

อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมการทำงาน
ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลซึ่งให้ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ต่ำ

A LOW HARMONIC CURRENT PHOTOVOLTAIC GRID CONNECTED
INVERTER WITH DIGITAL SIGNAL PROCESSING CONTROLLER



คมกฤตย์ ชมสุวรรณ

KOMKRIT CHOMSUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-894-5

**A LOW HARMONIC CURRENT PHOTOVOLTAIC GRID CONNECTED
INVERTER WITH DIGITAL SIGNAL PROCESSING CONTROLLER**

KOMKRIT CHOMSUWAN

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

2002

ISBN 974-648-894-5

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมการทำงานด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลซึ่งให้ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ต่ำ
นักศึกษา	นายคมกฤตย์ ชมสุวรรณ
รหัสประจำตัว	42061180
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ประภาส ไพรสุวรรณ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมการทำงานด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลซึ่งให้ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ต่ำ โดยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะวิเคราะห์ค่ากระแสและแรงดันที่จ่ายจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังงานที่ค่าสูงสุดอยู่ตลอดเวลา โดยการควบคุมกระแสจ่ายออก ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ใช้หลักการรับและคืนพลังงานของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มคลื่น จากนั้นจะทำการตรวจจับรูปคลื่นของกระแสในสายส่งและเมื่อรูปคลื่นของกระแสมีค่าเป็นศูนย์สวิตช์ ในส่วนอินเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมให้เปลี่ยนสถานะ เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มคลื่นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะเป็นชานัน์โดยมีค่าความเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสต่ำ ลักษณะการควบคุมให้สวิตช์เปลี่ยนสถานะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ดังกล่าวส่งผลให้ค่าสูญเสียจากการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์มีน้อย

การทดสอบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งนี้จะวิเคราะห์ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ทั้งจากการวัดและการนำผลไปวิเคราะห์ในโปรแกรม MATLAB รวมทั้งเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับผลการจำลองด้วยโปรแกรม OrCAD PSpice และวัดค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเพื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพของระบบ รวมไปถึงการทดสอบการหาค่ากำลังงานจ่ายออกสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสง

Thesis Title	A Low Harmonic Current Photovoltaic Grid Connected Inverter with Digital Signal Processing Controller
Student	Mr.Komkrit Chomsuwan
Student ID.	42061180
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Asst.Prof. Prapart Prisuwana

ABSTRACT

This thesis proposes a low harmonic current photovoltaic grid connected inverter with Digital signal processing controller. The Digital signal processing controller analyzes the photovoltaic operating point that gives a maximum power to deliver a high efficiency by controlling the output current. The technique of this inverter is to change the direct current to full wave direct current by using characteristics of an inductor and capacitor. Then it is converted to sine waves by using an inverter bridge switch which is controlled to change the state when the current waveform is equal to zero that the result is loseless in the inverter switch.

The efficiency testing of this inverter analyzes the harmonic current both measurement and analysis by using MATLAB program, compares the result with simulation by OrCAD PSpice program and measures the inverter loss to find out the efficiency. Finally, solar cell array is tested the maximum power point tracking when the illumination have changed

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำคำปรึกษารวมทั้งการอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ จาก ผศ.ประภาส ไพรสุวรรณ ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ และการให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านเทคนิคในการพัฒนาและวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัย ของ ดร.วีระพล โมนยะกุล ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม และห้องปฏิบัติการวิจัยระบบพลังงานสะอาด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทั้งด้านสถานที่และเครื่องมือสำหรับใช้ในการทดสอบ

ขอขอบพระคุณ ดร.กฤษณพงศ์ กีรติกร ผศ.วิไลภญา ศรีมาวิน ผศ.ดร.ดวงรัชนี นันทวิสารกุล ดร.นันทน์ ถาวรังกุล ดร.จิรวรรณ เตียรต์สุวรรณ ผศ.ดร.มารศรี เรืองจิตซ์ชาลัย ผศ.ดร.สุพัฒน์พงศ์ คำรงค์รัตน์ ดร.นคร ศรีสุขุมบวรชัย รวมทั้งคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อีกหลายท่านซึ่งไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ที่มีส่วนเป็นกำลังใจและช่วยเหลือรวมทั้งให้คำแนะนำในการทำงาน

ขอขอบคุณ ดร.วิจิตร กิณเรศ อ.สุรินทร์ คำฝอย อ.เฉลิมชาติ มานพ และคุณชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล ที่มีส่วนในการให้คำแนะนำที่ดีในการวิจัย

ท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คมกฤตย์ ชมสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	XI
คำอธิบายสัญลักษณ์	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.3 การหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	10
2.4 ลักษณะทั่วไปของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับ แผงเซลล์แสงอาทิตย์	11
2.4.1 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว	11
2.4.2 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น	12
2.5 สรุป	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและวิเคราะห์ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่ง	
แบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์	15
3.1 บทนำ	15
3.2 ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้น	
สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอ	15
3.2.1 การวิเคราะห์หลักการทำงานและ	
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	16
3.2.2 การออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่ง	18
3.2.3 ตัวอย่างการออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์	
เชื่อมต่อสายส่งที่นำเสนอ	19
3.3 การจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์	20
3.3.1 การจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB	22
3.3.2 การจำลองผลการทำงานของระบบ	
แบบไม่เชื่อมต่อสายส่งด้วย โปรแกรม OrCAD PSpice	23
3.3.3 การจำลองผลการทำงานของระบบแบบเชื่อมต่อกับสายส่ง	
ด้วยโปรแกรม OrCAD PSpice	27
3.4 สรุป	28
บทที่ 4 การควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับ	
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	29
4.1 บทนำ	29
4.2 โครงสร้างของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่ง	
แบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์	29
4.2.1 การควบคุมจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	30
4.2.2 การรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบชานน์	32
4.3 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ADMC 331	36
4.3.1 การกำเนิดค่าสัญญาณอ้างอิงชานน์แบบตามเวลาจริง	37
4.3.2 การควบคุมแบบพีไอ	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การออกแบบโปรแกรมควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอด้วย ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ADMC331	38
4.5 สรุป	40
บทที่ 5 ระบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้น	41
5.1 บทนำ	41
5.2 ระบบวงจรกำลัง	41
5.2.1 วงจรกรองแรงดัน	42
5.2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัส – บุสท์ ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว	42
5.2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์	43
5.3 ระบบวงจรควบคุม	45
5.3.1 วงจรขับเคลื่อน	45
5.3.2 วงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน	45
5.4 ระบบต้นแบบและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบ	46
5.5 สรุป	53
บทที่ 6 การทดสอบและผลการทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่ง แบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์	54
6.1 บทนำ	54
6.2 ผลการตรวจสอบการทำงานของระบบ	54
6.2.1 ผลทดสอบการทำงานในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณควบคุม	55
6.2.2 ผลทดสอบการทำงานในระบบวงจรกำลัง	58
6.3 การหาค่ากำลังงานสูงสุด	64
6.4 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ	67
6.4.1 ผลการทดสอบการทำงานขณะไม่เชื่อมต่อกับ ระบบสายส่งของการไฟฟ้า	67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4.2 ผลการทดสอบการทำงานขณะเชื่อมต่อกับ ระบบสายส่งของการไฟฟ้า	73
6.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ	78
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ	82
7.1 บทนำ	82
7.2 สรุปผลการทดลอง	82
7.3 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก ก.	85
ภาคผนวก ข.	95
ภาคผนวก ค.	110
ประวัติผู้เขียน	116

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1 ผลการทดสอบการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าภาระต่างๆ โดยทำการทดสอบที่ความเข้มแสง 800 W/m ²	64
6.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพที่ค่ากำลังงานจ่ายเข้าต่างๆ	78
6.2 (ต่อ) ผลการทดสอบประสิทธิภาพที่ค่ากำลังงานจ่ายเข้าต่างๆ	79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรมุมมูลย์ในอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์6
2.2	วงจรมุมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์7
2.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์8
2.4	กราฟแสดงคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามความเข้มของแสง8
2.5	กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิทำงานต่างๆ9
2.6	กราฟแสดงคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์9
2.7	บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว12
2.8	โครงสร้างวงจรของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว12
2.9	บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น13
2.10	โครงสร้างวงจรของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น13
2.11	บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์13
3.1	วงจรถ้ากำลังของอินเวอร์เตอร์แบบ 2 ขั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่นำเสนอ16
3.2	รูปแสดงการทำงานเมื่อ S_1 กับ S_2 นำกระแสและ D_1 กับ D_2 หยุดนำกระแส17
3.3	รูปแสดงการทำงานเมื่อ S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแสและ D_1 กับ D_2 นำกระแส17
3.4	วงจรมุมมูลย์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัก – บูลส์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว18
3.5	บล็อกไดอะแกรมของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัก – บูลส์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว18
3.6	ระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงาน21
3.7	บล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB21
3.8	ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB22
3.9	รูปคลื่นแรงดัน และรูปคลื่นกระแส ที่จ่ายให้วงจรคอนเวอร์เตอร์23
3.10	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ทางด้านรับไฟ23
3.11	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ทางด้านจ่ายไฟ24
3.12	รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ24
3.13	รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ25
3.14	รูปคลื่นแรงดัน และรูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบบัก – บูลส์25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 รูปคลื่นแรงดัน และรูปคลื่นกระแส ที่จ่ายออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์	26
3.16 สเปกตรัมของรูปคลื่นในรูปที่ 3.15 ซึ่งให้ค่า $THD_v = THD_i = 4.56\%$	26
3.17 รูปคลื่น และสเปกตรัมของกระแสจ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์เมื่อ ไม่มีการควบคุมลักษณะของรูปคลื่น ซึ่งมีค่า $THD_i = 7.93\%$	27
3.18 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์ ในขณะเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง	27
3.19 แสดงสเปกตรัมของรูปคลื่นในรูปที่ 3.18 ซึ่งค่า THD_v ขึ้นอยู่กับระบบสายส่ง และ $THD_i = 5.9\%$	28
4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งสำหรับ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอ	30
4.2 โพลีชาร์ทแสดงการหาจุดกำลังงานสูงสุด โดยใช้เทคนิค Hill Climbing Algorithm แบบควบคุมกระแสอ้างอิง	31
4.3 แสดงผลการจำลองการทำงานของ Hill Climbing Algorithm ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ	32
4.4 รูปคลื่น PWM ที่มีการสุ่มสัญญาณแบบสมมาตร	33
4.5 รูปคลื่น PWM แบบสมมาตรและไม่สมมาตร	34
4.6 รูปคลื่น PWM และสเปกตรัมของฮาร์โมนิกส์	35
4.7 โครงสร้างของ ADMC331	36
4.8 การประมาณค่าอินทิกรัล โดยใช้เทคนิค ZOH	38
4.9 โพลีชาร์ทของโปรแกรมควบคุมการทำงานของ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งที่นำเสนอ	39
5.1 ระบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่ง แบบ 2 ชั้นที่นำเสนอ	41
5.2 วงจรสมมูลลักษณะที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 จ่ายกำลังงานเข้าสู่ระบบสายส่ง ของการไฟฟ้า	43
5.3 วงจรขั้วเกิด	44
5.4 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมไอจีบีที กับสัญญาณที่ออกจากวงจรขั้วเกิด	44
5.5 วงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 Isolation amplifier four channel ของ LEYBOLD Didactic ที่ใช้สำหรับ ตรวจจับแรงดัน	46
5.7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบ	47
5.8 บอร์ดตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ (ADMC331)	48
5.9 ชุดระบบต้นแบบในส่วนชุดควบคุมทั้งหมดและวงจรคอนเวอร์เตอร์	49
5.10 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	50
5.11 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบจ่ายแรงดันคงที่ที่ใช้ในการทดสอบ	50
5.12 เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพกำลังงานไฟฟ้า Fluke 43 ที่ใช้วัดและทดสอบ	51
5.13 เครื่องมือวิเคราะห์กำลังงานไฟฟ้า YOKOGAWA รุ่น PZ 4000 ที่ใช้วัดและทดสอบ	51
5.14 เครื่องมือวัดสัญญาณทางไฟฟ้า YOKOGAWA รุ่น DL708 ที่ใช้วัดและทดสอบ	52
5.15 เครื่องมือวัดปริมาณความเข้มของแสงที่ใช้ (Solar Integrator)	52
6.1 วงจรและเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ	54
6.2 รูปคลื่นที่ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลอ่านค่าได้	55
6.3 รูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงขาอินพุตที่ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสร้างขึ้น	56
6.4 สัญญาณควบคุมพีคแบบลิวเอ็มสำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบบัค – บูสท์	56
6.5 สัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์	57
6.6 แสดงช่วงเวลาเดดไทม์ของสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์	57
6.7 รูปคลื่นแรงดัน V_s และกระแส I_s ที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายแรงดันคงที่	58
6.8 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตช์ S_1 (IGBT) ทางด้านรับไฟ	59
6.9 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตช์ S_2 (IGBT) ทางด้านจ่ายไฟ	59
6.10 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตช์ D_1 (Diode) ทางด้านรับไฟ	60
6.11 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตช์ D_2 (Diode) ทางด้านจ่ายไฟ	60
6.12 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้าตัวเหนี่ยวนำ L_1 ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบบัค – บูสท์	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.13 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค – บูสท์	61
6.14 รูปคลื่นแรงดัน V_{dc} และกระแส I_{dc} ที่ออกจากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค – บูสท์	62
6.15 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o ที่ออกจากอินเวอร์เตอร์	62
6.16 รูปคลื่นแรงดัน V_s และกระแส I_s ที่ไหลออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์	63
6.17 กราฟคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบ	65
6.18 กราฟแสดงการหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์วัดด้วย Fluke 43 Power quality analyzer	66
6.19 กราฟค่ากระแสอ้างอิงและกระแสจริงที่อ่านได้โดยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในขณะทดสอบการทำงานของส่วนหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	66
6.20 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o จำขออกจากอินเวอร์เตอร์เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานอย่างเดี่ยว	67
6.21 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o จำขออกจากอินเวอร์เตอร์ที่วัดได้จาก Fluke 43 เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานอย่างเดี่ยว	68
6.22 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o จำขออกจากอินเวอร์เตอร์ที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม MATLAB เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานอย่างเดี่ยว	69
6.23 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o จำขออกจากอินเวอร์เตอร์เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานกับมอเตอร์	70
6.24 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o จำขออกจากอินเวอร์เตอร์ที่วัดได้จาก Fluke 43 เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานกับมอเตอร์	71
6.25 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o จำขออกจากอินเวอร์เตอร์ที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม MATLAB เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานกับมอเตอร์	72
6.26 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o จำขออกจากอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกับสายส่ง	73
6.27 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o ขณะเชื่อมต่อกับสายส่ง	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.28 รูปคลื่นแรงดันและกระแสจ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกับ สายส่งเมื่อจ่ายกำลังงานให้กับระบบของการไฟฟ้า	74
6.29 รูปคลื่นแรงดันและกระแสจ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อ กับสายส่งโดยยังไม่จ่ายกำลังงานให้กับระบบของการไฟฟ้า	75
6.30 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 6.26 วัดด้วย Fluke 43	76
6.31 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 6.26 วิเคราะห์โดยโปรแกรม MATLAB	77
6.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับกำลังงานจ่ายเข้า	80
6.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสฮาร์โมนิกส์กับค่ากระแสจ่ายออก	80

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	:	ค่าคงที่ของรอยต่อ
A_C	:	พื้นที่ใช้งานในแกน, cm^2
A_p	:	พื้นที่ใช้งาน, $W_a \times A_C$, cm^4
B_m	:	ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก, <i>teslas</i>
d	:	คูตีโซเกิด
E	:	กำลังงาน, J
f_h	:	ความถี่ฮาร์โมนิกส์, Hz
f_0	:	ความถี่มูลฐาน, Hz
h	:	อันดับของฮาร์โมนิกส์
i_i	:	กระแสไหลเข้า, A
i_o	:	กระแสไหลออก, A
I_0	:	ค่ากระแสอิ่มตัวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์, A
I_{sc}	:	กระแสลัดวงจร, A
k	:	ค่าคงที่บอลลท์ซแมนน์
K_I	:	ค่าคงที่อินทิกรัล (Proportional)
K_J	:	ค่าตัวประกอบความหนาแน่นของกระแส
K_P	:	ค่าคงที่ผกผัน (Proportional)
K_u	:	ค่าตัวประกอบการใช้งานของหน้าต่าง
m_a	:	ดัชนีการมอดคูเลทเชิงขนาด
m_f	:	ดัชนีการมอดคูเลทเชิงความถี่
N	:	จำนวนรอบ
q	:	ค่าประจุของอิเล็กตรอน
R_s	:	ความต้านทานอนุกรมภายในของแผงเซลล์แสงอาทิตย์, Ω
R_{sh}	:	ความต้านทานขนานภายในของแผงเซลล์แสงอาทิตย์, Ω
T	:	อุณหภูมิ, K
t_n	:	ค่าเวลาใดๆ, s
T_{on}	:	ช่วงเวลาทำงาน, s
T_{sample}	:	ช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง, s

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

- \dot{x}_1 : ค่าตัวแปรสถานะของกระแส
- \dot{x}_2 : ค่าตัวแปรสถานะของแรงดัน
- ω_0 : ความถี่เชิงมุมมูลฐาน, rad/s
- ω_{PI} : ความถี่เชิงมุมของตัวควบคุมผลผัน - อินทิกรัล, $\frac{K_I}{K_P}$, rad/s
- α : ค่ามุมใดๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญมากที่สุดแหล่งหนึ่ง เนื่องจากพลังงานดังกล่าวได้มาโดยไม่สูญเสียทรัพยากรธรรมชาติอื่นใด ทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่สามารถใช้ได้โดยไม่มีวันหมด ดังนั้นจึงมีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมรวมไปถึงการอุปโภคบริโภคต่างๆ การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้าเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นว่ามีความสำคัญมากต่อชุมชน โดยเฉพาะในชนบทห่างไกลที่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าในการอุปโภคบริโภค เช่น การสูบน้ำเก็บไว้ใช้ภายในหมู่บ้าน เป็นต้น หรือแม้กระทั่งบนสถานีอวกาศและยานอวกาศจะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้า ปัจจุบันความจำเป็นในการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยิ่งทวีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันมีปริมาณน้อยลงเรื่อยๆ และอาจหมดลงภายในระยะเวลาไม่เกิน 100 ปีข้างหน้า วิธีการหนึ่งที่หลายๆ แห่งนำมาใช้ช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงคือ การใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยในการจ่ายภาระร่วมกับระบบไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน เพื่อเป็นการลดค่าสูงสุดของพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการเป็นอย่างมากในช่วงเวลากลางวัน [1]

ไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นการนำไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการจ่ายภาระร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ จำเป็นต้องเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยอินเวอร์เตอร์ซึ่งใช้เทคนิคการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจะมีค่ากำลังงานสูญเสียเกิดขึ้น โดยส่วนหนึ่งเป็นค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง อีกส่วนหนึ่งเป็นการสูญเสียเนื่องจากลักษณะของรูปคลื่นกระแสที่สร้างขึ้นมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ หรือมีค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากค่ากระแสฮาร์โมนิกส์

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเทคนิค และวิธีการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น ซึ่งแต่ละเทคนิคก็จะให้ผลดีและเสียที่แตกต่างกัน เทคนิคการเปลี่ยนรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีลักษณะเป็นชานน์แบบเต็มคลื่น ด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค — บูลท์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว ซึ่งใช้คุณสมบัติในการเก็บสะสมพลังงานและจ่ายพลังงานคืนของตัวเหนี่ยวนำในวงจรคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าว นอกจากนี้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค — บูลท์

ที่ใช้สวิทช์ 2 ตัวทั้งยังทำหน้าที่ควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุดอีกด้วย

เทคนิคนี้จะช่วยลดจำนวนของอุปกรณ์สวิทช์ซึ่งทำงานที่ความถี่สูง ซึ่งเท่ากับเป็นการลดค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนอินเวอร์เตอร์ลงได้ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเป็นที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นวิธีการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมการทำงานอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อให้มีค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ต่ำ โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัก — บุกส์ที่ใช้สวิทช์ 2 ตัว ในการดึงพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีกำลังงานจ่ายออกสูงสุดอยู่ตลอดเวลา และยังทำหน้าที่เปลี่ยนรูปคลื่นจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีลักษณะเป็นซายน์แบบเต็มคลื่น และเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับระบบของการไฟฟ้า

1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการควบคุมกำลังงานไฟฟ้าจ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังงานสูงสุดอยู่ตลอดเวลา จากนั้นจึงจะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์ จากหลักการดังกล่าวนี้พบว่าค่าสูญเสียจะเกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์เป็นอย่างมาก การลดค่าสูญเสียนี้อาจทำได้โดยการออกแบบให้อุปกรณ์ สวิทช์ทำงานที่สภาวะกระแสหรือแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะมีความยุ่งยากในการออกแบบระบบมากขึ้น

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงนำเสนอวิธีการควบคุมใหม่โดยการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซายน์เต็มคลื่น โดยควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัก — บุกส์ที่ใช้สวิทช์ 2 ตัว ด้วยเทคนิคการรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบซายน์เต็มคลื่น ก่อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนรูปคลื่นดังกล่าวไปเป็นรูปคลื่นซายน์และเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้า ดังนั้นอุปกรณ์สวิทช์ของอินเวอร์เตอร์จึงทำงานที่สภาวะแรงดันและกระแสมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้เกิดค่าสูญเสียในอินเวอร์เตอร์น้อยลง นอกจากนี้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัก — บุกส์ ที่ใช้สวิทช์ 2 ตัวยังทำหน้าที่ดึงกำลังงานสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการควบคุมค่ากระแสอ้างอิง ซึ่งระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งดังกล่าวนี้

ยังคงสามารถควบคุมให้ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์มีค่าอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดได้เช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบเดิม

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาชุดต้นแบบของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้น สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสต์ที่ใช้ สวิตช์ 2 ตัว
2. ใช้เทคนิคการเปลี่ยนรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปเป็นรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซายน์เต็มคลื่น โดยควบคุมที่วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสต์ ที่ใช้ สวิตช์ 2 ตัว ก่อนเปลี่ยนไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีรูปคลื่นซายน์ด้วยอินเวอร์เตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้า เพื่อลดค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรอินเวอร์เตอร์
3. ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในการควบคุมการทำงานของระบบ เพื่อเพิ่มความเชื่อถือให้กับระบบเนื่องจากการประมวลผลการทำงานแบบซิปเดียว ซึ่งช่วยลดความยุ่งยากในส่วนวงจรควบคุมลง
4. ควบคุมการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้จ่ายกำลังงานที่สูงสุดอยู่ตลอดเวลา โดยใช้เทคนิคการควบคุมค่ากระแสอ้างอิง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลจากบทความและวารสารต่างๆ เกี่ยวกับระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบของการไฟฟ้าแบบต่างๆ ที่ได้พัฒนาขึ้น
2. วิเคราะห์ระบบโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์และออกแบบระบบที่น่าเสนอ
3. จำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อดูผลและปัญหาที่เกิดขึ้นและแก้ไขระบบที่ออกแบบแล้วให้ใกล้เคียงกับระบบที่ต้องนำไปใช้จริง นอกจากนั้นยังใช้เป็นผลอ้างอิงในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลทางปฏิบัติ
4. พัฒนาชุดต้นแบบและทดสอบผลการทำงานเบื้องต้น
5. ทดสอบการทำงานจริง
6. วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบจริง และนำเสนอวิธีการแก้ไขเพื่อใช้ในการปรับปรุงจุดบกพร่องของระบบ
7. ปรับปรุงระบบโดยใช้การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์อีกครั้ง เพื่อให้มีการทำงานที่ใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด

8. ทดสอบและเก็บผลการทดลอง
9. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบและทดลองระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมการทำงานด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็นบทดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงที่มาของปัญหา ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย ขอบเขต วิธีการวิจัย โครงสร้างของวิทยานิพนธ์และประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เทคนิคการหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอ แสดงหลักการทำงาน และสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการทำงานของระบบ และผลการจำลองการทำงานของระบบ

บทที่ 4 เทคนิคการควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ เทคนิคการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มบนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและเทคนิคการหาค่ากำลังงานสูงสุดโดยอธิบายอยู่ในรูปของโพลีชาร์ท รวมถึงโพลีชาร์ทของโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบด้วย

บทที่ 5 อธิบายและการออกแบบระบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งแบบ 2 ชั้นที่นำเสนอทั้งหมด และแสดงรูประบบจริงที่ใช้ในการทดสอบ

บทที่ 6 ผลการทดลองทั้งหมดซึ่งประกอบด้วย ผลการตรวจสอบการทำงานของวงจรทั้งวงจรกำลังและวงจรควบคุมรวมทั้งการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลด้วย ผลการทดสอบจริงของการหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รูปคลื่นของกระแสและแรงดันขณะไม่เชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้าและเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้า รวมถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งแบบ 2 ชั้นที่นำเสนอ

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไป

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

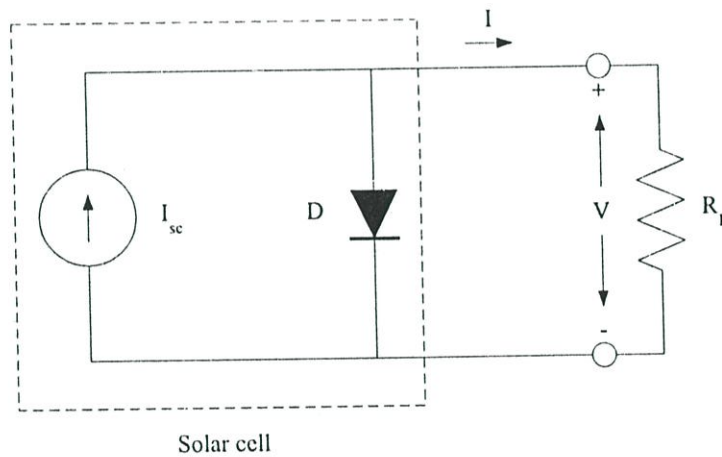
1. มีความสะดวกในการปรับปรุงการทำงาน โดยการพัฒนาโปรแกรมบนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
2. เป็นการประยุกต์ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล โดยนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งให้มีความถูกต้องและแม่นยำรวมทั้งความเร็วในการประมวลผลการทำงาน
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและสามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic phenomenon) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะไม่มีส่วนเคลื่อนที่ใดๆ ทำให้มีข้อดีในเรื่องความสะดวกต่อการนำไปใช้งาน มีการบำรุงรักษาที่ง่าย และอายุการใช้งานยาวนาน การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้ายังมีอุปสรรคในเรื่องของราคาเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ เนื่องจากประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 8-15% เท่านั้น ดังนั้นการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ตลอดเวลาจึงเป็นสิ่งจำเป็น บทนี้จะอธิบายหลักการและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ การควบคุมการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุด รวมไปถึงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลในอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์

2.2 ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

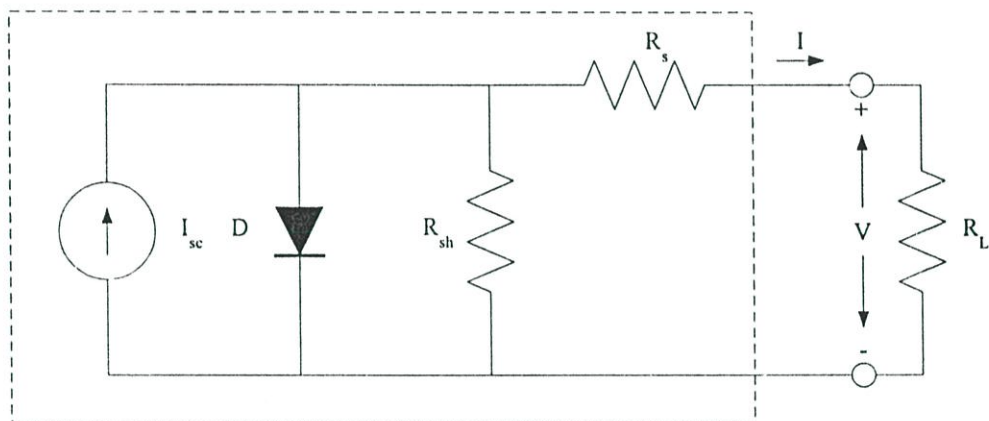
เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตขึ้นมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โครงสร้างวัสดุสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) เหมือนไดโอด ดังนั้นคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสขนานกับไดโอดดังรูปที่ 2.1 ซึ่งปริมาณกระแส I_{sc} นี้กำเนิดจาก

ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกที่ความเข้มของแสงค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ส่วนไดโอดจะแสดงถึงคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นค่ากระแสจ่ายออก I จึงสามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างของกระแส I_{sc} ที่กำเนิดจากแสงอาทิตย์กับกระแสของไดโอดดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right] \quad 2.1$$

อย่างไรก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ดังในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีทั้งความต้านทานที่ขนานและความต้านทานที่อนุกรมกับวงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ ดังนั้นสมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.2

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

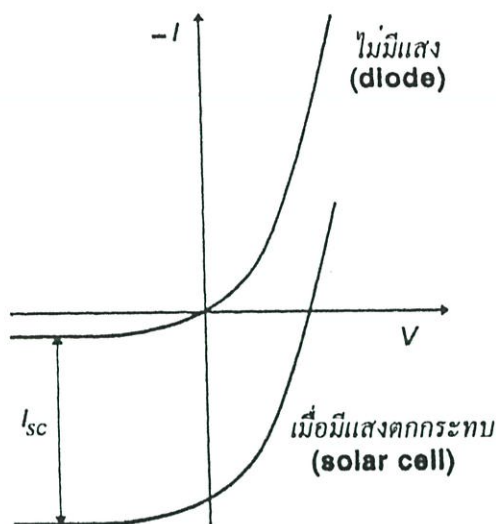


Solar cell

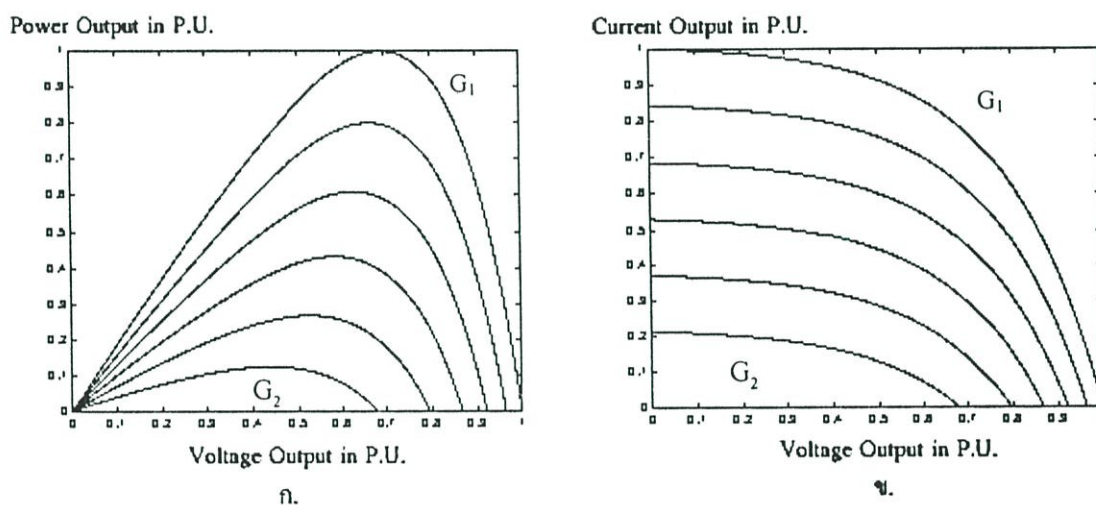
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์

จากสมการที่ 2.2 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันจ่ายออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2.3 ในสถานะที่ไม่มีแสงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีคุณสมบัติเหมือนไดโอดเนื่องจากมีโครงสร้างของวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกัน แต่เมื่อให้แสงกับเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกขึ้นและผลิตแรงดันและกระแสไฟฟ้าออกมา

เมื่อพิจารณาในสถานะเปิดวงจร กระแสจะไหลเข้าไดโอดทั้งหมดทำให้กระแสจ่ายออกจะมีค่าเป็นศูนย์ ในทางกลับกันถ้าลัดวงจรกระแสจ่ายออกก็จะไหลออกสู่วงจรภายนอกทั้งหมด เมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มของแสงจะเป็นผลให้ค่ากระแส I_{sc} มีค่าเปลี่ยนไปด้วยซึ่งแปรผันตรงกับค่าความเข้มของแสง ในขณะที่ค่าแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรืออาจกล่าวได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแส



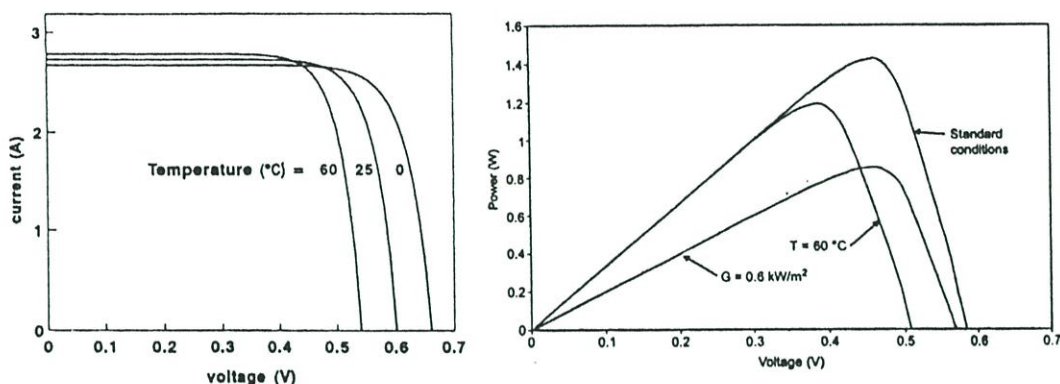
รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามความเข้มของแสงจากเส้น G_1 ที่มีค่าความเข้มของแสงมากกว่า G_2 ที่มีค่าความเข้มของแสงน้อย
(ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและแรงดัน
(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

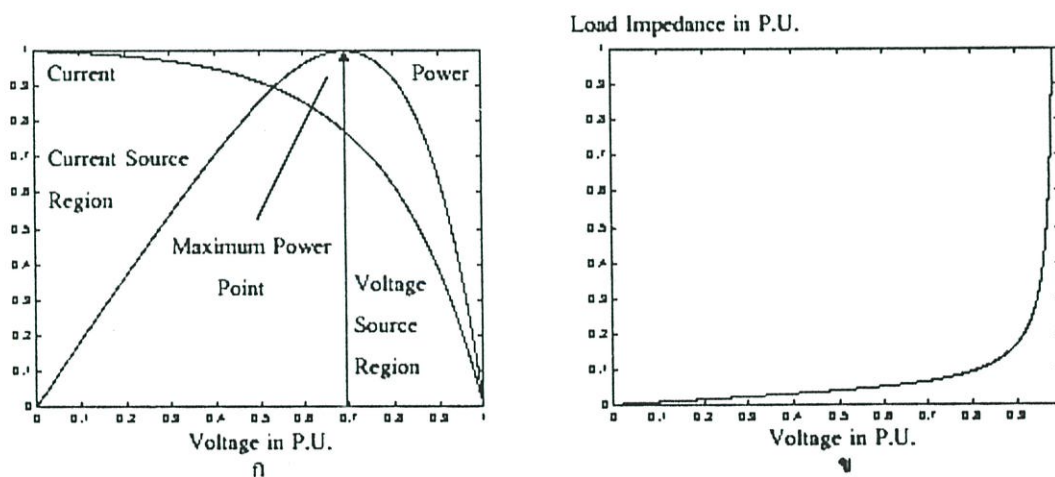
ความเข้มของแสงเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าแสงมีความเข้มต่ำจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ต่ำเช่นเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามถ้าความเข้มของแสงมีมากก็จะผลิตไฟฟ้าได้มากเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 2.4 (ข) ส่วนในรูป 2.4 (ก) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ จากรูปเมื่อความเข้มของแสงเปลี่ยนไป ค่ากระแสสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถให้กำเนิดได้จะมีค่าเปลี่ยน

ตามในขณะที่แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน พบว่าค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าสูงสุดค่าหนึ่งที่ทุกความเข้มของแสง



รูปที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิทำงานต่างๆ

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้ายังมีองค์ประกอบอื่นๆ อีกหลายประการ เช่น อุณหภูมิขณะทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.5 ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ลดลง ตำแหน่งหรือมุมรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น องค์ประกอบเหล่านี้เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่จะลดประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

- ก. แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- ข. ความสัมพันธ์ของความต้านทานของภาระกับแรงดันจ่ายออก

2.3 การหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [2]

การทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เป็นผลให้การผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีค่าไม่คงที่ และมีประสิทธิภาพไม่เท่ากับความสามารถที่ควรจะได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุด (Maximum power point; MPP) จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากเนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดที่จุดดังกล่าว

จากรูปที่ 2.6 อธิบายคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพิจารณาจากจุดกำลังงานสูงสุดไปทางบริเวณแหล่งจ่ายกระแส (Current source region) ขณะเพิ่มค่าภาระขึ้นจะทำให้กระแสจ่ายออกลดลง แต่ในทางกลับกันกำลังงานจ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งและเริ่มตกลง เมื่อมีการเพิ่มค่าภาระมากยิ่งขึ้นจนกระทั่งไม่มีกระแสไหลและกำลังงานจ่ายออกมีค่าเป็นศูนย์ จากการพิจารณาสามารถกล่าวได้ว่าเป็นไปตามทฤษฎีการส่งถ่ายกำลังงานสูงสุด (Maximum Power Transfer) ซึ่งค่ากำลังงานสูงสุดดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความต้านทานภายในของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของภาระ

เทคนิคการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุด [3, 4] สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี Perturbation & Observation Method (P&O) วิธีการนี้จะใช้การตรวจจับค่าแรงดันและกระแสที่จ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำมาพิจารณาหาจุดให้กำลังงานสูงสุด โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความชันระหว่างกำลังงานไฟฟ้าที่ได้รับเทียบกับค่าแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการที่ 2.3 หรือใช้การเปรียบเทียบค่ากำลังงานไฟฟ้าค่าใหม่ที่ตรวจจับได้กับค่ากำลังงานไฟฟ้าเดิม และควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่า ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ค่อนข้างง่ายและมีความแม่นยำสูงที่ค่าความเข้มของแสงสูงๆ แต่ที่ค่าความเข้มของแสงต่ำๆ ความถูกต้องของการหาจุดกำลังงานสูงสุดจะมีค่าลดลงเนื่องจากที่ค่าความเข้มของแสงต่ำค่าความชัน หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้ากับค่าแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกจะมีค่าต่ำ

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad 2.3$$

อีกวิธีหนึ่งคือ Incremental Conductance Method วิธีการนี้จะตรวจจับค่าแรงดันและกระแสและพิจารณาความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.4 และควบคุมให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานตามความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งวิธีนี้จะมีความยุ่งยากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีแรกแต่จะให้ความแม่นยำมากกว่า

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{I}{V} \quad 2.4$$

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการควบคุมการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานที่จุดกำลังงานสูงสุดด้วยวิธี Perturbation & Observation Method โดยใช้เทคนิค Hill climbing algorithm แบบควบคุมค่ากระแสอ้างอิง ซึ่งจะทำให้การตรวจจับค่ากระแส และแรงดันจ่ายออกเพื่อนำมาคำนวณหาค่า

กำลังงานที่จ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และนำมาเปรียบเทียบกับค่าเดิมและนำผลที่ได้มาปรับค่ากระแสอ้างอิงเพื่อใช้ควบคุมค่ากระแสจ่ายออกของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้รับค่ากำลังงานสูงสุด

2.4 ลักษณะทั่วไปของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [5]

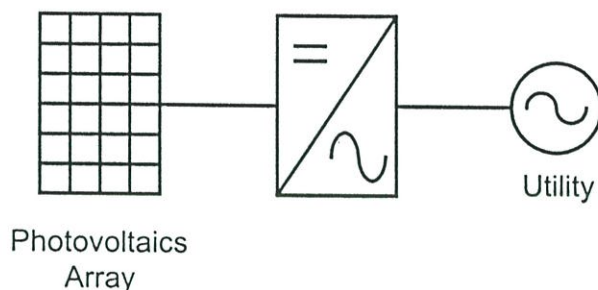
แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงออกมา ดังนั้นการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้กับระบบของการไฟฟ้า (Utility) เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทั่วไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ก่อนเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของการไฟฟ้า ลักษณะของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของวงจรเป็น 2 แบบคืออินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียวและอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น

อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีข้อแตกต่างทางโครงสร้าง เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไปที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่มีข้อแตกต่างในด้านหน้าที่การทำงานซึ่งไม่เฉพาะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปคลื่นจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะของรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นซายน์เท่านั้น แต่จะทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่จ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้รับกำลังงานสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการควบคุมประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกทางหนึ่งด้วย อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญของอินเวอร์เตอร์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่แตกต่างจากอินเวอร์เตอร์ทั่วไปก็คือ ค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์ค่าสูญเสียนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการทำงานของอุปกรณ์สวิทช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ส่วนที่ 2 เป็นการสูญเสียอันเนื่องมาจากรูปคลื่นของกระแสที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกมามีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นซายน์หรือมีค่าฮาร์โมนิกส์มากกว่าที่มาตรฐานกำหนด

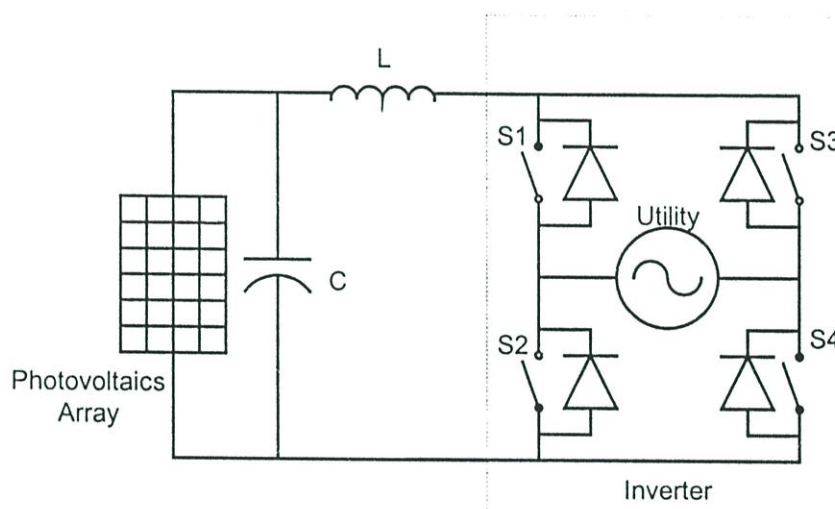
2.4.1 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว (Single state inverter)

บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว และโครงสร้างของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดี่ยวนี้อาจทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยไม่มีการจัดการพลังงานที่ด้านไฟฟ้ากระแสตรงก่อน หรือไม่มีวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุด อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบนี้มีข้อดีในเรื่องค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการทำงานของอุปกรณ์สวิทช์มีค่าต่ำ เนื่องจากมีจำนวนอุปกรณ์สวิทช์ซึ่งทำงานที่ความถี่สูงน้อย แต่มีข้อเสียในเรื่องการควบคุมที่ยุ่งยากเนื่องจากอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบนี้ นอกจากทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์แล้ว ยังต้องทำหน้าที่ควบคุมการทำงานให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังสูงสุดอีกด้วย อีก

ประการหนึ่ง ค่าแรงดันที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสออกสู่ระบบของการไฟฟ้าได้



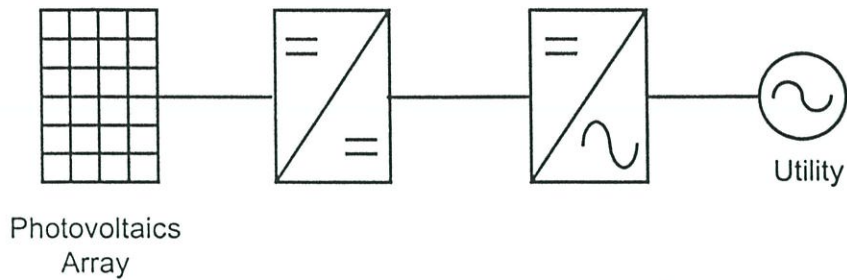
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบชั้นเดียว



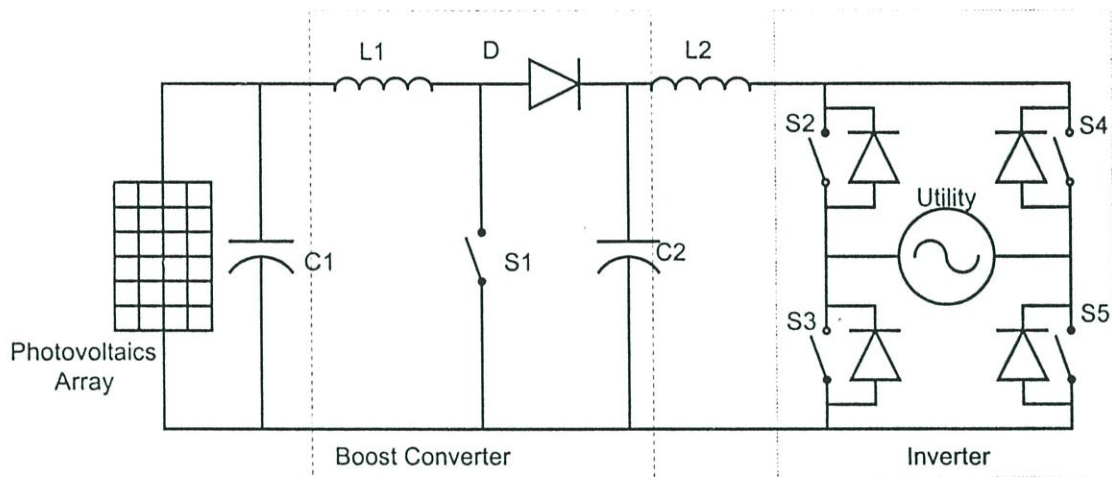
รูปที่ 2.8 โครงสร้างวงจรของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบชั้นเดียว

2.4.2 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองชั้น (Two state inverter)

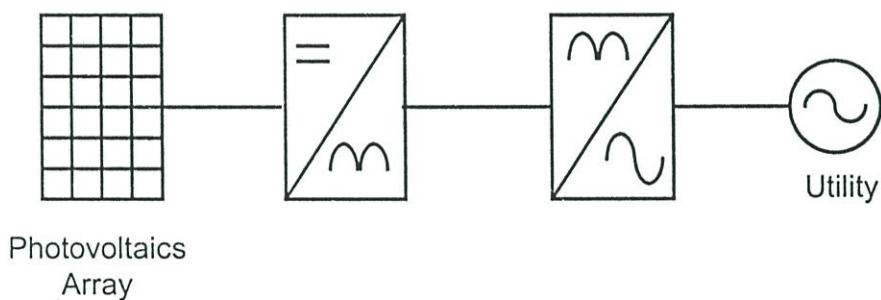
จากบล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองชั้น และโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ อินเวอร์เตอร์แบบนี้จะประกอบด้วย วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์ (Boost) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุด และปรับระดับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ ส่วนอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นการจัดการพลังงาน 2 ครั้ง ทำให้ค่าสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตซ์จึงสูงกว่าแบบแรกเนื่องจากจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งทำงานที่ความถี่สูงมากกว่าในแบบแรก แต่มีข้อดีในเรื่องการควบคุมที่ทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากแยกหน้าที่ในการทำงานกันอย่างชัดเจน ระหว่างการควบคุมกำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กับการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น



รูปที่ 2.10 โครงสร้างวงจรของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้นระดับบล็อกไดอะแกรมที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.11 โดยมีวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่ควบคุมค่ากำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พร้อมทั้งเปลี่ยนรูปคลื่นจากรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์แบบเต็มคลื่น ข้อดีของเทคนิคนี้มีดังนี้คือ จำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งทำงานที่ความถี่สูงมีจำนวนลดลง ทำให้มีประสิทธิภาพดีกว่าอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้นแบบเดิม และมีการควบคุมการทำงานที่ง่ายกว่าอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว

2.5 สรุป

พลังงานทดแทนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในปัจจุบันลดน้อยลงมากและอาจจะหมดไปในระยะเวลาอันสั้น พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นกำลังไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก กระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มของแสง อุณหภูมิ หรือแม้กระทั่งปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ เป็นต้น ตัวแปรต่างๆ นี้บางอย่างสามารถควบคุมได้แต่บางอย่างไม่สามารถควบคุมได้ และมีผลกับประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง ซึ่งทั่วไปแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำประมาณ 8-15% ดังนั้นการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุดอยู่ตลอดเวลาจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุดแสดงว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดเช่นเดียวกัน

อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นการออกแบบให้อินเวอร์เตอร์มีค่าสูญเสียน้อยที่สุดเท่ากับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 3

การออกแบบและวิเคราะห์ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่ง แบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.1 บทนำ

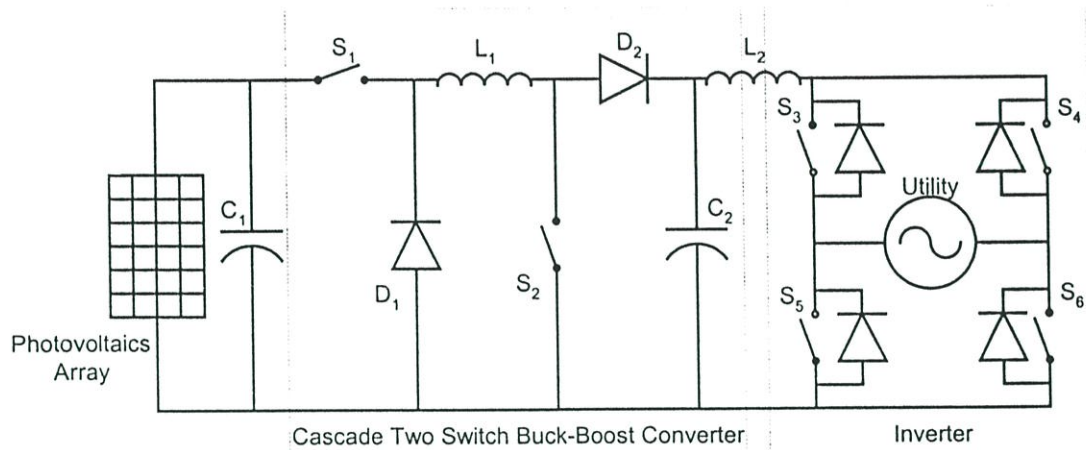
บทนี้นำเสนอหลักการของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นที่นำเสนอนี้จะใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัก-บูสต์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว ในการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังงานสูงสุด และลักษณะของรูปคลื่นกระแสจ่ายออกให้มีลักษณะเป็นรูปซายน้แบบเต็มคลื่นก่อนจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ เพื่อเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง [6] ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถประยุกต์ใช้ในการควบคุมให้กระแสจ่ายออกมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน้หรือมีค่าฮาร์โมนิกส์ประกอบอยู่น้อย ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการการทำงานของระบบที่นำเสนอ การวิเคราะห์หลักการทำงานและนำไปอธิบายการทำงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนการออกแบบระบบ รวมไปถึงการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของระบบที่ทำการออกแบบก่อนนำไปทดลองจริง

3.2 ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอ

ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอินเวอร์เตอร์แบบ 2 ชั้นดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัก-บูสต์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว ซึ่งถูกควบคุมให้สวิตช์ทั้งสองทำงานพร้อมกันด้วยเทคนิคการรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบซายน้เต็มคลื่น (Fullwave Sinusoidal Pulse Width Modulation) เพื่อให้คอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายกระแสที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน้แบบเต็มคลื่น และจ่ายกระแสดังกล่าวให้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่กลับเฟสให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า และทำหน้าที่ควบคุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานที่ค่ากำลังงานสูงสุด โดยการควบคุมค่าดัชนีการการรวมสัญญาณ (Modulation index)

ดังนั้นจากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าระบบมีอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งทำงานที่ความถี่สูงเพียง 2 ตัวเท่านั้น ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นเพียงสวิตช์กลับเฟส และทำงานในขณะที่แรงดันของสายส่งมีค่าเป็นศูนย์ทำให้ค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์มีค่า เนื่องจากมีเฉพาะค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก

การนำกระแสเท่านั้น ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของระบบนี้ควรจะมีค่าสูงกว่าอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นทั่วไปเพราะมีอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งทำงานที่ความถี่สูงน้อยกว่า



รูปที่ 3.1 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอง

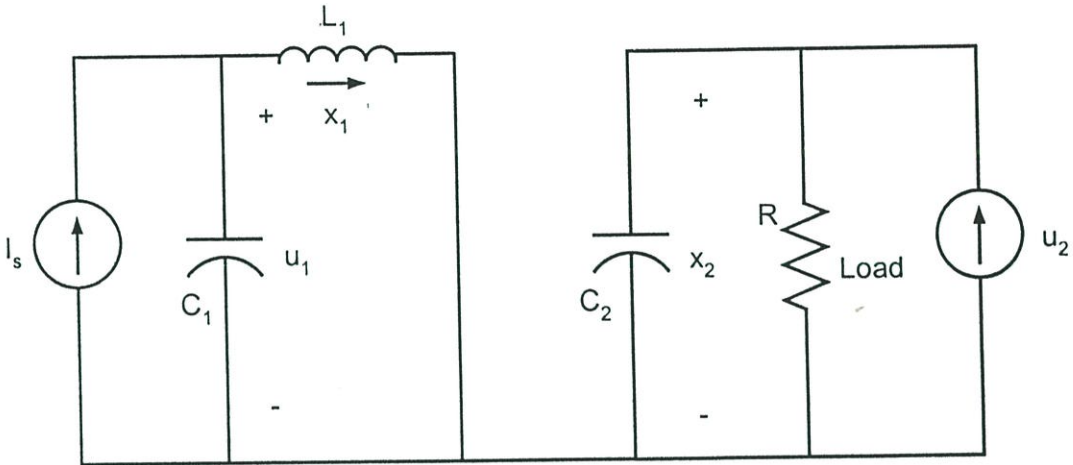
3.2.1 การวิเคราะห์หลักการทำงานและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [7, 8]

ในการวิเคราะห์หลักการทำงานของระบบ จะทำการวิเคราะห์เฉพาะในส่วนคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสท์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว เนื่องจากส่วนอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นเพียงสวิตช์แบบ H-bridge เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มคลื่นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น แต่การควบคุมรูปลักษณะของรูปคลื่นให้คล้ายรูปคลื่นไซน์จะควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสท์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว ในการวิเคราะห์การทำงานของคอนเวอร์เตอร์นี้ จะแบ่งออกเป็นสองช่วงการทำงานเพื่อลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์หลัง ซึ่งสภาวะการทำงานดังกล่าวประกอบด้วย ช่วง S_1 กับ S_2 นำกระแสหรือช่วงที่ D_1 กับ D_2 หยุดนำกระแส และช่วง S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแสหรือ D_1 กับ D_2 นำกระแส ในช่วงที่ 1 (Mode 1) เมื่อ S_1 กับ S_2 ถูกควบคุมให้นำกระแส (T_{on}) ดังรูปที่ 3.2 จะมีกระแส x_1 ไหลจากแหล่งจ่ายผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ซึ่งจะทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานไว้ ส่วนทางด้านภาหะคาปาซิเตอร์ C_2 จะทำหน้าที่จ่ายกำลังงานให้กับภาระโดยมีตัวเหนี่ยวนำ L_2 ทำหน้าที่เป็นตัวกรอง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.1

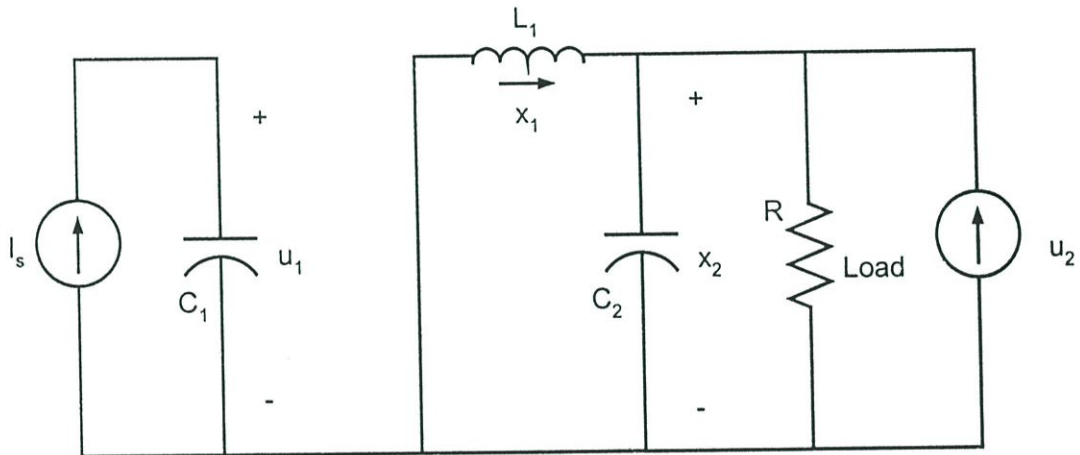
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{L_1} u_1 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{RC_2} x_2 + \frac{1}{C_2} u_2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

ในช่วงที่ 2 (Mode 2) เมื่อ S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแส (T_{off}) ในขณะที่ D_1 กับ D_2 จะนำกระแสแทนทำให้ตัวเหนี่ยวนำ L_1 จ่ายพลังงานที่สะสมไว้ในช่วงนำกระแสให้กับคาปาซิเตอร์ C_2 และภาระ R ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.2

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{1}{L_1}x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C_2}x_1 - \frac{1}{RC_2}x_2 + \frac{1}{C_2}u_2 \end{aligned} \quad (3.2)$$



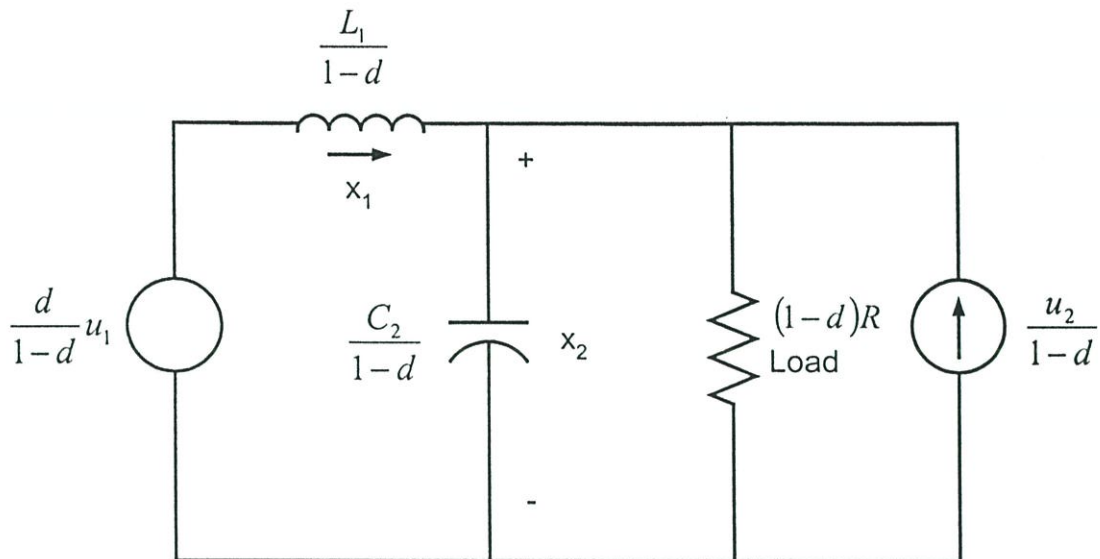
รูปที่ 3.2 รูปแสดงการทำงานเมื่อ S₁ กับ S₂ นำกระแสและ D₁ กับ D₂ หยุดนำกระแส (Mode 1)



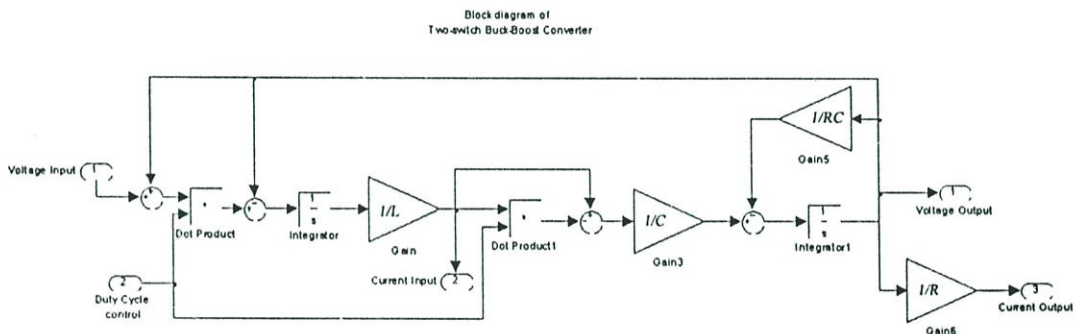
รูปที่ 3.3 รูปแสดงการทำงานเมื่อ S₁ กับ S₂ หยุดนำกระแสและ D₁ กับ D₂ นำกระแส (Mode 2)

จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 สามารถเขียนสมการสถานะแทนคุณลักษณะของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัต-บรูสต์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวได้ดังสมการที่ 3.3 และสามารถนำไปเขียนวงจรสมมูลย์ได้ในรูปที่ 3.4 หรือสามารถอธิบายด้วยบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.5 ซึ่งนำไปใช้ในการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถจ่ายกระแสออกเป็นรูปคลื่นชานันแบบเต็มคลื่นได้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-d)}{L_1} \\ \frac{(1-d)}{C_2} & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสท์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสท์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

3.2.2 การออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่ง

ในการออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ต้องคำนึงถึงความสามารถในการเก็บกำลังงานของตัวเหนี่ยวนำที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ S_1 กับ S_2 นำกระแส ในช่วงดังกล่าวแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังงานให้กับตัวเหนี่ยวนำ L_1 และตัวเหนี่ยวนำ L_1 นี้จะต้องสะสมกำลังงานไว้เพื่อจ่ายกำลังงานออกทั้งหมดให้กับตัวเก็บประจุ C_2 และภาระในสถานะ S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแส สิ่งสำคัญอีกประการที่ต้องคำนึงถึงก็คือหนึ่งตัวเหนี่ยวนำ L_1 จะต้องทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น และไม่เกิดการอิ่มตัวขึ้นในขณะที่ทำงานเพราะจะทำให้รูปคลื่นของกระแสผิดเพี้ยนไป ซึ่งจะไม่สามารถควบคุมให้รูปคลื่นมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ได้ เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำ L_1 จะต้องคืนกำลังงานทั้งหมดที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงที่ S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแส ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำได้ตามสมการที่ 3.4 (ไม่พิจารณา ค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยวนำและอุปกรณ์สวิตช์)

$$L_1 \frac{di_{L_1}}{dt_{off}} = u_1 \quad (3.4)$$

ดังนั้น

$$L_1 = \frac{u_1}{i_{L_1}} T_{off, \min} \quad (3.5)$$

กำลังงานที่ถูกสะสมในตัวเหนี่ยวนำ

$$E = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3.6)$$

จากกำลังงานที่ถูกสะสมในตัวเหนี่ยวนำในสมการที่ 3.6 สามารถนำไปคำนวณหาขนาดของแกนตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมได้โดยใช้สมการที่ 3.7 [9, 10]

$$A_p = \left(\frac{2E \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right)^{1.14} \quad (3.7)$$

จากค่า A_p ที่คำนวณได้นำไปเลือกขนาดของแกนในตาราง (ใช้ตารางแกน Toroid) และนำมาคำนวณหาจำนวนรอบโดยใช้สมการที่ 3.8

$$N = \frac{LI \times 10^4}{B_m A_c} \quad (3.8)$$

ในขณะเดียวกันเมื่อ S_1 และ S_2 หยดนำกระแสตัวเก็บประจุ C_2 ต้องรับพลังงานจาก L_1 ไว้ทั้งหมดเช่นเดียวกัน เนื่องจากกำลังงานที่ถูกสะสมในตัวเก็บประจุ C_2 มีค่าดังสมการที่ 3.9

$$E = \frac{1}{2} Cv^2 \quad (3.9)$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุได้ตามสมการที่ 3.10 (ไม่พิจารณาค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยวนำและไดโอด)

$$C = L \frac{i^2}{v^2} \quad (3.10)$$

3.2.3 ตัวอย่างการออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งที่นำเสนอ

ในการออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออยู่ทั้งแบบขนาน และแบบอนุกรม รวมถึงจุดทำงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการทดสอบที่แสดงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแบบ ซึ่งมีค่าแรงดันขณะเปิดวงจรเท่ากับ 19.9 V กระแสขณะลัดวงจรเท่ากับ 2.94 A ค่ากำลังงานสูงสุดเท่ากับ 47 W ที่แรงดัน 16.6 V กระแส 2.54 A จำนวน 8 แผง นำมาต่ออนุกรม 4 แผงและขนานอีก 4 แผง ประสิทธิภาพของแผงประมาณ 75% จากการทดสอบการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มของแสงประมาณ 650 W/m^2 จะให้ค่ากำลังงานสูงสุดประมาณ 200 W ที่แรงดันประมาณ 50 V กระแส 4.2 A จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถกำหนดข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

กำหนดให้

$$u_1 = 50V$$

$$i_{L_1} = 4.2A$$

$$f_s = 10kHz$$

$$m_{a,max} = 0.9$$

จากข้อมูลดังกล่าว ช่วงเวลาหยุดนำกระแสที่สั้นที่สุดที่ตัวเหนี่ยวนำต้องจ่ายกำลังงานออกมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{10k} * 0.1 = 10\mu S$ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$L_1 = \frac{10\mu \times 50}{4.2} = 119\mu H$$

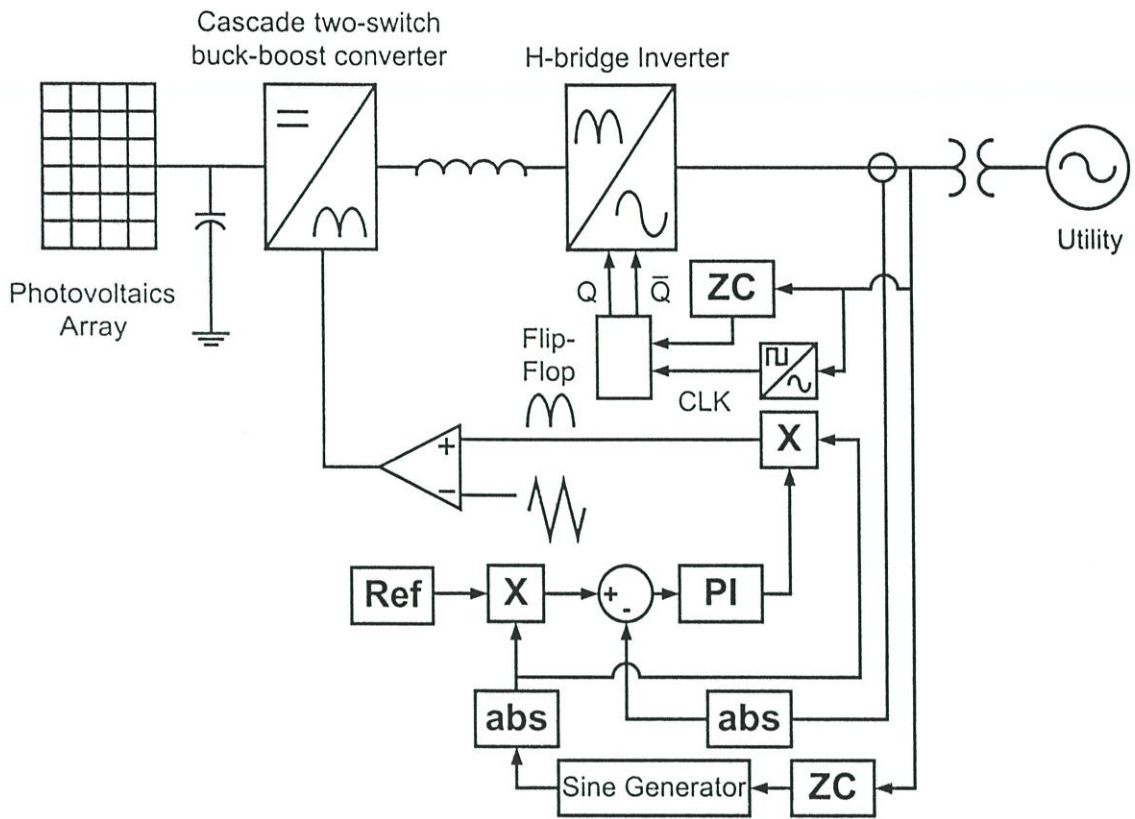
$$C_2 = \frac{119\mu \times 4.2^2}{50^2} = 0.839\mu F$$

3.3 การจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

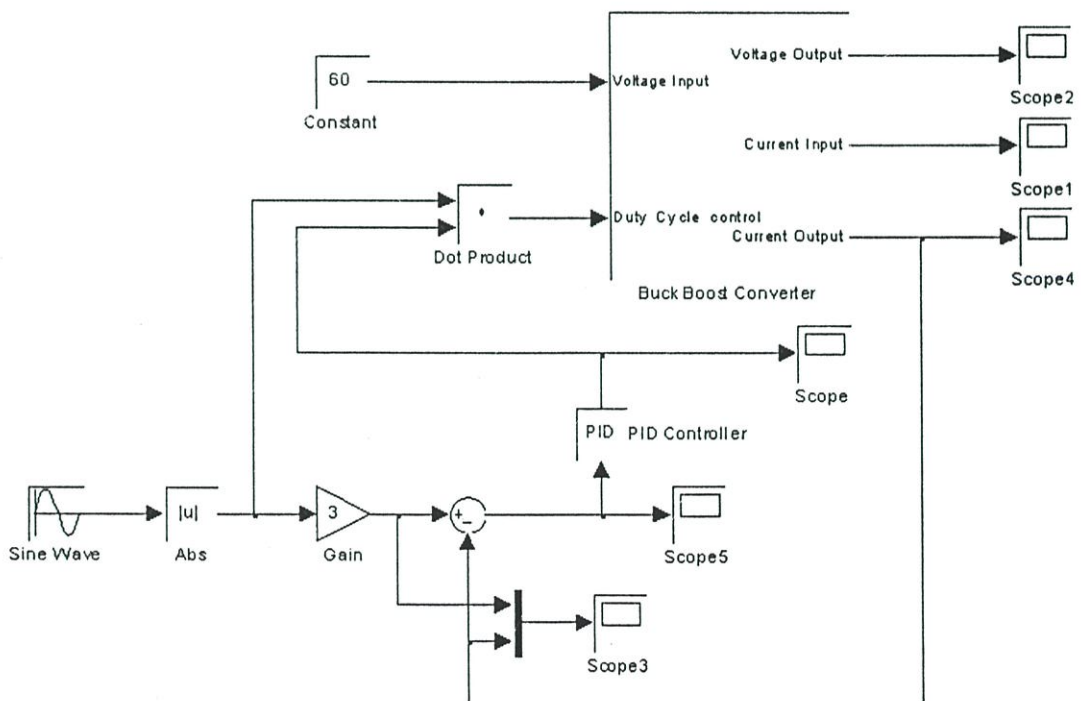
ในการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งที่นำเสนอนี้ เริ่มจากการจำลองผลการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสท์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.6 และค่าตัวแปรในหัวข้อที่ผ่านมา ในการจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB นี้เพื่อใช้ในการตรวจสอบพฤติกรรมของวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสท์ในขณะทำงานเท่านั้น โดยแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองในสภาวะที่มีกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีค่าตัวแปรที่น้อยกว่าระบบที่นำเสนอจริง ซึ่งผลการจำลองนี้เป็นเพียงการทดสอบสมมุติฐานเบื้องต้น โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เท่านั้น จากนั้นจึงนำไปจำลองผลด้วยโปรแกรม OrCAD PSpice ซึ่งในการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป OrCAD PSpice Version 9.1 จะใช้หลักการออกแบบในหัวข้อที่ผ่านมาเช่นเดียวกัน โดยผลที่ได้รับจากการจำลองด้วยโปรแกรม OrCAD PSpice จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงว่าเป็นไปตามที่ได้ตั้งสมมุติฐานไว้หรือไม่ รวมถึงการปรับค่าตัวแปรบางตัวให้เหมาะสมกับความเป็นจริงอีกด้วย

ในการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม OrCAD PSpice นี้มีข้อจำกัดเรื่องแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นในการจำลองการทำงานนี้จึงได้ใช้วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นำมาต่ออนุกรมจำนวน 60 เซลล์ และขนานกัน 2 ชุด เพื่อให้ได้ค่ากระแสแรงดันและกำลังงานที่ใกล้เคียงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้จริง

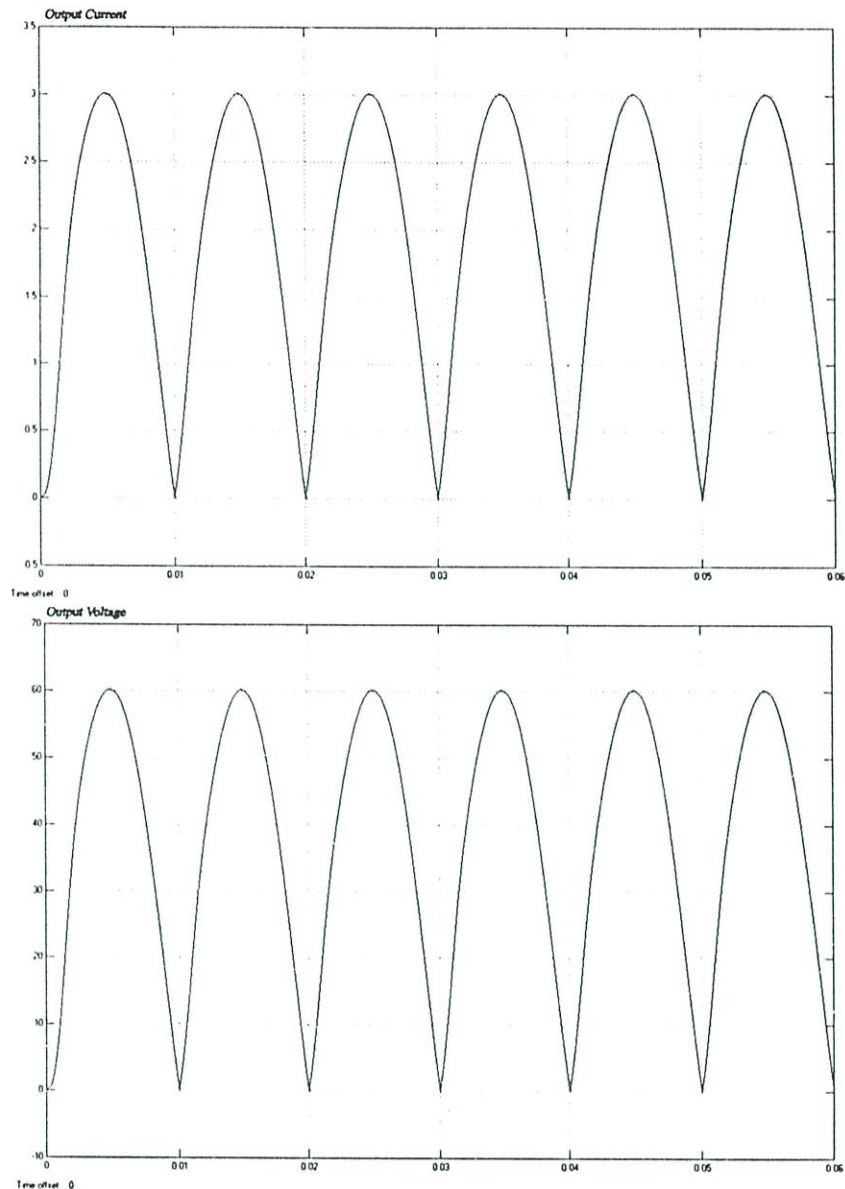
รูปที่ 3.7 เป็นระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยในการจำลองนี้จะแยกผลออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกันคือ ส่วนแรกอินเวอร์เตอร์จะทำงานแบบไม่เชื่อมต่อกับสายส่ง ส่วนที่สองอินเวอร์เตอร์จะทำงานเชื่อมต่อกับสายส่ง



รูปที่ 3.6 ระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงาน



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

(บน) รูปคลื่นกระแสจ่ายออก (ล่าง) รูปคลื่นแรงดันจ่ายออก

3.3.1 การจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB

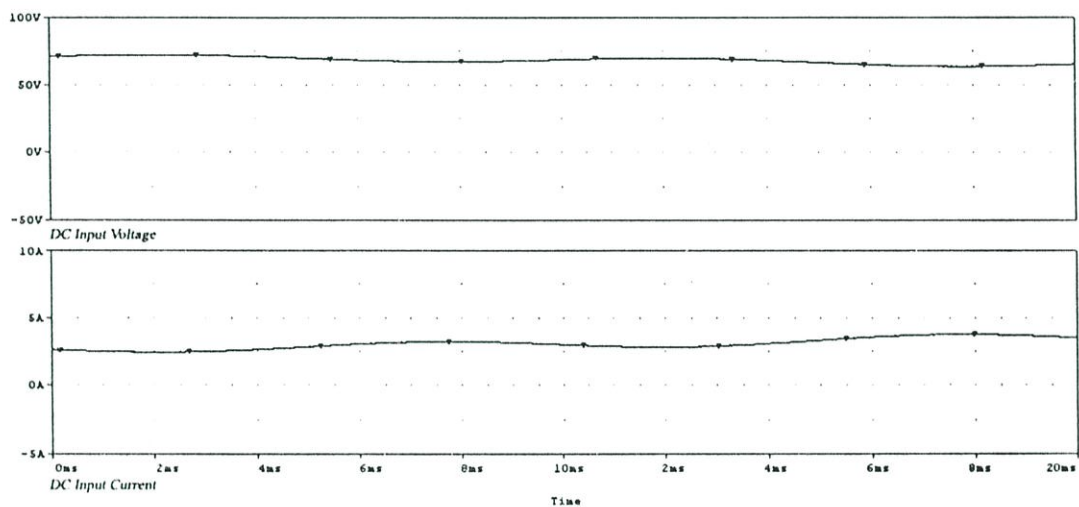
รูปที่ 3.7 แสดงบล็อกโคแอดิแอมที่ใช้ในการจำลองผลการทำงานเพื่อสังเกตพฤติกรรมและทำการทดสอบสมมุติฐานเบื้องต้นด้วยว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ที่นำเสนอสามารถที่จะควบคุมให้รูปคลื่นกระแสจ่ายออกมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์แบบเต็มคลื่นได้หรือไม่

ถึงแม้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นแบบจำลองแบบกระแสต่อเนื่อง ผลการจำลองในรูปที่ 3.8 ยังคงแสดงให้เห็นว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถควบคุมให้ทำงาน เพื่อจ่ายกระแสและแรงดันออกมาเป็นรูปคลื่นไซน์แบบเต็มคลื่นตามที่ตั้งสมมุติฐานไว้เบื้องต้นได้

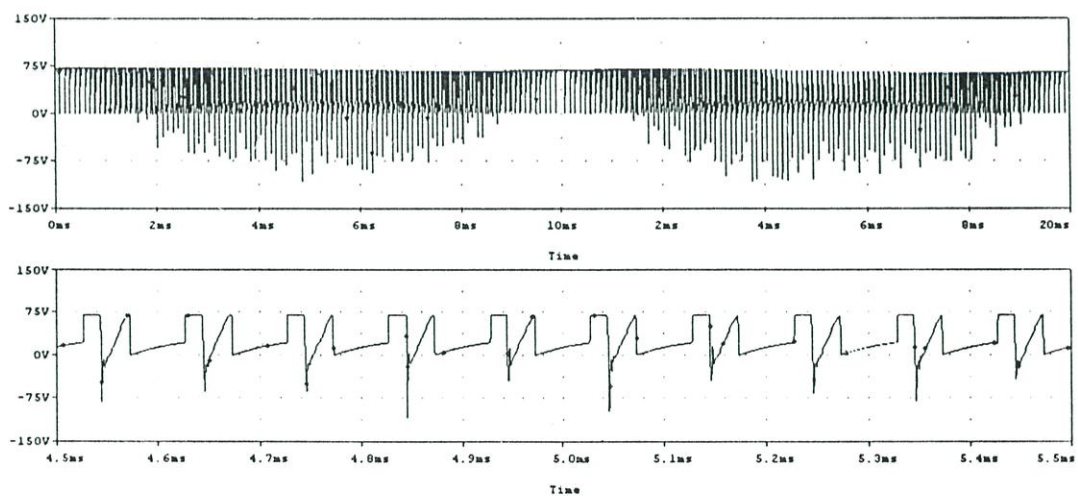
3.3.2 การจำลองผลการทำงานของระบบแบบไม่เชื่อมต่อกับสายส่งด้วยโปรแกรม OrCAD PSpice

การจำลองระบบแบบไม่เชื่อมต่อกับสายส่งเป็นการตรวจสอบผลของการทำงานของระบบก่อนในหลายๆ ด้าน เช่น ลักษณะของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบบัค-บูสต์ หรือปริมาณกระแสที่ไหลผ่านในจุดต่างๆ ของระบบ รวมถึงขนาดของแรงดันที่ตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตช์ เป็นต้น

รูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกจำลองการทำงานด้วยวงจรสมมูลย์ในอุดมคติ ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าการใส่ตัวเก็บประจุให้รับกำลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม จะทำให้รูปคลื่นแรงดันและกระแสดังกล่าวมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งจะมีผลดีในด้านการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานใกล้จุดกำลังงานสูงสุดอยู่ตลอดเวลา

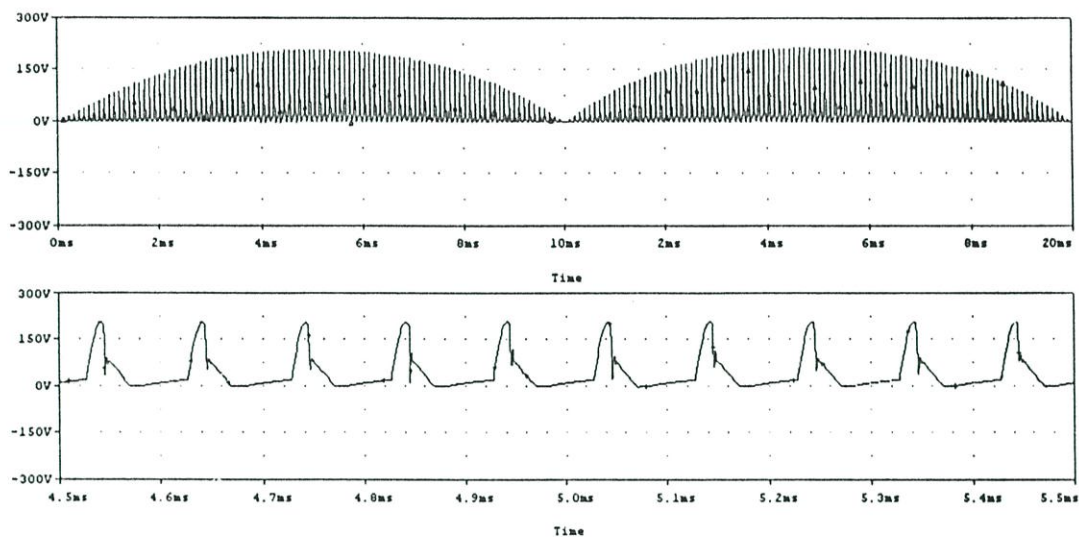


รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดัน (บน) และรูปคลื่นกระแส (ล่าง) ที่จ่ายให้วงจรคอนเวอร์เตอร์



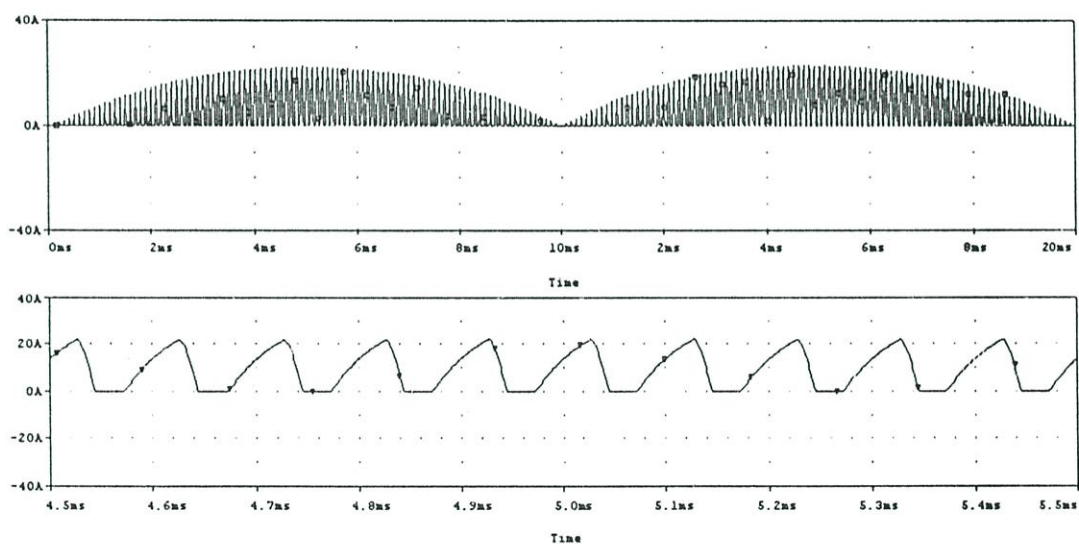
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ทางด้านรับไฟในช่วงเวลา 20 ms (บน)

พร้อมภาพขยาย (ล่าง)

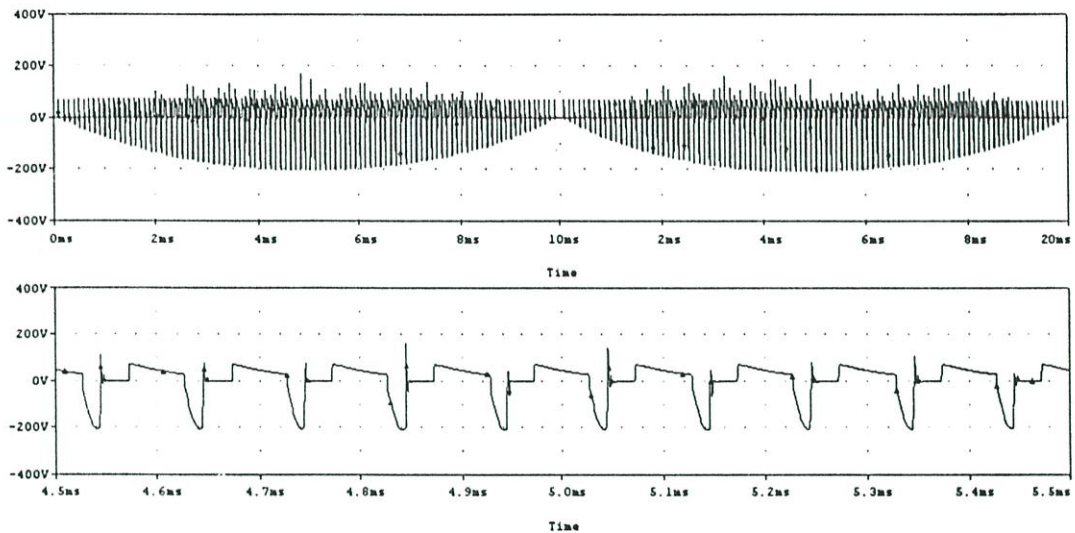


รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์ทางด้านจ่ายไฟในช่วงเวลา 20 ms (บน)
พร้อมภาพขยาย (ล่าง)

รูปที่ 3.10 และ 3.11 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งผลจากการจำลองการทำงานนี้จึงเป็นส่วนที่สำคัญในการกำหนดขนาดของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งมีพิกัดของกระแส และแรงดันที่สามารถทนต่อสภาวะการทำงานเช่นนี้ได้

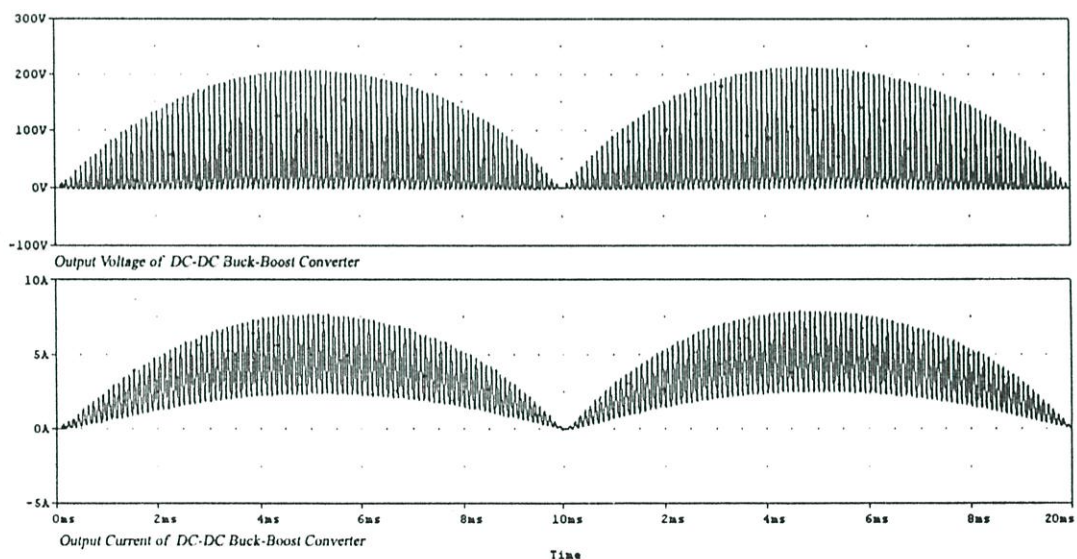


รูปที่ 3.12 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในช่วงเวลา 20 ms (บน) พร้อมภาพขยาย (ล่าง)

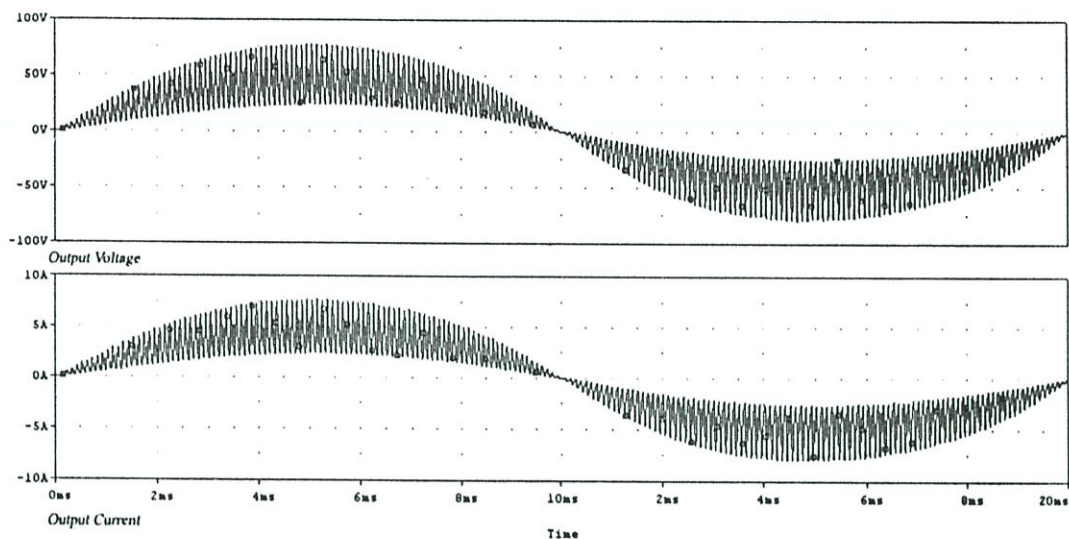


รูปที่ 3.13 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในช่วงเวลา 20 ms (บน) พร้อมภาพขยาย (ล่าง)

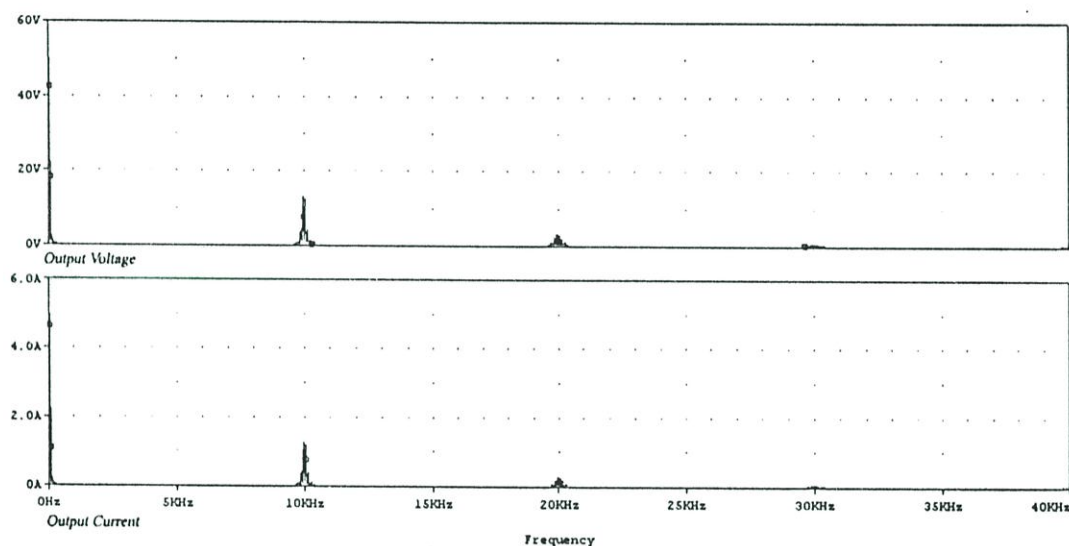
ในรูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดงขนาดของกระแสและแรงดันของตัวเหนี่ยวนำในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ จากรูปแสดงให้เห็นว่าตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวนี้สามารถรับและคายพลังงานได้ในเวลาที่ได้ออกแบบไว้ รูปที่ 3.14 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จ่ายออกจากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์แบบเต็มคลื่น จากนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ H-bridge ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นแรงดัน (บน) และรูปคลื่นกระแส (ล่าง) ที่จ่ายออกจาก
วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์

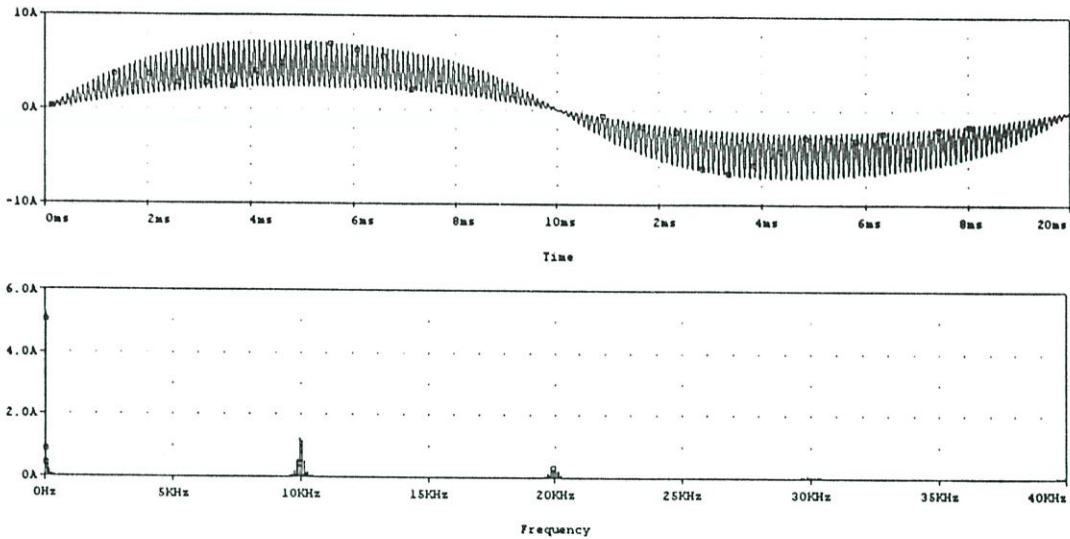


รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดัน (บน) และรูปคลื่นกระแส (ล่าง) ที่จ่ายออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์

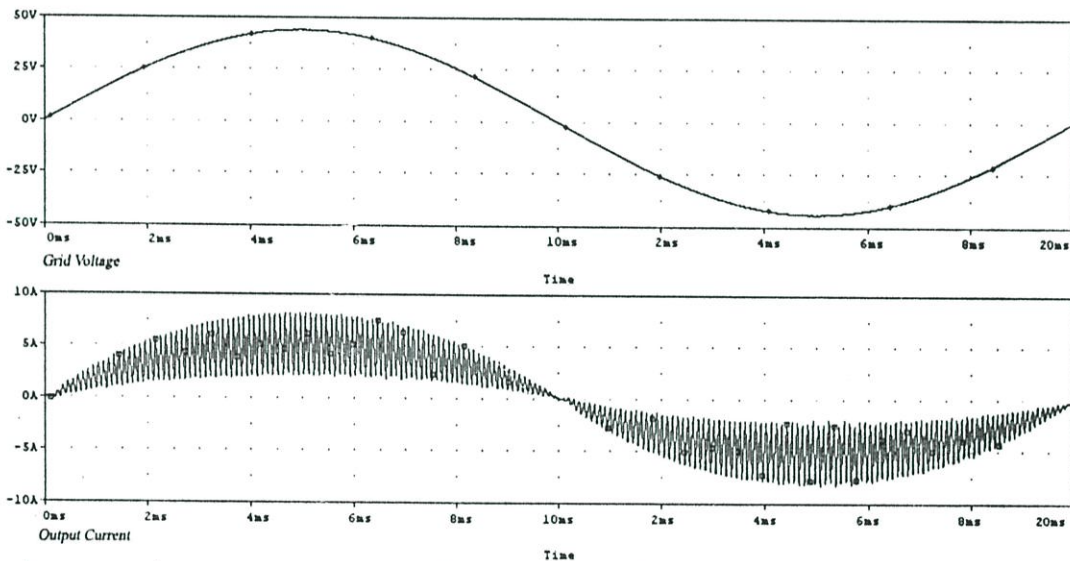


รูปที่ 3.16 สเปกตรัมของรูปคลื่นในรูปที่ 3.15 ซึ่งให้ค่า THD_v (บน) = THD_i (ล่าง) = 4.56 %

ค่ากระแสที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์จะมีค่า THD ประมาณ 4.5% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับรูปคลื่นกระแสในขณะที่ไม่มีการควบคุมแบบพีไอดังแสดงในรูปที่ 3.17 พบว่าค่า THD ของกระแสในระบบที่ไม่มีการควบคุมแบบพีไอจะมีประมาณ 8% ซึ่งมีค่าสูงกว่าระบบที่มีการควบคุมแบบพีไอมาก



รูปที่ 3.17 รูปคลื่น (บน) และสเปกตรัม (ล่าง) ของกระแสขาออกจากริเวอร์เตอร์
เมื่อไม่มีการควบคุมลักษณะของรูปคลื่นซึ่งมีค่า THDi = 7.93 %

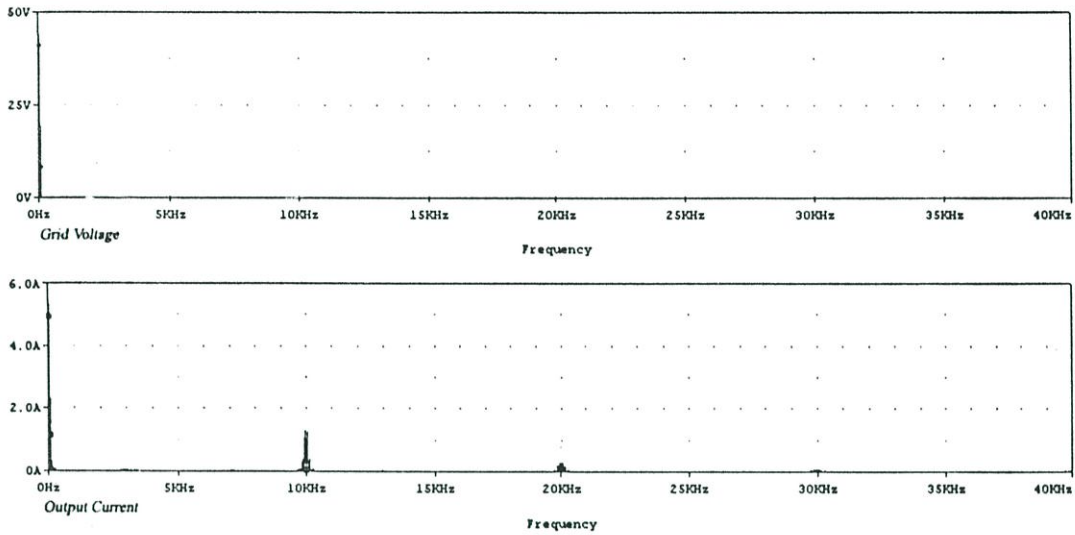


รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดัน (บน) และรูปคลื่นกระแส (ล่าง) ที่จ่ายออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์
ในขณะที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง

3.3.3 การจำลองผลการทำงานของระบบแบบเชื่อมต่อสายส่งด้วยโปรแกรม OrCAD PSpice

ในการจำลองผลการทำงานของระบบแบบเชื่อมต่อสายส่งเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการควบคุมค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่จ่ายเข้าไปในระบบสายส่ง พบว่ามีค่ากระแสฮาร์โมนิกส์มีค่าอยู่ประมาณ 6% ในขณะที่ไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก ปัจจัยที่เป็นเหตุให้ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวมีค่ามากกว่า 5% มีอยู่หลายประการ เช่น ขนาดของค่าภาระที่ระบบต้องจ่ายกระแสให้ คุณลักษณะของระบบที่ไม่เชิงเส้น เป็นต้น รูปที่ 3.18 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่สายส่งและ

กระแสที่จ่ายออกจากระบบอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอและทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของฮาร์โมนิกส์ ได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 สเปกตรัมของรูปคลื่นในรูปที่ 3.18 ซึ่งค่า THD_v (บน) ขึ้นอยู่กับระบบสายส่ง และ THD_i = 5.9 % (ล่าง)

3.4 สรุป

บทนี้ได้วิเคราะห์ถึงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งที่นำเสนอ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบที่ถูกต้องและสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ส่วนสำคัญที่สุดของระบบนี้อยู่ที่วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัท-บรูสท์ที่ใช้อุปกรณ์สวิทซ์ 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมค่ากำลังงานให้เก็บสะสมไว้ในตัวเหนี่ยวนำในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัท-บรูสท์นี้สามารถจ่ายกระแสออกโดยที่มีรูปคลื่นคล้ายไซน์แบบเต็มคลื่นมากที่สุด โดยที่ไม่ต้องมีการชดเชยใดๆ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ควบคุมค่ากระแสจ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานที่จุดให้กำลังงานสูงสุดอยู่ตลอดเวลาอีกด้วย

นอกจากนั้นยังมีการจำลองผลการการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งนอกจากจะเป็นการตรวจสอบการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งที่นำเสนอแล้ว ยังเป็นการยืนยันประสิทธิภาพในการควบคุมค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่จ่ายอีกด้วย

บทที่ 4

การควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้น สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

4.1 บทนำ

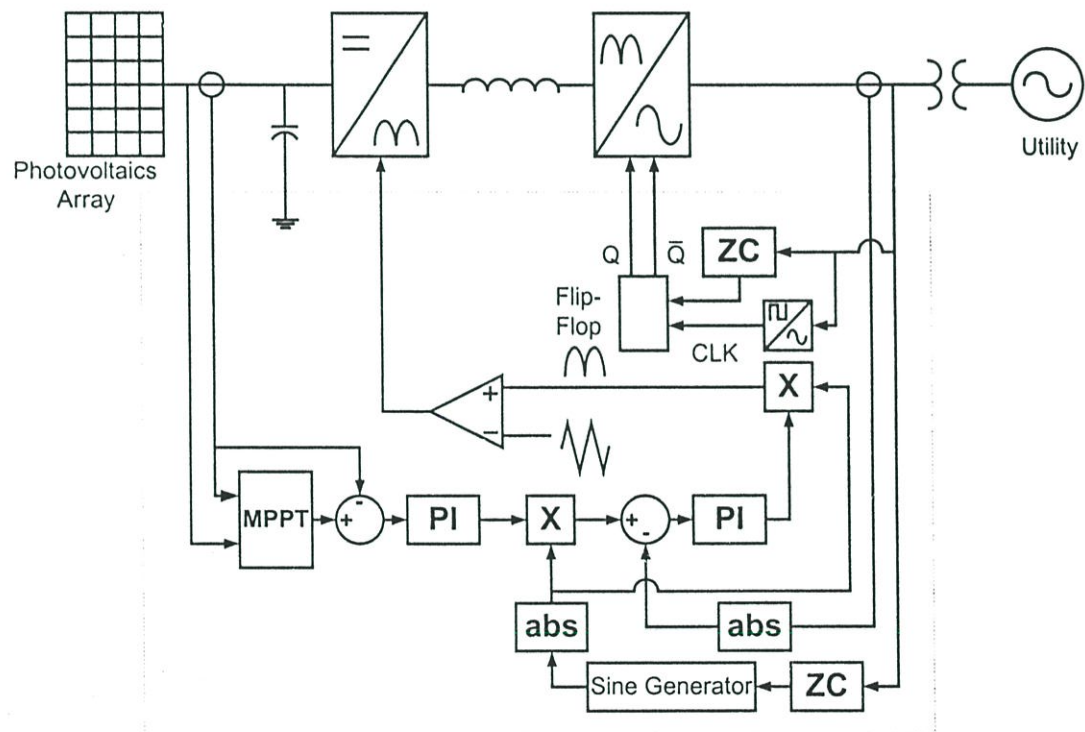
ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (ADMC 331) มีข้อดีในเรื่องของความเร็วในการประมวลผล ลดขนาดหรือจำนวนของอุปกรณ์ประกอบลง ซึ่งเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของระบบ และสะดวกในการพัฒนาเทคนิคการควบคุมอีกด้วย ในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการจำเป็นต้องใช้เทคนิคในการพัฒนาโปรแกรมหลายประการ ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติ โครงสร้าง และเทคนิคที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (ADMC 331) เช่น เทคนิคการรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบชานซ์ การคำนวณค่ากำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามที่ได้ออกแบบ

4.2 โครงสร้างของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (ADMC 331) จากโครงสร้างของระบบดังกล่าวจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือภาควงจรกำลังและภาคควบคุม โดยภาควงจรกำลังจะรับกำลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นชานซ์แบบเต็มคลื่นด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัก-บูสต์ ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว โดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบชานซ์เต็มคลื่น จากนั้นอินเวอร์เตอร์ H-bridge จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มคลื่นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ พร้อมทั้งเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังงานออก

ในภาคควบคุมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกเป็นการควบคุมค่ากำลังงานสูงสุดซึ่งจะคำนวณค่ากระแสที่เหมาะสมเพื่อที่จะได้รับค่ากำลังงานสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำกระแสที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับกระแสที่วัดได้ ค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบจะนำไปผ่านตัวควบคุมแบบ PI เพื่อสร้างค่าเป็นค่ากระแสอ้างอิง ส่วนที่สองเป็นการควบคุมกระแสจ่ายออกของอินเวอร์เตอร์และลักษณะของรูปคลื่นให้มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นชานซ์ โดยควบคุมการทำงานให้วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัก-บูสต์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว จ่ายกระแสออกให้มีลักษณะ

ของรูปคลื่นคล้ายรูปซายน์แบบเต็มคลื่น ส่วนควบคุมส่วนนี้จะรับค่ากระแสอ้างอิงจากส่วนควบคุมค่ากำลังงานสูงสุด และนำไปเปรียบเทียบกับกระแสที่ตรวจจับได้จากกระแสจ่ายออกของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งตัวควบคุมแบบ PI นี้จะทำการควบคุมทั้งขนาดและรูปร่างของรูปคลื่นของกระแสให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์ ดังนั้นรูปคลื่นของกระแสที่ออกจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัก-บูสท์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์แบบเต็มคลื่นที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของระบบของการไฟฟ้า ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนควบคุมการทำงานของ H-bridge อินเวอร์เตอร์ หรือส่วนแปลงรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงซายน์แบบเต็มคลื่นเป็นรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับแบบซายน์ โดยทำการตรวจจับจุดศูนย์ของรูปคลื่นแรงดันของระบบการไฟฟ้า และทำการสวิตช์เพื่อเปลี่ยนรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงซายน์แบบเต็มคลื่นไปเป็นรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับแบบซายน์ และยังทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้าอีกด้วย

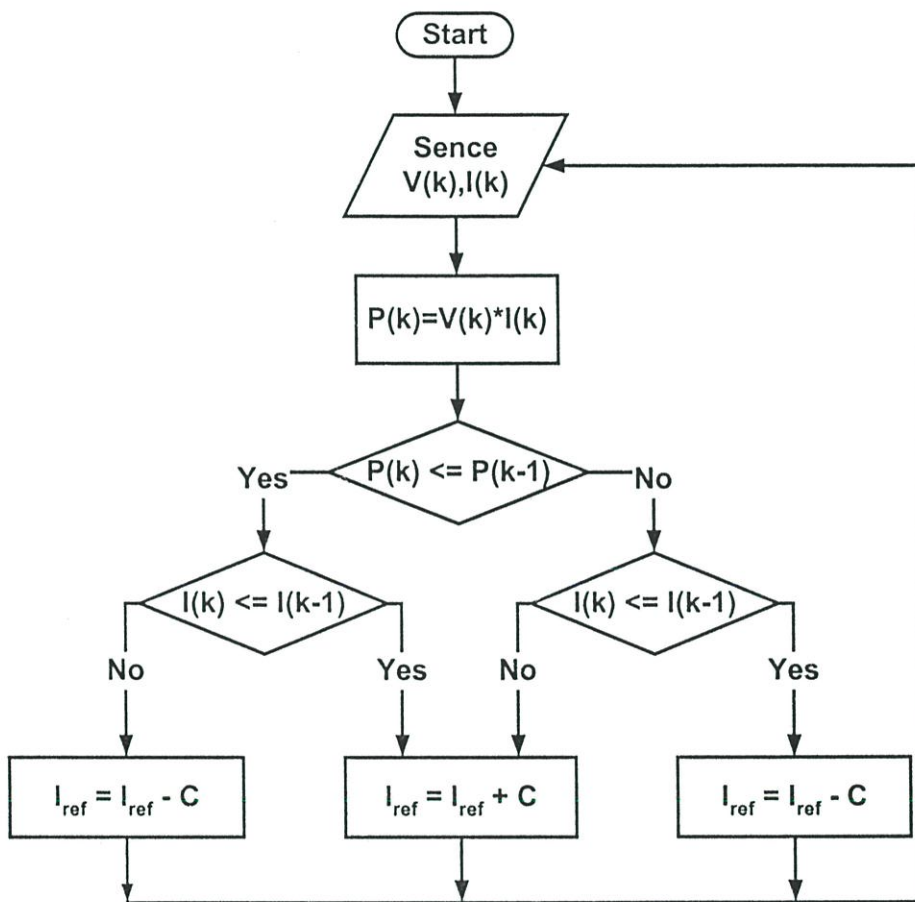


รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่ง
สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอ

4.2.1 การควบคุมจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เทคนิค Hill climbing algorithm [2, 3, 4, 5] แบบควบคุมค่ากระแสอ้างอิงเป็นวิธีการที่ใช้ในการควบคุมกำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยโฟลว์ชาร์ตดังแสดงในรูปที่ 4.2 เทคนิคนี้ใช้การตรวจจับค่าแรงดันและกระแสได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อนำมาใช้มาคำนวณหาค่ากำลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออก จากนั้นจึง

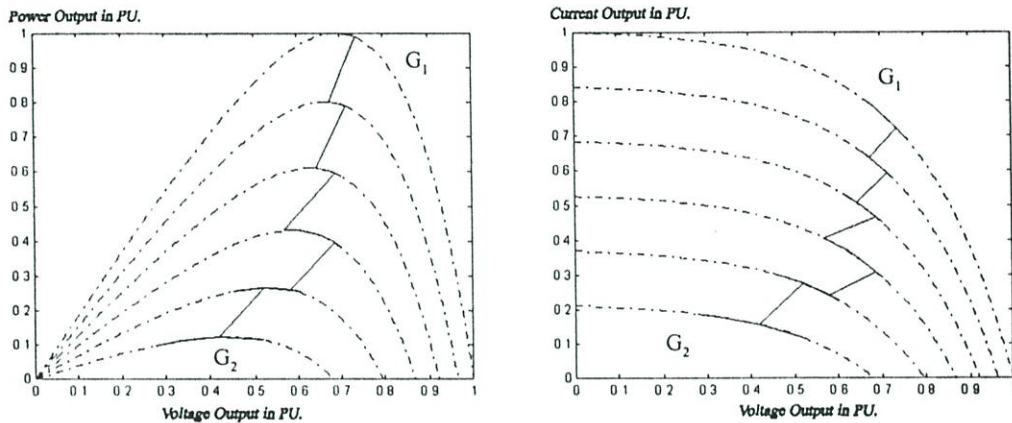
นำค่าที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ก่อนหน้า พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่ากระแสที่จุดดังกล่าวด้วย ซึ่งถ้าผลของการเปรียบเทียบค่ากำลังงานและกระแสจ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นลบหรือบวกทั้งสองค่า ระบบจะปรับลดค่ากระแสอ้างอิงลง แต่ถ้าเครื่องหมายไม่เหมือนกัน ระบบจะปรับเพิ่มค่ากระแสอ้างอิงขึ้น ดังนั้นระบบจะทำงานเช่นนี้ไปเรื่อยๆ และกำลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าใกล้จุดกำลังงานสูงสุดและระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเล็กน้อย เพื่อรักษาการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สามารถจ่ายกำลังงานออกที่ค่าดังกล่าว



รูปที่ 4.2 โฟลว์ชาร์ทแสดงการหาจุดกำลังงานสูงสุดโดยใช้เทคนิค Hill climbing algorithm แบบควบคุมกระแสอ้างอิง

ผลการจำลองการทำงานของเทคนิคการคำนวณค่ากำลังงานสูงสุดด้วย Hill climbing algorithm แบบควบคุมค่ากระแสอ้างอิงแสดงดังเส้นทึบในรูปที่ 4.3 จากผลดังกล่าวพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสง ระบบยังคงสามารถรักษาจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้จ่ายกำลังงานสูงสุดอยู่ตลอดเวลา ในช่วงที่ปริมาณความเข้มของแสงน้อยเทคนิคนี้จะมีค่าผิดพลาดมากเนื่อง

จากการควบคุมให้ค่ากระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จะมีผลให้แรงดันจ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงได้มาก (พิจารณาได้จากค่าความชันของความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันรูปขวา) ในขณะที่ความเข้มของแสงมีค่าสูงเทคนิคนี้จะให้ค่าความแม่นยำที่สูงกว่าเมื่อความเข้มของแสงมีค่าต่ำ



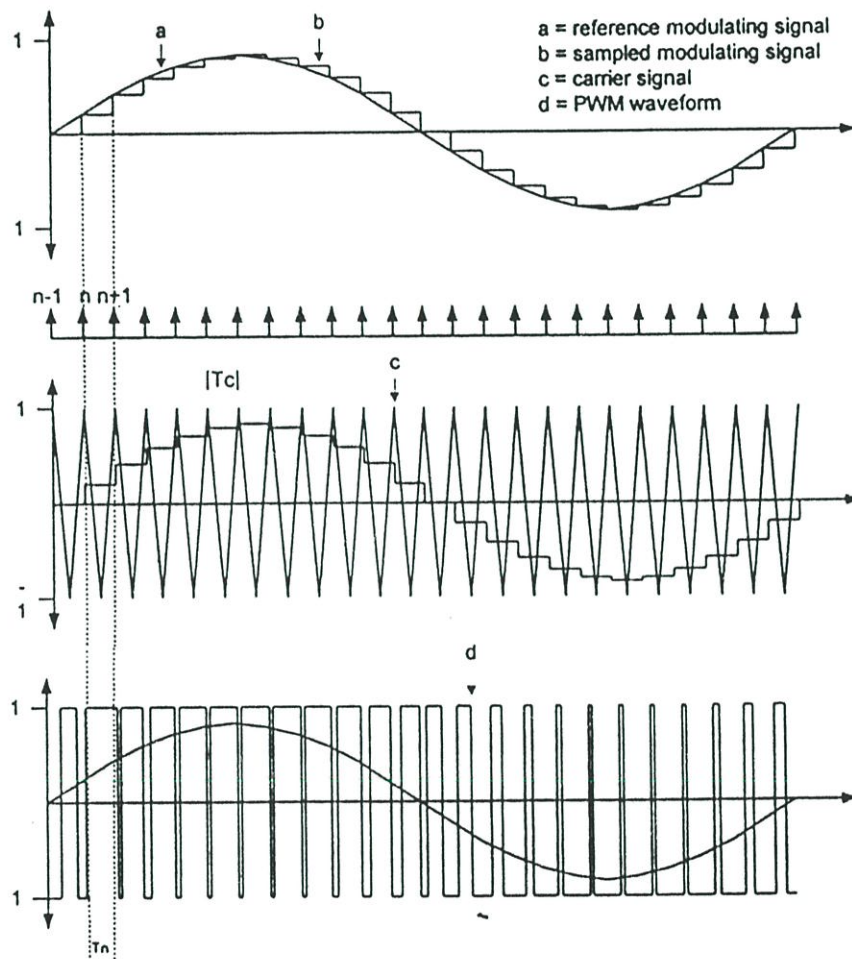
รูปที่ 4.3 แสดงผลการจำลองการทำงานของ Hill climbing algorithm ที่ค่าความเข้มของแสงต่างๆ โดยค่อยๆ เพิ่มค่าความเข้มของแสงจากเส้น G_2 ไปหา G_1

แต่อย่างไรก็ตามแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงจ่ายกำลังงานได้ที่รอบๆ จุดให้กำลังงานสูงสุดเท่านั้น เนื่องจากเทคนิคที่ใช้นี้ยังคงต้องอาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าจ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการหาค่าจุดให้กำลังงานสูงสุด จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ยังคงแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการคำนวณค่ากำลังงานสูงสุดด้วย Hill climbing algorithm แบบควบคุมค่ากระแสอ้างอิงยังคงสามารถควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังงานใกล้จุดสูงสุดได้อยู่ตลอดเวลาไม่เฉพาะที่ค่าความเข้มของแสงสูงๆ เท่านั้น

4.2.2 การรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบซายน์ (Sinusoidal PWM)

การรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบซายน์ เป็นการรวมสัญญาณมูลฐาน (Fundamental signal) ที่มีลักษณะของรูปคลื่นเป็นซายน์ (Sinusoidal waveform) กับสัญญาณพาหะ (Carrier signal) ซึ่งเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular waveform) ที่มีความถี่สูงกว่าสัญญาณมูลฐาน ผลของการรวมสัญญาณดังกล่าวนี้นำมาใช้ในการควบคุมสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้รับรูปคลื่นแรงดันหรือกระแสจ่ายออกที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์ ความถี่ของสัญญาณพาหะหรือความถี่ในการสวิทช์ (Switching frequency) จะมีค่ามากกว่าความถี่ของสัญญาณมูลฐานมาก ทำให้ค่าฮาร์โมนิกส์ต่ำมีค่าน้อยแต่จะเกิดฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่สูงซึ่งสามารถกำจัดออกได้ง่ายกว่า

วิธีการควบคุมความถี่ของสัญญาณพาหะมีอยู่ 2 แบบ วิธีแรกคือแบบซิงโครนัสเป็นการควบคุมอัตราส่วนของความถี่ (m_f) ระหว่างความถี่ของสัญญาณพาหะกับความถี่สัญญาณมูลฐานให้มีค่าคงที่ ดังนั้นถ้าความถี่ของสัญญาณมูลฐานเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณพาหะก็จะเปลี่ยนแปลงตาม วิธีที่สองเป็นแบบไม่ซิงโครนัสหรือความถี่ของสัญญาณพาหะมีค่าคงที่ โดยทั่วไปความถี่ของสัญญาณพาหะจะมากกว่าความถี่ของสัญญาณมูลฐานไม่น้อยกว่า 20 เท่า ซึ่งฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงที่เกิดขึ้นมีผลกับค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากฮาร์โมนิกส์น้อยมาก วิธีการนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากง่ายต่อการพัฒนาอัลกอริทึม



รูปที่ 4.4 รูปคลื่น PWM ที่มีการสุ่มสัญญาณแบบสมมาตร

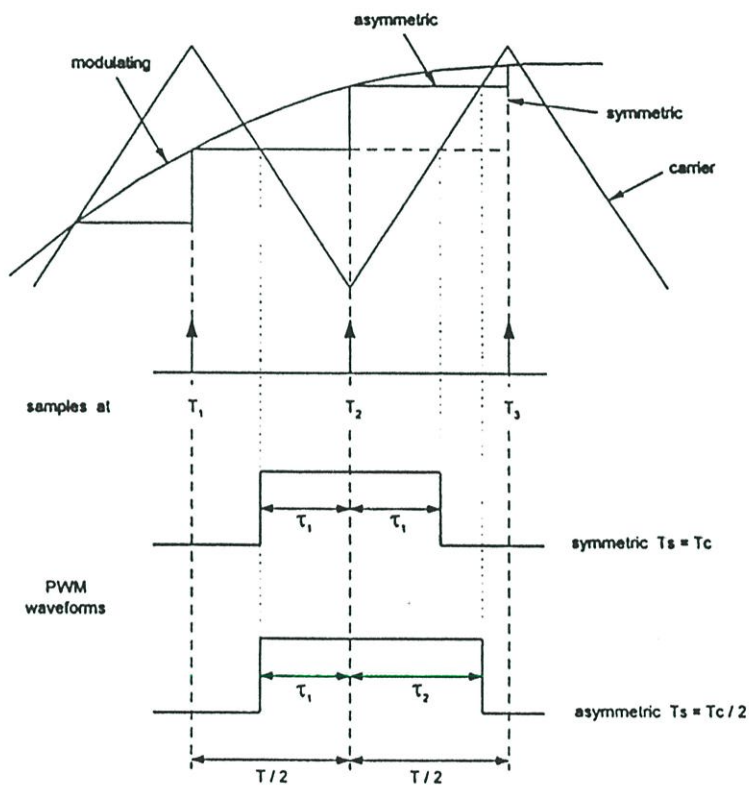
การรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบซายน์ สามารถเขียนแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรดิจิทัลได้เป็นอย่างดี การรวมสัญญาณโดยใช้เทคโนโลยีทางดิจิทัลนี้สามารถแบ่งเป็น 2 แบบตามลักษณะของสุ่มสัญญาณ (Sampling) คือการสุ่มสัญญาณ

แบบสมมาตร (Symmetrical regular sampling) กับแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical regular sampling)

4.2.2.1 การรวมสัญญาณแบบสมมาตร (Symmetrical modulation)

การรวมสัญญาณแบบนี้จะใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling rate) เท่ากับความถี่สัญญาณพาหะดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยจะทำการสุ่มสัญญาณมูลฐานในขณะที่ขนาดของสัญญาณพาหะมีค่าสูงสุด รูปคลื่นของสัญญาณมูลฐานที่ได้รับจะมีลักษณะเป็นขั้น จากนั้นจึงนำขนาดของสัญญาณมูลฐานมาคำนวณหาความกว้างของพัลส์ได้จากสมการ 4.1

$$T_{on} = \frac{T_c}{2} [1 + m_a \sin(\omega_0 t_n)] \quad (4.1)$$



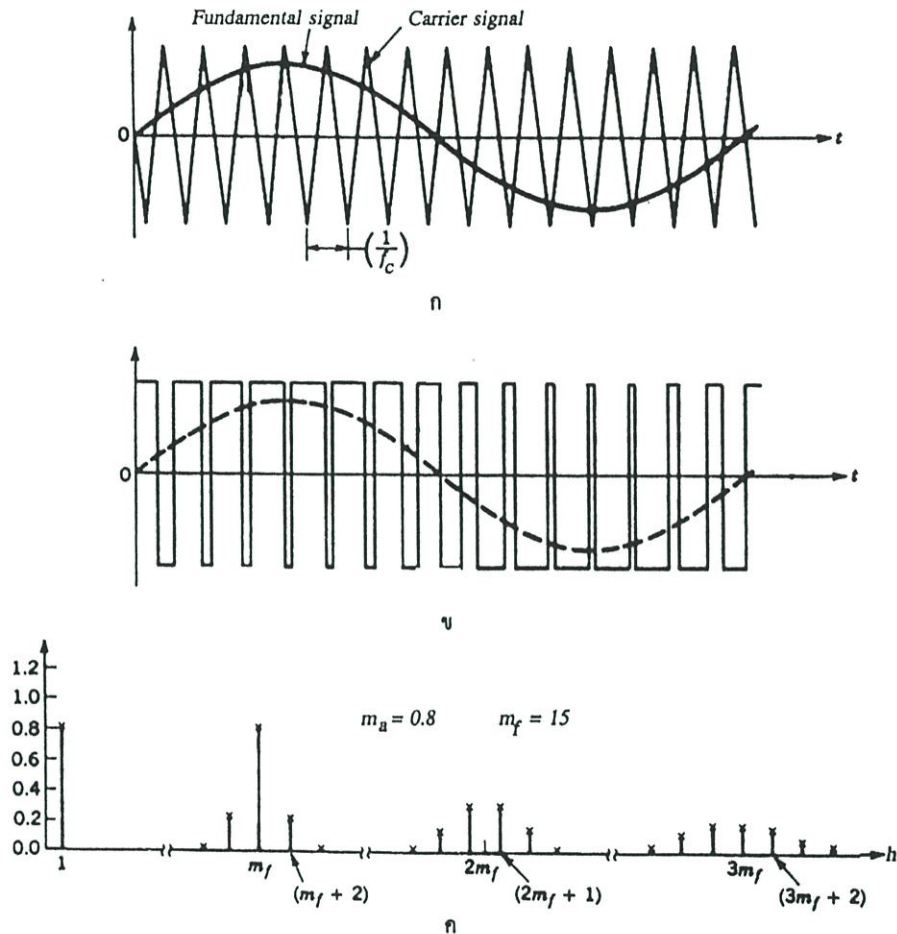
รูปที่ 4.5 รูปคลื่น PWM แบบสมมาตรและไม่สมมาตร

4.2.2.2 การรวมสัญญาณแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical modulation)

การรวมสัญญาณแบบนี้จะต่างจากแบบแรกที่อัตราการสุ่มสัญญาณสูงกว่าแบบแรก 2 เท่า วิธีนี้จะให้สเปกตรัมของฮาร์โมนิกส์ที่ดีกว่า ลักษณะของการสุ่มสัญญาณแสดงดังในรูปที่ 4.5 การสุ่มครั้งแรกจะหามุมด้านหน้าหรือขอบขาขึ้นของสัญญาณพัลส์ ส่วนการสุ่มสัญญาณครั้งที่สองจะหามุมด้านหลังหรือขอบขาลงของสัญญาณ วิธีการนี้จะคำนวณความกว้างของพัลส์ได้ใกล้เคียงกับการ

มอดคูเลทในระบบอนาล็อกมากกว่าแบบแรก การคำนวณหาความกว้างของพัลส์สามารถอธิบายได้
 ดังสมการ 4.2

$$T_{on} = \frac{T_c}{2} \left\{ 1 + \frac{M_a}{2} (\sin \omega_0 t_n + \sin \omega_0 t_{n+1}) \right\} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.6 รูปคลื่น PWM และสเปกตรัมของฮาร์โมนิกส์

4.2.2.3 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกส์

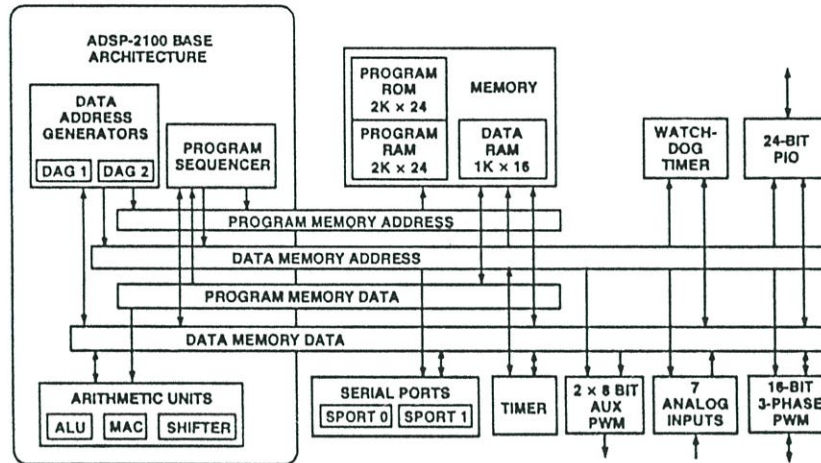
สเปกตรัมของฮาร์โมนิกส์ของการรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบชานี้ดังแสดง
 ในรูปที่ 4.6 จะประกอบด้วย 3 ส่วนคือส่วนแรกจะเป็นความถี่สัญญาณมูลฐานซึ่งมีขนาดเท่ากับ
 อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของสัญญาณมูลฐานกับค่าสูงสุดของสัญญาณพาหะหรือเรียกว่าดัชนีการ
 รวมสัญญาณ (m_a) ส่วนที่ 2 คือฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งผลคูณที่เป็นจำนวนเต็มของความถี่
 สวิตซ์ซึ่ง ส่วนที่ 3 จะเป็นฮาร์โมนิกส์ด้านข้าง (Side band) ที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งและผลคูณจำนวนเต็ม
 ของความถี่สวิตซ์ซึ่งดังสมการที่ 4.3 หรืออธิบายเป็นลำดับ (Order) ของฮาร์โมนิกส์ h ดังสมการที่
 4.4

$$f_h = (jm_f \pm k)f_0 \quad (4.3)$$

$$h = jm_f \pm k \quad (4.4)$$

ดังนั้นค่าฮาร์โมนิกอันดับที่ $h = 1$ คือค่าฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ของสัญญาณมูลฐานและค่าฮาร์โมนิกอันดับที่ $h = m_f$ คือค่าฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ของสัญญาณพาหะ

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของ ADMC331

4.3 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ADMC 331

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMC 331 ของบริษัท Analog Device มาใช้ในการประมวลผลและควบคุมการทำงานของระบบ เนื่องจากประมวลผลการทำงานแบบซิมเพิลจึงสามารถลดจำนวนอุปกรณ์ภายนอกลง เท่ากับเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบ รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็น โครงสร้างของ ADMC 331 ซึ่งมีคุณสมบัติโดยทั่วไปของ ADMC 331 สามารถสรุปได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 26 MIPS (38.5 nS Single cycles instruction execution), Fixed-Point, 16-bit DSP Core.
- 2K Internal Program and 1K Data Memory RAM.
- 2K Internal Program Memory ROM, offering Debugger Interface and Pre-Programmed Math and Motor Control Functions.
- A Three-Phase, 16-Bit PWM Generator, with single and double updates modes.
- Seven Analog Input Channels.
- 24 General Purpose I/O Lines, Configurable as Inputs or Outputs.

- Two Synchronous Serial Ports.
- Two programmable, 8-Bit Auxiliary PWM Outputs
- A 16-Bit Watchdog Timer.
- A General Purpose, Interval Timer with Prescaler.

4.3.1 การกำเนิดค่าสัญญาณอ้างอิงชายน้แบบตามเวลาจริง [11]

ในการกำเนิดค่าสัญญาณชายน้แบบตามเวลาจริง เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการควบคุมรูปคลื่นกระแสจ่ายออกให้มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นชายน้มากที่สุด จะต้องเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปสมการโพลิโนเมียม ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้ในการเปลี่ยนรูปสมการคือ Taylor Series และ McLaren Series ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ Taylor Series อันดับที่ 5 ดังนั้นฟังก์ชันชายน้จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการโพลิโนเมียมดังสมการที่ 4.5 และนำไปใช้ในการกำเนิดสัญญาณอ้างอิงแบบชายน้บนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

$$\sin(\alpha) = 3.140625\alpha^2 - 0.02026367\alpha^3 + 0.5446778\alpha^4 + 1.18000293\alpha^5 \quad (4.5)$$

$$\text{เมื่อ } \alpha \in [0,1]$$

จากสมการที่ 4.5 ค่าของชายน้จะมีค่าถูกต้องที่มุมใดๆ ในควอดแดนท์ที่ 1 เท่านั้น ส่วนค่าที่ควอดแดนท์อื่นๆ จะเท่ากับค่าในควอดแดนท์ที่ 1 เนื่องจาก $\sin(-\alpha) = -\sin(\alpha)$ และ $\sin(\alpha) = -\sin(180^\circ - \alpha)$ ดังนั้นค่าที่ควอดแดนท์อื่นๆ จึงสามารถอ้างอิงกับค่าในควอดแดนท์ที่ 1 ได้ทุกๆ ค่า

4.3.2 การควบคุมแบบพีไอ [12]

การควบคุมแบบพีไอเป็นเทคนิคในการควบคุมการทำงานที่สำคัญมากและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในระบบโดเมนเวลาแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.6 หรือเขียนสมการในรูปของความถี่ได้ดังสมการที่ 4.7

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) \cdot I(s) \quad (4.6)$$

$$U(s) = K_p \cdot \left(1 + \omega_{PI} \frac{1}{s} \right) \cdot I(s) \quad (4.7)$$

เมื่อ $\omega_{PI} = \frac{K_I}{K_p}$ แต่ในการนำมาใช้ในระบบควบคุมแบบดิจิทัลจำเป็นต้องเปลี่ยนจาก

ระบบโดเมนเวลาแบบต่อเนื่องเป็นระบบโดเมนเวลาแบบดิสครีต ซึ่งเทคนิคในการคำนวณหรือการประมาณค่าอินทิกรัลในโดเมนเวลาแบบดิสครีตมีหลายเทคนิคด้วยกัน แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้เทคนิค Zero order hold (ZOH) ในการประมาณค่าของอินทิกรัล ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้คำนวณค่าอิน-

ที่กรัดจากค่าปัจจุบันดังแสดงในรูปที่ 4.8 หรือเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.8 และนำไปเขียนใน Z-domain ได้ดังสมการที่ 4.9

$$\sum_{k+1} = \sum_k + I_k \cdot T_{sample} \quad (4.8)$$

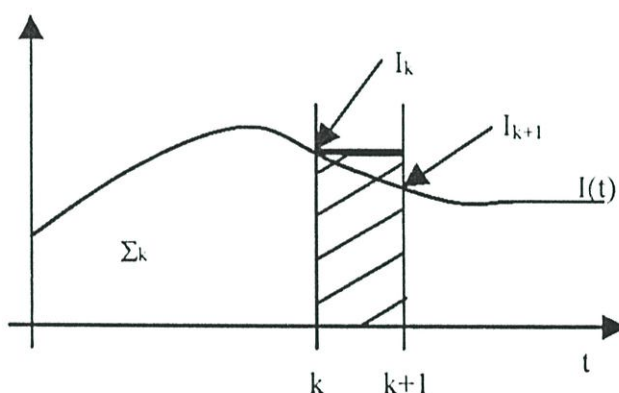
$$\sum(z) = \frac{T_{sample}}{z-1} I(z) \quad (4.9)$$

นำสมการที่ 4.9 ไปแทนในสมการที่ 4.7 จะได้สมการการควบคุมแบบพีไอในโดเมนเวลาแบบดิสครีตดังสมการที่ 4.10 หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปของค่าคงที่ได้ดังสมการที่ 4.11

$$U_{k+1} = K_P \cdot I_{k+1} + K_P (\omega_{PI} \cdot T_{sample} - 1) \cdot I_k + U_k \quad (4.10)$$

$$U_{k+1} = A_1 \cdot I_{k+1} + A_0 \cdot I_k + U_k \quad (4.11)$$

ดังนั้นในสมการที่ 4.11 จะนำไปใช้ในการควบคุมแบบพีไอในโดเมนเวลาแบบดิสครีต

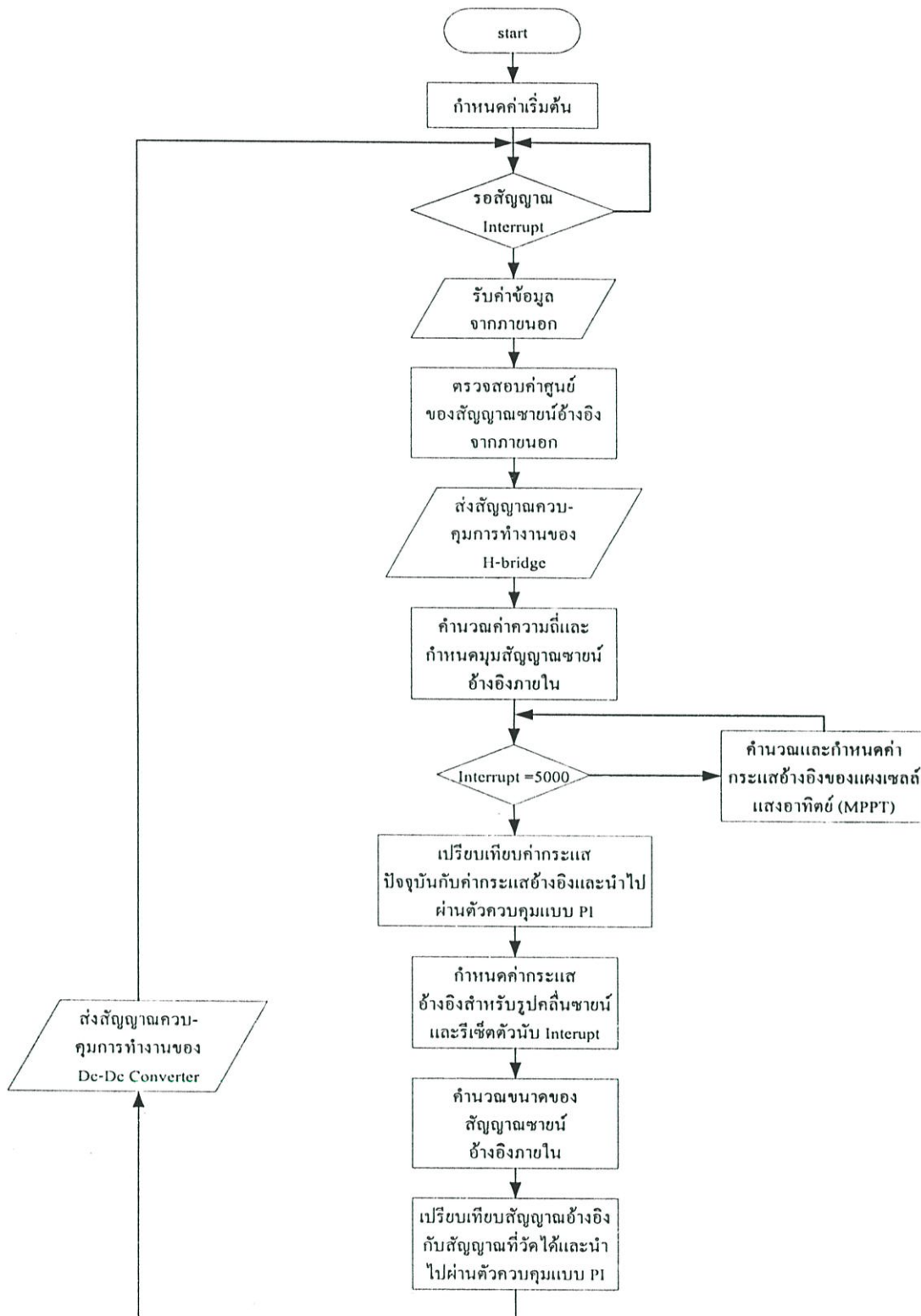


รูปที่ 4.8 การประมาณค่าอินทิกรัล โดยใช้เทคนิค ZOH [12]

4.4 การออกแบบโปรแกรมควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอด้วยตัวประมวลผลสัญญาณ

ดิจิทัล ADMC331

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1 ถึงโครงสร้างของระบบควบคุมการทำงานอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบน ADMC331 ซึ่งจะแบ่งส่วนควบคุมเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนการคำนวณหาค่ากำลังงานสูงสุด (MPPT) ซึ่งใช้เทคนิค Hill climbing algorithm ส่วนที่สองเป็นส่วนควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัก-บูสต์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวโดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบสมมาตรในการควบคุมกระแสจ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ขนาดและลักษณะของรูปคลื่นกระแสคล้ายรูปคลื่นไซน์แบบเต็มคลื่น โดยทำงานที่ความถี่สวิตช์ซึ่งเท่ากับ 10kHz ซึ่งนำไปใช้ในการกำหนดช่วงเวลาอินเตอร์รัปต์ของโปรแกรม ส่วนสุดท้ายเป็นการควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานเป็นสวิตช์กลับเฟสให้เป็นรูปคลื่นไซน์ จากข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวนี้นำไปใช้ในการออกแบบโปรแกรมดังแสดงในโพลีชาร์ทรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 โฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งที่นำเสนอ

ในการทำงานของโปรแกรมคังโพล์ชาร์ทรูปที่ 4.9 เริ่มต้นที่การกำหนดค่าตัวแปรและค่าคงที่หรือค่าเริ่มต้นสำหรับการทำงานของโปรแกรม จากนั้นจะทำรับค่ากระแสและแรงดันทั้งหมดจากระบบกำลัง และนำไปคำนวณหาค่ากำลังงานสูงสุดโดยในการคำนวณค่ากำลังงานสูงสุดนี้จะคำนวณทุกๆ 5 วินาที เพราะต้องรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวก่อนจึงจะสามารถคำนวณค่ากำลังงานสูงสุดได้ถูกต้อง ซึ่งในระหว่างนั้นระบบจะปรับขนาดของรูปคลื่นชานนี้ให้มีขนาดเท่ากับสัญญาณอ้างอิงซึ่งถูกกำหนดจากการคำนวณค่ากำลังงานสูงสุด รวมทั้งปรับลักษณะของรูปคลื่นให้คล้ายรูปชานนี้อีกด้วย

4.5 สรุป

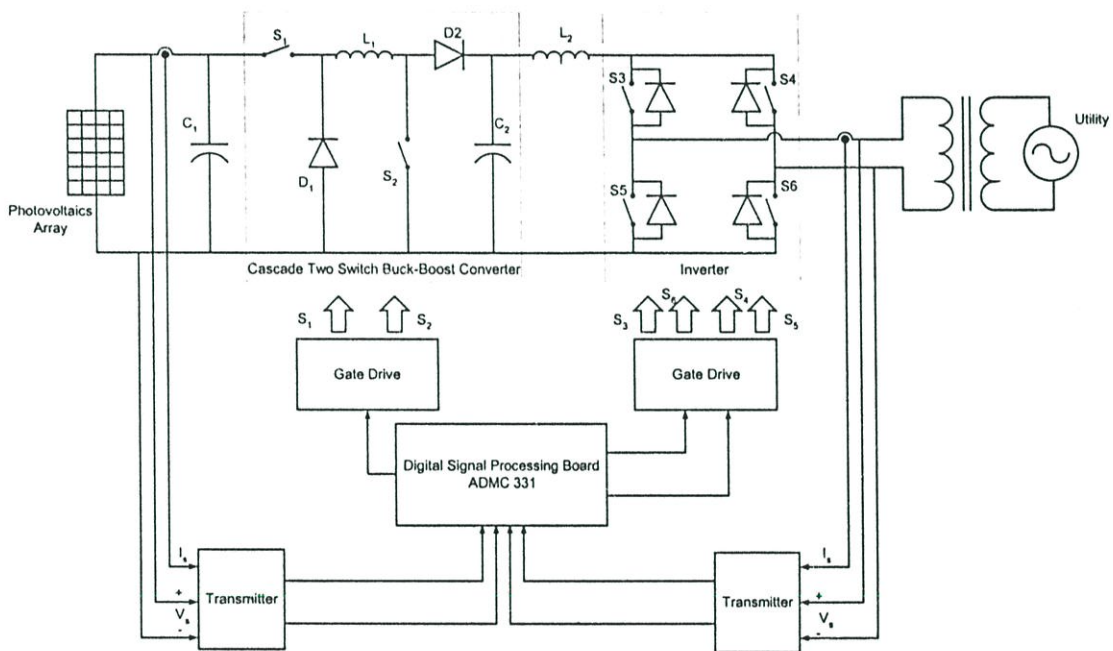
การนำตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (ADMC 331) มาใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น นอกจากลดความยุ่งยากและซับซ้อนของวงจรควบคุมแล้วยังเพิ่มความเสถียรภาพให้กับระบบเนื่องจากการประมวลผลการทำงานแบบดิจิทัลจึงสามารถลดจำนวนอุปกรณ์ภายนอกลงได้มาก รวมไปถึงความสะดวกในการปรับเปลี่ยนหรือพัฒนาระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการพัฒนาโปรแกรมควบคุมบนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเท่านั้น

บทที่ 5

ระบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้น

5.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงระบบวงจรกำลังและระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นที่นำเสนอ ซึ่งวงจรกำลังจะประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสต์ ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว วงจรกรองแรงดันและวงจรอินเวอร์เตอร์ ในส่วนวงจรควบคุมจะประกอบด้วยวงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน และวงจรควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์



รูปที่ 5.1 ระบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นที่นำเสนอ

5.2 ระบบวงจรกำลัง

ตามรูปที่ 5.1 แสดงระบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นที่นำเสนอ โดยในระบบวงจรกำลังจะมีส่วนประกอบและหน้าที่การทำงานดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.2.1 วงจรกรองแรงดัน

วงจรกรองแรงดันนี้จะใช้ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ขนาด 3000 ไมโครฟารัด 450 โวลท์ เนื่องจากเมื่อสวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสต์ทำงาน กำลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายให้กับตัวเหนี่ยวนำ เพื่อเก็บสะสมพลังงานก่อนที่จะจ่ายออกสู่ระบบภายนอก แต่ในขณะที่สวิตช์ดังกล่าวหยุดทำงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะหยุดจ่ายกำลังงานด้วยเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่าการทำงานดังกล่าวเป็นแบบไม่ต่อเนื่องแต่สามารถทำงานใกล้จุดกำลังงานสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังงานอย่างต่อเนื่องจะให้ประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่า และสามารถทำงานใกล้จุดกำลังงานสูงสุดมากกว่า ดังนั้นการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานแบบต่อเนื่องสามารถทำได้โดยออกแบบให้ตัวเก็บประจุนี้สามารถรับกำลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่สวิตช์ ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสต์หยุดทำงาน ดังนั้นตัวเก็บประจุดังกล่าวนี้นอกจากจะทำหน้าที่กรองแรงดันแล้วยังทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับระบบอีกด้วย

5.2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสต์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสต์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวทำงานที่ความถี่ 10kHz จะประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์จำนวน 2 ตัว ไดโอดจำนวน 2 ตัว ตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนกำลังงาน และตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวกรองแรงดันและรับกำลังงานจากตัวเหนี่ยวนำพร้อมทั้งจ่ายกำลังงานออกสู่ภายนอก จากการออกแบบที่แสดงในบทที่ 3 จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำขนาด $L_1 = 119\mu H$ จากนั้นนำไปออกแบบโดยเลือกใช้แกนไอออนพาเคอร์ทอรอยด์ (Iron powder toroid) โดยใช้สมการที่ 3.10 ซึ่งกำหนดให้ $B_m = 0.3T$, $K_u = 0.4$ และ $K_j = 403$ ดังนั้น

$$A_p = \left(\frac{2(1.0496 \times 10^{-3}) \times 10^4}{(0.3)(0.4)(403)} \right)^{1.14} = 0.3862$$

นำค่าดังกล่าวไปเปิดตารางและเลือกใช้แกนขนาด T80-40 ซึ่งมีค่า $A_c = 0.242$ ดังนั้นสามารถคำนวณหาจำนวนรอบตามสมการ 3.11 ดังนี้

$$N = \frac{119\mu \times 4.2 \times 10^4}{0.3 \times 0.242} = 68.8 \approx 69 \quad \text{รอบ}$$

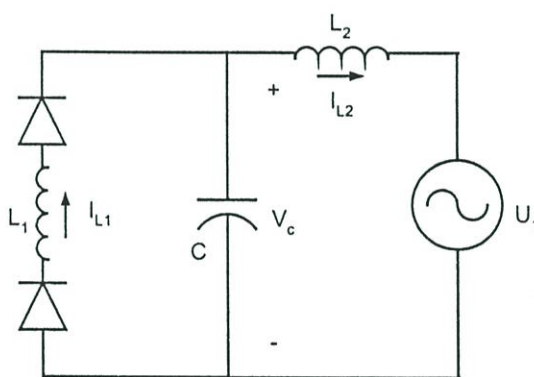
ตัวเก็บประจุที่สามารถคำนวณได้มีขนาด $C_2 = 0.839\mu F$ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด $0.47\mu F$ 400 โวลท์ จำนวน 2 ตัว ต่อขนานกัน เนื่องจากตัวเก็บประจุดังกล่าวมีขนาดเล็กดังนั้นจึงมีผลในเรื่องของแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์เนื่องมาจาก $V_L = L \frac{di}{dt}$ ที่มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งการที่จะเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุนี้ให้มีค่าสูงขึ้นจะมีผลทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกขนาดของอุปกรณ์สวิตช์ที่สามารถทนแรงดันที่เกิดขึ้นได้ โดยในที่นี้

เลือกใช้ไอจีบีทีขนาด 50 แอมป์ 600 โวลท์ รุ่น 2MB150N-060 ซึ่งมีไดโอดแบบฟื้นตัวเร็วมาก (Ultrafast recovery diode) ต่อแบบ Anti parallel กับ ไอจีบีที

5.2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์

สิ่งสำคัญในการออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบนี้คือ การกำหนดค่าของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงดันไปเป็นกระแส ซึ่งการออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งแบบ 2 ชั้นที่นำเสนอนี้จำเป็นต้องพิจารณาความถี่ของรูปคลื่นที่อาจเกิดขึ้นจากตัวเหนี่ยวนำดังกล่าว ด้วยขนาดของตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5.1

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลขณะตัวเหนี่ยวนำ L_1 จ่ายกำลังงานเข้าสู่ระบบสายส่งของการไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.2 ในสถานะที่ L_1 จ่ายกำลังงานออกหรือในสถานะที่สวิตช์ทั้งสองตัวของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัก-บูสท์หยุดทำงานสามารถเขียนสมการแรงดันตกคร่อมที่ V_{L2} ได้ดังสมการที่ 5.2 (ไม่คิดค่าแรงดันที่สูญเสียในอุปกรณ์สวิตช์และไดโอด)

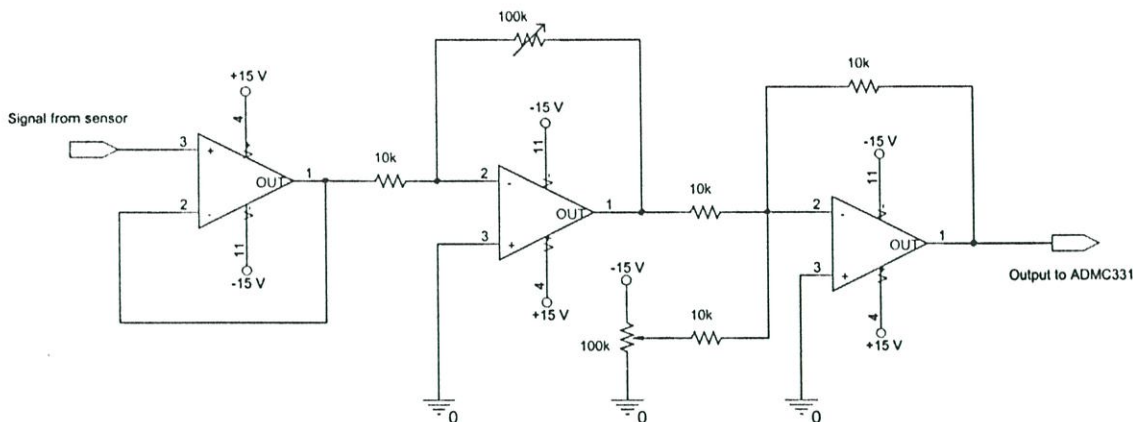
$$V_{L2} = V_c - V_o = L_1 \frac{di_{L1}}{dt_{off}} - U_1 \quad (5.2)$$

ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อม V_{L2} สามารถคำนวณดังนี้

$$V_{L2} = 119 \mu \frac{4.2}{100 \mu \times 0.1} - 33 = 16.98 \text{ โวลท์}$$

กำหนดให้ขนาดของกระแสระลอกสูงสุดมีค่าเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของกระแสจ่ายออก ดังนั้นค่ากระแสระลอกจึงมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.42 แอมป์ นำไปคำนวณหาขนาดของ L_2 ได้ดังนี้

$$L_2 = \frac{16.98 \times 100 \mu \times 0.1}{0.42} = 404.29 \text{ ไมโครเฮนรี่}$$



รูปที่ 5.5 วงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน

5.3 ระบบวงจรควบคุม

ในระบบวงจรควบคุมจะลดความยุ่งยากลงมาก เนื่องจากการนำตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (ADMC 331) มาใช้ในการควบคุมการทำงาน ดังนั้นในส่วนวงจรควบคุมจึงมีเพียงวงจรตรวจจับกระแสและแรงดันของระบบและวงจรจับเกตสำหรับไอจีบีทีเท่านั้น

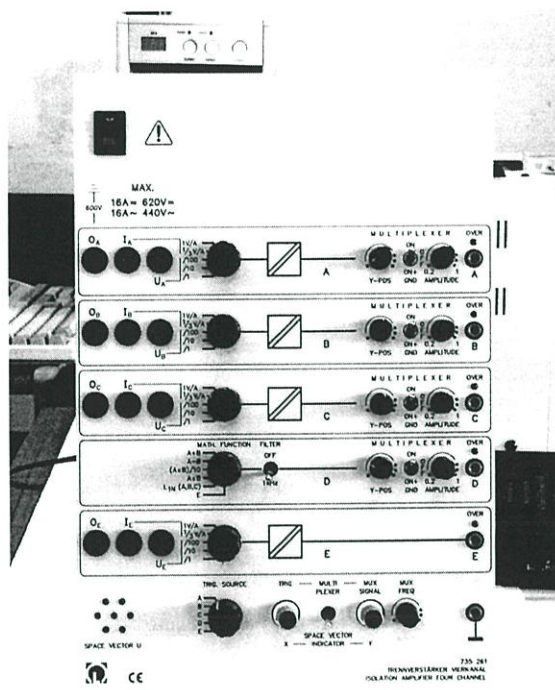
5.3.1 วงจรจับเกต (Gate drive circuit)

สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีจำเป็นต้องผ่านวงจรจับเกต เพื่อแยกกราวด์ของสัญญาณควบคุมก่อนส่งให้ไอจีบีที เนื่องจากไอจีบีทีแต่ละตัวถูกต่อให้ทำงานโดยจุดกราวด์มีค่าความต่างศักย์ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งวงจรจับเกตในวิทยานิพนธ์จะใช้ไอซีเบอร์ EXB840 ซึ่งเป็นไอซีสำเร็จรูปทำหน้าที่แยกกราวด์โดยใช้ Opto isolator วงจรจับเกตที่ใช้แสดงดังในรูปที่ 5.3 และรูปคลื่นสัญญาณที่ออกจากวงจรจับเกตดังรูปที่ 5.4

5.3.2 วงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน (Current and Voltage detector)

การตรวจจับกระแสจะใช้ LEM รุ่น LA25-NP ในการตรวจจับกระแส ซึ่งให้ค่ากระแสจ่ายออกสูงสุด $25mA$ และออกแบบให้เปลี่ยนค่ากระแสเป็นแรงดันด้วยความต้านทานขนาด 200 โอห์ม ดังนั้นระดับแรงดันจ่ายออกที่จะได้รับจาก LEM จะมีค่าอยู่ระหว่าง ± 5 โวลต์ สำหรับการตรวจจับแรงดันจะใช้ Isolation amplifier four channel ของ LEYBOLD Didactic GMBH รุ่น 735-261 ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งให้ค่าสัญญาณจ่ายออกอยู่ระหว่าง ± 5 โวลต์ เช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (ADMC 331) จะรับสัญญาณขนาด 0.3 – 3.3 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนระดับสัญญาณดังกล่าวให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสามารถตรวจจับได้ ซึ่งวงจรที่ใช้สำหรับการปรับระดับกระแสและแรงดัน จะมีลักษณะที่เหมือนกันแต่แตกต่างที่อัตราขยายและ

ระดับแรงดันอ้างอิงเท่านั้น ซึ่งวงจรดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.5 ประกอบด้วยวงจรบัฟเฟอร์ วงจรขยายสัญญาณและวงจรยกระดับสัญญาณ



รูปที่ 5.6 Isolation amplifier four channel ของ LEYBOLD Didactic ที่ใช้สำหรับตรวจจับแรงดัน

5.4 ระบบต้นแบบและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบ

ในการทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอนี้จะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 8 แผง ดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยนำแผงที่ต่ออนุกรมกันจำนวน 4 แผงมาขนานกัน ซึ่งแต่ละแผงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังนี้

Power (Typical $\pm 10\%$)	47.0	Watts
Current (Typical at load)	2.94	Amps
Voltage (Typical at load)	16.0	Volts
Short Circuit Current (Typical)	3.27	Amps
Open Circuit Voltage (Typical)	19.9	Volts (1000W/m ² 25°C AM 1.5)

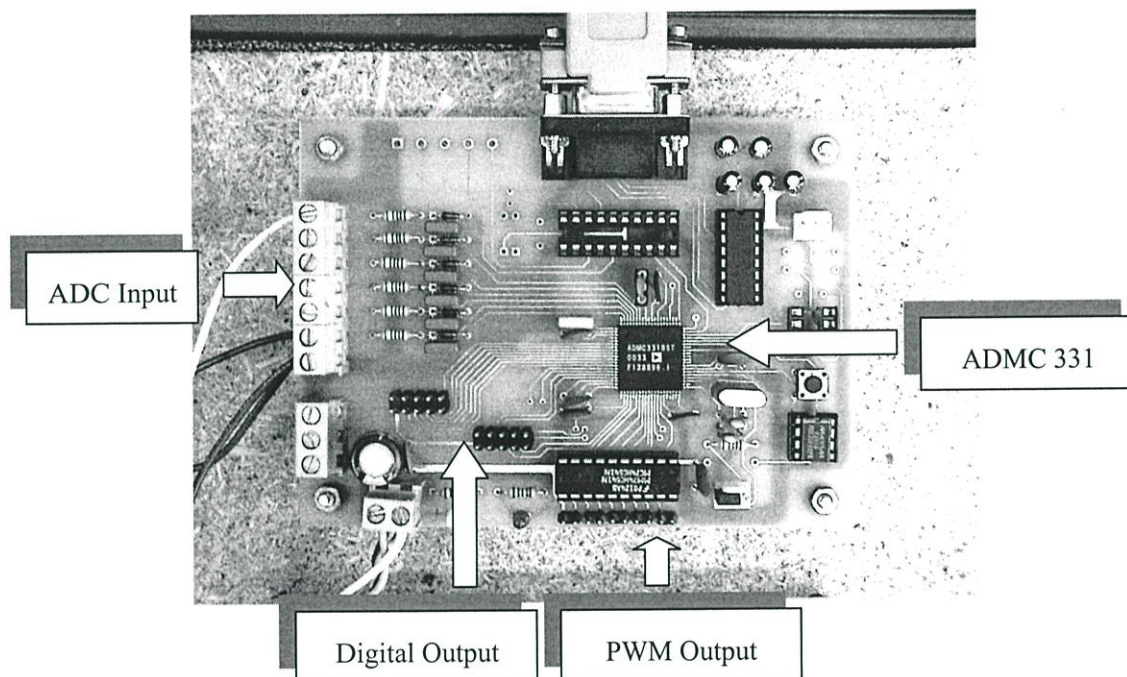


รูปที่ 5.7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบ

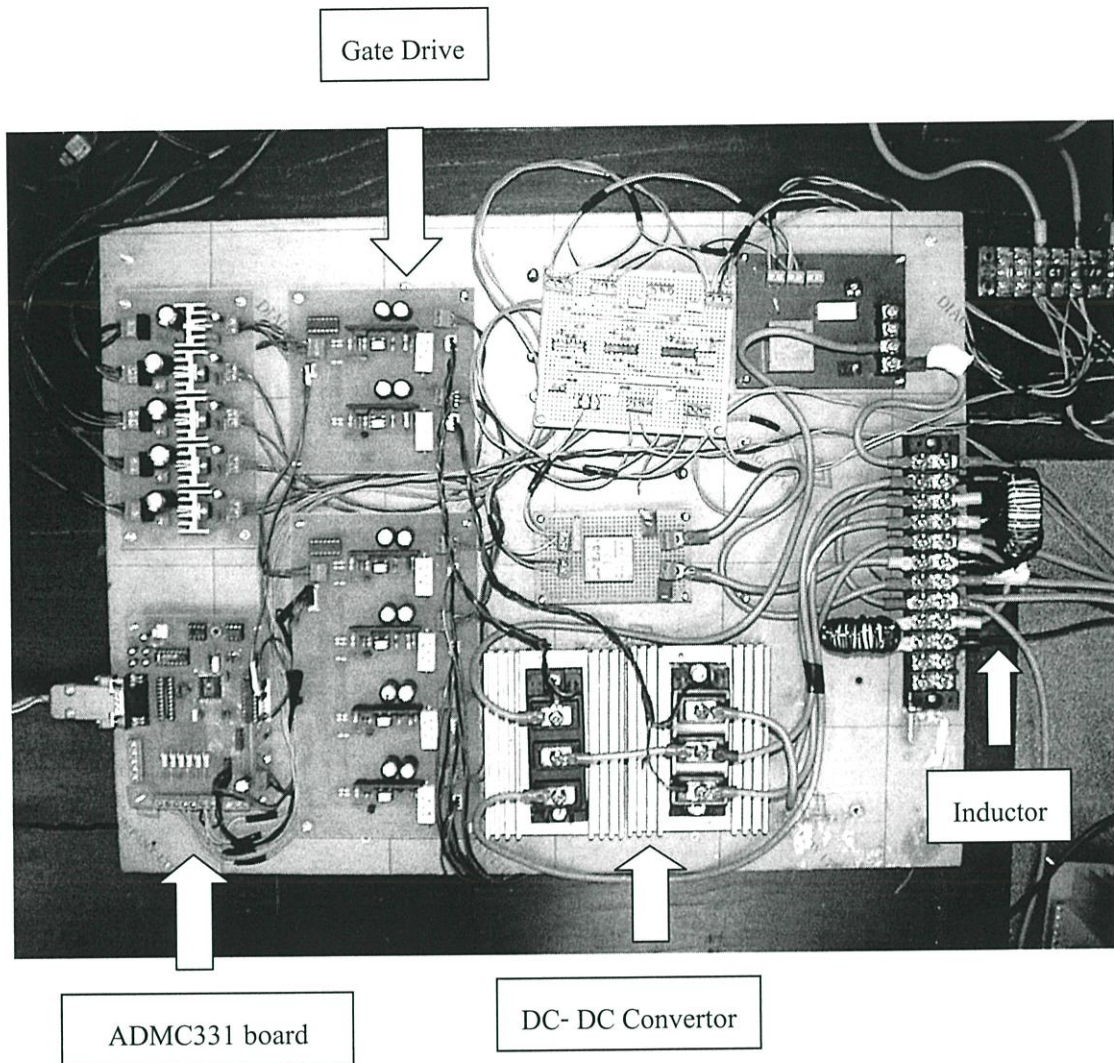
จากที่ได้ออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากนั้นนำมาประกอบเป็นระบบต้นแบบจริงดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นบอร์ดของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (ADMC 331) ที่ใช้ทดสอบ และในรูปที่ 5.9 เป็นระบบต้นแบบจริง

การทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นนี้จะทำการทดสอบการทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบจ่ายแรงดันคงที่ Elgar รุ่น SW 1750 ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ก่อนนำไปทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่ง โดยควบคุมให้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายแรงดันขนาด 50 โวลต์ และควบคุมระบบให้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดังกล่าว ให้มีค่าใกล้เคียงกับกำลังงานไฟฟ้าที่พิกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทำการทดสอบการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งที่เสมือนจริงมากที่สุด ซึ่งในการทดสอบดังกล่าวจะทำการทดสอบเฉพาะการควบคุมลักษณะของรูปคลื่น ทั้งในสถานะที่ยังไม่เชื่อมต่อกับสายส่งและสถานะที่เชื่อมต่อกับสายส่งแล้ว จากนั้นจึงทำการทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง ซึ่งในการทดสอบนี้จะต้องทดสอบอัลกอริทึมของการหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย ส่วนเครื่องมือวัดและทดสอบที่ใช้ประกอบด้วย เครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังงานไฟฟ้า Fluke 43 ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อวัดและวิเคราะห์รวมถึงบันทึกค่ากำลังงานไฟฟ้าเข้าคอมพิวเตอร์ได้ทันที ซึ่งเป็นการสะดวกในการเก็บข้อมูลการทดสอบการหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของระบบด้วย เครื่องวิเคราะห์กำลังงานไฟฟ้า YOKOGAWA รุ่น PZ 4000 ดังแสดงในรูปที่ 5.12 มีข้อดีในด้านช่องวัดสัญญาณแต่ช่องแยกกราวด์กันอย่างเด็ดขาดซึ่งทำให้มีความสะดวกในการวัดสัญญาณได้พร้อมๆ กันทั้งแปดช่องสัญญาณซึ่งแบ่งออกเป็นช่อง

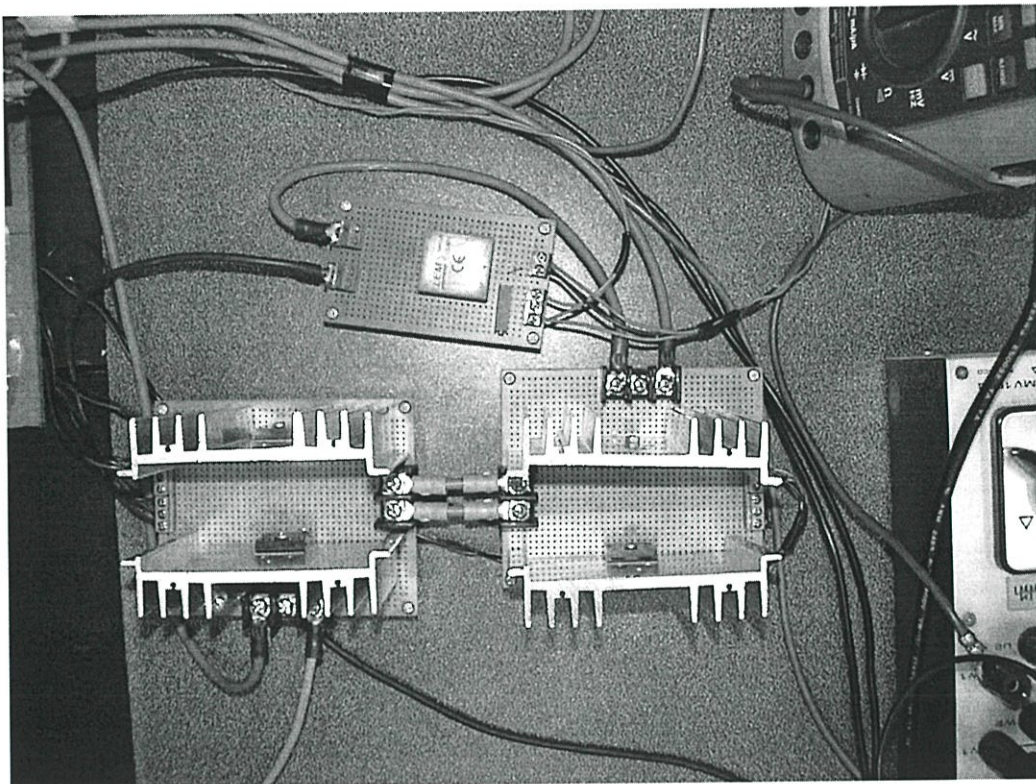
วัดกระแสจำนวน 4 ช่อง และช่องวัดแรงดันจำนวน 4 ช่อง ซึ่งเหมาะสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ อีกประการหนึ่งเครื่องวิเคราะห์กำลังงานไฟฟ้านี้สามารถคำนวณหาค่าฮาร์โมนิกส์ของทั้งกระแสและแรงดัน ทั้งยังดึงข้อมูลออกมาวิเคราะห์ค่าฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย ส่วนเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า YOKOGAWA รุ่น DL 708 เป็นเครื่องวัดที่มีคุณลักษณะคล้ายกับ รุ่น PZ 4000 ในด้านช่องวัดสัญญาณแต่ช่องแยกกราวด์กันอย่างเด็ดขาดซึ่งเหมาะกับการใช้ตรวจสอบและวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณควบคุมที่จุดต่างๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของระบบ



รูปที่ 5.8 บอร์ดตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ (ADMC331)



รูปที่ 5.9 ชุดระบบต้นแบบในส่วนชุดควบคุมทั้งหมดและวงจรคอนเวอร์เตอร์



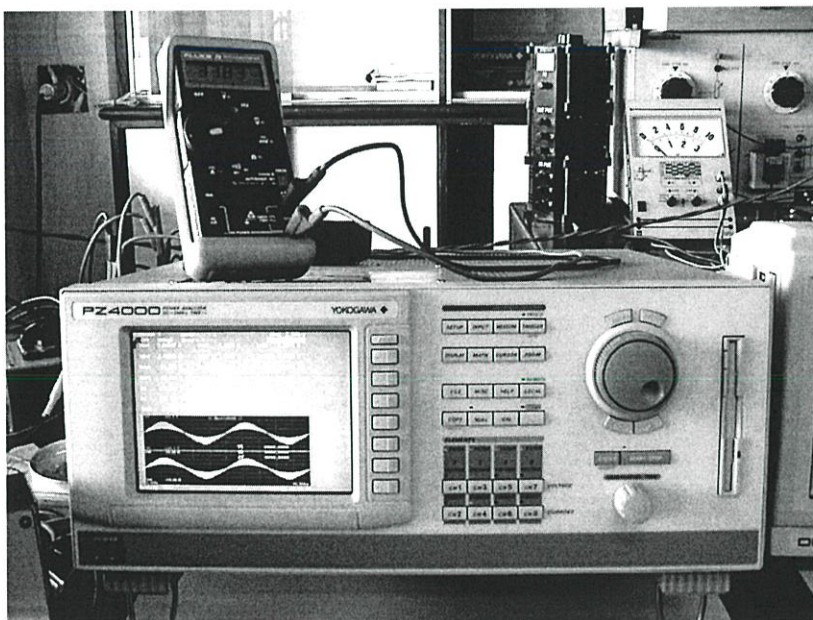
รูปที่ 5.10 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ



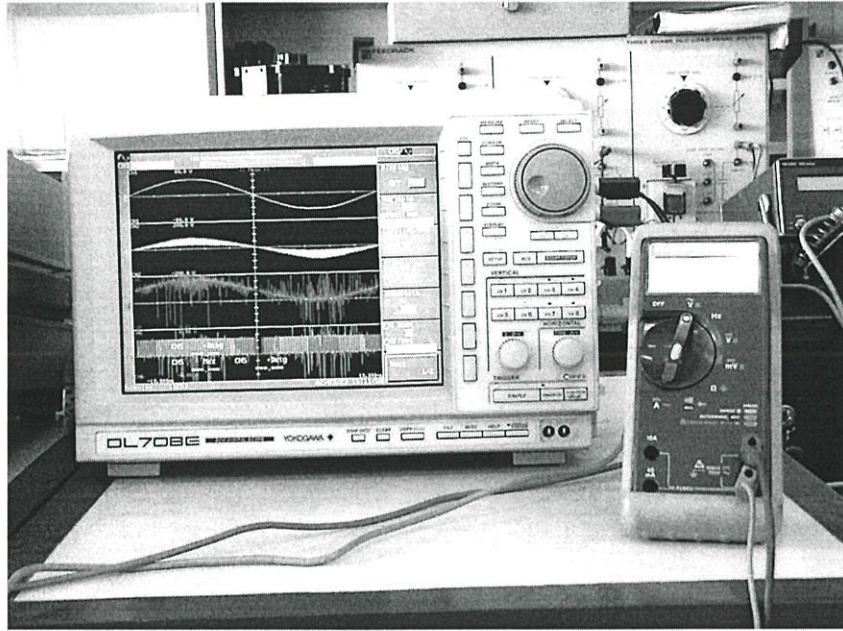
รูปที่ 5.11 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบจ่ายแรงดันคงที่ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5.12 เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพกำลังงานไฟฟ้า Fluke 43 ที่ใช้วัดและทดสอบ



รูปที่ 5.13 เครื่องมือวิเคราะห์กำลังงานไฟฟ้า YOKOGAWA รุ่น PZ 4000 ที่ใช้วัดและทดสอบ



รูปที่ 5.14 เครื่องมือวัดสัญญาณทางไฟฟ้า YOKOGAWA รุ่น DL 708 ที่ใช้วัดและทดสอบ



รูปที่ 5.15 เครื่องมือวัดปริมาณความเข้มของแสงที่ใช้ (Solar Integrator)

5.5 สรุป

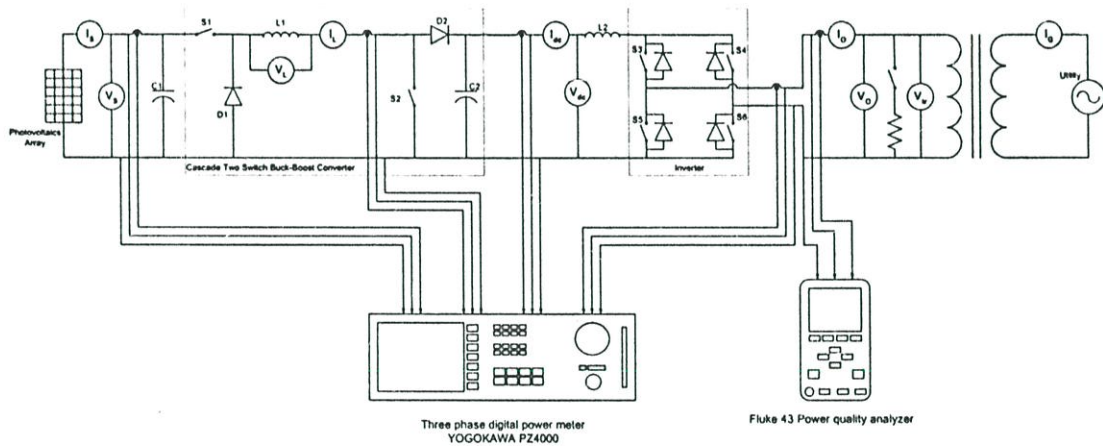
ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในการควบคุมการทำงาน ซึ่งนอกจากจะมีข้อดีในเรื่องของความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนหรือแก้ไขระบบควบคุมได้โดยง่ายแล้ว ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลนี้ยังมีการประมวลผลการทำงานแบบซิปเดี่ยว ซึ่งเป็นการลดจำนวนอุปกรณ์ลงได้มาก เทียบกับการลดความยุ่งยากของระบบควบคุมลงอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบกำลังที่ถูกต้องยังเป็นสิ่งที่สำคัญถึงแม้ว่าจะมีระบบควบคุมการทำงานที่ดีก็ตาม เพราะการออกแบบระบบกำลังที่ดีจะทำให้ระบบสามารถทำงานตามที่ต้องการได้เป็นอย่างดี เครื่องมือที่ใช้วัดและทดสอบที่ถูกต้องก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ให้เห็นความสามารถของระบบได้เป็นอย่างดี ซึ่งเครื่องมือวัดและการทดสอบที่ดีจะสามารถใช้เป็นสิ่งยืนยันในประสิทธิภาพในการทำงานของระบบด้วย

บทที่ 6

การทดสอบและผลการทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่ง แบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

6.1 บทนำ

การทดสอบการทำงานของระบบต้นแบบจะแยกการพิจารณาผลการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบการทำงานของระบบเพื่อพิจารณาความถูกต้องของการทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ในทางทฤษฎี ส่วนที่สองเป็นผลทดสอบการทำงานของการทำงานให้ค่ากำลังงานสูงสุดที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่สามเป็นการทดสอบการทำงานของระบบทั้งหมดโดยแบ่งเป็นสถานะที่ไม่เชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้า (Stand alone) กับสถานะเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้า (Grid connected) เพื่อเปรียบเทียบผลการทำงาน ส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ (ไม่รวมประสิทธิภาพของหม้อแปลง) โดยมีระบบการวัดและทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.1



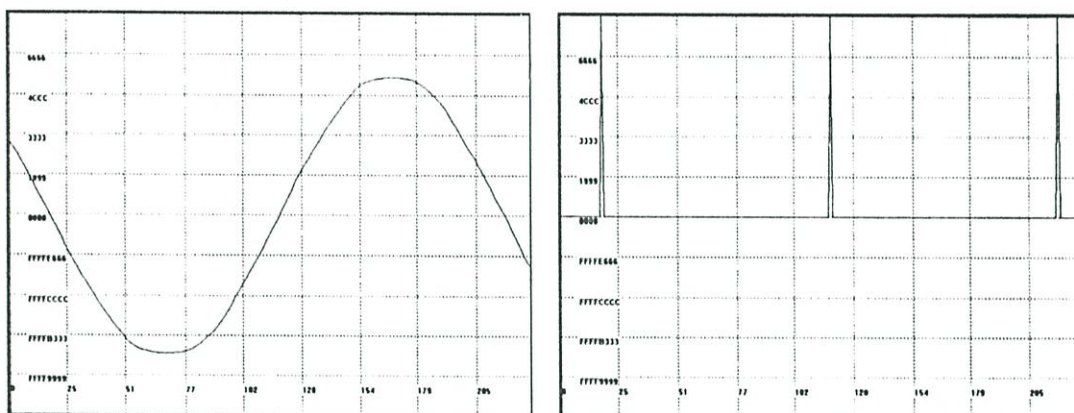
รูปที่ 6.1 วงจรและเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

6.2 ผลการตรวจสอบการทำงานของระบบ

การตรวจสอบการทำงานของระบบเป็นสิ่งจำเป็นมาก ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดความผิดพลาดในที่อาจเกิดจากการทดสอบจริงแล้ว ยังเป็นการตรวจสอบการทำงานของระบบเพื่อใช้เปรียบเทียบกับทางทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้ และสามารถนำไปปรับปรุงการทำงานให้เหมาะกับระบบจริงได้อีกด้วย โดยในการตรวจสอบการทำงานนี้จะพิจารณาทั้งในส่วนการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและผลการทำงานของวงจรกำลังในสถานะยังไม่เชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้า

6.2.1 ผลทดสอบการทำงานในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและสัญญาณควบคุม

ในการตรวจสอบการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จะตรวจสอบผลการตรวจจับค่าสัญญาณอนาล็อกและผลการทำงานภายในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล รวมไปถึงตรวจสอบผลสัญญาณควบคุมของคอนเวอเตอร์แบบบัท-นูสท์ และสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ออกจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลด้วย รูปที่ 6.2 ซ้ำแสดงรูปคลื่นแรงดันอ้างอิงจากภายนอกที่ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ตรวจจับได้ จากรูปคลื่นดังกล่าวต้องทำการวิเคราะห์หาจุดศูนย์ของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ขวา เพื่อนำไปใช้ควบคุมการทำงานของสวิทช์ที่อินเวอร์เตอร์ให้ทำงานที่จุดแรงดันเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นการลดค่าสูญเสียที่เกิดในจังหวะที่สวิทช์ ทำงาน

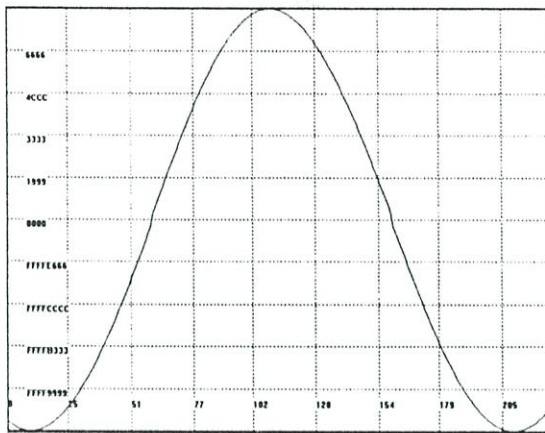


รูปที่ 6.2 รูปคลื่นที่ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลอ่านค่าได้

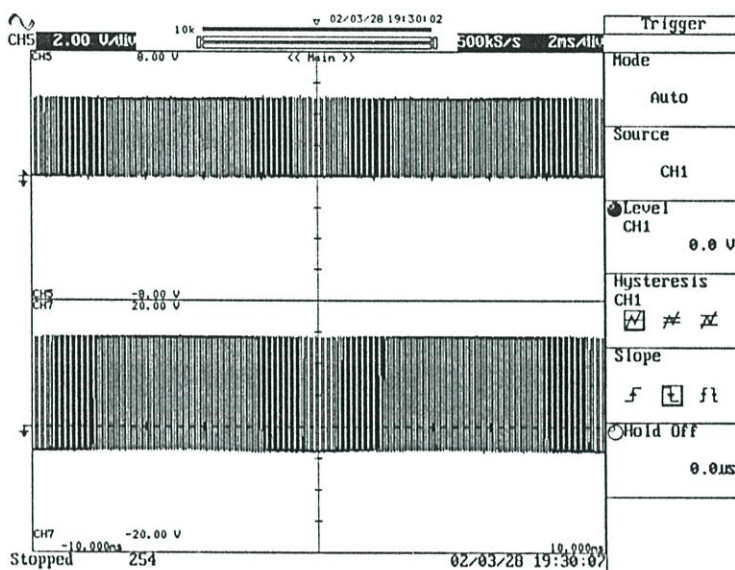
(ซ้าย) รูปคลื่นสัญญาณแรงดันอ้างอิงจากภายนอก

(ขวา) การตรวจจับค่าศูนย์ของสัญญาณแรงดันอ้างอิงจากภายนอก

จากที่ได้กล่าวในบทที่ 4 ถึงวิธีการสร้างสัญญาณอ้างอิงแบบซายน์เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อควบคุมรูปคลื่นกระแสขาออกมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นซายน์ ซึ่งสัญญาณอ้างอิงในรูปที่ 6.3 นี้ถูกสร้างมาจากสมการโพลีโนเมียลในสมการที่ 4.5 และรูปที่ 6.3 ยังแสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์ของรูปคลื่นซายน์ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยสมการที่ 4.5 ด้วย



รูปที่ 6.3 รูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงขาอินพุตที่คำนวณผลสัญญาณดิจิทัลสร้างขึ้น



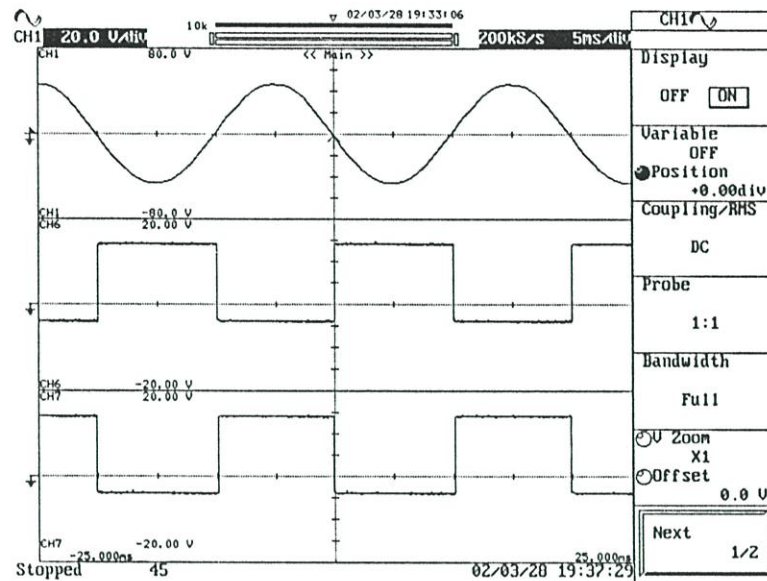
รูปที่ 6.4 สัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็มสำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัก – บูลท์

(บน) สัญญาณที่ออกจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (2 V/div 2 ms/div)

(ล่าง) สัญญาณที่ออกจากชุดวงจรขับเคลื่อน (5 V/div 2 ms/div)

รูปที่ 6.4 แสดงรูปคลื่นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัก-บูลท์ โดยจะต้องนำสัญญาณดังกล่าวไปผ่านวงจรขับเคลื่อนที่ได้อีกแล้วในบทที่ 5 โดยรูปคลื่นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มนี้จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีโอก่อนนำมาขับอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ เพื่อเป็นการชดเชยการทำงานของระบบและสามารถได้รับรูปคลื่นของกระแสจ่ายออกที่มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์มากที่สุด และรูปที่ 6.5 เป็นสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยสัญญาณควบคุมจะกำหนดการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ทั้ง 4 ตัวให้

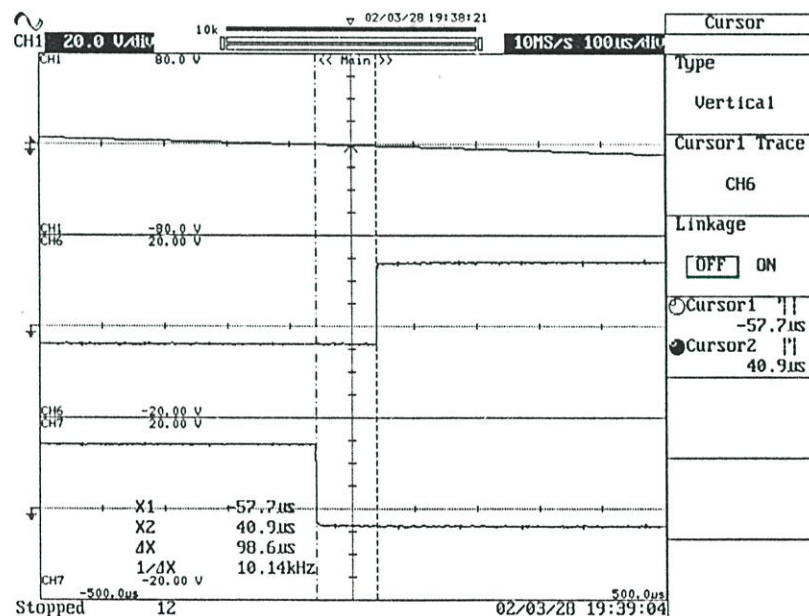
ทำงานในขณะที่แรงดันมีค่าเป็นศูนย์ตามที่อ่านค่าได้จากรูปที่ 6.2 เท่ากับเป็นการลดค่าสัญญาณระหว่างการสวิตช์ด้วย



รูปที่ 6.5 สัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์

(บน) รูปคลื่นสัญญาณแรงดันอ้างอิง (20 V/div 5 ms/div)

(กลางและล่าง) แสดงสัญญาณขับเคลื่อน (5 V/div 5 ms/div)



รูปที่ 6.6 แสดงช่วงเวลาเดดไทม์ของสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์

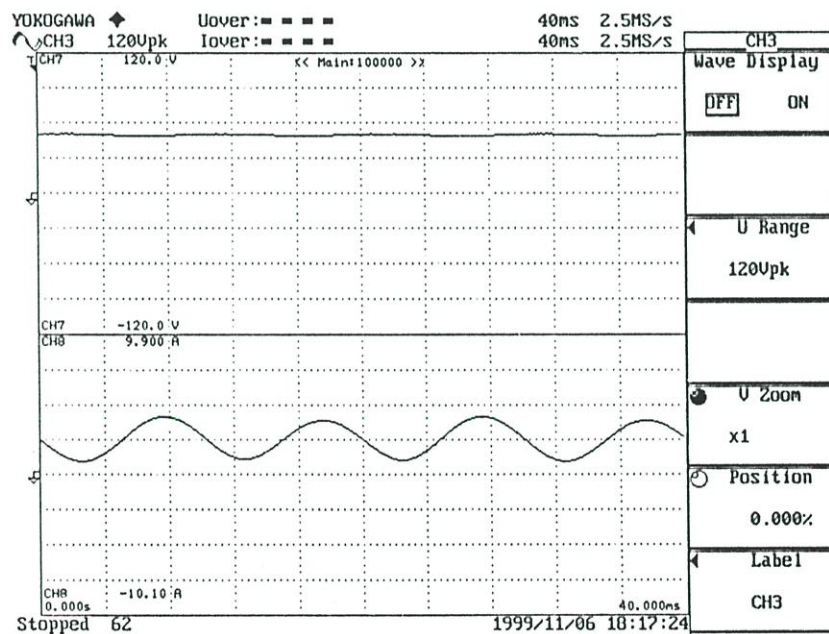
(บน) รูปคลื่นสัญญาณแรงดันอ้างอิง (20 V/div 500 us/div)

(กลางและล่าง) แสดงสัญญาณขับเคลื่อน (5 V/div 500 us/div)

6.2.2 ผลทดสอบการทำงานในระบบวงจรกำลัง

ในการทดสอบการทำงานของระบบวงจรกำลังแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกจะทำการทดสอบระบบวงจรกำลังโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ และตัดการทำงานในส่วนการหาจุดให้กำลังงานสูงสุดออก และควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้จ่ายค่ากระแสที่ค่าหนึ่ง และไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งเพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของวงจร ซึ่งจากการทดสอบพบว่าระบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ กล่าวคือเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ S_1 และ S_2 ทำงานกระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายเข้าไปยังตัวเหนี่ยวนำ และตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่สะสมกำลังงานไว้และจ่ายออกสู่ภายนอกเมื่อ S_1 และ S_2 หยุดทำงานหรือในขณะที่ D_1 และ D_2 ทำงาน ซึ่งกำลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำทั้งหมดจะถูกจ่ายออกทั้งหมดในช่วงที่ S_1 และ S_2 ทำงานเช่นเดียวกัน

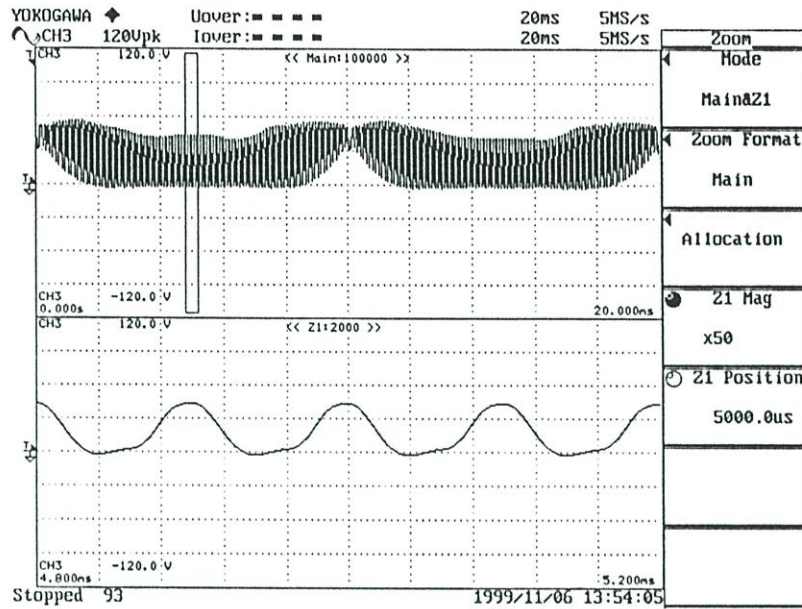
เนื่องจาก S_1 และ S_2 ถูกควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มแบบชานน์เต็มคลื่น โดยการควบคุมปริมาณกระแสและรูปคลื่นด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ดังนั้นค่ากระแสที่จ่ายออกจากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัท-บรูสท์ จึงมีขนาดตามค่ากระแสอ้างอิงที่ถูกกำหนดโดยชุดควบคุมค่ากำลังงานสูงสุด และมีลักษณะรูปคลื่นคล้ายรูปคลื่นชานน์แบบเต็มคลื่น ดังนั้นกระแสดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นชานน์ด้วย H-bridge อินเวอร์เตอร์



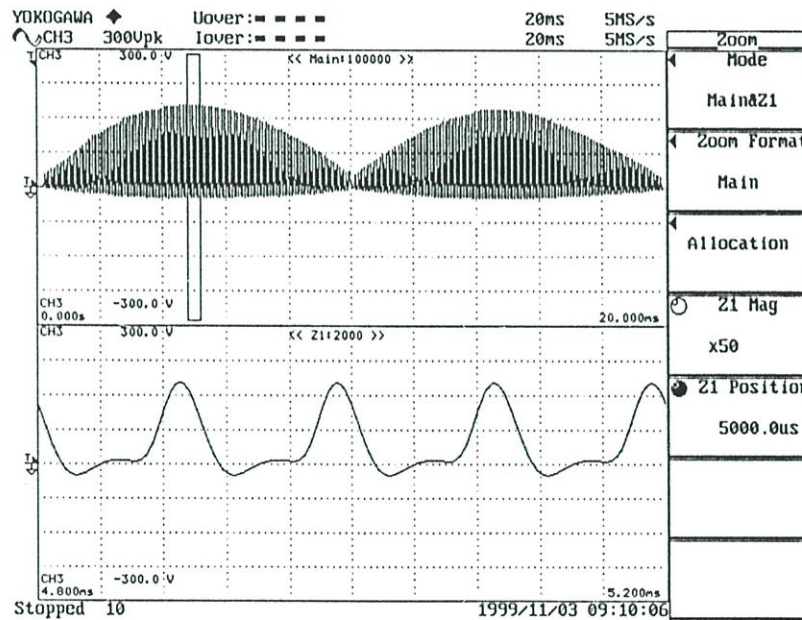
รูปที่ 6.7 รูปคลื่นแรงดัน V_s และกระแส I_s ที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายแรงดันคงที่

(บน) รูปคลื่นแรงดันที่ได้รับจากแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ (30 V/div 2 ms/div)

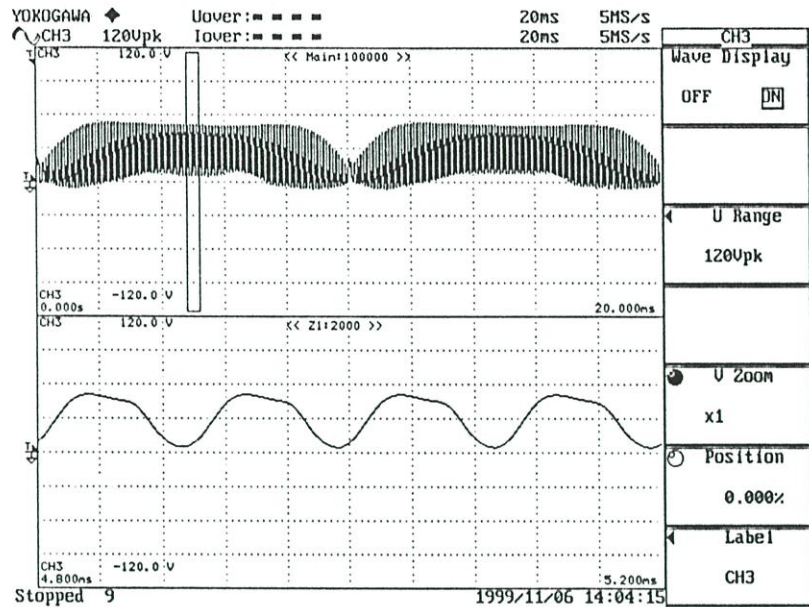
(ล่าง) รูปคลื่นกระแสที่ได้รับจากแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ (2.5 A/div 2 ms/div)



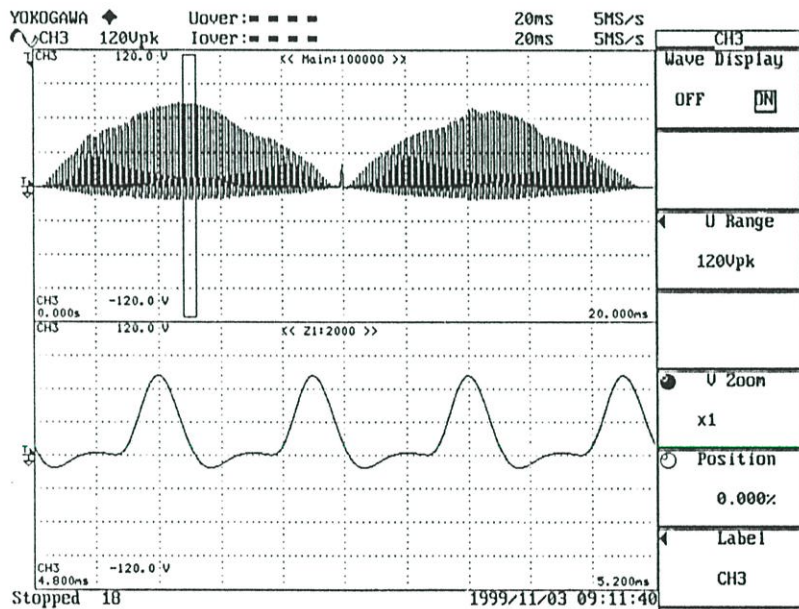
รูปที่ 6.8 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิทช์ S_1 (IGBT) ทางด้านรับไฟ (บน) และรูปขยาย (30 V/div 2 ms/div)



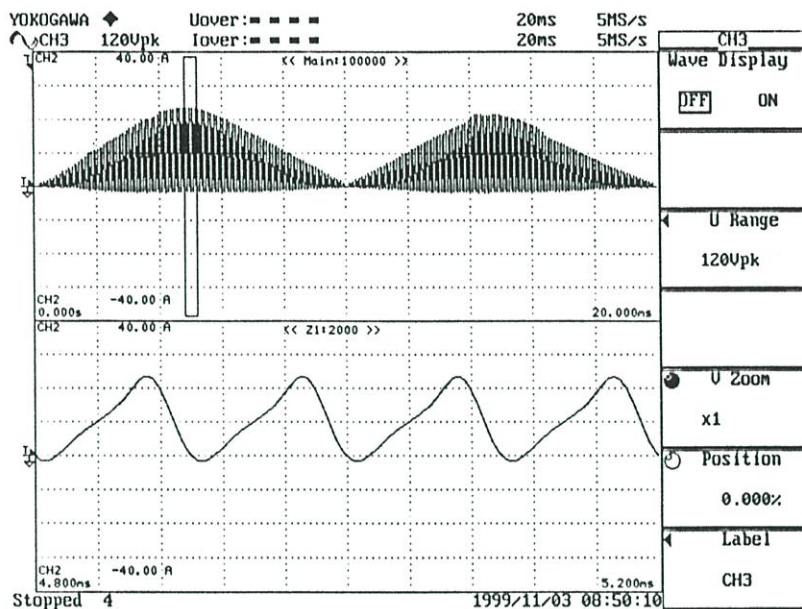
รูปที่ 6.9 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิทช์ S_2 (IGBT) ทางด้านจ่ายไฟ (บน) และรูปขยาย (75 V/div 2 ms/div)



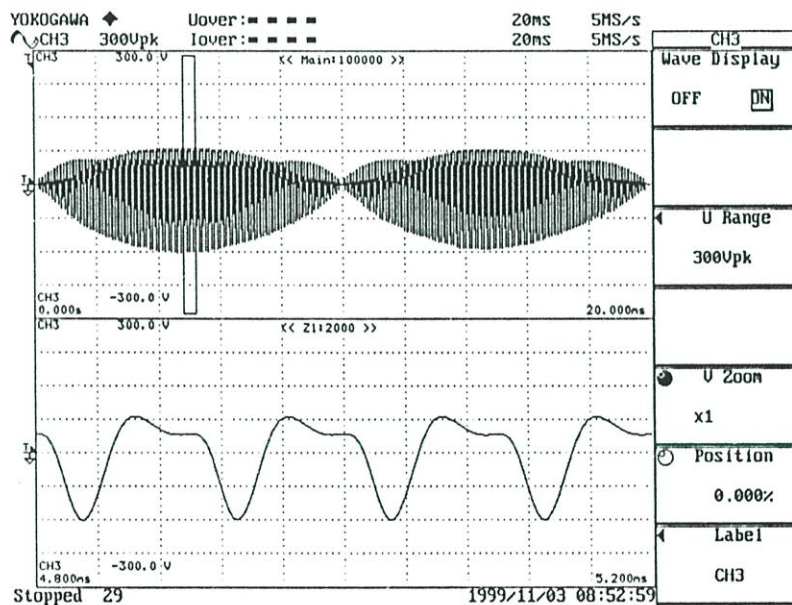
รูปที่ 6.10 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตซ์ D_1 (Diode) ทางด้านรับไฟ (บน) และรูปขยาย (30 V/div 2 ms/div)



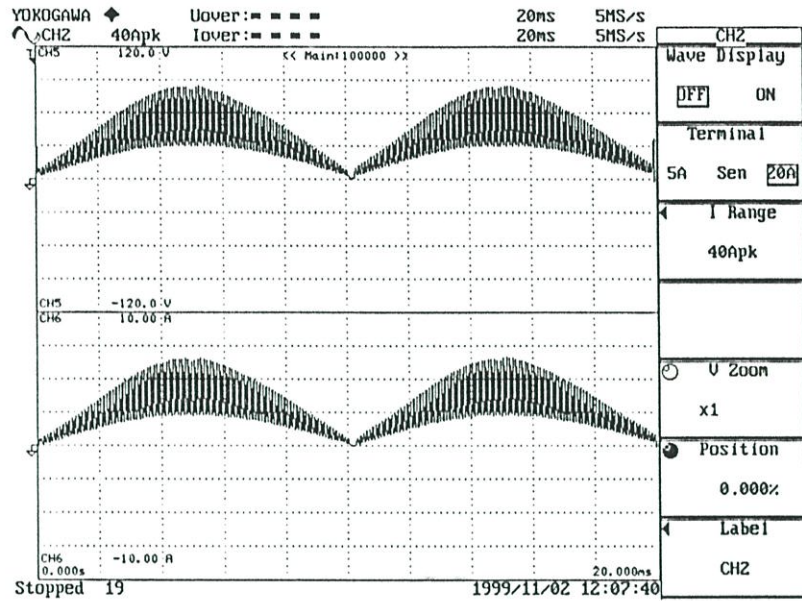
รูปที่ 6.11 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตซ์ D_2 (Diode) ทางด้านจ่ายไฟ (บน) และรูปขยาย (30 V/div 2 ms/div)



รูปที่ 6.12 รูปคลื่นกระแสไหลเข้าตัวเหนี่ยวนำ L , ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ (บน) และรูปขยาย (10 A/div 2 ms/div)



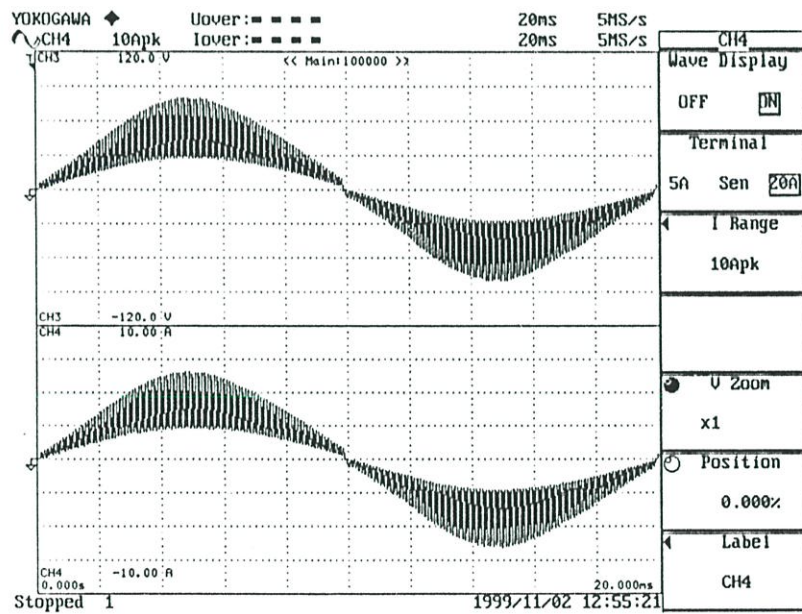
รูปที่ 6.13 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L , ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ (บน) และรูปขยาย (75 V/div 2 ms/div)



รูปที่ 6.14 รูปคลื่นแรงดัน V_{dc} และกระแส I_{dc} ที่ออกจากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสท์

(บน) รูปคลื่นแรงดัน V_{dc} (30 V/div 2 ms/div)

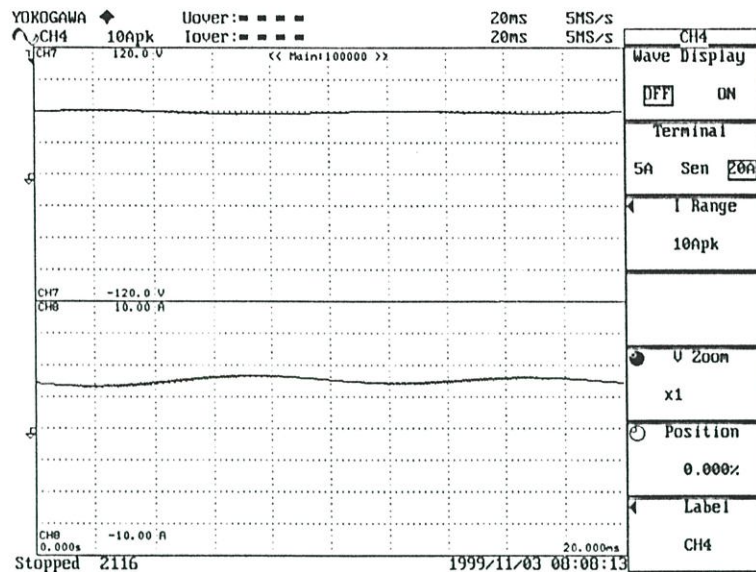
(ล่าง) รูปคลื่นกระแส I_{dc} (2.5 A/div 2 ms/div)



รูปที่ 6.15 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o ที่ออกจากอินเวอร์เตอร์

(บน) รูปคลื่นแรงดัน V_o (30 V/div 2 ms/div)

(ล่าง) รูปคลื่นกระแส I_o (2.5 A/div 2 ms/div)



รูปที่ 6.16 รูปคลื่นแรงดัน V_s และกระแส I_s ที่ไหลออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

(บน) รูปคลื่นแรงดัน V_s ที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (30 V/div 2 ms/div)

(ล่าง) รูปคลื่นกระแส I_s ที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (2.5 A/div 2 ms/div)

จากรูปที่ 6.7 ถึง รูปที่ 6.15 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันตกคร่อมและกระแสที่จุดต่างๆ รวมถึงกระแสและแรงดันจ่ายออกด้วยจ่ายออกด้วย ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองในบทที่ 3 จะพบว่าผลการทดลองดังกล่าวมีลักษณะที่คล้ายกันมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลจากการออกแบบและการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตรงกันกับผลการปฏิบัติจริง แต่อย่างไรก็ตามในระบบจริงก็ยังมีตัวแปรบางตัวที่ไม่สามารถควบคุมได้ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในการทดลอง

การทดสอบในส่วนที่สองจะทำการทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง โดยไม่มีส่วนหาจุดให้กำลังงานสูงสุด และไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งเช่นเดียวกันกับการทดสอบให้ส่วนแรก ซึ่งผลการทดสอบนี้ให้ผลเช่นเดียวกันกับการทดสอบในส่วนแรกแตกต่างเฉพาะลักษณะของค่ากระแสและแรงดันที่จ่ายเข้ามาในระบบเท่านั้น เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีคุณลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นลักษณะของกระแสที่จ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 6.16 จะมีค่ารีปเปิลน้อยกว่าการทดสอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ส่วนแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็มีค่ารีปเปิลน้อยเช่นเดียวกันเนื่องจากมีตัวเก็บประจุทำหน้าที่เป็นตัวกรองแรงดันจ่ายเข้า

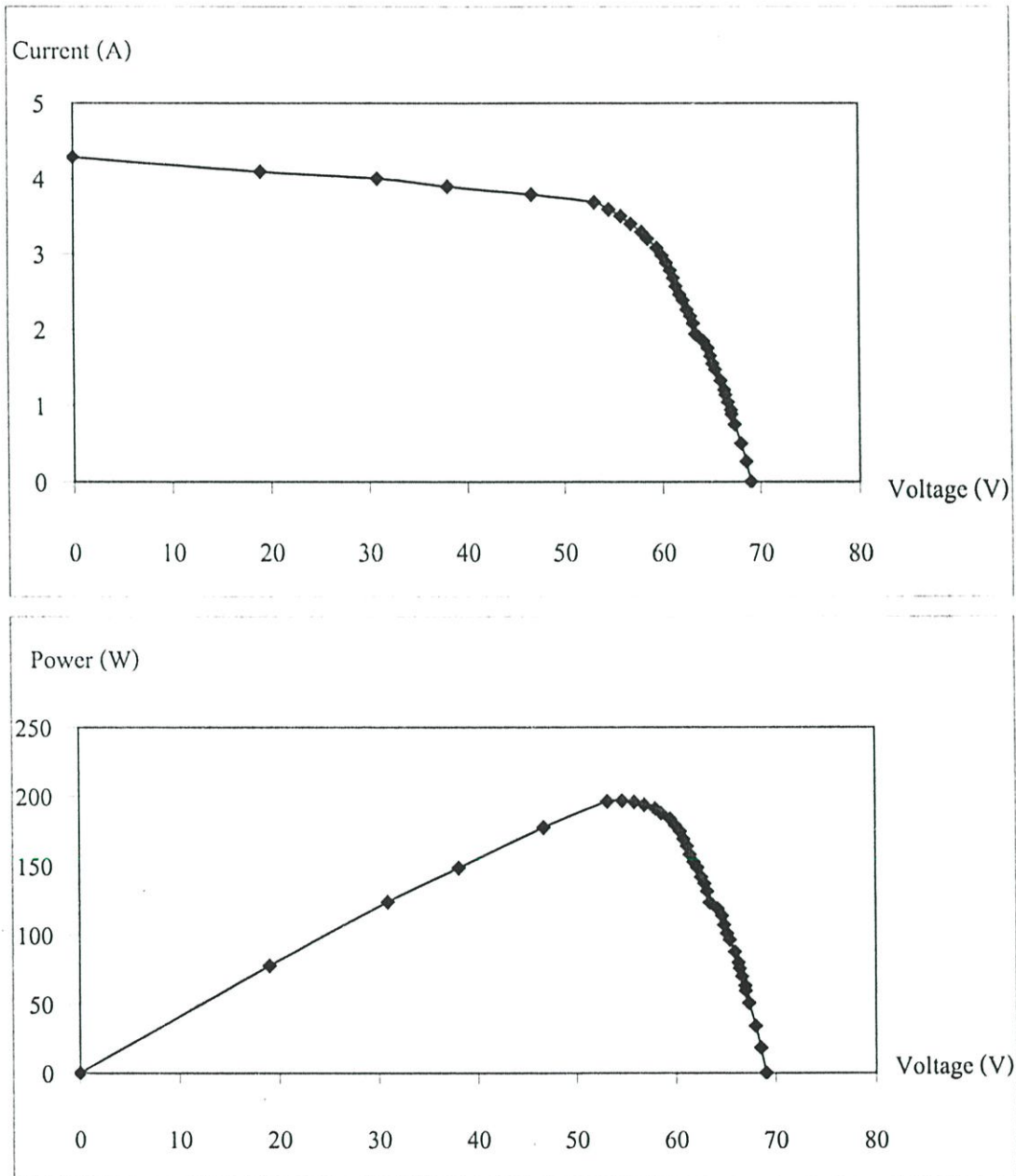
6.3 การหาค่ากำลังงานสูงสุด

ในการทดสอบการหาค่ากำลังงานสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องทราบค่ากำลังงานสูงสุดที่สามารถผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อนำค่าดังกล่าวไปเป็นค่าอ้างอิงในการทดสอบการทำงานของระบบจริงต่อไป

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าภาระต่างๆ
โดยทำการทดสอบที่ความเข้มของแสง 800 W/m^2

No.	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	No.	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)
1	69.04	0.00	0.00	20	62.20	2.39	148.35
2	68.53	0.26	18.09	21	61.84	2.47	152.50
3	68.03	0.50	34.15	22	61.47	2.57	158.04
4	67.38	0.75	50.80	23	61.18	2.68	163.90
5	67.05	0.89	59.34	24	60.85	2.78	169.22
6	66.99	0.94	63.24	25	60.48	2.89	174.48
7	66.70	1.05	69.83	26	60.01	2.98	178.89
8	66.44	1.14	75.68	27	59.49	3.08	183.41
9	66.32	1.21	79.98	28	58.57	3.21	187.72
10	65.97	1.33	87.74	29	57.96	3.30	190.98
11	65.44	1.47	96.33	30	56.86	3.41	193.72
12	65.17	1.55	101.21	31	55.85	3.51	195.81
13	64.90	1.65	107.28	32	54.64	3.60	196.54
14	64.68	1.76	113.64	33	53.15	3.69	196.18
15	64.23	1.85	118.83	34	46.74	3.79	177.33
16	63.42	1.94	123.29	35	38.05	3.90	148.40
17	63.19	2.08	131.37	36	30.89	4.01	123.71
18	62.93	2.18	137.00	37	19.02	4.09	77.85
19	62.60	2.27	141.85	38	0.00	4.29	0.00

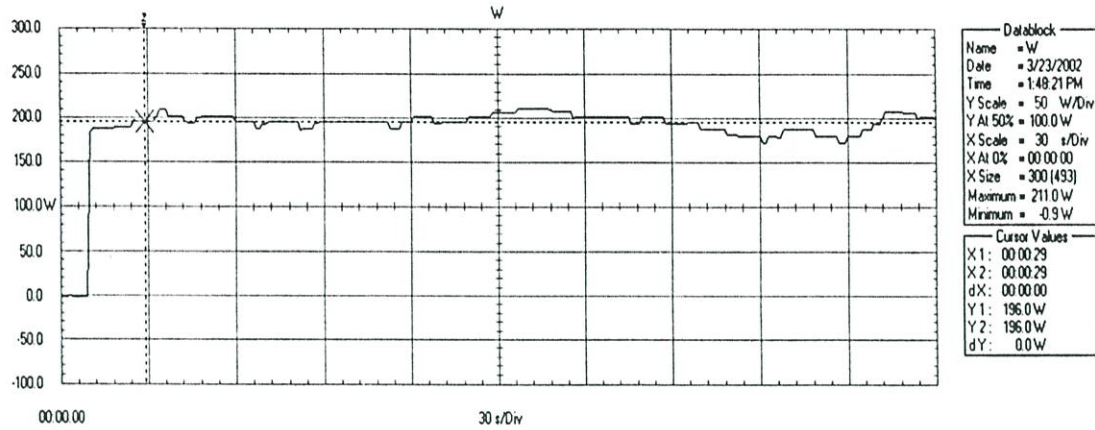
ในตารางที่ 6.1 แสดงผลทดสอบคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงประมาณ 800 W/m^2 โดยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกระแสให้กับภาระที่สามารถควบคุมได้ จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชุดนี้มีค่าอยู่ประมาณ 200 วัตต์ ที่กระแสและแรงดันประมาณ 3.65 แอมป์ กับ 54 โวลต์ ตามลำดับ โดยในรูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ที่ได้จากตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.17 กราฟคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบ (ประมาณ 800 W/m^2)

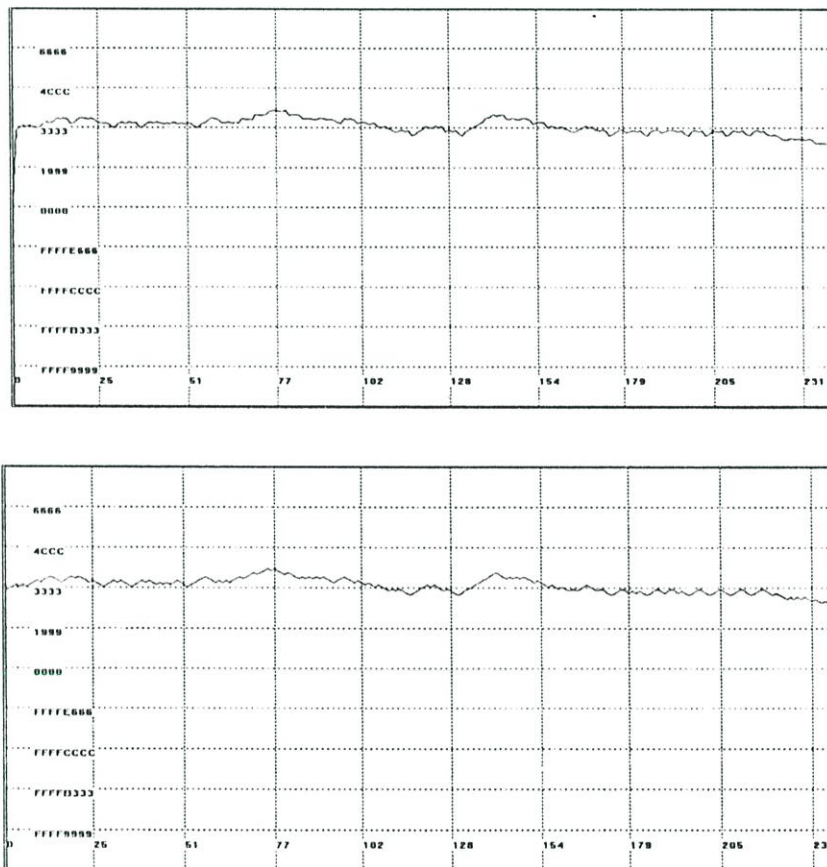
(บน) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจ่ายออกกับแรงดัน

(ล่าง) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานจ่ายออกกับแรงดัน



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงการหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

วัดด้วย Fluke 43 Power quality analyzer



รูปที่ 6.19 กราฟค่ากระแสอ้างอิงและกระแสจริงที่อ่านได้โดยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ในขณะทดสอบการทำงานของส่วนหาจุดให้กำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

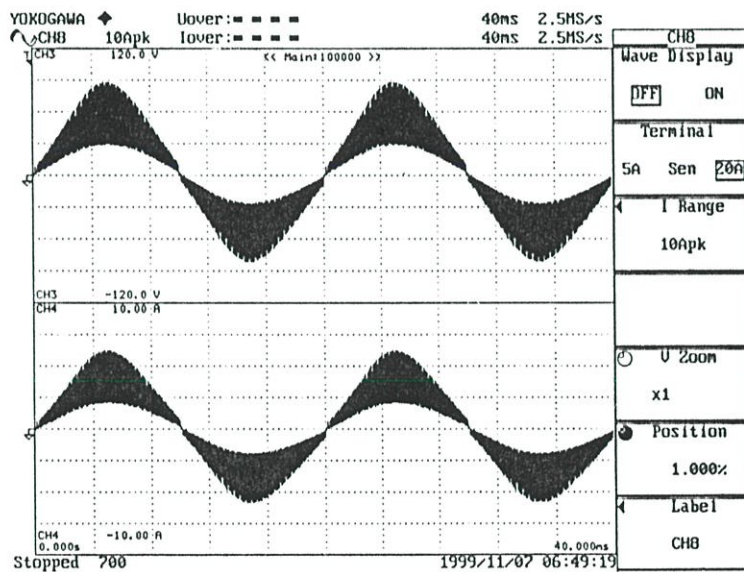
(บน) ค่ากระแสจริงที่วัดได้ (ล่าง) ค่ากระแสอ้างอิงที่กำหนดโดยส่วนหาค่ากำลังสูงสุด

ผลการทดสอบการทำงานของการทำงานให้อำนาจสูงสุดแสดงดังในรูป 6.18 และ 6.19 โดยทำการทดสอบที่ความเข้มของแสงประมาณ 800 W/m^2 ตลอดการทดลอง โดยผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถควบคุมให้แสงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้อำนาจสูงสุดอยู่ตลอดเวลา ในรูปที่ 6.19 ยังแสดงให้เห็นความสามารถในการควบคุมกระแสที่จ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (รูปที่ 6.19 บน) ให้มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่ากระแสอ้างอิง (รูปที่ 6.19 ล่าง) ด้วยระบบควบคุมแบบพีไอ จากการที่กระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่ากระแสอ้างอิง และไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่บ่อยครั้งแสดงว่าค่ากำลังงานที่จ่ายออกก็จะมีค่าที่คงที่ด้วยเช่นกัน

6.4 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

ในการทดสอบการทำงานของระบบทั้งหมดจะทำการทดสอบทั้งในขณะที่ไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งและเชื่อมต่อสายส่งโดยจะทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของแรงดัน กระแสรวมถึงการวัดและคำนวณค่าลดทอนฮาร์โมนิกส์รวม ซึ่งจะคำนวณเปรียบเทียบค่าระหว่างการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

6.4.1 ผลการทดสอบการทำงานขณะไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งของการไฟฟ้า

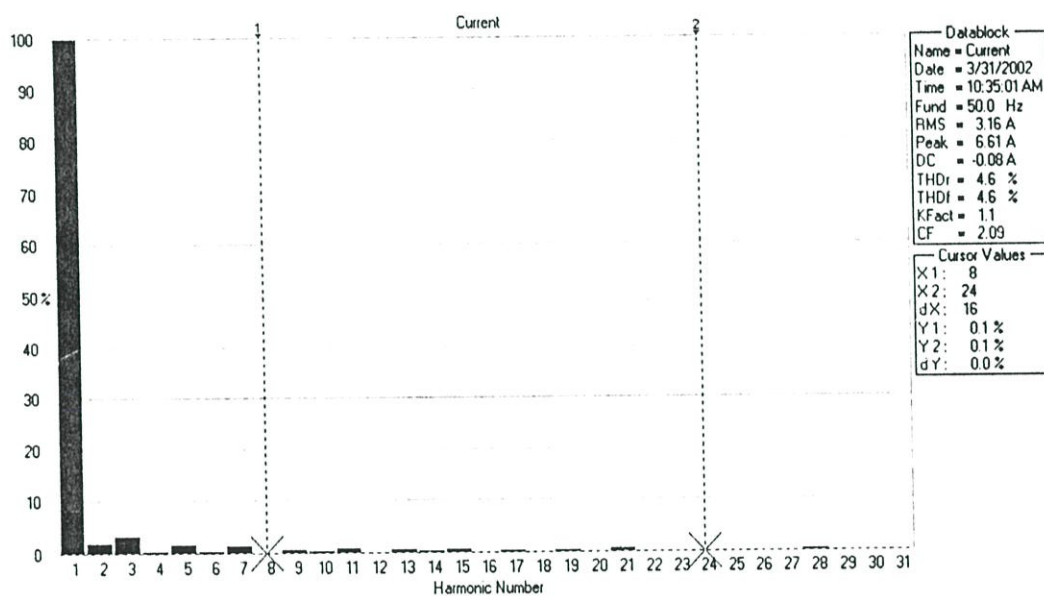
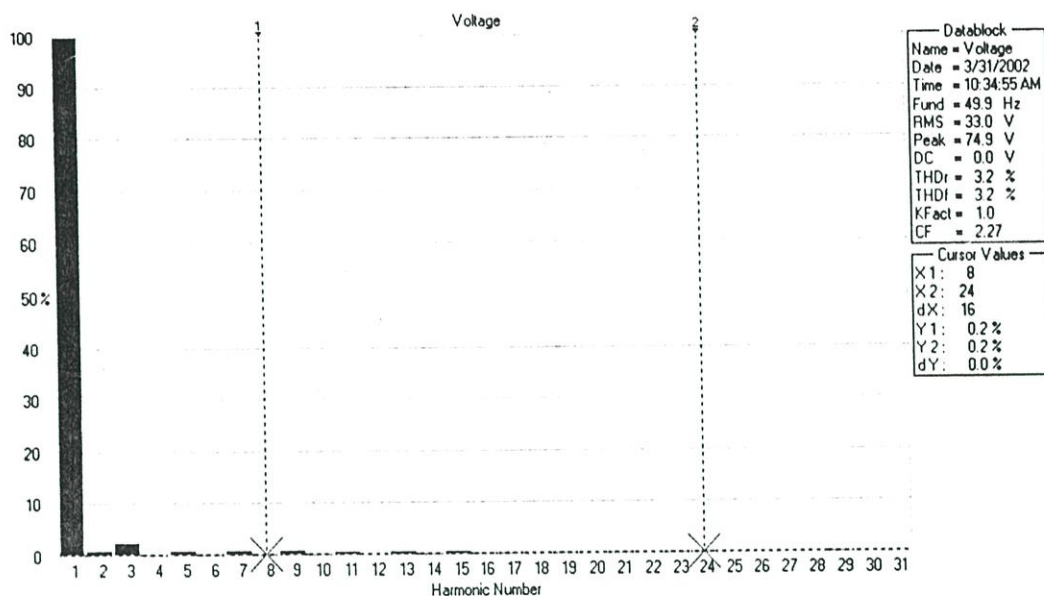


รูปที่ 6.20 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์

เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานอย่างเดียว

(บน) รูปคลื่นแรงดัน V_o (30 V/div 4 ms/div)

(ล่าง) รูปคลื่นกระแส I_o (2.5 A/div 4 ms/div)

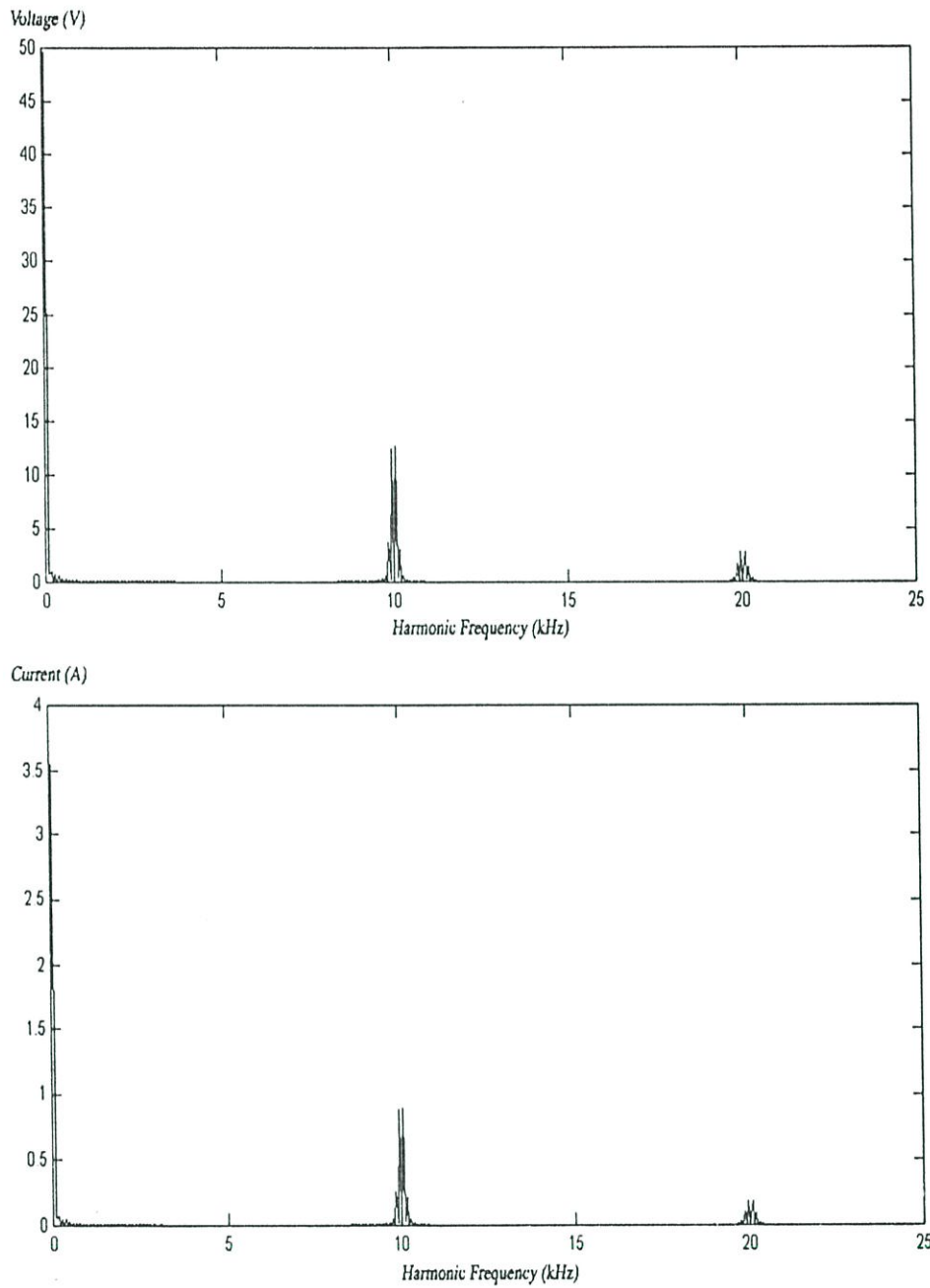


รูปที่ 6.21 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o ำยออกจากอินเวอร์เตอร์

ที่วัดได้จาก Fluke 43 เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานอย่างเดียว

(บน) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o เท่ากับ 3.2%

(ล่าง) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของกระแส I_o เท่ากับ 4.6%

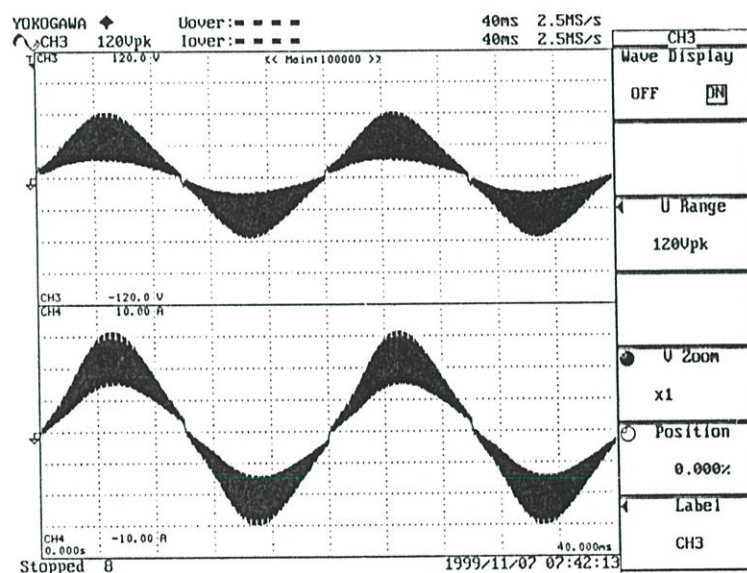


รูปที่ 6.22 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o ถ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์
 ที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม MATLAB เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานอย่างเดียว
 (บน) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o เท่ากับ 3.71%
 (ล่าง) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของกระแส I_o เท่ากับ 3.76%

การทดสอบการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์ขณะไม่เชื่อมต่อสายส่ง เพื่อตรวจสอบว่าระบบสามารถควบคุมให้ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ได้หรือไม่ ซึ่งในการทดสอบนี้แบ่งเป็นการทดสอบที่ใช้ค่ากระแสแบบความต้านทานอย่างเดียว กับ การทดสอบเมื่อภาระเป็นความต้านทานกับมอเตอร์ โดยในรูปที่ 6.20 ถึง 6.22 แสดงผลการทดสอบเมื่อภาระเป็นค่าความต้านทานอย่างเดียว จากการวิเคราะห์รูปคลื่นพบว่าเกิดค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่อันดับต่ำซึ่งทำให้ค่า THD ทั้งกระแส I_o และแรงดัน V_o มีค่าสูงแต่ยังไม่เกิน 5%

ในรูปที่ 6.23 ถึง รูปที่ 6.25 เป็นการทดสอบเมื่อมีภาระเป็นความต้านทานกับมอเตอร์ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงว่า ระบบยังคงควบคุมค่าฮาร์โมนิกส์ของทั้งกระแส I_o และแรงดัน V_o ให้น้อยกว่า 5% ถึงแม้ว่าค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่าในขณะทำการทดสอบเมื่อภาระเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

สิ่งที่พบอีกประการหนึ่งในการวิเคราะห์สเปกตรัมของรูปคลื่นด้วยโปรแกรม MATLAB คือ ในรูปคลื่นจะมีส่วนประกอบของค่าที่ความถี่รอบๆ ความถี่สวิทซ์ซึ่งเป็นผลจากการรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์

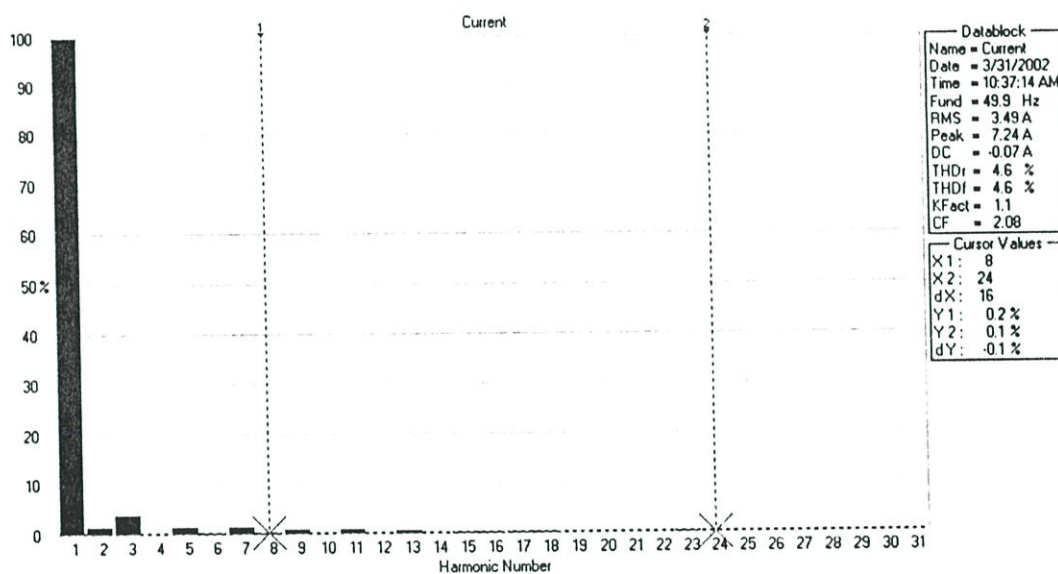
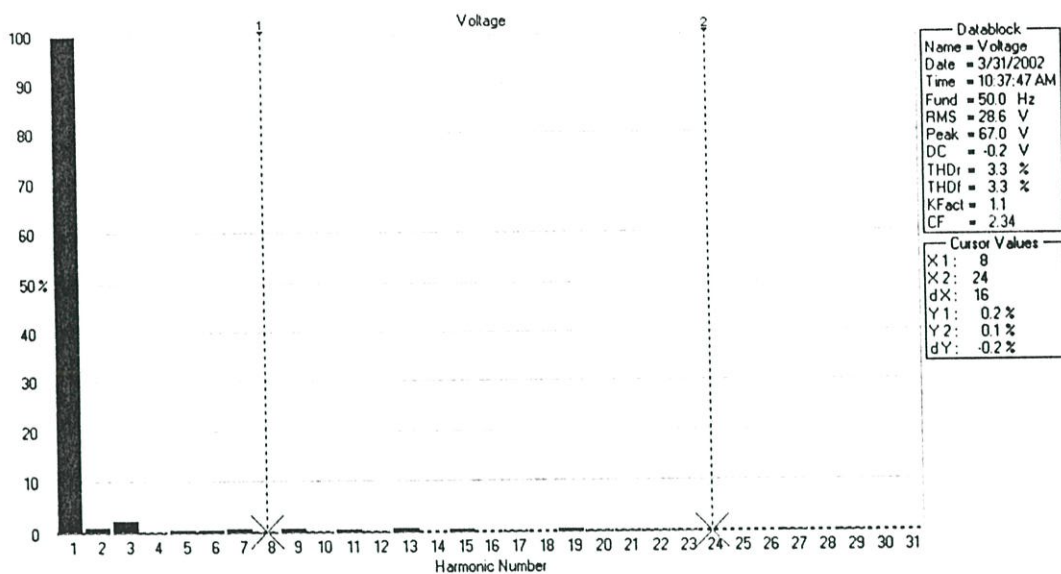


รูปที่ 6.23 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์

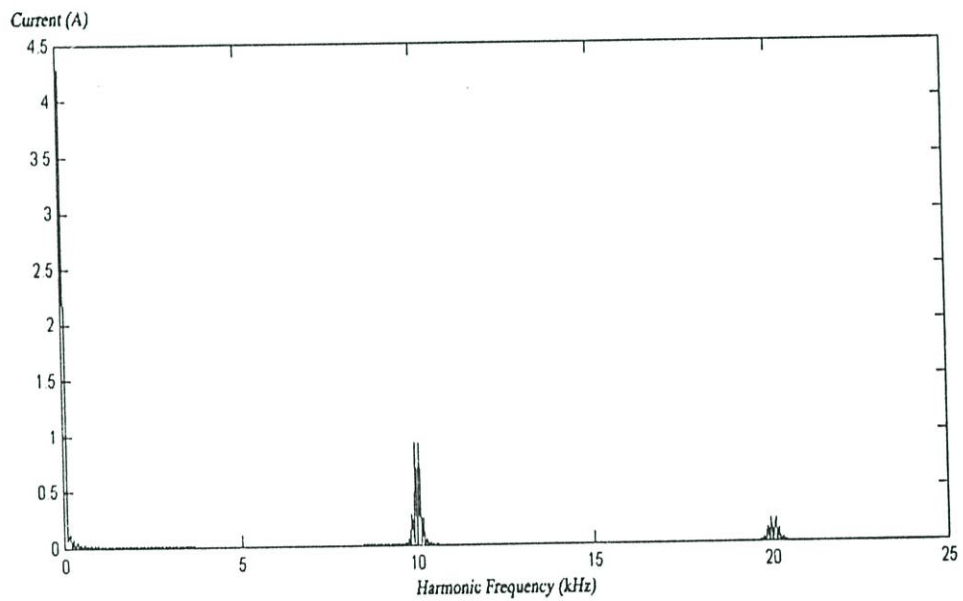
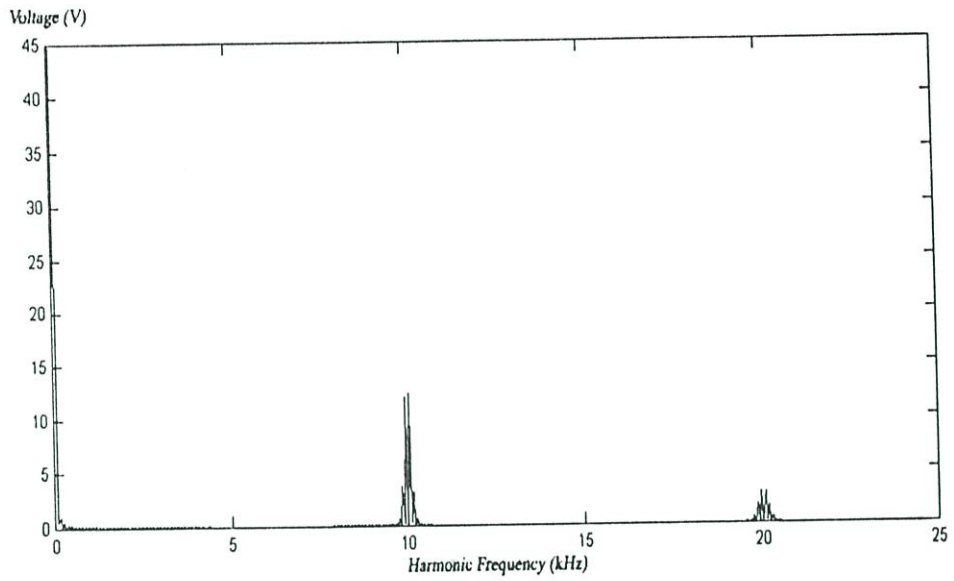
เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานกับมอเตอร์

(บน) รูปคลื่นแรงดัน V_o (30 V/div 4 ms/div)

(ล่าง) รูปคลื่นกระแส I_o (2.5 A/div 4 ms/div)

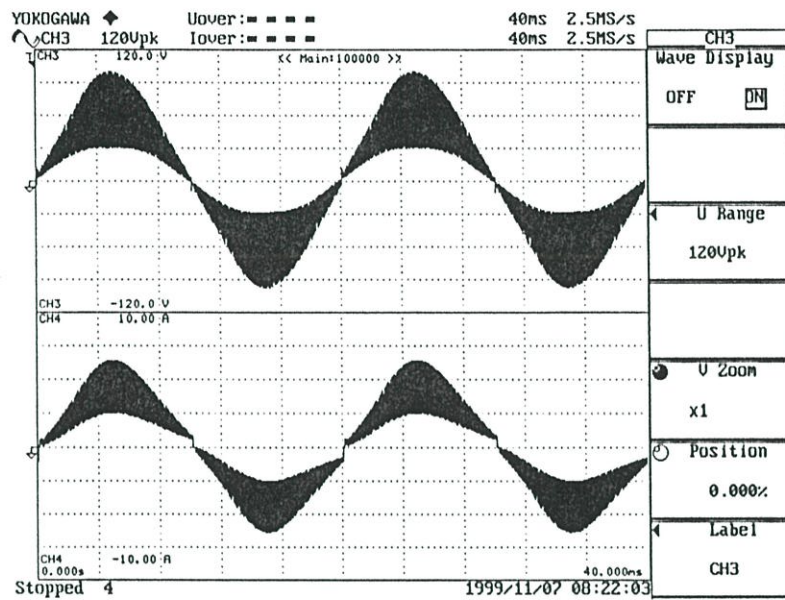


รูปที่ 6.24 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o จำขออกจากอินเวอร์เตอร์
 ที่วัดได้จาก Fluke 43 เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานกับมอเตอร์
 (บน) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o เท่ากับ 3.3%
 (ล่าง) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของกระแส I_o เท่ากับ 4.6%



รูปที่ 6.25 สเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดัน V_o และกระแส I_o ถ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์
 ที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม MATLAB เมื่อค่าภาระเป็นความต้านทานกับมอเตอร์
 (บน) สเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดัน V_o เท่ากับ 3.65%
 (ล่าง) สเปกตรัมฮาร์โมนิกของกระแส I_o เท่ากับ 4.54%

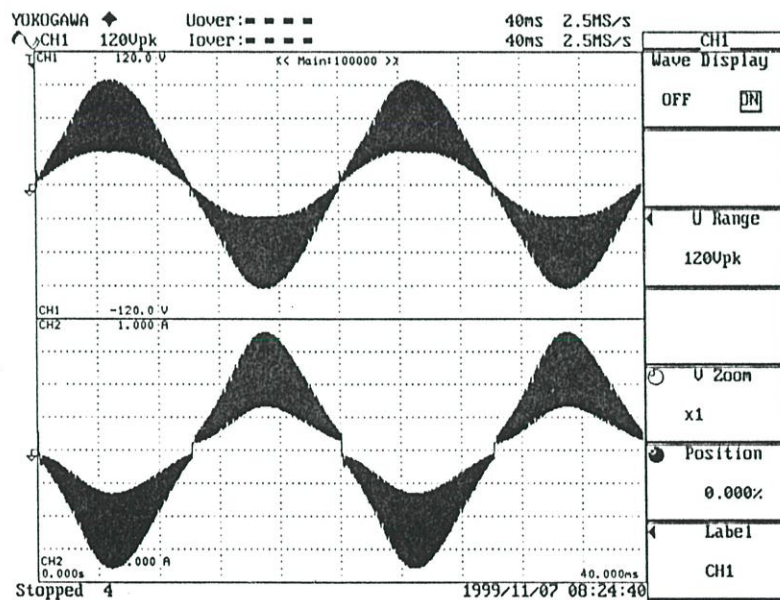
6.4.2 ผลการทดสอบการทำงานขณะเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของการไฟฟ้า



รูปที่ 6.26 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o ข่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกับสายส่ง

(บน) รูปคลื่นแรงดัน V_o (30 V/div 4 ms/div)

(ล่าง) รูปคลื่นกระแส I_o (2.5 A/div 4 ms/div)

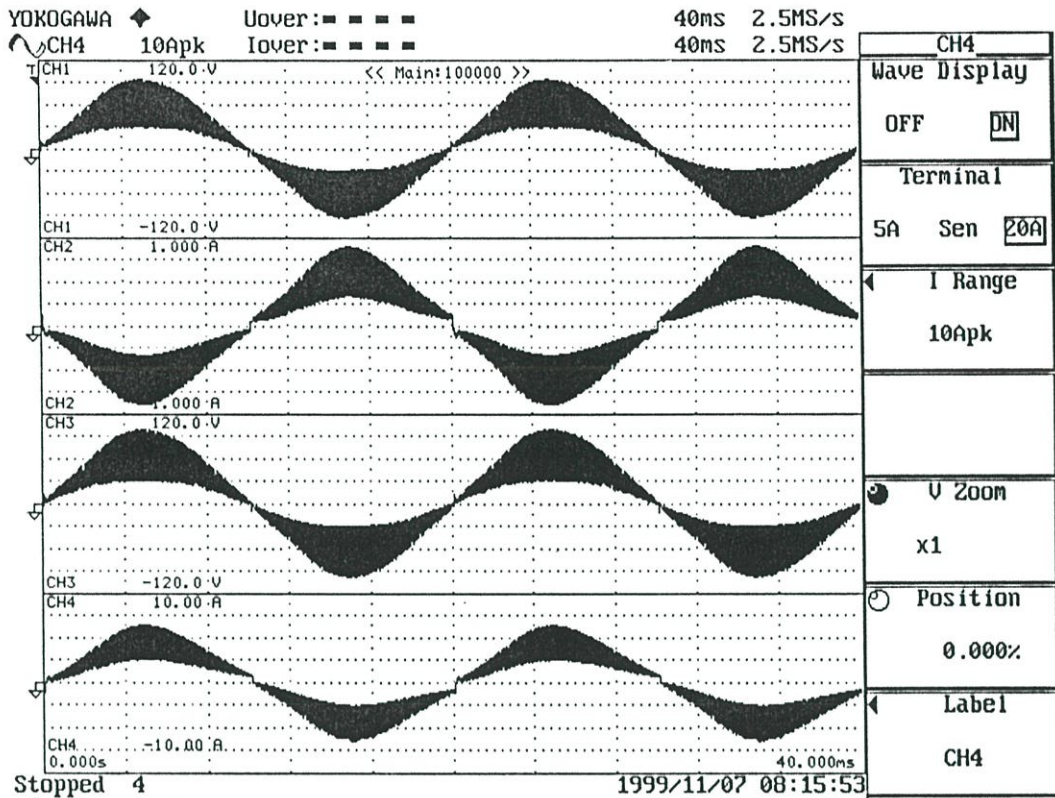


รูปที่ 6.27 รูปคลื่นแรงดัน V_o และกระแส I_o ขณะเชื่อมต่อกับสายส่ง

(บน) รูปคลื่นแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ V_o (30 V/div 4 ms/div)

(ล่าง) รูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกจากหม้อแปลง (ที่ Utility) ทางด้านแรงดันสูง I_G

(0.25 A/div 4 ms/div)



รูปที่ 6.28 รูปคลื่นแรงดันและกระแสจ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกับสายส่ง

เมื่อจ่ายกำลังงานให้กับระบบของการไฟฟ้า

(บนสุด) รูปคลื่นแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ V_o ก่อนจ่ายให้กับภาระ

(30 V/div 4 ms/div)

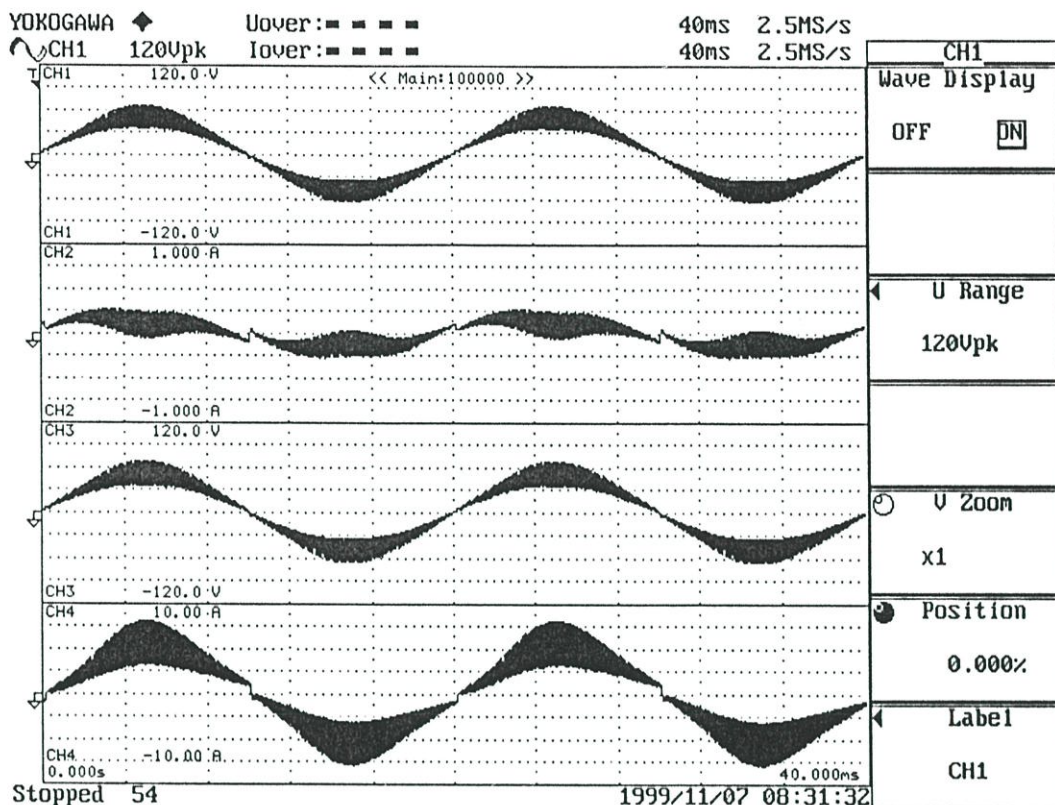
(บน) รูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกจากหม้อแปลง (ที่ Utility) ทางด้านแรงดันสูง I_G

(0.25 A/div 4 ms/div)

(ล่าง) รูปคลื่นแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ก่อนจ่ายเข้าหม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ V_r

(30 V/div 4 ms/div)

(ล่างสุด) รูปคลื่นกระแส I_o (2.5 A/div 4 ms/div)



รูปที่ 6.29 รูปคลื่นแรงดันและกระแสจ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกับสายส่ง

โดยยังไม่จ่ายกำลังงานให้กับระบบของการไฟฟ้า (มีภาระต่ออยู่ทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง)

(บนสุด) รูปคลื่นแรงดันที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ V_o ก่อนจ่ายให้กับภาระ

(30 V/div 4 ms/div)

(บน) รูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกจากหม้อแปลง (ที่ Utility) ทางด้านแรงดันสูง I_o

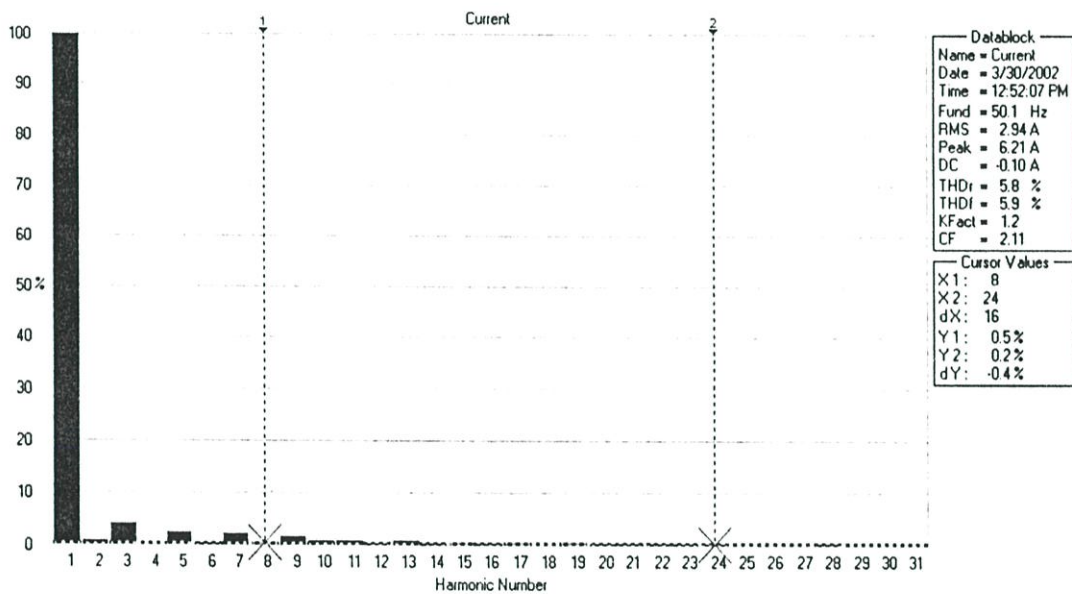
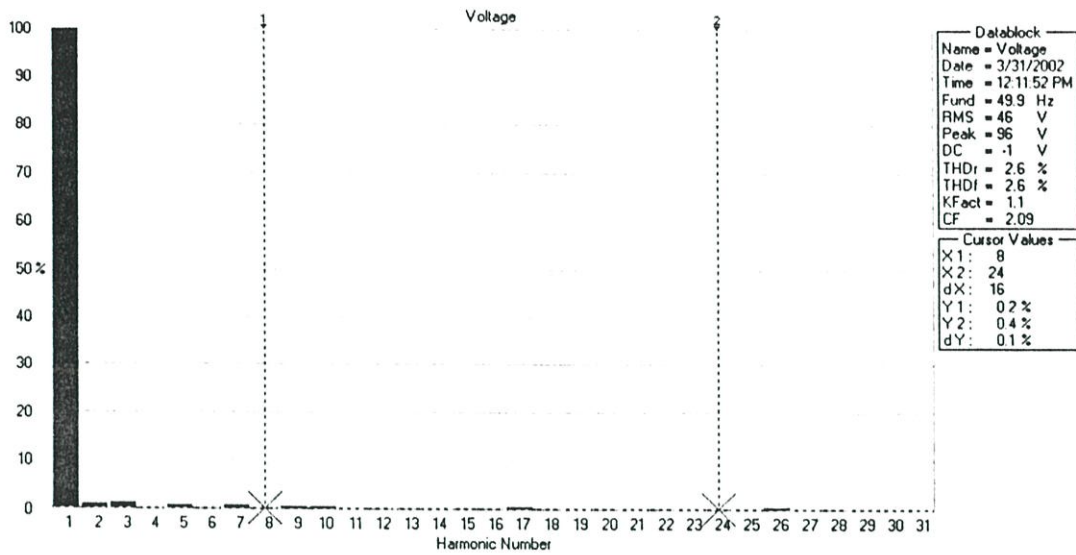
(0.25 A/div 4 ms/div)

(ล่าง) รูปคลื่นแรงดันที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ก่อนจ่ายเข้าหม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ V_r

(30 V/div 4 ms/div)

(ล่างสุด) รูปคลื่นกระแส I_o (2.5 A/div 4 ms/div)

จากรูปที่ 6.26 ถึงรูปที่ 6.29 จะแสดงผลเปรียบเทียบเมื่อสภาวะที่ไม่มีกระแสไหลออกจากอินเวอร์เตอร์เข้าไปในระบบสายส่งกับสภาวะที่มีกระแสไหลเข้าไปในระบบสายส่ง ซึ่งเห็นได้ชัดว่า เมื่อมีกระแสไหลออกจากอินเวอร์เตอร์เข้าไปในระบบสายส่งกระแสจ่ายออกจากหม้อแปลง (ที่ Utility) จะกลับเฟสจากกระแสเดิม 180 องศาทันทีซึ่งแสดงว่าระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายส่งได้จ่ายกำลังงานกลับเข้าไปในสายส่ง ส่วนค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับขณะไม่เชื่อมต่อกับสายส่ง

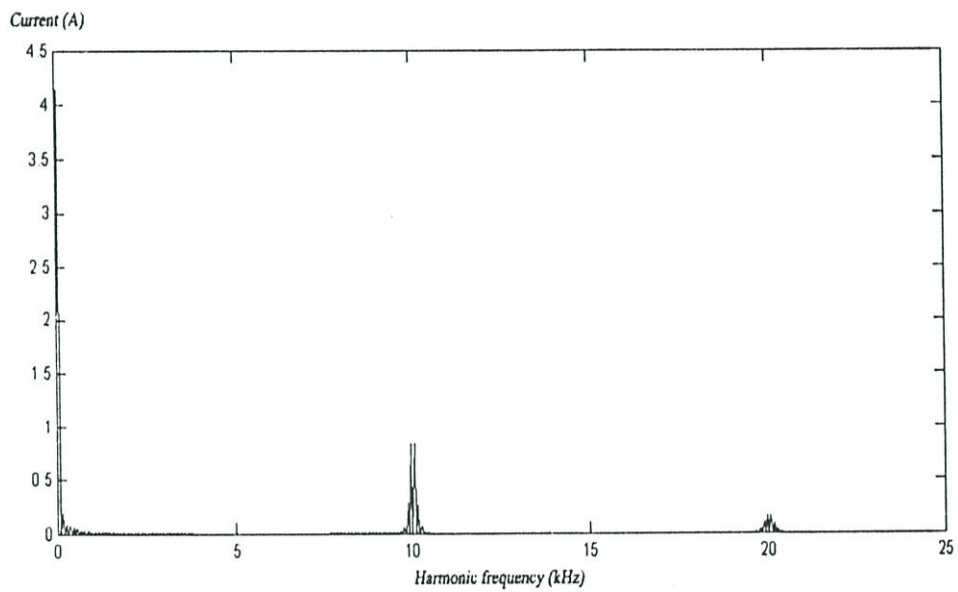
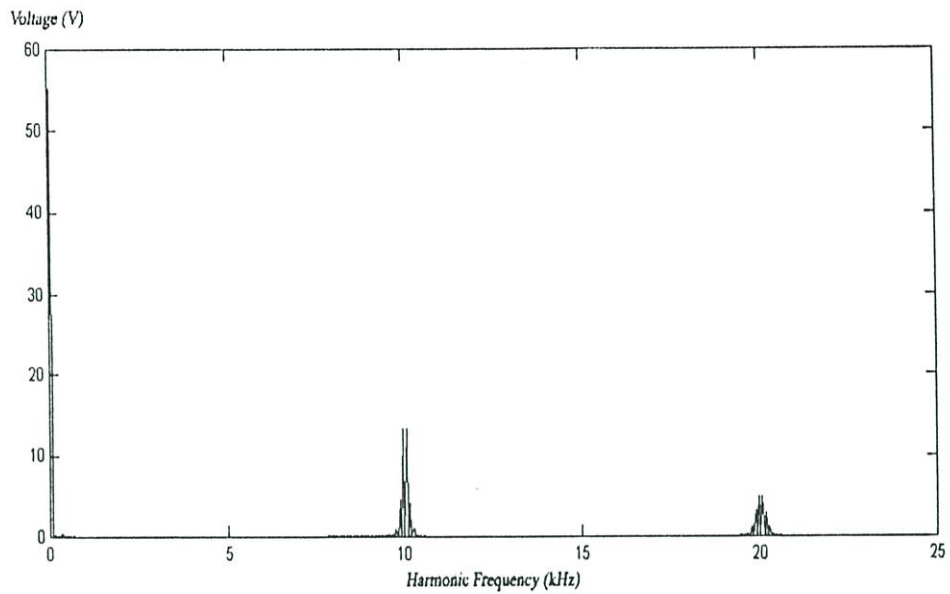


รูปที่ 6.30 สเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดัน V_o และกระแส I_o จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ใน

รูปที่ 6.26 วัดด้วย Fluke 43

(บน) สเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดัน V_o เท่ากับ 2.6%

(ล่าง) สเปกตรัมฮาร์โมนิกของกระแส I_o เท่ากับ 5.8 %



รูปที่ 6.31 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o และกระแส I_o จำขออกจากอินเวอร์เตอร์ใน

รูปที่ 6.26 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB

(บน) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_o เท่ากับ 1.29%

(ล่าง) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของกระแส I_o เท่ากับ 6.41 %

6.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ (ไม่รวมประสิทธิภาพของหม้อแปลง)

การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ ในส่วนแรกจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรบัค – บูสต์ที่ใช้ในระบบ ส่วนที่ 2 จะวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ ส่วนสุดท้ายทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของระบบ (ไม่รวมประสิทธิภาพของหม้อแปลง) โดยในการทดสอบทั้ง 3 ส่วนนี้จะทำการทดสอบพร้อมกันทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 6.2 และแสดงในรูปที่ 6.32

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพที่ค่ากำลังงานไฟฟ้าจ่ายเข้าต่างๆ

		No.	1	2	3	4	5	6
Photovoltaic Array	Voltage (V)	48.2	54.2	51.2	51.6	59.3	62.3	
	Current (A)	2.9	3.1	6.9	4.6	5.1	5.8	
	Power (W)	111.9	135.6	159.5	190.8	243.4	292.1	
DC - DC Converter Output	Voltage (V)	19.5	22.7	25.6	29.1	35.0	39.9	
	Current (A)	2.7	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	
	Power (W)	52.3	65.3	78.5	95.5	127.9	156.6	
% Converter efficiency		46.74	48.16	49.22	50.05	52.55	53.61	
Inverter Output	Voltage (V)	16.4	19.7	22.8	26.6	33.2	38.6	
	Current (A)	2.7	2.9	3.1	3.2	3.5	3.8	
	Power (W)	44.6	57.1	69.8	86.2	117.7	145.6	
	% THD current	2.7	3.1	3.0	3.6	4.0	4.0	
% Inverter efficiency		85.28	87.44	88.92	90.26	92.03	92.98	
% System efficiency*		39.86	42.11	43.76	45.18	48.36	49.85	

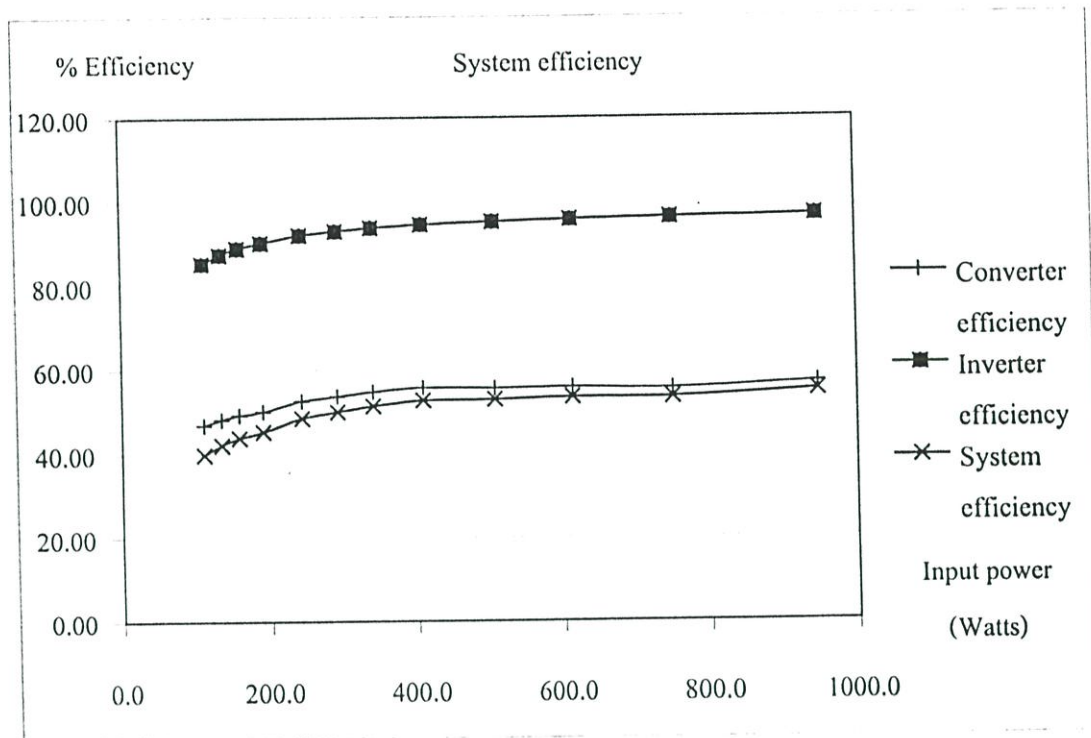
ตารางที่ 6.2 (ต่อ) ผลการทดสอบประสิทธิภาพที่ค่ากำลังงานไฟฟ้าจ่ายเข้าต่างๆ

		No.	7	8	9	10	11	12
Photovoltaic Array	Voltage (V)		67.6	72.7	72.5	80.3	56.4	87.1
	Current (A)		6.2	7.0	8.7	9.5	10.8	13.5
	Power (W)		341.0	409.9	506.6	613.7	751.3	946.5
DC - DC Converter Output	Voltage (V)		44.3	50.1	56.6	63.4	71.2	85.6
	Current (A)		3.7	3.9	4.2	4.4	4.6	4.7
	Power (W)		186.4	228.0	281.0	341.8	416.4	538.0
% Converter efficiency			54.66	55.62	55.47	55.69	55.42	56.84
Inverter Output	Voltage (V)		43.7	50.5	58.4	66.9	76.6	95.4
	Current (A)		4.0	4.6	4.6	4.9	5.2	5.5
	Power (W)		174.6	215.4	267.3	326.9	400.1	520.0
	% THD current		4.3	5.0	5.4	5.6	6.0	6.2
% Inverter efficiency			93.67	94.47	95.12	95.64	96.09	96.65
% System efficiency*			51.20	52.55	52.76	53.27	53.25	54.94

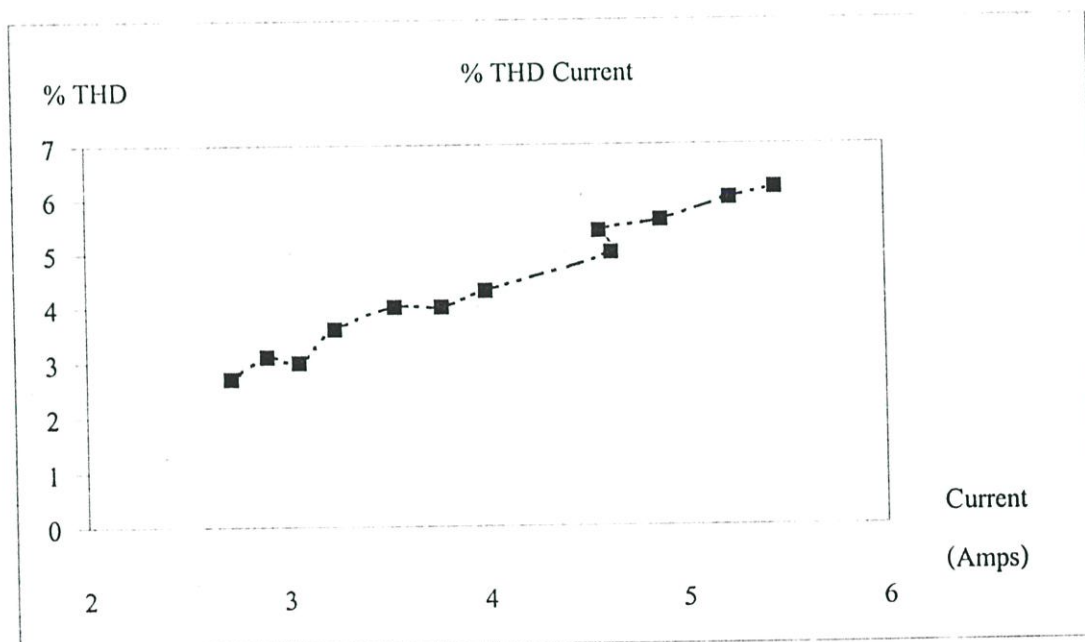
*ไม่รวมประสิทธิภาพของหม้อแปลง

จากผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.24 พบว่าประสิทธิภาพของวงจรบัค-บูสต์มีค่าที่ค่อนข้างต่ำซึ่งมีค่าอยู่ประมาณไม่เกิน 60% และกำลังมีค่าสูงขึ้นซึ่งทดสอบที่กำลังงานจ่ายเข้าไม่เกิน 1 kW สาเหตุหนึ่งมาจากไอจีบีทีทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพรวมถึงทำงานในขณะที่ค่าแรงดันตกคร่อมไม่มีค่าเป็นศูนย์หรือฮาร์ดสวิตชิง ซึ่งจากตารางที่ 6.2 พบว่าค่าแรงดันเฉลี่ยในการทดสอบครั้งสุดท้ายมีค่าไม่เกิน 100 โวลต์ ส่วนกระแสมีค่าไม่เกิน 15 แอมป์ แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบที่กำลังงานสูงกว่าจุดดังกล่าว เป็นสิ่งที่ไม่สามารถทำได้เนื่องจากค่าแรงดันและกระแสกระชากที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากจนถึงระดับที่จะทำให้อุปกรณ์ภายในระบบเสียหายได้ อีกประการหนึ่งระบบได้ถูกออกแบบมาให้ทำงานในช่วงไม่เกิน 300 วัตต์

สิ่งที่สังเกตได้อีกประการหนึ่งคือ คอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์นี้จะทำงานแบบบัคเป็นส่วนใหญ่ คือลดระดับแรงดันจากแหล่งจ่ายลงหรือค่าไม่เกินแหล่งจ่ายเท่านั้น ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของดัชนีการรวมสัญญาณสูงสุดพบว่าค่าดังกล่าวจะมีค่าไม่เกินประมาณ 0.6 เท่านั้น เท่ากับว่าระบบไม่สามารถบูสต์หรือเพิ่มแรงดันขึ้นได้มากเท่าที่ควร ซึ่งเป็นเพราะการควบคุมค่ากำลังงานสูงสุดกล่าวคือที่ดัชนีการรวมสัญญาณดังกล่าวเป็นจุดที่ให้แอมพลิจูดของสัญญาณให้กำลังงานสูงสุด



รูปที่ 6.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับกำลังงานจ่ายเข้า



รูปที่ 6.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสฮาร์โมนิกสี่กับค่ากระแสจ่ายออก

ในส่วนประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าสูงมากอยู่ที่ประมาณ 96% เนื่องจากอุปกรณ์สวิตช์ในอินเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมให้ทำงานในช่วงแรงดันตกรวมมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการสวิตช์จึงมีค่าน้อยมากจนถึงไม่มีเลย ส่วนค่าสูญเสียที่ขึ้นจึงมีเฉพาะค่าสูญเสียในขณะนำกระแสเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของระบบ (ไม่รวมประสิทธิภาพ

ของหม้อแปลง) จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์เท่านั้น การที่เพิ่มประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ได้จึงเท่ากับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ (ไม่รวมประสิทธิภาพของหม้อแปลง) ได้อย่างมากด้วย

รูปที่ 6.33 แสดงปริมาณกระแสจ่ายออกกับค่าลดทอนรวมของกระแสฮาร์โมนิกส์ซึ่งในขณะที่กระแสจ่ายออกมีค่าต่ำฮาร์โมนิกส์ก็จะมีค่าต่ำลงเช่นเดียวกัน เมื่อค่ากระแสจ่ายออกสูงขึ้นฮาร์โมนิกส์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทนำ

จากการวิเคราะห์และจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB และการจำลองวงจรจริงโดยใช้โปรแกรม OrCAD PSpice รวมถึงการทดสอบจริงจะให้ผลการทำงานที่คล้ายคลึงกัน และมีการทำงานที่เป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ซึ่งจากผลการดำเนินงานดังกล่าวสามารถสรุป และมีข้อเสนอแนะดังรายละเอียดต่อไปนี้

7.2 สรุปผลการทดลอง

1. ผลการจำลองการทำงานโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB และการใช้โปรแกรม OrCAD PSpice ให้ผลที่สอดคล้องกันกับผลการทดสอบจริง
2. เทคนิคการหาค่ากำลังงานสูงสุดโดยใช้ Hill climbing algorithm แบบควบคุมค่ากระแสอ้างอิงนี้ สามารถทำงานได้ดีที่ค่าความเข้มของแสงสูงๆ ถึงแม้ว่าตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะให้ความถูกต้องแม่นยำในการทำงานที่สูงมากก็ตาม แต่ความถูกต้องแม่นยำดังกล่าวก็ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาใช้ด้วย และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลจุดให้กำลังงานสูงสุดซึ่งค่อนข้างนาน ส่วนหนึ่งเป็นเพราะการหวนเวลาไว้ไม่ให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลวิเคราะห์จุดทำงานเพราะระบบยังไม่เข้าสู่เสถียรภาพ ซึ่งจะทำการวัดค่าเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าผิดพลาดไปด้วย
3. การควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูสต์ โดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณตามความกว้างของพัลส์แบบชายน้เต็มคลื่นมีข้อดีในเรื่องของการลดอุปกรณ์สับเบอร์ดที่ชุดอินเวอร์เตอร์ลง เนื่องจากอุปกรณ์สวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ทำงานขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ จึงไม่จำเป็นต้องใส่วงจรสับเบอร์ดที่อินเวอร์เตอร์ และยังทำให้ประสิทธิภาพของชุดอินเวอร์เตอร์สูงอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์นี้เป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะมีค่าสูญเสียเกิดขึ้นที่วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์สูงมาก
4. ผลของค่ากระแสฮาร์มอนิกสี่ในขณะทำการทดสอบแบบเชื่อมต่อสายส่งของระบบ มีค่าอยู่ที่ประมาณ 6% ซึ่งน่าจะเป็นเหตุมาจากการวัดค่ากระแสที่ไหลออกไม่ถูกต้องในขณะที่ตัวควบคุมแบบพีโอประมวลผลแล้วว่ารูปคลื่นมีลักษณะที่เป็นชายน้

5. การควบคุมการทำงานโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ที่มีการประมวลผลแบบชีพจร ช่วยลดความยุ่งยากของการพัฒนาระบบจริงลงได้มากทั้งทางด้านวงจรกำลังและการเปลี่ยนวิธีการควบคุมการทำงาน

7.3 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป

1. เนื่องจากระบบนี้เป็นมีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการควบคุมรูปคลื่นให้มีลักษณะคล้ายขายนที่ทุกๆ ค่าของกระแสจึงไม่สามารถทำได้ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบพีไอ จึงควรเปลี่ยนเทคนิคการควบคุมใหม่เพื่อให้สามารถควบคุมระบบได้ในย่านกระแสที่กว้างกว่านี้
2. ค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์สวิตช์ ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัก-บูทส์ยังคงมีค่าสูงอยู่เนื่องจากอุปกรณ์สวิตช์ทำงานแบบฮาร์ดสวิตชิง ดังนั้นควรจะมีการพัฒนาให้อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองทำงานในขณะที่แรงดัน หรือกระแสมีค่าเป็นศูนย์เพื่อลดค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอีกทางหนึ่ง
3. ควรพัฒนาเทคนิคในการหาค่ากำลังงานสูงสุด ให้สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแสงได้เร็วขึ้น วิธีการหนึ่งที่น่านำมาใช้คือ Incremental conductance ซึ่งน่าจะให้ผลที่แม่นยำและรวดเร็วกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.Markvart, **Solar electricity**. 2nd Ed. John Wiley & Sons, Ltd. 1994
- [2] C. Hua, J. Lin and C. Shen, “**Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking**,” IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol 45, No. 1, February 1998, pp. 99-107.
- [3] E.Koutroulis, H.Kalaitzakis and N.C.Voulgaris, “**Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system**,” IEEE Trans. on Power Elec., Vol. 16, No. 1, January 2001, pp. 46-54.
- [4] Y.C.Kuo, T.J.Liang, and J.F.Chen, “**Novel maximum power point tracking controller for photovoltaic energy conversion system**,” IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol. 48, No. 3, June 2001, pp. 594-601.
- [5] T.J.Liand, Y.C.Kuo and J.F.Chen, “**Single-state photovoltaic energy conversion system**,” IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 148, No 4, July 2001, pp. 339-344.
- [6] S. Saha and V.P. Sundarsingh, “**Novel Grid-Connected Photovoltaic Inverter**,” IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, No. 2, March 1996, pp. 219-224.
- [7] Daniel M.Mitchell. **DC-DC Switching Regulator Analysis**. New York :McGraw-Hill, Inc. 1988.
- [8] M.C.Ghanem, K.Al-Haddad, and G.Roy, “**A new control strategy to achieve sinusoidal line current in a cascade Buck-Boost converter**,” IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol. 43, No. 3, June 1996
- [9] Colonel Wm. T. Mclyman. **Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors**. New York :Marcel Dekker, Inc. 1982
- [10] Keith H. Billings. **Switchmode Power Supply Handbook**. 2nd Ed. New York :McGraw-Hill, Inc. 1999
- [11] Analog Devices. **Basic trigonometric subroutines for the ADMC331**. :Analog Devices, Inc. 2000.
- [12] Analog Devices. **Implementating PI controllers with ADMC331**. :Analog Devices, Inc. 2000.

ภาคผนวก ก.

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ADMC 331



ADMC331 PROCESSOR BOARD

INTRODUCTION

The *ADMC331 PROCESSOR BOARD* is a compact, highly flexible evaluation and development board for the low cost, single-chip DSP-based motor controller, the ADMC331. The device provides the following significant features:

- 26 MIPS, Fixed-Point, 16-bit DSP Core.
- 2K Internal Program and 1K Data Memory RAM.
- 2K Internal Program Memory ROM, offering Debugger Interface and Pre-Programmed Math and Motor Control Functions.
- Seven Analog input channels.
- A Three-Phase, 16-bit PWM Generator, with single and double update modes.
- 24 General Purpose I/O Lines, Configurable as Inputs or Outputs.
- Two Synchronous Serial Ports.
- Two programmable, 8-Bit, Auxiliary PWM Outputs.
- A 16-Bit Watchdog Timer.
- A General Purpose, Interval Timer with Prescaler.

Refer to the ADMC331 datasheet for a full description of all features and technical specifications of the ADMC331.

The *ADMC331 PROCESSOR BOARD* is intended as a compact, highly-integrated evaluation and software development platform for the ADMC331 controller. The processor board permits access through a UART connection to the *Motion Control Debugger* software that operates under Windows 95™ or Windows NT™. The *Motion Control Debugger* is used to download executable code, examine the contents of registers, program memory and data memory, run executable modules, set breakpoints and enable single-step operation.

The processor board is designed for compact size so that all relevant input and output signals are brought to three connector headers underneath the board. The processor board contains the following features and components:

- The ADMC331 Single-Chip DSP-Based Controller.
- A 12.96 MHz crystal to provide the CLKIN frequency.
- A power-on reset circuit based on the ADM709 that is used to provide a reset signal to the ADMC331 and the UART communications port. A push button is also provided to initiate a processor and system reset.
- A socket for a serial memory device (ROM or E²PROM) that may be used for serial boot loading on power up for stand alone operation.
- An isolated UART interface to the *Motion Control Debugger*. The signals are optically isolated from the remainder of the processor board. The AD7306 is used to drive the appropriate signals on the 9-way UART connector.
- A +5V and GND input power supply connector.
- An on board 5V to 5V dc-dc converter that provides an isolated 5V supply for the UART interface circuit.
- Analog interface circuitry.
- Jumpers that permit setting of the PWM polarity, enabling or disabling of the PWMTRIP input, enabling or disabling of PWM switch reluctance mode and enabling or disabling the serial memory device in the socket.
- Three socket blocks underneath the processor board that permit access to all of the input and output signals of interest. The three sockets comprise two digital sockets (1F1 and 1F3) and one analog socket (1F2).

The *ADMC331 PROCESSOR BOARD* may operate in a stand-alone mode, where the user must supply only the appropriate power supply voltage and either a UART connection to the *Motion Control Debugger* or a suitable serial memory device. In this case, the user must provide suitable connectors to interface to the various input and output signals on the expansion connectors underneath the board. Alternatively, the processor board may be plugged into the *ADMC CONNECTOR BOARD*. The connector board provides easy access to all relevant input and output signals via appropriate connectors and terminal blocks. The connector board also provides an

easy interface to the International Rectifier PowIRtrain™ modules to permit development of complete motor control solutions. In addition, the connector board adds new functionality including an 8-channel, 10-bit, serial DAC, and a large prototype area for system expansion. Refer to the documentation for the *ADMC CONNECTOR BOARD* for further details.

POWER SUPPLY REQUIREMENTS

The ADMC331 processor board contains a 2-way terminal block for connection of external power supplies. For correct operation, the following supplies are required:

- +5V \pm 10%, 200 mA (VDD)
- Ground

The VDD supply powers the digital logic circuits of the processor board, including the ADMC331 controller. In addition, it is used as the analog voltage supply of the ADMC331 and as the input to the dc-dc converter that provides the isolated supply for the UART interface. The processor board is laid out with separate analog and digital ground planes that are connected by a link (JP1) close to the power supply terminal block for noise immunity. This link should not be removed. A LED on the processor board indicates correct connection of the VDD supply.

Appropriate decoupling capacitors are provided on the processor board for the power supply input (VDD) to reduce noise coupling from the external power supply. However, for best performance, well-regulated external power supplies and correct wiring are recommended.

The arrangement on the input power supply connector is illustrated in Figure 1.

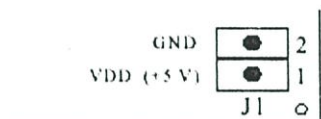


Figure 1: Power Supply Connector of ADMC331 Processor board.

FUNCTIONAL DESCRIPTION OF PROCESSOR BOARD

A complete set of schematics of the *ADMC331 Processor Board* are provided at the end of this document. Refer to these schematics for exact description of the functionality of the processor board. This section is intended as a functional description only of the major elements of the board.

UART Interface

A UART interface to the *Motion Control Debugger* is provided on the *ADMC331 PROCESSOR BOARD* via a 9-way D-type connector (P1). In order to separate the ADMC331 and any power conversion stage used in a complete motor drive system, the UART interface is optically isolated from the remainder of the processor board.

The *Motion Control Debugger* communicates through serial port 1 (SPORT1) of the ADMC331 using the DRIB and DT1 pins. In addition, the ADMC331 reset signal (ICRESET) is sent to the UART interface to ensure that a processor board reset is detected by the *Motion Control Debugger*. The three signals, DRIB, DT1 and ICRESET are optically isolated using two HCPL0630 dual isolators (U5 & U6). The signals DT1 and ICRESET are considered as outputs as these signals are sent from the processor board to the debugger. These signals are applied to one opto-isolator. Conversely, the signal DRIB is considered as an input as it is received by the processor board. This signal is isolated using the second isolator U5. The secondary supply for the optical isolators is produced on the processor board by the NME0505S power supply (isolated +5V to +5V dc-dc converter).

The *ADMC331 PROCESSOR BOARD* also contains an AD7306 transceiver (U7) that converts the TTL signals to the appropriate \pm 10 V levels suitable for the UART connection to the PC. A standard PC serial cable may be used to connect from the 9-way female socket of the processor board to the appropriate COM port of the PC. The baud rate and COM port to be used on the PC may be set from the *ADMC331 Comm Config* software that is part of the *Motion Control Debugger*.

A functional block diagram of the UART interface circuit is shown in Figure 2. The direction of the three signals is indicated in the figure. Refer to the full schematics at the end of this document for the full circuit. Recall that the secondary supply for the optical isolators and the AD7306 is derived on the processor board by the isolated dc-dc converter, the NME0505S (U1).

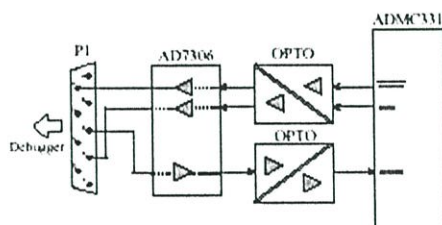


Figure 2: Functional Block Diagram of UART Interface to Motion Control Debugger of ADCM331 PROCESSOR BOARD.

Power On Reset Circuit

The ADCM331 PROCESSOR BOARD contains a power on reset (POR) based on the ADM709 (U4). The ADM709 generates a low $\overline{\text{RESET}}$ pulse of 140 ms duration whenever the VCC pin is brought below the threshold value. This pulse occurs automatically on power on and is applied directly to the $\overline{\text{RESET}}$ pin of the ADCM331 to reset the device. In addition, the ADCM331 can be reset by pressing the S1 push button that causes the voltage level at the VCC pin to be brought below the threshold. Resistor R5 and capacitor C15 limit the rise of voltage at the VCC pin. The $\overline{\text{RESET}}$ signal is also fed to the UART interface, as described previously, to permit the Motion Control Debugger to detect a system reset.

Serial ROM Interface

For normal program development, it is envisaged that the Motion Control Debugger would be used to download executable code to the ADCM331 PROCESSOR BOARD. However, as program development stabilizes, it

may be required to operate the processor board in a stand-alone mode in the target application. For this reason, the processor board contains an 8-pin DIP socket (U3) for installation of a serial memory device that can be used to boot load the program and data memory RAM of the ADCM331.

Either a one-time programmable serial ROM device, such as the XC1765D Xilinx, or an electrically erasable device, such as the AT17C65 E²PROM from Atmel, are recommended. In both cases, the application executable file can be converted to a form suitable for the serial memory devices using the MAKEPROM utility that is installed as part of the Motion Control Debugger.

For both memory devices, a three-wire connection to SPORT1 of the ADCM331 is used. An illustration of the connection of the serial memory device to the ADCM331 is shown in Figure 3. The connection of the 12.96 MHz crystal and associated capacitors is also shown in the figure.

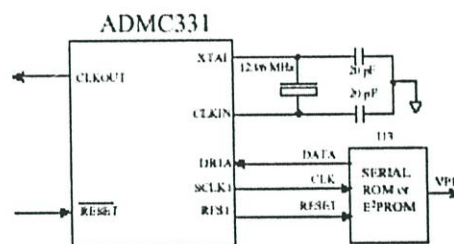


Figure 3: Connection of serial memory (ROM or E²PROM) and crystal to the ADCM331.

The DATA line of the serial memory device is connected to the DR1A pin of the ADCM331. The RESET line of the memory is connected to the RFS1 pin of the ADCM331 and the CLK line of the memory is driven by the SCLK1 pin of the ADCM331. Following activation of the $\overline{\text{RESET}}$ pin of the ADCM331, the RFS1 pin is pulsed low to reset the serial memory device. Subsequently, data is clocked synchronously into the ADCM331 from the memory device at a rate of CLKOUT/20 (or 1.3 MB/s for the processor board with a 12.96 MHz crystal). If a serial memory device is not

present, the ADMC331 automatically converts to UART communication mode.

The chip enable line (CEB) of the serial memory device is tied to a jumper (JP4) on the processor board. This jumper may be used to tie the CEB pin to either VDD or GND. In order to enable the serial memory device in the socket, it is necessary to tie this pin to GND (position 2-3). Conversely, the SRAM or E²PROM may be left in the socket and disabled by tying the CEB pin to VDD (position 1-2).

The programming pin of the serial memory device is pulled high on the processor board to disable this feature. However, this pin is also connected to the IF1 (pin 30 IF1B) interface connector underneath the processor board. This enables this pin to be pulled low by external hardware so that writing to the E²PROM would be possible. Obviously, it is necessary to respect the particular operational requirements of the chosen serial E²PROM if such a feature is to be attempted.

Analog Interface

The *ADMC331 PROCESSOR BOARD* permits up to seven analog inputs to be applied to the ADMC331 via the IF2 interface connector. There is a one stage passive anti-aliasing low pass filter at the input of each of the A/D converter channels. The RC filter values are 10kΩ and 3.3nF which give a cut off frequency of 5kHz. An external capacitor, charged by a constant current source, is required in the socket J2 to generate the reference ramp voltage (0.3-3.3V). The jumper JP2 connects the analog input channel VAUX3 either to an external analog input, through the RC filter or the VREF pin on the ADMC331.

Jumper Settings

The *ADMC331 PROCESSOR BOARD* contains five jumpers that:

- Permit selection of ADMC331 VREF or external analog input to VAUX3 (JP2)
- Permit enabling/disabling of PWM Switch Reluctance mode (JP3).

- Permit enabling/disabling of the SRAM/E²PROM in socket U4 (JP4).
- Permit selection of the PWM polarity (JP5).
- Permit enabling/disabling of the PWMTRIP input (JP6).

The settings of the three jumpers are described in Table 1. Connecting JP2 in the 1-2 position connects the analog input channel VAUX3 to an external analog input. On the other hand, connecting JP2 in the 2-3 position connects VAUX3 to VREF.

Connecting JP3 in the 1-2 position ties the PWMSR pin of the ADMC331 to VDD and disables the PWM switch Reluctance mode. On the other hand, connecting JP3 in the 2-3 position ties the PWMSR pin of the ADMC331 to GND and enables the PWM switch reluctance mode.

Connecting JP4 in the 1-2 position ties the chip enable pin (CEB) of the serial memory socket (U4) to VDD and disables the memory device. If a serial memory device is required, the jumper JP4 must be placed in the 2-3 position to enable the memory.

Connecting JP5 in the 1-2 position ties the PWMPOL pin of the ADMC331 to VDD and enables active HI PWM outputs. On the other hand, connecting JP5 in the 2-3 position creates active LO PWM outputs from the ADMC331. The appropriate setting for this jumper is determined by the exact nature of the gate drive circuit of the target system. The PWMPOL pin is also connected to the interface connector IF3 so that its state can be detected or altered by external hardware.

Connecting jumper JP6 in the 1-2 position ties the PWMTRIP pin of the ADMC331 to VDD and permanently enables PWM outputs. On the other hand, connecting jumper JP6 in the 2-3 position connects the PWMTRIP pin of the ADMC331 to the corresponding pin of the IF3 interface connector. External hardware may be used to derive the appropriate signal for this pin.

JP1 is a link that connects the analog and digital ground planes of the processor board together. For correct operation, this link must not be removed.

Jumper	Position	Function
JP2	1-2	Connects external analog input to VAUX3
	2-3	Connects VREF to VAUX3
JP3	1-2	Disables PWMSR mode.
	2-3	Enables PWMSR mode.
JP4	1-2	Disable SROM/E ² PROM
	2-3	Enable SROM/E ² PROM
JP5	1-2	PWM Outputs Active HI
	2-3	PWM Outputs Active LO
JP6	1-2	Enable PWMTRIP via IF3 connector
	2-3	Disable PWMTRIP input

Table 1: Jumper settings of ADMC331 PROCESSOR BOARD.

Interface Connectors

In order to create as compact an evaluation and development board as possible, all input and output signals are brought to three interface connectors underneath the processor board. Two connectors (IF1 and IF3) are dedicated to digital signals and the third (IF2) is reserved for analog signals. This three connector interface will be used in future processor boards for future motion control products from Analog Devices. Therefore, many of the pins on the connectors for the *ADMC331 PROCESSOR BOARD* are unconnected (n/c). These pins are reserved for other functions in future products.

Interface connectors IF1 and IF3 are both 3-way by 30 pin connectors. Connector IF2 is 3-way by 24 pins. The exact connections to this interface may be seen in the schematics at the end of this document. The connections are tabulated for connector IF1 in Table 2, for connector IF2 in Table 3 and for connector IF3 in Table 4.

IF1A		IF1B		IF1C	
Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
1	n/c	1	n/c	1	n/c
2	n/c	2	n/c	2	n/c
3	n/c	3	n/c	3	n/c
4	n/c	4	n/c	4	n/c
5	n/c	5	n/c	5	n/c
6	n/c	6	n/c	6	n/c
7	n/c	7	n/c	7	n/c
8	n/c	8	n/c	8	n/c
9	VDD	9	VDD	9	VDD
10	GND	10	GND	10	GND
11	n/c	11	n/c	11	n/c
12	n/c	12	n/c	12	n/c
13	n/c	13	n/c	13	n/c
14	n/c	14	n/c	14	n/c
15	n/c	15	n/c	15	n/c
16	n/c	16	n/c	16	n/c
17	n/c	17	n/c	17	n/c
18	n/c	18	n/c	18	ICREFSET
19	n/c	19	n/c	19	n/c
20	n/c	20	n/c	20	CLKOUT1
21	n/c	21	n/c	21	n/c
22	n/c	22	n/c	22	n/c
23	GND	23	GND	23	n/c
24	SCLK0	24	SCLK1	24	n/c
25	TFS0	25	TFS1	25	n/c
26	RFS0	26	RFS1	26	n/c
27	DR0	27	DR1A	27	n/c
28	DT0	28	DR1B	28	n/c
29	n/c	29	DT1	29	n/c
30	n/c	30	E ² PROG	30	n/c

Table 2: Definition of digital interface connector IF1 of ADMC331 PROCESSOR BOARD.

IF2A		IF2B		IF2C	
Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
1	VIN1	1	GND	1	n/c
2	VIN2	2	GND	2	n/c
3	VIN3	3	GND	3	n/c
4	VIN4	4	GND	4	n/c
5	VIN5	5	GND	5	n/c
6	VIN6	6	GND	6	n/c
7	VIN7	7	GND	7	n/c
8	n/c	8	GND	8	n/c
9	n/c	9	GND	9	n/c
10	n/c	10	GND	10	n/c
11	n/c	11	GND	11	n/c
12	n/c	12	GND	12	n/c
13	n/c	13	n/c	13	n/c
14	n/c	14	n/c	14	n/c
15	VREF	15	GND	15	n/c
16	n/c	16	GND	16	n/c
17	n/c	17	GND	17	n/c
18	n/c	18	GND	18	n/c
19	n/c	19	GND	19	n/c
20	n/c	20	GND	20	n/c
21	n/c	21	GND	21	n/c
22	n/c	22	GND	22	n/c
23	n/c	23	GND	23	n/c
24	n/c	24	GND	24	n/c

Table 3: Definition of analog interface connector IF2 of ADMC331 PROCESSOR BOARD.

IF3A		IF3B		IF3C	
Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
1	AH	1	BH	1	CH
2	AL	2	BL	2	CL
3	PWMSYNC	3	PWMTRIP	3	PWMSR
4	PWMVOL	4	n/c	4	n/c
5	n/c	5	n/c	5	n/c
6	n/c	6	n/c	6	n/c
7	n/c	7	n/c	7	n/c
8	n/c	8	n/c	8	n/c
9	n/c	9	n/c	9	n/c
10	n/c	10	n/c	10	n/c
11	n/c	11	n/c	11	n/c
12	AUX0	12	AUX1	12	CLKOUT
13	n/c	13	n/c	13	n/c
14	VDD	14	VDD	14	VDD
15	GND	15	GND	15	GND
16	n/c	16	n/c	16	n/c
17	n/c	17	n/c	17	n/c
18	n/c	18	n/c	18	n/c
19	PIO0	19	PIO1	19	PIO2
20	PIO3	20	PIO4	20	PIO5
21	PIO6	21	PIO7	21	PIO8
22	PIO9	22	PIO10	22	PIO11
23	PIO12	23	PIO13	23	PIO14
24	PIO15	24	PIO16	24	PIO17
25	PIO18	25	PIO19	25	PIO20
26	PIO21	26	PIO22	26	PIO23
27	n/c	27	n/c	27	n/c
28	n/c	28	n/c	28	n/c
29	n/c	29	n/c	29	n/c
30	n/c	30	n/c	30	n/c

Table 4: Definition of digital interface connector IF3 of ADMC331 PROCESSOR BOARD

The description of the various connections to the three interface connectors is given in Table 5.

Signal(s)	Function
VDD	+5 V power supply
GND	Ground
ICRESET	Reset pin of ADMC331
SCLK0, TFS0, RFS0, DT0, DR0	SPORT0 pins of ADMC331
SCLK1, TFS1, RFS1, DR1A, DR1B, DT1	SPORT1 pins of ADMC331
E ² PROG	E ² PROM programming pin
VIN1 - VIN7	Analog inputs
VREF	Reference voltage output
AH - CL	TTL-level PWM outputs
PWMSYNC	PWMSYNC pulse of ADMC331
PWMTRIP	PWMTRIP pin of ADMC331
PWMPOL	PWM polarity pin of ADMC331
PWMSR	PWM switch reluctance pin of ADMC331
PIO0 - PIO23	Dedicated programmable input/outputs of ADMC331
CLKOUT	TTL-level CLKOUT signal
AUX0, AUX1	TTL-level auxiliary PWM outputs

Table 5: Function of signals on interface connectors of ADMC331 PROCESSOR BOARD.

Components, Placement & Schematics

The various integrated circuits on the *ADMC331 PROCESSOR BOARD* are tabulated in Table 6.

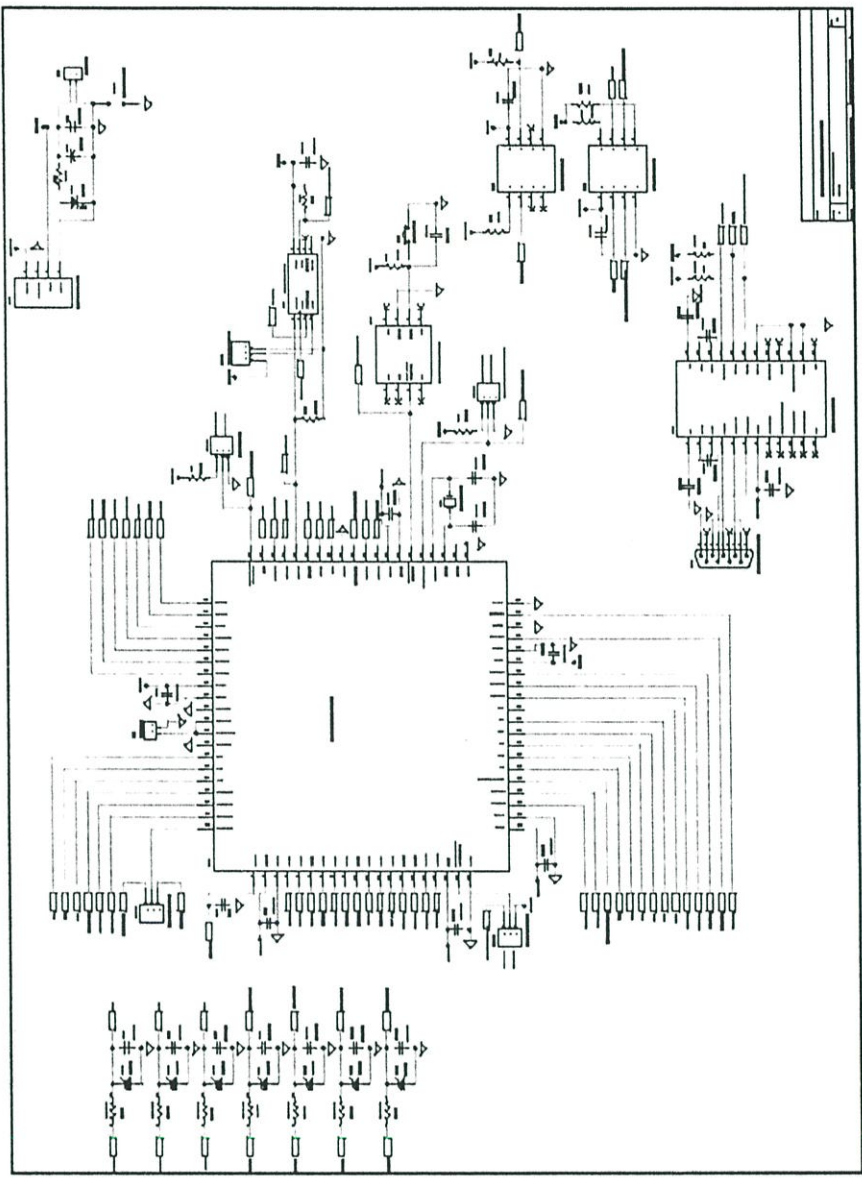
The board layout and circuit schematics are shown in the following pages.

Designator	Integrated circuit
U1	NME0505S dc/dc converter
U2	ADMC331 DSP Controller
U3	SROM/E ² PROM socket
U4	ADM709MAR - Power on Reset
U5	HCPL0630 Opto-isolator
U6	HCPL0630 Opto-isolator
U7	AD7306JR Transceiver

Table 6: Main integrated circuits of *ADMC331 PROCESSOR BOARD*.

ADMIC311 PROCESSOR BOARD

Analog Devices, Inc., 1998



Page 9

REV. A

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมควบคุมการทำงานคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อสายส่ง
แบบ 2 ชั้นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์


```

.INIT Delta : 0x0147;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Ts_2;           { Pwm Timer/2  648 at 10kHz 324 at 20kHz}
.INIT Ts_2 : 648;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Theta;          { Current angle      }
.INIT Theta : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM VrefA;          { Voltage demands    }
.INIT VrefA : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM VrefB;          { Voltage demands    }
.INIT VrefB : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM VrefC;          { Voltage demands    }
.INIT VrefC : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Ma;             { Modulation index   }
.INIT Ma : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Current_sine;   {Current Control Calculation }
.INIT Current_sine : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Current;        {Current Control Calculation }
.INIT Current : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Current_Av_Msb;
.INIT Current_Av_Msb : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Current_Av_Lsb;
.INIT Current_Av_Lsb : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Int_Current;
.INIT Int_Current : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Int_Current_Msb;
.INIT Int_Current_Msb: 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Mppt_ref;       { Modulation index from MPPT }
.INIT Mppt_ref : 0x0400;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Solar_V;        { Voltage Input sence from Solar }
.INIT Solar_V : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Solar_V_ref;    { Reference Voltage of Solar }
.INIT Solar_V_ref : 0x7fff;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Solar_I;        { Current Input sence from Solar }

```

```

.INIT Solar_I : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Solar_I_ref;           { Reference Current of Solar   }
.INIT Solar_I_ref : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Solar_P;               { Power Calculation from Solar }
.INIT Solar_P : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Solar_P_ref;          { Reference Power of Solar     }
.INIT Solar_P_ref : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM I_ref;                 { Reference Current of Solar   }
.INIT I_ref : 0x3000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM V_Ref;                 { Voltage Reference            }
.INIT V_Ref : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM fre_ref;
.INIT fre_ref : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM fre_cal;
.INIT fre_cal : 0x6400;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM zero_cro;
.INIT zero_cro : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM zero_status1;
.INIT zero_status1 : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM zero_status2;
.INIT zero_status2 : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM status1;
.INIT status1 : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM status2;
.INIT status2 : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM status3;
.INIT status3 : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM status4;
.INIT status4 : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM status5;
.INIT status5 : -1;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM status6;

```

```

.INIT status6 : 0;

.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM fre_gen;
.INIT fre_gen : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Cntr_fre;
.INIT Cntr_fre : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Cntr_fre1;
.INIT Cntr_fre1 : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Cntr_pll;
.INIT Cntr_pll : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Inverter_out;
.INIT Inverter_out : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Mincu;
.INIT Mincu : 0x7fff;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Maxcu;
.INIT Maxcu : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Minmaxst;
.INIT Minmaxst : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM offset;
.INIT offset : 0x4b80;

.ENTRY Inverter;
.ENTRY Zero_crossing;
.ENTRY Frequency_Calculation_10k;
.ENTRY Minmax;
.ENTRY MPPT;

Startup:
    PWM_Init(PWMSYNC_ISR, PWMTRIP_ISR);
    IFC = 0x80;          { Clear any pending IRQ2 inter.      }
    ay0 = 0x200;        { unmask irq2 interrupts.    }
    ar = IMASK;
    ar = ar or ay0;

```

```

IMASK = ar;                { IRQ2 ints fully enabled here      }
ar = 0x1F;
DM(PIODIRO) = ar;         { Set PIO PIN 0-4 for Output      }
INIT_PI16(PI_Delay16, 0x0000);    { reset PI      }
INIT_PI16(PIS_Delay16, 0x0000);    { reset PI      }
ADC_Init;
AutoCal_Init;             {Initialize the Auto Calibration Routine}
I1 = ^Output;
I2 = ^Output1;
L1 = 256;
L2 = 256;
M1 = 1;

Main:                      { Wait for interrupt to occur      }
    jump Main;
    rts;

```

PWMSYNC_ISR:

```

    Auto_Calibrate;
    ADC_Read(ADC1);        {ADC1 = V sin ref}
    dm(minmaxst) = ar;
    call Minmax;
    ar = dm(minmaxst);
    ay0 = dm(offset);
    ar = ar - ay0;
    my0 = 0x3000;
    mr = ar * my0 (SS);
    sr = lshift mr1 by 18 (lo);
    dm(zero_status1) = sr1;
    ADC_Read(ADC2);        {ADC2 = I sin output}
    ay0 = 0x4780;
    ar = ar - ay0;

```

```

my0 = 0x49cb;
mr = ar*my0(ss);
sr = lshift mr1 by 18 (lo);
sr = sr or lshift mr0 by 2 (lo);
dm(Current_sine) = sr1;
ADC_Read(ADC3);           {ADC3 = I solar}
ay0 = 0x0d00;
ar = ar - ay0;   {real}
dm(Solar_I) = ar;
ar = 0;
dm(status4) = ar;
Read_V:      ADC_Set_AUXch(0);
ADC_Read(ADCAUX); {ADC aux0 = V solar}
ay0 = 0x4958;
ay0 = dm(offset);
ar = ar - ay0;
my0 = 0x4396;
mr = ar*my0(ss);
sr = lshift mr1 by 18 (lo);
sr = sr or lshift mr0 by 2 (lo);
dm(Solar_V) = sr1;
ar = 1;
dm(status4) = ar;
Read_end:
ADC_Read(ADC3);           {ADC3 = IDC}
ay0 = 0x0a35;
ar = ar - ay0;   {real}
integrate:
call Frequency_calculation_10k;
ar = dm(zero_status1);
call Zero_crossing;
ar = pass ar;

```

```
dm(status1) = ar;
if eq jump next1;
ax0 = 0x0000;
dm(theta) = ax0;
ax0 = 0x0000;
dm(Cntr_fre1) = ax0;
ar = dm(status5);
ar = ar + 1;
dm(status5) = ar;
if le jump next1;
ar = -1;
dm(status5) = ar;
ax0 = 0x8000;
dm(theta) = ax0;
next1: ax0 = dm(Cntr_fre1);
ay0 = 1;
ar = ax0 + ay0;
dm(Cntr_fre1) = ar;
ar = dm(status2);
ar = ar + 2;
ax0 = 0;
if lt ar = pass ax0;
ay0 = dm(status1);
ar = ar and ay0;
if gt jump next3;
jump next2;
next3: call MPPT;
next2: ax0 = dm(I_ref);
ay0 = dm(Solar_I);
ar = ax0 - ay0;
dm(i1,m1) = ar ;
Pi16(PIS_Delay16, PIS_Coeff16, PIS_SF16);
```

```

dm(i2,m1) = sr1;
my0 = 0x3800;
mr = sr1 * my0 (SS);
ax0 = mr1;
ay0 = 0x3b33;
ar = ax0 + ay0;
dm(Mppt_ref) = ar;
dm(ma) = ar;
ax0 = 0;
Set_DAG_registers_for_trigonometric;
    mr = 0;                                {Clear mr                }
    mr1 = dm(Theta);                        {Preload Theta          }
next4:   mx0 = DM(AD_IN);
        my0 = dm(Delta);
        mr = mr + mx0*my0 (SS);            {Compute new angle & store }
        dm(Theta) = mr1;
next_theta2:  ax0 = mr1;
            Sin(mr1);                       {Result in ar register   }
dm(VrefB) = ar;
ar = dm(VrefB);
my0 = dm(Mppt_ref);
my0 = 0x4000;
mr = ar * my0 (SS);
dm(VrefC) = mr1;
ar = abs mr1;
mr1 = ar;
ar = dm(Current_sine);
ar = abs ar;
ay0 = ar;
ar = mr1 - ay0;
Pi16(PI_Delay16, PI_Coeff16, PI_SF16);    { compute controller output }
my0 = 0x3e00;

```

```

mr1 = 0x3200;
mr = mr + sr1 * my0 (SS);
ar = dm(VrefB);
ar = abs ar;
my0 = ar;
mr = mr1*my0(ss);
my0 = 0x7fff;
mr = mr1 * my0 (UU);
sr = lshift mr1 by 1 (lo);
ay0 = 0x7d00;
ar = sr0 - ay0;
    sr0 = DM(Ts_2);
    mr = 0;
    mr1 = sr0;
    my0 = ar;
    mr = mr + sr0 * my0 (SS);    {Calculate duty cycle          }
    dm(PWMCHA) = mr1;          {Set Ouput PWM Chanal A and must use AL}
call Inverter;

```

RTI;

PWMTRIP_ISR:

```

nop;
rti;

```

Inverter:

```

ar = dm(status1);
ar = pass ar;
if eq jump nn;
jump setdt1;
ar = dm(PIODATA0);
jump Opdigital;
nn: ar = dm(zero_status1);

```

```

    ar = pass ar;
    if LT jump Setdt2;
    jump Setdt3;
Setdt1: ar = 0x00;                {Clear bit all PIO Pin          }
    jump Opdigital;
Setdt2: ar = 0x0C;                {Set bit PIO Pin No.0-1      }
    jump Opdigital;
Setdt3: ar = 0x03;                {Set bit PIO Pin No.2-3     }
Opdigital:
    DM(PIODATA0) = ar;           {Set 50 Hz Output of Inverter at PIO pin}
    RTS;

```

Zero_crossing:

```

    ay0 = ar;
    ax0 = 0xfeaf;
    ax1 = 0x0120;
    ar = ax0 - ay0;
    If LT jump Zero1;
    jump Zero2;
Zero1: ay1 = 0x7fff;
Zero2: ar = ax1 - ay0;
    If GT jump Zero3;
    ax1 = 0;
    jump Zero4;
Zero3: ax1 = 0x7fff;
Zero4: ar = ax1 and ay1;
    RTS;

```

Frequency_Calculation_10k:

```

    ar = dm(zero_status1);
    ar = pass ar;
    If GE jump fre_call1;

```

```

ar = dm(Cntr_fre);
ar = pass ar;
if EQ jump endcall;
mx1 = dm(Cntr_fre);
mx1 = 100;
my1 = 0x4000;
mr = mx1 * my1 (SS);
sr = lshift mr0 by -7 (hi);
sr = sr or lshift mr1 by 9 (hi);
ay1 = 0xc800;
ar = ay1 - sr1;
dm(fre_cal) = ar;
my1 = 0x01a3;
mr = ar*my1 (SS);
ay1 = -2;
ar = mr1 + ay1;
dm(delta) = ar;
ax0 = 0;
dm(Cntr_fre) = ax0;
jump endcall;
fre_call1:    ax0 = dm(Cntr_fre);
              ar = ax0 + 1;
              dm(Cntr_fre) = ar;
endcall:     RTS;

```

MPPT:

```

mx0 = dm(Solar_V);
my0 = dm(Solar_I);
mr = mx0*my0 (SS);
sr = lshift mr1 by 18 (lo);
sr = sr or lshift mr0 by 2 (lo);
dm(Solar_P) = sr1;

```

```
ax0 = dm(Solar_P);
ay0 = dm(Solar_P_ref);
ar = ax0 - ay0;
if lt jump curr_ch1;
jump curr_ch2;
curr_ch1:    ax0 = dm(Solar_I);
ay0 = dm(Solar_I_ref);
ar = ax0 - ay0;
if gt jump Dec_Iref;
jump Inc_Iref;
curr_ch2:    ax0 = dm(Solar_I);
ay0 = dm(Solar_I_ref);
ar = ax0 - ay0;
if le jump Dec_Iref;
jump Inc_Iref;
Inc_Iref:    ax0 = dm(I_ref);
ay0 = 0x0147;
ar = ax0 + ay0;
dm(I_ref) = ar;
ay0 = 0x7000;
ar = ar - ay0;
if lt jump end_mppt;
dm(I_ref) = ay0;
jump end_mppt;
Dec_Iref:    ax0 = dm(I_ref);
ay0 = 0x0147;
ar = ax0 - ay0;
dm(I_ref) = ar;
ay0 = 0x1000;
ar = ar - ay0;
if gt jump end_mppt;
dm(I_ref) = ay0;
```

```

end_mppt:    ax0 = dm(Solar_V);

             dm(Solar_V_ref) = ax0;
             ax0 = dm(Solar_P);
             dm(Solar_P_ref) = ax0;
             ax0 = dm(Solar_I);
             dm(Solar_I_ref) = ax0;

end_mppt2:   RTS;

Minmax:

minss:  ax0 = dm(Mincu);
        ay0 = dm(Minmaxst);
        ar = ax0 - ay0;
        ar = ay0;
        if le ar = pass ax0;
        dm(Mincu) = ar;

maxss:  ax0 = dm(Maxcu);
        ay0 = dm(Minmaxst);
        ar = ax0 - ay0;
        ar = ay0;
        if gt ar = pass ax0;
        dm(Maxcu) = ar;

end_m:  ar = dm(status1);
        ar = pass ar;
        if eq jump back;
        ar = dm(status2);
        ar = ar + 1;
        dm(status2) = ar;
        if le jump back;
        ar = -401;
        dm(status2) = ar;
        ax0 = dm(Maxcu);
        ay0 = dm(Mincu);
        ar = ax0 - ay0;

```

```
my0 = 0x4000;  
mr = ar*my0 (ss);  
ar = mr1 + ay0;  
ay0 = 0x0000;  
ar = ar - ay0;  
dm(offset) = ar;  
ax0 = 0x7fff;  
dm(Mincu) = ax0;  
ax0 = 0x0000;  
dm(Maxcu) = ax0;  
back: RTS;  
.ENDMOD;
```

ภาคผนวก ก.

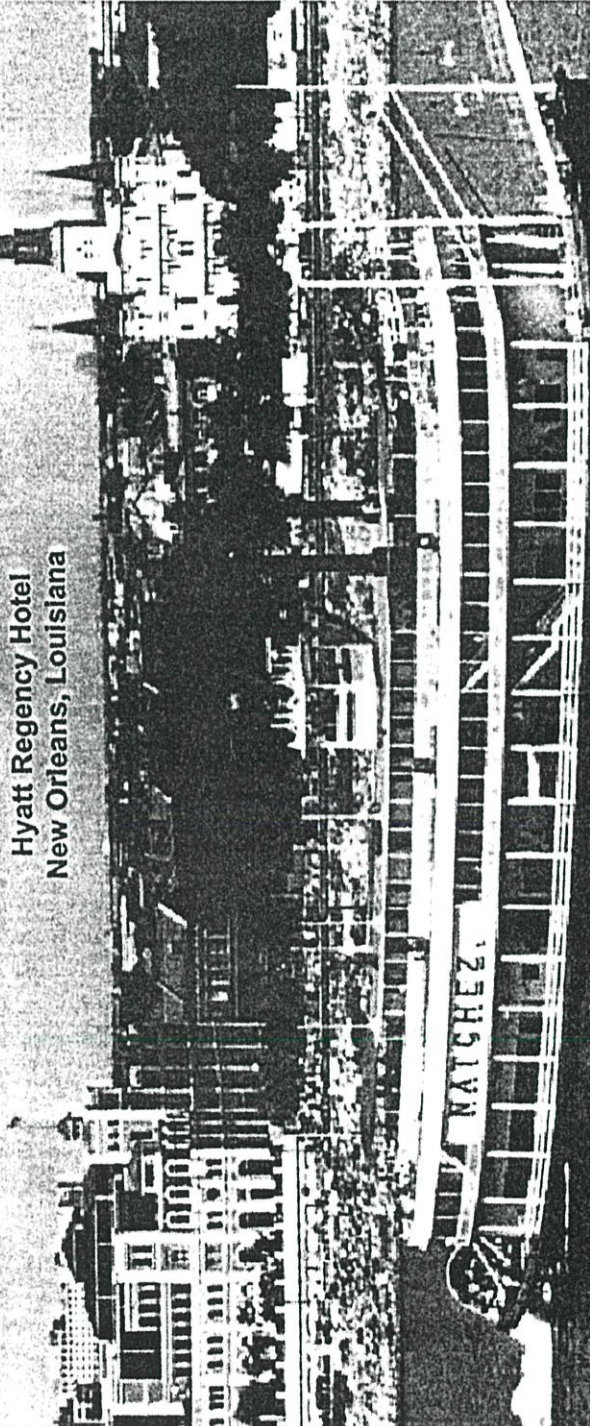
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

NEW ORLEANS

29th IEEE PVSC

MAY 20-24, 2002

Hyatt Regency Hotel
New Orleans, Louisiana



John P. Benner
Conference Chair

www.ieee.org/pvsc

Sponsored by the IEEE Electron Devices Society



PHOTOVOLTAIC GRID-CONNECTED INVERTER USING TWO-SWITCH BUCK-BOOST CONVERTER

Komkrit Chomsuwan¹, Prapart Prisuwana¹, and Veerapol Monyakul²

¹Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand,

²National Science and Technology Development Agency, Thailand.

ABSTRACT

This paper presents a two-stage photovoltaic grid-connected inverter. The first stage is a two-switch buck-boost circuit that performs various functions; tracking a maximum power point of the photovoltaic array and controlling current using fixed frequency current mode control technique; as well as reforming a direct current waveform to an absolute sinusoidal waveform. The second stage is a H-bridge switch that converts an absolute sinusoidal waveform to a sinusoidal waveform with a low harmonic distortion current and connected to utility. The system configuration is reliable using a single-chip DSP controller. Experimental results satisfy with simulation.

INTRODUCTION

There are various techniques that can be used to improve the efficiency of a photovoltaic grid-connected system. The maximum power output and the highest efficiency from a photovoltaic array can be achieved by using the MPPT method [1,2,4,5]. Preventing any loss in the inverter is another technique to improve the efficiency of a photovoltaic grid-connected system [3-4].

In general, a photovoltaic grid-connected system is a two-stage grid-connected inverter. The first stage of the DC/DC converter controls the photovoltaic for an optimum operating point. The second stage of the DC/AC converter regulates an output current to achieve sinusoidal waveform and in phase with the utility. The DC/DC and DC/AC converters function independently that makes the system easy to control. The system, however, yields low efficiency because a large number of power switches work at high frequency.

A single-stage grid-connected inverter is developed to increase the system efficiency [3,5]. The DC/AC inverter controls a maximum power output of photovoltaic array and regulates output current waveform from the inverter. Despite a higher efficiency than the conventional system, the control technique is more complex.

This paper proposes a two-stage grid-connected inverter using a two-switch buck-boost converter. The functions of this converter are to track a maximum power output of photovoltaic array and to transform a direct current waveform to an absolute sinusoidal waveform. A

H-bridge inverter is used to convert the absolute sinusoidal waveform to the sinusoidal waveform and can be connected to utility. The efficiency of the H-bridge inverter is high because the switching device can be operated at zero current and voltage. Accordingly, the efficiency of this proposed system is higher than the conventional system. The control technique is also easier than the single-stage grid-connected inverter.

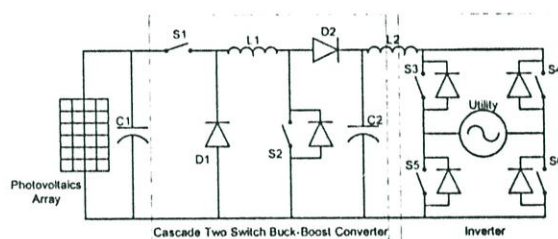


Fig. 1. The proposed system.

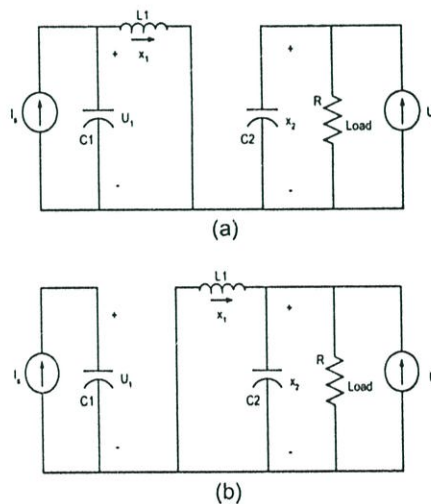


Fig. 2. Operation stage of a two-switch buck-boost converter.

(a) S1 and S2 operated.

(b) D1 and D2 operated.

SYSTEM CONFIGURATION

The photovoltaic grid-connected inverter proposed in this paper is shown in Fig. 1. A two-switch buck-boost circuit is used to track the maximum power point of a photovoltaic array, and to transform a direct current waveform to an absolute sinusoidal waveform. Both S1 and S2 switches operate simultaneously under absolute sinusoidal pulse width modulation. The switches transfer electrical power from a photovoltaic array to inductor L1 and then to the inverter. The absolute sinusoidal current waveform is converted by the H-bridge inverter to form the sinusoidal current.

In the two-switch buck-boost converter, there are two operation stages (see Fig. 2), and the stage equation can be described by the following equation.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -(1-d) \\ (1-d) & -\frac{1}{L_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

In circuit design, the current flowing through inductor L1 must operate in discontinuous mode. During S1 and S2 on period, the energy is stored in the inductor L1. This energy is used up during the off period. The S1 and S2 switches are controlled by the fixed frequency absolute SPWM technique. As a result, an absolute sinusoidal waveform will be achieved.

CONTROL STRATEGY

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Various methods have been studied to find an operating point of the photovoltaic that can deliver maximum power [2,4-6]. A modified algorithm of the perturbation and observation (P&O) using the current control method as the tracking for the MPPT is used in this proposed system (see Fig. 3). This simple algorithm is used to track the maximum power output by either increasing or decreasing reference current command of a photovoltaic array (I_{ref}). It is more rapid than changing reference voltage command (V_{ref}) [5] and easy to implement on a DSP controller. However, this algorithm controls the photovoltaic array that operates near the maximum power point.

The proposed MPPT in this system is used to calculate a reference current to control the maximum power output of photovoltaic array and the magnitude of the output current waveform.

Control System

To reduce size and increase reliability of the system, the system configuration (see Fig. 4) is implemented using the single-chip DSP controller. The proposed control system consists of two loops. The MPPT is used to set a reference current command that tracks the maximum power output from the photovoltaic array. The current waveform control is used to shape the waveform to an

absolute sinusoidal waveform with magnitude regulated in accordance with the reference current command.

The H-bridge is controlled to operate when the magnitude of the utility voltage is zero. The zero crossing detector (ZC) is used to detect zero utility voltage.

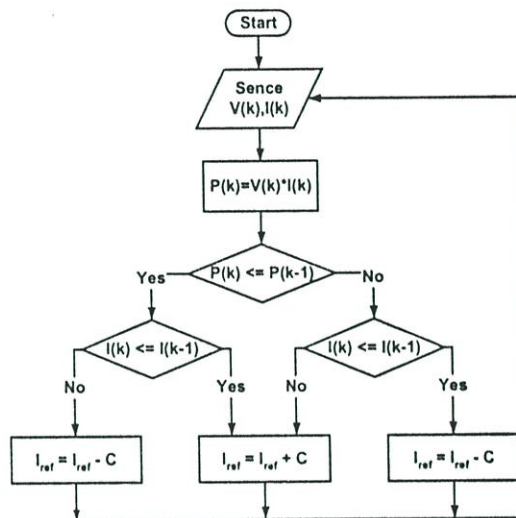


Fig. 3. MPPT Flow Chart using P&O Algorithm.

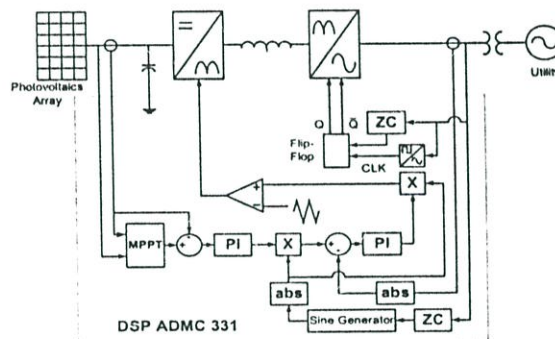


Fig. 4. Control system configuration using single-chip DSP (ADMC 331).

Table 1. Electrical characteristic of photovoltaic module (1000W/m² 25°C AM 1.5).

Power (Typical ±10%)	47 W
Current (Typical at load)	2.94 A
Voltage (Typical at load)	16.0 V
Short Circuit Current (Typical)	3.27 A
Open Circuit Voltage (Typical)	19.9 V

SIMULATION AND EXPERIMENT RESULT

In this experiment, eight modules of photovoltaic array are used. Each module has a maximum power output of 47 W and an efficiency of 80%. The electrical

characteristic of the photovoltaic module are shown in Table 1.

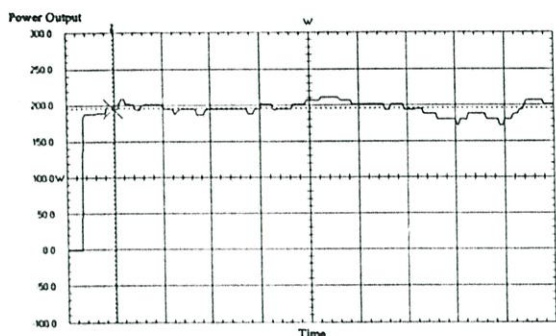
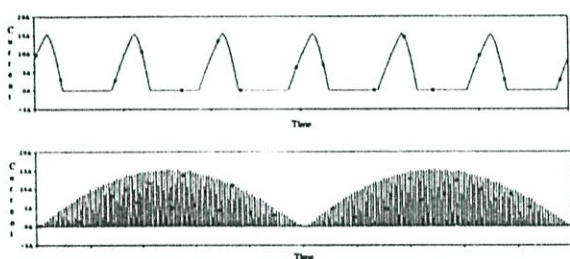
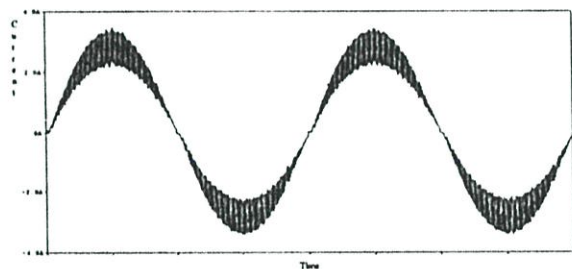


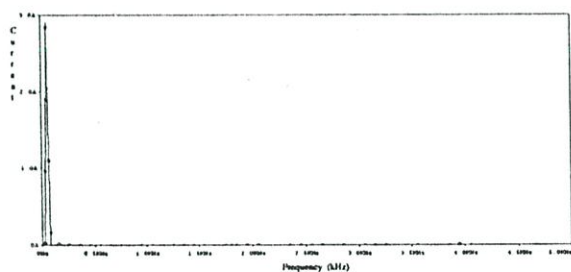
Fig. 5. Experimental result for insolation of 800 W/m².



(a)



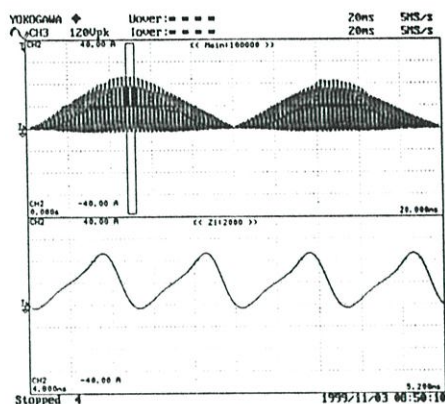
(b)



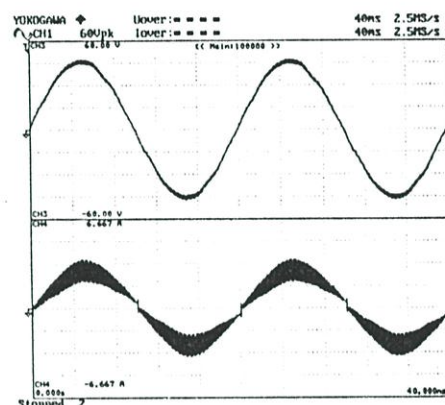
(c)

Fig. 6. Simulation result when connected to utility.

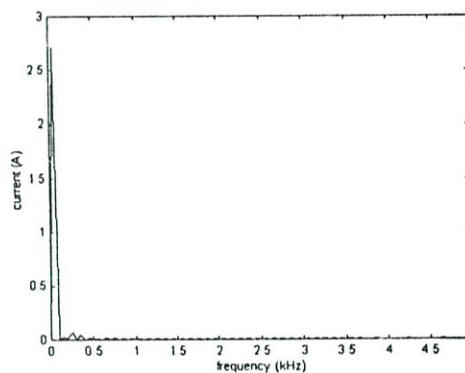
- (a) Inductor Current.
- (b) Output current waveform.
- (c) Frequency spectrum of output current waveform.



(a)



(b) voltage (upper) and current (lower)



(c)

Fig. 7. Experimental results of this proposed system when connected to utility.

- (a) Inductor current.
- (b) Output waveform.
- (c) Frequency spectrum of output current waveform.

The MPPT was tested at 40°C and at an insolation of 800 W/m². The results (see Fig. 5) show that the power output can maintain its steadiness at the level of about

200 W. This MPPT algorithm is, therefore, capable of controlling the maximum power output from a photovoltaic array.

The prototype system is designed and implemented at a switching frequency of 10 kHz and is controlled by the DSP controller, ADMC 331 of the Analog device.

For simulation and experimental testing, the designed system was connected to utility through the transformer. Fig. 6 and 7 present comparison between simulation and experimental results of the inductor current, output waveform, and harmonics spectrum, and the experimental results are in agreement with the simulation. The total harmonic distortions of current is about 3% for simulation results and 4.5% for an experiment results. The efficiency of the inverter is higher than 98%, and the two-switch buck-boost converter is higher than 70% at full-load.

CONCLUSION

A two-stage photovoltaic grid-connected inverter and an MPPT based on a current controlled algorithm are purposed. This modified MPPT can be well implemented to the system, and algorithm can track an operating point of photovoltaic array near the maximum power output and can rapidly identify the maximum. Simulation and experimental results verified that this proposed technique is capable of achieving a low total harmonic distortion of current. System efficiency is also higher than that of the conventional system.

ACKNOWLEDGMENT

My sincere thanks go to my colleagues who have made helpful comments during the preparation of this paper.

REFERRENECES

- [1] Y. C. Kuo, T. J. Liang, and J. F. Chen, "Novel Maximum-Power-Point-Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System", *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, Vol. 48, No. 3, June 2001, pp. 594 – 601.
- [2] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, "Development of a Microcontroller-based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System", *IEEE Trans. on Power Electr.*, Vol. 16, No. 1, January 2001, pp. 46 –54.
- [3] S. Premrudeepreechacharn, and T. Poapornsawan, "Fuzzy Logic Control of Predictive Current Control for Grid-Connected Single Phase Inverter", *Twenty-Eighth IEEE PVSC*, 2000, pp. 1715 –1718.
- [4] C. C. Hua, and J. R. Lin, "Fully Digital Control of Distributed Photovoltaic Power Systems", *ISIE 2001*, Vol. 1, pp. 1 –6.
- [5] T. J. Liang, Y. C. Kuo, and J. F. Chen, "Single-Stage Photovoltaic Energy Conversion System", *IEE Proc. – Electr. Power Appl.*, Vol. 148, No. 4, July 2001. pp. 339 – 344.
- [6] P. C. Sen, and Z. Yang, "A New DC-to-AC Inverter with Dynamic Robust Performance", *TENCON' 98*, Vol. 2, 1998, pp. 387 –390.

ประวัติผู้เขียน

นายคมกฤตย์ ชมสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 21 เมษายน 2517 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์) จากวิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา ปีการศึกษา 2533 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ ปีการศึกษา 2535 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2537

ปี พ.ศ. 2539 เข้ารับราชการในตำแหน่งอาจารย์ สังกัดภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปี พ.ศ. 2542 เปลี่ยนสภาพเป็นพนักงานในองค์การของรัฐตำแหน่งอาจารย์ สังกัดภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จนถึงปัจจุบัน