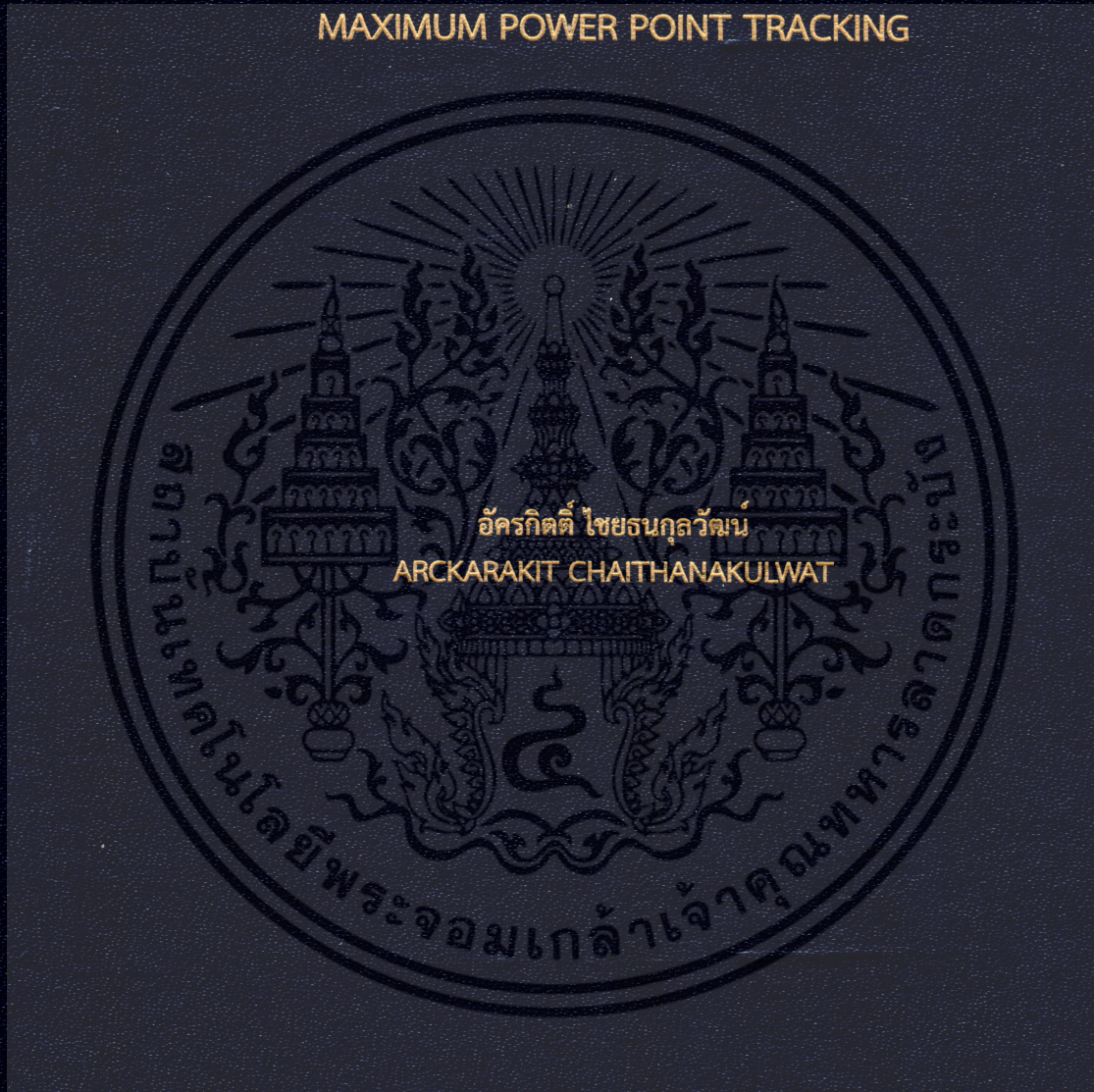


ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส
ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

SINGLE-PHASE GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM
WITH ACTIVE POWER FILTER FUNCTIONALITY AND
MAXIMUM POWER POINT TRACKING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

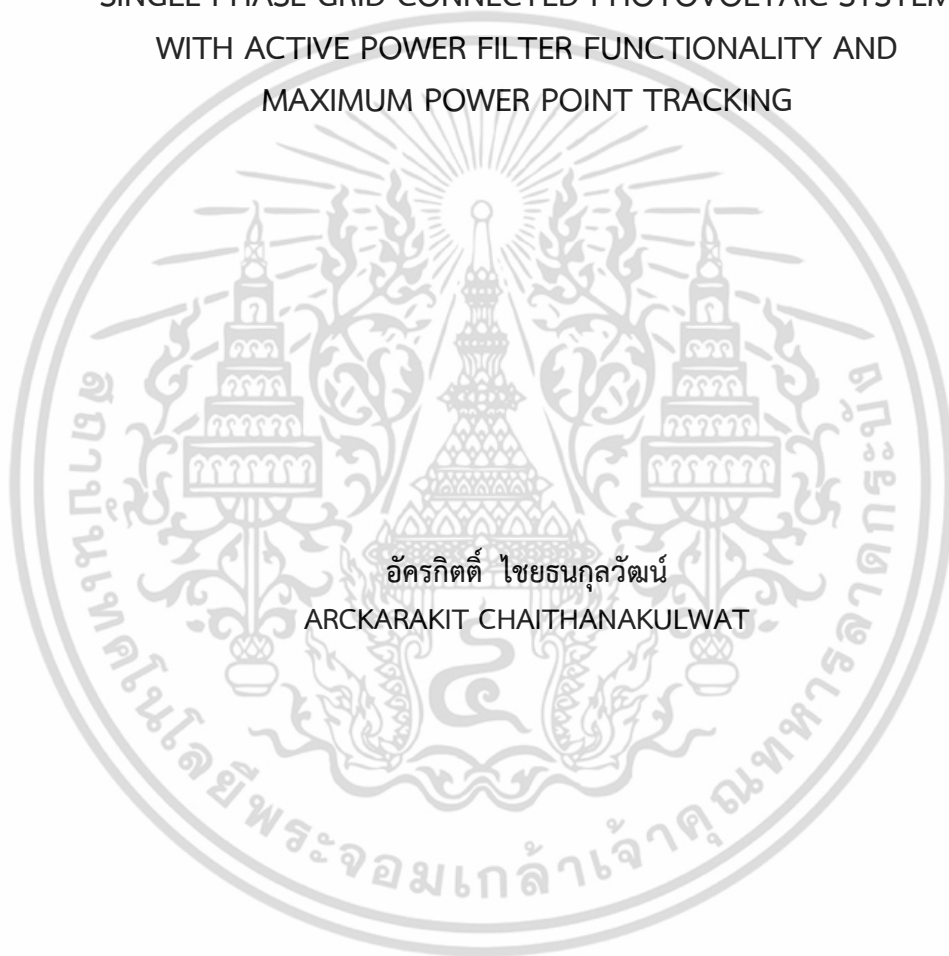
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-D-018-183

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส
ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

SINGLE-PHASE GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM
WITH ACTIVE POWER FILTER FUNCTIONALITY AND
MAXIMUM POWER POINT TRACKING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560
KMITL-2017-EN-D-018-183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SINGLE-PHASE GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM
WITH ACTIVE POWER FILTER FUNCTIONALITY AND
MAXIMUM POWER POINT TRACKING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-EN-D-018-183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017






FACULTY OF ENGINEERING

KING MON GKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟสที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงาน และการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด
Thesis Title Single-phase Grid-connected Photovoltaic System with Active Power Filter Functionality and Maximum Power Point Tracking
นักศึกษา นายอัครกิตต์ ไชยชนกุลวัฒน์
รหัสประจำตัว 53610124
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-D-018-183

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.เวคิน	ปิยรัตน์	
รศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสุวรรณกุล	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	

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

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด
นักศึกษา	นายอัครกิตติ์ ไชยธนกุลวัฒน์
รหัสประจำตัว	53610124
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟสโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังหนึ่งขั้นที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบนี้สามารถทำหน้าที่ได้หลายอย่างกล่าวคือถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากโหลดไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ขณะเดียวกันทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังไวงานเพื่อชดเชยกำลังเสมือนและลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่ง สามารถควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าและติดตามจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 ราคาต่ำเพื่อควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสซึ่งให้ข้อดีในเรื่องควบคุมง่ายและตอบสนองเร็ว การซิงโครไนซ์อย่างง่ายได้ใช้หลักการตรวจจับผ่านศูนย์แทนการใช้เฟสล็อกคัลคูล นอกจากนี้มีการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/SIMULINK เพื่อยืนยันความถูกต้อง ระบบที่ได้สร้างขึ้นได้ถูกทดสอบภายใต้สภาวะต่างๆ เช่นการส่งถ่ายกำลังที่ค่าต่างๆตามคำสั่งกระแสตลอดจนการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ความเข้มแสงต่างกัน การเปลี่ยนโหลดไม่เชิงเส้นอย่างฉับพลัน การจ่ายกำลังเสมือนให้กับโครงข่ายไฟฟ้า เป็นต้น ผลการจำลองและการทดสอบให้ผลสอดคล้องกันแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของเทคนิคที่นำเสนออัลกอริทึมและวงจรที่ได้ถูกออกแบบสร้างขึ้น

Thesis	Single-phase Grid-connected Photovoltaic System With Active Power Filter Functionality and Maximum power point tracking
Student	Mr.Arckarakit Chaithanakulwat
Student ID.	53610124
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares

ABSTRACT

Abstract – This thesis proposes the implementation of a single-phase grid-connected photovoltaic (PV) system using a single stage converter with active power filter functionality (APFF) and maximum power point tracking of photovoltaic modules. The proposed system offers multi-functionality namely excessive power transfer from the nonlinear load to the grid, simultaneously acting as an active power filter to compensate for reactive power and to mitigate harmonics of the grid current resulting in nearly unity grid power factor, capability of reactive power control and maximum power point tracking of the photovoltaic modules. The system is controlled by a low cost TMS320F28335 microcontroller in order to control the inverter current using a hysteresis current control technique giving good advantages in terms of simplicity and fast response. Simple synchronization with the grid employs a zero crossing technique instead of phase locked loop (PLL). In addition, simulation using MATLAB/Simulink is given in order to verify the correctness. The implemented system is tested under various conditions such as power transfer with varying current command throughout maximum power point transfer at different insolation, a step change in nonlinear load level, and reactive power control supplied to the grid, etc. Simulation and experimental results are in accordance showing the correctness of the proposed technique, algorithm and the designed circuit.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำแนะนำช่วยเหลือด้านวิชาการ และช่วยแก้ไขปัญหามาตลอดจนเพิ่มพูนประสบการณ์ต่าง ๆ ที่ดีแก่ข้าพเจ้า และใคร่ขอขอบคุณ คุณวัชรินทร์ พรหมคุณ ห้องปฏิบัติการ PMC 405 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสิทธิใช้พื้นที่ห้องปฏิบัติการและวงจรควบคุม สำหรับทำงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณศักดาวุฒิ บุญคุ้ม โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย และน้อง ๆ PMC ทุกคนที่ให้ความสนใจและการสนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา-มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพสูงสุด ตลอดจนครู-อาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ให้มีสติปัญญาและความสามารถในการดำเนินชีวิตมาจวบจนปัจจุบัน

อัครกิตติ ไชยธนกุลวัฒน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 ทฤษฎีและหลักการของโฟโตโวลตาอิก.....	9
2.2 คุณลักษณะของโฟโตโวลตาอิก.....	10
2.2.1 ผลกระทบจากระดับความเข้มแสง.....	11
2.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ.....	12
2.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.2.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	13
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ.....	13
2.3.1 ผลกระทบเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลง.....	14
2.3.2 ผลกระทบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง.....	14
2.3.3 ผลกระทบเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง.....	14
2.4 ทฤษฎีและหลักการของอินเวอร์เตอร์.....	15
2.5 อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันหนึ่งเฟส.....	17
2.5.1 อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันรูปครึ่งคลื่น.....	17
2.5.2 อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันรูปเต็มคลื่น.....	24
2.6 การมอดูเลตความกว้างของพัลส์ชนิดควบคุมกระแสแถบฮิสเตอร์รีซิสคิงที่.....	28
2.7 ทฤษฎีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างโครงข่ายไฟฟ้าและวงจรแปลงผันกำลัง.....	30
2.8 โหลดไม่เชิงเส้นหนึ่งเฟส.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9 วงจรกรองไวงาน.....	38
2.10 อินเวอร์เตอร์สำหรับเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้า.....	41
2.11 หลักการเฟสล็อกคลุป.....	43
บทที่ 3 หลักการควบคุมของระบบที่นำเสนอ.....	45
3.1 หลักการหากระแสอ้างอิง.....	46
3.2 การควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส.....	50
3.3 การซิงโครไนซ์แบบง่าย.....	56
3.4 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้อัลกอริทึม Perturb and observe.....	57
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง.....	59
4.1 การออกแบบระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	59
4.2 การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์.....	60
4.2.1 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส.....	60
4.2.2 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน.....	61
4.2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP TMS320F28335.....	63
4.2.4 วงจรประวิงเวลา.....	66
4.2.5 ตัวเก็บประจุแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	67
4.2.6 ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส.....	67
4.2.7 วงจรโอจีบีทีโมดูล.....	68
4.2.8 วงจรขับขาเกต.....	69
4.3 เทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	70
บทที่ 5 การจำลองการทำงานของระบบ.....	72
5.1 ส่วนการจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ที่ไม่มีติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	73
5.1.1 จำลองการทำงานของระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink.....	74
5.1.2 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อร่วม.....	77
5.1.3 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วม.....	80
5.1.4 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยชดเชยกระแสฮาร์มอนิก 81	
5.1.5 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยชดเชยกระแสฮาร์มอนิก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ในกรณีควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์.....	84
5.1.6 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแส ฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลด.....	86
5.1.7 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแส ฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่าย เป็นมุม 30 องศา.....	89
5.2 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่าย ไฟฟ้าที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	91
5.2.1 การจำลองในสภาวะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	94
5.2.2 การจำลองในสภาวะที่มีการติดตามและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลง ตามธรรมชาติ.....	96
บทที่ 6 การทดสอบการทำงานของระบบ.....	98
6.1 ส่วนการทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ที่ไม่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่.....	100
6.1.1 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อร่วม.....	100
6.1.2 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วม.....	106
6.1.3 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก..	107
6.1.4 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแส ฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแส.....	112
6.1.5 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแส ฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลด.....	115
6.1.6 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแส โครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.1.7 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับ โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแส ฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่าย เป็นมุม 30 องศา.....	118
6.2 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้า สูงสุดเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า.....	120
6.2.1 การทดสอบในสภาวะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	121
6.2.2 การทดสอบในสภาวะที่มีการติดตามและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลง ตามธรรมชาติ.....	124
6.2.3 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลดเชิงเส้น ต่อร่วม.....	126
6.2.4 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วม และมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก.....	128
6.2.5 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วม โดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแส.....	130
6.2.6 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วม โดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลด.....	132
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	134
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	134
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	135
บรรณานุกรม.....	136
ภาคผนวก.....	140
ภาคผนวก ก. การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 6 แผง ขนาด 1,600 W 240 V ติดตั้งบนชั้นดาดฟ้าของอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการทดสอบจ่ายโหลดขนาด 100 W – 2000 W หลอด ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น.....	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข. ชุดการทดสอบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	147
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	152
ประวัติผู้เขียน.....	168



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่า Ideal factor.....	11
2.2	สถานการณ์ทำงานของสวิตช์แบบไบโพลาร์สวิตช์.....	18
2.3	สถานการณ์ทำงานของสวิตช์แบบไบโพลาร์สวิตช์แบบจ่ายแรงดันรูปเต็มคลื่น.....	24
4.1	ข้อมูลลักษณะจำเพาะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	59
4.2	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำกรองกระแส.....	67
4.3	สถานะลอคจิกและมีสัญญาณเอาท์พุท.....	70
5.1	พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	73
6.1	ผลการทดสอบประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์.....	105
6.2	ผลการทดสอบในสภาวะจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก.....	111
6.3	ผลการควบคุมกระแสกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak โดยการปรับปริมาณกระแสเพิ่มขึ้น.....	114
6.4	ผลการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 300 วัตต์เพิ่มขึ้นเป็น 600 วัตต์.....	116
6.5	ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	121

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การตอบสนองที่มีต่อแสงของสารที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.2	วงจรถ่ายเก็บกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
2.3	กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	13
2.4	ผลกระทบเมื่อความต้านทานอนุกรมและขนานมีค่าเปลี่ยนแปลง.....	14
2.5	ผลกระทบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง.....	15
2.6	ผลกระทบเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง.....	15
2.7	วงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (VSI) สามเฟสสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ เหนี่ยวนำสามเฟส.....	17
2.8	การมอดูเลตสัญญาณขับด้วยหลักการไบโพลาร์สวิตช์ (Bipolar PWM).....	18
2.9	หลักการสร้างสัญญาณขับสวิตช์แบบยูนิโพลาร์.....	19
2.10	รูปสัญญาณการสวิตช์และแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ไบโพลาร์.....	22
2.11	รูปสัญญาณฮาร์มอนิกสำหรับการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ไบโพลาร์.....	23
2.12	อินเวอร์เตอร์ไบโพลาร์แบบจ่ายแรงดันรูปเต็มคลื่น.....	24
2.13	รูปคลื่นสัญญาณขับสวิตช์ และแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์สวิตช์.....	26
2.14	การสร้างสัญญาณขับสวิตช์แบบยูนิโพลาร์.....	26
2.15	รูปคลื่นสัญญาณสเปกตรัมฮาร์มอนิกของการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์สวิตช์.....	27
2.16	รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตเมื่อเกิดโอเวอร์มอดูเลชัน (Over modulation).....	27
2.17	สเปกตรัมฮาร์มอนิกแรงดันเอาต์พุตเมื่อเกิดโอเวอร์มอดูเลชัน.....	28
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่มูลฐานกับการปรับดัชนีการมอดูเลต.....	28
2.19	เทคนิคการควบคุมการมอดูเลตสัญญาณขับสวิตช์.....	29
2.20	Block Diagram ของการควบคุมการมอดูเลตความกว้างของพัลส์แถบฮีสเตอร์รีซีสคิงที่.....	29
2.21	ขอบเขตแถบฮีสเตอร์รีซีสปรับตัว.....	30
2.22	การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างโครงข่ายไฟฟ้า.....	30
2.23	แรงดันและกระแสโครงข่ายเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดการทำงานเรียงกระแส (rectification mode) เมื่อ $\theta = 0^\circ$	32
2.24	แรงดันและกระแสโครงข่ายเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ (inversion mode) เมื่อ $\theta = 180^\circ$ สอดคล้องกับเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.22.....	32
2.25	แรงดันและกระแสโครงข่ายไฟฟ้า.....	33
2.26	สเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่าย.....	33
2.27	การนำคอมพิวเตอรื 1 เฟสใช้งานในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย.....	34
2.28	วงจรรีเรียงกระแสชนิดไดโอดฟูลบริดจ์ (diode full bridge rectifier).....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.29	แรงดันโครงข่ายไฟฟ้าและกระแสที่ไหลผ่านคอมพิวเตอรื.....	35
2.30	สเปกตรัมฮาร์โมนิกของกระแสที่ไหลผ่านคอมพิวเตอรื.....	38
2.31	ไดอะแกรมไลน์เดี่ยว (one-line diagram) ของวงจรรงไวงาน.....	39
2.32	รูปแบบของวงจรไวงานชนิดแหล่งจ่ายแรงดันและกระแส.....	39
2.33	รูปแบบผสมของวงจรพาสซีฟและวงจรไวงาน.....	40
2.34	วงจรไวงานหนึ่งเฟสที่สอดคล้องกับรูปที่ 2.31.....	40
2.35	วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายแบบหนึ่งชั้น.....	41
2.36	วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้าแบบสองชั้น.....	41
2.37	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้าแบบสองชั้น ที่มีการติดตามจุดทำงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	42
2.38	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้า แบบใช้คอนเวอร์เตอร์สองชั้นโดยใช่วงจรบุทสำหรับการติดตามจุดทำงานสูงสุด ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	42
2.39	ระบบเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการควบคุมการติดตามกำลังสูงสุด และควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือน.....	42
2.40	ไดอะแกรมไลน์เดี่ยว (one-line diagram) ของเฟสล็คคูลูป.....	43
3.1	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงาน และการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	45
3.2	ไดอะแกรมไลน์เดี่ยว (one-line diagram) ของการหากระแสฮาร์โมนิก.....	46
3.3	การหาค่ากระแสอ้างอิงในไมโครโปรเซสเซอร์ TMS320F28335 ตระกูล C2000.....	49
3.4	การควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส.....	50
3.5	หลักการควบคุมกระแสสัญญาณภายใต้ขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส.....	51
3.6	สัญญาณของปริมาณกระแสจริงภายใต้ขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส.....	51
3.7	หลักการซิงโครไนซ์อย่างง่ายโดยใช้การตรวจจับผ่านศูนย์ (zero crossing).....	57
3.8	Flow Chart Diagram การดำเนินการของ Perturb and observe (P&O).....	58
4.1	ลักษณะการต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	60
4.2	วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้า.....	61
4.3	วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า.....	63
4.4	ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28335.....	63
4.5	โครงสร้างสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28335.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	วงจรประวิงเวลา.....	66
4.7	ไอจีบีทีโมดูล PM25RSB120.....	68
4.8	การออกแบบวงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีโมดูล.....	69
4.9	วงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีโมดูล.....	70
4.10	แผนภาพแสดงกระบวนการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	71
5.1	ไดอะแกรมการจำลองคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบ โครงข่ายไฟฟ้า.....	73
5.2	อัลกอริทึมเซลล์แสงอาทิตย์.....	74
5.3	บล็อกไดอะแกรมวงจรกำลัง.....	74
5.4	อัลกอริทึมสำหรับการควบคุม.....	74
5.5	การจำลองโดยใช้ MATLAB/Simulink.....	75
5.6	การจำลองกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_L) กระแสฮาร์มอนิก (i_{CR}) และกระแสอ้างอิง (i_{ref}).....	76
5.7	อัลกอริทึมและวงจรที่ใช้สำหรับการจำลอง.....	77
5.8	ผลการจำลองการกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$).....	79
5.9	วงจรกำลังที่ใช้สำหรับการจำลอง.....	80
5.10	การจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้น.....	80
5.11	อัลกอริทึมและวงจรที่ใช้สำหรับการจำลอง.....	82
5.12	ผลการจำลองการกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) และการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก.....	83
5.13	ผลการจำลองแรงดัน v_s และกระแส i_s กรณีปรับกระแสเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน.....	85
5.14	การจำลองแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้า (V_s), กระแสในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L) ในกรณีควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์.....	86
5.15	ผลการจำลองแรงดัน v_s และกระแส i_s กรณีปรับเปลี่ยนโหลด.....	87
5.16	การจำลองแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้า (V_s), กระแสในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสของคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L) ในกรณีปรับเปลี่ยนโหลด.....	88
5.17	การจำลองกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา.....	90
5.18	การจำลองแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้า (V_s), กระแสในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสของคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L) ในกรณีควบคุมกระแสโครงข่าย ให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา.....	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.19	การจำลองการทำงานของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	93
5.20	กราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์บริษัท Chaori Solar Energy.....	94
5.21	พารามิเตอร์ในระบบในสถานะเริ่มติดตามกำลังไฟฟ้า.....	95
5.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบเริ่มต้นทำงาน.....	95
5.23	พารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบ เมื่อระดับความเข้มแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน.....	96
5.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบเริ่มต้นทำงาน.....	97
6.1	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	99
6.2	ไดอะแกรมระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานที่ไม่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	100
6.3	การทดสอบการกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$).....	102
6.4	การทดสอบปรับปริมาณกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$).....	104
6.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ในฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าใน ระบบโครงข่าย.....	105
6.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ในฟังก์ชันกำลังไฟฟ้า.....	106
6.7	การทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ในสถานะโหลดไม่เชิงเส้น.....	107
6.8	ทดสอบการทำงานในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก.....	109
6.9	ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze).....	111
6.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ในฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าใน ระบบโครงข่าย.....	112
6.11	กราฟความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ในฟังก์ชันกำลังไฟฟ้า.....	112
6.12	ผลการทดสอบกรณีควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์.....	113
6.13	พารามิเตอร์ในระบบโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$).....	114
6.14	ผลจากการทดสอบกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลด.....	115
6.15	พารามิเตอร์ในระบบโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลด.....	116
6.16	ผลการทดสอบควบคุมกระแสไฟฟ้านำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา.....	118
6.17	ผลการทดสอบควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา ในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก.....	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.18	ระบบการทดสอบคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยมี การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....121
6.19	กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย.....122
6.20	การทดสอบการติดตามความเข้มแสงเมื่อความเข้มแสงลดลงตามลำดับ.....123
6.21	ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze).....124
6.22	ผลการทดสอบระบบเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงอย่างฉับพลัน.....125
6.23	ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze).....126
6.24	ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อร่วมขณะติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....127
6.25	ผลทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีความเข้มแสงตามปรากฏการณ์ธรรมชาติแบบ Real-Time จากเครื่องมือวัดวิเคราะห์กำลังงานไฟฟ้า.....127
6.26	การทดสอบการทำงานโดยใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วม.....129
6.27	ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า.....130
6.28	ผลการทดสอบกรณีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงแบบ Real-Time จำนวน 2 ปริมาณ.....131
6.29	พารามิเตอร์ในระบบโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง.....131
6.30	ผลจากการทดสอบกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลด.....132
6.31	พารามิเตอร์ในระบบโครงข่ายเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง.....133

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อเป็นพลังงานทางเลือกใหม่มากขึ้น เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม และยังเป็นแหล่งพลังงานอันมหาศาลที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันโดยทั่วไปในสองลักษณะประกอบด้วย ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยลำพัง ซึ่งระบบนี้มีข้อดีที่องค์ประกอบและการควบคุมไม่ยุ่งยากแต่จำเป็นต้องมีแหล่งเก็บสะสมพลังงาน (Battery) ไว้ใช้ในเวลากลางคืน สำหรับลักษณะที่สองเป็นระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ระบบนี้จะมีการควบคุมที่ซับซ้อนเนื่องจากต้องผ่านอินเวอร์เตอร์ที่มีคุณลักษณะเฉพาะและเป็นไปตามมาตรฐานสากลเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพเมื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

จากที่กล่าวมาข้างต้น การพัฒนาระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีคุณลักษณะเฉพาะในปัจจุบันจะอาศัยหลักการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งผู้วิจัยได้ให้ความสนใจโดยจะเห็นได้จากช่วงที่ผ่านมา [1-4] มีผู้วิจัยการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์โดยใช้หลักการการควบคุมกระแสแบบเชิงเส้น (Line Current Control) การควบคุมกระแสแบบทำนาย (Predictive Current Control) และหลักการควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Current Control) ในส่วนของการควบคุมกระแสโดยใช้หลักการควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Current Control) ซึ่งเป็นที่นิยมในงานระบบไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก วิธีนี้มีหลักการควบคุมที่ง่ายและมีผลตอบสนองค่อนข้างดี แต่ก็มีข้อเสียในส่วนของความถี่ในการสวิตซ์ไม่คงที่และถ้าขอบเขตฮิสเทอรีซิสมีค่าสูงและแรงดันไฟตรงมีค่าน้อยจะส่งผลทำให้ค่าผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortions ;THD) มีค่าสูงเมื่อเทียบกับเทคนิคพีดีบีลิวเอ็มคลื่นไซน์ (SPWM) ที่มีความถี่สวิตซ์คงที่ตลอดทั้งคาบและสามารถทำให้สวิตซ์สูงมากได้เพื่อลดฮาร์มอนิก โดยทั่วไประบบอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็กที่เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าจากการส่งกำลังจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโครงข่ายไฟฟ้าไม่มีฟังก์ชันวงจรไวงานเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกของโหลดไม่เชิงเส้นที่ต่อรวมในระบบและไม่มีการควบคุมกำลังเสมือนเพื่อไปปรับปรุงตัวประกอบกำลังของโหลดอื่น จึงเป็นปัจจัยที่ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะทำการปรับปรุงโดยใช้ฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพในระบบและลดฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าเนื่องจากโหลดไม่เชิงเส้นพร้อมกับการควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์โดยการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงานเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ให้เกิดสถานะที่มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้จัดทำเครื่องต้นแบบระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยผ่านอินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส เพื่อจ่ายโหลดที่ไม่เชิงเส้นร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีฟังก์ชันการรบกวนกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในตอนกลางวัน โดยมีลำดับการทำงานดังนี้ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cell) ผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนมากเกินความต้องการของโหลดก็จะส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินความต้องการเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยผ่านการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเพื่อให้กระแสมีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ โดยใช้หลักการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis current control) ซึ่งมีกระแสอ้างอิง (Reference current) ที่ได้จากการนำกระแสรูปคลื่นไซน์ที่มีมุมต่างเฟสเท่ากับ 180 องศาที่รูปคลื่นไซน์ของแรงดันอ้างอิงจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Grid Connected) รวมกับกระแสที่ถูกชดเชยจากการควบคุมกระแสฮาร์มอนิกของกระแสที่จ่ายให้กับโหลดไม่เชิงเส้น (Non-linear Load) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (DSP-TMS320F28335) เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์และควบคุมการทำงานทั้งระบบให้เกิดเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาและนำหลักการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิสสำหรับการส่งถ่ายกำลังและการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเมื่อจ่ายให้กับโหลดที่ไม่เชิงเส้นร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาและนำหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับอินเวอร์เตอร์และควบคุมการจ่ายพลังงานให้กับโหลดที่ไม่เชิงเส้นร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อควบคุมกำลังเสมือนเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังโครงข่ายไฟฟ้าเนื่องจากโหลดอื่น

1.2.4 เพื่อออกแบบและสร้างระบบคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าและพัฒนาระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (DSP-TMS320F28335) สำหรับควบคุมการจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 ระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (DSP-TMS320F28335) สามารถควบคุมการจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3.2 การซิงโครไนซ์เซชันกับโครงข่ายไฟฟ้าโดยใช้การตรวจจับผ่านศูนย์แทนเฟสล็อกคูล สามารถทำงานร่วมกันกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3.3 หลักการ Perturbation and observation (P&O) สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3.4 ฟังก์ชันการรบกวนกำลังไวงานสามารถควบคุมการเกิดฮาร์มอนิกในระบบให้ลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

รายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ประกอบด้วย

H.-L. JOU. และคณะ ได้นำเสนออัลกอริทึมการกรองกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าเฟสเดียว โดยอาศัยการคำนวณหากระแสไฟฟ้าจริงจากกระแสไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental Current) จากการเขียนอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถรักษาระดับของเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้และกระแสไฟฟ้ามีรูปสัญญาณใกล้เคียงไซน์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถชดเชยพลังงานให้กับโหลดแบบไม่เชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Rosa A. Mastromauro และคณะ ได้นำเสนอวิธีการของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อระบบโครงข่ายและมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก โดยพลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีใช้ค่าความนำ (Incremental conductance) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ ผลการทดสอบสามารถชดเชยความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกและติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

Bimal K. Bose. ได้นำเสนอวิธีการควบคุม PWM โดยใช้หลักการควบคุม Hysteresis-band ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้เนื่องจากมีการตอบสนองการควบคุมของกระแสอย่างรวดเร็วและสามารถกำหนดขอบเขตของกระแสสูงสุดและต่ำสุดได้ ถึงแม้จะมีข้อเสียในเรื่องการควบคุมความถี่ของการมอดูเลต แต่ผลการวิจัยก็สามารถควบคุมพารามิเตอร์ของระบบเพื่อให้การควบคุมความถี่ในการมอดูเลตเป็นไปตามความต้องการ

S. Saetieo และคณะ ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการควบคุมกระแสในระบบคอนเวอร์เตอร์สามเฟส โดยใช้ความแตกต่างทางเทคนิคหลัก ๆ สองส่วน ประกอบด้วยส่วนของเทคนิคการควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้หลักการพยากรณ์ด้วยความถี่สวิตซ์ที่คงที่ และในส่วนที่สองใช้เทคนิคการควบคุมแบบ bang-bang ควบคุมการพยากรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพแบบต่อเนื่องด้วยโครงข่ายประสาทยืดหยุ่นและตัวควบคุมลอจิกแบบฟัชซี ผลการวิจัยสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการพยากรณ์ของทั้งสองเทคนิคได้ตามความต้องการ

El-Sharkh และคณะ ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ห้วงจรกรองกำลังไฟฟ้าแอคทีฟ (Active) และรีแอคทีฟ (Reactive) ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโรงไฟฟ้าซึ่งได้ใช้การจำลองแบบพลวัต ผลการวิจัยสามารถวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของวงจรกรองกำลังไฟฟ้าทั้งสองแบบที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดตามที่ต้องการ

Lin and Hang ได้ทำการเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองระบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์โดยใช้ฟัชซีลอจิกมาประยุกต์ใช้เปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซิส ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าการควบคุมกระแสโดยใช้ฟัชซีลอจิกทำให้ความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกมีค่าโดยรวมน้อยกว่าวิธีการควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซิส

Altas. And Sharaf ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการค้นหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ครั้งก่อนเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าปัจจุบันว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งค่าความแตกต่างของทั้งสองจะนำไปใช้ในการควบคุมระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผลจากการวิจัยพบว่าเทคนิคนี้สามารถค้นหาจุดของกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้โดยไม่ต้องทราบข้อมูลของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์

Wu, et al. นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมกระแสแบบการพยากรณ์ (Predicted Current Control) หลักการของวิธีนี้ใช้การคำนวณวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) สำหรับการสวิตช์อินเวอร์เตอร์ในแต่ละคาบของการสวิตช์ ผลการวิจัยพบว่าการตอบสนองอย่างรวดเร็วและแม่นยำ แต่มีข้อเสียในการตรวจจับสัญญาณที่มีคาบการสวิตช์ที่ต้องมีช่วงเวลาที่คงที่ และมีการคำนวณที่ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องความเร็วของการตอบสนองและประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

J.Chavarria. และคณะ นำเสนอกลยุทธ์การควบคุมพลังงานที่สมดุลของเซลล์แสงอาทิตย์หลายระดับสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าในระบบสามเฟส ผลการวิจัยจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการควบคุมการจำลองข้อมูลที่มีการเก็บตัวอย่างพลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำมาออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดและแยกส่วนสำหรับวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในแต่ละแผงของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ การออกแบบการควบคุมจะต้องปรับให้เข้ากับการมอดูเลต PWM เพื่อเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า

Trishan Eswam. และคณะ นำเสนอวิธีการแบบไดนามิกที่ควบคุมรีปเปิดสำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เทคนิคจากการกระเพื่อมของสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยอัตโนมัติ ผลการวิจัยพบว่าสามารถควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคจากการกระเพื่อมของสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยอัตโนมัติได้

Ch. L. S. Srinivas. และคณะ นำเสนอเทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) วิธีใหม่ด้วยการพัฒนาการควบคุมความสัมพันธ์ระลอก (RCC) ด้วยระบบควบคุมพีซีลจิกคอนโทรลเลอร์ (FLC) สำหรับระบบ PV (Single-phase Phase) ผลการวิจัยพบว่าการควบคุมความสัมพันธ์ระลอก (RCC) นี้เหมาะสำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเฟสซึ่งเทคนิคไม่มีความซับซ้อนและต้นทุนต่ำ

Patcharaprakiti และคณะ นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมพีซีลจิกแบบปรับตัวสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งการทำงานของระบบประกอบด้วยวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์รับพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดและส่งผ่านกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์และทำการแปลงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ผลการวิจัยพบว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การควบคุมแบบพีซีลจิกสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดและทำหน้าที่ควบคุมกระแสฮีสเตอร์ซิสเพื่อควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ตามต้องการ

P. C. Tan. และคณะ นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานแบบเฟสเดียว 2 สายเชื่อมต่อขนานตัวกรองสัญญาณแบบพาสซีฟพร้อมด้วยฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานที่ใช้งานร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการวิจัยที่นำเสนอสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการกรองกำลังไวงานสามารถใช้งานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโหลดได้โดยใช้ทฤษฎี p-q และหลักการของกระแสอ้างอิงและระบบที่เสนอนี้สามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความถี่ 1 kHz แต่ที่สูงกว่าความถี่ที่ชัดเจน และมีค่า THD ของกระแสฮาร์มอนิกลดลงจาก 76.83 % เป็น 3.21 %

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของการทำวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย

1.5.1 จำลองการทำงานระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยโปรแกรม MatLab/Simulink โดยเริ่มจากการตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยการสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงและศึกษาพฤติกรรมของการตอบสนองของสัญญาณที่เกิดขึ้นทั้งระบบ

1.5.2 ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าที่มีระดับแรงดัน 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ และพัฒนาระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (DSP-TMS320F28335) สำหรับควบคุมการจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์ และทดสอบการทำงานของระบบควบคุมวงจรกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอเพื่อยืนยันความถูกต้องเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่สร้างขึ้น

1.5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบ สมรรถนะการทำงานโดยทำการต่อโหลดเชิงเส้นและไม่สมดุลและไม่เชิงเส้นและศึกษาพฤติกรรมของการตอบสนองที่เกิดขึ้นทั้งระบบเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในเรื่องต่าง ๆ ประกอบด้วย คุณภาพของระบบไฟฟ้า ฮาร์มอนิกและผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและเทคนิคการกรองกระแสฮาร์มอนิก ตลอดจนการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก

1.6.2 จำลองการทำงานระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยเริ่มจากการตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยการสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย และศึกษาพฤติกรรมของการตอบสนองของสัญญาณที่เกิดขึ้นทั้งระบบ

1.6.3 ศึกษาแบบซอฟต์แวร์ และฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการควบคุม โดยเริ่มจากการศึกษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการตรวจจับกระแสไฟฟ้า และ

แรงดันไฟฟ้า ศึกษาการประมวลผลด้วยสัญญาณดิจิทัลและการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล การควบคุมและป้องกันระบบไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์ และระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

1.6.4 สร้างเครื่องต้นแบบ โดยเลือกใช้อุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตามหลักการที่ได้ศึกษามาข้างต้น เพื่อออกแบบวงจรต่าง ๆ และการต่ออุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงาน

1.6.5 ทำการทดสอบและตรวจสอบเครื่องต้นแบบ เพื่อพัฒนาและปรับปรุงทั้งระบบซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยทำการทดสอบและเก็บข้อมูลเบื้องต้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง พร้อมการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และนำผลที่ได้ไปปรับปรุงระบบจนได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและสมบูรณ์

1.6.6 ทำการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ โดยทำการทดสอบเครื่องต้นแบบที่ได้พัฒนาและปรับปรุง สร้างขึ้น โดยทำการต่อโหลดแบบสมดุลและไม่สมดุลตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้ และศึกษาพฤติกรรมการทำงานของสัญญาณที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

1.6.7 สรุปผล จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสรุปผลและเปรียบเทียบผล

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงการสร้างระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังหนึ่งขั้นที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระบบที่นำเสนอสามารถทำหน้าที่ได้หลายอย่างประกอบด้วย ทำหน้าที่ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากโหลดไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังไวงานเพื่อชดเชยกำลังเสมือนและลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่ง และทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าและติดตามจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 ต้นทุนต่ำเพื่อควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสฮีสเทรีซิส ซึ่งมีข้อดีในเรื่องควบคุมง่ายและตอบสนองเร็ว ใช้การซิงโครไนส์อย่างง่ายโดยใช้หลักการตรวจจับผ่านศูนย์แทนการใช้เฟสล็อคคูลูป นอกจากนี้ยังมีการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยรายละเอียดจำนวน 7 บท และมีเค้าโครงของแต่ละบทโดยสังเขปดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา และเค้าโครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของโฟโตโวลตาอิก คุณสมบัติของโฟโตโวลตาอิก รวมถึงทฤษฎีและหลักการของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสและเทคนิคการควบคุมการมอดูเลตสัญญาณขับสวิตซ์

โหลดไม่เชิงเส้นหนึ่งเฟสและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยอนุกรมฟูเรียร์และดัชนีคุณภาพกำลังไฟฟ้า ชนิด วงจรและการควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกันระหว่างโครงข่ายและเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการและชนิดของ วงจรกรองฮาร์มอนิกไวงาน หลักการเฟสล็อกคูล

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการของระบบที่นำเสนอ หลักการหากระแสอ้างอิง วิธีการควบคุม กระแสแบบติดตามขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส การซิงโครไนซ์ด้วยการตรวจจับศูนย์ผ่าน (zero crossing) และการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้อัลกอริทึม Perturb and Observe

บทที่ 4 ในบทนี้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างและการออกแบบวงจรควบคุม วงจรกำลังของ อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟลูบริดจ์เพื่อจ่ายโหลดเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดย เริ่มจากการออกแบบระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และออกแบบวงจรควบคุม วงจรกำลัง ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรอง กระแส วงจรไอจีบีทีโมดูล วงจรขับเคลื่อน วงจรประวิงเวลา วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส วงจรตรวจจับ สัญญาณแรงดัน และการเขียนคำสั่งในการประมวลผลสัญญาณด้วยฟังก์ชัน Math Model จากโปรแกรม MATLAB/Simulink ลงในไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 5 บทนี้กล่าวถึงการจำลองการทำงานของระบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อ โครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟสที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด การจำลองนี้จะใช้ โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองการทำงานของระบบควบคุม จำลองการทำงานของระบบเซลล์ แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลด จำลองการทำงานของระบบ เซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้น จำลองการ ทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้น โดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก การจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์ เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยน กระแสโหลด จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้า แรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา และจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 6 กล่าวถึงการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบกับ ผลการจำลองในบทที่ 5 โดยการทดสอบนี้จะทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่ เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่าย ทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้น ทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้ แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการ ชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแส ทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าใน

สภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลดอย่างฉับพลัน ทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า โดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา ทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา และทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายการไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะไม่มีโหลด ในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นและมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแส ในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลดอย่างฉับพลัน

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

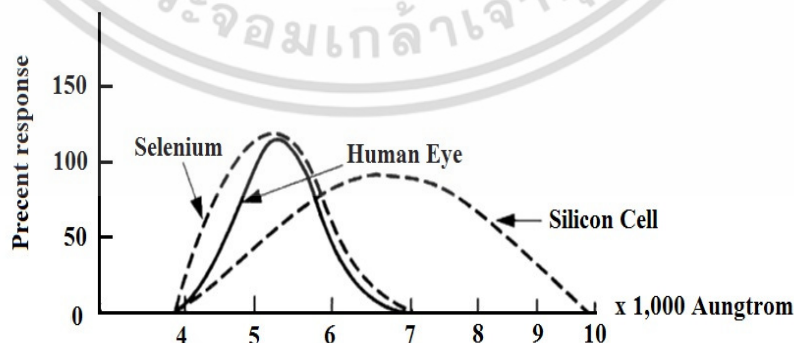
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการของโฟโตโวลตาอิก

โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic; PV) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) เป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ทางแสง (Photoelectric Transducers) ที่ทำการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้วัสดุไวแสงซึ่งวัสดุไวแสงนี้จะมีคุณสมบัติในการรับแสงที่มีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าความยาวคลื่นเริ่มต้น (Threshold Wavelength) หรือความถี่จุดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Frequency) ของวัสดุไวแสงนั้น วัสดุจะปล่อยอิเล็กตรอนออกมาเมื่อได้รับแสงสว่างอย่างเพียงพอ ปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่า Photoelectric Effect ซึ่งค้นพบโดย Meinrich Hertz ในปี ค.ศ. 1887 ดังนั้นจึงจัดได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์เป็นทรานสดิวเซอร์แบบไวงาน (Active Transducer)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพี - เอ็น ที่ประกบกันเป็นรอยต่อ สารที่นิยมใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะเป็นสารซิลิคอน (Silicon : Si) หรือสารซีลีเนียม (Selenium : Se) ซึ่งมีช่องสำหรับให้แสงทะลุผ่านได้ (Transparent Adhesive) และอุปกรณ์ป้องกันการสะท้อนของแสงจะอยู่ด้านบนในขณะที่ด้านล่างจะมีจุดต่อที่มีสีดำ (Back Contact) เพื่อใช้งาน เซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีแสงมาตกกระทบบนตัวของเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดพลังงานแสง (Photo Energy) อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของวัสดุไวแสง จะทำให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนใหญ่ในชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและโฮลในชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีเคลื่อนที่ออกจากบริเวณรอยต่อทำให้พาหะส่วนน้อยที่บริเวณรอยต่อเกิดเป็นศักย์แรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วต่อทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงทำให้เกิดเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.1 การตอบสนองที่มีต่อแสงของสารที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลการตอบสนองต่อแสงที่มาจากกระบอกสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าเป็นสารซิลิคอนจะอยู่ในช่วง 3,500 ถึงประมาณ 10,000 อังสตรอม และถ้าเป็นสารซิลิเนียมจะอยู่ในช่วง 2,500 ถึงประมาณ 7,500 อังสตรอม ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่สายตามนุษย์มองเห็น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และโดยปกติเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 0.25 – 0.6 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้ถึง 50 มิลลิแอมป์ ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง ถ้าหากต้องการให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าได้สูงมากขึ้น จะต้องนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานเพื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าและนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น

2.2 คุณลักษณะของโฟโตโวลตาอิก

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดจากพลังงานแสงไปทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระให้ไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนรอยต่อ P-N Junction ซึ่งจะเขียนแทนด้วยไดโอดและแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นจึงเขียนสมการแสดงคุณลักษณะทางกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล (exponential equation) ดังสมการที่ 2.1

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(V + IR_s)}{N \times K \times T} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

เมื่อกำหนดให้

I_{ph} คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากพลังงานแสง มีหน่วยเป็น A

I_s คือ กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด มีหน่วยเป็น A

q คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N คือ Ideal factor

K คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/Kevin

T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น Kevin

V คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด มีหน่วยเป็น V

R_s คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ มีหน่วยเป็น Ω

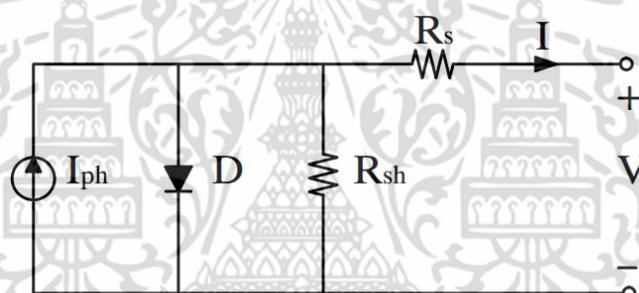
R_{sh} คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ มีหน่วยเป็น Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Ideal factor นั้นจะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2.1 และจากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเท่าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า Ideal factor [1]

Technology	N	Technology	N
Si-mono	1.2	a – Si:H triple	5
Si-poly	1.3	CdTe	1.5
a – Si:H	1.8	CIS	1.5
a – Si:H tandem	3.3	AsGa	1.3



รูปที่ 2.2 วงจรเทียบเท่าของเซลล์แสงอาทิตย์

พิจารณาจากรูปที่ 2.2 จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์มีจำนวน 5 ตัวแปร ประกอบด้วย I_s , N เป็นผลของไดโอด I_{ph} เป็นผลของแสงที่ตกกระทบ และ R_s , R_{sh} เป็นค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดการสูญเสียที่เซลล์แสงอาทิตย์

2.2.1 ผลกระทบจากระดับความเข้มแสง กระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{ph}) เป็นกระแสไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการใช้ระดับความเข้มแสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้จะมีส่วนโดยตรงกับระดับความเข้มแสง (Radiation Intensity) และอุณหภูมิ สามารถเขียนเป็นสมการ I_{ph} ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_I (T - T_{ref})] \times \lambda \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 25 °C มีหน่วยเป็น A

K_f คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร มีหน่วยเป็น A/°C

T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น Kelvin

λ คือ ระดับความเข้มแสง มีหน่วยเป็น kW/m²

2.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ เมื่อกำหนดให้ระดับความเข้มแสงมีค่าคงที่ จากสมการที่ (2.2) ทำให้อุณหภูมิส่งผลกระทบท่อกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากกระแสลัดวงจรมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ อีกทั้งอุณหภูมียังมีผลกระทบต่อกระแสไปอัสอิมิตัวย้อนกลับของไดโอดที่เรียกว่า Reverse saturation current of diode (I_s) ดังสมการที่ (2.3)

$$I_s(t) = I_s \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{N \times V_t} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้

E_g คือ Band gap energy of semiconductor

V_t คือ Thermal voltage at room temperature

2.2.3 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับพิกัดแรงดัน มักเรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล (PV Module) สำหรับการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ (2.1) หากไม่คิดผลของความต้านทาน R_s และ R_{sh} จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ (2.4)

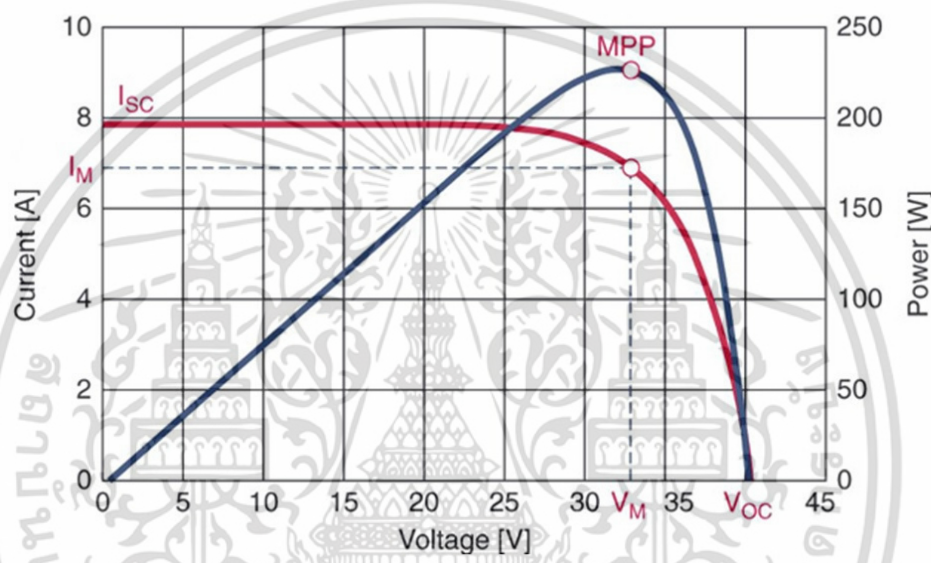
$$I = n_p \times I_{ph} - n_p \times I_s \left(\exp \frac{q \times V}{N \times K \times T \times n_s} - 1 \right) \quad (2.4)$$

เมื่อกำหนดให้

n_p คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน

n_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

2.2.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V Curve) ซึ่งใช้สำหรับตรวจสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หากอุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่สามารถเขียนกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีจุดที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เรียกว่า Maximum Power Point (MPP หรือ P_{max})



รูปที่ 2.3 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

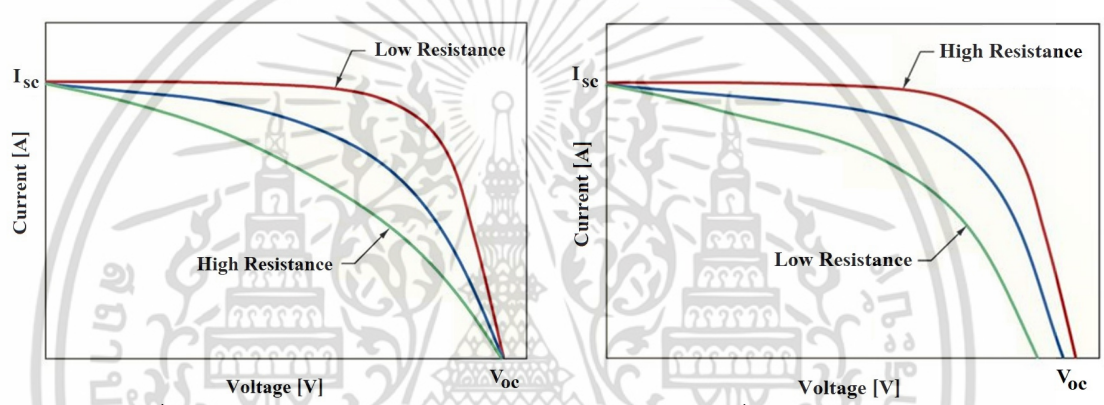
จากรูปที่ 2.3 ในการพิจารณาคุณลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open circuit Voltage ; V_{oc}), กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Short circuit current ; I_{sc}), กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point ; P_{max}), กระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power current ; I_m) และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power Voltage ; V_m)

2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลักหลายประการ ประกอบด้วย ผลของความต้านทานที่นำมาต่ออนุกรมและขนาน ความสูญเสียต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากธรรมชาติที่ไม่สามารถควบคุมได้ ผลกระทบจากความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบ และอุณหภูมิซึ่งล้วนแล้วที่เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานทั้งสิ้น โดยจะกล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ผลกระทบเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ จะพบว่ามอดูลประกอบของความต้านทานจำนวน 2 ตัวประกอบด้วย R_s และ R_{sh} ที่ต่ออนุกรมและขนานกันอยู่ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่า 1 หน่วยและที่อุณหภูมิในสภาวะปกติ (25 C°) ปริมาณกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะพบว่ากราฟกระแสและแรงดัน (V-I Curve) มีความชันลดลง ดังรูปที่ 2.4 ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงส่งผลถึงประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของระบบ



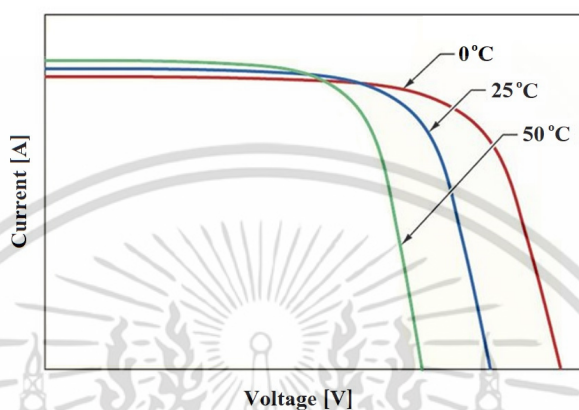
(ก) การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานอนุกรม (ข) การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขนาน

รูปที่ 2.4 ผลกระทบเมื่อความต้านทานอนุกรมและขนานมีค่าเปลี่ยนแปลง

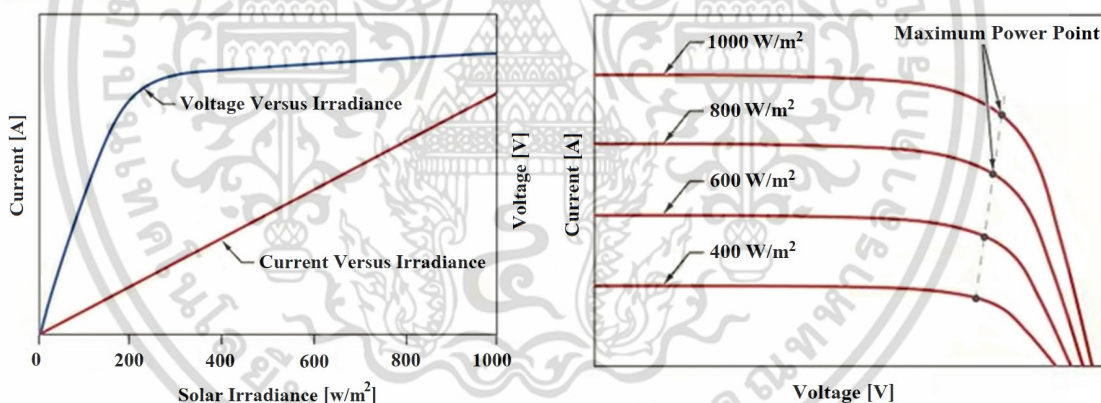
2.3.2 ผลกระทบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในสภาวะแวดล้อมที่ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับในส่วนของกระแสไฟฟ้าจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยเฉลี่ยทุกๆ 1 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่กำเนิดได้ลดลงประมาณ 0.5 % และอุณหภูมิที่เซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพโดยทั่วไปที่อุณหภูมิปกติเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.5

2.3.3 ผลกระทบเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง ความเข้มของแสงจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าแปรผันโดยตรงกับการกำเนิดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ นั่นคือเมื่อความเข้มของแสงจากดวงอาทิตย์มีมาก กระแสที่กำเนิดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะแปรผันตามความเข้มของแสงมากตามไปด้วยเช่นกัน จึงกล่าวได้ว่าค่าความเข้มแสงมีความสัมพันธ์อย่างมากกับกระแสที่กำเนิดได้ โดยค่าความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพ

อากาศแจ่มใสจะมีความเข้มแสงเท่ากับ $1,000 \text{ W/m}^2$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ Air Mass; AM 1.5 สามารถแสดงค่ากระแสเปลี่ยนแปลงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ผลกระทบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง



(ก) current and Voltage Versus Irradiance

(ข) Voltage and Current Solar Irradiance

รูปที่ 2.6 ผลกระทบเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

2.4 ทฤษฎีและหลักการของอินเวอร์เตอร์

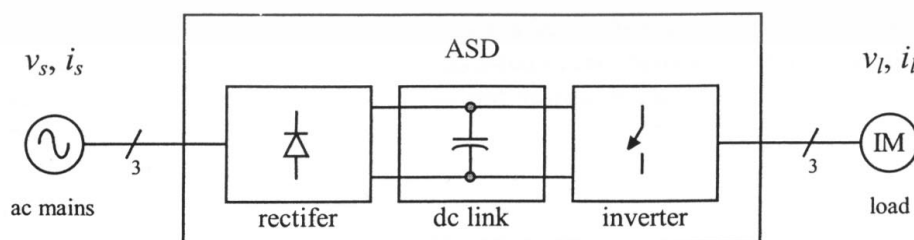
การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในระบบอินเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดกำลังสูงมากส่วนใหญ่มักใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีเอสซีอาร์เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยมีเงื่อนไขที่จะต้องต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับตลอดเวลา เนื่องจากการที่จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส (line-commutated inverter) นั้นจะต้องใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในการป้อนแรงดันไปอัสกลับให้กับเอสซีอาร์ ในขณะที่อินเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดกำลังต่ำจนถึงพิกัดกำลังปานกลางมักนิยมใช้อุปกรณ์สวิตซ์กำลังที่สามารถควบคุมการนำและหยุดนำกระแสที่ขาเกต (Gate-controlled turn-off devices) ได้โดยอุปกรณ์ดังกล่าวที่นิยมใช้ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟสและไอจีบีที ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะทำงานที่ความถี่สวิตซ์สูง โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวนี้จะใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณความกว้างของพัลส์ (Pulse width modulation; PWM) ซึ่งเทคนิคการสร้างแรงดันไฟฟ้านี้สามารถปรับขนาดและความถี่ทางด้านเอาต์พุตของไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์ได้ โดยทั่วไปนิยมนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Variable speed AC motor drives; VSD) เตาความร้อนเหนี่ยวนำ (Induction heating) แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง (Uninterruptible ac power supply; UPS) และระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High voltage DC transmission system)

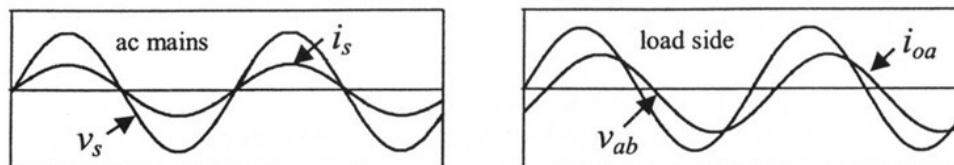
พื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็นอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส (Current source inverter; CSI) และอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage source inverter; VSI) อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสทางด้านอินพุตจะมีวงจรเรียงกระแสและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่ หรือเรียกอีกอย่างว่าแหล่งจ่ายกระแส (Current source) ทำให้มีอิมพีแดนซ์สูงตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมนี้จะทำให้แหล่งจ่ายกระแสมีกระแสไหลในวงจรต่อเนื่อง ทำให้การเปลี่ยนแปลงกระแสไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันที ในขณะที่เดียวกันกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสจะถูกควบคุมโดยแรงดันอินพุตกระแสตรงที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ ปกติแล้วอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสนี้มักใช้กับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีพิกัดกำลังสูงๆ

สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (VSI) ทางด้านอินพุตจะถูกป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มาจากรีจอร์เรียงกระแสโดยมีตัวเก็บประจุต่อขนานเพื่อลดระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้า (Ripple Voltage) ทำให้แรงดันที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ดังรูปที่ 2.4 ในทางอุดมคติแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสไฟสลับ (AC Main Supply) และแรงดันตกคร่อมโหลดนั้นจะต้องมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ซึ่งเป็นโพลตเชิงเส้นดังรูปที่ 2.4 (ข) แต่ในทางปฏิบัติกระบวนการแปลงกำลังไฟฟ้าทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุต (i_s) ทางด้านแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (ac mains) นั้นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากผลของการตัดต่อสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังรูปที่ 2.4 (ค) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์เหล่านี้จะเป็นโพลตที่ไม่เชิงเส้น

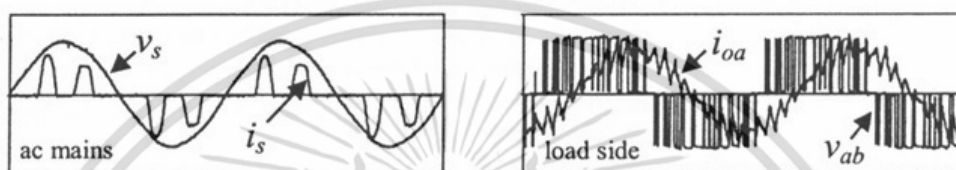


(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (VSI) ที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานเป็นไฟตรงเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตและเอาต์พุตในอุดมคติ



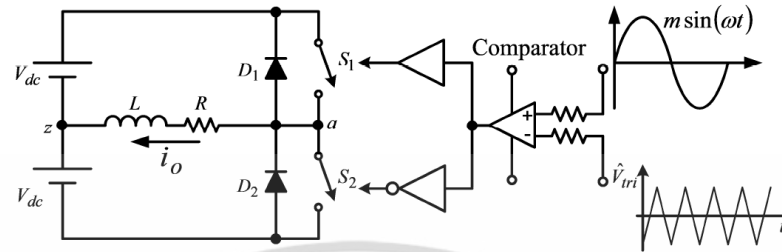
(ค) รูปคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตและเอาต์พุตในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (VSI) สามเฟสสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

2.5 อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันหนึ่งเฟส

การสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการมอดูเลตความกว้างของพัลส์ (Pulse width modulation) เพื่อปรับฮาร์มอนิกอันดับต่ำให้เกิดฮาร์มอนิกที่อันดับสูง ซึ่งข้อดีก็คือ สามารถปรับแรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตได้และสะดวกต่อการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก (Harmonic Filter) ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันหนึ่งเฟสนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น

2.5.1 อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันรูปครึ่งคลื่น (Half wave inverter) อินเวอร์เตอร์แบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งกึ่ง (One-leg inverter) ซึ่งเป็นการสร้างสัญญาณขับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยหลักการไปโพลาร์สวิตซ์ (Bipolar PWM) ให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันรูปครึ่งคลื่น โดยการมอดูเลตสัญญาณความกว้างของพัลส์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Sinusoidal pulse width modulation (SPWM) มอดูเลตสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ($v_{control}$) กับสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier signal) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสัญญาณสามเหลี่ยม ($v_{triangle}$) เพื่อให้ฮาร์มอนิกของแรงดันไปเกิดที่ลำดับฮาร์มอนิกอันดับสูงๆ สามารถพิจารณาหลักการได้จากรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การมอดูเลตสัญญาณขับด้วยหลักการไบโพลาร์สวิตช์ (Bipolar PWM)

พิจารณารูปที่ 2.8 หลักการขยายรูปสัญญาณการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์กับสัญญาณคลื่นพาร์ จะกำหนดเป็นเงื่อนไขดังนี้

- เมื่อ $V_{control} > V_{triangle}$ จะทำให้สวิตช์ S_1 นำกระแส
- เมื่อ $V_{control} < V_{triangle}$ จะทำให้สวิตช์ S_2 นำกระแส

จากเงื่อนไขดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสวิตช์ทั้งสองจะต้องนำกระแสไม่พร้อมกันเพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรและสร้างความเสียหายให้กับวงจร และรูปคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากรูปที่ 2.9 เมื่อพิจารณาในช่วง 1 คาบเวลาของการสวิตช์จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดที่ได้มีแรงดันเท่ากับ $+V_{dc}$ และ $-V_{dc}$ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการสวิตช์แรงดันสองขั้วหรือไบโพลาร์ (Bipolar voltage switching) ภายใน 1 คาบเวลา ซึ่งสามารถสรุปสถานะการทำงานของสวิตช์ให้แรงดันแบบไบโพลาร์ได้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สถานะการทำงานของสวิตช์ให้แรงดันแบบไบโพลาร์

การสวิตช์	S_1	S_2	แรงดันทางด้านเอาต์พุต
สถานะ	0	1	$-V_{dc}$
สถานะ	1	0	$+V_{dc}$

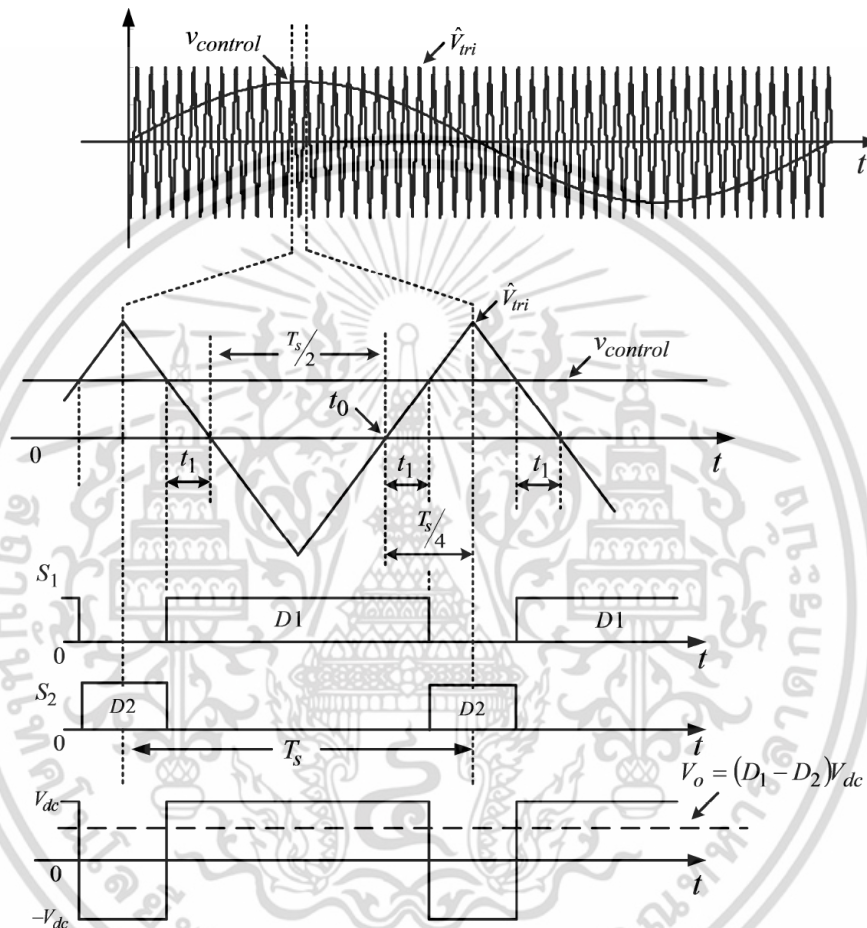
พิจารณาจากรูปที่ 2.8 การวิเคราะห์ฟังก์ชันของการมอดูเลตสัญญาณหรือสมการแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะพิจารณาจากสมการเส้นตรงของรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมในรูปที่ 2.9 จะได้

$$v_{triangle} = \frac{\hat{V}_{triangle}}{T_s/4}(t) \quad \text{เมื่อ} \quad 0 < t < T_s/4 \quad (2.5)$$

โดยขณะที่เวลา $t = t_1$ จะได้ว่า $v_{control} = v_{triangle}$ และเมื่อแทนลงในสมการที่ 2.5 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{control} = \frac{\hat{V}_{triangle}}{T_s/4}(t_1) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.9 หลักการสร้างสัญญาณขับสวิตช์แบบไบโพลาร์

ดังนั้นช่วงเวลา t_1 จะมีค่าเท่ากับ

$$t_1 = \frac{v_{control}}{\hat{V}_{triangle}} \left(\frac{T_s}{4} \right) \quad (2.7)$$

ในช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ S_1 จากรูปที่ 2.9 มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_{on} = 2t_1 + \frac{T_s}{4} \quad (2.8)$$

เมื่อกำหนดให้ T_s คือช่วงเวลา 1 คาบของการสวิตช์และกำหนดให้อัตราส่วนของช่วงเวลาในการนำกระแสของสวิตช์คือ Duty ratio (D) มีค่าเท่ากับ

$$Duty\ ratio = \frac{t_{on}}{T_s}$$

นำ t_1 ในสมการที่ 2.7 แทนค่าลงในสมการที่ 2.8 จะได้

$$\begin{aligned} t_{on} &= 2 \frac{v_{control}}{\hat{V}_{triangle}} \left(\frac{T_s}{4} \right) + \frac{T_s}{2} \\ &= \frac{v_{control}}{\hat{V}_{triangle}} \left(\frac{T_s}{2} \right) + \frac{T_s}{2} \\ &= \frac{T_s}{2} \left(1 + \frac{v_{control}}{\hat{V}_{triangle}} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

และช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ S_1 ตามสมการที่ 2.8 มีอัตราส่วน Duty ratio ; D1 เท่ากับ

$$D1 = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{control}}{\hat{V}_{triangle}} \right) \quad (2.10)$$

ใน 1 คาบเวลาอัตราส่วนการนำกระแสของสวิตช์ S_1 และ S_2 มีอัตราส่วน Duty ratio รวมไม่เกิน 100 % จะได้

$$D1 + D2 = 1 \quad (2.11)$$

และช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ S_2 มีอัตราส่วน Duty ratio ; D2 เท่ากับ

$$D2 = 1 - D1 \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการสวิตช์ S_1 และ S_2 ให้ผลลัพธ์ของแรงดันเอาต์พุตมีทั้งแรงดันบวกและลบภายในหนึ่งคาบเวลา แสดงในรูปที่ 2.6 ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยใน 1 คาบเวลา สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V_o &= [(D1)(V_{dc})] + [(D2)(-V_{dc})] \\ &= [(D1)(V_{dc})] - [(D2)(V_{dc})] \\ &= (D1 - D2)V_{dc} \end{aligned} \quad (2.13)$$

และเมื่อแทนค่า Duty ratio ; D2 จากสมการที่ 2.12 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้สมการใหม่เป็น

$$\begin{aligned} V_o &= (D1 - (1 - D1))V_{dc} \\ &= (2D1 - 1)V_{dc} \end{aligned}$$

แทนค่า Duty ratio ; D1 จากสมการที่ 2.10 จะได้ค่าแรงดันเฉลี่ยใน 1 คาบเวลาหรือแรงดันที่ความถี่มูลฐาน ดังสมการ

$$\begin{aligned} V_o &= \left(1 + \frac{v_{control}}{\hat{V}_{triangle}} - 1 \right) V_{dc} \\ &= \left(\frac{v_{control}}{\hat{V}_{triangle}} \right) V_{dc} \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อกำหนดให้ $\frac{v_{control}}{\hat{V}_{triangle}}$ เป็นฟังก์ชันมอดูเลตสัญญาณ Modulation index (m_{in}) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0-1

จะสามารถทำการปรับขนาดแรงดันเอาต์พุต ($v_{o,1}$) ได้จากการปรับขนาดของแรงดันที่ควบคุม ($v_{control}$) และปรับความถี่ของแรงดันเอาต์พุตได้จากความถี่ของ $v_{control}$ ได้เช่นกัน ดังนั้นสมการแรงดันเอาต์พุตของการมอดูเลตรูปคลื่นสัญญาณแรงดันแบบไบโพลาร์สวิตซิง (Bipolar voltage switching) สำหรับวงจร Half-bridge inverter จะมีค่าเท่ากับ

$$v_{o,1} = (m_{in})(V_{dc}) \quad (2.15)$$

โดยที่ที่กำหนดให้ดัชนีการมอดูเลตที่ให้แรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วงเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ $0 < m_{in} < 1$ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

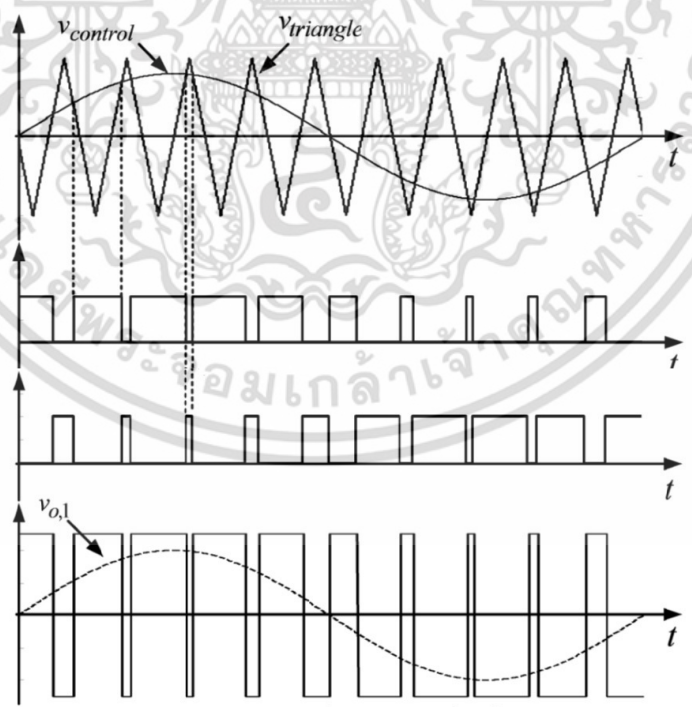
และจากรูปที่ 2.10 แสดงหลักการมอดูเลตสัญญาณความกว้างพัลส์ (PWM) สัญญาณขับสวิตช์ S_1 และ S_2 และรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตในหนึ่งคาบเวลาของแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่มูลฐาน โดยรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่แล้วจะได้เป็นรูปคลื่นไซน์ $v_{o,1}$ และเมื่อนำรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูเรียร์จะพบว่ากลุ่มฮาร์โมนิรอบข้าง (Sideband harmonic) ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณรอบๆ ลำดับความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ หรือเท่ากับความถี่ของคลื่นพาห้ ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นสเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดันเอาต์พุตที่มีการสวิตช์ด้วยหลักการไปโพลาร์ โดยกำหนดให้ดัชนีการมอดูเลตมีค่าเท่ากับ 0.8 และมีกลุ่ม Sideband harmonic เกิดขึ้นที่ m_f , $2m_f$, $3m_f$ ซึ่งเพิ่มขึ้นไปเป็นจำนวนเท่า โดยเรียก m_f นี้ว่าอัตราส่วนการมอดูเลตความถี่ มีค่าเท่ากับ

$$m_f = \frac{f_{sw}}{f_1} \tag{2.16}$$

เมื่อกำหนดให้

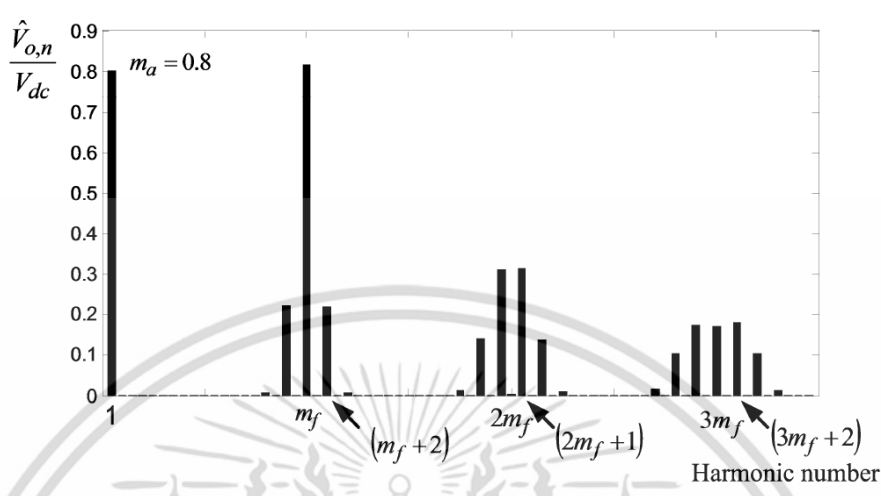
f_{sw} คือ ความถี่ของคลื่นพาห้ (Carrier frequency)

f_1 คือ ความถี่มูลฐานของแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.10 รูปสัญญาณการสวิตช์และแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ไปโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 รูปสัญญาณฮาร์มอนิกสำหรับการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์โพลาร์

พิจารณาจากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าแรงดัน PWM ทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency (f_1)) ที่เป็นความถี่เดียวกันกับความถี่ของแรงดันควบคุมหรือแรงดันอ้างอิง ($v_{control}$) ซึ่งมีฮาร์มอนิกรอบข้างในกลุ่มแรกที่ลำดับฮาร์มอนิก m_f และมีขนาดแรงดันสูงกว่าขนาดแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่มูลฐาน โดยกำหนดความสัมพันธ์ของฮาร์มอนิกรอบข้างได้ดังสมการที่ (2.17) และ (2.18)

เมื่อกำหนดให้ความถี่ฮาร์มอนิก (Harmonic frequency) มีค่าเท่ากับ

$$f_n = (jm_f \pm k) f_1 \tag{2.17}$$

และ

$$\frac{f_n}{f_1} = n = jm_f \pm k \tag{2.18}$$

และกำหนดให้

- n คือ ลำดับฮาร์มอนิก
- j คือ จำนวนเท่าของการมอดูเลตความถี่ m_f
- k คือ ฮาร์มอนิกรอบข้าง (Sideband harmonic)

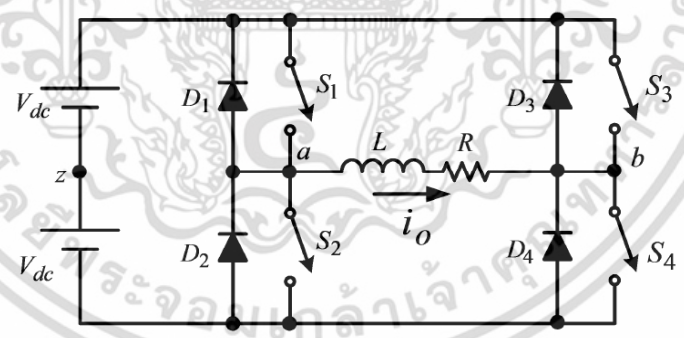
โดยที่ j มีค่าเป็นจำนวนคี่ (1, 3, 5,...) ผลของลำดับฮาร์มอนิก k จะมีค่าเป็นจำนวนคู่ (2, 4, 6 ...)
 โดยที่ j มีค่าเป็นจำนวนคู่ (2, 4, 6,...) ผลของลำดับฮาร์มอนิก k จะมีค่าเป็นจำนวนคี่ (1, 3, 5 ...)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันรูปเต็มคลื่น (Full-wave inverter) อินเวอร์เตอร์แบบนี้เรียกอีกอย่างว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดสองกึ่ง (H-Bridge inverter) การมอดูเลตสัญญาณขับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบวงจรถูก full-bridge inverter ดังรูปที่ 2.12 การนำเอาสัญญาณขับที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณในรูปที่ 2.10 มาขับสวิตช์ S_1 และ S_4 ในรูปที่ 2.12 และ S_2 นำมาเป็นสัญญาณขับสวิตช์ S_2 และ S_3 ผลที่ได้จากการสวิตช์นั้น ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็นแบบไบโพลาร์ แต่มีขนาดของแรงดันเอาต์พุตเป็น $2V_{dc}$ ซึ่งมีขนาดแรงดันเป็น 2 เท่าของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์แบบ half-bridge และสามารถเขียนสมการแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่มูลฐานสำหรับอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันรูปเต็มคลื่นที่มีการสวิตช์ด้วยเทคนิคไบโพลาร์ ดังนี้

$$v_{o,1} = (m_{in})(2V_{dc}) \tag{2.19}$$

การสวิตช์แบบไบโพลาร์นี้ยังมีเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณขับสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ โดยการกำหนดให้สวิตช์ S_1 และ S_3 ที่ต่ออยู่กับทางด้านแรงดันบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้มีสถานะของการสวิตช์เป็น 4 สถานะ โดยสามารถเขียนสถานะการทำงานได้ดังตารางที่ 2.3 โดยที่สวิตช์ S_2 และ S_4 มีสถานะที่ตรงข้ามกับ S_1 และ S_3 เพื่อป้องกันการลัดวงจรที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านอินพุตของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ ซึ่งผลการสวิตช์ของเทคนิคยูนิโพลาร์นี้ จะให้แรงดันเอาต์พุตที่ตกรวมโพลตมีเพียงรูปคลื่นแรงดันในซีกบวกและศูนย์ภายใน 1 คาบเวลาการสวิตช์ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.12 อินเวอร์เตอร์ไบโพลาร์แบบจ่ายแรงดันรูปเต็มคลื่น

ตารางที่ 2.3 สถานะการทำงานของสวิตช์แบบไบโพลาร์สวิตช์แบบจ่ายแรงดันรูปเต็มคลื่น

การสวิตช์	S_1	S_3	แรงดันทางด้านเอาต์พุต
สถานะ	0	0	0
สถานะ	0	1	$-2V_{dc}$
สถานะ	1	0	$2V_{dc}$
สถานะ	1	1	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการสร้างสัญญาณขับสวิตช์นี้ใช้สัญญาณแรงดันควบคุม 2 สัญญาณหลักประกอบด้วย $V_{control}$ และสัญญาณ $-V_{control}$ ซึ่งมีเฟสตรงข้ามกัน แล้วนำสองสัญญาณนี้มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณคลื่นพาร์เดียวกัน โดยที่ D_1 เป็นอัตราส่วนการนำกระแสของสวิตช์ S_1 และ D_2 เป็นอัตราส่วนการนำกระแสของสวิตช์ S_2 ในหนึ่งคาบเวลาของการสวิตช์ และจากรูปที่ 2.10 สามารถเขียนสมการแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยใน 1 คาบเวลาได้เป็น

$$v_o = V_{ab} = (D_1 - D_2)2V_{dc} \quad (2.20)$$

โดยที่

$$D_2 = 1 - D_1$$

เมื่อแทน D_2 ลงในสมการที่ 2.20 จะได้

$$\begin{aligned} v_o &= (D_1(1 - D_1))2V_{dc} \\ &= (2D_1 - 1)2V_{dc} \end{aligned} \quad (2.21)$$

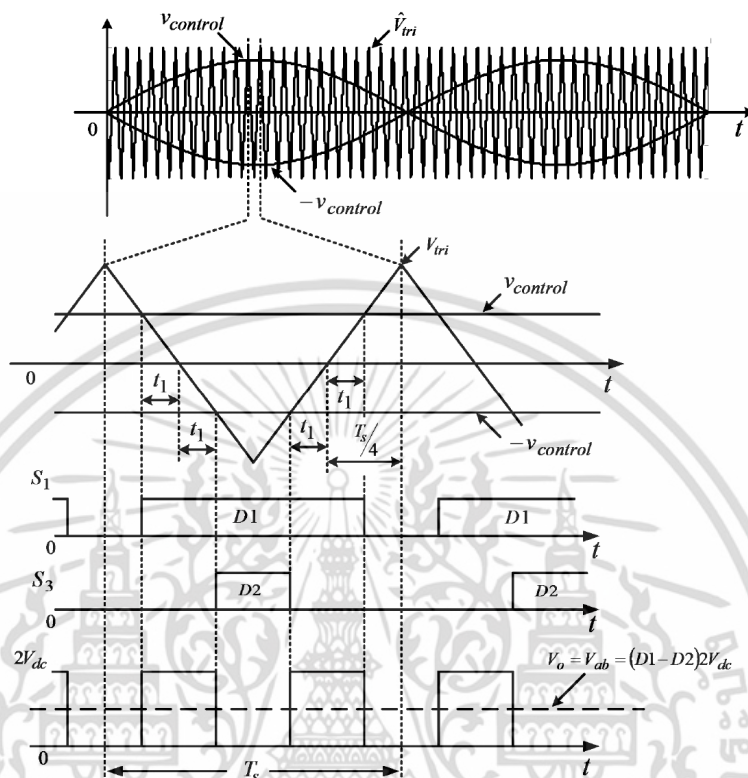
และเมื่อแทน D_1 จากสมการที่ 2.10 ลงในสมการที่ 2.21 จะได้

$$V_o = \left(\frac{v_{control}}{\hat{V}_{triangle}} \right) 2V_{dc}$$

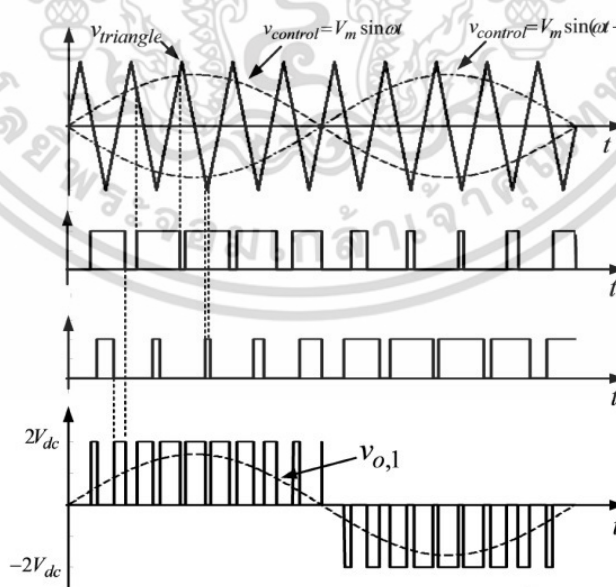
หรือ

$$v_{o,1} = (m_{in})(2V_{dc}) \quad \text{เมื่อ } 0 < m_{in} < 1 \quad (2.22)$$

และจากสมการ 2.19 และสมการที่ 2.22 ซึ่งเป็นสมการแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่มูลฐานของการสวิตช์แบบไบโพลาร์และยูนิโพลาร์ตามลำดับ และพบว่ามีความถี่ของแรงดันเอาต์พุตเท่ากันที่ดัชนีการมอดูเลตเท่ากัน โดยผลของแรงดันเอาต์พุตในรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตในหนึ่งคาบเวลาของการสวิตช์ที่ได้มีเพียงแรงดันบวกและแรงดันศูนย์ นั่นหมายความว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้มีขั้วเดียวซึ่งเป็นที่มาของการเรียก ยูนิโพลาร์ ดังรูปที่ 2.14 และความถี่ของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่ในการสวิตช์ ดังนั้นสเปกตรัมของฮาร์โมนิกแรงดันที่ได้จึงมีกลุ่มฮาร์โมนิกรอบข้าง (sideband harmonics) อยู่ที่ 2 เท่าของ m_f ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2m_f$, $4m_f$, ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และเมื่อกำหนดความสัมพันธ์ของกลุ่มฮาร์โมนิกรอบข้าง (sideband harmonics) จากสมการ $n = (jm_f \pm k)$ ซึ่งการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์นั้นมีค่า m_f เป็นจำนวน 2 เท่า นั่นหมายความว่ามีความถี่ j ค่าเฉพาะจำนวนเลขคู่ (2, 4, 6,...) ดังนั้นผลของลำดับฮาร์โมนิก k จะมีค่าเป็นจำนวนคี่ (1, 3, 5, ...)

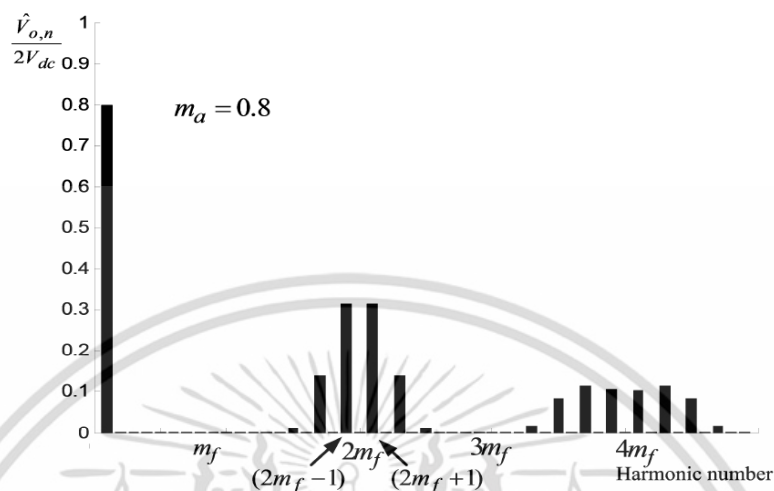


รูปที่ 2.13 การสร้างสัญญาณขับสวิตช์แบบยูนิโพลาร์



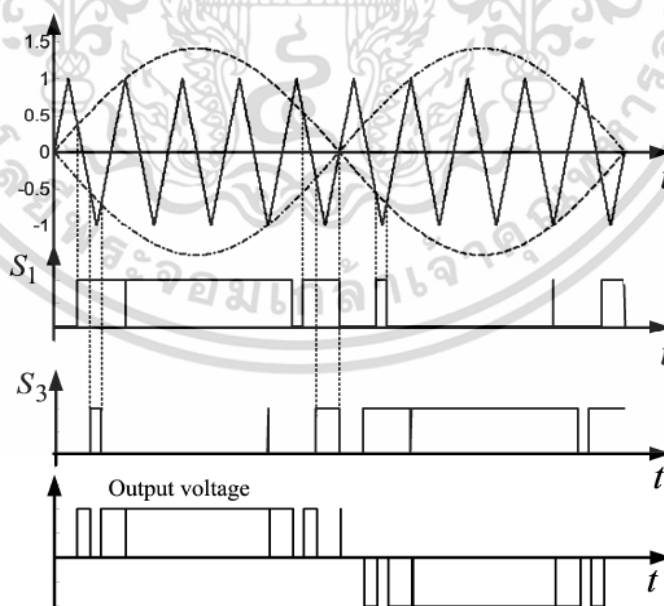
รูปที่ 2.14 รูปคลื่นสัญญาณขับสวิตช์ และแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์สวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



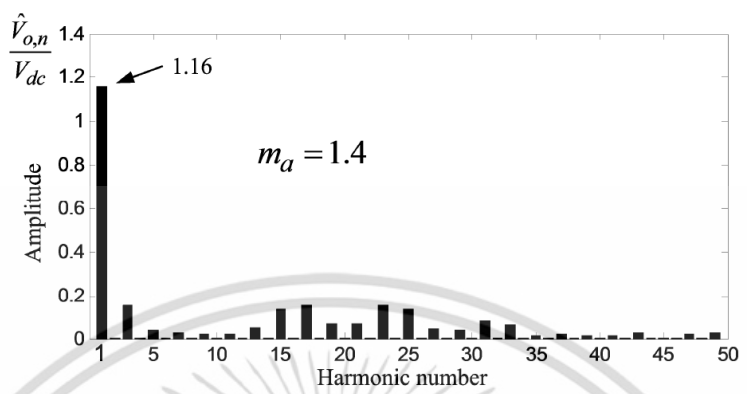
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นสัญญาณสเปกตรัมฮาร์มอนิกของการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์สวิตช์

และในกรณีที่มีการปรับ m_a มากกว่า 1 ดังรูปที่ 2.16 แรงดันเอาต์พุตที่ความถี่มูลฐานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 2.18 ผลที่ตามมาจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกแรงดันที่ลำดับต่ำ (ลำดับที่ 3, 5, 7,...) เกิดขึ้นใกล้กับแรงดันที่ความถี่มูลฐานดังแสดงตามรูปที่ 2.17 ซึ่งเป็นการปรับ m_a ที่ 1.4 (ในขณะที่ปรับ m_a ที่ 0.8 กลุ่มฮาร์มอนิกรอบข้างแรงดันเอาต์พุตจะเกิดที่กลุ่ม $2m_f = 20$)

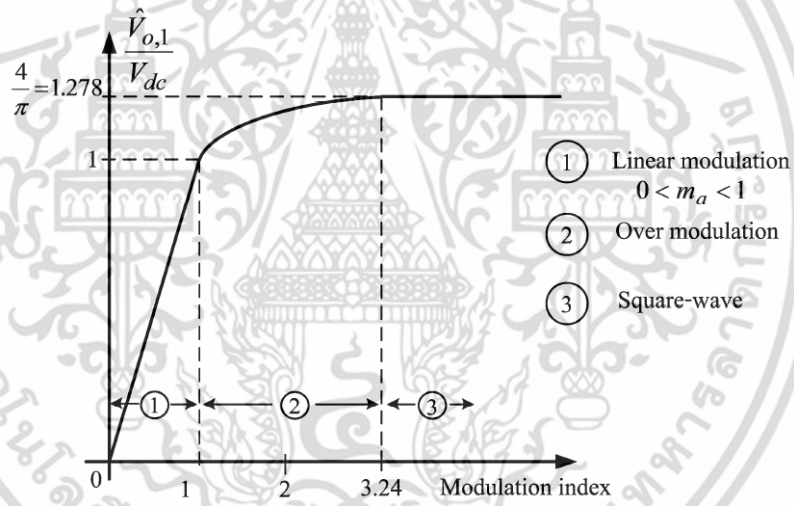


รูปที่ 2.16 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตเมื่อเกิดโอเวอร์มอดูเลชัน (Over modulation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 สเปกตรัมฮาร์โมนิกแรงดันเอาต์พุตเมื่อเกิดโอเวอร์มอดูเลชัน



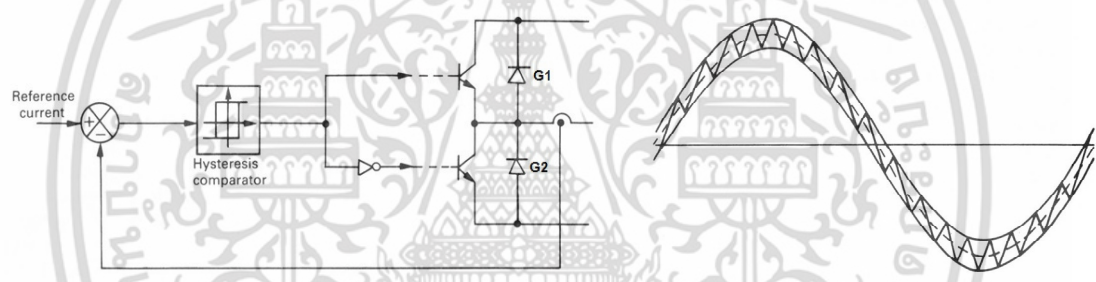
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่มูลฐานกับการปรับดัชนีการมอดูเลต

2.6 การมอดูเลตความกว้างของพัลส์ชนิดควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิสคงที่ (Fixed hysteresis current control PWM)

พีดีบีลิวเอ็ม (PWM) ที่ใช้หลักการควบคุมกระแสเป็นที่นิยมใช้สำหรับอินเวอร์เตอร์ในการประยุกต์ใช้งาน วงจรรอกกำลังไวงาน ตัวขดเคยกำลังเสมือน การเชื่อมต่อโครงข่ายกำลังจากแหล่งพลังงานทดแทน การขับเคลื่อนมอเตอร์เนื่องจากง่ายต่อการสร้างและตอบสนองเร็ว ซึ่งมีหลักการที่สามารถอธิบายได้ดังนี้

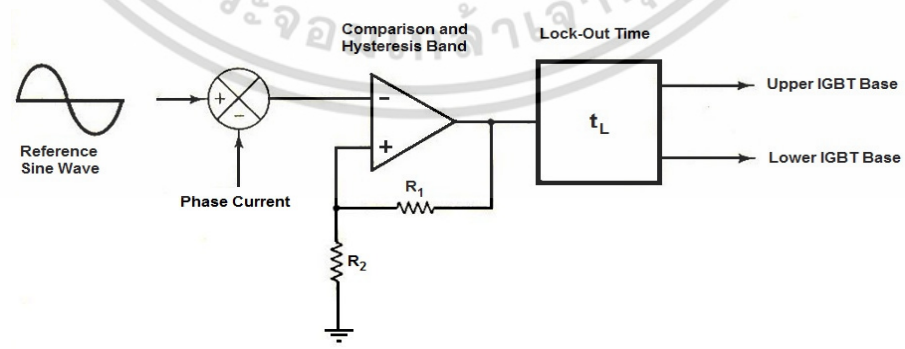
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากรูปที่ 2.19 (ก) เทคนิคการควบคุมการมอดูเลตสัญญาณขับสวิตช์ชนิดควบคุมกระแสฮีสเตอร์รีซิส เป็นส่วนสำคัญในการควบคุมกระแสโดยมีการปรับแต่งและควบคุมโดยอัตโนมัติ ภายใต้ขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสโดยการตรวจจับกระแสจริงมาเปรียบเทียบกับกระแสไซน์อ้างอิง พิจารณาจากรูปที่ 2.19 (ข) เมื่อกระแสจริงเกินขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสที่กำหนดไว้ G1 จะหยุดนำกระแสในขณะที่ G2 จะนำกระแสเป็นผลให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนจาก +Vd เป็น -Vd และกระแสเริ่มลดลงมาจนถึงขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสล่างและจะทำการเปลี่ยนการสวิตช์โดย G1 จะนำกระแสและ G2 หยุดนำกระแส ซึ่งจะเป็นการครอบรอบการสวิตช์ และในช่วงที่ G1 และ G2 เริ่มเปลี่ยนการสวิตช์นั้นจะมีการ Lock-out time เพื่อไม่ให้ G1 และ G2 ทำงานพร้อมกันซึ่งเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรในกิ่งเดียวกัน (shoot through) ขึ้นในวงจรในขณะสับเปลี่ยนการสวิตช์ สำหรับรูปที่ 2.20 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการสร้างการควบคุมกระแสชนิดแกบฮีสเตอร์รีซิสคงที่ ส่วนรูปที่ 2.21 แสดงแกบฮีสเตอร์รีซิสปรับตัวตามความกว้างของรูปคลื่นไซน์อ้างอิง [30]



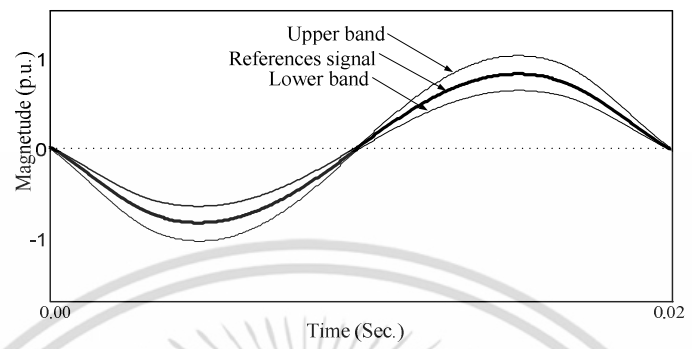
(ก) บล็อกวงจรควบคุมและวงจรถูกำลัง (ข) กระแสจริงติดตามกระแสอ้างอิงภายในขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส

รูปที่ 2.19 เทคนิคการควบคุมการมอดูเลตสัญญาณขับสวิตช์



รูปที่ 2.20 Block Diagram ของการควบคุมการมอดูเลตความกว้างของพัลส์แกบฮีสเตอร์รีซิสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

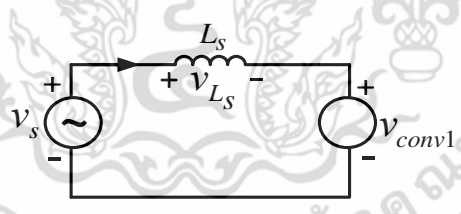


รูปที่ 2.21 ขอบเขตแถบฮีสเตอร์รีซิสปรับตัว

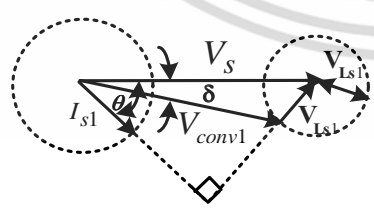
จากรายละเอียดของหลักการของการควบคุมกระแสชนิดแถบฮีสเตอร์รีซิสที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจะได้อธิบายอย่างละเอียดต่อไปในบทที่ 3

2.7 ทฤษฎีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างโครงข่ายไฟฟ้าและวงจรแปลงผันกำลัง [31]

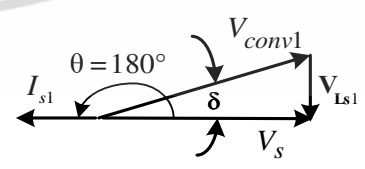
อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส จะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงที่ป้อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสไปยังระบบโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส โดยเขียนวงจรสมมูล และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 2.22



(ก) วงจรสมมูลของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า



(ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรมโดยทั่วไปของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า



(ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรมในโหมดอินเวอร์ตติ้ง ซึ่งค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง

รูปที่ 2.22 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างโครงข่ายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.22 (ก) พิจารณาโดยใช้ทฤษฎีกฎแรงดันของเคอร์ชอฟสามารถเขียนสมการแรงดันของโครงข่ายไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2.23) และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำระหว่างโครงข่ายไฟฟ้าและคอนเวอร์เตอร์ได้ดังสมการที่ (2.24)

$$v_s = v_{conv} + v_{L_s} \quad (2.23)$$

$$v_{L_s} = L_s \frac{di_s}{dt} \quad (2.24)$$

และจากแผนภาพเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.22 (ข) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{L_{s1}} \cos \theta = \omega L_s I_{s1} \cos \theta = V_{conv1} \sin \delta \quad (2.25)$$

$$V_{L_{s1}} \sin \theta = \omega L_s I_{s1} \sin \theta = V_s - V_{conv1} \cos \delta \quad (2.26)$$

และจากรูปที่ 2.22 (ก) การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนจากคอนเวอร์เตอร์ไปยังระบบโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส สามารถแสดงดังในสมการที่ (2.27) และ (2.28)

$$P = V_s I_{s1} \cos \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left(\frac{V_{conv1}}{V_s} \sin \delta \right) \quad (2.27)$$

$$Q = V_s I_{s1} \sin \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left(1 - \frac{V_{conv1}}{V_s} \cos \delta \right) \quad (2.28)$$

และสามารถเขียนสมการหาค่ากระแสที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental Current) ได้ดังสมการที่ (2.29)

$$I_{s1} = \frac{V_s - V_{conv1}}{j\omega L_s} \quad (2.29)$$

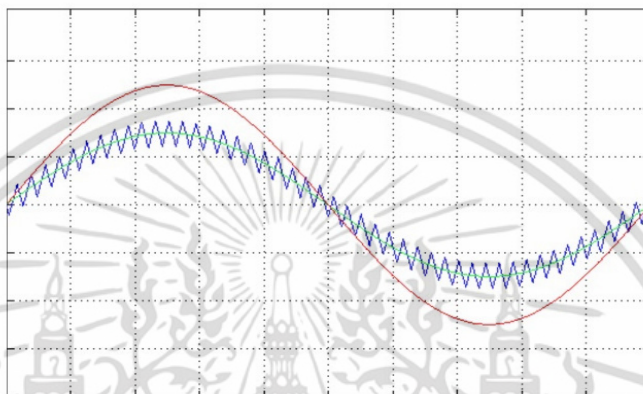
เมื่อกำหนดให้

I_{s1} คือ กระแสที่ความถี่มูลฐานของระบบโครงข่ายไฟฟ้า

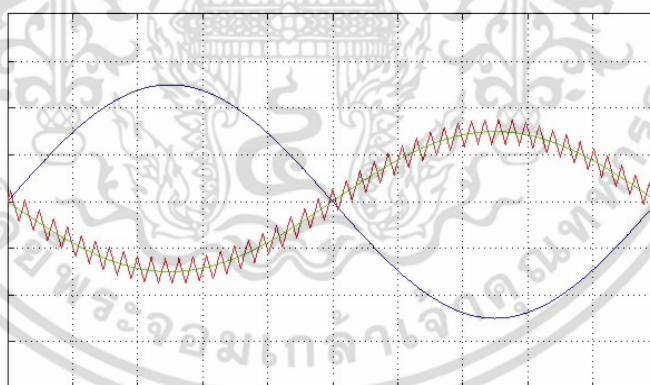
L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำระหว่างระบบโครงข่ายไฟฟ้าและคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถเขียนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าโครงข่าย (v_s) และกระแสโครงข่าย (i_s) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังทำงานในโหมดเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์ในกรณีเฟสตรงกัน (In-phase) และตรงกันข้าม (Out-of phase) ในสถานะไม่มีการส่งถ่ายกำลังเสมือน แสดงได้ดังรูปที่ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ



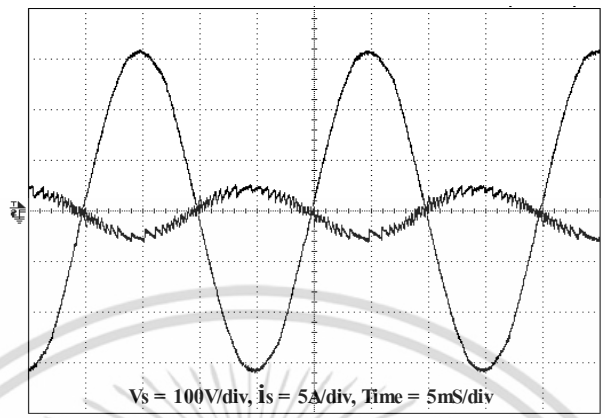
รูปที่ 2.23 แรงดันและกระแสโครงข่ายเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดการทำงานเรียงกระแส (rectification mode) เมื่อ $\theta = 0^\circ$



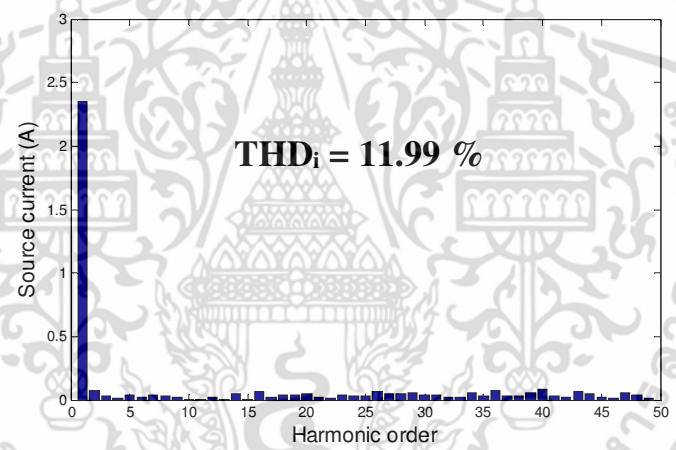
รูปที่ 2.24 แรงดันและกระแสโครงข่ายเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ (inversion mode) เมื่อ $\theta = 180^\circ$ สอดคล้องกับเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.22

พิจารณาจากรูปที่ 2.25 เป็นตัวอย่างลักษณะรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟสและสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่มีความผิดเพี้ยนรวมเท่ากับ 11.99 % ดังรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แรงดันและกระแสโครงข่ายไฟฟ้า



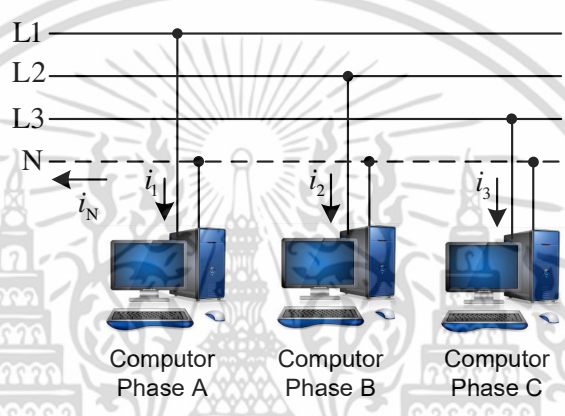
รูปที่ 2.26 สเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่าย

2.8 โหลดไม่เชิงเส้นหนึ่งเฟส

โหลดไม่เชิงเส้นหนึ่งเฟสโดยทั่วไปมักเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น สวิตชิงเพาเวอร์ ซัพพลาย ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เต้าหุงต้ม เหมียวนา บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้จะสร้างกระแสฮาร์มอนิกที่มีผลต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นปัญหาและไม่ต้องการของผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้า เนื่องจากทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องจักรกลไฟฟ้าส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรกลเหล่านี้ลดลง และเกิดความร้อนสูงหรือภาระเกินของอุปกรณ์ไฟฟ้า โหลดไม่เชิงเส้นจำพวกคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะหรือพกพา ส่วนมากจะใช้หลักการของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอดซึ่งเป็นวงจรเรียงกระแส

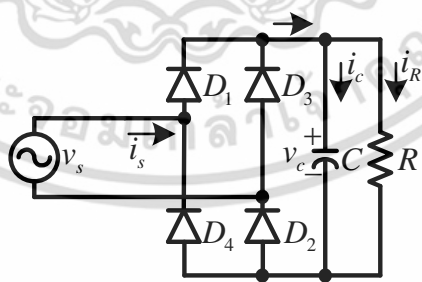
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านหน้าของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายก่อนนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์ภายในต่างๆ หากนำมาต่อใช้งานกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ในอาคารที่อยู่อาศัยหรือสำนักงานมักก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่คอมพิวเตอร์เชื่อมต่ออยู่ได้ เช่น การนำคอมพิวเตอร์ 1 เฟส มาต่อใช้งานในระบบไฟฟ้า โดยต่อกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ดังรูปที่ 2.27 จะก่อให้เกิดกระแสไหลย้อนในสายนิวทรัล ผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากโหลดไม่เชิงเส้นเฟสเดียวในระบบ 3 เฟส 4 สาย ทำให้การออกแบบระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องออกแบบขนาดของสายนิวทรัลที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น



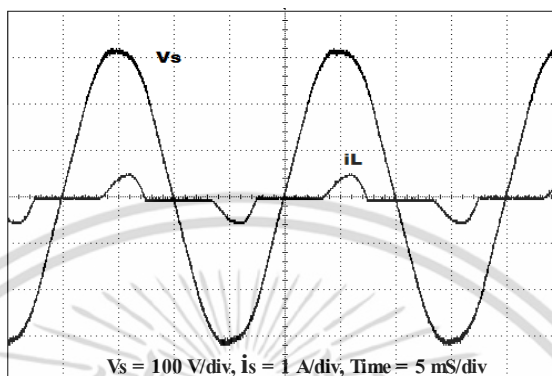
รูปที่ 2.27 การนำคอมพิวเตอร์ 1 เฟสใช้งานในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย

ในทางปฏิบัติจะพบว่าส่วนหน้าของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายจะเป็นวงจรเรียงกระแสสามารถแสดงได้รูปที่ 2.28 และมีรูปคลื่นกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งได้จากการวัดกระแสไหลผ่านโหลดที่เป็นคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.28 วงจรเรียงกระแสชนิดไดโอดฟูลบริดจ์ (diode full bridge rectifier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 แรงดันโครงข่ายไฟฟ้า (V_s) และกระแสที่ไหลผ่านคอมพิวเตอร์ (i_L)

จากที่กล่าวมาข้างต้นหากรูปคลื่นกระแสอินพุตไม่เป็นรูปไซน์ (Non-sinusoidal periodic) ที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะใช้ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์อธิบายคุณลักษณะ ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

เมื่อกำหนดให้ฟังก์ชันที่เป็นคาบใดๆ สามารถกระจายให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่มีความถี่ต่างๆ เป็นฟังก์ชันคาบโดยเขียนแทนด้วย $f(t)$ ดังสมการที่ 2.30

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.30)$$

เมื่อกำหนดให้

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (2.31)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2.32)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.31) – (2.33) เมื่อ a_0 คือ ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นไซน์ a_n และ b_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบไซน์และโคไซน์ ตามลำดับ เมื่อนำสมการที่ 2.32 และสมการที่ 2.33 มารวมสมการทางคณิตศาสตร์จะได้

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n \cos(n\omega_0 t) + \theta_n] \quad (2.34)$$

จากสมการที่ 2.34 เมื่อกำหนดให้

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{-b_n}{a_n} \right)$$

สำหรับกระแสในวงจรรูปที่ 2.28 และรูปคลื่นกระแสในรูป 2.29 กระแสสามารถเขียนอยู่ในอนุกรมฟูเรียร์ ได้ดังสมการที่ 2.35

$$I_L = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} C_n \sin n(\omega t - \phi_1) \quad (2.35)$$

เมื่อ C_n คือ ค่ายอดสูงสุดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกอันดับที่ n

ϕ_1 คือ มุมระหว่างแรงดันโครงข่ายไฟฟ้าและกระแสมูลฐานของโหลด

(Fundamental Load Current)

และถ้าพิจารณากระแส i_s ที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ ดังนั้นตัวประกอบความผิดเพี้ยน (Distortion factor) [32] จะได้ดังสมการที่ 2.36

$$DF = \frac{I_{s1}}{I_s} = \frac{I_{s1}}{\sqrt{I_{s1}^2 + \sum_{m=1,2,3,\dots}^{\infty} I_{sm}^2}} \quad (2.36)$$

เมื่อกำหนดให้

I_{s1} คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสมูลฐาน (*rms value of fundamental current*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_s คือ กระแสอาร์เอ็มเอส

สำหรับ ตัวประกอบการขจัด (DPF, displacement power factor) นิยามได้โดย DPF คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยต่อผลคูณของค่า *rms* (root mean square) ของแรงดันและกระแสมูลฐาน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.37

$$DPF = \frac{P_1}{V_s I_{s1}} = \frac{V_s I_{s1} \cos \phi}{V_s I_{s1}} = \cos \phi \quad (2.37)$$

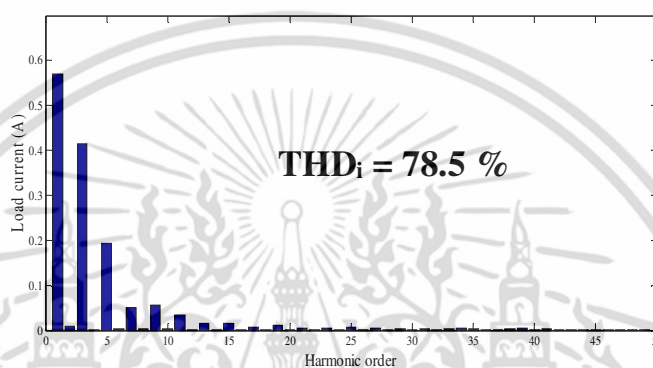
สำหรับตัวประกอบกำลังของโครงข่ายไฟฟ้า (PF, power factor) คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยต่อผลคูณของค่า *rms* (root mean square) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

$$\begin{aligned} PF &= \frac{P_1}{V_s \sqrt{I_{s1}^2 + \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} I_{sn}^2}} \\ &= \frac{V_s I_{s1} \cos \phi}{V_s \sqrt{I_{s1}^2 + \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} I_{sn}^2}} \\ &= \cos \phi \frac{I_{s1}}{\sqrt{I_{s1}^2 + \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} I_{sn}^2}} = DF \times DPF \end{aligned} \quad (2.38)$$

เนื่องจากรูปวงจรถ 2.28 มีความสำคัญมากสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านพักอาศัยและการประยุกต์ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมกำลังต่ำซึ่งปกติต่ำกว่า 10 kW การวิเคราะห์ของการกระเพื่อมกระแสจากการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้ามีความจำเป็น ถ้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีฮาร์มอนิกสูงจะทำให้ตัวประกอบกำลังทางด้านโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าต่ำลง นอกจากนี้ตัวประกอบกำลังขจัดจะขึ้นอยู่กับ การเลื่อนเฟสของกระแสมูลฐาน (Fundamental Current) จากแรงดันโครงข่ายไฟฟ้า ถ้ายิ่งเลื่อนเฟสมากส่งผล DPF ต่ำลง เช่นการปรับมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ของโหลดขับเคลื่อนมอเตอร์ส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังต่ำลงตามสมการ (2.38) อย่างไรก็ตามปริมาณคุณภาพกำลังไฟฟ้าเหล่านี้สามารถวัดได้จาก เครื่องมือวัดวิเคราะห์กำลังงาน (Power analyzer)

จะเห็นได้ว่าจากสมการที่ 2.34 สามารถนำมาวิเคราะห์หองค์ประกอบฮาร์มอนิกของสัญญาณรูปคลื่นกระแสอินพุตทางด้านแหล่งจ่ายของโครงข่ายไฟฟ้าได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้คำสั่ง FFT ที่มีใน

MATLAB/Simulink นำมาใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยทำการเก็บไฟล์ข้อมูลจากดิจิตอล ออสซิลโลสโคปในรูปแบบไฟล์ ASCII จากนั้นนำข้อมูลไปใช้ใน MATLAB/Simulink และสามารถพล็อต สเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดไม่เชิงเส้น (คอมพิวเตอร์) จำนวน 50 อันดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าลำดับ ฮาร์มอนิกเป็นเลขคี่ (1,3,5,...) และอยู่ลำดับต่ำดังแสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่งมีความผิดเพี้ยนรวม (THDi) เท่ากับ 78.5 %

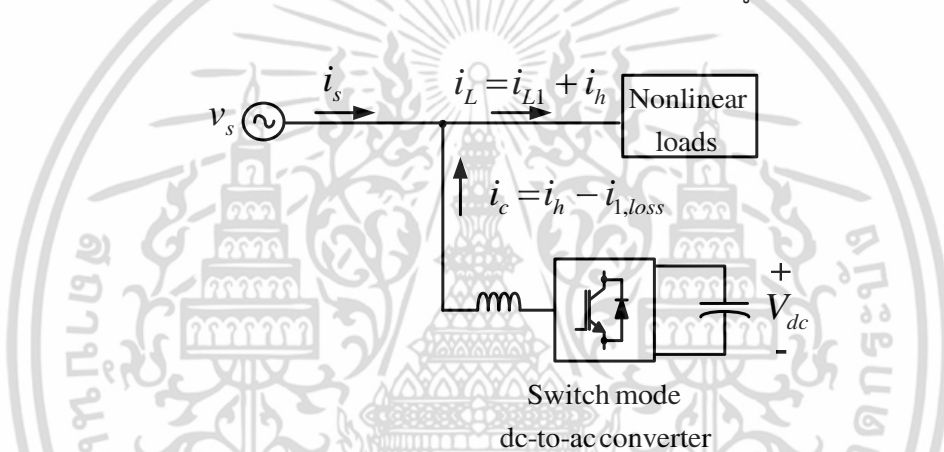


รูปที่ 2.30 สเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลผ่านคอมพิวเตอร์

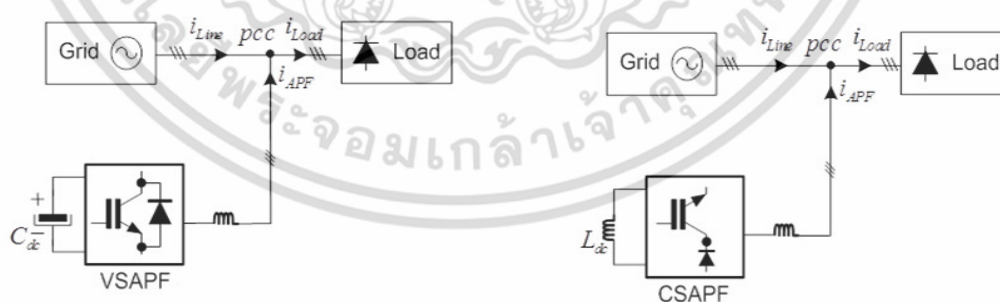
2.9 วงจรกรองไวงาน (Active filter) [31]

จากหัวข้อที่ผ่านมา โหลดไม่เชิงเส้นก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกและส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังต่อจุดต่อ ร่วม (PCC, point of common coupling) ของโหลดอื่น ดังนั้นการที่จะลดทอนหรือกำจัดจำเป็นต้องใช้ วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ (passive) ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่เลือกอันดับ ฮาร์มอนิกที่จะกำจัด เช่น โหลดไม่เชิงเส้นในระบบสามเฟสจะเลือกกำจัดฮาร์มอนิกที่จำเป็น ในลำดับที่ 5 และลำดับที่ 7 ซึ่งเป็นองค์ประกอบฮาร์มอนิกขนาดสูง และในระบบหนึ่งเฟสจะเลือกกำจัดฮาร์มอนิกที่ เป็นลำดับที่ 3 และลำดับที่ 5 หรือถ้าใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกไวงาน (Active power filter) จะสามารถ กำจัดทุกลำดับก็ได้หรือจะใช้แบบผสม (Hybrid) ที่ใช้ทั้งพาสซีฟและวงจรกรองไวงาน การใช้วงจรกรอง แบบพาสซีฟซึ่งราคาจะถูกจะต้องรู้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่จะนำไปต่อเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด เรโซแนนซ์ เมื่อความถี่ของระบบเท่ากับที่ความถี่ของฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดการขยายของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ฮาร์มอนิกลำดับนั้น ส่งผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายหรือพังได้ ส่วนวงจรกรองไวงาน จะใช้อินเวอร์เตอร์ซึ่งมีราคาแพงจะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดเรโซแนนซ์ ติดตั้งง่ายสามารถเพิ่มพิกัดกำลัง ได้โดยต่อขนานเพิ่มเข้าไปโดยไม่จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์ของระบบที่จะนำไปต่อเพิ่ม พิจารณาจากรูปที่ 2.31 แสดงไดอะแกรมหน้าที่ของวงจรกรองไวงาน กระแสที่ถูกจ่ายไปยังโหลดไม่เชิงเส้นประกอบด้วย องค์ประกอบความถี่มูลฐาน i_L และองค์ประกอบผิดเพี้ยนหรือฮาร์มอนิก $i_{L,distortion}$ กระแสโหลดจะถูก

ตรวจจับและกรองเพื่อให้ได้สัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับ $i_{L,distortion}$ ภายใต้การควบคุมกระแสจะทำให้คอนเวอร์เตอร์สวิตซ์โหมด ดีซี ทู เอซี (switch-mode-dc-to-ac converter) จ่ายกระแส $i_{L,distortion}$ ไปยังโครงข่ายไฟฟ้า ดังนั้นในกรณีอุดมคติกระแสฮาร์มอนิกของโครงข่ายจะถูกกำจัดไป ในส่วนไฟฟ้ากระแสตรงของคอนเวอร์เตอร์ต้องการตัวเก็บประจุที่มีค่าต่ำที่สุดเพราะว่าแรงดันไฟตรงที่คร่อมตัวเก็บประจุจะถูกควบคุมรักษาไว้ให้คงที่โดยคอนเวอร์เตอร์มีการส่งถ่ายกำลังจริงจากโครงข่ายไฟฟ้าไปชดเชยการสูญเสียโดยการดึง $i_{L,loss}$ วงจรกรองไวงานได้ถูกศึกษาเป็นเวลาช้านาน ปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์สวิตซ์ที่ทนกำลังได้สูง จึงมีการพิจารณาอย่างจริงจังในรูปแบบผสม (Hybrid filter topologies) ดังในรูปที่ 2.32 รูปแบบของวงจรไวงานสำหรับแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.31 ไดอะแกรมไลน์เดี่ยว (one-line diagram) ของวงจรกรองไวงาน

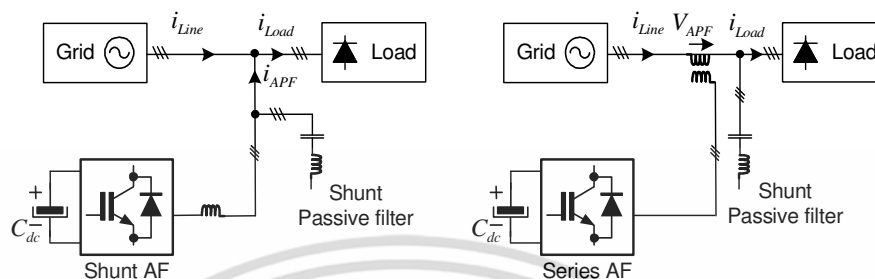


วงจรกรองชนิดจ่ายแรงดันไฟฟ้า

วงจรกรองชนิดจ่ายกระแสไฟฟ้า

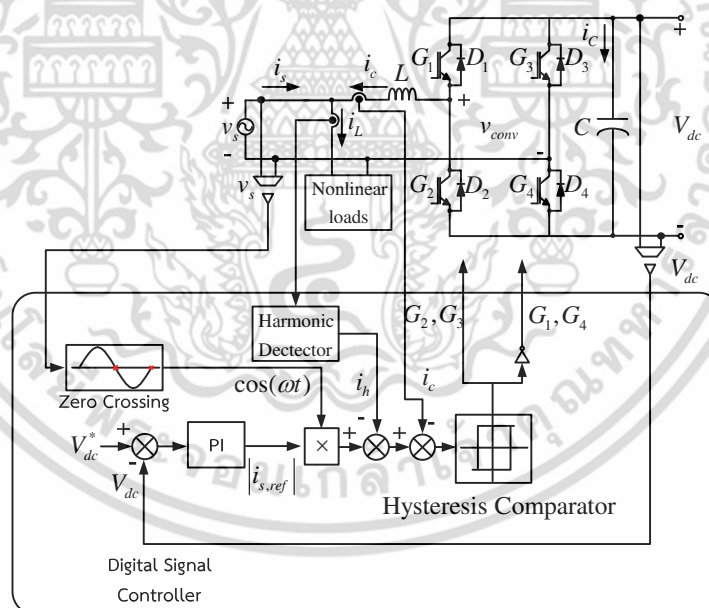
รูปที่ 2.32 รูปแบบของวงจรไวงานชนิดแหล่งจ่ายแรงดันและกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 รูปแบบผสมของวงจรพาสซีฟและวงจรไวงาน

สำหรับตัวอย่างวงจรกรองไวงานหนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.34 จะมีการใช้ซิงโครไนซ์โดยใช้ Zero crossing แทนการใช้เฟสล็อกคัลป์มีอุปกรณ์รักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ มีส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกและการควบคุมกระแสโดยใช้แถบฮิสเตอร์รีซิส

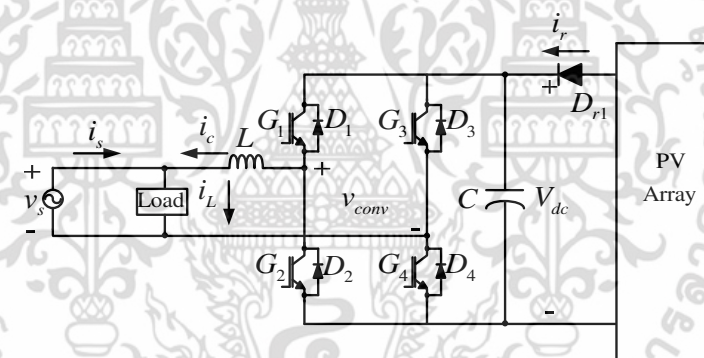


รูป 2.34 วงจรไวงานหนึ่งเฟสที่สอดคล้องกับรูปที่ 2.31

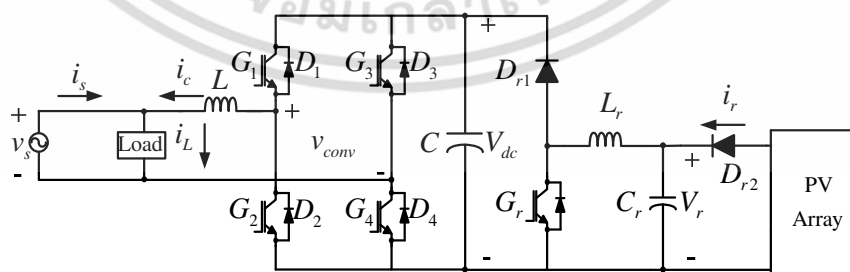
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 อินเวอร์เตอร์สำหรับเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้า

อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าจะทำหน้าที่ส่งพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า โดยทั่วไปจะแบ่งเป็นหนึ่งชั้นและสองชั้นดังรูปที่ 2.35 และ 2.36 ตามลำดับ รูปที่ 2.37 และ 2.38 จะแสดงระบบควบคุมที่ใช้วงจรกำลังสองชั้น วงจรกำลังชั้นแรกติดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยจะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงที่ต้องการปกติสูงกว่าค่ายอด (Peak Voltage) ของแรงดันโครงข่ายไฟฟ้า [31] ให้คงที่ โดยควบคุมวงจรกำลังชั้นที่ 2 คืออินเวอร์เตอร์ที่อยู่ติดกับโครงข่ายไฟฟ้า มีการใช้เฟสล็อกคลุปสำหรับซิงโครไนซ์กับแรงดันโครงข่ายไฟฟ้า การควบคุมอินเวอร์เตอร์จะใช้ PWM ยูนิโพลาร์ ควบคุมการส่งกำลังเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามระบบนี้ประสิทธิภาพของระบบต่ำ แต่มีข้อดีคือจะได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงสูงในขณะที่มีความเข้มแสงน้อย ดังรูปที่ 2.39 นอกจากนี้จะมีการติดตามจุดกำลังสูงสุดและการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจริงยังมีการควบคุมกำลังเสมือนที่จ่ายให้กับโครงข่ายไฟฟ้ารวมอยู่ด้วย

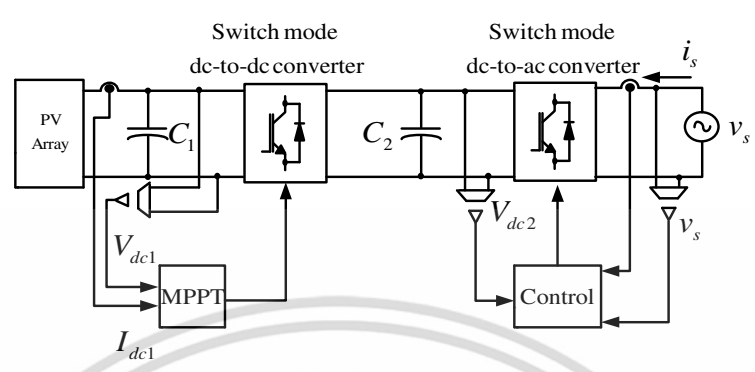


รูปที่ 2.35 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายแบบหนึ่งชั้น

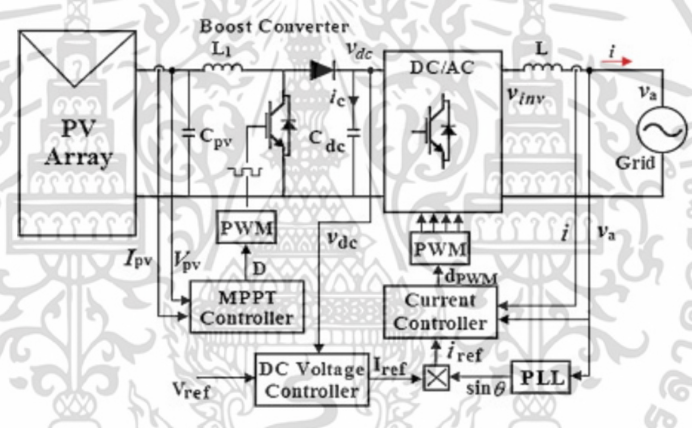


รูปที่ 2.36 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้าแบบสองชั้น

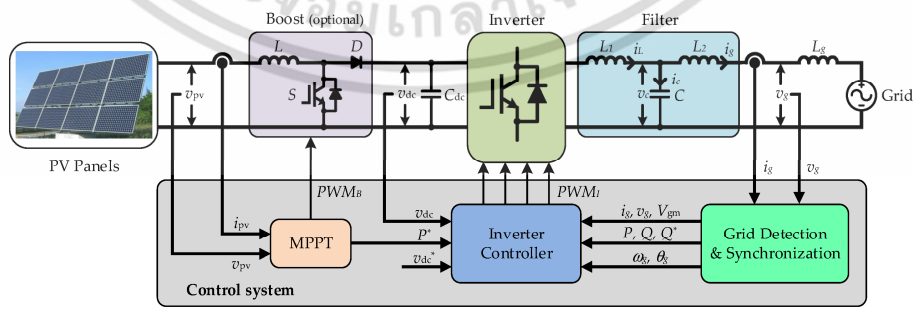
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้าแบบสองชั้นที่มีการติดตามจุดทำงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.38 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้าแบบใช้คอนเวอร์เตอร์สองชั้นโดยใช้จรรยาบรรณสำหรับการติดตามจุดทำงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์



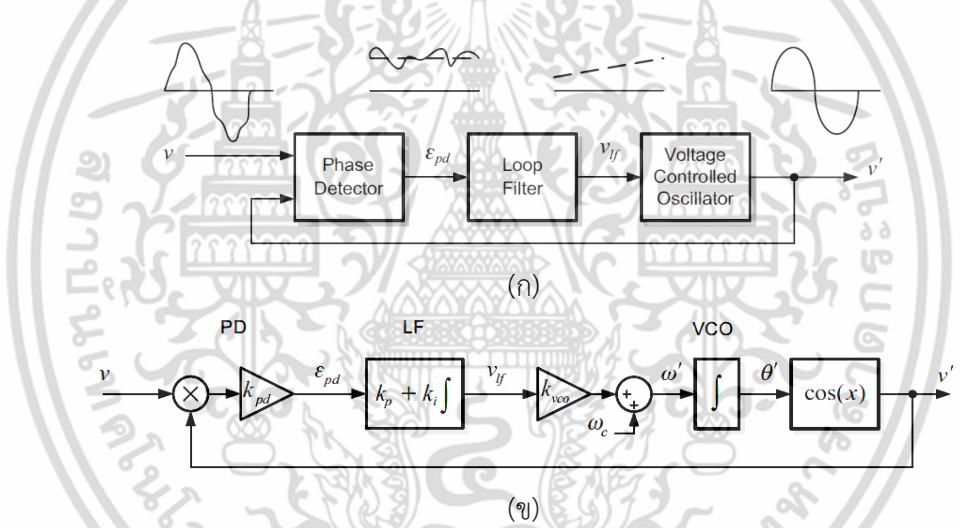
รูปที่ 2.39 ระบบเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการควบคุมการติดตามกำลังสูงสุดและควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ชั้นเดียวที่ทำหน้าที่ได้หลายอย่างกล่าวคือถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากโหลดไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ขณะเดียวกันทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังไวงานเพื่อชดเชยกำลังเสมือนและลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่ง สามารถควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าและติดตามจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

2.11 หลักการเฟสล็อกคูลูป

โครงสร้างพื้นฐานของเฟสล็อกคูลูป (Phase-Locked Loop ; PLL) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.40 (ก) และ (ข) ซึ่งประกอบด้วยพื้นฐาน 3 ส่วนนั้นคือ



รูปที่ 2.40 ไดอะแกรมไลน์เดี่ยว (one-line diagram) ของเฟสล็อกคูลูป

ส่วนที่ 1 ส่วนตรวจจับสัญญาณไซน์ (Phase Detector ;PD) โดยในส่วนนี้จะสร้างสัญญาณเอาต์พุตเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของสัญญาณไซน์ระหว่างสัญญาณอินพุต (v) และสัญญาณที่สร้างขึ้นโดยออสซิลเลเตอร์ภายในของเฟสล็อกคูลูป (v') โดยองค์ประกอบของการตรวจจับสัญญาณไซน์จะมีความถี่สูงและขึ้นอยู่กับความแตกต่างของสัญญาณ

ส่วนที่ 2 ลูปรอง (loop filter ;LF) ในส่วนนี้จะแสดงลักษณะการกรองความถี่ต่ำ (low-pass) เพื่อลดทอนองค์ประกอบความถี่สูงจากทางด้านเอาต์พุตของการตรวจจับสัญญาณไซน์ (PD) โดยปกติแล้วส่วนนี้จะถูกสร้างขึ้นโดยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านตัวควบคุม PI

ส่วนที่ 3 ส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled oscillator ;VCO) สำหรับส่วนนี้จะสร้างสัญญาณไฟสลับ (AC Signal) ออกมาที่มีความถี่สัมพันธ์กับความถี่ที่กำหนด (ω_c) ซึ่งเป็นส่วนของการกรองแรงดันไฟฟ้าที่ส่งผ่านมาจากการกรองความถี่ต่ำ (LF)

พิจารณาจากรูปที่ 2.30 เมื่อกำหนดให้สัญญาณไซน์ (v) มีค่าดังสมการที่ (2.39) นั่นคือ

$$v = V \sin(\theta) = V \sin(\omega t + \phi) \quad (2.39)$$

และสัญญาณที่สร้างโดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้า (VCO) มีค่าเท่ากับ

$$v' = \cos(\theta') = \cos(\omega' t + \phi') \quad (2.40)$$

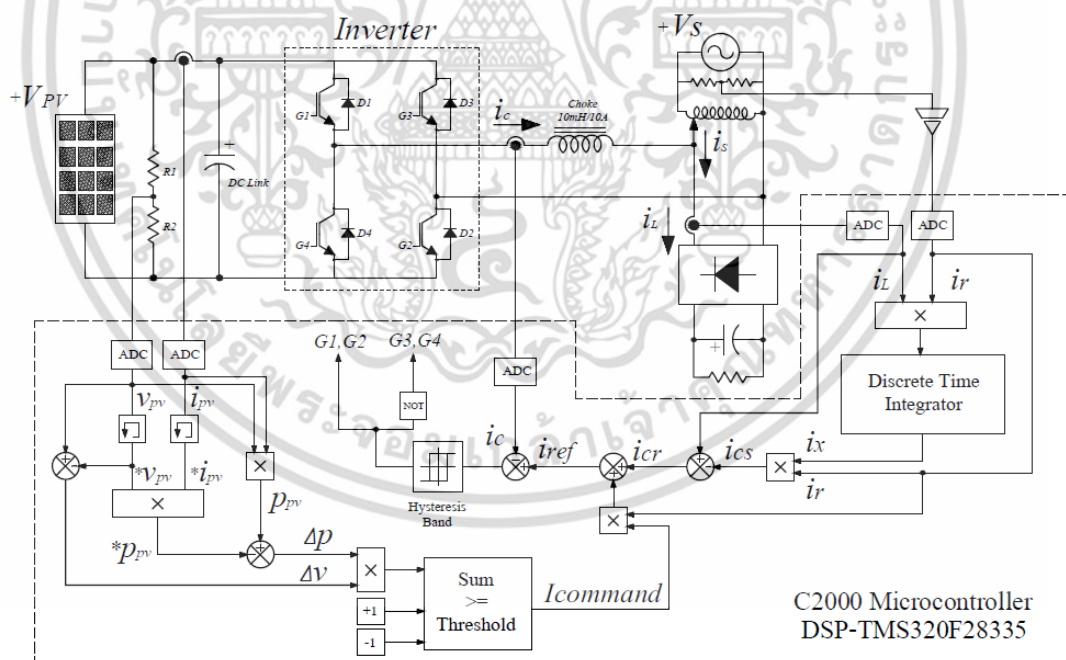
จะได้สัญญาณผิดพลาดของการตรวจจับสัญญาณไซน์ (PD) โดยเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \varepsilon_{pd} &= V k_{pd} \sin(\omega t + \phi) \cos(\omega' t + \phi') \\ &= \frac{V k_{pd}}{2} [\sin((\omega - \omega')t + (\phi - \phi')) + \sin((\omega + \omega')t + (\phi + \phi'))] \end{aligned} \quad (2.41)$$

บทที่ 3

หลักการควบคุมของระบบที่นำเสนอ

บทนี้ผู้วิจัยนำเสนอหลักการควบคุมของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด การคำนวณกระแสฮาร์มอนิก (i_{cr}) เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หากระแสอ้างอิง (i_{ref}) ที่แทนผลรวมของกระแสมูลฐานของคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องการ กระแสรีแอกทีฟ และกระแสกำจัดฮาร์มอนิก นอกจากนี้ยังมีการอธิบายหลักการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้อัลกอริทึม Perturb and observe (P&O) เพื่อควบคุมการเพิ่มหรือลดปริมาณกระแสคำสั่ง ($i_{command}$) ที่แทนขนาดกระแสยอดมูลฐาน (Fundamental peak current) ของคอนเวอร์เตอร์ที่จ่าย โดยเขียนคำสั่งในการประมวลผลสัญญาณด้วยฟังก์ชัน Math Model ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ลงไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP-TMS320F28335 ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



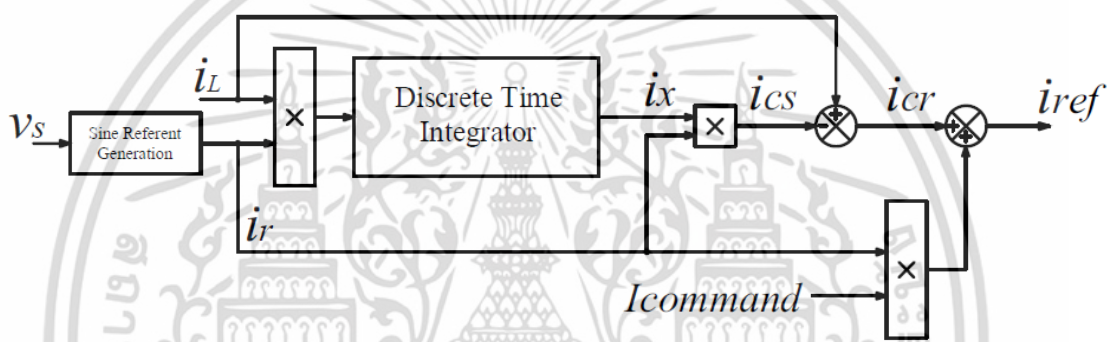
รูปที่ 3.1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 หลักการหาค่ากระแสอ้างอิง

สำหรับการหาค่ากระแสฮาร์มอนิก (i_{cr}) เพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟเพื่อจ่ายให้กับโหลดไม่เชิงเส้น จะใช้หลักการหาค่าแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (3.1)

$$v_s(t) = V_p \sin(\omega t) \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมการหาค่ากระแสอ้างอิง

และจากรูปที่ 3.2 เมื่อพิจารณาจากไดอะแกรมการหาค่ากระแสอ้างอิงโดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์ สามารถเขียนสมการเพื่อหาค่ากระแสของโหลดในสถานะไม่เชิงเส้นได้ดังสมการที่ 3.2

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (3.2)$$

เมื่อกำหนดให้ n เป็นลำดับที่ของฮาร์มอนิก และจากสมการที่ 3.2 เมื่อนำมาพิจารณาด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) ในส่วนความถี่มูลฐานกับรูปคลื่นไซน์ที่เป็นฮาร์มอนิก จะได้

$$i_L(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (3.3)$$

เมื่อกำหนดให้สัญญาณไซน์อ้างอิงมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วย (per unit) ซึ่งมีเฟสตรงกันกับแรงดันโครงข่ายไฟฟ้า สามารถเขียนสมการได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_r(t) = \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

และจากรูปที่ 3.1 ถ้ากำหนดให้สัญญาณไซน์อ้างอิงมีขนาดเป็น 2 เท้า และมีเฟสตรงกันกับ
 โคร่งข่ายไฟฟ้า ($v_s(t)$) คูณกับกระแสจริงที่ไหลต ($i_L(t)$) จะได้

$$p_L(t) = 2 \sin \omega t \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 แก้มการอนุพันธ์เพื่อหาค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้า จะได้

$$\begin{aligned} P_{ave} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_L(t) dt \\ &= \frac{1}{\omega T} \int_0^{\omega T} (2I_1 \sin^2 \omega t \cos \theta_1) d\omega t + \frac{1}{\omega T} \int_0^{\omega T} (2 \sin \omega t \cos \omega t \sin \theta_1) d\omega t \\ &\quad + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{\omega T} \int_0^{\omega T} (2 \sin \omega t I_n \sin(n\omega t + \theta_n)) d\omega t \\ &= I_1 \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้มีค่าเท่ากับ $I_1 \cos \theta_1$ ซึ่งเป็นค่ากระแสสูงสุดของโคร่งข่าย
 ไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า i_x มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} i_x &= \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) \times i_r(t) dt \\ &= \frac{1}{2} I_1 \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (3.7)$$

พิจารณาจากรูปที่ 3.1 ส่วนกระแสจริงของไหลตที่มีความถี่มูลฐานได้มาจากการคูณระหว่าง i_x
 กับ $i_r(t)$ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$i_{cs}(t) = i_x \times i_r(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{2} I_1 \cos \theta_1 \times \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3.3) และ (3.8) สามารถคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิก ได้เป็น

$$i_{cr}(t) = i_L(t) - i_{CS}(t) \quad (3.9)$$

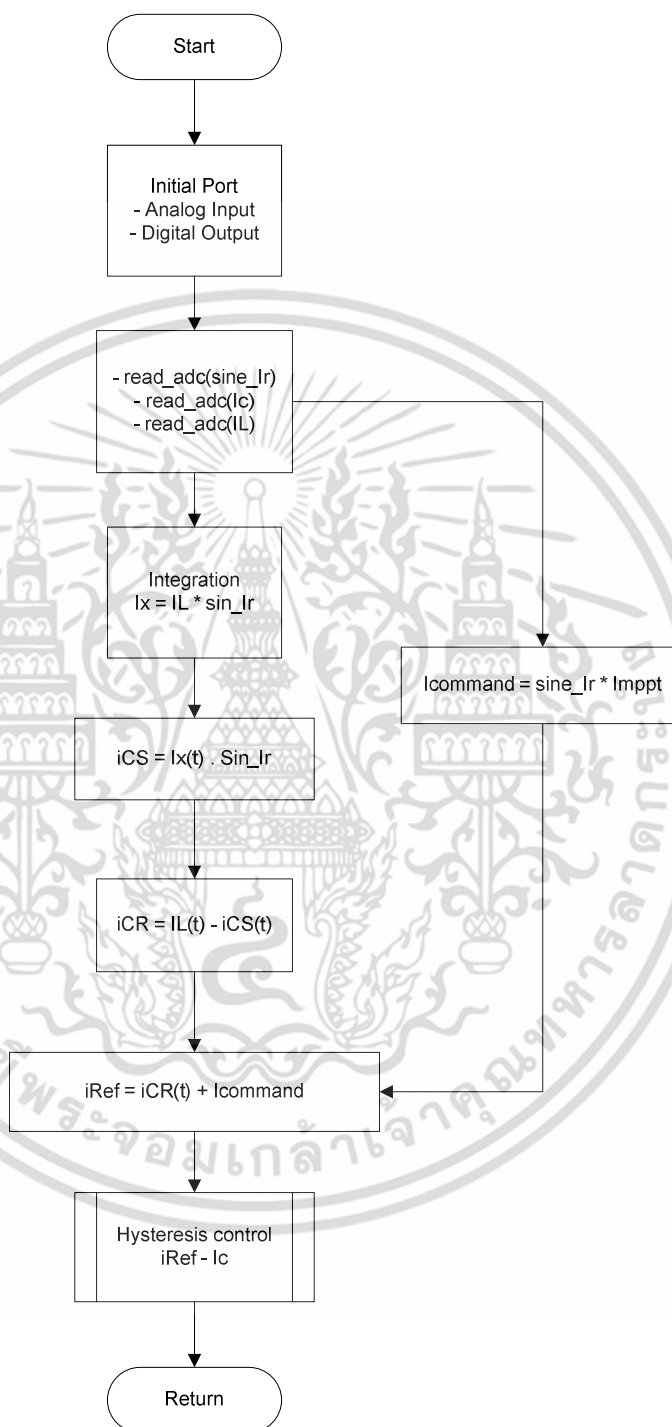
ดังนั้นจะได้

$$i_{cr}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - \frac{1}{2} I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) \quad (3.10)$$

จากสมการที่ 3.10 เมื่อนำมารวมกันเพื่อหาค่ากระแสอ้างอิง (i_{ref}) จะได้

$$\begin{aligned} i_{ref}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - \frac{1}{2} I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) + i_{command} \sin \omega t \quad (3.11) \\ &= \frac{1}{2} I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) + I_1 \sin \theta_1 \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) + i_{command} \sin \omega t \\ &= \left[\frac{1}{2} I_1 \cos \theta_1 + i_{command} \sin \omega t \right] + \left[I_1 \sin \theta_1 \cos \omega t \right] + \left[\sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \right] \quad (3.12) \end{aligned}$$

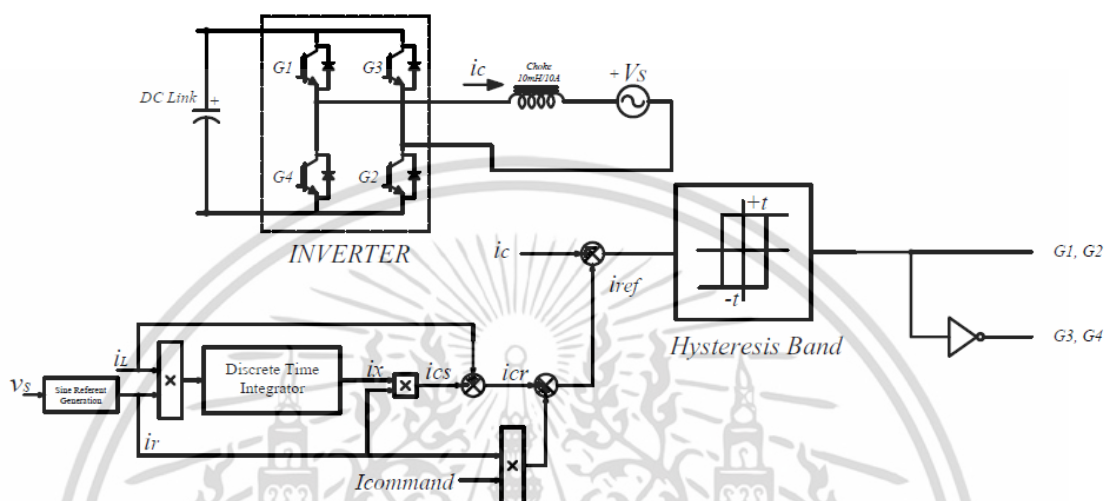
จากสมการที่ 3.11 ($i_{command}$) เป็นปริมาณกระแสสูงสุดที่กำหนดเพื่อให้คอนเวอร์เตอร์จ่าย และจากสมการที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าในเทอมแรกเป็นส่วนของกระแสแทนกำลังไฟฟ้าจริงที่คอนเวอร์เตอร์จ่ายให้กับโหลดและโครงข่ายไฟฟ้า และในเทอมที่สองเป็นส่วนของกระแสรีแอกทีฟ (Reactive Current) สำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ชดเชยให้กับโหลดและในเทอมที่สามเป็นส่วนของกระแสฮาร์มอนิกที่ชดเชยให้กับโหลดไม่เชิงเส้น โดยสามารถเขียนเป็น Flowchart diagram เพื่อหาค่ากระแสอ้างอิงในไมโครโปรเซสเซอร์ TMS320F28335 ตระกูล C2000 ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การหาค่ากระแสอ้างอิงในไมโครโปรเซสเซอร์ TMS320F28335 ตระกูล C2000

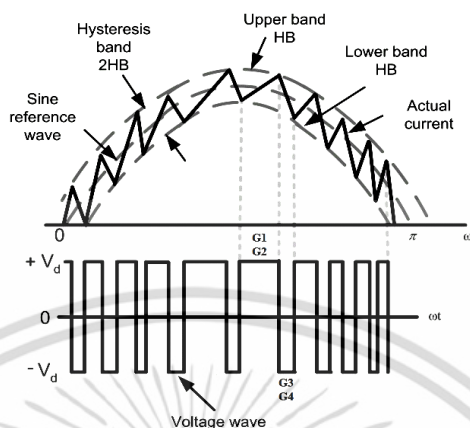
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส



รูปที่ 3.4 การควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส

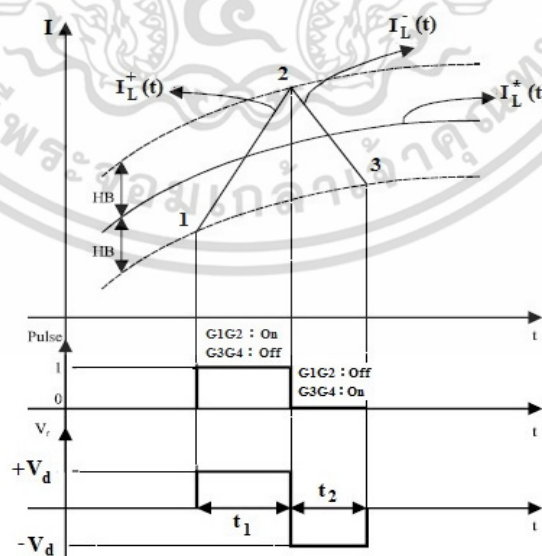
พิจารณาจากรูปที่ 3.4 การควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตของฮีสเตอร์รีซิส โดยทั่วไปจะใช้หลักการนำกระแสอ้างอิงจากหัวข้อตั้งที่กล่าวมาข้างต้นสร้างขอบเขตของฮีสเตอร์รีซิสทางด้านบนด้วยการบวกความกว้างของฮีสเตอร์รีซิสกับปริมาณกระแสอ้างอิง และสร้างขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสด้านล่างด้วยการนำปริมาณกระแสอ้างอิงลบความกว้างของฮีสเตอร์รีซิส ดังรูปที่ 3.5 โดยกำหนดเงื่อนไขให้ปริมาณกระแสอ้างอิงเป็นสัญญาณรูปไซน์ หลังจากนั้นให้นำกระแสจริงมาเปรียบเทียบกับขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสด้านล่าง หากมีค่าเท่ากัน (ปริมาณกระแสจริงถึงขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสด้านล่าง) สัญญาณควบคุมการสวิตช์ G1 และ G2 จะเปลี่ยนสถานะลอจิกเป็น 1 (ON) หากมีค่าไม่เท่ากันจะทำการเปรียบเทียบปริมาณกระแสจริงกับขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสด้านบน ถ้าหากมีค่าเท่ากัน (ปริมาณกระแสจริงถึงขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสด้านบน) สัญญาณสวิตช์ G1 และ G2 จะเปลี่ยนสถานะลอจิกเป็น 0 (OFF) หากไม่เป็นจริงทั้ง 2 เงื่อนไข (กระแสจริงอยู่ในขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส) ให้คงสถานะสัญญาณสวิตช์ G1 และ G2 ไว้ จากกระบวนการตั้งที่กล่าวมาข้างต้นจะได้สัญญาณ PWM เพื่อนำไปควบคุม IGBT ทั้ง 4 ตัว ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 หลักการควบคุมกระแสสัญญาณภายใต้ขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส

พิจารณาจากรูปที่ 3.5 หลักการควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตของฮีสเตอร์รีซิสในอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส จะมีหลักการ ดังนี้

เมื่อปริมาณกระแสจริงไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยกำหนดให้เป็น i_L เริ่มต้นจากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 ปริมาณกระแสจริงจะเคลื่อนที่จากขอบเขตด้านล่างไปยังขอบเขตด้านบน ส่งผลให้ความชันของปริมาณกระแสจริงเพิ่มขึ้นจากตำแหน่งที่ 2 ไปยังตำแหน่งที่ 3 ซึ่งปริมาณกระแสจริงจะเคลื่อนที่จากขอบเขตด้านบนมายังขอบเขตด้านล่าง ส่งผลให้ความชันของปริมาณกระแสจริงลดลง และสามารถเขียนสมการที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t_1 และ t_2 ของ IGBT ทำการสวิตช์ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 3.6 สัญญาณของปริมาณกระแสจริงภายใต้ขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสถานะที่ G1,G2 นำกระแส (turn on) และสถานะ G3,G4 ไม่นำกระแส (turn off) ที่เวลา t_1 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 3.17

$$-V_{dc} + V_L + v_S = 0$$

$$V_L = V_{dc} - v_S$$

$$L \frac{di_L^+}{dt} = V_{dc} - v_S \quad (3.12)$$

ในสถานะ G3,G4 นำกระแส (turn on) และ G1,G ไม่นำกระแส (turn off) ที่เวลา t_2 จะได้สมการเป็น

$$L \frac{di_L^-}{dt} = -V_{dc} + v_S \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.12 และสมการที่ 3.13 เมื่อนำสมการทั้งสองมารวมกันจะได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{di_L^+}{dt} + \frac{di_L^-}{dt} = 0 \quad (3.14)$$

และเมื่อมาพิจารณารูปที่ 3.5 ที่เวลา t ใด ๆ ค่าความชันของกระแสอ้างอิง (i_L^*) จะมีค่าน้อยมาก ซึ่งเห็นได้ว่ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเปรียบเทียบกับความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ซึ่งมีความชันมากกว่า

ดังนั้นเมื่อนำหลักการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ทฤษฎีของตรีโกณมิติช่วยในการวิเคราะห์สามารถเขียนสมการจากรูปที่ 3.5 ได้เป็น

$$\frac{di_L^+}{dt} t_1 - \frac{di_L^*}{dt} t_1 = 2HB \quad (3.15)$$

$$\frac{di_L^-}{dt} t_2 - \frac{di_L^*}{dt} t_2 = -2HB \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_2 + t_1 = T_C = \frac{1}{f_c} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ 3.17 เมื่อ t_1 และ t_2 เป็นช่วงเวลาในการสวิตช์ของ IGBT และ f_c เป็นความถี่ในการสวิตช์ซึ่ง ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ 3.18 และ 3.19 มารวมกันแล้วแทนลงในสมการที่ 3.20 จะได้

$$t_1 \frac{di_L^+}{dt} + t_2 \frac{di_L^-}{dt} (t_1 + t_2) = 0 \quad (3.18)$$

$$t_1 \frac{di_L^+}{dt} + t_2 \frac{di_L^-}{dt} - \frac{1}{f_c} \frac{di_L^*}{dt} = 0 \quad (3.19)$$

และเมื่อนำสมการที่ 3.20 ลบสมการที่ 3.21 จะได้สมการใหม่เป็น

$$t_1 \frac{di_L^+}{dt} - t_2 \frac{di_L^-}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{di_L^*}{dt} = 4HB \quad (3.20)$$

จากสมการที่ 3.19 แทนลงในสมการที่ 3.25 จะได้

$$\frac{di_L^+}{dt} = \frac{di_L^-}{dt}$$

$$4HB = \frac{1}{f_c} \frac{di_L^+}{dt} (t_1 - t_2) \frac{di_L^*}{dt} \quad (3.21)$$

เมื่อนำสมการที่ 3.19 แทนลงในสมการที่ 3.26 จะได้

$$(t_1 - t_2) = - \frac{\frac{di_L^*}{dt}}{f_c \frac{di_L^+}{dt}} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และนำสมการที่ 3.19 แทนลงในสมการที่ 3.27 จะได้

$$4HB = \frac{1}{f_c} \left[\frac{di_L^+}{dt} - \frac{\left(\frac{di_L^*}{dt} \right)^2}{\frac{dt_L^+}{dt}} \right] \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 3.18 แทนลงในสมการที่ 3.28 จะได้

$$\frac{di_L^+}{dt} = \frac{V_{dc} - v_s}{L}$$

$$4HB = \frac{1}{f_c} \left[\frac{V_{dc} - v_s}{L} - \frac{\left(\frac{di_L^*}{dt} \right)^2}{\frac{V_{dc} - v_s}{L}} \right]$$

เมื่อกำหนดให้ $m = \frac{dt_L}{dt}$ คือ ค่าความชันของกระแสอ้างอิง

$$4HB = \frac{1}{f_c} \left[\frac{V_{dc} - v_s}{L} - \frac{m^2}{\frac{V_{dc} - v_s}{L}} \right]$$

$$4HB = \frac{V_{dc} - v_s}{L f_c} \left[1 - \frac{m^2 L^2}{(V_{dc} - v_s)^2} \right]$$

$$HB = \frac{0.25(V_{dc} - v_s)}{L f_c} \left[1 - \frac{m^2 L^2}{(V_{dc} - v_s)^2} \right] \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_c = \frac{0.25(V_{dc} - v_s)}{(HB)L} \left[1 - \frac{m^2 L^2}{(V_{dc} - v_s)^2} \right] \quad (3.25)$$

พิจารณาจากสมการที่ 3.29 แสดงให้เห็นว่าช่วงความถี่ฮีสเตอร์รีซิสซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของการมอดูเลตความถี่ และจากสมการที่ 3.30 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขณะตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุจะมีค่าคงที่ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความถี่ในการสวิตช์ซึ่งสูงสุดจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเหนี่ยวนำและความกว้างของขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส แต่ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะไม่สามารถใช้ตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสที่มีค่าน้อยได้ เพราะจะทำให้ความถี่ในการสวิตช์สูงเกินพิกัดของอุปกรณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์การสวิตช์เสียหาย แต่ในขณะเดียวกันถ้ากำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสมีค่ามาก จะทำให้ผลตอบสนองของการสร้างปริมาณกระแสใช้ระยะเวลามากขึ้น ดังนั้นในการกำหนดขนาดตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสจะต้องเลือกให้เหมาะสมและในขณะเดียวกันความถี่สวิตช์ซึ่ง f_c ยังขึ้นอยู่กับค่าความชันของกระแสอ้างอิง (m) ด้วย ความถี่สวิตช์จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองศาทางไฟฟ้าของสัญญาณกระแสอ้างอิงและสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3.30 สามารถวิเคราะห์หาความถี่สวิตช์สูงสุด เมื่อ $\omega t = 0, \pi$ โดยที่ $i_L = I_m^* \sin \omega t$ ได้ดังสมการที่ 3.31

$$m^2 = \left[\frac{d}{dt} I_m^* \sin \omega t \right]^2 = 0.5 \omega^2 I_m^{*2} (1 + \cos 2\omega t) \quad (3.26)$$

และเมื่อกำหนดให้ $v_s = V_m \sin \omega t$ และทำให้ $v_s = 0$ จะได้ $f_{C\max}$ ดังสมการที่ 3.32

$$f_{C\max} = \frac{0.25(V_{dc})}{(HB)L} \left[1 - \frac{\omega^2 m^2 L^2}{(V_{dc})^2} \right] \quad (3.27)$$

และถ้ากำหนดให้ $\frac{\omega^2 I_m^{*2} L^2}{V_{dc}^2} \ll 1$ สามารถหา $f_{C\max}$ ใหม่ได้ดังสมการที่ 3.33

$$f_{C\max} = \frac{0.25(V_{dc})}{(HB)L} \quad (3.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการที่ 3.34 สามารถหาความถี่สวิตช์ต่ำสุด เมื่อ $\omega t = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ ได้เป็น

$$f_{C \max} = \frac{0.25(V_{dc} - v_s)}{(HB)L} \quad (3.29)$$

เมื่อกำหนดเงื่อนไขใหม่โดยให้ $v_s = V_m \sin \omega t$ และทำให้ $v_s = V_m$ จะได้ $f_{C \max}$ ใหม่ดังสมการที่ 3.35

$$f_{C \min} = \frac{0.25(V_{dc} - v_m)}{(HB)L} \quad (3.30)$$

โดยกำหนดให้

$f_{C \max}$ คือ ความถี่สวิตช์ซึ่งสูงสุด

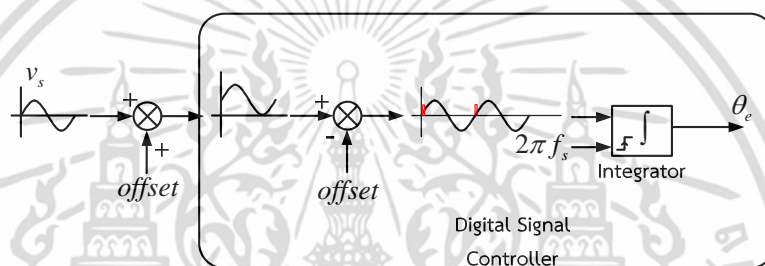
$f_{C \min}$ คือ ความถี่สวิตช์ซึ่งต่ำสุด

จากที่กล่าวมาข้างต้นในการควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซีสให้คงที่ (fix band) หากต้องการออกแบบให้ความถี่สวิตช์สูงสุด $f_{C \max}$ จะขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) กับแรงดันที่โครงข่ายไฟฟ้า (v_s) ซึ่งมีความมากที่สุดที่ $\omega t = 0, \pi$ และความถี่สวิตช์ต่ำสุด $f_{C \min}$ จะมีค่าต่ำสุดที่ $\omega t = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ ในหนึ่งคาบเวลา สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้แถบฮิสเตอร์รีซีสเท่ากับ 0.25 A

3.3 การซิงโครไนซ์แบบง่าย

เนื่องจากการซิงโครไนซ์โดยใช้เฟสล็อกคูลูปเหมาะสำหรับสัญญาณที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมจะมีความซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการซิงโครไนซ์อย่างง่ายโดยใช้การตรวจจับผ่านศูนย์ (zero crossing) ซึ่งเหมาะสำหรับความถี่โครงข่ายไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากค่าปกติไม่มาก หลักการที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 3.7 เริ่มต้นจากการใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากโครงข่ายไฟฟ้าลดทอนให้เป็นสัญญาณแรงดันต่ำลงแล้วเพิ่มออฟเซต (offset) ให้เป็นสัญญาณบวกอย่างเดียวเพื่อให้เหมาะสมแล้วป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์จากนั้นในอัลกอริทึมของไมโครคอนโทรลเลอร์จะลบออฟเซตเพื่อให้เป็นสัญญาณที่มีทั้งซีกบวกและซีกลบของสัญญาณกระแสสลับแล้วมีคำสั่งตรวจจับผ่านศูนย์ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของทุกๆ คาบของคลื่นไซน์แล้วเข้าสู่อินทิเกรเตอร์โดยมีความถี่เชิงมุมที่กำหนดให้เท่ากับความถี่เชิงมุมของโครงข่ายไฟฟ้าเข้าไปคูณทุกๆ การสุ่มสัญญาณ

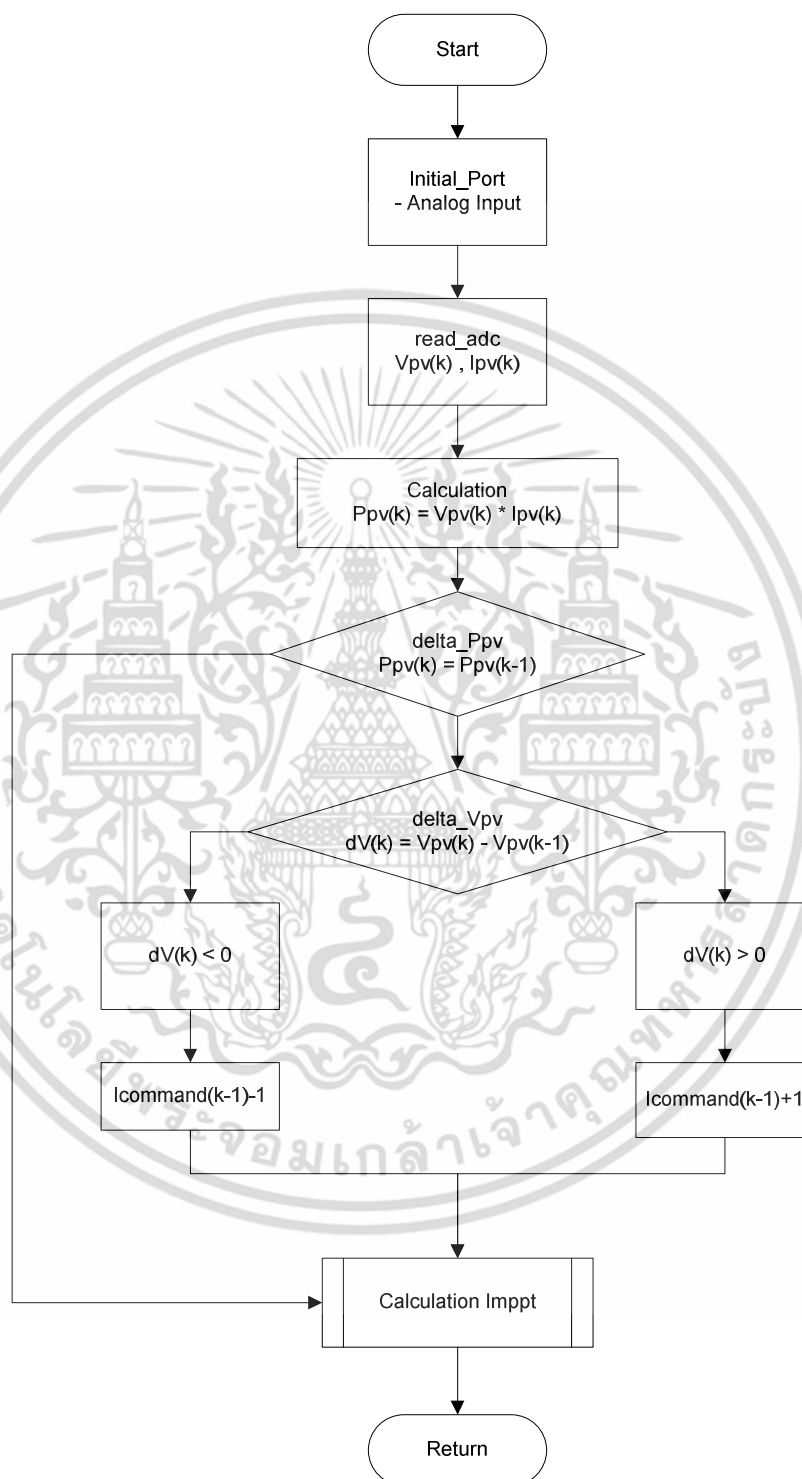
(sampling) ในงานวิจัยนี้จะใช้เวลาในการสุ่มเท่ากับ 100 ไมโครวินาที จะได้เอาต์พุตเป็นตำแหน่งมุมเมื่อมีสัญญาณตรวจจับผ่านศูนย์ถูกตรวจพบอีก ซึ่งหมายถึงหนึ่งคาบจะเกิดการรีเซ็ตเข้าสู่การสร้างคลื่นรูปไซน์รอบต่อไป ตำแหน่งมุมที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการสร้างไซน์อ้างอิงที่สามารถเลื่อนเฟสได้ซึ่งนำไปใช้เป็นเฟสของกระแสอ้างอิง ถ้ามีเฟสตรงกับแรงดันไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแส ตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับหนึ่ง โครงข่ายไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่วงจรเรียงกระแส ถ้าเฟสของไซน์อ้างอิงตรงข้ามกับโครงข่ายไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดอินเวอร์ตติ้ง (inverting mode) ก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าถูกส่งจากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านคอนเวอร์เตอร์สู่โครงข่ายไฟฟ้าตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง ถ้าเฟสของไซน์อ้างอิงนำหน้าทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนจะถูกส่งเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 หลักการชิงโครไนซ์อย่างง่ายโดยใช้การตรวจจับผ่านศูนย์ (zero crossing)

3.4 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้อัลกอริทึม Perturb and observe

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผู้วิจัยนำมาใช้มีอยู่ด้วยกันหลากหลายรูปแบบ ซึ่งในแต่ละรูปแบบมีหลักการเขียนอัลกอริทึมแตกต่างกันออกไป แต่ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้หลักการของ Perturb and observe (P&O) ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งหลักการนี้จะใช้วิธีการโดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ด้วยการปรับขนาดความกว้าง (Amplitude) ของสัญญาณอ้างอิงในการมอดูเลต ซึ่งใช้หลักการนำค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามาหาค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ฟังก์ชันการคูณเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะเวลานั้น (Real-Time) และทำการหาค่าผลต่างของความคาดเคลื่อนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะเวลานั้นกับกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาก่อนหน้า โดยผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าจำนวนเต็มศูนย์ แล้วนำเงื่อนไขของผลลัพธ์ที่ได้ไปเพิ่มหรือลดขนาดความกว้างของกระแสอ้างอิง เพื่อการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนเข้าสู่ระบบเมื่อปริมาณความเข้มแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ และยังสามารถป้องกันการเกิดโอเวอร์มอดูเลตของระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ โดยเขียนเป็น Flow Chart Diagram ได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Flow Chart การดำเนินการของ Perturb and observe (P&O)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง

ในบทนี้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างและการออกแบบวงจรควบคุม วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์เพื่อจ่ายโหลดเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยเริ่มจากการออกแบบระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และออกแบบวงจรควบคุม วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแส วงจรโอจีบีทีโมดูล วงจรชับเกต วงจรประวิงเวลา วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน และการเขียนคำสั่งในการประมวลผลสัญญาณด้วยฟังก์ชัน Math Model จากโปรแกรม MATLAB/Simulink ลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

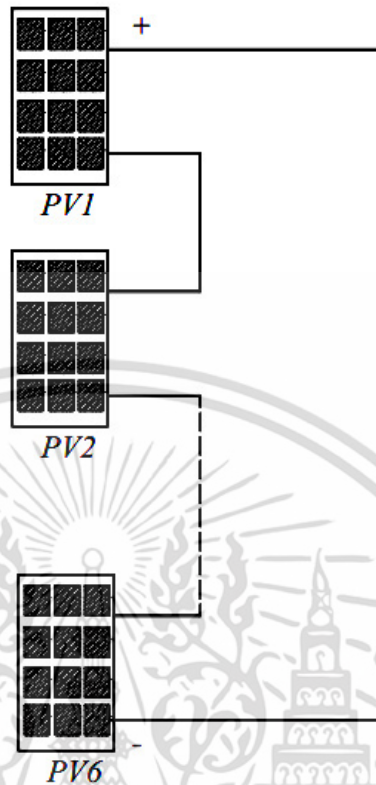
4.1 การออกแบบระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) เป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ทางแสง (Photoelectric Transducers) ที่ทำการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ของบริษัท Chaori Solar Energy จำนวน 6 แผง โดยมีข้อมูลจำเพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลลักษณะจำเพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

Module Type	Unit
Normal Power	275 W
Voltage Maximum; V_{Max}	44.7 V
Current Maximum; I_{Max}	7.72 A
Open Circuit voltage; V_{oc}	44.7 V
Short Circuit current; I_{sc}	8.82 A

สำหรับการต่อเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้ลักษณะการต่อแบบอนุกรมทั้งหมดจำนวน 6 แผง แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 268 โวลต์และกำลังไฟฟารวมทั้งหมดเท่ากับ 1,974 วัตต์



รูปที่ 4.1 ลักษณะการต่อเซลล์แสงอาทิตย์

4.2 การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบในภาพรวมทั้งหมด โดยจะเริ่มจากการออกแบบวงจรควบคุม ซึ่งประกอบด้วย วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าและวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรประวิงเวลา และการออกแบบวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ตัวเก็บประจุแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแส วงจรไอจีบีที โมดูล และวงจรขับเคลื่อน ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดการออกแบบตามลำดับดังต่อไปนี้

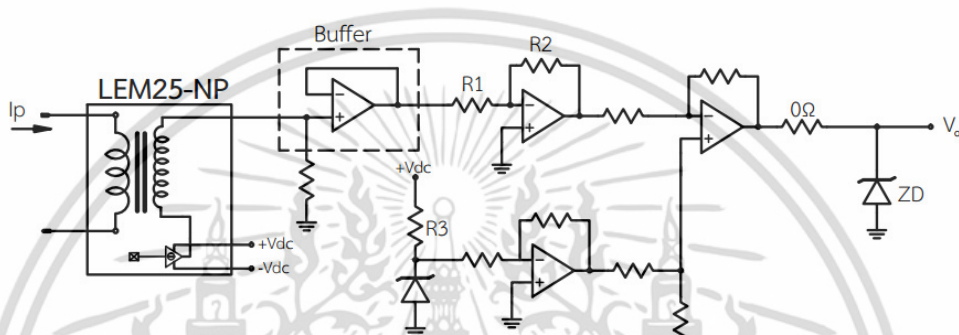
4.2.1 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสที่ใช้ได้เลือก Current Transducer (LEM LA25-NP) ซึ่งใช้หลักการตรวจจับสัญญาณกระแสด้วยปรากฏการณ์ Hall Effect ตรวจจับสัญญาณกระแส โดยมีวงจรสำหรับปรับขนาด (Amplitude modulation) และวงจรรายกระดับสัญญาณให้อยู่ในย่านที่เหมาะสมแล้วส่งผ่านเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อรับสัญญาณกระแสทั้งซีกบวกและซีกลบให้เป็นสัญญาณไฟบวกอย่างเดียว โดยสามารถเขียนสมการแสดงการหาค่าความไวของการตรวจจับสัญญาณ และเขียนวงจรการปรับขนาดและยกระดับสัญญาณกระแส พร้อมการต่อ

ใช้งานจริง ได้ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข)

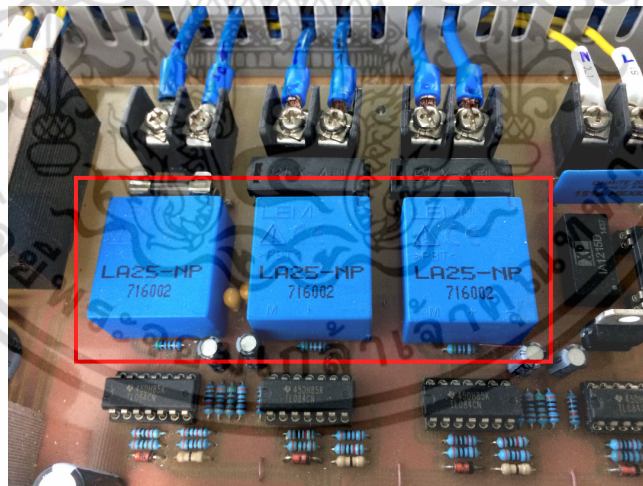
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \frac{-I_p R_{sense} R_2}{1000 \times R_1} + 1.5V \quad (4.1)$$

$$Sensitivity = \frac{V_o}{I_p} = \frac{R_{sense} R_2}{1000 \times R_1} \quad Volt / Amp \quad (4.2)$$



(ก) วงจรปรับขนาดและยกระดับสัญญาณกระแส (LEM LA25-NP)



(ข) วงจรใช้งานจริงของตัวตรวจจับสัญญาณกระแส (LEM LA25-NP)

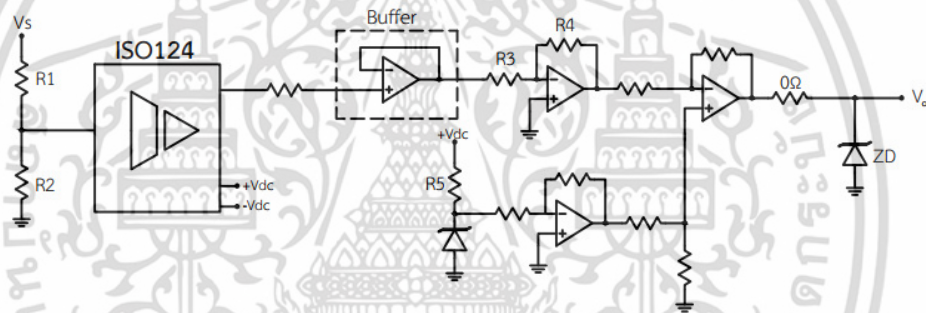
รูปที่ 4.2 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้า

4.2.2 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันที่เลือกใช้คือ Power Transducer Isolator amplifier (ISO124-NP) ซึ่งเป็นตัวตรวจจับสัญญาณแรงดันจากวงจรกำลัง โดยจะทำการแยกกราวด์สัญญาณออกจากกราวด์ในวงจรกำลังเพื่อป้องกันวงจรควบคุมไม่ให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

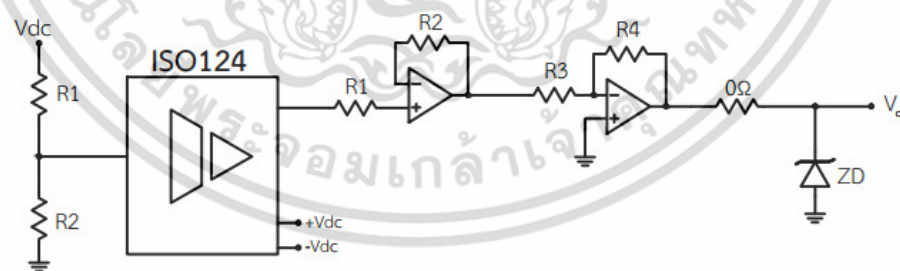
ความเสียหายเมื่อเกิดการลัดวงจรในวงจรกำลัง และมีวงจรปรับขนาดและวงจรรยะดับสัญญาณ โดยทำการยกระดับสัญญาณรูปคลื่นไซน์และปรับขนาดสัญญาณในย่านที่เหมาะสมแล้วส่งผ่านเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อรับสัญญาณแรงดันทั้งซีกบวกและซีกลบ โดยสามารถเขียนสมการแสดงการหาค่าความไวของการตรวจจับสัญญาณ และเขียนวงจรการปรับขนาดและยกระดับสัญญาณแรงดันพร้อมการต่อใช้งานจริง ได้ดังรูปที่ 4.3 (ก) (ข) และ (ค)

$$V_o = \frac{V_s R_1}{R_1 + R_2} \times \left(\frac{R_4}{R_3} \right) + 1.5V \quad (4.3)$$

$$Gain = \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad (4.4)$$

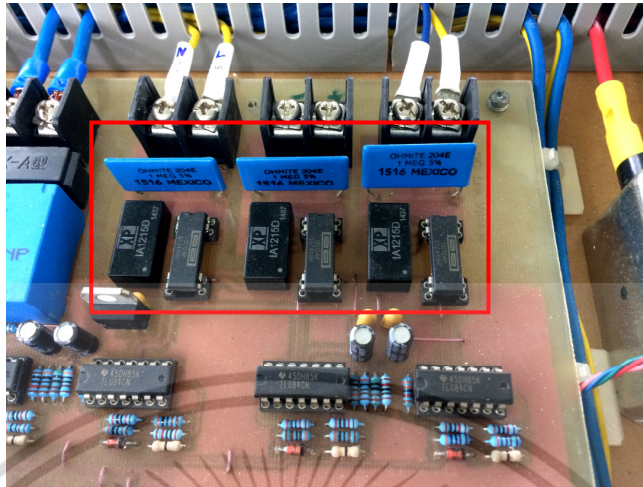


(ก) วงจรปรับขนาดและวงจรรยะดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (ISO124-NP)



(ข) วงจรปรับขนาดและวงจรรยะดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ISO124-NP)

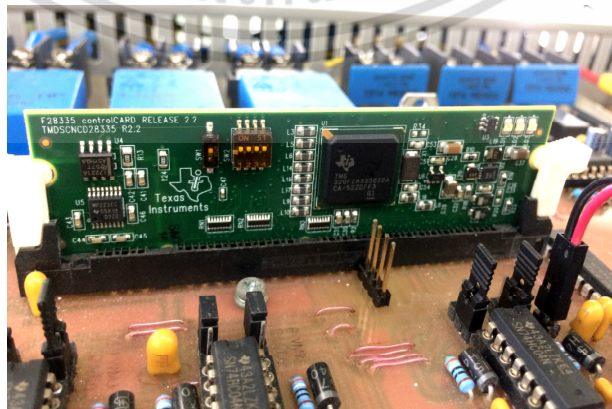
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) วงจรใช้งานจริงของตัวตรวจจับสัญญาณกระแสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (ISO124-NP)

รูปที่ 4.3 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

4.2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP TMS320F28335 สำหรับการประมวลผลสัญญาณที่ได้รับจากวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสและแรงดัน จะเลือกใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28335 ของบริษัท Texas Instrument สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 พิจารณาจากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ที่ใช้ซีพียูด้วยเทคโนโลยีทรานซิสเตอร์ (CMOS) มีความเร็วในการประมวลผลที่ความถี่ 150 MHz และมีคุณลักษณะพิเศษเฉพาะที่สามารถอ่านค่าความละเอียดของอนาล็อกอินพุตที่ 32 บิต และไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 ยังมีความโดดเด่นที่ผู้ออกแบบสามารถเขียนคำสั่งในการประมวลผลสัญญาณด้วยฟังก์ชัน Math Model จากโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมประมวลผลด้วยภาษาซีและยังสามารถที่จะเขียนคำสั่งลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรง ซึ่งมีรายละเอียดโครงสร้างและสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 จะเป็นดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28335

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- F28335, F28235 : 256x16 Flash, 34Kx16 SARAM
 - F28334, F28235 : 128x16 Flash, 34Kx16 SARAM
 - F28332, F28232 : 64x16 Flash, 26Kx16 SARAM
 - 1Kx16 OTP ROM
6. Boot ROM (8Kx16)
- Software Boost Modes (via SCI, SPI, CAN, I2C, McBSP, XINTX and Parallel I/O)
 - Standard Math Tables
7. Clock and System Control
- Dynamic PLL Ratio Changes Supported
 - Watch Dog Time Module
8. GPIO0 to GPIO63 pins Can Be Connectors
9. Peripheral Interrupt Expansion (PIE) Block That Supports all 58 Peripheral
10. 128-Bit Security Key/Lock
- Protects Flash/OTP/RAM Block
 - Prevents Firmware Reverse Engineering
11. Enhanced Control Peripherals
- Up to 18 PWM Output
 - Up to 6 HRPWM Output With 150 ps MEP Resolution
 - Up to 6 Even Capture Inputs
 - Up to 2 Quadrature Encoder Interfaces
 - Up to 8 32-Bit Timers (6 for eCAPs and 2 for eQEPs)
 - Up to 9 16-Bit Times (6 for ePWMs and 3XINTCRs)
12. Three 32-Bit CPU Timers
13. Serial Port Peripherals
- Up to 2 CAN Modules
 - Up to 3 SCI (UART) Module
 - Up to 2 McBSP Module (Configurable as SPI)
 - One SPI Module
 - One Inter-Integrated-Circuit (I2C) Bus
14. 12-Bit ADC, 16 Channels
- 80 ns Conversion Rate
 - 2x8 Channel Input Multiplexer

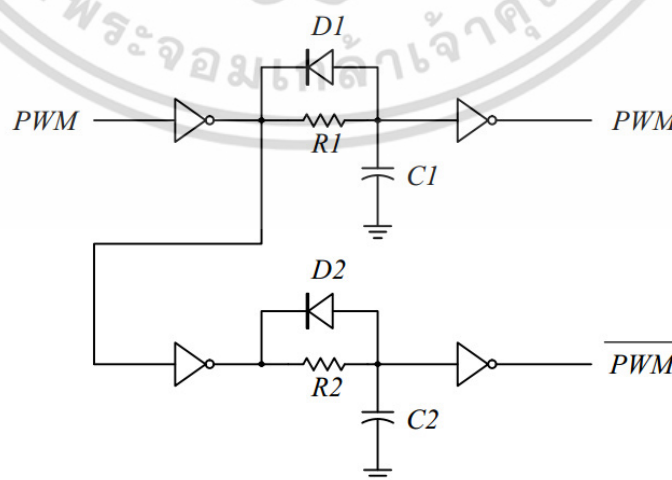
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Two Sample and Hold
 - Single/Simultaneous Conversions
 - Internal or External Reference
15. Up to 88 Individually Programmable, GPIO pins With Input Filtering
16. JTAG Boundary Scan Support
17. Advanced Emulation Functions
- Analyze and Breakpoint Functions
 - Real-Time Debug via Hardware
18. Deployment Support Includes
- ANSI C/C++ Compiler /Assembler /Linker
 - Code Composer Studio™ IDE
 - DSP/BIOS™
 - Digital Motor Control and Digital Power Software Libraries

4.2.4 วงจรประวิงเวลา (Dead time) พิจารณาจากรูปที่ 4.6 ใช้หลักการของวงจร RC Resonance ในการคำนวณหาค่าแรงดันเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ สามารถหาได้จากสมการที่ 4.5

$$V_{Low} = 5 \times e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.5)$$

โดยที่ V_{Low} จะเป็นค่าแรงดันของสถานะลอจิก 0 จากการคายประจุของค่าตัวเก็บประจุ เพื่อนำมาป้อนเข้าสู่ลอจิก NOT Gate ของไอซี 7404 เมื่อนำมาออกแบบสร้างวงจรจะได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรประวิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ตัวเก็บประจุแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันลดลงชั่วขณะ พร้อมทั้งทำหน้าที่สะสมพลังงานเพื่อจ่ายเข้าสู่อินเวอร์เตอร์

สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้จะเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดไบโพลาร์จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลดร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ดังนั้นขนาดของตัวเก็บประจุจึงขึ้นอยู่กับกำลังระดับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสำหรับในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวเก็บประจุที่ใช้จะต้องสามารถรองรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้ไม่น้อยกว่า 350 โวลต์ ดังนั้นจึงใช้ตัวเก็บประจุขนาด 5400 $\mu\text{F}/450\text{V}$

4.2.6 ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสในวงจรอินเวอร์เตอร์ จะมีหน้าที่กรองระลอกคลื่นความถี่สูงที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำให้ปริมาณกระแสชดเชยที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์มีความเรียบและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สำหรับเทคนิคการสวิตช์ควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซิสซึ่งมีความถี่สวิตช์ที่ไม่คงที่นั้นค่าตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสจะส่งผลโดยตรงต่อความถี่สวิตช์สูงสุดสำหรับการควบคุมกระแสฮีสเตอร์รีซิส ดังนั้นจากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 สามารถหาค่าความถี่สวิตช์สูงสุดจากความสัมพันธ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ 4.6

$$f_{C,\max} = \frac{0.25 V_{dc}}{L(HB)} \quad (4.6)$$

เนื่องจากไอจีบีทีโมดูลกำลังของบริษัทมิตซูบิชิ เบอร์ PM25RSB120 (Intelligent Power Module : IPM) จะทำงานในย่านความถี่สวิตช์สูงสุดที่ 20 kHz ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดค่าความถี่สวิตช์ไว้สูงสุดที่ 18 kHz โดยมีขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสเท่ากับ 0.4 และแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุอยู่ระหว่าง 250 - 350 โวลต์ ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสจากสมการที่ 4.6 ได้ดังตารางที่ 4.2

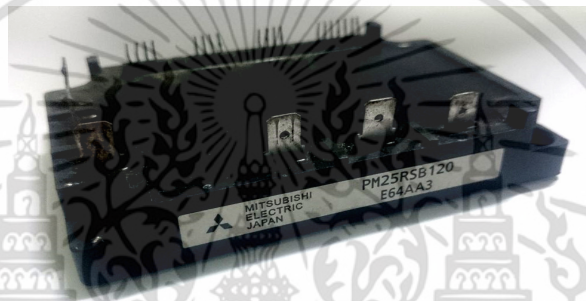
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำกรองกระแส

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-Link Voltage)	ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส (mH)
250	8.688
300	10.410
350	12.152

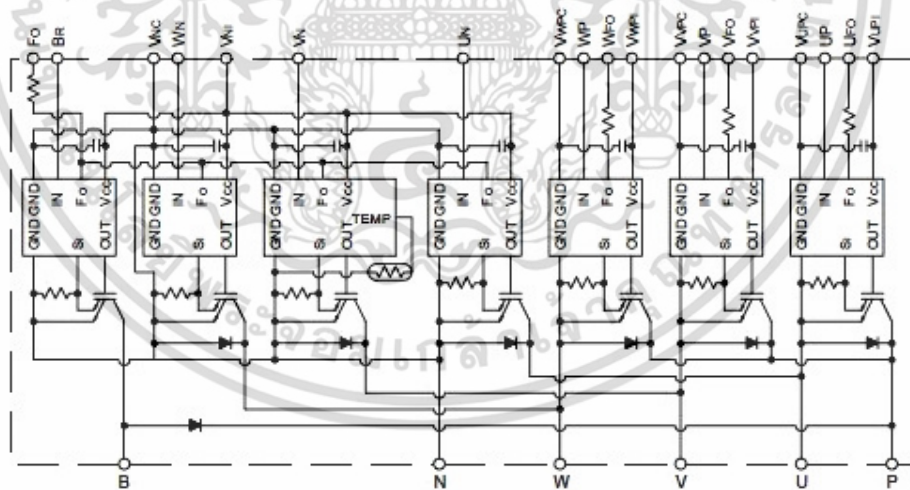
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากตารางที่ 4.2 จะได้ความสัมพันธ์ของตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแสเท่ากับ 8.688 mH - 12.152 mH จึงกำหนดให้ใช้ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 12.152 mH

4.2.7 วงจรไอจีบีทีโมดูล พิจารณาจากรูปที่ 4.7 จะมีโครงสร้างภายในไอจีบีทีโมดูลเป็น อินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟส ทำหน้าที่นำกระแสด้วยการเปิด-ปิด โดยนำกระแสและหยุดนำกระแสที่ขา เกตของไอจีบีทีภายในของโมดูล ในการสวิตช์ที่ความถี่สูงนี้อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อิจีบีทีโมดูล ได้ เนื่องจากการนำกระแสและหยุดนำกระแสที่ไม่สัมพันธ์กัน จึงจำเป็นต้องมีวงจรประวิงเวลา (Dead time) ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น



(ก) โครงสร้างภายนอกของไอจีบีทีโมดูล



(ข) โครงสร้างภายในของไอจีบีทีโมดูล

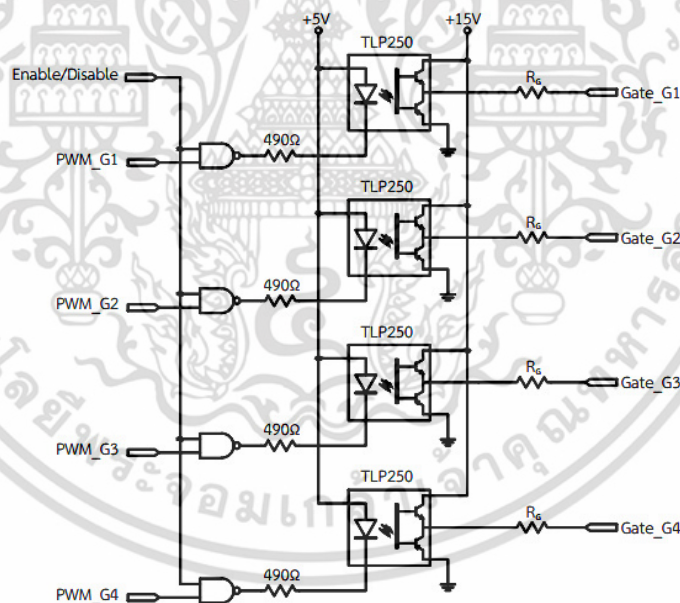
รูปที่ 4.7 ไอจีบีทีโมดูล PM25RSB120

พิจารณาจากรูปที่ 4.7 งานวิจัยนี้เลือกใช้ไอจีบีทีโมดูลของบริษัท มิตซูบิชิ รหัสรุ่น PM25RSB120 มีขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1,200 โวลต์และกระแสไฟฟ้าใช้งานเท่ากับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25 แอมป์ โดยโครงสร้างภายในของไอซีที่โมดูล ประกอบด้วยไอจีบีทีจำนวน 7 ตัว ซึ่งถูกออกแบบให้สามารถใช้งานเป็นอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสหรือสามเฟสได้ และภายในยังประกอบไปด้วยวงจรตรวจจับสัญญาณความผิดปกติของระบบ (Fault Sensor) ซึ่งจะส่งสัญญาณที่สถานะลอจิก 0 ออกมาเมื่อเกิดการลัดวงจรเพื่อป้องกันไอจีบีทีที่โมดูลเกิดความเสียหาย

สำหรับการออกแบบวงจรการใช้งานไอจีบีทีที่โมดูลให้ใช้งานเป็นอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเพื่อจ่ายโวลตร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ในการกำหนดให้นำกระแสและหยุดนำกระแสของไอจีบีทีที่โมดูลจะต้องอาศัยวงจรขับเคลื่อน ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

4.2.8 วงจรขับเคลื่อน การออกแบบวงจรขับเคลื่อนได้เลือกใช้งานไอซีแยกกราวด์เบอร์ ISO124-NP โครงสร้างภายในใช้หลักการรับแสงจากแอลอีดีภายในแบบ Optocoupler - Isolator ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่แยกระบบกราวด์ของวงจรกำลังออกจากวงจรควบคุมทำให้สามารถป้องกันการเกิดความเสียหายที่จะเกิดกับวงจรควบคุมเนื่องจากการลัดวงจรในระบบวงจรกำลังได้ จากรายละเอียดของวงจรขับเคลื่อน สามารถแสดงการออกแบบวงจรได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีที่โมดูล

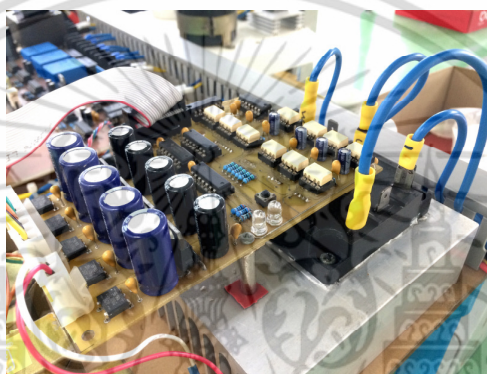
พิจารณาจากรูปที่ 4.8 วงจรขับเคลื่อนนี้ได้ออกแบบให้วงจรควบคุมป้องกันสัญญาณอินพุตในสถานะลอจิก 1 และมีสัญญาณเอาต์พุตอยู่ในสถานะลอจิก 1 ป้อนเข้าสู่วงจรกำลังสัญญาณที่ส่งออกจะถูกป้อนเข้าที่ขาเกตของไอจีบีทีที่โมดูล โดยทำหน้าที่กำหนดการนำกระแสและหยุดนำกระแสภายในไอจีบีทีที่โมดูล สำหรับแรงดันที่ใช้ป้อนเข้าที่ขาเกตของไอจีบีทีที่โมดูลอยู่ในสถานะลอจิก 0 และสถานะลอจิก 1 ซึ่งสามารถแสดงระดับได้ดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 สถานะลอจิกและมีสัญญาณเอาต์พุต

ระดับลอจิก	แรงดันที่ขาเกต (V)
0	0
1	+15

จากรายละเอียดข้างต้นเกี่ยวกับการออกแบบวงจรขับเคลื่อนด้วยไอซี Optocoupler- Isolator เบอร์ TLP250 นำมาออกแบบสร้างเพื่อใช้งานจริงได้ดังรูปที่ 4.9

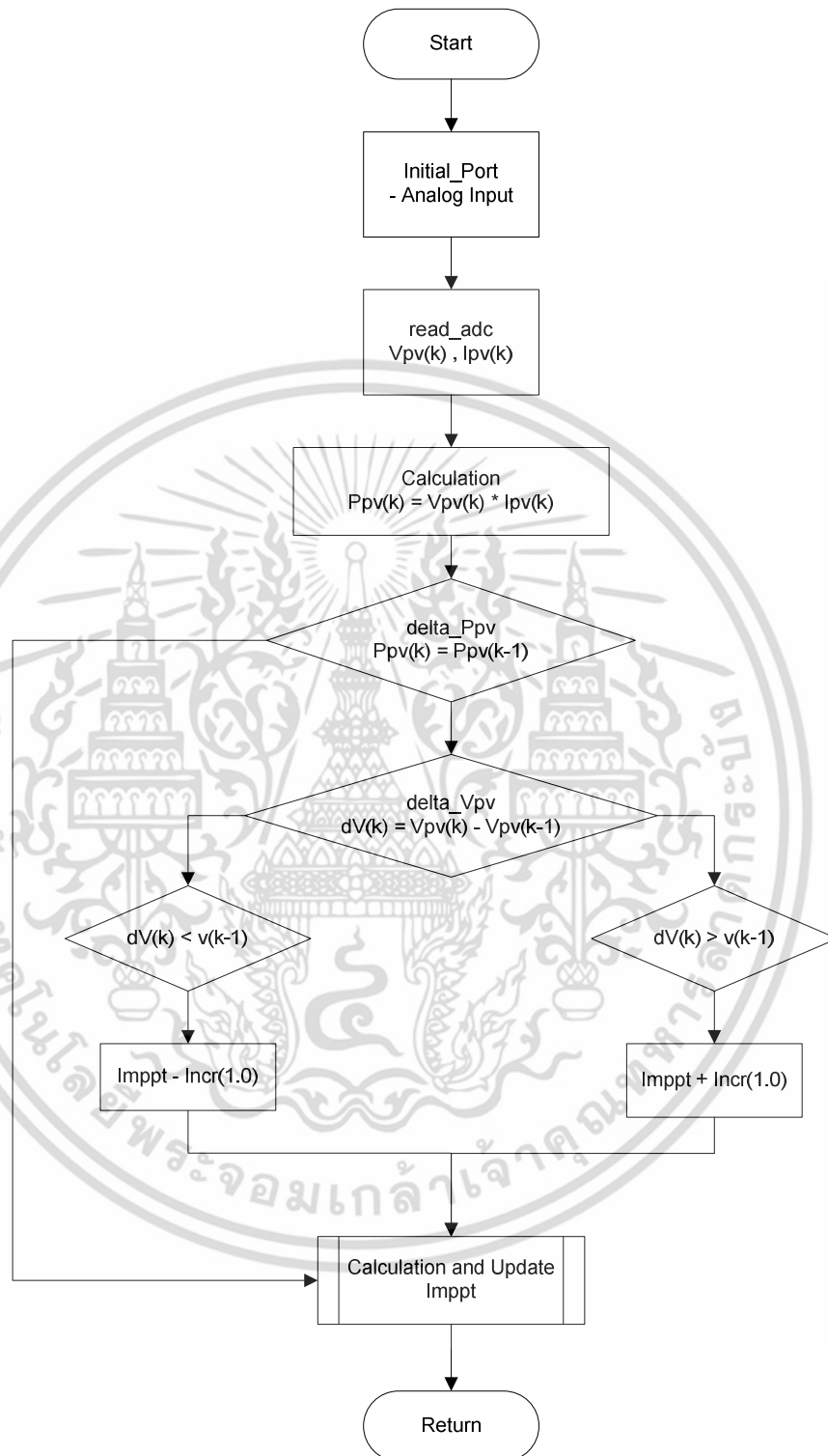


รูปที่ 4.9 วงจรขับเคลื่อนไอซีบีทีโมดูล

4.3 เทคนิคการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลักในการป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายพลังงานได้เฉพาะช่วงกลางวันเท่านั้น และในลักษณะการใช้งานตามธรรมชาติยังมีปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติเกิดเงาบังจากเมฆทำให้ประสิทธิภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ลดลงตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบชุดคำสั่งการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยเทคนิคการติดตามแบบ P&O method โดยการนำความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า ที่มาจากผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มาเปรียบเทียบกับตัวแปรอ้างอิงที่มีกำลังไฟฟ้าอ้างอิงสูงสุดเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบการคาดเคลื่อนแล้วนำไปคูณร่วมกับกระแสไซน์อ้างอิงร่วมกับการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบฮีสเตอร์รีซิส ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการทำงานได้ดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงกระบวนการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การจำลองการทำงานของระบบ

ในบทนี้กล่าวถึงการจำลองการทำงานของระบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟสที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด การจำลองนี้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองการทำงานโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

5.1 ส่วนการจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าที่ไม่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ประกอบด้วย

5.1.1 จำลองการทำงานของระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

5.1.2 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อร่วม

5.1.3 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วม

5.1.4 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

5.1.5 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์

5.1.6 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลด

5.1.7 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้หน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

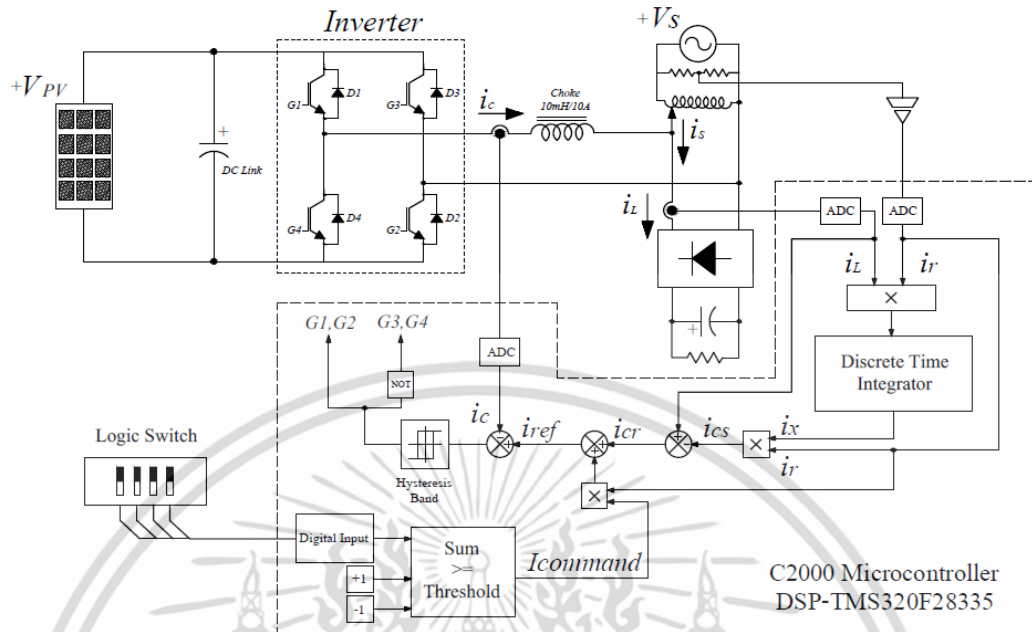
5.2 ส่วนการจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ประกอบด้วย

5.2.1 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

5.2.2 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติ

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนไดอะแกรมภาพรวมของระบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ไดอะแกรมการจำลองคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

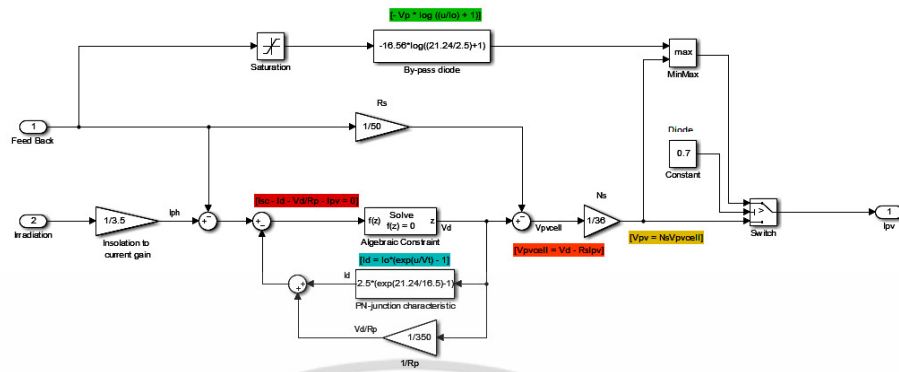
5.1 ส่วนการจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าที่ไม่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

พิจารณาจากรูปที่ 5.2 ในการจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าที่ไม่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยกำหนดพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบในอัลกอริทึม (Algorithm) MATLAB/Simulink ดังตารางที่ 5.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานจำลองจะนำมาต่ออนุกรมเพื่อให้มีระดับแรงดันที่สูงขึ้นจำนวน 6 แผง ซึ่งทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเท่ากับ 268 โวลต์ และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1,974 วัตต์

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

รายละเอียด	ขนาดพิกัด
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร	44.7 V
กระแสไฟฟ้่าลัดวงจร	8.23 A
แรงดันไฟฟ้าที่จุดสูงสุด	42.6 V
กระแสไฟฟ้าที่จุดสูงสุด	7.72 A
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	329 W

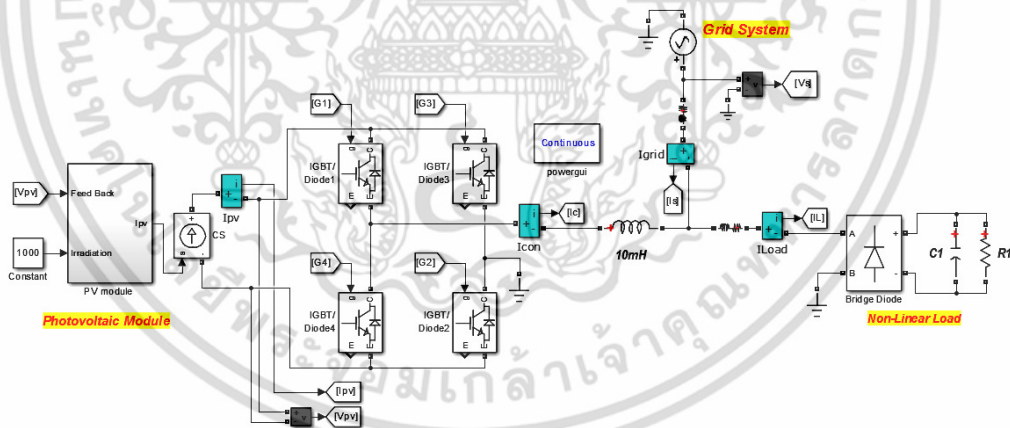
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



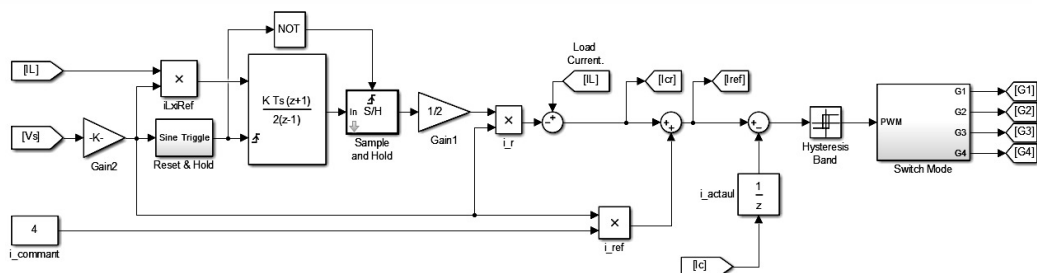
รูปที่ 5.2 อัลกอริทึมเซลล์แสงอาทิตย์

5.1.1 จำลองการทำงานของระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

การจำลองวงจรควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมวงจรกำลังและอัลกอริทึมสำหรับการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ตามลำดับ เมื่อทำการจำลองระบบจะได้แรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายไฟฟ้า (v_s) กระแสไฟฟ้าที่โครงข่ายไฟฟ้า (i_s) และแรงดันไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ (v_c) ดังรูปที่ 5.5 (ก) (ข) และ (ค)

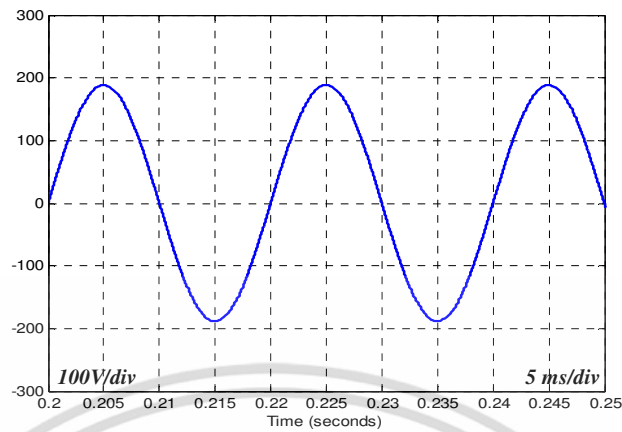
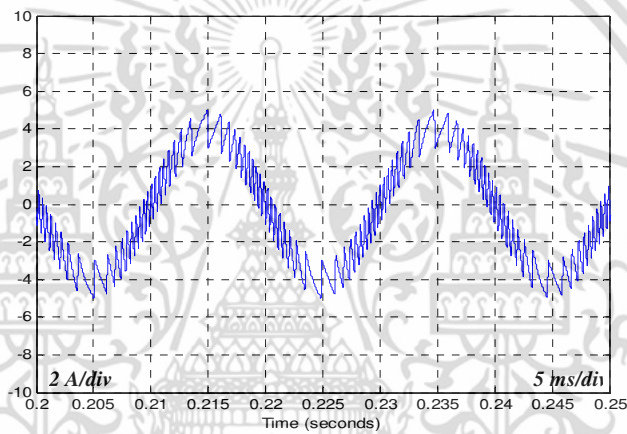
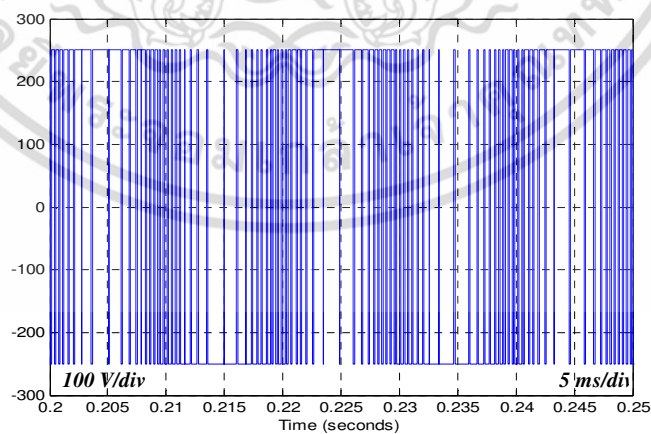


รูปที่ 5.3 บล็อกไดอะแกรมวงจรกำลัง



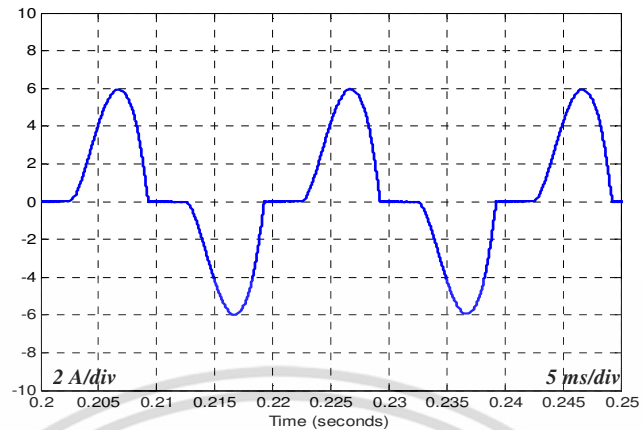
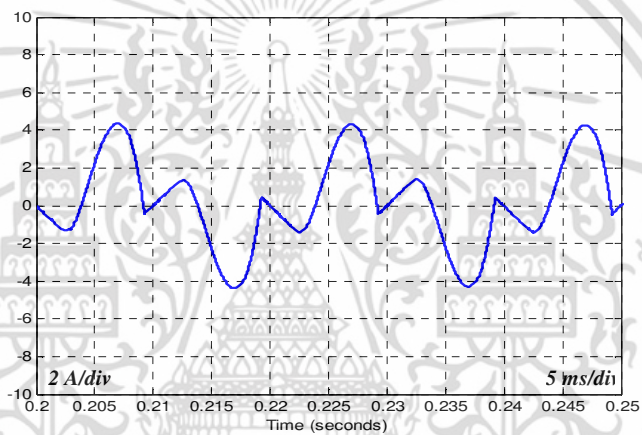
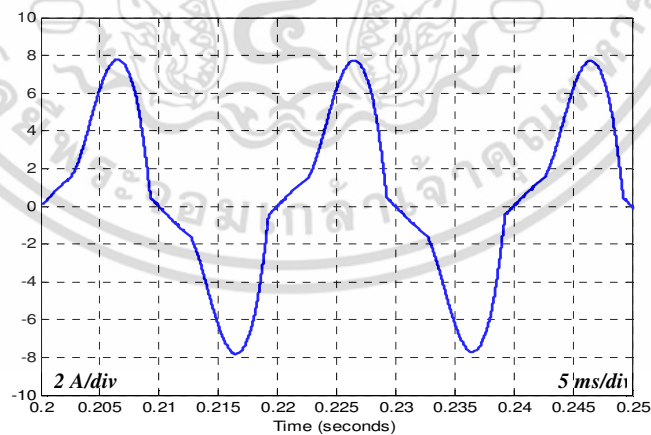
รูปที่ 5.4 อัลกอริทึมสำหรับการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) แรงดันไฟฟ้าระบบโครงข่าย (v_s)(ข) กระแสไฟฟ้าระบบโครงข่าย (i_s)(ค) แรงดันไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ (v_c)

รูปที่ 5.5 การจำลองโดยใช้ MATLAB/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) กระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_L)(ข) กระแสฮาร์มอนิก (i_{CR})(ค) กระแสอ้างอิง (i_{ref})

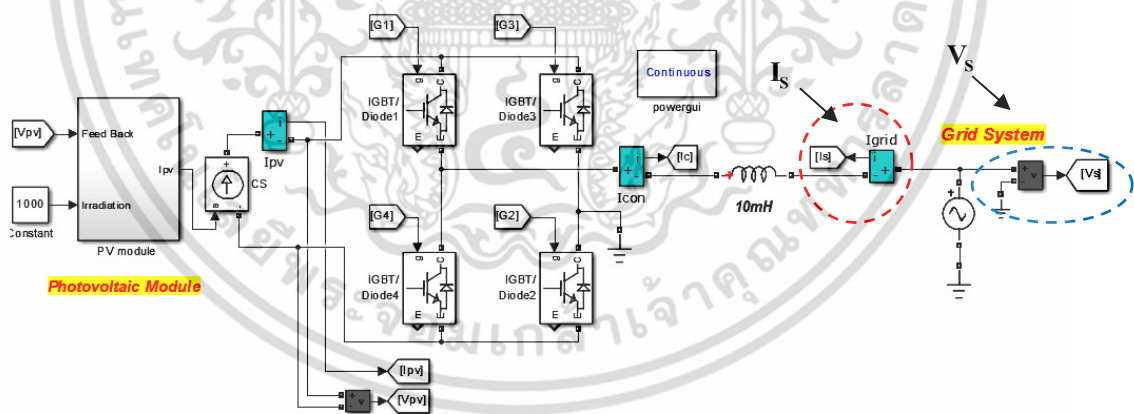
รูปที่ 5.6 การจำลองกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_L) กระแสฮาร์มอนิก (i_{CR}) และกระแสอ้างอิง (i_{ref})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

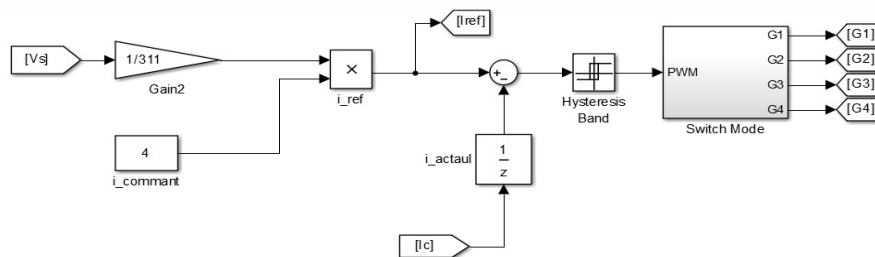
เมื่อจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดไม่เชิงเส้นร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบจะถูกนำมาคำนวณหากระแสอ้างอิง เพื่อใช้ในการมอดูเลตคำสั่งฮีสเตอร์รีซิส และเมื่อทำการจำลองจะได้กระแสโหลด (i_L) กระแสฮาร์มอนิก (i_{CR}) และกระแสอ้างอิง (i_{ref}) ดังรูปที่ 5.6

5.1.2 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อร่วม

การจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด บล็อกไดอะแกรมวงจรการจำลองสามารถแสดงดังรูปที่ 5.7 (ก) ซึ่งจะเป็นการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่โครงข่ายไฟฟ้าและการเกิดค่าความผิดพลาดของกระแสฮาร์มอนิกในระบบ โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 310 V และแรงดันโครงข่ายไฟฟ้าเท่ากับ 220 V_{rms} เมื่อกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ในอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการจำลองดังรูปที่ 5.7 (ข) มีค่ากระแสคำสั่งสูงสุด (Peak) เริ่มตั้งแต่ 2 A, 4 A, 6 A, 8 A และ 10 A ตามลำดับ จากผลการจำลองจะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบโครงข่ายกับความสัมพันธ์ค่าความผิดพลาดของกระแสฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 5.8 (ก) และ (ข)



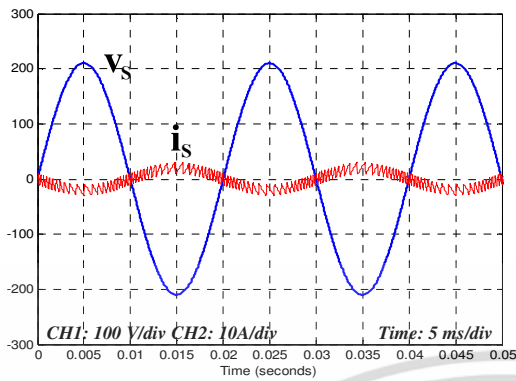
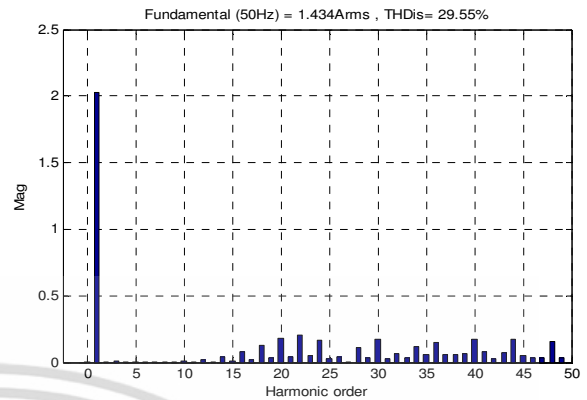
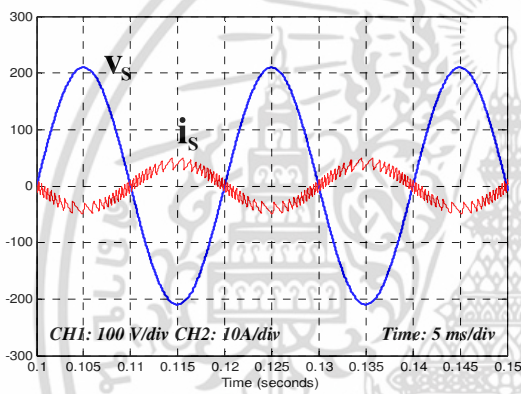
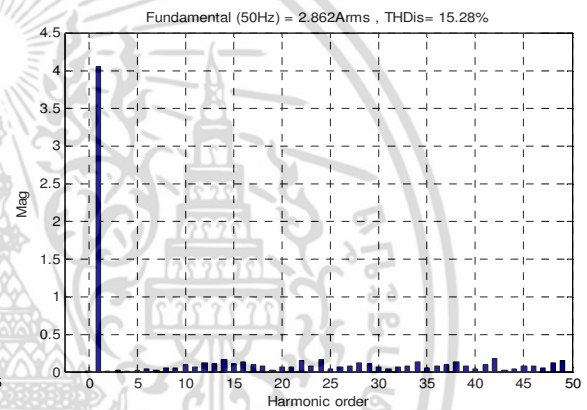
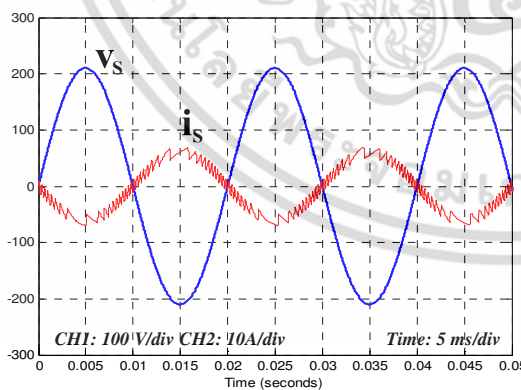
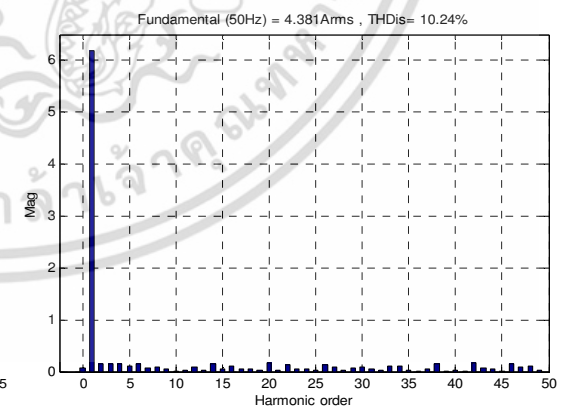
(ก) วงจรกำลังที่ใช้ในการจำลอง



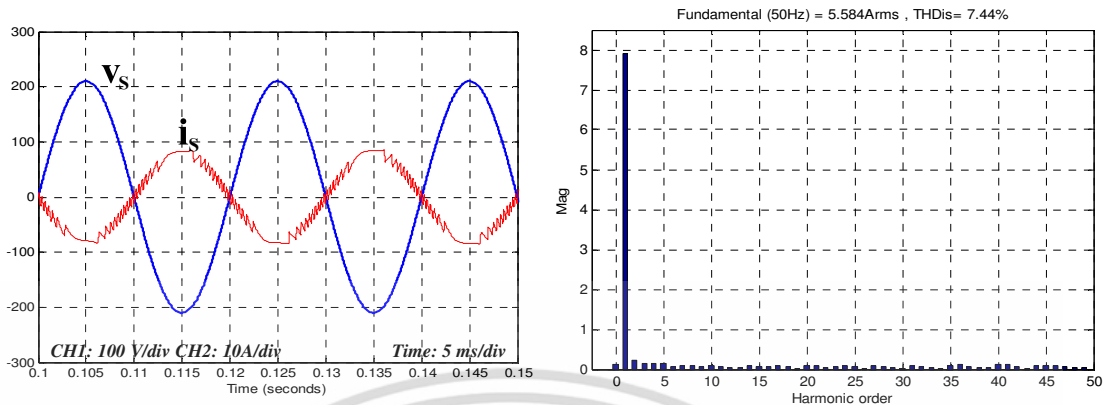
(ข) อัลกอริทึมสำหรับการควบคุม

รูปที่ 5.7 อัลกอริทึมและวงจรที่ใช้สำหรับการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

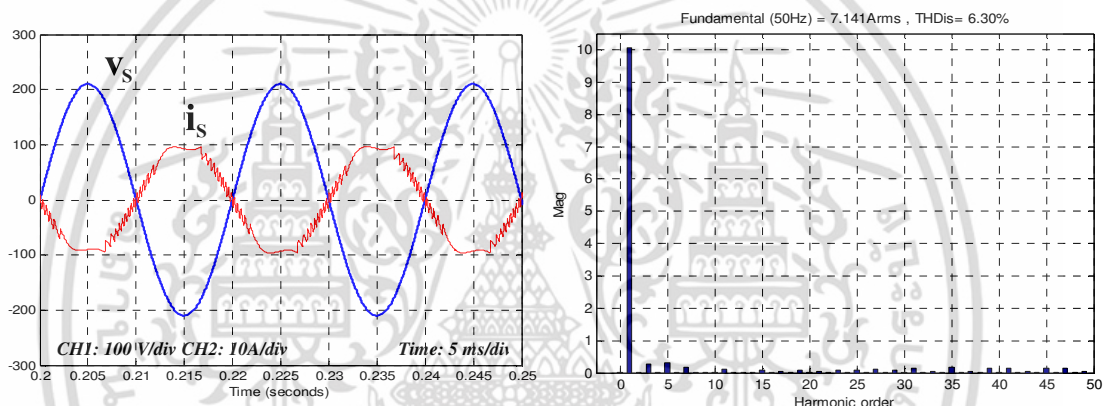
(ก) แรงดัน v_s , กระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 2 A(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s (ก) แรงดัน v_s , กระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 4 A(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s (ก) แรงดัน v_s , กระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 6 A(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แรงดัน v_s ,กระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 8 A

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s



(ก) แรงดัน v_s ,กระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 10 A

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

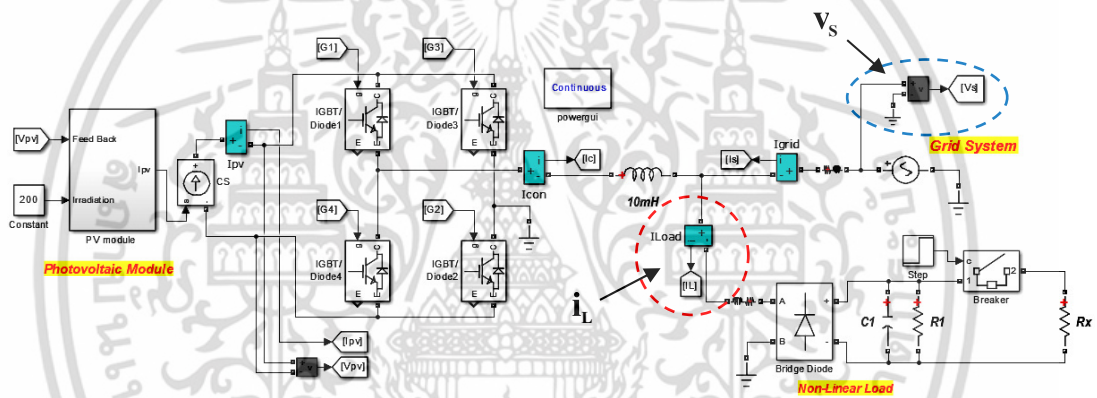
รูปที่ 5.8 ผลการจำลองการกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$)

พิจารณาจากรูปที่ 5.8 (ก) เมื่อกำหนดกระแสคำสั่งสูงสุด (Peak) เริ่มตั้งแต่ 2 A, 4 A, 6 A, 8 A และ 10 A จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) มีรูปลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และทำมุมเฟส 180 องศา กับแรงดันไฟฟ้าโครงข่าย เนื่องจากอยู่ในโหมดของอินเวอร์เตอร์ และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสัญญาณ จะพบว่ากระแสมูลฐาน (Fundamental Current) และค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณทั้งหมด (Total Harmonic Distortion; THD) มีค่าเท่ากับ $1.434A_{rms}$ (THD = 29.55%), $2.862A_{rms}$ (THD = 15.28%), $4.381A_{rms}$ (THD = 10.24%), $5.584A_{rms}$ (THD = 7.44%), $7.141A_{rms}$ (THD = 6.30%) ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณาที่กระแสคำสั่งมีค่ามากกว่า 8 A และ 10 A จะพบปรากฏการณ์โอเวอร์มอดูเลต (Over modulate) เนื่องจากแอมพลิจูดของกระแสอ้างอิง (i_{ref}) มากกว่ากระแสคอนเวอร์เตอร์ (i_c) ผลมาจากแรงดันไฟตรงทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าต่ำไม่เพียงพอ ในช่วงบริเวณพีคของแอมพลิจูดของกระแสอ้างอิง จึงทำให้พัลส์ที่ดับลิ้มขยายออกเพื่อทำให้กระแส

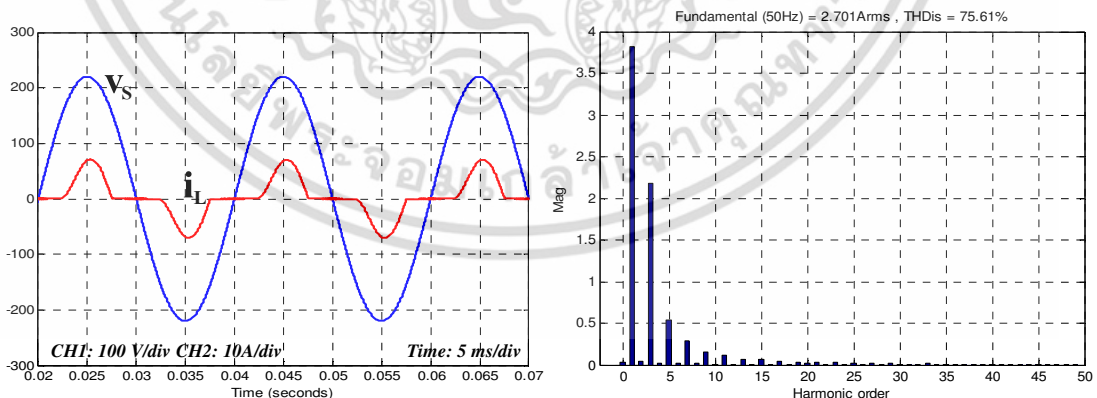
คอนเวอร์เตอร์ติดตามกระแสอ้างอิงทำให้เกิดการโอเวอร์มอดูเลตส่งผลให้เกิดค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 5.8 (ข)

5.1.3 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวม

สำหรับการจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้น บล็อกไดอะแกรมวงจรการจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าโหลดไม่เชิงเส้น เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 310 V แรงดันไฟฟ้าระบบโครงข่ายเท่ากับ 220 V_{rms} จะได้สัญญาณความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 วงจรกำลังที่ใช้สำหรับการจำลอง



(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_L

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_L

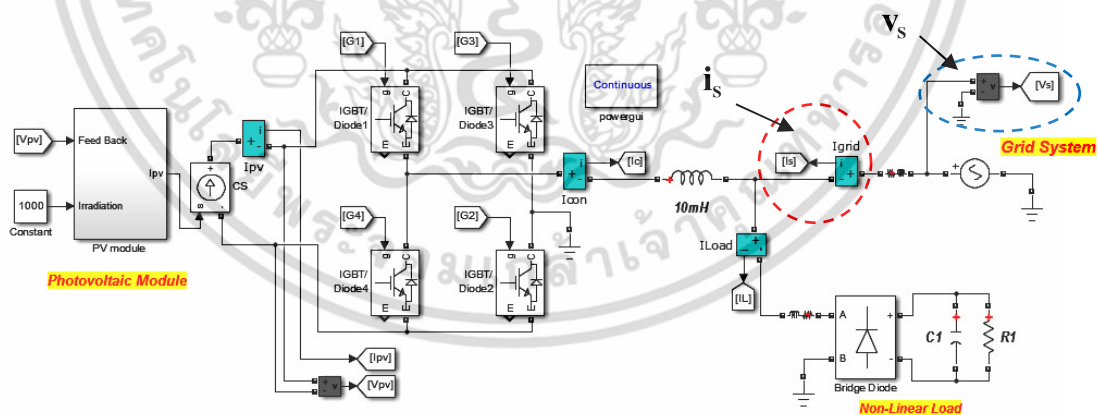
รูปที่ 5.10 การจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากรูปที่ 5.10 (ก) จะเห็นได้ว่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลดจะมีรูปผิวด้านไปจากรูปคลื่นไซน์เนื่องจากเกิดฮาร์มอนิกในลำดับที่ 3, 5, 7 และ 9 มีขนาดสูงขึ้นดังรูปที่ 5.10 (ข) ในขณะเดียวกันกระแสระบบโครงข่ายไฟฟ้าก็จ่ายกระแสฮาร์มอนิกให้กับโหลดด้วยส่งผลให้การจำลองเมื่อระบบทำการจ่ายโหลดให้กับวงจรเรียงกระแสซึ่งเป็นโหลดประเภทไม่เชิงเส้นทำให้เกิดค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกในระบบมีค่าเท่ากับ 75.61 % ในทางปฏิบัติความผิดเพี้ยนนี้สามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์และระบบได้

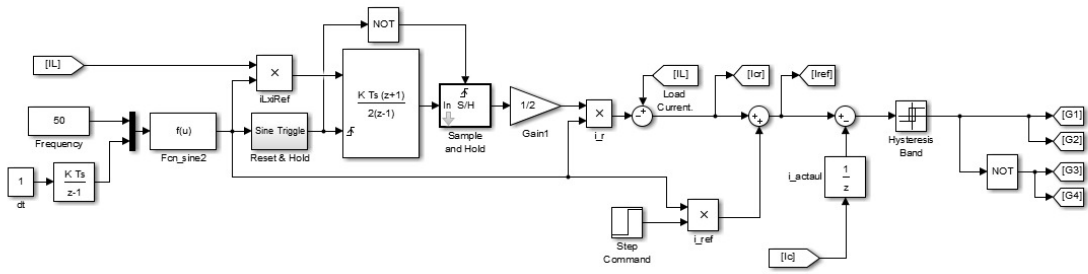
5.1.4 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

การจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นโดยชดเชยกระแสฮาร์มอนิก สามารถสร้างบล็อกไดอะแกรมวงจรการจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ดังรูปที่ 5.11 (ก) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่โครงข่ายไฟฟ้า และกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ในอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการจำลองดังรูปที่ 5.11 (ข) ที่มีค่าตั้งแต่ 2 A, 4 A, 6 A, 8 A และ 10 A ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 310 V แรงดันไฟฟ้าระบบโครงข่ายเท่ากับ 220 V_{rms} จะได้สัญญาณความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 5.12



(ก) วงจรกำลังที่ใช้ในการจำลอง

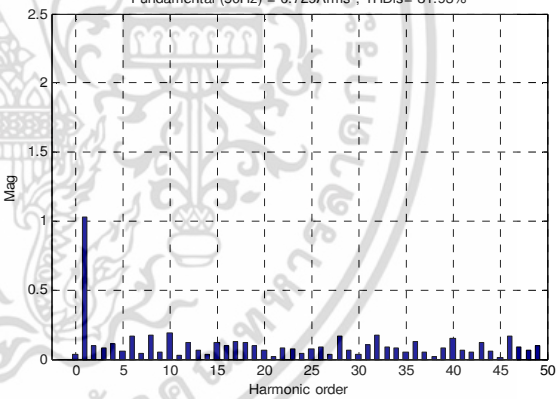
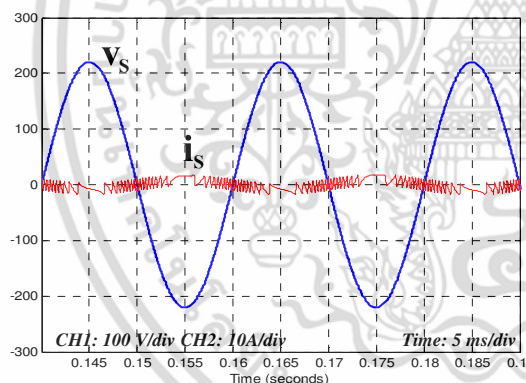
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลอง

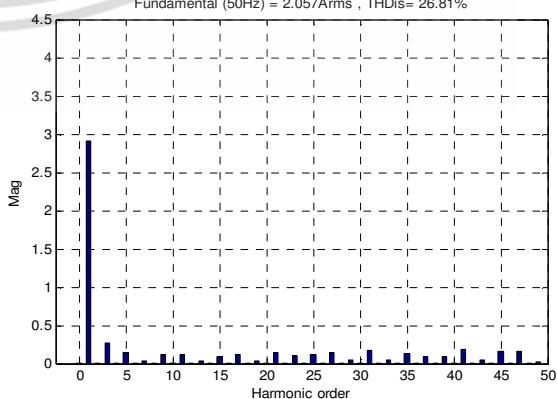
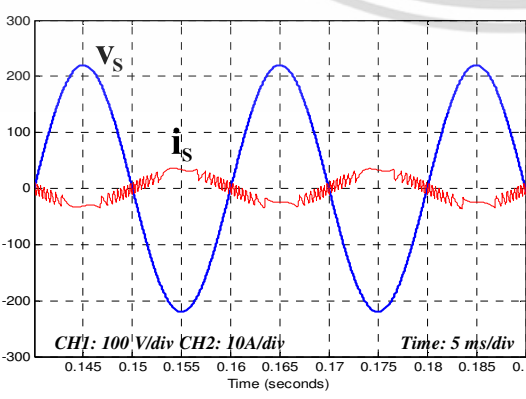
รูปที่ 5.11 อัลกอริทึมและวงจรที่ใช้สำหรับการจำลอง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.12 (ก) จะเห็นได้ว่าการจำลองเมื่อมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ระบบสามารถคำนวณกระแสฮาร์มอนิก (i_{CR}) และจ่ายออกมารวมกับกระแสอ้างอิง (i_{ref}) ทำให้กระแสที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s) ไม่จำเป็นต้องจ่ายกระแสฮาร์มอนิกให้กับโหลด จึงทำให้กระแสที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์โดยระบบยังสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจ่ายจากโหลดกลับสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า



(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 2 A

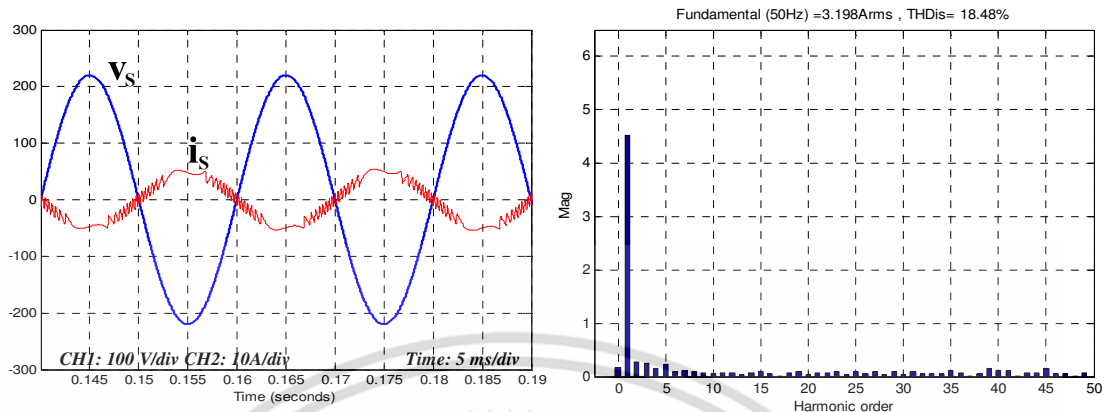
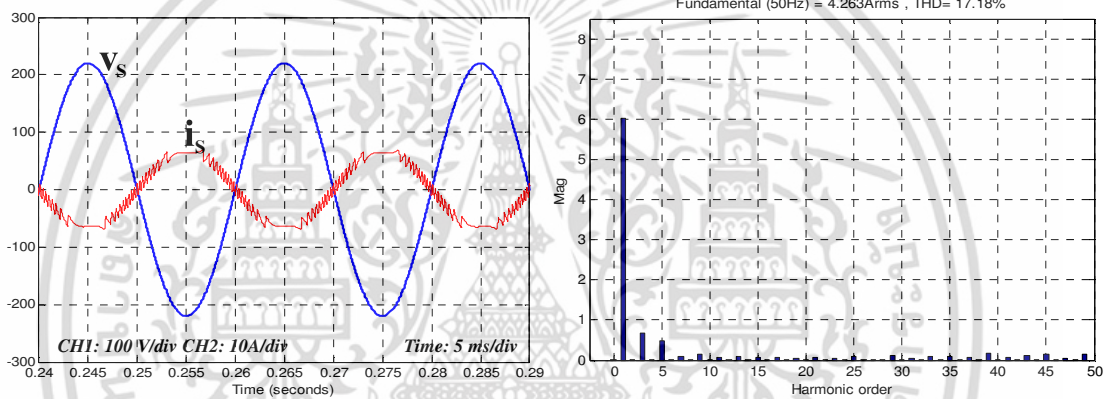
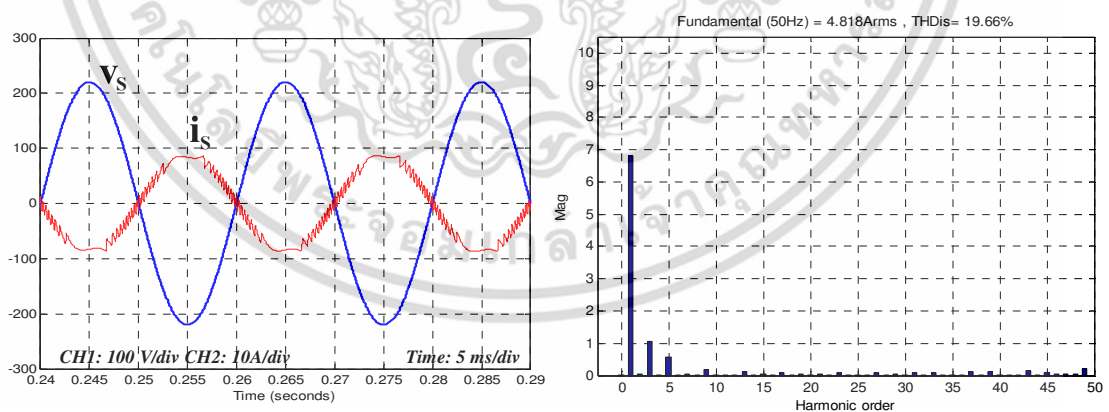
(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s



(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 4 A

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 6 A(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s (ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 8 A(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s (ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 10 A(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

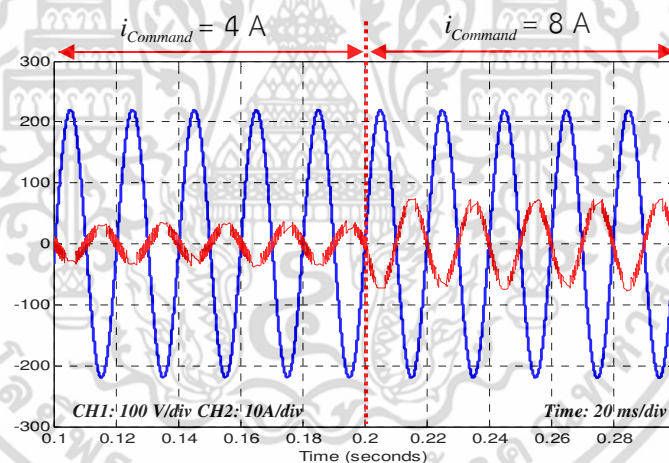
รูปที่ 5.12 ผลการจำลองการกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) และการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในรูปที่ 5.12 (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสมูลฐาน (Fundamental Current) มีแอมพลิจูดลดลง และเมื่อวิเคราะห์ด้วยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะพบว่ากระแสจะถูกจ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์ไปยังโหลด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

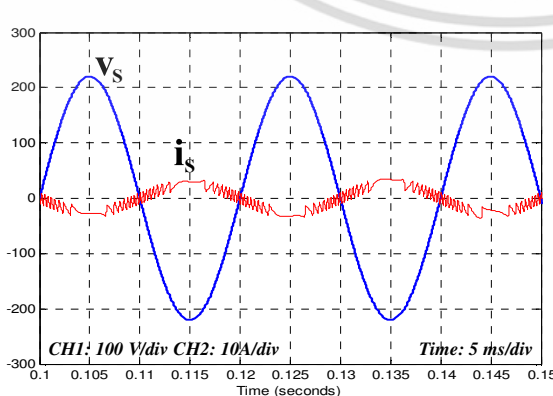
และระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังนั้นผลรวมจะมีค่าเท่ากับกระแสที่จ่ายเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าพร้อมกับกระแสที่จ่ายให้กับโหลดมีค่าเท่ากับกระแสที่คอนเวอร์เตอร์จ่ายออกมาและแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดและจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหลือจากการจ่ายโหลดเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

5.1.5 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์

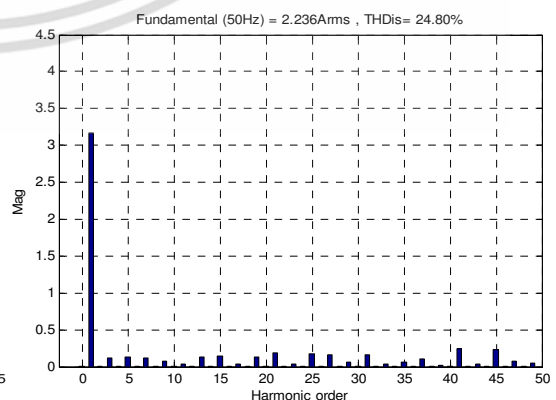
สำหรับในกรณีจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและมีเงื่อนไขการควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์ โดยกำหนดให้ $i_{Command}$ (Peak) มีค่าเท่ากับ 4 A และปรับเพิ่มขึ้นให้มีค่าเท่ากับ 8 A อย่างฉับพลันที่แรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 310 V และแรงดันไฟฟ้าระบบโครงข่ายเท่ากับ 220 V_{rms} เพื่อจำลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (v_s), กระแสไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L)



(ก) การจำลองของระบบช่วงการเปลี่ยนแปลงกระแสอย่างฉับพลัน

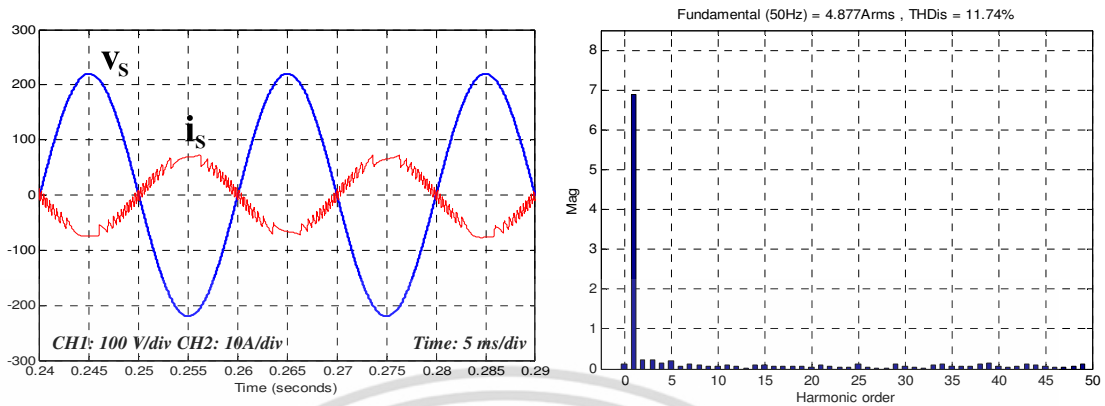


(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 4 A



(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

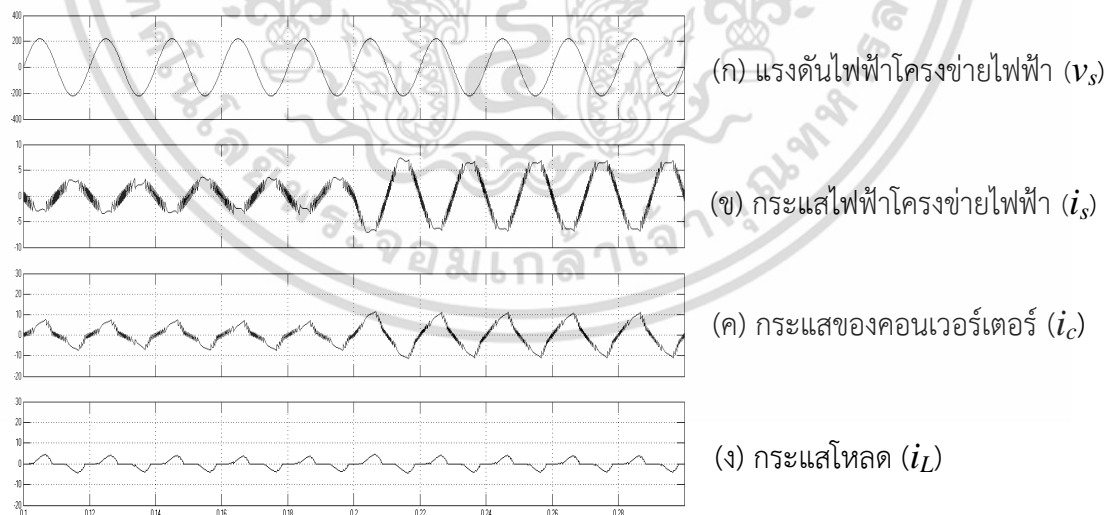
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



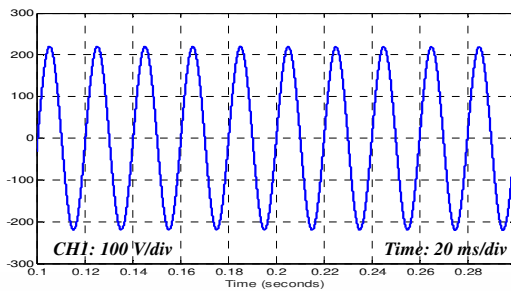
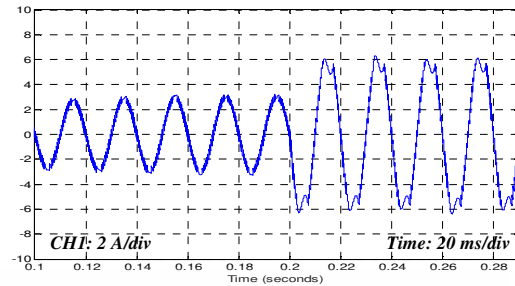
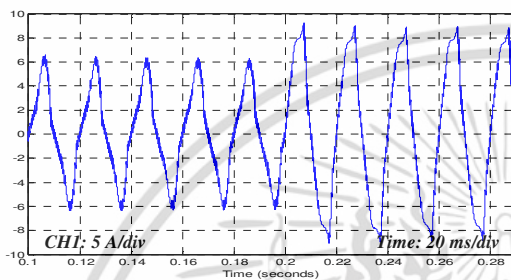
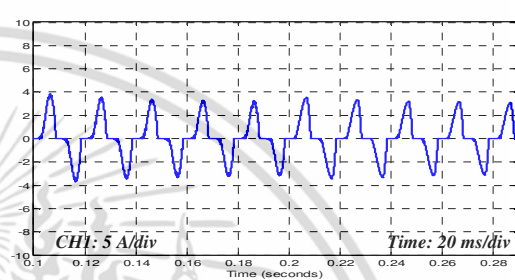
- (ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 8 A
- (ข) สเปกตรัมฮาร์โมนิกกระแส i_s
- (ค) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อกำหนดกระแส $i_{Command}$

รูปที่ 5.13 ผลการจำลองแรงดัน v_s และกระแส i_s กรณีปรับกระแสเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน

พิจารณาจากรูปที่ 5.13 จะเห็นได้ว่าระบบยังสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายได้ถึงแม้จะมีเงื่อนไขการควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์ สังเกตได้จากกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s) ที่ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ซึ่งเกิดจากการสวิตช์ที่ขอบเขตฮิสเตอร์ซิสกวางขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดของกระแสและที่ทำมุมเฟสกับแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่าย (v_s) 180 องศา และเมื่อเพิ่มกระแสจาก 4 A เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันเท่ากับ 8 A จะพบว่ากระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s) ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้นส่งผลให้การลดทอนฮาร์โมนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในระดับดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

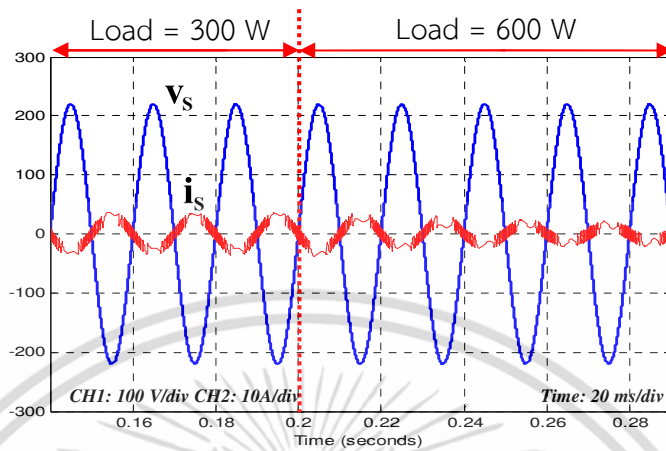
(ก) ภาพขยายแรงดันไฟฟ้าโครงข่ายไฟฟ้า (v_s)(ข) ภาพขยายกระแสไฟฟ้าโครงข่ายไฟฟ้า (i_s)(ค) ภาพขยายกระแสของคอนเวอร์เตอร์ (i_c)(ง) ภาพขยายกระแสโหลด (i_L)

รูปที่ 5.14 การจำลองแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้า (v_s), กระแสในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L) ในกรณีควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์

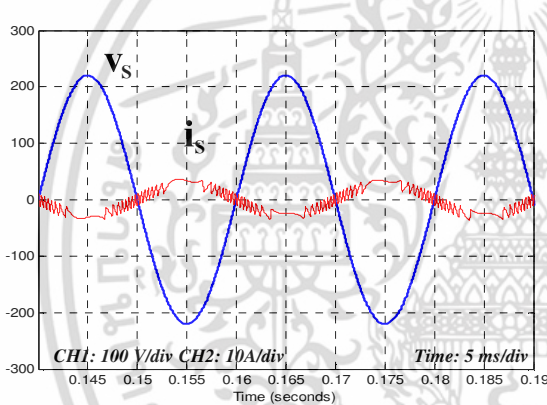
พิจารณาจากรูปที่ 5.14 ในช่วงการเปลี่ยนแปลงกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ที่มีปริมาณกระแสตั้งแต่ 4 A ไปจนถึง 8 A อย่างฉับพลัน ปริมาณกระแสที่ไหลเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความผิดพลาดของกระแสในระบบโครงข่ายมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณกระแสมูลฐาน (Fundamental Current) มีค่ามากขึ้น ในขณะเดียวกันกระแสโหลดเมื่อทำการจ่ายโหลดที่คงที่จึงทำให้กระแสโหลดมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามการควบคุมกระแสของคอนเวอร์เตอร์จึงทำให้พลังงานในส่วนที่เพิ่มขึ้นจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

5.1.6 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อพร้อมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลด

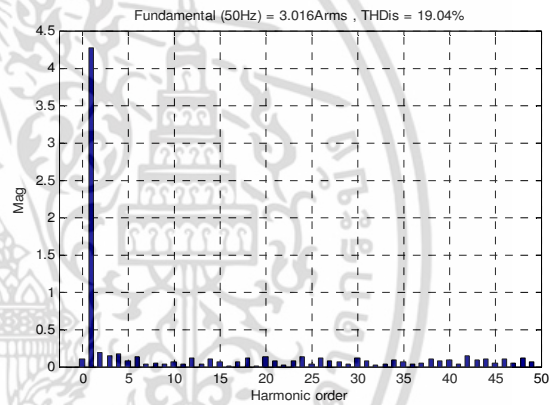
การจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นและมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนกระแสที่จ่ายให้กับโหลด โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 310 V และแรงดันไฟฟ้าระบบโครงข่ายเท่ากับ 220 V_{rms} เพื่อจ่ายโหลดมีค่าเท่ากับ 300 W และ 600 W



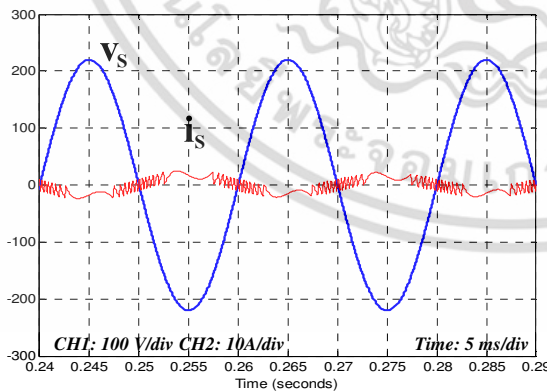
(ก) การจำลองของระบบเมื่อปรับเปลี่ยนกระแสที่จ่ายให้กับโหลด



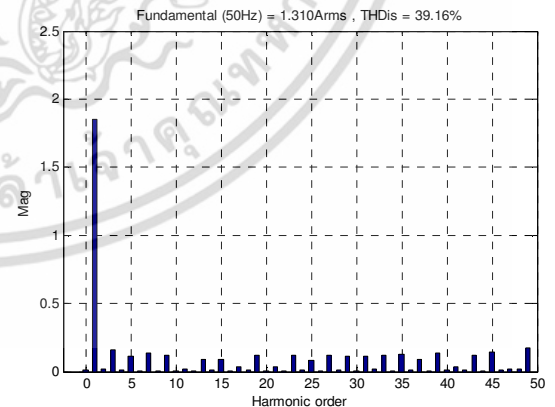
(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อโหลด 300 W



(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s



(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อโหลด 600 W



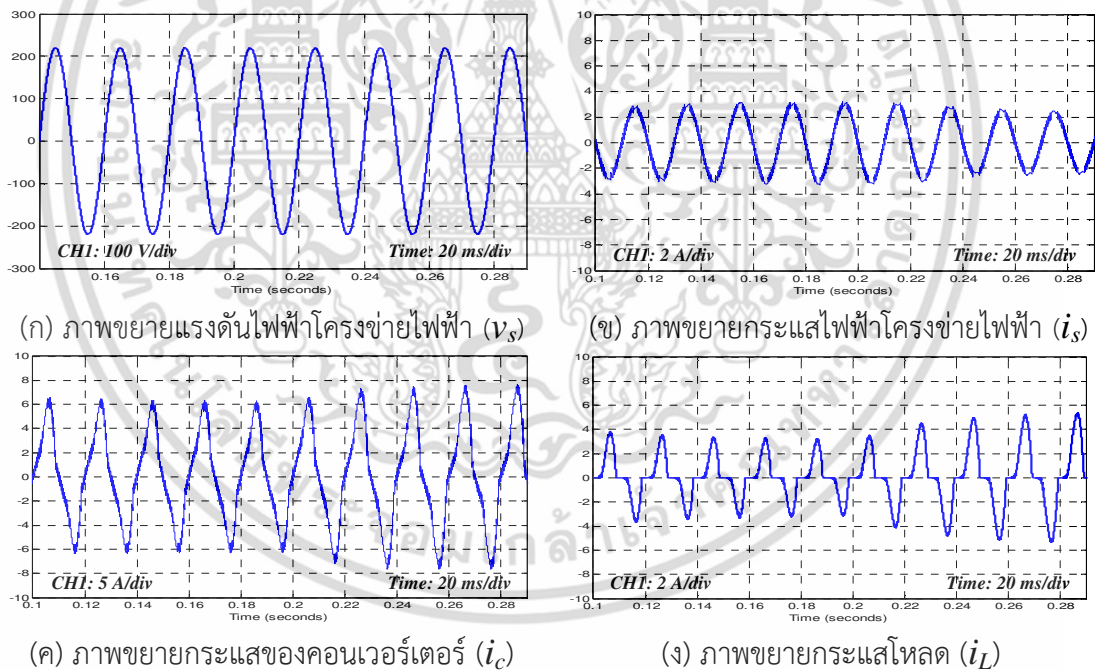
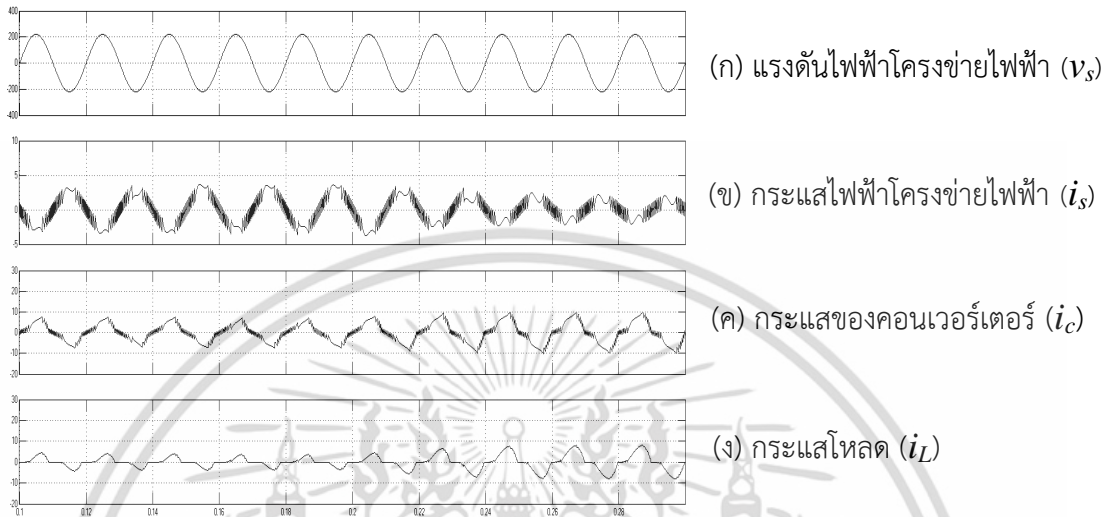
(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

(ข) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อเปลี่ยนแปลงโหลด

รูปที่ 5.15 ผลการจำลองแรงดัน v_s และกระแส i_s กรณีปรับเปลี่ยนโหลด

พิจารณาจากรูปที่ 5.15 เมื่อทำการปรับเพิ่มโหลดจาก 300 W เพิ่มขึ้นเป็น 600 W ที่เวลาเอกสารนี้ $t = 0.2$ วินาที จะทำให้ปริมาณของกระแสโหลด (i_L) เพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าในระบบไม่ว่กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคงจ่ายไฟฟ้า (i_s) ลดลง และในขณะเดียวกันการสวิตช์ที่ขอบเขตฮีสเตอร์ซิสจะกว้างขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดของกระแสแต่ยังสามารถทำมุมเฟสกับแรงดันไฟฟ้าที่โคงจ่าย (v_s) 180 องศา



รูปที่ 5.16 การจำลองแรงดันระบบโคงจ่ายไฟฟ้า (v_s), กระแสในระบบโคงจ่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสของคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L) ในกรณีปรับเปลี่ยนโหลด

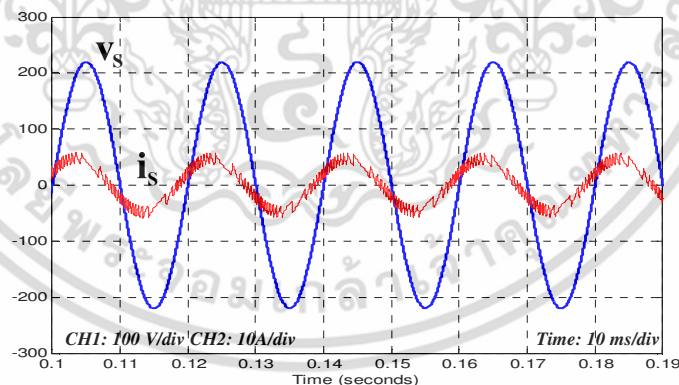
พิจารณาจากรูปที่ 5.16 ในช่วงการปรับเปลี่ยนปริมาณกระแสโหลด (i_L) ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น ผลการจำลองจะพบว่ากระแสในระบบโคงจ่าย (i_s) จะมีค่าลดลง ในขณะเดียวกันกระแสคอนเวอร์เตอร์ (i_c) จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามกระแสโหลดเนื่องจากฟังก์ชันอนุพันธ์การหากระแสอ้างอิง (i_{ref}) จึงทำให้คอนเวอร์เตอร์จ่ายพลังงานได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

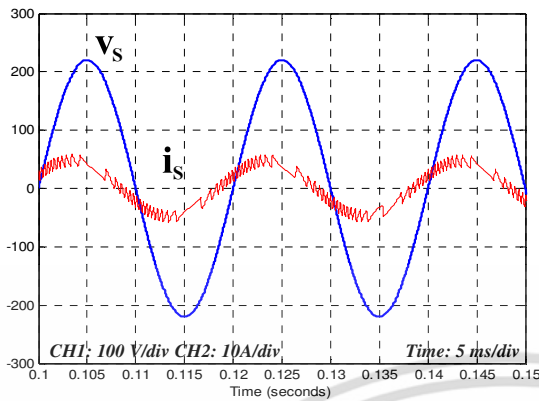
5.1.7 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

การจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้มีมุมนำหน้าแรงดันไฟฟ้าโครงข่าย 30 องศา โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 310 V และแรงดันไฟฟ้าระบบโครงข่ายเท่ากับ $220 V_{rms}$ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดมุมสัญญาณไซน์จากสมการฟังก์ชันไซน์โดยบวกมุมนำกระแสเพื่อเปลี่ยนมุมของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าที่เริ่มต้นให้มีสัญญาณตรงข้าม (Out-of-Phase) กับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยผลรวมการคำนวณมุมเฟสจะมีค่าเท่ากับ $\pi+30$ องศา เพื่อจำลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (v_s), กระแสไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L)

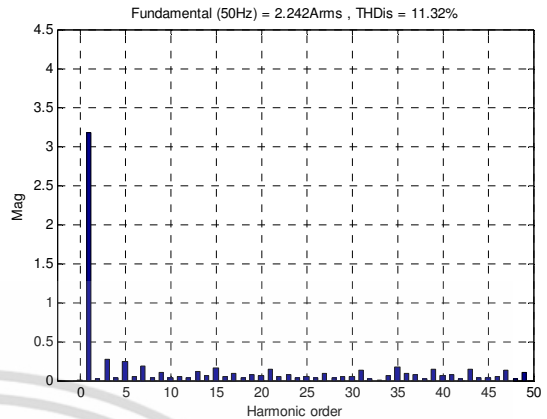
จากการจำลองกำหนดให้กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) มีค่าเท่ากับ 6 A จะเห็นได้ว่ากระแสที่จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Peak Current) มีค่าเท่ากับ 4.754 A และมีค่าความผิดเพี้ยนเท่ากับ 17.08 % ซึ่งพบว่าขนาดกระแสมูลฐาน (Fundamental Current) เพิ่มขึ้นและผลรวมค่าความผิดเพี้ยนลดลง ดังรูปที่ 5.17



(ก) แสดงการจำลองของระบบเมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 30 องศา

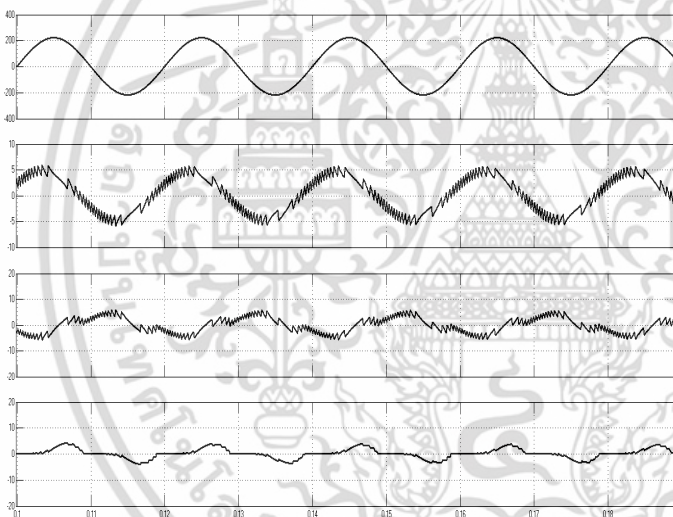


(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s นำหน้า 30 องศา



(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

รูปที่ 5.17 การจำลองกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายนำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

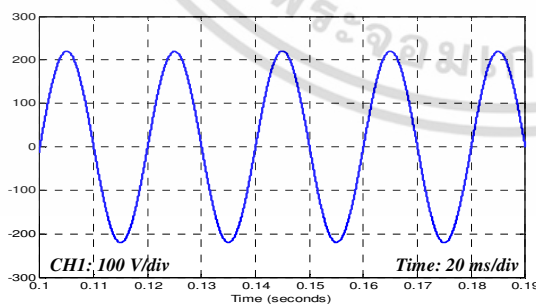


(ก) แรงดันไฟฟ้าโครงข่ายไฟฟ้า (v_s)

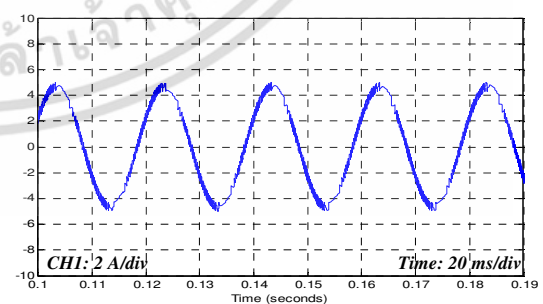
(ข) กระแสไฟฟ้าโครงข่ายไฟฟ้า (i_s)

(ค) กระแสของคอนเวอร์เตอร์ (i_c)

(ง) กระแสโหลด (i_L)

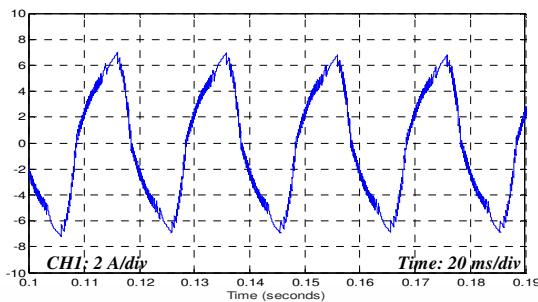
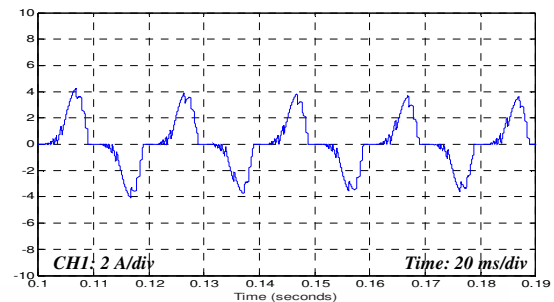


(ก) ภาพขยายแรงดันไฟฟ้าโครงข่ายไฟฟ้า (v_s)



(ข) ภาพขยายกระแสไฟฟ้าโครงข่ายไฟฟ้า (i_s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

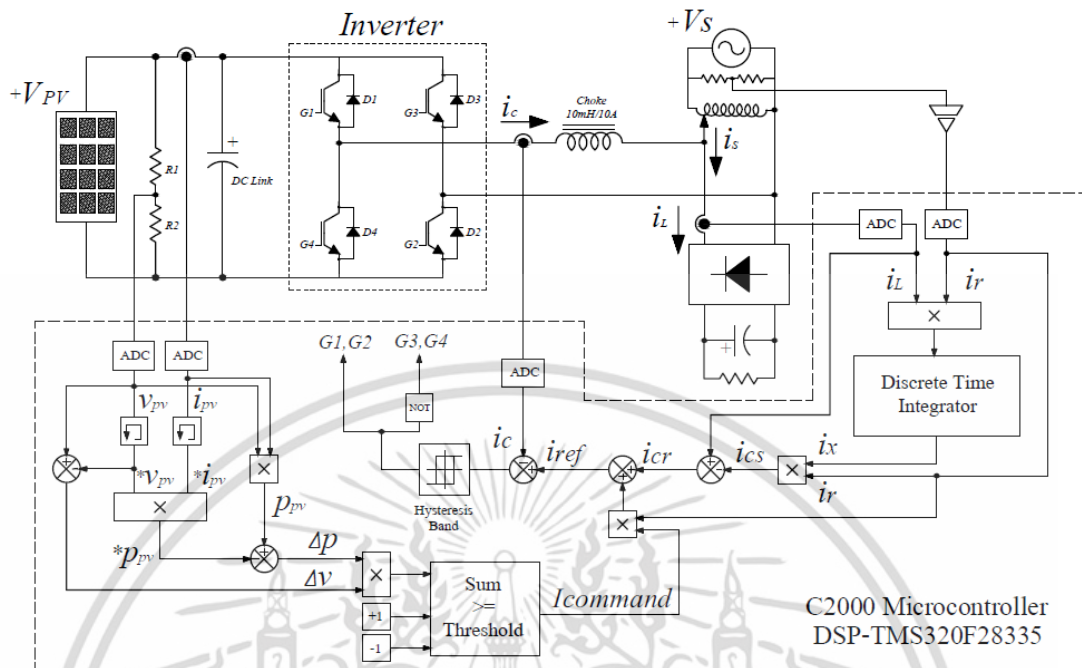
(ค) ภาพขยายกระแสของคอนเวอร์เตอร์ (i_c)(ง) ภาพขยายกระแสโหลด (i_L)

รูปที่ 5.18 การจำลองแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้า (v_s), กระแสในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสของคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L) ในกรณีควบคุมกระแสโครงข่าย ให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

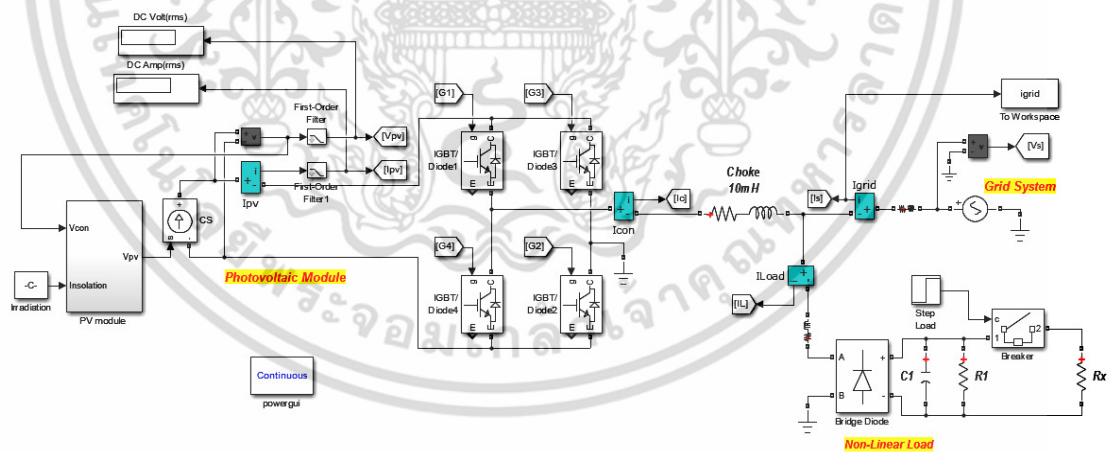
พิจารณาจากรูปที่ 5.18 จะพบว่ากระแสในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s) นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่าย (v_s) เป็นมุม 30 องศา ทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.866 และเมื่อพิจารณาที่กระแสโหลด (i_L) จะพบปรากฏการณ์ที่ทำให้กระแสโหลดไม่เชิงเส้นมีรูปผิดเพี้ยนเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ (DC.Link) มีค่าสูงกว่าแรงดันใช้งานทางด้านโครงข่ายไฟฟ้า (AC.Source) และค่าอิมพีแดนซ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ปรับค่าได้

5.2 จำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

พิจารณาจากรูปที่ 5.19 การจำลองการทำงานของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) จะมีค่าเริ่มต้นต่ำสุดและจะทำการปรับกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) เพิ่มขึ้นโดยทำการคำนวณหาค่ากระแสคำสั่งตามพิกัดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในการออกแบบได้จำกัดขอบเขตของกระแสต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 2 A และกระแสสูงสุดเท่ากับ 15 A ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนจ่ายเข้าสู่ชุดสะสมพลังงาน (DC Link) เพื่อนำมาหาอัตราส่วน $\frac{dP}{dV}$ และคำนวณหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) จากผลการจำลองจะได้ดังรูปที่ 5.21

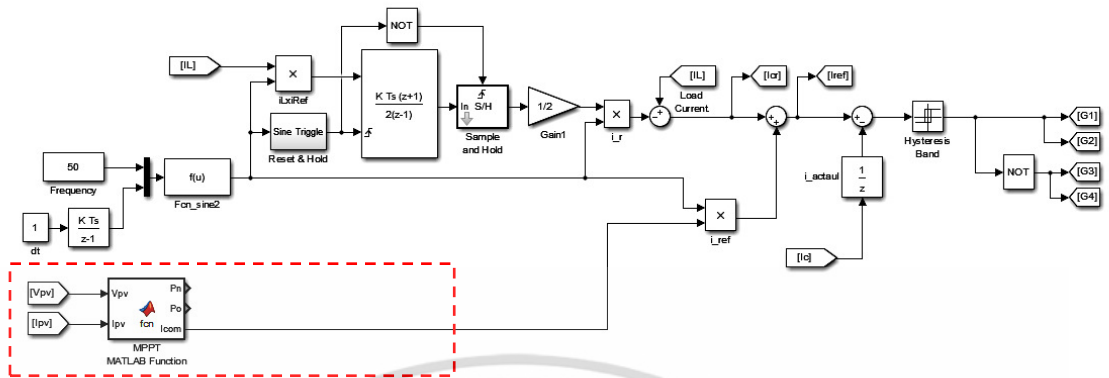


(ก) ระบบจำลองคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า โดยมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด



(ข) วงจรกำลังในการจำลอง

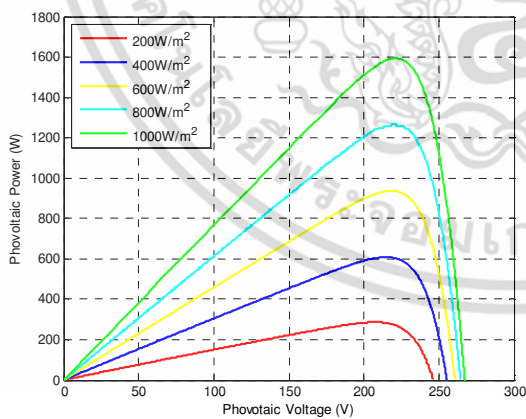
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



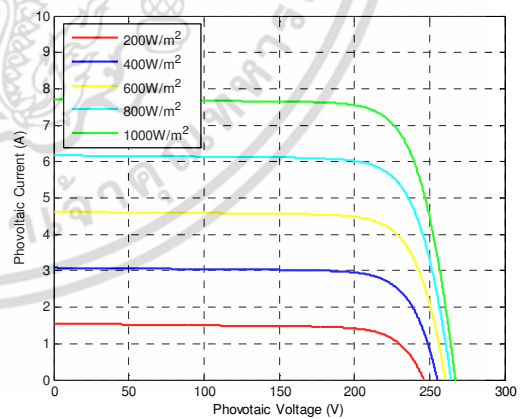
(ค) อัลกอริทึมการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

รูปที่ 5.19 การจำลองการทำงานของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

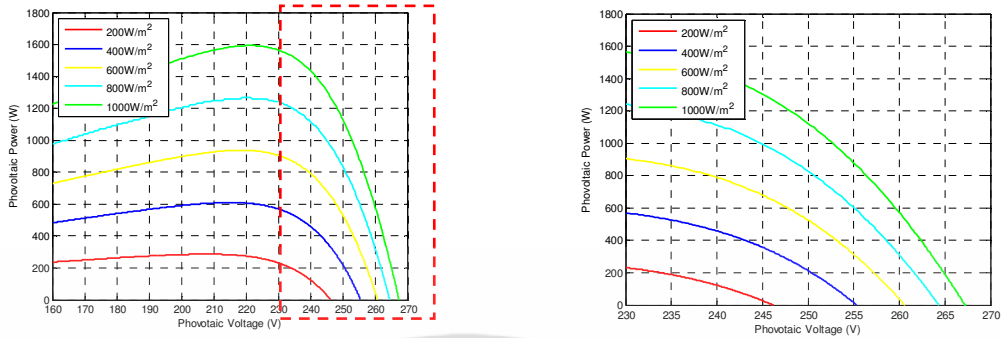
ในการจำลองการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผู้วิจัยได้ทำการจำลองในสถานะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และการจำลองในสถานะที่มีการติดตามเมื่อเกิดปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติ โดยการทดสอบในสถานะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ในการวิจัยนี้ได้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท Chaori Solar Energy จำนวน 6 แผง และมีข้อมูลจำเพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังตารางที่ 5.1 และกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์รูปที่ 5.20



(ก) กำลังไฟฟ้าในฟังก์ชันแรงดันไฟฟ้า



(ข) กระแสไฟฟ้าในฟังก์ชันแรงดันไฟฟ้า



(ค) กราฟคุณลักษณะของแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับค่าความเข้มแสงต่างๆ

รูปที่ 5.20 กราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์บริษัท Chaori Solar Energy

พิจารณาจากรูปที่ 5.20 จากคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท Chaori Solar Energy ผู้ผลิต เมื่อนำมาทำการทดสอบโดยใช้อัลกอริทึมเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink จำลองการทำงาน จะได้แรงดันไฟฟ้า V_{oc} ดังตารางที่ 5.2

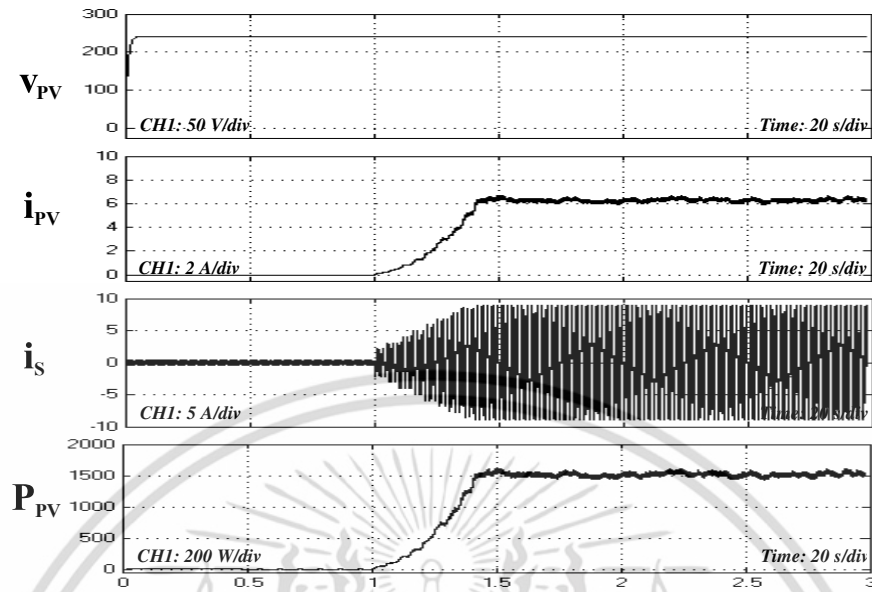
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า V_{oc} ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

ความเข้มแสง (W/m^2)	แรงดันไฟฟ้า V_{oc} (V) MATLAB/Simulink
1000 W/m^2	267.212
800 W/m^2	264.349
600 W/m^2	260.642
400 W/m^2	255.376
200 W/m^2	246.191

5.2.1 การจำลองในสภาวะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

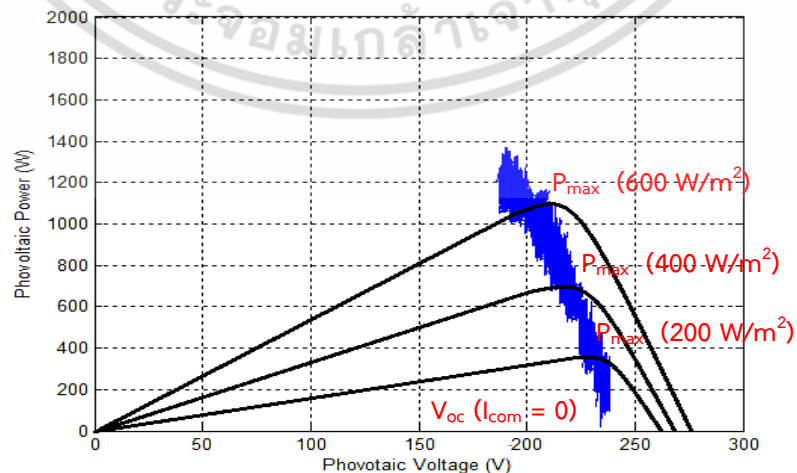
การจำลองการทำงานในสภาวะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ จะกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 2 A และทำการทดสอบการจำลอง ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 พารามิเตอร์ในระบบในสภาวะเริ่มติดตามกำลังไฟฟ้า

พิจารณาจากรูปที่ 5.21 เมื่อเริ่มการจำลองในสภาวะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) โดยกำหนดค่าเริ่มต้นเท่ากับ 2 A จากนั้นระบบการติดตามจะรับค่าแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตจากอัลกอริทึมของเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อประมวลผลและปรับขนาดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด การจำลองในงานวิจัยนี้เมื่อทำการวัดระดับความเข้มแสงจากบริเวณที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความเข้มแสงในบริเวณที่ทำวิจัยสูงสุด 600 วัตต์/ตารางเมตร ดังนั้นจึงกำหนดความเข้มแสงในการจำลองมีค่าเท่ากับ 600 วัตต์/ตารางเมตร และสามารถแสดงผลการจำลองระบบในสภาวะเริ่มติดตามกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.21 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบเริ่มต้นทำงาน ได้ดังรูปที่ 5.22

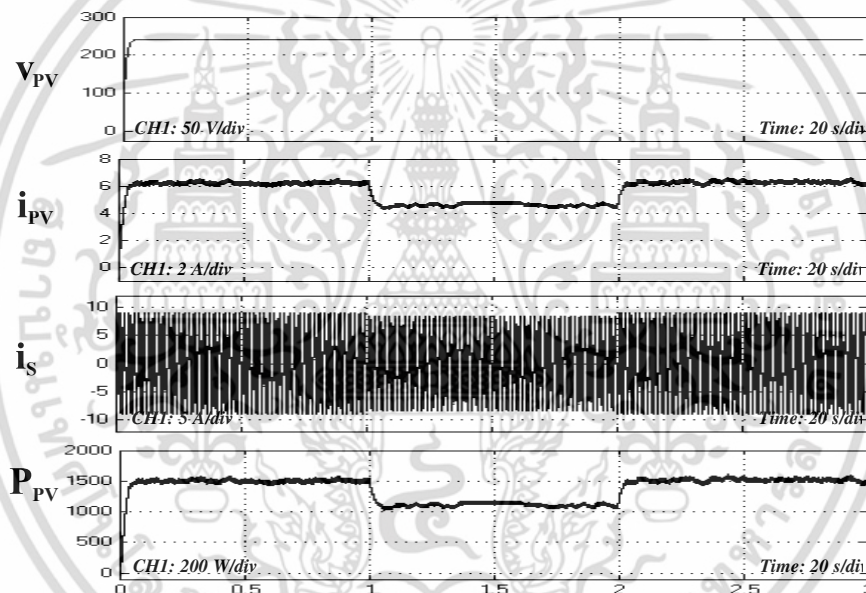


รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบเริ่มต้นทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

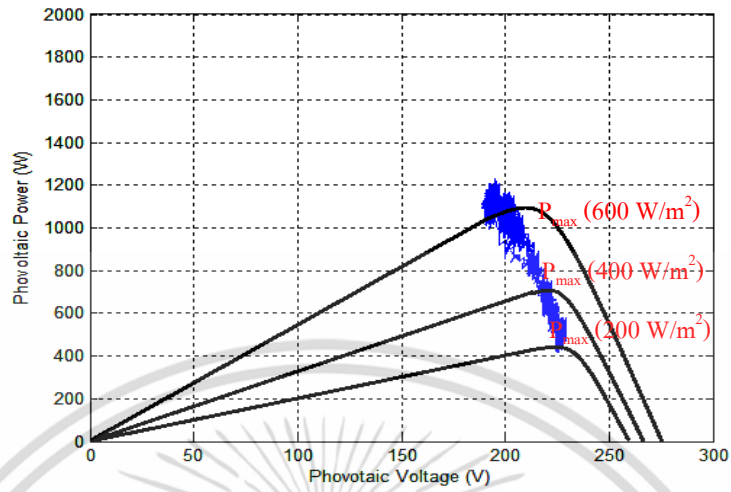
5.2.2 การจำลองในสถานะที่มีการติดตามและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติ

การจำลองในสถานะที่มีการติดตามและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติ การทำงานของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ จะกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมตามคุณลักษณะของผู้ผลิตกำหนดจำนวน 6 แผง มีค่าแรงดันไฟฟ้ารวมเท่ากับ 268 V เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าและร่วมกันจ่ายโหลด โดยจะกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) มีค่าเริ่มต้นน้อยที่สุดเพื่อรักษาระดับกำลังไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจากอัลกอริทึมของเซลล์แสงอาทิตย์ ในโปรแกรม MATLAB/Simulink และทำการทดสอบการจำลองระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังมีรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 5.23 พารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบ เมื่อระดับความเข้มแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน

พิจารณาจากรูปที่ 5.23 ผลการจำลองในสถานะที่มีการติดตามและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติ การทำงานของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำการลดค่ากระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ให้น้อยลงเพื่อรักษาระดับกำลังไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจากอัลกอริทึมของเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการจำลองพบว่าการทำงานของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเกิดปรากฏการณ์แสงที่ตกกระทบลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงตามธรรมชาติ ทำให้กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงส่งผลให้กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) มีขนาดลดลง และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบเริ่มทำงานได้ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบเริ่มต้นทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดสอบการทำงานของระบบ

บทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟสที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้พัฒนาและจัดทำขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในบทที่ 5 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

6.1 ส่วนการทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าที่ไม่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ประกอบด้วย

6.1.1 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อรวม

6.1.2 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวม

6.1.3 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

6.1.4 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแส

6.1.5 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลด

6.1.6 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

6.1.7 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

6.2 ส่วนการทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ประกอบด้วย

6.2.1 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติ

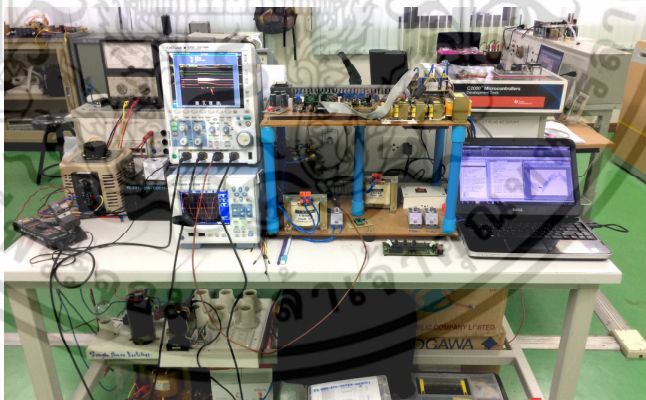
6.2.3 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อร่วม

6.2.4 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมและมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

6.2.5 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแส

6.2.6 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลด

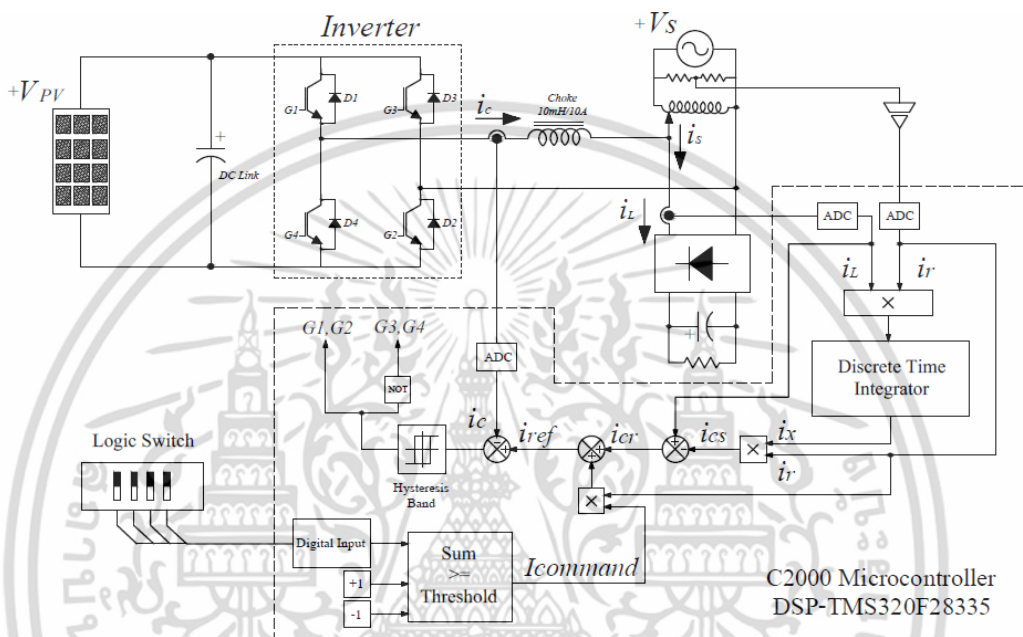
จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟสที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟสที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

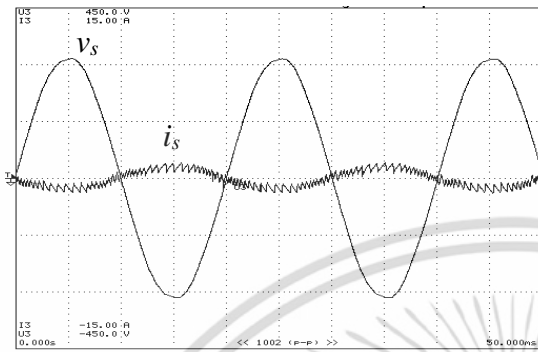
6.1 ส่วนการทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าที่ไม่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่



รูปที่ 6.2 ไดอะแกรมระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไงานานที่ไม่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

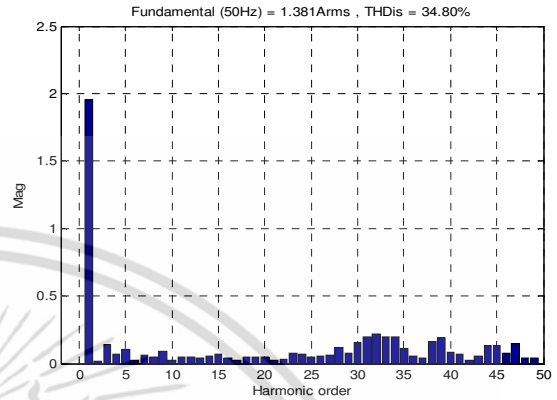
6.1.1 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อร่วม

การทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อร่วมโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่แทนการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบโดยกำหนดให้ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับ 280 V และแรงดันที่จุดต่อร่วมโครงข่ายไฟฟ้าเท่ากับ $229 V_{rms}$ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่โครงข่ายไฟฟ้า เมื่อกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{command}$) Peak ที่จ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์ เริ่มต้นตั้งแต่ 2 A, 4 A, 6 A, 8 A และ 10 A ตามลำดับ จะได้สัญญาณความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.3

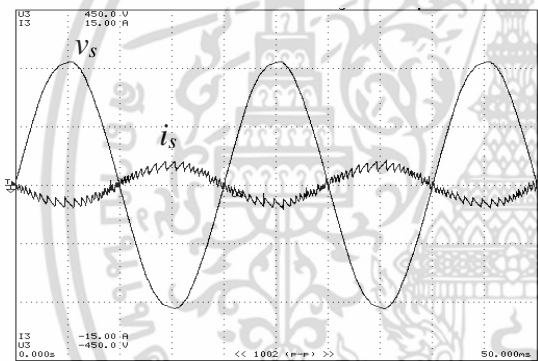


$V_s = 100 \text{ V/div}$, $i_s = 10 \text{ A/div}$, $\text{Time} = 5 \text{ mS/div}$

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ i_{Command} Peak = 2 A

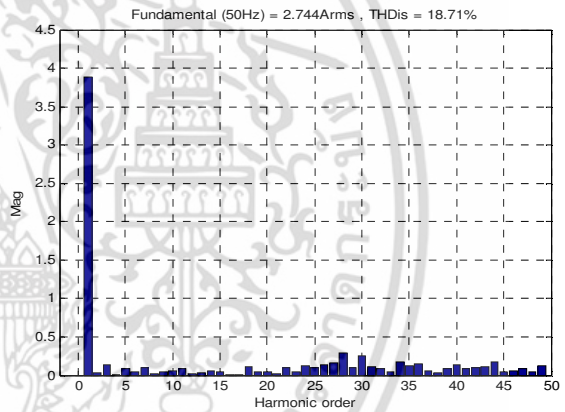


(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

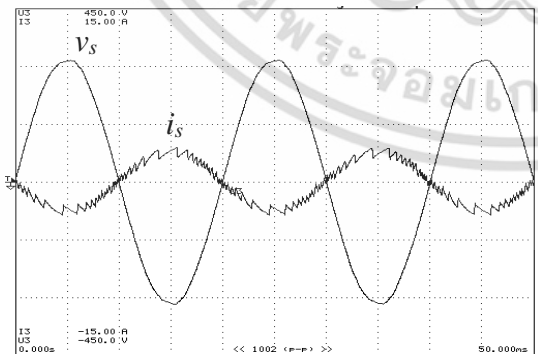


$V_s = 100 \text{ V/div}$, $i_s = 10 \text{ A/div}$, $\text{Time} = 5 \text{ mS/div}$

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ i_{Command} Peak = 4 A

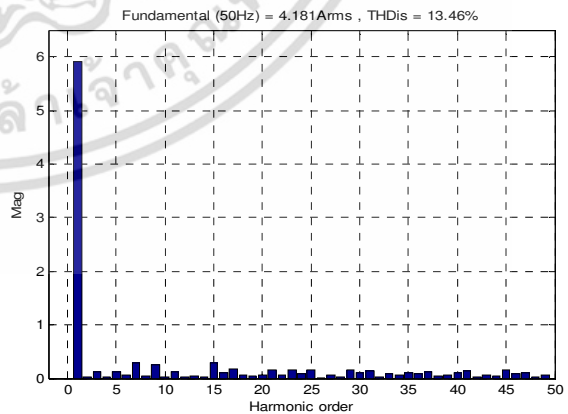


(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s



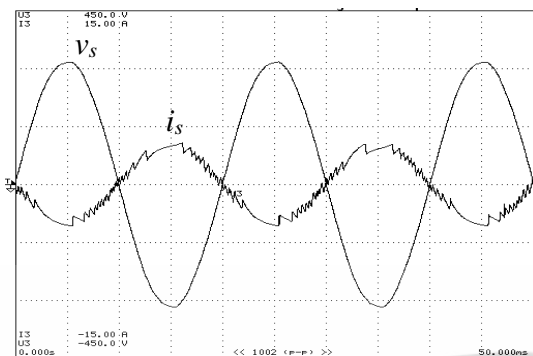
$V_s = 100 \text{ V/div}$, $i_s = 10 \text{ A/div}$, $\text{Time} = 5 \text{ mS/div}$

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ i_{Command} Peak = 6 A



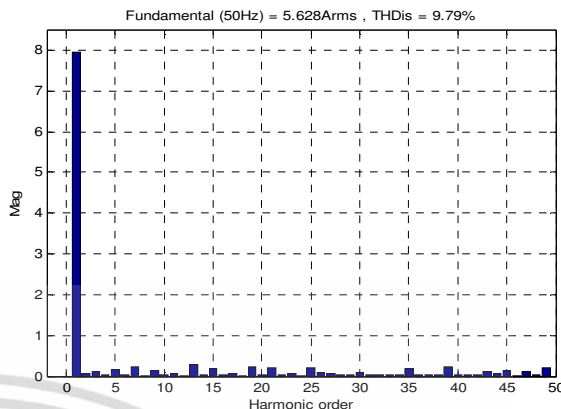
(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

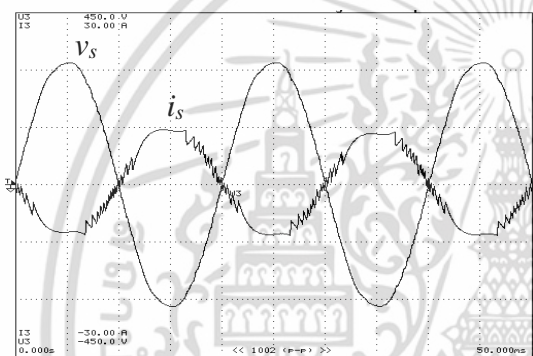


Vs = 100 V/div, is = 10 A/div, Time = 5 ms/div

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 8 A

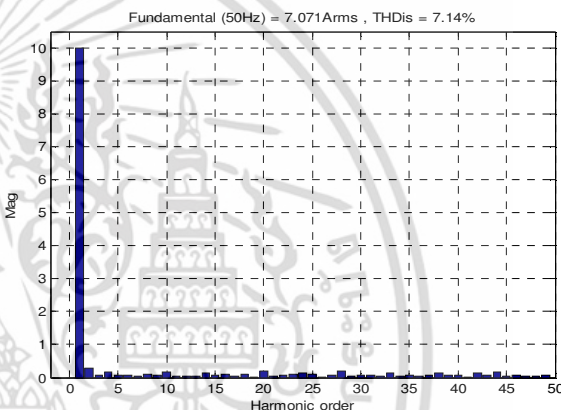


(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s



Vs = 100 V/div, is = 10 A/div, Time = 5 ms/div

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 10 A



(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

รูปที่ 6.3 การทดสอบการกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$)

พิจารณาจากรูปที่ 6.3 (ก) เมื่อกำหนดกระแสคำสั่งสูงสุด (Peak) เริ่มตั้งแต่ 2 A, 4 A, 6 A, 8 A และ 10 A จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) มีรูปลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และทำมุมเฟส 180 องศา กับแรงดันไฟฟ้าโครงข่ายและเมื่อพิจารณาสเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s จะพบว่ากระแสมูลฐาน (Fundamental Current) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) และค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion; THD) จะมีค่าลดลงสอดคล้องกับผลการจำลองในบทที่ 5 เมื่อพิจารณาที่กระแสคำสั่งมีค่ามากกว่า 8 A และ 10 A จะพบปรากฏการณ์โอเวอร์มอดูเลต (Over modulate) เนื่องจากแอมพลิจูดของกระแสอ้างอิง (i_{ref}) มากกว่ากระแสคอนเวอร์เตอร์ (i_c) ที่ใช้ในการมอดูเลต ทำให้ช่วงสูงสุดของกระแสในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกิดการโอเวอร์มอดูเลตส่งผลให้เกิดค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 6.3 (ข)

Normal Mode Uover: ■ ■ ■ Scaling: # LineFilt: ■ NULL: ■ YOKOGAWA ◆
 Iover: ■ ■ ■ Average: ■ FreqFilt: ■ CF: 3

	Element1 300V 10A	Element2 300V 10A	Element3 300V 10A
Voltage			
Current			
Urms [V]	276.49	162.62	228.57
Irms [A]	0.8716	0.000	1.024
P [W]	0.2405k	0.0000k	-0.1883k
S [VA]	0.2410k	0.0000k	0.2341k
Q [var]	0.0149k	0.0000k	0.1392k
λ []	0.9981	Error	-0.8040
φ [°]	63.54	Error	6143.51
fU [Hz]			
fI [Hz]	155.53	-----	806.27
Urms [V]	276.49	162.62	228.57
Umn [V]	306.96	162.31	229.00
Udc [V]	276.36	-0.19	0.32
Urm [V]	276.36	146.13	206.17
Uac [V]	8.25	162.62	228.57
U*pk [V]	285.03	237.16	321.41
U-pk [V]	268.58	-238.57	-321.37
CIU []	1.031	1.467	1.406

Update 41(100msec) 2017/06/10 16:39:36

(ก) กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพในระบบ เมื่อ $i_{Command} = 2 \text{ A}$

Normal Mode Uover: ■ ■ ■ Scaling: # LineFilt: ■ NULL: ■ YOKOGAWA ◆
 Iover: ■ ■ ■ Average: ■ FreqFilt: ■ CF: 3

	Element1 300V 10A	Element2 300V 10A	Element3 300V 10A
Voltage			
Current			
Urms [V]	272.70	162.12	229.87
Irms [A]	1.6364	0.000	1.797
P [W]	0.4456k	0.0000k	-0.3867k
S [VA]	0.4463k	0.0000k	0.4130k
Q [var]	0.0250k	0.0000k	0.1450k
λ []	0.9984	Error	-0.9363
φ [°]	63.21	Error	6159.44
fU [Hz]			
fI [Hz]	782.49	-----	277.21
Urms [V]	272.70	162.12	229.87
Umn [V]	302.76	162.04	230.45
Udc [V]	272.58	-0.32	-0.03
Urm [V]	272.58	145.89	207.48
Uac [V]	8.21	162.12	229.87
U*pk [V]	289.15	236.02	322.40
U-pk [V]	260.13	-243.68	-322.73
CIU []	1.060	1.503	1.404

Update 41(100msec) 2017/06/10 16:42:54

(ข) กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพในระบบ เมื่อ $i_{Command} = 4 \text{ A}$

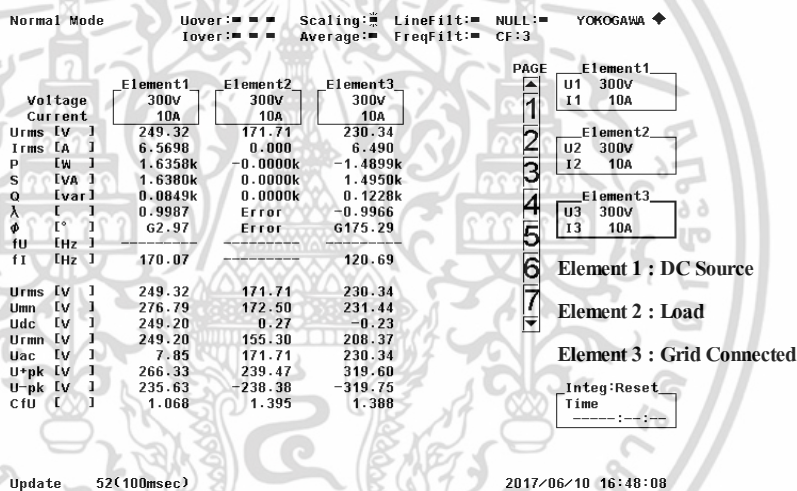
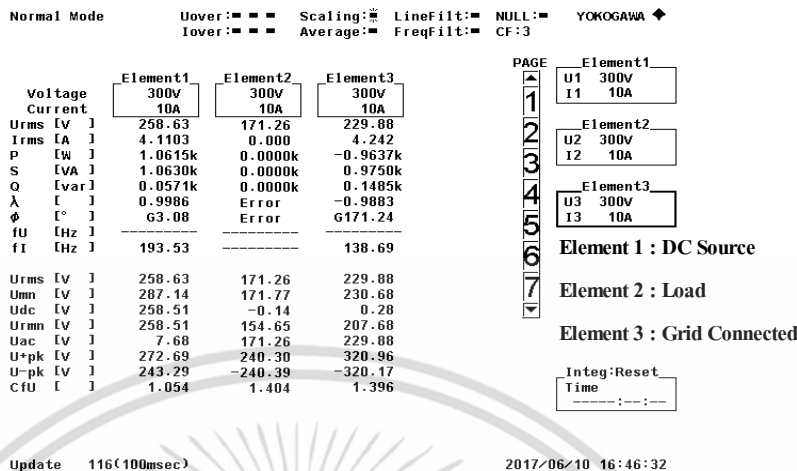
Normal Mode Uover: ■ ■ ■ Scaling: # LineFilt: ■ NULL: ■ YOKOGAWA ◆
 Iover: ■ ■ ■ Average: ■ FreqFilt: ■ CF: 3

	Element1 300V 10A	Element2 300V 10A	Element3 300V 10A
Voltage			
Current			
Urms [V]	264.29	163.94	229.39
Irms [A]	2.9255	0.000	3.076
P [W]	0.7721k	0.0000k	-0.6909k
S [VA]	0.7732k	0.0000k	0.7055k
Q [var]	0.0416k	0.0000k	0.1427k
λ []	0.9985	Error	-0.9793
φ [°]	63.09	Error	6168.33
fU [Hz]			
fI [Hz]	413.11	-----	172.71
Urms [V]	264.29	163.94	229.39
Umn [V]	293.41	164.07	230.06
Udc [V]	264.17	-0.23	-0.20
Urm [V]	264.17	147.71	207.13
Uac [V]	7.97	163.94	229.39
U*pk [V]	277.03	234.74	321.08
U-pk [V]	251.60	-236.95	-320.84
CIU []	1.048	1.445	1.400

Update 61(100msec) 2017/06/10 16:44:04

(ค) กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพในระบบ เมื่อ $i_{Command} = 6 \text{ A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



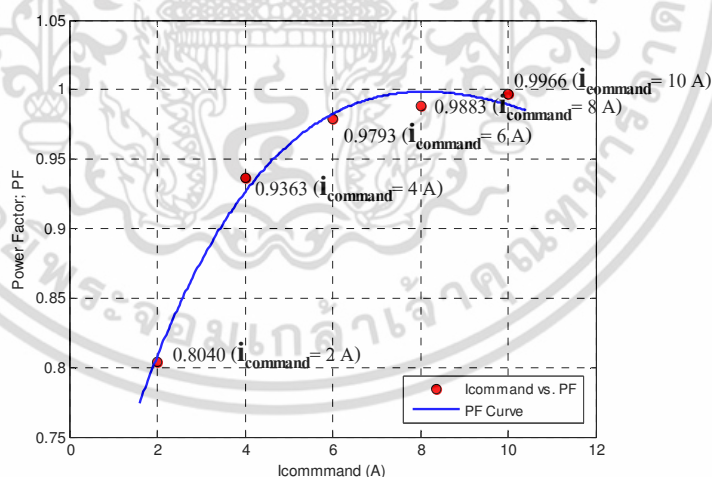
รูปที่ 6.4 การทดสอบปรับปริมาณกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$)

จากรูปที่ 6.4 ในการทดสอบปรับกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) และทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ (DC Source) ร่วมกับกำลังไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Grid Connected) เพื่อหาประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในระหว่างการทำงานโดยแบ่งโหมดการวัดเป็น 3 ส่วน (Element) การทดสอบสามารถบันทึกในช่วงกระแสคำสั่งที่ 2 A, 4 A, 6 A 8 A และ 10 A จะได้ผลดังรูปที่ 6.4 (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) และตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์

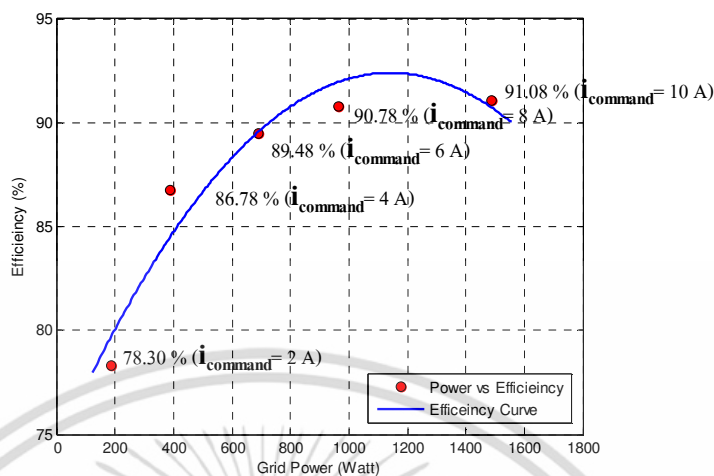
$i_{Command}$ (A_{peak})	DC Source			Grid Connected			PF	η (%)
	V (V_{dc})	I (A_{dc})	P (kW)	V (V_{rms})	I (A_{rms})	P (kW)		
2 A	276.49	0.817	0.2405	228.57	1.024	-0.1883	0.8040	78.295%
4 A	272.70	1.636	0.4456	229.87	1.797	-0.3867	0.9363	86.781%
6 A	264.29	2.925	0.7721	229.39	3.076	-0.6909	0.9793	89.483%
8 A	258.63	4.110	1.0615	229.88	4.242	-0.9637	0.9883	90.786%
10 A	249.32	6.569	1.6358	230.34	6.490	-1.4899	0.9966	91.080%

จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจากการจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้ตามการควบคุมกระแสคำสั่งและในขณะเดียวกันระบบยังสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังไวงานเพื่อชดเชยกำลังเสมือนดังรูปที่ 6.4 และลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าดังรูปที่ 6.3 (ข) ส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่ง และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ในฟังก์ชันของตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ได้ดังรูปที่ 6.5 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ในฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ในฟังก์ชันตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

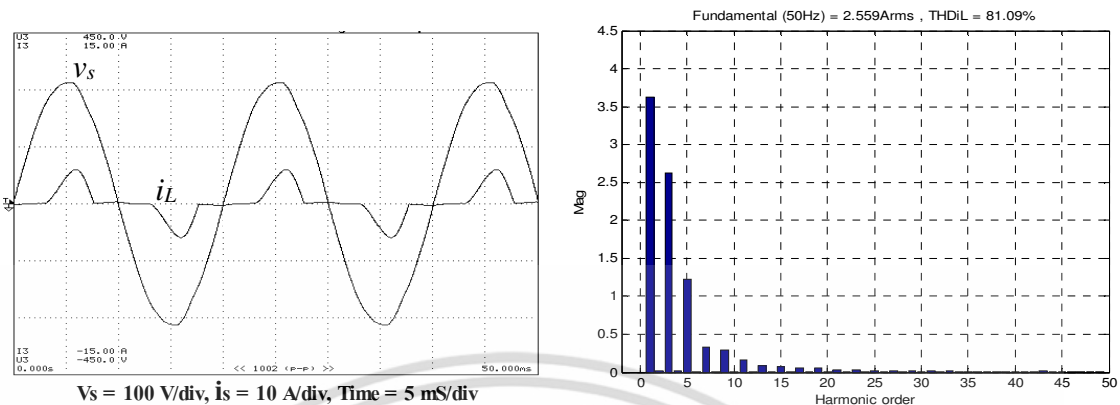


รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ในฟังก์ชันกำลังไฟฟ้า

6.1.2 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวม

ในการทดสอบการทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวม (วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและโหลดไฟฟ้า) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.7

พิจารณาจากรูปที่ 6.7 จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบโดยวัดกระแสที่ไหลผ่านโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้าปรากฏว่าผลการทดสอบที่ได้มีผลใกล้เคียงกับลักษณะรูปคลื่นจากการจำลองในบทที่ 5 ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านโหลด (i_L) จะมีฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5, 7 และ 9 มีแอมพลิจูดสูงขึ้น ซึ่งทำให้รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านโหลดผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์เมื่อควบคุมให้ระบบจ่ายกระแสที่เป็นรูปคลื่นไซน์ ในขณะที่เดียวกันโครงข่ายไฟฟ้าจะทำหน้าที่จ่ายกระแสที่เป็นฮาร์มอนิกให้กับโหลดดังนั้นรูปคลื่นกระแสของโครงข่ายจะผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ด้วยแต่ระบบยังสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากโหลดไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้



$V_s = 100$ V/div, $i_s = 10$ A/div, Time = 5 ms/div

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_L

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_L

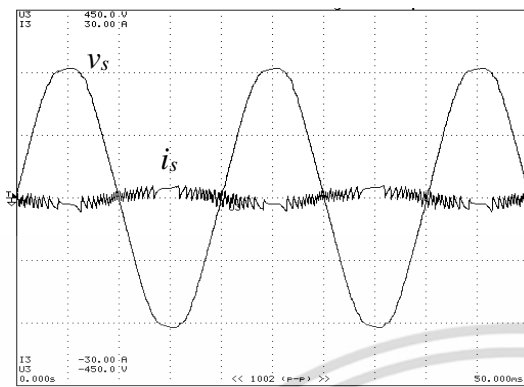
Normal Mode		Uover: ■■	Scaling: #	LineFilt: ■	NULL: ■	YOKOGAWA
		Lover: ■■	Average: ■	FreqFilt: ■	CF: 3	
		Element1	Element2	Element3	PAGE	
Voltage		300v	300v	300v	U1 300v	
Current		5A	10A	5A	I1 5A	
Urms	V	301.80	226.38	226.18	Element1	
Irms	A	0.0000	1.3300	1.3334	U2 300v	
P	W	0.0000k	-0.2303k	0.2383k	I2 10A	
S	VAr	0.0000k	0.3018k	0.3016k	Element3	
Q	Vvar	0.0000k	0.1888k	0.1848k	U3 300v	
λ	°	Error	0.7900	0.7903	I3 5A	
ϕ	°	Error	637.79	637.79	Element 1 : DC Source	
fU	Hz	Error			Element 2 : Load	
fI	Hz	Error		49.981	Element 3 : Grid Connected	
Urms	V	0.00	0.00	226.18	Integ:Reset	
Umn	V	0.00	0.00	226.65	Time	
Udc	V	0.00	-0.01	0.35		
Urmn	V	0.00	0.00	204.06		
Uac	V	0.00	0.00	226.18		
U*pk	V	0.39	0.35	320.18		
U-pk	V	-0.41	-0.38	-320.34		
CfU	°	Error	Error	1.416		
Update		46(100msec)		2017/06/10 14:28:20		

(ค) กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพในระบบ

รูปที่ 6.7 การทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้น

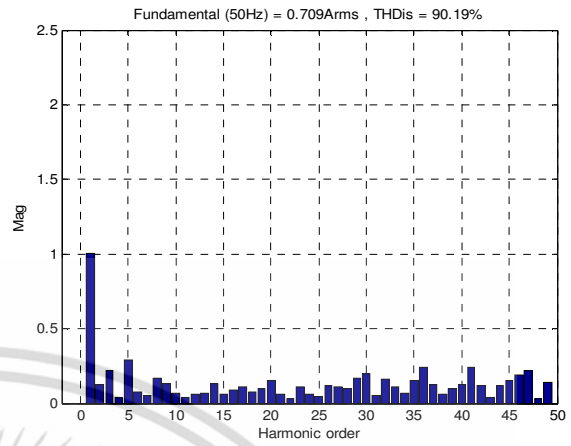
6.1.3 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

การทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่โครงข่ายไฟฟ้า โดยกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) มีค่าเท่ากับ 2 A, 4 A, 6 A, 8 A และ 10 A ตามลำดับ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.8

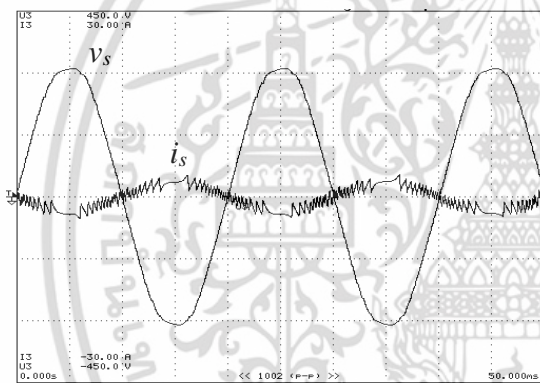


$V_s = 100V/div, i_s = 10A/div, Time = 5ms/div$

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 2 A

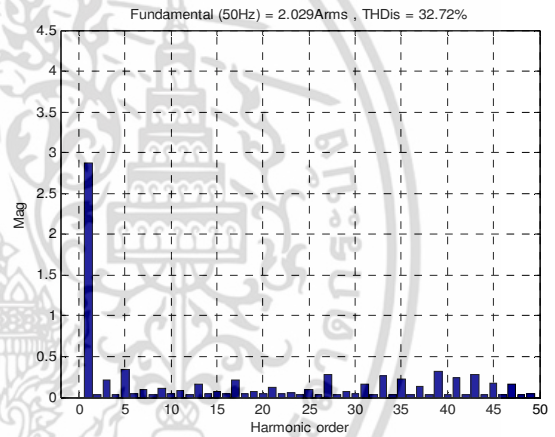


(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

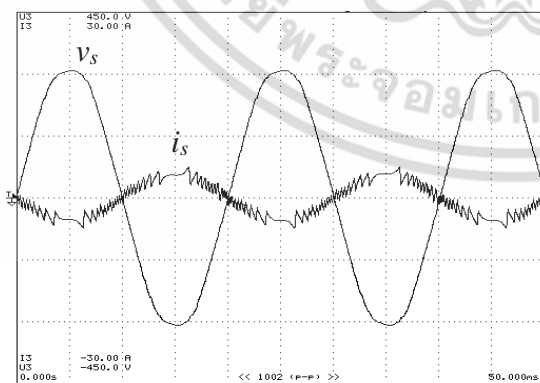


$V_s = 100V/div, i_s = 10A/div, Time = 5ms/div$

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 4 A

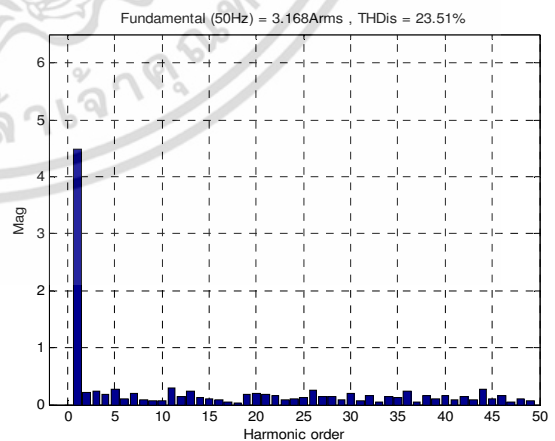


(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s



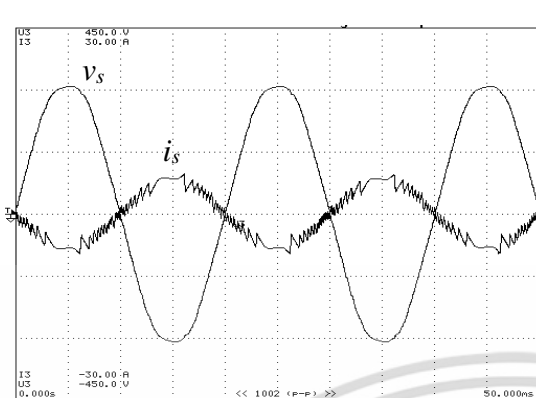
$V_s = 100V/div, i_s = 10A/div, Time = 5ms/div$

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 6 A



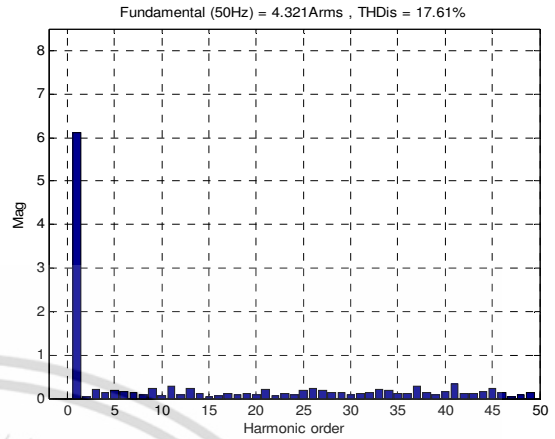
(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

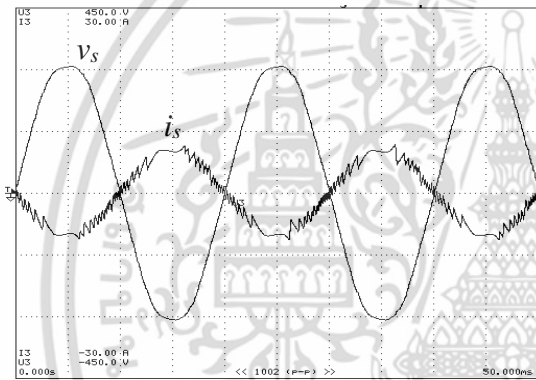


$V_s = 100V/div, I_s = 10A/div, Time = 5ms/div$

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 8 A

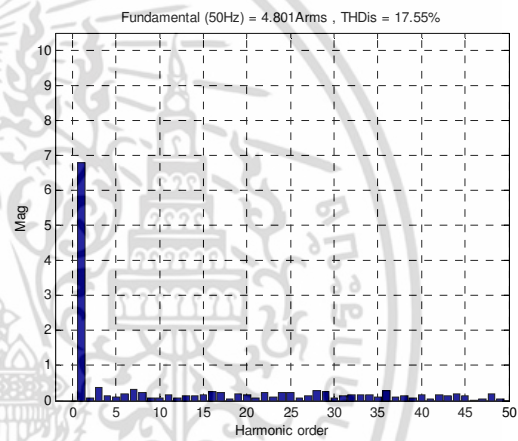


(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s



$V_s = 100V/div, I_s = 10A/div, Time = 5ms/div$

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อ $i_{Command}$ Peak = 10 A



(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

รูปที่ 6.8 ทดสอบการทำงานในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

Normal Mode Uover: == Scaling: # LineFilt: == NULL: == YOKOGAWA PAGE

Iover: == Average: # FreqFilt: == CF: 3

	Element1	Element2	Element3
Voltage	300V	300V	300V
Current	10A	10A	10A
Urms [V]	280.15	160.15	225.97
Irms [A]	0.754	1.039	0.867
P [W]	0.2109k	0.0928k	-0.0580k
S [VA]	0.2113k	0.1663k	0.1958k
Q [var]	0.0136k	0.1380k	0.1870k
λ	0.9979	0.5581	0.8363
ϕ [°]	63.68	D56.07	D107.23
fU [Hz]	Error		
fI [Hz]	Error		
Urms [V]	280.15	160.15	225.97
Umn [V]	311.17	160.40	226.89
Udc [V]	280.15	-0.59	-0.90
Urmn [V]	280.15	144.41	204.27
Uac [V]	0.00	160.15	225.97
U*pk [V]	290.76	230.52	319.60
U-pk [V]	270.10	-220.01	-319.74
CIU [I]	1.038	1.439	1.415

Element 1 : DC Source

Element 2 : Load

Element 3 : Grid Connected

Integ:Reset

Time

Update 16(100msec) 2017/07/19 16:12:28

(ก) กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak = 2 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Normal Mode Uover: ■ ■ ■ Scaling: ■ LineFilt: ■ NULL: ■ YOKOGAWA ◆
 Iover: ■ ■ ■ Average: ■ FreqFilt: ■ CF: 3

	Element1	Element2	Element3
Voltage	300v	300v	300v
Current	10A	10A	10A
Urms [V]	272.75	162.55	226.85
Irms [A]	1.829	1.047	1.727
P [W]	0.4980k	0.0917k	-0.3386k
S [VA]	0.4988k	0.1702k	0.3917k
Q [var]	0.0275k	-0.1433k	0.1969k
λ []	0.9985	0.5389	-0.8644
φ [°]	63.16	D57.39	G149.82
fU [Hz]	Error	-----	-----
fI [Hz]	Error	-----	-----
Urms [V]	272.75	162.55	226.85
Umn [V]	302.94	162.92	227.92
Udc [V]	272.75	-0.43	-0.46
Urmn [V]	272.75	146.68	205.20
Uac [V]	0.00	162.55	226.85
U*pk [V]	283.75	223.38	319.13
U-pk [V]	256.67	-222.30	-319.04
CFU []	1.040	1.374	1.407

Update 101(100msec) 2017/07/19 16:12:53

(ข) กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak = 4 A

Normal Mode Uover: ■ ■ ■ Scaling: ■ LineFilt: ■ NULL: ■ YOKOGAWA ◆
 Iover: ■ ■ ■ Average: ■ FreqFilt: ■ CF: 3

	Element1	Element2	Element3
Voltage	300v	300v	300v
Current	10A	10A	10A
Urms [V]	266.00	164.13	227.15
Irms [A]	3.094	1.129	2.946
P [W]	0.8219k	0.0970k	-0.6364k
S [VA]	0.8230k	0.1853k	0.6691k
Q [var]	0.0436k	-0.1579k	0.2066k
λ []	0.9986	0.5235	-0.9511
φ [°]	63.04	D58.43	G162.01
fU [Hz]	Error	-----	-----
fI [Hz]	Error	-----	-----
Urms [V]	266.00	164.13	227.15
Umn [V]	295.45	164.72	228.34
Udc [V]	266.00	-0.18	-0.20
Urmn [V]	266.00	148.30	205.58
Uac [V]	0.00	164.13	227.15
U*pk [V]	278.45	223.38	317.95
U-pk [V]	256.51	-223.41	-319.04
CFU []	1.047	1.361	1.405

Update 101(100msec) 2017/07/19 16:12:53

(ค) กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak = 6 A

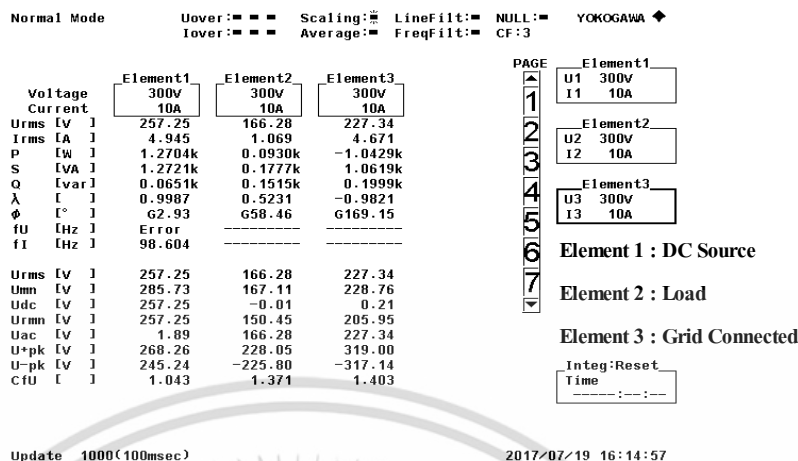
Normal Mode Uover: ■ ■ ■ Scaling: ■ LineFilt: ■ NULL: ■ YOKOGAWA ◆
 Iover: ■ ■ ■ Average: ■ FreqFilt: ■ CF: 3

	Element1	Element2	Element3
Voltage	300v	300v	300v
Current	10A	10A	10A
Urms [V]	260.83	164.97	226.92
Irms [A]	3.999	1.094	3.804
P [W]	1.0415k	0.0948k	-0.8382k
S [VA]	1.0430k	0.1804k	0.8631k
Q [var]	0.0543k	-0.1535k	0.2060k
λ []	0.9986	0.5255	-0.9711
φ [°]	62.98	D58.30	G166.19
fU [Hz]	Error	-----	-----
fI [Hz]	Error	-----	-----
Urms [V]	260.83	164.97	226.92
Umn [V]	289.70	165.68	228.27
Udc [V]	260.82	-0.08	0.05
Urmn [V]	260.82	149.16	205.52
Uac [V]	1.59	164.97	226.92
U*pk [V]	276.64	223.31	316.91
U-pk [V]	249.94	-223.95	-316.57
CFU []	1.061	1.358	1.397

Update 802(100msec) 2017/07/19 16:14:23

(ง) กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak = 8 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



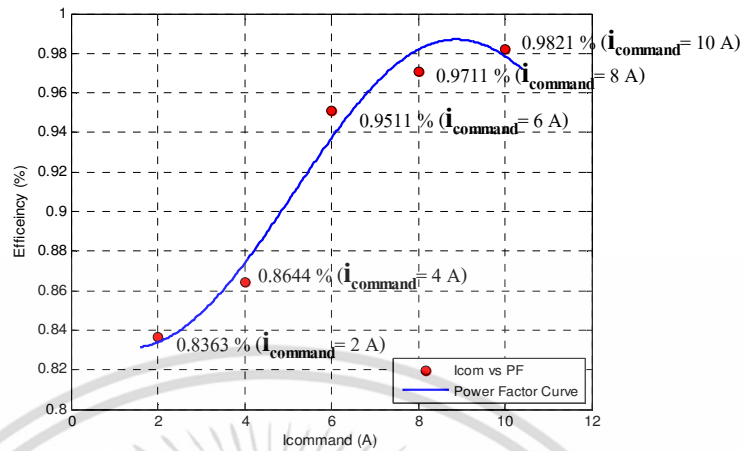
(จ) กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak = 10 A

รูปที่ 6.9 ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze)

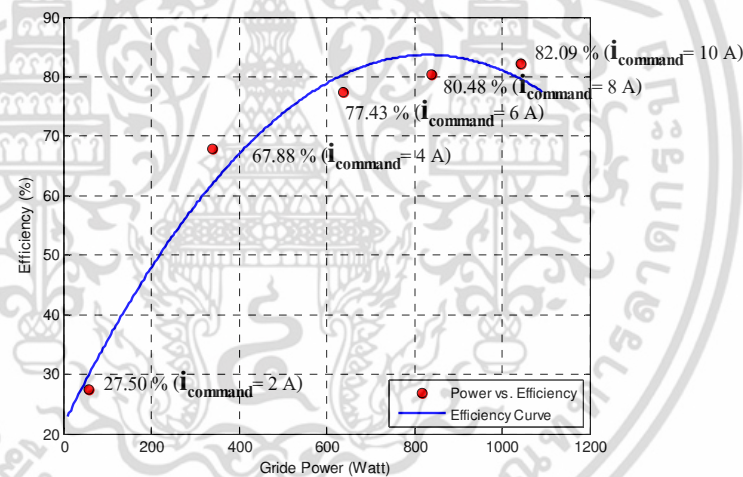
ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบในสภาวะจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

$i_{Command}$ (A_{peak})	DC Source			Grid Connected			PF	η (%)
	V (V_{dc})	I (A_{dc})	P (kW)	V (V_{rms})	I (A_{rms})	P (kW)		
2 A	280.15	0.754	0.2109	225.97	0.867	-0.0580	0.8363	27.50
4 A	272.75	1.829	0.4988	226.85	1.727	-0.3386	0.8644	67.88
6 A	266.00	3.094	0.8219	227.15	2.946	-0.6364	0.9511	77.43
8 A	260.83	3.999	1.0415	226.92	3.804	-0.8382	0.9711	80.48
10 A	257.25	4.945	1.2704	227.34	4.671	-1.0429	0.9821	82.09

ผลการทดสอบจ่ายกำลังไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวมในระบบโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก เมื่อกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ตามลำดับ ดังรูปที่ 6.8 (ก) จะเห็นได้ว่าระบบสามารถคำนวณกระแสฮาร์มอนิก (i_{CR}) เพื่อจ่ายร่วมกับกระแสไซน์อ้างอิง (i_{ref}) ทำให้กระแสที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s) ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ และมีสเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s (THDis) ลดลง ดังรูปที่ 6.8 (ข) สอดคล้องกับผลการจำลองในบทที่ 5 และจากรูปที่ 6.9 เมื่อทำการจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกพบว่าระบบสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากโหลดไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าและยังทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังไวงานเพื่อชดเชยกำลังเสมือนและลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่งดังผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 6.2 และจากตารางที่ 6.2 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ในฟังก์ชันของตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ดังรูปที่ 6.10 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ในฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 6.11



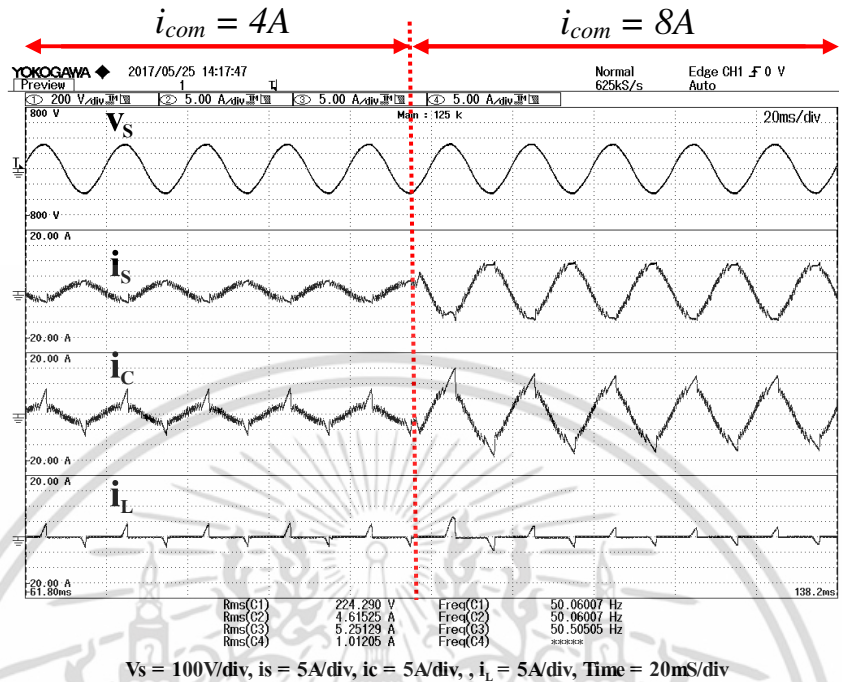
รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสคำสั่ง (i_{Command}) ในฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าในระบบโครงข่าย



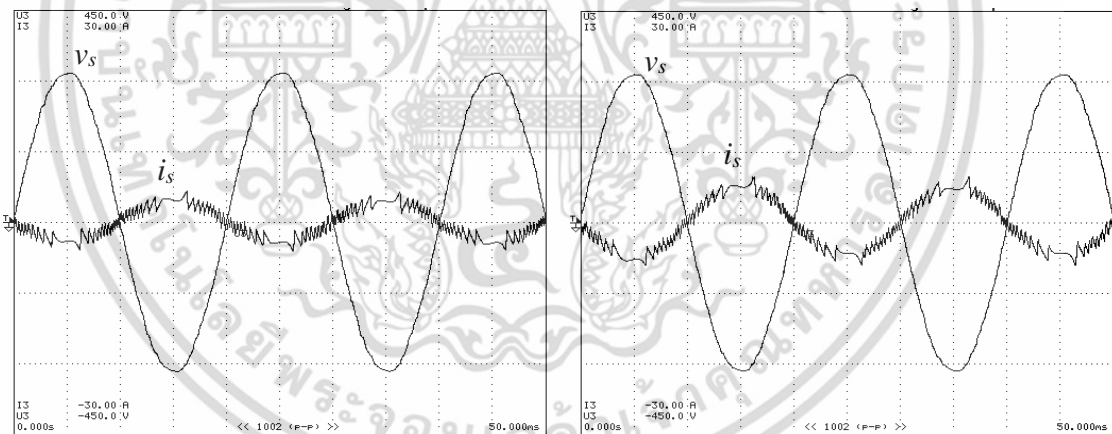
รูปที่ 6.11 กราฟความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ในฟังก์ชันกำลังไฟฟ้า

6.1.4 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกในกรณีควบคุมกระแส

การทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะที่จ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกเมื่อทำการควบคุมกระแสคำสั่ง (i_{Command}) Peak โดยการปรับปริมาณกระแสเพิ่มขึ้นจาก 4 A เพิ่มขึ้นเป็น 8 A จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.13

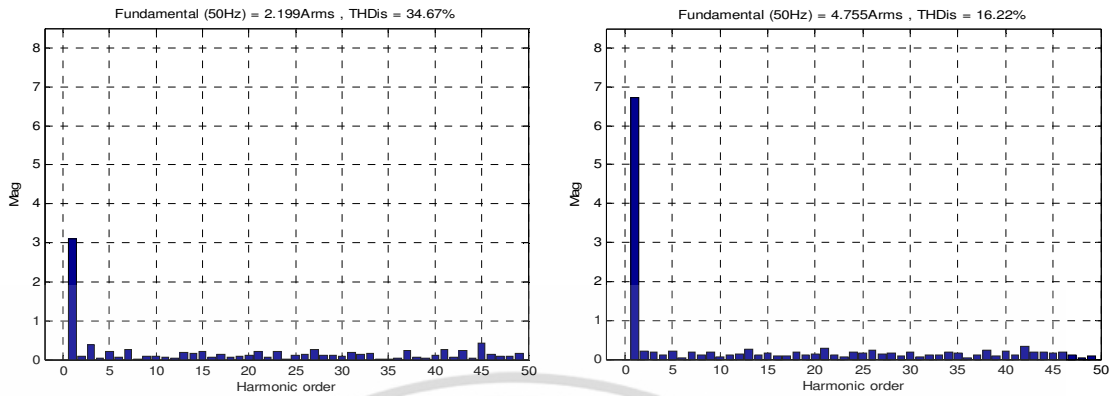


รูปที่ 6.12 ผลการทดสอบกรณีควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์



- (ก) กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak = 4 A (ข) กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak = 8 A
- (ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อปรับเปลี่ยน $i_{Command}$

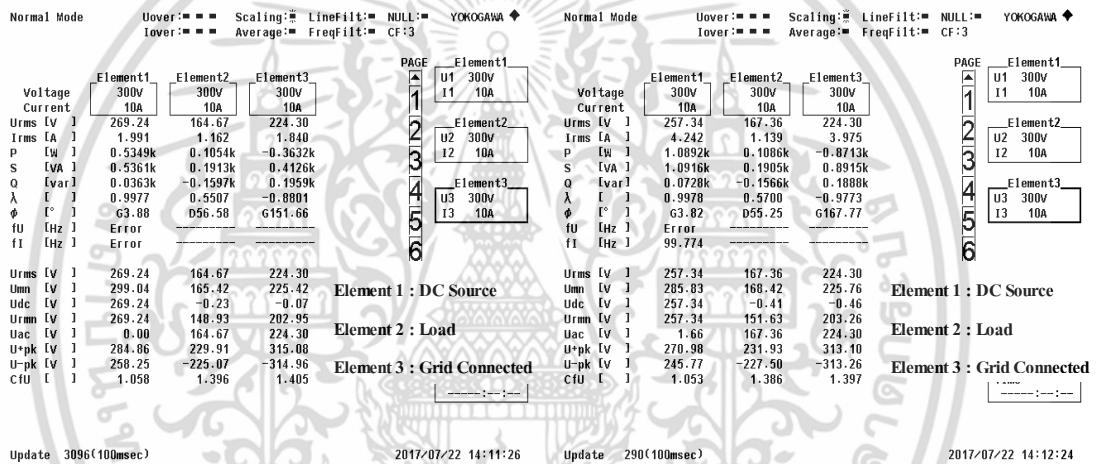
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak = 4 A

(ข) กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak = 8 A

(จ) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า



(ค) ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze)

รูปที่ 6.13 พารามิเตอร์ในระบบโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$)

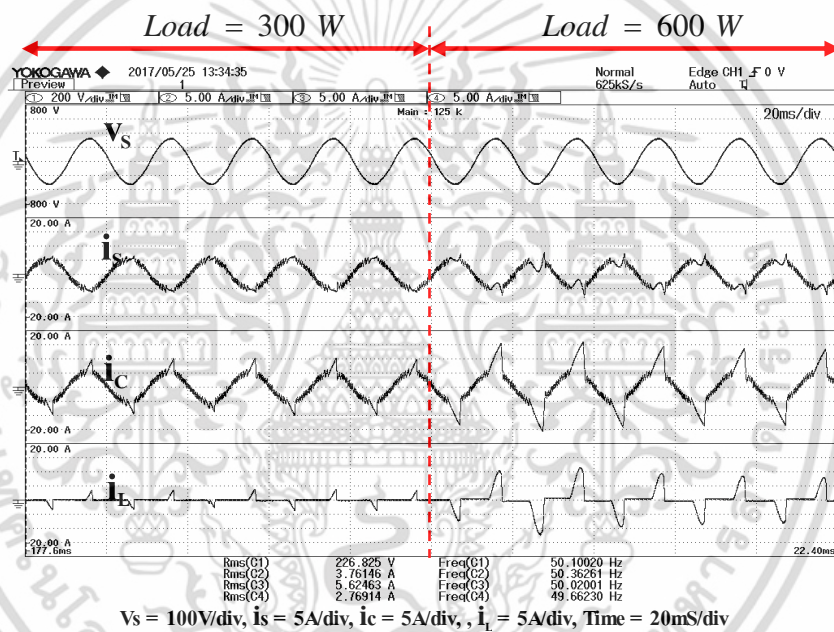
ตารางที่ 6.3 ผลการควบคุมกระแสกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak โดยการปรับปริมาณกระแสเพิ่มขึ้น

$i_{Command}$ (A_{peak})	DC Source			Grid Connected			PF	THDis
	V (V_{dc})	I (A_{dc})	P (kW)	V (V_{rms})	I (A_{rms})	P (kW)		
4 A	269.24	1.991	0.5349	224.30	1.840	-0.3632	0.8801	34.67
8 A	257.34	4.242	1.0892	224.30	3.975	-0.8713	0.9773	16.22

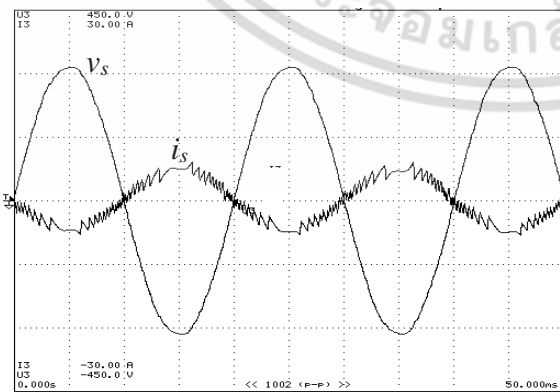
พิจารณาจากรูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.13 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (V_s), กระแสไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak จาก 4 A เพิ่มขึ้นเป็น 8 A อย่างฉับพลันจะเห็นว่าผลการทดสอบระบบสามารถซิงโครไนซ์โดยใช้หลักการตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing) เพื่อควบคุมกระแสของคอนเวอร์เตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสมีผลตอบสนองอย่างเอกสาร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็ว ทำให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบน้อยลงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s) มีขนาดลดลง และเมื่อพิจารณากระแสโหลดจะพบว่ามีความถี่ที่เนื่องจากโหลดคงที่ ดังตารางที่ 6.3 ในขณะเดียวกันจะพบว่าระบบสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อปรับเปลี่ยนกระแสคำสั่งเพิ่มขึ้นและทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามักเพิ่มขึ้นส่งผลให้ THDis ลดลง

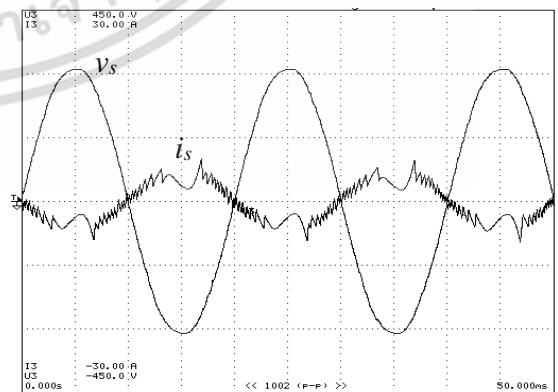
6.1.5 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่เชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลด



รูปที่ 6.14 ผลจากการทดสอบกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลด



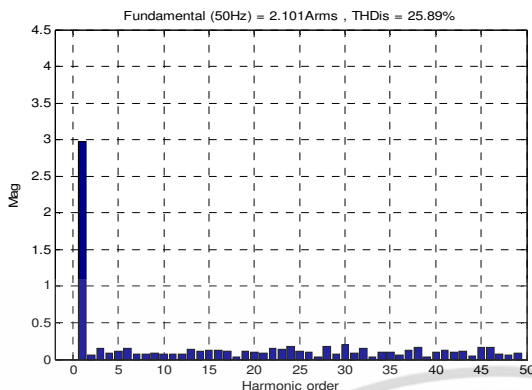
(ก) Load = 300 W



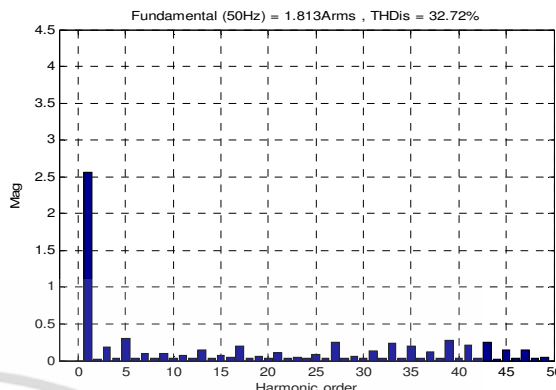
(ข) Load = 600 W

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อปรับเปลี่ยนโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

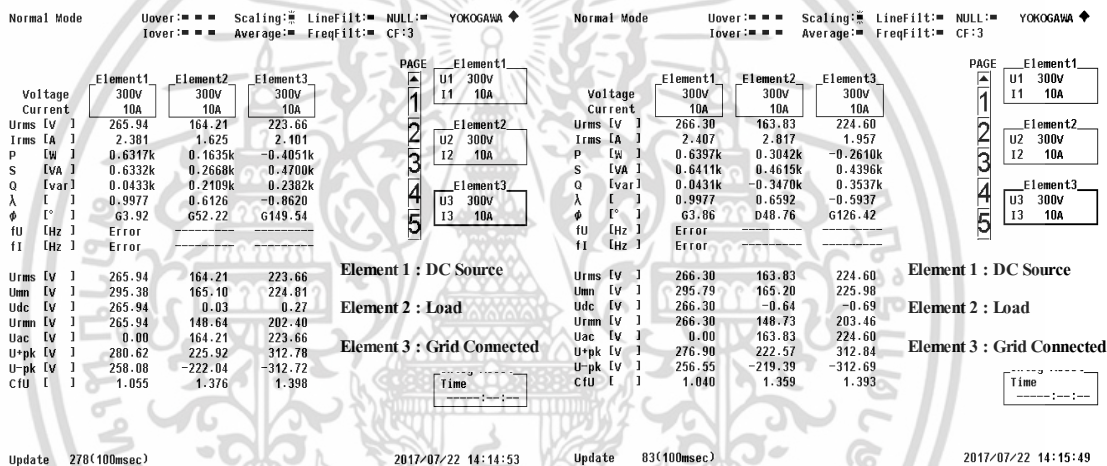


(ก) Load = 300 W



(ข) Load = 600 W

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า



(ค) ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze)

รูปที่ 6.15 พารามิเตอร์ในระบบโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลด

ตารางที่ 6.4 ผลการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 300 วัตต์เพิ่มขึ้นเป็น 600 วัตต์

Load (W)	Photovoltaic			Grid			PF	THDis
	V (V _{dc})	I (A _{dc})	P (kW)	V (V _{rms})	I (A _{rms})	P (kW)		
300	265.94	2.381	0.6317	223.66	2.101	-0.4051	0.8620	25.89
600	266.38	2.487	0.6397	224.60	1.957	-0.2610	0.5937	32.72

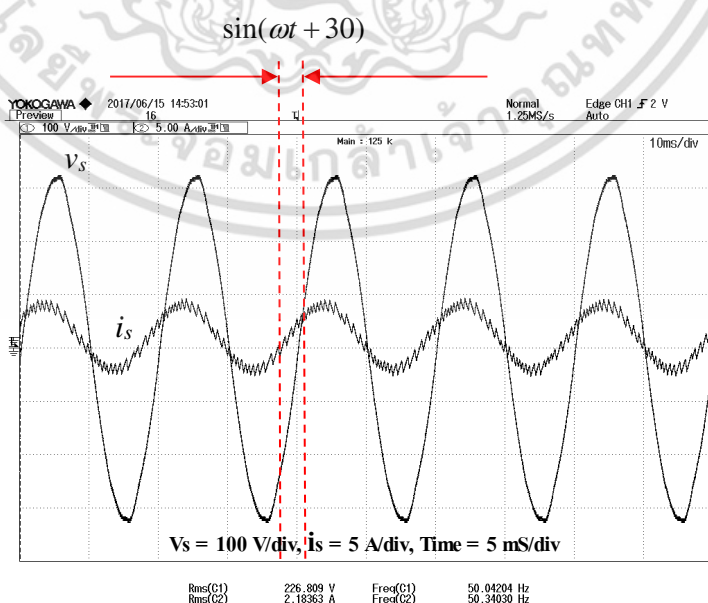
การทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้นเมื่อมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 300 วัตต์เพิ่มขึ้นเป็น 600 วัตต์อย่างฉับพลัน เพื่อทดสอบคุณลักษณะการทำงานของระบบ ซึ่งผลการทดสอบจะเป็นดังรูปที่ 6.14 และรูปที่ 6.15 พบว่าระบบทำหน้าที่เป็นวงจรรองกำลังไวงานเพื่อชดเชยกำลังเสมือนและลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าทำให้ระบบสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากโหลดไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ดังตารางที่ 6.4 ในขณะเดียวกันจากรูป

6.14 (ก) (ข) ที่โหลด 300 วัตต์และ 600 วัตต์ เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าในระบบโครงข่าย (i_s) จะพบว่ามีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์เมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าจำเป็นต้องจ่ายกระแสฮาร์มอนิกให้กับโหลดส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังลดลงและค่า THDis เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการจำลองและการทดสอบมีผลสอดคล้องกันแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของเทคนิคที่นำเสนอ

6.1.6 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

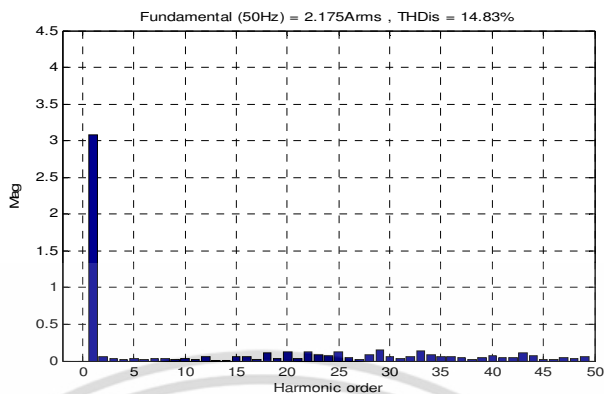
การทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าและมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มุนำหน้าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 30 องศา โดยกำหนดให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $226.809 V_{rms}$ และกระแสที่โครงข่ายเท่ากับ $2.1836 A_{rms}$. เพื่อทดสอบคุณลักษณะการทำงานของระบบ ซึ่งผลการทดสอบจะเป็นดังรูปที่ 6.16 (ก)

พิจารณาจากรูปที่ 6.16 (ข) และ (ค) เมื่อทำการทดสอบการปรับเปลี่ยนมุมกระแสอ้างอิงเพื่อควบคุมกระแสระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้มุนำหน้า (Reading) แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 30 องศา ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากระแสที่จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $2.175 A_{rms}$ และมีค่าสเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (THDis) เท่ากับ 14.83 % แสดงให้เห็นว่าขนาดกระแสมูลฐาน (Fundamental Current) จะมีค่าลดลงทำให้สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s ลำดับที่ 3, 5, 7 และ 9 ลดลง ขณะเดียวกันระบบจะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าทำให้โหลดภายในระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

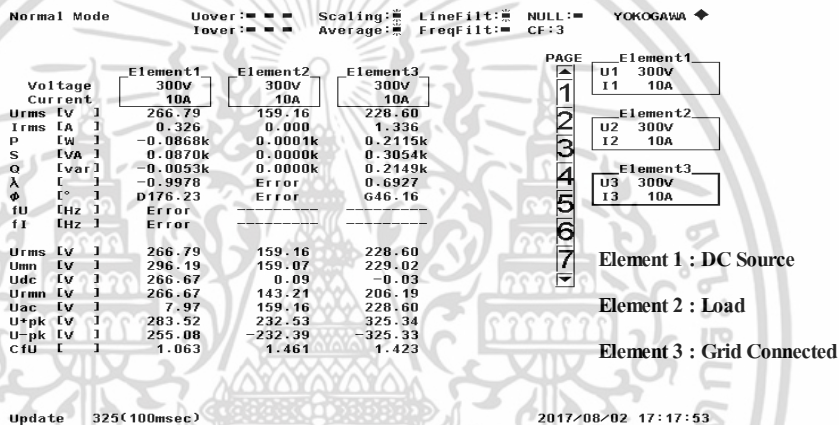


(ก) ควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มุนำหน้าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s



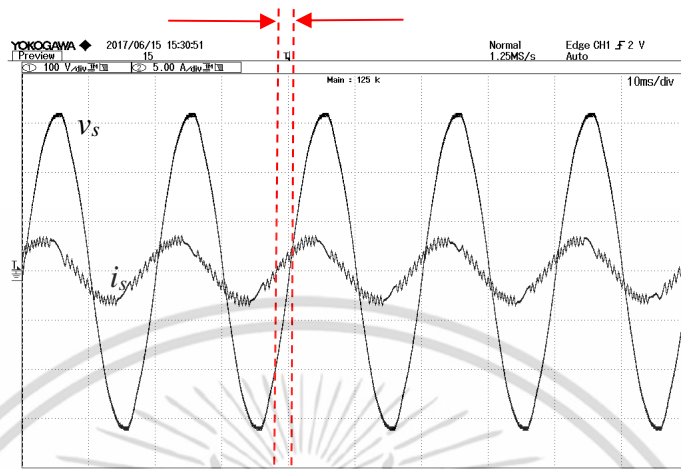
(ค) พารามิเตอร์ในระบบโครงข่ายเมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้านำหน้าแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 6.16 ผลการทดสอบควบคุมกระแสไฟฟ้านำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

6.1.7 ทดสอบระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

การทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา โดยกำหนดให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $225.639 V_{rms}$ และกระแสที่โครงข่ายเท่ากับ $2.135 A_{rms}$ เพื่อทดสอบคุณลักษณะการทำงานของระบบ ซึ่งผลการทดสอบจะเป็นดังรูปที่ 6.17 (ก) (ข) และ (ค)

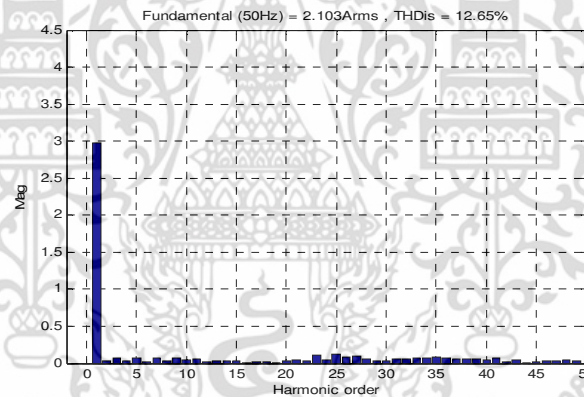
$$\sin(\omega t + 30)$$



Rms(C1) 225.639 V Freq(C1) 50.03002 Hz
 Rms(C2) 2.13561 A Freq(C2) 49.90817 Hz

Vs = 100 V/div, Is = 5 A/div, Time = 5 ms/div

(ก) ควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มุนำหน้าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 30 องศา



(ข) สเปกตรัมฮาร์โมนิกกระแส i_s

Parameter	Element1	Element2	Element3
Voltage	300V	300V	300V
Current	10A	10A	10A
Urms [V]	268.71	150.96	223.96
Irms [A]	0.370	2.184	2.509
P [W]	-0.0992k	0.2131k	0.4730k
S [VA]	0.0993k	0.3298k	0.5619k
Q [var]	-0.0045k	0.2516k	0.3026k
A []	-0.9990	0.6462	0.8418
φ [°]	D177.39	G49.74	G32.67
fU [Hz]	Error		
fI [Hz]	Error		
Urms [V]	268.71	150.96	223.96
Umn [V]	298.46	151.70	224.68
Udc [V]	268.71	-0.00	-0.00
Urmn [V]	268.71	136.57	202.29
Uac [V]	0.00	150.96	223.96
U*pk [V]	284.79	211.09	317.15
U-pk [V]	257.87	-207.48	-317.20
cfu []	1.060	1.398	1.416

(ค) พารามิเตอร์ในระบบเมื่อควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 6.17 ผลการทดสอบควบคุมกระแสโครงข่ายให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่ายเป็นมุม 30 องศา

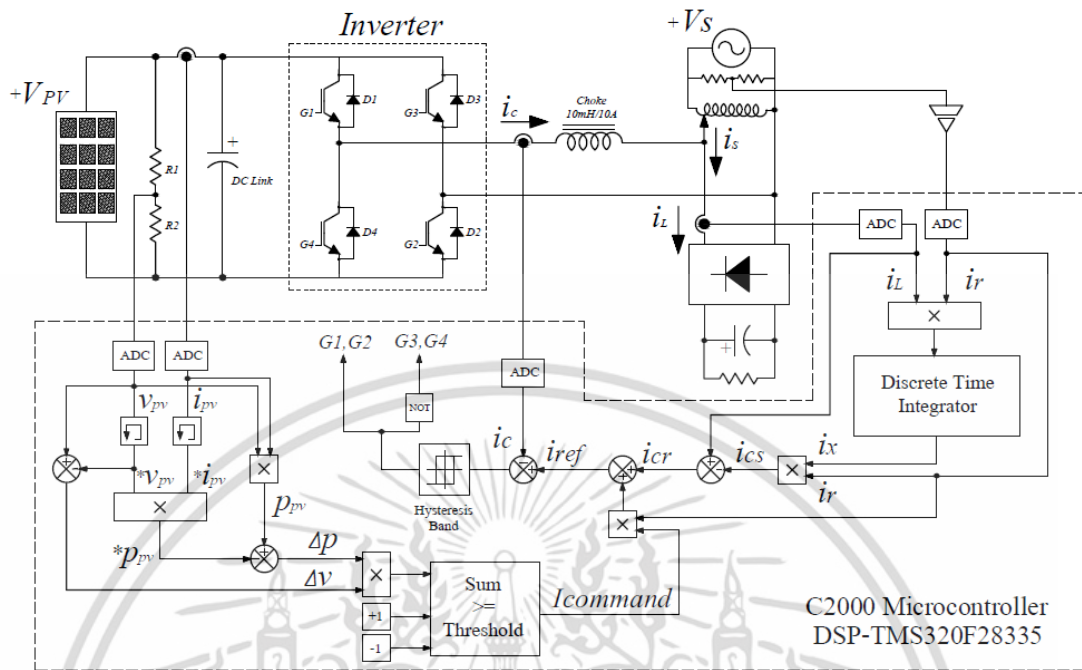
ในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์โมนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากรูป 6.17 (ค) ผลการทดสอบการทำงานของระบบในสถานะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อ ร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแสไฟฟ้าให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่โครงข่าย เป็นมุม 30 องศา จะเห็นได้ว่ากระแสที่จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $2.509 A_{rms}$ และ จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าเท่ากับ $0.3026 kW$ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.17 (ข) ค่าสเปกตรัม ฮาร์มอนิกกระแส i_s ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (THDis) จะมีค่าเท่ากับ 12.65 % และยังพบว่าระบบ สามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าและลดทอนฮาร์มอนิกของกระแส โครงข่ายไฟฟ้าส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่ง

6.2 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้า สูงสุดเชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้า สูงสุดเชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า ผู้วิจัยจะทำการทดสอบในสถานะเริ่มมีการติดตาม กำลังไฟฟ้าสูงสุด การทดสอบในสถานะที่มีการติดตามและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติ ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการ ติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นและมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้า สูงสุดเชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการชดเชยกระแส ฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแส ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตาม กำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อกอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการ ชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลดอย่างฉับพลัน ดังจะกล่าวต่อไปนี้



รูปที่ 6.18 ระบบการทดสอบคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

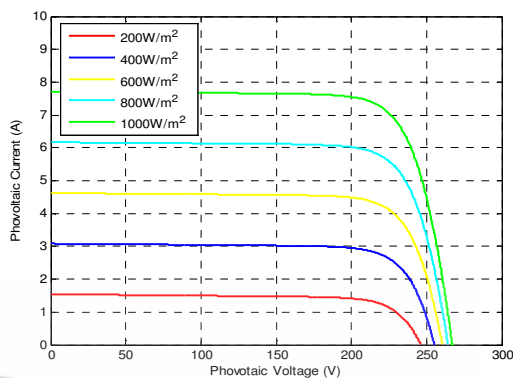
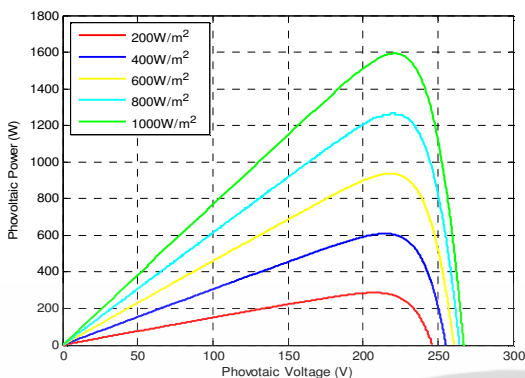
6.2.1 การทดสอบในสถานะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การทดสอบในสถานะเริ่มมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยผู้วิจัยได้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท Chaori Solar Energy จำนวน 6 แผง และมีข้อมูลจำเพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังตารางที่ 6.5 และกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์รูปที่ 6.19

ตารางที่ 6.5 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

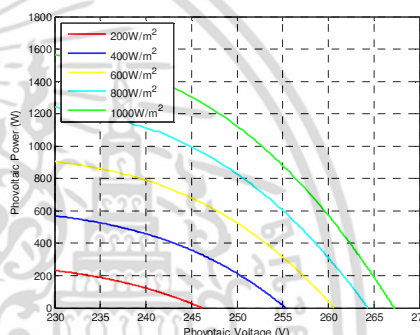
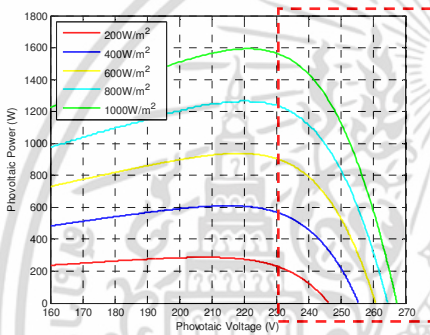
Module Type	Unit
Normal Power	275 W
Voltage Maximum; V_{Max}	44.7 V
Current Maximum; I_{Max}	7.72 A
Open Circuit voltage; V_{OC}	44.7 V
Short Circuit current; I_{SC}	8.82 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กำลังไฟฟ้าในฟังก์ชันแรงดันไฟฟ้า

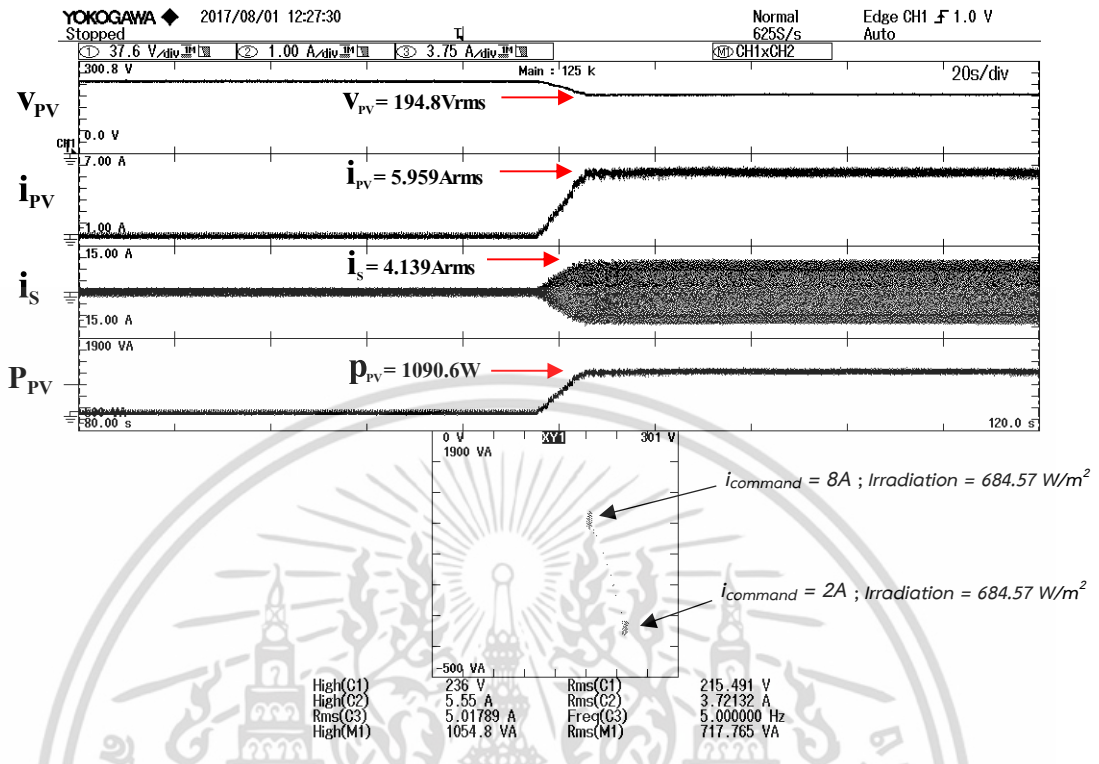
(ข) กระแสไฟฟ้าในฟังก์ชันแรงดันไฟฟ้า



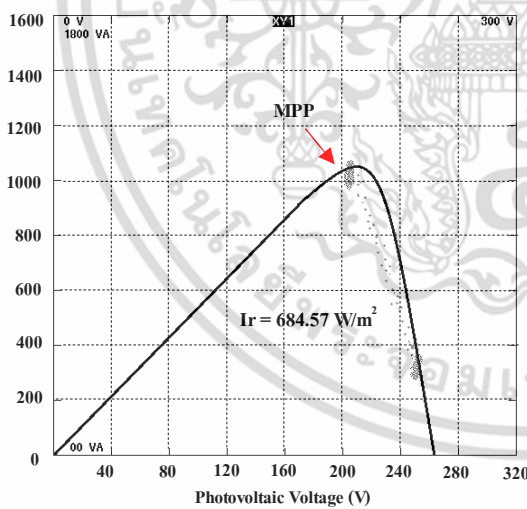
(ค) กราฟคุณลักษณะของแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับค่าความเข้มแสงต่างๆ

รูปที่ 6.19 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย

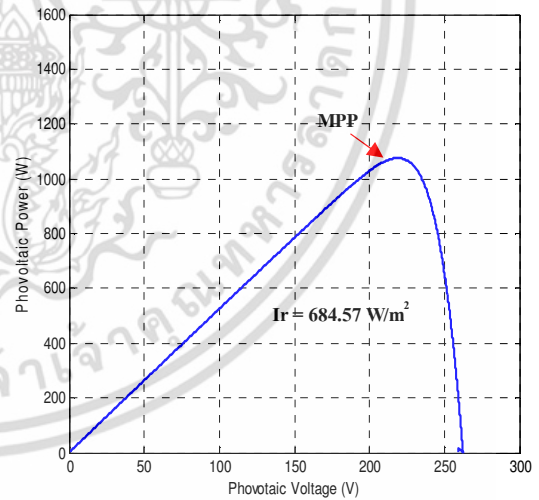
เมื่อเริ่มทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และในการวิจัยได้ทำการจำกัดขอบเขตโดยกำหนดกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak มีค่าสูงสุดเท่ากับ 10 A และกำหนดกระแสต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0 A โดยระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายเข้าสู่ชุดสะสมพลังงาน (DC Link) เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาค่ากระแสที่ใช้ในการควบคุมกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) จะได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้



(ก) ระบบการทำงานติดตามความเข้มแสงเมื่อความเข้มแสง



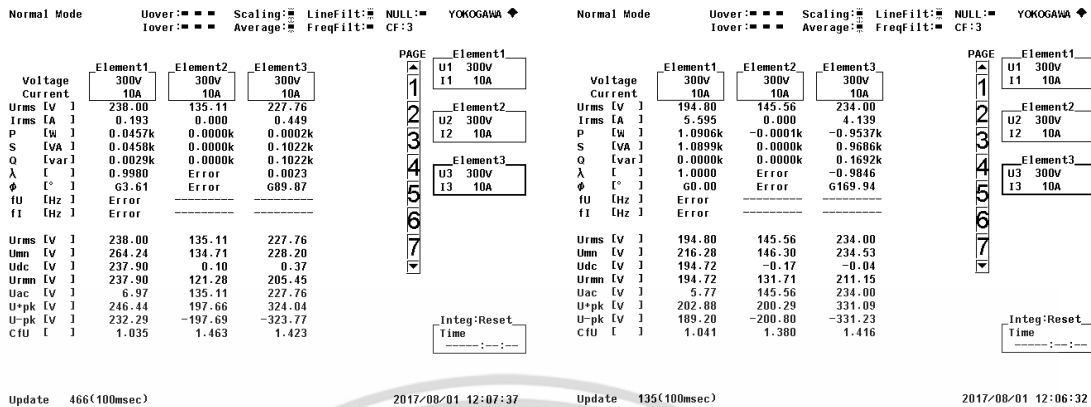
(ข) การทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุด
จากระบบการติดตาม



(ค) การจำลองกำลังไฟฟ้าสูงสุด
โดยใช้ MATLAB/Simulink

รูปที่ 6.20 การทดสอบการติดตามความเข้มแสงเมื่อความเข้มแสงลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



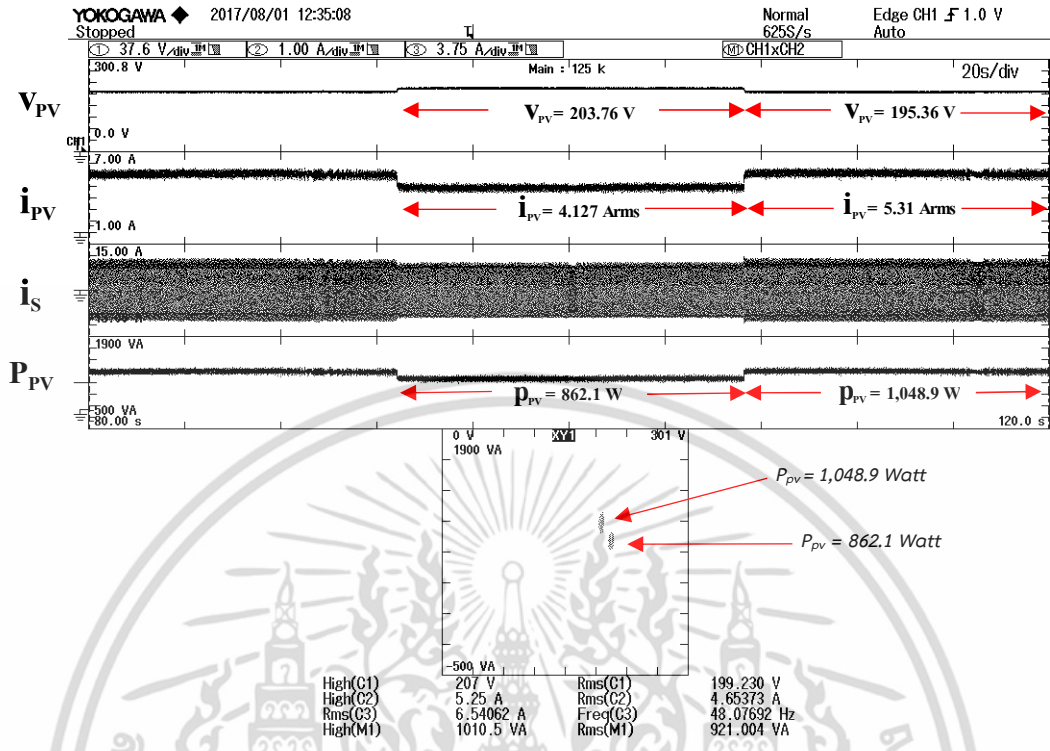
(ก) กระแสคำสั่งเริ่มต้น 0 A (ข) กระแสคำสั่งที่ 8 A

รูปที่ 6.21 ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze)

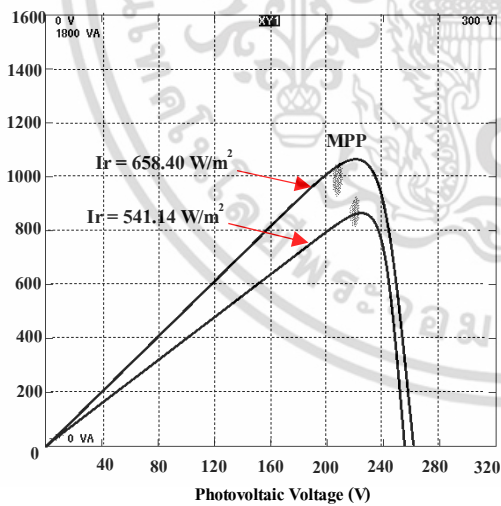
พิจารณาจากรูปที่ 6.20 ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ปริมาณความเข้มแสงในบริเวณที่ทำการทดสอบมีค่าเท่ากับ 684.57 W/m² จะเริ่มต้นกระแสคำสั่งมีค่าเท่ากับ 0 A และกระแสจะเพิ่มขึ้นตามลำดับจากเงื่อนไขการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าในการปรับเปลี่ยนกระแสคำสั่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และจากรูปที่ 6.20 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 194.8 V_{rms} กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อกระแสคำสั่งเพิ่มขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 5.959 A_{rms} กระแสไฟฟ้าโครงข่ายเริ่มติดตามทำให้ระบบสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรรองกำลังไวงานเพื่อชดเชยกำลังเสมือนและลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่งดังรูปที่ 6.21

6.2.2 การทดสอบในสถานะที่มีการติดตามและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติ

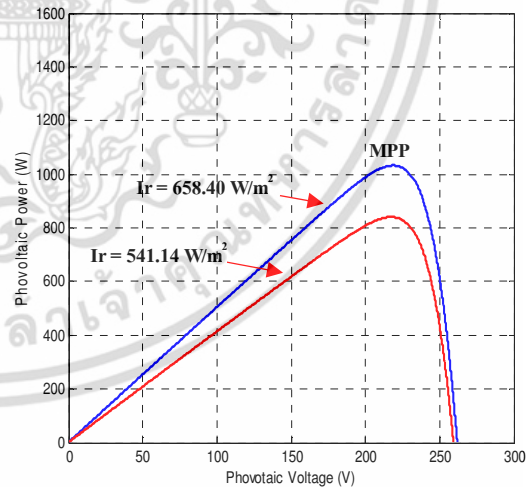
ในการทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะโหลดไม่เชิงเส้นโดยมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดและเกิดปรากฏการณ์แสงลดลงตามธรรมชาติ ในการวิจัยได้ทำการลดปริมาณกระแสคำสั่ง (*i_{Command}*) Peak ให้น้อยลงเพื่อรักษาระดับกำลังไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต จะได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้



(ก) การทำงานของระบบเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงอย่างฉับพลัน



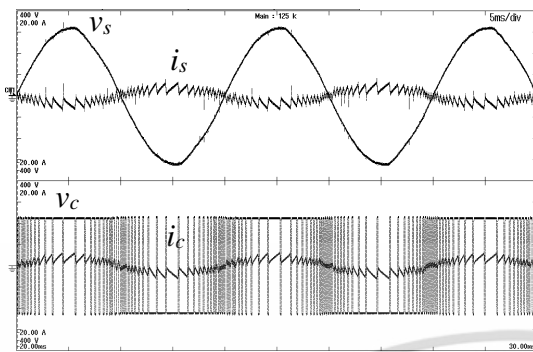
(ข) การทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุด
จากระบบการติดตาม



(ค) การจำลองกำลังไฟฟ้าสูงสุด
โดยใช้ MATLAB/Simulink

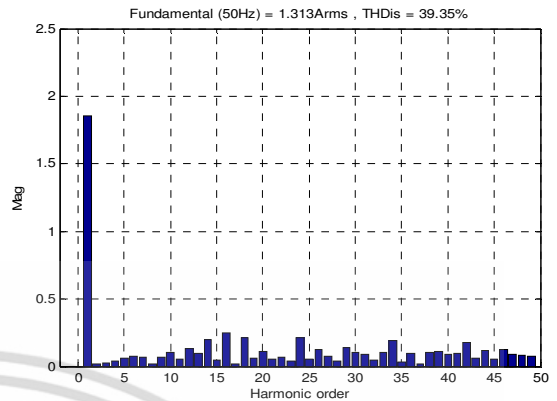
รูปที่ 6.22 ผลการทดสอบระบบเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงอย่างฉับพลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. อนุญาตให้หน่วยงานอื่น ๆ ศึกษานำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

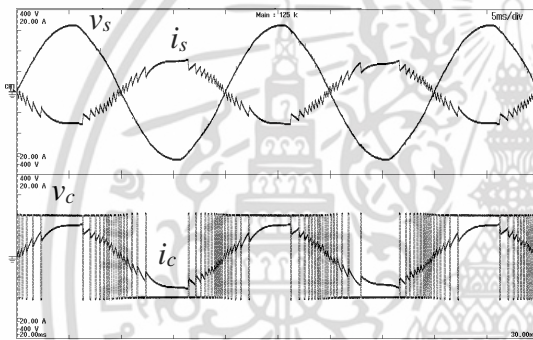


$V_s = 100 \text{ V/div}$, $i_s = 10 \text{ A/div}$, Time = 5 ms/div

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s ในสภาวะเริ่มติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

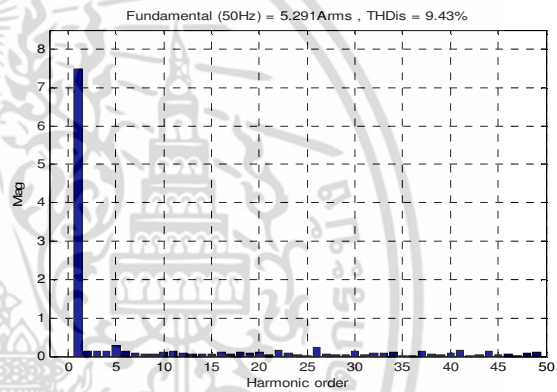


(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s



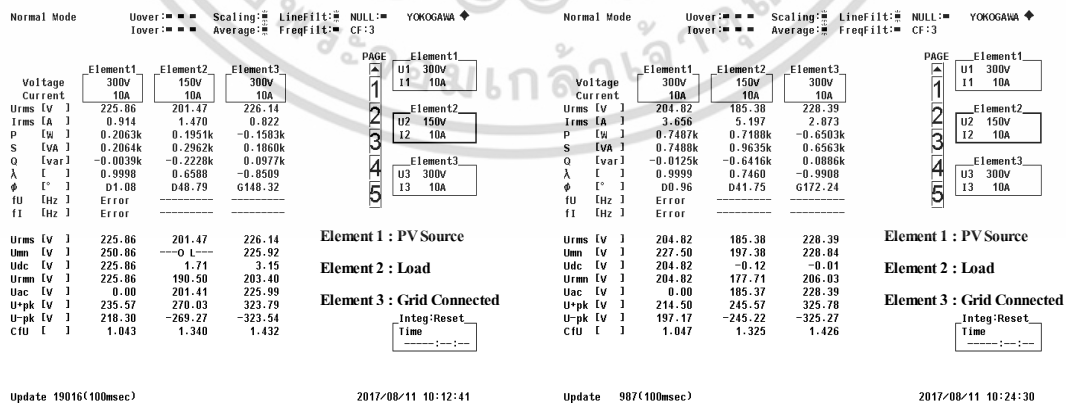
$V_s = 100 \text{ V/div}$, $i_s = 10 \text{ A/div}$, Time = 5 ms/div

(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น



(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

รูปที่ 6.24 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลดเชิงเส้นต่อรวมขณะติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 6.25 ผลทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีความเข้มแสงตามปรากฏการณ์ธรรมชาติแบบ Real-Time จากเครื่องมือวัดวิเคราะห์กำลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

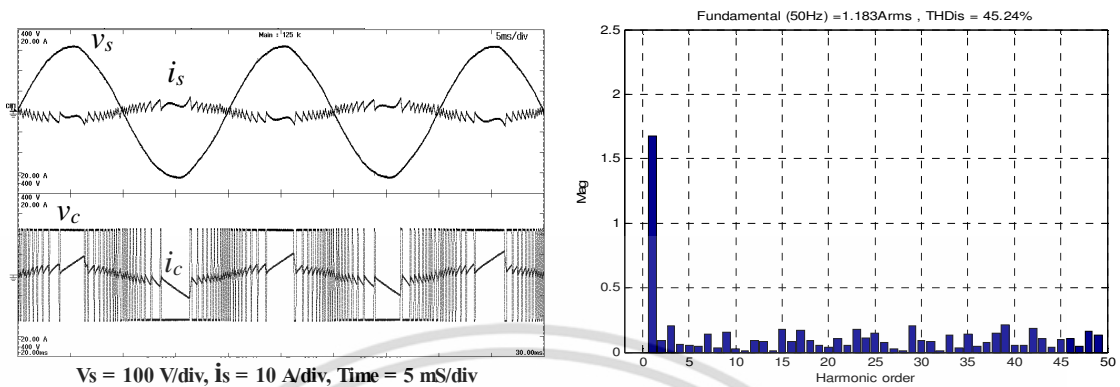
พิจารณาจากรูปที่ 6.24 (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นการปรับ Amplitude ของสัญญาณอ้างอิงในการมอดูเลตโดยใช้ฟังก์ชันการคูณค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น Real-Time จะหาค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าในช่วงแรกจึงทำให้เกิดการเพิ่มหรือลดขนาดของกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) เพื่อไปเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าที่คอนเวอร์เตอร์ทำให้กระแสของคอนเวอร์เตอร์ (i_c) เกิดการโอเวอร์มอดูเลต (Over modulate) ซึ่งเป็นผลเนื่องจากแอมพลิจูดของกระแสอ้างอิง (i_{ref}) มากกว่ากระแสคอนเวอร์เตอร์ (i_c) ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่งผลให้เกิดค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 6.24 (ข) และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s จะพบว่ากระแสมูลฐาน (Fundamental Current) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion; THD) จะมีค่าลดลงสอดคล้องกับผลการจำลองในบทที่ 5 และการทดสอบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ดังกล่าวข้างต้น

จากรูปที่ 6.25 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจากการจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้ตามการควบคุมกระแสคำสั่งที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงและในขณะเดียวกันระบบยังสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังไวงานเพื่อชดเชยกำลังเสมือนและลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่ง

6.2.4 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมและมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

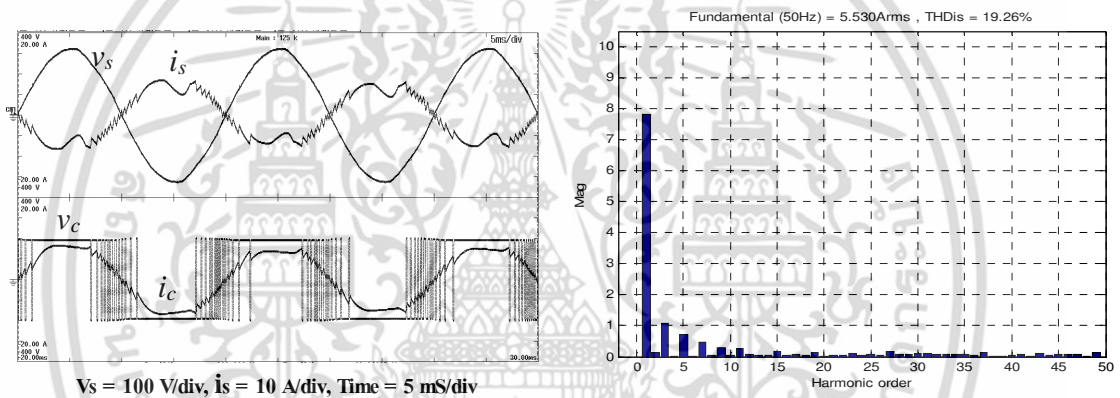
การทดสอบการทำงานโดยใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วม (วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและโหลดไฟฟ้า) และมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก โดยทำการทดสอบจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนชั้นดาดฟ้าของอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามความเข้มแสงที่เกิดปรากฏการณ์ธรรมชาติแบบ Real-Time จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.26

พิจารณาจากรูปที่ 6.26 จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบโดยวัดกระแสที่ไหลผ่านโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้าปรากฏว่าผลการทดสอบที่ได้มีผลใกล้เคียงกับลักษณะรูปคลื่นจากการจำลองในบทที่ 5 และการทดสอบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ดังกล่าวข้างต้น



(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s ในสภาวะเริ่มติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

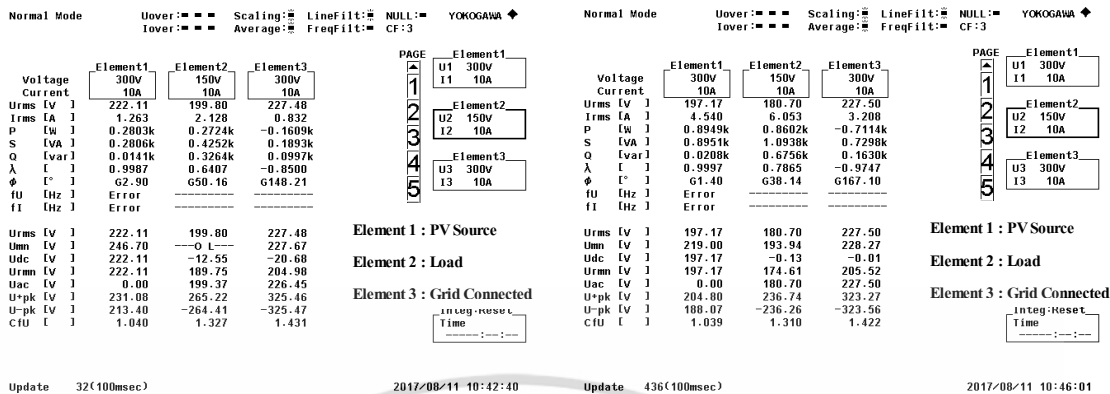


(ก) แรงดัน v_s และกระแส i_s เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s

รูปที่ 6.26 การทดสอบการทำงานโดยใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วม

ผลการทดสอบจ่ายกำลังไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมในระบบโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก เมื่อกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงที่เกิดปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ ดังรูปที่ 6.26 (ก) จะเห็นได้ว่าระบบสามารถคำนวณกระแสฮาร์มอนิก (i_{CR}) จากอัลกอริทึมใน Math model เพื่อเพิ่มระดับกระแสไซน์อ้างอิง (i_{ref}) ตามความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลง ทำให้กระแสที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s) ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ และเกิดโอเวอร์มอดูเลตเนื่องจากกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) ที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงมีค่ามากกว่ากระแสคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และจากรูปที่ 6.26 (ข) จะพบว่าสเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s (THDis) ลดลง

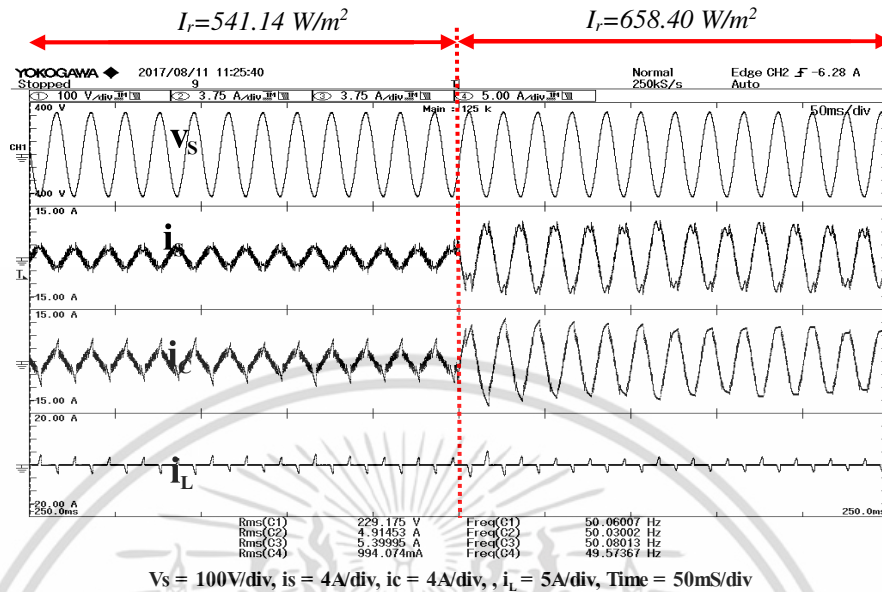


รูปที่ 6.27 ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze)

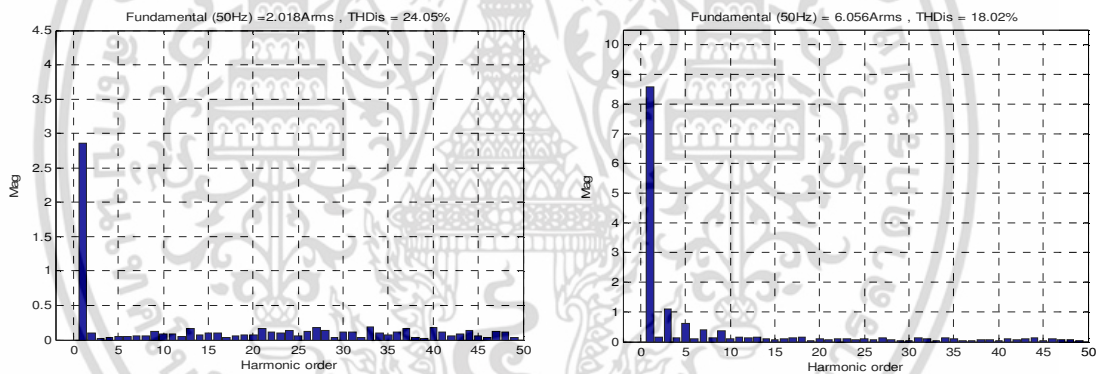
พิจารณาจากรูปที่ 6.27 เมื่อทำการจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นตามความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงแบบ Real Time ในช่วงเวลา 13.00- 15.00 น. โดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในระบบ พบว่าระบบสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือกลับสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าและยังสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นี้เป็นข้อบ่งชี้ยืนยันได้ว่าผลมีความใกล้เคียงกับลักษณะรูปคลื่นจากการจำลองในบทที่ 5 และสอดคล้องกับการทดสอบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ดังกล่าวข้างต้น

6.2.5 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีควบคุมกระแส

การทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะที่จ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยและมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเมื่อทำการควบคุมกระแสกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak ตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่เกิดปรากฏการณ์ตามธรรมชาติในช่วงเวลาที่เกิดความเข้มแสงสูงสุดในเวลา 13.00 – 15.00 น. ของหลักการ P&O โดยควบคุมปริมาณกระแสตามความเข้มแสงที่เกิดปรากฏการณ์แบบ Real-Time จำนวน 2 ปริมาณ (ติดตามปริมาณกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak ให้มีค่าประมาณ 4 A ถึง 8 A) เพื่อเปรียบเทียบกับทดสอบโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่และผลการจำลองในบทที่ 5 จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.28 และรูปที่ 6.29

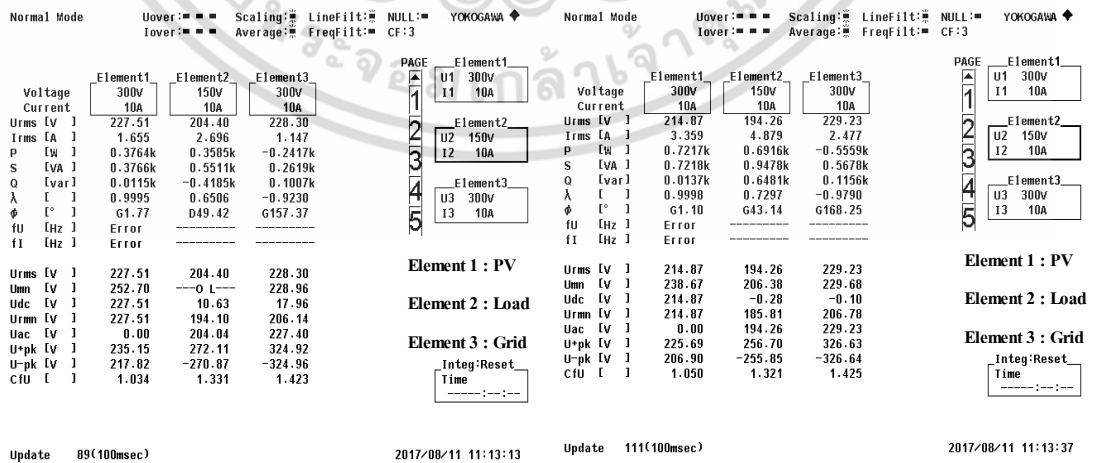


รูปที่ 6.28 ผลการทดสอบกรณีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงแบบ Real-Time จำนวน 2 ปริมาณ



(ก) ที่ความเข้มแสง $I_r=541.14 \text{ W/m}^2$

(ข) ที่ความเข้มแสง $I_r=658.40 \text{ W/m}^2$



(ค) ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze)

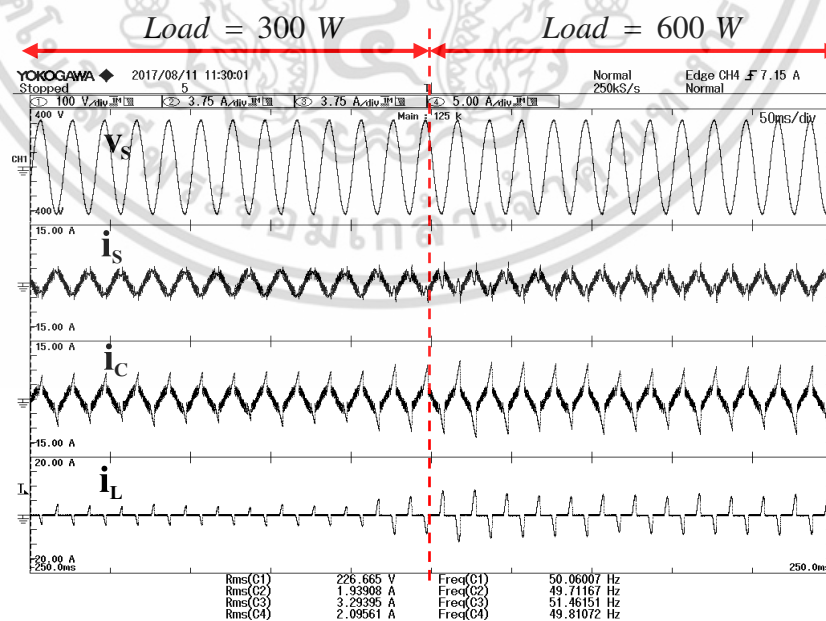
รูปที่ 6.29 พารามิเตอร์ในระบบโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากรูปที่ 6.28 และรูปที่ 6.29 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (V_s), กระแสไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s), กระแสไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ (i_c) และกระแสโหลด (i_L) เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงตามการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยหลักการ P&O ทำให้กระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak ที่ถูกควบคุมแปรผันตามความเข้มแสง และพบว่าระบบสามารถควบคุมกระแสฮาร์มอนิกและจ่ายออกมารวมกับกระแสที่เป็นคลื่นไซน์ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ (i_c) จ่ายเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบน้อยลงทำให้กระแสไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_s) มีขนาดลดลง ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีผลใกล้เคียงกับลักษณะรูปคลื่นจากการจำลองในบทที่ 5 และสอดคล้องกับการทดสอบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ดังกล่าวข้างต้น

6.2.6 ทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีปรับเปลี่ยนกระแสโหลด

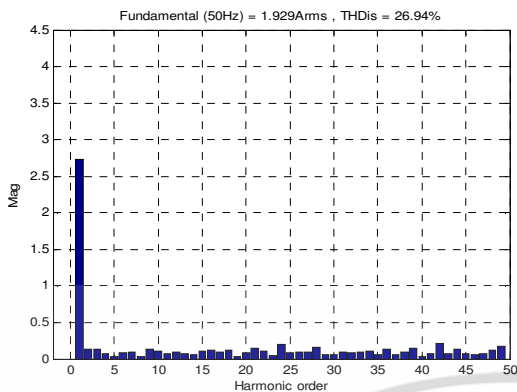
การทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อรวมเมื่อมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 300 วัตต์เพิ่มขึ้นเป็น 600 วัตต์ เพื่อทดสอบคุณลักษณะการทำงานของระบบควบคุมกระแสคำสั่ง ($i_{Command}$) Peak ตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่เกิดปรากฏการณ์ตามธรรมชาติในช่วงเวลาที่เกิดความเข้มแสงสูงสุดในเวลา 13.00 – 15.00 น. โดยใช้หลักการ P&O ควบคุมปริมาณกระแสตามความเข้มแสงที่เกิดปรากฏการณ์แบบ Real-Time ซึ่งผลการทดสอบจะเป็นดังรูปที่ 6.30 และรูปที่ 6.31



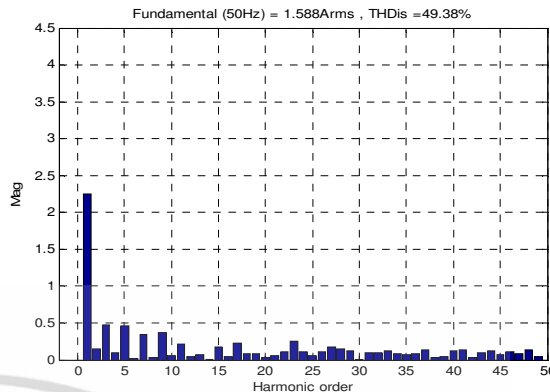
$V_s = 100V/div$, $i_s = 4A/div$, $i_c = 4A/div$, $i_L = 5A/div$, Time = 50ms/div

รูปที่ 6.30 ผลจากการทดสอบกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

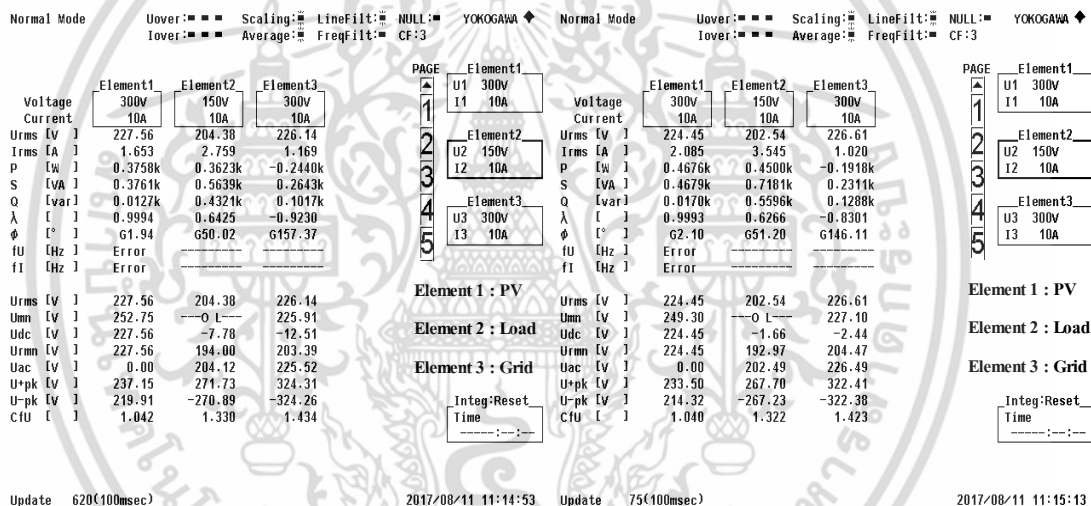


(ก) Load = 300 W



(ข) Load = 600 W

(ก) สเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแส i_s ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า



(ข) ผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Analyze)

รูปที่ 6.31 พารามิเตอร์ในระบบโครงข่ายเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง

พิจารณาจากรูปที่ 6.30 การทดสอบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะมีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมโดยมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในสภาวะการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่าความเข้มแสงมากในช่วงเวลา 13.00–15.00 น. แบบ Real Time และทำการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 300 วัตต์ปรับเพิ่มขึ้นเป็น 600 วัตต์อย่างฉับพลัน จะพบว่าระบบยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีผลใกล้เคียงกับลักษณะรูปคลื่นจากการจำลองในบทที่ 5 สอดคล้องกับการทดสอบโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.31 (ข) จะพบว่าระบบสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากโหลดไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า และทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังไวงานเพื่อชดเชยกำลังเสมือนส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่งและลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสโครงข่ายไฟฟ้าดังรูปที่ 6.31 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการดำเนินงานระบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า 1 เฟสที่มีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จัดทำขึ้น ตลอดจนปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินงาน รวมถึงผลการจำลองและผลการทดสอบที่ได้พัฒนาเครื่องต้นแบบเปรียบเทียบผลที่ได้ ในส่วนท้ายของบทนี้ได้ให้ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาดำเนินงานวิจัยต่อไป

7.1 สรุปผลการวิจัย

การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าและมีฟังก์ชันการกรองกำลังไวงานและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอินเวอร์เตอร์โดยนำหลักการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิสและการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเมื่อจ่ายโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ โดยทำการจำลองโปรแกรม ออกแบบ และสร้างวงจรกำลัง วงจรควบคุม พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (DSP-TMS320F28335) สามารถสรุปคุณลักษณะของระบบควบคุมทั้งการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink และการทดสอบจริงทั้งหมดได้ดังนี้

1. อินเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างสามารถนำมาเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า 200 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ได้จริง โดยพิกัดของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถแปรเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 1.5 กิโลวัตต์ และมีลักษณะสัญญาณกระแสของอินเวอร์เตอร์ใกล้เคียงกับสัญญาณกระแสอ้างอิงที่เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

2. อินเวอร์เตอร์ที่ใช้วิธีการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิสมีความยืดหยุ่นในการใช้งานในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบและค่าความผิดพลาดฮาร์มอนิกรวม

3. หลักการการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเพื่อให้กระแสมีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ โดยนำหลักการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิสซึ่งมีกระแสอ้างอิงที่ได้มาจากการนำกระแสจากรูปคลื่นไซน์ที่มีมุมเฟสเท่ากับรูปคลื่นไซน์ของแรงดันอ้างอิงจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าพร้อมกับกระแสที่ถูกชดเชยจากการควบคุมกระแสฮาร์มอนิกของกระแสที่จ่ายให้กับโหลดที่ไม่เชิงเส้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (DSP-TMS320F28335) สามารถควบคุมการทำงานของระบบทั้งการจำลองและการทดสอบเครื่องต้นแบบได้ตามสมมุติฐานงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอินเวอร์เตอร์โดยนำหลักการควบคุมกระแสฮีสเตอร์รีซิสและการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเมื่อจ่ายโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อควบคุมกระแสคำสั่งของคอนเวอร์เตอร์เมื่อความเข้มแสงลดลงตามธรรมชาติอย่างฉับพลันเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบได้

5. ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และการทดสอบจากเครื่องต้นแบบเป็นเครื่องบ่งชี้ว่าระบบสามารถทำการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าโดยทำการทดสอบในขณะที่ไม่มีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกลดลง (%THDi) ลดลงตามสมมุติฐานที่ได้กล่าวไว้

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการใช้หลักการควบคุมแบบฮีสเตอร์รีซิสจะทำให้ความถี่และช่วงคาบการสวิตช์ในการสวิตช์ไม่คงที่ ทำให้การวิเคราะห์และการกรองฮาร์มอนิกมีความยุ่งยาก ดังนั้นในการที่จะทำให้ความถี่ในการสวิตช์มีค่าคงที่ ทำได้โดยการนำเอาค่าสัญญาณผิดพลาดจากการเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงที่ได้ โดยค่าความผิดเพี้ยนกระแสในระบบจะมีค่าเฉลี่ยในระดับ 20-30 % เนื่องจากความถี่ในการสวิตช์สูง ทำให้ลำดับค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกจะมีแอมพลิจูดสูงในช่วงลำดับที่ 35 ขึ้นไป

2. จากความถี่และช่วงคาบการสวิตช์ที่ไม่คงที่ของการใช้เทคนิคฮีสเตอร์รีซิส ส่งผลกระทบในเรื่องของความถี่รบกวนในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและในตัวเก็บประจุ (DC Link) ผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนเข้าสู่ตัวเก็บประจุ เพื่อทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่ต่ำด้วยหลักการ (LC Low-Pass Filter) ซึ่งสามารถแก้ไขเรื่องของสัญญาณรบกวนในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้อยู่ในระดับที่ดีพอสมควร

3. การต่อตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสระหว่างคอนเวอร์เตอร์และระบบโครงข่ายไฟฟ้ามักเกิดปัญหาเรื่องความร้อนที่เกิดจากช่วงความถี่การสวิตช์ที่ความถี่สูง และกระแสไซน์ที่มีคาบการสวิตช์ไหลเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า ควรมีการปรับปรุงในโอกาสต่อไป

4. การทดสอบระบบการทำงาน เมื่อทำการปรับเลื่อนมุมโซลาร์ให้เฟสแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์นำหน้าเฟสแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไปเป็นมุม 30 องศา จากการทดสอบในเงื่อนไขนี้ทำให้มุมเฟสของกระแสไฟฟ้าโครงข่ายมีมุมนำหน้าเฟสแรงดันไฟฟ้าโครงข่าย เนื่องจากกำลังไฟฟ้าจ่ายจากด้านอินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบโครงข่าย ปัญหาในการทดสอบพบว่าเกิดปรากฏการณ์มีระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าทางด้านระบบโครงข่ายไฟฟ้า

บรรณานุกรม

- [1] Akagi, H., and K. Isozaki. 2012. "A Hybrid Active Filter for a Three-Phase 12-Pulse Diode Rectifier Used as the Front End of a Medium-Voltage Motor Drive" IEEE Transactions on Power Electronics 27(1): pp. 69–77.
- [2] A. Kotsopoulos et al., 2001 "A predictive control scheme for DC voltage and AC current in grid-connected photovoltaic inverters with minimum dc link capacitance"., IECON, pp. 1994–1969.
- [3] Bimal k., Bose., 1990. "An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System.", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 31 (5)., pp. 402-408.
- [4] Changchien, S., T. J. Liang, J. F. Chen, and L. S. Yang. 2010. "Novel High Step-Up DC-DC Converter for Fuel Cell Energy Conversion System." IEEE Transactions on Industrial Electronics 57 (6), 2007-2017.
- [5] Ch. L. S. Srinivas, Sreeraj E. S., 2015 "A Maximum Power Point Tracking Technique Based on Ripple Correlation Control for Single Phase Photovoltaic System with Fuzzy Logic Controller" 5th International Conference on Advances in Energy Research, ICAER 2015, 15-17 December 2015, Mumbai, India: pp.69-77.
- [6] Chaithanakulwat, A., V. Kinnares, and N. Thungsuk. 2012. "Modeling and Simulation of a 3-Phase Grid Connected Photovoltaic Inverter with Active Power Filter Functionality for Harmonic Mitigation." The International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2012), Kanazawa, 8-12 July 2012: pp. 186-190.
- [7] Chaithanakulwat, A., V. Kinnares, and N. Thungsuk. 2012. "Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Active Power Filter Functionality." In 2012 15th International Conference on Electrical Machines and System (ICEMS), Sapporo, 21-24 October 2012: pp. 175-177. IEEE.
- [8] D.P. Hohm and M.E. Ropp, 2000 "Comparative study of maximum power point tracking algorithm using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed"., PESC, pp.1699–1702.
- [9] Dzone Naoussi, S., Kom, C., Berviller, H., 2015 "FPGA Approach for Implementation of an Adaline-Based Harmonics Mitigation Technique Using NPLL", International Journal on Energy Conversion (IRECON), 3 (3), pp.95-102.

- [10] El Kachani, A., Chakir, E., Ait laachir, A., Jarou, T., Niaaniaa, A., Zerouaoui, J., Sedra, M., 2015 “AC Grid Connected DFIG-Based Wind Turbine with Shunt Active Power Filter Based on Nonlinear Predictive Control, International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 8 (3), pp. 354-361.
- [11] Hidouri, N., 2014 Power Control Applied to a Grid Connected Fuzzy-MPPT Controlled Photovoltaic System, International Journal on Energy Conversion (IRECON), 2 (2), pp. 40-48.
- [12] Jayachandran, J., Murali Sachithanatham, R., Malathi, S., 2014 “Power Quality Improvement in Three Phase Four Wire Distribution System with Implementation of Fuzzy Logic Controller Based Adaptive Shunt Active Filter, International Review of Automatic Control (IREACO), 7 (2), pp. 197-207.
- [13] J. W. Kimball and P. T. Krein. 2007 "Digital Ripple Correlation Control for Photovoltaic Applications," Proceedings of the IEEE 38th Power Electronics Specialists Conference, PESC'07, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Jun 2007. pp.1689-1694.
- [14] Jou, H.-L., J.-C. Wu, and H.-Y. Chu. 1994. “New Single-Phase Active Power Filter.” IEE Proceedings – Electric Power Applications 141 (3), pp. 129-134.
- [15] L. Hassaine, E. Olias, J Quintero, M. Haddadi, 2009 ”Digital Power Factor Control and Reactive Power Regulation for Grid-Connected Photovoltaic Inverter,” Renewable Energy, 34., pp. 315-321.
- [16] Liu, P. Z., and M. Fang. 2010. “Research on Construction System of Large Scale Non-Grid-Connected Wind Power Offshore Wind Farms.” In 2010 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference(WNWEC), Nanjing, 5-7 November 2010: 1-5. IEEE.
- [17] M. Routimo; M. Salo; H. Tuusa; 2005 “Current sensorless control of a voltage-source active power filter”, Applied Power Electronics Conference and Exposition,. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE, 3., pp. 1696-1702.
- [18] N. A. Rahim, J. Selvaraj, Krismadinata., 2007 “Hysteresis Current Control and Sensorless MPPT for Grid-Connected Photovoltaic Systems,” IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 572-577.
- [19] P. C. Tan., Z. Salam., 2004. “A New Single-phase Two-Wire Hybrid Active Power Filter Using Extension p-q Theorem for Photovoltaic Application”, National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia., pp. 126-131.

- [20] P.Wannakarn,, and V. Kinnares. 2002. "Digital Signal Controller Based Grid Connected Inverter for Axial Flux Permanent Magnet Generator." In 2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Singapore, 5-8 December 2011: pp. 1527–1530. IEEE.
- [21] P. Wannakarn and V. Kinnares, 2012 "Single-phase grid connected axial flux permanent magnet generator system with reactive power compensation functionality," 10th International Power & Energy Conference (IPEC), Ho Chi Minh City, 2012, pp. 338-341.
- [22] RM Hilloowala., AM Sharaf., 1992 "A rule-based fuzzy controller for a PWM inverter in photovoltaic energy conversion scheme"., IEEE IAS Conf Record, pp. 762-769.
- [23] Roman, E., R.Alonso, P.Ibanez, S. Elorduizapatarietxe, and D.Goitia. 2006. "Intelligent PV Module for Grid-Connected PV Systems" IEEE Transactions on Industrial Electronics 53 (4): pp. 1066-1073.
- [24] Rosa A. Mastromauro, Marco Liserre, Tamas Kerekes, and Antonio Dell' Aquila. 2009 "A Single-Phase Voltage-Controlled Grid-Connected Photovoltaic System With Power Quality Conditioner Functionality," IEEE Trans. Industrial Electronics., 56 (11): pp. 4436-4444.
- [25] Seul-Ki Kim.,Jin-Hong Jeon.,Chang-Hee Cho., Eung- Sang Kim., Jong-B Ahn. 2009. "Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis" Solar Energy 83: pp. 664–678.
- [26] S. Kjaer, J. Pedersen, F. Blaabjerg, 2005 "A Review of Single Phase Grid Connected Inverters for Photovoltaic Modules," IEEE Transactions on Industry Applications, 41 (5), pp. 1292-1306.
- [27] T. Eram et al., 2006 "Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays using Ripple Correlation Control," IEEE Transactions on Power Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 21 (5), pp.1282-1291.
- [28] W. Libo, Z. Zhengming, and L. Jianzheng., 2007 "A Single-Stage Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Modified MPPT Method and Reactive Power Compensation," IEEE Transactions on Energy Conversion, 22 (4) ., pp. 881-886.
- [29] Zahzouh, Z., Khochmane, L., Haddouche, A., 2015 " Command of the Novel Multilevel Active Power Filter by an Algorithm Through the P-Q Developed, International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 8 (1), pp.41-47.

- [30] Sardyoung, P., P. Watcharin, and V. Kinnares. 2014. "Single-Phase AC/DC/AC Converter System for a Grid-Connected Asymmetrical Parameter Type Two-Phase Induction Generator." IEEE (TENCON-2014) Proceeding Bangkok Thailand. 22-25 October 2014: IEEE.
- [31] Nedmohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, "Power Electronic Converters, Applications and Design", John Wiley and Sons., Inc., 2003.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Implementation of a Low-Cost Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Active Power Filtering Mechanism

Arckarakit Chaithanakulwat¹, Vijit Kinnares²

Abstract – This research is concerned with the implementation of a low-cost single-phase grid connected PV system including active power filtering functionality. The system is able to transfer surplus power to the grid, to compensate both reactive power and harmonics for nonlinear loads resulting in nearly unity power factor and nearly sinusoidal grid current. The system is controlled by a low cost dSPIC30F4011 microcontroller. Rectification and inversion mode operation is described. Software and hardware design of the system is given. The merit of the proposed system is simplicity especially for grid synchronization using zero crossing in conjunction with a sinusoidal look-up table. The process of reference current generation is fully described and demonstrated by experimental waveforms. Simulation and experimental results are compared in order to validate the proposed technique under various conditions such as low and high solar irradiation. **Copyright © 2017 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.**

Keywords: Active Filters, Nonlinear Filters, Current Control, Voltage Control, Power Quality

Nomenclature

PV	Photovoltaic
DSC	Digital signal controller
THD	Harmonic distortion
D/A	Digital to analog
i_c	Converter current
i_{com}	Command current
i_{CR}	Harmonic current
i_{ref}	Reference current
i_r	Reference signal current
i_x	Fundamental actual load current
i_L	Load current
i_s	Grid current
v_s	Grid voltage
$i_{Command}$	Command current responsible for the supplied converter power

to cope with synchronization and power transfer to the grid. Modeling and simulation of a grid-connected PV system based on electromagnetic transient analysis can be found in [4] which was implemented on PSCAD/EMTDC. However, the effect of nonlinear load has not been investigated. A harmonic problem in power systems has become a serious concern due to the wide use of power electronics equipment (i.e. nonlinear load). Furthermore, the input power factor of most of this equipment is poor. Conventionally, passive power filters and capacitors are employed to attenuate the harmonics and improve the input power factor, respectively [15]. However, they have many disadvantages, such as large size, resonance, fixed compensation characteristic etc. An active power filter is considered as one of the most good methods to compensate the reactive power and to eliminate harmonic currents for nonlinear loads [5], [16]. For a single-phase system with nonlinear loads, the power quality improvement was proposed in [6]. The control technique seems to be complicated. With the shortcoming of previous works, this research work has attempted to implement the whole system with a simple control technique. The aim of this research is to apply the cost-effective converter providing two functions namely power transfer and harmonic compensation in the generation of electricity from PV. The synchronism control is simple. The implementation and testing are given. The simulation of the proposed system is also included to confirm the correctness.

I. Introduction

Presently, renewable energy is focused since non-renewable energy resources such as coal, natural gas, etc. are limited [1]-[16]. In recent years, electricity production from photovoltaic systems has become less costly and more efficient. The clean and pollution-free nature of solar energy makes it non-harmful to human beings and the environment [1]-[3]. Currently, there are two principal types of photovoltaic (PV) systems namely an isolated system and a grid-connected system. The operation of the isolated PV system is straightforward. Normally batteries to store power for night use are required. On the other hand, the grid-connected PV system is considerably more complicated with controllers

II. Description of Proposed Scheme

Fig. 1 illustrates the schematic of the proposed system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

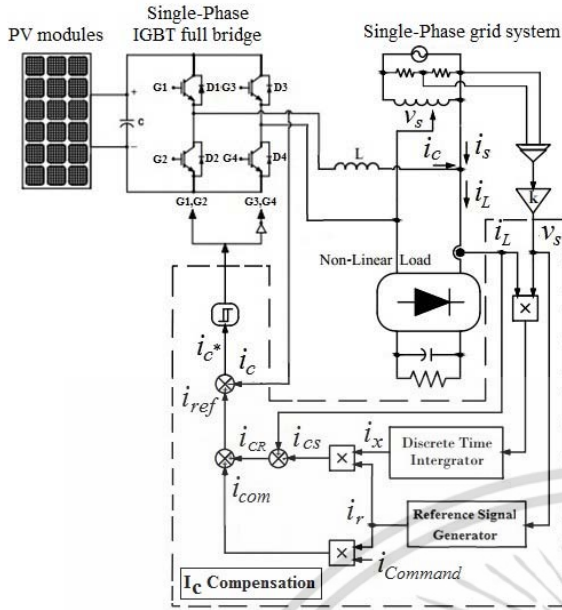


Fig. 1. Schematic of the proposed system

It consists of PV modules, a single-phase IGBT full bridge, a smoothing inductor, a diode bridge rectifier with smoothing capacitor acting as a nonlinear load, a single-phase grid with autotransformer, isolated voltage and current sensors and control block diagram. The dash line box covers the process for calculating the reference current which is responsible for power transfer and harmonic compensation. All algorithms are processed by a low cost dSPIC30F4011 microcontroller. The detailed reference current for power transfer and harmonic elimination will be explained in the next section.

II.1. Reference Current Calculation

The process of the calculation is modified from [8]. Unlike the converter function in [8], this process takes into account power supplying to load and transferring to the grid. Figure 2 depicts the process to obtain the reference current responsible for two functions namely the supplied converter power and harmonic compensation. The sum of reference power command current (i_{com}) and harmonic current (i_{CR}) is the required reference current (i_{ref}). The process for obtaining reference current is as follows. The synchronization with the grid is needed for generating the reference signal (i_r) which can be controlled in phase with respect to the grid voltage for rectification and out of phase with respect to the grid voltage for inversion. Also leading power factor for supplying the reactive power to the grid can be achieved by shifting the leading reference signal. The grid voltage is assumed to be a sinusoidal waveform represented as:

$$v_s(t) = V_p \sin(\omega t) \quad (1)$$

Non-linear load current can be written in a Fourier series form as:

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (2)$$

where n is the order of harmonics. It can be rewritten in terms of the fundamental and harmonic components as:

$$i_L(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (3)$$

A p.u. reference sinusoidal signal which is in-phase with respect to the grid is given as:

$$i_r(t) = \sin(\omega t) \quad (4)$$

The amplitude of the real part of the fundamental of the load current (i_x) can be represented as:

$$i_x = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) \times i_r(t) dt = I_1 \cos \theta_1 \quad (5)$$

This equation will be computed in the block of discrete time integrator as shown in Fig. 1 and Fig. 2.

Therefore, the real part of the fundamental load current (i_x) as fundamental frequency, which is the product of i_x and $i_r(t)$, can be written as:

$$i_{CS}(t) = i_x \times i_r(t) = I_1 \cos \theta_1 \times \sin(\omega t) \quad (6)$$

From equations (3) and (6), it is possible to calculate the reference current as:

$$i_{CR}(t) = i_L(t) - i_{CS}(t) \quad (7)$$

Substituting (2) and (6) in (7) yields:

$$i_{CR}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) \quad (8)$$

Then, the above equations can be incorporated into equation i_{ref} as:

$$i_{ref}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) + i_{Command} \sin(\omega t) \quad (9)$$

where $i_{Command}$ is the dc quantity representing the amplitude of a current command responsible for the supplied converter power.

For a case of supplying reactive power to the grid (i.e leading power factor), a p.u. reference sinusoidal current can be expressed as:

$$i_r(t) = \sin(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

Then the amplitude of the real part of the fundamental of the load current can be expressed as:

$$i_x = I_1 \cos(\theta_1 - \varphi) \quad (11)$$

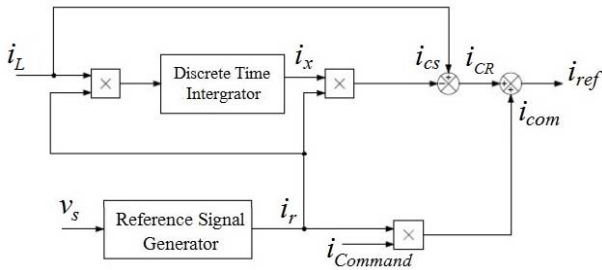


Fig. 2. Block diagram of the process of calculating the reference current responsible for power transfer and harmonic compensation

Similar to the process of the reference current calculation of the case of unity power factor, the required reference current is:

$$i_{ref}(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - I_1 \cos(\theta_1 - \varphi) \sin(\omega t + \varphi) + i_{command} \sin(\omega t + \varphi) \quad (12)$$

II.2. PIC Program Design

Flowchart for writing C program on the PIC microcontroller is shown in Fig. 3. ADC, DAC, timer and port are initialized and set. Zero crossing of the grid for the synchronization is checked via ADC. The 500 sinusoidal values of a look up table are read with 40 microseconds sampling time controlled by Timer 2. With the read sinusoidal value at every sampling time, current reference calculation and hysteresis current control are processed.

Then ADC values will be read for checking zero crossing again. If the zero crossing is detected, the sinusoidal value will be read at the beginning of the look up table for the next cycle.

II.3. Hardware Design

In this research, voltage detector (Fig. 4), current detector (Fig. 5), a digital signal controller (DSC) circuit board and an inverter were constructed. Specifically, the DSC mathematically converts the analog signals from the voltage and current detectors to the digital signals which are used for generating PWM signals to control the IGBTs. The inverter supplies the power to the grid and the non-linear load. Also the nonlinear load harmonics are mitigated by this inverter.

In Fig. 4, the AC voltage sensor unit detects the voltage from the grid using voltage divider. The detected voltage is used for synchronization. The measured voltage will be detected for zero-crossing inside the microcontroller to restart reading sinusoidal values in a look-up table. This experimental voltage detector unit utilizes the ISO124 isolation amplifier to isolate the system ground from the single-phase grid.

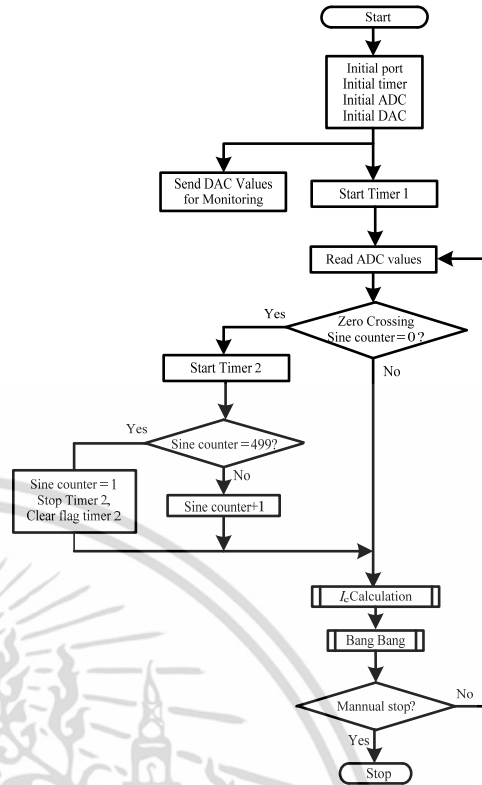


Fig. 3. Flowchart for programming PIC microcontroller

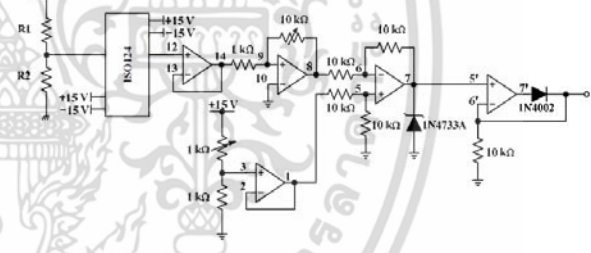


Fig. 4. Voltage detector unit

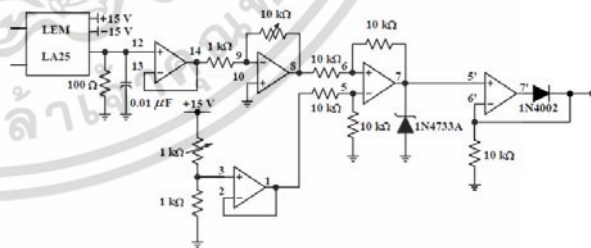


Fig. 5. Schematic of the current detector unit

Fig. 5 depicts the schematic of the experimental current detector unit whose functions are to detect the inverter currents and the non-linear load currents. The current sensor of this research utilizes LEM No. LA25-NP based on Hall-Effect, as illustrated in Fig. 6.

Fig. 7 illustrates the photograph of the digital signal controller (DSC) circuit board implemented including a dead time circuit to prevent the upper and lower IGBT switches from shootthrough fail. The dsPIC30F4011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

microchip is utilized as the processing unit due to its precision, speed and inexpensiveness, while Fig. 8 shows the prototype of the entire experimental system.

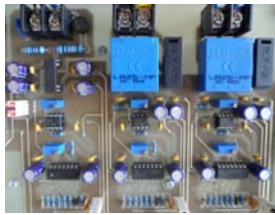


Fig. 6. Photograph of the experimental voltage detector and current detector units



Fig. 7. Photograph of digital signal control (DSC) and dead time circuit board



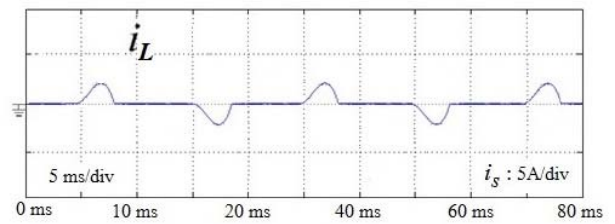
Fig. 8. Photograph of the entire system prototype

III. Results and Discussion

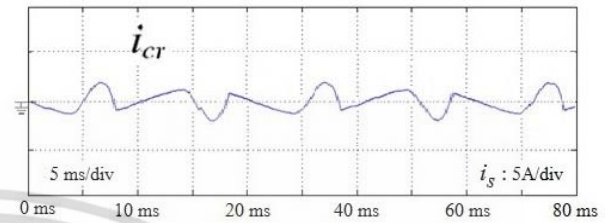
In this research, MATLAB/Simulink was employed to simulate the proposed system with active power filtering mechanism before the development of a prototype. Figs. 9-10 respectively illustrate the simulated and measured waveforms of the load current (i_L), the compensated harmonic current (i_{CR}), and the reference current (i_{ref}). Note that i_{CR} and i_{ref} are sent from the microcontroller via digital to analog (D/A). It can be observed that the i_L , i_{CR} and i_{ref} waveforms of the simulation and prototype are similar, indicating the correctness of the implemented algorithm.

In Figs. 11, a comparison is made between the simulated and measured grid voltage (v_s) and load current (i_L) waveforms. The comparative results reveal a close resemblance between v_s and i_L from MATLAB/Simulink and the prototype.

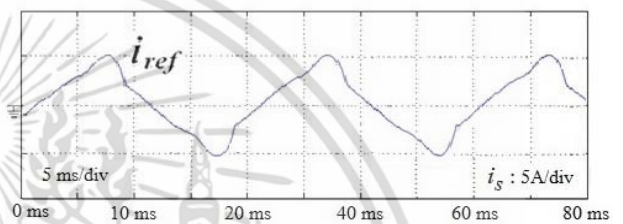
The on-load efficiency achieved with the proposed filtering mechanism, as measured with a power analyzer (Yokogawa: WT3000), is 87.09%. Figs. 12 compare the simulated and measured harmonic spectra of the load currents (i_L) with total measured harmonic distortion (THD) of approximately 15.6%. These results are also similar.



(a)

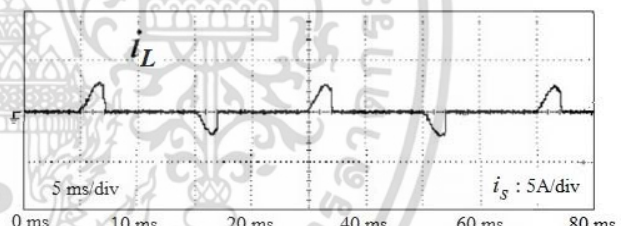


(b)

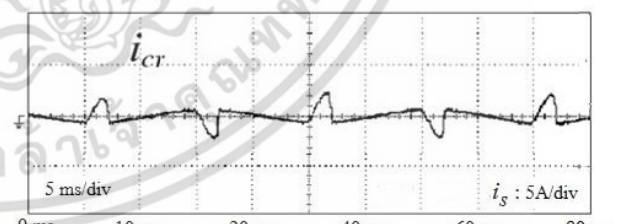


(c)

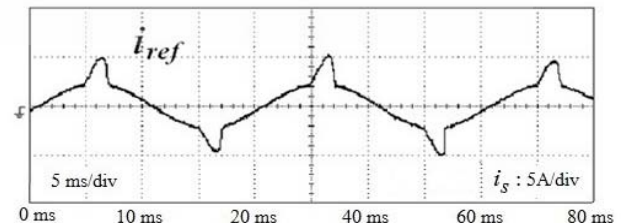
Figs. 9. Simulated waveforms: (a) load current (i_L), (b) harmonic current (i_{CR}), (c) reference current (i_{ref})



(a)

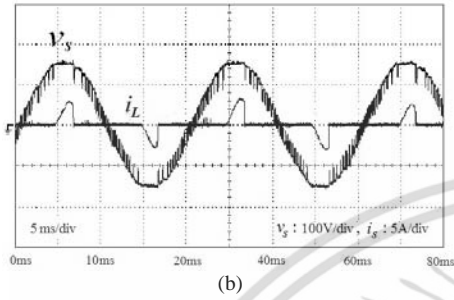
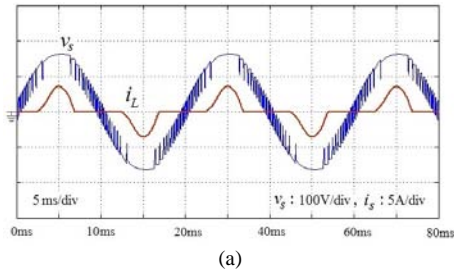


(b)

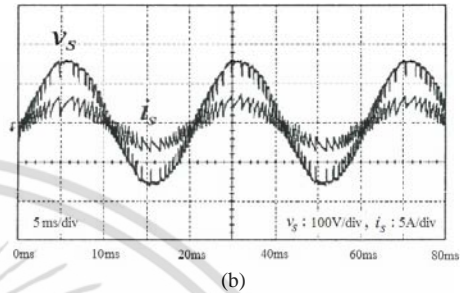
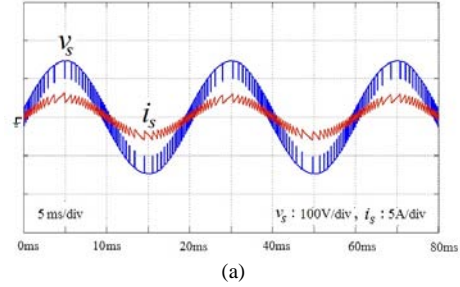


(c)

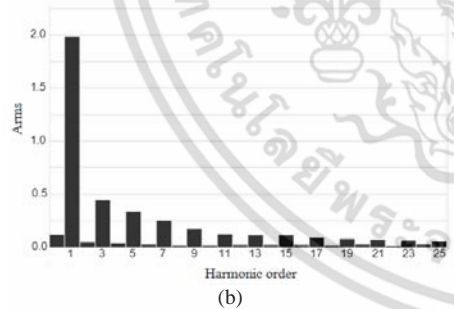
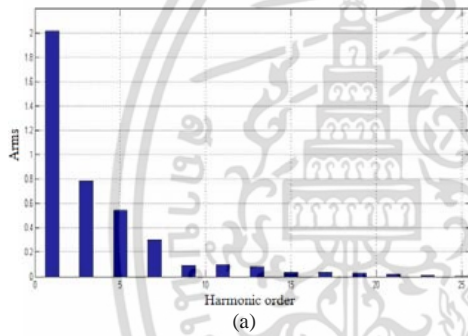
Figs. 10. Measured waveforms: (a) load current (i_L), (b) harmonic current (i_{CR}), (c) reference current (i_{ref})



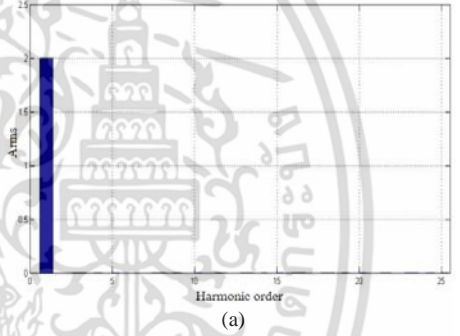
Figs. 11. v_s and i_L waveforms (before compensation)
(a) simulation results (b) measured results



Figs. 13. Grid voltage and current waveforms after compensation
(a) simulated and (b) measured



Figs. 12. Harmonic spectra of load current (i_L):
(a) simulated (b) measured

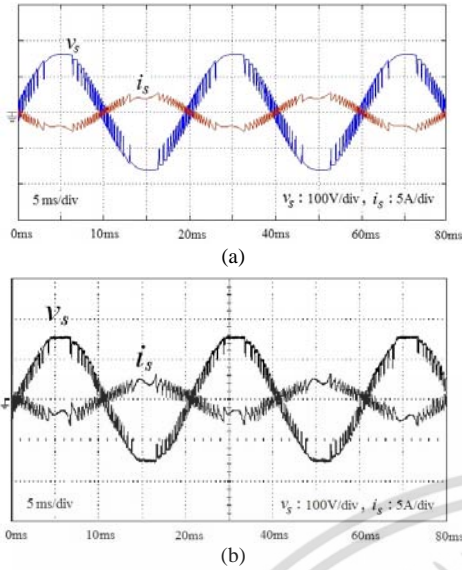


Figs. 14. Harmonic spectra of the grid after compensation
(a) Simulated (b) measured

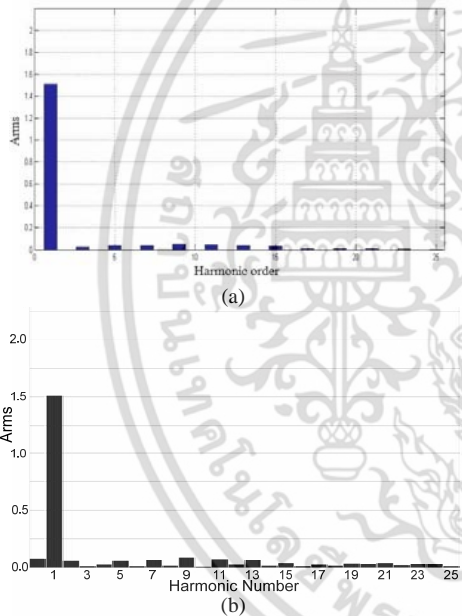
In Figs. 13, the voltage and current waveforms of the grid are in phase for both the simulation and prototype under a low insolation of PV condition, thereby resulting in unity displacement power factor. Note that in this condition the grid delivers to both the inverter and the nonlinear load whilst the inverter mitigates the harmonic current associated with the nonlinear load. Figs. 14 depict the grid current harmonic spectra from the MATLAB Simulink simulation software and the prototype, in which the low order of the harmonics are removed (less than 25th order).

In Figs. 15, the post-compensation current (i_s) and voltage waveforms for simulation and experiment exhibit a near-sinusoidal feature with an inverse 180° phase angle with regard to current and voltage waveforms under a high insolation condition of solar. Note that in this condition the inverter delivers power to the nonlinear load and the grid. Also the inverter mitigates the harmonic current associated with the nonlinear load. Figs. 16 illustrates a similarity between the simulated harmonic spectrum and that of the prototype. Obviously, the harmonics of the grid current are mitigated when compared to Figs. 12.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



Figs. 15. Grid voltage and current waveforms after compensation (a) simulated (b) measured



Figs. 16. Harmonic spectra after compensation (a) simulated (b) measured

Specifically, the measured on-load efficiency, total harmonic distortion (THD) and power factor achieved with the proposed mechanism are respectively 87.09%, 15.6% and 0.95 (i.e. near-unity). Moreover, the after-filtering surplus electricity could be resold to the transmission grid. For a case of dynamic operation, Figs. 17 and 18 illustrate simulation results and experimental results for grid voltage (v_s), grid current (i_s), converter current (i_c) and load current (i_L) during a step change in load, respectively. Apparently, especially for experimental results, the grid current suddenly decreases whilst the converter current is somewhat constant. This is because the current command (i.e. power command) is fixed. As a consequence the real power supplied from the

converter is constant. The simulation and experimental results are in good agreement. These results confirm the correctness of the proposed system.

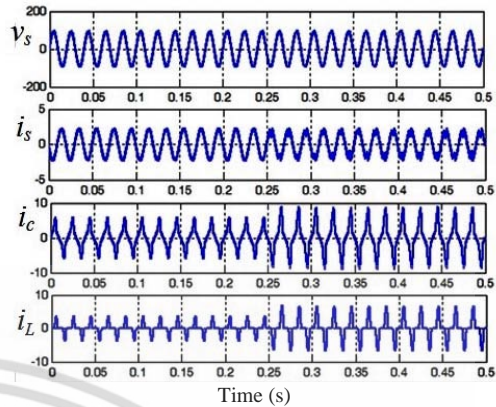


Fig. 17. Simulation results for v_s (200 V/div), i_s (5 A/div), i_c (10 A/div), i_L (10 A/div), Time: 50 ms/div

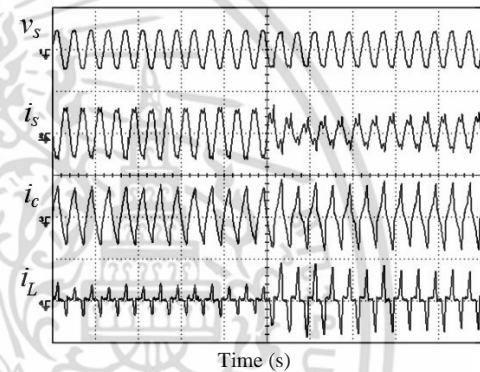


Fig. 18. Experimental results for v_s (200 V/div), i_s (5 A/div), i_c (10 A/div), i_L (10 A/div), Time: 50 ms/div

For a step change in command current at $t = 0.1$ s, Figs. 19 and 20 show dynamic response of currents for simulation and experiment, respectively. Clearly, the amplitude of load current is constant whilst both amplitudes of grid and converter currents increase resulting from the increased command current responsible for supplied real power to the grid and the load.

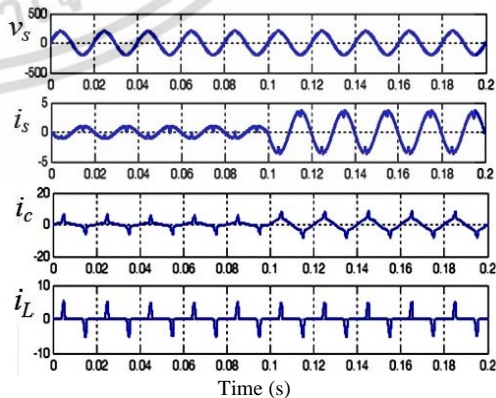


Fig. 19. Simulation results for v_s , i_s , i_c and i_L in case of a Type I nonlinear load (Single-phase diode bridge rectifier with RC load); Scale: Time 20 ms/div, v_s (500 V/div), i_s (5 A/div), i_c (20 A/div), i_L (10 A/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

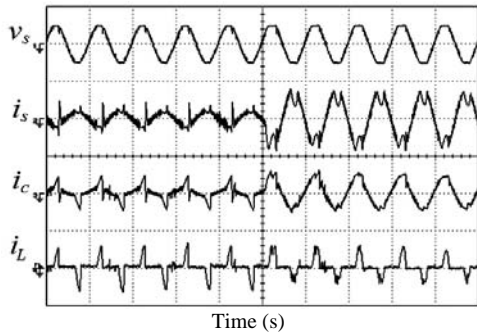


Fig. 20. Experimental results for with RC load); Scale: Time 20 ms/div, v_s (500 V/div), i_s (5 A/div), i_c (20 A/div), i_L (10 A/div)

Again the simulation and experimental results are in good agreement. These results also verify the correct operation of the implemented system. In order to show the capability of the proposed system for reactive power control, the reference current is set to lead the reference voltage with 30 degrees. Figs. 21 and 22 show the simulation and experimental results for nearly 0.866 leading grid power factor (i.e. grid current leads grid voltage of 30 degrees), respectively. This means that the proposed system is able to supply reactive power to the grid. Also, these results for simulation and experiment are in accordance. They verify the capability of the proposed system in reactive power control. In addition to the photovoltaic system, this cost-effective filtering mechanism could be applied to electricity generated from other natural sources, e.g. wind turbine, biomass.

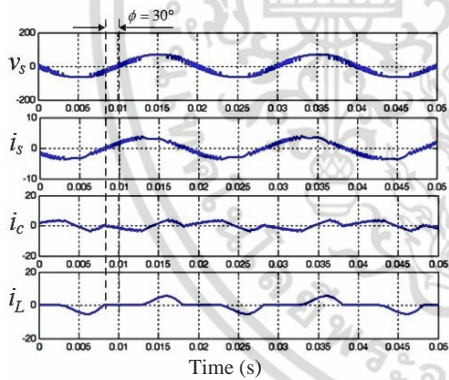


Fig. 21. Simulation results for v_s (100 V/div), i_s (10 A/div), i_c (20 A/div), i_L (20 A/div). Time: 5 ms/div

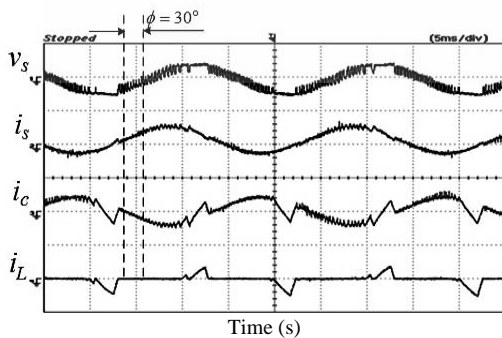


Fig. 22. Experimental results for, v_s (100 V/div), i_s (10 A/div), i_c (20 A/div), i_L (20 A/div), Time: 5 ms/div

IV. Conclusion

This research has dealt with the implementation of an inexpensive grid connected PV system with active power filter functionality to transfer power and to compensate for non-linear load harmonics. Hysteresis current control is utilized in generating PWM signals for switching devices in the main power circuit. As a consequence, power supplying to the nonlinear load and transferring to the grid and compensation for load harmonics are achieved. Both simulation and experimental results have confirmed the validity of the proposed system in terms of correctness of the algorithm and circuit and capability in power transfer and harmonic compensation. Also, supplying reactive power to the grid can be achieved.

Acknowledgements

This work was supported by Dhonburi Rajabhat University, Thailand and Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. Also, this work was supported in part by the Thailand Research Fund under grant No. IRG5780006. The authors would like to thank Assist. Prof. Poonsri Wannakarn, Mr. Watcharin Promkhun, Mr. Wuttikrai Jantasila, Mr. Sakchai Varichar, Mr. Attakom Seangsai, Mr. Aunyawut Jaruthammarut for experimental setup.

References

- [1] Changchien, S., T. J. Liang, J. F. Chen, and L. S. Yang. 2010. "Novel High Step-Up DC-DC Converter for Fuel Cell Energy Conversion System." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57 (6), 2007-2017.
- [2] Liu, P. Z., and M. Fang. 2010. "Research on Construction System of Large Scale Non-Grid-Connected Wind Power Offshore Wind Farms." In *2010 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference (WNWEC)*, Nanjing, 5-7 November 2010: 1-5. IEEE. doi:10.1109/WNWEC.2010.5673119
- [3] Roman, E., R. Alonso, P. Ibanez, S. Elorduizapatarietxe, and D. Goitia. 2006. "Intelligent PV Module for Grid-Connected PV Systems" *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 53 (4): 1066-1073. doi:10.1109/TIE.2006.878327
- [4] Seul-Ki Kim., Jin-Hong Jeon., Chang-Hee Cho., Eung-Sang Kim., Jong-Bo Ahn "Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis" *Solar Energy* 83: 664-678, 2009.
- [5] Akagi, H., and K. Itozaki. 2012. "A Hybrid Active Filter for a Three-Phase 12-Pulse Diode Rectifier Used as the Front End of a Medium-Voltage Motor Drive" *IEEE Transactions on Power Electronics* 27(1): 69-77. doi:10.1109/TPEL.2011.2157977
- [6] Rosa A. Mastromauro, Marco Liserre, Tamas Kerekes, and Antonio Dell'Aquila, "A Single-Phase Voltage-Controlled Grid-Connected Photovoltaic System With Power Quality Conditioner Functionality," *IEEE Trans. Industrial Electronics.*, Vol. 56(11): 4436-4444, 2009.
- [7] Jou, H.-L., J.-C. Wu, and H.-Y. Chu. 1994. "New Single-Phase Active Power Filter." *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 141 (3), 129-134. doi: 10.1049/ip-epa:19949938
- [8] Chaithanakulwat, A., V. Kinnares, and N. Thungsuk. 2012. "Modeling and Simulation of a 3-Phase Grid Connected Photovoltaic Inverter with Active Power Filter Functionality for

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Authors' information

- Harmonic Mitigation." The *International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2012)*, Kanazawa, 8-12 July 2012: 186-190.
- [9] Chaithanakulwat, A., V. Kinnares, and N. Thungsuk. 2012. "Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Active Power Filter Functionality." In 2012 15th *International Conference on Electrical Machines and System (ICEMS)*, Sapporo, 21-24 October 2012: 175-177. IEEE.
- [10] P. Wannakarn, and V. Kinnares. 2002. "Digital Signal Controller Based Grid Connected Inverter for Axial Flux Permanent Magnet Generator." In 2011 *IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Singapore, 5-8 December 2011: 1527-1530. IEEE.
- [11] P. Wannakarn and V. Kinnares, "Single-phase grid connected axial flux permanent magnet generator system with reactive power compensation functionality," 2012 10th *International Power & Energy Conference (IPEC)*, Ho Chi Minh City, 2012, pp. 338-341. doi: 10.1109/ASSCC.2012.6523289
- [12] El Kachani, A., Chakir, E., Ait laachir, A., Jarou, T., Niaania, A., Zerouaoui, J., Sedra, M., AC Grid Connected DFIG-Based Wind Turbine with Shunt Active Power Filter Based on Nonlinear Predictive Control, (2015) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 8 (3), pp. 354-361. doi: 10.15866/iremos.v8i3.6070
- [13] Jayachandran, J., Murali Sachithanatham, R., Malathi, S., Power Quality Improvement in Three Phase Four Wire Distribution System with Implementation of Fuzzy Logic Controller Based Adaptive Shunt Active Filter, (2014) *International Review of Automatic Control (IREACO)*, 7 (2), pp. 197-207.
- [14] Zahzouh, Z., Khochmane, L., Haddouche, A., Command of the Novel Multilevel Active Power Filter by an Algorithm Through the P-Q Developed, (2015) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 8 (1), pp. 41-47. doi: 10.15866/iremos.v8i1.4994
- [15] Hidouri, N., Power Control Applied to a Grid Connected Fuzzy-MPPT Controlled Photovoltaic System, (2014) *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 2 (2), pp. 40-48.
- [16] Dzone Naoussi, S., Kom, C., Berviller, H., FPGA Approach for Implementation of an Adaline-Based Harmonics Mitigation Technique Using NPLL, (2015) *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 3 (3), pp. 95-102.

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.
Email: chaithanakul@gmail.com

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.
Email: kkwijit@kmitl.ac.th



Arckarakit Chaithanakulwat He received the B.Ind. Tech. degree in Electrical engineering from South-East Asia University, Bangkok, Thailand. and M.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His research interests include renewable energy systems, power electronics, motor drives and application of power electronic in system.



Vijit Kinnares (Member, IEEE) He received the B.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand and M.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. Ph.D. degree in Electrical engineering University of Nottingham, England.

His research interests include renewable energy systems, Power Electronics, Electric Drives, Industrial power electronics and application of power electronic in system.

Modeling and Simulation of a 3-Phase Grid Connected Photovoltaic Inverter with Active Power Filter Functionality for Harmonic Mitigation

A. CHAITANAKULWAT¹, V. KINNARES¹, N. THUNGSUK²

¹Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, THAILAND, 10520

²Dhonburi Rajabhat University, Bangkok, THAILAND, 10600
e-mail : arckarakit_chai@hotmail.com, kkwijit@kmitl.ac.th

In this paper, modeling and simulation using SIMULINK for a 3-Phase grid connected system supplying non linear loads using a photovoltaic inverter is presented. Apart from an energy transfer function from photovoltaic (PV), the proposed inverter can also be an active filter in order to mitigate harmonic current associated with non-linear loads for a three-phase four wire system. Initially, mathematical modeling of the PV is given. The simulation based on mathematical equations obtained from the model provides electrical characteristics of the PV source which will be used as the DC input of the inverter. Secondly, the main system has been virtually created in order to actualize the conversion from DC to AC. The main power circuit employs IGBTs formed in a three-phase full bridge. Thirdly, the control circuit is discussed and has been designed. The control method used is hysteresis current control which is simple. The reference current is derived from combining a purely sinusoidal current in phase with the mains supply voltage reference and compensating the current calculated from harmonic contents of the load current. Finally the obtained results are discussed in order to verify the correct operation as the system is designed.

Keywords: Photovoltaic inverter, Active filter, Non linear loads.

1 INTRODUCTION

Electricity production from photovoltaic systems has become less costly and more efficient in recent years. This leads to a huge market for off-grid PV power systems for remote areas[1]. Photovoltaic system are still related to the supply of power to remote areas or rural electrification in developing countries. Although the cost of grid connected PV system is still high, research in power electronics and in semiconductors have played an important role in reducing the cost of PV system. Despite cost reduction, the power converter necessary to transform the dc power from the PV array to grid-synchronous ac power accounts for about 15% of the total system cost [2]-[4].

This paper deals with modeling and simulation of a 3-phase grid connected PV inverter with an active filter functionality. Apart from energy transfer from the PV, this system is also assigned to compensate the harmonic current for the non linear loads. The control method used is hysteresis current control. The reference current is derived from combining a purely sinusoidal current in phase with the mains supply voltage reference and compensating the current calculated from the harmonic of the load current.

2 SYSTEM DESCRIPTION

2.1 PV Array Mathematical Model and Implementation

Photovoltaic cell is the most basic generation part in a PV system. Single-diode mathematic model is applicable to simulate silicon photovoltaic cells, which consists of a photocurrent source I_{ph} , a nonlinear diode, internal resistances R_s and R_{sh} as shown in figure 1.

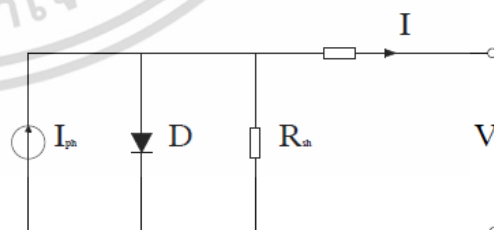


Figure 1. Single-diode mathematic model of a PV cell

The mathematic relationship for the current and voltage in the single-diode equivalent circuit can be described as

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

where, I_{ph} is photocurrent; I_s is diode saturation current; q is coulomb constant (1.602×10^{-19} C); k is temperature (K); A is P-N junction ideality factor; R_s and R_{sh} are intrinsic series resistances.

Photocurrent is the function of solar radiation and cell temperature, described as

$$I = \left(\frac{S}{S_{ref}} \right) \left[I_{ph,ref} + C_T (T - T_{ref}) \right] \quad (2)$$

where, S is the real solar radiation (W/m^2); S_{ref} , T_{ref} , $I_{ph,ref}$ is the solar radiation, cell absolute temperature, photocurrent in standard test conditions respectively; C_T is the temperature coefficient (A/K).

Diode saturation current varies with the cell temperature

$$I_s = I_{s,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

where, $I_{s,ref}$ is the diode saturation current in standard test conditions; E_g is the band-gap energy of the cell semiconductor (eV), depending on the cell material.

2.2 Three phase grid connected System

A typical voltage source inverters (VSI) connected to the grid via the first-order L-filter is shown in figure 3. The more detail of its operation will be given in the full paper.

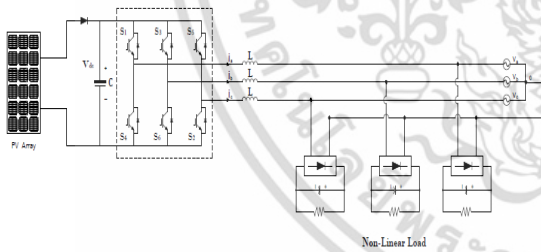


Figure 2. Three phase grid-connected PV system

2.3 Current reference calculation

From Fig. 3, the current reference for the hysteresis current controller to generate PWM signals for all main power switches is derived from combining a purely sinusoidal current in phase with the mains supply voltage reference and compensating the current calculated from the harmonic of the load current. The equations are related to the block diagram in Fig. 3 are as follows.

$$V_s(t) = V_p \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$I_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (5)$$

$$I_L(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (6)$$

$$I_r(t) = \sin(\omega t)$$

$$I_x = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) \times i_r(t) dt \quad (7)$$

$$I_{CS}(t) = I_1 \cos\theta_1 \times \sin(\omega t)$$

$$I_{CR}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - I_1 \cos\theta_1 \sin(\omega t) \quad (8)$$

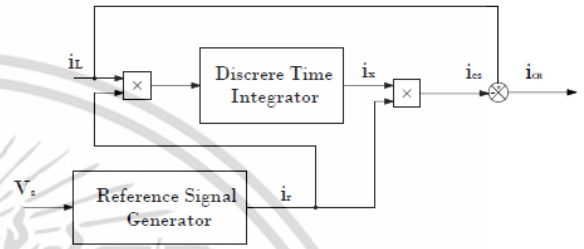


Figure 3. Block diagram of Harmonic Current

2.4 Modeling and Control system configuration

Figure 4. shows the control method per phase. More detail will be given in the full paper.

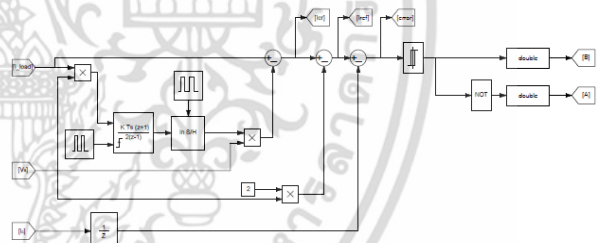
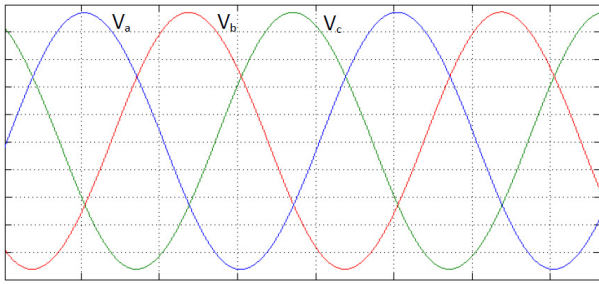


Figure 4. The control system model in MATLAB/Simulink

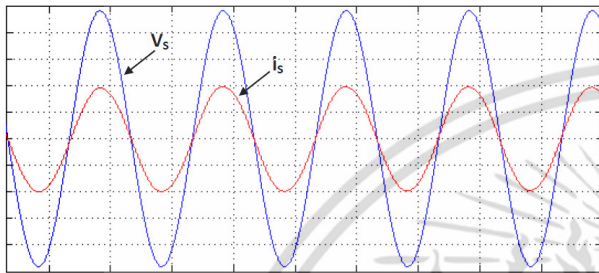
3 SIMULATION RESULTS

Several numerical simulations of the proposed system were accomplished for different situations of load connected in this system (non-linear).

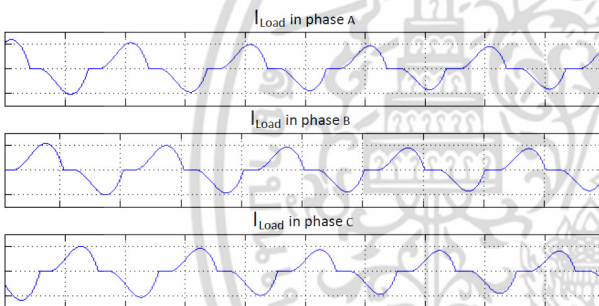
The simulation with non-linear loads was conducted and good results were obtained to several load parameters. Some promising results are shown in the following Figures. More results and discussion will be presented in the full paper.



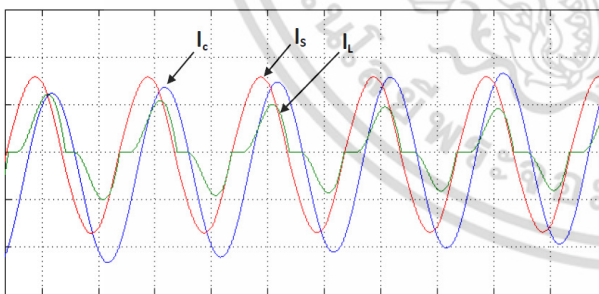
(a) Simulation waveform of Photovoltaic Inverter



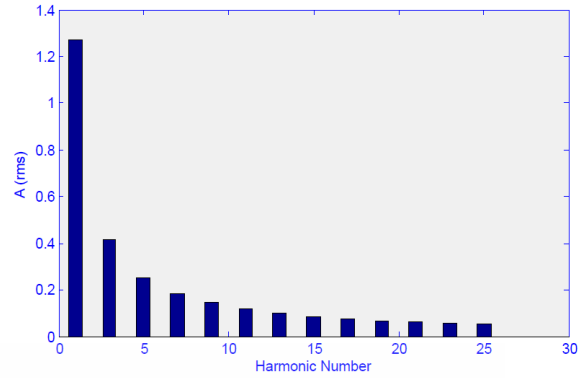
(b) Simulation waveform of grid phase voltage



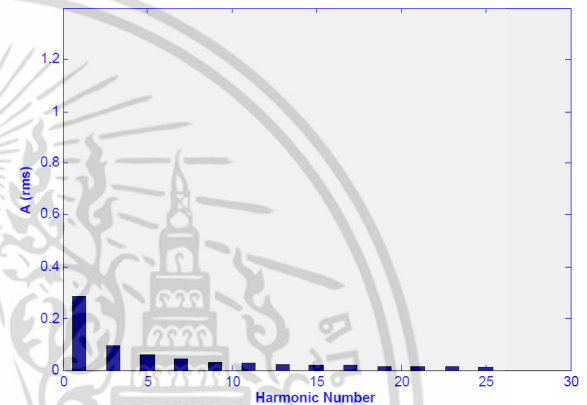
(c) Waveform of load current



(d) Simulation waveform of I_c , I_s and I_L



(e) Signals obtained harmonic spectrum (I_{Load})



(f) Signals obtained harmonic spectrum (I_{Source})

Figure 5. Simulation results of the system in Matlab/Simulink

4 CONCLUSIONS

This paper treats an approach of modeling and control of a grid connected photovoltaic system. A causal informational graph method and its properties are permitted to determine all elementary models and to calculate the Photovoltaic side and grid side controllers. More results will be given in the full paper.

5 REFERENCES

- [1] IEEE P929/D11 Draft Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. Nov 1999
- [2] Spiegel, R.Kern, Jr.Eand Greenberg, D. "Demonstration of the Environmental and Demand Side Management Benefits of Grid-Connected Photovoltaic Power Systems". *Solar Energy*, Vol.62.Pergamon Press.1998
- [3] P. Kazmierkowski, L. Malesani, "Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey", *IEEE Trans. Ind.Electron.*, vol. 45, No. 5, October 1998.

- [4] Photovoltaic array model for use in power Electronics simulation studies", *IEE Proceedings Electric Power Applications*, Vol 146, No. 2, pp. 193-200, 1999.
- [5] N.Mohan,T.M.Underland,and W.P.Robins, "*Power Electronics Converter Application and Design*", John Wiley&Sons,Inc.,2003
- [6] Dou Wei,Xu Zhengguo,Peng Yanchang, Li Jing,Xu Honghua,"Study of Three-phase Grid-Connected Inverter Output Current Waveform Control Scheme," *ACTA ENERGLAE SOLARIS SINICA*,Vol.28,No.11, pp.1263-1265 , Nov.,2007.
- [7] Darren M. Bagnall, Matt Boreland, "Photovoltaic technologies", *Energy Policy*, Vol 36, pp.4390-4396, 2008.
- [8] M. G. Molina, P. E. Mercado, "Modeling and Control of Grid-connected Photovoltaic Energy Conversion System used as a Dispersed Generator", *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*.
- [9] Schonardie, Mateus F. Martins, Denizar C. , "Three-phase grid-connected photovoltaic system with active and reactive power control using dq0 transformation," *IEEE 39th Annual Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1202-1207, 2008.
- [10] R. A. Mastromauro, M. Liserre, A. Dell' Aquila.: "Study of the effects of non-linear inductance on the performance of resonant and repetitive controllers"; *2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, ISIE 2006, Volume 2, July 2006, Page(s): 1498-1503.
- [11] M.Ciobotaru, T.Kerekes, R.Teodorescu, A.Bouscayrol, "PV inverter simulation using MatLab/Simulink graphical environment and PLECS blockset", *IEEE* , p 5313-5318.
- [12] S. Orts, S. Segui, F.J. Gimeno, M.Alcáiz, R.Masot, Modelling and simulation of three phase power active compensator with MATLAB/ Simulink,2004 35th Annual *IEEE Power Electronics Specialists Conference*,Aachen, Germany,2004



Vijit Kinnares received the B.Eng.degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang , Bangkok, Thailand. and M.Eng. degree in electrical engineering from king Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang , Bangkok, Thailand. Ph.D. degree in electrical engineering University of Nottingham, England. His research interests include renewable energy systems, Power Electronics, Electric Drives, Industrial power electronics



Nuttee Thungsuk received his B.Eng Electrical Engineering from Mahanakron University of Technology in 1999 and M.S.Ind.Ed : Electrical Engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi in 2007, and is presently work in Department of Engineering at Dhonburi Rajabhat University, Thailand. He works in research fields of renewable energy, wind and Photovoltaics.



Arckarakit Chaithanakulwat received the B.Ind.Tech. degree in electrical engineering from South-East Asia University , Bangkok, Thailand, in 1993 and M.Eng. degree in electrical engineering from king Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang , Bangkok, Thailand, in 1998. His research interests include renewable energy systems, power electronics, motor drives and application of power electronic in system.

Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Active Power Filter Functionality

A. CHAITANAKULWAT¹, V. KINNARES¹ and N. THUNGSUK²

¹Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, THAILAND, 10520

²Dhonburi Rajabhat University, Bangkok, THAILAND, 10600
e-mail : arckarakit_chai@hotmail.com, kkwijit@kmitl.ac.th

Abstract — This paper presents a single-phase grid connected photovoltaic (PV) system with active power filter functionality for nonlinear load. The system is simulated by using MATLAB/SIMULINK. With this method, power generated by the PV is transferred to the nonlinear load and the grid and the power factor is nearly unity. The current control is based on adaptive PWM method. The system performance is investigated for low and high values of insolation of the PV.

I. INTRODUCTION

Presently, renewable energy has been increasingly focused since non-renewable energy resources such as coal, natural gas, etc. are limited. Electricity production from photovoltaic systems has become less costly and more efficient in recent years. This leads to a huge market for off-grid photovoltaic (PV) power systems for remote areas [1]. An active power filter is considered as one of the most good methods to compensate the reactive power and to eliminate harmonic currents for non-linear loads. For three-phase four wire system with nonlinear loads, grid connected PV systems can be found in [4,7]. Modeling and simulation of a grid-connected PV system based on electromagnetic transient analysis can be found in [5] which was implemented on PSCAD/EMTDC. However, the effect of nonlinear load has not been investigated. For single-phase system with nonlinear load, the power quality improvement has been proposed in [6]. The control technique seems to be complicated. Due to lack of simple control techniques to cope with the nonlinear load. Therefore this paper deals with modeling and simulation of a single-phase grid connected PV inverter with an active filter functionality. The proposed system is shown in Fig.1. Apart from energy transfer from the PV, this system is also assigned to compensate the harmonic current for the nonlinear load. An IGBT full bridge inverter is used. The control method used is hysteresis current control which is simple. The reference current is derived from combining a purely sinusoidal current synchronized with the mains supply voltage and compensating the current calculated from the harmonic of the load current.

II. PV ARRAY MATHEMATICAL MODEL

Photovoltaic cell is the most basic generation part in a PV system. Single-diode mathematic model is applicable to simulate silicon photovoltaic cells, which consists of a

photocurrent source I_{ph} , a nonlinear diode I_d , internal resistances R_s and R_{sh} as shown in Fig. 1.

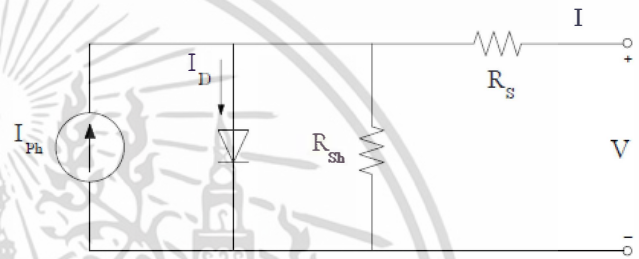


Fig. 1 Single-diode mathematic model of a PV cell

The mathematic relationship for the current and voltage in the single-diode equivalent circuit can be described as

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

where, I_{ph} is photocurrent; I_s is diode saturation current; q is coulomb constant (1.602×10^{-19} C); k is temperature (K); A is P-N junction ideality factor; R_s and R_{sh} are intrinsic series resistances.

Photocurrent is the function of solar radiation and cell temperature, described as

$$I = \left(\frac{S}{S_{ref}} \right) \left[I_{ph,ref} + C_T (T - T_{ref}) \right] \quad (2)$$

where, S is the real solar radiation (W/m^2); S_{ref} , T_{ref} , $I_{ph,ref}$ is the solar radiation, cell absolute temperature, photocurrent in standard test conditions respectively; C_T is the temperature coefficient (A/K).

Diode saturation current varies with the cell temperature

$$I_s = I_{s,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

where, $I_{s,ref}$ is the diode saturation current in standard test conditions; E_g is the band-gap energy of the cell semiconductor (eV), depending on the cell material.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III. REFERENCE CURRENT CALCULATION

Reference current calculation for power transfer and filtering harmonics for nonlinear load is modified from [3].

$$i_L(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (4)$$

From (4), the load current consists of fundamental and harmonic components. The reference current which is synchronized with the grid voltage can be defined as

$$i_r(t) = \sin(\omega t)$$

The fundamental of the load current which is in phase with respect to the grid voltage can be obtained from

$$I_X = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) \times i_r(t) dt \quad (5)$$

Therefore the instantaneous value of the in-phase fundamental respect to the grid voltage is

$$i_{CS}(t) = I_1 \cos \theta_1 \times \sin(\omega t) \quad (6)$$

The reference current for compensating the harmonics of the nonlinear load can be obtained as

$$i_{CR}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) \quad (7)$$

i_{CR} will be added with the current command indirectly representing power to be transferred from the PV. Then the reference current i_{ref} responsible for a transfer of active power and harmonic elimination is achieved. This reference current will be compared with the actual current to generate PWM signals for overall switching devices in the main power circuit. The actual current will track the required reference current within the lower and upper band of hysteresis control. The whole system is shown in Fig. 2. The reference current is calculated by using (1)-(7). The overall system is implemented on MATLAB/SIMULINK.

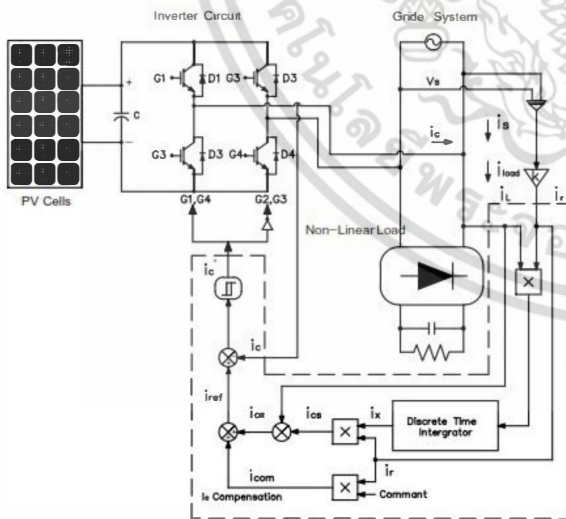


Fig.2 Proposed system

IV. SIMULATION RESULTS

PV conditions for the proposed system are divided into two stages namely low insolation and high insolation. Fig.3 shows the grid voltage and nonlinear load current. Fig.4 shows

the corresponding harmonic current spectrum. Clearly the load current consists of large amplitudes of harmonic components resulting in high total harmonic distortion. Note that without the proposed converter, the grid current is the same as the load current. For the low insolation condition, the power from the PV is only transferred to the load due to produced low energy. Fig.5 shows that the mains supply current waveform is nearly sinusoidal and in-phase with respect to the grid voltage. As a consequence, power factor is nearly unity. Fig.6 shows the corresponding harmonic current. The low order components is almost eliminated. For the high insolation condition, the power from the PV is transferred to the load and the grid due to produced excess energy. Fig.7 shows that the mains supply current waveform is nearly sinusoidal and out of phase with respect to the grid voltage. This shows that the power generated from the PV is transferred to the grid and the nonlinear load. Fig. 8 illustrates the corresponding harmonic contents. Quite clearly low order current harmonics are almost eliminated. According to the obtained results, it shows that the proposed system is able not only to transfer energy produced from the PV but also to filter the power harmonics out from the grid.

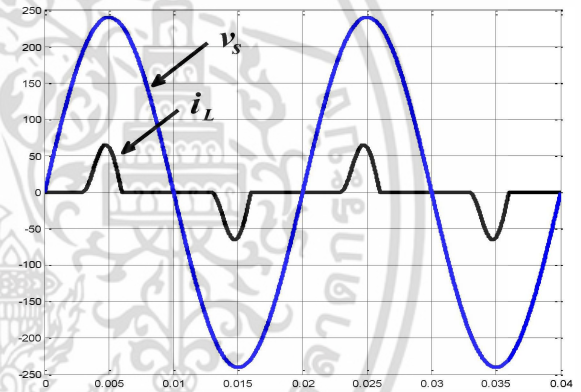


Fig. 3 grid voltage and nonlinear load current

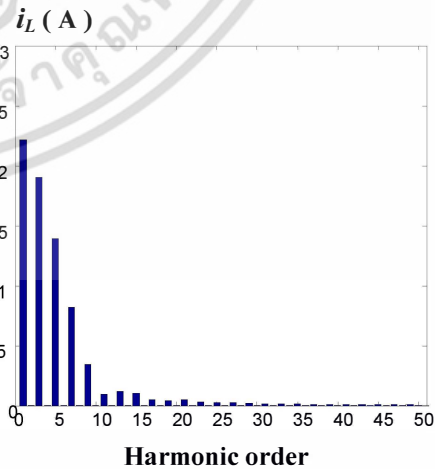


Fig.4 Harmonic spectrum of the load current

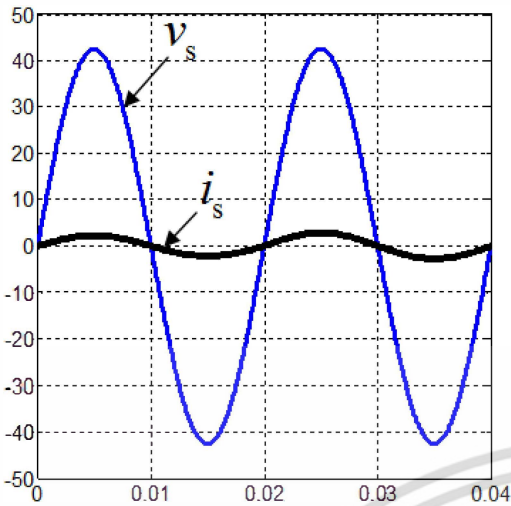


Fig. 5 Supply voltage and current

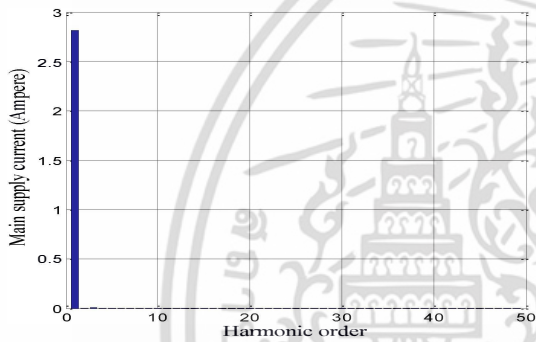


Fig.6 Spectrum of harmonics of the mains supply current

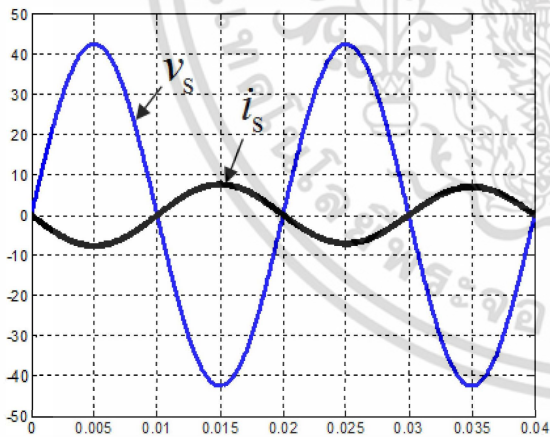


Fig. 7 Supply voltage and current

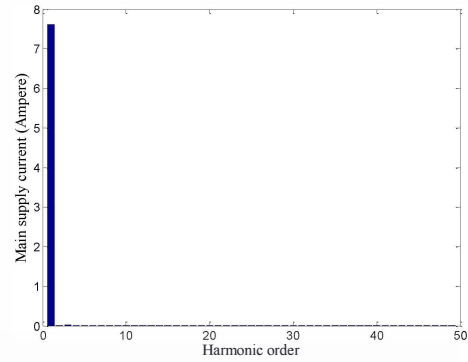


Fig. 8 Supply current spectrum

III. CONCLUSION

This paper has presented a single-phase grid connected photovoltaic (PV) system with active power filter functionality for non-linear load. The proposed system is verified by the simulation using MATLAB/SIMULINK. The reference current has been fully described. The current control technique is simple. The power is only transferred from the PV to the nonlinear load for a low value of the insolation. For a high value of the insolation, the power is transferred from the PV to both the nonlinear load and the grid. The obtained power factor is nearly unity. The proposed system is also able to eliminate the low order of supply current harmonics.

References

- [1] IEEE P929/D11 Draft Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. Nov 1999
- [2] B. K. Bose, "An Adaptive Hysteresis-Band Current Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System," IEEE Trans. Ind. Electronics, vol.37, no.5, pp.402-408, 1990.
- [3] H.-L. Jou, J.-C. Wu, Chu, "New single-phase active power filter", IEEE Proc.-Electr. Power Appl. 1994, pp 129-134.
- [4] S.H. Hosseini, S. Danyali, A. Yazdanpanah Goharrizi and M.Sarhanzadeh, "Three-Phase Four-wire Grid-Connected PV Power Supply with Accurate MPPT for Unbalanced Nonlinear Load Compensation", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009) July 2009 pp.1099-1104.
- [5] Seul-Kim, jin-Hong jeon, Chang-Hee Cho, Eung-Sang Kim, Jong-Bo Ahn " Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis", Solar Energy 83(2009) pp.664-678
- [6] Rosa A. Mastromauro, Marco Lieserre, Tamas Kerekes, and Antonio Dell'Aquila " A Single-Phase Voltage-Controlled Grid-Connected Photovoltaic System With Power Quality Conditioner Functionality, Trans. On industrial Electronics, Vol.56, No.11, November 2009.
- [7] A.Chaithanakulwat, V.Kinnaree, N.Thungsuk "Modeling and Simulation of a 3-Phase Grid Connected Photovoltaic Inverter with Active Power Filter Functionality for Harmonic Mitigation" The International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2012) July 2012 Japan, pp.186-190.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 6 แผง ขนาด 1,600 W 240 V
ติดตั้งบนชั้นดาดฟ้าของอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ
ทดสอบจ่ายโหลดขนาด 100 W – 2000 W ตลอด
ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 จ่ายโหลดในช่วงเวลา 08.00 น.

แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
222.30	0.9	200	200.07
151.40	1.4	400	211.96
70.46	1.45	600	102.167
52.75	1.6	800	84.4
26.65	1.7	1000	45.305
20.15	1.75	1200	35.2625
16.86	1.9	1400	32.034
11.67	1.9	1600	22.173
10.73	1.9	1800	20.387
10.35	1.9	2000	19.665

ตารางที่ 2 จ่ายโหลดในช่วงเวลา 09.00 น.

แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
242.40	0.9	200	218.16
237.30	1.8	400	427.14
231.50	2.7	600	625.05
224.60	3.5	800	786.1
215.40	4.2	1000	904.68
201.50	4.95	1200	997.425
172.50	5.3	1400	914.25
136.70	5.35	1600	731.345
111.00	5.4	1800	599.4
98.45	5.4	2000	531.63

ตารางที่ 3 ตารางการทดลองจ่ายโหลดในช่วงเวลา 10.00 น.

แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
243.00	0.9	200	218.7
238.70	1.8	400	429.66
234.00	2.8	600	655.2
229.00	3.5	800	801.5
223.40	4.25	1000	949.45
216.60	5.15	1200	1115.49
207.70	5.85	1400	1215.045
194.50	6.45	1600	1254.525
169.80	6.8	1800	1154.64
150.25	6.8	2000	1021.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 จ่ายโหลดในช่วงเวลา 11.00 น.

แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
241.10	0.9	200	216.99
234.50	1.8	400	422.1
226.50	2.65	600	600.225
219.60	3.45	800	757.62
207.60	4.2	1000	871.92
197.80	4.85	1200	959.33
157.70	5.15	1400	812.155
140.30	5.4	1600	757.62
132.40	6	1800	794.4
112.50	5.8	2000	652.5

ตารางที่ 5 จ่ายโหลดในช่วงเวลา 12.00 น.

แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
242.60	0.9	200	218.34
239.40	1.8	400	430.92
234.70	2.8	600	657.16
229.50	3.5	800	803.25
224.20	4.35	1000	975.27
218.50	5.15	1200	1125.275
211.70	5.9	1400	1249.03
204.60	6.8	1600	1391.28
176.30	7	1800	1234.1
140.00	7	2000	980

ตารางที่ 6 จ่ายโหลดในช่วงเวลา 13.00 น.

แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
241.60	0.9	200	217.44
236.70	1.8	400	426.06
231.40	2.8	600	647.92
227.50	3.5	800	796.25
223.40	4.3	1000	960.62
206.10	5.2	1200	1071.72
195.60	5.65	1400	1105.14
193.60	6.4	1600	1187.84
191.80	7.2	1800	1380.96
148.50	7.4	2000	1098.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 จ่ายโหลดในช่วงเวลา 14.00 น.

แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
242.70	0.9	200	218.43
238.20	1.8	400	428.76
233.40	2.8	600	653.52
228.00	3.5	800	798
221.70	4.3	1000	953.31
213.70	5.1	1200	1089.87
202.40	5.75	1400	1163.8
182.30	6.2	1600	1130.26
150.30	6.3	1800	946.89
132.25	6.3	2000	833.175

ตารางที่ 8 จ่ายโหลดในช่วงเวลา 15.00 น.

แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
241.6	0.9	200	217.44
236.1	1.8	400	424.98
229.5	2.7	600	619.56
221.1	3.5	800	773.85
208.2	4.2	1000	874.44
181.1	4.7	1200	851.17
137.8	4.7	1400	647.66
108.4	4.7	1600	509.48
86.7	4.7	1800	407.49
70.2	4.7	2000	329.94

ตารางที่ 9 จ่ายโหลดในช่วงเวลา 16.00 น.

แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
236.40	0.9	200	212.76
227.80	1.75	400	398.65
214.00	2.6	600	556.4
171.60	3.1	800	531.96
117.70	3.1	1000	364.87
84.20	3.1	1200	261.02
62.40	3.1	1400	193.44
47.76	3.1	1600	148.056
37.14	3.1	1800	115.134
26.54	3.1	2000	82.274

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 จ่ายโหลดในช่วงเวลา 17.00 น.

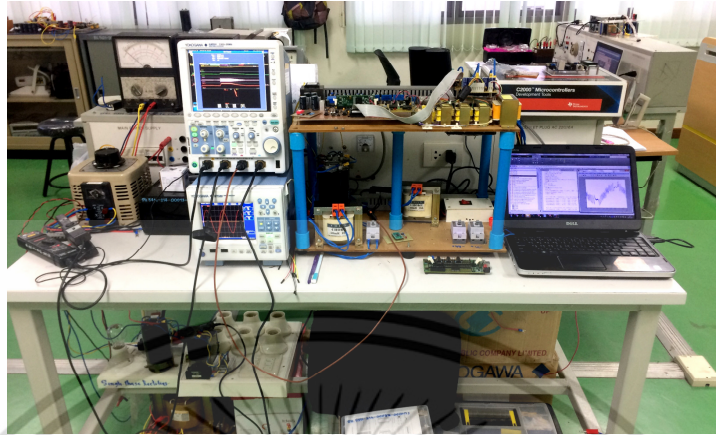
แรงดัน (V)	กระแส (A)	โหลด (W)	กำลังไฟฟ้า (W)
216.10	0.9	200	194.49
112.70	1.2	400	135.24
51.70	1.2	600	62.04
27.57	1.2	800	33.084
15.21	1.2	1000	18.252
9.02	1.2	1200	10.824
5.95	1.2	1400	7.14
4.44	1.2	1600	5.328
3.61	1.2	1800	4.332
2.89	1.2	2000	3.468

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

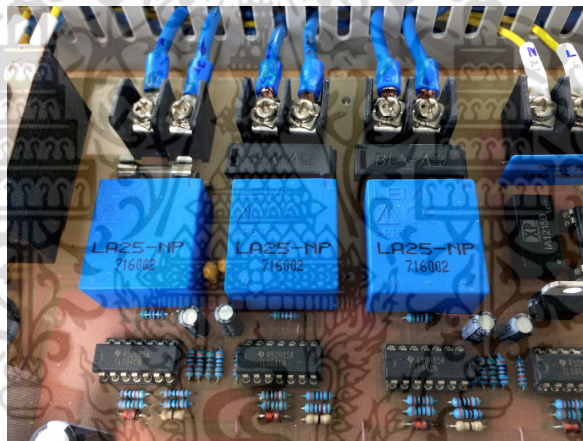


ภาคผนวก ข
ชุดการทดสอบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

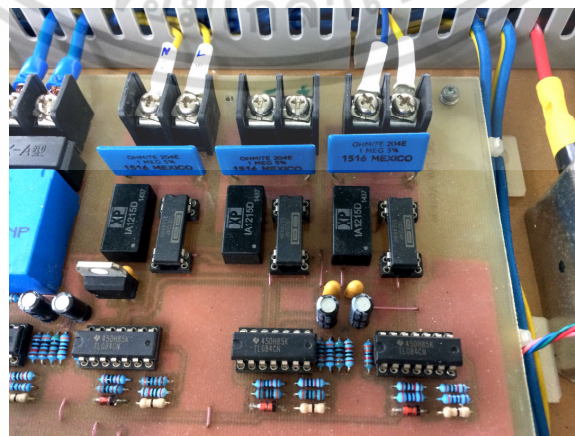
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพรวมของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

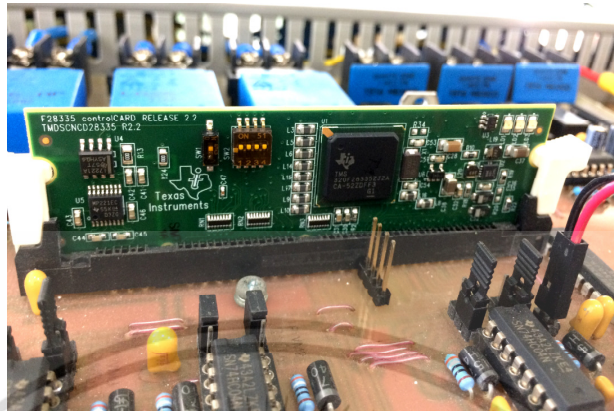


อุปกรณ์ตัวตรวจจับสัญญาณกระแส (LEM LA25-NP)

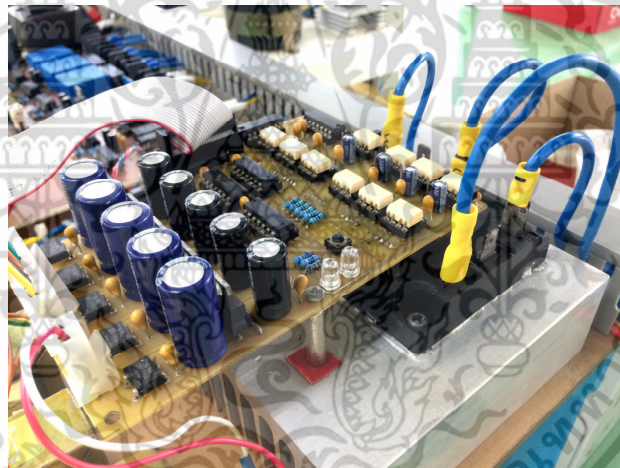


อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (ISO124-NP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28335



ชุดขับเคลื่อนไอซีบีทีโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือ	รายละเอียด
	<p>Power Analyze YOGOKAWA รุ่น WT500</p>
	<p>Oscilloscope YOGOGAWA รุ่น DLM2000</p>
	<p>Differential Probe TECPEL รุ่น DP-25</p>
	<p>Current Probe TEKTRONIC รุ่น A622</p>
	<p>Irradiation Meter CEM DT-1307</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>AC Volt-Amp Meter YOGOKAWA รุ่น 2011-30</p>
	<p>DC Volt-Amp Meter YOGOKAWA รุ่น 2011-31</p>
	<p>Watt-Hour meter MISHUBISHI-5(15)A</p>
	<p>Digital Multimeter YOGOKAWA รุ่น Digital Multimeter, 3.5 Digit, 6000 Count Dual Display, +/-1-0.09%, Bandwidth 20kHz</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายอักรกิตติ์ ไชยธนกุลวัฒน์
 วันเดือนปีเกิด 18 มีนาคม พ.ศ.2510
 ที่อยู่ 54/151 หมู่ 5 หมู่บ้านอินนิซิโอ (ปิ่นเกล้า-ศาลายา)
 ถนนสำเร็จพัฒนา ตำบลศาลากลาง อำเภอบางกรวย
 จังหวัดนนทบุรี 11130

ประวัติการศึกษา

- 1) 2536 อดุสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
- 2) 2541 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1) Renewable energy systems
- 2) Power electronics
- 3) Motor drives and application of power electronic in system

ประสบการณ์การทำงาน

- 2530 – 2531 เจ้าหน้าที่พัสดุ กองพัสดุ วิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
- 2531 – 2536 ผู้ช่วยอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
 วิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
- 2536 – 2540 อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
 มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
- 2540 – 2541 อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยสยาม
- 2541 – 2542 อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี (มหาวิทยาลัยธนบุรี)
- 2542 – 2544 รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี
 (มหาวิทยาลัยธนบุรี)
- 2544 – 2549 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี
 (มหาวิทยาลัยธนบุรี)
- 2549 – 2550 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี
- 2549 – 2550 คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี
- 2550 ตรวจสอบและประเมินคุณภาพการศึกษาภายในสถานศึกษา
 ระดับอุดมศึกษา สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
- 2551-ปัจจุบัน ผู้อำนวยการโครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ
- 2556-2560 ผู้อำนวยการมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการเรียนการสอนในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้