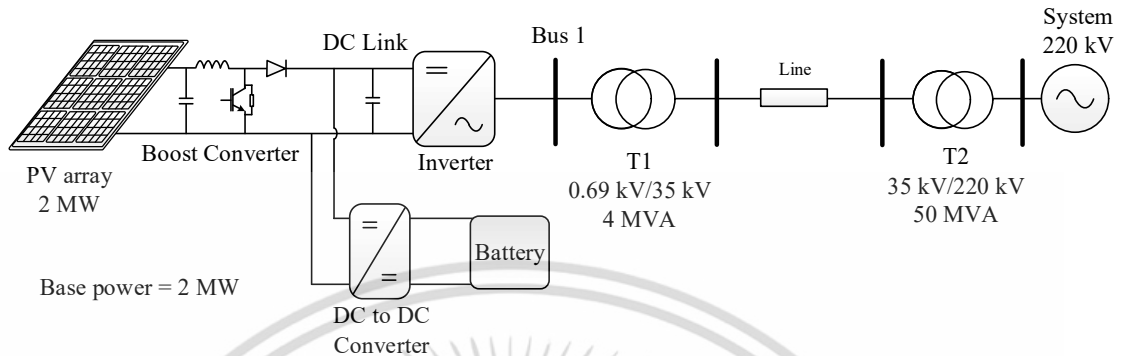
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอ ของกำลังไฟฟ้าด้านนอก

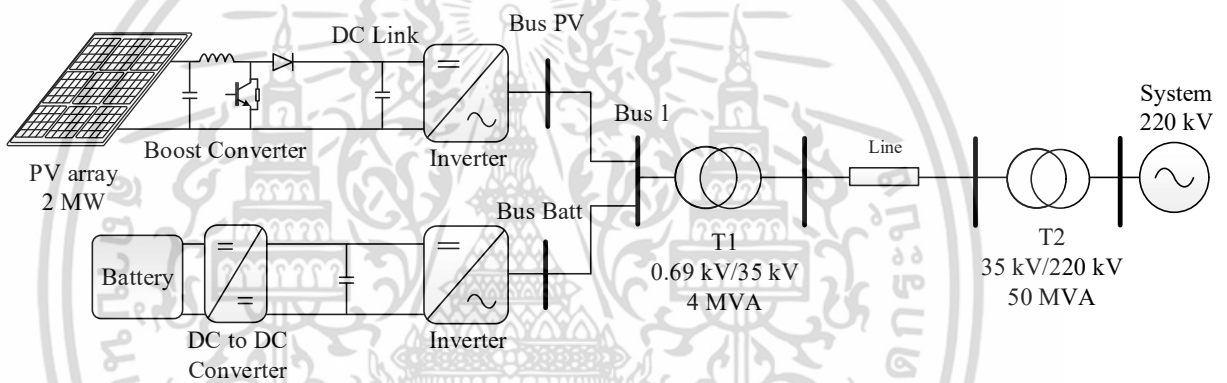
ในบทนี้แนะนำเสนอการติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับดีซีลิงค์ (DC link) ภายในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) โดยใช้ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC converter) ซึ่งทำให้แบตเตอรี่สามารถเชื่อมต่อระหว่างดีซีลิงค์ของ PV โดยไม่ต้องใช้อินเวอร์เตอร์เหมือนกับการติดตั้งแบตเตอรี่ภายนอก โดยแบตเตอรี่ภายในทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงาน เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านนอกของ PV โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ (Proportional Integral Controller) สำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์และดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ของ PV เพื่อให้แบตเตอรี่สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอถูกดำเนินการเพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านนอก ผลการจำลองแสดงประสิทธิภาพการควบคุมของ PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเปรียบเทียบกับติดตั้งแบตเตอรี่ที่ขั้วของ PV และบทนี้ยังแนะนำเสนอการนำแบตเตอรี่ที่ติดตั้งภายใน PV เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านนอกของแหล่งผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมอีกด้วย

3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

3.1.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน



รูปที่ 3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายนอก

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงถึง PV ขนาดพิกัด 2 MW เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าพิกัดแรงดันไฟฟ้า 220 kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า T1 T2 และสายส่งยาว 30 กิโลเมตร พารามิเตอร์ในการจำลองของ PV แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยแบตเตอรี่จะถูกตั้งที่ภายใน PV ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ของ PV กับ อินเวอร์เตอร์ และภายนอกจะถูกติดตั้งที่ขั้วของ PV ดังรูปที่ 3.2

ในระบบกำลังไฟฟ้านี้จะใช้ศึกษาในสภาวะการทำงานปกติ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก PV มีความไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการผลิตกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้ามีการแกว่ง ทำให้ได้รับกำลังไฟฟ้าไม่คงที่ซึ่งส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับดีซีลิงค์ของ PV ด้วยดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC to DC Converter) เปรียบเทียบกับติดตั้งแบตเตอรี่ที่ขั้วของ PV ดังนั้นแบตเตอรี่ที่ติดตั้งจะทำหน้าที่ชดเชยการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV

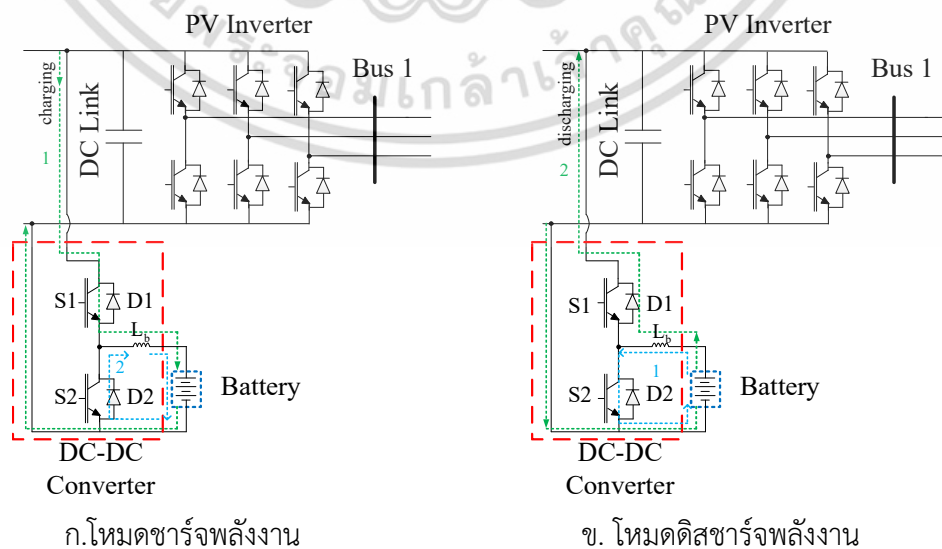
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV และแบตเตอรี่

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	15
จำนวนโมดูลที่ต่อขนาน	437
ชนิดแบตเตอรี่	ลิเทียม-ไอออน
ขนาดแบตเตอรี่	1 MW

3.1.2 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของแบตเตอรี่

โครงสร้างวงจรไฟฟ้าแบตเตอรี่ ซึ่งติดตั้งในระบบ PV เพื่อแก้ไขปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบจำลองของแบตเตอรี่ที่ติดตั้งที่ขั้วของ PV ใช้โครงสร้างอ้างอิงจากบทที่ 2.2.1 และ ติดตั้งภายใน PV แสดงดังรูป 3.3

โครงสร้างวงจรไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ติดตั้งภายใน ประกอบด้วยแบตเตอรี่ ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) โดยดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งโครงสร้างนี้จะเป็นการใช้อินเวอร์เตอร์ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ของ PV ทำให้ลดจำนวนอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งได้



รูปที่ 3.3 วงจรไฟฟ้าของแบตเตอรี่ติดตั้งภายในของ PV

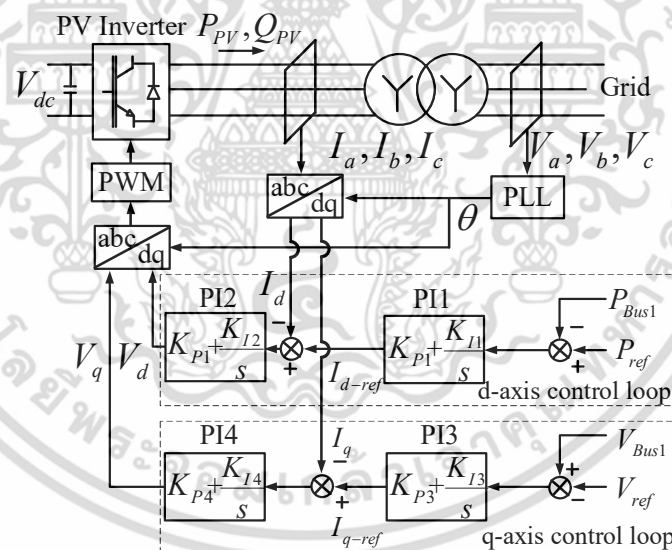
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขการใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ก. และ 3.3 ข. แสดงถึงโหมดชาร์จและดิสชาร์จพลังงานของแบตเตอรี่โดยมีการทำงานดังนี้ ช่วงที่ 1 (S1 ON) สวิตช์ 1 (S1) ทำงาน สวิตช์ 2 (S2) ไม่ทำงานและ ไดโอดทั้งสอง (D1,D2) ถูกรีเวิร์สไบแอส ในช่วงนี้คอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ส่งพลังงานจากดีซีลิงค์ไปยังแบตเตอรี่ (Charge mode) ช่วงที่ 2 (D2 ON) ในช่วงนี้ S1 และ S2 ไม่ทำงาน D2 จะเริ่มนำกระแส พลังงานที่สะสมใน L_b จะลดลง ช่วงที่ 3 (S2 ON) ในช่วงนี้ S2 ทำงาน สวิตช์ S1 ไม่ทำงาน D1 และ D2 รีเวิร์สไบแอส ในขณะที่ L_b ถูกชาร์จ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพิ่มขึ้น และช่วงที่ 4 (D1 ON) ในช่วงนี้ สวิตช์ทั้งสองไม่ทำงาน D1 เริ่มนำกระแส ในช่วงนี้คอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ดิสชาร์จพลังงานจากแบตเตอรี่ไปยังดีซีลิงค์ (Discharge mode)

3.1.3 การออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม

3.1.3.1 การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์สำหรับ PV

ในระบบ PV การส่งกำลังไฟฟ้าให้กับระบบต้องผ่านอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ดังเช่นในรูปที่ 3.1 ซึ่งอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับของระบบไฟฟ้ากำลังกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงของ PV เพื่อที่จะสามารถส่งผ่านพลังงานจาก PV ให้กับระบบได้ การควบคุมอินเวอร์เตอร์ทำได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของ PV

วงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ของ PV จะประกอบด้วยลูปควบคุมแกนตรงและแกนฉาก โดยวงจรเฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop: PLL) จะใช้ในการวัดมุมการแปลงจากค่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (V_a, V_b, V_c) ด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า T1 สัญญาณเอาต์พุตของเฟสล็อกคูลูปเป็นสัญญาณมุม θ ซึ่งใช้สำหรับแปลงตัวแปรเฟส a, b, c ไปเป็นตัวแปรของแกนตรง d (Direct-axis) และแกนตั้งฉาก q (Quadrature-axis)

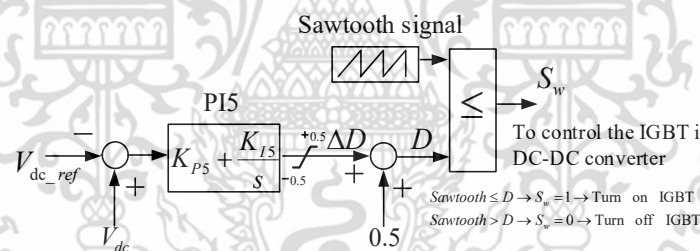
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมพีไอที่ 1 (PI1) ใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของบัส 1 (P_{Bus1}) และสร้างสัญญาณอ้างอิงของกระแสไฟฟ้าในแกนตรง I_{d_ref} โดยนำไปเทียบกับกระแสไฟฟ้าจริงในแกนตรง I_d ที่ได้จากการแปลงกระแส 3 เฟส $I_a/I_b/I_c$ เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในแกนตรง V_{d_ref} ซึ่งเป็นสัญญาณขาออกของตัวควบคุมพีไอที่ 2 (PI2)

ตัวควบคุมพีไอที่ 3 (PI3) ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันของบัส 1 (V_{Bus1}) และสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแกนตั้งฉาก I_{q_ref} โดยจะขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตระหว่างแรงดันบัส 1 และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}) ตัวควบคุมพีไอที่ 4 (PI4) สร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในแกนตั้งฉาก V_{q_ref} ทั้ง V_{d_ref} และ V_{q_ref} จะถูกเปลี่ยนกลับเป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเฟส $V_{a-ref}, V_{b-ref}, V_{c-ref}$ จากนั้น แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 3 เฟสจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยที่มีความถี่ 2500 เฮิรตซ์ เพื่อสร้างสัญญาณชั้บเกตของสวิทช์ควบคุมสำหรับควบคุมพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse width modulation: PWM) ของอินเวอร์เตอร์

3.1.3.2 การออกแบบตัวควบคุมดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.3 ชุดดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ของวงจรแบตเตอรี่ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแบตเตอรี่กับกริด เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV สามารถควบคุมได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ระบบควบคุมของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์

ตัวควบคุมพีไอ 5 (PI5) ใช้เพื่อควบคุม แรงดันดีซีลิงค์ (V_{DC}) โดยการปรับค่าความเบี่ยงเบนของดิวตี้ไซเคิล ΔD ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ โดยการสร้างสัญญาณความเบี่ยงเบนของดิวตี้ไซเคิลจะขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตระหว่างสัญญาณ V_{DC} และสัญญาณอ้างอิงแรงดันดีซีลิงค์ (V_{ref_DC}) โดยดิวตี้ไซเคิล D ใช้สำหรับการควบคุม PWM ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมการชดเชยพลังงานของแบตเตอรี่ โดยเมื่อดิวตี้ไซเคิลมากกว่า 0.5 พลังงานถูกชาร์จจากระบบเข้าสู่แบตเตอรี่ เมื่อดิวตี้ไซเคิลน้อยกว่า 0.5 พลังงานดิสชาร์จออกจากแบตเตอรี่ไปสู่ระบบ

3.1.4 วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม

ในหัวข้อนี้นำเสนอเทคนิคการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์และดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ให้มีความเหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV และแรงดันไฟฟ้า

ขณะสภาวะการทำงานปกติของแบตเตอรี่ซึ่งทำหน้าที่รักษากำลังไฟฟ้าจริงขาออกของ PV คงที่ โดยการทำให้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ของการเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าจริง巴士ที่ 1 $IAE_{\Delta P_{Bus1}}$ ต่ำที่สุด ดังสมการต่อไปนี้

$$IAE_{\Delta P_{Bus1}} = \int_{t_0}^{t_f} |\Delta P_{Bus1}| dt \quad (3.1)$$

กำหนดให้ ΔP_{Bus1} คือ ความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง巴士ที่ 1 และกำลังไฟฟ้าอ้างอิง巴士ที่ 1

การทำให้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงปริพันธ์ (Integral Absolute Error: IAE) ของการเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าที่巴士ที่ 1 ของ PV ต่ำที่สุด ตามสมการด้านล่าง

$$IAE_{\Delta V_{Bus1}} = \int_{t_0}^{t_f} |\Delta V_{Bus1}| dt \quad (3.2)$$

โดยกำหนดให้ ΔV_{Bus1} คือ ความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้า巴士 1 ที่วัดได้ และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

t_0 คือ เวลาเริ่มต้นของการจำลอง (s)

t_f คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

สมการปัญหาการหาค่าเหมาะสมสร้างจากสมการที่ (3.1) และ (3.2) ได้เป็นสมการที่ (3.3)

$$F = IAE_{\Delta P_{Bus1}} + IAE_{\Delta V_{Bus1}} \quad (3.3)$$

ซึ่งสมการที่ (3.3) จะถูกทำให้ค่าต่ำที่สุดเพื่อให้ได้ระบบที่ออกแบบตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยมีพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบ คือ พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอทั้ง 10 ตัว K_{P_i} และ K_{I_i} , $i = 1, \dots, 5$

กำหนดให้ 1) $0.01 \leq K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}, K_{P4}, K_{P5} \leq 30$

2) $0.01 \leq K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}, K_{I4}, K_{I5} \leq 30$

การหาค่าที่เหมาะสมจะใช้วิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เพื่อหาค่าตอบใน (3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

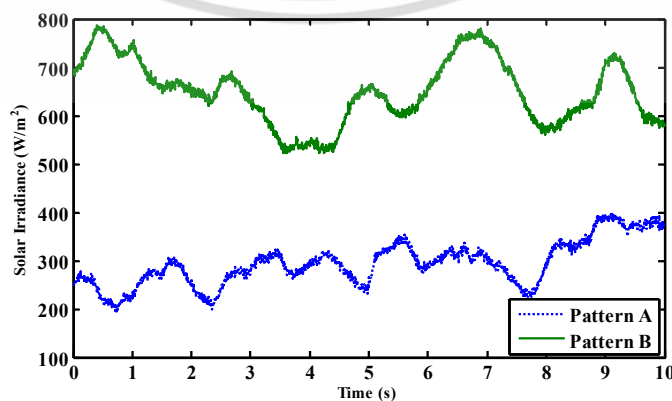
ในการศึกษาครั้งนี้ การออกแบบระบบที่นำเสนอ (PV with internal battery) จะถูกนำไปทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานใดๆ (PV without battery) และระบบที่ติดตั้งแบตเตอรี่ โดยติดตั้งเข้ากับบัสที่ 1 (PV with external battery) ที่ออกแบบด้วยวัตถุประสงค์เดียวกัน โดยใช้สมการ (3.3) หาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO และเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystem

3.1.5 ผลการจำลอง

การปรับตั้งค่าอย่างเหมาะสมของพารามิเตอร์ภายใต้กรณีของความเข้มแสง A แสดงด้วยรูปที่ 3.6 ซึ่งความเข้มแสง A มีค่าต่ำที่สุด รูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดงเส้นโค้งลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีแบตเตอรี่ภายนอกและภายในตามลำดับ ในการศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมของ PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ที่บัส 1 แทนด้วย PV with internal battery และ PV with external battery ตามลำดับ โดยตารางที่ 3.2 แสดงค่าของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่ทำการหาค่าที่เหมาะสมของทั้ง 2 กรณี ซึ่งการแสดงผลสมรรถนะในการทำให้กำลังไฟฟ้าคงที่ของกรณี PV with internal battery ใช้ความเข้มแสงในการทดสอบทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ A และ B แสดงดังรูปที่ 3.6

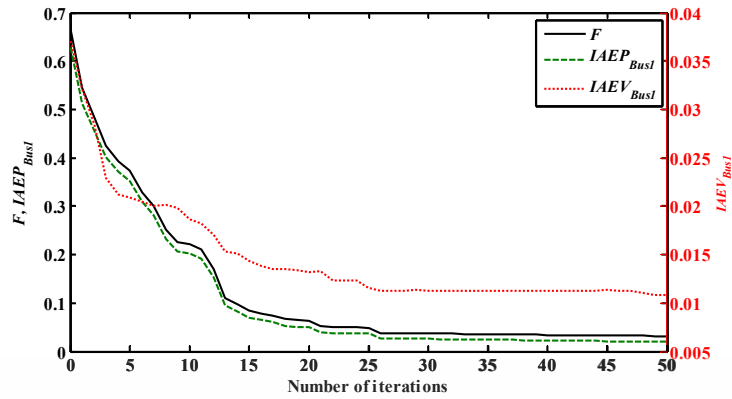
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ

ตัวควบคุมพีไอ	PV with internal battery	PV with external battery
K_{P1}, K_{I1}	12.23 28.34	3.46 19.94
K_{P2}, K_{I2}	7.24 13.22	20.87 5.62
K_{P3}, K_{I3}	3.64 13.42	15.23 25.35
K_{P4}, K_{I4}	7.47 14.60	15.36 5.264
K_{P5}, K_{I5}	1.63 4.96	10.23 18.79

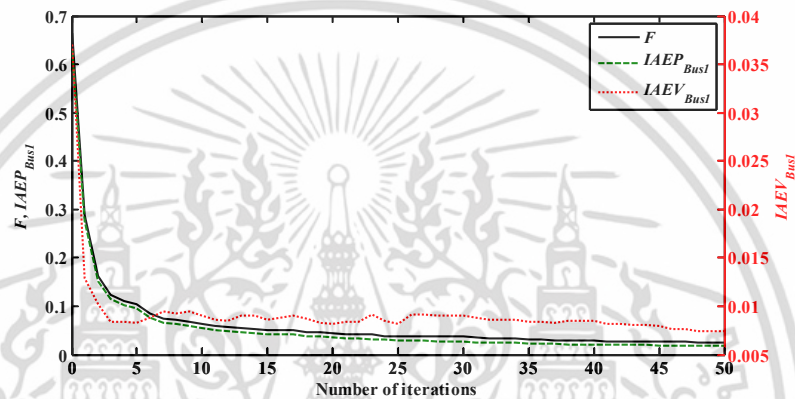


รูปที่ 3.6 รูปแบบความเข้มแสงของ PV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

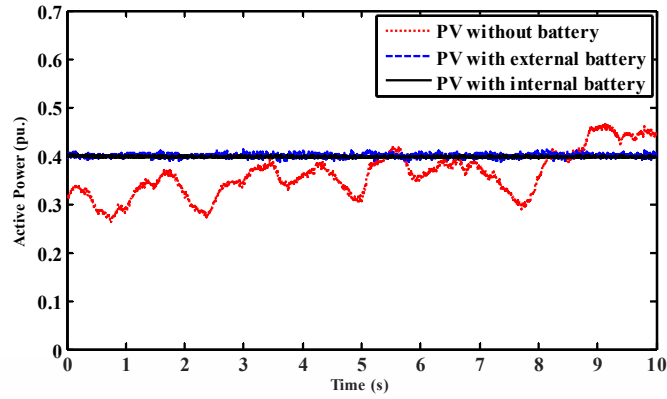


รูปที่ 3.7 เส้นโค้งลู่เข้าหาคำตอบของกรณีแบตเตอรี่ภายนอก

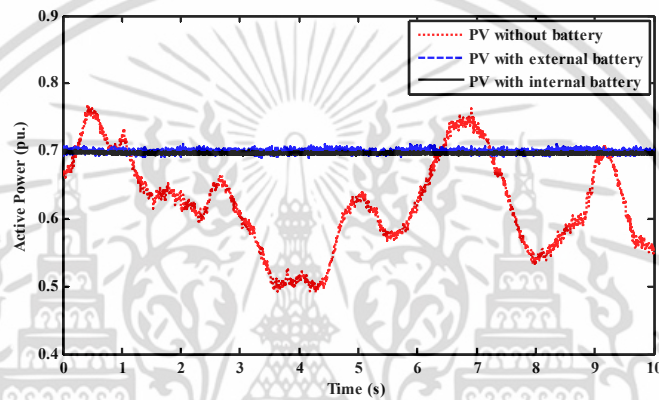


รูปที่ 3.8 เส้นโค้งลู่เข้าหาคำตอบของกรณีแบตเตอรี่ภายใน

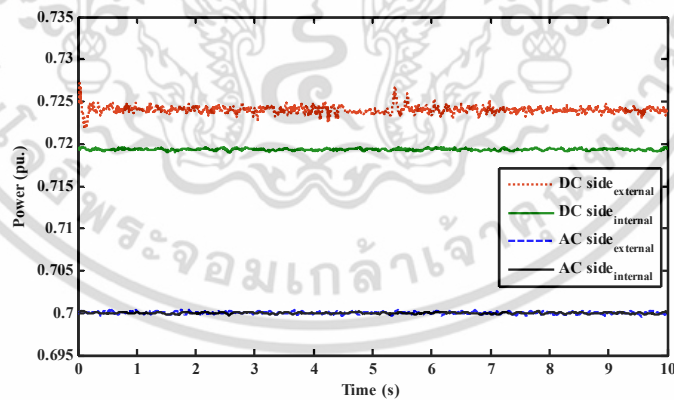
ในรูปที่ 3.9 และ 3.10 แสดงกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ที่บัส 1 ภายใต้การจำลองของความเข้มแสงในรูปแบบ A และ B ตามลำดับ ซึ่งภายใต้การจำลองของความเข้มแสงรูปแบบ A กำลังไฟฟ้าที่สร้างจาก PV ซึ่งไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใดๆ แทนด้วย PV without battery มีแนวโน้มของกราฟเหมือนกับกราฟความเข้มแสง A ในทางกลับกันในกรณีของ PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ทั้งสองกรณีสามารถชดเชยพลังงานทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกของ PV มีลักษณะเรียบสม่ำเสมอได้ ภายใต้การจำลองความเข้มแสงในรูปแบบ B กำลังไฟฟ้าขาออกของกรณีไม่ติดตั้งแบตเตอรี่ มีลักษณะแกว่งอย่างมากซึ่งตรงกันข้ามกับอีก 2 กรณี ทั้งกรณีที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในและติดตั้งแบตเตอรี่ที่ขั้วจะมีลักษณะของกำลังไฟฟ้าขาออกสม่ำเสมอและมีการเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อย ในรูปที่ 3.11 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านอินเวอร์เตอร์ เมื่อกำหนดให้ ระบบจ่ายกำลังที่ 0.7 pu. จากกราฟในกรณีที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายนอกจะเห็นได้ว่าการสูญเสียจากการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์มากกว่ากรณีติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน โดยกรณีที่ติดตั้งภายนอกมีค่าความสูญเสียประมาณ 50 kW ในทางตรงข้ามกรณีที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในมีค่าความสูญเสียประมาณ 40kW



รูปที่ 3.9 กำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ภายใต้การจำลองของความเข้มแสง A



รูปที่ 3.10 กำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ภายใต้การจำลองของความเข้มแสง B



รูปที่ 3.11 กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 สรุป

การประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ด้วยวิธีที่นำเสนอโดยการร่วมติดตั้งเข้ากับ PV สำหรับการลดความไม่สม่ำเสมอกำลังไฟฟ้าขาออก จากกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

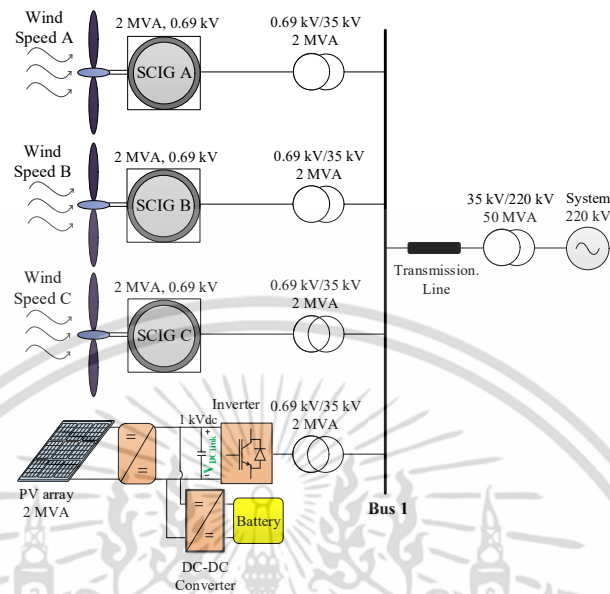
1. แบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อระหว่าง PV กับระบบไฟฟ้าสามารถชดเชยการแกว่งกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ได้

2. การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ใช้หลักการทำให้ค่าต่ำสุดของการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า เพื่อแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการควบคุมของ PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่นั้นสามารถทำงานได้ดีเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงอาทิตย์

3. ผลการศึกษายืนยันได้ว่ากรณีที่ PV ติดตั้งแบตเตอรี่ทั้งภายในและภายนอกให้ประสิทธิภาพในการลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ได้ใกล้เคียงกัน แต่กรณีที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในสามารถใช้อินเวอร์เตอร์ร่วมกับ PV ได้ ทำให้ลดจำนวนอินเวอร์เตอร์ในระบบลง และยังลดความสูญเสียเนื่องจากกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ได้ถึง 20%

3.2 ระบบไฟฟ้ากำลังต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม

3.2.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.12 ระบบศึกษา

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.12 ประกอบด้วย ฟาร์มกังหันลมชนิด SCIG A B และ C แต่ละตัวมีพิกัด 2 MVA โดยมี ฟาร์มโซลาร์ขนาด 2 MVA ที่ติดตั้งแบตเตอรี่อยู่ภายในติดตั้งที่บัสเดียวกันกับกังหันลมผ่านหม้อแปลงขนาด 2 MVA ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า 220kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 MVA และสายส่งยาว 100 km เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ โดยพารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV ดังตารางที่ 3.1

ฟาร์มกังหันลมทั้งสามผลิตกำลังไฟฟ้าให้ระบบจึงทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ซึ่งเป็นบัสเชื่อมต่อกับกริดจึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของ PV ที่มีแบตเตอรี่ภายในซึ่งเก็บสะสมพลังงานไว้เต็มจากการผลิตไฟฟ้าของ PV เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัส

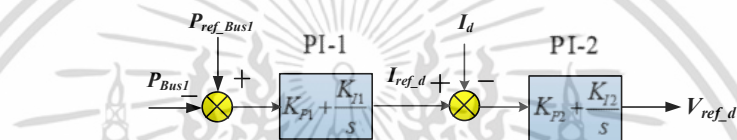
3.2.2 การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่

การควบคุม PV และแบตเตอรี่ในที่นี้จะใช้การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนซึ่งการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของฟาร์มโซลาร์เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านออกและแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อสามารถทำได้ด้วยตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งในฟาร์มโซลาร์ ส่วนการรักษาระดับแรงดันดีซีลิงค์ในวงจรของฟาร์มโซลาร์สามารถทำได้โดยตัวควบคุมพีไอของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่

3.2.2.1 การออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์สำหรับ PV

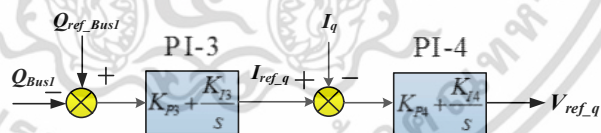
การออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับอินเวอร์เตอร์ของฟาร์มโซลาร์ แบ่งเป็น 2 กรณี คือการใช้กำลังไฟฟ้าจริงเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และการใช้กำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าดังนี้

1. กรณีการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไม่สม่ำเสมอที่เกิดจากกัมมันตขนิด SCIG จะใช้ตัวควบคุมพีไอ 2 ตัว ตามรูปที่ 3.13 ตัวควบคุมพีไอตัวที่หนึ่ง (PI-1) จะควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอโดยเปรียบเทียบสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1 (P_{Bus1}) กับสัญญาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิง (P_{ref_Bus1}) เอาท์พุทที่ได้คือสัญญาณอ้างอิงของกระแสไฟฟ้าแกนตรง (I_{ref_d}) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสแกนตรง (I_d) เอาท์พุทที่ได้จะนำไปเป็นอินพุตของตัวควบคุมพีไอตัวที่สอง (PI-2) จะได้เอาท์พุทเป็นสัญญาณอ้างอิงของแรงดันแกนตรง (V_{ref_d})



รูปที่ 3.13 ตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดกำลังไฟฟ้าแกว่ง

2. กรณีการแก้ปัญหาการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อกับ กริดจะใช้ตัวควบคุมพีไอ 2 ตัว ตามรูปที่ 3.14 ตัวควบคุมพีไอที่สาม (PI-3) จะเปรียบเทียบสัญญาณกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส 1 (Q_{Bus1}) กับสัญญาณกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง (Q_{ref_Bus1}) และเอาท์พุทที่ได้คือสัญญาณอ้างอิงของกระแสไฟฟ้าแกนขวาง (I_{ref_q}) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสแกนขวาง (I_q) เอาท์พุทที่ได้จะนำไปเข้าตัวควบคุมพีไอตัวที่สี่ (PI-4) จะได้เอาท์พุทสัญญาณอ้างอิงของแรงดันแกนขวาง (V_{ref_q})

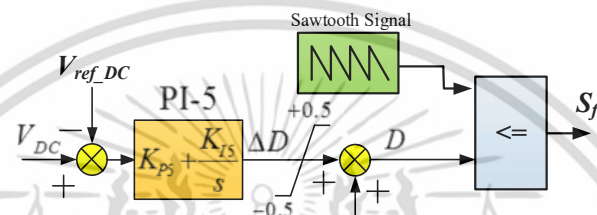


รูปที่ 3.14 ตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดแรงดันไฟฟ้าแกว่ง

สัญญาณ V_{ref_d} และ V_{ref_q} จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสอ้างอิง ($V_{ref_A,B,C}$) หลังจากนั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณฟีดแบ็คเพื่อสร้างสัญญาณขับขาเกทของอุปกรณ์สวิตช์ซิ่ง IGBTs ของ อินเวอร์เตอร์ของฟาร์มโซลาร์ เพื่อลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 มีค่าใกล้เคียง 1 p.u. มากที่สุด

3.2.2.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่

รูปที่ 3.15 แสดงตัวควบคุมพีไอของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่เพื่อควบคุมการจับเก็บพลังงานในดีซีลิงค์และรักษาระดับแรงดันของดีซีลิงค์ให้คงที่ ตัวควบคุม PI-5 ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีลิงค์ (V_{DC}) โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณ V_{DC} กับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ดีซีลิงค์ (V_{ref_DC}) และเอาต์พุตที่ได้คือสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของดิวตี้ไซเคิล (ΔD) เพื่อปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (D) สำหรับควบคุม PWM เพื่อสร้างสัญญาณขับเกท (S_f) ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ เมื่อดิวตี้ไซเคิลมีค่ามากกว่า 0.5 พลังงานที่เก็บในดีซีลิงค์จะชาร์จไปยังแบตเตอรี่ ในทางตรงกันข้ามเมื่อดิวตี้ไซเคิลมีค่าน้อยกว่า 0.5 พลังงานจากแบตเตอรี่จะดิชาร์จไปยังดีซีลิงค์



รูปที่ 3.15 ตัวควบคุมพีไอของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่

3.2.3 วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม

ในหัวข้อนี้นำเสนอเทคนิคการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์และดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ให้มีความเหมาะสมในที่นี้จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมของ PI-1, PI-2, PI-3, PI-4 และ PI-5 พร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟด้านออกเนื่องจากกักเก็บพลังงาน SCIG ที่บัส 1
2. เพื่อลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 เนื่องจากการ absorb Q ของ SCIG

จากวัตถุประสงค์ต่างๆ สามารถนำมาตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมและเงื่อนไข โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ผลรวมของค่า Integral Absolute Error, IAE ของกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อกับกริดมีค่าน้อยที่สุดซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Minimize} \quad \int_{t_0}^{t_{sim}} |\Delta P_{Bus1}| dt + \int_{t_0}^{t_{sim}} |\Delta V_{Bus1}| dt \quad (3.4)$$

เมื่อ ΔP_{Bus1} คือค่าความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริงที่บัส 1 กับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ΔV_{Bus1} คือค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จริงที่บัส 1 กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง t_0 คือ เวลาเริ่มต้นการจำลอง t_{sim} คือเวลาสิ้นสุดการจำลอง K_{p_i} และ K_{i_i} ($i=1, \dots, 5$) คือ อัตราขยายตัวควบคุมพีไอ วิธีการแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสมของสมการที่ 3.4 ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมกำหนดให้ ΔP_{Bus1} คือ ความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงบัสที่ 1 และกำลังไฟฟ้าอ้างอิงบัสที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

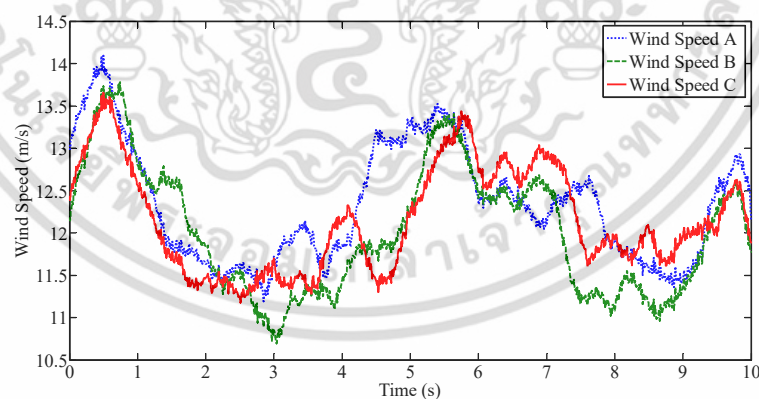
โดยในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ใช้หลักการวัตถุประสงค์และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.1.4 ซึ่งขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอทั้ง 10 ตัว K_{P_i} และ $K_{I_i}, i=1, \dots, 5$ ในการหาค่าที่เหมาะสมกำหนดดังนี้

- 1) $0.01 \leq K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}, K_{P4}, K_{P5} \leq 30$ (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ)
- 2) $0.01 \leq K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}, K_{I4}, K_{I5} \leq 30$ (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ)

ในการศึกษาการออกแบบระบบที่นำเสนอ นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับระบบ PV ที่ไม่ติดตั้งตัวควบคุมพีไอ (PV without PI controllers) และระบบที่ติดตั้งตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวัตถุประสงค์และใช้สมการ (3.4) หาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO เช่นเดียวกับกรณีของระบบที่นำเสนอ พร้อมเปรียบเทียบผลด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystem

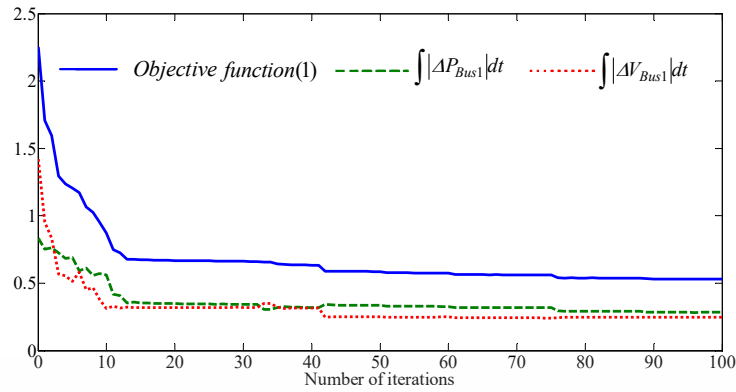
3.2.4 ผลการจำลอง

รูปที่ 3.16 แสดงความเร็วลม A, B และ C ของกังหันลมชนิด SCIG A, B และ C ซึ่งติดตั้งอยู่ในบริเวณเดียวกันตามลำดับ การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค จะใช้อนุภาคจำนวน 30 อนุภาค และใช้ 100 รอบการคำนวณ ซึ่งจะดำเนินการภายใต้รูปแบบความเร็วลมชุดนี้ เส้นโค้งการลู่เข้าหาค่าตอบที่เหมาะสมของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 ผลของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมพีไอแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่ไม่ได้ผ่านวิธีการทำให้เหมาะสมได้มาจากการตั้งค่าด้วยการลองผิดลองถูก โดยให้ได้ผลสมรรถนะการทำงานออกมาได้ดี



รูปที่ 3.16 ความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

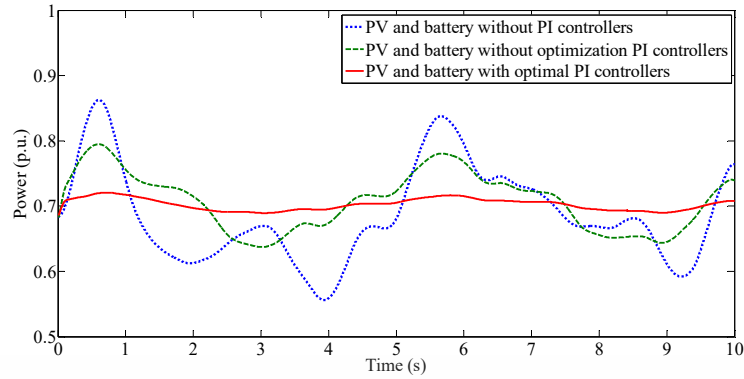


รูปที่ 3.17 เส้นโค้งการลู่เข้าหาค่าตอบของการทำให้เหมาะสม

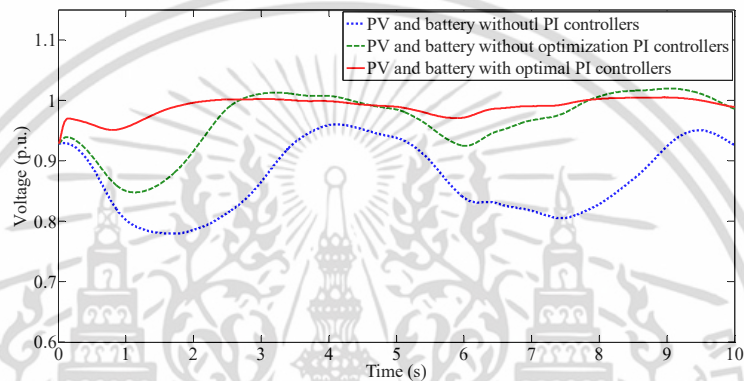
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ

พารามิเตอร์	Without optimization PI Controllers	Optimal PI Controllers
K_{P1}, K_{I1}	10, 5	25.55, 12.78
K_{P2}, K_{I2}	5, 20	4.33, 20.15
K_{P3}, K_{I3}	1, 0.5	11.29, 4.19
K_{P4}, K_{I4}	3, 5	0.54, 17.86
K_{P5}, K_{I5}	10, 15	18.99, 19.57

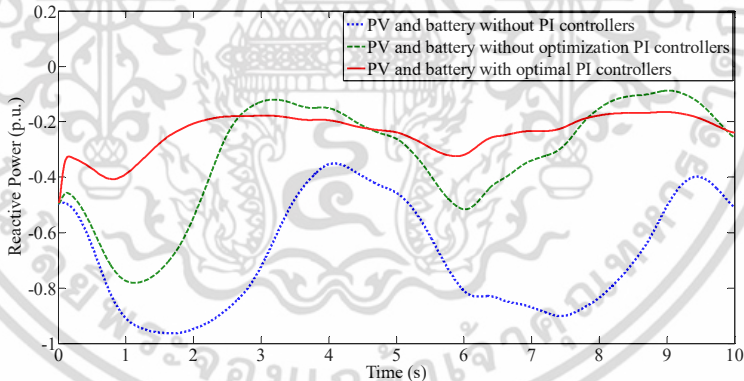
ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems ของ กำลังไฟฟ้าจริง แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส 1 แสดงได้ดังรูปที่ 3.18, 3.19, 3.20 ตามลำดับ ในกรณีฟาร์มโซลาร์และแบตเตอรี่ที่ไม่ติดตั้งตัวควบคุมพีไอ (PV and battery without PI controllers) จะเกิดปัญหาการแกว่งของทั้งกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน และแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 กรณีฟาร์มโซลาร์และแบตเตอรี่ที่ติดตั้งตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสม (PV and battery with optimal PI controllers) จะให้ผลลัพธ์การควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอที่ไม่ผ่านการทำให้เหมาะสม (PV and battery without optimization PI controllers) อนึ่ง กำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าฟาร์มกังหันลมชนิด SCIG รับกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้ามา รูปที่ 3.21 แสดงกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือน ด้านออกของฟาร์มโซลาร์ กำลังไฟฟ้าจริงที่มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ในฟาร์มโซลาร์รับกำลังไฟฟ้าเข้ามาจากระบบ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าเสมือนที่เป็นบวกแสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ในฟาร์มโซลาร์จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนออกไปให้ระบบ ผลการจำลองนี้แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนที่ชดเชยจากฟาร์มโซลาร์จะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น



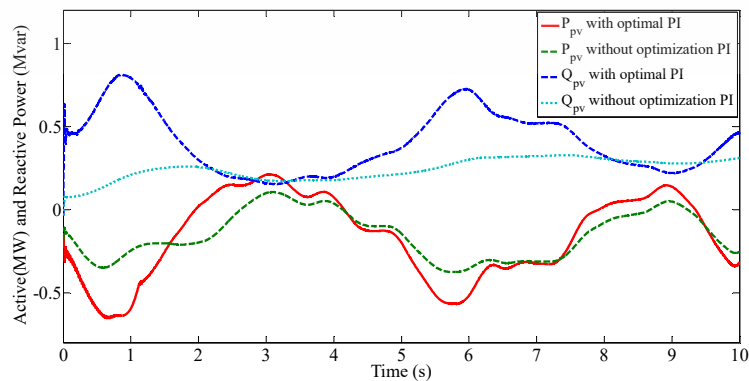
รูปที่ 3.18 กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1



รูปที่ 3.19 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1



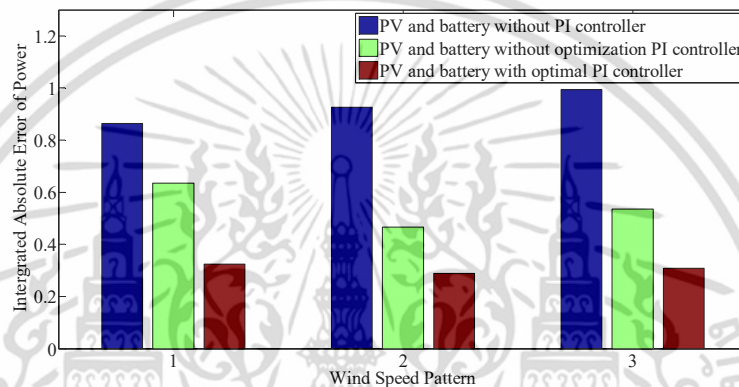
รูปที่ 3.20 กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส 1



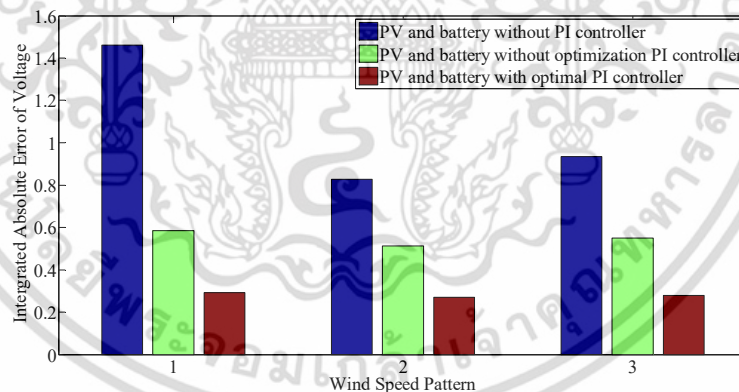
รูปที่ 3.21 กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนด้านออกของฟาร์มโซลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบตามวิธีที่นำเสนอ จึงใช้ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมเดิมไปทดสอบกับความเร็วลม A, B และ C อีก 2 กลุ่มใหม่ที่ไม่นำมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งรูปที่ 3.22 และ 3.23 แสดงค่า IAE ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1 และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ตามลำดับ ภายใต้ความเร็วลมทั้ง 3 กลุ่ม โดยรูปแบบความเร็วลมกลุ่มที่ 1 คือความเร็วลม A, B และ C ที่ใช้ระหว่างการหาค่าที่เหมาะสม จะเห็นว่า IAE ของกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมจะมีค่าน้อยที่สุด ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ทำให้เหมาะสมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความเร็วลมทั้งสามรูปแบบ



รูปที่ 3.22 IAE ของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1



รูปที่ 3.23 IAE ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1

3.2.5 สรุป

การประยุกต์ใช้ PV ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านออกเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมชนิดความเร็วคงที่ จากกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แบตเตอรี่เชื่อมต่อกันระหว่าง PV กับระบบไฟฟ้าสามารถลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านออกและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมได้

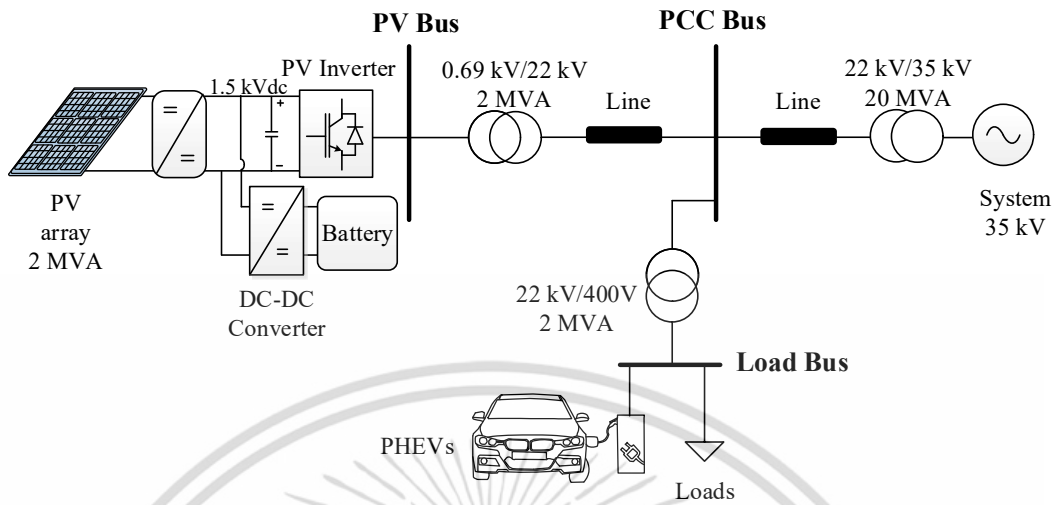
2. จากผลการศึกษายืนยันให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและรักษาระดับแรงดันบัสได้ดีกว่าแม้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้า ในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้า

ในบทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ระหว่างดีซีลิงค์ (DC link) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) เพื่อแก้ปัญหากำลังไฟและรักษา ระดับแรงดันไฟฟ้าตกในระบบ โดยการเปรียบเทียบติดตั้งแบตเตอรี่ 2 ตำแหน่งด้วยกัน คือ ติดตั้ง แบตเตอรี่ภายใน PV วิธีนี้ชุดแบตเตอรี่จะสามารถใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ร่วมกับ PV ได้ กับติดตั้ง แบตเตอรี่ที่ขั้ว PV ซึ่งอินเวอร์เตอร์ และดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ของทั้ง 2 ระบบจะใช้ การควบคุมจากตัวควบคุมพีไอ (PI controller) พร้อมกับออกแบบเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้า ปัญหา แรงดันไฟฟ้าเกิน และ แรงดันไฟฟ้าตกเกิดน้อยที่สุด ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน ให้ประสิทธิภาพลดความไม่สม่ำเสมอจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้มี ประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการติดตั้งแบตเตอรี่ที่ขั้วของ PV

4.1 ระบบศึกษา



รูปที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเชื่อมต่อกับ PHEVs

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) พารามิเตอร์ของ PV และแบตเตอรี่ ดังตารางที่ 4.1 ขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอิน (Plug-in Hybrid Electrical Vehicles: PHEVs) และโหลดที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถยนต์ไฟฟ้าและโหลด กำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น และหากในระบบมีการเชื่อมต่อของ PHEVs กับระบบเพื่อชาร์จพลังงาน ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส PCC ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกินอาจทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต่อกับระบบเสียหายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ในมาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า[46] ซึ่งทั้งปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่งผลเสียต่อทั้งคุณภาพและเสถียรภาพไฟฟ้าของไฟฟ้าในระบบ

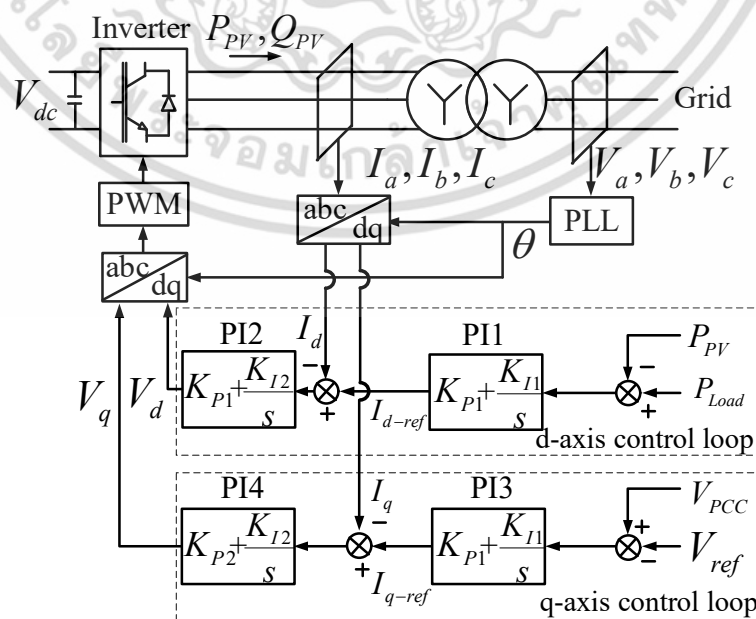
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV และแบตเตอรี่

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	15
จำนวนโมดูลที่ต่อขนาน	437
ชนิดแบตเตอรี่	ลิเทียม-ไอออน
ขนาดแบตเตอรี่	1 MW ,3.4 MWh

4.2 การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่

โครงสร้างของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะมีสองแบบคือแบตเตอรี่ที่ติดตั้งภายนอกซึ่งอ้างอิงตามแบบจำลองบทที่ 2.2.1 และ แบตเตอรี่ที่ติดตั้งภายใน PV อ้างอิงตามแบบจำลองบทที่ 3.1.2 ซึ่งการควบคุมการทำงานในการชาร์จและดิสชาร์จพลังงานของ แบตเตอรี่ กับ PV ได้ถูกอธิบายไว้ในบทก่อนหน้านี้อแล้ว

4.2.1 การออกแบบตัวควบคุมของอินเวอร์เตอร์สำหรับ PV



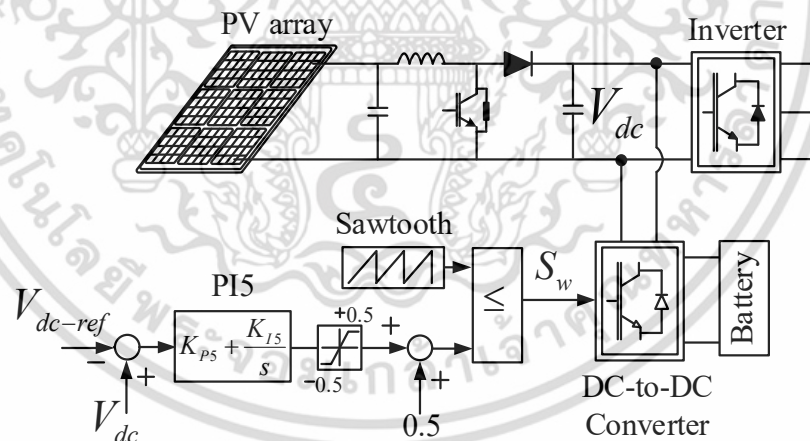
รูปที่ 4.2 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 อธิบายการควบคุมของอินเวอร์เตอร์ของ PV โดยใช้เฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop : PLL) ในการวัดมุมของการแปลงจากแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (V_a, V_b, V_c) สัญญาณเอาต์พุตของเฟสล็อกคูลูปคือมุม θ ซึ่งใช้สำหรับการแปลงตัวแปรเฟส (a,b,c) ไปเป็นตัวแปรแกนตรง (Direct-axis) และแกนขวาง (Quadrature-axis)

การควบคุมอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยลูปควบคุมแกน d และลูปควบคุมแกน q ในลูปควบคุมแกน d คือ ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงขาออกของ PV (P_{PV}) และซึ่งจะควบคุมให้เท่ากับความต้องการโหลดรวม (P_{Load}) ด้วยตัวควบคุมพีไอที่ 1 (PI1) เนื่องจากต้องการให้ PV จ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากับความต้องการโหลดรวม $P_{PV}=P_{Load}$ สัญญาณอ้างอิงของกระแสไฟฟ้าแกน d (I_{d-ref}) รับค่ามาจาก PI1 แล้วเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าจริงในแกน d (I_d) ความแตกต่างระหว่าง I_{d-ref} และ I_d นำไปเป็นสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมพีไอที่ 2 (PI2) ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงแกน d (V_{d-ref}) สร้างมาจาก PI2 ในลูปควบคุมแกน q ตัวควบคุมพีไอที่ 3 (PI3) ใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC (V_{PCC}) โดยในการศึกษานี้ต้องการให้แรงดันไฟฟ้าที่ PCC มีค่าเป็นหนึ่ง นั่นหมายความว่าสัญญาณอ้างอิงแรงดันไฟฟ้า (V_{ref}) มีค่าเท่ากับหนึ่ง และสัญญาณอินพุตของ PI4 เป็นค่าความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงแกน q (I_{q-ref}) และกระแสไฟฟ้าแกน q (I_q) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าแกน q (V_q) สามารถสร้างจาก PI4

4.2.2 การออกแบบตัวควบคุมของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่



รูปที่ 4.3 การควบคุมดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่

รูปที่ 4.3 แสดงตัวควบคุมพีไอของดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ซึ่งใช้แทนด้วยตัวควบคุมพีไอที่ 5 (PI5) ทำหน้าที่รักษาแรงดันดีซีลิงค์ (V_{dc}) ของ PV สัญญาณขาออกของ PI5 เป็นค่าการเบี่ยงเบนของดิวิตีไซเคิล (Δ) ซึ่งขึ้นอยู่กับความต่างระหว่าง V_{dc} และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงดีซีลิงค์ (V_{dc-ref}) ดิวิตีไซเคิล (D) สร้างด้วยการบวกค่า 0.5 กับ Δ สัญญาณชับเกต (S_w) ของสวิทช์ในดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สร้างด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยกับดิวิตีไซเคิล โดยเมื่อดิวิตีไซเคิล

มากกว่า 0.5 พลังงานชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่ ในทางตรงข้ามพลังงานจะดิสชาร์จไปสู่ระบบ

4.3 วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม

ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอให้มีความเหมาะสม มีวัตถุประสงค์คือ สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ได้ และสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐานได้

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

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

ΔV_{PCC} คือ ความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่บัส PCC (V)

t_0 คือ เวลาเริ่มต้นของการจำลอง (s)

t_s คือ เวลาสุดท้ายของการจำลอง (s)

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้มาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า KEPCO ซึ่งต้องรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC ให้อยู่ในช่วง $\pm 3\%$ ของแรงดันไฟฟ้าปกติ [46]

เพื่อให้ได้ระบบที่ออกแบบตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ จะต้องทำให้สมการที่ (4.1) มีค่าน้อยที่สุด ด้วยวิธี PSO โดยมีพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบ ประกอบด้วย พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอทั้ง 10 ตัว K_{P_i} และ K_{I_i} , $i = 1, \dots, 5$

กำหนดให้ 1) $0.01 \leq K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}, K_{P4}, K_{P5} \leq 30$ (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพี)

2) $0.01 \leq K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}, K_{I4}, K_{I5} \leq 30$ (ขอบเขตของพารามิเตอร์ตัวควบคุมไอ)

ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ (PV with internal battery) จะทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานใดๆ (PV without battery) และระบบที่ติดตั้งแบตเตอรี่ที่ PV บัส (PV with external battery) ที่ใช้การออกแบบพารามิเตอร์เช่นเดียวกับระบบที่นำเสนอ

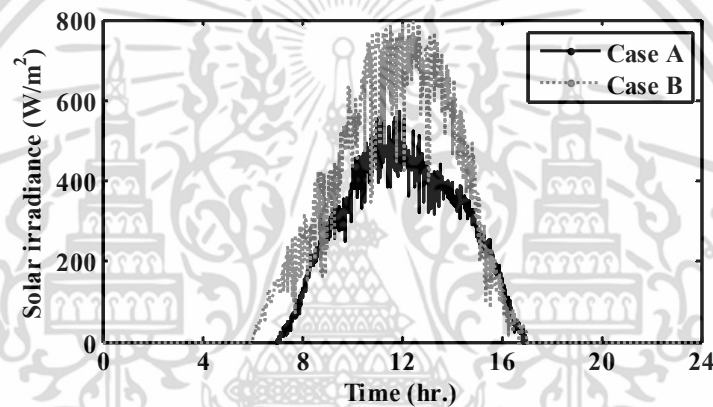
4.4 ผลการจำลอง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ และผ่านวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแล้ว แทนด้วย PV with internal battery เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากับแบบจำลองที่ติดตั้งแบตเตอรี่ที่ขั้วบัสของ PV หรือเรียกว่า

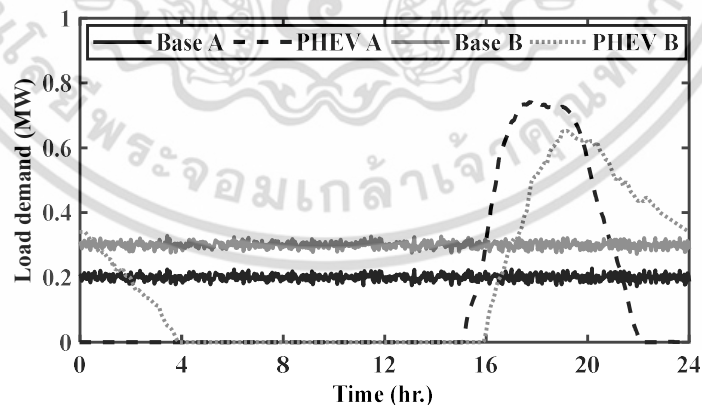
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PV with external battery โมเดลของแบตเตอรี่ที่ชั่ว ประกอบด้วยการควบคุมอินเวอร์เตอร์ และ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ตาม รูปที่ 2.9 และ รูปที่ 3.5 ตามลำดับ

ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่นั้นใช้ชุดตัวควบคุม PI ทั้งหมด 4 ชุด เพื่อควบคุม แรงดันไฟฟ้าที่บัส และกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ตัวควบคุม PI ของดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ถูกใช้ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ของแบตเตอรี่ รวมทั้งหมดมีตัวควบคุมของแบตเตอรี่ 5 ชุด ประกอบด้วย พารามิเตอร์ชุดละ 2 ตัว คือตัวควบคุมพี และตัวควบคุมไอ ซึ่งยังไม่รวมกับชุดตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์ ของ PV อีก 4 ชุด ซึ่งในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ (4.1) ตัวควบคุมทั้งหมด 18 ตัว นั้นถูกทำการหาค่าที่ เหมาะสม และ แบตเตอรี่ที่ใช้นำมาเปรียบเทียบในการศึกษานี้ใช้แทนด้วย PV with external battery สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ตัวควบคุมของทั้ง 2 กรณีใช้ความเข้มแสงใน รูปแบบที่ 1 ในรูปที่ 4.4 ส่วนความต้องการของโหลดและการชาร์จของรถยนต์ไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.5



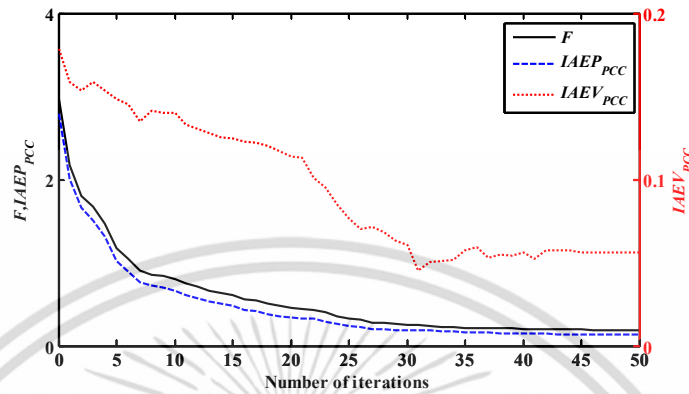
รูปที่ 4.4 ความเข้มแสงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



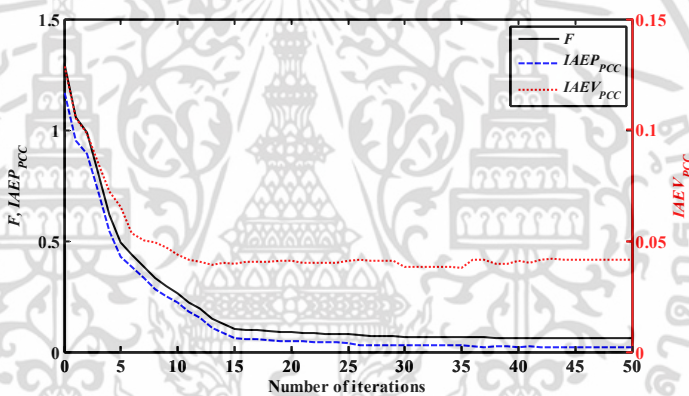
รูปที่ 4.5 ความต้องการโหลดและการชาร์จกำลังไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงกราฟพลู่เข้าของค่าตอบของฟังก์ชัน F $IAEP_{PCC}$ และ $IAEV_{PCC}$ ของกรณี PV with external battery และ internal battery ตามลำดับ ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ที่ผ่านวิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคของ PV with external battery และ internal battery ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 เส้นโค้งพลู่เข้าค่าตอบกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ที่ขั้วของ PV



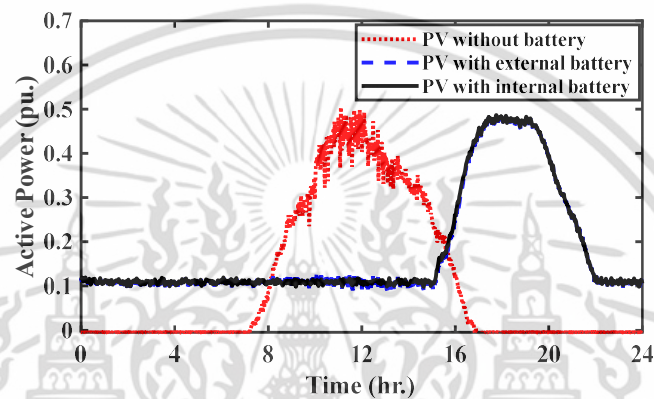
รูปที่ 4.7 เส้นโค้งพลู่เข้าค่าตอบกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน PV

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์และดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์

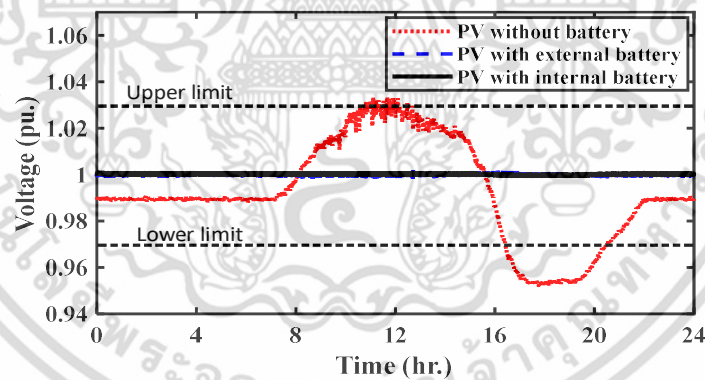
ตัวควบคุมพีไอ	PV with external battery		PV with internal battery
	PV inverter	Batt inverter	
K_{P1}, K_{I1}	15.654, 13.124	5.022, 26.255	7.827 26.812
K_{P2}, K_{I2}	10.232, 11.961	15.874, 8.621	20.178 25.413
K_{P3}, K_{I3}	2.014, 10.125	8.923, 26.124	10.018, 5.614
K_{P4}, K_{I4}	5.381, 12.254	12.154, 21.032	6.352, 9.038
K_{P5}, K_{I5}	-	2.175, 15.445	8.811, 18.457

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

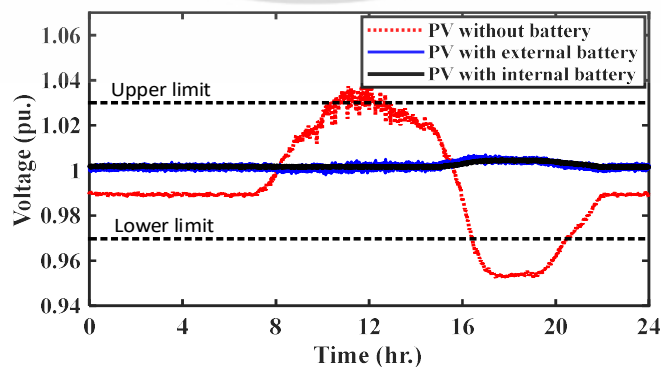
การจำลองศึกษาภายใต้สถานการณ์ 2 รูปแบบ ประกอบด้วย ความเข้มแสงอาทิตย์ ความต้องการโหลด การชาร์จของรถยนต์ไฟฟ้าในหนึ่งวันแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ข้อสำคัญในรูปแบบ B ความเข้มแสงมีค่าสูงและมีความไม่สม่ำเสมอมากกว่าแบบ A ซึ่งใช้ในการออกแบบ ความต้องการโหลดเพิ่มขึ้นและระยะเวลาการชาร์จของรถยนต์ไฟฟ้านานขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบ A ผลการจำลองกรณีที่ 1 ในรูปที่ 4.8-4.10 ภายใต้ความเข้มแสง และความต้องการโหลด รูปแบบ A และ กรณีที่ 2 รูปที่ 4.11-4.13 ภายใต้รูปแบบความเข้มแสง และความต้องการโหลด รูปแบบ B ซึ่งแสดงกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV แรงดันไฟฟ้าที่บัส PCC และ แรงดันไฟฟ้าที่บัส PV ภายใต้ความเข้มแสงทั้ง 2 รูปแบบ รูปที่ 4.14 แสดงการชดเชยกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทั้ง 2 กรณี



รูปที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 1

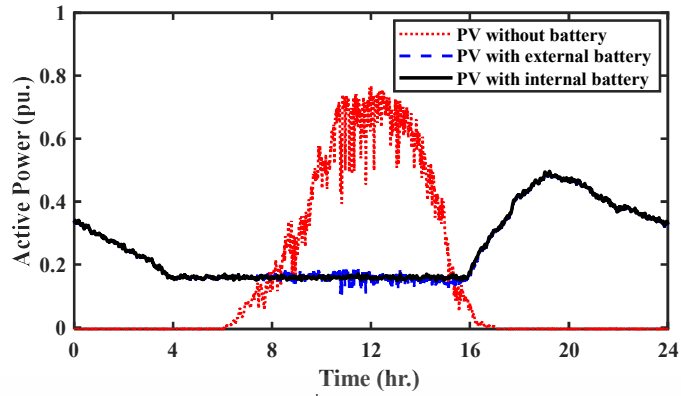


รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสในกรณีที่ 1

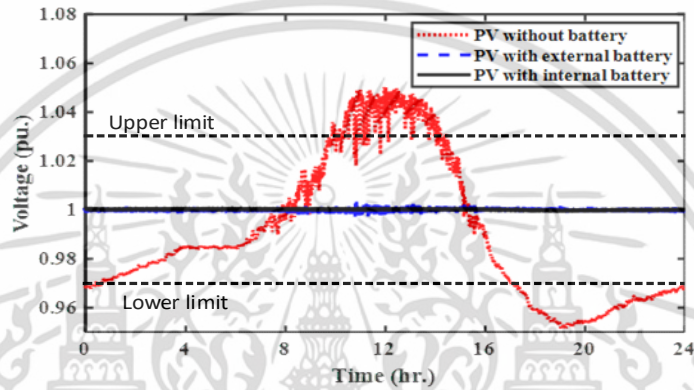


รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสในกรณีที่ 1

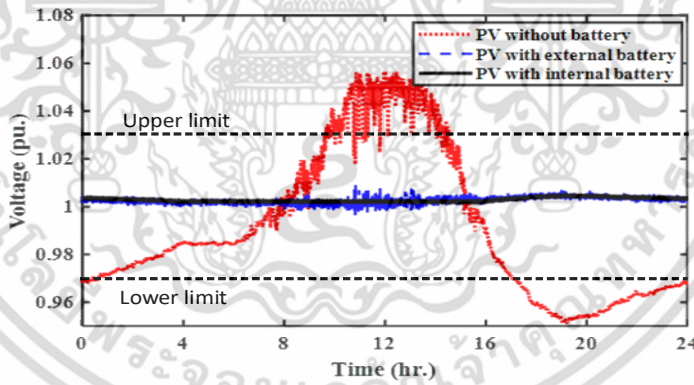
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



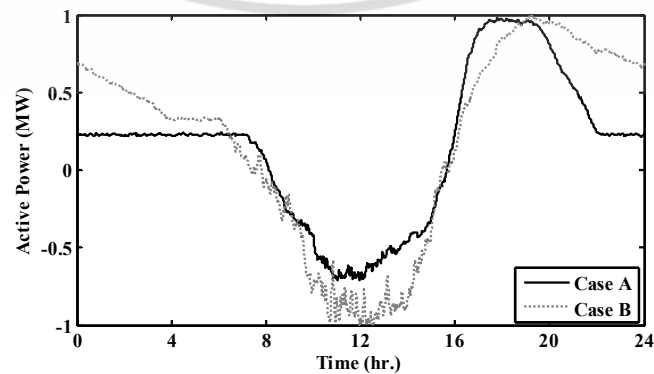
รูปที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ 2



รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าที่ PCC บัสในกรณีที่ 2



รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าที่ PV บัสในกรณีที่ 2



รูปที่ 4.14 การชดเชยกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทั้ง 2 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุป

บทความวิจัยนี้ นำเสนอการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย ซึ่งมีระบบขาร์จรถยนต์ไฟฟ้าติดตั้งอยู่ในระบบด้วย ผลศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. ใช้หลักการของการหาค่าต่ำที่สุดของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ในการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ ดำเนินการแบบอัตโนมัติ

2. ผลการศึกษายืนยันได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน และติดตั้งที่ขั้วของ PV ไม่เพียงส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่น่าพอใจในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว ยังสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ด้วย

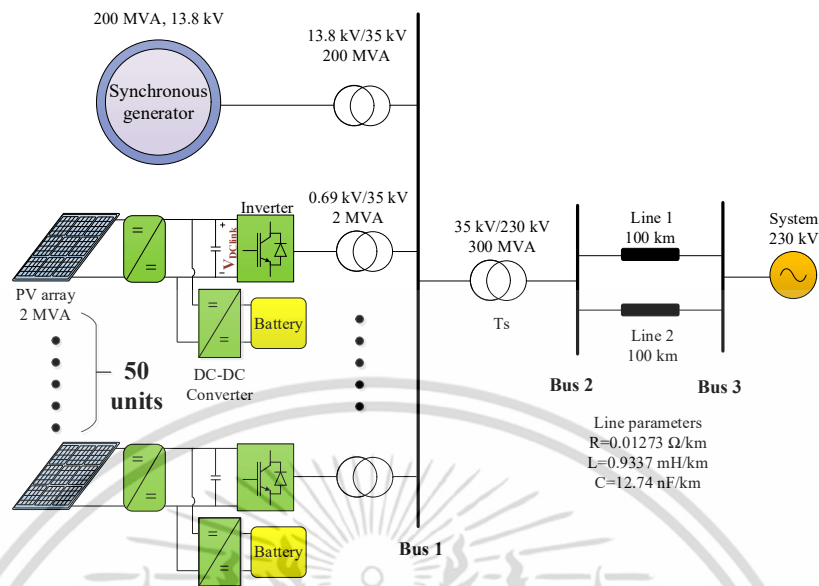
3. การติดตั้งแบตเตอรี่ภายในสามารถลดการใช้อินเวอร์เตอร์ลงได้ และยังมีจำนวนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในการออกแบบน้อยกว่ากรณีติดตั้งแบตเตอรี่ที่ขั้วซึ่งต้องออกแบบทั้งตัวอินเวอร์เตอร์ของ PV อินเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่ และคอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่ ซึ่งมีตัวควบคุมพีไอทั้งสิ้น 9 ชุด ในขณะที่ระบบที่ติดตั้ง PV ภายในมีตัวควบคุมพีไอเพียง 5 ชุด

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้ง แบตเตอรี่ภายในเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

ในบทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ติดตั้งในฝั่งดีซีของ PV และเสนอวิธีควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยแบตเตอรี่ที่ถูกติดตั้งในฝั่งดีซีของ PV ไม่เพียงแต่ใช้อินเวอร์เตอร์ร่วมกับกับ PV แต่ยังสามารถในการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของ PV กับระบบได้ ตัวหน่วยการแกว่งกำลังไฟฟ้าถูกติดตั้งอยู่ในตู้ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของ PV อินเวอร์เตอร์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนสามารถควบคุมเพื่อหน่วยการแกว่งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบได้ โครงสร้างของตัวหน่วยการแกว่งเป็นแบบตัวชดเชยเฟสนำและตามอันดับที่สอง เพื่อได้รับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวหน่วยการแกว่งการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคจึงถูกนำมาใช้เพื่อทำให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด ผลการจำลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพการรักษาเสถียรภาพของ PV ที่ติดตั้งตัวควบคุมที่เหมาะสมให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ไม่ได้ผ่านวิธีการทำให้เหมาะสมภายใต้การเกิดความผิดปกติรุนแรง และระดับการไหลของกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

5.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 5.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 5.1 แสดงระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน ซึ่งต่ออยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแปลงแรงดันขึ้น Ts และสายส่งแบบขนาน แบตเตอรี่ถูกนำมาใช้เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากความเข้มแสงซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในสภาวะปกติ และรักษาเสถียรภาพการแกว่งไฟฟ้ากำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์เมื่อเกิดความผิดปกติ

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ในการจำลองระบบของ PV และแบตเตอรี่

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโมดูล PV	305.23 W
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร V_{oc}	64.2 V
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc}	5.96 A
แรงดันไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด V_{pmax}	54.7 V
กระแสไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด I_{pmax}	5.58 A
พิกัดกำลังไฟฟารวม (P)	2 MW
จำนวนโมดูลที่ต่ออนุกรม	15
จำนวนโมดูลที่ต่อขนาน	437
ชนิดของแบตเตอรี่	ลิเทียม-ไอออน
ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่	1 MW

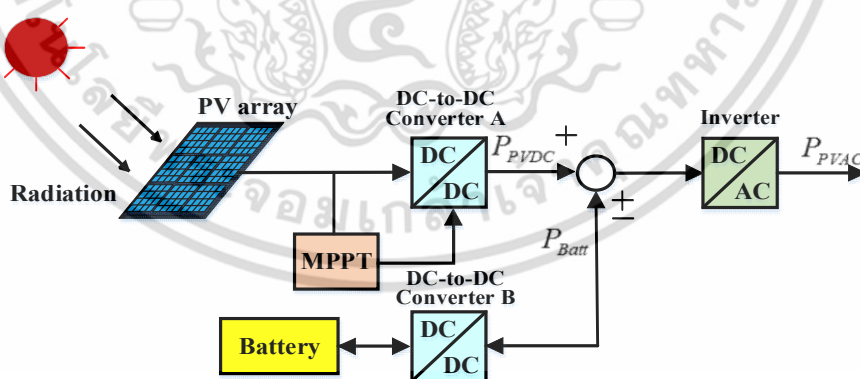
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีพิกัด 200 MVA 13.8kV 60 Hz ซึ่งติดตั้งชุดกระตุ้น (Exciter) และชุดควบคุมกังหัน (Turbine governor) ซึ่งระบบการกระตุ้น (Excitation system) ใช้ IEEE ชนิดที่ 1 ตัวคุมค่าแรงดันของเครื่องจักรกลซิงโครนัสร่วมกับตัวกระตุ้นซึ่งเป็นบล็อกกระตุ้นมาตรฐานของระบบ Simulink ซึ่งมีให้ในฐานข้อมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้า [47]

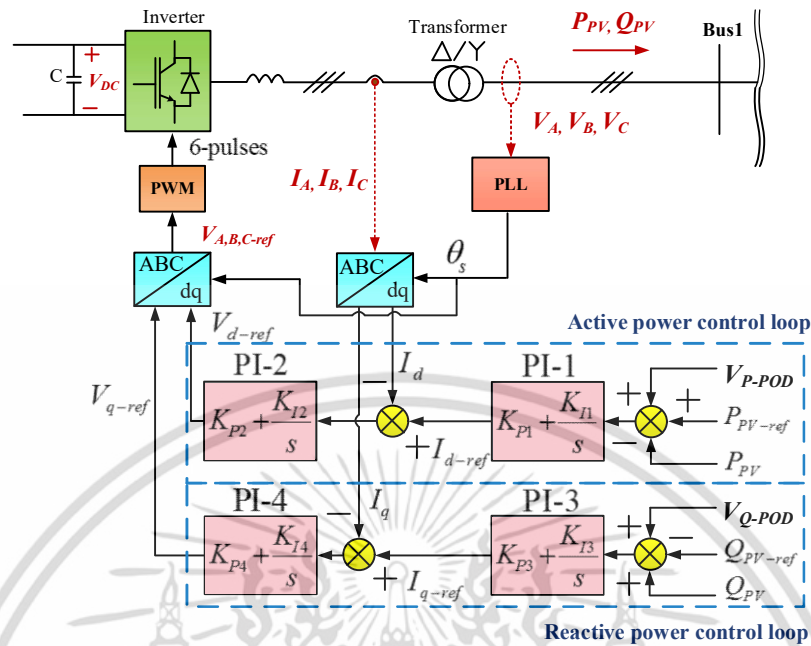
5.1.2 ระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

โครงสร้างระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 5.2 ประกอบด้วยชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คอนเวอร์เตอร์ A ซึ่งเป็นวงจรเพิ่มระดับแรงดัน (Boost converter) คอนเวอร์เตอร์ B ซึ่งเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์กระแสตรงแบบสองทาง (Bidirectional DC-to-DC converter) ของแบตเตอรี่ และอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ซึ่งติดตั้งที่ฝั่งดีซีของ PV ผ่านคอนเวอร์เตอร์ B ดังนั้น PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในสามารถใช้เพื่อทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกเรียบในช่วงการทำงานปกติ และลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าหลังการเกิดความผิดปกติของระบบ ในรูปที่ 5.2 P_{PVDC} และ P_{PVAC} คือ กำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ทางฝั่งดีซี และฝั่งเอซีตามลำดับ P_{Batt} คือ กำลังไฟฟ้าที่ชดเชยจากแบตเตอรี่ ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมและขนานกัน โดยข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกแสดงในตารางที่ 5.1 วิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point tracking) ของระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้วิธี Incremental Conductance เพื่อหาจุดการทำงานของ PV สำหรับควบคุมคอนเวอร์เตอร์ A โดยแบตเตอรี่ที่มีพิกัดกำลัง 1 MW และแรงดันไฟฟ้า 1 kV ถูกติดตั้งที่ฝั่งดีซีของ PV



รูปที่ 5.2 ระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

5.2 การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่



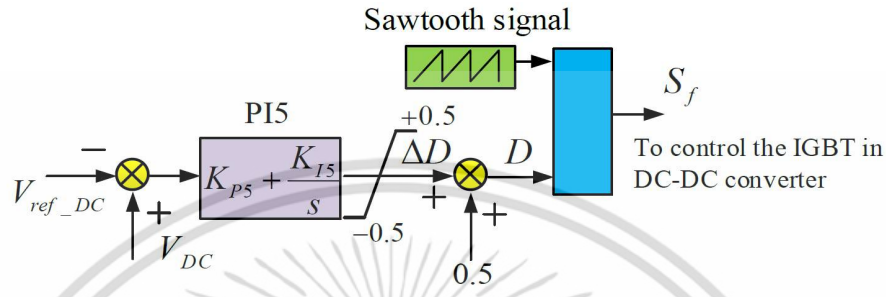
รูปที่ 5.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

รูปที่ 5.3 แสดงวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ของ PV ซึ่งประกอบด้วยลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและ ลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยวงจรเฟสล็อกคูลูป (PLL) จะถูกใช้ในการวัดมุมการเปลี่ยนแปลง (θ_s) จาก แรงดันไฟฟ้าสามเฟส (V_a, V_b, V_c) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ด้านแรงดันต่ำสำหรับการเปลี่ยนแปลงจากแรงดัน และกระแสเฟสไปสู่แรงดันและกระแสในแนวแกนตรง (Direct-axis) และแกนขวาง (Quadrature-axis) ในทางกลับกันก็สามารถแปลงจากกระแสและแรงดันในแนวแกนตรงและขวางไปสู่แรงดันและกระแสเฟส

ลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงขาออกของ PV ที่ค่าอ้างอิง ตัวควบคุมพีไอ ตัวที่ 1 (PI-1) จะสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแนวแกนตรง (I_{ref_d}) จากสัญญาณผลลัพธ์ของผลต่าง ระหว่างสัญญาณควบคุมจากตัวหน่วงการแกว่งในลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (V_{P-POD}), สัญญาณอ้างอิง กำลังไฟฟ้าจริงของ PV (P_{ref_PV}) และสัญญาณจริงกำลังไฟฟ้าจริงของ PV (P_{PV}) สัญญาณอ้างอิงแรงดันไฟฟ้า แกนตรง (V_{ref_d}) ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง I_{ref_d} กับสัญญาณจริงของกระแสไฟฟ้าแกนตรง (I_d) ซึ่งเป็นสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมพีไอ ตัวที่ 2 (PI-2)

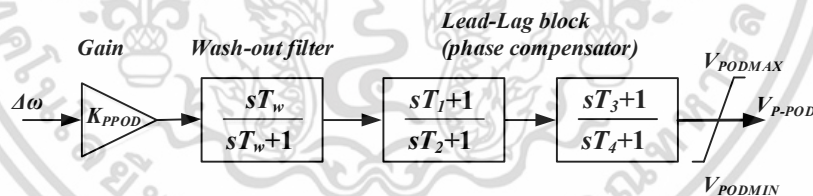
ลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนขาออกของ PV ที่ค่าอ้างอิง ตัวควบคุมพีไอตัวที่ 3 (PI-3) จะสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแนวแกนขวาง (I_{ref_q}) จากสัญญาณผลลัพธ์ ของผลต่างระหว่างสัญญาณควบคุมจากตัวหน่วงการแกว่งในลูปควบคุมกำลังไฟฟ้า

เสมือน (V_{Q-POD}), สัญญาณอ้างอิงกำลังไฟฟ้าเสมือนของ PV (Q_{ref_pv}) และสัญญาณจริงกำลังไฟฟ้าเสมือนของ PV (Q_{pv}) สัญญาณอ้างอิงแรงดันไฟฟ้าแกนขวาง (V_{ref_q}) ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง I_{ref_q} กับสัญญาณจริงของกระแสไฟฟ้าแกนขวาง (I_q) ซึ่งเป็นสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมพีไอตัวที่ 4 (PI-4) ทำยที่สุด V_{ref_d} และ V_{ref_q} จะถูกแปลงเป็นแรงดันอ้างอิงสามเฟส (V_{A-ref} , V_{B-ref} , V_{C-ref}) และนำไปใช้สร้างสัญญาณควบคุม สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

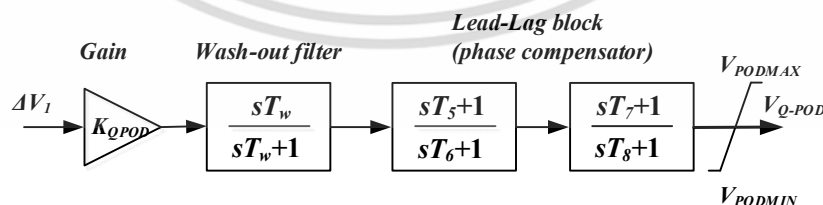


รูปที่ 5.4 วงจรควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่

รูปที่ 5.4 แสดงวงจรควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่ โดยตัวควบคุมพีไอตัวที่ 5 ใช้เพื่อควบคุม แรงดันดีซีลิงค์ (V_{DC}) โดยเปลี่ยนแปลงค่าผลต่างดิวตี้ไซเคิล (ΔD) สัญญาณ ΔD ได้จากการเปรียบเทียบ สัญญาณ V_{DC} กับสัญญาณอ้างอิงแรงดันดีซีลิงค์ (V_{ref_DC}) ดิวตี้ไซเคิล (D) สร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ (S_f) สำหรับการควบคุมการชดเชยพลังงานของแบตเตอรี่ โดยเมื่อ ดิวตี้ไซเคิลต่ำกว่า 0.5 พลังงานจะถูกจ่ายออก จากแบตเตอรี่ไปสู่ระบบ ในทางตรงกันข้ามพลังงาน จะถูกชาร์ตไปยังแบตเตอรี่



รูปที่ 5.5 วงจรตัวหน่วงการแกว่งในลูบควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (P-POD)



รูปที่ 5.6 วงจรตัวหน่วงการแกว่งในลูบควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q-POD)

รูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 แสดงโครงสร้างของวงจรตัวหน่วงการแกว่งในลูบควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (P-POD) และเสมือน (Q-POD) ตามลำดับ โดยมีโครงสร้างเป็นตัวชดเชยเฟสนำและตามอันดับที่สอง ซึ่งพารามิเตอร์ ของตัวหน่วงการแกว่งประกอบด้วย อัตราขยายสำหรับเสถียรภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(K_{PPOD} , K_{QPOD}), ค่าคงที่เวลาสำหรับกรองสัญญาณความถี่สูง (T_w) ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 10 s ค่าคงที่เวลาสำหรับทำเสถียรภาพ ($T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8$) โดยสัญญาณขาเข้าของ P-POD และ Q-POD คือค่าเบี่ยงเบนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($\Delta\omega$) และแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 (ΔV_1) เทียบกับสัญญาณอ้างอิงตามลำดับ สัญญาณขาออก V_{P-POD} จะถูกส่งไปยังลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงในทางตรงข้ามสัญญาณขาออก V_{Q-POD} จะถูกส่งไปยังลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยสัญญาณขาออกจะถูกจำกัดโดยตัวจำกัดขอบเขตบน (V_{PODMAX}) และขอบเขตล่าง (V_{PODMIN}) ที่สถานะปกติ สัญญาณขาออกของ P-POD และ Q-POD มีค่าเป็น 0 และในขณะเกิดความผิดปกติ P-POD และ Q-POD จะถูกออกแบบให้ลด $\Delta\omega$ และ ΔV_1 ดังนั้นความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าจะถูกควบคุมที่ค่าอ้างอิง จึงสามารถรักษาเสถียรภาพการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

5.3 วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่น่าเสนอของพารามิเตอร์ตัวหน่วงการแกว่งกำลังไฟฟ้า ใช้วิธีหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Integral absolute error) ของค่าเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ΔP_{Gen}) และแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 (ΔV_{Bus1}) เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าหลังเกิดความผิดปกติ

$$IAE_p = \int_{t_0}^{t_{sim}} |\Delta P_{Gen}| dt \quad (5.1)$$

$$IAE_v = \int_{t_0}^{t_{sim}} |\Delta V_{Bus1}| dt \quad (5.2)$$

เมื่อ t_0 และ t_{sim} คือ เวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดของการจำลองตามลำดับ ΔP_{Gen} คือค่าเบี่ยงเบน กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง และ ΔV_{Bus1} คือค่าเบี่ยงเบน แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จริงที่บัส 1 เทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

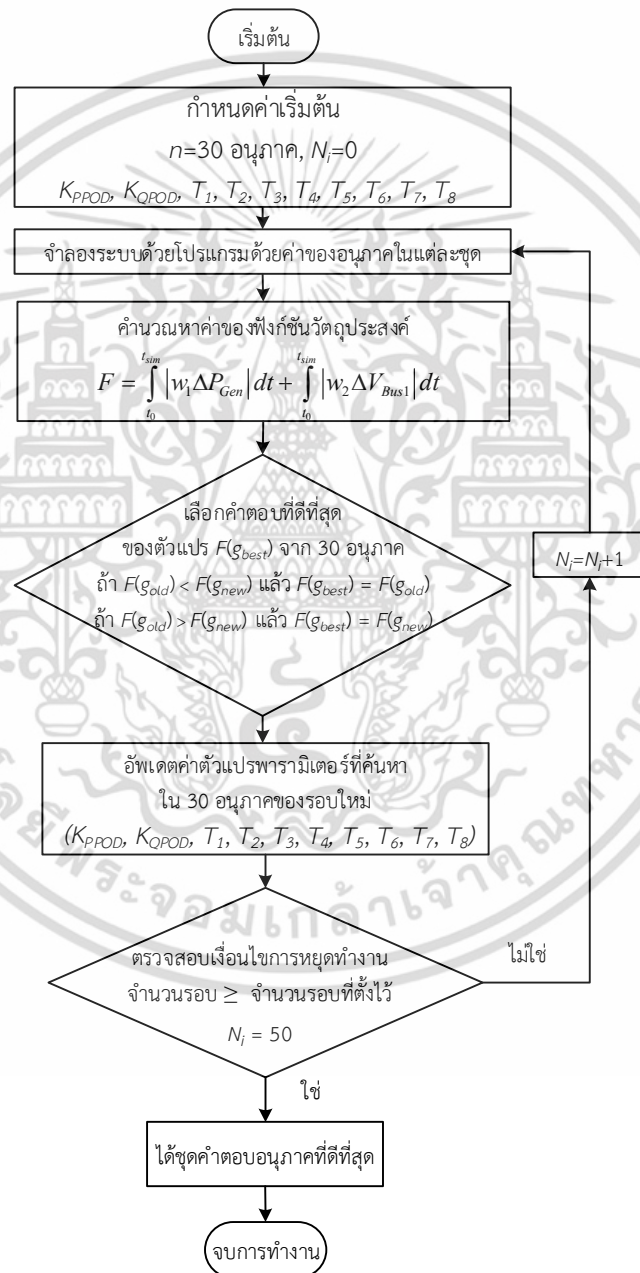
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการทำให้เหมาะสมสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Minimize } F = w_1 IAE_p + w_2 IAE_v \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยมีเงื่อนไขดังนี้} \quad & 0.01 \leq K_{PPOD} \leq 30 \\ & 0.01 \leq K_{QPOD} \leq 30 \\ & 0.01 \leq T_1, T_2, T_3, T_4 \leq 1 \\ & 0.01 \leq T_5, T_6, T_7, T_8 \leq 1 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ F คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าดัชนีถ่วงน้ำหนัก w_1, w_2 มีค่า 0.2 และ 1 ตามลำดับ เพื่อที่จะได้รับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวห่วยการแกว่ง วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าตอบแบบสุ่มซึ่งมีแรงบรรดาลใจมาจากพฤติกรรมทางสังคมของสัตว์ PSO เป็นวิธีการค้นหาค่าตอบที่มีประสิทธิภาพซึ่งมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ และปัญหาทางวิศวกรรมมากมาย เนื่องจากมีแนวคิดไม่ซับซ้อน เข้าใจง่าย มีตัวแปรน้อย ดังนั้น PSO จึงถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสม (5.3) ซึ่งแผนภาพการทำงานของ PSO แสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แผนผังการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

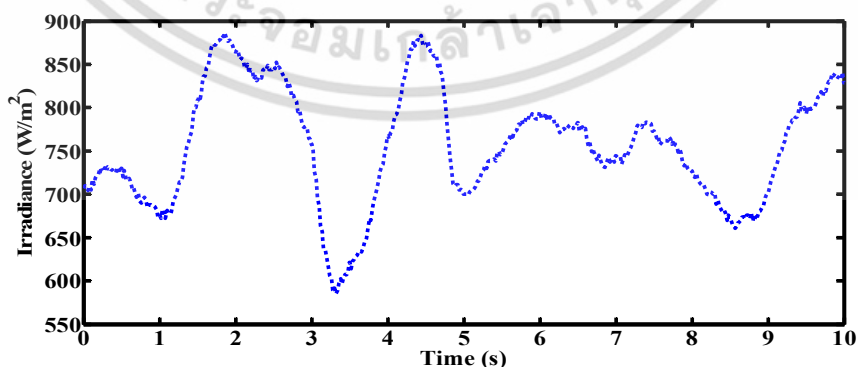
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการจำลอง

ผลการจำลอง และการหาค่าพารามิเตอร์ POD ที่เหมาะสมจะถูกดำเนินการในโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems [33] PV ที่ติดตั้ง P-POD และ Q-POD จะถูกทำให้เหมาะสมภายในกรณีศึกษาที่ 1 ในตารางที่ 5.2 ภายใต้ความเข้มแสงอาทิตย์ที่แสดงดังรูปที่ 5.8 เส้นโค้งลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F_{IAE_p} และ IAE_v จะถูกแสดงในรูปที่ 5.9 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ P-POD และ Q-POD แสดงดังตารางที่ 5.3 โดย PV ติดตั้งด้วย P-POD และ Q-POD ที่มีค่าที่เหมาะสมจะเรียกว่า PV ที่ติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งที่เหมาะสม (PV with optimal POD) โดยในการจำลองนี้ประสิทธิภาพการหน่วง การแกว่งของ PV ที่ติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งที่เหมาะสมจะถูกเปรียบเทียบกับ PV ที่ติดตั้งตัวหน่วงการแกว่งที่ตั้งค่ามาด้วยวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) โดยให้ผลสมรรถนะการทำงานออกมาได้ดี (PV without optimized POD) โดยทุกพารามิเตอร์ออกแบบอย่างเหมาะสมภายใต้ กรณีศึกษาที่ 1

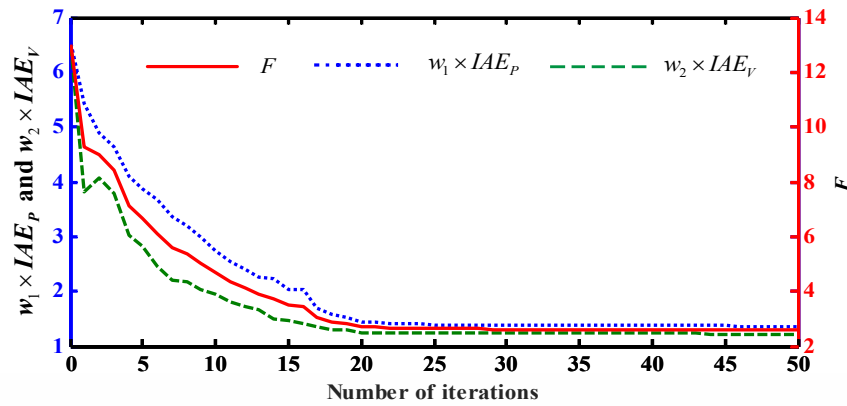
ตารางที่ 5.2 กรณีศึกษา

กรณีศึกษา	ความผิดปกติที่เกิดขึ้น	ค่าเริ่มต้นกำลังไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
1	ความผิดปกติ 3 เฟส เกิดขึ้น ณ บัส 2 ที่ $t = 1$ s นาน 100 ms.	150 MW
2	ความผิดปกติ 3 เฟส เกิดขึ้น ณ จุดกึ่งกลางสายส่งเส้นที่ 1 ที่ $t = 1$ s นาน 100 ms. และมีการกำจัดความผิดปกติโดยเปิดวงจรสายส่งเส้นที่ 1 ที่ $t = 1.10$ s	150 MW



รูปที่ 5.8 ความเข้มแสงของ PV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

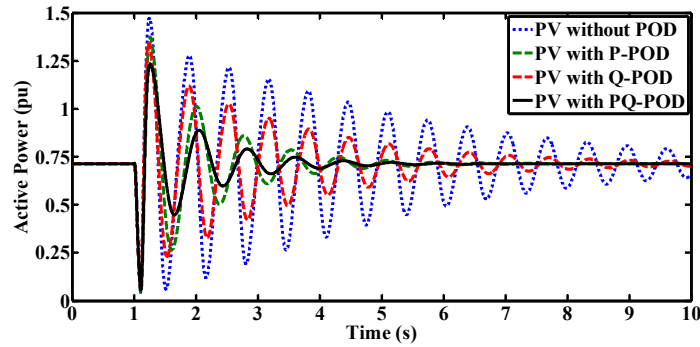


รูปที่ 5.9 เส้นโค้งการลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

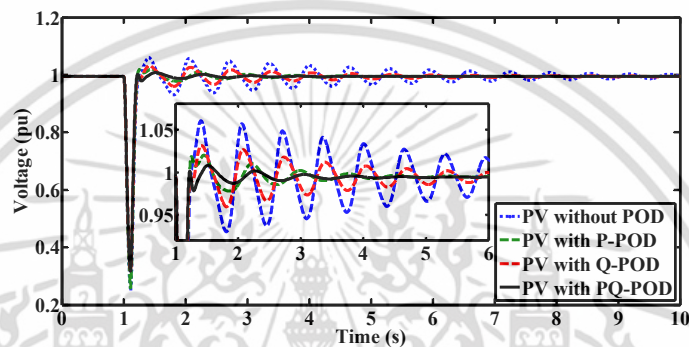
ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของตัวหน่วงการแกว่ง

พารามิเตอร์	POD	
	Without optimization	Optimal
K_{POD}	25	21.5835
T_{PW}	10	10
T_1, T_2	0.1, 0.05	0.9508, 0.4512
T_3, T_4	0.5, 0.05	0.9951, 0.4683
K_{QPOD}	20	14.8304
T_{QW}	10	10
T_5, T_6	0.05, 0.02	0.0472, 0.2529
T_7, T_8	0.3, 0.5	0.5937, 0.1133
V_{PODMIN}, V_{PODMAX}	-0.3, 0.3	-0.3, 0.3

ผลการจำลองการรักษาเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 เมื่อติดตั้ง POD ในรูปควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนแสดงดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้ง POD ทั้งสองรูปควบคุมให้ผลลัพธ์ในการรักษาเสถียรภาพได้ดีกว่าการติดตั้งในรูปควบคุมใดควบคุมหนึ่ง ดังนั้นจึงนำเสนอการติดตั้ง POD ทั้งในรูปควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพได้ดีที่สุด

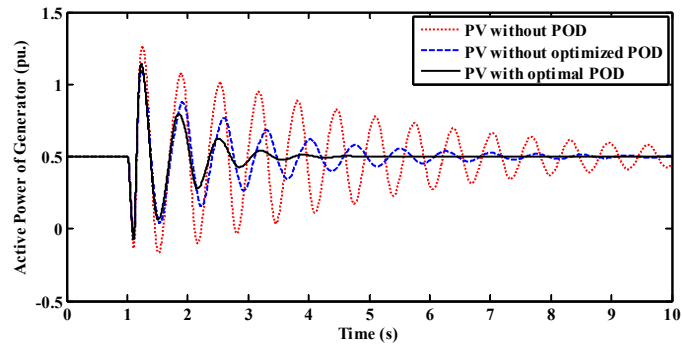


รูปที่ 5.10 กำลังไฟฟ้าที่บัส 1 สำหรับกรณีที่ 1

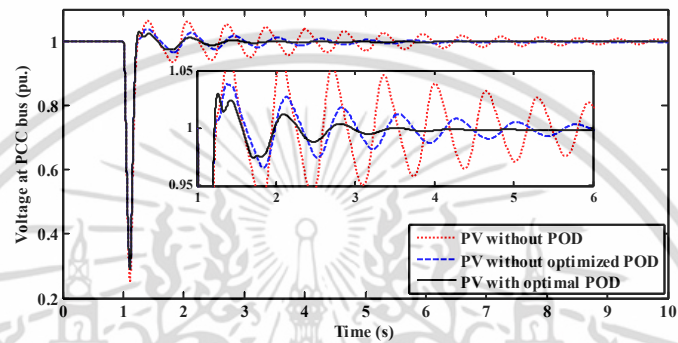


รูปที่ 5.11 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 สำหรับกรณีที่ 1

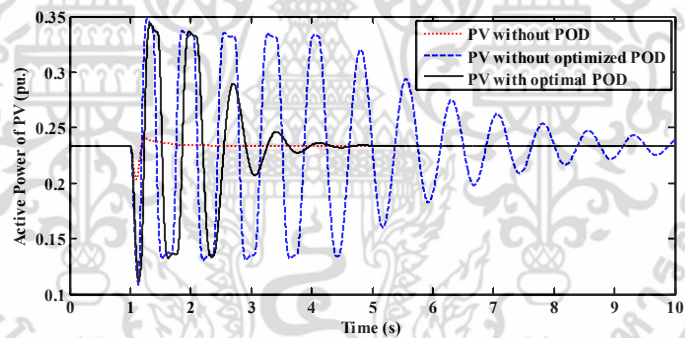
ผลการจำลองของกรณีที่ 1 แสดงดังรูปที่ 5.12-5.18 โดยรูปที่ 5.12 แสดงกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ในกรณีที่ PV ไม่ติดตั้ง POD เกิดการแกว่งกำลังไฟฟ้าขึ้น ในทางตรงข้าม PV ที่ติดตั้ง POD ทั้งที่พารามิเตอร์ผ่านการออกแบบเหมาะสมสุดแบบกลุ่มอนุภาคและออกแบบด้วยวิธีลองผิดลองถูกนั้นมีความสามารถในการรักษาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม POD ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่ผ่านวิธีการทำให้เหมาะสมที่สุดให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า รูปที่ 5.13 แสดงการแกว่งแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ซึ่ง PV ที่ติดตั้ง POD นั้นมีความสามารถในการรักษาการแกว่งของแรงดันที่บัส 1 รูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 แสดงกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนขาออกของ PV เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส รูปที่ 5.16 แสดงถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบตเตอรี่จะชดเชยพลังงานซึ่งเป็นไปในแนวทางตรงข้ามกับความเข้มของแสงอาทิตย์เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสภาพอากาศเปลี่ยน ในกรณี PV ไม่ติดตั้ง POD และสำหรับกรณีที่มี POD แบตเตอรี่จะชดเชยพลังงานให้กับระบบ เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ เมื่อค่ากำลังไฟฟ้าเป็นบวกบ่งชี้ถึงสถานะการคายพลังงานของแบตเตอรี่ ในทางตรงข้ามเมื่อกำลังไฟฟ้าเป็นลบบ่งชี้ถึงสถานะการเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ รูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 แสดงสัญญาณการทำงานของ POD ของลูปควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนเพื่อลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพลาด



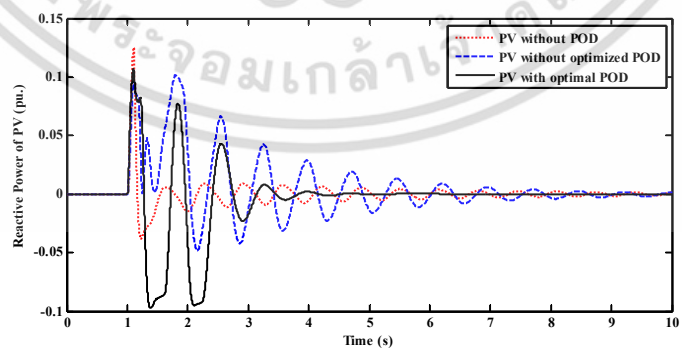
รูปที่ 5.12 กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับกรณีที่ 1



รูปที่ 5.13 แรงแดันไฟฟ้าที่บัส 1 สำหรับกรณีที่ 1

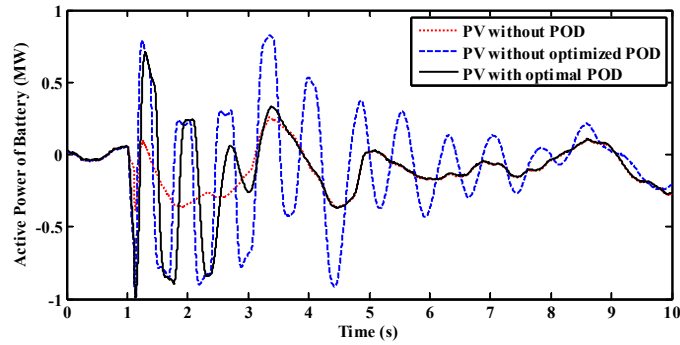


รูปที่ 5.14 กำลังไฟฟ้าจริงของ PV สำหรับกรณีที่ 1

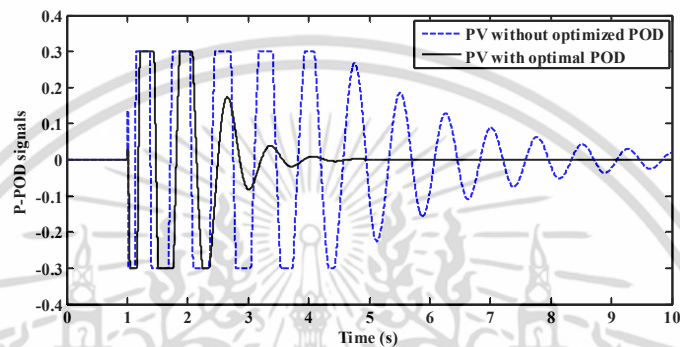


รูปที่ 5.15 กำลังไฟฟ้าเสมือนของ PV สำหรับกรณีที่ 1

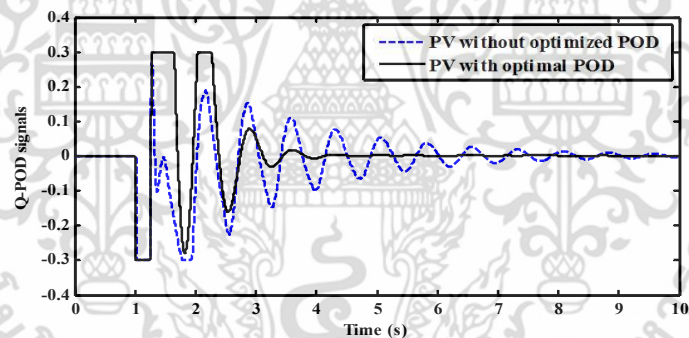
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 การชดเชยกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่สำหรับกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ 5.17 สัญญาณ P-POD สำหรับกรณีศึกษาที่ 1

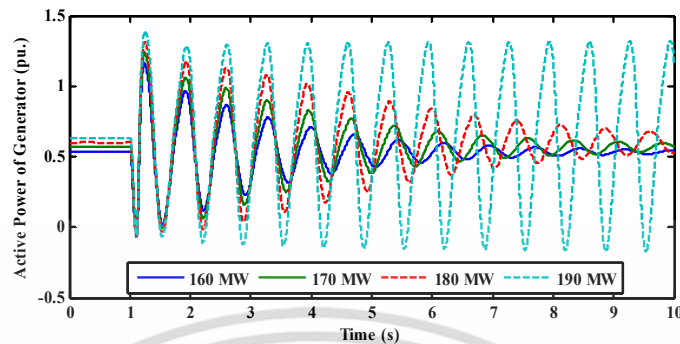


รูปที่ 5.18 สัญญาณ Q-POD สำหรับกรณีศึกษาที่ 1

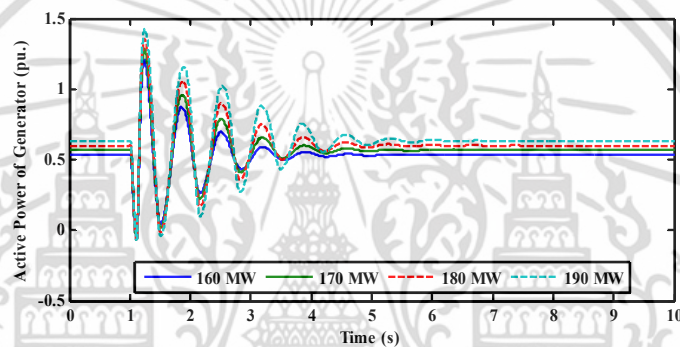
ประสิทธิภาพการรักษาระดับแรงดันของ PV ที่ติดตั้ง POD จะถูกนำมาเปรียบเทียบเมื่อค่าเริ่มต้นกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 160 MW ถึง 190 MW ภายใต้กรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 แสดงกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสที่ถูกควบคุมโดย PV ที่ติดตั้ง POD ที่ไม่ได้ผ่านวิธีการทำให้เหมาะสม และ PV ที่ติดตั้ง POD ที่มีค่าเหมาะสมตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการลดการแกว่งของ PV ที่ติดตั้ง POD ที่ไม่ได้ผ่านวิธีการทำให้เหมาะสมให้ผลลัพธ์ที่แย่ลง ส่วน PV ที่ติดตั้ง POD ที่เหมาะสมสามารถลดการแกว่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตารางที่ 5.4 แสดงค่าเวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟอลต์ (Critical Clearing Time) ซึ่งหาได้จากการปรับค่าเวลาที่ใช้เคลียร์ฟอลต์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่ 100 ms จนระบบไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้ จากตารางค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟลอตต์ในกรณี POD ผ่านกระบวนการหาค่าอย่างเหมาะสมจะมีค่ามากกว่า ซึ่งมีความคงทนต่อการเกิดฟลอตต์ได้นานกว่า ทำให้สามารถแก้ปัญหาการแกว่งได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



รูปที่ 5.19 กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ POD ไม่ผ่านการทำให้เหมาะสมในกรณี 1



รูปที่ 5.20 กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ POD มีค่าที่เหมาะสมสำหรับกรณี 1

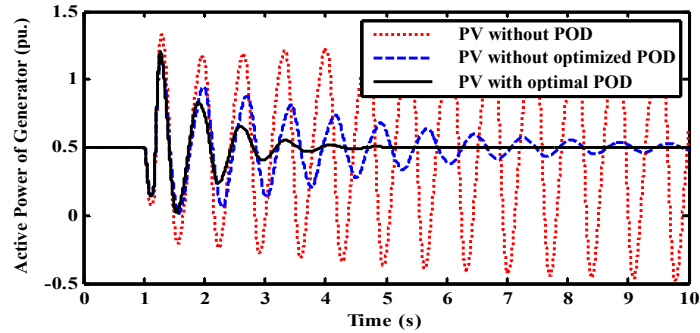
ตารางที่ 5.4 ค่าเวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟลอตต์กรณี 1

ค่าเริ่มต้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MW)	ค่าเวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟลอตต์ (ms)	
	With Optimization	Without Optimization
150	234	230
160	225	220
170	212	209
180	203	201
190	182	< 100

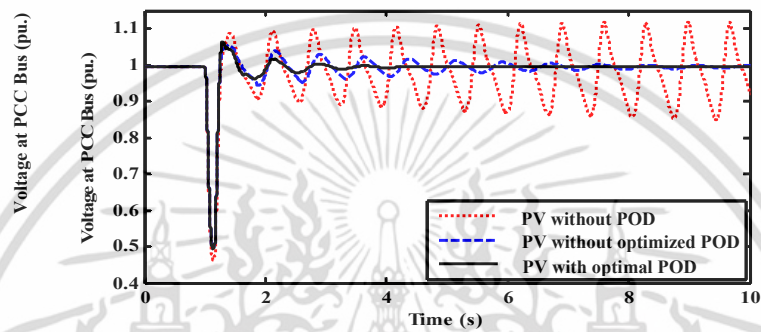
ผลการจำลองของกำลังไฟฟ้าจริงขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสและแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 สำหรับกรณี 2 แสดงดังรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 ตามลำดับ ในกรณี PV ที่ไม่ติดตั้ง POD ทั้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีการแกว่งอย่างรุนแรงและระบบสูญเสียเสถียรภาพ ในทางตรงข้าม PV ที่ติดตั้ง POD ที่เหมาะสมให้ผลลัพธ์ในการรักษาเสถียรภาพของระบบได้เหนือกว่า POD ที่ไม่ได้ผ่าน

การทำให้เหมาะสมทั้งผลกระทบต่อ กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

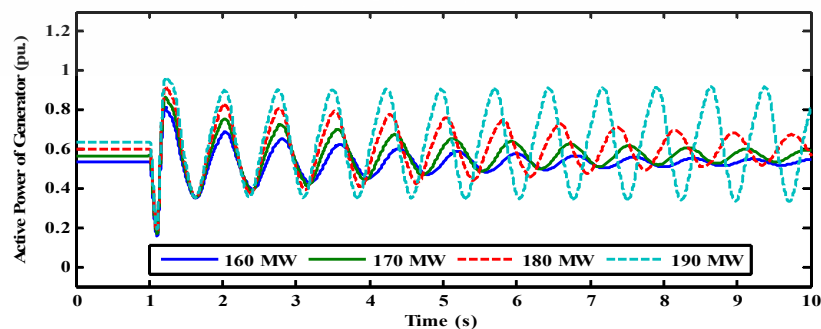


รูปที่ 5.21 กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสสำหรับกรณีที่ 2



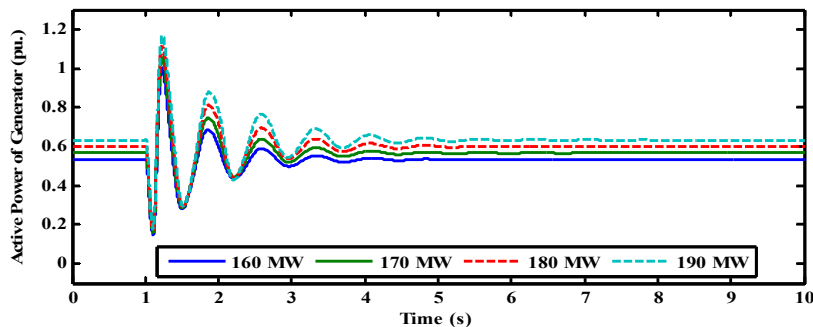
รูปที่ 5.22 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 สำหรับกรณีที่ 2

ผลลัพธ์ของการรักษาเสถียรภาพของ PV ที่ติดตั้ง POD ที่มีผ่านการหาค่าเหมาะสมและไม่ผ่านกระบวนการออกแบบค่าที่เหมาะสมจะถูกตรวจสอบเมื่อการส่งออกกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่า เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 160 MW ถึง 190 MW ภายใต้กรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งรูปที่ 5.23 และรูปที่ 5.24 แสดงให้เห็นถึงกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสที่ถูกควบคุมโดย PV ที่ติดตั้ง POD ที่มีค่าไม่ได้ผ่านวิธีการทำให้เหมาะสมและ PV ที่ติดตั้ง POD ที่มีค่าเหมาะสมตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดการแกว่งของ POD ที่ไม่ได้ผ่านการทำให้เหมาะสมแย่งเมื่อกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพ ในทางกลับกัน PV ที่ติดตั้ง POD ที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพในการรักษาการแกว่งเมื่อมีการไหล ของกำลังไฟฟ้าสูง และสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5.23 กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ POD ไม่ผ่านการทำให้เหมาะสมในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ POD มีค่าที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่ 2

5.5 สรุป

บทความวิจัยนี้ นำเสนอการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ โดยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของ PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่และ PODs ถูกนำเสนอเพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ และการเกิดความผิดปกติในระบบ โดยผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1 ประยุกต์ใช้ PV ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
- 2 การติดตั้ง POD ในรูปควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของ PV อินเวอร์เตอร์ สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าได้ พารามิเตอร์ของ POD จะถูกหาค่าอย่างเหมาะสม โดยอัตโนมัติซึ่งขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการ หาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค
- 3 ผลการจำลองยืนยันว่าประสิทธิภาพการรักษาเสถียรภาพของ PV ที่ติดตั้ง POD ที่มีค่าเหมาะสมให้ผลลัพธ์ดีกว่า PV ที่ติดตั้ง POD ที่ไม่ได้ผ่านวิธีการทำให้เหมาะสมภายใต้ความผิดปกติที่รุนแรง และการไหลของกำลังไฟฟ้าในระดับสูง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ที่ติดตั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) ที่ต่อร่วมอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง และลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติ โดยแยกเป็น 3 หัวข้อ คือ

1. การประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ติดตั้งภายใน PV เพื่อแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าด้านนอก ซึ่งรูปแบบของระบบ ประกอบด้วย ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมต่อกับ PV และ ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมต่อเข้ากับ PV และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

2. การประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ติดตั้งภายใน PV ที่มีรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินและโหนดเชื่อมต่อกับระบบ เพื่อแก้ไขปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ PV ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของมาตรฐานแรงดันไฟฟ้า

3. การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งแบตเตอรี่ภายใน เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ

ซึ่งทั้ง 3 หัวข้อ มีการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมต่างๆ ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ และผลจากการจำลองสามารถสรุปผลของงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

- ผลการศึกษายืนยันได้ว่ากรณีที่ PV ติดตั้งแบตเตอรี่ทั้งภายในและภายนอก ให้ประสิทธิภาพในการลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ได้ใกล้เคียงกัน แต่กรณีที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในสามารถใช้อินเวอร์เตอร์ร่วมกับ PV ได้ ทำให้ลดจำนวนชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ในการติดตั้งลงได้
- การประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ติดตั้งภายใน PV ในการลดความไม่สม่ำเสมอกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และรักษาระดับแรงดันบัสได้โดยไม่ขึ้นกับความเร็วลมรูปแบบใดๆ
- แบตเตอรี่ที่ติดตั้งกับระบบ PV ที่ประกอบด้วยรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินและโหนดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง แสดงสมรรถนะที่ยอดเยี่ยมในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก PV ได้และยังรักษาแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมให้อยู่ในขอบเขตของมาตรฐานแรงดันที่กำหนดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การประยุกต์ใช้ตัวหน่วงการแกว่งมาติดตั้งใน PV ที่มีแบตเตอรี่ภายในนั้นสามารถลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ ในขณะที่สภาวะปกติ PV ที่มีแบตเตอรี่ภายในก็ยังสามารถลดความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าขาออกของ PV ได้
- การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์พีไอด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคใช้หลักการทำให้ค่าต่ำสุดของการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า เพื่อแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่นั้นสามารถทำงานได้ดีในสภาวะต่างๆ

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

1. ควรนำแบตเตอรี่ประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบที่ติดตั้งพลังงานทดแทนแบบผสมผสาน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น
2. การออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไออย่างเหมาะสมในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุมซึ่งได้ออกแบบภายใต้กรณีศึกษาเดียว แล้วนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปทดสอบกับกรณีอื่นๆ ถึงแม้ตัวควบคุมที่ได้จะสามารถรองรับการทำงานในกรณีอื่นๆได้ แต่ในการออกแบบเพื่อใช้งานจริงมีปัจจัยหลายๆอย่างที่ต้องพิจารณาเพื่อออกแบบการควบคุมได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นควรมีการพิจารณาในหลายๆกรณีในการออกแบบ เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่มีความเหมาะสมกับทุกสถานการณ์
3. เพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบตัวควบคุมให้ดียิ่งขึ้น เช่น การใช้ตัวควบคุมแบบปรับค่าได้ (adaptive controller) ในการปรับค่าที่สภาวะการทำงานที่แตกต่างกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมให้สูงขึ้น
4. เพิ่มแนวคิดการนำแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้าไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า และรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง
5. ควรมีการพิจารณาค่าความจุ (Energy capacity) และ สถานะการประจุของแบตเตอรี่ (State of charge) ในงานวิจัยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] REN21. “Renewables 2017 Global Status Report” [Online] Available: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>. 2017
- [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] IEA-PVPS. “Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2017” [Online] Available <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=266>. 2017
- [4] Abdalkarim A., Iyad T., Mohammed H., Wasel G., et al “PV Output Power Smoothing Using Flywheel Storage System,” **IEEE Environment and Electrical Eng.**, 2017.
- [5] Worapong K. and Issarachai N. “Optimal Superconducting Coil Integrated Into PV Generators for Smoothing Power and Regulating Voltage in Distribution System With PHEVs,” **IEEE Trans. Appl. Supercond**, vol. 26, no. 7, 2016. pp. 5402805.
- [6] Xiangjun L., Dong H., and Xiaokang L. “Battery Energy Storage (BESS)-based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations,” **IEEE Trans. on Sustain. Energy**, vol. 4, no. 2, 2013. pp. 464-473.
- [7] Jay J., Abraham E., Atsushi D., Kimio M., et al “PV Output Smoothing Using A Battery and Natural Gas Engine-generator,” **IEEE Photovoltaic Specialists Conf.**, 2013. pp. 1811-1816.
- [8] Xiaokang X., Martin B., Donna G. O., and Chen H. “Application and Modeling of Battery Energy Storage in Power System,” **Journal of Power and Energy Systems**, vol. 2, no. 3, 2016. pp. 82-90.
- [9] E. O Ogunniyi and HCvZ P. “Overview of Battery Energy Storage System Advancement for Renewable (Photovoltaic) Energy Applications” **IEEE Domestic Use of Energy Conf.**, 2017. pp. 233-239.
- [10] . Baoqi L., Yanhu Z., Bing H., Liying X., and Zhao W. “An Integrated Control Strategy of PV-battery Hybrid Systems,” **IEEE Power Electronics and Application Conf. and Exposition (PEAC)**, 2014. pp. 419-422.
- [11] Manoj D., Tomonobu S., Atsushi Y., et al “A Frequency-control Approach by Photovoltaic Generator in A PV-diesel Hybrid Power System,” **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 26, no. 2, 2011. pp. 559-571.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Nattapol S. and Issarachai N. “Intelligent Photovoltaic Farms for Robust Frequency Stabilization in Multi-area Interconnected Power System Based on PSO-based Optimal Sugeno Fuzzy Logic Control” **Renewable Energy**, vol. 74, 2015. pp. 555-567.
- [13] Theerawut C. and Issarachai N. “Improvement of Power System Transient Stability by PV Farm with Fuzzy Gain Scheduling of PID Controller” **IEEE Systems Journal**, vol. 11, no. 3, 2017. pp. 1684-1691.
- [14] Narsa R. T., Mahesh K. M., and Sachin S. “Dynamic Energy Management of Hybrid Energy Storage System with High-Gain PV Converter,” **IEEE Trans. on Energy Conversion**, vol. 30, no. 1, 2015. pp. 150-160.
- [15] Rakibuzzaman S., Nadarajah M., and Kwang Y. L. “Large-scale PV Plant with a Robust Controller Considering Power Oscillation Damping,” **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 28, no. 1, 2013. pp. 106-116.
- [16] Rakibuzzaman S., Nadarajah M., Kwang Y. L., et al “Wide-area Measurement Signal-based Stabilizer for Large-scale Photovoltaic Plants with High Variability and Uncertainty,” **IET Renewable Power Generation**, vol. 7, no. 6, 2013. pp. 614-622.
- [17] Global wind energy council, “**Global Status of Wind Power 2016**” [Online] Available: <http://gwec.net/global-figures/wind-energy-global-status>. 2017.
- [18] Minh Q. D., Kim H. L., Francesco G., et al “Comparison of Power Quality in Different Grid-integrated Wind Turbines,” **IEEE Conf. on Harmonics and Quality of Power**, 2014. pp. 448-452
- [19] Rajiv K. V., Vinod K., and Ravi S. “Nighttime Application of PV Solar Farm as STATCOM to Regulate Grid Voltage,” **IEEE Trans. on Energy Conversion**, vol. 24, no.4, 2009. pp. 983-985.
- [20] Vinod K., Rajiv K. V., and Ravi S. “Grid Voltage Regulation Utilizing Storage Batteries in PV Solar,” **IEEE Electrical Power and Energy Conf.** 2009. pp. 1-6.
- [21] Maryam H., Vassilios G. A., Vahid S., et al “Index-based Assessment of Voltage Rise and Reverse Power Flow Phenomena in a Distribution Feeder under High PV Penetration,” **IEEE Journal of Photovoltaics**, vol. 5, no. 4, 2015. pp. 1158-1168.
- [22] International Energy Agency. “**Global EV Outlook 2017**” [Online] Available: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/global-ev-outlook-2017.html>. 2017

- [23] Kejun Q., Chengke Z., Malcolm A., and Yue Y. “Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems,” **IEEE Trans. on Power Systems**, vol. 26, no. 2, 2011. pp. 802-810.
- [24] EGAT, MEA, PEA, “รายงานแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านไฟฟ้าเพื่อรองรับยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย” พฤศจิกายน 2559.
- [25] Peng Z., Kejun Q., Chengke Z., et al “A Methodology for Optimization of Power Systems Demand Due to Electric Vehicle Charging Load,” **IEEE Trans. on Power Systems**, vol. 27, no. 3, 2012. pp. 1628-1636
- [26] Peter R., Damian F., and Andrew K. “Optimal Charging of Electric Vehicles in Low-voltage Distribution Systems,” **IEEE Trans. on Power Systems**, vol. 27, no. 1, 2012. pp. 268-279
- [27] Mohammad H. M., Mohammad A., and S. M. Hosseinian “Improving Operation Constraints of Microgrid using PHEVs and Renewable Energy Sources,” **Renewable Energy**, vol. 83, 2015. pp. 543-552
- [28] Byung-Kwan K., Seung-Tak K., Sun-Ho B., et al “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.
- [29] Prachitara S., Snehmoy D., and P.K. Dash “A Mutated Hybrid Firefly Approach to Mitigate Dynamic Oscillations of Second Order PLL Based PV-battery System for Microgrid Applications,” **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 16, 2016. pp. 69-83.
- [30] Yajuan G., Juan C. V., Josep M. G., Yibo W., and Wei F. “Frequency Stability of Hierarchically Controlled Hybrid Photovoltaic-battery-hydropower Microgrids,” **IEEE Trans. on Industry Applications**, vol. 51, no. 6, 2015. pp. 4729-4742.
- [31] Ryan J., N. Klemm, H. D. Laneville, S. Koetschau, et al “Wild, Power Modulation of Sidney HVDC Scheme—Part I: RAS Control Concept, Realization and Field Tests, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 4, no. 4, 1989. pp. 2145–2152.
- [32] Kennedy J. and Eberhart R. “Particle swarm optimization,” **In Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.**, vol. 1, 1995. pp. 1942-1948.
- [33] MATLAB/SimPowerSystems Version 5.7 Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2014.

- [34] Chihchiang H., Jongrong L., and Chihming S. “Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking,” **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 45, no. 1, 1998. pp. 99-107.
- [35] Mohammed A. E., Bashar Z., and David J. A. “Assessment of the Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking Algorithm,” **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, vol. 4, no. 1, 2013. pp. 108-117.
- [36] Dezso S., Laszlo M., Tamas K., et al “On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems” **IEEE Journal of Photovoltaics**, vol. 3, no. 3, 2013. pp. 1070-1078.
- [37] World Energy Council, “**World Energy Resources Solar 2016**” [Online] Available <https://www.worldenergy.org/data/resources>.
- [38] Kenji K., “**2MW Solar Plant Comes With Storage Battery System**” [Online] Available http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20150530/420880
- [39] Wiebke K., “**Flagship Project in the Caribbean**” [Online] Available <http://www.smainverted.com/flagship-project-in-the-caribbean-pv-hybrid-system-on-the-island-of-st-eustatius/>
- [40] Andreas P. “A Comparative Overview of Large-scale Battery Systems for Electricity Storage,” **Renew. and Sustain. Energy Reviews**, vol. 27, 2013. pp. 778-788.
- [41] International Electrotechnical Commission, “**Electrical Energy Storage**” [Online] Available <http://www.iec.ch/whitepaper/energystorage/?ref=gspromo> . 2011
- [42] Ana S., Maria G., Matthias G. et al “**Overview of Storage Technologies**” [Online] Available <http://www.h2020-project-sensible.eu/downloads.aspx> . 2016
- [43] Kathie Z. “**Why Storage is a Huge Market Opportunity for Solar**” [Online] Available <https://www.solarpowerworldonline.com/2015/12/why-storage-is-a-huge-market-opportunity-for-solar>. 2015
- [44] Angus M., et al “**GLOBAL TRENDS IN RENEWABLE ENERGY INVESTMENT 2016**” [Online] Available <http://www.greengrowthknowledge.org/resource/global-trends-renewable-energy-investment-2017>.
- [45] Kwang Y. L. and Jong-bae P. “Application of Particle Swarm Optimization to Economic Dispatch Problem: Advantages and Disadvantages,” **IEEE PES Power Systems Conference and Exposition**, 2006. pp. 188-192.

- [46] Byung-Kwan K., Seung-Tak K., et al “A Study on Optimal Sizing of Superconducting Magnetic Energy Storage in Distribution Power System” **IEEE Trans. Appl. Supercond**, vol. 22, no. 3, 2012. pp.5701004
- [47] “Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,” **IEEE Standard 421.5-1992**, August, 1992.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และรางวัล

1. **S. Pothisoonthorn**, I. Ngamroo, and A. Kunakorn “Power Swing and Voltage Stabilization by PV Generator with Active and Reactive Power Controls”, IEEE Manchester PowerTech, pp.1-6, 18-22 June. 2017, Manchester, England.
2. **S. Pothisoonthorn** and I. Ngamroo, “Optimal Active and Reactive Power Controls of PV Generator installed with Internal Battery for Power Swing Stabilization”, IEEE-IEEE PES Thailand Symposium on Advanced Technology in Power System, pp.95-98, 2017.
3. **S. Pothisoonthorn** and I. Ngamroo, “Active Power Modulation Control of Hybrid PV Generator-battery for Power Swing Stabilization”, Proceedings of IEEE International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp.1-6, 28 June -1 July 2016, Chiang Mai, Thailand.
4. **สุกัญญา โพธิ์สุนทร อิศระชัย งามหรุ และ วรวรรธน์ นาคะวิโร**, “การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของฟาร์มโซลาร์ด้วยตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากฟาร์มกังหันลมในช่วงกลางคืน”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38 (EECON-38), หน้า.89-92, 18-20 พ.ย. 2558, พระนครศรีอยุธยา, ประเทศไทย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของฟาร์มโซลาร์ด้วยตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากฟาร์มกังหันลมในช่วงกลางคืน
Active and Reactive Power Control of Solar Farm with Optimal PI Controllers for Smoothing Power and Voltage Fluctuations due to Wind Farm during Nighttime

สุกัญญา โทธิสุนทร อิศระชัย จันทนู และ วรวรรณ นาคะวิโร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2329-8000 E-mail: eye_kmid@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนด้านออกของฟาร์มโซลาร์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่อยู่ภายใน เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากกังหันลมที่ติดตั้งที่บัสเดียวกันในช่วงกลางคืน ในที่นี้จะทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอสำหรับดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่ และดีซี-เอชคอนเวอร์เตอร์ (อินเวอร์เตอร์) ของฟาร์มโซลาร์ โดยใช้วิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค โดยนี้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทำการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าให้น้อยที่สุด ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมด้วยวิธีนี้มีเสนอสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไม่สม่ำเสมอของกังหันลม และรักษาแรงดันบัสที่เชื่อมต่อกับกริด ได้ดีกว่าการควบคุมพีไอที่ไม่เหมาะสม

คำสำคัญ: ฟาร์มโซลาร์ กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ การแกว่งของกำลังไฟฟ้า วิธีที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

Abstract

This paper proposes active and reactive power control of photovoltaic solar farm embedded with the internal battery for smoothing the power and voltage fluctuations due to the wind farm during the nighttime. The tuning technique based on particle swarm optimization of PI controllers which are installed with the DC-DC converter of battery, and the DC-AC converter (Inverter) of the solar farm. Simulation study using MATLAB/SimPowerSystems shows that the smoothing effect on the power fluctuation and the grid connected bus voltage of the PV with optimal PI controllers is superior to those of the PV equipped with non-optimal PI controllers.

Keywords: Solar farm, Squirrel cage induction generator wind turbine, Power fluctuation, Particle swarm optimization

1. บทนำ

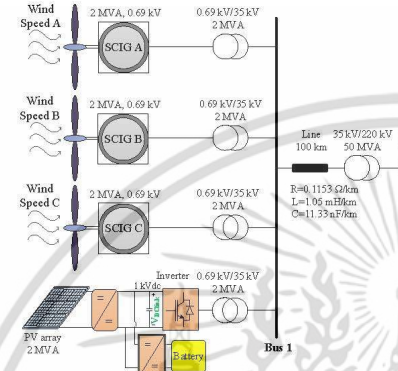
ในปัจจุบันพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์มีการใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลกโดยเฉพาะพลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนที่เติบโตเร็วที่สุด มีการติดตั้งแหล่งผลิตพลังงานลมเพิ่มขึ้นถึง 51 GW ในเวลาเพียง 1 ปี ทำให้กำลังการผลิตพลังงานลมทั่วโลกประมาณ 376 GW ในปี 2014 [1] โดยทั่วไป กังหันลมชนิดความเร็วคงที่ที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (Squirrel Cage Induction Generator, SCIG) มีการติดตั้งอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีเช่น ทนทาน โครงสร้างไม่ซับซ้อน และราคาถูก อย่างไรก็ตามกังหันลมชนิดนี้ยังมีข้อเสียคือ การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงที่สร้างจากกังหันลม และความต้องการกำลังไฟฟ้เสมือนจากกริดซึ่งทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อกับกริด [2]

ในบทความที่ [3] ได้มีการแก้ปัญหาการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อกับกริดของฟาร์มกังหันลมชนิดความเร็วคงที่และฟาร์มโซลาร์ที่ติดตั้งที่บัสเดียวกัน โดยการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของฟาร์มโซลาร์ด้วยตัวควบคุมพีไอของอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ บทความที่ [4] ได้ใช้ฟาร์มโซลาร์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลากลางคืน โดยใช้พลังงานสะสมภายในแบตเตอรี่ซึ่งเป็นพลังงานที่เหลือจากการจ่ายโหลดในเวลากลางวัน อย่างไรก็ตาม บทความ [3] และ [4] ไม่ได้พิจารณาปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของกังหันลม และไม่ได้นำเสนอวิธีการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสม

บทความนี้จึงนำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนด้านออกของฟาร์มโซลาร์ที่ติดตั้งแบตเตอรี่อยู่ภายในเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอในช่วงกลางคืนเนื่องจากฟาร์มกังหันลมชนิดความเร็วคงที่ซึ่งใช้ SCIG ที่ติดตั้งที่บัสเดียวกัน ในที่นี้จะหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอสำหรับอินเวอร์เตอร์ของฟาร์มโซลาร์และตัวควบคุมพีไอของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) ผลการจำลองคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ฟาร์มโซลาร์ที่ติดตั้งตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมสามารถแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่าฟาร์มโซลาร์ที่ติดตั้งตัวควบคุมพีไอที่ไม่เหมาะสม

2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ศึกษา

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ฟาร์มกังหันลมชนิด SCIG A B และ C แต่ละตัวมีกำลัง 2 MVA โดยมี ฟาร์มโซลาร์ขนาด 2 MVA ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ขนาด 500kWh อยู่ในทิศทางที่ตั้งกับทิศทางกันกับกังหันลมผ่านหม้อแปลงขนาด 2 MVA ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า 220kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 MVA และสายส่งยาว 100 km เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

ในช่วงกลางคืนฟาร์มกังหันลมทั้งสามยังคงผลิตกำลังไฟฟ้าจ่ายให้ระบบจึงทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ซึ่งเป็นบัสที่เชื่อมต่อกับกริดจึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบ ในการศึกษานี้จะนำเสนอกำหนดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของ ฟาร์มโซลาร์ที่มีแบตเตอรี่ภายในซึ่งเก็บสะสมพลังงานไว้เต็มจากการผลิตไฟฟ้าในช่วงกลางวัน เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัสในช่วงกลางคืน

3. การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของฟาร์มโซลาร์

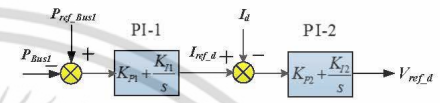
การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของฟาร์มโซลาร์เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อกับกริดทำให้ด้วยตัวควบคุมฟีดแบ็คอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งในฟาร์มโซลาร์ ส่วนการรักษาระดับแรงดันดีซีลิงค์ในวงจรของฟาร์มโซลาร์สามารถทำได้โดยตัวควบคุมฟีดแบ็คของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่

3.1 ตัวควบคุมฟีดแบ็คอินเวอร์เตอร์สำหรับฟาร์มโซลาร์

การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนโดยอินเวอร์เตอร์ของฟาร์มโซลาร์ แบ่งเป็น 2 กรณี คือการใช้กำลังไฟฟ้าจริงเพื่อลดการ

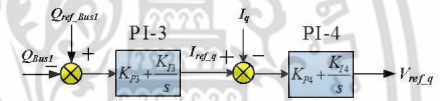
แกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และการใช้กำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจริงนี้

1. กรณีการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไม่สม่เสมอที่เกิดจากกังหันลมชนิด SCIG จะใช้ตัวควบคุมฟีดแบ็ค 2 ตัว ตามรูปที่ 2 ตัวควบคุมฟีดแบ็คที่หนึ่ง (PI-1) จะควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่เสมอโดยเปรียบเทียบสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1 (P_{bus1}) กับสัญญาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ($P_{ref, bus1}$) เอาท์พุทที่ได้คือสัญญาณอ้างอิงของกระแสไฟฟ้าแกนตรง ($I_{ref, d}$) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสแกนตรง (I_d) เอาท์พุทที่ได้จะนำไปเป็นอินพุตของตัวควบคุมฟีดแบ็คที่สอง (PI-2) จะได้เอาท์พุทเป็นสัญญาณอ้างอิงของแรงดันแกนตรง ($V_{ref, d}$)



รูปที่ 2 ตัวควบคุมฟีดแบ็คอินเวอร์เตอร์กำลังไฟฟ้าจริง

2. กรณีการแก้ปัญหาการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่เชื่อมต่อกับกริดจะใช้ตัวควบคุมฟีดแบ็ค 2 ตัว ตามรูปที่ 3 ตัวควบคุมฟีดแบ็คที่สาม (PI-3) จะเปรียบเทียบสัญญาณกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส 1 (Q_{bus1}) กับสัญญาณกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง ($Q_{ref, bus1}$) และเอาท์พุทที่ได้คือสัญญาณอ้างอิงของกระแสไฟฟ้าแกนขวาง ($I_{ref, q}$) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสแกนขวาง (I_q) เอาท์พุทที่ได้จะนำไปเป็นตัวควบคุมฟีดแบ็คที่สี่ (PI-4) จะได้เอาท์พุทเป็นสัญญาณอ้างอิงของแรงดันแกนขวาง ($V_{ref, q}$)



รูปที่ 3 ตัวควบคุมฟีดแบ็คอินเวอร์เตอร์แรงดันไฟฟ้าจริง

สัญญาณ $V_{ref, d}$ และ $V_{ref, q}$ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสอ้างอิง ($V_{ref, A, S, C}$) หลังจากนั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพันเล็ยเพื่อสร้างสัญญาณขับขาเกของอุปกรณ์สวิตชิ่ง IGBTs ของอินเวอร์เตอร์ของฟาร์มโซลาร์ เพื่อลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงและทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 มีค่าใกล้เคียง 1 p.u. มากที่สุด

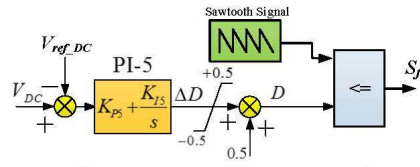
3.2 ตัวควบคุมฟีดแบ็คดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่

แบบเตอร์

รูปที่ 4 แสดงตัวควบคุมฟีดแบ็คของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่เพื่อควบคุมการจัดเก็บพลังงานในดีซีลิงค์และรักษาระดับแรงดันของดีซีลิงค์ไว้คงที่ ตัวควบคุม PI-5 ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีลิงค์ (V_{dc}) โดยเปรียบเทียบสัญญาณ V_{dc} กับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ดีซีลิงค์ ($V_{ref, dc}$) และเอาท์พุทที่ได้คือสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของดีวีดี (ΔD) เพื่อปรับค่าดีวีดี (D) สำหรับควบคุม PWM เพื่อสร้างสัญญาณขับขาเก (S_g) ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อตัวชี้วัดมีค่ามากกว่า 0.5 พลังงานที่เก็บในดีซีลิงคิงจะซาวง์ ไปยังแบตเตอรี่ ในทางตรงกันข้ามเมื่อตัวชี้วัดมีค่าน้อยกว่า 0.5 พลังงานจากแบตเตอรี่จะดีซาวง์ ไปยังดีซีลิงคิง



รูปที่ 4 ควบคุมพีไอของเฟิร์ม-สวิชคอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่

4. การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอ

ในที่นี้จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมของ PI-1, PI-2, PI-3, PI-4 และ PI-5 พร้อมกัน โดยมีจุดประสงค์ดังนี้

1. เพื่อให้ตัวควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอด้านออกของกังหันลมชนิด SCIG ที่บัส 1
2. เพื่อลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1

จากจุดประสงค์ต่างๆ สามารถนำมาตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมและเงื่อนไข โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ผลรวมของค่า Integral Absolute Error, IAE ของกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อกับกริดที่มีค่าน้อยที่สุดซึ่งสามารถแสดง ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } \int_{t_0}^{t_{end}} |\Delta P_{Bus1}| dt + \int_{t_0}^{t_{end}} |\Delta V_{Bus1}| dt \quad (1)$$

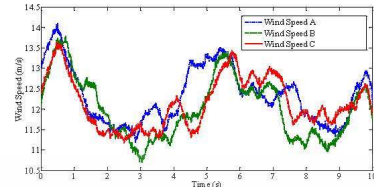
- Subject to
- $0.1 \leq K_{p1} \leq 20, 0.1 \leq K_{i1} \leq 20$
 - $0.1 \leq K_{p2} \leq 100, 0.1 \leq K_{i2} \leq 20$
 - $0.1 \leq K_{p3} \leq 10, 0.1 \leq K_{i3} \leq 20$
 - $0.1 \leq K_{p4} \leq 20, 0.1 \leq K_{i4} \leq 10$
 - $0.1 \leq K_{p5} \leq 5, 0.1 \leq K_{i5} \leq 20$

เมื่อ ΔP_{Bus1} คือค่าความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริงที่บัส 1 กับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ΔV_{Bus1} คือค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จริงที่บัส 1 กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง t_0 คือเวลาเริ่มต้นการจำลอง t_{end} คือเวลาสิ้นสุดการจำลอง K_{pi} และ K_{i} ($i=1, \dots, 5$) คืออัตราขยายตัวควบคุมพีไอ วิธีการแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสมของสมการ(1) ใช้ PSO(S) เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสม

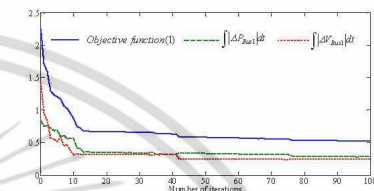
5. ผลการจำลองคอมพิวเตอร์

รูปที่ 5 แสดงความเร็วลม A, B และ C ของกังหันลมชนิด SCIG A, B และ C ตามลำดับ การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคจะใช้อ่อนภาคจำนวน 20 อนุภาค และใช้ 100 รอบการคำนวณ ซึ่งจะดำเนินการภายใต้รูปแบบความเร็วลมชุดนี้ เส้นโค้งการเข้าสู่หาค่าตอบที่เหมาะสมของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดง ได้ดังรูปที่ 6 ผลของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมพีไอแสดงดัง

ตารางที่ 1 โดยพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมได้มาจากการลองผิดลองถูก (Trial and Error)



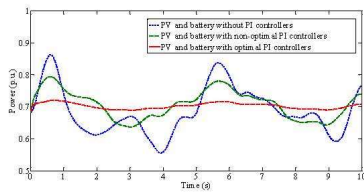
รูปที่ 5 ความเร็วลม



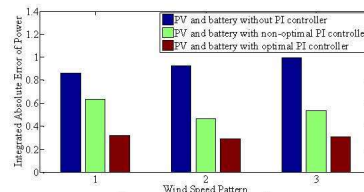
รูปที่ 6 เส้นโค้งการเข้าหาค่าตอบของกริดทำให้เหมาะสม ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ

พารามิเตอร์	Non-optimal PI Controllers	Optimal PI Controllers
K_{p1}, K_{i1}	10, 5	75.55, 12.78
K_{p2}, K_{i2}	5, 20	4.33, 20.15
K_{p3}, K_{i3}	1, 0.5	11.29, 4.19
K_{p4}, K_{i4}	3, 5	0.54, 17.86
K_{p5}, K_{i5}	10, 15	18.99, 19.57

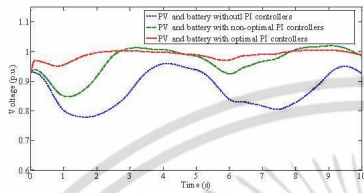
ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems ของกำลังไฟฟ้าจริง แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส 1 แสดง ได้ดังรูปที่ 7, 8, 9 ตามลำดับ ในกรณีพาร์มโซล่าและแบตเตอรี่ไม่ติดตั้งตัวควบคุมพีไอ (PV and battery without PI controllers) จะเกิดปัญหาการแกว่งของทั้งกำลังไฟฟ้าจริงกำลังไฟฟ้าเสมือน และแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 กรณีพาร์มโซล่าและแบตเตอรี่ติดตั้งตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสม (PV and battery with optimal PI controllers) จะให้ผลลัพธ์การควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอที่ไม่เหมาะสม (PV and battery with non-optimal PI controllers) อนึ่งกำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าพาร์มกังหันลมชนิด SCIG รับกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้ามา รูปที่ 10 แสดงกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนด้านออกของพาร์มโซล่า กำลังไฟฟ้าจริงที่มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ในพาร์มโซล่ารับกำลังไฟฟ้าเข้ามาจากระบบ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าเสมือนที่เป็นบวกแสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ในพาร์มโซล่าจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนออกไปให้ระบบ ผลการจำลองนี้แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนที่ชัดเจนจากพาร์มโซล่าจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น



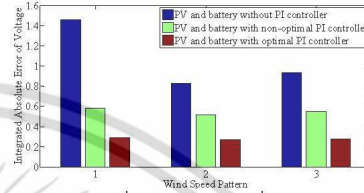
รูปที่ 7 กำลังไฟจริงที่บัส 1



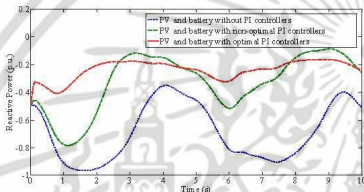
รูปที่ 11 IAE ของกำลังไฟจริงที่บัส 1



รูปที่ 8 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1



รูปที่ 12 IAE ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1



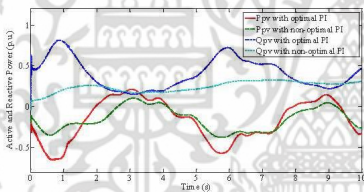
รูปที่ 9 กำลังไฟที่ตามีที่บัส 1

6. สรุป

บทความนี้ประยุกต์ใช้การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนแนวใหม่ของฟาร์มโซล่าที่ติดตั้งแบตเตอรี่ภายในเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อกัน เนื่องจากฟาร์มกังหันลมชนิดความเร็วคงที่ ในการศึกษานี้ ได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่โอที่เหมาะสมของวิธีพีซีคอนเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่และอินเวอร์เตอร์ของฟาร์มโซล่าด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค ผลการศึกษายืนยันให้เห็นว่าตัวควบคุมที่โอที่เหมาะสมสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงและรักษาแรงดันที่บัสได้ดีกว่าตัวควบคุมที่โอที่มีพารามิเตอร์ไม่เหมาะสม โดยไม่ขึ้นกับความเร็วลมรูปแบบใดๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Global status of wind power in 2014, Global Wind Report Annual Market Update 2014.
- [2] M.Q. Duong, "Comparison of power quality in different grid-integrated wind turbines," IEEE Int. Conf., pp.448-452, 2014.
- [3] R.K. Varma, et al., "Nighttime application of PV solar farm as STATCOM to regulate grid voltage," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 24, no.4, pp.983-985, 2009.
- [4] V. Khadkikar, et al., "Grid voltage regulation utilizing storage batteries in PV solar," IEEE Power & Energy Conf., pp.1-6, 2009.
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, Vol.1, pp.1942-1948, 1995.



รูปที่ 10 กำลังไฟที่จริงและกำลังไฟที่ตามีที่บัส 1 ของฟาร์มโซล่า

เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบตามวิธีที่นำเสนอ จึงใช้ตัวควบคุมที่โอที่เหมาะสมเดิมไปทดสอบกับความเร็วลม A, B และ C อีก 2 กลุ่มใหม่ที่ไม่ได้นำมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งรูปที่ 11 และ 12 แสดงค่า IAE ของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 1 และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ตามลำดับ ภายใต้ความเร็วลมทั้ง 3 กลุ่ม โดยรูปแบบความเร็วลมกลุ่มที่ 1 คือความเร็วลม A, B และ C ที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จะเห็นว่า IAE ของกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 ในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่โอที่เหมาะสมจะน้อยกว่าที่สุด ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่โอที่เหมาะสมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความเร็วลมทั้งสามรูปแบบ

Final Program

ECTI-CON 2016

ChiangMai Thailand, June 28 - 1 July , 2016

13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics
Computer, Telecommunications and Information Technology



Illustrated by Assoc.Prof. Wichit Chomtaveewiroot

**Rajamangala University of Technology Lanna
ChiangMai, Thailand**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Active Power Modulation Control of Hybrid PV Generator-Battery for Power Swing Stabilization

Sukanya Pothisoonthorn

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
Eye_kmitl@hotmail.com

Issarachai Ngamroo

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
knissara@kmitl.ac.th

Abstract—This paper proposes the active power modulation control scheme of the hybrid photovoltaic (PV) generator and battery for power swing stabilization. The battery which is connected to the DC link of the PV generator, is used to smooth the output power fluctuation of the PV generator during normal operation. During faults, the stored energy of battery can be used for the active power output modulation control of the PV generator to stabilize the power swing. By equipping the power oscillation damper (POD) at the active power controller of the PV inverter, the active power output can be modulated to damp the power swing. The POD structure is a practical second-order lead/lag compensator with single input signal. Simulation study confirms the stabilizing effect of the PV with POD.

Keywords—Power system stabilization; photovoltaic generator; power oscillation damper; power modulation control

I. INTRODUCTION

At present, the proliferation of solar photovoltaic (PV) generators in power systems considerably increases. Until 2014, the solar PV global capacity is about 177 GW [1]. The increasing penetration of PV system installed with suitable location improves oscillatory stability of power system [2]. Nevertheless, the effect of PV penetration on system oscillation stability depends on changing of system operating conditions, such as balancing of power flow in the power system by variation of PV generations and power output of synchronous generator (SG) [3]. Moreover, the solar PV power output fluctuation may affect the power system stability and quality. To smooth the PV power output, the battery which is connected to the DC link of the PV inverter can be used [4]. Additionally, the hybrid PV and battery is also applied to frequency control of multi-area interconnected power systems [5] and to improve the power quality in [6]. On the other hand, when the disturbances such as short circuits etc. occur in the system, the severe transient power swing adversely impacts the system stability. To suppress the power swing, Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) devices and power system stabilizer (PSS) are employed effectively [7]-[8]. However, there are no research works which apply the hybrid PV and battery to stabilize the power swing.

This paper presents the active power modulation control of

This research work was supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund Under Grant KREF055706.

the hybrid PV and battery to stabilize the power swing. At normal operating condition, the stored energy in the battery is used to compensate the PV power output under normal operating condition. In addition, the stored energy can be quickly controlled to serve the PV for stabilizing power swing during faults. The power oscillation damper (POD) is integrated into the active power controller of the PV inverter so that the active power output of the PV generator can be modulated to stabilize the power swing. The stabilizing effect of the PV with POD is evaluated by simulation study.

II. STUDY SYSTEM AND MODELING

A. Study System

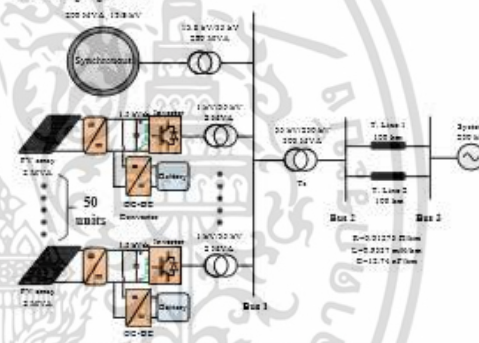


Fig. 1. Grid-connected hybrid PV generator-battery system.

Fig. 1 shows the grid-connected hybrid PV generator and battery energy storage system. Fifty units of PV generator with rated power 2 MVA and a synchronous generator (SG) with rated power 200 MVA are connected to the same bus 1 and to the 230 kV system via a step up transformer T_1 and parallel transmission lines. The rated power capacity of battery is 0.3 MVA. Under normal operation, the battery is used to alleviate the output power fluctuation of the PV generators. During faults, the stored energy in the battery is rapidly controlled to serve the PV inverter to suppress the power swing of the SG. The system parameters are given in Appendix.

B. Photovoltaic Array

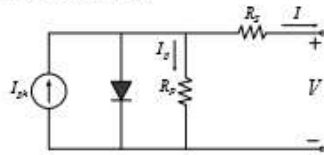


Fig. 2. The equivalent circuit of a PV cell.

An ideal PV cell can be modeled by a current source in parallel with a diode. In practically, a parallel resistance and a series resistance are added to the model [9] as depicted in Fig. 2. The PV cell current of this circuit is following by

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left\{ \exp \left[\frac{q}{nKT} (V + IR_s) \right] - 1 \right\} - I_p \quad (1)$$

Where I and V are current and voltage outputs of PV cell. I_{ph} is a photo-generated current in the cell (A), I_{sat} is a diode reverse saturation current (A), q is an elementary charge (C), n is the diode ideality factor, K is the Boltzmann's constant, T is a temperature (K) and R_s is a series resistance of PV cell (Ω).

By Ohm's law, the current flow in the parallel resistance is expressed by

$$I_p = \frac{V_p}{R_p} \quad (2)$$

Where, R_p is a parallel resistance (Ω), V_p is Voltage of parallel resistance (V).

For a photovoltaic module consists of N_s cells in series. Assuming that all cells are identical under the same irradiance and temperature. Therefore, the current and voltage of the PV module is expressed by

$$I_{module} = I_{cell} \quad (3)$$

$$V_{module} = N_s \times V_{cell} \quad (4)$$

C. Control System of PV and battery

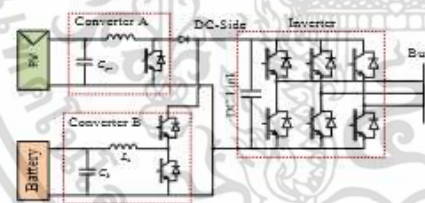


Fig. 3. The Model of hybrid PV generator and battery energy storage system

The interfaced circuit of the hybrid PV generator and battery energy storage system are represented in Fig. 3. The system consists of a PV array connected with converter A as a boost converter and the battery connected between the DC-side of PV generator via a bidirectional DC-to-DC converter or converter B. The energy of DC-side is converted to AC-side via an inverter and inject to Bus 1.

Fig. 4 depicts the control system of PV generator and battery. The PV generator consists of DC-to-AC converter, DC link capacitor, DC-to-DC converter, and PV array. Three phase voltages (V_A, V_B, V_C) are measured and used as the input signal of the phase lock loop (PLL) to calculate the angle of transformation (θ). As a result, the phase voltage and current (I_A, I_B, I_C) can be transformed to the voltage and current in the direct-axis and the quadrature-axis, and vice versa.

The PV inverter consists of two loop controls, i.e. active and reactive power control loops. The active power control loop is used to keep the active power at bus 1 constant. The active power control loop is composed of two proportional integral (PI) controllers (PI-1 and PI-2). The input signal of PI-1 is the difference between the reference power ($P_{ref, Bus1}$), the POD signal (V_{POD}), and the actual active power at bus 1 (P_{Bus1}). Note that at normal operating condition or without faults, V_{POD} is zero. The output signal of PI-1 is the reference current in the direct-axis ($I_{ref,d}$) which is used to compare with the actual current in the direct-axis (I_d). The resulted signal is used as the input of the PI-2 to generate the reference voltage in the direct-axis ($V_{ref,d}$).

The reactive power control loop is composed of two proportional integral (PI) controllers (PI-3 and PI-4). This control loop is used to maintain the reactive power at bus 1 constant. The input signal of PI-3 is the difference between the reference reactive power ($Q_{ref, Bus1}$), and the actual reactive power at bus 1 (Q_{Bus1}). The output signal of PI-3 is the reference current in the quadrature-axis ($I_{ref,q}$) which is used to compare with the actual current in the quadrature-axis (I_q). The resulted signal is used as the input of the PI-4 to generate the reference voltage in the quadrature-axis ($V_{ref,q}$). Subsequently, $V_{ref,d}$ and $V_{ref,q}$ are transformed to the reference phase voltages ($V_{Aref}, V_{Bref}, V_{Cref}$) and used for the pulse with modulation (PWM) of the inverter operation.

The battery is connected to the DC link by the DC-to-DC converter. The fifth PI controller (PI-5) is used to control the DC-to-DC converter so that the DC link voltage can be kept constant. In other words, the stored energy in the battery can be exchanged with the system. The input signal of the PI-5 is the difference between the dc link voltage (V_{DC}) and the reference dc link voltage ($V_{ref,DC}$). The output signal of PI-5 is the duty cycle deviation (ΔD). By adding ΔD by 0.5, the duty cycle D can be obtained. When D is lower than 0.5, the stored energy in the battery is discharged to the system. When D is greater than 0.5, the energy from the system is charged to the battery. By comparing D with the sawtooth signal, the switching signal (S_p) of the DC-to-DC converter can be generated.

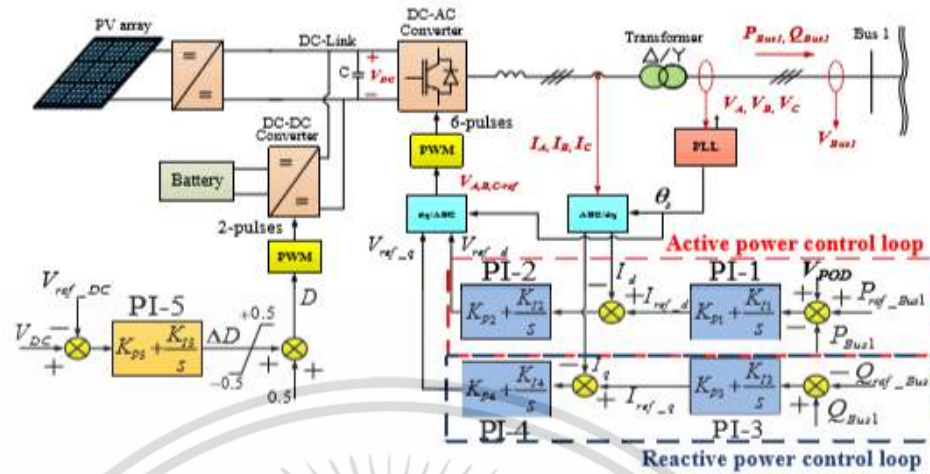


Fig. 4. Control system of hybrid PV and battery.

D. POD Model

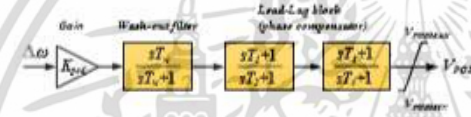


Fig. 5. 2nd-order lead/lag compensator-based POD model.

Fig. 5 shows the POD model which is a 2nd-order lead/lag compensator where K_{POD} is the gain, T_w is the wash out time constant, and T_1, T_2, T_3, T_4 are time constants. The input signal of the POD is the speed deviation ($\Delta\omega$) of the synchronous generator. The output signal of the POD is restricted by the limiter where V_{PODmin} and V_{PODmax} are minimum and maximum limits. At normal operation, the POD does not operate because the generator speed is at synchronous speed which causes $\Delta\omega$ to be zero. During faults, the rotor swing causes the speed deviation. With non-zero $\Delta\omega$, the POD operates and tries to eliminate $\Delta\omega$.

III. STUDY RESULTS

In this study, control parameters of PI controllers and POD are appropriately set as given in Tables II and III, respectively. MATLAB/SimPower is used for time simulation study [5]. Fig. 6 shows the solar irradiance of the PV generators used in this study. Simulation results of power outputs of PV at DC side, AC side, and battery are depicted in Fig. 7. It can be observed that the PV power at the DC side varies in the same fashion as the solar irradiance. On the other hand, the PV power at the AC side is completely smoothed by the power compensation of

battery. Note that the positive power means that the energy is discharged from the battery while the negative power means that the energy is charged to the battery. Fig. 8 shows the dc link voltage of the PV generator. Clearly, the dc link voltage is kept constant.

Next, it is assumed that the temporary three phase fault occurs at the high voltage bus of the transformer T_s at $t = 1$ s for 100 ms. Figs. 9 and 10 show the active power flow at bus 1 and the active power output of the synchronous generator. In case of the PV without POD, the power swing is very severe. On the contrary, the PV with POD is able to damp out the power swing effectively. Fig. 11 depicts the active power output of the PV generator. In order to damp the power swing, the power output of the PV with POD highly changes. Fig. 12 shows the DC link voltage of the PV inverter. The DC link voltages in case of PV with and without POD slightly change in the acceptable range during fault. Fig. 13 shows the voltage oscillation at bus 1. The voltage oscillation can be eliminated by the PV with POD. Fig. 14 depicts the POD signal. Obviously, the POD operates when the fault occurs. Fig. 15 shows the power outputs of the PV at the DC side, the AC side, and battery. The PV power at the DC side varies in the same way as the solar irradiance. On the other hand, the battery power compensates the PV power at the DC side so that the PV power at the AC side can be modulated to stabilize the power swing.

Finally, it is assumed that the three phase fault occurs at the midpoint of one of two parallel lines at $t = 1$ s for 150 ms. The fault is cleared by opening the faulted line without reclosing. Figs. 16 and 17 depict the active power flow at bus 1 and the active power output of the synchronous generator. In case of the PV without POD, the power oscillation cannot be damped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

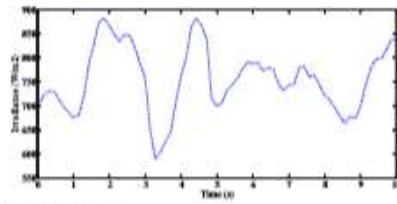


Fig. 6. Solar irradiance

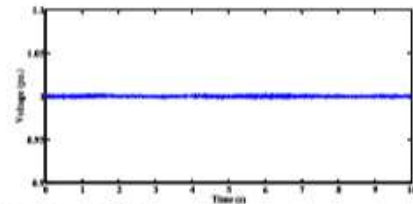


Fig. 8. Voltage at DC link

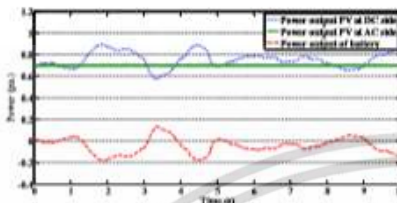


Fig. 7. Power outputs of PV at DC, AC sides, and battery.

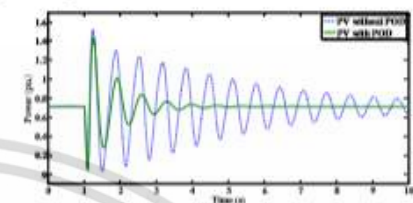


Fig. 9. Active Power at Bus 1.

out and results in the unstable system. On the other hand, the PV with POD is capable of suppressing the power oscillation effectively. Fig. 18 shows the sudden change in the active power output of the PV generator. The PV generator uses the energy served by the battery to get rid of the power oscillation. Fig. 19 shows the DC link voltage of the PV inverter. The DC link voltages in case of PV with and without POD highly vary in the acceptable range after the fault occurrence. Fig. 20 shows the voltage oscillation at bus 1. Without POD, the voltage is unstable. The PV with POD is able to get rid of the voltage oscillation completely. Fig. 21 depicts the POD signal. Fig. 22 shows the power outputs of the PV at the DC side, the AC side, and battery. The battery power can compensate the PV power at the DC side so that the PV power at the AC side can be controlled to eliminate the power oscillation.

TABLE I. PARAMETERS OF PI CONTROLLERS

PI Parameters	PI controllers
K_{P1}, K_{I1}	12.2, 28.3
K_{P2}, K_{I2}	7.2, 13.2
K_{P3}, K_{I3}	3.6, 13.4
K_{P4}, K_{I4}	2.8, 11.1
K_{P5}, K_{I5}	1.5, 50.0

TABLE II. PARAMETERS OF POD

POD Parameters	PI controllers
K_{pod}	3
T_w	10
T_1, T_2	0.1, 0.5
T_3, T_4	15, 0.1
V_{max1}, V_{max2}	-1, 1

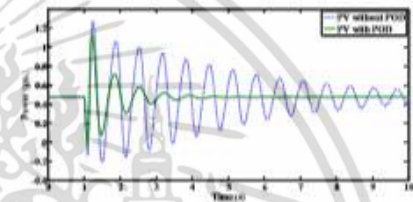


Fig. 10. Active Power of Synchronous Generator.

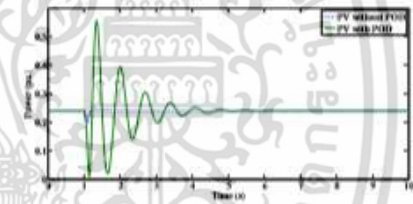


Fig. 11. Active Power of PV generator.

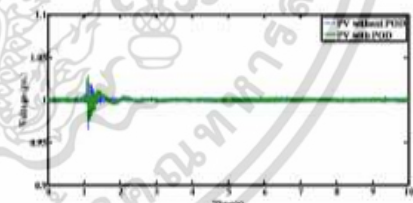


Fig. 12. Voltage at DC link

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

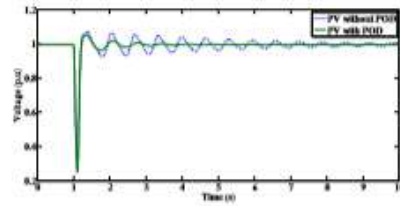


Fig. 13. Voltage at Bus 1.

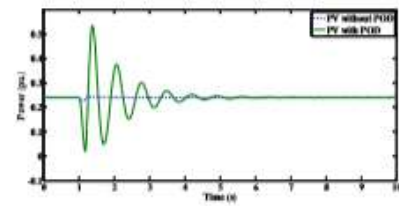


Fig. 18. Active Power of PV generator.

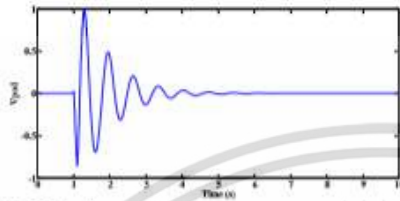


Fig. 14. POD signal

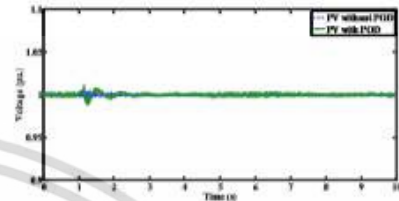


Fig. 19. Voltage at DC link.

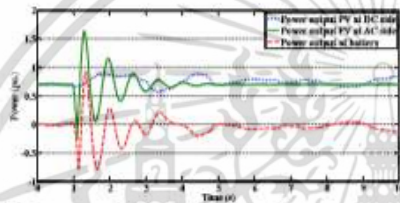


Fig. 15. Power outputs of PV at DC, AC sides, and battery.

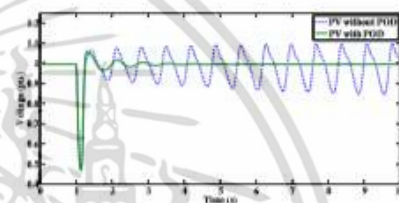


Fig. 20. Voltage at Bus 1.

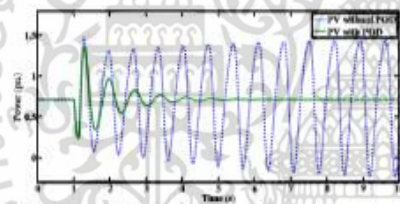


Fig. 16. Active Power at Bus 1.

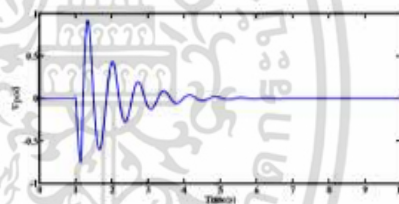


Fig. 21. POD signal

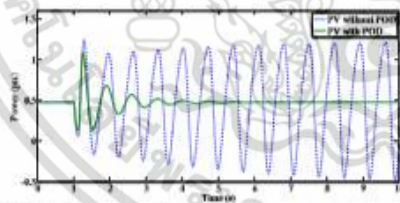


Fig. 17. Active Power of Synchronous Generator.

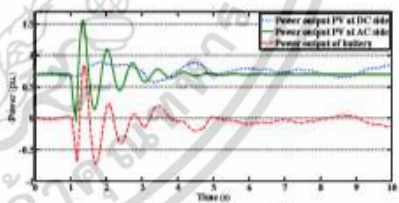


Fig. 22. Power outputs of PV at DC, AC sides, and battery.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV. CONCLUSION

In this paper, the active power modulation control of the hybrid PV and battery is proposed to stabilize power swing under the occurrence of system faults. The study results can be summarized as follows.

- 1) The stored energy in the battery can be used not only during normal operation for power smoothing, but also during faults for power swing stabilization.
- 2) The proposed control system of the hybrid PV generator and battery consists of four PI controller for the PV inverter and one PI controller for the DC-to-DC chopper of the battery.
- 3) The POD is integrated into the active power controller of the PV generator so that the active power output of the PV can be modulated to stabilize the power swing during fault.
- 4) Simulation study confirms the stabilizing effect of the PV with POD.

In the future study, the reactive power modulation control and the optimization of PI and POD parameters will be carried out.

V. REFERENCES

- [1] Renewables 2015 Global Status Report, 2015.
- [2] Rakibuzzaman Shah and all, "Impact of Large-Scale PV Penetration on Power System Oscillatory Stability," Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, pp. 1-7.
- [3] Du, W., H. Wang, and R. Dumt. "Power System Small-Signal as Affected by Large-Scale PV Penetration," International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009 IEEE, pp. 1-6.
- [4] M Datta, T. Senjyu, A. Youa, and T. Funabashi, "A fuzzy-based method for leveling output power fluctuations of photovoltaic-diesel hybrid power system," Renewable Energy, vol. 36, pp. 1695-1703, 2011.
- [5] N. Sangs-wong, and I. Ngamroo, "Intelligent photovoltaic farms for robust frequency stabilization in multi-area interconnected power system based on PSO-based optimal Sugeno fuzzy logic control," Renewable Energy, vol. 74, pp. 555-567, 2015.
- [6] T. Ahmad, "A hybrid grid connected PV battery energy storage system with power quality improvement," Solar Energy, vol. 125, pp. 180-191, 2016.
- [7] Sreevidya T.R., Dawnee S. "Optimal Interaction of PSS and SSSC in a Power System Network," International Conference on Emerging Trends in Science, Engineering and Technology, 2012 IEEE, pp. 479-484.
- [8] Tran Thi Ngoc and Le Ngoc Giang, "Assessment of the Effectiveness of Two Coordinate System: SVC-PSS and STATCOM-PSS for Improving Transient Stability of Power System," International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 414-418, August 2013.
- [9] K. Ding, X. Biao, H. Liu and T. Peng, "A MATLAB-Simulink-Based PV Module Model and Its Application Under Conditions of Nonuniform Irradiance," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 27, no. 4, pp. 864-872, September 2012.
- [10] MATLAB/SimPowerSystems Version 5.8, 2013a, The MathWorks, Inc.

APPENDIX

SYSTEM PARAMETERS

Parameters of Synchronous Generator	
Nominal power (MVA)	200
Line-to-Line voltage (V)	13,800
Frequency (Hz)	50
Number of pole pairs	2
Reactances, x_d, x_d', x_d'' (pu)	1.305, 0.296, 0.252
Reactances, x_q, x_q', x_q'' (pu)	0.474, 0.243, 0.18
Time constants, T_d, T_d', T_d'' (s)	1.01, 0.053, 0.1
Stator resistance, R_s (pu)	0.002
Inertia coefficient, H (s)	3.2
Parameters of PV Module	
Module type	SPR-305-WHT
Rated output power (W)	305
Open circuit voltage, V_{oc} (V)	64.2 V
Short circuit current, I_{sc} (A)	5.96 A
Number of cells in series, N_c	96
Parameters of Battery Pack	
Battery type	Lead-acid
Nominal Voltage (V)	1,000
Rated Capacity (Ah)	300
Energy capacity (kWh)	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ECTI-CON 2016

IEEE
THAILAND SECTION

ECTI
Association

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LANNA, CHIANG MAI, THAILAND.

Student Grant Award

Presented to

Sukanya Pothisoonthorn

Presented in

2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics,
Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2016).

K. Chaitanu

(Dr. Kitchar Chaitanu)
General co-chair
Dean Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna

P. Prayoot

(Professor Dr. Prayoot Akkarasakthalin)
General chair
President, ECTI Association

N. Songthanapitak

(Assoc. Prof. Dr. Nanyoot Songthanapitak)
President
Rajamangala University of Technology Lanna

ECTI-CON 2016 June 28th - July 1st at Chiang Mai, THAILAND.

Paper ID: 1300

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	สุกัญญา โพธิสุนทร
วัน เดือน ปีเกิด	30 พฤศจิกายน 2534 ที่ จังหวัดภูเก็ต
ที่อยู่	148 ถ.พระบารมี ต.ป่าตอง อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต 83150
ประวัติการศึกษา	2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
รางวัล	2557 ได้รับทุนการศึกษาจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2559 ได้รางวัลทุนการศึกษา ในงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าระดับ นานาชาติ (ECTI-CON 2016) ในหัวข้อเรื่อง “Active Power Modulation Control of Hybrid PV Generator-Battery for Power Swing Stabilization”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้