ไมโครอินเวอร์เตอร์

MICRO-INVERTER

โดย

นายคุณนิติ หงษ์ทองหล่อ

นายวัชรินทร์ ช่างพะเนา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

ไมโครอินเวอร์เตอร์
MICRO-INVERTER

โดย

นายคุณนิธิ พงษ์ทองหล่อ
นายวัชรินทร์ ช่างพะเนา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

MICRO-INVERTER

KUNNITI PONGTONGLOR
WATCHARIN CHANGPANAO

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

ปีการศึกษา 2557

ไมโครอินเวอร์เตอร์
MICRO-INVERTER

โดย

นาย คุณนิธิ พงษ์ทองหล่อ

นาย วัชรินทร์ ช่างพะเนา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สมภพ ผลไม้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ไมโครอินเวอร์เตอร์

ผู้จัดทำ

1. นาย คุณนิธิ พงษ์ทองหล่อ
2. นาย วัชรินทร์ ช่างพะเนา

....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.สมภพ ผลไม้)

ไมโครอินเวอร์เตอร์

นาย คุณนิธิ พงษ์ทองหล่อ
นาย วัชรินทร์ ช่างพะเนา
ดร. สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์พิกัดกำลัง 120 วัตต์ เป็นต้นกำเนิดพลังงาน เชื่อมต่อกันในลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผงรวมกับไมโครอินเวอร์เตอร์หนึ่งชุด ชุดไมโครอินเวอร์เตอร์นี้ประกอบไปด้วยวงจรแปรผันไฟตรงซึ่งเลือกใช้วงจรพุชพูลคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเปรียบเสมือนการนำฟอร์เวิดคอนเวอร์เตอร์สองชุดมาทำงานร่วมกันโดยผลัดกันทำงานในแต่ละครึ่งคาบเวลาในลักษณะกลับเฟส ทำให้จ่ายกำลังได้สูง และใช้เทคนิคเฟสคอนโทรลดีซีทูเอซีคอนเวอเตอร์ ในการในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตโดยมีหน่วยประมวลผลซึ่งใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) รุ่น TMS320F28335 ในการควบคุมการทำงานของชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ ซึ่งได้ทำการสร้างเครื่องต้นแบบไมโครอินเวอร์เตอร์และทำการทดสอบจริงซึ่งผลการทำงานของเครื่องต้นแบบไมโครอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายโหลดได้ทั้งโหลดตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ตามที่ออกแบบไว้และสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้ชุดไมโครอินเวอร์เตอร์สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้

MICRO-INVERTER

Mr.Kunniti Pongtonglor
Mr.Watcharin Changpanao
Dr.Sompob Polmai Advisor

ABSTRACT

This thesis present analysis, design and construction of a prototype micro inverter for 120 watts photovoltaic module. Micro inverter has two power conversion stage. One is Push-Pull converter with 50 kHz switching frequency. The advantages of this technique are high power. The other is Phase-controlled DC-AC converter with high-frequency switching that switch consist of mosfet and diode. Each pair of switch was alternately operated with 50 KHz. The advantages of this technique are simple and high efficiency and power can flow bidirectional through this converter. Digital signal processor (DSP) TMS380F28335 is used for control the operation of the micro inverter. Finally a micro-inverter able to supply R L C load as designed and will be develop to connect to the system in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดี และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ตลอดจนท่านอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆให้กับผู้จัดทำโครงงาน

ขอขอบคุณคุณเพื่อนๆพี่ๆร่วมห้องปฏิบัติการ PEARL โดยเฉพาะพี่ศรายุทธ จิตประสงค์และพี่โทนี่ ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำมาโดยตลอดในการทำโครงงาน

ขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมระบบพลังงานที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำโครงงานครั้งนี้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณปุณยวีร์ ฉายศิริ ที่คอยให้คำแนะนำต่างๆในการทำโครงงาน

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I

ABSTRACT II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญรูป VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาทำการวิจัย 2

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน 4

1.4 วิธีการและขั้นตอนการดำเนินโครงงาน 5

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 การผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ 6

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ 6

2.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 6

2.2.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ 9

2.2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Crystalline Solar cell) 9

2.2.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบาง (Thin-Film Solar Cell) 10

2.2.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นผลึกแกลเลียม์อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Solar cell) 10

2.2.3 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 10

2.3 รูปแบบการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ 11

2.3.1 รูปแบบของอินเวอร์เตอร์สำหรับผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ 12

2.4 Phase-Controlled DC-AC Converter with High-Frequency Switching 15

2.5 การวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟสลับโดยใช้การควบคุมเฟสของพัลส์ความถี่สูง 18

2.5.1 กรณี 1 Q_1และ Q_3นำกระแส (ช่วงเวลา t_1, t_2) 19

2.5.2 กรณี 2 Q_1และ Q_4นำกระแส (ช่วงเวลา t_2, t_3) 20

2.5.3 กรณี 3 Q_2และ Q_4นำกระแส (ช่วงเวลา t_3, t_4) 21

2.5.4 กรณี 4 Q_2และ Q_3นำกระแส (ช่วงเวลา t_4, t_5). 21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างโมดูลไมโครอินเวอร์เตอร์ 23

3.1 การจำลองผลวงจรไมโครอินเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม PowerSimulation (PSIM) 23

3.1.1 วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ 23

3.1.1.1 ความต้านทาน 24

3.1.1.2 กระแสขาออก 24

3.1.1.3 อัตราส่วนจำนวนรอบ ของหม้อแปลงไฟฟ้า 24

3.1.1.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ 25

3.1.1.5 การเลือกตัวเก็บประจุ 25

3.2 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ 26

3.2.1 การเลือกพิกัดอุปกรณ์ 26

3.2.1.1 มอสเฟต 26

3.2.1.2 ไดโอด 27

3.2.2 การพันหม้อแปลงเซนเตอร์แทป 27

3.2.3 วงจรขับมอสเฟส 29

3.2.4 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันระบบไฟฟ้า 30

3.2.5 วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแสระบบไฟฟ้า 31

3.2.6 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรตรวจวัดสัญญาณ 33

3.3 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processing, DSP) 34

บทที่ 4 ผลการทดลอง 35

4.1 ผลการทดสอบวงจรไมโครอินเวอร์เตอร์ 35

4.1.1 สัญญาณขับเกต 36

4.1.2 แรงดันที่ขั้วหม้อแปลง 37

4.1.3 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวิตซ์ Q2,Q3 38

4.1.3.1 ช่วงการสวิตซ์โดยที่ Duty มีค่าประมาณ 1 38

4.1.3.2 ช่วงการสวิตซ์โดยที่ Duty มีค่าประมาณ 0.5 39

4.1.3.3 ช่วงการสวิตซ์โดยที่ Duty มีค่าประมาณ 0 40

4.1.4 แรงดันเอาท์พุต 41

4.1.5 การทดลองจ่ายโหลด 42

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 46

5.1 สรุปผลการทดลอง 46

เอกสารอ้างอิง 47

ภาคผนวก 48

ภาคผนวก ก 49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข	54
ภาคผนวก ค	68
ประวัติผู้เขียน	71

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 1.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 1
รูปที่ 1.2 อินเวอร์เตอร์หลักเพียงตัวเดียว 2
รูปที่ 1.3 อินเวอร์เตอร์ในแต่ละสาย 3
รูปที่ 1.4 ไมโครอินเวอร์เตอร์ 4
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลทางอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์ 7
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ 7
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ 8
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ 9
รูปที่ 2.5 รูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ 11
รูปที่ 2.6 ไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับต่อเข้ากับกริด 12
รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์แบบมีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์และมีการแยกกราวด์. 12
รูปที่ 2.8 อินเวอร์เตอร์แบบมีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แต่ไม่มีการแยกกราวด์ 13
รูปที่ 2.9 อินเวอร์เตอร์แบบไม่มีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แต่มีการแยกกราวด์ 14
รูปที่ 2.10 อินเวอร์เตอร์แบบไม่มีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์และไม่มีการแยกกราวด์ 14
รูปที่ 2.11 วงจรพื้นฐานของวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟสลับโดยใช้การควบคุมเฟสของพัลส์ 15
รูปที่ 2.12 รูปแบบการสวิตซ์และแรงดันขาออก 16
รูปที่ 2.13 แสดงการทำงานทั้ง 4 โหมด 16
รูปที่ 2.14 วงจร Phase-Controlled DC-AC Converter 17
รูปที่ 2.15 วงจรพุช-พูล อินเวอร์เตอร์ 18
รูปที่ 2.16 แสดงช่วงเวลาการทำงานของสวิตซ์ Q_1-Q_4 19
รูปที่ 3.1 วงจรไมโครอินเวอร์เตอร์ที่ใช้จำลองผลในโปรแกรม PSIM 23
รูปที่ 3.2 ค่ากระแสและแรงดันของมอสเฟตด้านไพรมารี่ 26
รูปที่ 3.3 ค่ากระแสและแรงดันของมอสเฟตด้านเซคคั่นดารี่ 26
รูปที่ 3.4 แรงดันตกคร่อมและกระแสของไดโอด D1 27
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานจริงของหม้อแปลงเซ็นเตอร์แทป 29
รูปที่ 3.6 วงจรขับมอสเฟส 29
รูปที่ 3.7 ชิ้นงานจริงของวงจรขับเกต 30
รูปที่ 3.8 การต่อใช้งานของ LEM LV 25-P 30
รูปที่ 3.9 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันระบบไฟฟ้า 31
รูปที่ 3.10 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันระบบไฟฟ้าที่สร้างขึ้น 31
รูปที่ 3.11 Current Tranduser CSNX25 (Honeywell) 32
รูปที่ 3.12 วงจรยกระดับและขยายสัญญาณกระแส 32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 3.13 วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแสระบบไฟฟ้าที่สร้างขึ้น 32
รูปที่ 3.14 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรตรวจวัดสัญญาณ 33
รูปที่ 3.15 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรตรวจวัดสัญญาณที่สร้างขึ้น 33
รูปที่ 3.16 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) 34
รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งการวัดของชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ 35
รูปที่ 4.2 สัญญาณขับมอสเฟส Q1,Q3,Q2,Q4 ตามลำดับ 36
รูปที่ 4.3 แรงดันที่ขั้วหม้อแปลง Vs1,Vs2 37
รูปที่ 4.4 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวิตซ์ Q2,Q3 Duty การสวิตซ์มีค่าประมาณ 1 38
รูปที่ 4.5 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวิตซ์ Q2,Q3 Duty การสวิตซ์มีค่าประมาณ 0.5 39
รูปที่ 4.6 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวิตซ์ Q2,Q3 Duty การสวิตซ์มีค่าประมาณ 0 40
รูปที่ 4.7 แรงดันเอาท์พุตจากชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ 41
รูปที่ 4.8 แรงดันและกระแสเอ้าท์พุทขณะจ่ายโหลด 42
รูปที่ 4.9 แรงดันเอ้าพุทและกระแสอินพุทขณะจ่ายโหลด 100 วัตต์ 44
รูปที่ 4.10 ชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ที่ได้สร้างขึ้นจริง 45

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

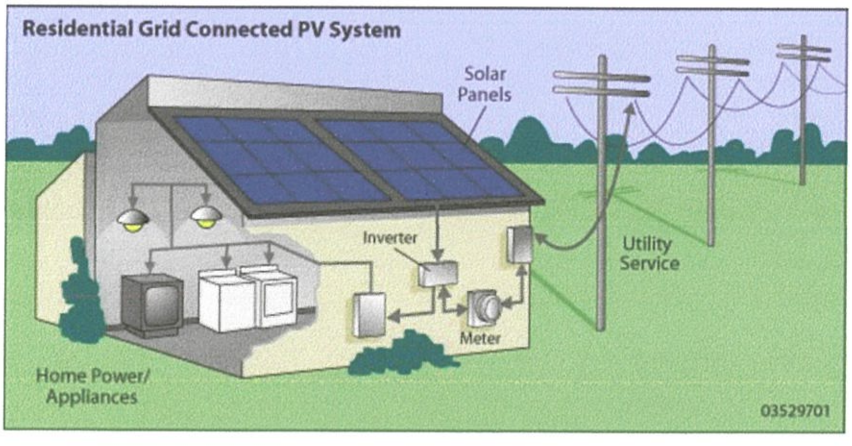
เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าปริมาณสำรองของพลังงานจากฟอสซิล (ก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน) บนโลกนี้กำลังจะหมดไปหากมนุษย์เราไม่สามารถค้นหาแหล่งพลังงานใต้พิภพเพิ่มเติมได้อีกทำให้มนุษย์จึงเร่งหาพลังงานทดแทนชนิดอื่นๆมาเพื่อนำมาใช้แทนพลังงานจากฟอสซิลทำให้หลายประเทศทั่วโลกหันมาส่งเสริมการผลิตและการใช้พลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและใช้ไม่มีวันหมด

1.1.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่ายประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอาจจะมีพิกัดกำลังฟ้าอยู่ในช่วง 10W – 300W ต่อแผง โดยที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์แปลงผันพลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งอาจจะมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งสำรองพลังงานในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้อง

<u>**อินเวอเตอร์สำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid-Tie Inverter)**</u>

บ้านพักอาศัยทั่วไปอาจมีการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1.1 ทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์หรือทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) จะช่วยหาจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ส่วนทางด้านระบบฟ้าหรือทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะต้องมีรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่และมุมเฟสตรงกันกับระบบไฟฟ้า รวมทั้งแรงดันไฟฟ้าควรจะสูงกว่าระบบไฟฟ้าเล็กน้อย เพื่อให้ง่ายต่อการผลักดันกระแสไฟฟ้าไปยังระบบไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

<u>ผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์</u>

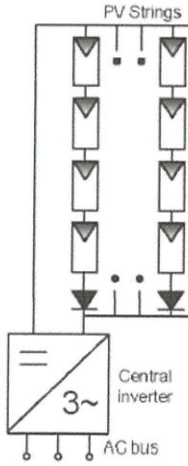
อินเวอเตอร์สำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมีพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 175W และอาจมากกว่า 10kW และมีการเชื่อมต่ออยู่ในรูปแบบหลายๆสตริง (String) โดยที่ใช้อินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียวในการแปลงผันกำลังไฟฟ้า ต่อมามีวิธีการพัฒนาและวิธีการเชื่อมต่อและแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างออกไปเรียกว่า ไมโครอินเวอร์เตอร์ เป็นการเชื่อมต่อในลักษณะรวมเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผงเข้ากับอินเวอร์เตอร์หนึ่งตัวเป็นหนึ่งโมดูล (module) และติดตั้งบนหลังคาบ้านได้ทันที ข้อเปรียบเทียบของอินเวอร์เตอร์ที่มีจำหน่ายในเชิงพานิชย์แสดงดังตารางที่ 1.1

1.1.2 พัฒนาการของอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เพียงหนึ่งแผงมีกำลังไฟฟ้าไม่มากนัก จึงมีการรวบรวมกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์หลายแผงเข้าด้วยกัน ซึ่งมีการคิดค้นรูปแบบของการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษระต่างๆ โดยที่อาจแบ่งออกได้ 3 ประเภทดังนี้

1. อินเวอร์เตอร์หลักเพียงตัวเดียว (Centralized Inverter)

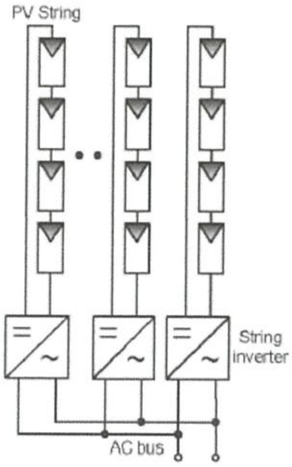
อินเวอร์เตอร์ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าและส่งจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะมีเพียงตัวเดียว ดังรูปที่ 1.2 โดยที่เซลล์แสงอาทิตย์จะต่ออนุกรมกันเรียกว่าสตริงเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นและหลายๆสตริงจะต่อขนานกันเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น ซึ่งข้อเสียของเทคโนโลยีนี้คือ ต้องใช้สายไฟเส้นใหญ่ มีความสูญเสียและมีข้อจำกัดในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ส่งผลให้ระสิทธิภาพต่ำลงและมีความน่าเชื่อถือต่ำ ปัจจุบันมีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมน้อย และไม่นิยมมาใช้กับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สมัยใหม่



รูปที่ 1.2 อินเวอร์เตอร์หลักเพียงตัวเดียว

2. อินเวอร์เตอร์ในแต่ละสาย (String Inverter)

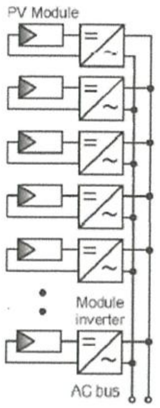
เทคโนโลยีแสดงในรูปที่ 1.3 ได้แก้ปัญหาของการออกแบบในหัวข้อที่ผ่านมา เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงจะต่ออนุกรมกับอินเวอร์เตอร์หนึ่งตัว มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละสตริง และมีต้นทุนต่ำกว่าในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม รูปแบบการเชื่อมต่อแบบนี้เป็นที่นี้เป็นที่นิยมในการติดตั้งสมัยใหม่ อย่างงไรก็ตามอาจมีปัญหาในเรื่องของการบังเงาบางส่วน ซึ่งการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดอาจมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 1.3 อินเวอร์เตอร์ในแต่ละสาย

3. ไมโครอินเวอร์เตอร์ (Micro-Inverters)

ไมโครอินเวอร์เตอร์อาจจะเรียกว่าเอซีโมดูล (AC Module) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 เป็นการรวมอินเวอร์เตอร์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ชิ้นเดียวกัน การควบคุมเป็นอิสระกันในแต่ละโมดูล เพราะฉะนั้นจึงหมดปัญหาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพราะมีการติดตามในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีความเหมาะสมในการผลิตเชิงอุตสากรรม เนื่องจากต้นทุนในการผลิตต่ำ และราคาผลิตต่อหน่วยต่ำ เทคโนโลยีนี้เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่มีกำลังผลิตไฟฟ้าต่ำและมักมีปัญหาในเรื่องการบังเงาบางส่วน ทั้งนี้หากมีการติดตั้งจำนวนมาก ต้นทุนในการบำรุงรักษาอาจจะสูงขึ้น เนื่องจากมีอินเวอร์เตอร์จำนวนมาก และหากอินเวอร์เตอร์ตัวใดทำงานผิดพลาด การระบุตำแหน่งที่ชัดเจนและรวดเร็วจึงเป็นไปได้ยาก เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีระบบตรวจจับความล้มเหลวในการทำงานของไมโครอินเวอร์เตอร์ และส่งข้อมูลนั้นสู่ส่วนกลางตลอดเวลา อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์แบบนี้กำลังเป็นที่นิยมและจะครองส่วนแบ่งตลาดสูงขึ้นในอนาคต



รูปที่ 1.4 ไมโครอินเวอร์เตอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาระบบ Micro – Inverter ที่มีการจำหน่ายในปัจจุบัน
2. เสนอแนวคิดการใช้เทคนิค Phase-Controlled with High-Frequency ในการออกแบบ Micro-Inverter
3. ออกแบบสร้าง Micro – Inverter สำหรับแผงโซลาร์เซลล์ พิกัดไม่เกิน 300 วัตต์ โดยใช้เทคนิคตามข้อ 2
4. ส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

ขอบเขตของโครงงาน เป็นการศึกษาการทำงานของไมโครอินเวอเตอร์ขนาดพิกัดไม่เกิน 300 วัตต์ โดยใช้หลักการออกแบบของ วงจร Push-Pull Inverter โดยในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงได้มีการศึกษาหลักการพื้นฐานการออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยวิธีทั่วไป

1.4 วิธีการและขั้นตอนการดำเนินงานโครงงาน

1. ศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า
2. จำลองการทำงานของมโครอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Psim
3. ออกแบบวงจรไมโครอินเวอร์เตอร์
4. ทดสอบและเก็บผลการทดลอง
5. สรุปผลทำวิจัย

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์

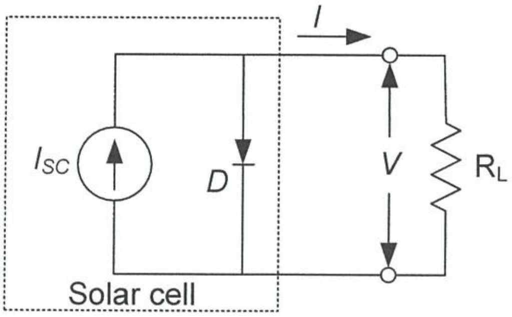
ปัจจุบันพลังงานจากแสงอาทิตย์นับว่าเป็นพลังงานหมุนเวียนอีกทางเลือกหนึ่ง ที่จะมาทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียม เนื่องจากราคาของปิโตรเลียมพุ่งสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ยังคงมีอุปสรรคในด้านต้นทุนค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับพลังงานอื่นที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งต้นทุนของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี วัตถุดิบ รวมถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เช่น ค่าแรง ขนาดของตลาด เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำแบบผลึกซิลิกอน (Silicon crystal) มีใช้งานในเชิงพาณิชย์มากกว่า 80% ของตลาด เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและราคายังคงสูงเช่นกัน ส่วนประเภทฟิล์มบางแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous silicon thin film) มีส่วนแบ่งทางการตลาดประมาณ 11% เนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำกว่าและราคาต่ำกว่าเช่นกัน ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาฟิล์บางให้มีประสิทธิภาพและตวามคงทนมากขึ้น อาทิเช่น Copper Indium Gallium Cadmium เป็นต้น สำหรับเทคโนโลยีที่กำลังพัฒนาและมีแนวโน้มใช้งานในเชิงพาณิชย์ในระยกลางคือ Micro Crystalline ส่วนระยะยาวอาจจะเป็น Dye Sensitized Cell ซึ่งทั้งสองชนิดจะมีราคาถูกลงมาก แต่ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำในปัจจุบัน

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรงซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์โฟโตโวลเตอิก (Photovoltaic phenomenon) การเปลี่ยนแปลงพลังงานด้วยวิธีนี้จะไม่มีส่วนเคลื่อนที่ใดๆ ทำให้มีข้อดีในเรื่องความสะดวกต่อการนำไปใช้งาน มีการบำรุงรักษาที่ง่าย และอายุการใช้งานยาวนาน การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้ายังมีอุปสรรคในเรื่องราคาเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ เนื่องจากประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 8 -15 % เท่านั้น ดังนั้นการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ตลอดเวลาจึงเป็นสิ่งจำเป็น

2.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

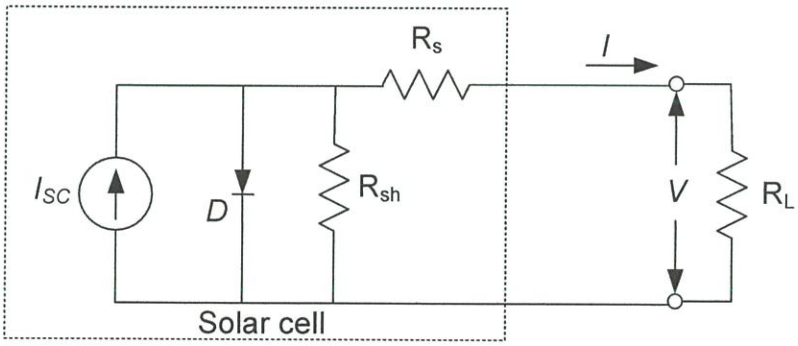
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นมาจากวัสดุกึ่งตัวนำเหมือนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โครงสร้างวัสดุสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) เหมือนไดโอด ดังนั้นคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติจึงสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสขนานกับไดโอดดังรูปที่ 2.1 ซึ่งปริมาณกระแส I_{SC} นี้กำเนิดจากปรากฏการณ์โฟโตโวลเตอิกที่ความเข้มข้นของแสงค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ส่วนไดโอดจะแสดงถึงคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นค่ากระแสจ่ายออกจึงสามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างของกระแส I_{SC} ที่กำเนิดจากแสงอาทิตย์กับกระแสของไดโอดดังแสดงในสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลทางอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = I_{SC} - I_O \left[e^{\left(\frac{qV}{AkT}\right)} - 1 \right] \tag{2.1}$$

อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ดังในรูปที่ 2.2 มีทั้งความต้านทานที่ขนานและความต้านทานที่อนุกรมกับวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ สมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.2

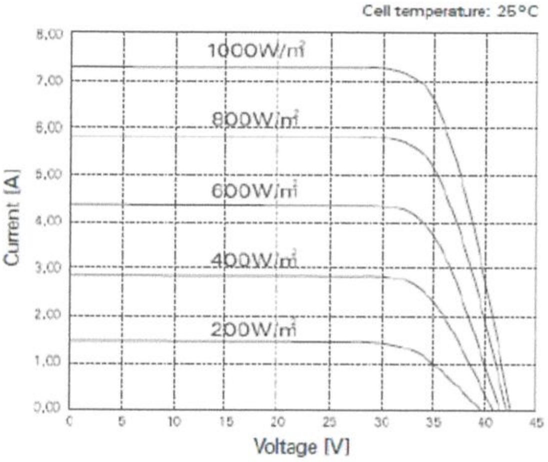


รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = I_{SC} - I_O \left[e^{\left(\frac{qV}{AkT}\right)} - 1 \right] - \frac{(V+IR_S)}{R_{sh}} \tag{2.2}$$

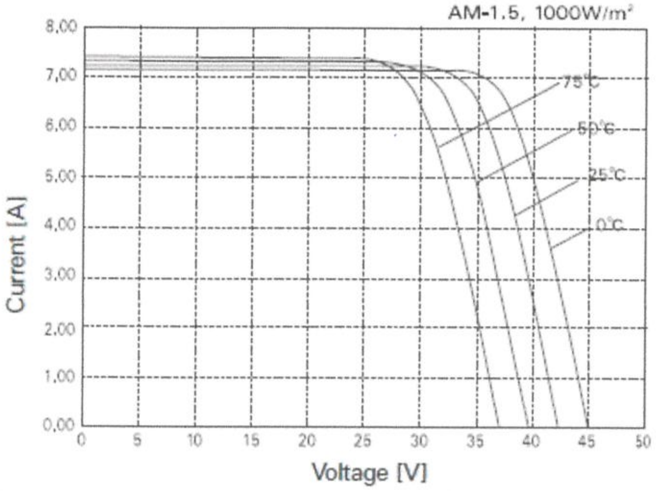
จากสมการที่ 2.2 อธิบายความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันจ่ายออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ในสภาวะที่ไม่มีเซลล์แสงอาทิตย์จะมีคุณสมบัติเหมือนไดโอด เนื่องจากมีโครงสร้างของวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกัน แต่เมื่อให้แสงกับเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลเตอิกขึ้นทำให้เกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้าออกมา เมื่อพิจารณาในสภาวะเปิดวงจร กระแสจะไหลเข้าไดโอดทั้งหมดทำ

ให้กระแสจ่ายออกจะมีค่าเป็นศูนย์ ในทางกลับกันถ้าลัดวงจรกระแสจ่ายออกก็จะไหลออกสู่วงจรภายนอกทั้งหมด เมื่อเปลี่ยนค่าความเข้าของแสงจะเป็นผลให้ค่ากระแส I_{SC} มีค่าเปลี่ยนไปด้วยซึ่งแปลผันตรงกับค่าความเข้มของแสง ในขณะที่ค่าแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรืออาจกล่าวได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแส



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25 °C คงที่เปลี่ยนแปลงระดับค่าความเข้มแสงที่ค่าต่างๆ

ความเข้มแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าแสงมีความเข้มแสงต่ำจำทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ต่ำเช่นเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความเข้มแสงมากก็จะผลิตไฟฟ้าได้มากเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปเมื่อปริมาณความเข้มแสงเปลี่ยนไปค่ากระแสสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะมีค่าเปลี่ยนตาม ในขณะที่แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 คงที่ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ

รูปที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่ออุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ลดลง จากรูปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ในขณะที่กระแสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.2.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

วิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์มีมาหลายทศวรรษแล้ว เซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงแรกผลิตขึ้นจากซีลิเนียม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานประมาณ 1-2 % จึงทำให้การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ไม่แพร่หลายมากนัก จนถึงในช่วง พ.ศ. 2493 ได้มีการผลิตซิลิกอนขึ้นได้สำเร็จเป็นครั้งแรกโดยกระบวนการ Czochraki ซึ่งเป็นจุดสำคัญต่อวิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ถูกลง เพิ่มอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานให้สูงขึ้นด้วย ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท

2.2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Crystalline Solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกที่ใช้งานในปัจจุบันส่วนมากผลิตจากซิลิกอน เนื่องจากได้มีการพัฒนาทั้งด้านราคา อายุการใช้งาน และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานเรื่องมา ในช่วงแรกเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวจะมีราคาประมาณ 1,000 บาทต่อวัตต์ ในช่วง พ.ศ. 2516 ลดลงเป็นประมาณ 125 บาทต่อวัตต์ ในปี พ.ศ. 2534 และได้มีการพัฒนาอายุการใช้งานให้เพิ่มขึ้นเกิน 30 ปีในปัจจุบัน ในด้านประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน ถูกกำจัดด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิกอน คือมีค่าสูงสุดได้ประมาณ 29 % จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการคิดค้นพัฒนาในการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แทนซิลิกอน เช่น แกลเลียมอาเซ

ไนด์ (GaAs) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงกว่าซิลิกอน คือจะมีค่าประมาณ 31 % แต่ยังถูกจำกัดโดยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากราคาของสารดังกล่าวยังแพงกว่าซิลิกอน

2.2.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบาง (Thin-Film Solar Cell)

เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นมาเพื่อลดราคาให้ถูกว่าแบบแรก เนื่องจากกระบวนการผลิตใช้ปริมาณสารกึ่งตัวนำน้อยกว่าแบบแรก โดยปกติใช้อะมอฟัสซิลิกอน (a-si) จำนวนเล็กน้อยฉาบลงบนผิวของวัสดุชนิดอื่น แต่จะมีข้อเสียคือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำกว่าแบบแรก มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงาน 12 % ในห้องปฏิบัติการ และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในการใช้งานจริงภาคสนามประมาณ 8 % มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบางที่ทำจากอะมอฟัสซิลิกอนมีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 27 % เนื่องจากถูกกำจัดโดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอะมอฟัสซิลิกอน

2.2.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นผลึกแกลเลียม์อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Solar cell)

เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากสารชั้น P บนฐานของซิลิกอนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ชนิด N และสร้างชั้น P ชนิดแกลเลียม์อาร์เซไนด์ (GaAlAs) ลักษณะโครงสร้างจะคล้ายผลึกเดี่ยว เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพในการแปลพลังงานสูงกว่า 31 % สามารถใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลลเซียสนิยมใช้บนยานอวกาศและเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับดาวเทียม แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาสูงมาก

2.2.3 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรติดตั้งให้มีความลาดเอียงเพียงพอเพื่อที่ให้ได้รับแสงมากที่สุดและอีกเหตุผลหนึ่ง เพื่อให้เกิดการระบายน้ำฝนได้อย่างรวดเร็วเพื่อใช้เป็นการชำระสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่บนแผงได้อีกด้วย การเลือกมุมความลาดเอียงและทิศทางของแผงที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานที่ สำหรับประเทศไทยค่าที่ดีที่สุดคือ 15 องศา โดยหันหน้าไปทางทิศใต้ อีกวิธีหนึ่งที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ การปรับแผงให้เอียงตามการโคจรของดวงอาทิตย์ แต่วิธีนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจริงจึงติดตั้งแผงเซลล์ให้มีความลาดเอียงที่ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น

2.3 รูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์อาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2. อินเวอร์เตอร์หลักเพียงตัวเดียว (Centralized Inverter)

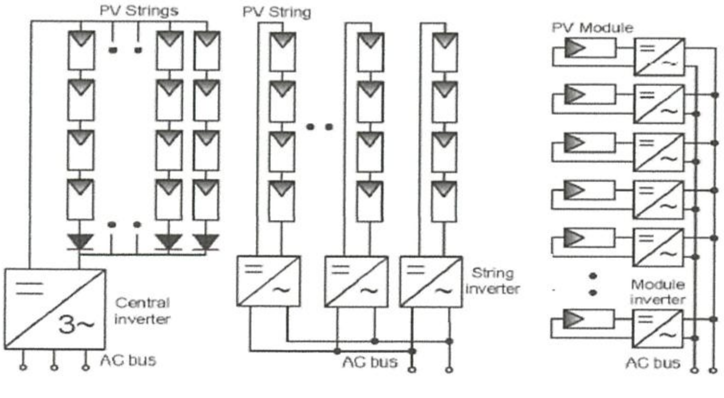
อินเวอร์เตอร์ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าและส่งจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะมีเพียงตัวเดียว โดยที่เซลล์แสงอาทิตย์จะต่ออนุกรมกันเรียกว่าสตริงเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น และหลายๆ สตริงจะต่อขนานกันเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น ซึ่งข้อเสียของเทคโนโลยีนี้คือ ต้องใช้สายไฟเส้นใหญ่ มีความสูญเสียและมีข้อจำกัดในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ส่งผลให้ระสิทธิภาพต่ำลงและมีความน่าเชื่อถือต่ำ ปัจจุบันมีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมน้อย และไม่นิยมมาใช้กับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สมัยใหม่

3. อินเวอร์เตอร์ในแต่ละสาย (String Inverter)

เทคโนโลยีนี้ ได้แก้ปัญหาของการออกแบบในหัวข้อที่ผ่านมา เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงจะต่ออนุกรมกับอินเวอร์เตอร์หนึ่งตัว มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละสตริง และมีต้นทุนต่ำกว่าในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม รูปแบบการเชื่อมต่อแบบนี้เป็นที่นี้เป็นที่นิยมในการติดตั้งสมัยใหม่ อย่างงไรก็ตามอาจมีปัญหาในเรื่องของการบังเงาบางส่วน ซึ่งการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดอาจมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร

4. ไมโครอินเวอร์เตอร์ (Micro-Inverters)

ไมโครอินเวอร์เตอร์อาจจะเรียกว่าเอซีโมดูล (AC Module) หรือ PV Module เป็นการรวมอินเวอร์เตอร์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ชิ้นเดียวกัน การควบคุมเป็นอิสระกันในแต่ละโมดูล เพราะฉะนั้นจึงหมดปัญหาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพราะมีการติดตามในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีความเหมาะสมในการผลิตเชิงอุตสากรรม เนื่องจากต้นทุนในการผลิตต่ำ และราคาผลิตต่อหน่วยต่ำ เทคโนโลยีนี้เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่มีกำลังผลิตไฟฟ้าต่ำและมักมีปัญหาในเรื่องการบังเงาบางส่วน ทั้งนี้หากมีการติดตั้งจำนวนมาก ต้นทุนในการบำรุงรักษาอาจจะสูงขึ้น เนื่องจากมีอินเวอร์เตอร์จำนวนมาก และหากอินเวอร์เตอร์ตัวใดทำงานผิดพลาด การระบุตำแหน่งที่ชัดเจนและรวดเร็วจึงเป็นไปได้ยาก เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีระบบตรวจจับความล้มเหลวในการทำงานของไมโครอินเวอร์เตอร์ และส่งข้อมูลนั้นสู่ส่วนกลางตลอดเวลา อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์แบบนี้กำลังเป็นที่นิยมและจะครองส่วนแบ่งตลาดสูงขึ้นในอนาคต



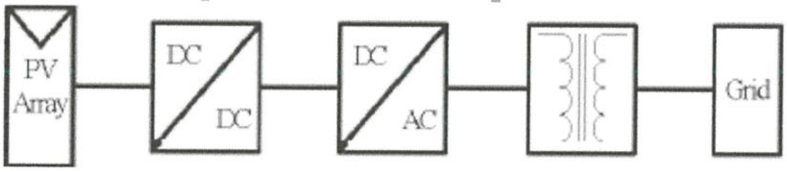
รูปที่ 2.5 รูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

ปัจจุบันมีหลายบริษัทได้ผลิตและจำหน่ายไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์แล้ว ตัวอย่างของไมโครอินเวอเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.6

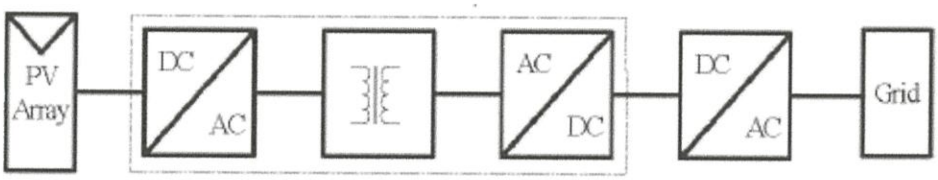
รูปที่ 2.6 ไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับต่อเข้ากับกริด

2.3.1 รูปแบบของอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

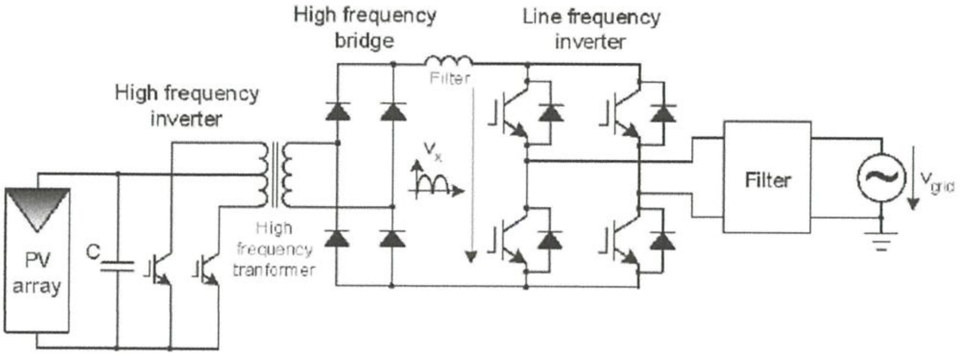
อินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ อาจแบ่งตามลักษณะการแปลงผันพลังงานได้ 4 รูปแบบ ดังนี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์แบบมีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์และมีการแยกกราวด์

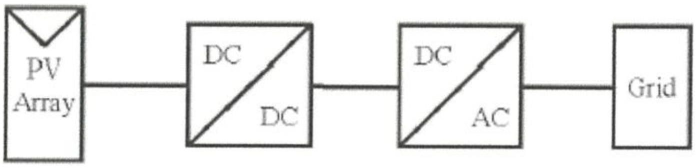
1. อินเวอร์เตอร์แบบมีดีซี-ดีซีและมีการแยกกราวด์

การแยกกราวด์ทางไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการใช้หม้อแปลง ซึ่งสามารถวางได้ทั้งทางด้านความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 2.7(ก) หรือวางทางด้านความถี่สูง ดังรูปที่ 2.7(ข) หม้อแปลงความถี่สูงจะมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา แต่ต้องมีการออกแบบอย่างเหมาะสมเพื่อให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำ

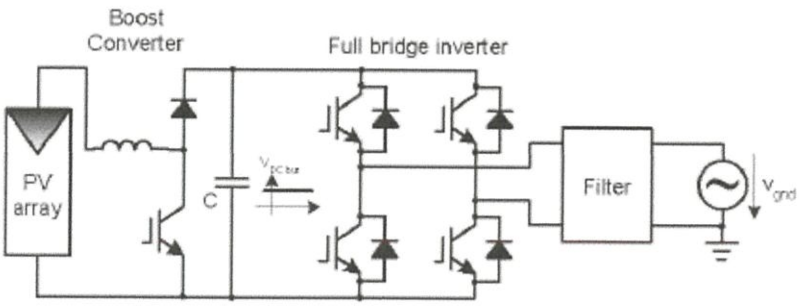
จากรูปที่ 2.7(ค) แสดงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพื่อแยกกราวด์ในวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter)

2. อินเวอร์เตอร์แบบมีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แต่ไม่มีการแยกกราวด์

ในบางประเทศไม่มีการแยกกราวน์กับระบบไฟฟ้า เพราะฉะนั้นอินเวอร์เตอร์ในรูปแบบนี้อาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.8(ก) สำหรับตัวอย่างการใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 2.8(ข) ซึ่งเป็นวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter)



(ก)

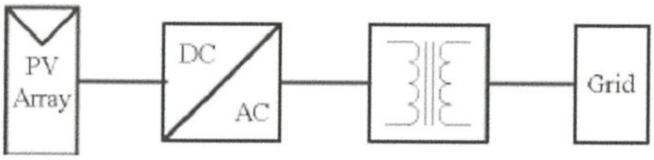


(ข)

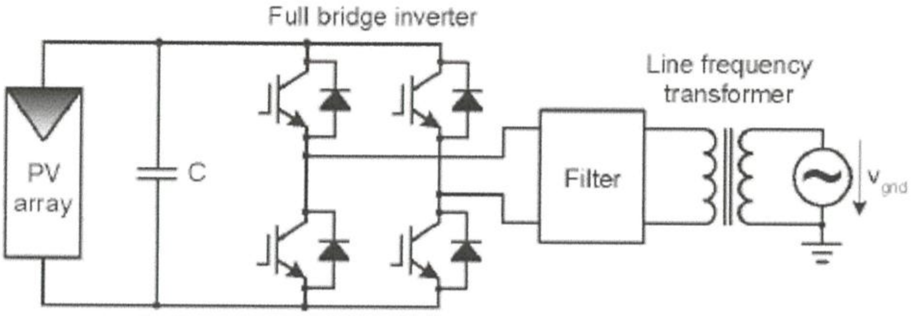
รูปที่ 2.8 อินเวอร์เตอร์แบบมีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แต่ไม่มีการแยกกราวด์

3. อินเวอร์เตอร์แบบไม่มีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แต่มีการแยกกราวด์

จากรูปที่ 2.9(ก) แสดงการใช้อินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า ซึ่งต่อผ่านหม้อแปลงความถี่ต่ำเพื่อแยกกราวด์ สำหรับตัวอย่างการใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 2.9(ข) ซึ่งเป็นวงจรฟูลบริดอินเวอร์เตอร์ (Full bridge inverter)



(ก)

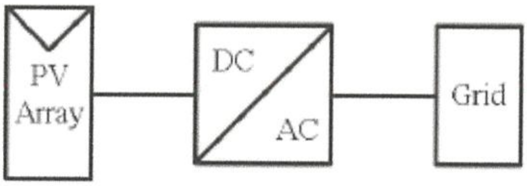


(ข)

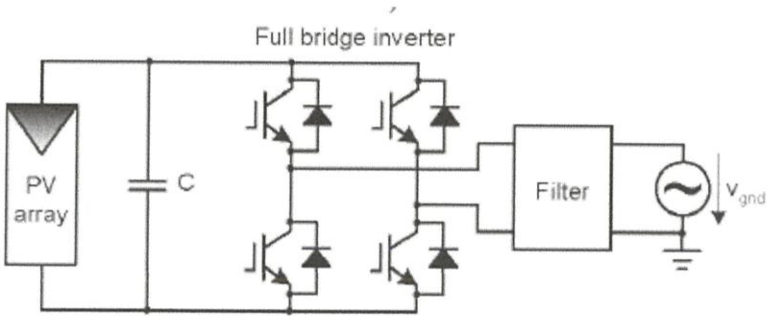
รูปที่ 2.9 อินเวอร์เตอร์แบบไม่มีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แต่มีการแยกกราวด์

4. อินเวอร์เตอร์แบบไม่มีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์และไม่มีการแยกกราวด์

ระบบนี้แสดงดังรูปที่ 2.10(ก) และจากรูปที่ 2.10(ข) เป็นวงจรฟูลบริดอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะกับระบบที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกันจำนวนมากและให้ค่าแรงดันสูงทุกช่วงเวลา



(ก)



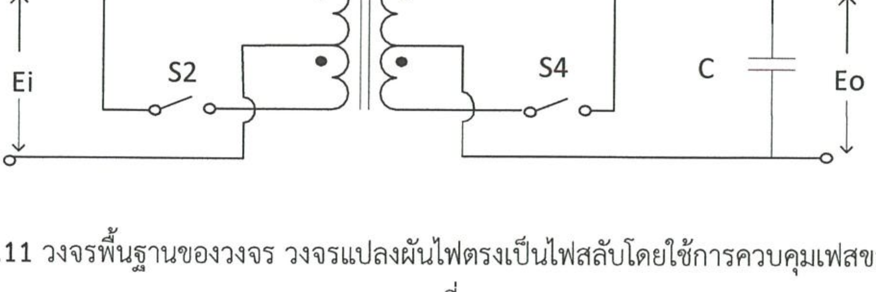
(ข)

รูปที่ 2.10 อินเวอร์เตอร์แบบไม่มีดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์และไม่มีการแยกกราวด์

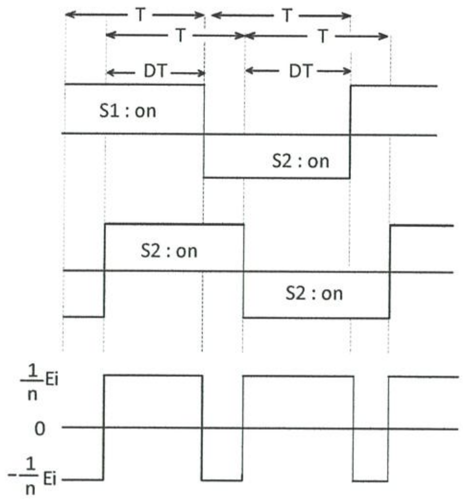
2.4 Phase-Controlled DC-AC Converter with High-Frequency Switching

Phase-Controlled DC-AC Converter with High-Frequency Switching เป็นวงจรที่มีสวิตช์คู่ทั้งในฝั่งปฐมภูมิและฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงแยกโดด อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันจะถูกควบคุมโดยความต่างเฟสของสวิตช์ทั้งสองคู่ กระแสและแรงดันกระชากในระหว่างการสับเปลี่ยนสวิตช์หรือการสวิตช์ชิ่งจะถูกลดลงโดยขดลวดที่ถูกแยกเป็นสองตัว สามารถลดขนาดของหม้แปงลงได้เป็นผลมาจากการที่เพิ่มความถี่ในการสวิตช์ชิ่งและวงจรนี้สามารถจ่ายโหดลรีแอคทีพได้อีกด้วย วงจรPhase-Controlled DC-AC Converter นี้เหมาะสำหรับวงจร Uninterruptible power supply (UPS)และสามารประยุกค์ใช้สำหรับวงกร Micro Inverter ได้อีกด้วย

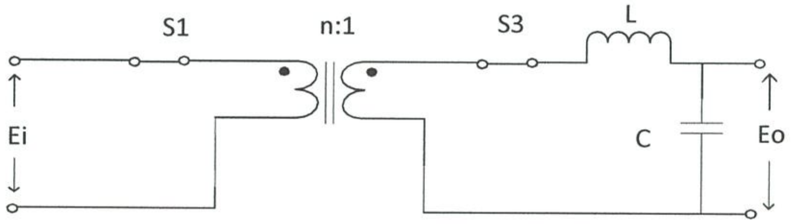
วงจรพื้นฐานของวงจร Phase-Controlled DC-AC Converter ได้แสดงในรูปที่ 2.11 สวิตช์ S_1และ S_2 ในสฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงทำการเปิดและปิดสลับกันซ้ำไปซ้ำมาโดยมี Duty ratio ใกล้เคียง 50 เปอร์เซ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สวิตช์ S_3 และ S_4 ในฝั่งทุตยภูมิทำการเปิดและปิดสลับกันซ้ำไปซ้ำมาและทำงานเช่นเดียวกันกับฝั่งปฐมภูมิ สวิตช์ในฝั่งปฐมภูมิและฝั่งทุติยภูมิจะทำงานโดยมีความต่างเฟสเท่ากับ DT เมื่อ D คือ เวลาที่ทำงานสอดคล้องกันของ Duty ratio ของวงจรคอนเวอร์เตอนี้



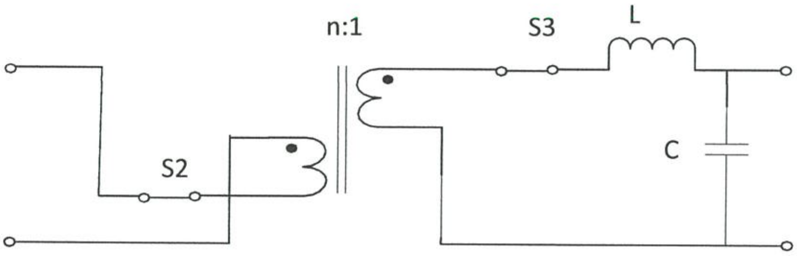
รูปที่ 2.11 วงจรพื้นฐานของวงจร วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟสลับโดยใช้การควบคุมเฟสของพัลส์ความถี่สูง



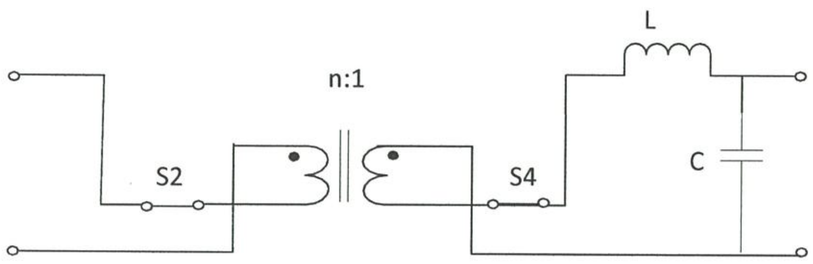
รูปที่ 2.12 รูปแบบการสวิตซ์และแรงดันขาออก



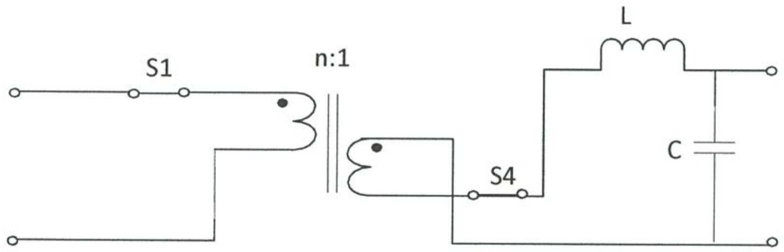
(ก)



(ข)



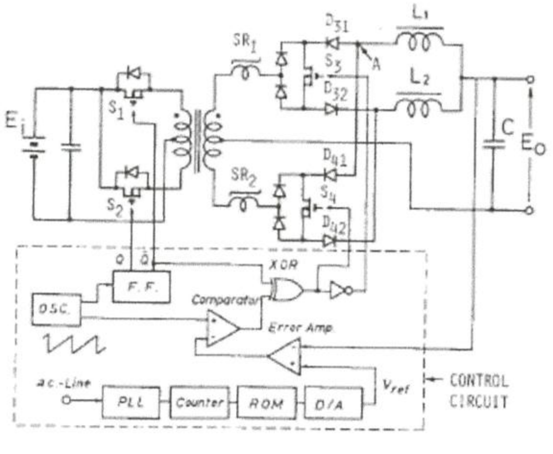
(ค)



(ง)

รูปที่ 2.13 แสดงการทำงานทั้ง 4 โหมด

จากเงื่อนไขของสวิตช์ทั้ง 4 การทำงานของคอนเวอร์เตอจะถูกแบ่งออกเป็น 4 โหมดดังที่แสดงในรูปที่ 2.13 (ก)-(ง) โดยที่รูป(ก) S_1 : on, S_3 : on, S_2 : off, S_4 : off. (ข)S_2: on, S_3 : on, S_1: off, S_4 : off. (ค) S_2 : on, S_4 : on, S_2 : off, S_3 : off. (ง) S_1 : on, S_4 : on, S_2 : off, S_3 : off



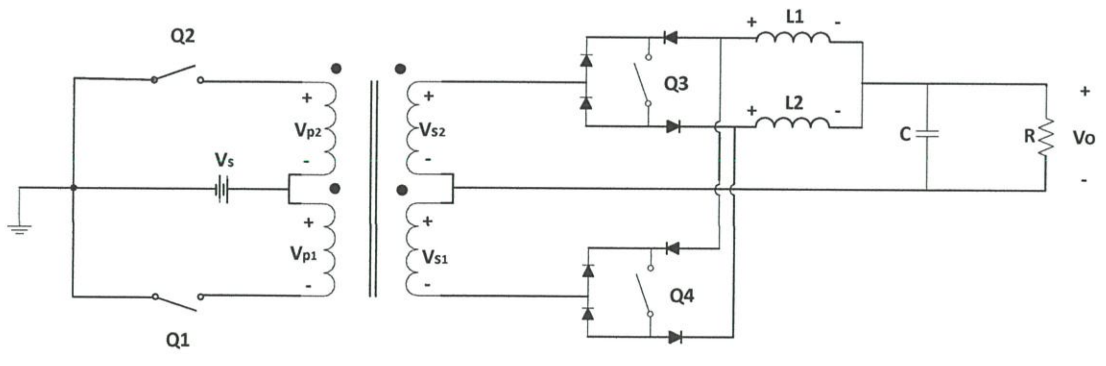
รูปที่ 2.14 วงจร Phase-Controlled DC-AC Converter with High-Frequency Switching

ในวงจรพื้นฐานของวงจร Phase-Controlled DC-AC Converter ที่แสดงในรูปที่ 2.15 นั้นสามารถเกิดกระแสกระชากหรือแรงดันกระชากสูงๆได้ในระหว่างการสับเปลี่ยนระหว่างสวิตช์ S_3และ S_4ในกรณีที่เกิดการคาบเกี่ยวหรือซ้อนกัน ฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงจะเกิดการลัดวงจร เนื่องจากสวิตช์ S_3 และ S_4 เกิดการลัดวงจร ในแง่ของวงจรจริง เป็นไปได้ยากหรือแทบเป็นไปไม่ได้เลย ที่สวิตช์ S_3 และ S_4 จะทำงานโดยไม่เกิดการคาบเกี่ยวหรือซ้อนกันในระหว่างการสับเปลี่ยนสวิตช์

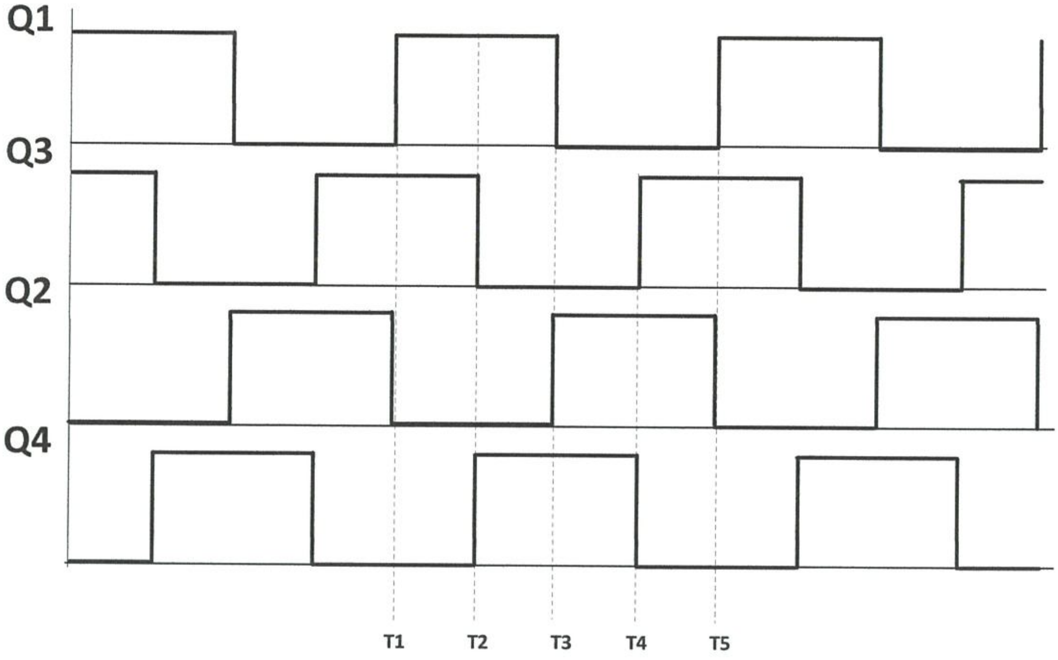
ปัญหาน้าสามารถแก้ไขได้โดยการแยกขดลวดเป็นสองส่วนคือ L_1และ L_2 ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.15 ในวงจรนี้สวิตช์ S_3 และ S_4จะถูกขับโดยมีการคาบเกี่ยวหรือซ้อนกันที่น้อยลง เพราะมีขดลวดช่วยลิมิตกระแส และยังสามารถสังเกตุเห็นการสับเปลี่ยนระหว่างสวิตช์ S_3 และ S_4ที่นุ่มนวลขึ้น

Phase-Controlled DC-AC Converter เป็นวงจรการแปลงผันไฟฟ้าที่ง่าย และมีประสิทธิภาพสูง และมีหม้อแปลแยกโดดที่มีขนาดเล็กเป็นผลมาจากความถี่สวิตช์ชิ่งที่สูงและกำลังไฟฟ้าสามารถไหลได้ทั้งสองฝั่งผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้ รวมถึงกระแสและแรงดันกระชากที่เกิดจากการสับเปลี่ยนระหว่างสวิตช์ S_3 และ S_4จะถูกลดลงไปมากโดยขดลวดL_1และ L_2ที่แยกออกจากกัน

2.5 การวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟสลับโดยใช้การควบคุมเฟสของพัลส์ความถี่สูง



รูปที่ 2.15 วงจรพุช-พูล อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.16 แสดงช่วงเวลาการทำงานของสวิตซ์ Q_1-Q_4

2.5.1 กรณี 1 Q_1และ Q_3นำกระแส (ช่วงเวลา t_1, t_2)

$$V_{p1} = V_s = V_{p2} \tag{2.3}$$

$$V_{Q2} = 2V_s = 2V_{P1} \tag{2.4}$$

ส่งจ่ายไปยังขดลวดอื่นอีก

$$V_{s1} = V_{s2} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \tag{2.5}$$

เมื่อใช้หลักการ Kirchhoff's Voltage Law (KVL) จะได้ว่า

$$-V_{s2} + V_{L2} + V_o = 0 \tag{2.6}$$

$$V_{L2} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \tag{2.7}$$

จาก

$$V_{L2} = L_2\frac{d\,i_{L2}}{dt} \tag{2.8}$$

โดย dt ในที่นี้คือเวลา ช่วง t_1กับ t_2

จะได้ว่า
$$L_2 \frac{d\,i_{L2}}{dt} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \tag{2.9}$$

$$\frac{d\,i_{L2}}{dt} = \frac{V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o}{L_2} \tag{2.10}$$

$$\therefore \Delta i_{L2} = \frac{\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right]}{L_2} \cdot (T_2 - T_1) \tag{2.11}$$

2.5.2 กรณี 2 Q_1และ Q_4นำกระแส (ช่วงเวลา t_2, t_3)

$$V_{p1} = V_s = V_{p2} \tag{2.12}$$

และ
$$V_{Q2} = 2V_s = 2V_{P1} \tag{2.13}$$

ส่งจ่ายไปยังขดลวดอื่นอีก

$$V_{s1} = V_{s2} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \tag{2.14}$$

เมื่อใช้หลักการ Kirchhoff’s Voltage Law (KVL) จะได้ว่า

$$-V_{s1} - V_o - V_{L1} = 0 \tag{2.15}$$

$$V_{L1} = -V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \tag{2.16}$$

จาก
$$V_{L1} = L_2 \frac{d\,i_{L1}}{dt} \tag{2.17}$$

โดย dt ในที่นี้คือเวลา ช่วง t_2กับ t_3

จะได้ว่า
$$L_1 \frac{d\,i_{L1}}{dt} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \tag{2.18}$$

$$\frac{d\,i_{L1}}{dt} = \frac{V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o}{L_1} \tag{2.19}$$

$$\therefore \Delta i_{L1} = \frac{\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right]}{L_1} \cdot (T_3 - T_2) \tag{2.20}$$

2.5.3 กรณี 3 Q_2และ Q_4นำกระแส (ช่วงเวลา t_3, t_4)

$$V_{p2} = -V_s = V_{p1} \tag{2.21}$$

และ

$$V_{Q1} = 2V_s \tag{2.22}$$

ส่งจ่ายไปยังขดลวดอื่นอีก

$$V_{s1} = V_{s2} = -V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \tag{2.23}$$

เมื่อใช้หลักการ Kirchhoff's Voltage Law (KVL) จะได้ว่า

$$V_{s1} + V_{L2} + V_o = 0 \tag{2.24}$$

$$-V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) + V_{L2} - V_o = 0 \tag{2.25}$$

$$V_{L2} = -V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \tag{2.26}$$

จาก

$$V_{L2} = L_2\frac{d\,i_{L2}}{dt} \tag{2.27}$$

โดย dt ในที่นี้คือเวลา ช่วง t_3กับ t_4

จะได้ว่า

$$L_2\frac{d\,i_{L2}}{dt} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \tag{2.28}$$

$$\frac{d\,i_{L2}}{dt} = \frac{V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o}{L_2} \tag{2.29}$$

$$\therefore \Delta i_{L2} = \frac{\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right]}{L_2} \cdot (T_4 - T_3) \tag{2.30}$$

2.5.4 กรณี 4 Q_2และ Q_3นำกระแส (ช่วงเวลา t_4, t_5)

$$V_{p2} = -V_s = V_{p1} \tag{2.31}$$

และ

$$V_{Q1} = 2V_s \tag{2.32}$$

ส่งจ่ายไปยังขดลวดอื่นอีก

$$V_{s1} = V_{s2} = -V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \tag{2.33}$$

เมื่อใช้หลักการ Kirchhoff's Voltage Law (KVL) จะได้ว่า

$$V_{s2} - V_o - V_{L1} = 0 \tag{2.34}$$

$$-V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o - V_{L1} = 0 \tag{2.35}$$

$$V_{L1} = -\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) + V_o\right] \tag{2.36}$$

จาก

$$V_{L1} = L_1\frac{d\,i_{L1}}{dt} \tag{2.37}$$

โดย dt ในที่นี้คือเวลา ช่วง t_4กับ t_5

จะได้ว่า

$$L_1\frac{d\,i_{L1}}{dt} = -\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) + V_o\right] \tag{2.38}$$

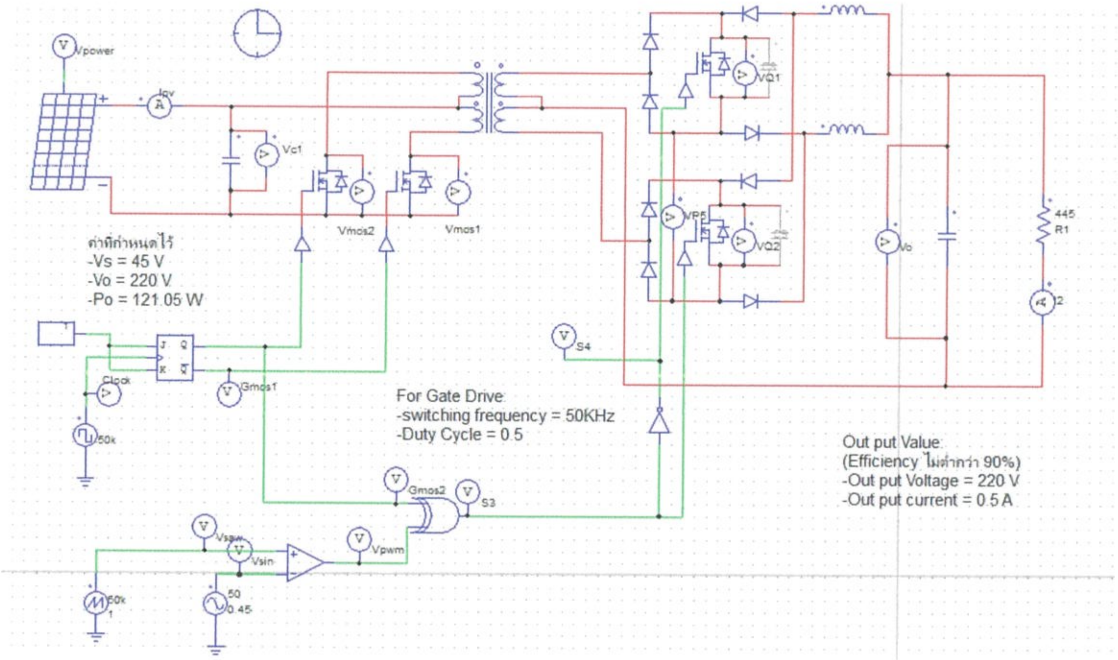
$$\frac{d\,i_{L1}}{dt} = \frac{-\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right]}{L_1} \tag{2.39}$$

$$\therefore \Delta i_{L1} = \frac{-\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) + V_o\right]}{L_1} \cdot (T_5 - T_4) \tag{2.40}$$

บทที่ 3
การออกแบบและสร้างโมดูลไมโครอินเวอร์เตอร์

ในการศึกษาโมดูลไมโครอินเวอร์เตอมีการออกแบบและจำลองผลโดยใช้โปรแกรม Power Simulation (PSIM) ช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ ซึ่งสามารถแสดงการวิเคราะห์และจำลองผลได้ดังต่อไปนี้

3.1 การจำลองผลวงจรไมโครอินเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม Power Simulation (PSIM)



รูปที่ 3.1 วงจรไมโครอินเวอร์เตอร์ที่ใช้จำลองผลในโปรแกรม PSIM

เมื่อต้องการออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรไมโครอินเวอร์เตอร์โดยกำหนดให้ มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- กำลังเอ้าต์พุต 121 วัตต์
- แรงดันเอ้าต์พุต 220 โวลต์
- กำลังเอ้าต์พุต 121 วัตต์
- แรงดันขาเข้า 45 โวลต์
- ประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 90 %
- ความถี่ในการทำงานของสวิตช์ 50 KHz

3.1.1 วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

3.1.1.1 ความต้านทาน (R)

จาก $V_s = 45V, V_o = 220V$ และ $P_o = 121.05W$

$$P_o = \frac{{V_o}^2}{R} \tag{3.1}$$

$$\therefore R = \frac{220^2}{121.05} = 400 \text{ Ohm}$$

3.1.1.2 กระแสขาออก ($\boldsymbol{I_o}$)

$$I_o = \frac{V_o}{R} \tag{3.2}$$

ซึ่งจะได้ค่ากระแสขาออกเท่ากับ 0.55 A

3.1.1.3 อัตราส่วนจำนวนรอบ $\left[\boldsymbol{\frac{N_s}{N_p}}\right]$ ของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$\frac{V_o}{V_s} = 2\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \cdot D \tag{3.3}$$

จากสมการที่ เมื่อ สามารถหาค่าอัตราส่วนจานวนรอบ $\boldsymbol{\frac{N_s}{N_p}}$ ได้เท่ากับ 7 รอบ

3.1.1.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถนำมาหาค่าของตัวเหนี่ยวนำน้อยที่สุด (L_{min}) ได้จาก

$$L_{min} = \frac{(1-2D)R}{4f} \qquad (3.4)$$

จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนาน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.4 mH ซึ่งจากค่าตัวเหนี่ยวนำน้อยที่สุดนั้น สามารถเลือกขนาดค่าความเหนี่ยวนำ เท่ากับ 0.5 mH

3.1.1.5 การเลือกตัวเก็บประจุ

จากค่า Voltage Ripple สามารถนามาค่าตัวเก็บประจุน้อยที่สุด (C_{min}) ได้จากสมการ

$$C_{min} \geq \frac{(1-2D)}{32L\left(\frac{\Delta V_0}{V_0}\right)f^2} \qquad (3.5)$$

เมื่อพิจารณาค่า Voltage Ripple $\left(\frac{\Delta V_0}{V_0}\right)$ ที่มีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าตัวเก็บประจุน้อยที่สุดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.6.5 μF

โดยในการเลือกค่าตัวเก็บประจุนั้น ควรเลือกให้มีพิกัดสูงกว่าค่าที่คำนวณได้ ซึ่งในการจำลองผลของวงจรนั้น ทำการเลือกค่าตัวเก็บประจุ เท่ากับ 1 μF (ต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานเสมือนที่อนุกรมอยู่ภายในตัวเก็บประจุ (Equivalent Series Resistance, ESR) ด้วย ซึ่งในการเลือกพิกัดของตัวเก็บประจุนั้น ควรจะเลือกโดยคำนวณจาก

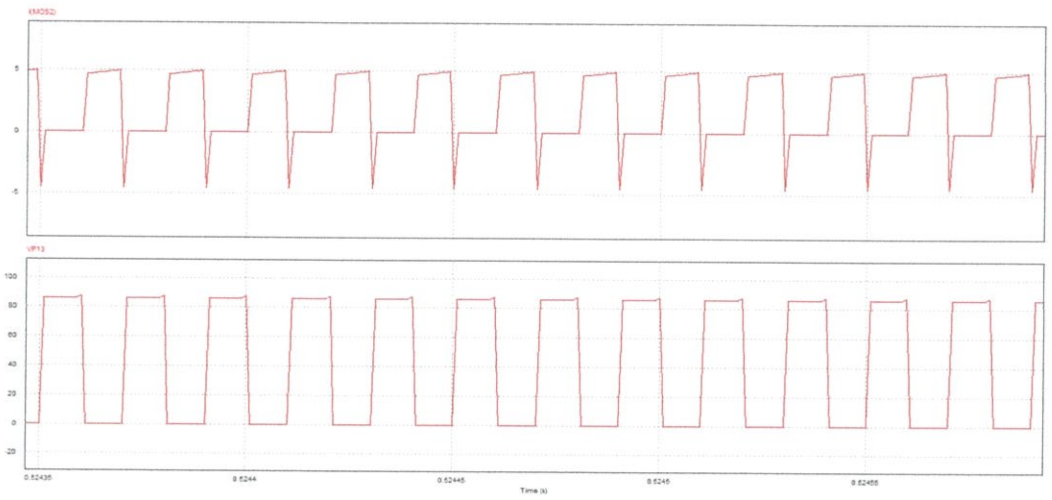
$$ESR \times I_c \leq ripple \qquad (3.6)$$

โดยเลือกค่าของตัวเก็บประจุที่นามาใช้งาน มีค่าเท่ากับ 1 μF

3.2 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์

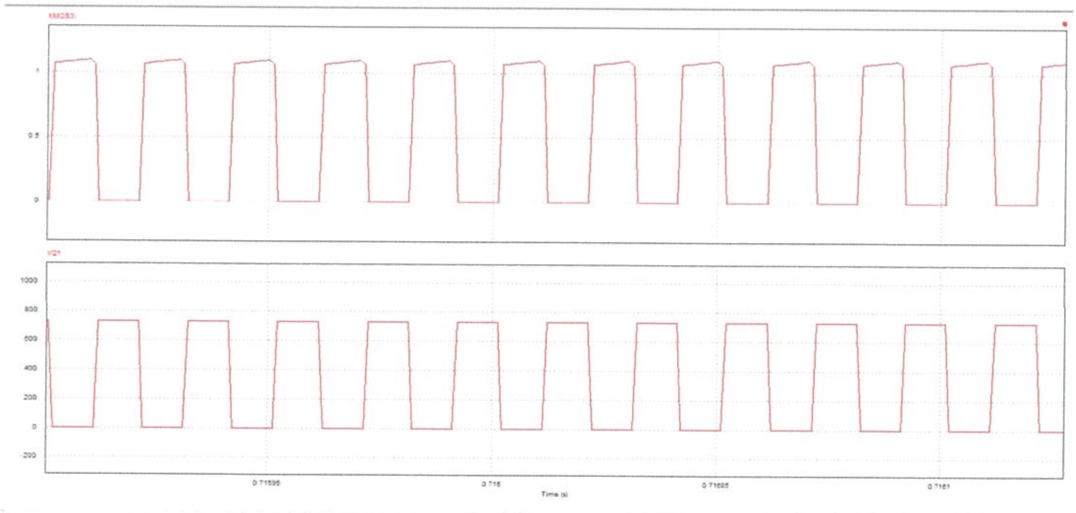
3.2.1 การเลือกพิกัดอุปกรณ์

3.2.1.1 มอสเฟต



รูปที่ 3.2 ค่ากระแสและแรงดันของมอสเฟตด้านด้านปฐมภูมิ

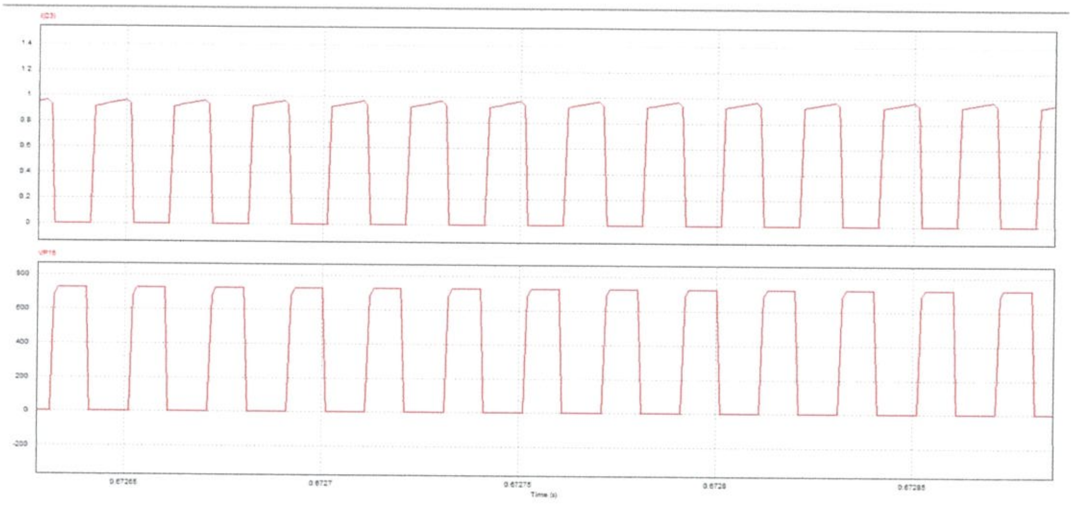
จากผลการจำลอง พบว่า กระแสมอสเฟสด้านด้านปฐมภูมิมีค่าประมาณ 5 แอมป์ และแรงดันระหว่างขาเดรน-ซอร์ส ในด้านไพมารี่มีค่าประมาณ 90 โวลต์ จึงเลือกมอสเฟสเบอร์ IRFP250N ซึ่งมีพิกัด 200 โวลต์ 30 แอมป์



รูปที่ 3.3 ค่ากระแสและแรงดันของมอสเฟตด้านด้านทุติยภูมิ

จากผลการจำลอง พบว่า กระแสมอสเฟสด้านทุติยภูมิมีค่าประมาณ 1 แอมป์ และแรงดันระหว่างขาเดรน-ซอร์ส ในด้านไพมารี่มีค่าประมาณ 750 โวลต์ จึงเลือกมอสเฟสเบอร์ FQP7N80C ซึ่งมีพิกัด 800 โวลต์ 6.6 แอมป์

3.2.1.2 ไดโอด



รูปที่ 3.4 แรงดันตกคร่อมและกระแสของไดโอด D1

จากผลการจำลองที่ได้ ไดโอดทั้งแปดตัวจะมีค่าแรงดันตกคร่อมและกระแสใกล้เคียงกัน สามารถที่จะหาพิกัดของไดโอดได้แระมาณ 750 V และ กระแสประมาณ1 A ดังนั้นจึงเลือกไดโอดเบอร์ MUR880AG ซึ่งมีพิกัด 800 โวลต์ 8 แอมป์

3.2.2 การพันหม้อแปลงเซนเตอร์แทป

(ก) กำลังไฟฟ้า

$$\mathrm{Po2} = \mathrm{I2mV2m} = 0.336\mathrm{A} * 355\mathrm{V} = 119.28\ \mathrm{Watts} \qquad (3.7)$$

(ข) เลือกแกนเหล็ก

$$Ap = AcAw = \frac{Po2(1+\frac{1}{n})\sqrt{2}}{4JKwBmfs} \qquad (3.8)$$

$$n = 0.8,\ Kw = 0.4,\ Bm = 0.5T, fs = 50kHz\ , J = 5x10^6\ {}^{A}/_{m^2}$$

$$Ap = 3795.466\ mm^2$$

เลือกแกน ETD42

$$Ap = 4659\,mm^2\,, Aw = 256\,mm^2, Ac = 182\,mm^2$$

$$\mu e = 2030\,, Lm = 97.22\,mm\,, Le = 93\,\frac{mm}{turn}$$

(ค) คำนวณรอบการพัน

$$N_1 = \frac{V_{in/max}}{4AcBmfs}\;; V_{in/max} = 45v \quad \text{ได้ } N_1 = 2.47 \text{ เลือก } N_1 = 3 \text{ รอบ} \tag{3.9}$$

$$N_2 = \frac{V_{out/max}}{4AcBmfs}\;; V_{out/max} = 355v \quad \text{ได้ } N_2 = 19.5 \text{ เลือก } N_2 = 24 \text{ รอบ} \tag{3.10}$$

(ง) คำนวณขนาดลวดตัวนำ

$$A_1 = \frac{\mathrm{I_1}}{\mathrm{J}} = 0.538\ \mathrm{mm}^2\;;\ \mathrm{I_1} = 2.69\mathrm{A} \tag{3.11}$$

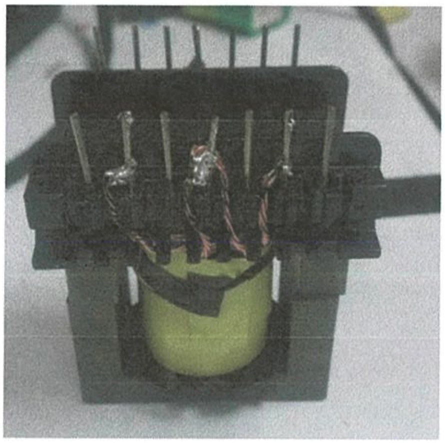
$$A_2 = \frac{\mathrm{I_2}}{\mathrm{J}} = 0.0672\ \mathrm{mm}^2\;;\ \mathrm{I_2} = 0.336\mathrm{A} \tag{3.12}$$

(จ) คำนวณค่าปรากฏการณ์ทางผิว (Skin dept) เพื่อใช้ในการเลือกลวดทองแดง

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = 0.32374mm\,; \rho = 1.2, \mu = 1.724x10^{-8} \tag{3.13}$$

ดังนั้น ต้องเลือกลวดตัวนำที่มีรัศมีน้อยกว่าค่า δ

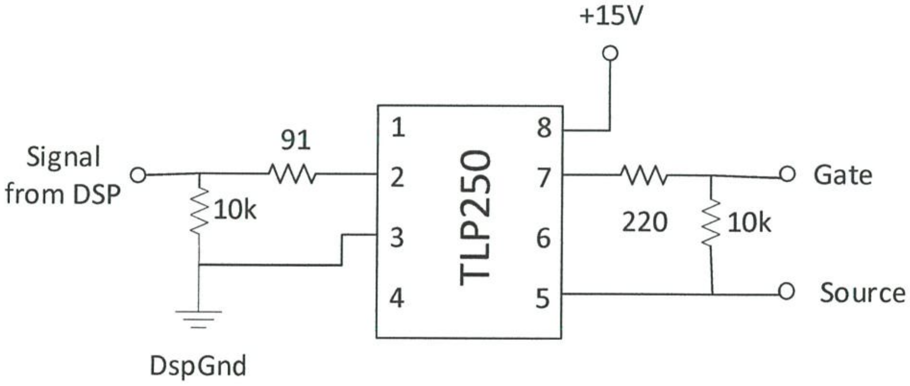
เลือกลวดเบอร์ AWG 23 มีขนาดรัศมี 0.316 mm^2 มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.2508 mm^2 ขดลวด ฝั่งปฐมภูมิจึงต้องมีการเกลียว = $\frac{\mathbf{0.538\ mm^2}}{\mathbf{0.2508\ mm^2}}$ =2.14 รอบ เลือกการตีเกลียว 3 รอบ



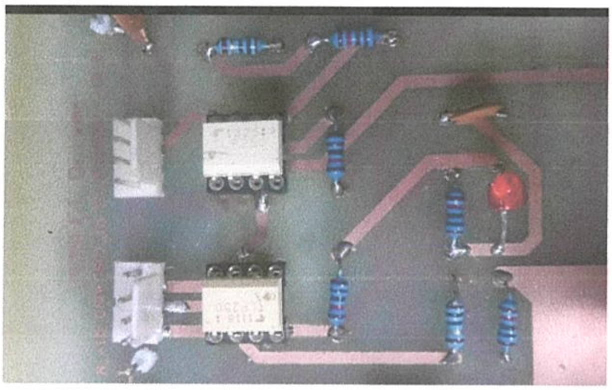
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานจริงของหม้อแปลงเซ็นเตอร์แทป

3.2.3 วงจรขับมอสเฟส

วงจรวงจรขับมอสเฟสดังรูปที่ 3.6 เลือกไอซีเบอร์ TPL250 บริษัท Toshiba ใช้ขับมอสเฟสทั้งฝั่งไพรมารี่และเซคันดารี่



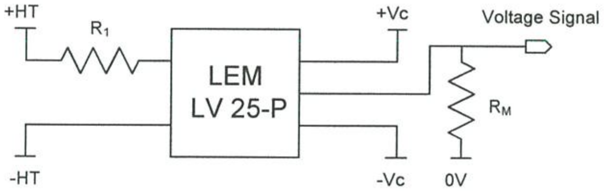
รูปที่ 3.6 วงจรขับมอสเฟส



รูปที่ 3.7 ชิ้นงานจริงของวงจรขับเกต

3.2.4 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันระบบไฟฟ้า

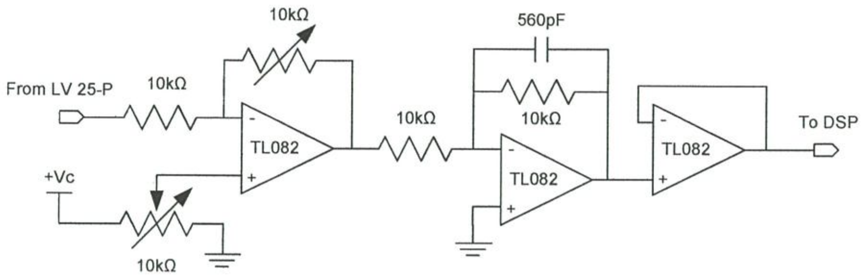
วงจรสำหรับตรวจวัดสัญญาณแรงดันระบบไฟฟ้าจะใช้หลักการทำงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก (Hall Effect) ของบริษัท LEM เบอร์ LV 25-P ซึ่งสามารถวัดแรงดันได้สูงสุด 250 V วงจรการต่อใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.7 ในส่วนของสัญญาณขาเข้าเพื่อความแม่นยำในการวัดจะกำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 เท่ากับ 10 mA ดังนั้นการออกแบบให้สามารถวัดได้ 250 V จึงต้องเลือกขนาดความต้านทาน R_1 เท่ากับ 25 kΩ 2.5 W ทางด้านสัญญาณขาออกจะเป็นสัญญาณกระแสจึงต้องทำความต้านทาน R_M มาต่อเพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงดันสำหรับการเลือกขนาดของความต้านทาน R_M นั้นเลือกจากขนาดของแหล่งจ่ายที่ใช้ คือ ±15 V ทำให้ได้ค่าความต้านทาน R_M ที่สามารถใช้ได้น้อยที่สุดคือ 100 Ω ดังนั้นจึงเลือกขนาด 100 Ω



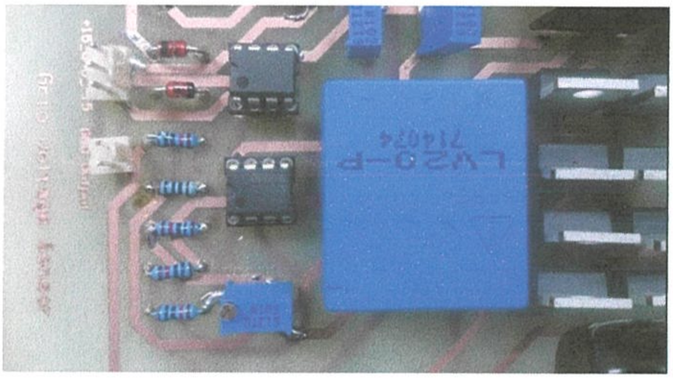
รูปที่ 3.8 การต่อใช้งานของ LEM LV 25-P

จากนั้นสัญญาณแรงดันที่ได้จะถูกส่งไปยัง ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) ที่ช่องการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) ซึ่งสามารถรับแรงดันได้ 0-3 V ดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดแรงดันของสัญญาณไม่ให้เกิน 3 V_{P-P} นอกจากนั้นสัญญาณแรงดันที่ได้จาก LEM LV 25-P นั้นเป็นรูปคลื่นซายน์ซึ่งมีการแกว่งในซีกบวกและลบ ทำให้ต้องมีการยกระดับสัญญาณให้อยู่ใน

ซีกบวกทั้งหมด โดยวงจรจำกัดแรงดันและยกระดับแรงดันนี้ใช้ออปแอมป์เบอร์ TL082 ดังแสดงรูปที่ 3.8



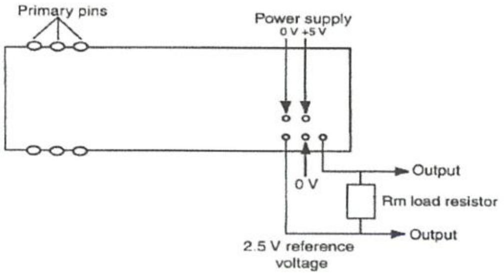
รูปที่ 3.9 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันระบบไฟฟ้า



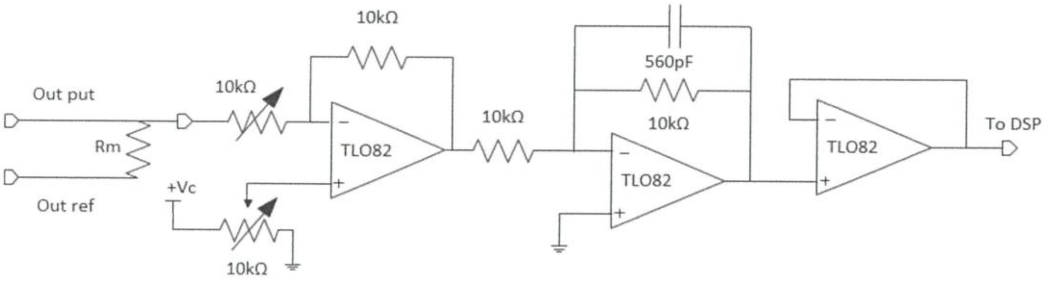
รูปที่ 3.10 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันระบบไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

3.2.5 วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแสระบบไฟฟ้า

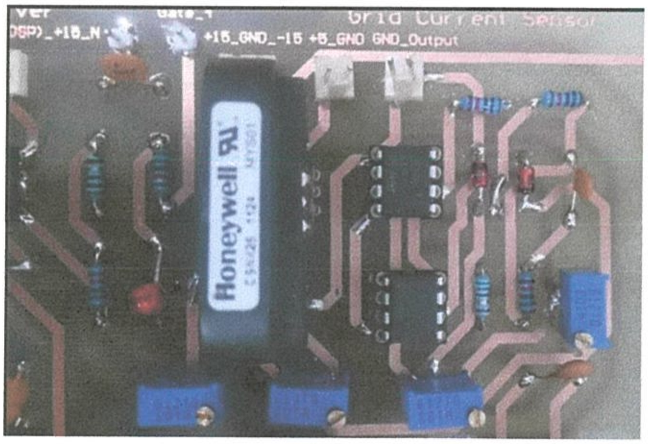
วงจรสำหรับตรวจวัดสัญญาณกระแสระบบไฟฟ้าจะใช้ Tranduser เบอร์ CSNX25 ของบริษัท Honeywell โดยมีอัตราส่วนและรูปแบบของอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.10 สัญญาณเอาท์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อก ดังนั้นเราต้องทำการแปลงให้สัญญาณอยู่ในซีกบวกก่อนส่งสัญญาณไปให้ DSP ใช้ในการคำนวณต่อไป โดยในการปรับค่าของตัวต้านทานปรับค่าได้จะใช้ตัวต้านทานแบบทริมพอท (Trimpot) วงจรยกระดับสัญญาณของวงจรตรวจจับกระแสระบบไฟฟ้าที่ออกแบบแล้วแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 Current Tranduser CSNX25 (Honeywell)



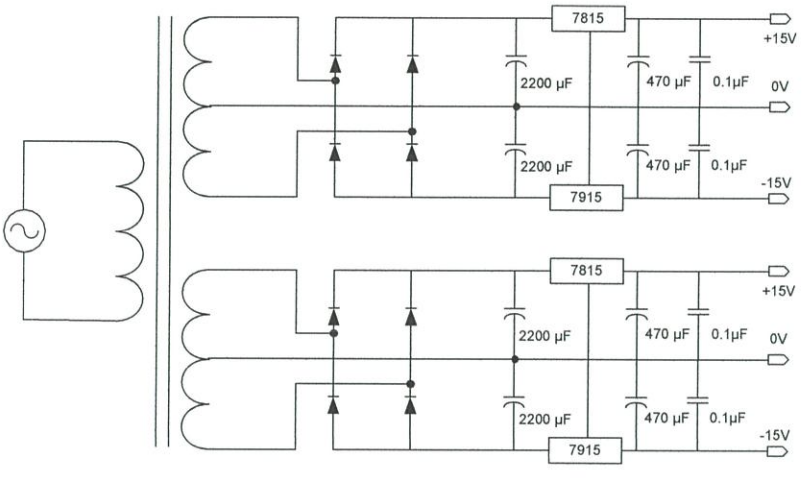
รูปที่ 3.12 วงจรยกระดับและขยายสัญญาณกระแส



รูปที่ 3.13 วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแสระบบไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

3.2.6 แหล่งจ่ายไฟสำหรับวงจรตรวจวัดสัญญาณ

เนื่องจากตัวตรวจวัดสัญญาณทั้งแรงดันและกระแส รวมทั้งออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรตรวจวัดสัญญาณ จำเป็นต้องใช้ไฟเลี้ยง ±15 V ทำให้ต้องสร้างวงจรเรียงกระแสที่สามารถจ่ายแรงดัน +15 V, -15 V และ 0 V จำนวนสองชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.13

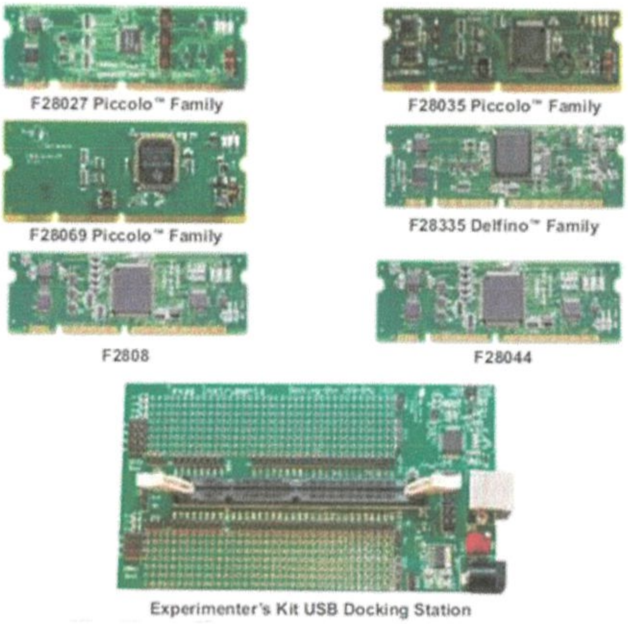


รูปที่ 3.14 แหล่งจ่ายไฟสำหรับวงจรตรวจวัดสัญญาณ

รูปที่ 3.15 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรตรวจวัดสัญญาณที่สร้างขึ้น

3.3 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processing, DSP)

งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) ของบริษัท Texas Instruments ซึ่งเป็นชุด C2000^{TM} Experimenter's Kit ซึ่งชุดนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆสองส่วน คือ ส่วน docking station จะเป็นส่วนที่ต่อกับขาอินพุทเอาท์พุท และชุดไฟเลี้ยง อีกส่วนคือ controlCARD ซึ่งตัว controlCARD สามารถเลือกได้หลายตระกูล โดยงานวิจัยนี้เลือกตระกูล F28335 Delfino ซึ่งมีความเร็วในการประมวลผลที่ 150 MHz

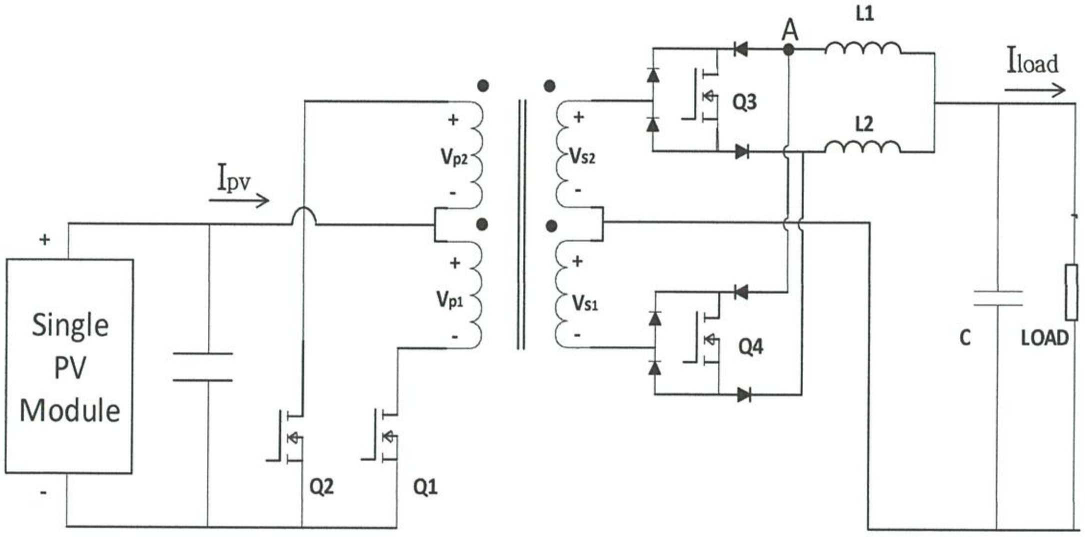


รูปที่ 3.16 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP)

บทที่ 4
ผลการทดลอง

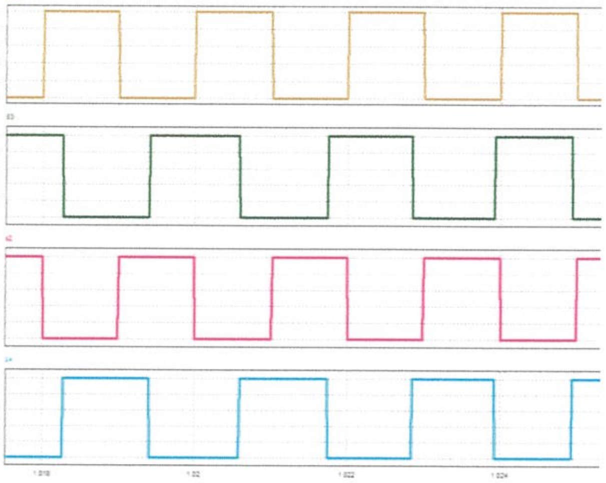
4.1 ผลการทดสอบวงจรไมโครอินเวอร์เตอร์

ทำการวัดค่าต่างๆของวงจรไมโครอินเวอร์เตอร์ จากการจำลองด้วยโปรแกรม Psim เพื่อยืนยันความถูกต้องและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง โดยแสดงตำแหน่งการวัดดังรูปที่ 4.1

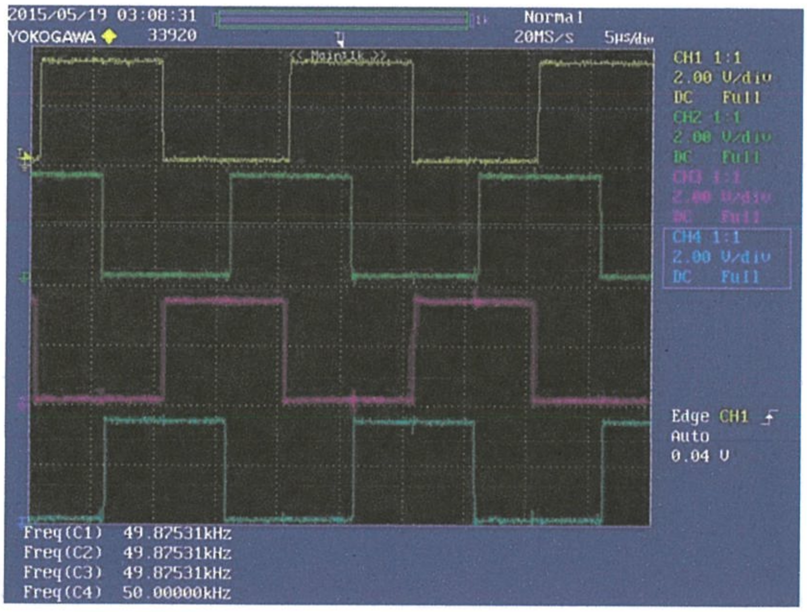


รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการวัดของชุดไมโครอินเวอร์เตอร์

4.1.1 สัญญาณขับเกต



(ก) ผลการจำลองสัญญาณขับเกตด้วยโปรแกรม Psim

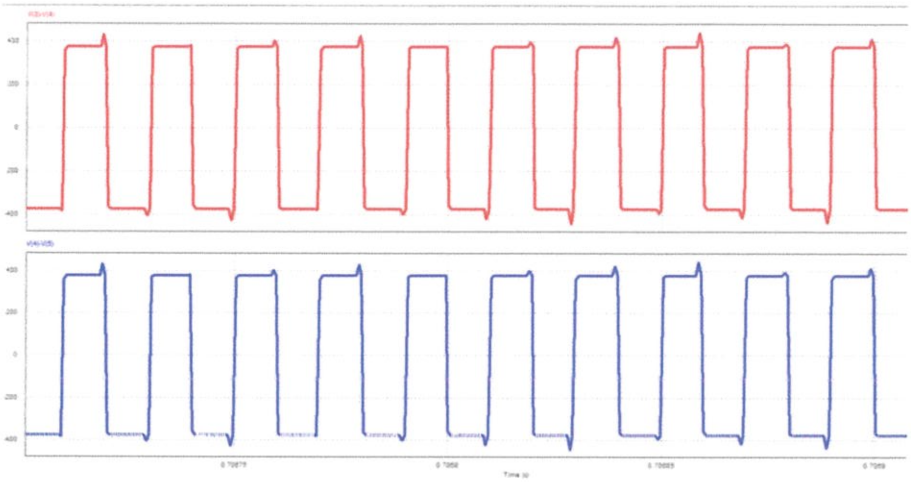


(ข) สัญญาณขับเกตจาก DSP ที่ใช้ในการทดลอง

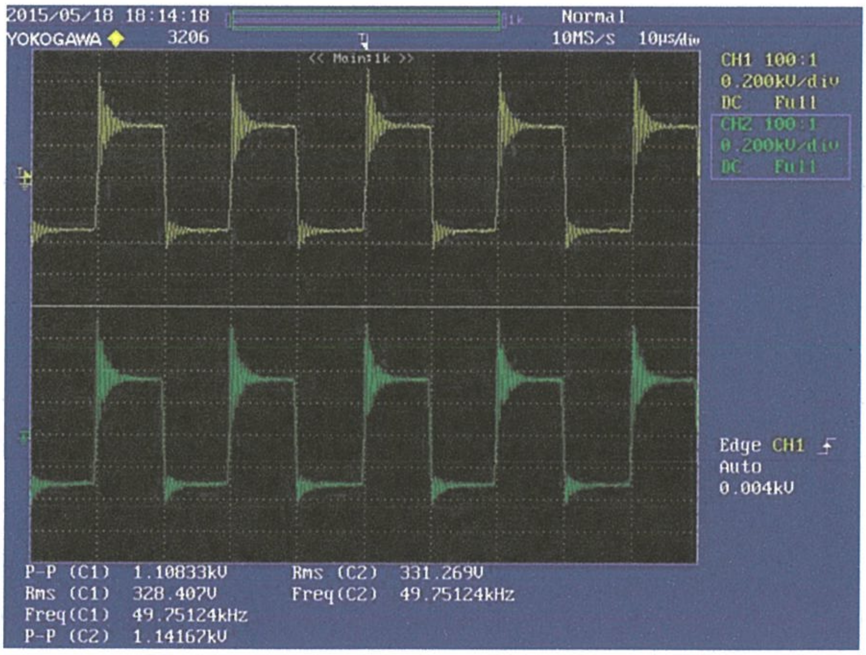
รูปที่ 4.2 สัญญาณขับมอสเฟส Q1,Q3,Q2,Q4 ตามลำดับ

4.1.2 แรงดันที่ขั้วหม้อแปลง

ทำการวัดแรงดันที่ขั้วหม้อแปลงฝั่งทุติยภูมิ



(ก) ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Psim

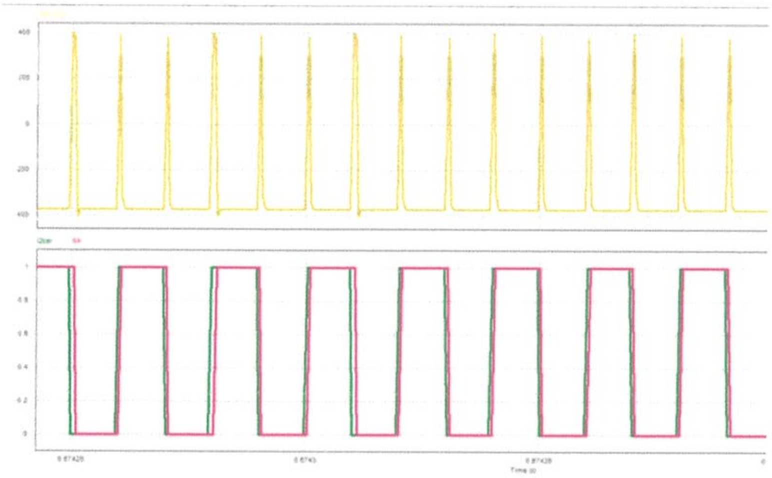


(ข) ผลจากการทดลอง

รูปที่ 4.3 แรงดันที่ขั้วหม้อแปลง Vs1,Vs2

4.1.3 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวิตซ์ Q2,Q3

4.1.3.1 ช่วงการสวิตซ์โดยที่ Duty มีค่าประมาณ 1

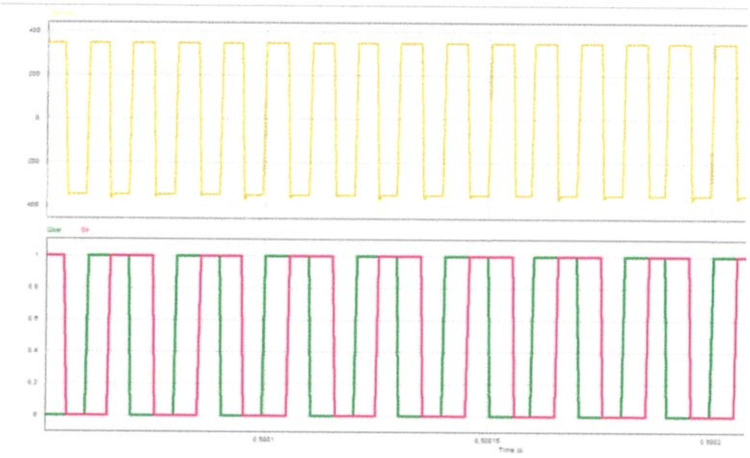


(ก) ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Psim

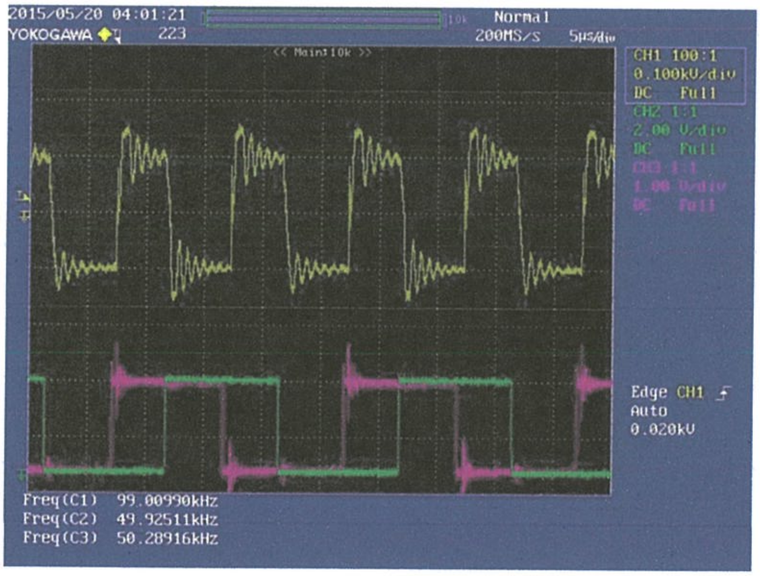
(ข) ผลจากการทดลอง

รูปที่ 4.4 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวิตซ์ Q2,Q3 โดยที่ Duty การสวิตซ์มีค่าประมาณ 1

4.1.3.2 ช่วงการสวิตซ์โดยที่ Duty มีค่าประมาณ 0.5



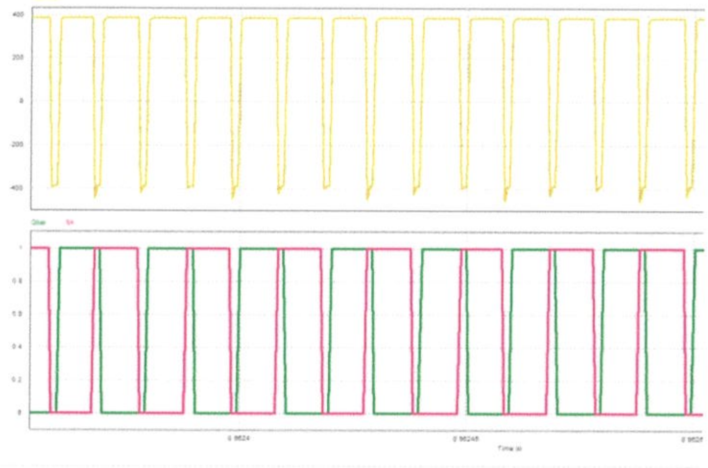
(ก) ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Psim



(ข) ผลจากการทดลอง

รูปที่ 4.5 แรงดันจุด A เทียบกับสัญญาณสวิตซ์ Q2,Q3 โดยที่ Duty การสวิตซ์มีค่าประมาณ 0.5

4.1.3.3 ช่วงการสวิตซ์โดยที่ Duty มีค่าประมาณ 0

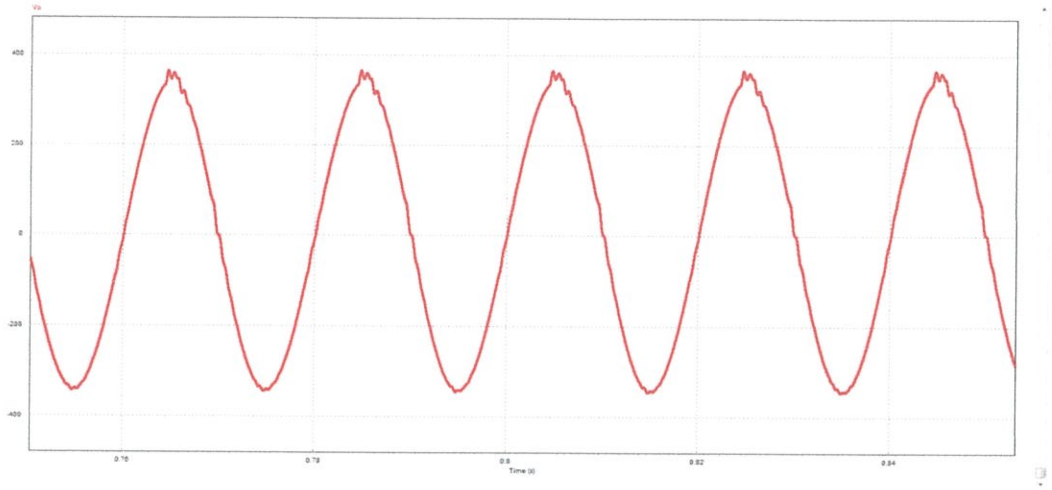


(ก) ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Psim

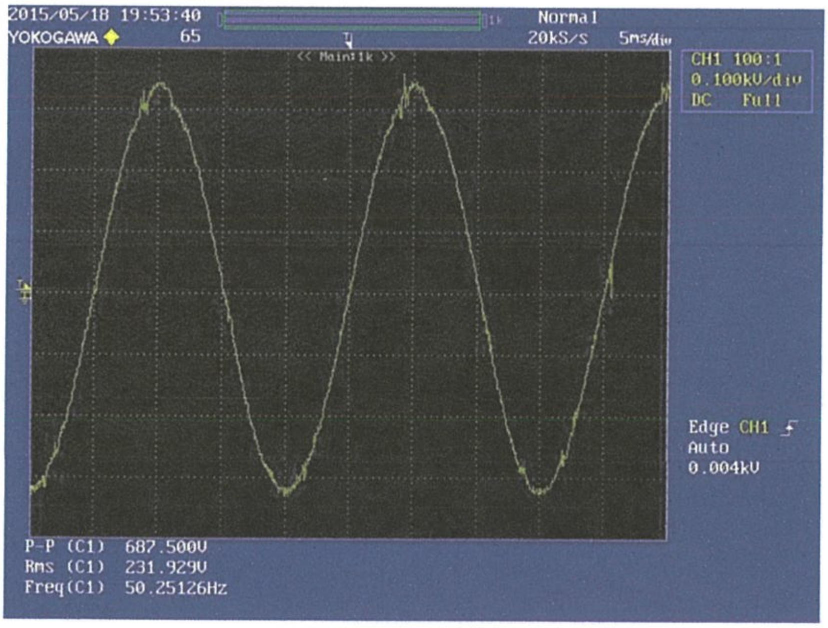
(ข) ผลจากการทดลอง

รูปที่ 4.6 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวิตซ์ Q2,Q3 โดยที่ Duty การสวิตซ์มีค่าประมาณ 0

4.1.4 แรงดันเอาท์พุต



(ก) ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Psim

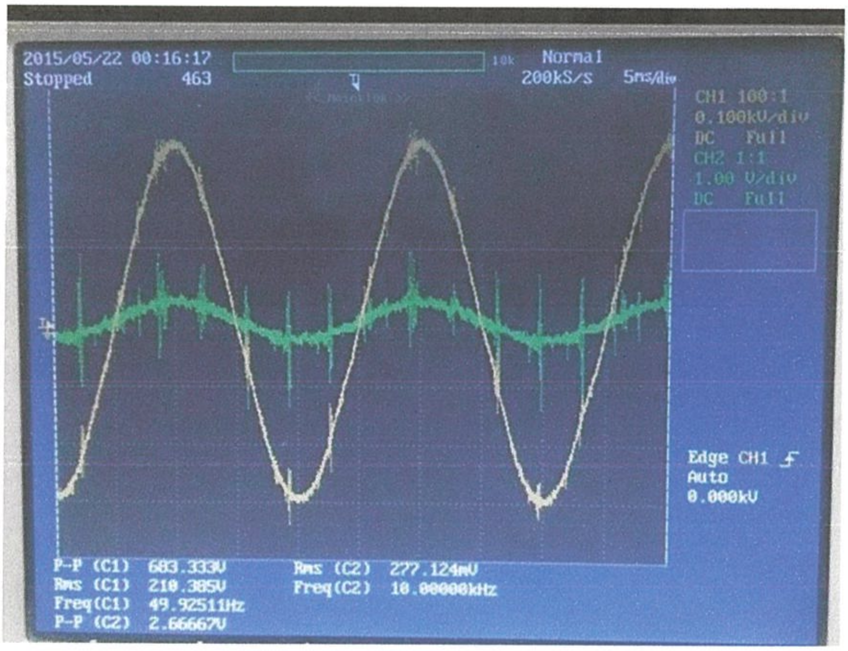


(ข) ผลจากการทดลอง

รูปที่ 4.7 แรงดันเอาท์พุตจากชุดไมโครอินเวอร์เตอร์

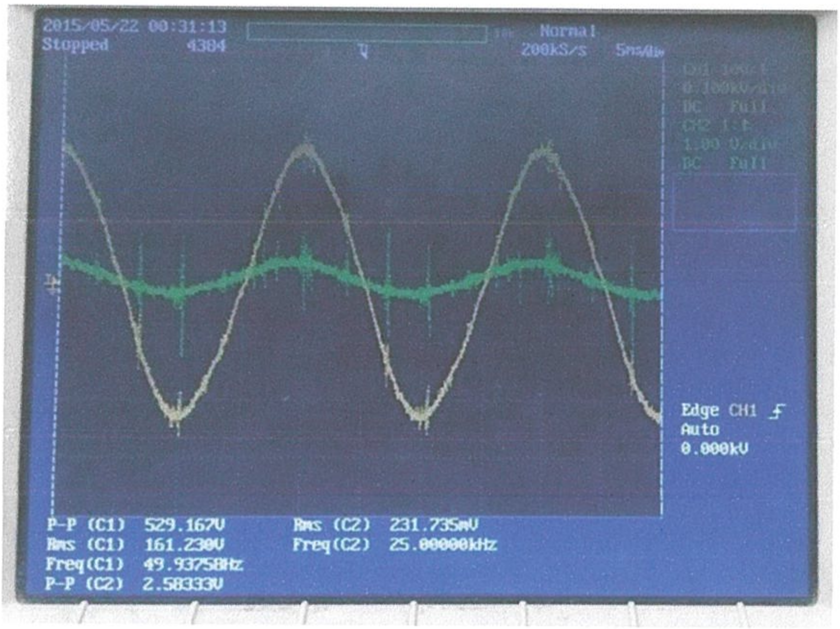
4.1.5 การทดลองจ่ายโหลด

วัดแรงดันแลtกระแสเอ้าท์พุทขณะทำการทดลองโดยจ่ายโหลด R,RL,RC



(ก)

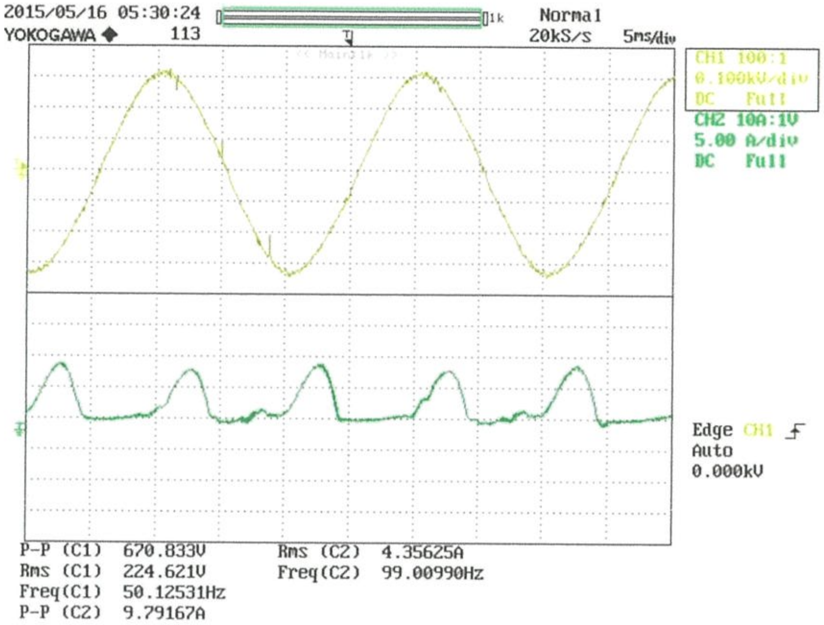
(ข)



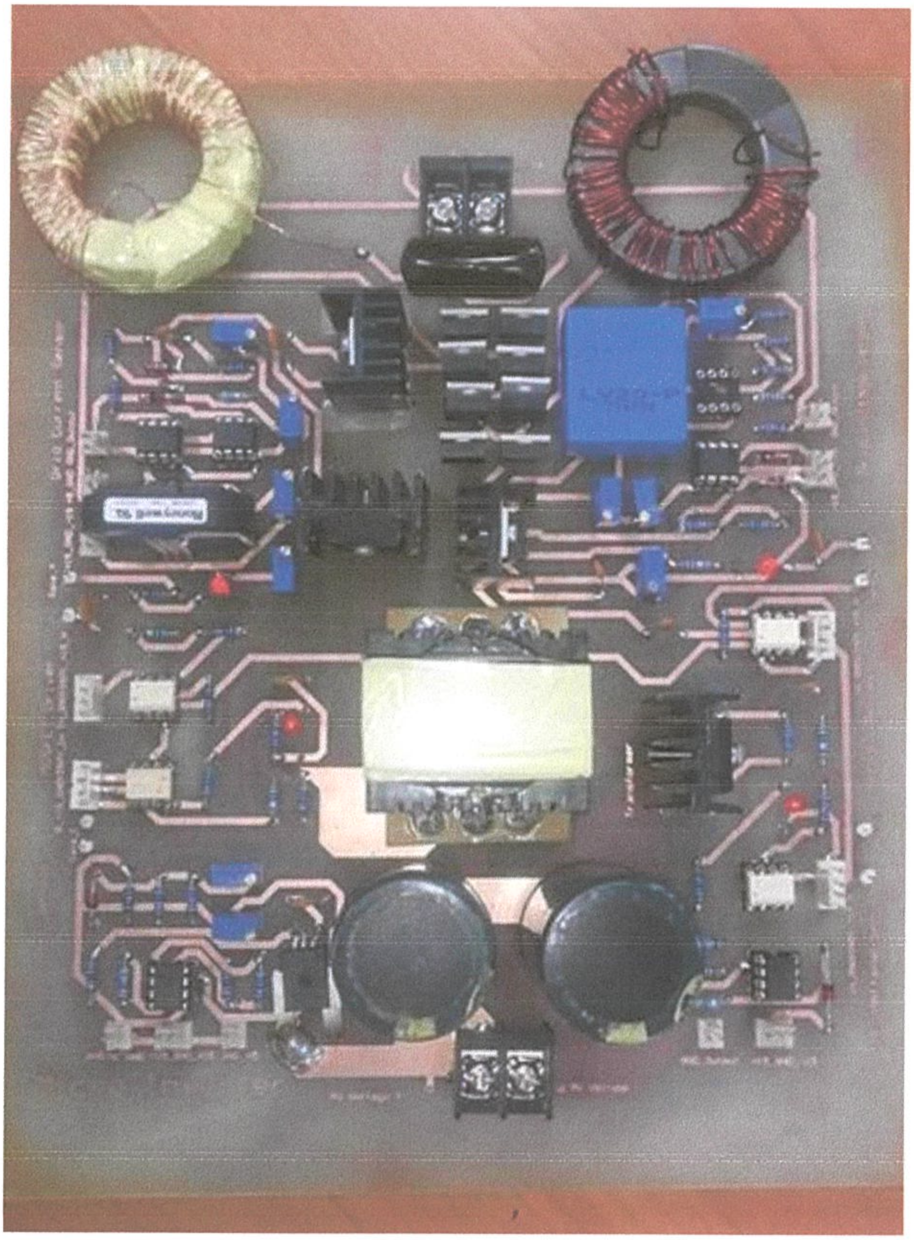
(ค)

รูปที่ 4.8 แรงดันและกระแสเอาท์พุทขณะจ่ายโหลด (ก) ตัวต้านทาน 110 Ohm (ข) ตัวต้านทาน 110 Ohm ตัวเหนี่ยวนำ 1.18H (ค) ตัวต้านทาน 110 Ohm ตัวเก็บประจุ 15uf

จากการทดลองจ่ายโหลดตัวต้านทาน 100 วัตต์ พบว่ากระแสอินพุท dc ที่จ่ายที่จ่าย ขณะแรงดัน DC อินพุท 40 โวลต์ มีค่า เท่ากับ 4.3 A ซึ่งคิดค่า Power ได้ = 40x4.3 =172 วัตต์ คิดประสิทธิภาพของชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ = $\frac{100}{172} \times 100\% = 58.14\%$



รูปที่ 4.9 แรงดันเอ้าพุทและกระแสอินพุทขณะจ่ายโหลดตัวต้านทาน (100วัตต์)



รูปที่ 4.10 ชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ที่ได้สร้างขึ้นจริง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงงานนี้นำเสนอเสนอแนวคิดการใช้เทคนิค Phase-Controlled WithHigh-Frequency ในการออกแบบไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ ชุดวงจรประกอบไปด้วยส่วนวงจรพุช-พูล ด้านไพรมารี่มีสวิตซ์สองตัวสลับกันทำงานด้วยดิวตี้มีค่าใกล้ 0.5 ต่อกับหม้อแปลงความถี่สูงเซ็นเตอร์แทปเพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น ส่วนด้านเซคั่นดารี่ประกอบไปด้วย สวิตซ์สองตัวซึ่งจะทำงานในลักษณะของ Phase-Controlled เพื่อให้ระดับแรงดันเอาท์พุตมีลักษณะรูปคลื่นพีดับบลิวยูเอ็ม ซึ่งเมื่อผ่านวงจรกรอง (Filter) ก็จะได้แรงดันเอ้าพุตที่มีลักษณะรูปคลื่น sine โดยสัญญาณที่ใช้ในการสวิตซ์มอสเฟสนั้นใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) ซึ่งมีความเร็วในการประมวลผลที่ 150 MHz

จากการทำงานของชุดไมโครอินเวอร์เตอร์นั้นผลที่ได้เป็นไปตามการออกแบบ สามารถจ่ายโหลดได้จริง ทั้งโหลดตัวต้านทาน โหลดตัวเหนี่ยวนำ และโหลดตัวตัวเก็บประจุ

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ในระหว่างการทดลองชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ ปัญหาที่พบเจอคือการเกิด ringing voltage ที่ขั้วของหม้อแปลง แม้จะมีการออกแบบชุดสนับเบอร์เพื่อลดปัญหาดังกล่าวแต่ก็จะส่งให้เกิดการสูญเสีย(loss) ในวงจรเยอะอยู่ดีส่งผลให้หม้อแปลงมีประสิทธิภาพต่ำ เพื่อการแก้ไขปัญหาดังกล่าวควรศึกษาวิธีการพันหม้อแปลงและกระบวนการพันหม้อแปลงที่ถูกต้องด้วยวิธีการไบไฟลาร์ (bifilar wiring) เพื่อที่จะให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงดีขึ้นและจะส่งผลให้วงจรไมโครอินเวอร์เตอร์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Koosuke Harada, Hiroshi Sakamoto, and Masahito Shoyama, "Phase-Controlled DC-AC Converter with High-Frequency Switching," **IEEE Transactions on Power Electronics**. Vol. 3. No. 4. Oct 1988.

[2] ภานุพงศ์ ตรียุทธ และคนอื่นๆ. "ไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์," **ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553

[3] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน, วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic)**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

[4] ปัญญา สุมิตสวรรค์, "ไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า," **วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.

[5] ไพศักดิ์ พูลผกา, "เทคนิคการม็อดดูเลตเชิงความกว้างพัลส์เพื่อควบคุมแรงดันโหมดร่วมของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง," **วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความวิจัย

ไมโครอินเวอร์เตอร์

MICRO-INVERTER

คุณนิธิ พงษ์ทองหล่อ และ วัชรินทร์ ช่างพะเนา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-739-2478 E-mail : kunniti_p@outlook.co.th

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์พิกัดกำลัง 120 วัตต์เป็นต้นกำเนิดพลังงาน เชื่อมต่อกันในลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผงรวมกับไมโครอินเวอร์เตอร์หนึ่งชุด ชุดไมโครอินเวอร์เตอร์นี้ประกอบไปด้วยวงจรแปรผันไฟตรงซึ่งเลือกใช้วงจรพุชพูลคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเปรียบเสมือนการนำฟอร์เวิดคอนเวอร์เตอร์สองชุดมาทำงานร่วมกันโดยผลัดกันทำงานในแต่ละครึ่งคาบเวลาในลักษณะกลับเฟส ทำให้จ่ายกำลังได้สูง และใช้เทคนิคเฟสคอนโทรลดีซีทูเอซีคอนเวอเตอร์ ในการในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตโดยมีหน่วยประมวลผลซึ่งใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) รุ่น TMS320F28335 ในการควบคุมการทำงานของชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ ซึ่งได้ทำการสร้างเครื่องต้นแบบไมโครอินเวอร์เตอร์และทำการทดสอบจริงซึ่งผลการทำงานของเครื่องต้นแบบไมโครอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายโหลดได้ทั้งโหลดตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ตามที่ออกแบบไว้และสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้ชุดไมโครอินเวอร์เตอร์สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้

Abstract

This thesis present analysis, design and construction of a prototype micro inverter for 120 watts photovoltaic module. Micro inverter has two power conversion stage. One is Push-Pull converter with 50 kHz switching frequency. The advantages of this technique are high power. The other is Phase-controlled DC-AC converter with high-frequency switching that switch consist of mosfet and diode. Each pair of switch was alternately operated with 50 KHz. The advantages of this technique are simple and high efficiency and power can flow bidirectional through this converter. Digital signal processor (DSP) TMS380F28335 is used for control the operation of the micro inverter. Finally a micro-inverter able to supply R L C load as designed and will be develop to connect to the system in the future.

1.บทนำ

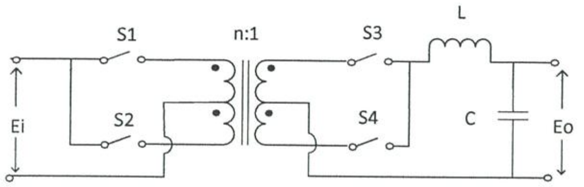
เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าปริมาณสำรองของพลังงานจากฟอสซิล (ก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน) บนโลกนี้กำลังจะหมดไปหากมนุษย์เราไม่สามารถค้นหาแหล่งพลังงานใต้พิภพเพิ่มเติมได้อีกทำให้มนุษย์จึงเร่งหาพลังงานทดแทนชนิดอื่นๆมาเพื่อนำมาใช้แทนพลังงานจากฟอสซิลทำให้หลายประเทศทั่วโลกหันมาส่งเสริมการผลิตและการใช้พลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและใช้ไม่มีวันหมด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

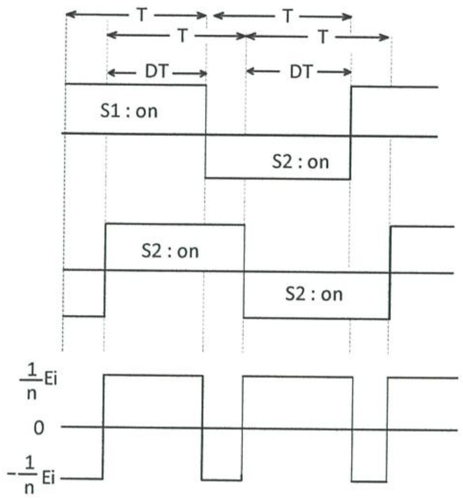
2.1 Phase-Controlled DC-AC Converter with High-Frequency Switching

Phase-Controlled DC-AC Converter with High-Frequency Switching เป็นวงจรที่มีสวิตช์คู่ทั้งในฝั่งปฐมภูมิและฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงแยกโดด อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันจะถูกควบคุมโดยความต่างเฟสของสวิตช์ทั้งสองคู่ กระแสและแรงดันกระชากในระหว่างการสับเปลี่ยนสวิตช์หรือการสวิตช์ซึ่งจะถูกลดลงโดยขดลวดที่ถูกแยกเป็นสองตัว สามารถลดขนาดของหม้แปงลงได้เป็นผลมาจากการที่เพิ่มความถี่ในการสวิตช์ซึ่งและวงจรนี้สามารถจ่ายโหดลรีแอคทีพได้อีกด้วย วงจร Phase-Controlled DC-AC Converter นี้เหมาะสำหรับวงจร Uninterruptible power supply (UPS)และสามารประยุกต์ใช้สำหรับวงกร Micro Inverter ได้อีกด้วย

วงจรพื้นฐานของวงจร Phase-Controlled DC-AC converter ได้แสดงในรูปที่ 1 สวิตช์ S_1และ S_2 ในสฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงทำการเปิดและปิดสลับกันซ้ำไปซ้ำมาโดยมี Duty ratio ใกล้เคียง 50 เปอร์เซ็นดังแสดงในรูปที่ 2 สวิตช์ S_3 และ S_4 ในฝั่งทุตยภูมิทำการเปิดและปิดสลับกันซ้ำไปซ้ำมาและทำงานเช่นเดียวกันกับฝั่งปฐมภูมิ สวิตช์ในฝั่งปฐมภูมิและฝั่งทุติยภูมิจะทำงานโดยมีความต่างเฟสเท่ากับ DT เมื่อ D คือเวลาที่ทำงานสอดคล้องกันของ Duty ratio ของวงจรคอนเวอร์เตอนี้



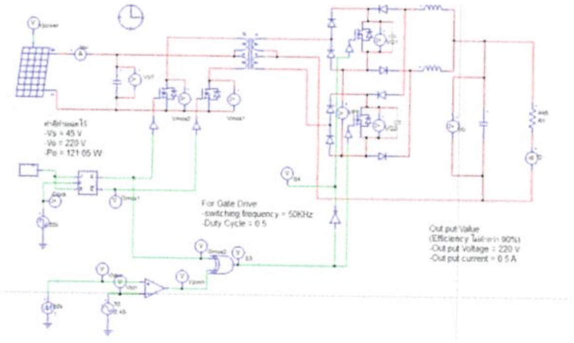
รูปที่ 1 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส



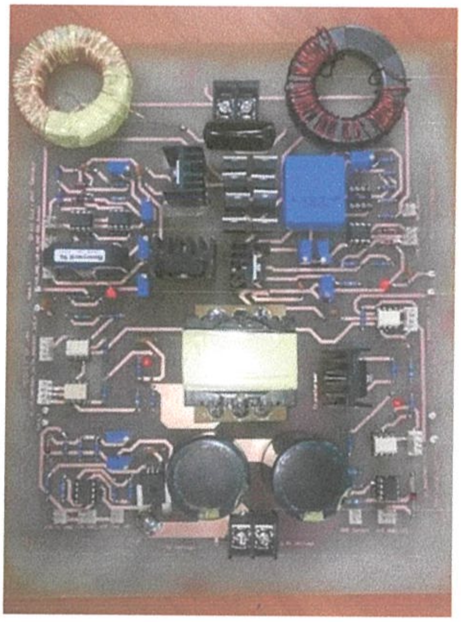
รูปที่ 2 รูปแบบการสวิตซ์และแรงดันขาออก

3. การออกแบบและสร้างโมดูลไมโครอินเวอร์เตอร์

ในการศึกษาโมดูลไมโครอินเวอร์เตอมีการออกแบบและจำลองผลโดยใช้โปรแกรม Power Simulation (PSIM) รูปที่ 3 ช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองก่อนที่จะสร้างไมโครอินเวอร์เตอร์ขึ้นจริง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4



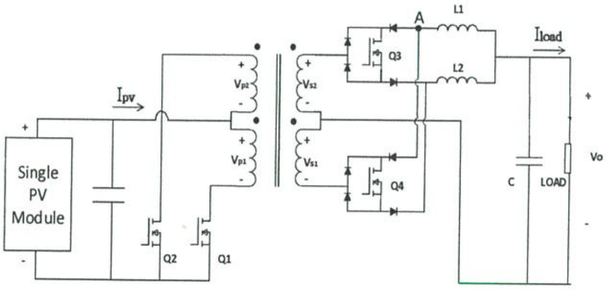
รูปที่ 3 การจำลองชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม (PSIM)



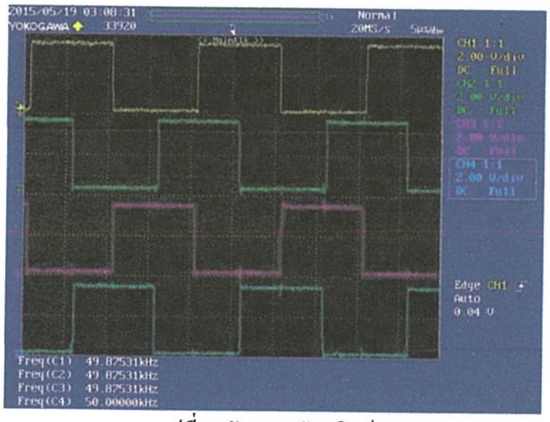
รูปที่ 4 ชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ที่ได้สร้างขึ้นจริง

4. ผลการทดลอง

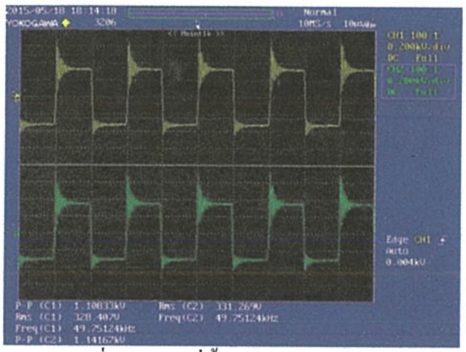
ทำการวัดค่าต่างๆของวงจรไมโครอินเวอร์เตอร์ ที่ได้ร้างขึ้นจริงโดยแสดงตำแหน่งการวัดดังรูปที่ 5



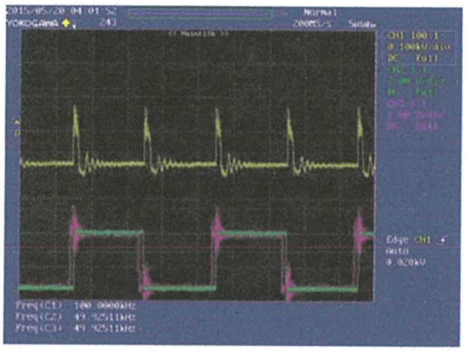
รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งการวัดค่าจากชุดไมโครอินเวอร์เตอร์



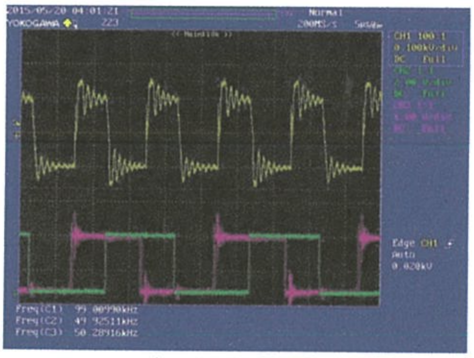
รูปที่ 6 สัญญาณขับสวิสต์ Q1-Q4



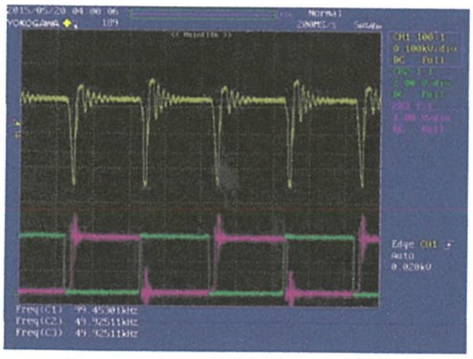
รูปที่ 7 แรงดันที่ขั้วหม้อแปลง Vs1,Vs2



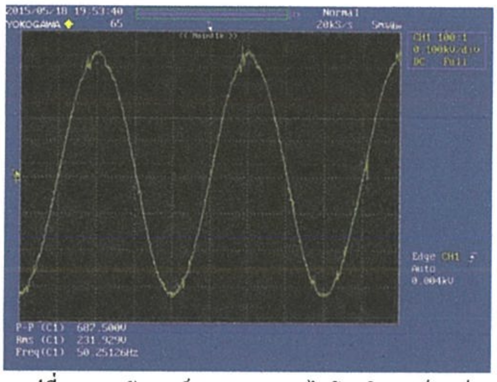
รูปที่ 8 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวัตซ์ Q2,Q3ช่วงการสวิตซ์โดยที่ Duty มีค่าประมาณ 1



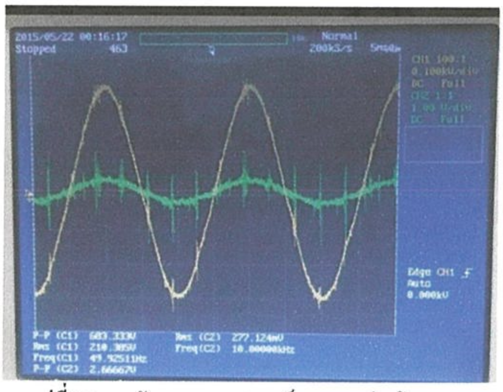
รูปที่ 9 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวัตซ์ Q2,Q3ช่วงการสวิตซ์โดยที่ Duty มีค่าประมาณ 0.5



รูปที่ 10 แรงดันจุด A เปรียบเทียบกับสัญญาณสวัตซ์ Q2,Q3ช่วงการสวิตซ์โดยที่ Duty มีค่าประมาณ 0

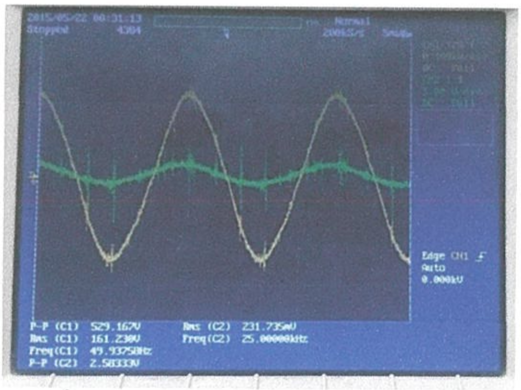


รูปที่ 11 แรงดันเอาท์พุต Vo จากชุดไมโครอินเวอร์เตอร์

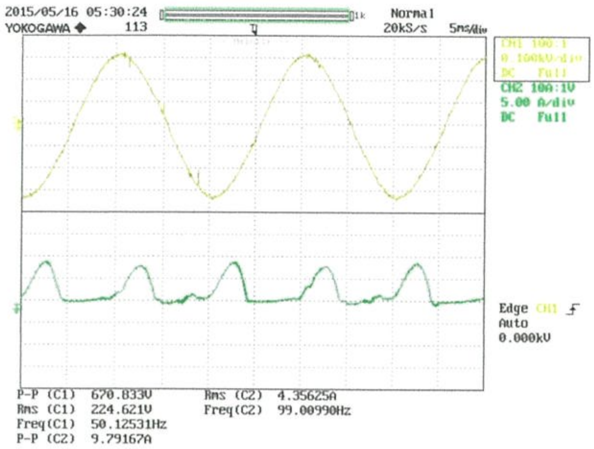


รูปที่ 12 แรงดันและกระแสเอาท์พุต ขณะจ่ายโหลด R

รูปที่ 13 แรงดันและกระแสเอาท์พุต ขณะจ่ายโหลด RL



รูปที่ 14 แรงดันและกระแสเอาท์พุต ขณะจ่ายโหลด RC



รูปที่ 15 แรงดันเอ้าพุทและกระแสอินพุทขณะจ่ายโหลด R (100วัตต์)

ทดลองจ่ายโหลดตัวต้านทาน 100 วัตต์ พบว่ากระแสอินพุท dc ที่จ่ายที่จ่าย ขณะแรงดัน DC อินพุท 40 โวลต์ มีค่า เท่ากับ 4.3 A ซึ่งคิดค่า Power ได้ = 40x4.3 =172 วัตต์ คิดประสิทธิภาพของชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ = $\frac{100}{172}$ x 100% = 58.14%

5. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้นำเสนอแนวคิดการออกแบบไมโครอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เทคนิค Phase-Controlled DC-AC Converter with High-Frequency Switching ซึ่งผลการทดลองพบว่าชุดไมโครอินเวอร์เตอร์ สามารถจ่ายโหลดได้จริงทั้งโหลด R, RL และโหลด RCตามที่ออกแบบไว้อีกทั้งยังสามรถนำไปพัฒนาต่อยอดให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและให้สามรถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำทั้งทางทฤษฏีและทางปฏิบัติตลอดจนท่านอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆให้กับผู้จัดทำโครงงาน

ขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมระบบพลังงานที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำโครงงานครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Koosuke Harada, Hiroshi Sakamoto, and Masahito Shoyama, “Phase-Controlled DC-AC Converter with High-Frequency Switching,” **IEEE Transactions on Power Electronics**. Vol. 3. No. 4. Oct 1988.

[2] ภานุพงศ์ ตรียุทธ และคนอื่นๆ. “ไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์,” **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553

[3] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน, วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic)**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

[4] ปัญญา สุมิตสวรรค์, “ไมโครอินเวอร์เตอร์สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า,” **วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.

[5] ไพศักดิ์ พูลผกา, “เทคนิคการม็อดดูเลตเชิงความกว้างพัลส์ไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง,” **วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.

ประวัติผู้เขียน

นายคุณนิธิ พงษ์ทองหล่อ
ที่อยู่ 174 ม.1 ต.ลำภี อ.ท้ายเหมือง จ.พังงา โทรศัพท์ 0857896613
Email : kunniti_p@outlook.co.th

นายวัชรินทร์ ช่างพะเนา
ที่อยู่ 41 ม.10 ต.โคกขมิ้น อ.วังสะพุง จ. เลย 42130 โทรศัพท์ 08571094422
Email : horizon.kmitl@gmail.com

ภาคผนวก ข
โปรแกรมควบคุมตัวประมวลสัญญาณดิจิตอล

```
#include "DSP28x_Project.h"    // Device Headerfile and Examples Include File
#include "math.h"

#define cr_1 750
#define EN0_on GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO15
#define EN0_off GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO15
#define EN1_on GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO24
#define EN1_off GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO24
#define EN2_on GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO26
#define EN2_off GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO26

#define EN_on GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO12
#define EN_off GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO12

#define  sw    GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34
// Prototype statements for functions found within this file.
void spi_fifo_init(void);
void spi_init(void);
interrupt void adc_isr(void);
interrupt void cpu_timer2_isr(void);
void scia_echoback_init(void);
void scia_fifo_init(void);


// Global variables used in this example:
Uint16 rdata;
Uint16 n=0;
Uint16 D_out0=0,D_out1=0,D_out2=0;
Uint16 A0=0,A1=0,A2=0,A3=0,B0=0,B1=0,B2=0,B3=0,B4=0,B5=0;
Uint16 vsinA=0,vsinB=0,vsinC=0;
Uint16 vmA=0,vmB=0,vmC=0;
int m=0;
float   V2_A=0,Q1_A=0,Q1_1_A=0;
float   Offset_Vs_A=0,Offset_Vs_B=0,Offset_Vs_C=0;
float   Offset_is_A=0,Offset_is_B=0,Offset_is_C=0;
float   Offset_iL_A=0,Offset_iL_B=0,Offset_iL_C=0;
float   va=0,vb=0,vc=0,vdc_bus=0,isa=0,isb=0,isc=0,iLa=0,iLb=0,iLc=0;
float   vds=0,vqs=0,vd=0,vq=0;
```

```
float   theta=0,theta_1=0;
float    Er_P=0,Er=0,Er_I=0,Er_I_old=0,Omega1=0,Omega2=0;
float    theta5=0,theta_a=0,theta_b=0,theta_c=0;
float    isds=0,isqs=0,iLds=0,iLqs=0;
float    isd=0,isq=0,iLd=0,iLq=0;
float    Q1_isd=0,Q2_isd=0,isd_2=0;
float    Q1_isq=0,Q2_isq=0,isq_2=0;
float    Q1_iLd=0,Q2_iLd=0,iLd_5=0;
float    Q1_iLq=0,Q2_iLq=0,iLq_5=0;
float    vd5_star=0,vq5_star=0;
float    isds2=0,isqs2=0;
float    vd_star=80;     //<--------vdc Bus cmd
float    k=54;
float    g=1;
float    isha=0,ishb=0,ishc=0,vaFfb=0,vbFfb=0,vcFfb=0;
float    vd5s_star=0,vq5s_star=0,vaFff=0,vbFff=0,vcFff=0;
float    vAFa_star=0,vAFb_star=0,vAFc_star=0;
float    er_vd=0,erp=0,eri=0,delta_iq_star=0;
float    kp=0.05,ki=0.000005;
Uint16 count=0;
Uint16 data[3];
//float a=0,b=0,v=0;
float   v_d=0;  //pu of dc bus

void main(void)
        {
        er_vd=0,erp=0,eri=0,delta_iq_star=0;
        v_d=1/vd_star;
        // Step 1. Initialize System Control:
        // PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
        // This example function is found in the DSP2833x_SysCtrl.c file.0
        InitSysCtrl();
        InitSciaGpio();

        //        Initial GPIO      //

        EALLOW;
```

```
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO12 = 0; // PIN 10 is GPIO
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO12 = 1;   //GPIO 10 is output

GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO15 = 0; // PIN 15 is GPIO
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO15 = 1;   //GPIO 15 is output

GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO24 = 0; // PIN 24 is GPIO
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO24 = 1;   //GPIO 24 is output

GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO26 = 0; // PIN 26 is GPIO
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO26 = 1;   //GPIO 26 is output

GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO0 = 0;   // Enable pullup on GPIO0
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO1 = 0;   // Enable pullup on GPIO1
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO2 = 0;   // Enable pullup on GPIO2
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO3 = 0;   // Enable pullup on GPIO3
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO4 = 0;   // Enable pullup on GPIO4
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO5 = 0;   // Enable pullup on GPIO5
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO6 = 0;   // Enable pullup on GPIO6
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO7 = 0;   // Enable pullup on GPIO7
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO8 = 0;   // Enable pullup on GPIO8
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO9 = 0;   // Enable pullup on GPIO9
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO10 = 0;   // Enable pullup on GPIO10
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO11 = 0;   // Enable pullup on GPIO11

GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1;  // GPIO0 = PWM1A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO1 = 1;  // GPIO1 = PWM1B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 1;  // GPIO2 = PWM2A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 1;  // GPIO3 = PWM2B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 1;  // GPIO4 = PWM3A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 1;  // GPIO5 = PWM3B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO6 = 1;  // GPIO0 = PWM4A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO7 = 1;  // GPIO1 = PWM4B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO8 = 1;  // GPIO2 = PWM5A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO9 = 1;  // GPIO3 = PWM5B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO10 = 1;  // GPIO4 = PWM6A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO11 = 1;  // GPIO5 = PWM6B
```

```
GpioCtrlRegs.GPBPUD.bit.GPIO34 = 0;  // Enable pullup on GPIO34
GpioCtrlRegs.GPBMUX1.bit.GPIO34 = 0; // GPIO34 = GPIO34
GpioCtrlRegs.GPBDIR.bit.GPIO34 = 0;  // GPIO34 = input

EDIS;


EALLOW;
#if (CPU_FRQ_150MHZ)     // Default - 150 MHz SYSCLKOUT
#define ADC_MODCLK 0x3 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 = 150/(2*3)   =
25.0 MHz
#endif
#if (CPU_FRQ_100MHZ)
#define ADC_MODCLK 0x2 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 = 100/(2*2)   =
25.0 MHz
#endif
// Specific clock setting for this example:

// Define ADCCLK clock frequency ( less than or equal to 25 MHz )
// Assuming InitSysCtrl() has set SYSCLKOUT to 150 MHz
SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK;        // HSPCLK =
SYSCLKOUT/ADC_MODCLK
EDIS;
// Step 2. Initialize GPIO:
InitSpiaGpio();
DINT;
InitPieCtrl();
// Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;
InitPieVectTable();

// Interrupts that are used in this example are re-mapped to
// ISR functions found within this file.
EALLOW;  // This is needed to write to EALLOW protected register
PieVectTable.ADCINT = &adc_isr;
PieVectTable.TINT2 = &cpu_timer2_isr;
EDIS;    // This is needed to disable write to EALLOW protected registers
```

```
        InitCpuTimers();
        ConfigCpuTimer(&CpuTimer2, 150, 100);
        CpuTimer2Regs.TCR.all = 0x4001; // Use write-only instruction to set TSS bit =
0
        //SPI initial
        spi_fifo_init();    // Initialize the Spi FIFO
        spi_init();                   // init SPI

        InitAdc();  // init the ADC

        // Step 5. User specific code, enable interrupts:

        // Enable ADCINT in PIE
        PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx6 = 1;
        IER |= M_INT1; // Enable CPU Interrupt 1
        IER |= M_INT14;
        EINT;          // Enable Global interrupt INTM
        ERTM;          // Enable Global realtime interrupt DBGM

        // Configure ADC
        AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = 0x0;
        AdcRegs.ADCTRL1.bit.CPS = 0x1;
        AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = 0x0;
        //just make sure  ADCCLK = 12.5MHz(not MAX) and ACQ_PS = 0
        //for  12.5 MSPS or 80 ns per sample


        AdcRegs.ADCTRL3.bit.SMODE_SEL = 0x1; // Setup simultaneous sampling
mode
        AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 0x1; // Setup cascaded sequencer mode
        AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0007;       // Setup 16 conv's on SEQ1
        AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; // Setup ADCINA0 as 1st SEQ1
conv.   Voltage sensor A
        AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; // Setup ADCINA1 as 1st SEQ1
conv.   Voltage sensor B
        AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; // Setup ADCINA2 as 1st SEQ1
conv.   Voltage sensor C
```

```
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x3; // Setup ADCINA3 as 1st SEQ1
conv.  Current sensor A
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV04 = 0x4; // Setup ADCINA4 as 2nd SEQ1
conv.  Current sensor B
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV05 = 0x5; // Setup ADCINA5 as 2nd SEQ1
conv.  Current sensor C
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0;  // stop after reaching End of Sequence
//AdcRegs.ADCTRL2.bit.EPWM_SOCA_SEQ1 = 1;// Enable SOCA from ePWM to
start SEQ1
AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 1;  // Enable SEQ1 interrupt (every
EOS))( end-of-sequence)


//==============================================================
==============
// Configuration epwm
//==============================================================
==============
// Initialization Time
//=========================//
// EPWM Module 1 config
EPwm1Regs.TBPRD = cr_1; //
EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // Set Phase register to zero
EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UP; // Symmetrical mode
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Master module
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PRDLD = TB_SHADOW;
EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_CTR_ZERO; // Sync down-stream
module
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
EPwm1Regs.AQCTLA.bit.PRD = AQ_TOGGLE; // set actions for EPWM1A
EPwm1Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable Dead-band
module
EPwm1Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // Active Hi complementary
EPwm1Regs.DBFED = 375; // FED = 20 TBCLKs
EPwm1Regs.DBRED = 375; // RED = 20 TBCLKs
```

```
// EPWM Module 2 config
EPwm2Regs.TBPRD = cr_1; //
EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // Set Phase register to zero
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UP; // Symmetrical mode
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_ENABLE; // Slave module
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PRDLD = TB_SHADOW;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN; // sync flow-through
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_TOGGLE; // set actions for EPWM2A
EPwm2Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable Dead-band
module
EPwm2Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // Active Hi Complementary
EPwm2Regs.DBFED = 375; // FED = 20 TBCLKs
EPwm2Regs.DBRED = 375; // RED = 20 TBCLKs
// EPWM Module 3 config
EPwm3Regs.TBPRD = cr_1; //
EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // Set Phase register to zero
EPwm3Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UP; // Symmetrical mode
EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_ENABLE; // Slave module
EPwm3Regs.TBCTL.bit.PRDLD = TB_SHADOW;
EPwm3Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN; // sync flow-through
EPwm3Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm3Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
EPwm3Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
EPwm3Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // set actions for EPWM3Ai
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.PRD = AQ_CLEAR;
EPwm3Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable Dead-band
module
EPwm3Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // Active Hi complementary
EPwm3Regs.DBFED = 0; // FED = 20 TBCLKs
EPwm3Regs.DBRED = 0; // RED = 20 TBCLKs


scia_fifo_init();    // Initialize the SCI FIFO
```

```
        scia_echoback_init();  // Initalize SCI for echoback



}
interrupt void cpu_timer2_isr(void)
{
        EALLOW;
        CpuTimer2.InterruptCount++;
        //EN_on=1;
        //DELAY_US(10);
        //EN_off=1;
        AdcRegs.ADCTRL2.bit.SOC_SEQ1=1;
        // The CPU acknowledges the interrupt.
        EDIS;
}

interrupt void  adc_isr(void)
{
        EN_on=1;
        //V-source
        A0 = AdcRegs.ADCRESULT0>>4;
        A1 = AdcRegs.ADCRESULT2>>4;
        A2 = AdcRegs.ADCRESULT4>>4;
        //v-dc-bus
        A3 = AdcRegs.ADCRESULT6>>4;
        //i-Source
        B0 = AdcRegs.ADCRESULT1>>4;
        B1 = AdcRegs.ADCRESULT3>>4;
        B2 = AdcRegs.ADCRESULT5>>4;
        //i-LOAD
        B3 = AdcRegs.ADCRESULT7>>4;
        B4 = AdcRegs.ADCRESULT9>>4;
        B5 = AdcRegs.ADCRESULT11>>4;
        if(n<200)
        {       //vs
                Offset_Vs_A = Offset_Vs_A+ (A0*7.326e-4);
```

```
            //is
            Offset_is_A = Offset_is_A+(B0*7.326e-4);

            //iL
            Offset_iL_A = Offset_iL_A+(B3*7.326e-4);

            n++;

        }else if(n==200)
        {   Offset_Vs_A = Offset_Vs_A*0.005;     //1/200

            //is
            Offset_is_A = Offset_is_A*0.005;

            //iL
            Offset_iL_A = Offset_iL_A*0.005;

            n++;
        }else if(n>200)
        {
            va = 226.27417*((A0*7.326e-4) -
Offset_Vs_A);///226.27417*1.02794*((Volt0*7.326e-4) - Offset_A);
        //226.27417=sqrt(2)*240/1.5


            vdc_bus=200*(A3*7.326e-4);

            isa=10*((B0*7.326e-4) -Offset_is_A );


            iLa=10*((B3*7.326e-4) -Offset_iL_A );





            //PLL
                //if(data_rec[12]==1)          //enable phase A
                //{
```

```
Q1_A = va + (0.9761*Q1_1_A); //make phase shift
V2_A = (0.9761*Q1_A) - Q1_1_A;
Q1_1_A = Q1_A;
Er = va*cos(theta_1) - V2_A*sin(theta_1);  //  er = vq
//PI
Er_P = Er*1e-4;                      //kp
Er_I = Er_I_old + (Er*5e-4);         //ki
Er_I_old = Er_I;
Omega1 = 0 ;//Er_P + Er_I;
Omega2 = Omega1+ 0.0314159;
theta = theta_1 + Omega2;
if(theta>=6.283185308)
{
        theta = theta - 6.283185308;
}
theta_1 = theta;
//End PLL phase A

//              //PLL/////////////////////////////////////////////
//              //PI
//              Er_P = Er *0.001;                       //kp
//              Er_I = Er_I_old + (Er*0.0005);          //ki
//              Er_I_old = Er_I;
//              Omega1 = Er_P + Er_I;
//              Omega2 = Omega1+ 0.0314159;
//              theta = theta_1 + Omega2;
//              if(theta>=6.283185308)
//              {
//                      theta = theta - 6.283185308;
//              }
//              theta_1 = theta;
//              //=========================================


vmA=(0.7*cr_1*0.5*sin(theta))+(0.5*cr_1);

EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA =vmA; // adjust duty for output EPWM2A
//EPwm2Regs.CMPB=vmA;
```

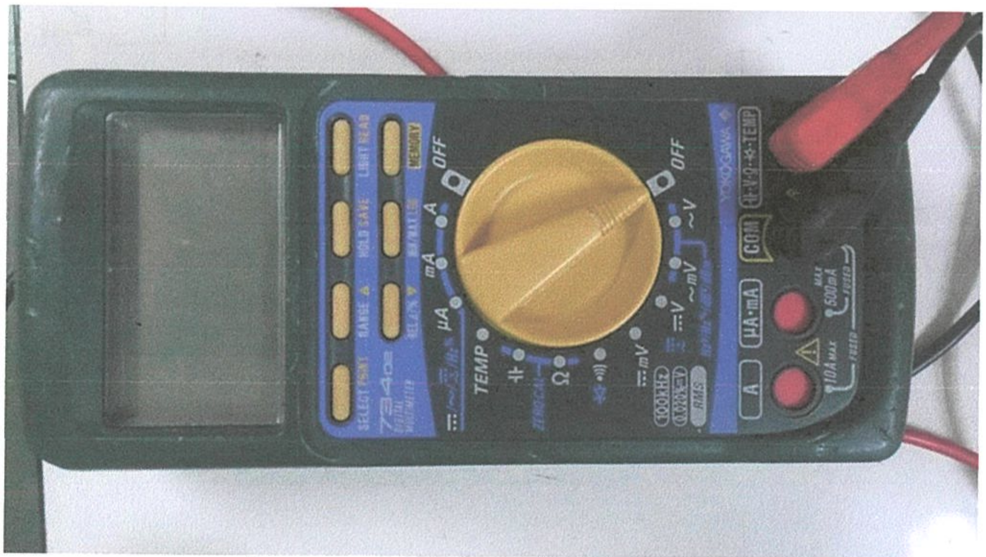
```
                EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA =vmA; // adjust duty for output EPWM3A
                EPwm3Regs.CMPB=vmA;


                EN_off=1;
        }







//      RELAY_Coff=1;
        //      End interupt /////

        AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;      // Clear INT SEQ1 bit
        AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ2_CLR = 1;      // Clear INT SEQ1 bit
        PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;  // Acknowledge interrupt to PIE
}



void receive_array(int byte[],int size)
{
                int j=0;

                for(j=0;j<size;j++)
                {
                // Wait for inc character
                        while(SciaRegs.SCIFFRX.bit.RXFFST !=1) { } // wait for XRDY =1
for empty state
                        // Get character
                        byte[j]= SciaRegs.SCIRXBUF.all;

                }
}
```

```
// Test 1,SCIA  DLB, 8-bit word, baud rate 0x000F, default, 1 STOP bit, no parity
void scia_echoback_init()
{
        // Note: Clocks were turned on to the SCIA peripheral
        // in the InitSysCtrl() function

        SciaRegs.SCICCR.all =0x0007;  // 1 stop bit,  No loopback
        // No parity,8 char bits,
        // async mode, idle-line protocol
        SciaRegs.SCICTL1.all =0x0003;  // enable TX, RX, internal SCICLK,
        // Disable RX ERR, SLEEP, TXWAKE
        SciaRegs.SCICTL2.all =0x0003;
        SciaRegs.SCICTL2.bit.TXINTENA =1;
        SciaRegs.SCICTL2.bit.RXBKINTENA =1;
        //      Baud rate = LSPCLK/(SPIBRR+1)
#if (CPU_FRQ_150MHZ)
        //                      01 E7 hex = 487 dec for 9600
        //                      00 1D hex = 29 dec for 156250
        SciaRegs.SCIHBAUD    =0x0000;  // 937500 baud @LSPCLK = 37.5MHz.
        SciaRegs.SCILBAUD    =0x0004;
#endif
#if (CPU_FRQ_100MHZ)
        //                      01 44 hex = 324 dec for 9600
        SciaRegs.SCIHBAUD    =0x0001;  // 9600 baud @LSPCLK = 20MHz.
        SciaRegs.SCILBAUD    =0x0044;
#endif
        SciaRegs.SCICTL1.all =0x0023;  // Relinquish SCI from Reset
}

// Transmit a character from the SCI




// Initalize the SCI FIFO
void scia_fifo_init()
{
```

```
        SciaRegs.SCIFFTX.all=0xE040;
        SciaRegs.SCIFFRX.all=0x204f;
        SciaRegs.SCIFFCT.all=0x0;
}

void spi_init()
{
        SpiaRegs.SPICCR.all = 0x000F;                 // Reset on, rising edge, 16-bit
char bits
        SpiaRegs.SPICTL.all = 0x0006;                 // Enable master mode,
normal phase,
        // enable talk, and SPI int disabled.
        SpiaRegs.SPIBRR         =       0x0000;                            // if
SPIBRR is 3 to 127, Baud rate = LSPCLK/(SPIBRR+1) **LSPCLK =
37.5MHz//0,1,2//brr=9375000
        SpiaRegs.SPICCR.all = 0x009F;                 // Relinquish SPI from
Reset
        SpiaRegs.SPIPRI.bit.FREE = 1;          // Set so breakpoints don't disturb
xmission
}

void spi_fifo_init()
{
        // Initialize SPI FIFO registers
        SpiaRegs.SPIFFTX.all=0xE040;
        SpiaRegs.SPIFFRX.all=0x204f;
        SpiaRegs.SPIFFCT.all=0x0;
}


//=============================================================
==============
// End of SourceCode.
//=============================================================
==============
```

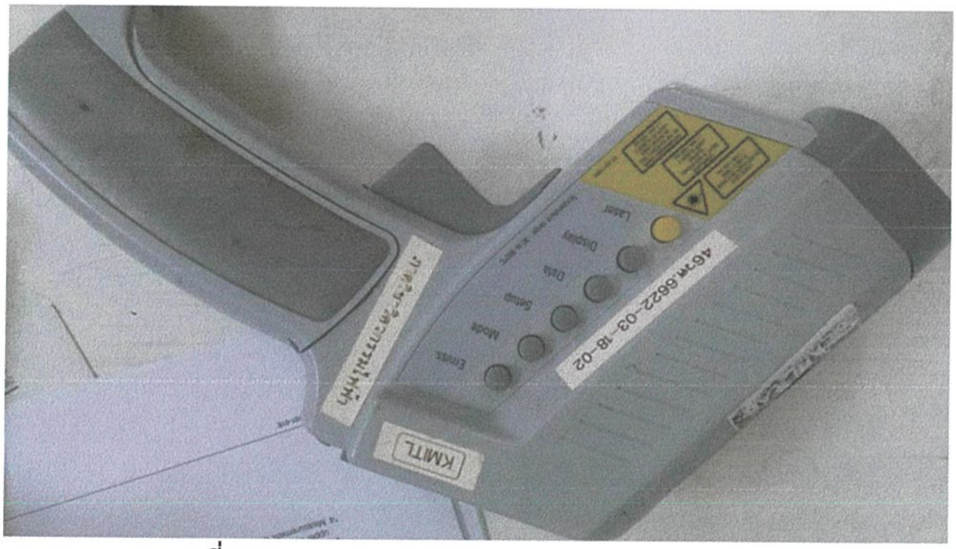
ภาคผนวก ค
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงาน

รูปที่ ค.1 ดิจิตอลออสซิโลสโคป YOKOGAWA รุ่น DL1740E



รูปที่ ค.2 Digital mutimeter YOKOGAWA 73402

รูปที่ ค.3 Differential Probe YOKOGAWA รุ่น 700625



รูปที่ ค.4 temperature measurement instruments

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายคุณนิธิ พงษ์ทองหล่อ
วัน เดือน ปีเกิด	4 ธันวาคม 2535
ภูมิลำเนา	จังหวัดพังงา
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษา โรงเรียนดีบุกพังงาวิทยายน ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล	นายวัชรินทร์ ช่างพะเนา
วัน เดือน ปีเกิด	1 มกราคม 2535
ภูมิลำเนา	จังหวัดเลย
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษา โรงเรียนขอนแก่นวิทยายน ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง