

ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบ
กำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

DSC-CONTROLLED GRID CONNECTED PV SYSTEM WITH
POWER FACTOR CORRECTION

วิศิชัย ชูรักษ์
WITICHAI CHOORAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2730-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบ
กำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

DSC- CONTROLLED GRID CONNECTED PV SYSTEM WITH
POWER FACTOR CORRECTION



วิติชัย ชูรักษ์

WITICHAJ CHOORAK

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 65484
วันเดือนปี..... 11 ต.ค. 2549

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2730-6

**DSC- CONTROLLED GRID CONNECTED PV SYSTEM WITH
POWER FACTOR CORRECTION**

WITICHAI CHORAK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2730-6

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง
ด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล
DSC-CONTROLLED GRID CONNECTED PV SYSTEM WITH POWER
FACTOR CORRECTION

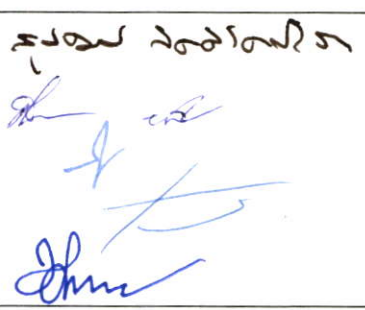
นักศึกษา นายวิรัชชัย ชูรัชย์

รหัสประจำตัว 45060102

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สังจา	
ดร.สมภพ	ผลไม้	
รศ.ดร.วีระเชษฐ์	ชันเงิน	
รศ.ดร.ชรินทร์	บุญลักษณ์านุสรณ์	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 17 พฤษภาคม 2549 เวลา 11.30-13.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-401)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....17.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....2549.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการ
แก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

นักศึกษา

นาย วิมลชัย ชูรัมย์

รหัสนักศึกษา

45060102

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2549

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 320 W ต่อกับคอนเวอร์เตอร์ดีซี-เอซี เพื่อเชื่อมต่อการไฟฟ้าในระบบ 1 เฟส 220 V 50 Hz โดยที่ระบบถูกกำหนดให้ทำงานสองหน้าที่คือ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าและทำหน้าที่เป็นแอคทีฟฟิลเตอร์จากกระแสอ้างอิงในการควบคุมประกอบด้วยสองส่วนคือ กระแสคำสั่งที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับกระแสชดเชยที่ได้จากการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกของกระแสโหลด เพื่อใช้ในการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซีต โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล DSPIC30F4011 ทำการประมวลผลทั้งระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการจำลองและวิเคราะห์การทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองมาวิเคราะห์การทำงานของระบบที่ได้ออกแบบขึ้นเพื่อตรวจสอบการทำงานที่ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ก่อนทดสอบจริง ในส่วนของวงจรกำลังได้นำเสนอหลักการวิเคราะห์และออกแบบตัวเหนี่ยวนำ, ความถี่สูงสุดในการสวิตช์

ในตอนท้ายของวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอเครื่องต้นแบบของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง โดยทำการทดสอบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีแรกเป็นการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า กรณีที่สองเป็นการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าร่วมกันจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้น กรณีที่สามเป็นการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าร่วมกันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

Thesis Title	DSC- Controlled Grid Connected PV System with Power Factor Correction
Student	Mr. Witichai Choorak
Student ID.	45060102
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical of Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis presents a grid connected DC-AC converter which is transferred energy from solar energy, and included power factor correction system. The system consists of photovoltaic system 320 W and 1 phase DC-AC converter 220 V 50Hz. This system is assigned as a power transfer and an active filter. The reference current includes two parts which are a command current for power transfer from the converter and compensating current resulting from subtraction between load current and fundamental current in order to use for hysteresis controller by a Digital Signal Controller (DSC dsPIC30F4011 calculation. The system design is analyzed by MATHLAB/SIMMULINK. As a result, simulation results can compare with implementation results in order to improve the system process. For power circuit part, the propose method show the concept of inductor design and high frequency switching design.

Furthermore, the hardware implementation results are divided into 3 conditions, namely, on load test, linear load supplied by solar energy and gird connected, and finally, non linear load supplied by solar energy and gird connected and improve nearly unity power factor.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สังจา และ ดร.สมภพ ผลไม้ กรรมการการสอบหัวข้อ และเค้าโครงวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำจนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ อาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ ที่ได้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการเขียนโปรแกรม และความรู้เกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ขอกราบขอบคุณ คุณพ่อชู และคุณแม่วันนา ที่คอยให้กำลังใจในการศึกษา และเป็นผู้สนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างในการศึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณสำนักห้องสมุดกลางและห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้สนับสนุนข้อมูล และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย โดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2546-2547

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัย ECC 405 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอบแต่ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วิมลชัย ชูรักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	3
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	3
2.1.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	3
2.1.2 การหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.1.3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.1.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน.....	9
2.1.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบาง.....	9
2.1.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเกล็ดเดี่ยวอาร์เซไนต์.....	9
2.1.4 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.2 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	10
2.3 การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการวิเคราะห์คุณภาพรูปคลื่นกระแส.....	12
2.3.1 วงจรกรองกำลังพาสทีฟ.....	12
2.3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	13
2.3.2.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	14
2.3.2.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม.....	14
2.3.3 วิธีการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกอย่างง่าย.....	16

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.4	การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณ.....	18
2.3.5	การประเมินสมรรถนะของวงจรรอกำลังแอกทีฟด้วยค่าดัชนีคุณภาพ.....	19
2.3.5.1	แรงดันและกระแสมูลฐานอาร์เอ็มเอส.....	19
2.3.5.2	แรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอส.....	19
2.3.5.3	ค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้า.....	19
2.3.5.4	ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยน.....	20
2.3.5.5	ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยนรวมของฮาร์มอนิก.....	20
2.4	การชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ.....	20
2.4.1	การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.....	21
2.4.2	ประโยชน์จากการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ.....	22
2.5	อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส.....	23
2.5.1	ลักษณะทั่วไปของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อการไฟฟ้าสำหรับแสงเซลล์ แสงอาทิตย์.....	23
2.5.2	อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขึ้นเดียว.....	24
2.5.3	อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองชั้น.....	25
2.6	การควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิส.....	26
2.7	สรุป.....	31
บทที่ 3	การจำลองและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการ แก้ไขตัวประกอบกำลัง.....	33
3.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	33
3.2	การจำลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัว ประกอบกำลัง.....	45
3.2.1	การคำนวณหากระแสอ้างอิง.....	46
3.2.2	การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการ ไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง.....	48
3.3	สรุป.....	51
บทที่ 4	การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมและวงจรถูกกำลัง.....	52
4.1	การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	53

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การออกแบบอินเวอร์เตอร์.....	54
4.2.1 ตัวเก็บประจุไฟตรง.....	54
4.2.2 ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส.....	54
4.2.3 วงจรสวิตช์กำลัง.....	55
4.2.4 วงจรประวิงเวลา.....	58
4.2.5 วงจรวงจรป้องกันภาคกำลัง.....	58
4.3 การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณของวงจรควบคุม.....	59
4.3.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน.....	59
4.3.2 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส.....	61
4.4 ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล.....	61
4.4.1 สถาปัตยกรรมของ DSPIC30F4011.....	62
4.5 การออกแบบโครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุม.....	64
4.5.1 โปรแกรมคำนวณหากระแสอ้างอิง.....	66
4.5.2 โปรแกรมควบคุมกระแสฮีสเตอร์รีซิส.....	66
4.6 สรุป.....	67
บทที่ 5 ผลการทดลองการทำงานของระบบ.....	68
5.1 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ.....	68
5.1.1 ผลการตรวจสอบการคำนวณหากระแสอ้างอิง.....	68
5.1.2 การทดสอบวงจรกำลัง.....	70
5.1.2.1 การทดสอบวงจรกำลังโดยการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า กลับคืนการไฟฟ้า.....	70
5.1.2.2 การทดสอบวงจรกำลังโดยการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า จ่ายโหลดรวมกับการไฟฟ้า.....	73
1. โหลดเป็นเชิงเส้น.....	73
2. โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	83
5.2 การทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า.....	92
5.2.1 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยการ ควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....	94

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2.2 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยร่วม กันจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้น.....	98
5.2.3 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยร่วม กันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	101
5.3 สรุป.....	105
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	106
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	106
6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	107
เอกสารอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก. เครื่องมือที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	111
ภาคผนวก ข. เครื่องต้นแบบในงานวิจัย.....	114
ภาคผนวก ค. โปรแกรมควบคุมการทำงาน DSPIC30F4011.....	118
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	140
ประวัติผู้เขียน.....	148

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบวงจรรองกำลังพาสซีฟและวงจรรองกำลังแอคทีฟ.....	15
2.2 การเปรียบเทียบวงจรรองกำลังแอคทีฟแบบขนานและอนุกรม.....	16
2.3 นิยามดัชนีและปริมาณที่กำหนดคุณสมบัติและคุณภาพรูปสัญญาณกระแสอินพุต.....	20
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	34
3.2 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิ 25 °C คงที่ เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ ระดับต่างๆ.....	44
3.3 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 1000 W/m ² คงที่ เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิที่ระดับต่างๆ.....	45

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรมุมูลในอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์.....4
2.2	วงจรมุมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....4
2.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....5
2.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25 °C คงที่เปลี่ยนแปลงระดับค่าความเข้มแสงที่ต่างๆ.....5
2.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม แสง 1000 W/m ² คงที่ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่างๆ..... 6
2.6	วงจรมุมูลการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 และบัส 2.....10
2.7	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....10
2.8	วงจรรองกำลังพาสซีฟแบบต่อขนานกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น.....13
2.9	วงจรรองกำลังพาสซีฟแบบต่ออนุกรมกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น.....13
2.10	วงจรรองกำลังแอคทีฟแบบต่อขนานกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น.....14
2.11	วงจรรองกำลังแอคทีฟแบบต่ออนุกรมกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น.....15
2.12	วิธีการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกอย่างง่าย.....16
2.13	องค์ประกอบของฮาร์มอนิกของสัญญาณที่ไม่เป็นรูปไซน์.....19
2.14	การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....21
2.15	อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบฟูลบริดจ์.....23
2.16	บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว.....24
2.17	โครงสร้างอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว.....25
2.18	บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น.....25
2.19	โครงสร้างอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น.....26
2.20	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิส.....27
2.21	สัญญาณกระแสอ้างอิงและสัญญาณสวิทช์.....27
2.22	สัญญาณกระแสจริงภายใต้ขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส.....27
3.1	วงจรมุมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....33
3.2	คุณลักษณะเอาท์พุทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....34
3.3	วงจรมุมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย.....35
3.4	วงจรมุมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะลัดวงจร.....36
3.5	ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองในการกำหนดค่าที่ถูกต้องของ Ideality factor (A) และความต้านทานอนุกรม.....39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS 40 ของบริษัท บางกอกโซลาร์ จำกัด.....40
3.7	กราฟแสดงค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการทดสอบจาก โรงงาน.....41
3.8	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์..... 42
3.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 25°C คงที่ เปลี่ยนแปลงความเข้มแสง.....42
3.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากแบบจำลองที่ความเข้มแสง 1000 W/m ² เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ..... 43
3.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 25°C คงที่ เปลี่ยนแปลงความเข้มแสง.....43
3.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากแบบจำลองที่ความเข้มแสง 1000 W/m ² เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....44
3.13	บล็อกไดอะแกรมระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า.....46
3.14	วงจรกำลังและวิธีการคำนวณหากระแสอ้างอิงในการควบคุมการทำงานของระบบ.....47
3.15	สัญญาณที่ได้จากการจำลองวิธีการหากระแสอ้างอิง.....47
3.16	การจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK.....48
3.17	การจำลองระบบในกรณีที่สามารผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์..... 50
4.1	โครงสร้างส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมี การแก้ไขตัวประกอบกำลัง.....52
4.2	ลักษณะการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า.....53
4.3	เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้.....54
4.4	โครงสร้างไอจีบีทีโมดูลกำลังเบอร์ PM25RSB120 (IPM)56
4.5	วงจรแยกกราวด์ก่อนเข้าสู่ชุดขับเคลื่อนไอจีบีทีกำลัง.....57
4.6	อินเวอร์เตอร์ของเครื่องต้นแบบ.....57
4.7	วงจรสร้างช่วงการประวิงเวลา.....58
4.8	วงจรวงจรป้องกันภาคกำลัง.....59
4.9	วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน.....60
4.10	ชุดตรวจจับสัญญาณของเครื่องต้นแบบ.....60
4.11	วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส.....61
4.12	โครงสร้างของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล DSPIC30F4011.....63

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล DSPIC30F4011 ของเครื่องต้นแบบ.....63
4.14	เครื่องต้นแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้.....64
4.15	โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ.....65
4.16	โครงสร้างโปรแกรมคำนวณหากระแ้อ้างอิง.....66
4.17	โครงสร้างโปรแกรมควบคุมการสร้างกระแส.....67
5.1	สัญญาณไซน์ขนาด 1 หน่วย 50 Hz จากวงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาลอก.....69
5.2	สัญญาณที่จุดต่างๆ ในวิธีการคำนวณหากระแ้อ้างอิง.....70
5.3	วงจรกำลังการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....71
5.4	สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....71
5.5	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....71
5.6	สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....72
5.7	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....72
5.8	สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....72
5.9	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....73
5.10	วงจรกำลังการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อการไฟฟ้าร่วมกันจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้น.....74
5.11	สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด 50 W.....74
5.12	สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} ขนาด 50 W.....74
5.13	สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W.....75
5.14	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W.....75
5.15	สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W.....75
5.16	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W.....76
5.17	สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W.....76
5.18	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W.....76
5.19	สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด 100 W.....77
5.20	สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} ขนาด 100 W.....77
5.21	สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....77
5.22	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....78
5.23	สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....78
5.24	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....78
2.25	สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....79

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	79
5.27 สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด 150 W.....	80
5.28 สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} จ่ายโหลด 150 W.....	80
5.29 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	80
5.30 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	81
5.31 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	81
5.32 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	81
5.33 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	82
5.34 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	82
5.35 วงจรกำลังการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยรวมกันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	83
5.36 สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด 50 W.....	83
5.37 สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} ขนาด 50 W.....	84
5.38 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 50 W.....	84
5.39 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 50 W.....	84
5.40 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 50 W.....	85
5.41 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 50 W.....	85
5.42 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 50 W.....	85
5.43 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 50 W.....	86
5.44 สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด 100 W.....	86
5.45 สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} ขนาด 100 W.....	87
5.46 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	87
5.47 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	87
5.48 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	88
5.49 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	88
5.50 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	88
5.51 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	89
5.52 สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด 150 W.....	89
5.53 สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} ขนาด 150 W.....	90
5.54 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	90
5.55 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	90

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.56	ศึกษาในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	91
5.57	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	91
5.58	ศึกษาในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	91
5.59	สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W.....	92
5.60	ศึกษา V_{PV} , I_{PV} และ P_{PV} ในแต่ละช่วงเวลา.....	94
5.61	ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยทำการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....	94
5.62	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 11:00 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....	95
5.63	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 11:30 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....	95
5.64	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 12:00 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....	95
5.65	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 12:30 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....	96
5.66	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 13:00 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....	96
5.67	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 13:30 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....	96
5.68	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 14:00 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า.....	97
5.69	ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยรวมกันจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้น.....	98
5.70	ศึกษา i_{load} เวลา 11:00 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	98
5.71	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 11:00 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	99
5.72	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 11:30 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	99
5.73	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 12:00 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	99
5.74	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 12:30 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	100
5.75	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 13:00 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	100
5.76	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 13:30 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	100
5.77	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 14:00 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	101
5.78	ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยรวมกันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	102
5.79	ศึกษา i_{load} เวลา 11:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	102
5.80	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 11:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	102
5.81	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 11:30 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	103
5.82	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 12:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	103
5.83	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 12:30 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	103
5.84	ศึกษา v_s , i_s และ i_c เวลา 13:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	104

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.85 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 13:30 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	104
5.56 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 14:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W.....	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีการนำระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานในรูปแบบต่างๆ กันอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้มากขึ้นในอนาคตอันใกล้ เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาดไม่มีสารพิษตกค้างที่อาจจะเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมไม่มีมลภาวะในการแปรรูปพลังงานและที่สำคัญคือเป็นแหล่งพลังงานอันมหาศาลที่ได้เปล่าและมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ ในระบบไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์มีการประยุกต์ใช้สองแบบใหญ่ คือระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยลำพังซึ่งระบบนี้มีข้อดีที่องค์ประกอบและการควบคุมไม่ยุ่งยากแต่จำเป็นต้องมีแบตเตอรี่เก็บพลังงานไว้ใช้ในช่วงเวลากลางคืน ส่วนแบบที่สอง คือระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับการไฟฟ้า ระบบนี้มีการควบคุมที่ซับซ้อนกว่าแบบแรกเพราะการทำงานของระบบนี้ต้องมีเฟสตรงกันกับการไฟฟ้าและจ่ายโหลดร่วมกัน ซึ่งได้มีการทำวิจัยกันมาแล้ว แต่ในงานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้มองถึงระบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นสาเหตุให้เกิดความผิดเพี้ยนของกระแสและทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำลงซึ่งอาจก่อให้เกิดกระแสเกินในตัวเก็บประจุทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์หรืออายุการใช้งานสั้นลงและเกิดการรบกวนต่อระบบสื่อสาร อุปกรณ์ต่างๆ ทำงานผิดพลาดรวมไปถึงการรบกวนการทำงานของระบบข้างเคียงอื่นๆ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาการทำงานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าแบบเดิมและทำการพัฒนาระบบให้สามารถใช้ได้กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังและรวมถึงการศึกษาในส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลทำการประมวลผลทั้งหมดเพื่อเพิ่มความเร็วและความแม่นยำในการทำงานของระบบ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่กล่าวไว้ข้างต้น ระบบไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าแบบเดิมไม่สามารถใช้ได้กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง การแก้ปัญหานี้ทำโดยการเพิ่มหน้าที่การทำงานเป็นแอกทีฟฟิลเตอร์ในการควบคุมการทำงานของระบบส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเข้าใกล้หนึ่งและกรองกระแสฮาร์มอนิก

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 3 หัวข้อใหญ่ๆ คือ

- 1.4.1 การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
- 1.4.2 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวถึงการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับ การไฟฟ้าและหลักการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า
- 1.4.3 แอคทีฟฟิลเตอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการคำนวณหากระแสชดเชยที่ใช้ในการแก้ไขตัว ประกอบกำลังและการกรองกระแสฮาร์มอนิก

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยมี การแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล ในระบบ 1 เฟส 220 V 50 Hz ขนาดพิกัดของระบบ 320 W ซึ่งโหลดที่นำมาทดสอบเป็นวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อใช้ ทดสอบการแก้ไขตัวประกอบกำลังและกรองกระแสฮาร์มอนิก รวมถึงการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไปยัง โหลดและการไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และพื้นฐานของระบบไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณ ดิจิทัล

บทที่ 3 กล่าวถึงการจำลองและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองการทำงานของระบบ

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย และพื้นฐานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกรไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงเซลล์แสงอาทิตย์ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่างๆ และทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการวิเคราะห์คุณภาพรูปคลื่นกระแส ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษา และประเมินประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกรไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

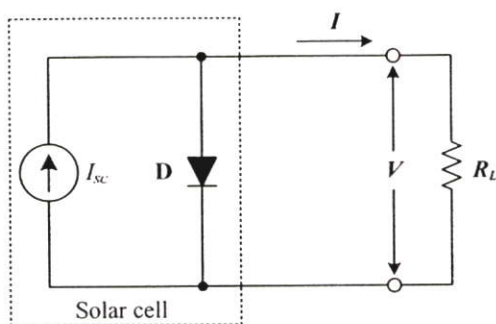
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic phenomenon) การเปลี่ยนแปลงพลังงานด้วยวิธีนี้จะไม่มีส่วนเคลื่อนที่ใดๆ ทำให้มีข้อดีในเรื่องความสะดวกต่อการนำไปใช้งาน มีการบำรุงรักษาที่ง่าย และอายุการใช้งานยาวนาน การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้ายังมีอุปสรรคในเรื่องของราคาเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ได้รับเนื่องจากประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 8-15 % เท่านั้น ดังนั้นการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ตลอดเวลาจึงเป็นสิ่งจำเป็น

2.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตขึ้นมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โครงสร้างวัสดุสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) เหมือนไดโอด ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสขนานกับไดโอดดังรูปที่ 2.1 ซึ่งปริมาณกระแส I_{sc} นี้กำเนิดจากปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิกที่ความเข้มข้นของแสงค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายกระแสที่ ส่วนไดโอดจะแสดงถึงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นค่ากระแสจ่ายออก I จึงสามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างของกระแส I_{sc} ที่กำเนิดจากแสงอาทิตย์กับกระแสของไดโอดดังแสดงในสามการที่ 2.1

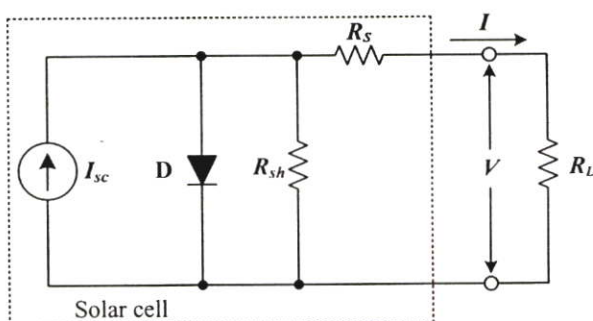
$$I = I_{sc} - I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลในอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์

อย่างไรก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ดังในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีทั้งความต้านทานที่ขนานและความต้านทานที่อนุกรมกับวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ ดังนั้นสมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.2

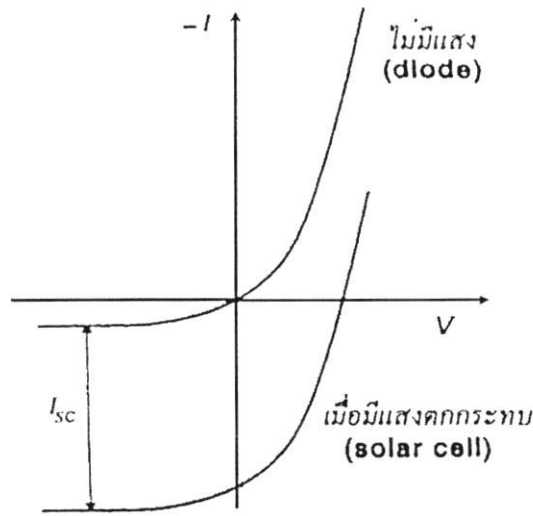
$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_S)}{R_{sh}} \quad (2.2)$$



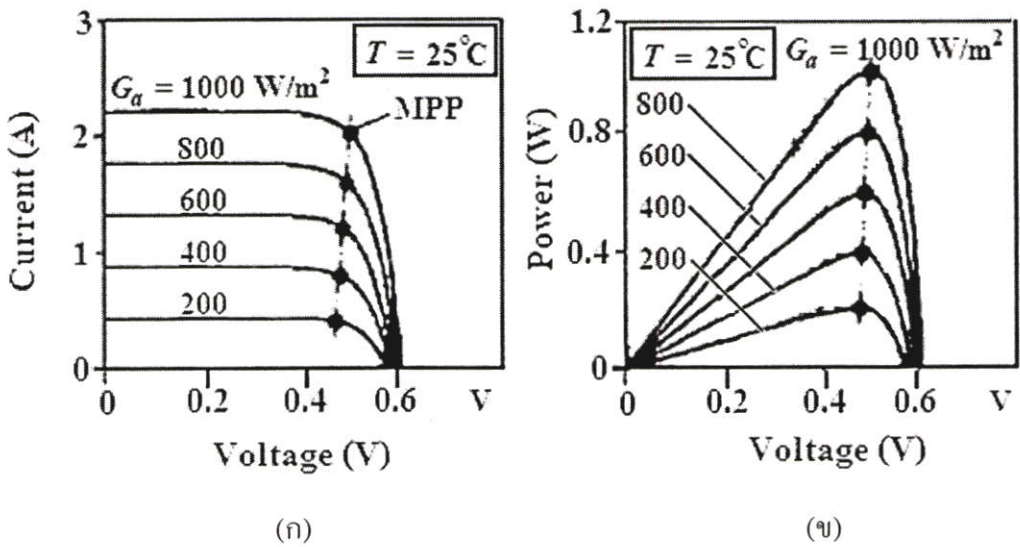
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากสมการที่ 2.2 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันจ่ายออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2.3 ในสถานะที่ไม่มีแสงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีคุณสมบัติเหมือนไดโอด เนื่องจากมีโครงสร้างของวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกันแต่เมื่อให้แสงกับเซลล์แสงอาทิตย์ก็เกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิกขึ้นทำให้เกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้าออกมา เมื่อพิจารณาในสถานะเปิดวงจร กระแสจะไหลเข้าไดโอดทั้งหมดทำให้กระแสจ่ายออกจะมีค่าเป็นศูนย์ ในทางกลับกันถ้าลัดวงจรกระแสจ่ายออกก็จะไหลออกสู่วงจรภายนอกทั้งหมด เมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มของแสงจะเป็นผลให้ค่ากระแส I_{sc} มีค่าเปลี่ยนไปด้วยซึ่งแปรผันตรงกับค่าความเข้มของแสง

ในขณะที่ค่าแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรืออาจกล่าวได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแส



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์



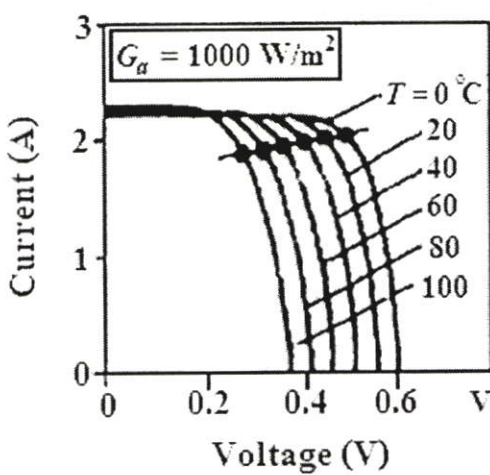
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25°C คงที่ เปลี่ยนแปลงระดับค่าความเข้มแสงที่ต่างๆ

(ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

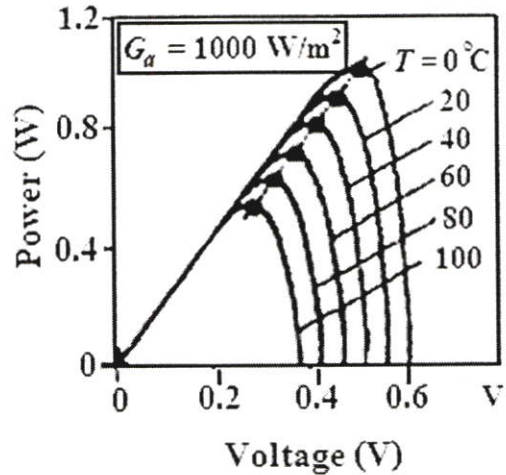
(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า

ความเข้มแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าแสงมีความเข้มแสงต่ำจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ต่ำเช่นเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความเข้มแสงมากก็จะผลิตไฟฟ้าได้มากเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่

2.4 (ก) และ (ข) จากรูปเมื่อปริมาณความเข้มแสงเปลี่ยนไปค่ากระแสสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้จะมีค่าเปลี่ยนตาม ในขณะที่แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลัง พบว่าจุดที่ให้กำลังงานสูงสุดของแต่ละระดับความเข้มแสงไม่ได้อยู่ที่ระดับแรงดันเดียวกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 คงที่ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่างๆ

(ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่ออุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ลดลง จากรูปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ในขณะที่กระแสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.1.2 การหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์[1]

จากรูปที่ 2.4 (ข) แสดงถึงคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเห็นได้ว่าจุดที่ให้กำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม(ความเข้มแสงและอุณหภูมิ) เป็นผลให้การผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่คงที่และมีประสิทธิภาพไม่เท่ากับความสามารถที่ควรจะได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้น ระบบจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการติดตามจุดที่ให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการควบคุมแรงดันตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ให้ตรงกับจุดที่ให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พิจารณาจากจุดกำลังงานสูงสุด เมื่อเพิ่มค่าโหลดขึ้นจะทำให้กระแสจ่ายออกลดลง แต่ในทางกลับกันกำลังงานจ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง และเริ่มลดลง เมื่อมีการเพิ่มค่าโหลดมาก

ขึ้นจนกระทั่งไม่มีกระแสไหลและกำลังงานจ่ายออกมีค่าเป็นศูนย์ จากการพิจารณาสามารถกล่าวได้ว่าเป็นไปตามทฤษฎีการส่งถ่ายกำลังงานสูงสุด (Maximum power Transfer) ซึ่งค่ากำลังงานสูงสุดดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความต้านทานภายในของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของโหลด

ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันของกราฟในรูปที่ 2.4 (ข) ถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน จากคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสัมประสิทธิ์ค่าหนึ่งซึ่งแสดงว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้เรียกว่าค่า "ฟิลแฟกเตอร์" (FF: Fill Factor) ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดต่อพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ในทางอุดมคติ

$$FF = \frac{P_o}{P_m} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.3)$$

เมื่อ FF คือ ค่าฟิลแฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

P_m คือ พลังงานไฟฟ้าสูงสุด

P_o คือ พลังงานไฟฟ้าสูงสุดในทางอุดมคติ

V_m คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด

I_m คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด

V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร

จากสมการที่ (2.3) จะเห็นได้ว่าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าสูงสุดไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟกเตอร์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดม

เทคนิคการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี วิธีแรก Perturbation & Observation Method (P&O) วิธีการนี้จะใช้การตรวจจับค่าแรงดัน และกระแสที่จ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำมาพิจารณาหาจุดให้กำลังงานสูงสุด โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความชันระหว่างกำลังงานไฟฟ้าที่ได้รับเทียบกับค่าแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการที่ 2.4 หรือใช้การเปรียบเทียบค่ากำลังงานไฟฟ้าค่าใหม่ที่ตรวจจับได้กับค่ากำลังงานไฟฟ้าเดิมและควบคุมให้แผงเซลล์

แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่า ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ค่อนข้างง่าย และมีความแม่นยำสูงที่ความความเข้มของแสงสูงๆ แต่ที่ค่าความเข้มของแสงต่ำๆ ความถูกต้องของการหาจุดกำลังงานสูงสุดจะมีค่าลดลงเนื่องจากที่ค่าความเข้มของแสงต่ำค่าความชันหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้ากับค่าแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกจะมีค่าต่ำ

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.4)$$

วิธีที่สองคือ Incremental Conductance Method วิธีการนี้จะตรวจจับค่าแรงดันและกระแส และพิจารณาความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.5 และควบคุมให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานตามความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งวิธีนี้จะมีความยุ่งยากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแรกแต่จะให้ความแม่นยำมากกว่า

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{I}{V} \quad (2.5)$$

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานที่จุดกำลังงานสูงสุดด้วยวิธี Perturbation & Observation Method โดยใช้เทคนิค Hill climbing algorithm แบบควบคุมค่าแรงดันอ้างอิง ซึ่งจะทำการตรวจจับค่ากระแส และแรงดันจ่ายออกเพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังงานที่จ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าเดิมและนำผลที่ได้มาปรับค่าแรงดันอ้างอิงเพื่อใช้ควบคุมค่ากระแสจ่ายออกของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้รับกำลังงานสูงสุด

2.1.3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

วิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์มีมาหลายทศวรรษแล้ว เซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงแรกผลิตขึ้นจากซิลิเนียม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานประมาณ 1-2 % จึงทำให้การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ไม่แพร่หลายมากนัก จนถึงในช่วง พ.ศ. 2493 ได้มีการผลิตซิลิกอนขึ้นได้สำเร็จเป็นครั้งแรกโดยกระบวนการ Czochraki ซึ่งเป็นจุดสำคัญต่อวิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้มีการพัฒนากรรมวิธีการผลิตเรื่อยๆ มาเพื่อลดราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ถูกลง เพิ่มอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานให้สูงขึ้นด้วย ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท

2.1.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Crystalline Solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกที่ใช้งานในปัจจุบันส่วนมากผลิตจากซิลิกอน เนื่องจากได้มีการพัฒนาทั้งด้านราคา อายุการใช้งาน และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานเรื่อยมา ในช่วงแรกเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวจะมีราคาประมาณ 1,000 บาทต่อวัตต์ ในช่วง พ.ศ. 2516 ลดลงเป็นประมาณ 125 บาทต่อวัตต์ ในปี 2534 และได้มีการพัฒนาอายุการใช้งานให้เพิ่มขึ้นเกิน 30 ปีในปัจจุบัน ในด้านประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน ถูกจำกัดด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิกอน คือมีค่าสูงสุดได้ประมาณ 29 % จากเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการค้นคิดพัฒนาในการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ มาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แทนซิลิกอน เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงกว่าซิลิกอน คือ จะมีค่าประมาณ 31 % แต่ยังคงถูกจำกัดโดยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากราคาของสารดังกล่าวยังสูงกว่าซิลิกอน

2.1.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบาง (Thin-Film Solar Cell)

เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นมาเพื่อลดราคาให้ถูกกว่าแบบแรก เนื่องจากในกระบวนการผลิตใช้ปริมาณสารกึ่งตัวนำน้อยกว่าแบบแรก โดยปกติใช้อะมอर्फัสซิลิกอน (a-si) จำนวนเล็กน้อยฉาบลงบนผิวของวัสดุชนิดอื่น แต่จะมีข้อเสียคือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำกว่าแบบแรก มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานประมาณ 12% ในห้องปฏิบัติการ และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในการใช้งานจริงภาคสนามประมาณ 8% ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบางที่ทำจากอะมอर्फัสซิลิกอนมีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 27% เนื่องจากถูกจำกัดโดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอะมอर्फัสซิลิกอน

2.1.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Solar cell)

เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากสารชั้น P บนฐานซิลิกอนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ชนิด N และสร้างชั้น P ชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ลักษณะโครงสร้างจะคล้ายผลึกเดี่ยว เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงกว่า 31 % สามารถใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส นิยกรใช้บนยานอวกาศและเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับดาวเทียมแต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาสูงมาก

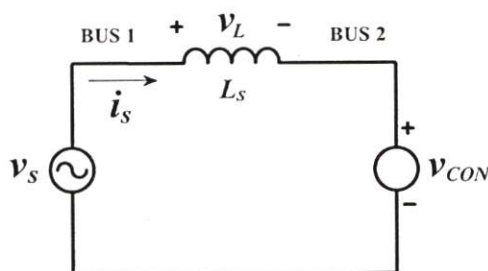
2.1.4 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรติดตั้งให้มีความลาดเอียงเพียงพอเพื่อให้ได้รับแสงมากที่สุดและอีกเหตุผลหนึ่งเพื่อให้เกิดการระบายน้ำฝนได้อย่างรวดเร็วเพื่อใช้ในการชำระล้างสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่บนแผงได้อีกด้วย การเลือกมุมความลาดเอียงและทิศทางของแผงที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานที่ สำหรับประเทศไทยค่าที่ดีที่สุดคือ 15 องศา โดย

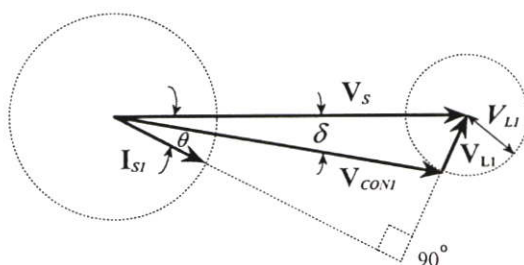
หันหน้าไปทางทิศได้ อีกวิธีหนึ่งที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ การปรับแผงให้เอียงตามการโคจรของดวงอาทิตย์ แต่วิธีนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากดังนั้นในทางปฏิบัติจึงติดตั้งแผงเซลล์ให้มีความลาดเอียงที่ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น

2.2 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า[2]

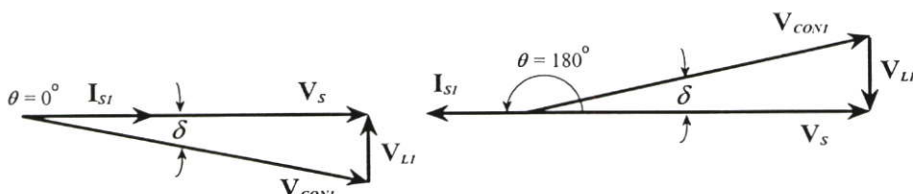
การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 และบัส 2 สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า V_S และ V_{CON} และสามารถเขียนเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.7 (ก), (ข) และ (ค)



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 และบัส 2



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 2.7 (ก) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

(ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรมโหมคเร็คติไฟเออร์

(ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรมโหมคอินเวอร์เตอร์

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.7 (ก) สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ที่จ่ายจากแหล่งจ่าย V_s ไปยังคอนเวอร์เตอร์ V_{con} หรือจากบัส 1 ไปยังบัส 2 ได้ดังนี้ จากรูปที่ 2.6 พิจารณาตามกฎ KVL จะได้ว่า

$$v_s = v_{con} + v_L \quad (2.6)$$

$$v_L = L_S \frac{di_s}{dt} \quad (2.7)$$

สมมุติให้ v_s เป็นรูปไซน์และเป็นองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐานของ v_{con} และ i_s ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถเขียนในรูปเฟสเซอร์ V_{con1} และ I_{s1} กำหนดให้ V_s เป็นเฟสเซอร์อ้างอิง จะได้ว่า

$$V_s = V_{con1} + V_{L1} \quad (2.8)$$

$$V_{L1} = j\omega L_S I_{s1} \quad (2.9)$$

$$P = V_s I_{s1} \cos \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_S} \left(\frac{V_{con1}}{V_s} \sin \delta \right) \quad (2.10)$$

จากรูปที่ 2.7 (ก)

$$V_{L1} \cos \theta = \omega L_S I_{s1} \cos \theta = V_{con1} \sin \delta \quad (2.11)$$

$$Q = V_s I_{s1} \sin \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_S} \left(1 - \frac{V_{con1}}{V_s} \cos \delta \right) \quad (2.12)$$

จากรูปที่ 2.7 (ก)

$$V_s - \omega L_S I_{s1} \sin \theta = V_{con1} \cos \delta \quad (2.13)$$

และ

$$I_{s1} = \frac{V_s - V_{con1}}{j\omega L_S} \quad (2.14)$$

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.7 (ค) สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าและกระแสที่ไหลจากคอนเวอร์เตอร์ V_{con} ไปยังแหล่งจ่าย V_s หรือจากบัส 2 ไปยังบัส 1 ได้ดังนี้

$$P_{21} = -P_{12} \quad (2.15)$$

และ

$$I_{S1} = \frac{V_{CON1} - V_S}{j\omega L_S} \quad (2.16)$$

การควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมได้จากมุม δ และการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ทั้งในโหมดเรกติไฟเออร์และในโหมดอินเวอร์เตอร์ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในโหมดอินเวอร์เตอร์ โดยการกำหนดเวกเตอร์ของกระแส I_{S1} ให้ทำมุม 180° และซิงโครไนส์กับแหล่งจ่าย V_S ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากคอนเวอร์เตอร์ V_{CON} ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแรงดันได้ดังนี้

$$V_{CON1} = \sqrt{V_S^2 + (\omega L_S I_{S1})^2} \quad (2.17)$$

ในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงทำให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อยลง ดังนั้นจากสมการที่ 2.17 สามารถเขียนใหม่ได้ว่า $V_{CON1} \approx V_S$ โดยที่แรงดันไฟตรงทางด้านอินพุตของคอนเวอร์เตอร์ควรมีค่าตามสมการที่ 2.18

$$V_{dc} > \sqrt{2}V_S \quad (2.18)$$

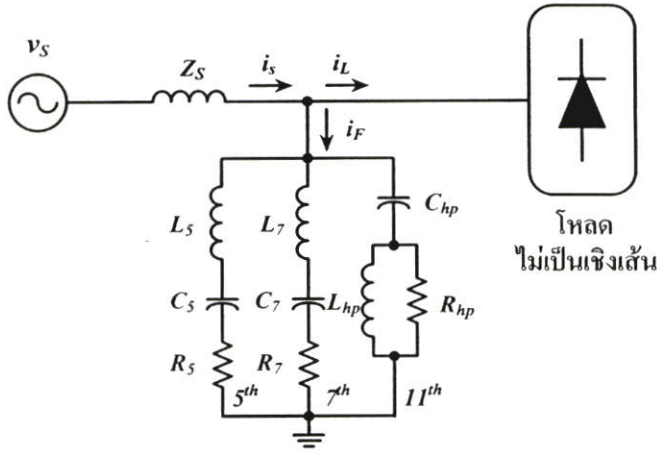
2.3 การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการวิเคราะห์คุณภาพรูปคลื่นกระแส[3]

สาเหตุหลักของกระแสฮาร์มอนิกเกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสร้างปัญหาโดยการเข้าไปรบกวนการทำงานอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบ เช่น อาจก่อให้เกิดกระแสเกินในตัวเก็บประจุทำให้เกิดการเสียหายหรืออายุการใช้งานสั้นลง สำหรับแนวทางการแก้ปัญหาคือการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกอาศัยหลักการวงจรกรองกำลังทั้งแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟ ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน

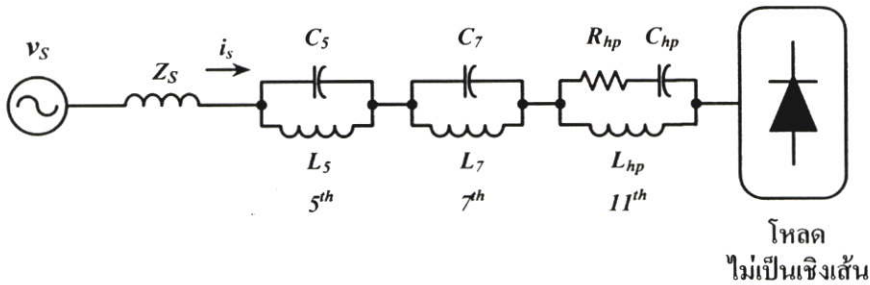
2.3.1 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ

วงจรกำลังพาสซีฟประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ, ตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน ลักษณะของวงจรกรองกำลังพาสซีฟจะเป็นวงจรที่แสดงคุณสมบัติค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่กระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ โดยจะนำไปต่อในลักษณะขนานหรืออนุกรมกับวงจรที่มีโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านที่วงจรกรองกำลังพาสซีฟและไม่ให้ไหลไปยังแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งจำเป็นต้องต้องคำนวณค่าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่แน่นอนเพื่อทำหน้าที่กำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับนั้นๆ วงจรกรองกำลังพาสซีฟจะประพอดิตัวเป็นค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกรณีเป็น

แบบขนานและในกรณีที่ต่อแบบอนุกรมจะประพจน์ตัวเป็นค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกลดลงแสดงดังรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 เป็นวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานและอนุกรมต่อกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น ตามอันดับ



รูปที่ 2.8 วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบต่อขนานกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.9 วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบต่ออนุกรมกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น

2.3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟ คือ วงจรที่ทำหน้าที่ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก โดยทำการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังงาน (Power Converter) ทำการจ่ายกระแสเข้าสู่ระบบอย่างเหมาะสม โดยทั่วไปวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีส่วนประกอบหลัก คือ

1. ส่วนตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ส่วนนี้จะทำหน้าที่ตรวจจับกระแสหรือแรงดันของระบบแล้วนำมาหาค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกในระบบโดยอาศัยวิธีการต่างๆ
2. ส่วนควบคุมค่ากระแสฮาร์มอนิกที่คำนวณได้จากส่วนการตรวจจับ โดยส่วนนี้ใช้ในการกำหนดค่ากระแสของวงจรกรองกำลัง ซึ่งจ่ายกระแสเข้าสู่ระบบเพื่อทำการกำจัดฮาร์มอนิกตามที่ต้องการ

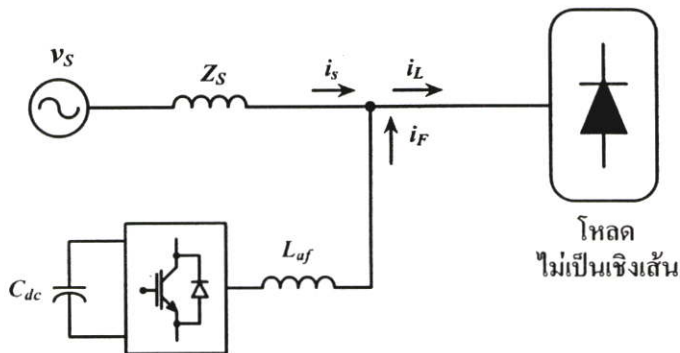
3. คอนเวอร์เตอร์กำลังเป็นส่วนที่ทำการควบคุมกระแสของวงจรรองให้มีค่าเป็นไปตามส่วนควบคุมกำหนด ในส่วนนี้คือวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงให้เป็นแรงดันไฟสลับ ซึ่งใช้เทคนิคของการปรับความกว้างพัลส์จากการควบคุมกระแส

4. วงจรเชื่อมต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่าย เนื่องจากวงจรรองกำลังแอกทีฟจะมีการเชื่อมต่อกันระหว่างแหล่งจ่ายผ่านตัวเหนี่ยวนำและวงจรรองระลอกคลื่นความถี่การสวิตช์ในกรณีที่ใช้กับระดับแรงดันสูงก็อาจมีการต่อผ่านหม้อแปลงหรือตัวเก็บประจุเพื่อลดขนาดแรงดันที่ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

วงจรกำลังแอกทีฟมีความยืดหยุ่นในการทำงานมากกว่าวงจรกำลังพาสซีฟและมีย่านการใช้งานที่กว้างกว่า ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแยกประเภทของวงจรกำลังแอกทีฟได้ 2 ประเภท คือ

2.3.2.1 วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ลักษณะการต่อวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแสดงได้ดังรูป 2.10 โดยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานประพุดิตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ วงจรรองกำลังแอกทีฟจะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกให้กับโหลดแทนแหล่งจ่าย

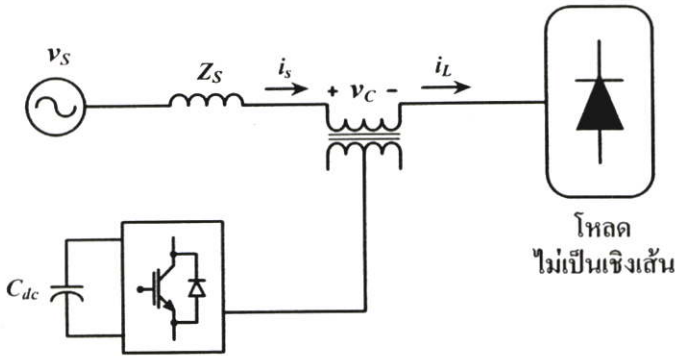


รูปที่ 2.10 วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบต่อขนานกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น

2.3.2.2 วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมมีลักษณะคล้ายกับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานต่างกันตรงที่จุดต่อร่วม คือ วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะต่อกับจุดต่อร่วมโดยตรง แต่วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะต่อกับจุดต่อร่วมผ่านทางหม้อแปลง โดยจุดต่อร่วมจะอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 2.11 วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมใช้เพื่อกำจัดสัญญาณแรงดันฮาร์มอนิก, รักษาสมมูลและคงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของด้านโหลดหรือด้านแหล่งจ่าย วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมนี้ทำการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

ที่ไหลในระบบแล้วนำไปสร้างแรงดันของวงจรกรองที่มีเฟสตรงกันกับกระแสฮาร์มอนิก ส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกถูกกั้นไม่ให้ไหลยังแหล่งจ่ายได้ ในทางกลับกันกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายก็ไม่สามารถไหลไปทางด้านโหลดเช่นกันซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาในกรณีที่แหล่งจ่ายมีความผิดเพี้ยนของแรงดันและ โหลดมีอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่ำ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจึงทำหน้าที่เป็นตัวแยกฮาร์มอนิกระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด สำหรับข้อดีและข้อเสียของวงจรกรองแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.11 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมกับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบวงจรกรองกำลังพาสซีฟและวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

คุณสมบัติ	วงจรกรองกำลังพาสซีฟ	วงจรกรองกำลังแอกทีฟ
การกำจัดฮาร์มอนิก	แยกกำจัดแต่ละอันดับฮาร์มอนิกได้แต่ต้องติดตั้งวงจรกรองเรียงอันดับต่ำเสมอเพื่อป้องกันการเกิดรีโซแนนซ์	แยกกำจัดอันดับฮาร์มอนิกใดๆก็ได้หรือจะกำจัดหมดก็ได้
ความสามารถในการกำจัดฮาร์มอนิก	ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายออกแบบให้ค่า Q สูงยาก	ไม่ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย
ความเปลี่ยนแปลงของความถี่แหล่งจ่าย	คุณสมบัติการกรองลดลง โดยเฉพาะเมื่อค่า Q สูง	คุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง
ปัญหาเรโซแนนซ์กับอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย	อาจเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานเมื่อมองจากโหลดหรือ เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมเมื่อมองจากแหล่งจ่ายทำให้เกิดกระแสและแรงดันเกินในวงจร	มีโอกาสเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานเมื่อมองจากโหลดได้น้อยกว่า
ปริมาณกำลังงานรีแอกทีฟ	จ่ายกำลังงานรีแอกทีฟเสมอ ซึ่งอาจเกินความต้องการ	สามารถเลือกให้จ่ายกำลังงานรีแอกทีฟหรือไม่จ่ายก็ได้

ตารางที่ 2.1(ต่อ)

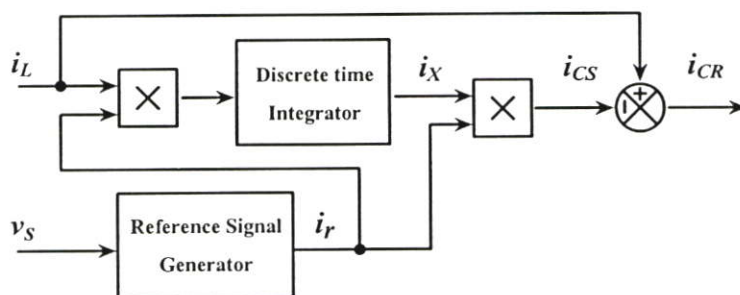
คุณสมบัติ	วงจรรองกำลังพาสซีฟ	วงจรรองกำลังแอคทีฟ
การวิเคราะห์ อิมพีแดนซ์ของระบบ	ต้องวิเคราะห์อย่างละเอียด	ในกรณีทั่วไปไม่จำเป็น
การออกแบบ	ต้องออกแบบเป็นกรณีๆไป	ในกรณีทั่วไปใช้ได้ไม่ต้อง ออกแบบ
ขนาด	ใหญ่	เล็กกว่า
ราคา	ถูกกว่า	แพงกว่า

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบวงจรรองกำลังแอคทีฟแบบขนานและอนุกรม

คุณสมบัติ	วงจรรองกำลังแอคทีฟ แบบขนาน	วงจรรองกำลังแอคทีฟ แบบอนุกรม
	ขนาดกระแส/แรงดัน	แก้ได้ดีเฉพาะกรณีที่โหลดมี อิมพีแดนซ์สูงเทียบกับแหล่งจ่าย
แรงดันแหล่งจ่ายมีฮาร์ โมนิก	แก้ไม่ได้	แก้ได้
ความน่าเชื่อถือ	สูงเพราะต่อขนานกับระบบ เหมือนโหลดทั่วไป	ต่ำเพราะต้องต่ออนุกรมกับ ระบบ
หลักการทำงาน	ทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแส	ทำตัวเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

2.3.3 วิธีการคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกอย่างง่าย[4]

จากรูปที่ 2.12 แสดงวิธีการคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกอย่างง่ายเพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการทำหน้าที่เป็นแอคทีฟฟิลเตอร์เพื่อแก้ตัวประกอบกำลังให้กับระบบของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น พิจารณาที่แรงดัน V_s มีรูปร่างเป็นไซน์



รูปที่ 2.12 วิธีการคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกอย่างง่าย

$$v_s(t) = V_p \sin(\omega t) \quad (2.19)$$

กระแสไหลคไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (8)

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (8) นำมาพิจารณาด้วยวิธี FFT สามารถแยกได้ว่า

$$i_L(t) = I_1 \sin(n\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (2.21)$$

สมมุติสัญญาณไซน์อ้างอิงมีค่าเท่ากับ

$$i_r(t) = \sin(\omega t) \quad (2.22)$$

ขนาดส่วนจริงของกระแสไหลคหาได้จาก

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) \cdot i_r(t) dt \\ &= I_1 \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (2.23)$$

ดังนั้นส่วนจริงของกระแสไหลคที่ความถี่มูลฐานได้มาจากผลคูณของ I_x กับ $i_r(t)$ สามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} i_{CS}(t) &= I_x i_r(t) \\ &= I_1 \cos \theta \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (12) สามารถคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกได้ดังนี้

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

$$i_{CR}(t) = \sum I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - I_1 \cos\theta_1 \sin(\omega t) \quad (2.25)$$

2.3.4 การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณ[5]

การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณกระแสอินพุตทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้อาศัยทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณที่ไม่เป็นรูปไซน์ (nonsinusoidal periodic) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13 ตามทฤษฎีสามารถอธิบายได้ดังนี้

ฟังก์ชันคาบ $f(t)$ ทั่วไป สามารถเขียนในรูปอนุกรมได้ดังสมการที่ 2.26

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (2.27)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2.28)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.18) ถึง (2.20) นิพจน์ a_0 คือ ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่น ส่วนนิพจน์ a_n และ b_n คือค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบไซน์และโคไซน์ตามลำดับ ซึ่งสามารถรวมสมการทางคณิตศาสตร์ได้อีกรูปแบบหนึ่งดังสมการที่ (2.30)

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

เมื่อ

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{และ} \quad \theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{-b_n}{a_n} \right) \quad (2.31)$$

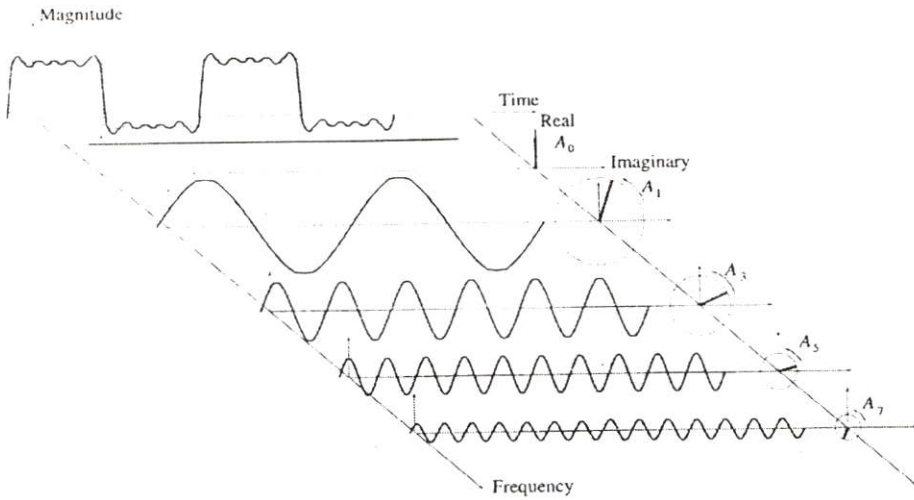
หรือ

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega_0 t) + \theta_n \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{และ} \quad \theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.30) ถึง (2.33) สามารถนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของฮาร์มอนิกของสัญญาณรูปคลื่นกระแสนินพุตทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าได้ ซึ่งใช้วิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพของกระแสในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2.13 องค์ประกอบของฮาร์มอนิกของสัญญาณที่ไม่เป็นรูปไซน์

2.3.5 การประเมินสมรรถนะของวงจรกำลังแอกทีฟด้วยค่าดัชนีคุณภาพ

ดัชนีคุณภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทำการประเมินสัญญาณกระแสนินพุตทางด้านแหล่งจ่ายและเป็นตัวบ่งชี้ถึงสมรรถนะของวงจรการในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกประกอบด้วย

2.3.5.1 แรงดันและกระแสมูลฐานอาร์เอ็มเอส

ค่าอาร์เอ็มเอสขององค์ประกอบความถี่มูลฐานของแรงดัน (V_{rms}) และกระแส (I_{rms}) เป็นค่าระดับแรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอสที่มีความถี่มูลฐาน ซึ่งเป็นความถี่ของระบบส่งจ่าย องค์ประกอบนี้เป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังไฟฟ้าและเป็นองค์ประกอบที่ต้องการใช้งาน

2.3.5.2 แรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอส

ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน (V_{rms}) และกระแส (I_{rms}) อินพุตเป็นค่าระดับแรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอสของสัญญาณอินพุต ซึ่งเป็นค่ารวมขององค์ประกอบทุกๆ ความถี่ของสัญญาณ

2.3.5.3 ค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้า (Input Power Factor: PF)

ลักษณะรูปสัญญาณและมุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันเป็นตัวกำหนดค่าตัวประกอบกำลังของระบบ ซึ่งค่าตัวประกอบกำลังของระบบเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบ กล่าวคือ ถ้าคิดที่กำลังไฟฟ้า (Watt) เดียวกันระบบที่มีค่า PF สูงส่งผลให้กระแสไหลในระบบน้อย

กว่าระบบที่มีค่า PF ต่ำ ดังนั้นระบบที่มีค่า PF สูงสามารถลดพิດกักระแสของอุปกรณ์ที่ต่อรวมในระบบลงได้ โดยยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่าเดิม

2.3.5.4 ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยน (Distortion Factor: DF)

สำหรับค่า DF ที่นิยามในวิทยานิพนธ์นี้เป็นค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยน ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของกระแสอินพุตอาร์เอ็มเอสที่ความถี่มูลฐานต่อกระแสอาร์เอ็มเอสที่รวมผลของฮาร์โมนิก โดยอัตราส่วนจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 นั้นหมายถึงสัญญาณนั้น ไม่มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ส่วนกรณีที่ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยนมีค่าต่ำๆ แสดงว่าเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณไปจากรูปสัญญาณไซน์มาก

2.3.5.5 ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยนรวมของฮาร์โมนิก (Total Harmonic Distortion: THD)

ค่า Total Harmonic Distortion ของกระแส (THD) เป็นดัชนีที่ใช้ในการบ่งชี้ถึงความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณอินพุตทางด้านแหล่งจ่ายที่แตกต่างไปจากองค์ประกอบกระแสความถี่มูลฐาน ในการหาค่า THD_i อาศัยการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์เพื่อทำการหาองค์ประกอบความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกของรูปคลื่นสัญญาณกระแสอินพุตทางด้านแหล่งจ่ายสามารถนำไปเข้าสู่ตรและหาค่าออกมาได้โดยค่าดัชนีคุณภาพทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 นิยามดัชนีและปริมาณที่กำหนดคุณสมบัติและคุณภาพรูปสัญญาณกระแสอินพุต

V_{1rms}	V_{rms}	I_{1rms}	I_{rms}	PF	DF	%THD _i
$\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$	$\frac{I_{peak}}{\sqrt{2}}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$	$\frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \cos \phi$	$\frac{I_{1rms}}{I_{rms}}$	$\frac{100}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$

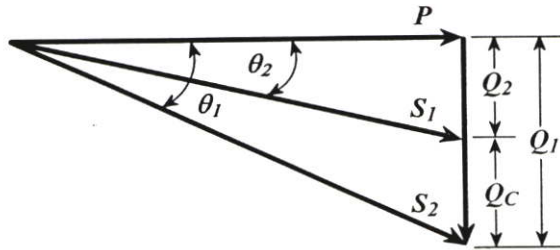
2.4 การชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ

เนื่องจากโหลดในระบบจำหน่ายส่วนใหญ่มีตัวประกอบกำลังล่าหลัง (Lagging) ส่งผลให้กระแสโหลดมีค่ามากกว่าที่ต้องการของกำลังไฟฟ้าจริงจากแหล่งจ่าย นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้นที่ใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ส่วนประกอบอื่นของกระแสโหลดเป็นส่วนที่สูญเปล่า ซึ่งส่งผลเสียต่อระบบเช่น ขนาดสายใหญ่ขึ้น โดยไม่จำเป็นและก่อให้เกิดความสูญเสียใน

รูปพลังงานความร้อนที่สายอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จำเป็นต้องคิดอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพิ่มเติมจากการจ่ายไฟของการไฟฟ้าเพื่อแก้ไขปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น

2.4.1 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

โดยทั่วไปการปรับปรุงตัวประกอบกำลังนิยมใช้ตัวเก็บประจุ เพราะมีราคาค่อนข้างถูกไม่ต้องบำรุงรักษามากนักและมีกำลังสูญเสียในตัวเองต่ำ โดยทำการควบคุมให้ตัวเก็บประจุจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟใกล้เคียงกับที่โหลดต้องการจนทำให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งแต่อาจเกิดปัญหาเมื่อใช้กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดการเพิ่มของกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบจำหน่ายจนเกินพิกัดของโหลดต่างๆ ที่ต่อร่วมกัน ส่งผลทำให้โหลดต่างๆ ได้รับความเสียหาย ดังนั้นจึงออกแบบตัวกรองกำลังรีแอกทีฟและจำกัดกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลเข้าระบบจำหน่ายให้เหมาะสมกับระบบนั้นๆ



รูปที่ 2.14 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.14 สามเหลี่ยมกำลังโหลดประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟารีแอกทีฟล้าหลัง (Q) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) จากความสัมพันธ์สามารถหาค่าตัวประกอบกำลังได้ดังสมการที่ (2.34)

$$\cos \theta_1 = \frac{P}{S_1} \quad (2.34)$$

เมื่อต่อตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกขนานกับโหลดทำให้ค่าตัวประกอบกำลังถูกปรับปรุงเปลี่ยนจาก $\cos \theta_1$ เป็น $\cos \theta_2$

$$\cos \theta_2 = \frac{P}{S_2} \quad (2.35)$$

จากรูปที่ 2.14 แสดงถึงกำลังไฟฟ้าปรากฏและกำลังไฟฟารีแอกทีฟมีค่าลดลงจาก S_1 เป็น S_2 และเปลี่ยนจาก Q_1 เป็น Q_2 (โดยการจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟของ Q_c) ตามลำดับ ซึ่งทำให้กระแสรวมทั้งหมดลดลงส่งผลให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีคุณภาพและประสิทธิภาพดีขึ้น

2.4.2 ประโยชน์จากการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

1. หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถรับโหลดได้เพิ่มขึ้น เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้มีค่าสูงขึ้นทำให้กระแสของระบบลดลงนั่นคือกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดรวมลดลงทำให้ระบบสามารถจ่ายโหลดได้มากขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่เพิ่มขึ้นตามสมการที่ (2.36)

$$kVA = kW \times \left(\frac{1}{\cos\theta_1} - \frac{1}{\cos\theta_2} \right) \quad (2.36)$$

2. ปรับปรุงระดับแรงดันของระบบจำหน่ายให้ดีขึ้นและลดแรงดันตกคร่อมในสายส่งหม้อแปลง

3. กำลังสูญเสียของระบบลดลง เนื่องจากกำลังสูญเสียในสายตัวนำไฟฟ้าของระบบเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของกระแส เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นจึงทำให้กระแสลดลง ดังนั้นกำลังสูญเสียจึงเป็นสัดส่วนกับค่าตัวประกอบกำลังกำลังสอง

$$\%P_{loss} = \left| \frac{PF_1}{PF_2} \right|^2 \times 100\% \quad (2.37)$$

$$\% \Delta P_{loss} = \left(1 - \left| \frac{PF_1}{PF_2} \right|^2 \right) \times 100\% \quad (2.38)$$

$$P_{loss2} = P_{loss1} \times \left(1 - \left| \frac{PF_1}{PF_2} \right|^2 \right) \quad (2.39)$$

เมื่อ PF_1 คือ ค่าตัวประกอบกำลังก่อนทำการปรับปรุง

PF_2 คือ ค่าตัวประกอบกำลังหลังทำการปรับปรุง

P_{loss1} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนทำการปรับปรุง

P_{loss2} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียหลังทำการปรับปรุง

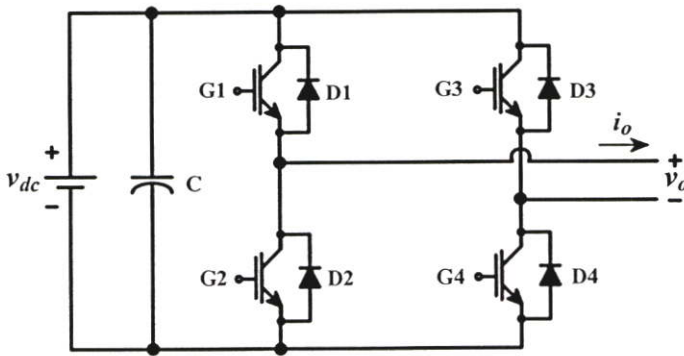
ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส กำลังสูญเสียในสาย = I^2R ดังนั้นเมื่อกระแสลดลงทำให้กำลังสูญเสียในสายลดลงด้วยเช่นกัน

4. กำลังสูญเสียในหม้อแปลงลดลง ซึ่งกำลังสูญเสียในหม้อแปลงประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังสูญเสียในขดลวด โดยที่กำลังสูญเสียในขดลวดนี้แปรผันตามกระแสกำลังสอง เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นแล้วกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงจะลดลงทำให้กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดลดลง

5. ลดขนาดสายส่งกำลังและสายของหม้อแปลงให้มีขนาดเล็กลง
6. ไม่ต้องเสียค่าปรับให้การไฟฟ้า

2.5 อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส

อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ในการเชื่อมต่อการไฟฟ้า จากรูปที่ 2.19 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยการควบคุมสวิตช์ทั้ง 4 ตัว เพื่อกำหนดทิศทางของกระแสที่ไหลไปยังโหลด โดยวิธีการควบคุมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น เทคนิค PWM แบบต่างๆ และการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้และจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.15 อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบฟูลบริดจ์

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อการไฟฟ้าสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงออกมา ดังนั้นการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบการไฟฟ้าเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั่วไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า โดยทั่วไปจะแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของวงจรเป็น 2 แบบ คือ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อการไฟฟ้าแบบขั้วเดียวและอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้ว

อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อการไฟฟ้าสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีข้อแตกต่างทางโครงสร้าง เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไปที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแต่มีข้อแตกต่างในด้านหน้าที่การ

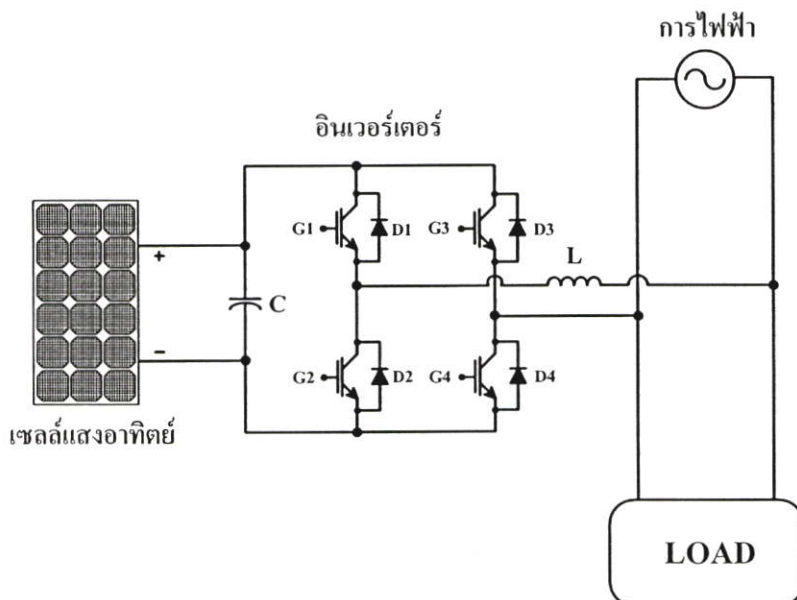
ทำงานซึ่งนอกจากทำหน้าที่เปลี่ยนรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะของรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นไซน์เท่านั้น แต่ต้องทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่จ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้รับกำลังงานสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการควบคุมประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกทางหนึ่งด้วย อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญของอินเวอร์เตอร์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่แตกต่างจากอินเวอร์เตอร์ทั่วไปคือ ค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์ค่าสูญเสียนี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ส่วนที่ 2 เป็นการสูญเสียเนื่องจากรูปคลื่นของกระแสที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกมามีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์หรือมีค่าฮาร์มอนิกมากกว่าที่มาตรฐาน

2.5.2 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว (Single state inverter)

บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียวและโครงสร้างระบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 และ 2.21 ตามลำดับ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดี่ยวนี้อำนาจที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยไม่มีการจัดการพลังงานที่ด้านไฟฟ้ากระแสตรงก่อนหรือไม่มีวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุด อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียวนี้มีข้อดีตรงที่ค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์มีค่าต่ำ เพราะมีจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ที่ทำงานที่ความถี่สูงน้อย แต่มีข้อเสียในส่วนการควบคุมที่ยุ่งยากเนื่องจากอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว นอกจากทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์แล้วยังต้องทำหน้าที่ควบคุมการทำงานให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุดอีกด้วยและอีกเหตุผลที่สำคัญคือ ค่าแรงดันที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมีค่าสูงมากพอที่ทำให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสออกสู่ระบบการไฟฟ้า



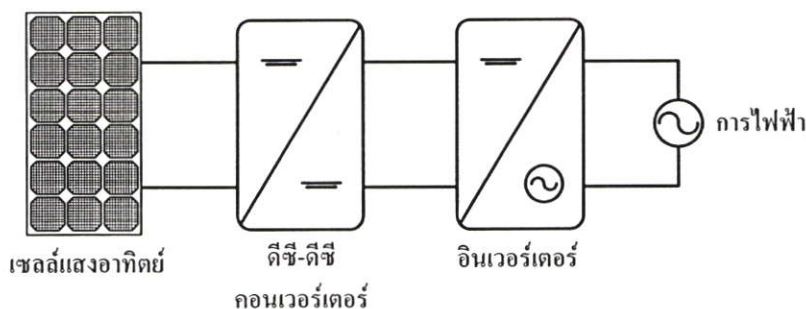
รูปที่ 2.16 บล็อก ไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว



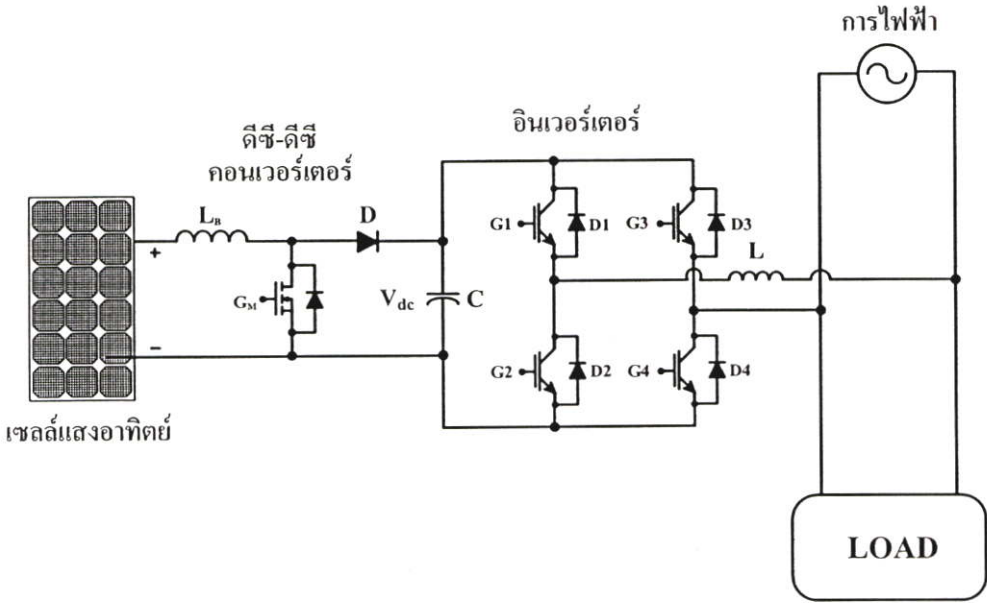
รูปที่ 2.17 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว

2.6.3 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น (Two state inverter)[7]

บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้นและโครงสร้างระบบแสดงดังรูปที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ อินเวอร์เตอร์แบบนี้จะประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ดีซี-ดีซีบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุดและปรับระดับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ ส่วนอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นการจัดการพลังงาน 2 ครั้งทำให้ค่าสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตซ์จึงสูงกว่าแบบแรก เนื่องจากจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สวิตซ์ทำงานที่ความถี่สูงมากกว่าขั้นเดียว แต่มีข้อดีในส่วนการควบคุมที่ทำได้ง่ายกว่า เนื่องจากแยกหน้าที่ในการทำงานกันอย่างชัดเจนระหว่างการควบคุมกำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้า



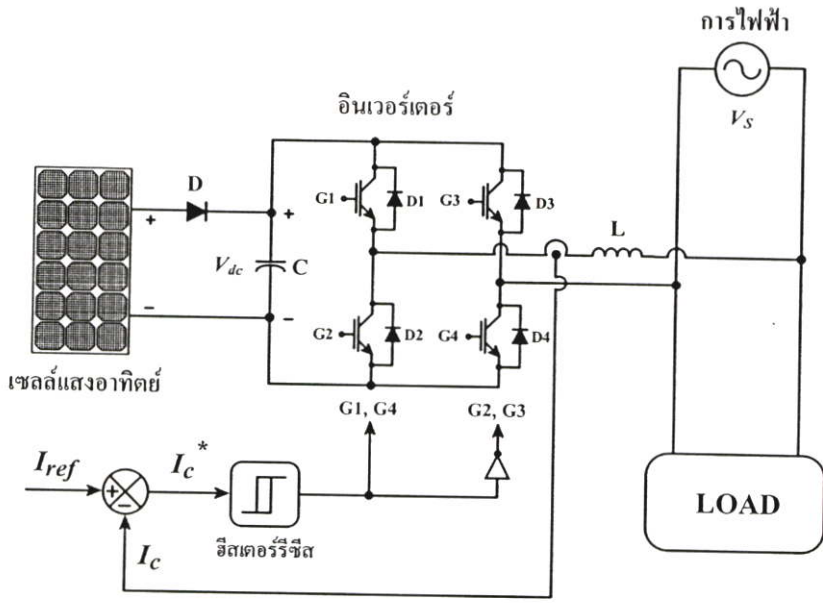
รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น



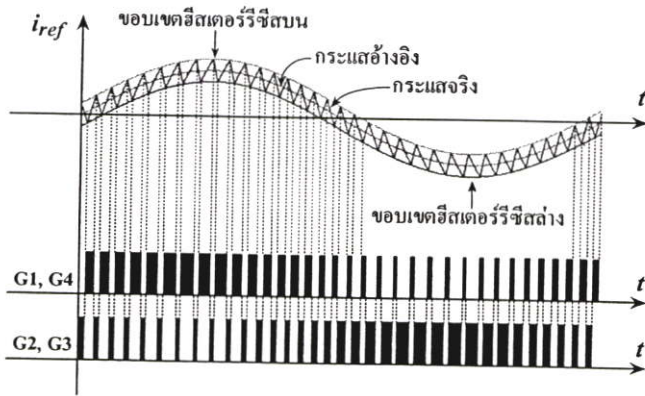
รูปที่ 2.19 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้ว

2.6 การควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีชีส[8]

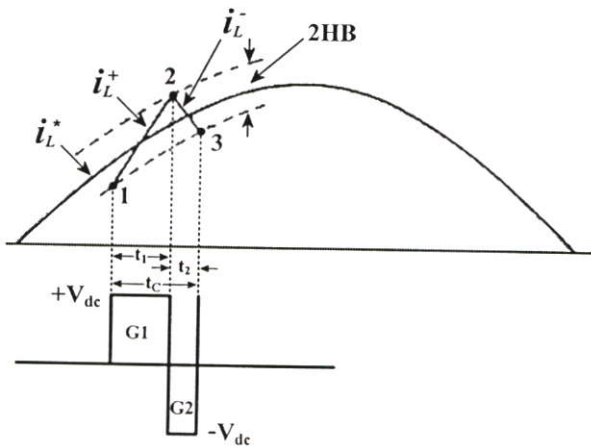
การควบคุมด้วยเทคนิคการติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีชีสนั้นมีหลักการคือ นำกระแสอ้างอิงมาสร้างขอบเขตฮิสเตอร์รีชีสบนด้วยการบวกความกว้างฮิสเตอร์รีชีสกับกระแสอ้างอิงและสร้างขอบเขตฮิสเตอร์รีชีสล่างด้วยการนำกระแสอ้างอิงลบความกว้างฮิสเตอร์รีชีส สมมุติกระแสอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ จากนั้นนำกระแสจริงมาเปรียบเทียบกับขอบเขตฮิสเตอร์รีชีสล่าง ถ้าเท่ากัน(กระแสจริงชนขอบเขตฮิสเตอร์รีชีสล่าง) สัญญาณสวิทช์ G1, G4 ต้องเปลี่ยนสถานะเป็น 1 (ON) แต่ถ้าไม่เท่ากัน ทำการเปรียบเทียบกระแสจริงกับขอบเขตฮิสเตอร์รีชีสบน ถ้าเท่ากัน(กระแสจริงชนขอบเขตฮิสเตอร์รีชีสบน) สัญญาณสวิทช์ G1, G4 ต้องเปลี่ยนสถานะเป็น 0 (OFF) แต่ถ้าไม่ใช่ทั้งสองกรณี (กระแสจริงอยู่ในขอบเขตฮิสเตอร์รีชีส) ให้คงสถานะสัญญาณสวิทช์ G1, G4 ไว้ จากกระบวนการดังกล่าวจะได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่นำไปควบคุม IGBT ทั้ง 4 ตัว รูปที่ 2.20 และ 2.21 แสดงบล็อกไดอะแกรมและรูปสัญญาณกระแสจริงในการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีชีสตามลำดับ



รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสอีตเตอร์รีซีต



รูปที่ 2.21 สัญญาณกระแสอ้างอิงและสัญญาณสวิทช์



รูปที่ 2.22 สัญญาณกระแสจริงภายใต้ขอบเขตอีตเตอร์รีซีต

การวิเคราะห์หลักการควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซีสนั้นมีการทำงานอยู่ 2 สถานะ คือ เมื่อกระแสจริงไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_L เดินทางจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 โดยกระแสจริงเคลื่อนที่จากขอบเขตล่างไปยังขอบเขตบนส่งผลให้ความชันของกระแสจริงเพิ่มขึ้นและจากจุดที่ 2 ไปยังจุดที่ 3 กระแสจริงเคลื่อนที่จากขอบเขตบนมายังขอบเขตล่างส่งผลให้ความชันของกระแสจริงลดลง ดังนั้นในการวิเคราะห์จากรูปที่ 2.22 สามารถเขียนสมการที่เกิดจากการสวิตช์ที่เวลา t_1 และ t_2

เมื่อ G1 นำกระแส (turn on) และ G2 ไม่นำกระแส (turn off) ที่เวลา t_1

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

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

$$L \frac{di_L^+}{dt} = V_{dc} - v_S \quad (2.41)$$

เมื่อ G2 นำกระแส (turn on) และ G1 ไม่นำกระแส (turn off) ที่เวลา t_2

$$L \frac{di_L^-}{dt} = -V_{dc} + v_S \quad (2.42)$$

เมื่อนำ $t_1 + t_2$ จะได้ว่า

$$\frac{di_L^+}{dt} + \frac{di_L^-}{dt} = 0 \quad (2.43)$$

จากรูปที่ 2.21 พบว่าที่เวลา t ใดๆ ค่าความชันของกระแสกระแสอ้างอิง (i_L^*) นั้นมีค่าน้อยมาก โดยมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเปรียบเทียบกับความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ซึ่งมีค่าความชันมากกว่าและจากหลักการตรีโกณมิติในรูปที่ 2.22 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{di_L^+}{dt} t_1 - \frac{di_L^*}{dt} t_1 = 2HB \quad (2.44)$$

$$\frac{di_L^-}{dt} t_2 - \frac{di_L^*}{dt} t_2 = -2HB \quad (2.45)$$

$$t_2 + t_1 = T_C = \frac{1}{f_C} \quad (2.46)$$

เมื่อ t_1 และ t_2 คือ เวลาในการสวิตช์ของไอจีบีที และ f_c คือ ความถี่สวิตช์จิ่ง และ เมื่อนำสมการที่ (2.44) และ (2.45) มาบวกกันแล้วแทนในสมการที่ (2.46) จะได้ดังสมการที่ (2.47) และสมการที่ (2.48)

$$t_1 \frac{di_L^+}{dt} + t_2 \frac{di_L^-}{dt} - \frac{di_L^*}{dt} (t_1 + t_2) = 0 \quad (2.47)$$

$$t_1 \frac{di_L^+}{dt} + t_2 \frac{di_L^-}{dt} - \frac{1}{f_c} \frac{di_L^*}{dt} = 0 \quad (2.48)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.44) ลบสมการที่ (2.45) จะได้ดังสมการที่ (2.49)

$$t_1 \frac{di_L^+}{dt} - t_2 \frac{di_L^-}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{di_L^*}{dt} = 4HB \quad (2.49)$$

จากสมการที่ (2.43) แทนลงในสมการที่ (2.49) จะได้สมการที่ (2.50)

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

$$4HB = \frac{1}{f_c} \frac{di_L^+}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{di_L^*}{dt} \quad (2.50)$$

นำสมการที่ (2.42) แทนลงในสมการที่ (2.47) จะได้ดังสมการที่ (2.50)

$$(t_1 - t_2) = \frac{\frac{di_L^*}{dt}}{f_c \frac{di_L^+}{dt}} \quad (2.51)$$

นำสมการที่ (2.50) แทนลงในสมการที่ (2.49) จะได้ดังสมการที่ (2.51)

$$4HB = \frac{1}{f_c} \left[\frac{di_L^+}{dt} - \frac{\left(\frac{di_L^*}{dt}\right)^2}{\frac{di_L^+}{dt}} \right] \quad (2.52)$$

จากสมการที่ (2.41) แทนลงในสมการที่ (2.52) จะได้ดังสมการที่ (2.53) และ (2.54)

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

$$4HB = \frac{1}{f_C} \left[\frac{V_{dc} - v_S}{L} - \frac{\left(\frac{di_L^+}{dt}\right)^2}{\frac{V_{dc} - v_S}{L}} \right]$$

เมื่อ $m = \frac{di_L^+}{dt}$ คือ ความชันของกระแสอ้างอิง

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

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

$$HB = \frac{0.25(V_{dc} - v_S)}{Lf_C} \left[1 - \frac{m^2 L^2}{(V_{dc} - v_S)^2} \right] \quad (2.53)$$

$$f_C = \frac{0.25(V_{dc} - v_S)}{(HB)L} \left[1 - \frac{m^2 L^2}{(V_{dc} - v_S)^2} \right] \quad (2.54)$$

โดยสมการที่ (2.53) แสดงถึงแถบความถี่ฮิสเตอร์รีซิสซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของการมอดูเลตความถี่ จากสมการที่ (2.54) แสดงถึงขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นค่าคงที่ ดังนั้นความถี่ในการสวิตช์ซึ่งสูงสุดขึ้นอยู่กับขนาดตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส ในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้ตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสมีค่าน้อยๆ ได้เพราะทำให้ความถี่ในการสวิตช์สูงเกินพิกัดของอุปกรณ์การสวิตช์เป็นเหตุให้อุปกรณ์การสวิตช์เสียหาย แต่ถ้ากำหนดขนาดตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสมีค่ามาก การตอบสนองต่อการสร้างกระแสขา ดังนั้น ในการกำหนดขนาดตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสจะต้องเลือกให้เหมาะสมและความถี่สวิตช์ f_C ยังขึ้นอยู่กับ m ความถี่การสวิตช์มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับองศาทางไฟฟ้าของสัญญาณกระแสอ้างอิงและสัญญาณแรงดัน จากสมการที่ (2.54) สามารถหาความถี่สวิตช์สูงสุด เมื่อ $\omega t = 0, \pi$ โดยที่ $i_L = I_m^* \sin \omega t$

$$m^2 = \left[\frac{d}{dt} I_m^* \sin \omega t \right]^2 = 0.5 \omega^2 I_m^2 (1 + \cos 2\omega t) \quad (2.55)$$

และ $v_s = V_m \sin \omega t$ ทำให้ $v_s = 0$ จะได้ว่า

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

สมมติให้ $\frac{\omega^2 I_m^2 L^2}{V_{dc}^2} \ll 1$ จะได้ว่า

$$f_{C \max} = \frac{0.25 V_{dc}}{(HB)L} \quad (2.56)$$

จากสมการที่ (2.54) สามารถหาความถี่สวิตซ์ต่ำสุด เมื่อ $\omega t = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$

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

และ $v_s = V_m \sin \omega t$ ทำให้ $v_s = V_m$ จะได้ว่า

$$f_{C \min} = \frac{0.25(V_{dc} - V_m)}{(HB)L} \quad (2.57)$$

เมื่อ $f_{C \max}$ คือ ความถี่สวิตซ์สูงสุด

$f_{C \min}$ คือ ความถี่สวิตซ์ต่ำสุด

ดังนั้นในการควบคุมขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสให้คงที่นั้น (fix band) เมื่อต้องการออกแบบให้ความถี่สวิตซ์สูงสุด $f_{C \max}$ ซึ่งขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างแรงดันไฟตรง V_{dc} กับแรงดันการไฟฟ้า V_s มากที่สุดอยู่ที่ $\omega_t = 0, \pi$ เรเดียน และความถี่สวิตซ์ต่ำสุด $f_{C \min}$ อยู่ที่ $\omega_t = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ ในหนึ่งรอบสัญญาณ

2.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย และพื้นฐานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง ซึ่งเนื้อหาใน

บทนี้จะกล่าวถึงเซลล์แสงอาทิตย์ คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่างๆ, ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการวิเคราะห์คุณภาพรูปคลื่นกระแส, อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส และการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิส บทต่อไปจะกล่าวถึงการจำลองและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

บทที่ 3

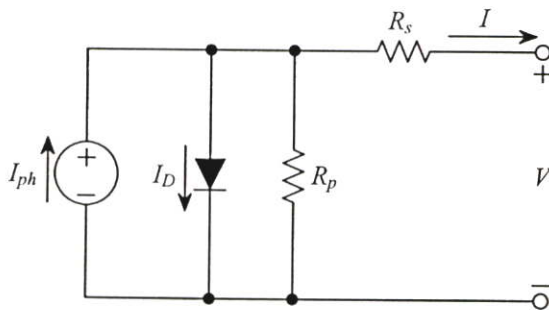
การจำลองและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อ การไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อ
การไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์และคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ใน
การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบ
กำลัง ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า
พลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

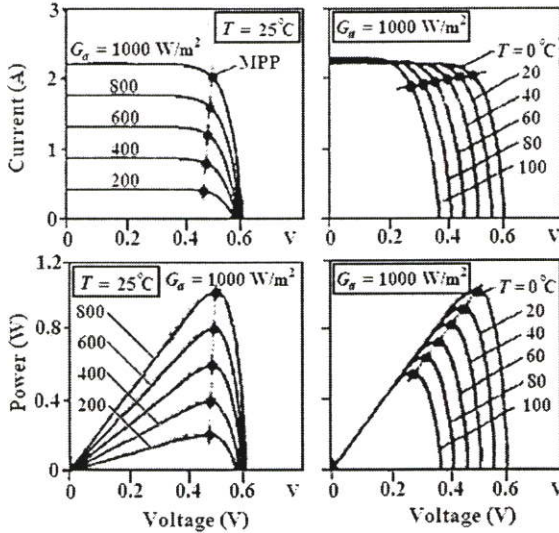
ในปัจจุบันการวิจัยระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก
อุปสรรคอย่างหนึ่งในงานวิจัยทางด้านนี้คือไม่มีแบบจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์
แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของระบบที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่าย
กำลังไฟฟ้าที่ถูกต้องซึ่งมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป
โดยโครงสร้างวัสดุสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีลักษณะเป็นรอยต่อ พี-เอ็น (p-n
junction) เหมือนไดโอด ดังนั้นคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถ
เขียนเป็นวงจรสมมูลประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสขนานกับไดโอดดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

เป็นที่รู้กันดีว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายไม่เป็นเชิงเส้นเพราะแรงดันและกระแสเอาต์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นอยู่กับความเข้มแสงและอุณหภูมิ [3], [4] ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 เป็นผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน (STC) [5] ที่ระดับความเข้มแสง 1000 W/m^2 , อุณหภูมิ 25°C และที่ระดับความเข้มแสงและที่อุณหภูมิต่างๆ



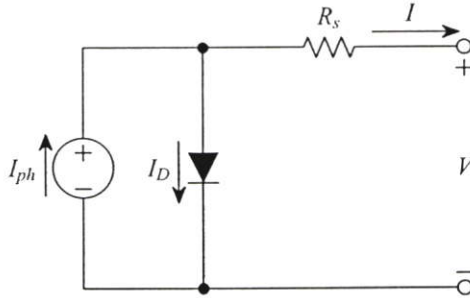
รูปที่ 3.2 คุณลักษณะเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลเฉพาะภายใต้มาตรฐานการทดสอบ (STC)	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ
กำลังไฟฟ้าสูงสุด : $P_{mpps} = 40 \text{ W}$	กำลังไฟฟ้าที่สูงที่สุดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ :
กระแสลัดวงจร : $I_{scs} = 1.16 \text{ A}$	$\Delta P_{mpp} = -0.19 \% / ^\circ\text{C}$
แรงดันเปิดวงจร : $V_{ocs} = 62.2 \text{ V}$	แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ :
กระแสที่ให้กำลังสูงสุด : $V_{mpps} = 0.9 \text{ V}$	$\Delta V_{mpp} = -153 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
แรงดันที่ให้กำลังสูงสุด : $V_{mpps} = 44.8 \text{ V}$	แรงดันเปิดวงจรที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ :
จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม : $N_s = 39$	$\Delta V_{oc} = -170 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน : $N_p = 1$	กระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ :
	$\Delta I_{sc} = +1.6 \text{ mA} / ^\circ\text{C}$

ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากแผ่นแสดงคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในตารางที่ 1 จะนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพิจารณาวงจรสมมูลของ

เซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายที่ประกอบด้วยไดโอด 1 ตัวที่มีความต้านทานอนุกรมเพียงอย่างเดียว จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานค่าความต้านทานขนาน (R_p) จะมีค่าสูงมากพอที่ไม่นำมาพิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) จะมีผลและบทบาทที่สำคัญต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

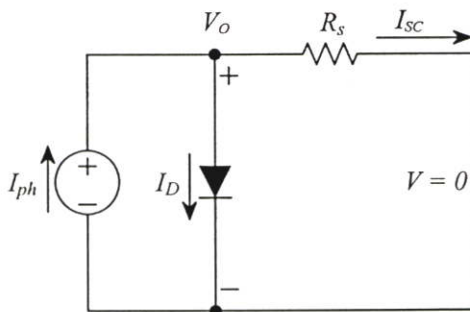
จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.3 กระแสต้านเอาท์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{V + IR_s}{V_t}} - 1 \right] \quad (3.1)$$

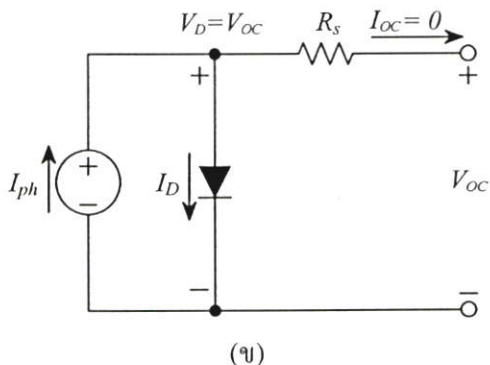
เมื่อ I_{ph} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตนิก

V_t คือ Thermal Voltage

I_{sat} คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอด



(ก)



รูปที่ 3.4 (ก) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะลัดวงจร

(ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะเปิดวงจร

ในสภาวะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (Short circuit condition) ในรูปที่ 3.4 (ก) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสไฟได้ดังสมการที่ 3.2

$$I_{ph} = I_D + I_{sc} \quad (3.2)$$

กระแสจะไหลผ่านไดโอดน้อยมากจนไม่มีผลต่อการคำนวณที่สภาวะลัดวงจรได้แต่เนื่องจากกระแสไฟได้เป็นส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่ 3.3

$$I_{ph}(G_a, T) = I_{scs} \frac{G_a}{G_{as}} [1 + \Delta I_{sc}(T - T_s)] \quad (3.3)$$

เมื่อ G_a คือ ค่าของความเข้มแสง

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Kelvin)

I_{scs} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่ทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน (STC)

G_{as} คือ ค่าความเข้มแสงมาตรฐาน (1000 W/m^2)

ΔI_{sc} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

T_s คือ ค่าอุณหภูมิมาตรฐาน (298 K)

ในสภาวะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (Open circuit condition) จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.4 (ข) สามารถคำนวณแรงดันเปิดวงจรได้ดังสมการที่ 3.4

$$V_{oc}(T) = V_{ocs} + \Delta V_{oc}(T - T_s) \quad (3.4)$$

เมื่อ V_{oc} คือค่าแรงดันเปิดวงจรที่ทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน และ ΔV_{oc} คือค่าแรงดันเปิดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ และจากวงจรสมมูลสามารถหาค่ากระแสไหลผ่านไดโอดได้ดังนี้

$$I_{ph}(G_a, T) = I_D(G_a, T) \quad (3.5)$$

ซึ่งสมการกระแสของไดโอดสามารถหาได้จาก

$$I_D(G_a, T) = I_{sat}(G_a, T) \times \left[e^{\frac{V_{oc}}{V_t}} - 1 \right] \quad (3.6)$$

เมื่อแรงดันที่ขั้วหาได้จาก $V_t(T) = \frac{AkT}{q}$

A คือ ค่า Ideality Factor

I_{sat} คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงและอุณหภูมิ

q คือ ขนาดประจุมีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมบ์

k คือ ค่าคงที่ Boltzman มีค่า 1.38×10^{-23} J/K

แทนสมการที่ (3.5) และ (3.6) เพื่อหาค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดได้จาก

$$I_{sat}(G_a, T) = \frac{I_{ph}(G_a, T)}{e^{\left(\frac{V_{oc}(T)}{V_t(T)}\right)} - 1} \quad (3.7)$$

พิจารณาจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันในรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดและสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{V_{mpp} + IR_s}{V_t}} - 1 \right] \quad (3.8)$$

นำสมการที่ (3.7) แทนลงในสมการที่ (3.8) จะได้สมการกระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนี้

$$I_{mpp} = I_{ph} - \left[\frac{e^{\left(\frac{V_{mpp} + IR_s}{V_t}\right)} - 1}{e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right)} - 1} \right] I_{ph} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรม (R_s) และ Thermal Voltage (V_t) ได้ดังนี้

$$R_s = \frac{V_t \ln \left[\left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{ph}} \right) e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_t} \right)} + \frac{I_{mp}}{I_{ph}} \right] - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (3.10)$$

เมื่อ Thermal Voltage (V_t) เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับค่า Ideality factor (A) ผลจากอุณหภูมิที่มีต่อค่า Ideality factor ของไดโอดและค่าความต้านทานอนุกรม พิจารณาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะหาได้จาก $\frac{dP}{dV} = 0$ เมื่อ $P = VI$ สามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} = 0 \quad (3.11)$$

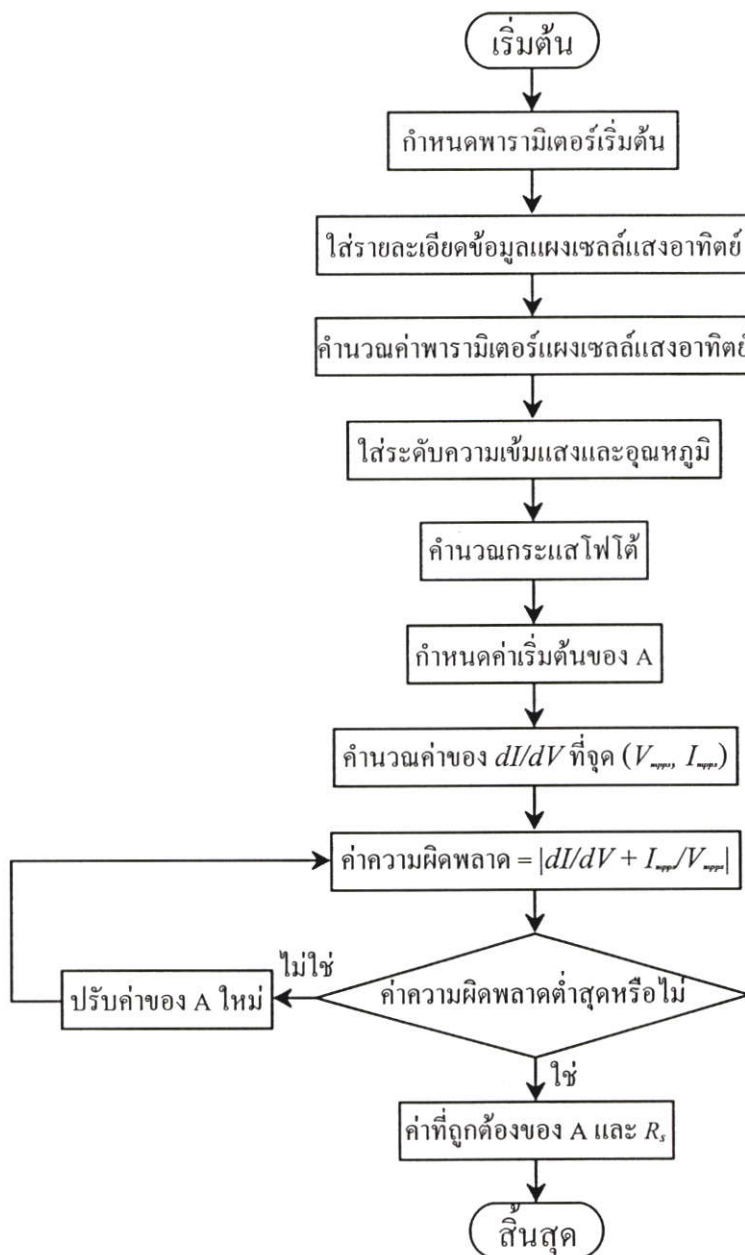
เมื่อนำสมการที่ (3.1) แทนค่าในสมการที่ (3.11)

$$\frac{dI}{dV} = -I_{sat} \left\{ e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} \left[\frac{1}{V_t} + \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \frac{dI}{dV} \right] \right\} \quad (3.12)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

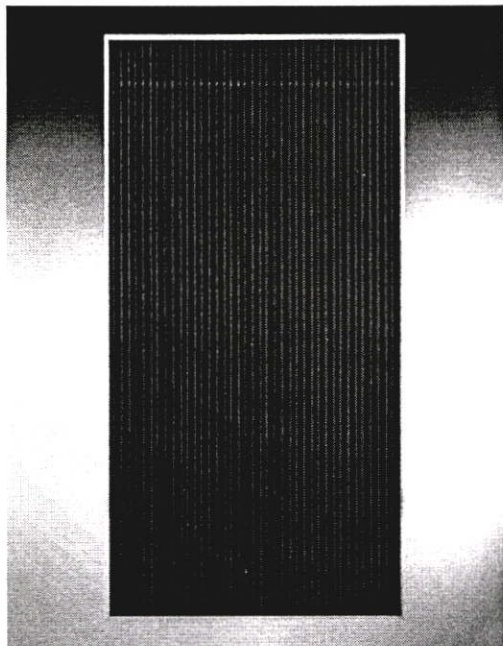
$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{mpp}} = - \frac{\frac{I_{sat}}{V_t} e^{\frac{V_{mpp}+IR_s}{V_t}}}{1 + \frac{I_{sat}R_s}{V_t} e^{\frac{V_{mpp}+IR_s}{V_t}}} \quad (3.13)$$

สมการที่ (3.12) เป็นการคำนวณค่า $\frac{dI}{dV}$ ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยนำไปเปรียบเทียบกับ $\frac{I_{mpps}}{V_{mpps}}$ ซึ่งคุณลักษณะเอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดนั้นสามารถหาได้จากค่า Ideality factor (A) และ ค่าความต้านทานอนุกรมในแบบจำลองโดยค่าของ Ideality factor (A) และค่าความต้านทานอนุกรมประมาณได้จากค่าสมบูรณ์ที่ต่ำสุดของสมการ $\left(\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{mpp}} + \frac{I_{mpps}}{V_{mpps}} \right)$ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการประมาณค่า Ideality factor (A) และค่าความต้านทานอนุกรม ได้ดังรูปที่ 3.5

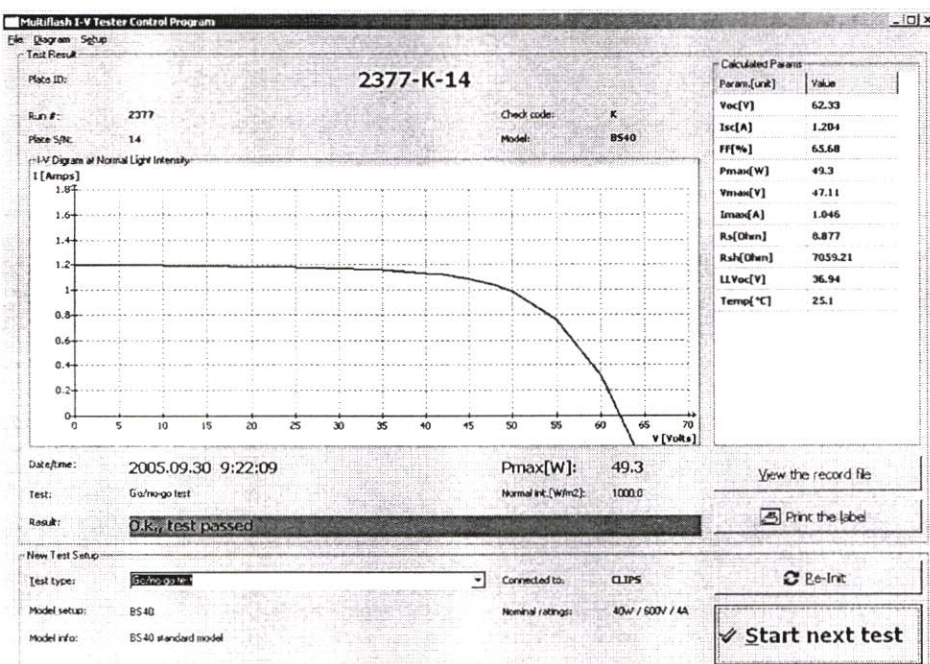


รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองในการกำหนดค่าที่ถูกต้องของ Ideality factor (A) และความต้านทานอนุกรม

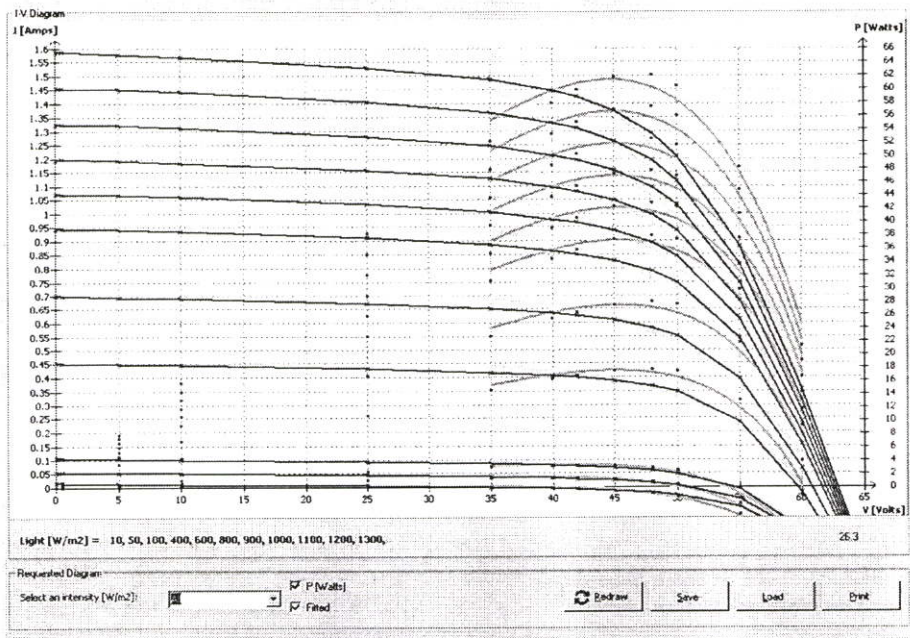
ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS 40 ของบริษัท บางกอก โซลาร์ จำกัด ดังรูปที่ 3.6 เนื่องจากมีข้อมูลในการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากโรงงานที่ผ่านการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน (ความเข้มแสง 1000 W/m^2 , อุณหภูมิ 25°C , AM 1.5) ด้วยเครื่องทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้า (IV Tester) ดังรูปที่ 3.6 เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นซึ่งข้อมูลต่างๆที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 3.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS 40 ของบริษัท บางกอก โซลาร์ จำกัด



(ก)

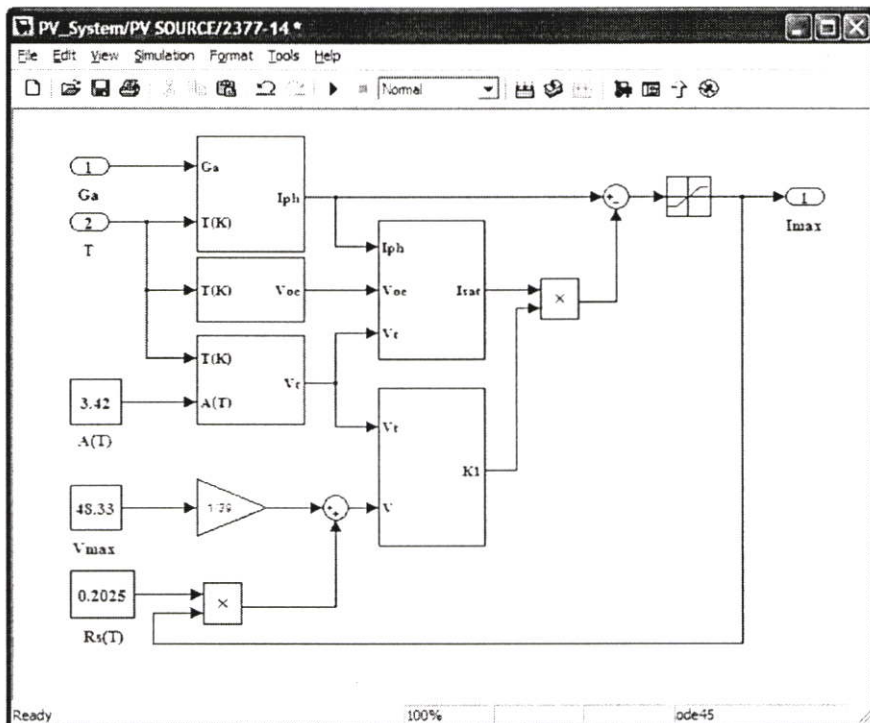


(ข)

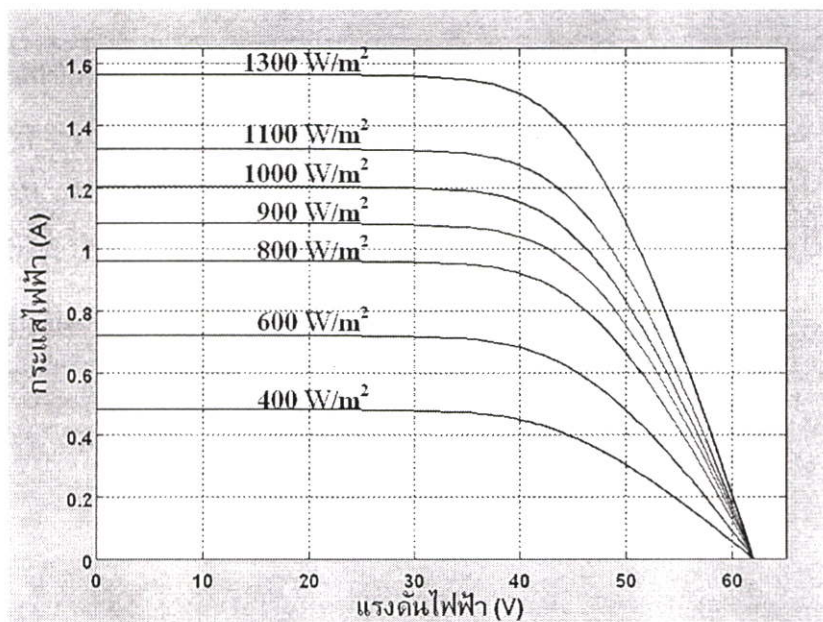
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการทดสอบจากโรงงาน

- (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่สภาวะมาตรฐาน
 (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ

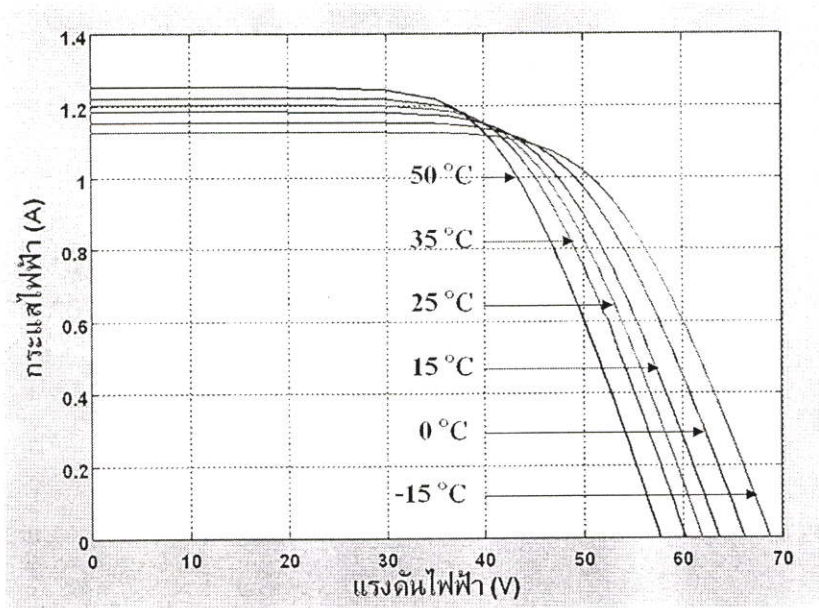
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองด้วย โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคุณสมบัติแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสมการไม่เป็นเชิงเส้น รูปที่ 3.7 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างมาจากสมการที่ (3.1, 3.3, 3.4 และ 3.7) เป็นสมการที่กำหนดค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิที่มีผลต่อแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยผลจากแบบจำลองสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.9 ถึง 3.12 โดยที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากเครื่องทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้า (IV Tester) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3



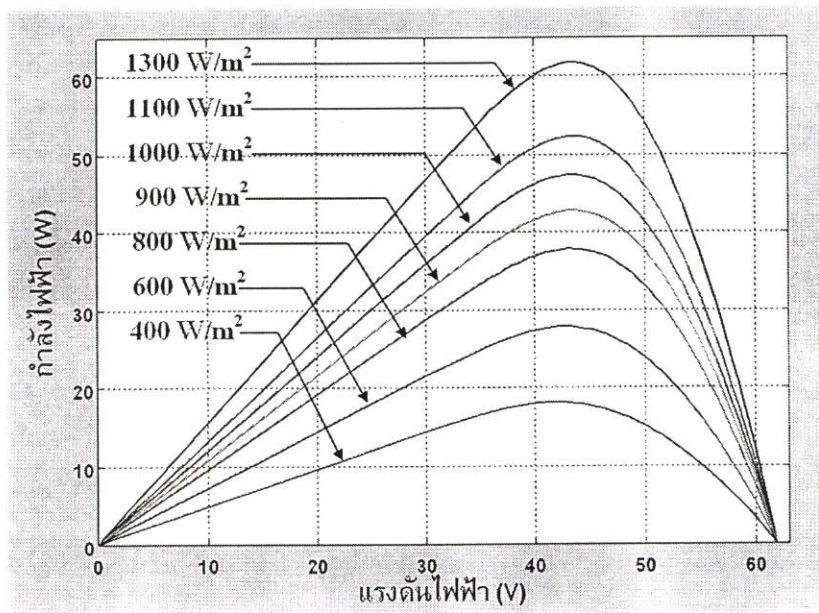
รูปที่ 3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์



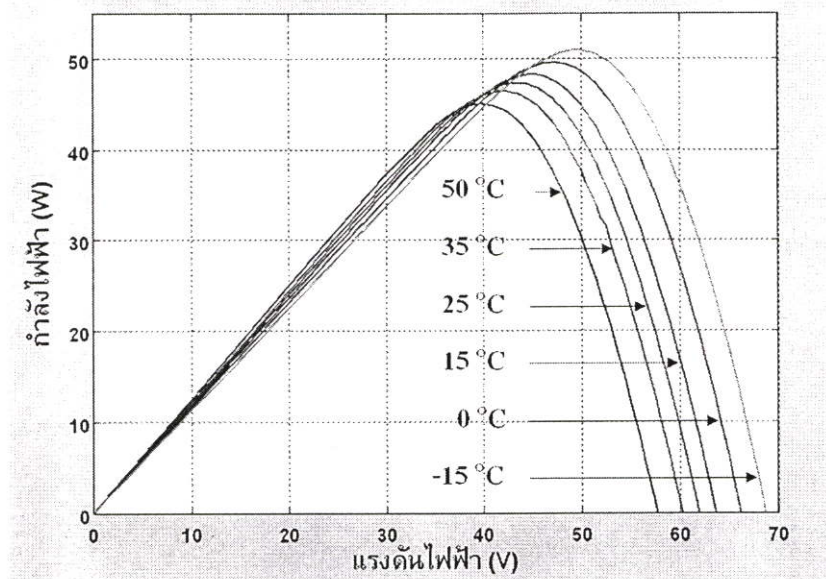
รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 25°C
คงที่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสง



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากแบบจำลองที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 25°C คงที่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสง



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากแบบจำลองที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิ 25°C คงที่ที่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ระดับต่างๆ

ค่าความเข้มแสง (W/m^2)	ผลจากเครื่อง ทดสอบ (W)	ผลจากแบบจำลอง (W)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน (%)
1300	61.5	61.44	0.097
1100	52	51.98	0.038
1000	47	46.95	0.1
900	42.5	42.49	0.023
800	37.5	37.456	0.117
600	27.5	27.47	0.109
400	18	17.956	0.244

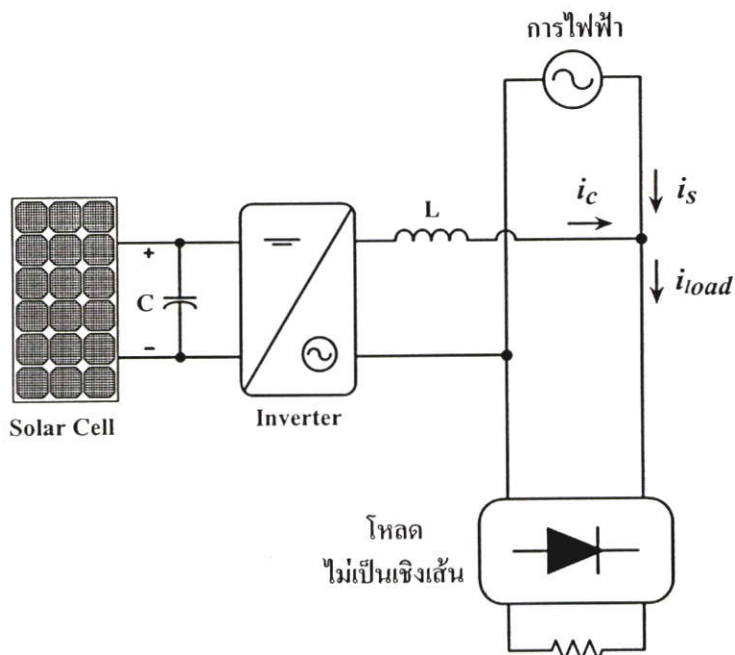
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 1000 W/m² คงที่ เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิที่ระดับต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ผลจากเครื่องทดสอบ (W)	ผลจากแบบจำลอง (W)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
50	44.768	44.729	0.08
35	46.107	46.019	0.19
15	47.893	47.857	0.075
0	49.232	49.185	0.095
-15	50.572	50.6	0.055

ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ มีคุณสมบัติของแรงดันและกระแสขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงและอุณหภูมิเช่นเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง เมื่อพิจารณาจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากโรงงาน ทำให้สามารถทำการจำลองแหล่งจ่ายไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการจำลองระบบไฟฟ้าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องและง่ายต่อการใช้งาน เนื่องจากการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบผลิตภัณฑ์ของบริษัททำให้แบบจำลองจึงสามารถใช้งานกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทุกแบบโดยไม่ต้องคำนึงถึงผลที่เกิดจากโครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์

3.2 การจำลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

ระบบไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบขั้นเดียว (Single state system) คือ เอาท์พุทจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกับอินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟตรงเป็นไฟสลับเพื่อเชื่อมต่อการไฟฟ้า ดังที่แสดงในรูปที่ 3.13 ในการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง เป็นการจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้เกินความต้องการของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น กำลังไฟฟ้าจะไหลกลับสู่การไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

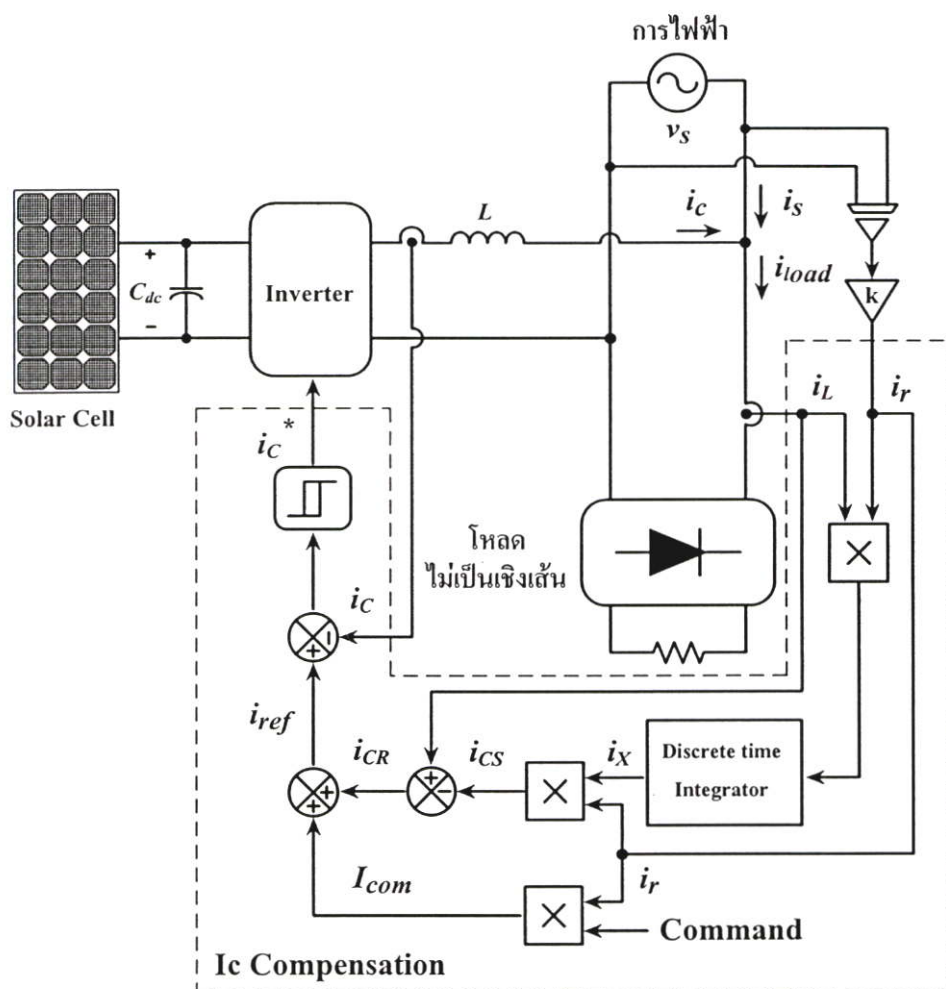


รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า

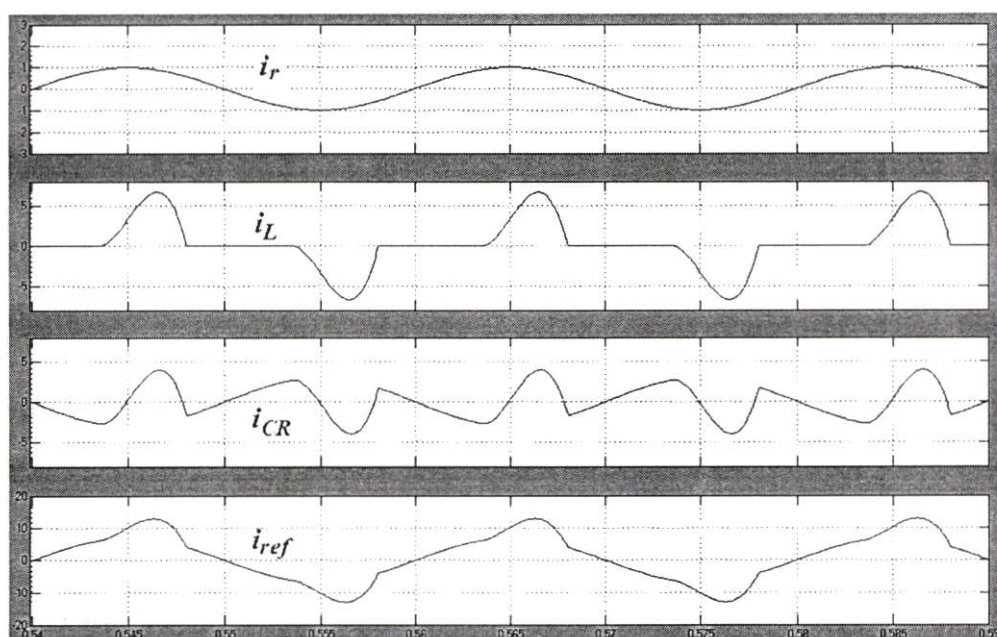
ในการจำลองการทำงานของระบบทั้งหมดใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อศึกษาการทำงานของระบบและวิเคราะห์ผลการจำลองของระบบ ทั้งในกรณีที่ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้โดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังและร่วมจ่ายโหลดรวมกับการไฟฟ้าได้

3.2.1 การคำนวณหากระแสอ้างอิง

การคำนวณหากระแสอ้างอิงในการควบคุมการทำงานประกอบด้วยสองส่วนคือ กระแสคำสั่งในการจ่ายกำลังไฟฟารวมกับกระแสชดเชยที่ได้จากการคำนวณค่าจริงของกระแสที่ความถี่มูลฐาน จากวงจรกำลังและวิธีการควบคุมในรูปที่ 3.14 แสดงวิธีการคำนวณหากระแสอ้างอิงของคอนเวอร์เตอร์ได้จากการกำหนดขนาดและทิศทางของเวกเตอร์ I_s ให้มีเฟสตรงข้ามเป็นมุม 180° และซิงโครไนส์กับแรงดัน V_s แล้วนำมารวมกับกระแสชดเชยที่คำนวณตามหลักการที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 รูปที่ 3.15 แสดงสัญญาณที่ได้จากการจำลองวิธีการหากระแสชดเชย เพื่อเป็นกระแสอ้างอิงให้กับการควบคุมแบบฮีสเตอร์รีซิส



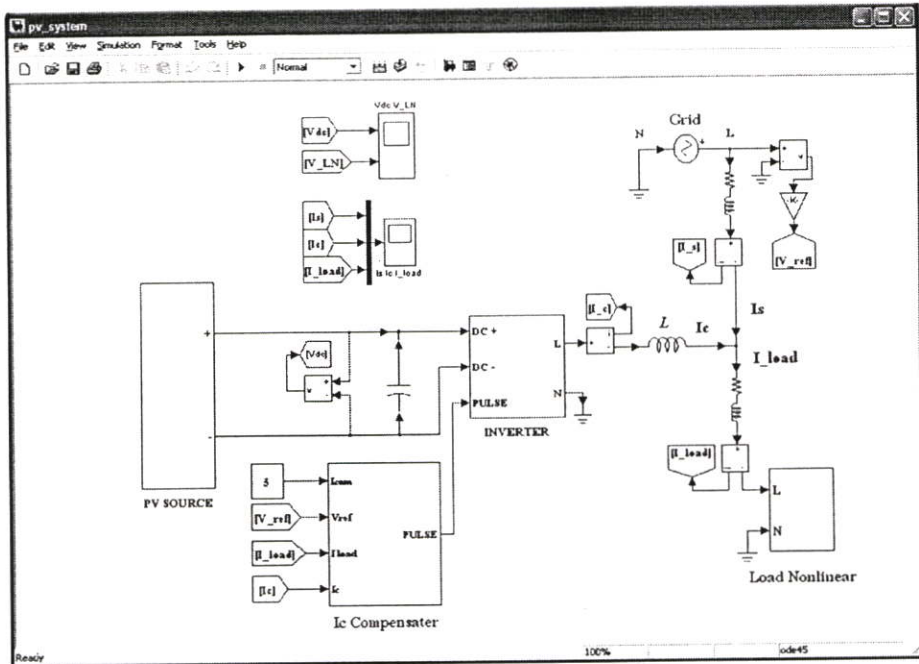
รูปที่ 3.14 วงจรกำลังและวิธีการคำนวณหากระแสอ้างอิงในการควบคุมการทำงานของระบบ



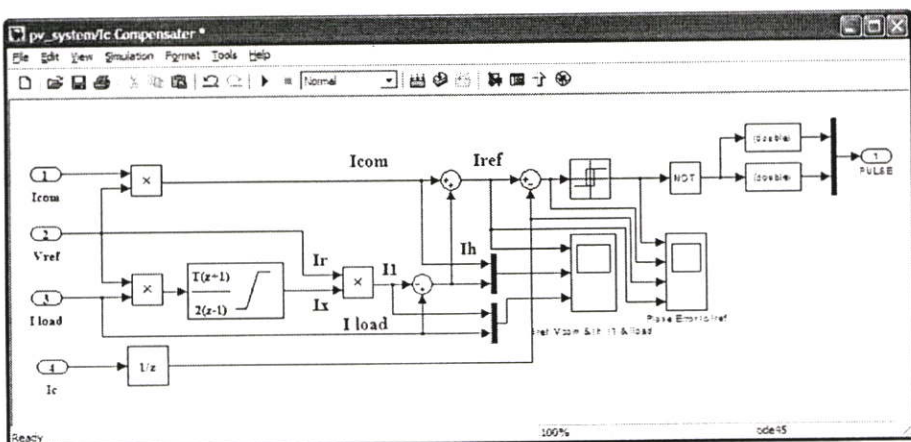
รูปที่ 3.15 สัญญาณที่ได้จากการจำลองวิธีการหากระแสอ้างอิง

3.2.2 การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

จากรูปที่ 3.16 แสดงการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อศึกษาการทำงานของระบบ 1 เฟส 220 V ความถี่ 50 Hz โดยมีตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 10 \text{ mH}$, $V_{dc} = 350 \text{ V}$ และความกว้างฮิสเตอร์รีซิส (HB) = 0.5 A ความถี่สวิตชิงสูงสุด 10.5 kHz และความถี่ในการสุ่ม 100 kHz ซึ่งภาระที่นำมาทดสอบเป็นวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

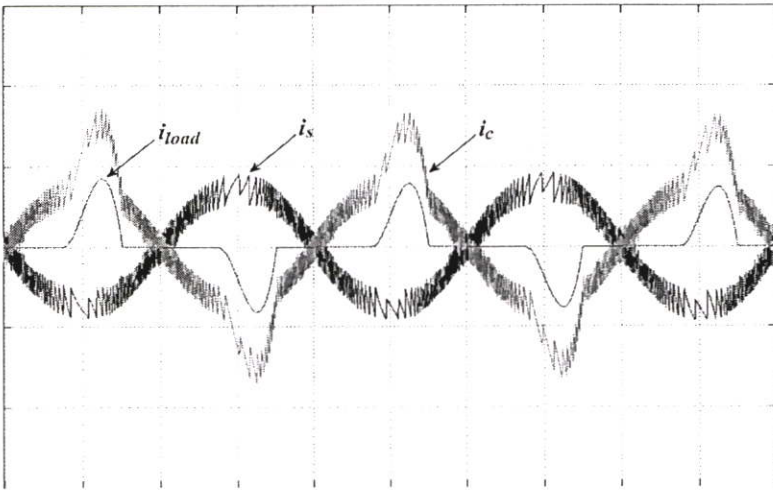


(ก) วงจรกำลังของระบบ

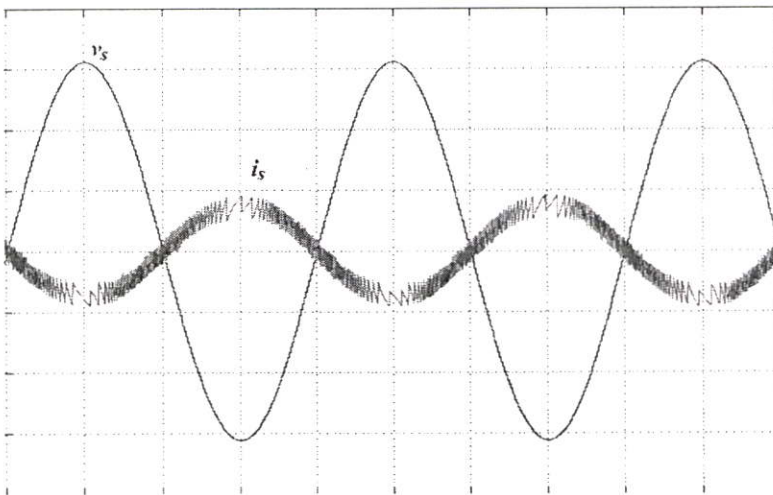


(ข) วงจรควบคุมของระบบ

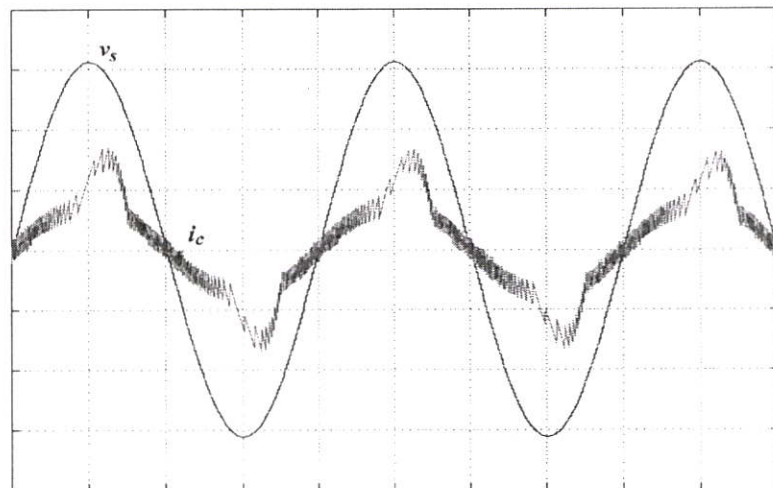
รูปที่ 3.16 การจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK



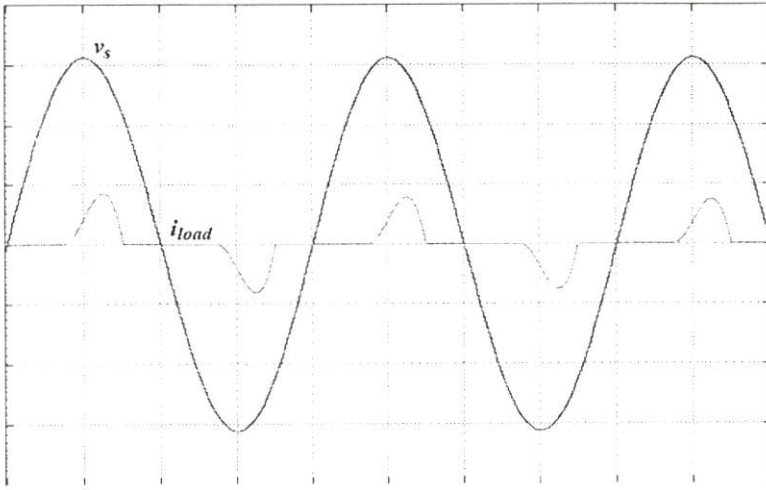
(ก) สัญญาณกระแสไลน์ i_s , กระแสชดเชย i_c และกระแสโหลด i_{load} (5 A/div)



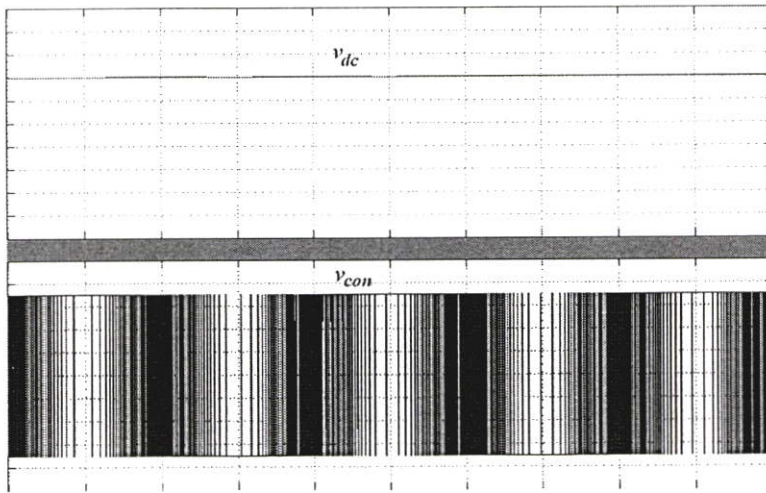
(ข) สัญญาณแรงดัน v_s (20V/div) และกระแสไลน์ i_s (5 A/div)



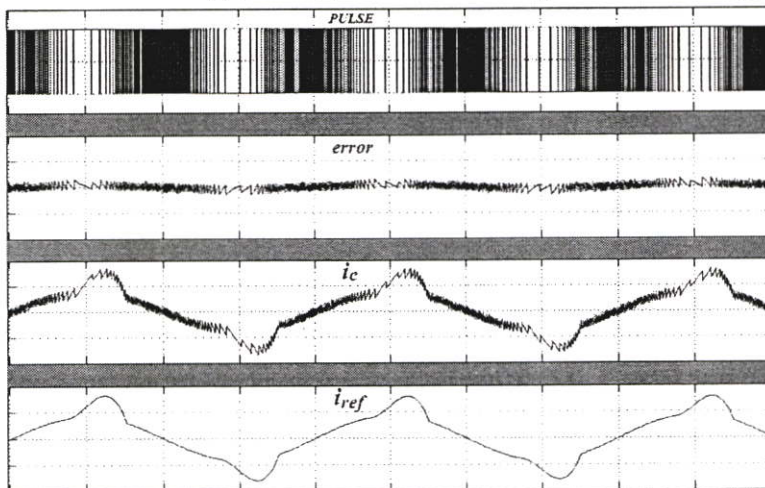
(ค) สัญญาณแรงดัน v_s (20V/div) และกระแสชดเชย i_c (5 A/div)



(ง) สัญญาณแรงดัน v_s ($20V/div$) และกระแสโหลด i_{load} ($5 A/div$)



(จ) สัญญาณแรงดันไฟตรง v_{dc} ($50V/div$) และแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ v_{con} ($100 V/div$)



(ค) สัญญาณสวิทช์ ($1 V/div$), สัญญาณผิดพลาด, กระแสขดเซช i_c และกระแสอ้างอิง i_{ref} ($5 A/div$)
รูปที่ 3.17 การจำลองระบบในกรณีที่สามารผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ($5 mS/div$)

จากรูปที่ 3.17 (ก), ถึง (ง) แสดงผลการจำลองระบบที่สามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ จากผลการจำลองพบว่าสัญญาณแรงดัน v_s และ i_s ทำมุมห่างกัน 180° (out of phase) และสัญญาณกระแสมีรูปร่างใกล้เคียงไซน์ จากผลการจำลองพบว่ากระแส i_c ที่จ่ายออกจากระบบเท่ากับผลรวมของกระแสโหลด i_{Load} กับกระแสการไฟฟ้า i_s นั้นหมายความว่าระบบสามารถผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายโหลดและจ่ายคืนกลับสู่การไฟฟ้าได้โดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังและกรองกระแสฮาร์มอนิกให้กับระบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น รูปที่ 3.17 (จ) แสดงสัญญาณแรงดันไฟตรงและสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และรูปที่ 3.17 (ฉ) แสดงสัญญาณจากวงจรควบคุม

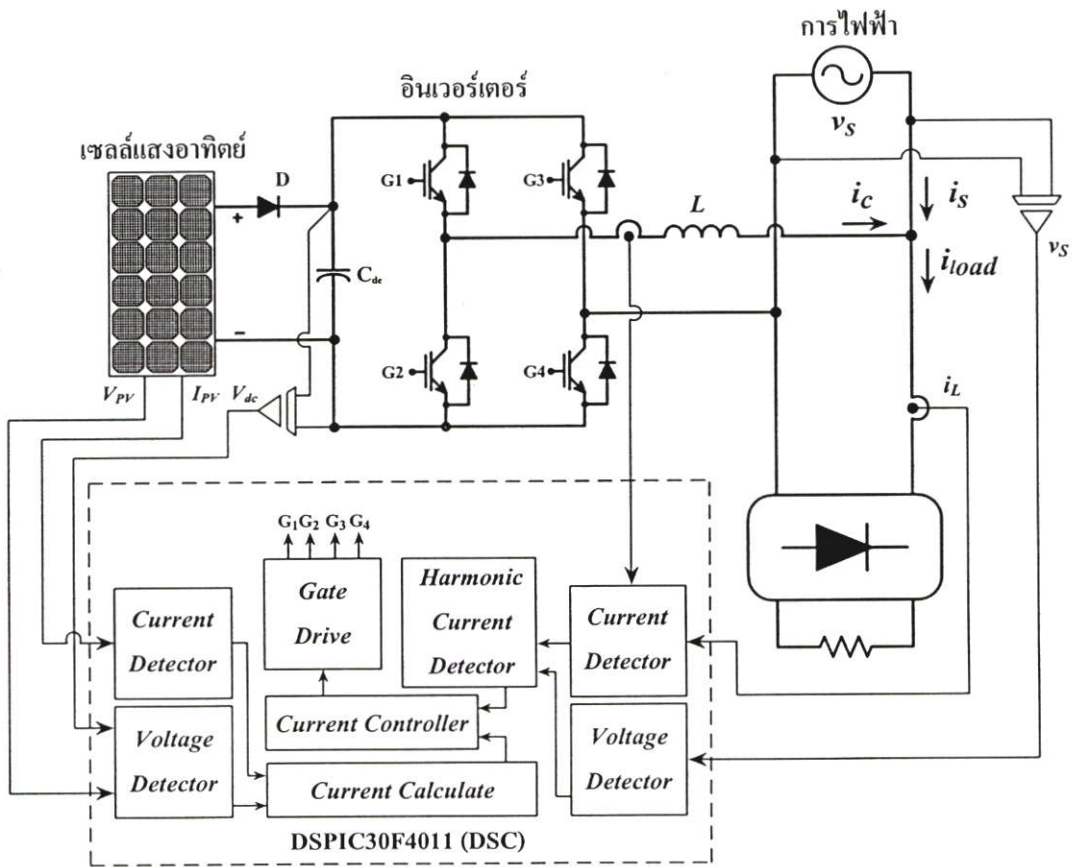
3.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการแก้ตัวประกอบกำลังในระบบ 1 เฟส 220 V 50 Hz จุดประสงค์หลักอยู่ทางด้านการเชื่อมต่อการไฟฟ้าในกรณีที่ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้เกินความต้องการของโหลด กำลังไฟฟ้าที่เหลือจะไหลคืนกลับสู่การไฟฟ้าโดยมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ผลการจำลองระบบให้ผลสอดคล้องกับการหลักที่ได้นำเสนอมาแล้ว

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง

บทนี้จะกล่าวถึงลักษณะ โครงสร้างระบบควบคุมและวงจรกำลังของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง โดยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นประกอบด้วยวงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน, วงจรควบคุมหลักที่ควบคุมโดยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSC) และ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อการไฟฟ้าและกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยถูกควบคุมจากสัญญาณที่ได้คำนวณจากตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล รูปที่ 4.1 แสดง โครงสร้างส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง



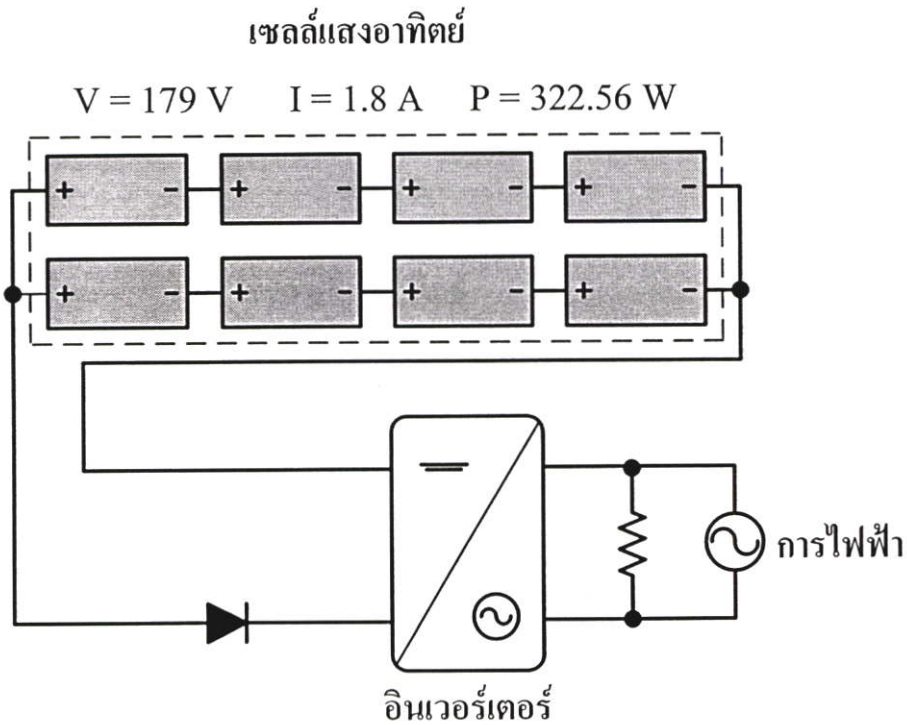
รูปที่ 4.1 โครงสร้างส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

4.1 การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

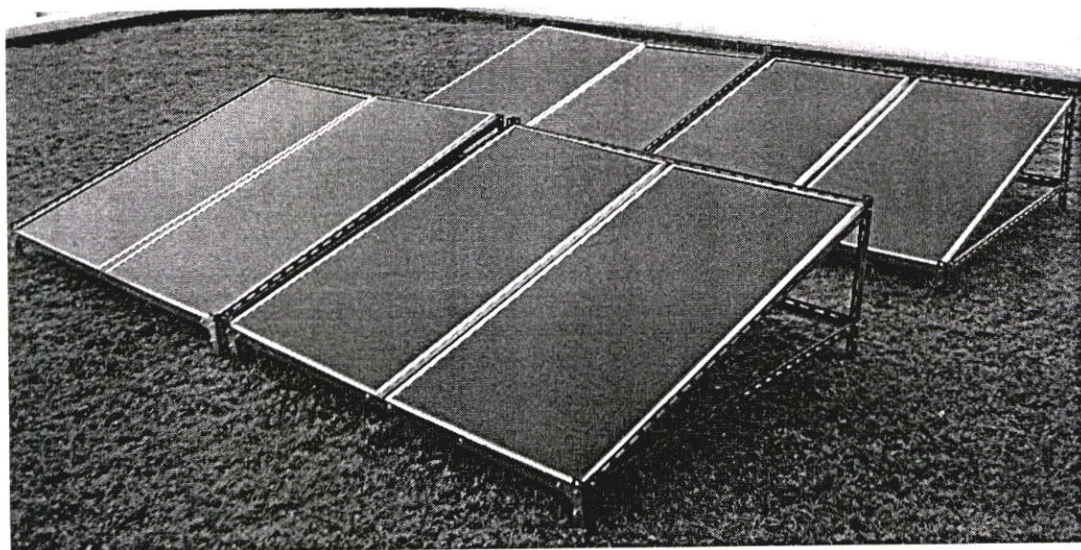
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของบริษัท บางกอกโซลาร์ รุ่น BS 40 จำนวน 8 แผง โดยมีข้อมูลสำคัญในการออกแบบดังนี้

กำลังไฟฟ้าสูงสุด : P_{MAX}	40 W \pm 10 %
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร : V_{OC}	62.2 V \pm 10 %
กระแสไฟฟ้่าลัดวงจร : I_{SC}	1.16 A \pm 10 %
แรงดันไฟฟ้าที่จุดให้กำลังงานสูงสุด : V_M	44.8 V \pm 10 %
กระแสไฟฟ้าที่จุดให้กำลังงานสูงสุด : I_M	0.9 A \pm 10 %

ลักษณะการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเป็นวงจรผสม โดยต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรมกัน 4 แผง 2 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะได้แรงดันไฟฟ้า 179 V กระแสไฟฟ้า 0.9 A จากนั้นนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชุดมาต่อขนานกันจะได้แรงดันไฟฟ้า 179 V กระแสไฟฟ้า 1.8 A ซึ่งได้กำลังไฟฟ้าทั้งหมด 322.56 W



รูปที่ 4.2 ลักษณะการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

4.2 การออกแบบอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบการไฟฟ้าด้วยการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าและกำลังจลน์เพื่อแก้ไขตัวประกอบกำลัง จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์มีดังนี้

4.2.1 ตัวเก็บประจุไฟตรง

ตัวเก็บประจุไฟตรงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รักษาระดับแรงดันไฟตรงด้านเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์และเป็นอุปกรณ์ในการเก็บพลังงานเพื่อจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ในการทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าและประพุดิตัวเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้เป็นชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ต่อขนานอยู่กับระบบ ขนาดของตัวเก็บประจุนั้นขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและชนิดของโหลด สำหรับเครื่องต้นแบบได้เลือกใช้ค่าความของตัวเก็บประจุขนาด $6,600 \mu\text{F}$

4.2.2 ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส

การเชื่อมโยงระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบการไฟฟ้าทำการเชื่อมโยงผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งหน้าที่ของตัวเหนี่ยวนำคือทำการกรองระลอกคลื่นกระแสที่เกิดจากการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้กระแสชดเชยที่จ่ายจกอินเวอร์เตอร์มีความเรียบมากขึ้นแต่ในกรณีที่ต้องการใช้ผลตอบสนองทางไดนามิกที่ดีนั้น ขนาดของตัวเหนี่ยวนำควรมีขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดเล็กเกินไปส่งผลทำให้ระลอกคลื่นกระแสที่เกิดจากการสวิตช์

มาก ดังนั้น ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำควรวางแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยค่าของตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้ดังสมการ

$$f_{C_{\max}} = \frac{0.25V_{dc}}{(HB)L} \quad (4.1)$$

เมื่อ L คือ ตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ระหว่างอินเวอร์เตอร์กับการไฟฟ้า

HB คือ ขอบเขตฮิสเตอร์รีส

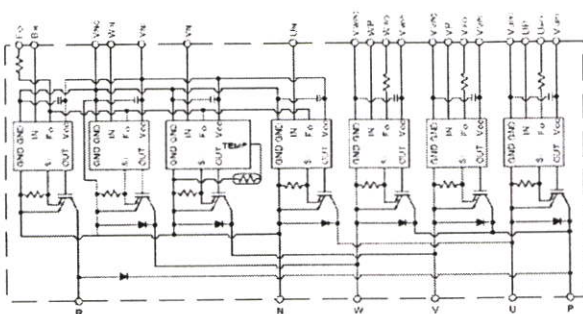
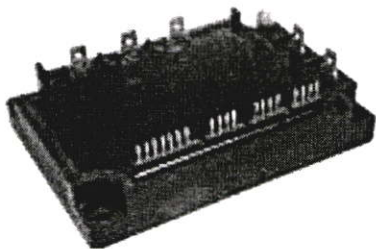
V_{dc} คือ แรงดันไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

f_c คือ ความถี่ในการสวิตช์สูงสุด

กำหนดความถี่ในการสวิตช์สูงสุดเท่ากับ 10 kHz และขอบเขตฮิสเตอร์รีสเท่ากับ 0.5 และแรงดันไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 200 V ดังนั้นจะได้ค่าเหนี่ยวนำเท่ากับ 10 mH

4.2.3 วงจรสวิตช์กำลัง

วงจรสวิตช์กำลังเป็นส่วนในการทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นกระแสด้วยเทคนิคการติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีส โดยการสวิตช์นั้นจะถูกควบคุมจากส่วนของการควบคุมที่ได้กำหนดไว้จากตัวประมวลผลเพื่อใช้สำหรับการสร้างกระแสอ้างอิง โดยอุปกรณ์กำลังที่ทำหน้าที่ในการสวิตช์เป็นส่วนที่มีการเสียบ่อยที่สุด เพราะว่าเป็นส่วนที่ทำการแปลงจากสัญญาณควบคุมกำลังต่ำเป็นไฟกำลังงานสูง อุปกรณ์สวิตช์ที่นำมาใช้นี้ต้องคำนึงถึงพิกัดของขนาดแรงดันกระแสและความถี่ในการสวิตช์สูงสุดที่สามารถรองรับได้ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ไอจีบีทีโมดูลกำลังของบริษัทมิตซูบิชิเบอร์ PM25RSB120 (Intelligent Power Module: IPM) มีพิกัดแรงดัน 1,200 โวลต์ พิกัดกระแส 25 แอมป์ โดยภายในของไอจีบีทีโมดูลกำลังประกอบไปด้วยไอจีบีทีกำลังทั้งหมด 7 ตัว ซึ่งออกแบบมาให้ใช้งานในการควบคุมพลังงานในลักษณะ 3 เฟส นำมาประยุกต์ใช้กับระบบ 1 เฟส โดยใช้ไอจีบีที 4 ตัว ซึ่งไอจีบีทีโมดูลแบบนี้มีข้อดีกว่าไอจีบีทีแบบตัวเดี่ยว คือสามารถส่งสัญญาณฟอลต์ (Fault) จากตัวไอจีบีทีโมดูลเพื่อใช้ในการหยุดสัญญาณขับเคลื่อนในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในกึ่งและกระแสเกินหรืออุณหภูมิในตัวเองมีค่าสูง ไอจีบีทีโมดูลนี้มีความสามารถในการรองรับความถี่สวิตช์สูงสุดได้ถึง 20 kHz ซึ่งโครงสร้างของไอจีบีทีโมดูลนี้แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 4.4



(ก) โครงสร้างภายนอกไอจีบีทีกำลัง

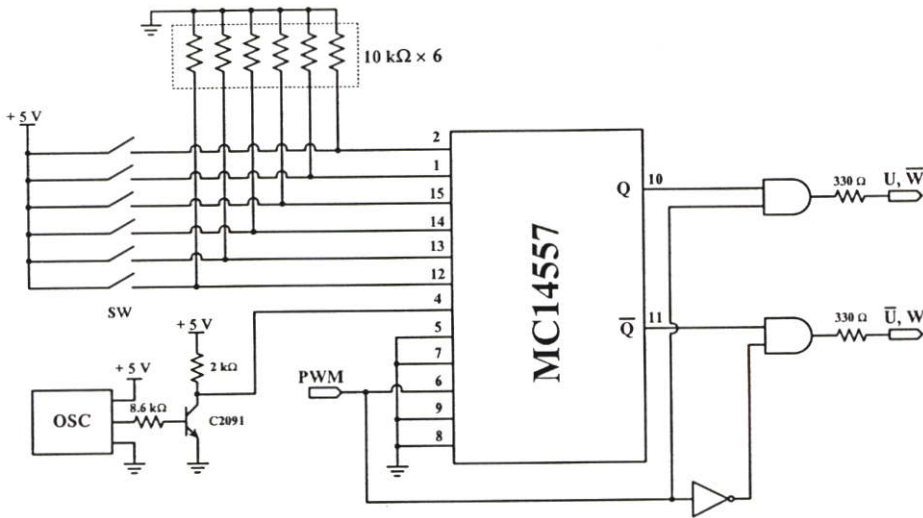
(ข) โครงสร้างภายในไอจีบีทีกำลัง

รูปที่ 4.4 โครงสร้างไอจีบีทีโมดูลกำลังเบอร์ PM25RSB120 (IPM)

การควบคุมการทำงานของไอจีบีทีกำลังจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทำการแยกแยะระหว่างสัญญาณขับเคลื่อนกับสัญญาณควบคุม ในการแยกกันของสัญญาณนี้เพื่อต้องการแยกกราวด์ไม่ให้ไอจีบีทีกำลังตัวบนและตัวล่างในกิ่งเดียวกันเกิดการลัดวงจรเนื่องจากใช้กราวด์ร่วมกันแสดงวงจรดังรูปที่ 4.5 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกกราวด์ได้ใช้ออปโต (OPTO) เบอร์ HCPL4504 จำนวน 4 ตัว โดยออปโตที่ใช้ในการควบคุมสวิทช์ 2 ตัวบนจะต้องทำการแยกไฟเลี้ยงขนาด 15 โวลต์ออกจากกัน ส่วนออปโตที่ใช้ในการควบคุมสวิทช์ 2 ตัวล่างจะรับไฟเลี้ยงขนาด 15 โวลต์ จากแหล่งจ่ายไปชุดเดียวกัน สำหรับการควบคุมการทำงานของโมดูลสวิทช์นี้สามารถทำได้โดยการจ่ายแรงดันที่ขาออปโต (U, W, \bar{U}, \bar{W}) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นผลทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงที่อยู่ภายในออปโตจึงทำให้ชุดไอจีบีทีด้านเอาท์พุททำงาน ส่วนวงจรที่ใช้ในการส่งสัญญาณฟอลต์ที่ออกจากตัวโมดูลเพื่อใช้หยุดสัญญาณขับเคลื่อนได้ใช้ออปโต เบอร์ TLP521 จำนวน 4 ตัว โดยสัญญาณที่มาจากออปโต 3 ตัวแรกนี้จะมาจากการตรวจจับบริเวณสวิทช์ 3 กิ่งบน ส่วนออปโตอีกตัวจะได้จากการตรวจจับบริเวณสวิทช์ 3 กิ่งล่าง การทำงานของวงจรนี้สามารถอธิบายได้ว่าถ้าในกรณีที่สภาวะปกติ สัญญาณฟอลต์จะมีสถานะเป็นแรงดันขนาด 15 โวลต์ แต่ถ้ากรณีที่เกิดฟอลต์ขึ้นจะมีส่งสัญญาณระดับแรงดันศูนย์โวลต์ออกมาแทน จากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่วงจรป้องกันเพื่อไปตัดการทำงานของระบบต่อไป

4.2.4 วงจรประวิงเวลา

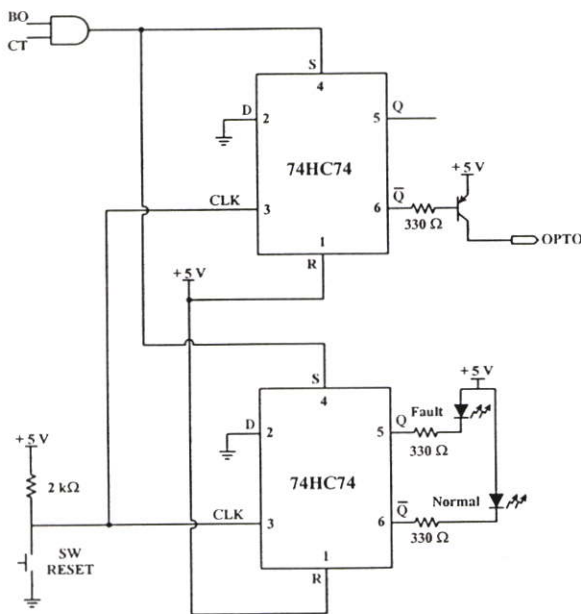
เนื่องจากการทำงานของไอจีบีทีโมดูลอาจมีการที่สวิทซ์ในกิ่งเดียวกันทำงานพร้อมกันส่งผลทำให้เกิดการลัดวงจรภายในกิ่งเดียวกันและทำให้ไอจีบีทีโมดูลกิ่งนั้นเสียหาย โดยวงจรที่ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณประวิงเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้ไอจีบีทีโมดูลในกิ่งเดียวกันเกิดการสวิทซ์พร้อมกัน โดยใช้วงจรประวิงเวลา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 สัญญาณขับเคลื่อนกิ่งบนและกิ่งล่างต้องมีค่าเวลาหน่วงกันเล็กน้อยและเวลาในการประวิงเวลานี้จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการไต่ขึ้นและการไต่ลงของอุปกรณ์สวิทซ์แต่ละประเภท ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ไอจีบีทีโมดูลควมมีค่าเวลาหน่วง $4 \mu\text{s}$



รูปที่ 4.7 วงจรสร้างช่วงการประวิงเวลา (Dead time)

4.2.5 วงจรวงจรป้องกันภาคกำลัง

วงจรป้องกันที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 โดยวงจรนี้ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายขณะที่ระบบทำงานผิดปกติ วงจรป้องกันที่ออกแบบนี้จะเป็นส่วนป้องกันที่รับสัญญาณมาจากสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นสัญญาณที่รับสัญญาณมาจากส่วนป้องกันที่สร้างสัญญาณฟอลต์จากตัวไอจีบีทีโมดูล (CT) และส่วนที่สองมาจากวงจรวงจรควบคุม (BO) โดยสัญญาณทั้งสองนี้สภาวะปกติจะมีแรงดันอยู่ที่ 15 โวลต์ แรงดันที่รับเข้ามาจะส่งไปยังวงจรแอนเกตซึ่งได้ค่าเอาท์พุทของ 74HC74 ที่นำไปขับทรานซิสเตอร์มีค่าเป็น 5 โวลต์ ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ไม่ทำงานเป็นผลให้ไม่มีแรงดัน 5 โวลต์ ที่เอาท์พุทเพื่อนำไปเลี้ยงออปได้ เพราะฉะนั้นวงจรขับเคลื่อนไม่สามารถส่งสัญญาณขับไปยังไอจีบีทีโมดูลได้



รูปที่ 4.8 วงจรวงจรป้องกันภาคกำลัง

4.3 การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณของวงจรควบคุม

เนื่องจากการประมวลผลสัญญาณของวงจรควบคุมจะต้องมีการรับสัญญาณทั้งกระแสและแรงดันจากจุดต่างๆ แล้วทำการส่งมายังตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) เพื่อนำสัญญาณเข้ามาทำการประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมภาคกำลังต่อไป ซึ่งในส่วนของการตรวจจับสัญญาณมีทั้งหมด 6 ชุด แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกใช้ในการตรวจจับสัญญาณของเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่สองใช้ในการตรวจจับสัญญาณในการเชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยแยกประเภทวงจรตรวจจับสัญญาณออกเป็น 2 ประเภท

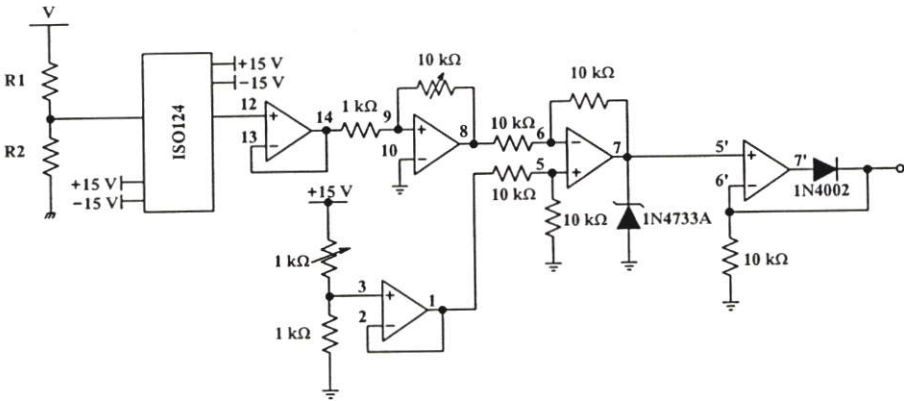
4.3.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

ในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งประเภทวงจรตรวจจับระดับแรงดันได้ 2 ประเภท คือ วงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟสลับและวงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟตรง

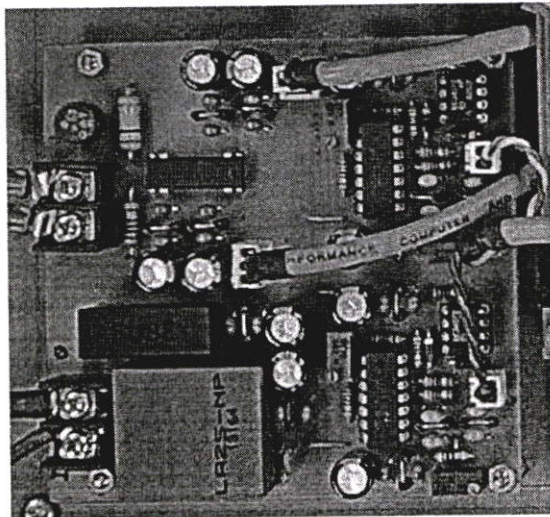
1. การตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟสลับนั้น ทำโดยการจับสัญญาณแรงดันจากการไฟฟ้าเพื่อนำสัญญาณที่ได้นี้ไปเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับส่วนการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก วงจรที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณแรงดันของวงจรควบคู่นั้นจะใช้ไอซีขยายสำหรับแยกโคด (Isolation Amplifiers) เบอร์ ISO124 เพื่อทำการแยกกราวด์จากแรงดันการไฟฟ้า โดยแรงดันที่รับเข้ามาจะมีระดับแรงดันขนาด 220 โวลต์ ซึ่งเราไม่สามารถที่จะนำระดับแรงดันขนาดนั้นมาเข้าสู่ไอซีขยายสำหรับแยกโคดได้เพราะสัญญาณอินพุตสูงสุดของไอซีขยายสำหรับแยกโคดที่สามารถรับได้จะมีค่าไม่เกิน 10 โวลต์ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทำการลดระดับแรงดันด้วยวิธีการลดทอนแรงดัน ซึ่งใช้ความต้านทานมาเป็นส่วนแบ่งของแรงดัน (Voltage Divider) เมื่อได้ระดับ

แรงดันที่เหมาะสมแล้วนำมาผ่านวงจรปรับอัตราขยายให้เหมาะสมแล้วทำการยกระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 2.5 โวลต์ จากนั้นจะส่งไปยังวงจรปรับแต่งรูปสัญญาณเพื่อให้สัญญาณที่รับเข้ามา มีระดับแรงดันเหมาะสมกับพอร์ตของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเอาท์พุทที่มีค่าเกิน 5 โวลต์ และต้องเป็นระดับสัญญาณบวกเท่านั้น โดยใช้ไดโอดในการตัดแต่งสัญญาณแล้วทำการส่งไปยังตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป รูป 4.9 แสดงวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน รูป 4.10 แสดงชุดตรวจจับสัญญาณของเครื่องต้นแบบ

2. การตรวจจับระดับแรงดันไฟตรงนั้นทำการจับสัญญาณแรงดันไฟตรง 2 จุด คือที่แรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์และแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงเพื่อนำมาใช้ในการรักษาระดับแรงดันของตัวเก็บประจุ ในส่วนของวงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟตรงนี้จะมีลักษณะเหมือนกับวงจรที่ใช้ในการตรวจจับระดับแรงดันไฟสลับ แต่ต่างกันตรงที่วงจรในส่วนนี้ไม่ต้องทำการปรับระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 2.5 โวลต์ แต่ต้องปรับระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 0 โวลต์แทน เนื่องจากในการตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟตรงนี้จะไม่มีส่วนของสัญญาณลบ โดยใช้ไดโอดในการตัดแต่งสัญญาณแล้วทำการส่งไปยังตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป



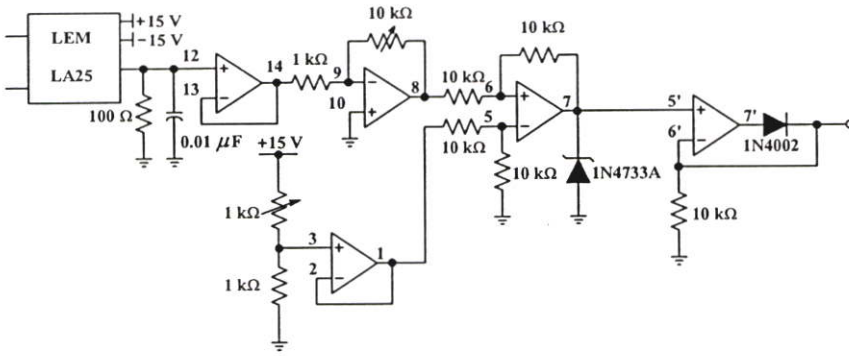
รูปที่ 4.9 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน



รูปที่ 4.10 ชุดตรวจจับสัญญาณของเครื่องต้นแบบ

4.3.2 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส

การตรวจจับสัญญาณกระแสของวงจรควบคุมนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 จุด คือ จุดแรกตรวจจับสัญญาณกระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์โพลด จุดที่สอง ส่วนการตรวจจับกระแสที่แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ จุดที่สาม ตรวจจับสัญญาณกระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์โพลดเพื่อใช้หาค่ากระแสฮาร์มอนิกของกระแสโพลด ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้พิคคของกระแสไม่เกิน 25A ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวตรวจจับกระแส LEM เบอร์ LA25-NP แล้วทำการเลือกอัตรากระแสอินพุตต่อกระแสเอาต์พุตไว้ที่ 1000:1 จากนั้นสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสจะส่งไปยังวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและปรับระดับออฟเซต ซึ่งมีลักษณะวงจรเหมือนกับวงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟสลับและไฟตรงที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแสดงไว้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส

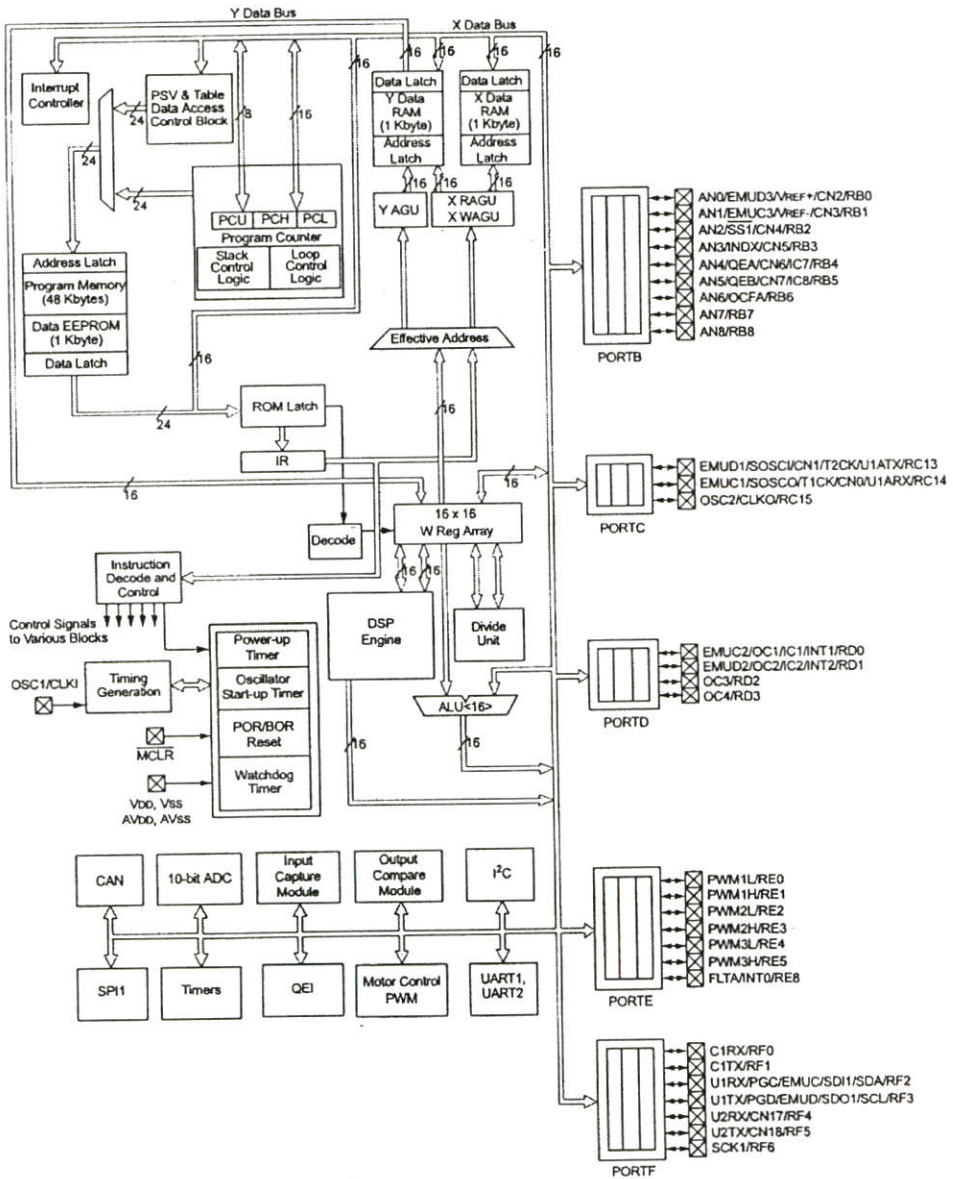
4.4 ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

ความก้าวหน้าทางด้านไมโครและอิเล็กทรอนิกส์และความต้องการใช้งานทางด้านความเร็วสูงในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ ส่งผลให้มีการพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต ที่ออกแบบสำหรับคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการความเร็วสูงหรือที่เรียกว่าตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Controller: DSC) ข้อเด่นของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล คือความเร็วของการทำงานทางคณิตศาสตร์และฟังก์ชันการทำงานแบบตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processor: DSP) รวมถึงมีฟังก์ชัน โมดูลพิเศษให้ใช้งานได้อย่างสะดวก ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ของบริษัท Microchip รุ่น DSPIC30F4011 อยู่ในตระกูล DSC Motor Control & Power Conversion ซึ่งงานวิจัยนี้ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลรุ่นนี้เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ภายในประเทศและมีคุณสมบัติโดยรวมที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้

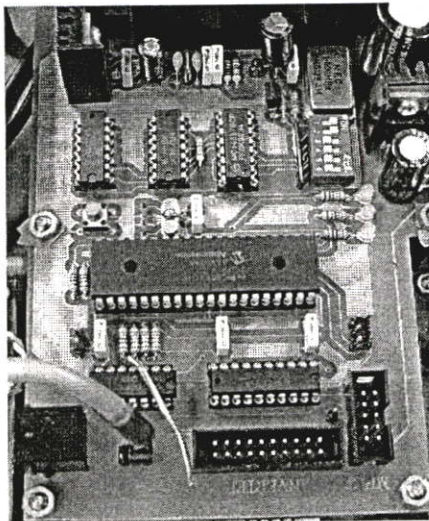
4.4.1 สถาปัตยกรรมของ DSPIC30F4011

ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเบอร์ DSPIC30F4011 ของบริษัท Microchip ผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในแวดวงนักพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ โดย Microchip Technology ได้กำหนดชื่ออย่างเป็นทางการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรมใหม่นี้ว่า Digital Signal Controller หรือ DSC นั้นหมายความว่า DSPIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่องานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูง คุณสมบัติภายในตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล DSPIC30F4011

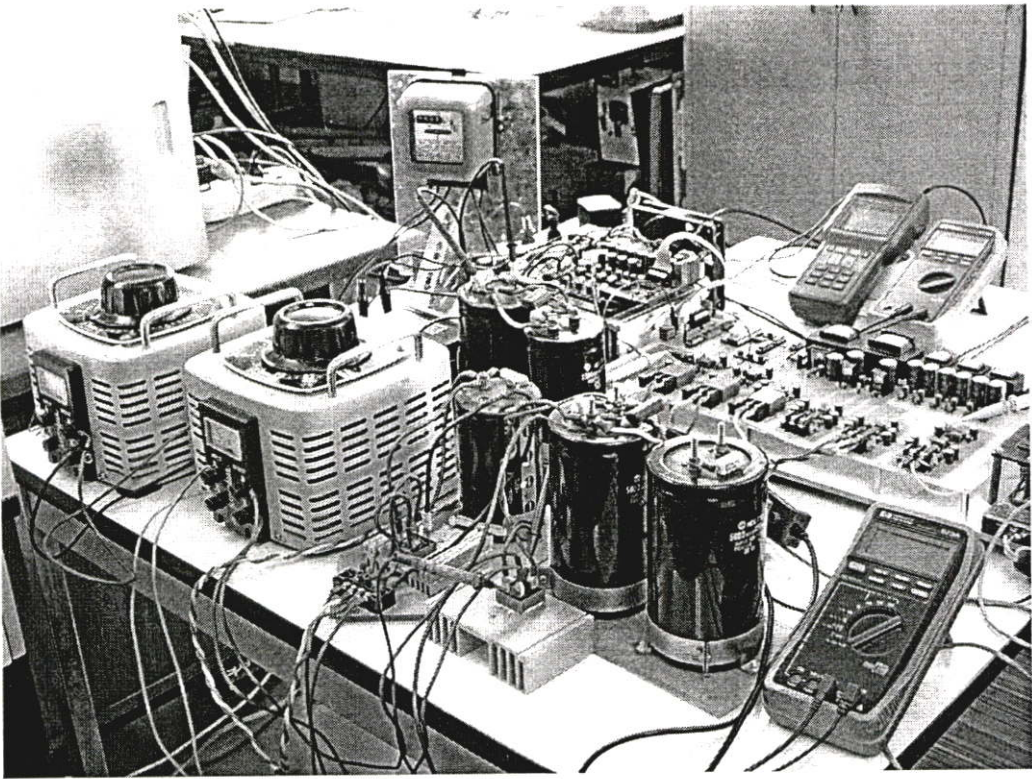
- ตัวประมวลผลเป็นแบบ RISC
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- มีแอสเซมบลีเลอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว
- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณหารเลข 17 บิต
- มีวงจรเฟตซ์ข้อมูลคู่
- มีไทม์เมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต 5 ตัว สามารถต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทม์เมอร์ 32 บิต
- มี 84 คำสั่งภาษาแอสเซมบลีมาตรฐาน
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลของมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ขนาด 48 กิโลไบต์ x 16 บิต
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ ROM ขนาด 2 กิโลไบต์ x 16 บิต
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 1 กิโลไบต์ x 16 บิต
- มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ 30 แหล่งอินเตอร์รัปต์
- มีวงจรถวายไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-อนรีเซตม เพาเวอร์อัป-ไทม์เมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท-อัปไทม์เมอร์
- มีวอตช์ดีด็อกไทม์เมอร์โปรแกรมได้
- มีวงจรถวายสองการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา
- รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม
- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้
- มีโมดูลตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณดิจิทัล
- มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์
- มีวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลความละเอียด 10 บิต
- มีโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
- มีโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดร่าเจอร์
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทั้งแบบ SPI และ I²C



รูปที่ 4.12 โครงสร้างของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล DSPIC30F4011



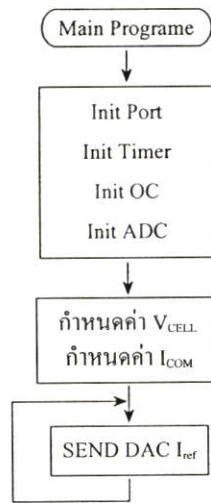
รูปที่ 4.13 ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล DSPIC30F4011 ของเครื่องต้นแบบ



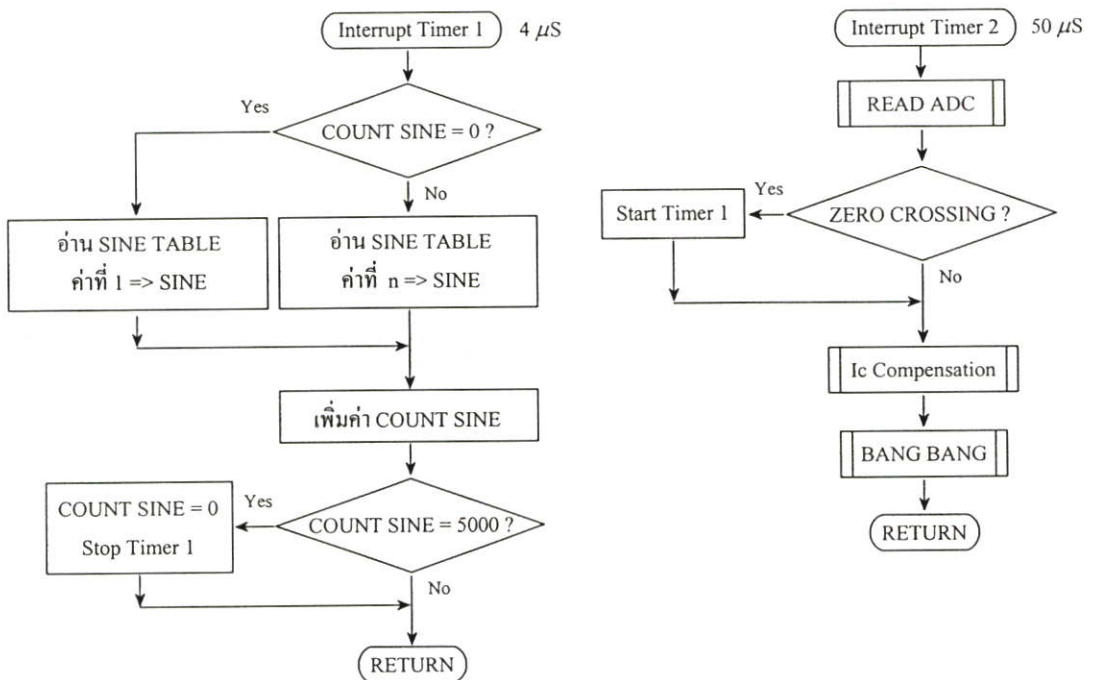
รูปที่ 4.14 เครื่องต้นแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

4.5 การออกแบบโครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุม

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งมีทั้งวงจรกำลังและวงจรการตรวจจับสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณมาให้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเพื่อประมวลผลสัญญาณควบคุมแล้วส่งสัญญาณไปควบคุมวงจรกำลังวงจรกำลังต่อไป ในการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการควบคุมการทำงานสามารถเขียนโปรแกรมได้ทั้งภาษาระดับสูง (ภาษาซี) และภาษาระดับต่ำ (แอสเซมบลี) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกภาษาระดับต่ำ เนื่องจากการเขียนโปรแกรมที่ใช้ภาษาระดับสูงเมื่อทำการแปล (Compile) มาเป็นภาษาระดับต่ำโปรแกรมที่ได้จะมีขนาดใหญ่ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จำเป็นต้องใช้เวลาในการประมวลผลให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้เพื่อให้การตอบสนองของระบบที่ดี โดยโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานทั้งหมดสามารถแสดงผลแผนผังได้ดังรูปที่ 4.15



(ก) แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลัก



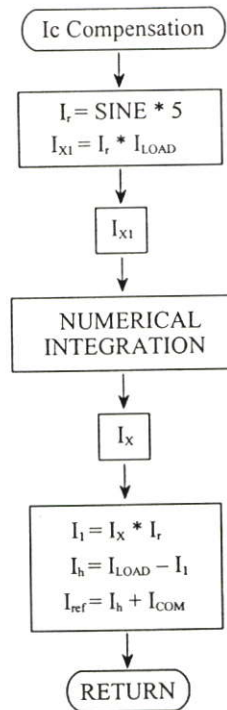
(ข) แผนผังการทำงานของโปรแกรมขัดจังหวะ

รูปที่ 4.15 โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ

จากรูปที่ 4.10 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมหลักและโปรแกรมขัดจังหวะของไทม์เมอร์ 1 และไทม์เมอร์ 2 ซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ โดยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลรับสัญญาณที่ได้จากขา A/D เข้ามาทำการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำมาประมวลผลการทำงานของระบบ ซึ่งการทำงานของระบบจำเป็นต้องซิงโครไนส์กับการไฟฟ้า โดยการเขียนโปรแกรมตรวจจับจุดผ่านศูนย์ของแรงดันการไฟฟ้าเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นการทำงานในแต่ละไซเคิล

4.5.1 โปรแกรมคำนวณหากระแสอ้างอิง (Ic Compensation)

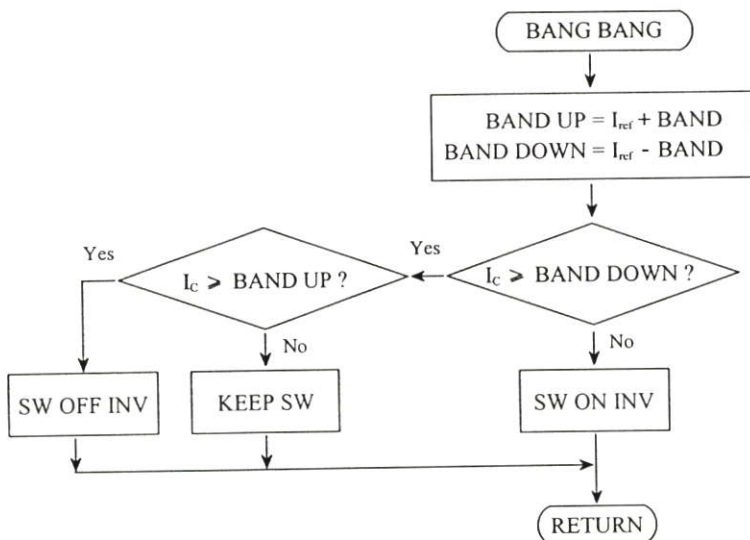
ในส่วนนี้เป็นโปรแกรมที่ทำหน้าที่คำนวณหากระแสอ้างอิงให้กับการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งจากการทำงานของระบบถูกควบคุมให้ทำงาน 2 หน้าที่ คือ การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าและกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ดังนั้น กระแสอ้างอิงจึงประกอบด้วยกัน 2 ส่วน กระแสคำสั่งในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า I_{COM} และกระแสชดเชยในการกำจัดฮาร์มอนิก I_h รูปที่ 4.16 แสดงวิธีการหากระแสอ้างอิงเพื่อส่งไปให้โปรแกรมควบคุมการสร้างกระแสต่อไป



รูปที่ 4.16 โครงสร้างโปรแกรมคำนวณหากระแสอ้างอิง (Ic Compensation)

4.5.2 โปรแกรมควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิส

ในส่วนนี้เป็นโปรแกรมที่ทำหน้าที่ในการควบคุมสร้างกระแสเพื่อนำไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดยรับกระแสอ้างอิงในการควบคุมจากโปรแกรมคำนวณหากระแสอ้างอิง ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมด้วยเทคนิคการติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส โดยการนำกระแสอ้างอิงมาสร้างขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสบน ด้วยการบวกความกว้างฮิสเตอร์รีซิสกับกระแสอ้างอิงและสร้างขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสล่างด้วยการนำกระแสอ้างอิงลบความกว้างฮิสเตอร์รีซิส รูปที่ 4.17 แสดงแผนผังโปรแกรมควบคุมการสร้างกระแส (Bang Bang) จากกระบวนการดังกล่าวจะได้สัญญาณพีคดับลิวเอ็มที่นำไปควบคุม IGBT ทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 4.17 โครงสร้างโปรแกรมควบคุมการสร้างกระแส (Bang Bang)

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ โดยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนของวงจรกำลังวงจรอินเวอร์เตอร์ ส่วนที่สองเป็นชุดควบคุมและโปรแกรมการทำงานของระบบทั้งหมดที่ถูกรวบรวมด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) ทั้งระบบ โดยรับค่าที่ได้จากวงจรตรวจจับสัญญาณมาทำการประมวลผลแล้วส่งสัญญาณไปควบคุมวงจรกำลังต่อไป

บทที่ 5

ผลการทดลองการทำงานของระบบ

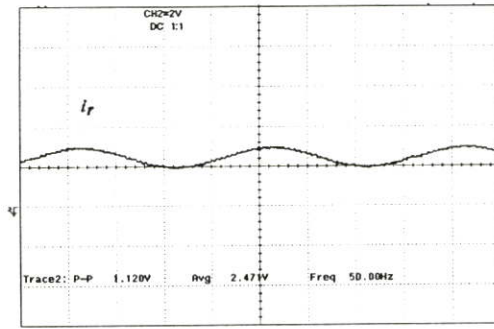
การทดลองการทำงานของระบบต้นแบบสามารถแยกพิจารณาผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบการทำงานของระบบเพื่อพิจารณาความถูกต้องของการทำงานตามที่ออกแบบไว้ในทางทฤษฎี ส่วนที่สองเป็นผลการทดลองการทำงานของวงจรกำลัง ส่วนที่สามเป็นผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีแรกเป็นการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า กรณีที่สองเป็นการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าร่วมกันจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้น ส่วนกรณีที่สามเป็นการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าร่วมกันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง ในการทดลองทั้งหมดทำเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบ

5.1 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

การตรวจสอบการทำงานของระบบเป็นสิ่งจำเป็นมากในการทดสอบระบบจริงทั้งระบบ ซึ่งเป็นการตรวจสอบการทำงานของระบบเพื่อใช้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้ และที่สำคัญในการทดสอบการทำงานของระบบคือเพื่อลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดในการทดสอบระบบจริง โดยการทดสอบการทำงานนี้จะพิจารณาทั้งในส่วนการทำงานของตัวควบคุม สัญญาณดิจิทัลและผลการทำงานของวงจรกำลัง โดยใช้แหล่งจ่ายคงที่

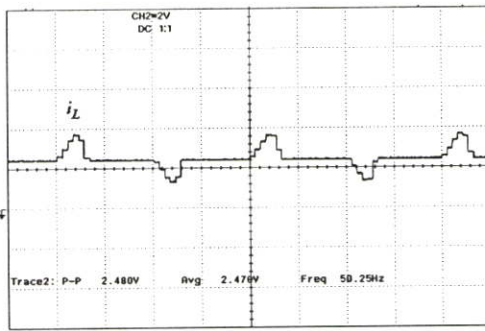
5.1.1 ผลการตรวจสอบการคำนวณหากระแสอ้างอิง

จากหลักการคำนวณหากระแสอ้างอิงที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และการออกแบบในบทที่ 4 โดยเริ่มจากการสร้างสัญญาณไซน์ขนาด 1 หน่วย 50 Hz และซิงโครไนส์กับการไฟฟ้าโดยการตรวจจับจุดผ่านศูนย์ของแรงดันการไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการเปิดข้อมูลตารางไซน์ภายในหน่วยความจำของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ข้อมูลตารางไซน์ขนาด 5,000 ข้อมูลใน 1 ไซเคิล รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณไซน์ขนาด 1 หน่วย 50 Hz โดยส่งข้อมูลผ่านวงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาลอก

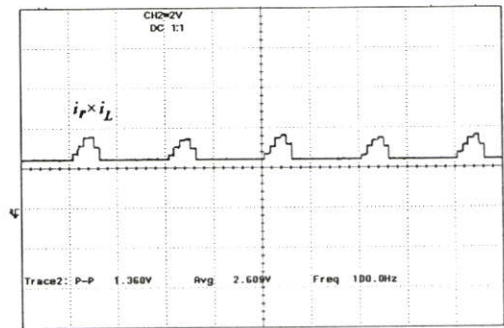


รูปที่ 5.1 สัญญาณไซน์ขนาด 1 หน่วย 50 Hz จากวงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาลอก

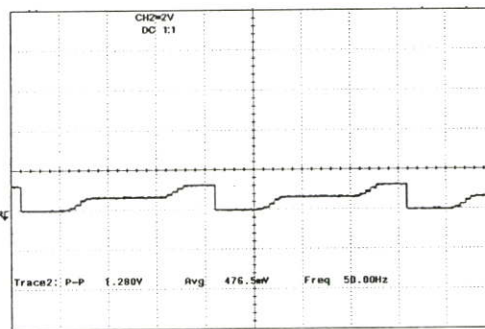
จากรูปที่ 3.14 แสดงวิธีการคำนวณหากระแสแฉ้างอิงในการควบคุมการทำงานของระบบ รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณที่จุดต่างๆ ในวิธีการคำนวณหากระแสแฉ้างอิงโดยส่งข้อมูลผ่านวงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาลอก



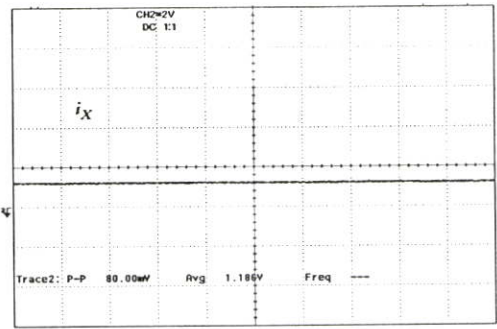
(ก) สัญญาณ i_{load}

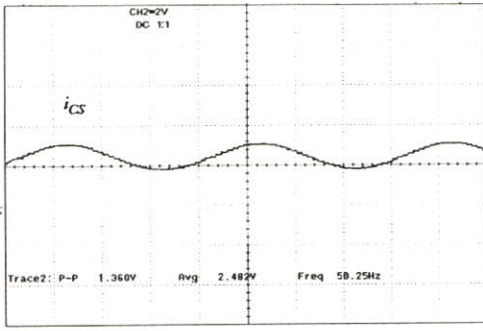


(ข) สัญญาณ $i_{load} \times i_r$

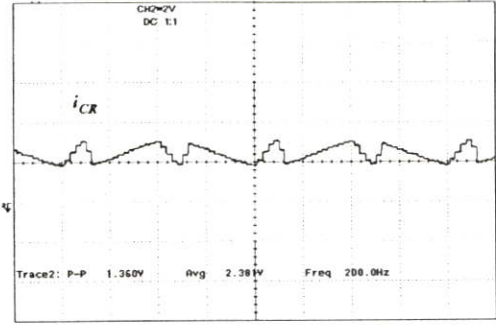


(ค) สัญญาณที่ได้จากการอินทิเกรต $i_{load} \times i_r$ (ง) สัญญาณขนาดกระแสโหลดที่ความถี่มูลฐาน

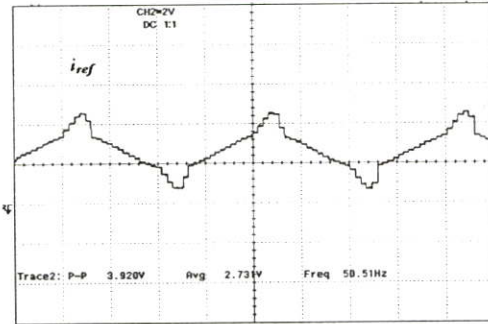




(จ) สัญญาณกระแสโพลต์ที่ความถี่มูลฐาน



(ฉ) สัญญาณกระแสฮาร์โมนิก



(ช) สัญญาณกระแสอ้างอิง

รูปที่ 5.2 สัญญาณที่จุดต่างๆ ในวิธีการคำนวณหากระแสอ้างอิง

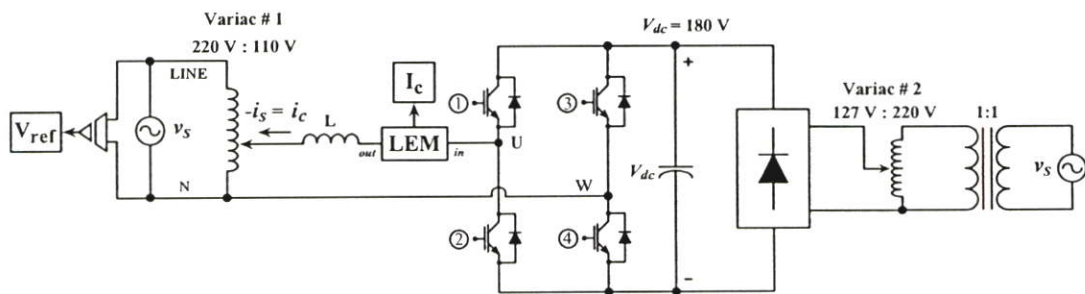
สัญญาณที่ได้จากการประมวลผลของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลในการคำนวณหากระแสอ้างอิงในรูปที่ 5.2 นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากการจำลองวิธีการคำนวณหากระแสอ้างอิงในรูปที่ 3.14 ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการคำนวณที่ถูกต้องของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

5.1.2 การทดสอบวงจรกำลัง

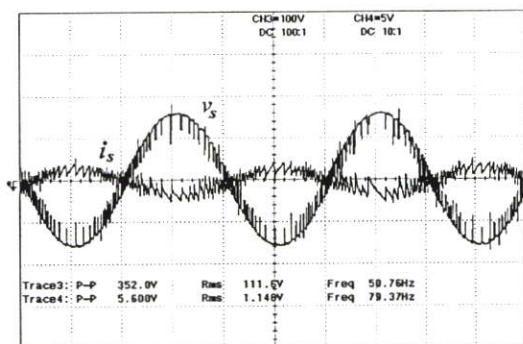
ในการทดสอบวงจรกำลังทำโดยการใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรกำลัง โดยการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้าและจ่ายโหลดร่วมกับการไฟฟ้า โหลดที่ใช้ในการทดสอบใช้โหลดโหลดเป็นเชิงเส้น (โหลดไฟ) และโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (วงจรเรียงกระแส 1 เฟส แบบเต็มคลื่น) แล้วทำการทดสอบโดยการควบคุมกระแสที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ที่ค่าต่างๆ

5.1.2.1 การทดสอบวงจรกำลังโดยการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

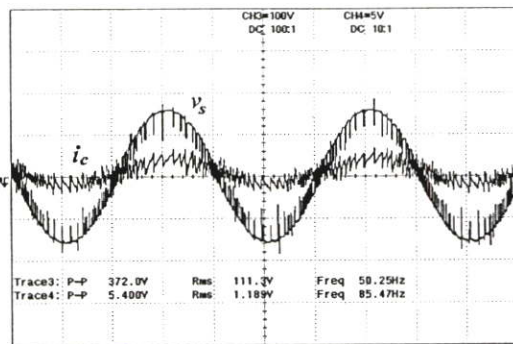
การควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้าโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ แล้วทำการทดสอบโดยการควบคุมกระแสที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ที่ค่าต่างๆ ดังนี้ $1.0 A_{rms}$, $1.5 A_{rms}$, $2.0 A_{rms}$



รูปที่ 5.3 วงจรกำลังการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

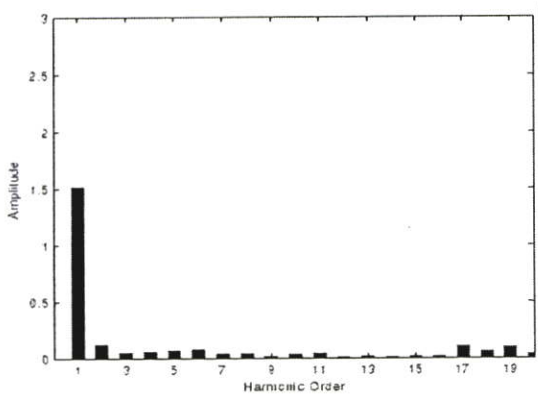


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

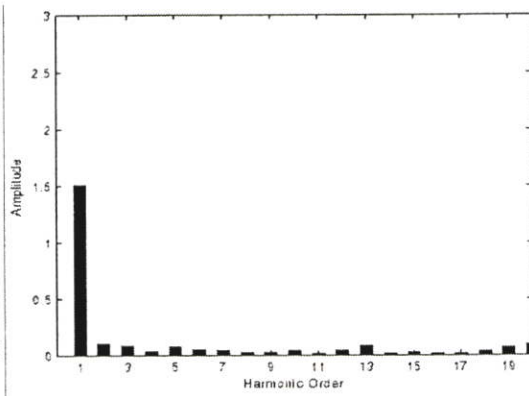


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.4 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

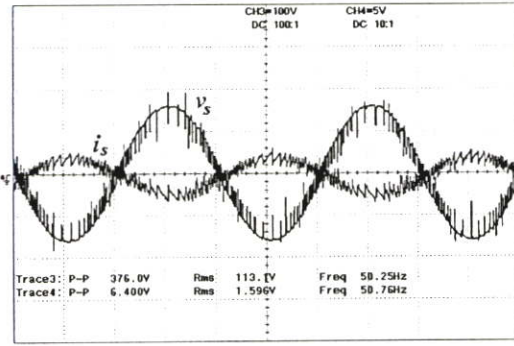
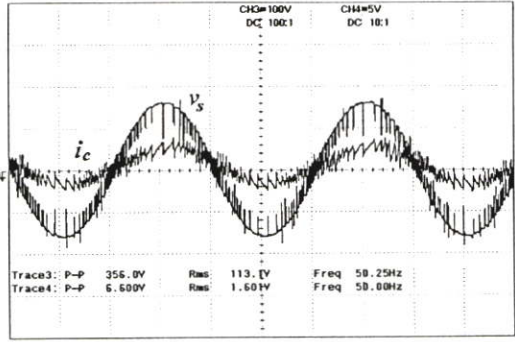


(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

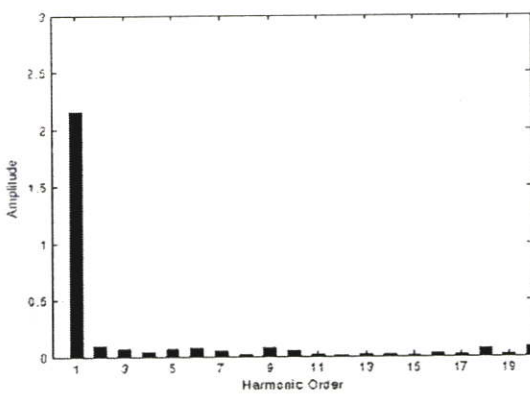
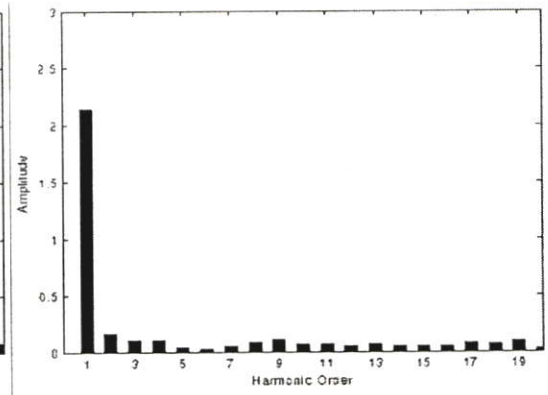


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

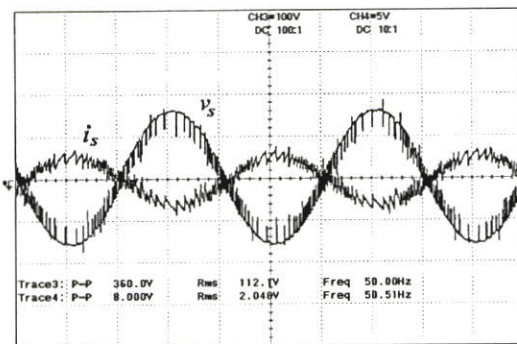
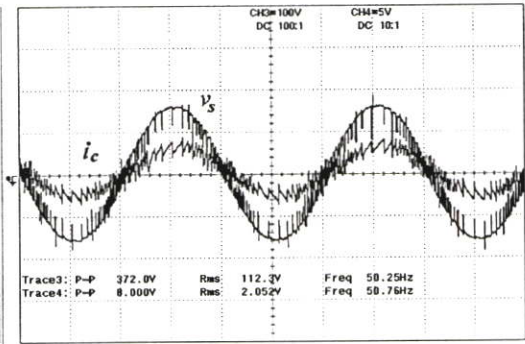
รูปที่ 5.5 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

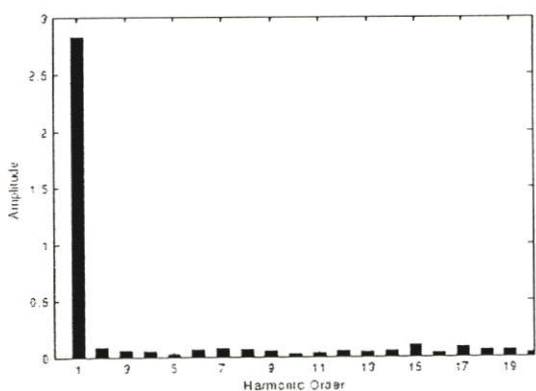
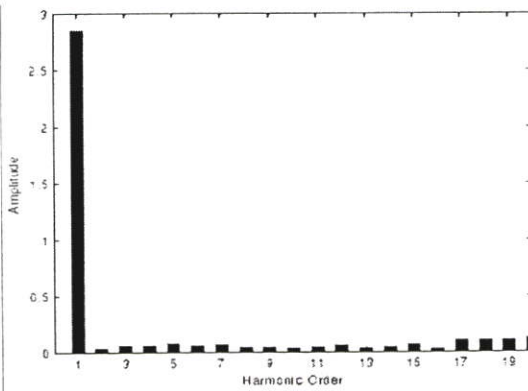
รูปที่ 5.6 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.7 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.8 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.9 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

แรงดัน $v_s=110 V_{rms}$								
$I_{L,COM}$ (A_{rms})	i_s (A_{rms})	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	P_{DC} (W)	P_S (W)	PF	DPF	η %
1.0	1.12	180	0.96	165.6	-120	0.96	0.99	72.4
1.5	1.53	180	1.25	225.7	-168	0.98	1.00	74.4
2.0	2.02	180	1.55	276	-220	0.99	1.00	79.7

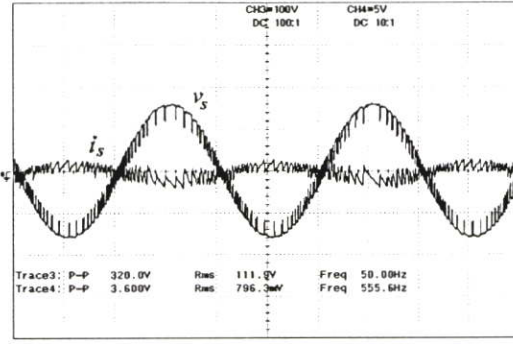
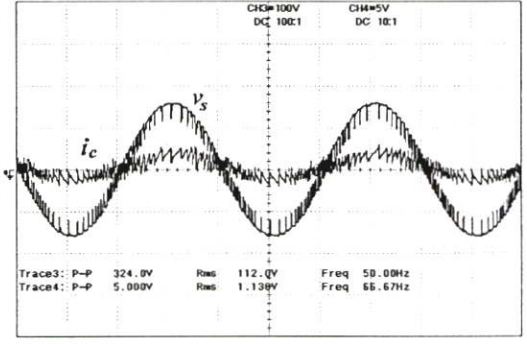
จากผลการทดลองการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์และวิธีการควบคุมกระแสคำสั่งในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อให้ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่งเสมอ

5.1.2.2 การทดสอบวงจรกำลังโดยการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดรวมกับการไฟฟ้า

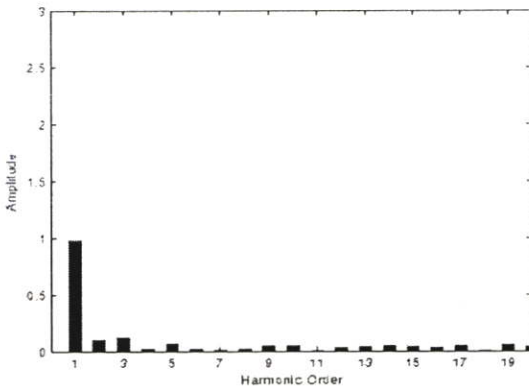
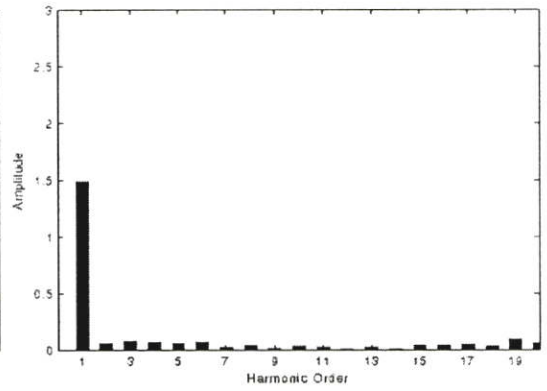
การควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดรวมกับการไฟฟ้า โหลดที่ใช้ในการทดสอบใช้โหลด โหลดเป็นเชิงเส้น (หลอดไฟ) และโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (วงจรเรียงกระแส 1 เฟส แบบเต็มคลื่น)

1. โหลดเป็นเชิงเส้น

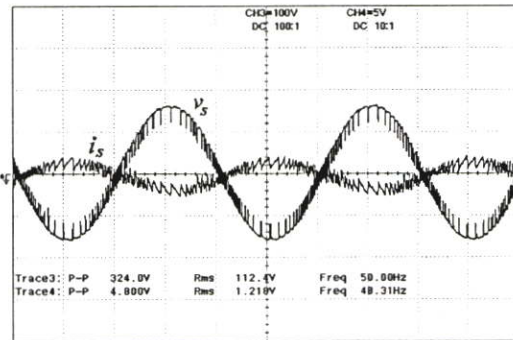
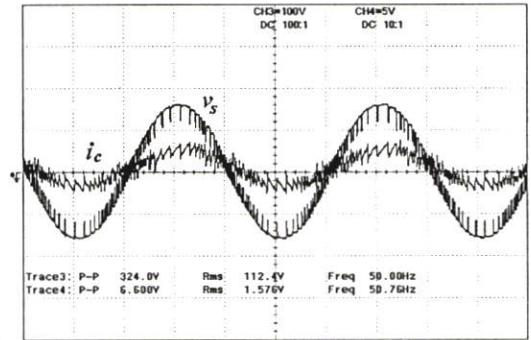
การทดสอบวงจรกำลังโดยทำการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้น (หลอดไฟ) ขนาด 50 W, 100 W, 150 W ร่วมกับการไฟฟ้า โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่แล้วทำการควบคุมกระแสคำสั่งจ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ที่ค่าต่างๆ ดังนี้ $1.0 A_{rms}$, $1.5 A_{rms}$, $2.0 A_{rms}$

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

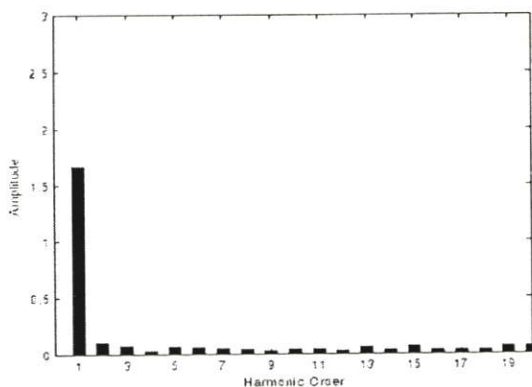
รูปที่ 5.13 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W

(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

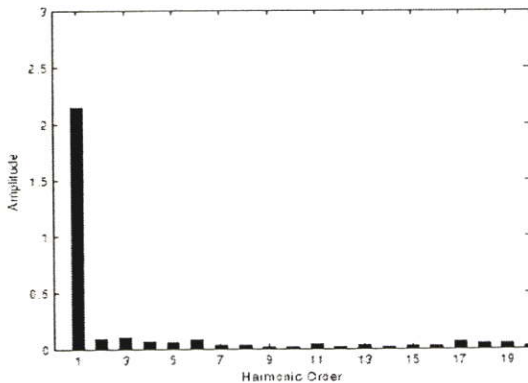
รูปที่ 5.14 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.15 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W

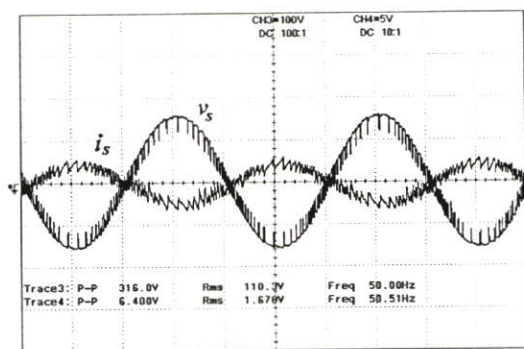


(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

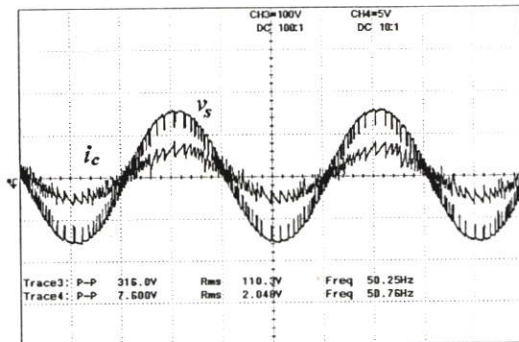


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.16 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W

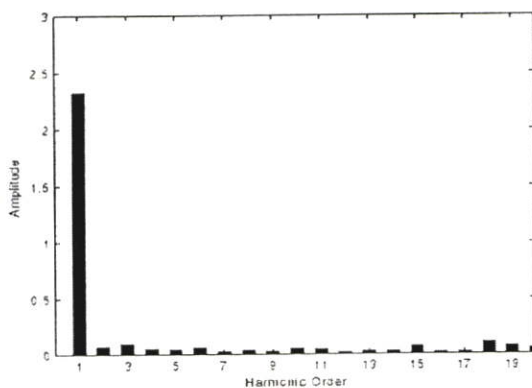


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

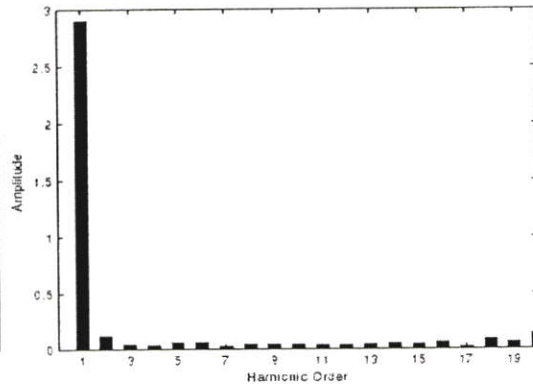


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.17 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W



(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s



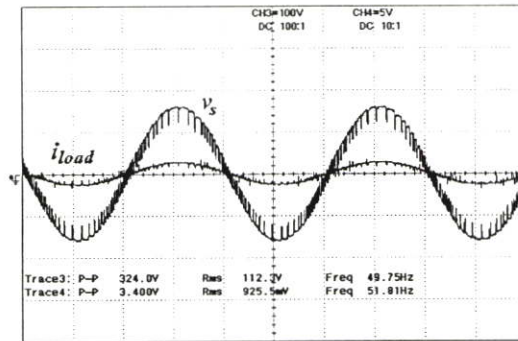
(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.18 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W

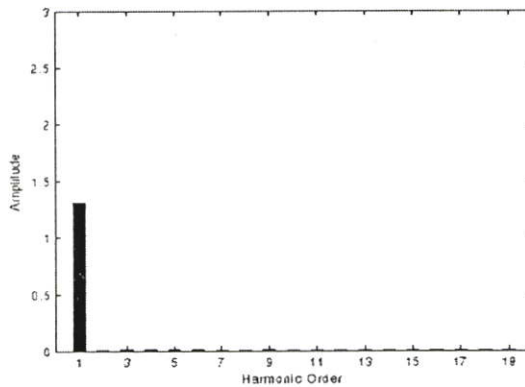
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองโดยการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W ร่วมกับการไฟฟ้า

$$P_{load} = 50 \text{ W ที่แรงดัน } v_s = 110 \text{ V}_{rms}, i_{load} = 0.454 \text{ A}_{rms}$$

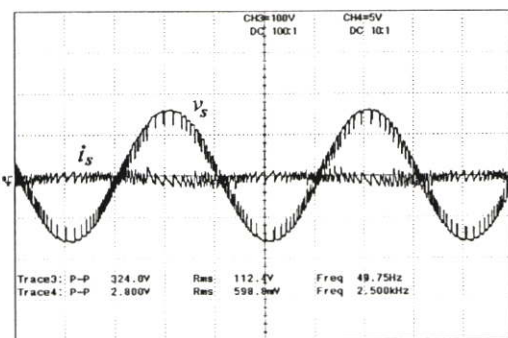
$I_{L,COM}$ (A_{rms})	i_s (A_{rms})	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	P_{DC} (W)	P_S (W)	PF	DPF	η %
1.0	-0.73	180	0.92	165.6	-72	0.89	0.99	73.6
1.5	-1.19	182	1.24	225.68	-126	0.96	0.99	77.8
2.0	-1.68	178	1.55	275.9	-182	0.98	0.99	83.7



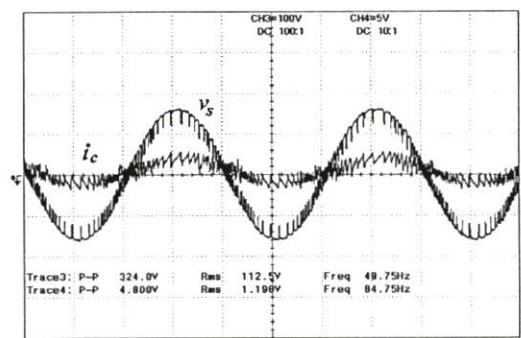
รูปที่ 5.19 สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด 100 W (5 ms/div)



รูปที่ 5.20 สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} ขนาด 100 W

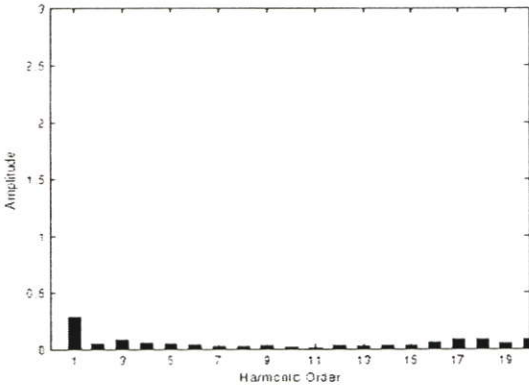


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

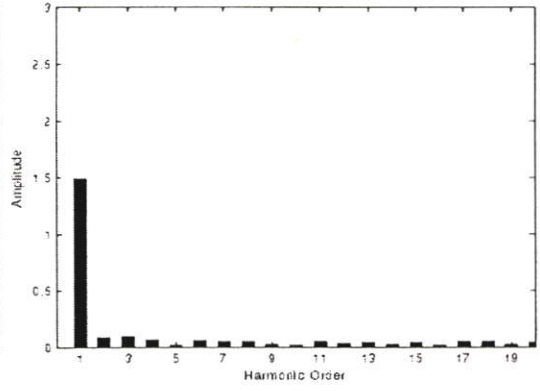


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.21 สัญญาณในการกำหนดกระแสกำลัง 1.0 A_{rms} จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

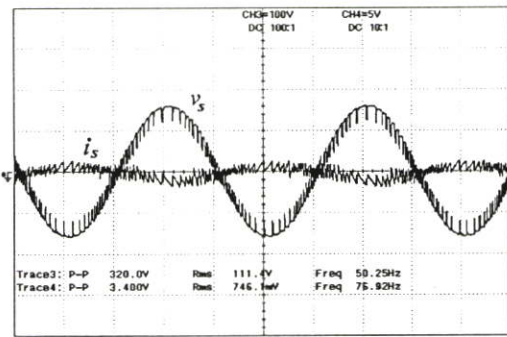


(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

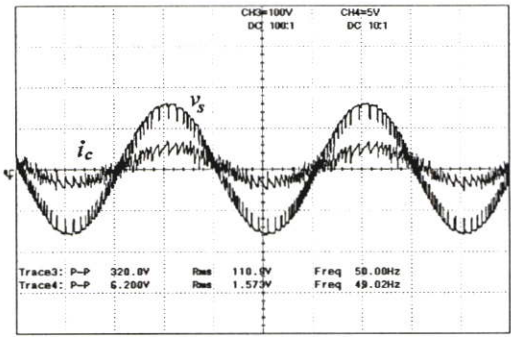


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.22 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าตั้ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

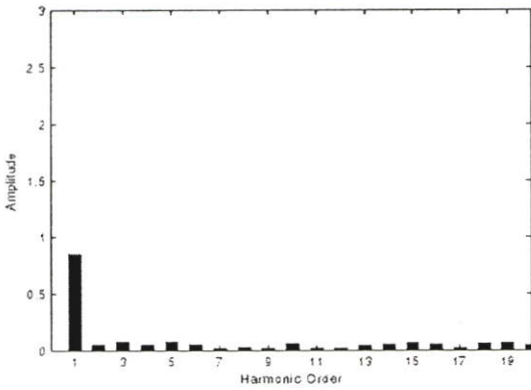


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

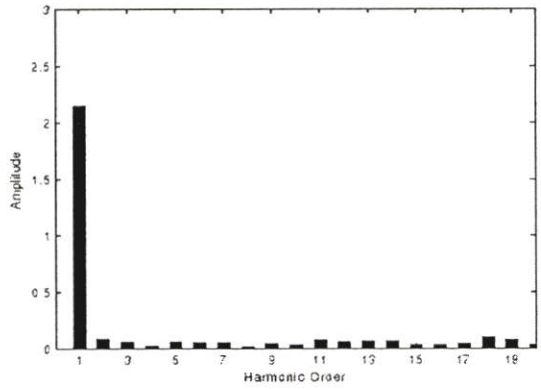


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.23 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าตั้ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

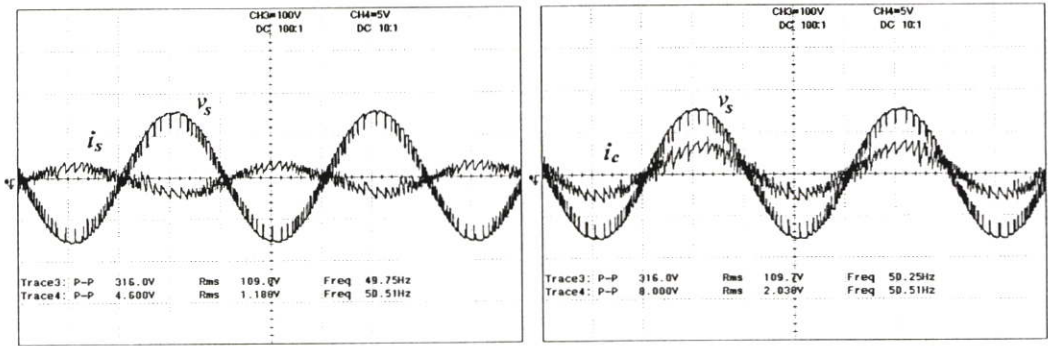


(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

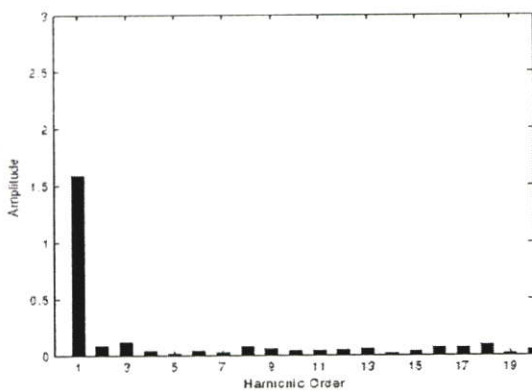
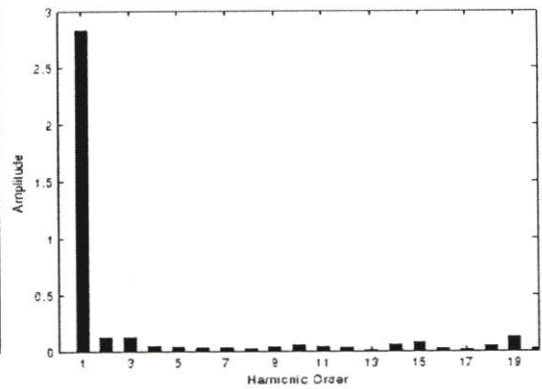


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.24 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าตั้ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

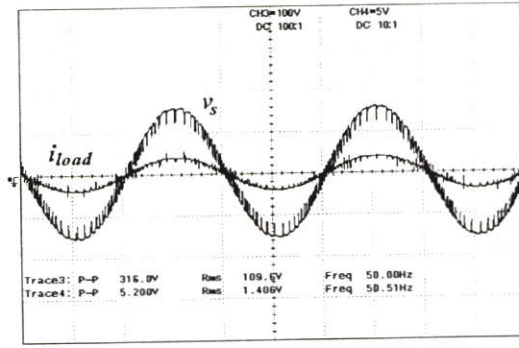
รูปที่ 5.25 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าตั้ง 2.0 A_{rms} จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

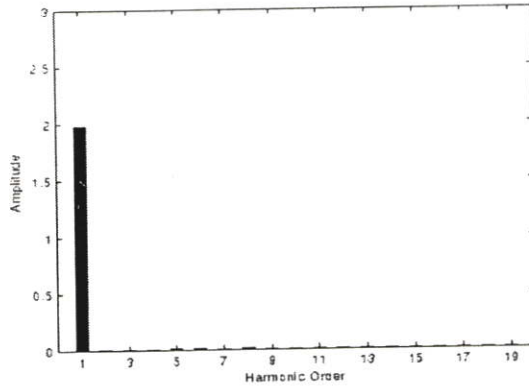
รูปที่ 5.26 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าตั้ง 2.0 A_{rms} จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองโดยการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W ร่วมกับการไฟฟ้า

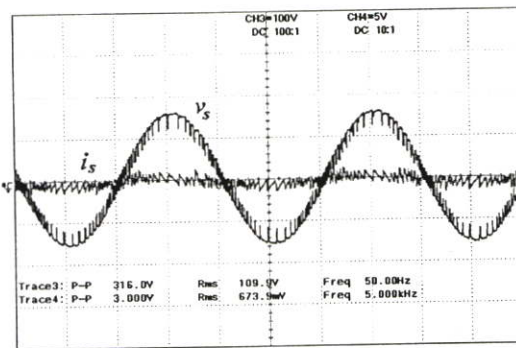
$P_{load} = 100 \text{ W}$ ที่แรงดัน $v_s = 110 \text{ V}_{rms}$, $i_{load} = 0.909 \text{ A}_{rms}$								
$I_{I,COM}$ (A _{rms})	i_s (A _{rms})	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	P_{DC} (W)	P_s (W)	PF	DPF	η %
1.0	-0.39	182	0.92	165.6	-17	0.43	0.76	70.9
1.5	-0.72	181	1.25	225.68	-70	0.89	0.95	75.3
2.0	-1.17	178	1.55	275.9	-125	0.95	0.99	81.5



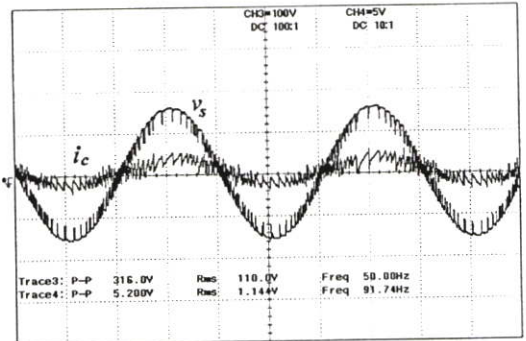
รูปที่ 5.27 สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด 150 W (5 ms/div)



รูปที่ 5.28 สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} จ่ายโหลด 150 W

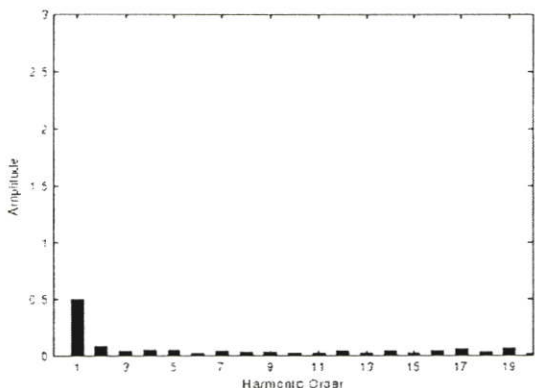


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

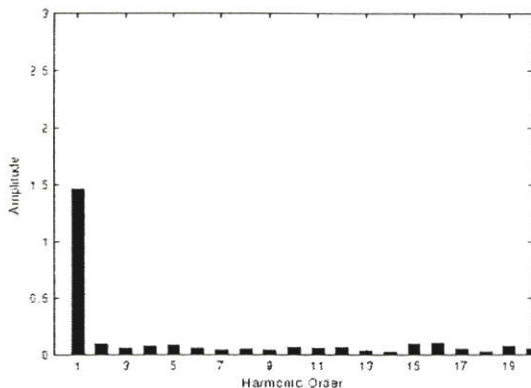


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.29 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าตั้ง 1.0 A_{rms} จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

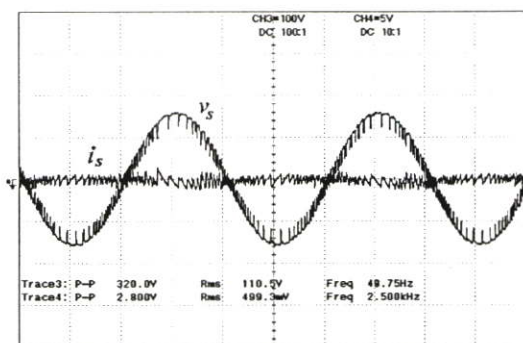


(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

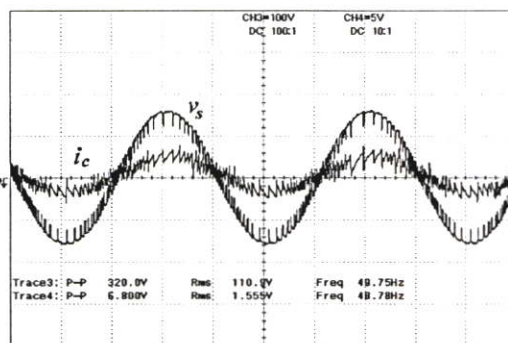


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.30 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

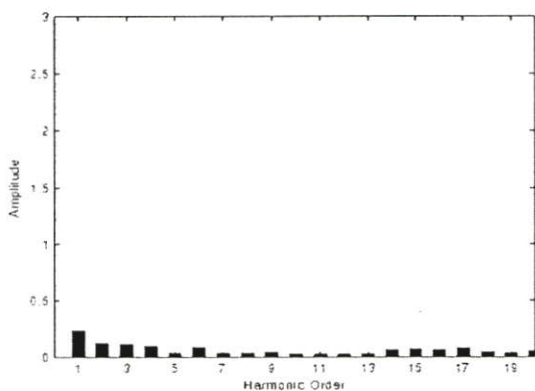


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

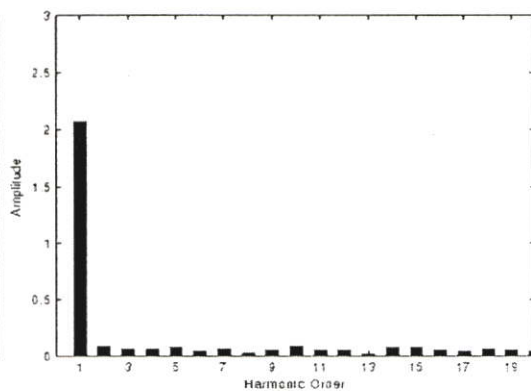


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.31 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

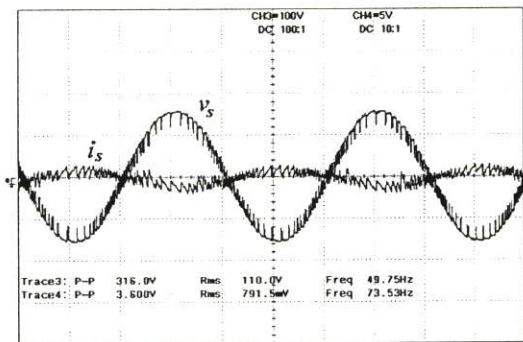


(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

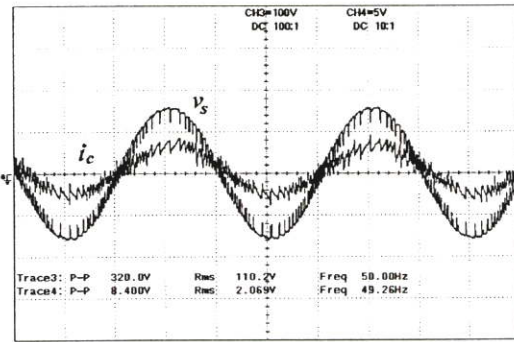


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.32 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

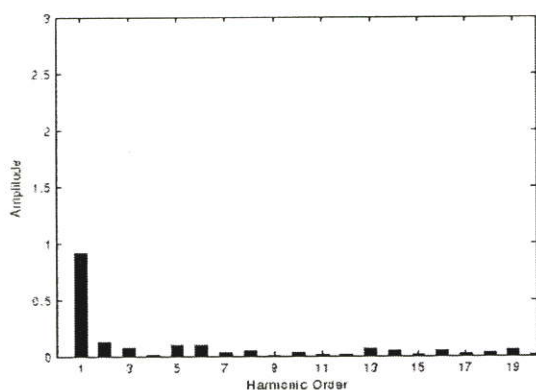


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

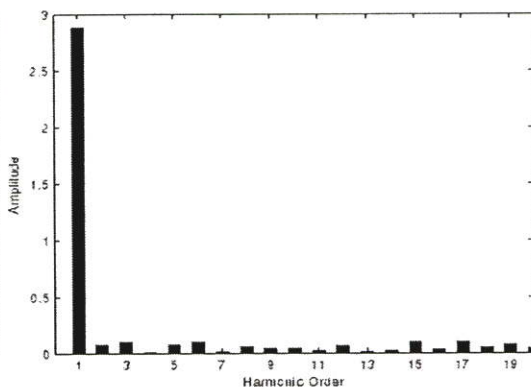


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.33 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าสั่ง 2.0 A_{rms} จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W



(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s



(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.34 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง 2.0 A_{rms} จ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองโดยการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 150 W ร่วมกับการไฟฟ้า

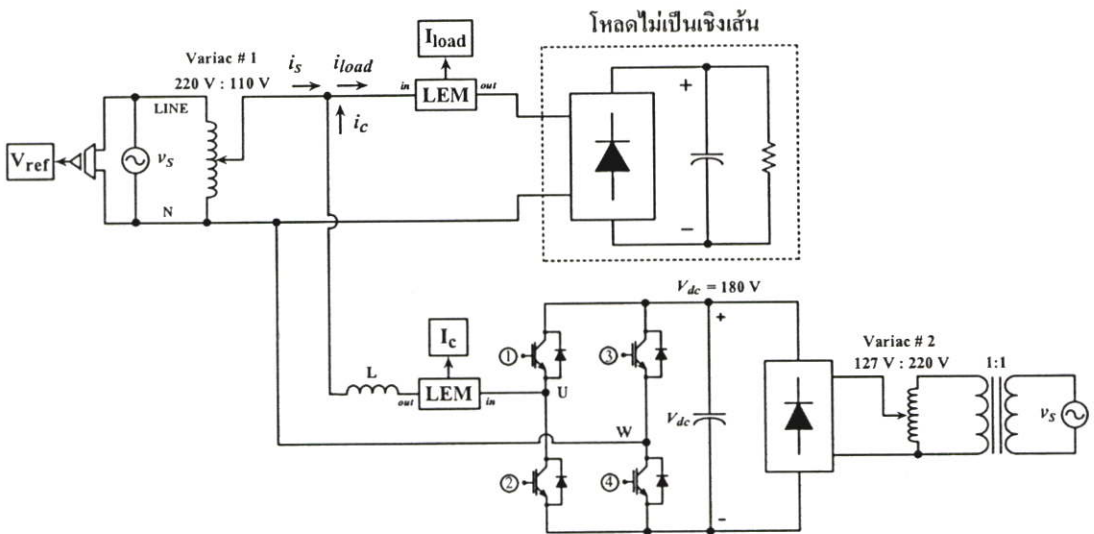
$P_{load} = 150 \text{ W}$ ที่แรงดัน $v_s = 110 \text{ V}_{rms}$, $i_{load} = 1.363 \text{ A}_{rms}$								
$I_{L,COM}$ (A_{rms})	i_s (A_{rms})	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	P_{DC} (W)	P_S (W)	PF	DPF	η %
1.0	0.50	180	0.92	165.6	44	0.78	0.94	64
1.5	-0.40	180	1.25	225.68	-17	0.40	0.55	73.9
2.0	-0.77	180	1.55	275.9	-73	0.88	0.95	80.8

จากผลการทดลองการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 50 W, 100 W, 150 W ร่วมกับการไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับการไฟฟ้า เมื่อกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์มากเกินความต้องการของโหลด กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะไหลกลับสู่การไฟฟ้า สังเกตจากรูปสัญญาณกระแส i_s มีทิศทางกลับ

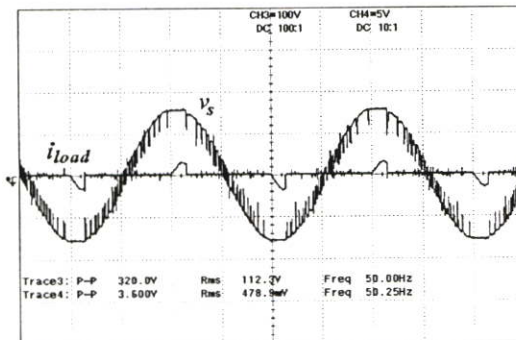
เฟสกับแรงดัน v_s (ค่าเป็นลบ) และค่ากำลังไฟฟ้า P_s มีค่าเป็นลบ โดยที่ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์ไม่เพียงพอับความต้องการของโหลด (ที่กระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลด $150 W$) สังเกตจากรูปสัญญาณกระแส i_s มีทิศทางตรงฟสกับแรงดัน v_s (ค่าเป็นบวก) ซึ่งหมายความว่ากำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าจะไหลไปจ่ายโหลดร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ โดยที่ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่งเสมอ

2. โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

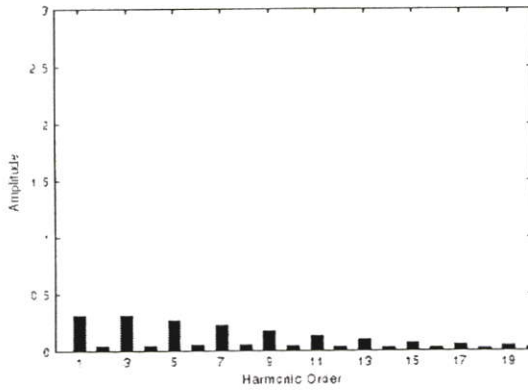
การทดสอบวงจรกำลังโดยทำการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (วงจรเรียงกระแส 1 เฟส แบบเต็มคลื่น) ขนาด $50 W$, $100 W$, $150 W$ ร่วมกับการไฟฟ้า โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่แล้วทำการควบคุมกระแสคำสั่งจ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ที่ค่าต่างๆ ดังนี้ $1.0 A_{rms}$, $1.5 A_{rms}$, $2.0 A_{rms}$



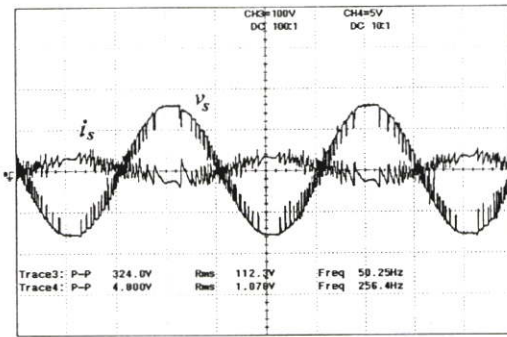
รูปที่ 5.35 วงจรกำลังการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยร่วมกันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น



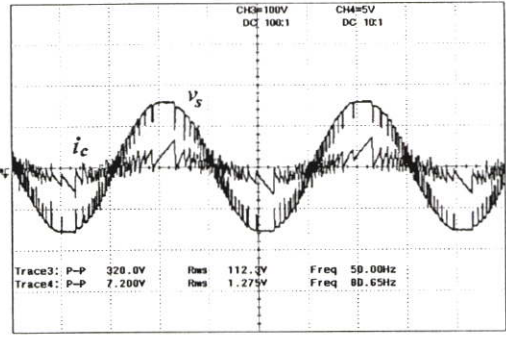
รูปที่ 5.36 สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด $50 W$ ($5 ms/div$)



รูปที่ 5.37 สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} ขนาด 50 W

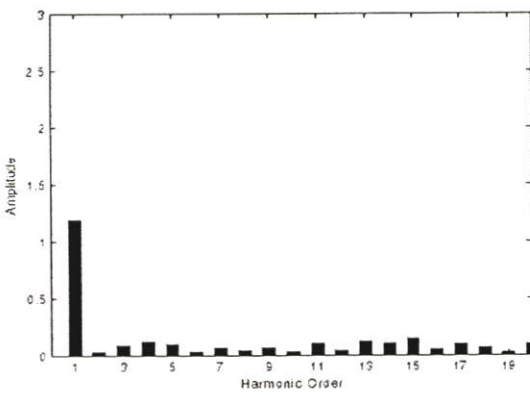


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

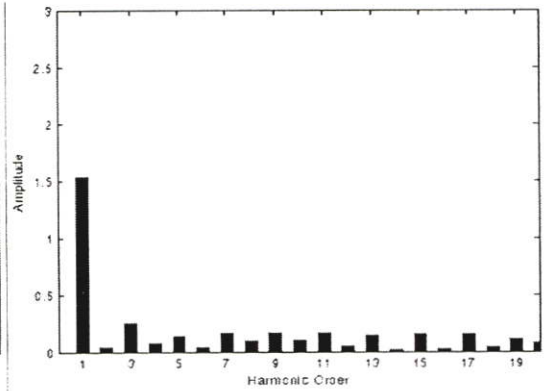


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.38 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 50 W

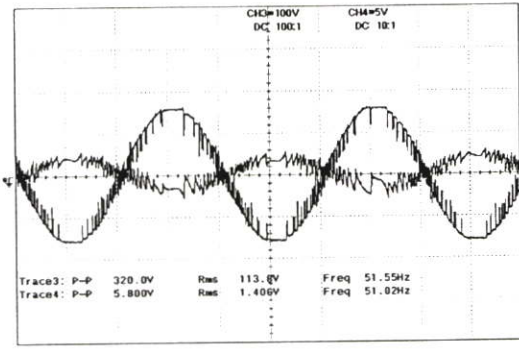
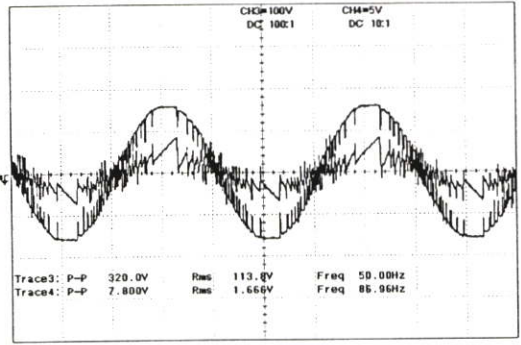


(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

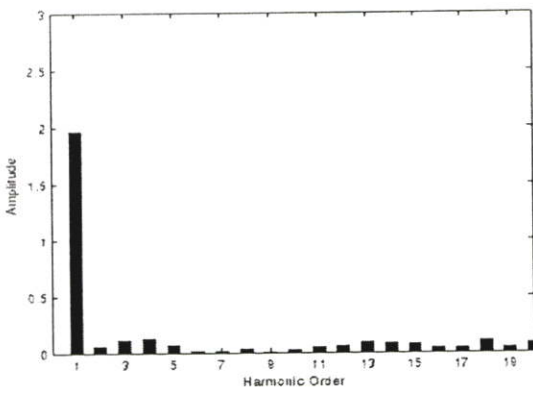
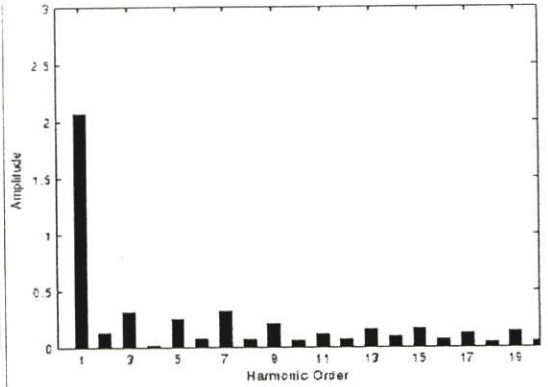


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

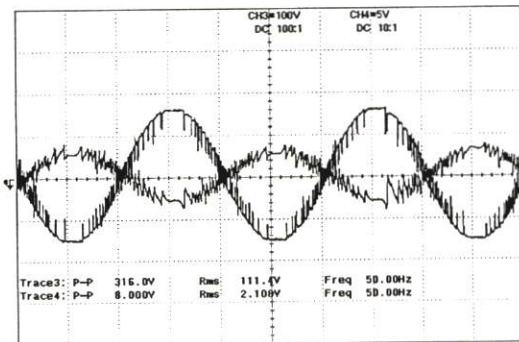
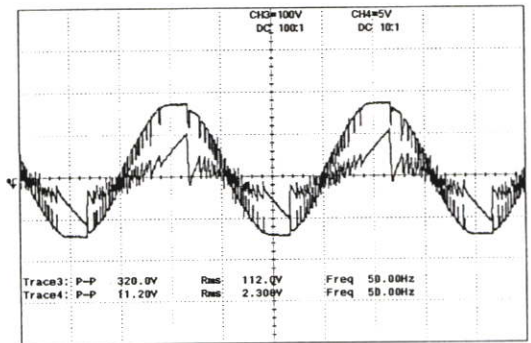
รูปที่ 5.39 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 50 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

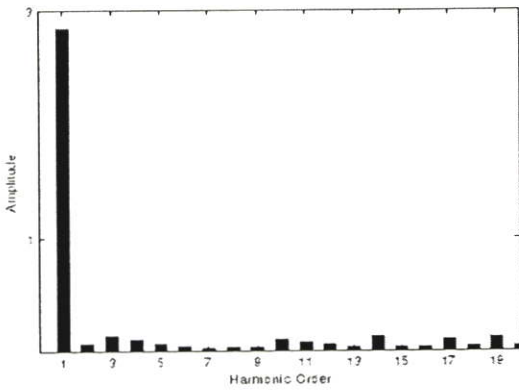
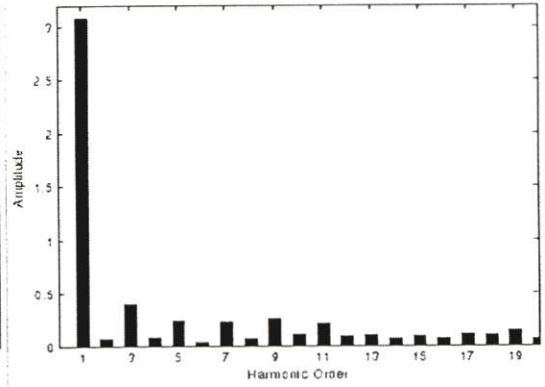
รูปที่ 5.40 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 50 W

(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.41 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 50 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

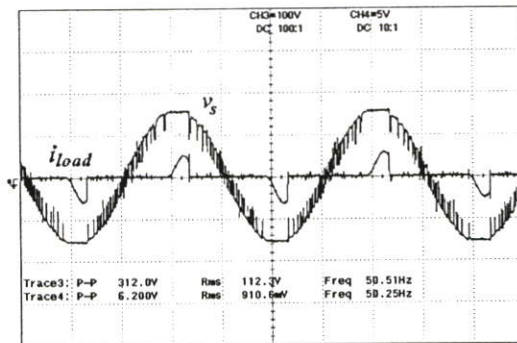
รูปที่ 5.42 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 50 W

(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

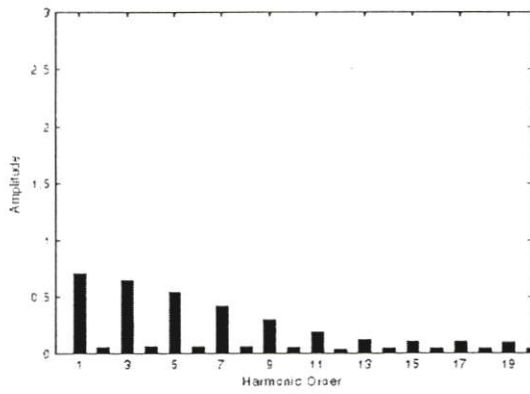
รูปที่ 5.43 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด $50 W$

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลอง โดยการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด $50 W$ ร่วมกับการไฟฟ้า

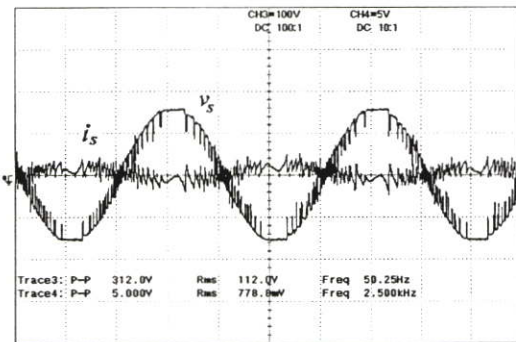
$P_{load} = 50 W$ ที่แรงดัน $v_s = 110 V_{rms}$, $i_{load} = 0.482 A_{rms}$								
$I_{I,COM}$ (A_{rms})	i_s (A_{rms})	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	P_{DC} (W)	P_S (W)	PF	DPF	η %
1.0	-0.98	180	1.06	198.8	-103	0.92	0.99	76.9
1.5	-1.25	180	1.29	232.2	-135	0.95	0.99	79.6
2.0	-1.96	180	1.82	327.6	-215	0.98	1.00	80.8



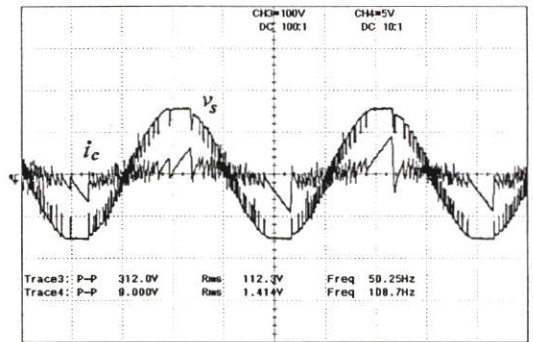
รูปที่ 5.44 สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด $100 W$ ($5 ms/div$)



รูปที่ 5.45 สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} ขนาด 100 W

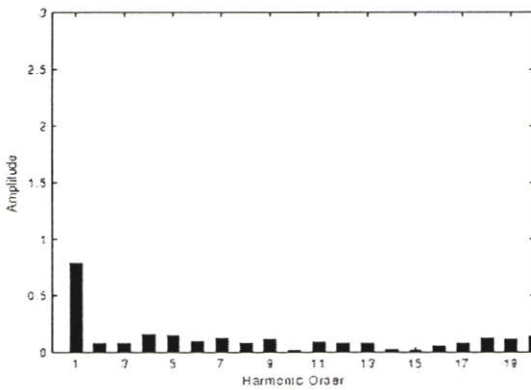


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

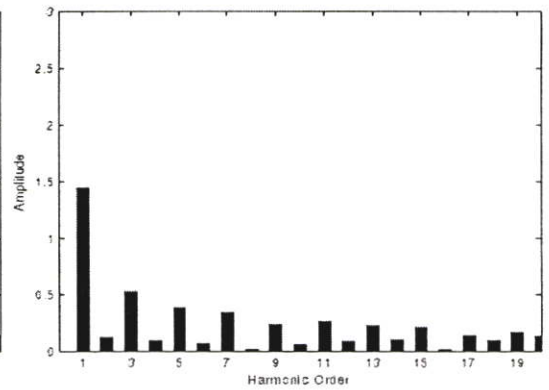


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.46 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

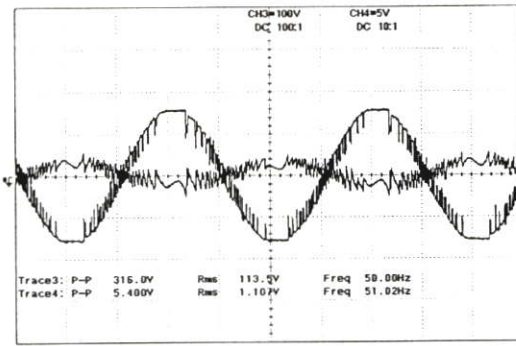
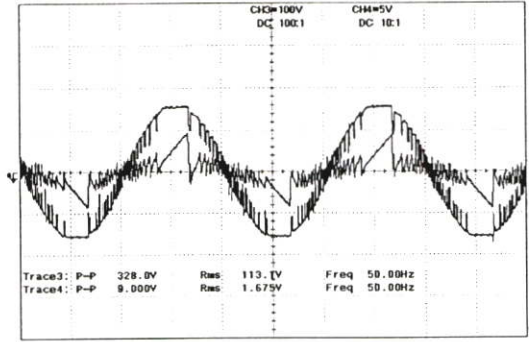


(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

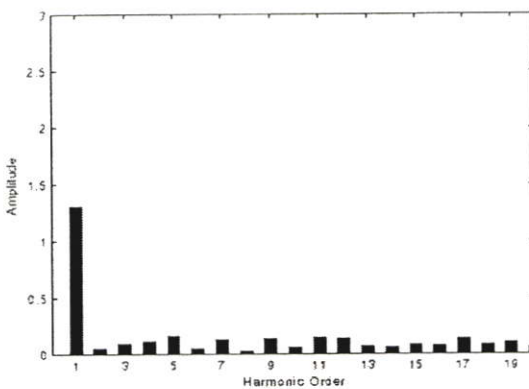
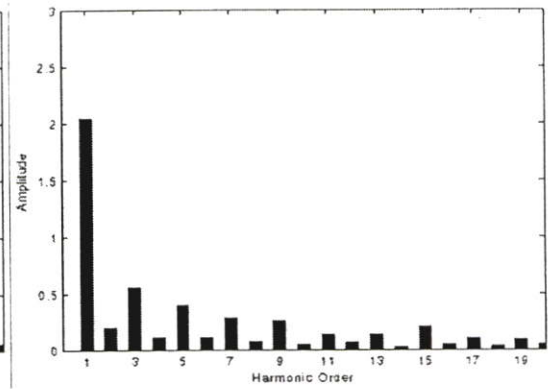


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

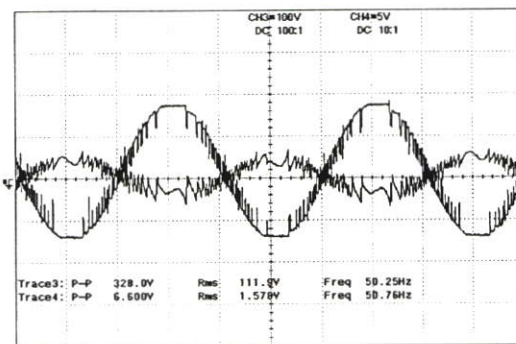
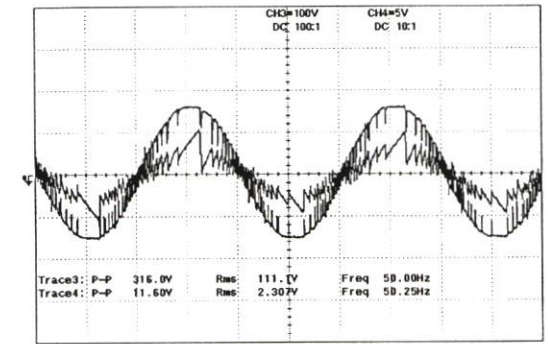
รูปที่ 5.47 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

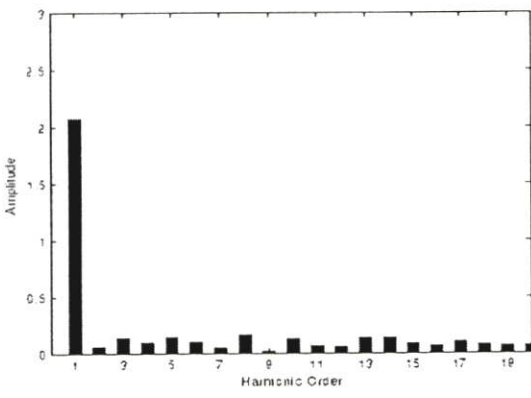
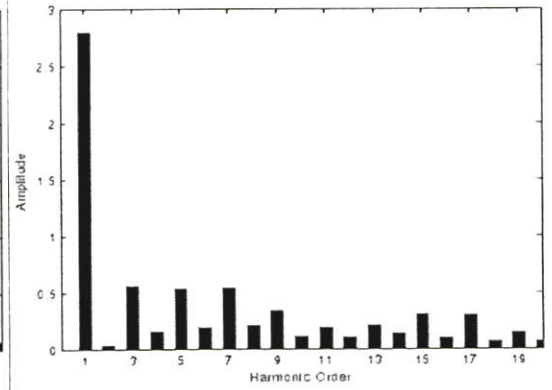
รูปที่ 5.48 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าตั้ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.49 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าตั้ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

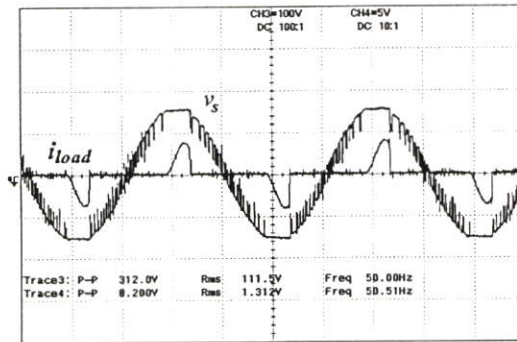
รูปที่ 5.50 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าตั้ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

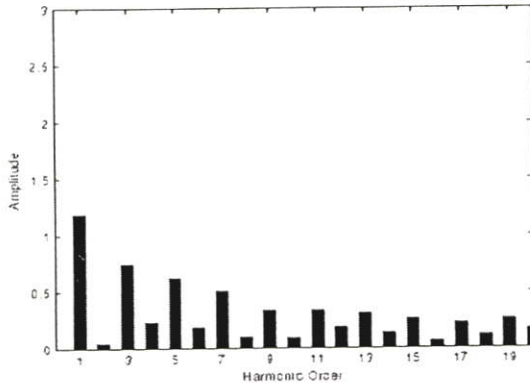
รูปที่ 5.51 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด $100 W$

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองโดยการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด $100 W$ ร่วมกับการไฟฟ้า

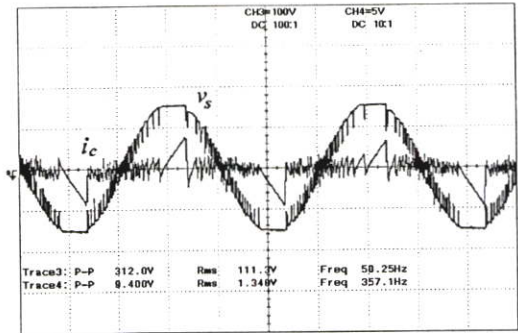
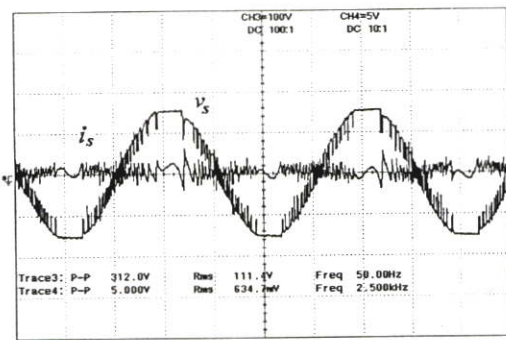
$P_{load} = 100 W$ ที่แรงดัน $v_s = 110 V_{rms}$, $i_{load} = 0.918 A_{rms}$								
$I_{L,COM}$ (A_{rms})	i_s (A_{rms})	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	P_{DC} (W)	P_S (W)	PF	DPF	η %
1.0	0.69	180	1.09	196.6	-62	0.8	0.99	82.4
1.5	0.99	180	1.31	235.8	-101	0.92	1.00	85.2
2.0	1.54	180	1.72	309.6	-173	0.96	1.00	85.6



รูปที่ 5.52 สัญญาณ v_s และ i_{load} ขนาด $150 W$ ($5 ms/div$)



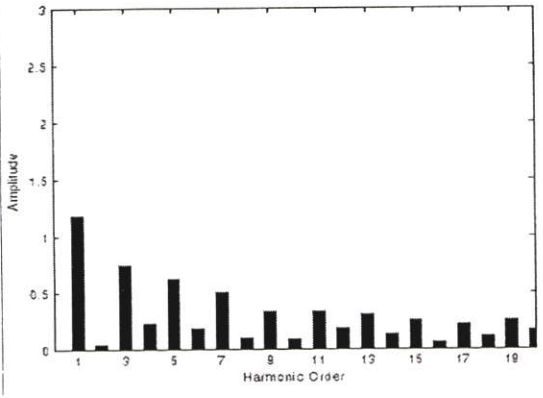
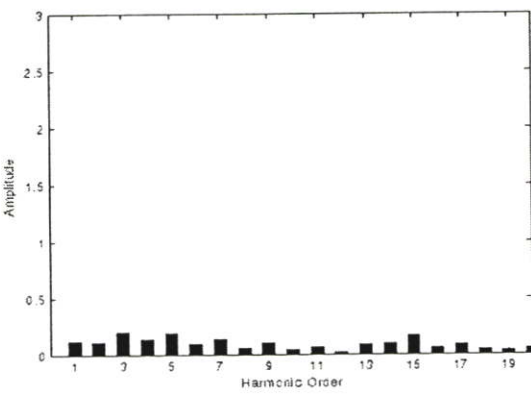
รูปที่ 5.53 สเปกตรัมของสัญญาณ i_{load} ขนาด 150 W



(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

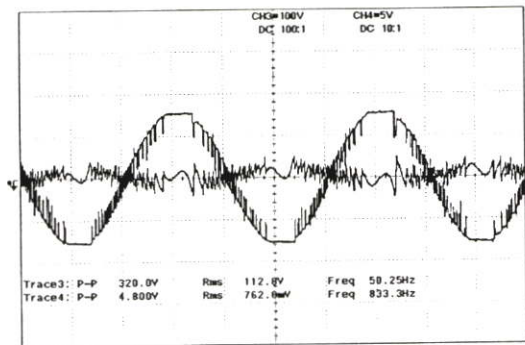
รูปที่ 5.54 สัญญาณในการกำหนดกระแสค่าตั้ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W



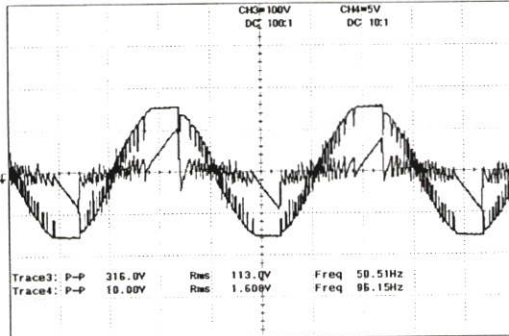
(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.55 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าตั้ง $1.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

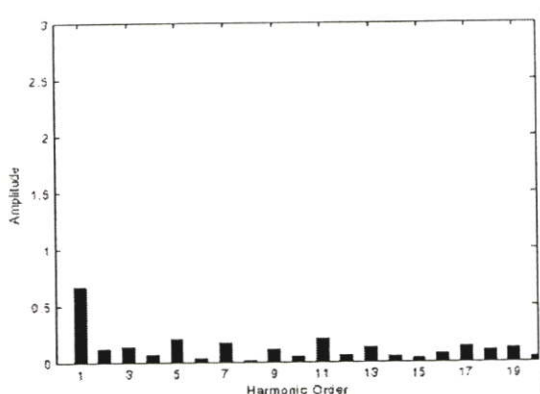


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

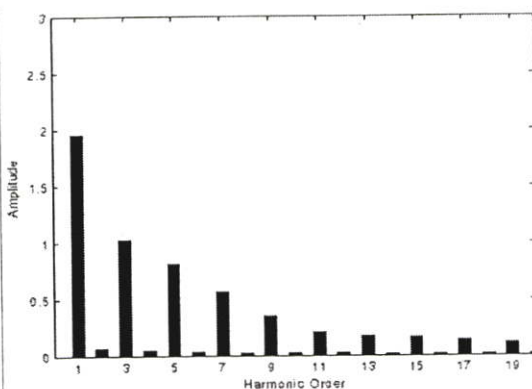


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.56 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

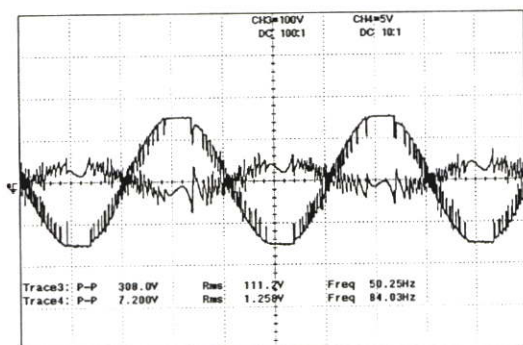


(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s

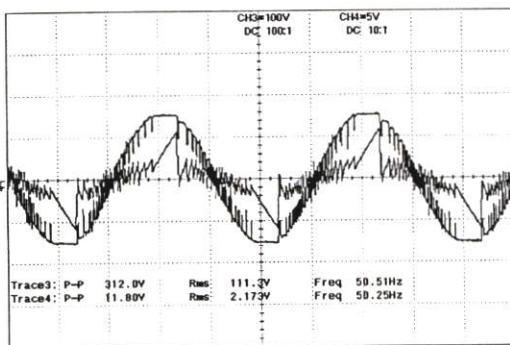


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.57 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสคำสั่ง $1.5 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

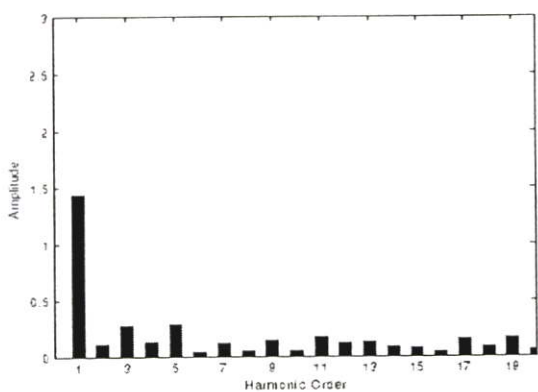
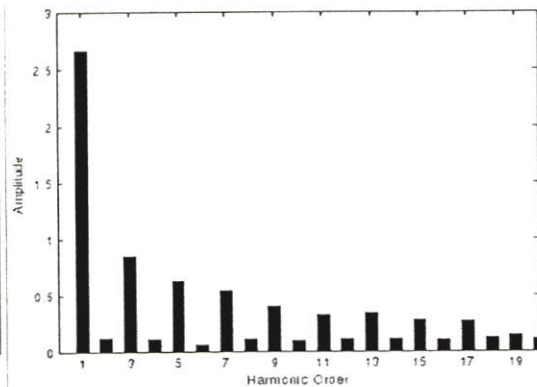


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)



(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.58 สัญญาณในการกำหนดกระแสคำสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ i_s (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ i_c

รูปที่ 5.59 สเปกตรัมในการกำหนดกระแสค่าสั่ง $2.0 A_{rms}$ จ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองโดยการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 150 W ร่วมกับการไฟฟ้า

$P_{load} = 150 \text{ W}$ ที่แรงดัน $v_s = 110 \text{ V}_{rms}$, $i_{load} = 1.352 \text{ A}_{rms}$								
$I_{I,COM}$ (A_{rms})	i_s (A_{rms})	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	P_{DC} (W)	P_S (W)	PF	DPF	η %
1.0	-0.5	180	1.02	183.6	-9	0.18	0.8	86.6
1.5	-0.66	180	1.23	221.4	-46	0.63	0.99	88.5
2.0	-1.16	180	1.68	302.4	-121	0.92	1.00	89.6

จากผลการทดลองการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 50 W, 100 W, 150 W ร่วมกับการไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับการไฟฟ้า เมื่อกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์มากเกินความต้องการของโหลด กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะไหลกลับสู่การไฟฟ้า สังเกตจากรูปสัญญาณกระแส i_s มีรูปร่างเป็นสัญญาณไซน์ที่สททางกลับเฟสกับแรงดัน v_s (ค่าเป็นลบ) และค่ากำลังไฟฟ้า P_S มีค่าเป็นลบ โดยที่ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง จากรูปสเปกตรัมของสัญญาณกระแส i_s , i_c และ i_{load} พิจารณาที่ความถี่มูลฐานพบว่าขนาดของกระแส i_c จะเท่ากับขนาดกระแส i_s รวมกับกระแส i_{load} ส่วนที่ความถี่ฮาร์โมนิคต่างๆ ของกระแส i_{load} จะถูกจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์เท่านั้น ส่งผลให้กระแส i_s มีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งเสมอ

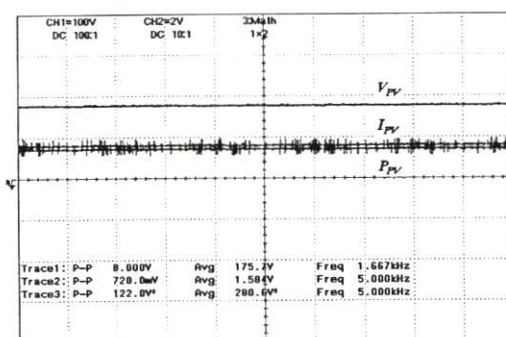
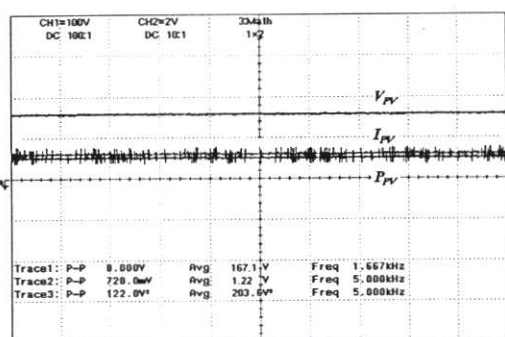
5.2 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า

ในการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า ทำโดยการทดลองในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณความเข้มแสงที่ระดับต่างๆ และส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าที่ระดับต่างๆ แล้วทำการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการ

ไฟฟ้าและจ่ายโหลดควบคู่กับการไฟฟ้า โหลดที่ใช้ในการทดลองใช้โหลดโหลดเป็นเชิงเส้น (โหลดไฟ) และโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (วงจรรีจกกระแส 1 เฟส แบบเต็มคลื่น)

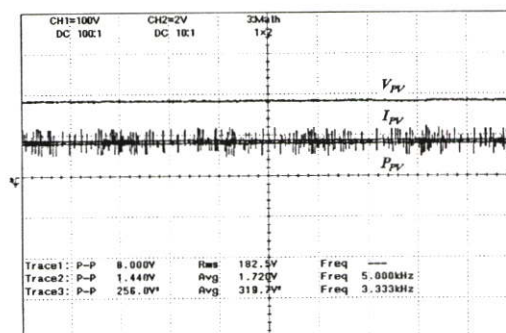
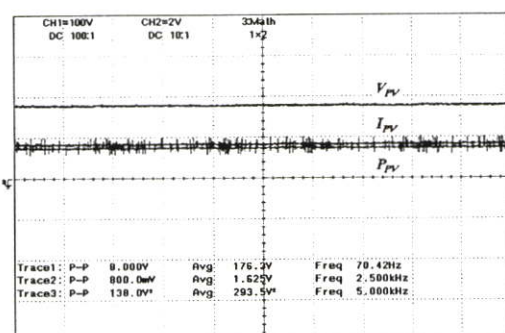
ตารางที่ 5.8 กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา

เวลา	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)
11.00	213	1.8	167.1	1.22	203
11.30	227	2.2	175.7	1.54	280
12.00	226	2.36	176.3	1.625	293
12.30	226	2.4	182.5	1.72	319
13.00	228	2.43	179.4	1.75	317
13.30	209	1.4	191	0.83	164
14.00	230	2.39	181	1.7	307



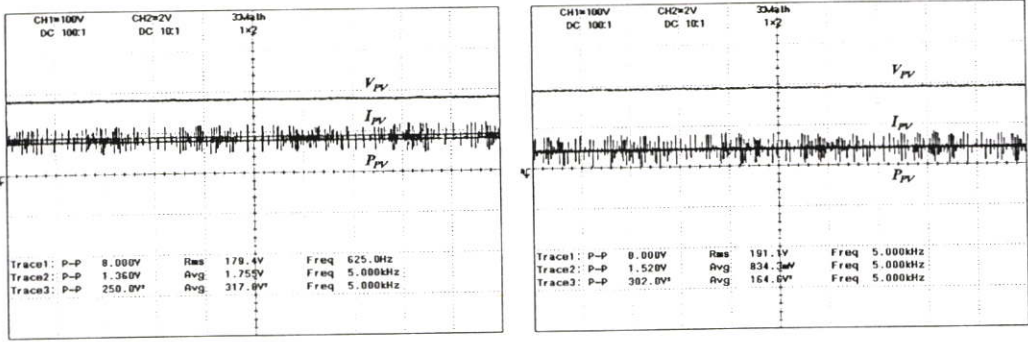
(ก) สัญญาณ V_{PV} , I_{PV} และ P_{PV} เวลา 11:00 น.

(ข) สัญญาณ V_{PV} , I_{PV} และ P_{PV} เวลา 11:30 น.

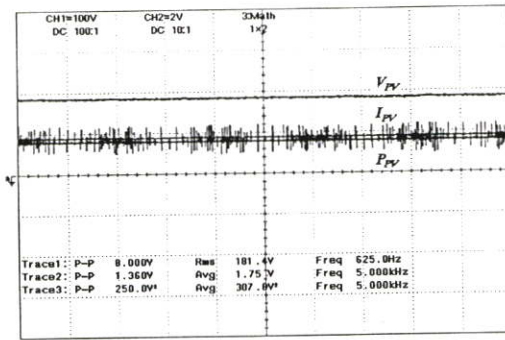


(ค) สัญญาณ V_{PV} , I_{PV} และ P_{PV} เวลา 12:00 น.

(ง) สัญญาณ V_{PV} , I_{PV} และ P_{PV} เวลา 12:30 น.



(จ) สัญญาณ V_{pv} , I_{pv} และ P_{pv} เวลา 13:00 น. (ฉ) สัญญาณ V_{pv} , I_{pv} และ P_{pv} เวลา 13:30 น.

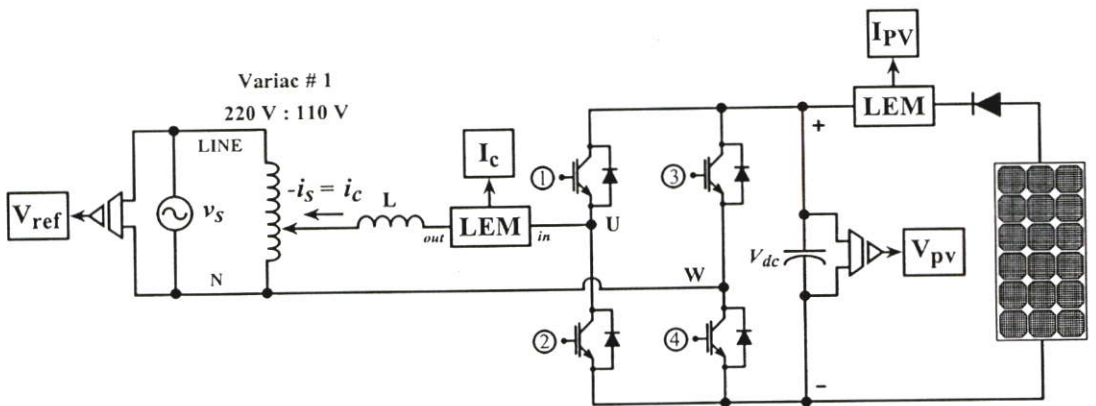


(ช) สัญญาณ V_{pv} , I_{pv} และ P_{pv} เวลา 14:00 น.

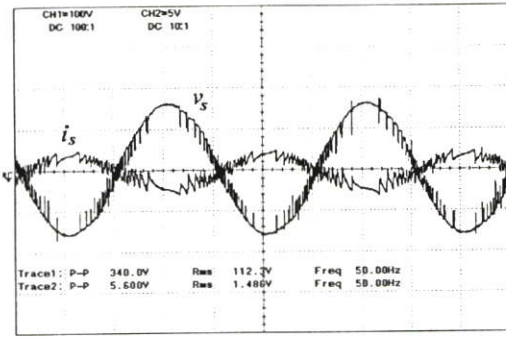
รูปที่ 5.60 สัญญาณ V_{pv} , I_{pv} และ P_{pv} ในแต่ละช่วงเวลา

5.2.1 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

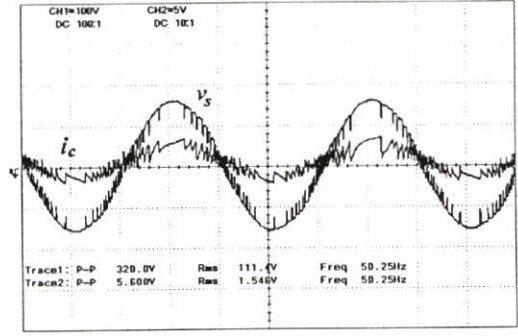
การทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยทำการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า ทำโดยการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหากระแสคำสั่งในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.61 ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยทำการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

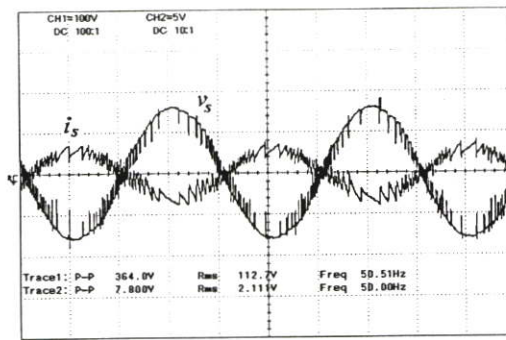


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

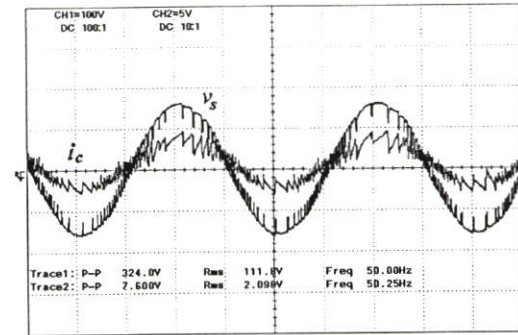


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.62 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 11:00 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

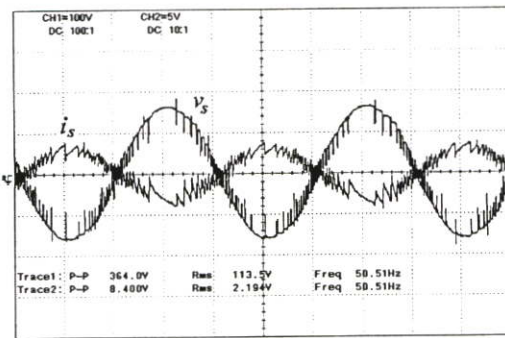


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

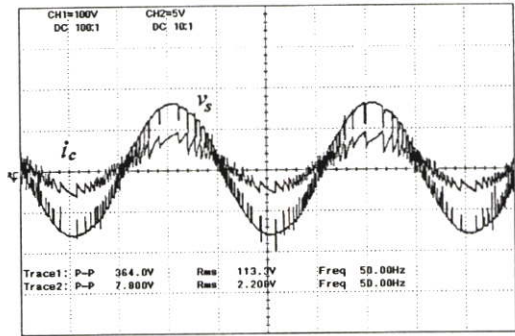


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.63 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 11:30 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

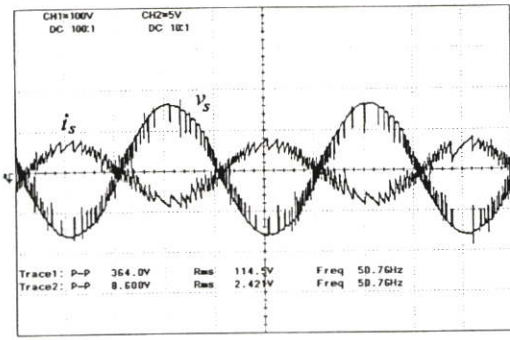


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

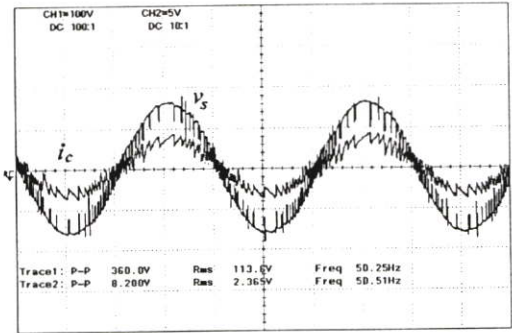


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.64 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 12:00 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

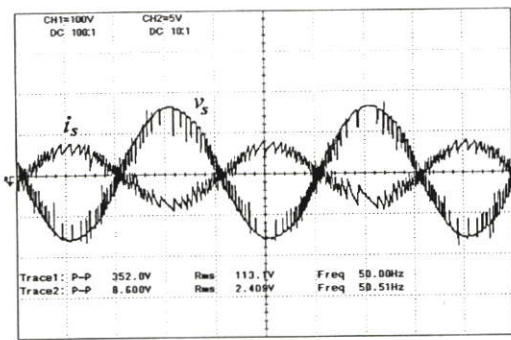


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

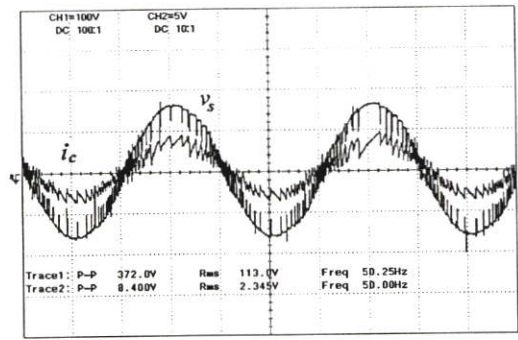


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.65 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 12:30 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

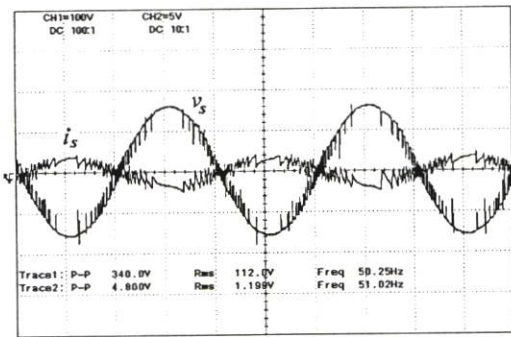


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

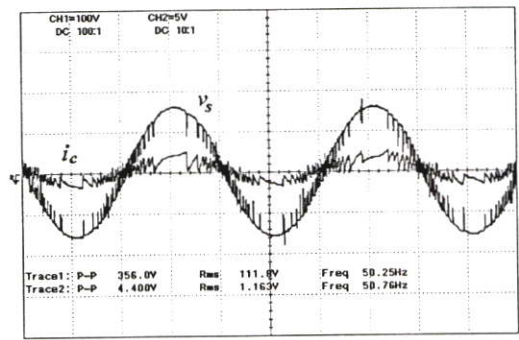


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.66 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 13:00 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

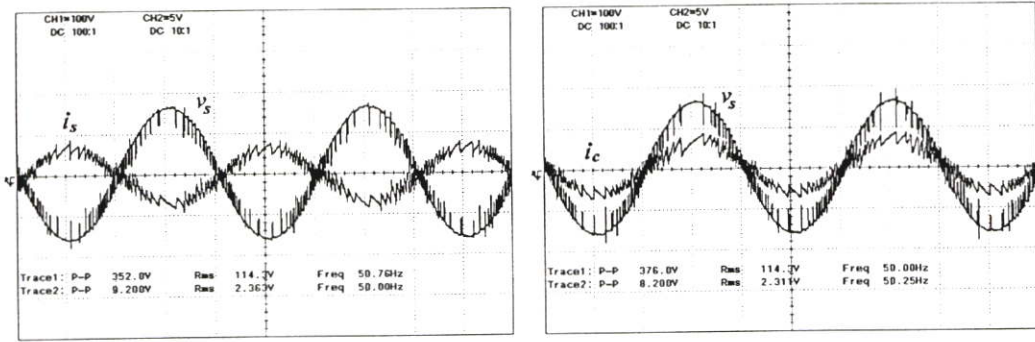


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)



(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.67 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 13:30 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(จ) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.68 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 14:00 น. ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า

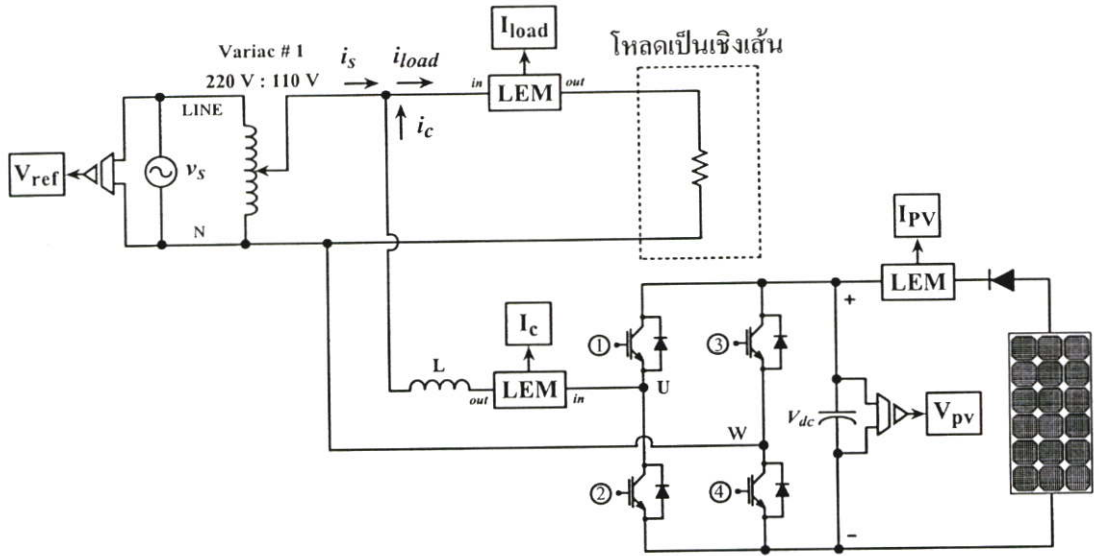
ตารางที่ 5.9 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า

แรงดัน $v_s = 110 V_{rms}$								
เวลา	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)	i_c (A)	i_s (A)	P_s (W)	PF	DPF
11:00 น.	167.1	1.22	203	1.45	-1.44	-157	0.97	1.00
11:30 น.	175.7	1.54	280	2.02	-2.03	-230	0.99	1.00
12:00 น.	176.3	1.625	293	2.12	-2.13	-232	0.99	1.00
12:30 น.	182.5	1.72	319	2.32	-2.44	-280	0.99	1.00
13:00 น.	179.4	1.75	317	2.3	-2.33	-260	0.99	1.00
13:30 น.	191	0.83	164	1.14	-1.20	-130	0.95	1.00
14:00 น.	181	1.7	307	2.27	-2.3	-270	0.99	1.00

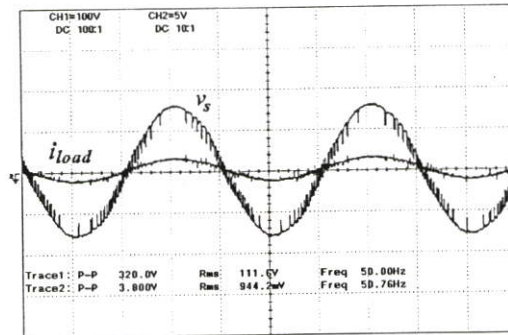
จากผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับคืนการไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงในแต่ละช่วงเวลา ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 5.9 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดคือช่วงเวลา 12:30 น. พิจารณารูปสัญญาณแรงดัน v_s , สัญญาณกระแส i_s และสัญญาณกระแส i_c แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งเสมอ

5.2.2 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยร่วมกันจ่าย โหลดเป็นเชิงเส้น

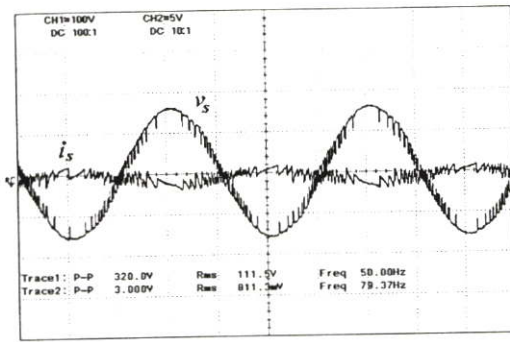
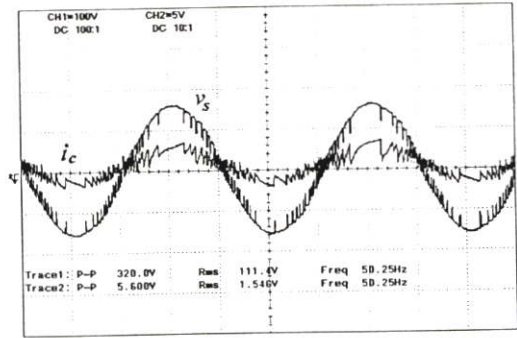
การทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยร่วมกันจ่าย โหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W ทำโดยการคำนวณหากำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหากระแสคำสั่งในการควบคุมอินเวอร์เตอร์



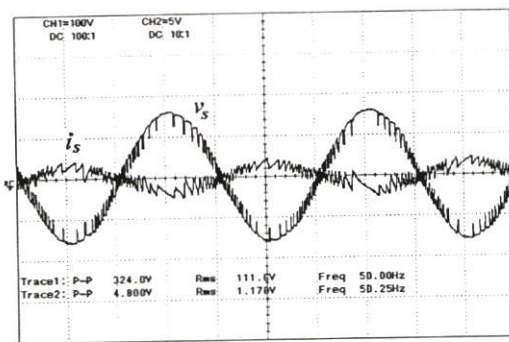
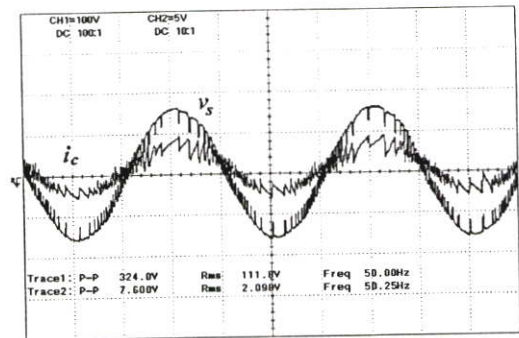
รูปที่ 5.69 ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยร่วมกันจ่าย โหลดเป็นเชิงเส้น



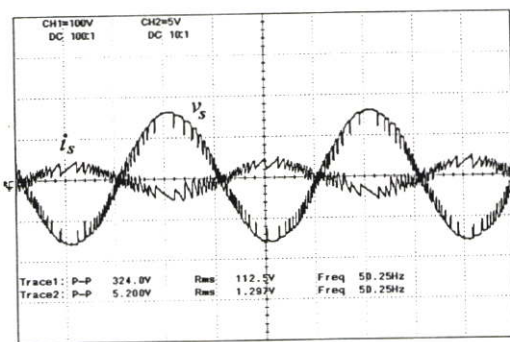
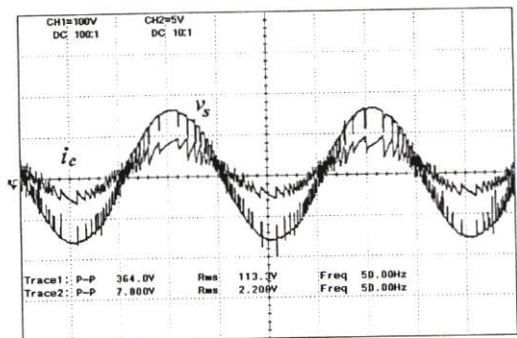
รูปที่ 5.70 สัญญาณ i_{load} เวลา 11:00 น. ในการจ่าย โหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

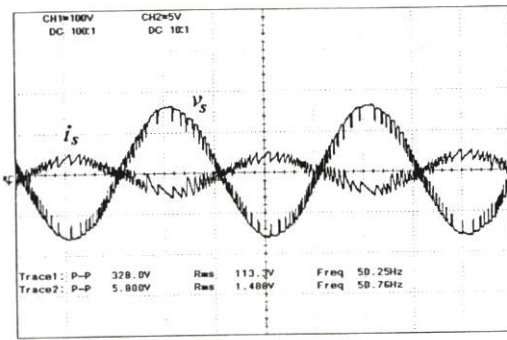
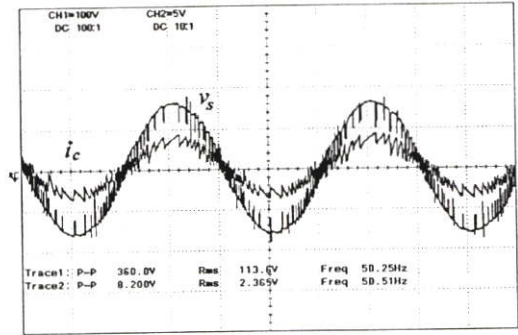
รูปที่ 5.71 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 11:00 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

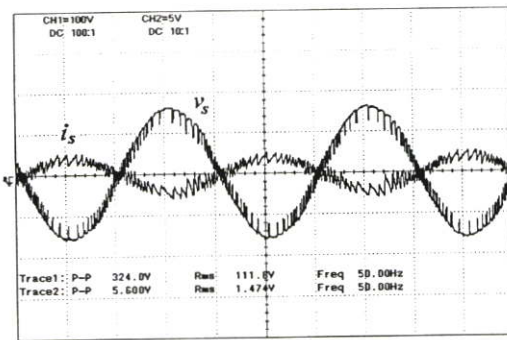
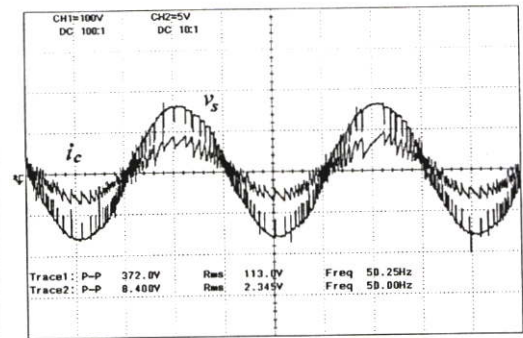
รูปที่ 5.72 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 11:30 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

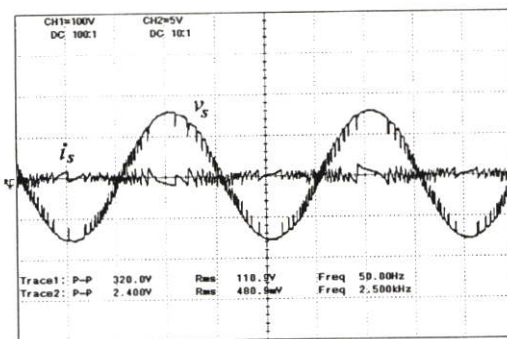
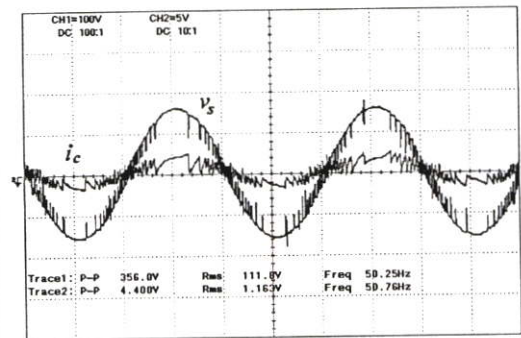
รูปที่ 5.73 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 12:00 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

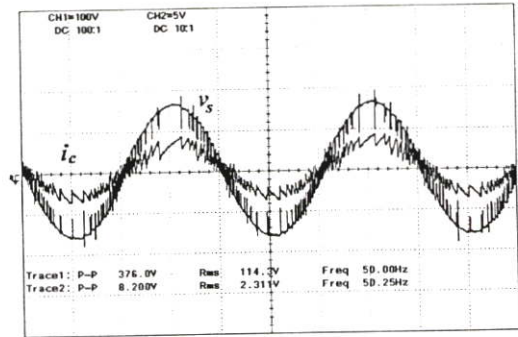
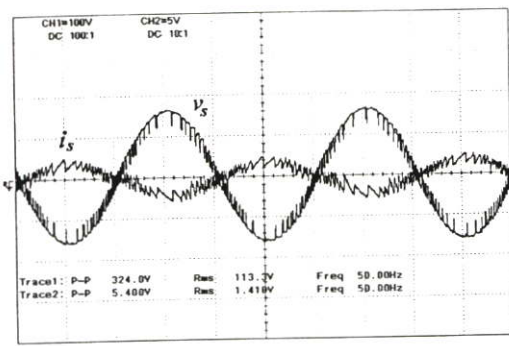
รูปที่ 5.74 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 12:30 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.75 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 13:00 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.76 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 13:30 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W



(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.77 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 14:00 น. ในการจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยร่วมกันจ่าย โหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

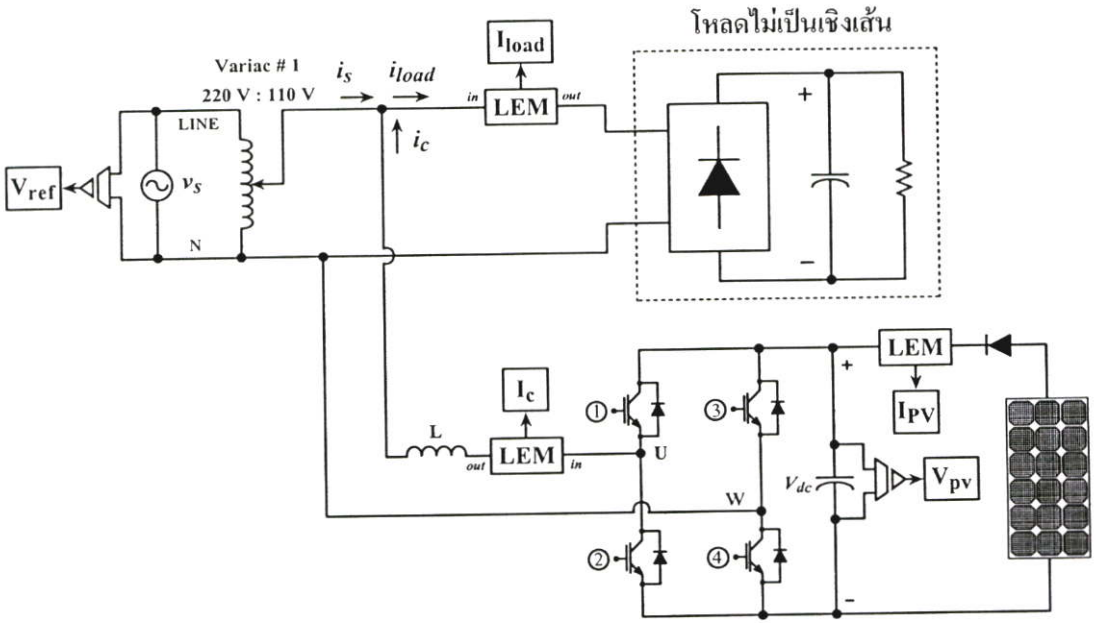
$P_{load} = 100 \text{ W}$ ที่แรงดัน $v_s = 110 \text{ V}_{rms}$, $i_{load} = 0.909 \text{ A}_{rms}$								
เวลา	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)	i_c (A)	i_s (A)	P_s (W)	PF	DPF
11:00 น.	167.1	1.22	203	1.44	-0.65	-55	0.79	0.99
11:30 น.	175.7	1.54	280	2.03	-1.17	-124	0.95	1.00
12:00 น.	176.3	1.625	293	2.15	-1.16	-127	0.99	1.00
12:30 น.	182.5	1.72	319	2.31	-1.54	-170	0.97	1.00
13:00 น.	179.4	1.75	317	2.35	-1.38	-152	0.98	1.00
13:30 น.	191	0.83	164	1.12	-0.38	-15	0.43	0.95
14:00 น.	181	1.7	307	2.26	-1.36	-150	0.97	1.00

จากผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยร่วมกันจ่าย โหลดเป็นเชิงเส้นขนาด 100 W แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำลังไฟกำลังไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์มากเกินไปเกินความต้องการของโหลดกำลังไฟส่วนที่เหลือจะไหลกลับสู่การไฟฟ้า สังเกตจากรูปสัญญาณกระแส i_s มีทิศทางกลับเฟสกับแรงดัน v_s (ค่าเป็นลบ) และค่ากำลังไฟ P_s มีค่าเป็นลบ โดยที่ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่งเสมอ

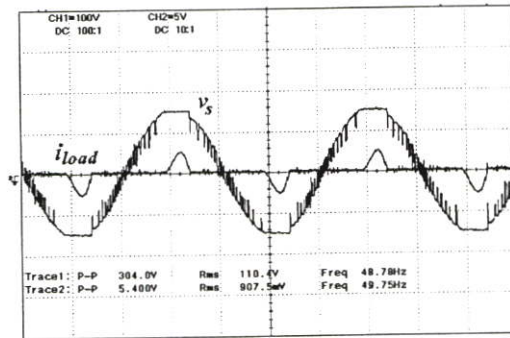
5.2.3 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยร่วมกันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

การทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยร่วมกันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W ทำโดยการคำนวณหาลำดับกำลังไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์และคำนวณหา

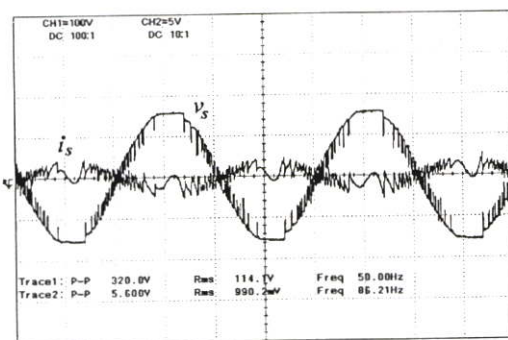
กระแสฮาร์โมนิกจากกระแสโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหากระแสคำสั่งในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์



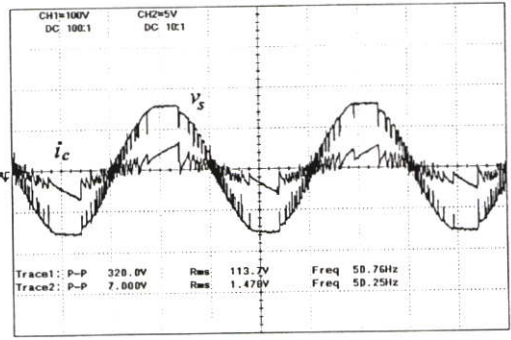
รูปที่ 5.78 ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยรวมกันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 5.79 สัญญาณ i_{load} เวลา 11:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

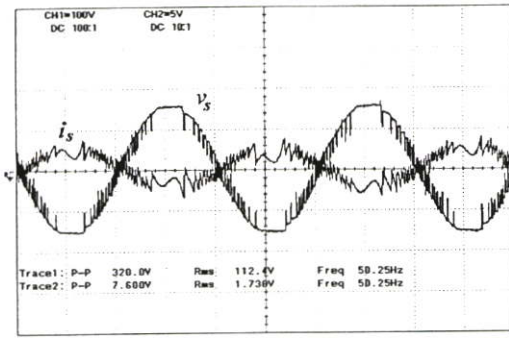
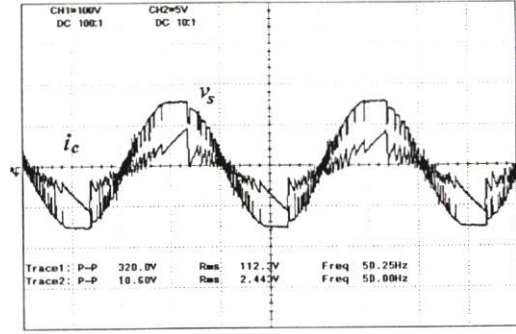


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

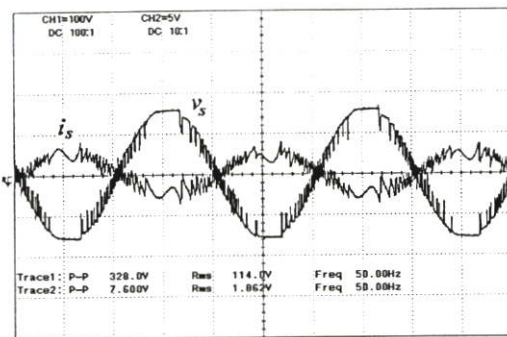
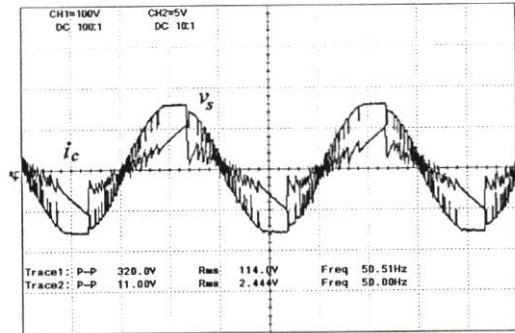


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

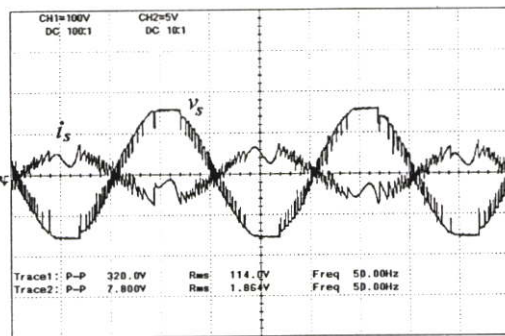
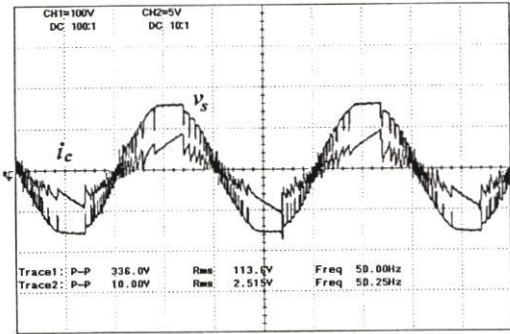
รูปที่ 5.80 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 11:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

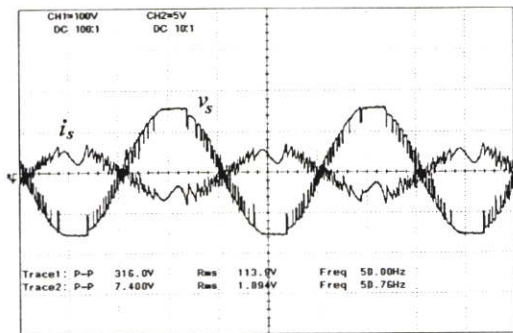
รูปที่ 5.81 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 11:30 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

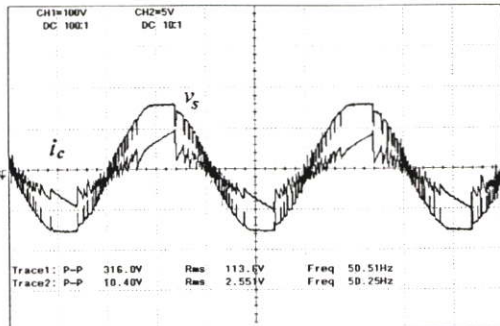
รูปที่ 5.82 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 12:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.83 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 12:30 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

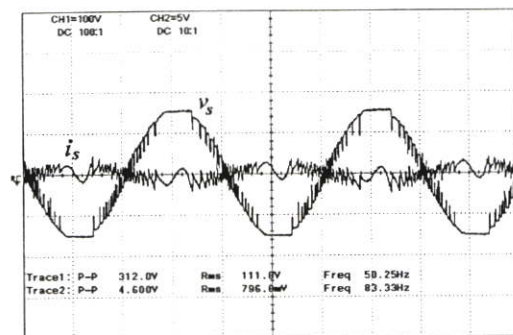


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

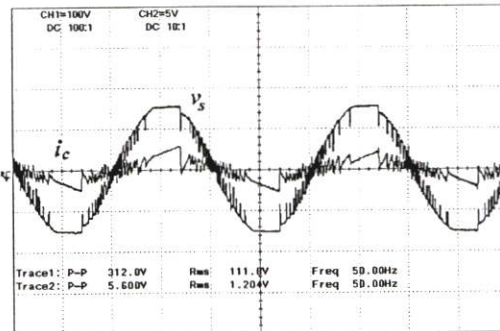


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.84 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 13:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

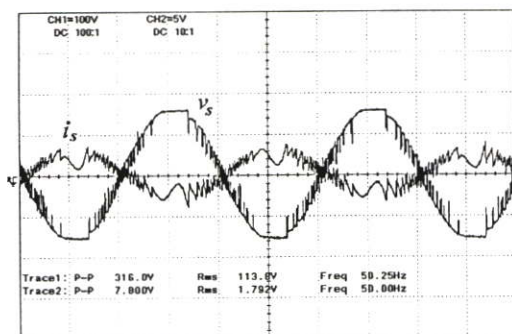


(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)

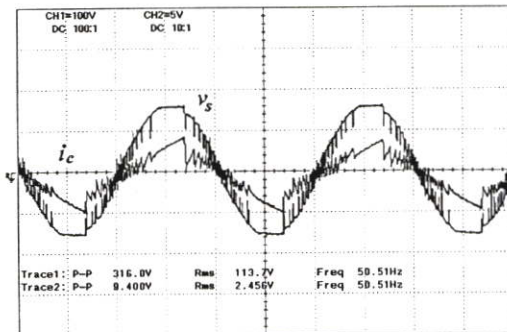


(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.85 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 13:30 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W



(ก) สัญญาณ v_s และ i_s (5 ms/div)



(ข) สัญญาณ v_s และ i_c (5 ms/div)

รูปที่ 5.86 สัญญาณ v_s , i_s และ i_c เวลา 14:00 น. ในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยรวมกันจ่าย โหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W

$P_{load} = 100 \text{ W}$ ที่แรงดัน $v_s = 110 \text{ V}_{rms}$, $i_{load} = 0.909 \text{ A}_{rms}$								
เวลา	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)	i_c (A)	i_s (A)	P_s (W)	PF	DPF
11:00 น.	167.1	1.22	203	1.42	-0.97	-84	0.78	1.00
11:30 น.	175.7	1.54	280	2.3	-1.26	-124	0.95	1.00
12:00 น.	176.3	1.625	293	2.2	-1.25	-134	0.98	1.00
12:30 น.	182.5	1.72	319	2.4	-1.82	-192	0.96	1.00
13:00 น.	179.4	1.75	317	2.36	-1.85	-195	0.96	1.00
13:30 น.	191	0.83	164	1.12	-0.74	-49	0.6	1.00
14:00 น.	181	1.7	307	2.23	-1.75	-182	0.95	1.00

จากผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยรวมกันจ่าย โหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาด 100 W แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้างำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์มากเกินความต้องการของโหลดกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะไหลกลับสู่การไฟฟ้า สังเกตจากรูปสัญญาณกระแส i_s มีรูปร่างเป็นสัญญาณไซน์ทิศทางกลับเฟสกับแรงดัน v_s (ค่าเป็นลบ) และค่ากำลังไฟฟ้า P_s มีค่าเป็นลบ โดยที่ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

5.3 สรุป

จากผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปโหลดและการไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในกรณีที่ไม่มีโหลด, โหลดเป็นเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง จากผลการทดลองพบว่าในช่วงเวลาที่ปริมาณความเข้มแสงต่ำๆ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยทำให้ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ เนื่องจากรูปร่างของกระแสเริ่มผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์ แต่ในช่วงเวลาที่มีปริมาณความเข้มแสงมาก ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถส่งกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปโหลดและการไฟฟ้าโดยมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งเสมอ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างและทดสอบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังขนาด 300W ในระบบ 1 เฟส 220 V และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่นำมาใช้เป็นวงจรเรียงกระแส 1 เฟส แบบเต็มคลื่น เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีแรกเป็นการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า กรณีที่สองเป็นการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าพร้อมกันจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้น ส่วนกรณีที่สามเป็นการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าพร้อมกันจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังรวมทั้งได้มีการจำลองเพื่อวิเคราะห์การทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง จากการเปรียบเทียบผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกันและเป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถสรุปและมีข้อเสนอแนะดังนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบระบบจริง
2. วิธีการคำนวณกระแสอ้างอิงในการควบคุมการทำงานของระบบที่ได้นำเสนอมีหลักการที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนและให้ผลที่ถูกต้อง จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองวิธีการคำนวณกระแสอ้างอิงกับผลที่ได้จากการทดสอบวิธีการคำนวณกระแสอ้างอิงของระบบจริงจากตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล
3. ระบบสามารถควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ตอนต้นและยังสามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังให้กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นได้ โดยควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปยังการไฟฟ้าและพร้อมกันจ่ายโหลดเป็นเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้นในกรณีที่กำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากเกินความต้องการของโหลด กำลังไฟฟ้าจะไหลกลับสู่การไฟฟ้าแต่ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอกับความต้องการของโหลด กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการจะถูกจ่ายมาจากการไฟฟ้าซึ่งเป็นการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างระบบไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กับการไฟฟ้า โดยมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งเสมอ

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1. ในการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรมีแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่มีความเข้มแสงใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในการทดสอบกับสภาพแวดล้อมจริงในช่วงฤดูฝน
2. ควรออกแบบวงจรควบคุมให้มีเสถียรภาพที่ดีเพื่อป้องกันปัญหาสัญญาณรบกวนกับวงจรควบคุมและวงจรตรวจจับสัญญาณต่างๆ
3. เนื่องจากระบบนี้ใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไม่เป็นเชิงเส้น ค่ากระแสที่ได้จึงไม่สามารถควบคุมได้ด้วยเทคนิคการควบคุมพีไอ ดังนั้นในการพัฒนาระบบต่อไปควรเปลี่ยนการควบคุมที่สามารถควบคุมแหล่งจ่ายไม่เป็นเชิงเส้นได้
4. เนื่องการวิธีการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นวิธีการอย่างง่ายแต่การตอบสนองของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดยังทำได้ช้า ในการพัฒนาต่อไปควรเปลี่ยนวิธีวิธีการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้เร็วและแม่นยำกว่านี้
5. เนื่องจากการควบคุมการทำงานของระบบนี้ใช้วิธีการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งการควบคุมกระแสด้วยวิธีนี้มีความถี่สวิตช์ไม่คงที่ อาจจะเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ในระบบได้ถ้าความถี่สวิตช์สูงเกินพิกัดของตัวอุปกรณ์ ดังนั้นควรมีการควบคุมกระแสแบบความถี่สวิตช์คงที่

เอกสารอ้างอิง

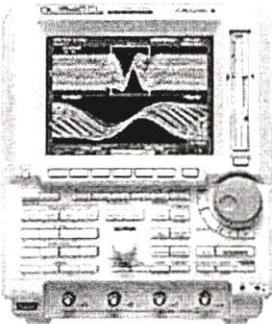
- [1] คมกฤตย์ ชมสุวรรณ “อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมการทำงานด้วยตัวประมวลสัญญาณดิจิทัลซึ่งให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกต่ำ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, “Power Electronic Converter, Application and Design” John Wiley & Sons Inc, 1995
- [3] วิรัตน์ เกตุสวัสดิ์สมกร, “การวิเคราะห์และออกแบบวงจรออกกำลังแบบผสมเพสซีฟและแอคทีฟที่มีการชดเชยกำลังรีแอคทีฟและฮาร์มอนิก”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546
- [4] H.-L. Jou, J.-C. Wu, H.-Y. Chu, “New single-phase active power filter”, IEE Proc.-Electr. Power Appl, 1994, pp 129-133
- [5] Enrique Acha, Manuel Madrigal, “Power System Harmonics”, John Wiley & Sons Inc, 2001
- [6] รศ.ดร. วีรเชษฐ ชันเงิน, วุฒิพล ชาราธิ์เรษยฐ์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง, 2547
- [7] S. Kin, Gwanjong Yo, Jinsoo Song, “A Bifunctional Utility Connected Photovoltaic System with Power Factor Correction and U.P.S. Facility”, IEEE 25th PVSC, May 13-17, 1996, pp 1363-1368
- [8] B.K. BOSE, “Modern Power Electronics, Evolution, Technology, and Applications”, The Institute of Electrical and Electronics Engineer Inc, 1992
- [9] ลิขิต ชูทรัพย์ “วงจรออกกำลังแอคทีฟแบบขนานสามเฟสที่ใช้ตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547
- [10] T.-F.Wu, C.-H.Chang and Y.-K. Chen, “A Multi-Function Photovoltaic Power Supply System with Grid-Connection and Power Factor Correction Features”, IEEE 2000, pp 1185-1190
- [11] A. Lohner, T. Meyer, A. Nagel, “A New Panel-Integratable Inverter Concept for Grid-Connected Photovoltaic System”, IEEE, 1996, pp 827-831


- [12] L. Zhang, A. Al-Amodil, Yunfei Bai, "Real-Time Maximum Power Point Tracking for Grid-Connected Photovoltaic System", REE conference Publication No. 475, 2000, pp124-129
- [13] Xiaofeng Sum, Weinang Wee, Xin Lin, Ginglin thao, "A Research on Photovoltaic Energy Controlling System with Maximum Power Point Tracking", IEEE Pcc-Osaka 2002, pp 822-826
- [14] Mikihiko Matsui, Tatsuna kitano, De-nong Xu and Thong-ging Yang, "A New Maximum Power Point Tracking Control Scheme Based on Power Equilibrium at De Link", IEEE, 1999, pp804-809
- [15] Humberto Jimenez, Hugo Calleja Victor Cardenas, "Grid-Connected PV System with Power-Factor Correction Capability", IEEE, 2002, pp 247-251
- [16] กำพล ศิริจันทร์พงศ์ "1 เฟส เอชวี-ทู-ดีซีสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์มีการส่งถ่ายกำลังงานไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546
- [17] S.K.Mita, Digital Signal Processing A Computer-Base Approach, Second Editor, New York, McGRAW-HILL, 2000
- [18] Microchip, Digital Signal Controller DSPIC30F4011 Data Sheet, 2005, Microchip


ภาคผนวก


ภาคผนวก ก.


เครื่องมือวัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope(YOKOGA)</p> <p>รุ่น DL1540 /DL (4 Channel)</p> <p>รายละเอียด 150 MHz Analog Bandwidth</p> <p> 120 MS/s on two channele</p> <p> 8 bit vertical resolution</p> <p> DC to 30 MHz, 850V(DC+AC</p> <p> peak)2% DC accuracy, Internal low</p> <p> pass filter</p>
---	--

	<p>ผลิตภัณฑ์ Multi Meter (Hewlett Packard)</p> <p>รุ่น 973 A</p> <p>รายละเอียด True RMS 20 kHz</p> <p> Accuracy = 0.1 %</p> <p> Vac or Vdc : 0 to 1000 Volts</p> <p> Iac or Idc : 0 to 10 Amp</p>
--	---

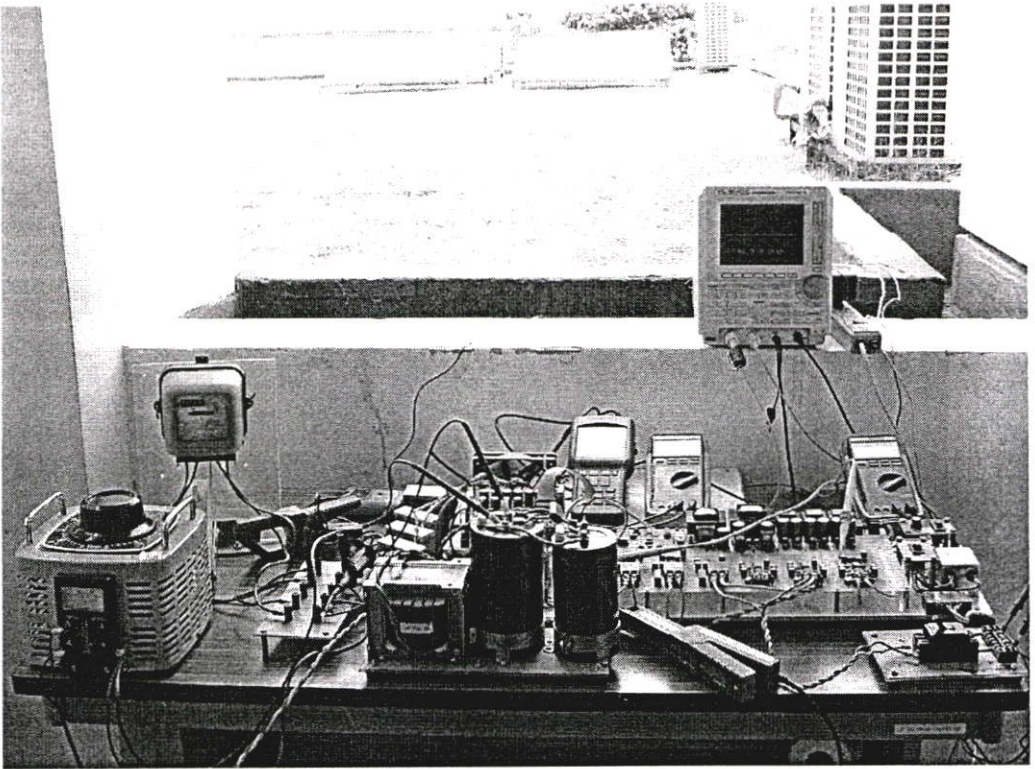
	<p>ผลิตภัณฑ์ Band Differential Probe</p> <p>รุ่น 700924</p> <p>รายละเอียด 100 MHz</p> <p> A probe lets you make wide-</p> <p> band differential input</p> <p> measurements</p>
--	--

	<p>ผลิตภัณฑ์ Current Probe (CHAUVIN</p> <p> ARNOUX)</p> <p>รุ่น E3N</p> <p>รายละเอียด Current Probe 10-100 Ampere/ 1Volt</p> <p> Input 100 A Peak Max</p> <p> Frequency: DC to 100 kHz .(@3 db)</p> <p> Output 10 mV/A, 100 mV/A CAT III</p>
---	---

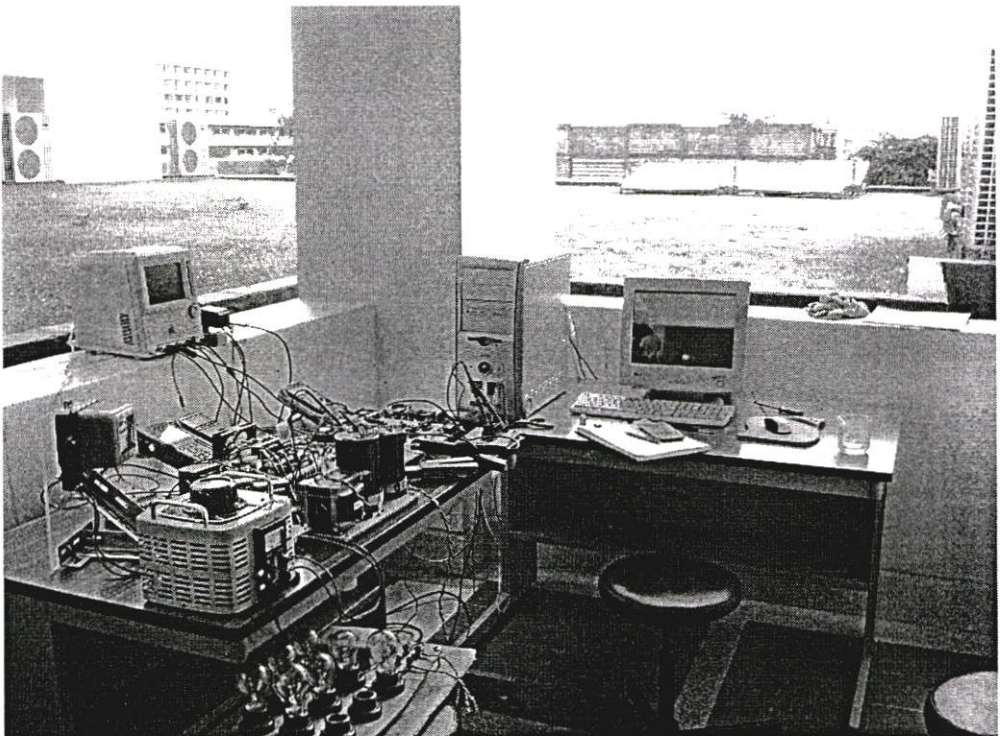
	<p>ผลิตภัณฑ์ Power/Harmonic Scope Meter</p> <p>รุ่น Fluke 41B</p> <p>รายละเอียด True-rms voltage from 5.0V to 600V</p> <p>True-rms current from 1A to 500A</p> <p>Peak, DC, and Crest Factor</p> <p>Frequency from 6Hz-99.9Hz</p> <p>Waveform and spectrum displays</p>
--	---

ภาคผนวก ข.
เครื่องต้นแบบในงานวิจัย

เครื่องต้นแบบในงานวิจัย



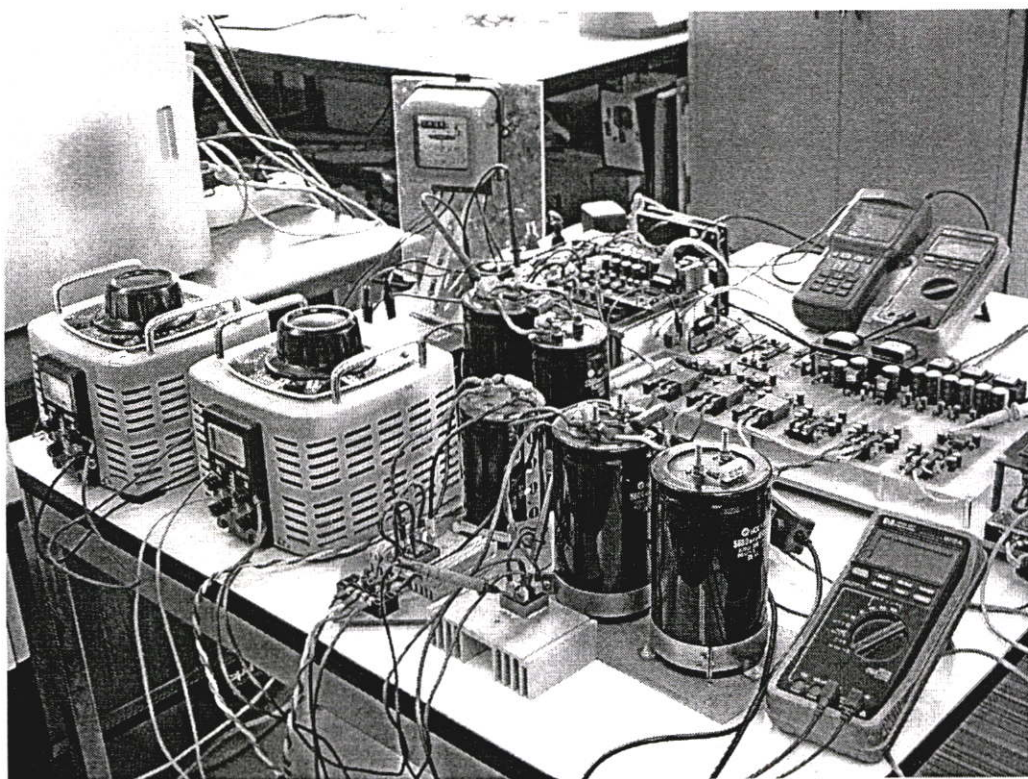
รูปที่ ข.1 แสดงภาพโดยรวมของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า 1



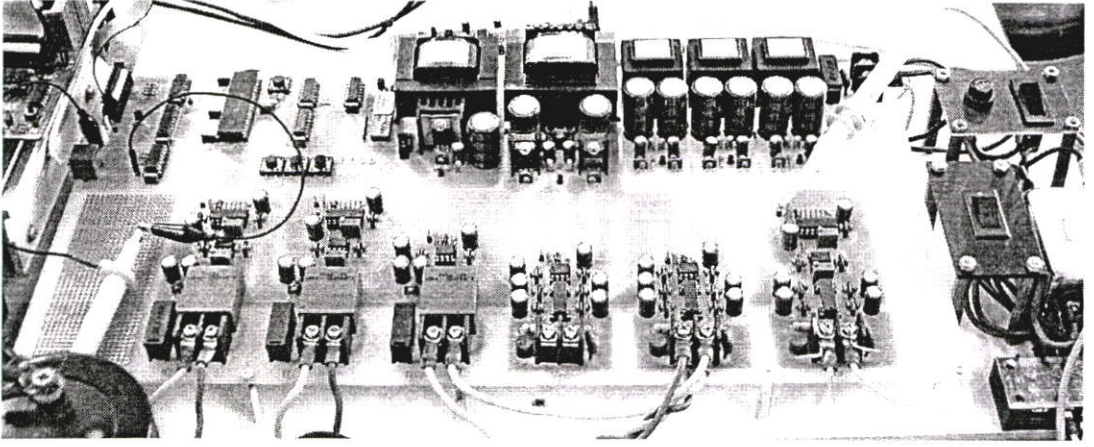
รูปที่ ข.2 แสดงภาพโดยรวมของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า 2



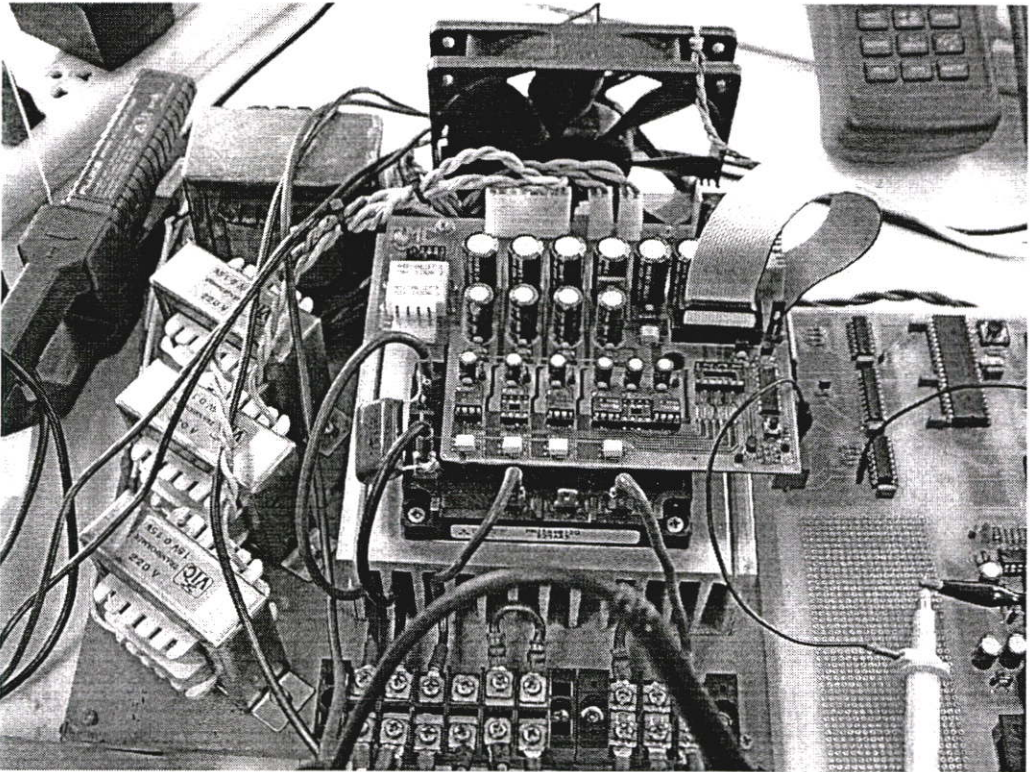
รูปที่ ข.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ ข.4 เครื่องต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ ข.5 วงจรควบคุมของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

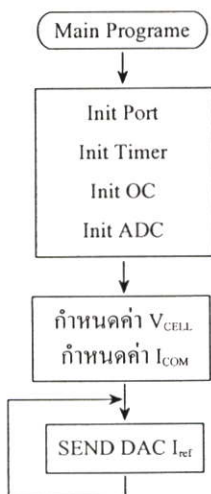


รูปที่ ข.6 คอนเวอร์เตอร์ของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

ภาคผนวก ค.

โปรแกรมควบคุมการทำงาน DSPIC30F4011

โปรแกรมควบคุมการทำงาน DSPIC30F4011



รูปที่ ค.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลัก

```

;*****
;
;       Author       : BIRD_PV
;
;       Company      : KMITL
;
;       Filename     : Main Program.s
;
;       Date         : 7/8/2006
;
;       Frequency    : 7.3728 MHz at PLL 16x
;*****
;
;       Other Files Required      : p30F4011.gld, p30f4011.inc
;
;       Tools Used:MPLAB GL      : 7.01
;
;       Compiler                 : 1.30
;
;       Assembler                : 1.30
;
;       Linker                   : 1.30
;
;       Devices Supported by this file : dsPIC 30F4011
;*****
;
;       .equ __30F4011, 1
;
;       .include "p30f4011.inc"
;-----
;Configuration bits:
;-----
;
  
```

```

config __FOSC, CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16
config __FWDT, WDT_OFF
config __FBORPOR, PBOR_ON & BORV_27 & PWRT_16 & MCLR_DIS
config __FGS, CODE_PROT_OFF

```

```

;-----
;Global Declarations:
;-----

```

```

.global    __reset
.global    __T1Interrupt
.global    __T2Interrupt

```

```

;-----
; Define Constants
;-----

```

```

.equ      T_2,#0x101           ; (Q15format)
.equ      T_2RC,#0xCE          ; (Q15format)
.equ      Y_MIN,#0x0000
.equ      Y_MAX,#0x7FC0
.equ      U_MIN,#0x0000
.equ      U_MAX,#0x666
.equ      Kp_A0,#0x1D13
.equ      Kp_A1,#0x1CF4
.equ      G_XOR,#0x8000
.equ      G_AND,#0x7FFF
.equ      BAND,#0x168          ; BAND = 0.25 A
.equ      I2C_DAC_CON,#0b01000000 ; CONTROL of PFC8591P

```

```

;-----
;Global Declarations Constants:
;-----

```

```

.global    T_2
.global    T_2RC
.global    Y_MIN
.global    Y_MAX
.global    U_MIN

```

```

.global      U_MAX
.global      Kp_A0
.global      Kp_A1
.global      G_XOR
.global      G_AND
.global      BAND
.global      I2C_DAC_CON
.global      I2C_ADD_ADC_1
.global      I2C_ADD_ADC_2

```

```

;Difine      Variable

```

```

.bss        BAND_UP,2
.bss        BAND_DOWN,2
.bss        B_I2C_ACK,2
.bss        COUNT_ADC_PV,2
.bss        COUNT_N,2
.bss        COUNT_SINE,2
.bss        COUNT_DAC,2
.bss        COUNT_GAIN,2
.bss        G_COM,2
.bss        I2C_DATA,2
.bss        I_1,2
.bss        I_1_B,2
.bss        I_com,2
.bss        I_com_B,2
.bss        I_C,2
.bss        I_h,2
.bss        I_h_B,2
.bss        I_LOAD,2
.bss        I_load_B,2
.bss        I_MPPT,2
.bss        I_PV,2

```

.bss I_PV_DFL,2
.bss I_r,2
.bss I_r_B,2
.bss I_ref,2
.bss I_ref_B,2
.bss I_X1,2
.bss I_X2,2
.bss I_x,2
.bss P_PV,2
.bss P_PV_OLD,2
.bss SINE,2
.bss V_CELL,2
.bss V_S,2
.bss V_DC,2
.bss V_PV,2
.bss V_DC_DFL,2
.bss V_PV_OLD,2
.bss V_com,2
.bss V_com_B,2
.bss X,2
.bss X_Z1,2
.bss Y,2
.bss Y_Z1,2
.bss V_DC_ref,2
.bss E,2
.bss E_Z1,2
.bss U,2
.bss U_Z1,2
.bss IN_DFL,2
.bss IN_DFL_Z1,2
.bss OUT_DFL,2
.bss OUT_DFL_Z1,2
.bss VOC,2

```
.bss      VOC_Z1,2
```

```
-----  
;Global Declarations Variable:  
-----
```

```
.global   BAND_UP  
.global   BAND_DOWN  
.global   B_I2C_ACK  
.global   COUNT_ADC_PV  
.global   COUNT_N  
.global   COUNT_SINE  
.global   COUNT_DAC  
.global   COUNT_GAIN  
.global   G_COM  
.global   I2C_DATA  
.global   I_1  
.global   I_1_B  
.global   I_com  
.global   I_com_B  
.global   I_C  
.global   I_h  
.global   I_h_B  
.global   I_LOAD  
.global   I_load_B  
.global   I_MPPT  
.global   I_PV  
.global   I_PV_DFL  
.global   I_r  
.global   I_r_B  
.global   I_ref  
.global   I_ref_B  
.global   I_X1  
.global   I_X2  
.global   I_x
```



```
MOV     W0,W14
REPEAT #12
MOV     W0,[++W14]
CLR     W14
```

;

; Clear all Variable:

;

```
CLR     BAND_UP
CLR     BAND_DOWN
CLR     B_I2C_ACK
CLR     COUNT_ADC_PV
CLR     COUNT_N
CLR     COUNT_SINE
CLR     COUNT_DAC
CLR     COUNT_GAIN
CLR     G_COM
CLR     I2C_DATA
CLR     I_1
CLR     I_1_B
CLR     I_com
CLR     I_com_B
CLR     I_h
CLR     I_h_B
CLR     I_C
CLR     I_load_B
CLR     I_MPPT
CLR     I_PV
CLR     I_PV_DFL
CLR     I_r
CLR     I_r_B
CLR     I_ref
CLR     I_ref_B
CLR     I_X1
```

```

CLR      I_X2
CLR      I_x
CLR      SINE
CLR      VOC
CLR      VOC_Z1
CLR      V_S
CLR      V_PV
CLR      V_DC_DFL
CLR      V_com
CLR      V_com_B
CLR      X
CLR      X_Z1
CLR      Y
CLR      Y_Z1
CLR      IN_DFL
CLR      IN_DFL_Z1
CLR      OUT_DFL
CLR      OUT_DFL_Z1

```

```

;*****<<insert more user code here>>*****

```

```

START:   CALL      Init_PORTS           ; Initialize the I/O ports
         CALL      Init_TMR            ; initialize TMR
         CALL      Init_ADC            ; initialize ADC_10BIT

         BSET      LATF,#RF5           ; LED Show Operterting
;
         BCLR      LATF,#RF5
;
         BSET      LATE,#RE1           ; SW OPTO off
;
         BCLR      LATE,#RE2           ; LED Show SW OPTO off
;
         BCLR      LATE,#RE1           ; SW OPTO off
;
         BCLR      LATE,#RE2           ; LED Show SW OPTO off
;
         MOV       #0x1385,W0          ; 1.0 Arms #0x1385
         MOV       #0x30EF,W0          ; 1.5 Arms #0x1A66 , 2000,
;
         MOV       #0x2999,W0          ; 2.0 Arms #0x2266 2999
         MOV       W0,G_COM

```

```

MOV    #0x3999,W0
MOV    W0,V_DC_ref
MAIN:
BRA    SW_DAC
BTSC   PORTE,#RE3
BRA    SW_DAC
CALL   SW_DELAY
BTSS   PORTE,#RE3
BRA    SW_DAC
CALL   SW_DELAY
BTG    LATE,#RE2           ; LED Show V_com = 0
BRA    SW_DAC
;-----
SW_DAC:  BTSC   PORTF,#RF6
          BRA    SKIP_SW
          CALL   SW_DELAY
          BTSS   PORTF,#RF6
          BRA    SKIP_SW
          INC    COUNT_DAC
SKIP_SW: MOV    COUNT_DAC,W8
          CP     W8,#1           ; COUNT_DAC = 1 ?
          BRA    Z,SEND_1       ; If Yes jump to SEND_1
          CP     W8,#2           ; COUNT_DAC = 2 ?
          BRA    Z,SEND_2       ; If Yes jump to SEND_2
          CP     W8,#3           ; COUNT_DAC = 2 ?
          BRA    Z,SEND_3       ; If Yes jump to SEND_3
SEND_0:  MOV    V_com,W6         ; I_INV => W6 (SEND DAC)
          BCLR   LATF,#RF1
          BCLR   LATF,#RF4
          CLR    COUNT_DAC
          BRA    END_DAC
SEND_1:  MOV    I_com,W6         ; I_X1 => W6 (SEND DAC)
          BSET   LATF,#RF1

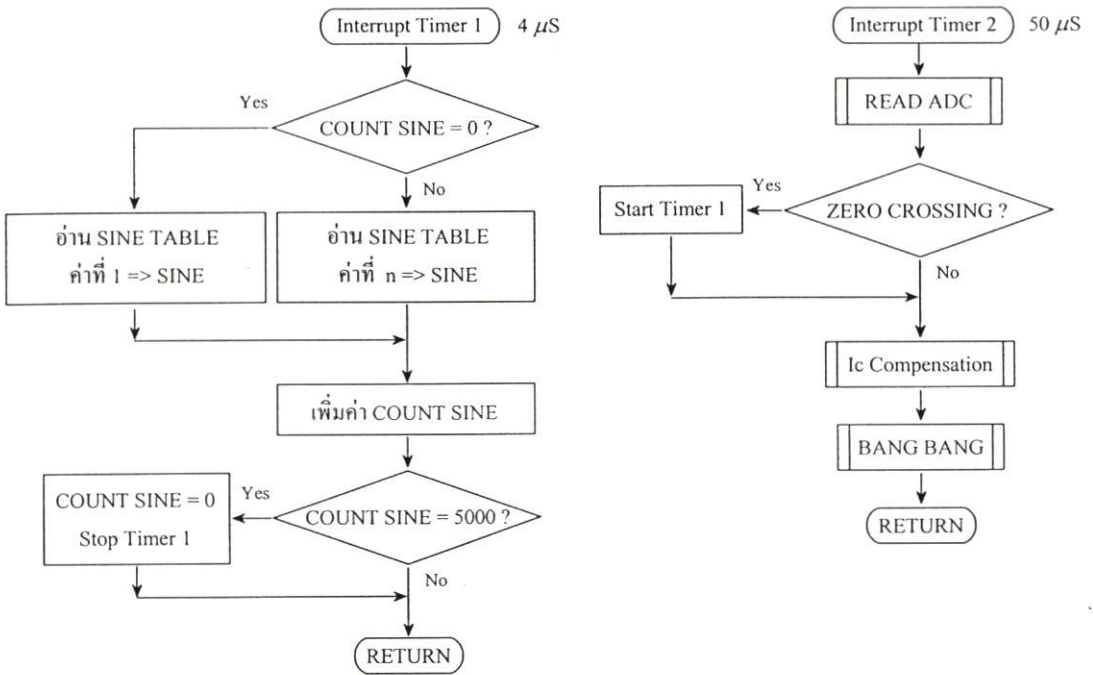
```

```

        BCLR    LATF,#RF4
        BRA     END_DAC
SEND_2:  MOV     I_h,W6                ; I_1 => W6 (SEND DAC)
        BCLR    LATF,#RF1
        BSET    LATF,#RF4
        BRA     END_DAC
SEND_3:  MOV     I_ref,W6             ; I_h => W6 (SEND DAC)
        BSET    LATF,#RF1
        BSET    LATF,#RF4

END_DAC:
;-----
; WRITE DATA to I2C
;-----
SLAVE_I2C: MOV     #I2C_ADD_ADC_1,W9    ; ADDRESS of PFC8591P #1
          MOV     W9,I2C_DATA
          CALL    I2C_SLAVE             ; Connected DAC
CONTROL_DAC:MOV    #I2C_DAC_CON,W9
          MOV     W9,I2C_DATA
          CALL    I2C_DATA_WR           ; Writed Control Data
SEND_DAC: MOV     #0xFF,W7             ; Chang Data rang 0 < Data < 255
          MPY     W6*W7,B
          MOV     ACCBH,W8              ; Value Sine is changed => W8
          MOV     W8,I2C_DATA           ; W8 => I2C_DATA
          CALL    I2C_DATA_WR           ; Writed Data
          BRA     MAIN
;-----

```



รูปที่ ค.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรมขัดจังหวะ

;Timer 1 Interrupt Service Routine

__T1Interrupt:

BCLR IFS0,#T1IF ; Clear the Timer1 Interrupt flag

*****<<insert more user code here>>*****

```

PUSH W0
PUSH W1
PUSH W4
PUSH W5
PUSH W6
PUSH W7
PUSH W8
PUSH W9
CALL READ_SINE_TABLE
POP W9
POP W8
POP W7
    
```

```

POP      W6
POP      W5
POP      W4
POP      W1
POP      W0

RETFIE

```

```

;-----
; End of AllTimer 1 Interrupt Service Routine
;-----

```

```

__T2Interrupt:

```

```

        BCLR      IFS0,#T2IF          ; Clear the Timer2 Interrupt flag

```

```

;*****<<insert more user code here>>*****

```

```

        PUSH     W0
        PUSH     W1
        PUSH     W2
        PUSH     W3
        PUSH     W4
        PUSH     W5
        PUSH     W6
        PUSH     W7
        PUSH     W8
        PUSH     W9

```

```

;-----
        CALL     READ_ADC
;-----

```

```

; Check Zero Crossing
;-----

```

```

        MOV      V_S,W1
        MOV      #0x3FFF,W0          ; ZERO = > W0
        CPSGT   W0,W1                ; ZERO > V_LINE ?
        BRA     CLR_D1                ; If No, jump to CLR_D1
SET_D1:  BSET    LATD,#RD1           ; SET_D1
        BRA     END_ZC

```

```

CLR_D1:   BCLR    LATD,#RD1           ; CLR_D1
          BTSC    PORTD,#RD1        ; RD1=0 ?and If Yes, Start Timer 1
          BRA     END_ZC             ; If No, jump to END_ZC
          BSET    TICON,#TON        ; Start Timer 1

```

```

END_ZC:

```

```

;-----
; V_com = SINE * G_COM
;-----

```

```

          MOV     SINE,W1
          SL     W1,W1
          MOV     #G_XOR,W2
          XOR    W1,W2,W4
          MOV     G_COM,W5
          MPY    W4*W5,A
          MOV     ACCAH,W1
          SL     W1,#2,W1
          MOV     W1,V_com_B
          MOV     #G_XOR,W2
          XOR    W1,W2,W3
          ASR    W3,#1,W1
          MOV     #G_AND,W2
          AND    W1,W2,W1
          MOV     W1,V_com

```

```

;-----
          CALL    Ic_Compensation
          CALL    BANG_BANG
;-----

```

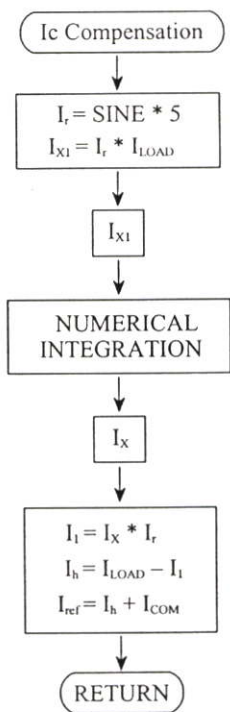
```

END_T2:  POP     W9
          POP     W8
          POP     W7
          POP     W6
          POP     W5
          POP     W4

```

```
POP      W3
POP      W2
POP      W1
POP      W0
RETFIE
```

```
-----End of All Code Sections -----
.end                                     ; End of program code in this file
-----
```



รูปที่ ก.3 โครงสร้างโปรแกรมคำนวณหากระแ้างอิง

```
-----
.equ __30F4011, 1
.include "p30f4011.inc"
-----

.global      Ic_Compensation

Ic_Compensation:
-----
;I_r = SINE
```

```

MOV     SINE,W1
MOV     W1,I_r
SL      W1,W1
MOV     #G_XOR,W2
XOR     W1,W2,W4
MOV     W4,I_r_B

```

```

;-----
; I_X1 = I_r_B * I_LOAD
;-----

```

```

MOV     I_LOAD,W1
SL      W1,W1
MOV     #G_XOR,W2
XOR     W1,W2,W5
MOV     W5,I_load_B
MPY     W4*W5,A
MOV     ACCAH,W4
MOV     #G_XOR,W2
XOR     W4,W2,W3
ASR     W3,#1,W1
MOV     #G_AND,W2
AND     W1,W2,W1
MOV     W1,I_X1

```

```

;-----
; Numerical Intrgration (Trapezoidal) ----->>> {Y(z) = T/2*(X(z) + X(z)Z-1) + Y(z)Z-1}
;-----

```

```

;      MOV     X,W4                ; X = Input = sine(Bipolar)
      MOV     #T_2,W5
      MPY     W4*W5,A
      MOV     ACCAH,W6            ; W6 = T_2*X(z)
      MOV     X_Z1,W7
      ADD     W6,W7,W8            ; W8 = T/2*(X(z) + X(z)Z-1)

```

```

MOV     Y_Z1,W9
ADD     W8,W9,W4           ; W4 = T/2*(X(z) + X(z)Z-1) +
MOV     #Y_MAX,W1         ; Check Y_MAX > Y ?
CPSGT  W1,W4              ; If Yes, jump to Check Y_MIN
BRA     Y_Y_MAX           ; If No, jump to Y_Y_MAX
MOV     #Y_MIN,W1         ; Check Y_MIN > Y ?
CPSGT  W1,W4              ; If Yes, jump to Check Y_MIN
BRA     INT_OUT           ; If No, jump to INT_OUT
Y_Y_MIN: MOV     #Y_MIN,W4
        BRA     INT_OUT
Y_Y_MAX: MOV     #Y_MAX,W4
INT_OUT: MOV     W4,Y      ; Y = Output
        MOV     W4,Y_Z1   ; W0 = Y(z) ==> Y(z-1) Keep old
        MOV     W6,X_Z1   ; W6 = T_2*X(z) ==> T_2*X(z-1)
        MOV     #0x3FFF,W5 ; Because of Y {Bipolar Value} =
        MPY     W4*W5,A
        MOV     ACCAH,W6
END_INT: MOV     W6,I_X2
;-----
; Keep value Y(350) = I_X2(390) ; COUNT_N is clear with T1Interrupt
;-----
        INC     COUNT_N
        MOV     COUNT_N,W1
        MOV     #390,W2
        CPSEQ  W1,W2      ; COUNT_N = 350 ?
        BRA     FIND_I_1  ; If No, jump to FIND_I_1
        MOV     W6,I_x    ; If Yes, keep value I_X3 =
;-----
; I_1 = I_x * I_r_B
;-----
FIND_I_1:
        MOV     I_x,W4

```

```

MOV     I_r_B,W5
MPY     W4*W5,A
MOV     ACCAH,W1           ; W1 = I_X2_M * I_r_B
MOV     W1,I_1_B
MOV     #G_XOR,W2
XOR     W1,W2,W3
ASR     W3,#1,W1
MOV     #G_AND,W2
AND     W1,W2,W1
MOV     W1,I_1

```

```

; I_h = I_load_B - I_1_B

```

```

MOV     I_1_B,W1
MOV     I_load_B,W2
SUB     W2,W1,W3
MOV     W3,I_h_B
MOV     #G_XOR,W2
XOR     W3,W2,W3
ASR     W3,#1,W1
MOV     #G_AND,W2
AND     W1,W2,W3
MOV     W3,I_h

```

```

; I_com = I_r_B * G_COM *****

```

```

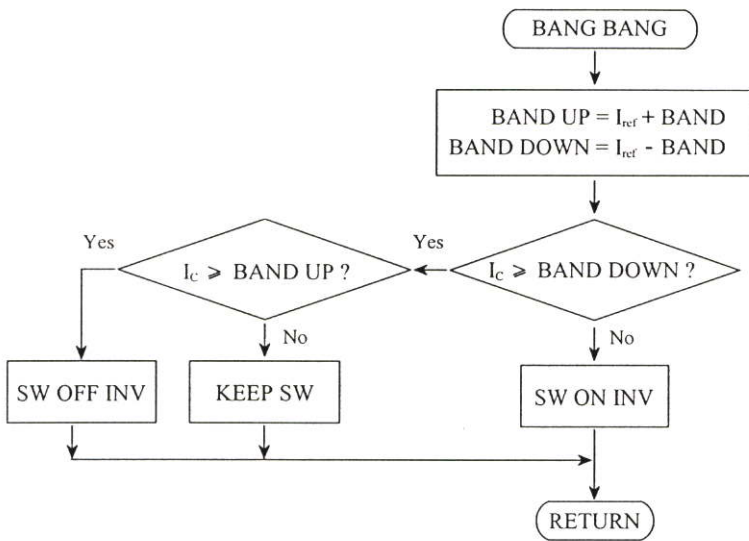
MOV     G_COM,W4
MOV     I_r_B,W5
MPY     W4*W5,A           ; I_r * I_MPPT
MOV     ACCAH,W1

```

```
MOV    W1,I_com_B
MOV    #G_XOR,W2
XOR    W1,W2,W3
ASR    W3,#1,W1
MOV    #G_AND,W2
AND    W1,W2,W1
MOV    W1,I_com
BRA    CAL_Iref
```

```
-----
;
; I_ref = Icom + I_h
;
-----
```

```
CAL_Iref:  MOV    I_com_B,W1
           MOV    I_h_B,W2
           ADD    W1,W2,W3
           MOV    W3,I_ref_B
           MOV    #G_XOR,W2
           XOR    W3,W2,W3
           ASR    W3,#1,W1
           MOV    #G_AND,W2
           AND    W1,W2,W3
           MOV    W3,I_ref
           RETURN
```



รูปที่ ค.4 โครงสร้างโปรแกรมควบคุมการสร้างกระแส

```

;-----
.equ __30F4011, 1
.include "p30f4011.inc"
;-----
; Subroutine : BANG_BANG
;-----
.global BANG_BANG
BANG_BANG:
;-----
; GENERATED BAND_UP and BAND_DOWN
;-----
;SEND_V_com: MOV V_com,W1 ; V_com => W1
; BRA GEN_BAND
;SEND_I_com: MOV I_com,W1 ; I_com => W1
MOV I_ref,W1 ; I_ref => W1
; MOV I_h,W1 ; I_h => W1
GEN_BAND: MOV #BAND,W2 ; BAND => W2
ADD W1,W2,W3 ; V_com + BAND = BAND_UP
MOV W3,BAND_UP ; W3 => BAND_UP
SUB W1,W2,W3 ; V_com - BAND =BAND_DOWN

```

```

MOV      W3,BAND_DOWN      ; W3 => BAND_DOWN
;-----
MOV      I_C,W1             ; I_INV => W1
;
BRA      RECTIFIER         ; Jump to RECTIFIER MODE- I_h
;-----
; INVERTER MODE
;-----
INVERTER: CP      W1,W3      ; I_INV >= BAND_DOWN ?
          BRA      GTU,CHECK_HI_INV ; If Yes jump to CHECK_HI
SW_ON_INV: BSET   LATE,#RE0
          BRA      EXIT_BB_INV
CHECK_HI_INV: MOV  I_C,W1     ; I_INV => W1
          MOV      BAND_UP,W2 ; BAND_UP => W2
          CP      W1,W2      ; I_INV >= BAND_UP ?
          BRA      GTU,SW_OFF_INV ; If Yes jump to SW_OFF
SW_KEEP_INV: MOV  PORTE,W0
          MOV      W0,LATE
          BRA      EXIT_BB_INV
SW_OFF_INV: BCLR  LATE,#RE0
EXIT_BB_INV: RETURN
;-----
; RECTIFIER MODE
;-----
RECTIFIER: CP      W1,W3      ; I_INV >= BAND_DOWN ?
          BRA      GTU,CHECK_HI_REC ; If Yes jump to CHECK_HI
SW_ON_REC: BCLR   LATE,#RE0
          BRA      EXIT_BB_REC
CHECK_HI_REC: MOV  I_C,W1     ; I_INV => W1
          MOV      BAND_UP,W2 ; BAND_UP => W2
          CP      W1,W2      ; I_INV >= BAND_UP ?
          BRA      GTU,SW_OFF_REC ; If Yes jump to SW_OFF
SW_KEEP_REC: MOV  PORTE,W0
          MOV      W0,LATE

```

```
BRA      EXIT_BB_REC
```

```
SW_OFF_REC:
```

```
BSET    LATE,#RE0
```

```
EXIT_BB_REC:
```

```
RETURN
```

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

คอนเวอร์เตอร์ดีซี-เอซี เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัว ประกอบกำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอล

DSC-Controlled Utility Grid Connected DC-AC Converter with Power Factor Correction

วิมลชัย ชูรัมย์

วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอคอนเวอร์เตอร์ดีซี-เอซี เชื่อมต่อการไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอล โดยที่คอนเวอร์เตอร์ถูกกำหนดให้ทำงานสองหน้าที่คือ ส่งกำลังไฟฟ้าและทำหน้าที่เป็นแอคทีฟฟิลเตอร์ กระแสอ้างอิงประกอบด้วยสองส่วนคือ กระแสคำสั่งในการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับกระแสชดเชยที่ได้จากการคำนวณกระแสไหลกลับด้วยกระแสที่ความถี่มูลฐาน เพื่อใช้ในการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอล DSPIC30F4011 ทำการประมวลผลทั้งระบบ ในส่วนของวงจรกำลังได้นำเสนอหลักการวิเคราะห์และออกแบบตัวเหนี่ยวนำ, ความถี่สูงที่สุดในการสวิตช์ จากผลการจำลองและผลการทดลองแสดงถึงระบบที่นำเสนอสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นและจ่ายกลับคืนการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังและการกรองกระแสฮาร์มอนิก

Abstract

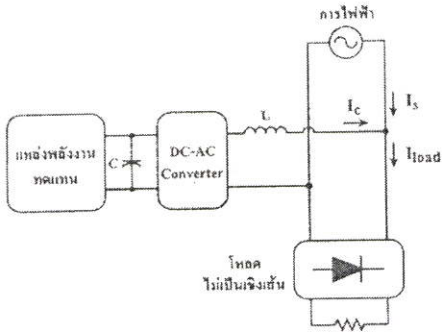
This paper proposes a DSC-controlled utility grid connected DC-AC converter with power factor correction. The converter is assigned to operate with two function namely, power transfer and acting as an active filter. Reference current includes two parts which are command current for power transfer from the converter and compensating current resulting from subtraction between load current and fundamental current. This reference current is used for hysteresis control. All algorithms are processed by DSPIC30F4011. Analysis of a main power circuit and inductor design and determination of maximum switching frequency are given. Simulation and experiment results show capability of the proposed system for supplying power to non-linear loads and power transfer to utility with power factor correction and harmonic current filtration.

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานทดแทนกำลังเป็นที่น่าสนใจจึงมีแนวคิดที่จะนำพลังงานทดแทนมาใช้ร่วมกับระบบที่มีอยู่เดิม[1] ซึ่งพลังงานทดแทนอย่างเช่น พลังงานแสงอาทิตย์,

พลังงานลม พลังงานเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นในการนำมาใช้ร่วมกับกริดไฟฟ้าซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อการไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าคอนเวอร์เตอร์ดีซี - เอซี

โดยมีหน้าที่การทำงานเปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเชื่อมต่อการไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1 ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีคำนวณค่าใช้โดยมีการเพิ่มเติมในส่วนของการแก้ไขตัวประกอบกำลังให้กับระบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น



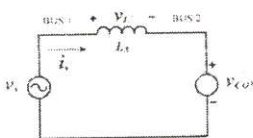
รูปที่ 1 ขลิ่งโคจรการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

2. หลักการพื้นฐาน

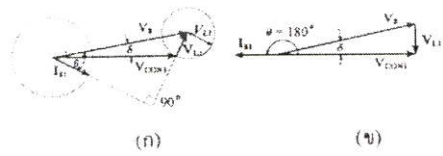
วิธีการที่นำเสนอในบทความนี้ใช้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดและจ่ายกลับคืนการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ดังนั้นหลักการพื้นฐานที่ควรกล่าวถึงคือ การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าและการแก้ไขตัวประกอบกำลังหรือที่เรียกว่าแอสทีพิลเตอร์

2.1 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าคือ V_s และ V_{CON} และสามารถเขียนเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังรูปที่ 3 (ก), (ข) [3], [4]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 และบัส 2



รูปที่ 3 (ก) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า (ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรมโหมดอินเวอร์เตอร์

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 3 (ก) สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ที่จ่ายจากแหล่งจ่าย V_s ไปยังคอนเวอร์เตอร์ V_{CON} หรือจากบัส 1 ไปยังบัส 2 ได้ดังนี้

$$P = V_s I_{S1} \cos \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left(\frac{V_{CON1}}{V_s} \sin \delta \right) \quad (1)$$

จากรูปที่ 3 (ก)

$$V_{L1} \cos \theta = \omega L_s I_{S1} \cos \theta = V_{CON1} \sin \delta$$

$$Q = V_s I_{S1} \sin \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left(1 - \frac{V_{CON1}}{V_s} \cos \delta \right) \quad (2)$$

จากรูปที่ 3 (ก)

$$V_s - \omega L_s I_{S1} \sin \theta = V_{CON1} \cos \delta$$

และ
$$I_{S1} = \frac{V_s - V_{CON1}}{j \omega L_s} \quad (3)$$

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 3 (ข) สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าและกระแสที่ไหลจากคอนเวอร์เตอร์ V_{CON} ไปยังแหล่งจ่าย V_s หรือจากบัส 2 ไปยังบัส 1 ได้ดังนี้

$$P_{21} = -P_{12}$$

และ
$$I_{S1} = \frac{V_{CON1} - V_s}{j \omega L_s} \quad (4)$$

การควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมได้จากมุม δ และการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในโหมดของอินเวอร์เตอร์ได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 3 (ข) ซึ่งเป็นวิธีการที่บทความนี้ได้นำมาใช้โดยการกำหนดแวกเตอร์ของกระแส I_{S1} ให้ทำมุม 180° และซึ่งโครโนส์กับแหล่งจ่าย V_s ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากคอนเวอร์เตอร์ V_{CON} ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแรงดันได้ดังนี้

$$V_{CON1} = \sqrt{V_s^2 + (\omega L_s I_{S1})^2} \quad (5)$$

โมดูลที่คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงทำให้ขนาดของตัวเก็บเหนี่ยวนำมีค่าน้อยลง ดังนั้นจากสมการที่ (5) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า $V_{CON} \approx V_S$ โดยที่แรงดันไฟตรงทางด้านอินพุตของคอนเวอร์เตอร์ควรมีค่าตามสมการที่ (6)

$$V_{dc} > \sqrt{2}V_S \quad (6)$$

2.2 แอคทีฟฟิลเตอร์

จากรูปที่ 4 แสดงวงจรกำลังและวิธีการควบคุมของระบบซึ่งมีหน้าที่การทำงานเป็นแอคทีฟฟิลเตอร์เพื่อแก้ตัวประกอบกำลังให้กับระบบของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ในบทความนี้ใช้วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบเต็มคลื่นเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้น พิจารณาที่แรงดัน V_s มีรูปร่างเป็นไซน์ [2]

$$v_s(t) = V_p \sin(\omega t) \quad (7)$$

กระแสโหลดไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (8)

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) นำมาพิจารณาด้วยวิธี FFT สามารถแยกได้ว่า

$$i_L(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (9)$$

สมมุติสัญญาณไซน์อ้างอิงมีค่าเท่ากับ

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

ขนาดส่วนจริงของกระแสโหลดหาได้จาก

$$I_s = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) \cdot i_r(t) dt = I_1 \cos \theta_1 \quad (11)$$

ดังนั้นส่วนจริงของกระแสโหลดที่ความถี่มูลฐาน ได้มาจากผลคูณของ i_s กับ $i_L(t)$ สามารถเขียนได้ว่า

$$i_{CS}(t) = I_s i_r(t) = I_1 \cos \theta_1 \cdot \sin(\omega t) \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) สามารถคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกได้ดังนี้

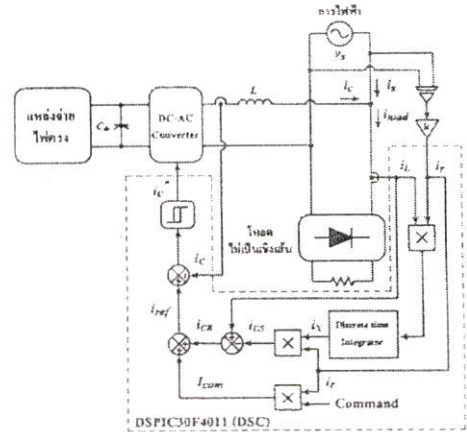
$$i_{CS}(t) = i_L(t) - i_{CS}(t) \quad (13)$$

$$i_{CS}(t) = \sum I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t)$$

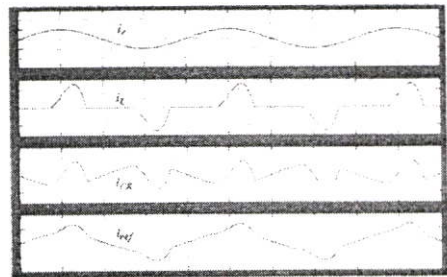
3. การออกแบบ

3.1 การคำนวณหากระแสอ้างอิง

จากวงจรกำลังและวิธีการควบคุมในรูปที่ 4 แสดงวิธีการคำนวณหากระแสอ้างอิงของคอนเวอร์เตอร์ได้จากการกำหนดขนาดและทิศทางของเวกเตอร์ i_c^* ให้มีเฟสตรงข้ามเป็นมุม 180° และซิงโครไนส์กับแรงดัน V_s แล้วนำมารวมกับกระแสชดเชยที่คำนวณตามหลักการที่กล่าวมาแล้วในตอน ที่ 2 รูปที่ 5 แสดงสัญญาณที่ได้จากการจำลองวิธีการหากระแสชดเชย เพื่อเป็นกระแสอ้างอิงให้กับการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล DSPIC30F4011(DSC) ทำการประมวลผลทั้งระบบ



รูปที่ 4 วงจรกำลังและวิธีการควบคุม



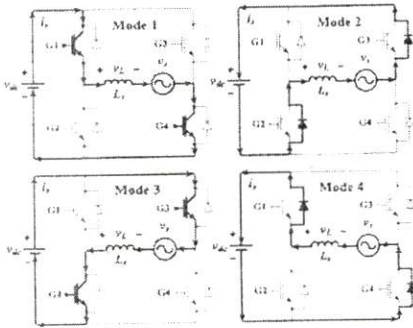
รูปที่ 5 สัญญาณที่ได้จากการจำลองวิธีการหากระแสอ้างอิง

3.2 การควบคุมกระแสด้วยวิธีฮีสเตอร์รีซิส

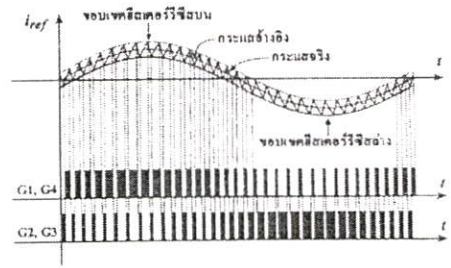
วงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ดีซี-เอซี ใช้ IGBT ทำการสวิตช์จำนวน 4 ตัว วิธีการควบคุมคือนำกระแสอ้างอิงมาสร้างขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสบนด้วยการบวกความกว้างฮีสเตอร์รีซิสกับกระแสอ้างอิงและสร้างขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสต่างด้วยการนำกระแสอ้างอิงลบความกว้างฮีสเตอร์รีซิส สมมุติกระแสอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ จากนั้นนำกระแสจริงมาเปรียบเทียบกับขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสล่าง ถ้าเท่ากัน(กระแสจริงชนขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสล่าง) สัญญาณสวิตช์ G1, G4 ต้องเปลี่ยนสถานะเป็น 1 (ON) แต่ถ้าไม่เท่ากัน ทำการเปรียบเทียบกระแสจริงกับขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสบน ถ้าเท่ากัน (กระแสจริงชนขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสบน) สัญญาณสวิตช์ G1, G4 ต้องเปลี่ยน สถานะเป็น 0 (OFF) แต่ถ้าไม่ชนทั้งสองกรณี (กระแสจริงอยู่ในขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส) ให้คงสถานะสัญญาณสวิตช์ G1, G4 ไว้ จากกระบวนการดังกล่าวจะได้สัญญาณที่ดับบลิเวอ์ที่นำไปควบคุม IGBT ทั้ง 4 ตัว (G1, G4 ตรงข้ามกับ G2, G3) ตามเงื่อนไขในตารางที่ 1 และรูปที่ 6 แสดงรูปแบบการสวิตช์แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์

Mode 1	$i_s > 0, di_s/dt > 0$ และ $v_{dc} = v_L + v_S$
Mode 2	$i_s > 0, di_s/dt < 0$ และ $v_{dc} = -v_L + v_S$
Mode 3	$i_s < 0, di_s/dt < 0$ และ $v_{dc} = v_L + v_S$
Mode 4	$i_s < 0, di_s/dt > 0$ และ $v_{dc} = -v_L + v_S$



รูปที่ 6 รูปแบบการสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 7 สัญญาณกระแสอ้างอิงและสัญญาณสวิตช์

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าความถี่สวิตช์ไม่คงที่ โดยสามารถหาความถี่สูงสุดในการสวิตช์ได้จาก

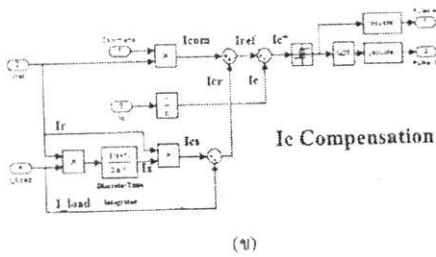
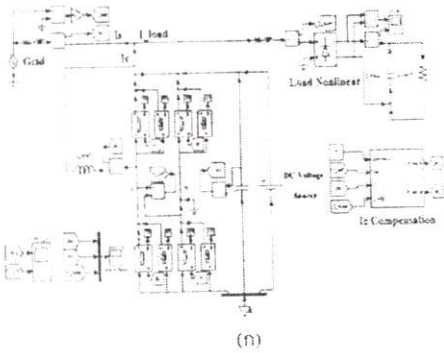
$$f_{max} = \frac{0.25V_{dc}}{(HB)L} \tag{14}$$

จากสมการที่ (14) พบว่าขณะที่แรงดันไฟตรงมีค่าคงที่ ดังนั้นความถี่สูงสุดในการสวิตช์ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) และความกว้างฮีสเตอร์รีซิส (HB) ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้ตัวเหนี่ยวนำและค่าความกว้างฮีสเตอร์รีซิสค่าเล็กมาก ๆ ได้ เพราะจะทำให้ความถี่สวิตช์สูงเกินพิกัดของตัวอุปกรณ์สวิตช์เป็นเหตุให้ตัวอุปกรณ์สวิตช์เกิดความเสียหาย

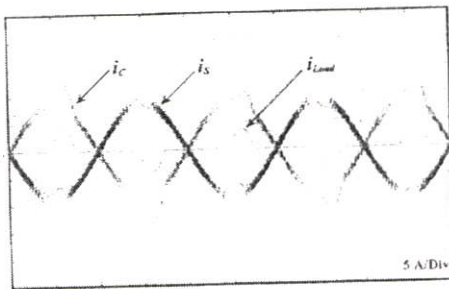
4. ผลการจำลองและผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลอง

จากหลักการพื้นฐานที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น 2 นำมาจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อศึกษาการทำงานของระบบ 1 เฟส 220 V ความถี่ 50 Hz โดยมีตัวเหนี่ยวนำ $L_s = 10$ mH, $V_{dc} = 350$ V และความกว้างฮีสเตอร์รีซิส (HB) = 0.5 A ความถี่สวิตช์สูงสุด 17.5 kHz และความถี่ในการสุ่ม 20 kHz ซึ่งภาระที่นำมาทดสอบเป็นวงจรกระแสแบบเต็มคลื่นต่ออยู่กับโหลดขนาด 100 W รูปที่ 8 (ก) แสดงการจำลองวงจรกำลังและรูปที่ 8 (ข) วิธีการคำนวณหากระแสอ้างอิง



รูปที่ 8 (ก) การจำลองวงจรกำลัง
(ข) วิธีการคำนวณหาระแสอ้างอิง



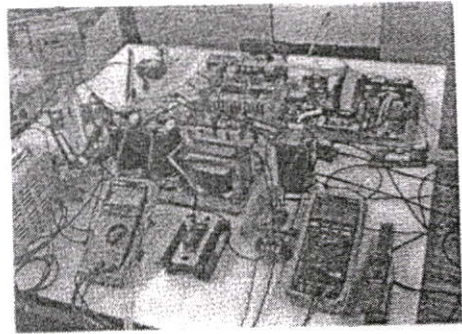
รูปที่ 9 สัญญาณกระแสที่จุดเชื่อมต่อการไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง

จากรูปที่ 9 แสดงสัญญาณกระแสที่จุดเชื่อมต่อการไฟฟ้า กระแส i_c มีรูปร่างใกล้เคียงสัญญาณไซน์และมีเฟสตรงข้าม 180° จากกระแสโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีการชดเชยจากกระแส i_c จากกฎของ KCL ผลรวมกระแสที่

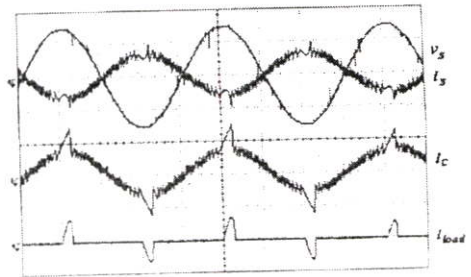
จุดใดๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ จากรูปที่ 9 สามารถพิสูจน์ได้ว่าผลรวมของ i_s , i_c และ i_{Load} เท่ากับศูนย์

4.2 ผลการทดลอง

จากการจำลองการทำงานของระบบนำมาสร้างวงจรต้นแบบ โดยในส่วนของกรควบคุมใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล DSPIC30F4011 เป็นตัวประมวลผลทั้งหมด



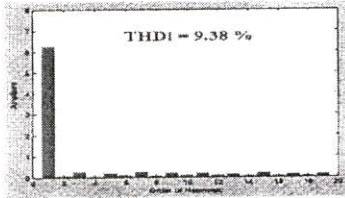
รูปที่ 10 วงจรต้นแบบและชุดควบคุมที่จัดทำขึ้น



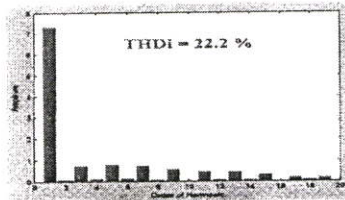
รูปที่ 11 สัญญาณแรงดันและกระแสที่จุดเชื่อมต่อการไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง(แรงดัน 100 V/div, กระแส 10 A/div)

รูปที่ 10 แสดงวงจรต้นแบบและชุดควบคุมที่จัดทำขึ้น รูปที่ 11 แสดงรูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่จุดเชื่อมต่อการไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองในรูปที่ 9 จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงดัน v_s และ i_c ทำมุมห่างกัน 180° นั้นหมายความว่า

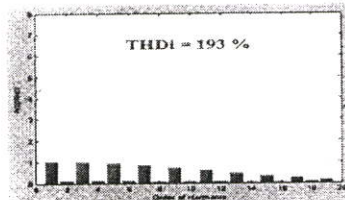
กำลังไฟฟ้าไหลกลับสู่การ ไฟฟ้า โดยมีรูปร่างใกล้เคียงไซน์ และขนาดเท่ากับกระแสคำสั่งที่กำหนดไว้ในโปรแกรมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ดีซี-เอซี ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดและการไฟฟ้า



(ก)

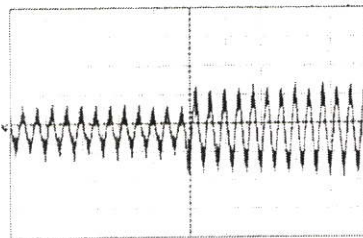


(ข)



(ค)

รูปที่ 12 (ก) สเปกตรัมของกระแส i_s
 (ข) สเปกตรัมของกระแส i_C
 (ค) สเปกตรัมของกระแส i_{load}



รูปที่ 13 สัญญาณกระแส i_s เมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสคำสั่งทันทีทันใด(กระแส 10 A/div)

รูปที่ 12 แสดงสเปกตรัมของกระแสที่จุดเชื่อมต่อ การไฟฟ้า ที่พิจารณาที่ความถี่มูลฐาน พบว่าขนาดกระแส i_s จะเท่ากับขนาดกระแสโหลดรวมกับกระแส i_C และที่ความถี่ฮาร์โมนิกของกระแสโหลดจะถูกจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ดีซี-เอซีเท่านั้น ส่งผลให้กระแส i_s มีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง รูปที่ 13 แสดงผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสคำสั่งทันทีทันใด ซึ่งระบบมีผลตอบสนองเป็นที่น่าพอใจ

5. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ นำเสนอคอนเวอร์เตอร์ดีซี-เอซี เชื่อมต่อการ ไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเพื่อคำนวณหากระแสอ้างอิงให้กับการควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซิส ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณที่ไม่ยุ่งยาก จากผลการทดลองพบว่าคอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไปยังโหลดและจ่ายกลับคืนการ ไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งจากโหลดไม่ เป็นเชิงเส้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Kin, Gwanjong Yo, Jinsoo Song "A bifunctional Utility Connected Photovoltaic System with Power Factor Correction and U.P.S. Facility" Proc. IEEE 25th PVSC, May 13-17, pp 1363-1368, 1996
- [2] H.-L. Jou, J.-C. Wu, H.-Y. Chu "New single-phase active power filter" IEE Proc.-Electr. Power Appl, pp 129-133, 1994
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins "Power Electronic Converter, Application and Design" John Wiley & Sons Inc, 1995
- [4] อภิวัฒน์ คันทวี, วิจิตร กิมเรศ "การวิเคราะห์และออกแบบ IGBT คอนเวอร์เตอร์สำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, 2546, หน้าที่ 648-653, โรงแรม โกลเด้น แชนด์ ชะอำ จ.เพชรบุรี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวิศิษฐ์ ชูรัมย์
วัน เดือน ปีเกิด	22 กุมภาพันธ์ 2522
ที่อยู่	187 ถ.โชคสมาน 6 ต.หาดใหญ่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110 โทร 074-358683
ประวัติการศึกษา	2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร