

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์กำลัง  
SOLID STATE TRANSFORMER

โดย

นายจรรยา	วิวัฒน์
นายทวิชัย	เดชาชน
นายชัยวัฒน์	บุญเรือง
นายชวณัฐ	ศ. น.โรจน์

ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาของหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง  
SOLID STATE TRANSFORMER

โดย

นายเจษฎา	วัฒนคุ้ม
นายชนาธิป	เลาหสม
นายชัยรัช	ขุนระจับสังข์
นายชาญปกรณ์	ณ นิโรจน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

# SOLID STATE TRANSFORMER

JEDSADA

WATTANAKUM

CHANATIP

LAOHASOM

CHAITAWAT

KOONRANGABSANG

CHARNPAKORN

NA NIROJANA

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

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง  
SOLID STATE TRANSFORMER

โดย

นายเจษฎา	วัฒนคุ่ม
นายชนาธิป	เลาหสม
นายชัยวัช	ขุนระงับสังข์
นายชาญปกรณ์	ณ นิโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย  
รองศาสตราจารย์ ประภาช ไพรสสุวรรณ

ปริญญาโทปีการศึกษา 2557


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ผู้จัดทำ

1. นายเจษฎา วัฒนคุ้ม
2. นายชนาธิป เลาสสม
3. นายชัยธวัช ขุนระงับสังข์
4. นายชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย )

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ประภาช ไพรสวรรณา )

## หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เจษฎา	วัฒนคุ้ม	
ชนาธิป	เลาหสม	
ชัยวิช	ขุนระงับสังข์	
ชาญปกรณ์	ณ นิโรจน์	
รศ.ดร.สุรินทร์	คำฝอย	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ประภาษ	ไพรสวรรณา	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557		

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Solid State Transformer) ซึ่งเป็นการใช้งานร่วมกันระหว่างหม้อแปลงความถี่สูงและวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หม้อแปลงชนิดนี้สามารถลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากระบบโซลาร์ฟาร์มได้ โดยค่าความสูญเสียดังกล่าวที่เกิดในช่วงเวลากลางคืน อันเป็นช่วงที่โซลาร์ฟาร์มไม่มีการผลิตพลังงาน นอกจากนี้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นมีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าหม้อแปลงความถี่ต่ำที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน คือการป้องกันการเกิดปัญหาแรงดันตกและแรงดันเกินได้ ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ส่วนที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษาในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มุ่งเน้นไปที่การศึกษาและพัฒนางจรอินเวอร์เตอร์ชนิด modular multilevel inverter แบบสามระดับ โดยจะใช้โปรแกรม PSIM 9.0 ในจำลองผลด้วยการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวิธี Phase disposition รวมไปถึงการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบที่พิกัดกำลัง 300 วัตต์เพื่อนำมาใช้ในการทดลองนี้ ในการศึกษาทดลอง จะมีการทดสอบที่หลายๆสถานะ ไม่ว่าจะเป็น สภาวะเชิงเส้น(linear) ทั้งแบบที่พิกัด และครึ่งหนึ่งของพิกัด รวมไปถึงสภาวะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ซึ่งจะเป็นการใช้โหลดเป็นมอเตอร์ร่วมกับโหลดไฟ ทำการวัดค่าที่ได้จากการทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแส เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าเป็นไปตามทฤษฎี และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเมื่อทำงานอยู่ที่พิกัดอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

## Solid State Transformer

Mr.Jedsada	Wattanakum	
Mr.Chanatip	Laohasom	
Mr.Chaitawat	Koonrangabsang	
Mr.Charnpakorn	Na Nirojana	
Assoc.Prof.Dr.Surin Khomfoi		Advisor
Assoc.Prof PraPart Prisuwan		Advisor

2014

### ABSTRACT

Solid state transformer (SST) is presented in this thesis. SST is the combination of high-frequency transformers and power electronics circuits. The total losses of the solar farm system can be reduce while solar-farms are not used in the night time by using SST. Under voltage and over voltage prevention are also the advantages of a SST compared to a low frequency transformer. The inverter which is connected to utility system is specifically interested and developed in this thesis by using three-level modular multilevel inverter topology. PSIM 9.0 is used to simulate by generating PWM signal with a phase disposition PWM method. The 300 watt prototype is also developed for experimental validation. The tests are operated on several conditions such as full-load, half-load, and an induction motor with lamp load. The efficiency measurement,  $THD_i$  and  $THD_v$  are also validated. The study illustrate that the simulation and experimental results are in good agreement. The total efficiency of the developed prototype is about 70%.

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำปริญญานิพนธ์เรื่องหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์นี้ จะไม่สามารถเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีหากปราศจากความกรุณาและคำแนะนำต่างๆจากอาจารย์ทั้งสองท่าน รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย และรศ.ประกาศ ไพรสวรรณา ขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านสำหรับการให้คำปรึกษา แนวคิด และคำแนะนำต่างๆเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน(Renewable Energy Application Laboratory, REAL) สำหรับการช่วยเหลือในด้านต่างๆไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์และสถานที่ ขอขอบคุณพี่ๆในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะคุณปัญญา เข็มมุก(พี่หมุ) ที่คอยให้คำแนะนำให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด รวมถึงเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการที่คอยช่วยเหลือกัน ให้กำลังใจกัน ไม่ทิ้งกันไปไหน

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยถ่ายทอดวิชาความรู้ เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปประกอบวิชาชีพ และเป็นวิศวกรที่ดีมีคุณภาพของสังคม

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงสมาชิกท่านอื่นๆในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเสมอมา จนทำให้โครงการนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญรูป .....	VIII
สารบัญตาราง .....	XII
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ .....	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ .....	3
1.5 แผนการดำเนินโครงการ .....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>6</b>
2.1 บทนำ .....	6
2.2 พลังงานแสงอาทิตย์ .....	6
2.3 ผลกระทบของพลังงานทดแทนที่มีต่อระบบไฟฟ้า .....	7
2.3.1 แรงดันเกิน .....	7
2.3.2 แรงดันตก .....	8
2.4 หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง .....	8
2.5 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว .....	9
2.6 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ .....	10
2.6.1 Multilevel Diode clamped Inverter (NPCMLI) .....	10
2.6.2 Multilevel Flying capacitor Inverter (CCMLI) .....	11
2.6.3 Cascades Multilevel Inverter (CMCI) .....	12
2.6.4 Generalized P2-cell Multilevel Inverter (GMLI) .....	12
2.6.5 Reversing Voltage Multilevel Inverter (RVMLI) .....	13
2.6.6 Modular Multilevel Inverter (MMI) .....	14
2.6.7 Generalized Multilevel Current Source Inverter (GMCSI) .....	15
2.7 การมอดูเลชัน .....	16
2.7.1 PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ .....	16
2.7.2 PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ .....	17
2.7.2.1 Phase Shifted Carrier PWM (PSCPWM) .....	18
2.7.2.2 Phase Distortion PWM (PDPWM) .....	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 สรุป .....	21
<b>บทที่ 3 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....</b>	<b>22</b>
3.1 บทนำ.....	22
3.2 การจำลองการทำงานของ Modular Multilevel Inverter .....	22
ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	
3.3 ผลการจำลองการทำงานของ Modular Multilevel Inverter .....	24
ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	
3.3.1 จำลองการทำงานเมื่อไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้า .....	24
3.3.2 จำลองการทำงานเมื่อเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 300 W .....	25
3.3.3 จำลองการทำงานเมื่อเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 260 W .....	26
3.3.4 จำลองการทำงานเมื่อเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 200 W .....	27
3.3.5 จำลองการทำงานเมื่อเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 120 W .....	28
3.3.6 จำลองการปรับอัตรามือตดูเลชั่น .....	29
3.3.6.1 การจำลองที่อัตรามือตดูเลชั่น 0.2 .....	29
3.3.6.2 การจำลองที่อัตรามือตดูเลชั่น 0.4 .....	30
3.3.6.3 การจำลองที่อัตรามือตดูเลชั่น 0.6 .....	30
3.3.6.4 การจำลองที่อัตรามือตดูเลชั่น 0.8 .....	31
3.3.6.5 การจำลองที่อัตรามือตดูเลชั่น 1.0 .....	31
3.4 บทสรุป .....	32
<b>บทที่ 4 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ .....</b>	<b>33</b>
4.1 บทนำ .....	33
4.2 การออกแบบและสร้างชิ้นงานจริง .....	33
4.2.1 ชุดวงจรเรียงกระแสเพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสตรง .....	33
4.2.2 ชุดModular Multilevel Inverter .....	35
4.2.3 ชุดวงจรขับเคลื่อน .....	37
4.2.4 ชุดวงจรควบคุม .....	38
4.2.5 ชุดวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน .....	40
4.3 บทสรุป .....	41
<b>บทที่ 5 ผลการทดลองเครื่องต้นแบบ .....</b>	<b>42</b>
5.1 บทนำ .....	42

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 การทดลองอินเวอร์เตอร์เมื่อไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำด้านขาออก .....	42
5.2.1 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้า .....	42
5.2.2 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 300 W .....	43
5.2.3 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 260 W .....	44
5.2.4 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 200 W .....	45
5.2.5 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 120 W .....	46
5.3 การทำลองอินเวอร์เตอร์เมื่อต้องวงจรรองความถี่ต่ำด้านขาออก .....	47
5.3.1 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้า .....	47
5.3.2 การทดลองอินเวอร์เตอร์เมื่อปรับค่าอัตรามือคตุเลขชั้น .....	48
5.3.2.1 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามือคตุเลขชั้น 0.2 .....	49
5.3.2.2 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามือคตุเลขชั้น 0.4 .....	49
5.3.2.3 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามือคตุเลขชั้น 0.6 .....	50
5.3.2.4 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามือคตุเลขชั้น 0.8 .....	50
5.3.2.5 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามือคตุเลขชั้น 1.0 .....	51
5.3.3 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 300 W .....	52
5.3.4 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 260 W .....	54
5.3.5 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 200 W .....	56
5.3.6 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 120 W .....	58
5.3.7 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระ 300 W และมอเตอร์ 250 W .....	60
5.3.8 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระ 260 W และมอเตอร์ 250 W .....	62
5.3.9 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระ 200 W และมอเตอร์ 250 W .....	64
5.3.8 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระ 140 W และมอเตอร์ 250 W .....	66
5.4 การทดลองวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ .....	69
5.5 บทสรุป .....	70
<b>บทที่ 6 บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา .....</b>	<b>71</b>
6.1 บทสรุป .....	71
6.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ .....	72
6.3 แนวทางการพัฒนา .....	72
<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>73</b>
<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>74</b>
ภาคผนวก ก. เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างจริงในปริญญาานิพนธ์ .....	75
ภาคผนวก ข. เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ในปริญญาานิพนธ์ .....	78

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค. โปรแกรมที่ใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์ .....	83
ภาคผนวก ง. ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในปริศยานิพนธ์ .....	89
ภาคผนวก จ. บทความทางวิชาการ .....	109
ประวัติผู้เขียน .....	114

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โชล่าฟาร์ม .....	6
2.2 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	7
2.3 กราฟแรงดันเกิน .....	8
2.4 กราฟแรงดันตก .....	8
2.5 โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง .....	9
2.6 หลักการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง .....	9
2.7 (ก.) วงจรฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge) .....	10
2.7 (ข.) รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรถูกปรับ (Half-Bridge) .....	10
2.8 (ก.) วงจรฟูลบริดจ์ (Full-Bridge) .....	10
2.8 (ข.) รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรถูกปรับ (Full-Bridge) .....	10
2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ .....	11
2.10 วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ .....	11
2.11 วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด .....	12
2.12 (ก.) P2-cell .....	13
2.12 (ข.) วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซลล์ P2 .....	13
2.13 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแรงดันย้อนกลับ .....	14
2.14 (ก.) โมดูลชนิดครึ่งคลื่น .....	14
2.14 (ข.) โมดูลชนิดครึ่งคลื่นร่วมกับไทรสเตอร์บายพาส .....	14
2.14 (ค.) โมดูลชนิดเต็มคลื่น .....	14
2.14 (ง.) โมดูลชนิดแคลมป์ครึ่งคลื่นสองชั้น .....	14
2.14 (จ.) วงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดมอดดูลา โดยใช้โมดูลชนิดครึ่งคลื่น .....	15
2.15 อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีแหล่งจ่ายกระแส .....	16
2.16 (ก.) เส้นประสีน้ำเงินแสดงถึงสัญญาณ PWM อ้างอิงและเส้นสีเขียวทึบ คือสัญญาณพาหะสามเหลี่ยม .....	17
2.16 (ข.) เส้นทึบสีเขียว แสดงแรงดันขาออก .....	17
2.17 กราฟของวิธี PSCPWM โดยจะเป็นสัญญาณพาหะและสัญญาณอ้างอิงของ CMCI .....	18
ทำระดับมีสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะอย่างละสองสัญญาณ แต่ละสัญญาณสำหรับแต่ละโมดูล	
2.18 โมดูลแรงดันสองโมดูล แยกออกเป็นสองกราฟ .....	19
2.19 สัญญาณอ้างอิง (ไซน์) และสัญญาณพาหะ (สามเหลี่ยม) ในกรณีที่ใช้วิธี .....	20
การมอดดูเลทแบบ PDPWM ควบคุมอินเวอร์เตอร์ทำระดับชนิด NPCMLI หรือ CMCI	
2.20 แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ NPCMLI ที่ใช้วิธี PDPWM .....	20
3.1 วงจร Modular Multilevel Inverter .....	22
3.2 วงจรควบคุม Modular Multilevel Inverter .....	23
3.3 รูปคลื่นสัญญาณการสวิตช์ .....	23

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้าและวงจรรองความถี่ต่ำ .....	24
3.5 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้าและทำการเชื่อมต่่วงจรรองความถี่ต่ำ	25
3.6 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่พิกัดและไม่ได้ต่่วงจรรองความถี่ต่ำ .....	25
3.7 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่พิกัดและต่่วงจรรองความถี่ต่ำ .....	26
3.8 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ครึ่งหนึ่งของพิกัด .....	26
และไม่ได้ต่่วงจรรองความถี่ต่ำ	
3.9 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ครึ่งหนึ่งของพิกัด .....	27
และต่่วงจรรองความถี่ต่ำ	
3.10 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 200 W และไม่ได้ต่่วงจรรองความถี่ต่ำ ...	27
3.11 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 200 W และต่่วงจรรองความถี่ต่ำ .....	28
3.12 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 120 W และไม่ได้ต่่วงจรรองความถี่ต่ำ ...	28
3.13 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 120 W และต่่วงจรรองความถี่ต่ำ .....	29
3.14 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชั้น 0.2 .....	29
3.15 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชั้น 0.4 .....	30
3.16 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชั้น 0.6 .....	30
3.17 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชั้น 0.8 .....	31
3.18 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชั้น 1.0 .....	31
3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราमितดูละชั้นกับแรงดันขาออก .....	32
4.1 รูปชิ้นงานเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ .....	33
4.2 วงจรชุดเรียงกระแส .....	34
4.3 ชิ้นงานชุดวงจรเรียงกระแส .....	34
4.4 วงจร Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ .....	35
4.5 ชิ้นงาน Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ .....	36
4.6 (ก.) ชิ้นงานตัวเหนี่ยวนำ .....	37
4.6 (ข.) วงจรของตัวเหนี่ยวนำ .....	37
4.7 ชิ้นงานวงจรขับเคลื่อน .....	37
4.8 วงจรขับเคลื่อน .....	38
4.9 ชิ้นงานชุดวงจรควบคุม .....	39
4.10 วงจรชุดควบคุม .....	39
4.11 ชุดวงจรความถี่ต่ำผ่าน .....	41
5.1 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อไม่มีภาระทางไฟฟ้าและไม่ได้ต่่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน .....	43
5.2 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 300 W และไม่ได้ต่่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน .....	44
5.3 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 260 W และไม่ได้ต่่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน .....	45
5.4 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 200 W และไม่ได้ต่่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน .....	46
5.5 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 120 W และไม่ได้ต่่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน .....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 รูปคลื่นแรงดันเมื่อไม่ได้ต่อภาระไฟฟ้าและต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน .....	48
5.7 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชัน 0.2 .....	49
5.8 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชัน 0.4 .....	49
5.9 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชัน 0.6 .....	50
5.10 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชัน 0.8 .....	50
5.11 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตราमितดูละชัน 1.0 .....	51
5.12 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการमितดูละชันกับแรงดันขาออก ระหว่างผลที่วัดได้จากการจำลอง และผลที่วัดได้จากตัวชิ้นงาน .....	51
5.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 300 W .....	53
และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
5.14 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระที่พิกัด .....	53
5.15 สเปกตรัมของ THD <sub>v</sub> และ THD <sub>i</sub> ที่ 300 W .....	53
5.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 260 W .....	55
และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
5.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระที่ 260 W .....	55
5.18 สเปกตรัมของ THD <sub>v</sub> และ THD <sub>i</sub> ที่ 260 W .....	55
5.19 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 200 W .....	57
และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
5.20 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระที่ 200 W .....	57
5.21 สเปกตรัมของ THD <sub>v</sub> และ THD <sub>i</sub> ที่ 200 W .....	57
5.22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 120 W .....	59
และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
5.23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระที่ 120 W .....	59
5.24 สเปกตรัมของ THD <sub>v</sub> และ THD <sub>i</sub> ที่ 120 W .....	59
5.25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระ 300 W และมอเตอร์ 250 W .....	61
และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
5.26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระ 300 W และมอเตอร์ 250 W .....	61
และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
5.27 สเปกตรัมของ THD <sub>v</sub> และ THD <sub>i</sub> ที่ภาระไฟฟ้า 300 W มอเตอร์ 250 W .....	61
และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
5.28 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระ 260 W และมอเตอร์ 250 W .....	63
และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
5.29 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระ 260 W และมอเตอร์ 250 W .....	63
และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30	สเปกตรัมของ $THD_v$ และ $THD_i$ ที่ภาระไฟฟ้า 260 W มอเตอร์ 250 W ..... 63 และต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
5.31	รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระ 200 W และมอเตอร์ 250 W ..... 65 และต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
5.32	รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระ 200 W และมอเตอร์ 250 W ..... 65 และต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
5.33	สเปกตรัมของ $THD_v$ และ $THD_i$ ที่ภาระไฟฟ้า 200 W มอเตอร์ 250 W ..... 65 และต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
5.34	รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระ 140 W และมอเตอร์ 250 W ..... 67 และต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
5.35	รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระ 140 W และมอเตอร์ 250 W ..... 67 และต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
5.36	สเปกตรัมของ $THD_v$ และ $THD_i$ ที่ภาระไฟฟ้า 140 W มอเตอร์ 250 W ..... 67 และต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
5.37	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังขาออก ..... 68
5.38	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดเพี้ยนกับกำลังขาออก ..... 68
5.39	รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากทฤษฎี ..... 70
5.40	รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากการทดลอง ..... 70

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนดำเนินงาน .....	4
5.1 ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่สภาวะต่างๆ .....	69

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในประเทศไทยมีการเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมที่กำลังพัฒนาไปอย่างก้าวกระโดด ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าเริ่มที่จะไม่เพียงพอต่อการใช้งาน และอีกทั้งไฟฟ้าในปัจจุบันมีต้นทุนในการผลิตสูงเนื่องจากทรัพยากรที่นำมาผลิตไฟฟ้ามีอยู่อย่างจำกัด ตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 (PDP2010) ได้มีการตั้งเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานทางเลือกให้มีปริมาณกำลังผลิตอยู่ที่ร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศในปี พ.ศ. 2573 ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของระบบ พลังงานทางเลือกเหล่านี้จะเป็นพลังงานที่ไม่มีต้นทุนทางด้านทรัพยากรที่นำมาผลิต และไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานทางเลือกจะมีผลกระทบต่อระบบ อาทิเช่น สภาวะแรงดันเกิน (Overvoltage) หรือแรงดันตก (Undervoltage) จนแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เกินกว่ายอมรับได้อันเนื่องมาจากช่วงที่มีกำลังการผลิตที่สูงหรือต่ำกว่าสภาวะปกติ จึงต้องมีการปรับปรุงสัญญาให้มีค่าแรงดันตรงกับระบบต้องการก่อนที่จะจ่ายเข้าสู่ระบบที่ทำงานร่วมกับการไฟฟ้านครหลวงหรือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

พลังงานทางเลือกที่มีในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ ฯลฯ ซึ่งพลังงานเหล่านี้ไม่มีต้นทุนทางด้านทรัพยากรและอีกทั้งยังไม่มีผลเสียต่อระบบนิเวศอีกด้วย โดยพลังงานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์แปลงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบันยังมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่ค่อนข้างมาก และยังมีค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปในการทำงานของอุปกรณ์ในระบบเนื่องจากในช่วงเวลากลางคืนจะไม่มีการผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้นเพราะไม่มีแสงอาทิตย์ แต่อุปกรณ์ในระบบยังคงทำงานอยู่ อุปกรณ์ที่ว่านั้นคือ อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ ต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้ตลอดเวลา ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เสียไปกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้ และนอกจากนี้ยังมีความสูญเสียภายในหม้อแปลงไฟฟ้า (Core loss) ถึงแม้จะไม่มีการใช้งานเช่นกัน โดยช่วงเวลากลางคืน คือ ช่วงเวลาประมาณ 20.00 น. ถึง 8.00 น. จะไม่มีการผลิตไฟฟ้าซึ่งทำให้การสูญเสียของการทำงานของอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น และนอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องแรงดันเกินและแรงดันตกที่หม้อแปลงความถี่ต่ำไม่สามารถแก้ไขได้อีกด้วย [1]

หม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นหรือหม้อแปลงที่ใช้ทั่วไปนั้นเป็นหม้อแปลงที่ใช้งานที่ความถี่ 50 Hz ซึ่งจัดได้ว่าเป็นการใช้งานในย่านความถี่ต่ำ โดยหม้อแปลงชนิดนี้เป็นหม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถส่งผ่านพลังงานได้ดีเยี่ยม และยังมีควมน่าเชื่อถือสูงในการใช้งานเนื่องจากหม้อแปลงชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากความถี่ใช้งานที่ย่าน 50 Hz จึงส่งผลให้หม้อแปลงนี้มีขนาดที่ใหญ่ และยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาเรื่องแรงดันเกินและแรงดันตกได้ด้วย

โดยการแก้ไขปัญหาค่าความสูญเสียในระบบนั้นสามารถทำได้โดยการปิดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในขณะที่ไม่ได้ทำงาน เมื่อมาพิจารณาที่หม้อแปลง จะเลือกใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Solid State Transformer) เนื่องจากหม้อแปลงชนิดนี้มีอินเวอร์เตอร์อยู่ภายในจึงไม่มีการสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่ได้ใช้งาน และเมื่ออินเวอร์เตอร์ไม่ได้ทำงาน ทำให้หม้อ

แปลงไม่มีการสูญเสียในหม้อแปลง (Core loss) นอกจากนี้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังยังทำงานที่ย่านความถี่สูง ซึ่งจะส่งผลให้หม้อแปลงมีขนาดที่เล็กลงกว่าหม้อแปลงแบบความถี่ต่ำ ทั้งนี้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังยังสามารถแก้ไขปัญหาความผิดปกติของระบบ คือ แรงดันเกิน (Overvoltage) และแรงดันตก (Undervoltage) ให้กลับมาเป็นปกติได้ก่อนที่จะจ่ายเข้าสู่ระบบเพื่อนำไปใช้งาน

ด้วยเหตุนี้จากผลกระทบของโซลาฟาร์ม ไม่ว่าจะเป็นปัญหาทางด้านค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปกับการเปิดเครื่องอินเวอร์เตอร์ทิ้งไว้ หรือการสูญเสียในหม้อแปลงในขณะที่หม้อแปลงไม่ได้ทำงาน โดยจะแก้ไขโดยใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Solid State Transformer) ซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงความถี่สูงและชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาค่าใช้จ่ายที่สูญเสียจากการเปิดอินเวอร์เตอร์ทิ้งไว้และการสูญเสียของหม้อแปลงในขณะที่ไม่ได้ทำงาน ทั้งยังมีขนาดที่เล็กกว่าเนื่องจากทำงานที่ย่านความถี่สูง และสามารถแก้ไขปัญหาแรงดันเกินและแรงดันตกได้

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาในส่วนของอินเวอร์เตอร์ที่รับไฟฟ้ากระแสตรงแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในส่วนที่ต่อกับระบบ (Grid) โดยจะเลือกใช้ Modular Multilevel Inverter สำหรับปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อแก้ไขปัญหาค่าใช้จ่ายที่สูญเสียที่เกิดจากการต้องเปิดเครื่องอินเวอร์เตอร์ค้าง และการสูญเสียในหม้อแปลงในขณะที่หม้อแปลงไม่ได้ทำงานของโซลาฟาร์ม
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้ได้คุณสมบัติที่สามารถทำไปใช้งานร่วมกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์
3. เพื่อสร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีคุณสมบัติในการรักษาเสถียรภาพของระบบและป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ
4. เพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากการต่อระบบพลังงานทางเลือกเข้าสู่ระบบส่งจ่าย
5. เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter เพื่อใช้สำหรับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและจัดสร้างส่วนอินเวอร์เตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถปรับค่าระดับแรงดันในกรณีที่มีแรงดันตกหรือแรงดันเกิน ให้กลับมามีระดับแรงดันที่ระบบต้องการ โดยการใช้โปรแกรมจำลองการทำงานต่างๆในการออกแบบ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ และทำการสร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการจำลองมา จากนั้นทำการทดสอบผลจากการสร้างแบบจำลอง

#### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาค้นคว้าและจัดเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อทำการเลือกเครื่องมือและอุปกรณ์ในการออกแบบการทดลอง
2. นำความรู้ ข้อมูล รวมถึงอุปกรณ์ที่ได้ มาออกแบบโดยใช้โปรแกรม PowerSIM ในการจำลองผลการออกแบบ Modular Multilevel Inverter
3. จัดเตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ
4. ออกแบบและดำเนินการสร้างเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter
5. ทดลองเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter ที่สร้างขึ้นโดยการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า จ่ายพลังงานแก่ภาระไฟฟ้า
6. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
7. สรุปผลการทดลอง
8. รวบรวมข้อมูลการทดลอง และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และทำความเข้าใจในทฤษฎี ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการออกแบบและจัดสร้างชิ้นงาน โดยมีระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่ สิงหาคม 2557 ถึง พฤษภาคม 2558 รวมเป็นเวลา 10 เดือน โดยมีแผนการดำเนินโครงการตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2. ศึกษาวิจัยกระบวนการทำงานจำลองเปรียบเทียบการทำงานในรูปแบบต่างๆ ด้วยโปรแกรม PowerSIM										
3. รวบรวมผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล										
4. จัดเตรียมอุปกรณ์ และศึกษาเครื่องมือต่างๆ										
5. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์										
6. สร้างเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter 5 ระดับ										
7. ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ต้นแบบและบันทึกผล										
8. สรุปผลและวิเคราะห์งานวิจัยและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ทำให้เกิดความเข้าใจถึงหลักการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเมื่อมีการใช้งานกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์
2. สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้มาเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดเพื่อให้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังรุ่นถัดไปมีความสมบูรณ์และประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีขึ้น
3. ช่วยสนับสนุนพัฒนาและส่งเสริมการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังให้ดียิ่งขึ้น
4. ได้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ใน  
ระบบได้
5. ใช้เป็นหม้อแปลงที่มีคุณสมบัติในการรักษาเสถียรภาพของระบบและป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ
6. ช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการต่อระบบพลังงานทดแทนเข้าสู่ระบบ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

บทนี้จะเป็นการกล่าวถึงข้อมูลเบื้องต้นของพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกที่ได้รับความนิยมในการนำมาผลิตไฟฟ้า โดยพลังงานนี้เป็นหนึ่งเหตุผลสำคัญในการเปลี่ยนมาใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากพลังงานทดแทนเป็นพลังงานที่เราไม่สามารถควบคุมการผลิตได้ จึงพบปัญหาเกี่ยวกับระบบ ไม่ว่าจะเป็นแรงดันตกหรือแรงดันเกิน นอกจากนี้ยังกล่าวถึงหลักการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง รวมถึงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ชนิดต่างๆ การควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยสัญญาณ PWM

#### 2.2 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy)

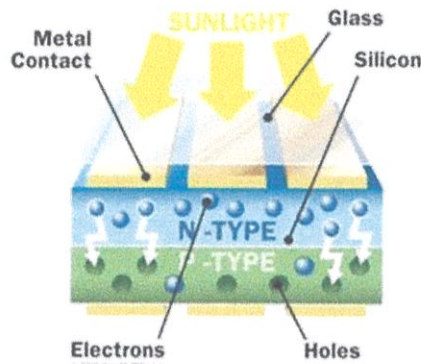
พลังงานทดแทนที่ถูกนำมาใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิดแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกพลังงานชนิดต่างๆ ควรเลือกให้เหมาะสมกับสถานที่ที่ตั้งของโรงกำเนิดไฟฟ้าพลังงานนั้นๆ เนื่องจากการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งเชื้อเพลิงที่จะไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า และระยะทางไม่ควรห่างจากแหล่งใช้ไฟฟ้า (Load) มากเกินไป เพื่อลดการสูญเสีย (Loss) ในสายส่ง นอกจากนี้การเลือกใช้พลังงานทดแทนควรเลือกให้เหมาะสมกับประสิทธิภาพของพลังงานทดแทนชนิดนั้นๆ เพราะพลังงานบางชนิดเหมาะสำหรับช่วยผลิตไฟฟ้าในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงๆ (Peak load) แต่ไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตไฟฟ้าหลัก (Base load)

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่ประเทศไทยมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นพลังงานทางเลือก เนื่องจากความเข้มแสงของประเทศไทยจะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยวันละ 4.7-5.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อตารางเมตร ในขณะที่ประเทศแถบยุโรปจะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยเพียงวันละ 3-4 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อตารางเมตร โดยโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกตั้งขึ้นจะเรียกว่า “Solar Farm” (โซลาฟาร์ม) นั่นคือในโซลาฟาร์มหนึ่งๆจะประกอบไปด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก อินเวอร์เตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โซลาฟาร์ม

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell หรือ Solar cell) มีหลักการทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric) ร่วมกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) เรียกรวมเป็นปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) ในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้า กระแสตรง โดยเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกสร้างโดยการนำสารกึ่งตัวนำ นิยมใช้เป็นซิลิกอนเนื่องจากหาง่าย และมีราคาถูก ผ่านกระบวนการทำให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ โดยมีหลักการทำงานคือเมื่อมีแสงมาตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ รังสีของแสงที่อนุภาคโฟตอน จะถ่ายเทพลังงานทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและความต่างศักย์ในสารกึ่งตัวนำ จนมีพลังงานมากพอที่จะออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และเมื่ออิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ครบวงจรก็จะทำให้เกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นดังรูปที่ 2.2



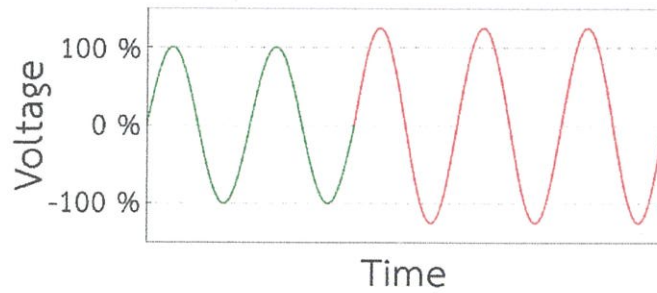
รูปที่ 2.2 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ทั้งนี้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ ซึ่งโดยทั่วไปประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ที่ร้อยละ 7-19 ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่นำมาใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.3 ผลกระทบของพลังงานทดแทนที่มีต่อระบบไฟฟ้า

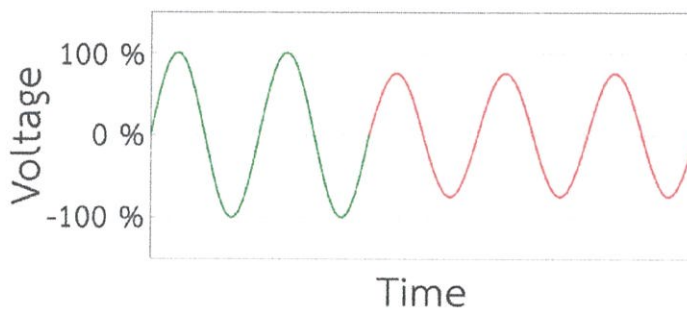
เนื่องจากว่าพลังงานทดแทนเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าเข้ามาในระบบเพิ่มเติม เนื่องจากว่าไม่ใช่ระบบเดียวกันอาจทำให้เกิดผลกระทบต่างๆเกิดขึ้นในระบบได้ การที่มีพลังงานทดแทนเข้ามาในระบบทำให้เกิดผลกระทบกับแรงดัน กระแสฟอลต์ การตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งจะทำให้แรงดันในระบบเกินกว่าที่กำหนด อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ เพราะพลังงานทดแทนบางชนิดไม่สามารถผลิตได้ตลอดเวลาแรงดันที่เกินมาอาจจะเพิ่มเป็นบางช่วงเวลาเท่านั้น

**2.3.1 แรงดันเกิน (Overvoltage)** เป็นสภาวะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงเพิ่มขึ้นเป็นระยะเวลานาน โดยอาจจะมีสาเหตุต่าง ๆ กัน เช่น เกิดจากตำแหน่งใช้งานที่ใกล้แหล่งจ่ายไฟฟ้า เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ การสวิตซ์ตัวเก็บประจุเข้าระบบ หรือ การปรับแทป (Tap) ของหม้อแปลงไม่เหมาะสม เป็นต้น โดยลักษณะของแรงดันไฟเกินจะวัดได้จากการที่ค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของแรงดันในสายกำลังมีค่าเกินกว่า  $242 - 264 V_{rms}$  ในชวงเวลานานกว่า 1 นาที ซึ่งจะมีผลกระทบต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต่อใช้งานอยู่ให้มีคุณภาพเสื่อมลงและมีอายุใช้งานสั้นลง ลักษณะของการเกิดไฟเกินแสดงรูปคลื่นได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กราฟแรงดันเกิน

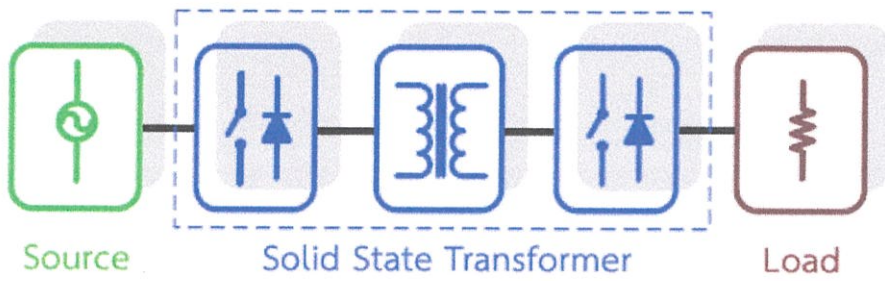
2.3.2 แรงดันตก (Undervoltage) เป็นสภาวะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดต่ำลงเป็นระยะเวลานาน โดยอาจจะเกิดได้จากหลายสภาวะ เช่น การใช้กำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำลังงานสูง ตำแหน่งใช้งานอยู่ไกลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า เกิดจากการต่อโหลดขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบ การสวิตช์ตัวเก็บประจุออกจากระบบ เป็นต้น โดยลักษณะแรงดันไฟตกจะวัดได้จากการที่ค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของแรงดันในสายกำลังมีค่าต่ำกว่า 176 - 198  $V_{rms}$  ในช้่วงเวลานานกว่า 1 นาที ซึ่งส่งผลให้เครื่องใช้ไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ดี หรือ อาจจะดึงกระแสสูงขึ้น (Overload) ทำให้เกิดความเสียหายหรืออายุใช้งานสั้นลง ลักษณะของการเกิดไฟตกแสดงรูปคลื่นได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟแรงดันตก

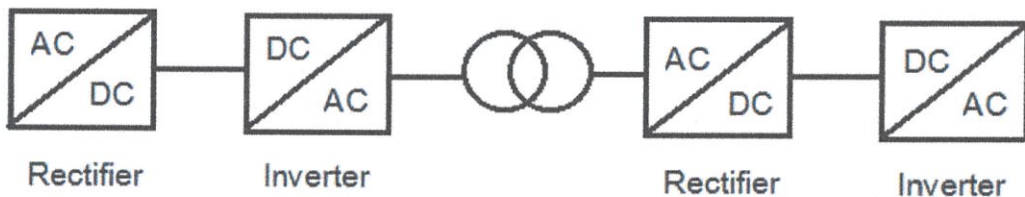
## 2.4 หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Solid State Transformer)

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Solid State Transformer) เป็นหม้อแปลงที่มีการเพิ่มวงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้ามา ซึ่งหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้ยังเหมาะสมที่จะใช้ต่อร่วมกับระบบที่มีแหล่งจ่ายที่เป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากสามารถช่วยลดปัญหาที่เกิดจากแหล่งจ่ายของพลังงานทางเลือก เช่น ปัญหาด้านแรงดันเกินหรือแรงดันตกจากแหล่งกำเนิดหรือโหลดเกิน โดยหลักการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คือ การรับไฟฟ้าที่ความถี่ต้นกำเนิดมาเข้าอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งทางด้านปฐมภูมิเพื่อเพิ่มความถี่ให้อยู่ในระดับประมาณ 1 kHz - 5 kHz เข้าหม้อแปลงเพื่อปรับแรงดันให้ได้ค่าที่ต้องการแล้วทำการส่งไฟฟ้าที่ได้แรงดันที่ต้องการ แล้วส่งไปยังอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งด้านทุติยภูมิ เพื่อปรับความถี่ให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ความถี่สูงในการส่งผ่านกำลังผ่านหม้อแปลงจะส่งผลให้หม้อแปลงที่ได้มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

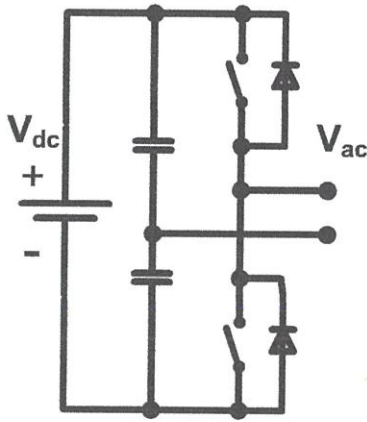
ขั้นตอนหลักของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในช่วงเริ่มต้นไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงจากแหล่งกำเนิด จะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้วงจรเรียงกระแส (Rectifier) จากนั้นจะถูกนำมาแปลงกลับเป็นกระแสสลับแรงดันสูงผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยในขั้นตอนนี้ จะแปลงความถี่ให้ขึ้นไปอยู่ในระดับ 1 kHz – 5 kHz ก่อนส่งกำลังผ่านหม้อแปลงเพื่อปรับลดแรงดัน เมื่อได้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำความถี่สูงแล้วจะแปลงมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ ในขั้นนี้สามารถนำไฟฟ้ากระแสตรงนี้ไปใช้งานกับโหลดได้เลย (DC-link) และในขั้นสุดท้าย จะเป็นการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงกลับไปเป็นกระแสสลับแรงดันต่ำ โดยในขั้นสุดท้ายนี้ จะทำการแปลงความถี่ให้กลับมาอยู่ในช่วงความถี่ใช้งาน 50 – 60 Hz เพื่อนำไปใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับต่อไปดังรูปที่ 2.6 [2]



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

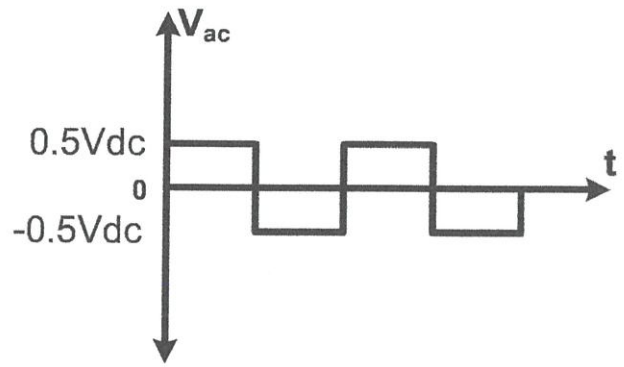
## 2.5 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือแบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.7(ก) และ 2.8(ก) ตามลำดับ ซึ่งมีเงื่อนไขการทำงานที่สำคัญคือการทำงานของสวิตช์ในกึ่งเดียวกันจะต้องไม่ทำงานหรือนำกระแสพร้อมกัน ถ้าสวิตช์ในกึ่งเดียวกันนำกระแสพร้อมกันนั้น จะเป็นสาเหตุของการลัดวงจรระหว่างบัสด้านบนกับบัสด้านล่าง ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง จะต้องมีการกำหนดช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ซึ่งเป็นช่วงเวลาก่อนที่สวิตช์จะเปลี่ยนสถานะ โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชนิด มีลักษณะแรงดันดังรูปที่ 2.7(ข) และ 2.8(ข) ตามลำดับ



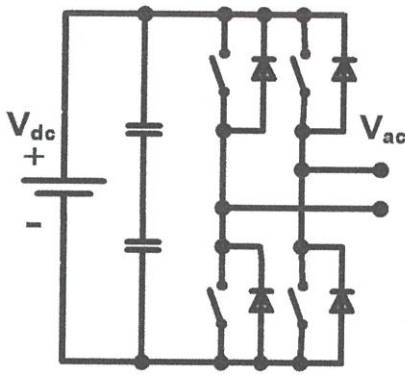
(ก)

รูปที่ 2.7 (ก) วงจรฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge)



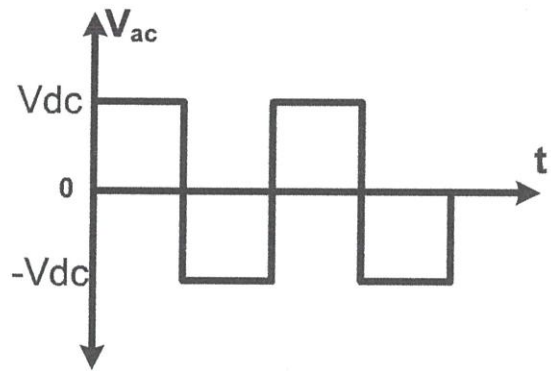
(ข)

(ข) รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรถ่ายฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge)



(ก)

รูปที่ 2.8 (ก) วงจรฟูลบริดจ์ (Full-Bridge)



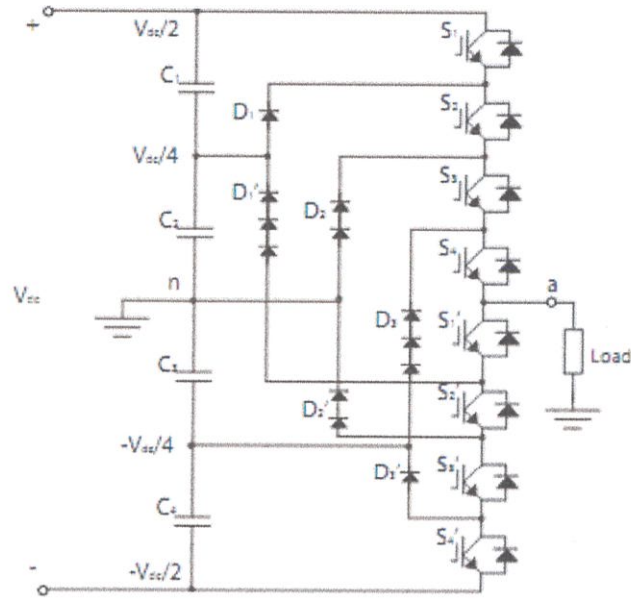
(ข)

(ข) รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรถ่ายฟูลบริดจ์ (Full-Bridge)

## 2.6 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

### 2.6.1 Multilevel Diode clamped Inverter (NPCMLI)

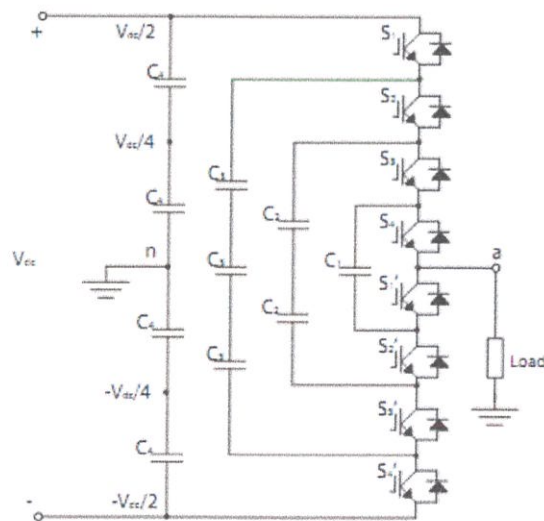
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ เป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแรกๆ ที่ได้รับความนิยม กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ซึ่งโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์นั้นมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยตัวเก็บประจุจะช่วยจ่ายแรงดันให้เกิดความสมดุล จึงทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ มีจุดเด่นสามารถส่งพลังงานได้สองทิศทาง [3]



รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์

### 2.6.2 Multilevel Flying capacitor Inverter (CCMLI)

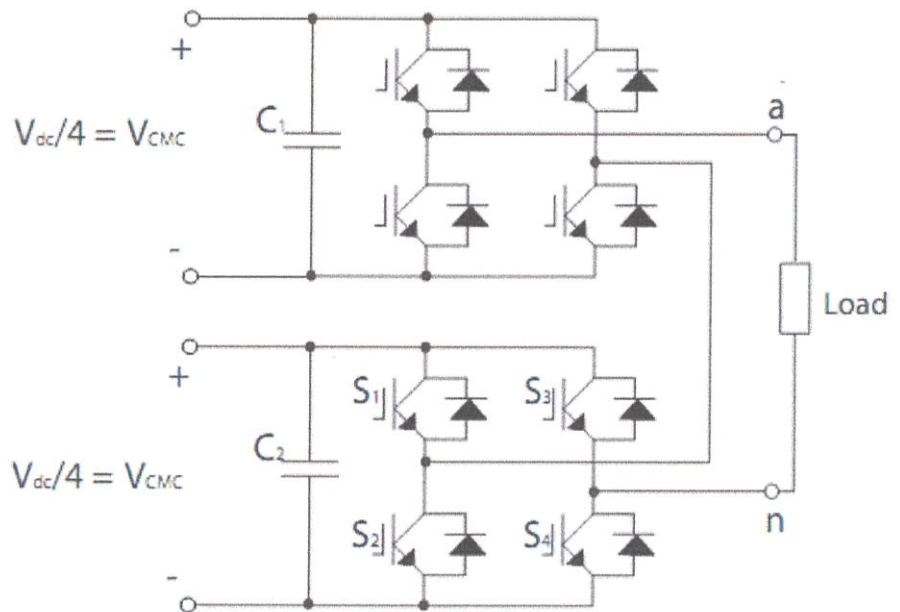
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์จะมีโครงสร้างคล้ายกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ ซึ่งในวิธีนี้จะเป็นการใช้ตัวเก็บประจุแทนไดโอด โดยตัวเก็บประจุนี้จะต่อที่จุดกึ่งกลางของคู่สองคู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากใช้ตัวเก็บประจุแทนไดโอด ตัวเก็บประจุจะไม่ป้องกันแรงดันย้อนกลับ ทำให้จำนวนสวิตช์นั้นเพิ่ม ดังรูปที่ 2.10 [3]



รูปที่ 2.10 วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

### 2.6.3 Cascades Multilevel Inverter (CMCI)

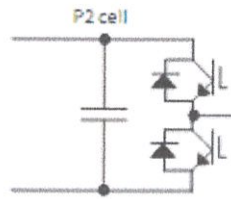
ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดนี้จะแตกต่างกับ ชนิดไดโอด แคลมป์และชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยในการสร้างแรงดันหลายระดับ ซึ่งแหล่งจ่ายกระแสตรงจะ แยกจ่ายให้แต่ละโมดูล ในแต่ละโมดูลจะเป็นวงจรฟูลบริดจ์ โดยสองโมดูลจะสร้างแรงดันได้ 5 ระดับ  $(2n+1)$  เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงที่แยกจากกันจึงเหมาะสำหรับใช้งานกับพลังงานทดแทน ดังรูปที่ 2.11 [3]



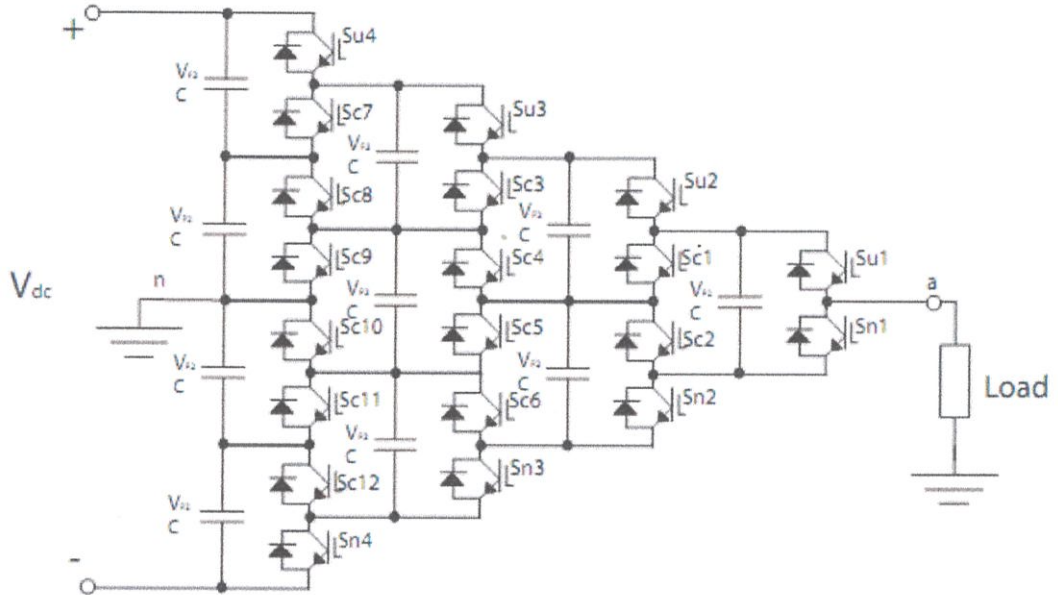
รูปที่ 2.11 วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด

### 2.6.4 Generalized P2-cell Multilevel Inverter (GMLI)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด เซลล์ P2 จะไม่มีปัญหาด้านแรงดันสมดุลเมื่อมีการ ส่งถ่ายกำลัง ในขณะที่ปัญหานี้จะเกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆ เนื่องจาก GMLI สามารถที่จะทำ การสมดุลแรงดันด้วยตัวเก็บประจุภายในตัว โดยไม่จำเป็นต้องต่อวงจรเพิ่ม หลักการของ two-level voltage cell หรือที่เรียกว่า P2-cell จะถูกต่อกันเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม โดย P2 แต่ละเซลล์จะมี สวิตช์และไดโอด 2 คู่ และตัวเก็บประจุ 1 ตัว เมื่อเซลล์ P2 ตัวใดตัวหนึ่งไม่ถูกใช้งานในการปรับ ระดับแรงดัน จะมีสวิตช์ 1 ตัวทำงานเพื่อที่จะปรับสมดุลแรงดันของตัวเก็บประจุ โดยลักษณะของ เซลล์ P2 และการต่ออินเวอร์เตอร์ชนิด GMLI จะแสดงในรูปที่ 2.12ก และ 2.12ข ตามลำดับ [3]



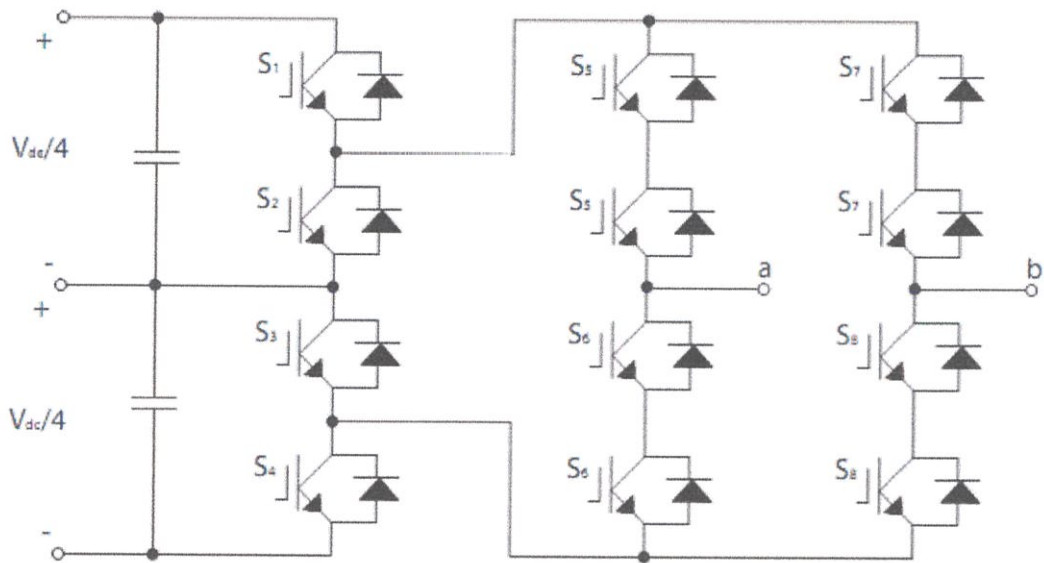
รูปที่ 2.12 (ก) P2-cell



รูปที่ 2.12 (ข) วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซลล์ P2

### 2.6.5 Reversing Voltage Multilevel Inverter (RVMLI)

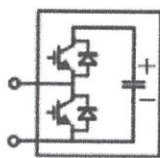
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแรงดันย้อนกลับ ยังไม่เป็นที่รู้จักมากนัก โดยข้อดีหลักๆของ RVMLI คือการใช้อุปกรณ์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่น หลักการพื้นฐานของ RVMLI คือการสร้าง แรงดันครึ่งคลื่นชนิดขั้นบันไดหลายระดับเฉพาะค่าบวก ด้วยตัวอินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายกระแสตรงจำนวนไม่มาก โดยจะมีวงจรฟูลบริดจ์ถูกต้องกับอินเวอร์เตอร์แล้วส่งแรงดันครึ่งคลื่นย้อนกลับที่มีค่าเป็นบวกทุกครั้งถูกคลื่นเพื่อสร้างสัญญาณแรงดันไซน์ ในส่วนวงจรฟูลบริดจ์สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีที่ง่าย เนื่องจากใช้เพื่อทำการกลับค่าแรงดันทุกครั้งถูกคลื่นเท่านั้น ทำให้คู่สวิตช์ภายในวงจรฟูลบริดจ์ สามารถทำงานที่แรงดันขาออกที่ความถี่มูลฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.13[3]



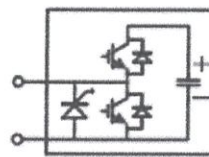
รูปที่ 2.13 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแรงดันย้อนกลับ

### 2.6.6 Modular Multilevel Inverter (MMI)

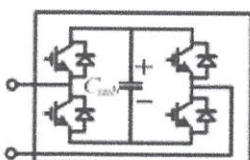
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดมอดดูลา นี้ เป็นการสร้างแรงดันกระแสสลับขาออกจากการสั่งให้โมดูลแต่ละโมดูล ทำงาน (activate) หรือไม่ทำงาน (bypass) ซึ่งการออกแบบโมดูลสามารถเลือกออกแบบได้หลายวิธี อาทิเช่น แบบครึ่งคลื่น แบบครึ่งคลื่นร่วมกับไทรสเตอร์บายพาส แบบเต็มคลื่น และแบบแคลมป์ครึ่งคลื่นสองชั้น เป็นต้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.14(ก) 2.14(ข) 2.14(ค) 2.14(ง) ตามลำดับ ในทุกๆขาเฟสจะประกอบไปด้วย 2 แขน และในแต่ละแขนจะมี โมดูลจำนวนทั้งสิ้น  $n$  โมดูล ซึ่งจำนวนโมดูลเหล่านี้จะหาได้จากสูตร  $n = m - 1$  โดยที่  $m$  คือระดับแรงดัน ตัวอย่างในการสร้างแรงดันไฟฟ้าขาออกกระแสสลับของโมดูลชนิดครึ่งคลื่น จะมีหลักการคือหากต้องการให้โมดูลตัวใดทำงาน (activate) สวิตช์ตัวบนจะถูกเชื่อมต่อให้ on และเชื่อมต่อสวิตช์ตัวล่างให้ off หากต้องการให้โมดูลตัวใดไม่ทำงาน (bypass) ก็เชื่อมต่อสวิตช์ตัวบนให้ off และเชื่อมต่อสวิตช์ตัวล่างให้ on ซึ่งรูป 2.14(จ) จะแสดงวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดมอดดูลา [3]



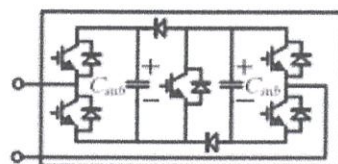
รูปที่ 2.14 (ก) โมดูลชนิดครึ่งคลื่น



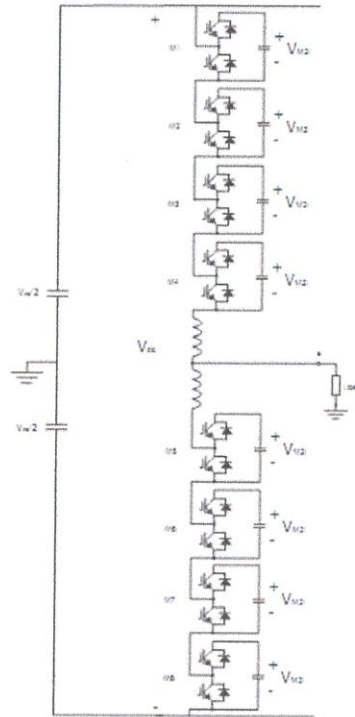
รูปที่ 2.14 (ข) โมดูลชนิดครึ่งคลื่นร่วมกับไทรสเตอร์บายพาส



รูปที่ 2.14 (ค) โมดูลชนิดเต็มคลื่น



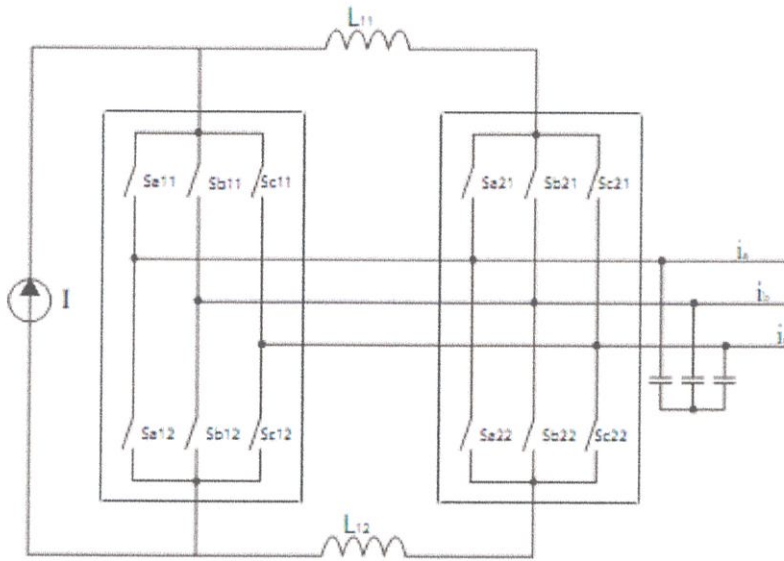
รูปที่ 2.14 (ง) โมดูลชนิดแคลมป์ครึ่งคลื่นสองชั้น



รูปที่ 2.14 (จ) วงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดมีอดตุลา โดยใช้โมดูลชนิดครึ่งคลื่น

### 2.6.7 Generalized Multilevel Current Source Inverter (GMCSI)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีแหล่งจ่ายกระแส มีหลักการคือการนำแหล่งจ่ายกระแสหนึ่ง หรือมากกว่าหนึ่งแหล่งจ่าย มาทำงานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อจ่ายกระแสเข้าสู่โหลด โดยภายในวงจรของ GMCSI จะประกอบไปด้วย โมดูลแหล่งจ่ายกระแสหาค่า รวมไปถึงตัวเหนี่ยวนำ เพื่อใช้ในการทำให้กระแสด้าน DC เรียบ และเพื่อใช้แบ่งแหล่งจ่ายออกตามพิกัดกระแสที่แตกต่างกัน ข้อดีของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ คือในการใช้งานบางชนิด เราสามารถลดการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าได้แต่ก็มีข้อควรระวังคือ อาจเกิดความไม่สมดุลของกระแสบริเวณตัวเหนี่ยวนำได้ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะแสดงวงจรตามรูปที่ 2.15 [3]



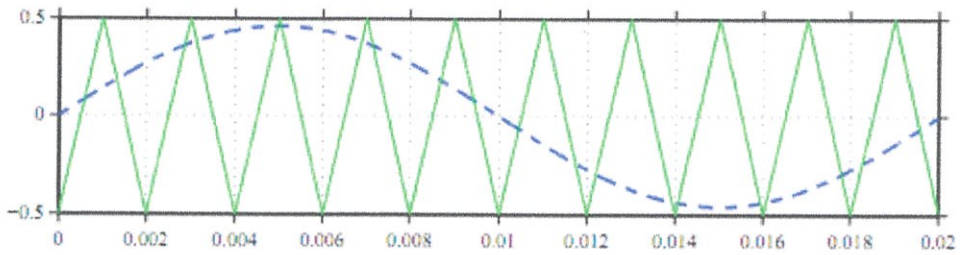
รูปที่ 2.15 อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีแหล่งจ่ายกระแส

## 2.7 การมอดดูเลชั่น

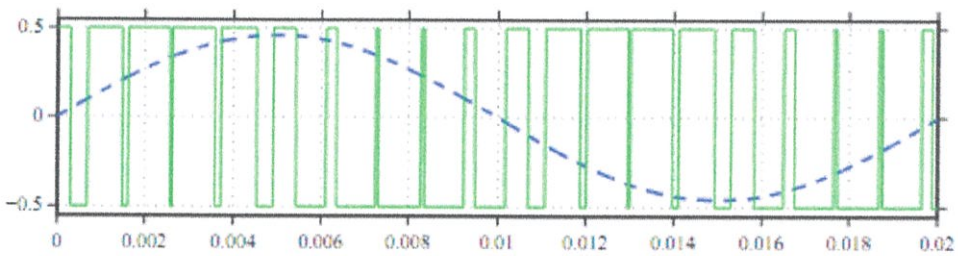
เมื่อก้าวถึงการมอดดูเลชั่นของอินเวอร์เตอร์ จะแบ่งออกได้เป็นสองวิธีการหลักๆ ได้แก่วิธีการมอดดูเลชั่นที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งมูลฐาน และ วิธีการมอดดูเลชั่นที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งสูง PWM ซึ่งทั้งคู่จะให้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกัน คือ กราฟขาออกในรูปของ กราฟขั้นบันได

### 2.7.1 PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ

โดยทั่วไปในการมอดดูเลท PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยมอย่างละหนึ่งตัว โดยสัญญาณอ้างอิงจะมีความถี่และยอดคลื่นสำหรับแรงดันขาออก และสัญญาณพาหะแบบสามเหลี่ยมจะมียอดคลื่นเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันกระแสตรงขาเข้า และความถี่จะขึ้นกับชนิดการใช้งาน แต่โดยมากจะมีค่าสูงกว่าความถี่ของสัญญาณอ้างอิง นิยมใช้ในหลักกิโลเฮิรซ์ ความถี่ของสัญญาณอ้างอิงจะเป็นตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์การ on และ off ของสวิตซ์ในอินเวอร์เตอร์ ทุกครั้งที่สัญญาณทั้งสองตัดกันจะส่งผลให้สวิตซ์ on หรือ off ซึ่งภาพของสัญญาณต่างๆและแรงดันขาออกจะแสดงในรูปที่ 2.16(ก) และ 2.16(ข)



รูปที่ 2.16 (ก) เส้นประสีน้ำเงินแสดงถึงสัญญาณ PWM อ้างอิง  
และ เส้นสีเขียวทึบคือสัญญาณพาหะสามเหลี่ยม



รูปที่ 2.16 (ข) เส้นทึบสีเขียว แสดงแรงดันขาออก

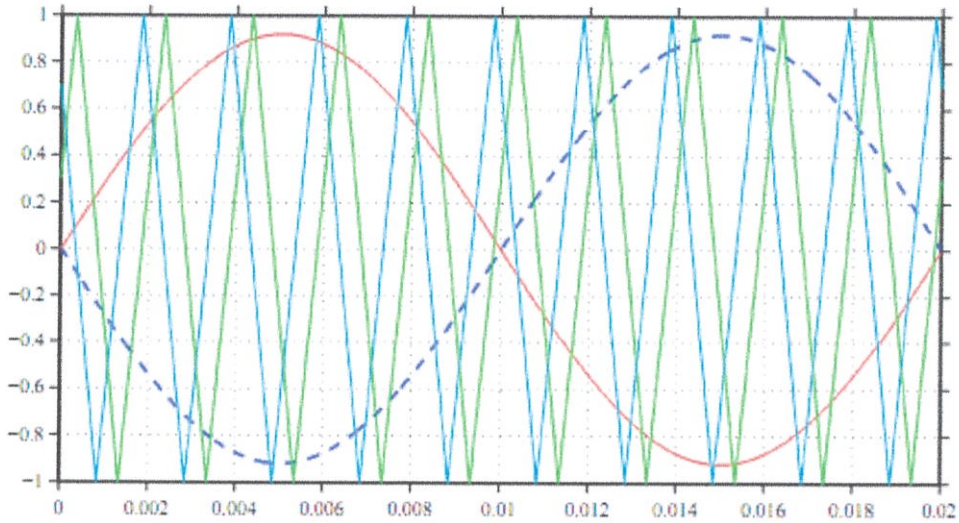
ถ้าสัญญาณพาหะตัดกับสัญญาณอ้างอิง จะทำให้มีค่าสูงกว่าสัญญาณอ้างอิง สวิตช์ด้านบนจะ off และสวิตช์ด้านล่างจะ on ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์สองระดับ ค่าที่ได้ออกมาจะเป็น  $\frac{V_{DC}}{2}$  เมื่อสัญญาณพาหะมาตัดกับสัญญาณอ้างอิงอีกครั้ง จะมีค่าต่ำกว่าสัญญาณอ้างอิง สวิตช์จะเปลี่ยนสถานะ และค่าที่ได้ออกมาจะเป็น  $-\frac{V_{DC}}{2}$  และหากสัญญาณอ้างอิงคงที่ที่ระดับแรงดันศูนย์ จะถูกสัญญาณพาหะตัดทั้งด้านบนและด้านล่างที่เวลาเดียวกันระหว่างทุกครั้งที่มีการตัด ทำให้ได้ผลลัพธ์เป็น  $\frac{V_{DC}}{2}$  และ  $-\frac{V_{DC}}{2}$  พร้อมๆกันในทุกๆ ไซเคิล นี่แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันขาออกเฉลี่ยเหนือช่วงเวลาหนึ่งของสัญญาณพาหะเป็นศูนย์

### 2.7.2 PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

เป็นการใช้สัญญาณพาหะที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งสูงหลายๆตัวมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงหลายๆตัวเพื่อสร้างกราฟขาออกเป็นไซน์ จะมีการนำเทคนิคการเลื่อนของเฟสมาเพื่อแก้ไขปัญหาค่ามอดูเลชันฮาร์โมนิกในด้านสัญญาณขาออก ซึ่งจะมีหลายวิธีการในการเปลี่ยนตำแหน่งหรือเลื่อนสัญญาณพาหะสามเหลี่ยม จำนวนของสัญญาณพาหะจะขึ้นอยู่กับจำนวนสวิตซ์ที่ถูกใช้ควบคุมในตัวอินเวอร์เตอร์

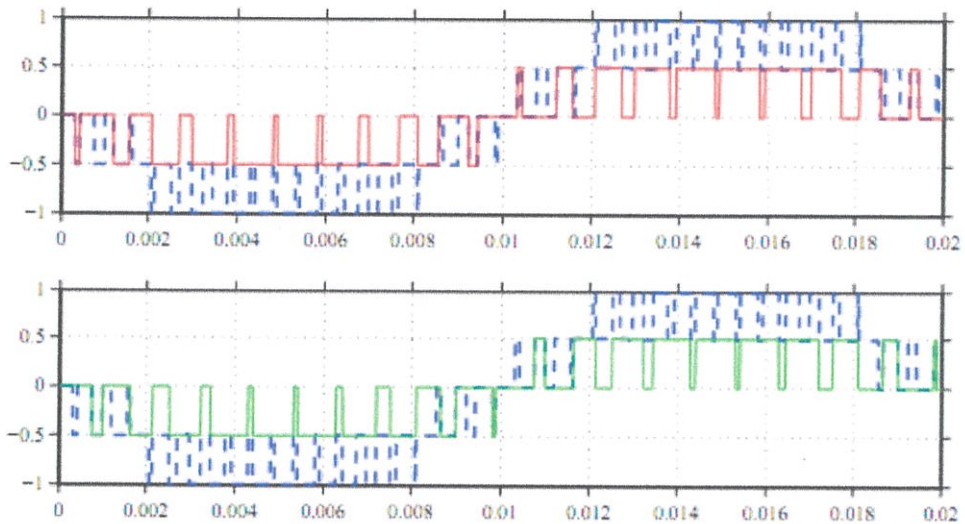
### 2.7.2.1 Phase Shifted Carrier PWM (PSCPWM)

วิธี PSCPWM ที่เห็นในรูปที่ 2.17 นี้เป็นวิธีการมอดดูเลชั่นสัญญาณพาหะหลายๆตัว ซึ่งมีการเลื่อนของเฟสออกจากกัน ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานในการทำมอดดูเลชั่นของอินเวอร์เตอร์ชนิด CMCI



รูปที่ 2.17 กราฟของวิธี PSCPWM โดยจะเป็นสัญญาณพาหะและสัญญาณอ้างอิงของCMCI ห้าระดับมีสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะอย่างละสองสัญญาณแต่ละสัญญาณสำหรับแต่ละโมดูล

ใน CMCI ที่มี  $n$  โมดูลฟูลบริดจ์ แต่ละขาเฟสจะมีสัญญาณพาหะ  $n$  สัญญาณโดยที่ จะมีสัญญาณพาหะหนึ่งสัญญาณต่อหนึ่งโมดูลฟูลบริดจ์ มีเฟสเลื่อนจากกัน  $180/n$  องศาและมียอดคลื่นเป็นค่ายอดของแรงดัน DC ค่ายอดสูงสุดของสัญญาณพาหะจะถูกมอดดูเลทจากระดับแรงดันของโมดูลที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่เป็น CMCI ห้าระดับ จะมีสองโมดูล ก็จะมีสัญญาณพาหะสองสัญญาณ หนึ่งสัญญาณต่อหนึ่งโมดูล จากรูปที่ 2.18 โมดูลจะสร้างแรงดันสองค่าด้วยวิธีการมอดดูเลชั่นแบบ PSCPWM นอกจากนี้ยังมีสัญญาณอ้างอิงสองสัญญาณสำหรับทั้งสองขาในแต่ละโมดูลของอินเวอร์เตอร์ที่มีเฟสเลื่อนจากกัน  $180$  องศา ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 2.17 สัญญาณอ้างอิงทั้งสองสัญญาณจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะทั้งสองสัญญาณ สัญญาณอ้างอิงสัญญาณแรกไว้สำหรับการมอดดูเลชั่นขาสวิทช์ซ้ายของโมดูลฟูลบริดจ์ (สัญญาณอ้างอิงที่เป็นเส้นประ) และอีกสัญญาณสำหรับการมอดดูเลชั่นขาสวิทช์ขวาของโมดูลฟูลบริดจ์ (สัญญาณอ้างอิงที่เป็นเส้นทึบ) กราฟสามเหลี่ยมแรกจากรูปที่ 2.16 จะถูกเทียบกับแรงดันขาออกกราฟบนในรูปที่ 2.16ข และกราฟสามเหลี่ยมอีกกราฟจะเทียบกับแรงดันกราฟล่างในรูปที่ 2.17 ที่ใกล้เวลาช่วง  $2$  ms จะเห็นว่ากราฟสามเหลี่ยมแรกตัดกับสัญญาณอ้างอิงหนึ่งด้านล่าง และควบคุมขาสวิทช์ขวาของโมดูลทำให้โมดูลมีค่าแรงดันขาออกอยู่ในช่วง  $0\text{ kV}$  ถึง  $-0.5\text{ kV}$  และเมื่อกราฟสามเหลี่ยมที่สองตัดกับสัญญาณอ้างอิงเดิม จะได้แรงดันขาออกในช่วง  $-0.5\text{ kV}$  ถึง  $0\text{ kV}$  [3]



รูปที่ 2.18 โมดูลแรงดันสองโมดูล แยกออกเป็นสองกราฟ

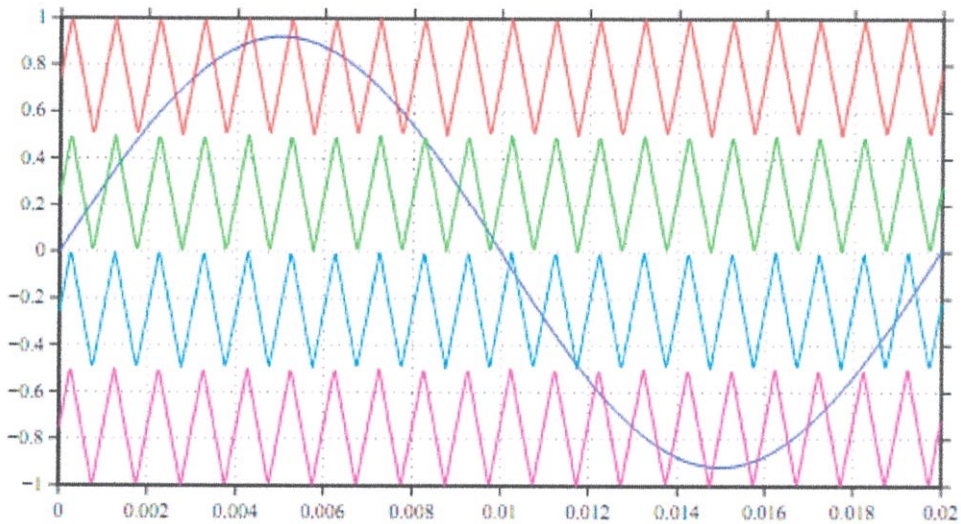
### 2.7.2.2 Phase Distortion PWM (PDPWM)

ในเทคนิค PDPWM นี้ มีข้อดีคือเป็นวิธีที่สร้างความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกได้ต่ำที่สุดในแรงดันระหว่างสาย (line-to-line) โดยจะให้สัญญาณพาหะทุกสัญญาณจะมีเฟสเดียวกัน

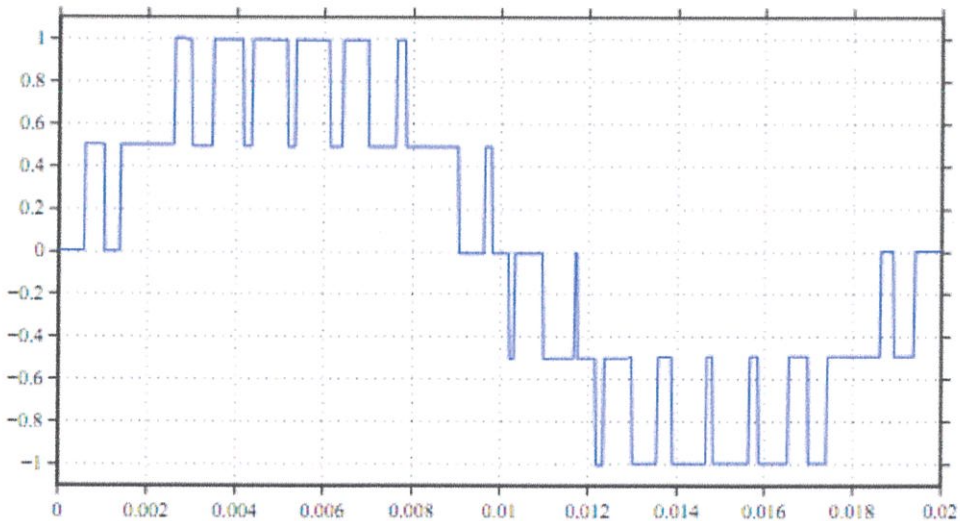
เมื่อใช้ในอินเวอร์เตอร์แบบ NPCMLI ที่มีระดับแรงดันเท่ากับ  $m$  จะมีการใช้สัญญาณพาหะเป็น  $m-1$  สัญญาณ สัญญาณพาหะเหล่านี้มีความถี่เดียวกันและถูกจัดให้เรียงซ้อนกัน โดยที่ไม่มีการเลื่อนเฟส ทำให้ได้ค่าแรงดันขาออกสูงสุดไปจนถึงต่ำสุด ยอดคลื่นของสัญญาณพาหะจะถูกมอดูเลตโดยยอดคลื่นแรงดันล่าสุดตามลำดับของระดับแรงดัน สัญญาณพาหะแต่ละสัญญาณจะถูกต่อกับแรงดันขาออกที่ระดับต่างกันไป ถ้าสัญญาณพาหะไม่ถูกมอดูเลตอย่างถูกต้อง แรงดันขาออกที่ได้ก็จะมีค่าออกมาไม่ถูกต้อง เนื่องจากระดับแหล่งจ่ายแรงดันเปลี่ยนไปจากค่าที่ควรจะเป็น (เกิดความไม่สมดุล) ถ้ายอดคลื่นของแหล่งจ่ายเปลี่ยนโดยที่สัญญาณพาหะไม่ถูกมอดูเลต ก็จะไม่ได้ค่าแรงดันขาออกที่ต้องการ เมื่อสัญญาณพาหะถูกตัดโดยสัญญาณอ้างอิง กราฟขาออกจะเพิ่มขึ้นหนึ่งหรือลดลงหนึ่งระดับ

วิธีนี้ยังนิยมใช้เป็นวิธีควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิด RVMLI แต่ก็ใช้กับแบบอื่นๆได้หากใช้กับอินเวอร์เตอร์ชนิด CMCI วิธีการมอดูเลตขั้นแบบ PDPWM จะเกิดจากสัญญาณพาหะ  $m-1$  สัญญาณ โดยในแต่ละโมดูลฟูลบริดจ์จะมีสองสัญญาณ หนึ่งสัญญาณได้ศูนย์และอีกหนึ่งสัญญาณเหนือศูนย์เหมือนกันทุกๆโมดูล แต่ละโมดูลจะทำการมอดูเลตหนึ่งระดับ โดยที่โมดูลฟูลบริดจ์ระดับหนึ่งสามารถชาร์จเพื่อจุดประสงค์ในการรักษาความสมดุลได้ (balancing) ในกรณีที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิด CMCI ห้าระดับ เป็นไปได้ว่าโมดูลที่มีประจุสูงที่สุดในแหล่งจ่ายจะถูกมอดูเลตโดยสัญญาณพาหะที่สองและสามนับจากข้างบน ในรูปที่ 2.18 และอีกโมดูลที่มีประจุต่ำกว่า จะถูกควบคุมโดยสัญญาณพาหะที่หนึ่งและสี่ หากสัญญาณที่สองและสามอยู่ใกล้ศูนย์มากที่สุด โมดูลที่มีประจุสูงกว่าจะถูกต่อเข้ากับโหนดในทุกๆครึ่งไซเคิล นอกจากนี้สัญญาณสามเหลี่ยมสองสัญญาณที่ใกล้

ศูนย์ สามารถควบคุมโมดูลที่มีประจุสูงสุดได้ หากมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณพาหะที่เป็นบวกจะมอดดูเลทขาซ้ายของโมดูลฟูลบริดจ์ได้เป็นแรงดันขาออกค่าบวกและสัญญาณพาหะที่เป็นลบจะมอดดูเลทขาขวาของโมดูลฟูลบริดจ์ได้เป็นแรงดันออกค่าลบโมดูลอื่นๆจะถูกควบคุมโดยสัญญาณพาหะอีกสองตัวที่อยู่ไกลจากศูนย์ ยอดคลื่นของสัญญาณพาหะจะถูกมอดดูเลทโดยระดับแรงดันของโมดูลฟูลบริดจ์ที่ควบคุมอยู่ [3]



รูปที่ 2.19 สัญญาณอ้างอิง(ไซน์) และสัญญาณพาหะ (สามเหลี่ยม) ในกรณีที่ใช้วิธีการมอดดูเลทแบบ PDPWM ควบคุมอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิด NPCMLI หรือ CMCI



รูปที่ 2.20 แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ NPCMLI ที่ใช้วิธี PDPWM

## 2.8 สรุป

จากการศึกษาในบทที่ 2 จะกล่าวถึงข้อมูลต่างๆของโซล่าฟาร์มทั้งหลักการทำงาน รวมถึงผลกระทบที่สามารถเกิดขึ้นได้กับระบบ หลักการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และยังกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆที่สามารถนำไปใช้ รวมถึงวิธีการควบคุมสัญญาณ PWM แบบต่างๆที่ใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นนี้สามารถที่จะไปทำการออกแบบ เครื่องต้นแบบและทำการสร้างเครื่องต้นแบบได้

## บทที่ 3

### การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

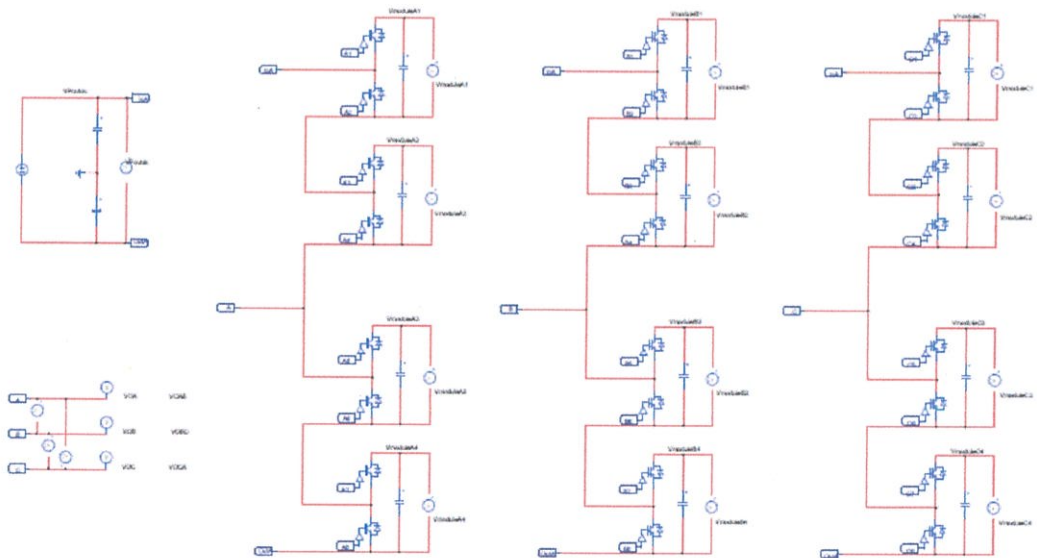
#### 3.1 บทนำ

สำหรับในบทนี้ได้แนะนำถึงผลการจำลองการทำงานของ Modular Multilevel Inverter โดยใช้โปรแกรม PowerSIM ในการจำลองการทำงาน ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองผล เพื่อเป็นการยืนยันถึงหลักการว่าถูกต้อง และเป็นไปตามทฤษฎี ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นชิ้นงานต้นแบบ

#### 3.2 การจำลองการทำงานของ Modular Multilevel Inverter ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

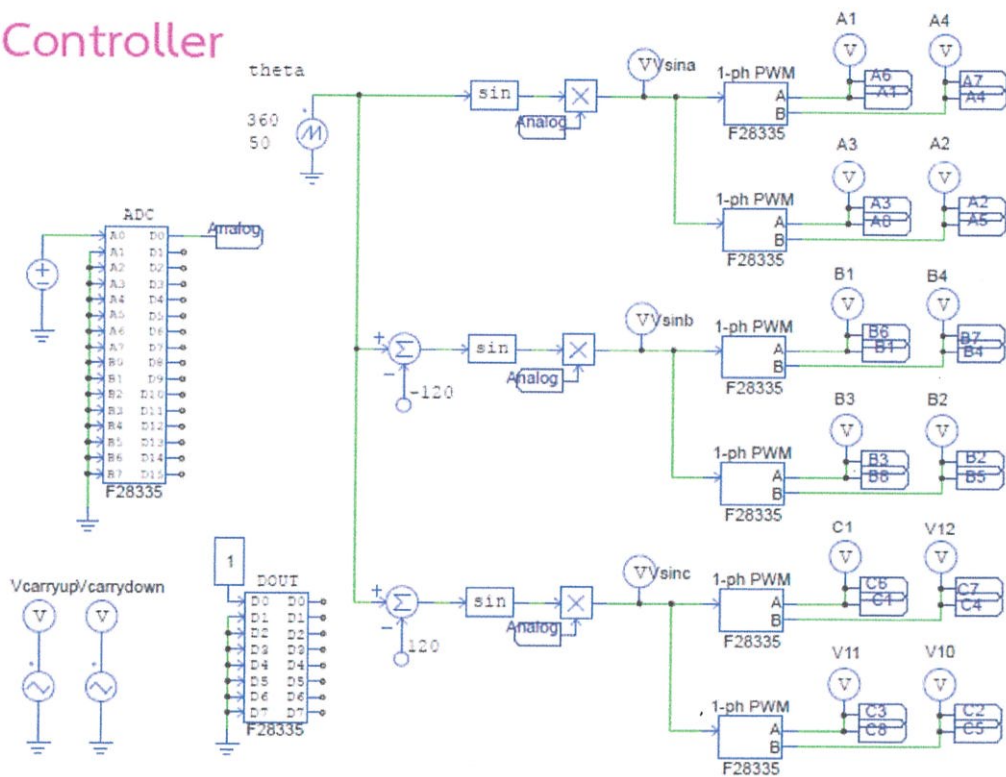
การจำลองการทำงานของ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ นั้นใช้โปรแกรม PowerSIM ในการจำลองการทำงาน ซึ่งในการจำลองการทำงานแบ่งออกได้เป็น ส่วนที่ทำการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ดังในรูปที่ 3.1 และส่วนที่ใช้ควบคุมวงจรดังในรูปที่ 3.2 ซึ่งในการจำลองการทำงาน ต้องใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ที่ใช้ให้ตรงตามที่ศึกษาข้อมูลมา

Power Circuit



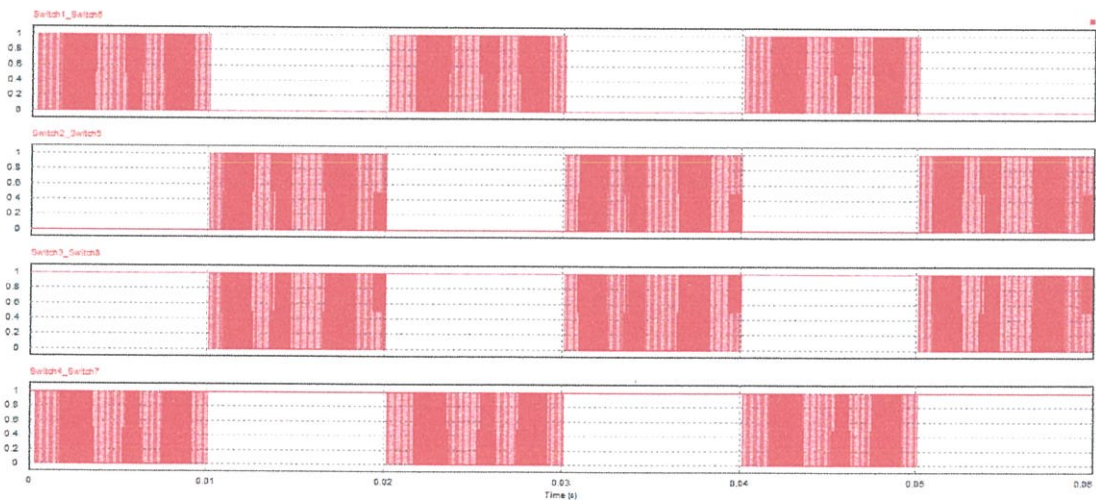
รูปที่ 3.1 วงจร Modular Multilevel Inverter

## Controller



รูปที่ 3.2 วงจรควบคุม Modular Multilevel Inverter

ซึ่งจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นวงจรควบคุมได้ทำการสร้างสัญญาณ PWM ซึ่งวิธีที่ใช้ในการสร้างสัญญาณนั้นเลือกใช้วิธี Phase Disposition PWM ในการสร้างซึ่งรูปคลื่นสัญญาณนั้นได้แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นสัญญาณการสวิตช์

### 3.3 ผลการจำลองการทำงานของ Modular Multilevel Inverter ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการจำลองการทำงานของ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับนี้ โดยกำหนดให้กระแสตรงที่รับเข้ามาที่  $300 V_{dc}$  ผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นกระแสสลับ โดยให้วงจรควบคุม ควบคุมความถี่ในการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ที่  $10 \text{ kHz}$  เพื่อขับภาระทางไฟฟ้า  $280 \text{ w}$  โดยสามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกได้โดย ปรับอัตราการมอดดูเลชั่น ( $m_a$ ) โดยแรงดันขาออกสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 3.1

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \times m_a \times V_{dc} \quad (3.1)$$

$V_{LL}$  คือ แรงดันไลน์ขาออก

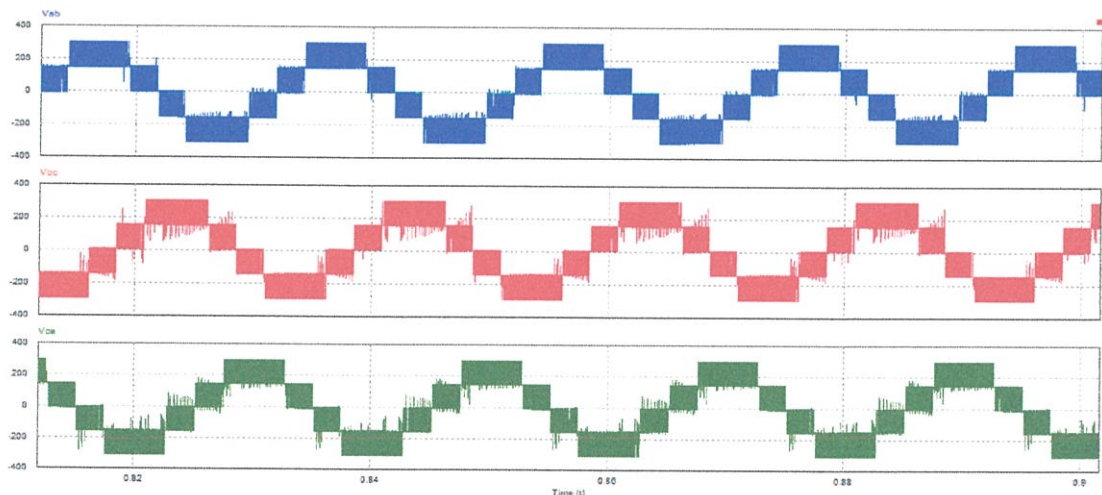
$m_a$  คือ อัตราการมอดดูเลชั่น

$V_{dc}$  คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า

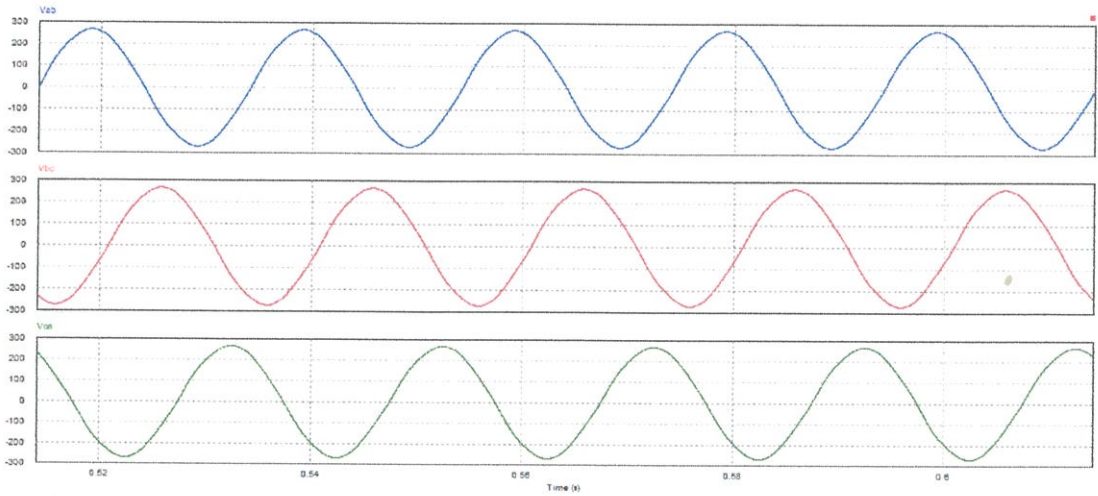
โดยอัตราการมอดดูเลชั่นสามารถปรับได้ตั้งแต่ค่า  $0.1 - 1.0$  เพื่อปรับระดับแรงดันขาออกให้ได้ค่าตามที่ต้องการ

#### 3.3.1 จำลองการทำงานเมื่อไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้า

จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PowerSIM โดยการจำลองภาวะที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับภาระทางไฟฟ้า ที่อัตรามอดดูเลชั่น  $0.85$  เพื่อดูรูปคลื่นแรงดันขาออก ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมเมื่อไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำได้ดังรูปที่ 3.4 และเมื่อทำการต่อชุดวงจรความถี่ต่ำเข้าไป จะได้รูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 3.5



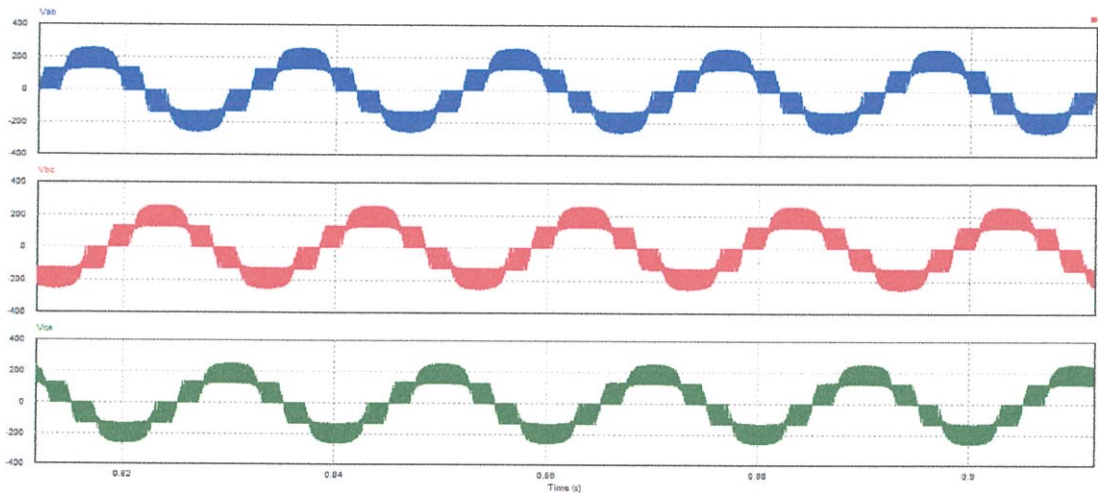
รูปที่ 3.4 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้าและวงจรรองความถี่ต่ำ



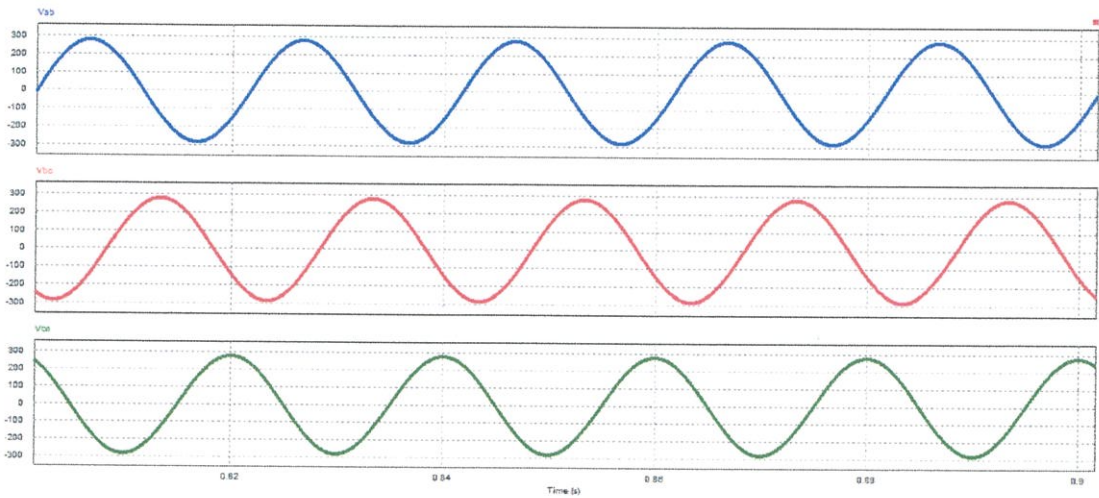
รูปที่ 3.5 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้าและทำการเชื่อมต่อวงจรรองความถี่ต่ำ

### 3.3.2 จำลองการทำงานเมื่อเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 300 W

จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PowerSIM โดยการจำลองภาวะที่ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้า ที่อัตรามีอดดูเลชั่น 0.85 และทำการต่อภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 300 W เพื่อดูรูปคลื่นแรงดันขาออก ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมเมื่อไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำได้ดังรูปที่ 3.6 และเมื่อทำการต่อชุดวงจรความถี่ต่ำเข้าไปจะได้รูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 3.7



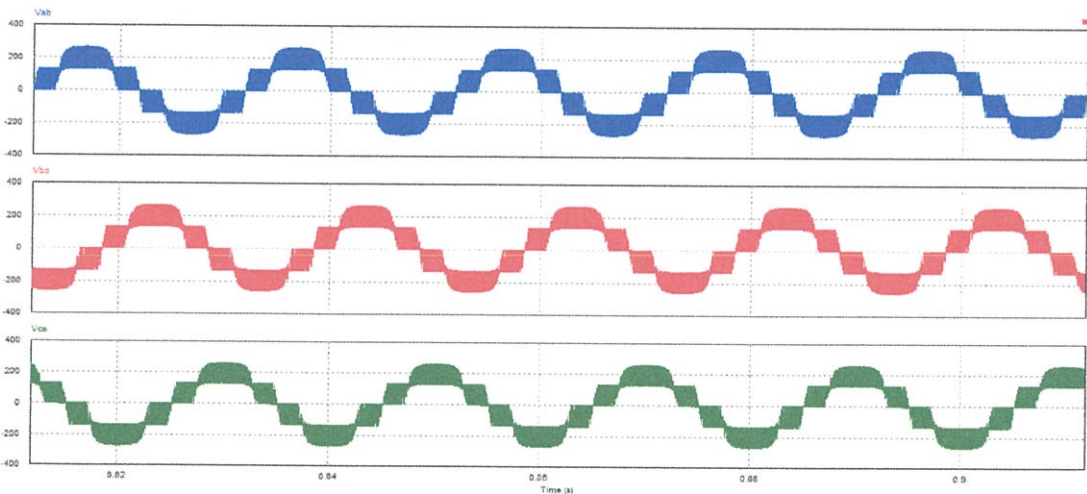
รูปที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่พิกัดและไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำ



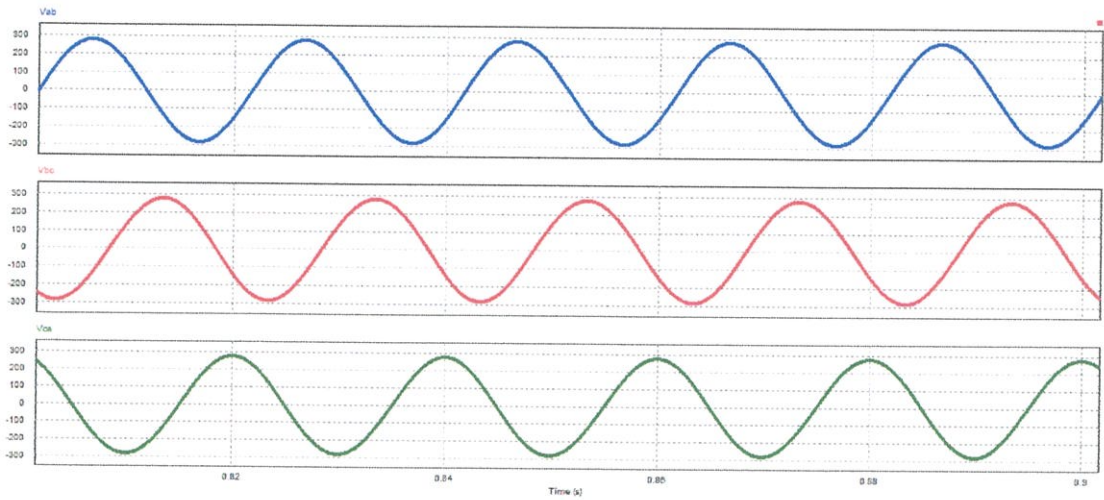
รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่พิกัดและต่อวงจรรองความถี่ต่ำ

### 3.3.3 จำลองการทำงานเมื่อเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 260 W

จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PowerSIM โดยการจำลองภาวะที่ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้า ที่อัตรามอดดูเลชั่น 0.85 และทำการต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 260 W เพื่อดูรูปคลื่นแรงดันขาออก ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมเมื่อไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำได้ดังรูปที่ 3.8 และเมื่อทำการต่อชุดวงจรความถี่ต่ำเข้าไปจะได้รูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 3.9



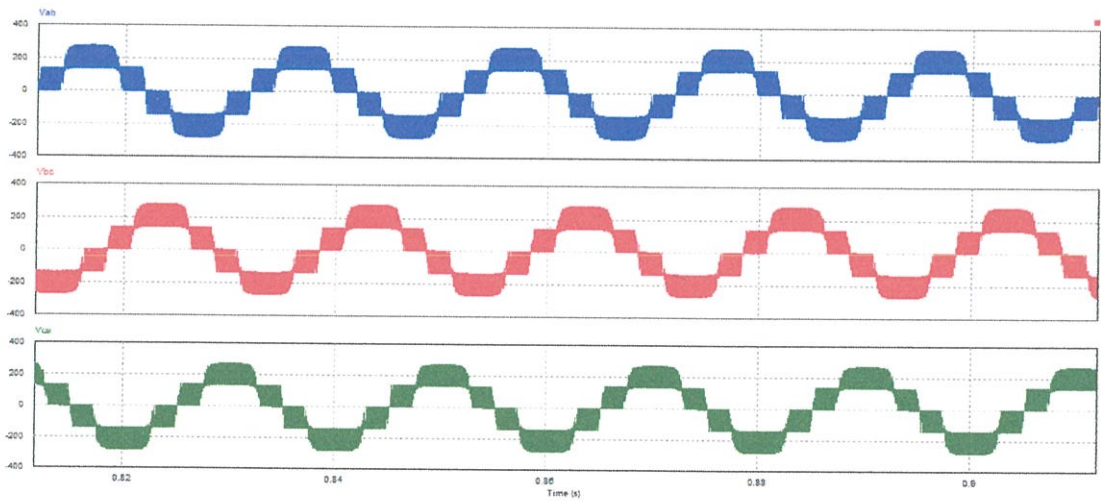
รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 260 W และไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำ



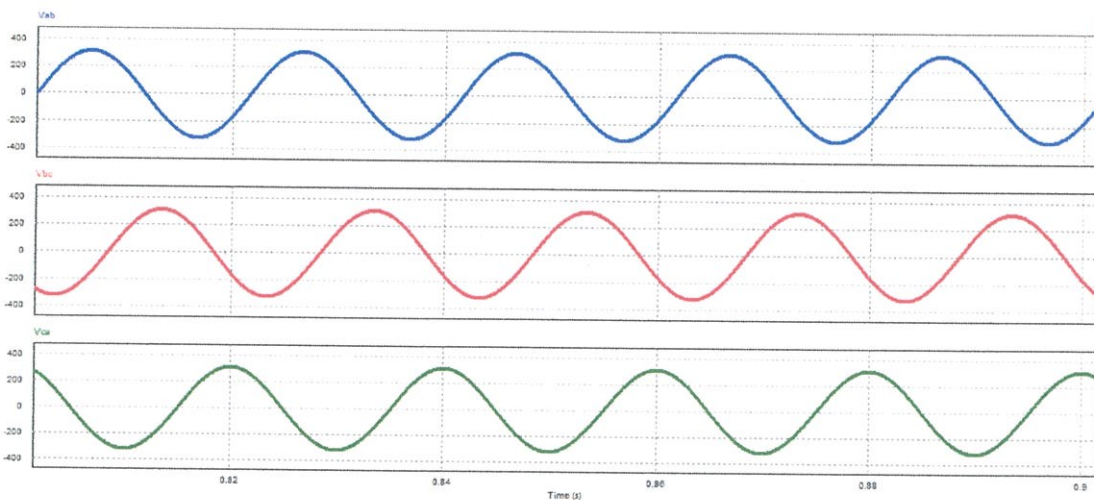
รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 260 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ

### 3.3.4 จำลองการทำงานเมื่อเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 200 W

จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PowerSIM โดยการจำลองภาวะที่ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้า ที่อัตรามีอดดูเลขขึ้น 0.85 และทำการต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 200 W เพื่อดูรูปคลื่นแรงดันขาออก ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมเมื่อไม่ได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำได้ดังรูปที่ 3.10 และเมื่อทำการต่อชุดวงจรความถี่ต่ำเข้าไปจะได้รูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 3.11



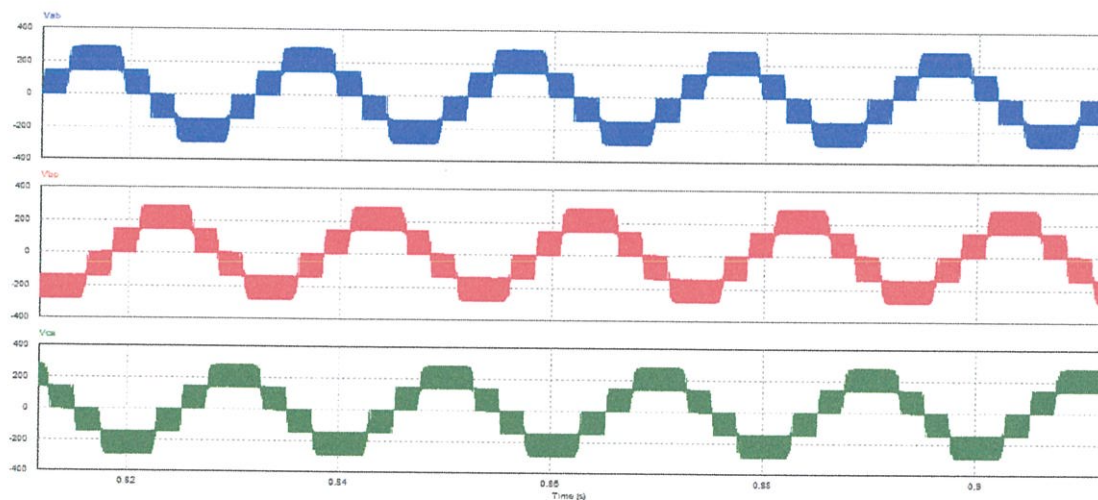
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 200 W และไม่ได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ



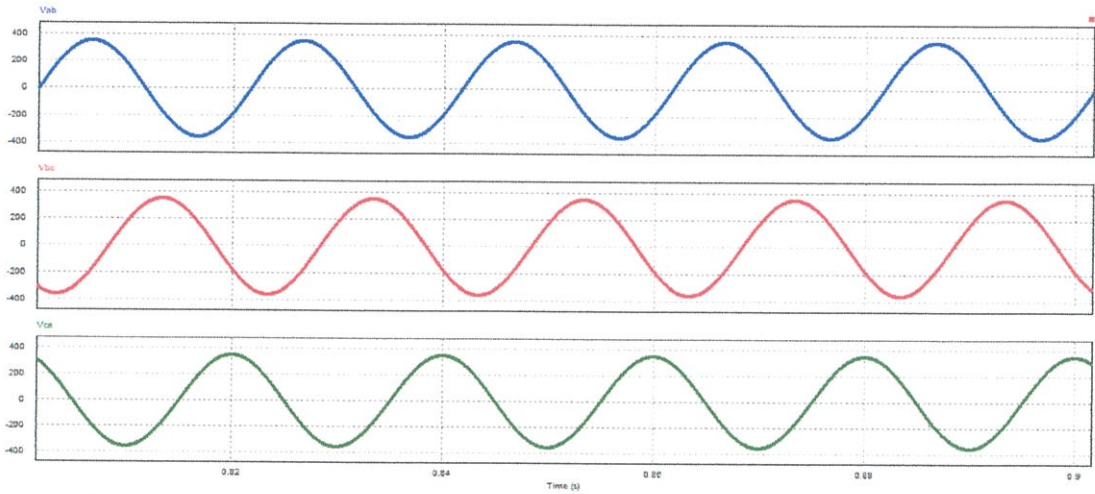
รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 200 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ

### 3.3.5 จำลองการทำงานเมื่อเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 120 W

จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PowerSIM โดยการจำลองภาวะที่ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้า ที่อัตรามีอดดูเลขขึ้น 0.85 และทำการต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 120 W เพื่อดูรูปคลื่นแรงดันขาออก ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมเมื่อไม่ได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำได้ดังรูปที่ 3.12 และเมื่อทำการต่อชุดวงจรความถี่ต่ำเข้าไปจะได้รูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 120 W และไม่ได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ



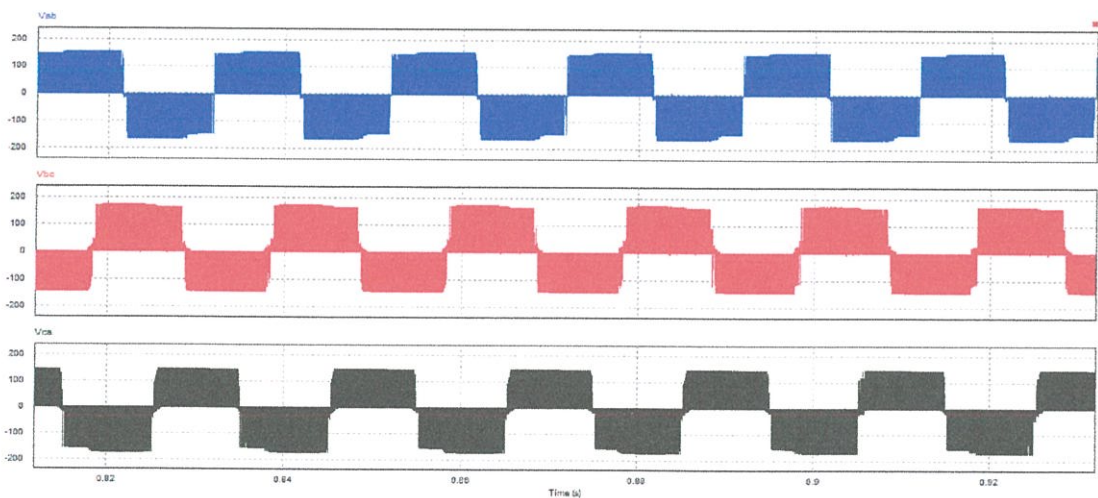
รูปที่ 3.13 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าที่ 120 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ

### 3.3.6 จำลองการปรับอัตราमितดูแลชั่น

จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PowerSIM โดยทำการปรับอัตราการมอดดูเลชั่นเพื่อวัดหาแรงดันขาออกว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยอัตราการมอดดูเลชั่น สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0.1 – 1.0 โดยในการจำลองนี้จะจำลองการทำงานที่อัตรามอดดูเลชั่นที่ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 และจากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์

#### 3.3.6.1 การจำลองที่อัตรามอดดูเลชั่น 0.2

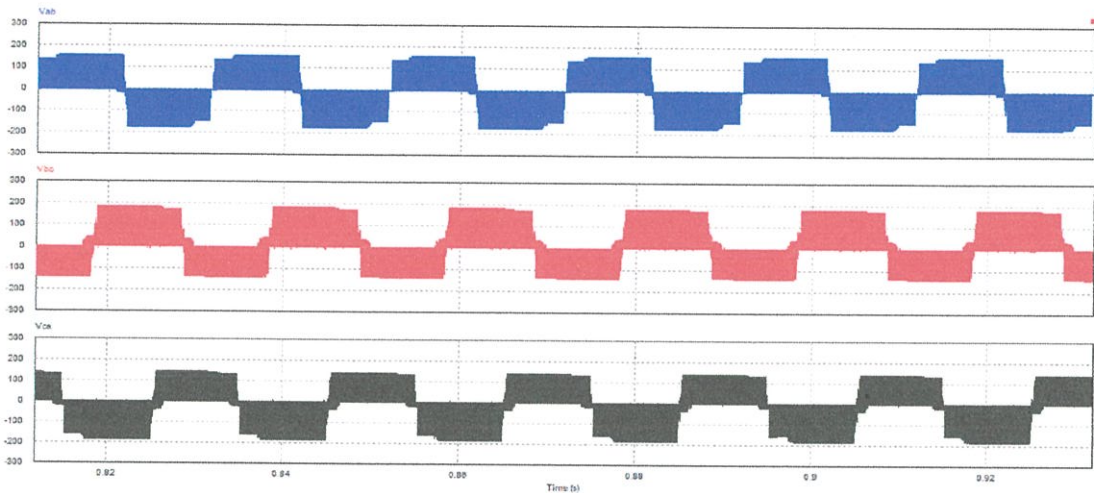
ทำการปรับอัตรามอดดูเลชั่นที่ 0.2 และทำการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม PowerSIM เพื่อวัดแรงดันขาออก ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 3.14 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 73.6 V



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามอดดูเลชั่น 0.2

### 3.3.6.2 การจำลองที่อัตรามอดดูเลชั่น 0.4

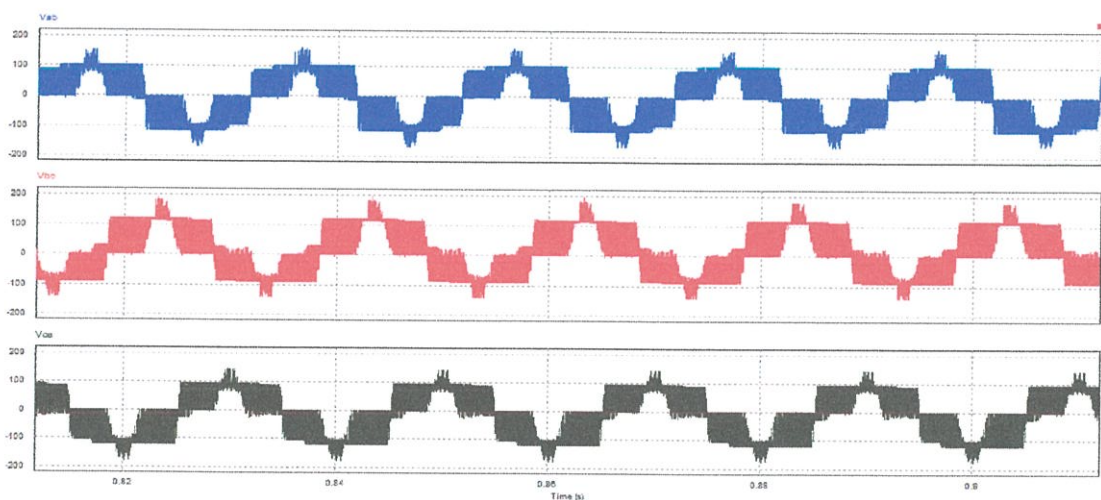
ทำการปรับอัตรามอดดูเลชั่นที่ 0.4 และทำการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม PowerSIM เพื่อวัดแรงดันขาออก ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 3.15 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 97.53 V



รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามอดดูเลชั่น 0.4

### 3.3.6.3 การจำลองที่อัตรามอดดูเลชั่น 0.6

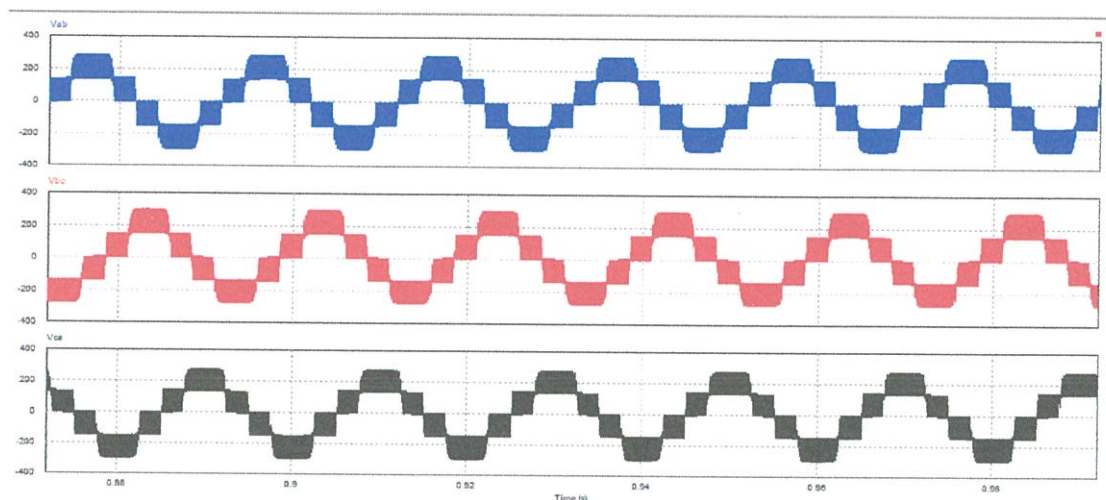
ทำการปรับอัตรามอดดูเลชั่นที่ 0.6 และทำการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม PowerSIM เพื่อวัดแรงดันขาออก ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 3.16 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 119.92 V



รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามอดดูเลชั่น 0.6

### 3.3.6.4 การจำลองที่อัตรามีอดดูเลขชั้น 0.8

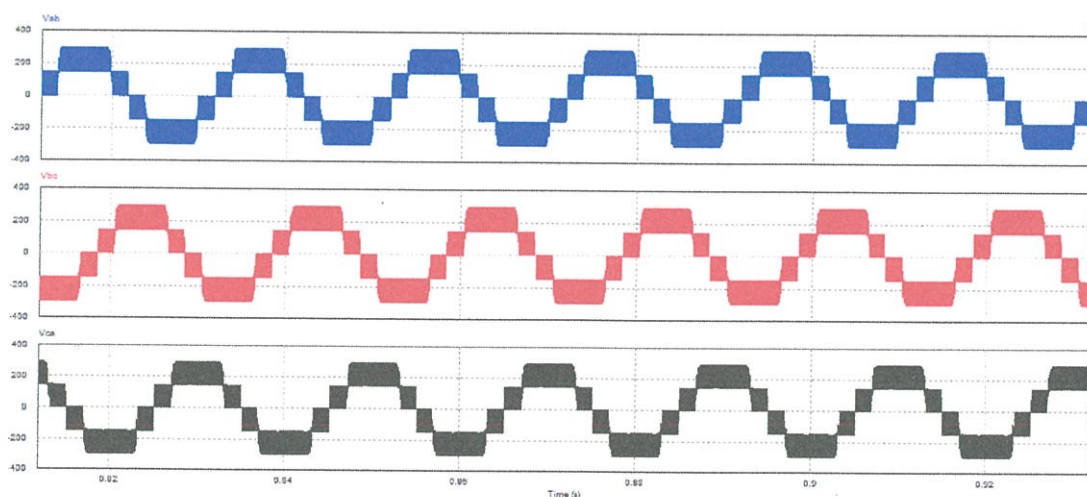
ทำการปรับอัตรามีอดดูเลขชั้นที่ 0.8 และทำการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม PowerSIM เพื่อวัดแรงดันขาออก ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 3.17 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 149.99 V



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามีอดดูเลขชั้น 0.8

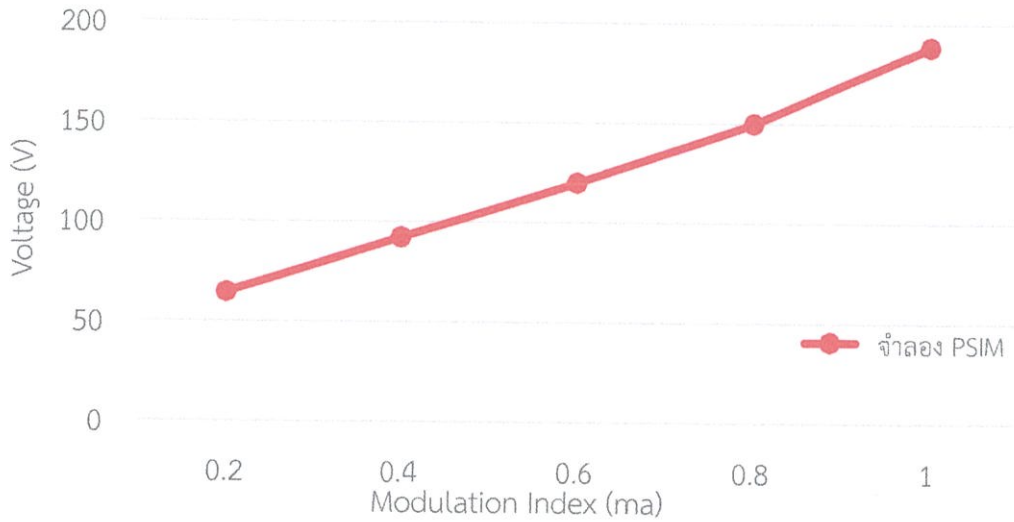
### 3.3.6.5 การจำลองที่อัตรามีอดดูเลขชั้น 1.0

ทำการปรับอัตรามีอดดูเลขชั้นที่ 1.0 และทำการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม PowerSIM เพื่อวัดแรงดันขาออก ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 3.18 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 188.54 V



รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามีอดดูเลขชั้น 1.0

จากการจำลองด้วยโปรแกรม PowerSIM สามารถนำผลการจำลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการมอดูเลชันและแรงดันขาออกได้ โดยการนำมาวาดกราฟดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตรามอดูเลชันกับแรงดันขาออก

### 3.4 สรุป

จากผลการทดลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานที่ภาวะต่างๆ เช่นการทำงานที่พิกัด การทำงานที่ครึ่งหนึ่งของพิกัด การทำงานของภาระตัวต้านทานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ มีรูปคลื่นแรงดันเป็นไปตามทฤษฎี และหากทำการเชื่อมต่อกับวงจรกรองความถี่ต่ำ รูปคลื่นแรงดันที่ได้จะมีรูปคลื่นที่เข้าใกล้ไซน์มากขึ้น และเมื่อทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว จึงทำการออกแบบเครื่องต้นแบบและนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในบทต่อไป

## บทที่ 4

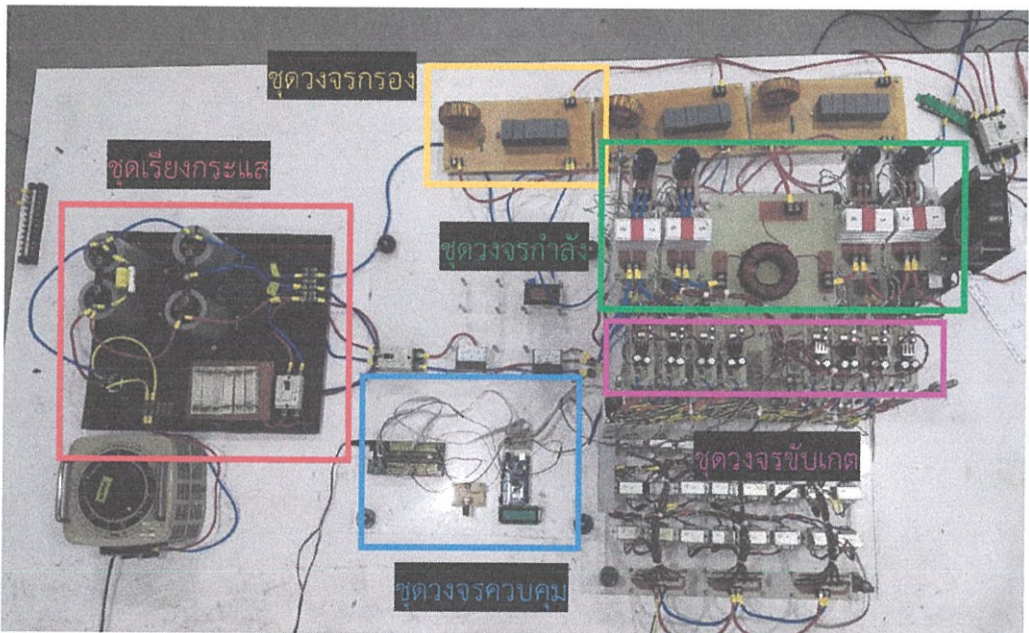
### การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

#### 4.1 บทนำ

สำหรับในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบและการสร้าง Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ ที่พิกัด 300 W ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ ชุดวงจรเรียงกระแสเพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสตรง ชุด Modular Multilevel Inverter ชุดวงจรขับเคลื่อน ชุดวงจรควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และชุดวงจรกรอง โดยการออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานและโครงสร้างโดยละเอียดของอุปกรณ์ในแต่ละส่วนที่นำมาต่อรวมกัน เพื่อให้อุปกรณ์จะสามารถทำงานร่วมกัน และสามารถแก้ไขเมื่อเกิดปัญหาในการทำงานได้

#### 4.2 การออกแบบและสร้างชิ้นงานจริง

ชิ้นงานทั้งหมดที่ได้สร้างขึ้นนั้น ประกอบด้วยวงจรต่างๆ ที่ได้กล่าวไป ดังนี้



รูปที่ 4.1 รูปชิ้นงานเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ

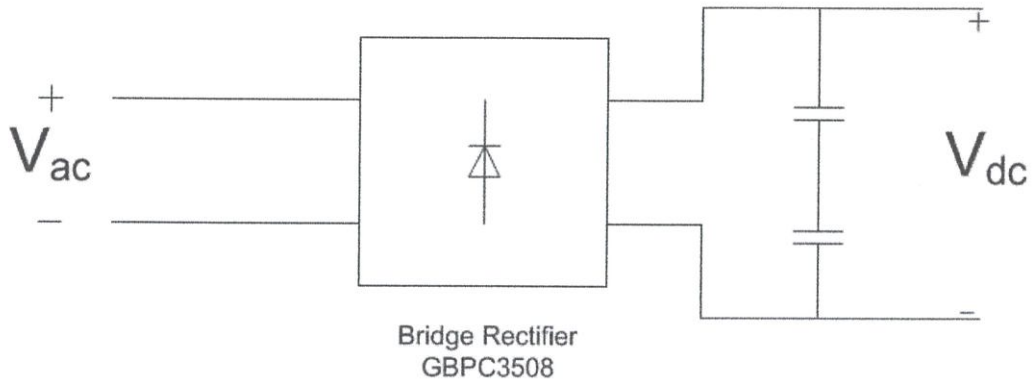
##### 4.2.1 ชุดวงจรเรียงกระแสเพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสตรง

ชุดวงจรเรียงกระแสเพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสตรง เป็นชุดวงจรที่รับไฟฟ้ากระแสสลับ ผ่าน Bridge rectifier GBPC3508 โดยรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 300 V ดังสมการที่ 4.1

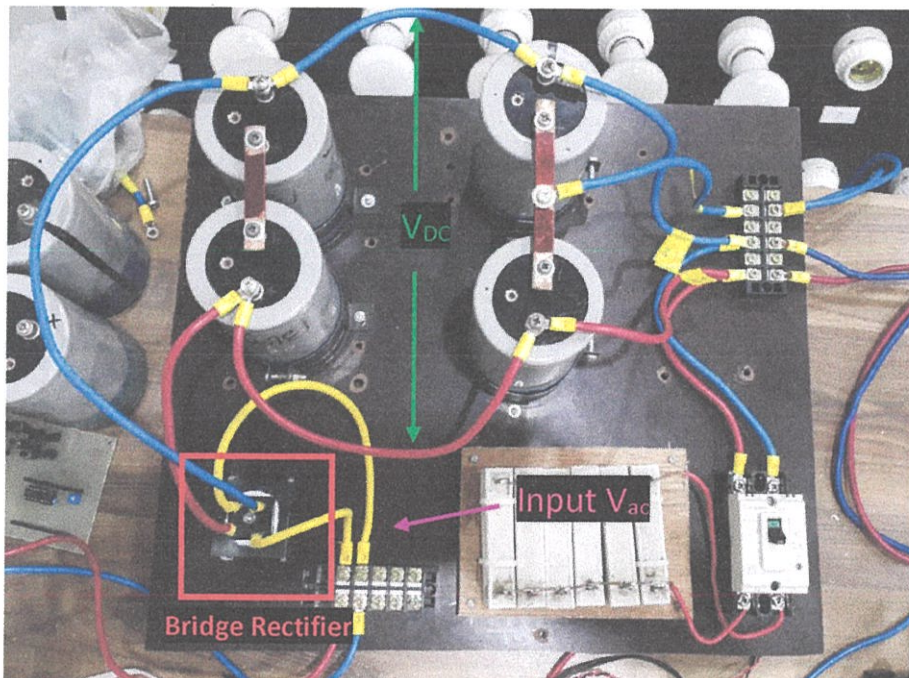
$$V_{DC} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{rms} \quad (4.1)$$

$V_{DC}$  คือ ไฟฟ้ากระแสตรง  
 $V_{rms}$  คือ ไฟฟ้ากระแสสลับ

เลือกใช้ตัวเก็บประจุ 2200  $\mu F$  450 V 2 ตัวนำมาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้สามารถทนต่อแรงดัน 300  $V_{DC}$  ได้โดยอุปกรณ์ไม่เสียหาย ดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการจำลองในส่วนของ DC Link ใน Solid State Transformer ก่อนที่จะแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแล้วจ่ายเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 4.2 วงจรชุดเรียงกระแส

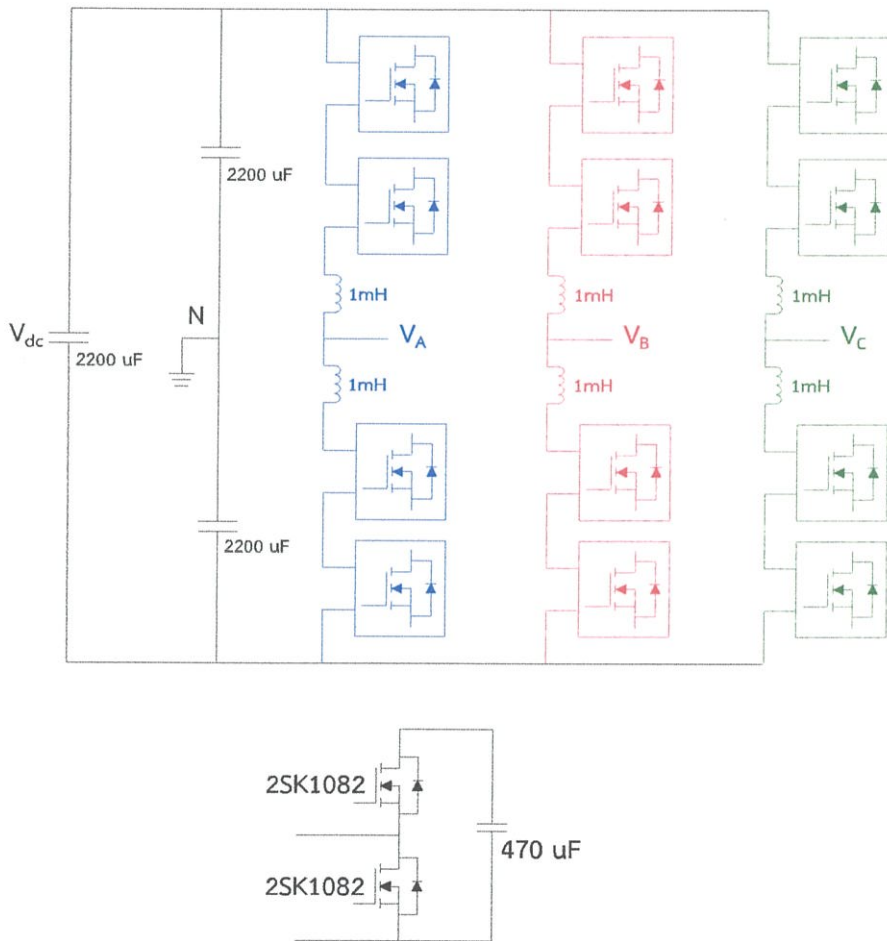


รูปที่ 4.3 ชิ้นงานชุดวงจรเรียงกระแส

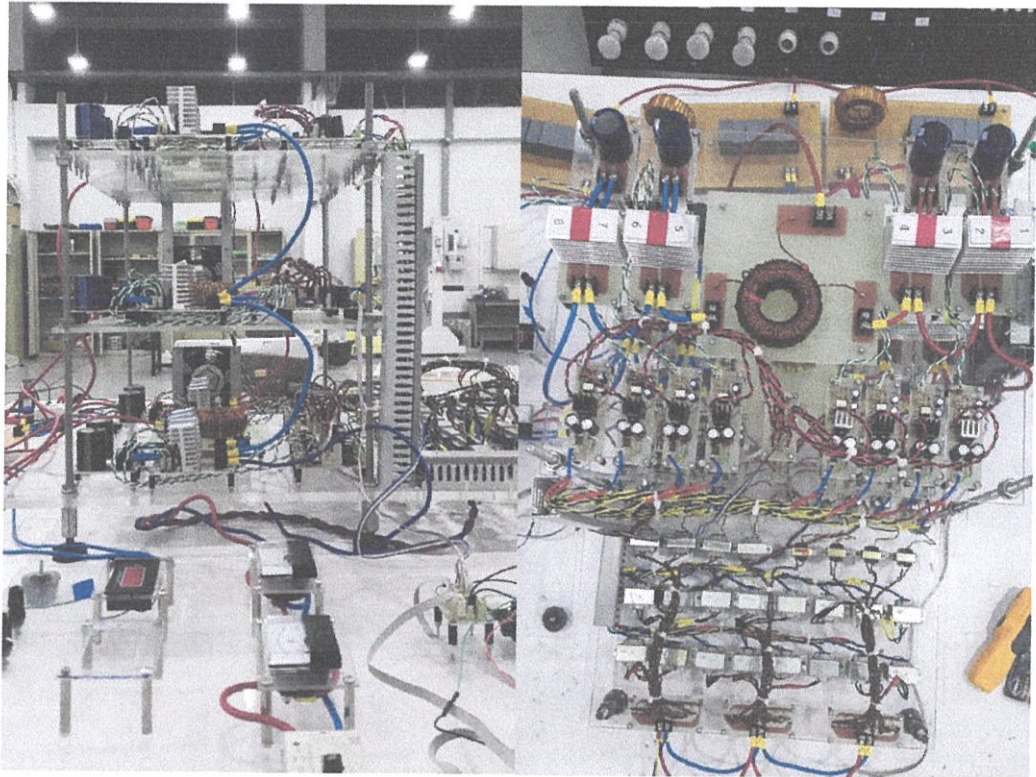
#### 4.2.2 ชุด Modular Multilevel Inverter

วงจร Modular Multilevel Inverter เป็นอุปกรณ์ที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) จากนั้นจึงนำแรงดันขาออกผ่านวงจรกรองเพื่อรูปคลื่นแรงดันเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์

วงจรกิจกรรมของ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ แสดงดังรูปที่ 4.4 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวิตช์กำลังชนิดมอสเฟต เบอร์ 2SK1082 มีพิกัดแรงดัน 900 V พิกัดกระแส 6 A ต่อเป็นวงจรฮาร์ฟบริดจ์สำหรับ 1 โมดูล โดยใช้มอสเฟต 1 ตัวต่อหนึ่งสัญญาณขับ ในตรงจุดนิวทรัลจะมีตัวเก็บประจุที่สำหรับแบ่งแรงดันโดยเลือกใช้ ค่า 2200  $\mu\text{F}$  และตัวเหนี่ยวนำใช้แกนทอรอยด์ ในการพันขดลวดเบอร์ 16 AWG โดยอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 วงจร Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ



รูปที่ 4.5 ชิ้นงาน Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรของ Modular Multilevel Inverter สามารถคำนวณได้จากสมการที่ โดยกระแส  $i_u$  สามารถหาได้จากการคำนวณที่พิกัดเมื่อทำการใส่โหลดจะได้กระแส  $i_u$  จากนั้นจึงสามารถหากระแสไหลวน  $i_{zu}$  ได้ดังสมการที่ 4.4

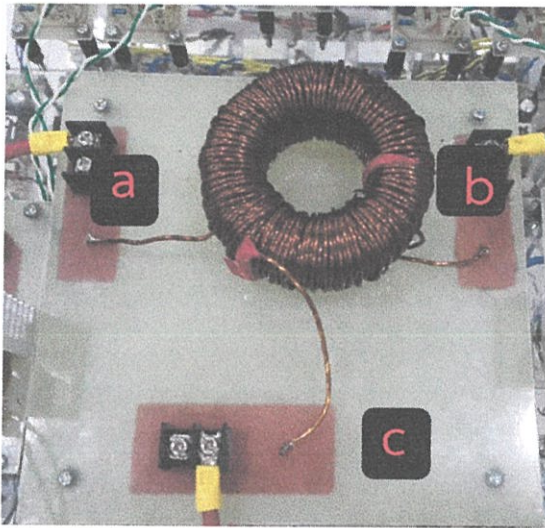
$$i_{pu} = \frac{i_u}{2} + i_{zu} \quad (4.2)$$

$$i_{nu} = -\frac{i_u}{2} + i_{zu} \quad (4.3)$$

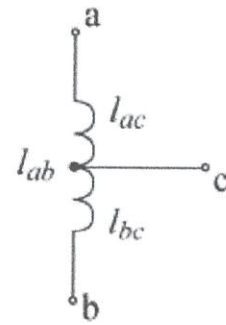
$$i_{zu} = \frac{1}{2}(i_{pu} + i_{nu}) \quad (4.4)$$

$$l_{ab} = 4l_{ac} = 4l_{bc} \quad (4.5)$$

และจากนั้นนำกระแส  $i_{zu}$  เพื่อไปหาค่าตัวเหนี่ยวนำได้ โดยตัวเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสของกึ่งบนกับกึ่งล่างต้องเท่ากัน ดังสมการที่ 4.5 ซึ่งเป็นการพันแกนร่วมดังรูปที่ 4.6(ก) [4]



(ก)

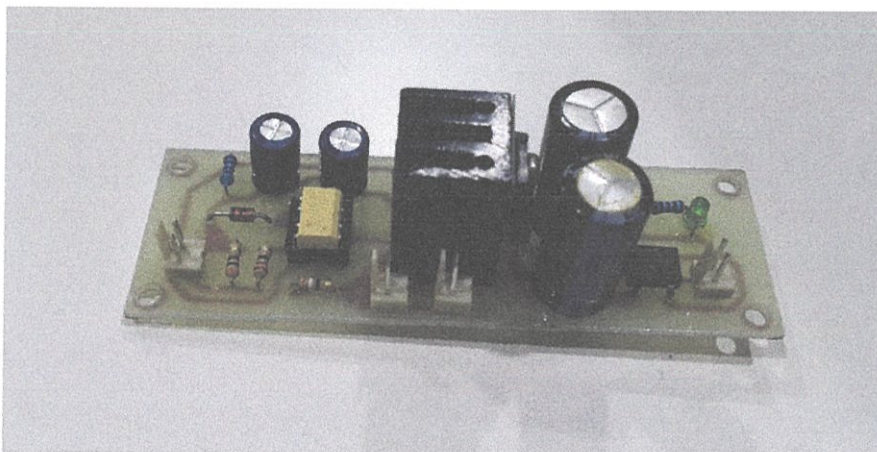


(ข)

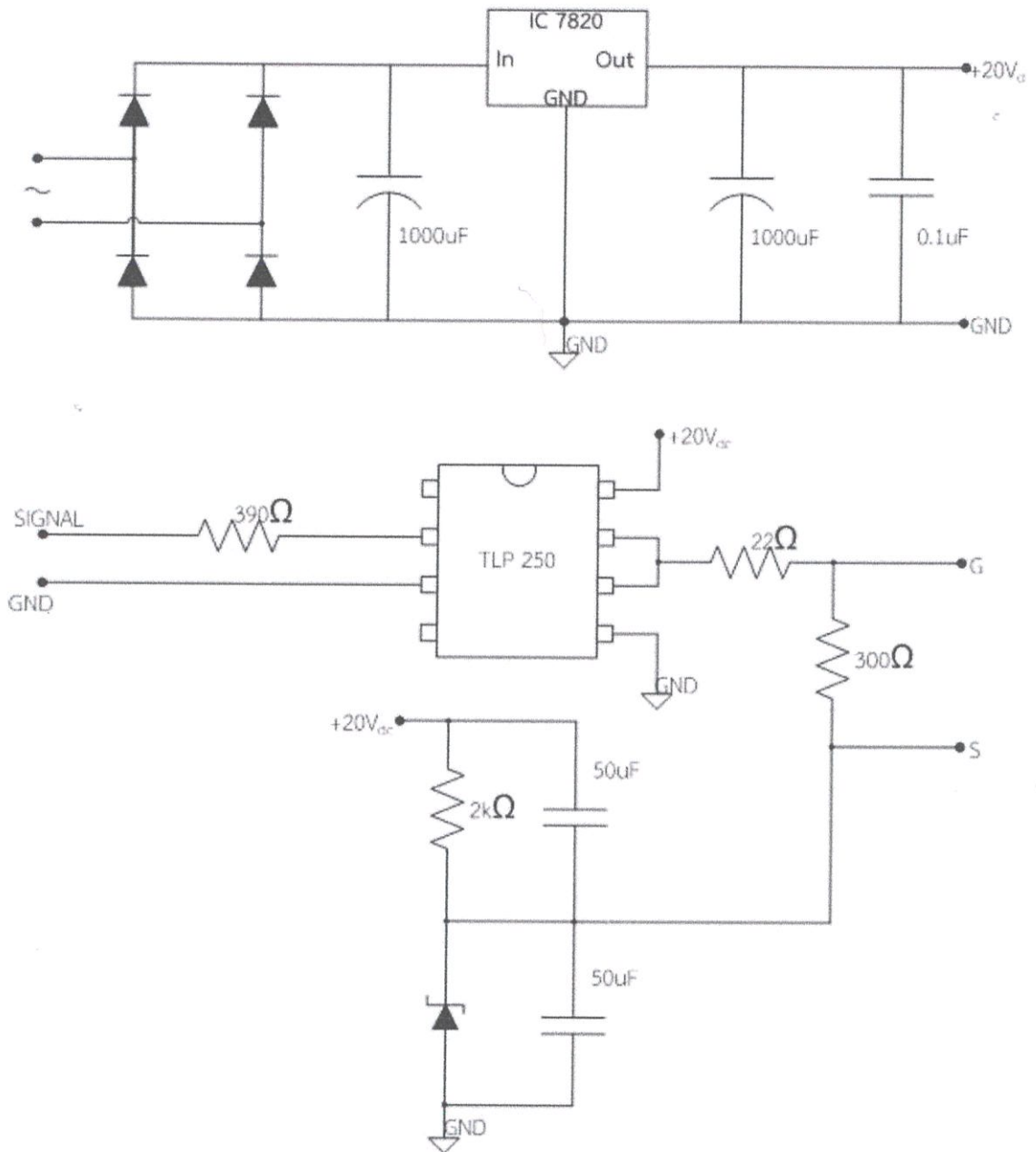
รูปที่ 4.6 (ก) ชิ้นงานตัวเหนี่ยวนำ  
(ข) วงจรของตัวเหนี่ยวนำ

#### 4.2.3 ชุดวงจรขับเคลื่อน

วงจรขับสัญญาณขาเกต (Gate Drive) ทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณควบคุมการสวิตช์ซึ่งจากชุดวงจรควบคุมให้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสวิตช์กำลัง (MOSFET) จะต้องใช้สัญญาณแรงดันขนาด 15 V ในการขับสัญญาณที่ขาเกตเพื่อให้สวิตช์นำกระแส ทั้งยังเป็นอุปกรณ์ในการแยกกราวด์ทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง ในการออกแบบจะใช้ IC เบอร์ TLP-250 เป็นอุปกรณ์ในการขับสวิตช์ โดยใช้หม้อแปลงขนาด 220/24 V เพื่อลดระดับแรงดันลงจากนั้นใช้ IC เรียงกระแสเบอร์ DB104G เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกจากหม้อแปลงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และใช้ Voltage Regulator 7820 เพื่อให้ได้ระดับแรงดันที่ 20 V ก่อนผ่าน TPL-250 ซึ่งรับสัญญาณและส่งสัญญาณ ดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8



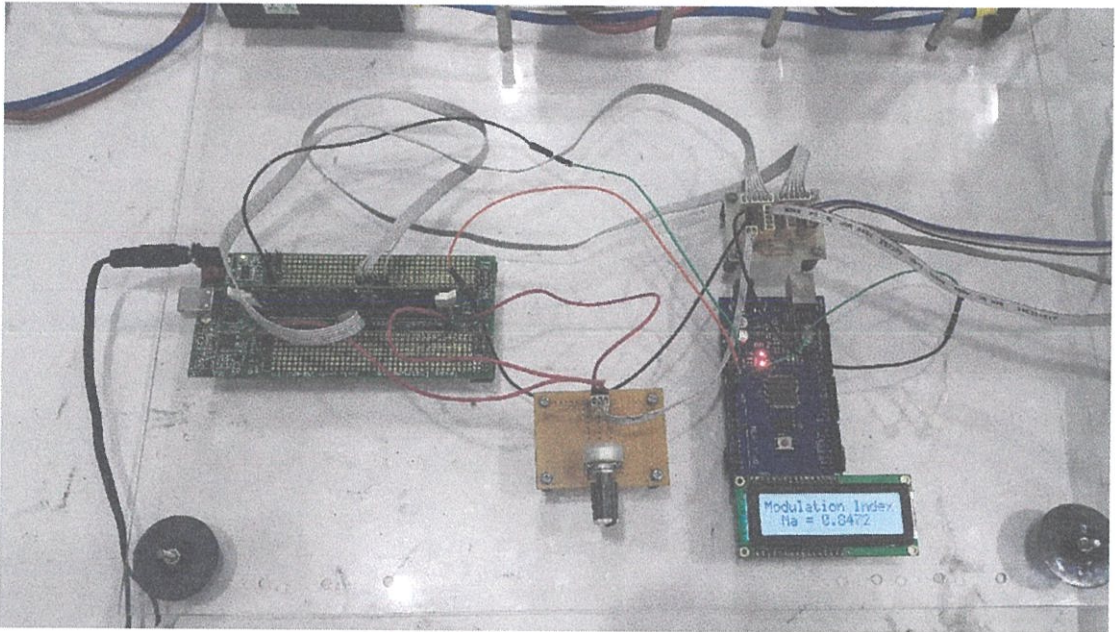
รูปที่ 4.7 ชิ้นงานวงจรขับเคลื่อน



รูปที่ 4.8 วงจรขับเกต

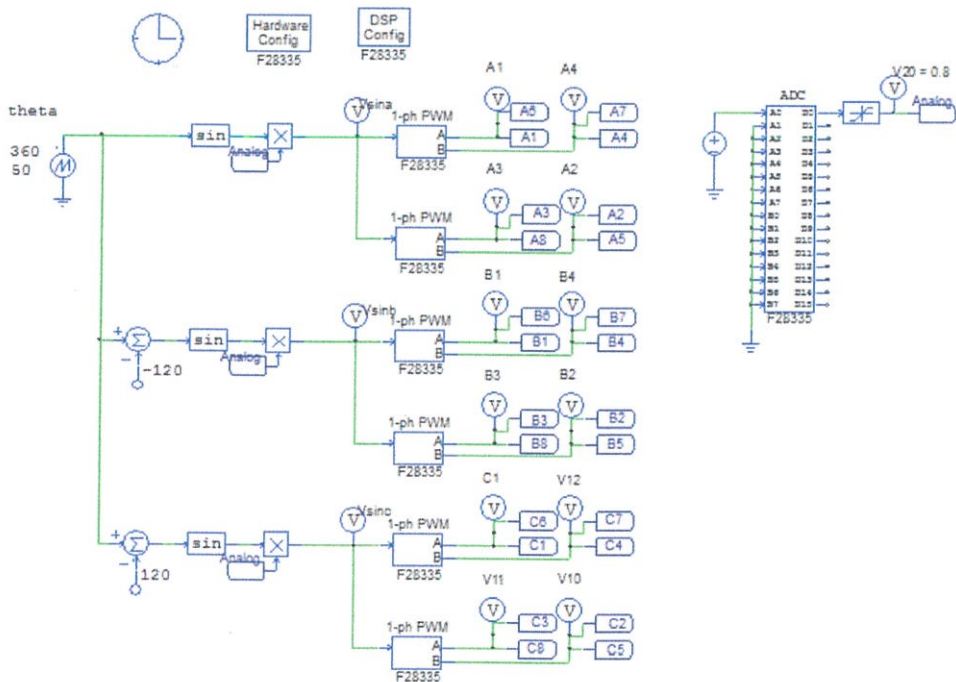
#### 4.2.4 ชุดวงจรควบคุม

ในส่วนนี้จะเป็นชุดควบคุมการทำงานของ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ ซึ่งจะต้องใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณจะใช้ DSP TMS320C2000™ Experimenter Kit เบอร์ TMS320F28335 ซึ่งสามารถนำข้อมูลในการควบคุมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้งานได้เลย ซึ่งในส่วนนี้สามารถควบคุมอัตราการมอดูเลชัน ( $m_a$ ) ได้ตั้งแต่ 0.8-1.0 ซึ่งไว้สำหรับควบคุมระดับแรงดันขาออกซึ่งมีจอ LCD ไว้แสดงผล ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ชิ้นงานชุดวงจรควบคุม

โดยการสร้างสัญญาณ PWM นี้จะสร้างโดยใช้โปรแกรม PowerSIM ในการควบคุม วงจร ซึ่งจะใช้บล็อกไดอะแกรม PWM ในการสร้างขึ้น แต่ว่าบล็อก PWM นี้จะรับได้แค่สัญญาณที่เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง จึงต้องทำให้เป็นสัญญาณกระแสสลับก่อน โดยการสร้างสัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth) ส่งผ่านบล็อกไดอะแกรมเพื่อสร้างให้เป็นสัญญาณไซน์ จึงจะได้สัญญาณ PWM ได้ตาม ต้องการ และนอกจากนี้ยังมีบล็อกไดอะแกรมที่ไว้ควบคุมอัตราการมอดดูเลชั่น ( $m_a$ ) เพื่อไว้สำหรับ ควบคุมแรงดันขาออก ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 วงจรชุดควบคุม

#### 4.2.5 ชุดวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรฟิลเตอร์ที่ใช้เป็นวงจร LC Filter ซึ่งใช้ในการกรององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ ความถี่สูงออกให้เหลือแต่องค์ประกอบความถี่มูลฐาน (50 Hz) เนื่องจากองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ ความถี่สูงนั้นเกิดจากการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ที่ทำให้แรงดันไซน์จากการไฟฟ้าถูกสับ ทำให้แรงดันเกิดการผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์เดิม แต่เมื่อนำมาผ่านวงจร LC Filter จะทำให้รูปคลื่นที่ได้ มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่าเดิมแต่จะมีแอมพลิจูดและค่าประสิทธิผล (RMS) ของแรงดันไฟฟ้าลดลง ซึ่งวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน คือวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่าน แต่จะกั้นสัญญาณความถี่สูงไว้ แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยนิยามเราเรียกย่านความถี่ที่วงจรยอมให้ผ่านว่า ย่านความถี่ต่ำผ่าน (Pass band) หรือแบนด์วิดท์(Bandwidth: BW) ของวงจร ส่วนย่านที่วงจรไม่ยอมให้ผ่านไปเรียกว่า ย่านความถี่หยุด (Stop band) และค่าความถี่คัทออฟ (Cut off Frequency) จะหมายถึง ค่าความถี่ที่ขนาดของสัญญาณด้านออกของวงจรซึ่งโดยทั่วไปที่นิยมใช้กัน คือมีค่าเท่ากับ 0.707 เท่า (หรือประมาณ -3 dB) ของขนาดสัญญาณสูงสุด

ในการคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของวงจร LC Filter นั้น ต้องทราบค่าความถี่คัทออฟ (Cut off Frequency) หรือก็คือค่าความถี่เรโซแนนท์ของวงจร LC Filter เมื่อได้ความถี่เรโซแนนท์ จะสามารถหาค่าของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเหนี่ยวนำ ได้จากสมการที่ 4.6

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.6)$$

กำหนดค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ด้านขาออกเป็น 60 uF และความถี่คัทออฟ ( $f_r$ ) เป็น 1 kHz จากสมการที่ 4.6 จัดรูปเพื่อหาค่า L จะได้

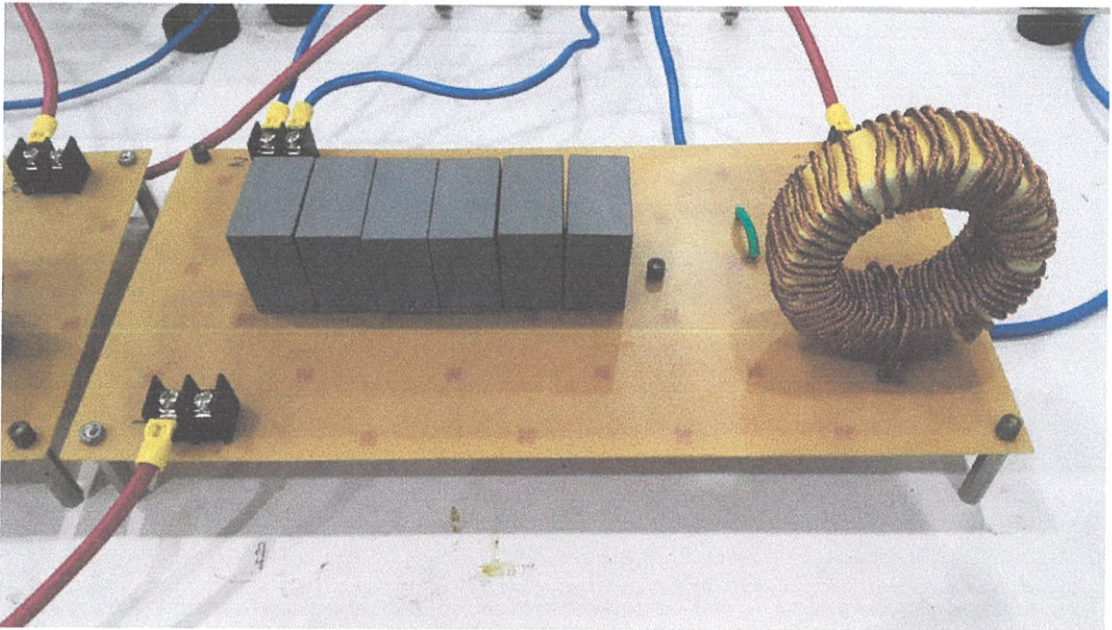
$$L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \times C} \quad (4.7)$$

แทนค่าลงในสมการที่ จะได้

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 1000)^2 \times 60 \times 10^{-6}}$$

$$L = 0.422 \text{ mH}$$

ดังนั้นในแต่ละเฟสจึงเลือกใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ ที่ความถี่คัทออฟ 1 kHz จึงเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 0.5 mH มาต่อขนานกับตัวเก็บประจุขนาด 60 uF ซึ่งตัวเก็บประจุที่นำมาใช้นั้นได้นำตัวเก็บประจุขนาด 10 uF จำนวน 6 ตัวมาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าตามที่ต้องการนำไปใช้งาน ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ชุดวงจรความถี่ต่ำผ่าน

#### 4.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบเครื่องต้นแบบและรายละเอียดของเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ ขนาดพิกัด 300 W ซึ่งจะประกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแส เพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้อินเวอร์เตอร์วงจร Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ วงจรกรองความถี่ต่ำด้านขาออก และส่วนวงจรควบคุมซึ่งจะมีวงจรที่สร้างสัญญาณ PWM และส่วนของการปรับอัตรามอดดูเลชั่นและผลการทดลองในการทำงานจะนำเสนอในบทต่อไป

## บทที่ 5

### ผลการทดลองเครื่องต้นแบบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการทำงานของเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ ขนาดพิกัด 300 W โดยทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ เพื่อทำการวัดค่าต่างๆ เช่น กระแสขาออก แรงดันขาออก THD<sub>v</sub>, THD<sub>i</sub> ประสิทธิภาพการทำงาน แล้วจึงนำค่าต่างๆ มาวิเคราะห์เพื่อหาปัญหาที่เกิดขึ้น

การทดลองการทดสอบเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับมีอุปกรณ์ประกอบการทดลองและเครื่องมือดังนี้

1. ชุดวงจรเรียงกระแส
2. หม้อแปลง 1 เฟสชนิดปรับค่าได้ (1-phase Variac)
3. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B (RIGOL Digital Oscilloscope DS1104B)
4. มัลติมิเตอร์ (Multimeter)
5. ภาระทางไฟฟ้า (หลอดไฟ)
6. ภาระทางไฟฟ้า (มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 250 W)

#### 5.2 การทดลองอินเวอร์เตอร์เมื่อไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่านด้านขาออก

##### 5.2.1 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้า

- วัดคุณสมบัติ

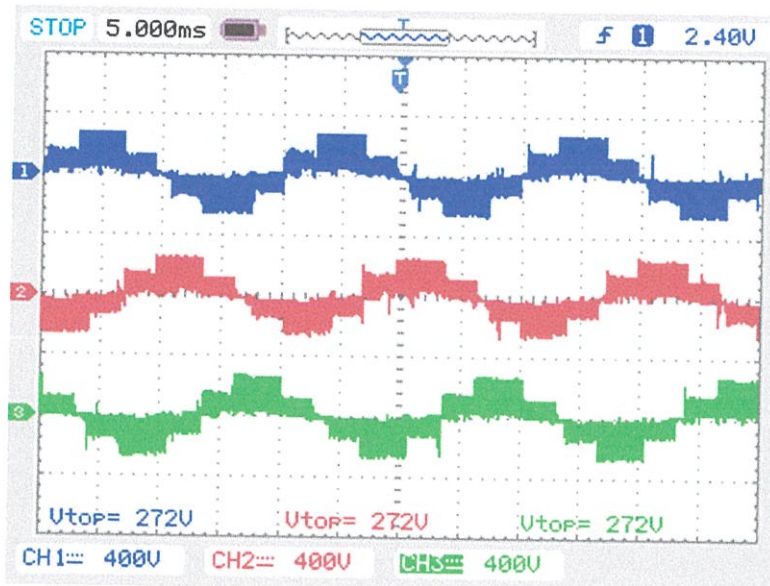
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า ที่อัตราमितดูละชั้นเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกในขณะที่ไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

- ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 210 V ที่อัตราमितดูละชั้นเท่ากับ 0.85 ขณะที่ไม่ใส่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงรูปที่ 5.1 เนื่องจากไม่มีภาระทางไฟฟ้าทำให้ไม่มีกระแสขาออกไหล



รูปที่ 5.1 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อไม่มีภาระทางไฟฟ้าและไม่ได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

### 5.2.2 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 300 W

- วัตถุประสงค์

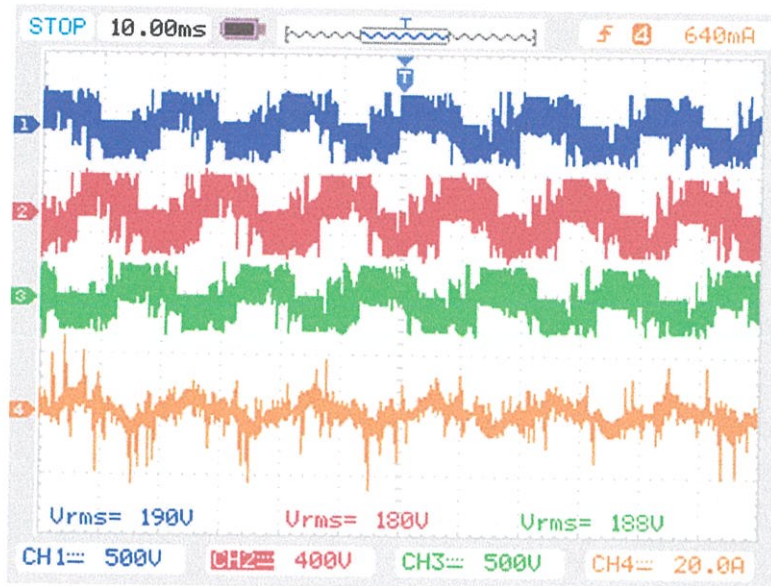
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 300 w ที่อัตรามอเตอร์เฉลี่ยขึ้นเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกในกรณีที่ไม่ได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

- ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าให้ถึงค่าพิกัด 300 W
5. ใช้ดีจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
6. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 300 w อัตรามอเตอร์เฉลี่ยขึ้นเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 190 V ขณะที่ไม่ได้ใส่วงจรกรองความถี่ต่ำ ซึ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้ เป็น 5 ระดับดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 รูปคลื่นแรงดันเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 300 W และไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

### 5.2.3 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 260 W

- วัตถุประสงค์

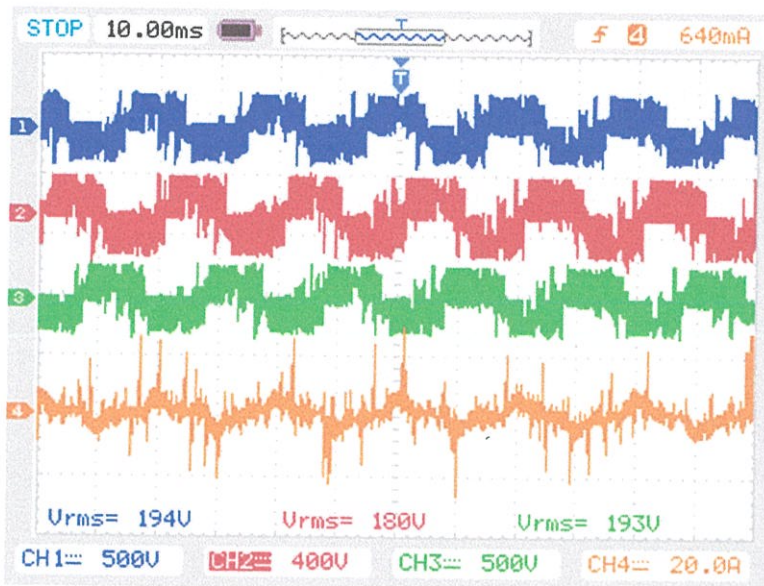
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่เครื่องหนึ่งของพิกัดประมาณ 260 W ที่อัตราโหมดดูเลชันเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกในกรณีที่ไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

- ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าให้ถึงค่าเครื่องหนึ่งของพิกัด 260 W
5. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
6. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่เครื่องหนึ่งของพิกัด 260 W อัตราโหมดดูเลชันเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 194 V ขณะที่ไม่ได้ใส่วงจรรองความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 รูปคลื่นแรงดันเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 260 W และไม่ได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

#### 5.2.4 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 200 W

- วัตถุประสงค์

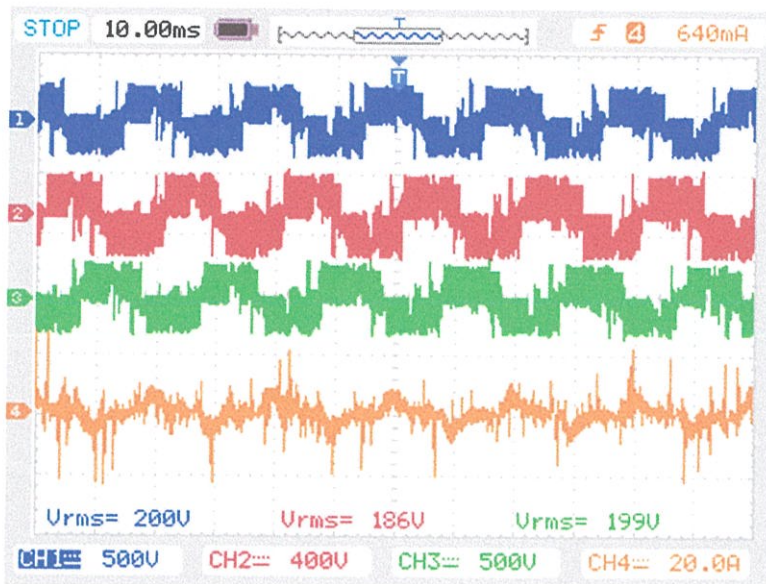
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่เครื่องหนึ่งของพิกัดประมาณ 200 W ที่อัตราमितดูละเช่นเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกในขณะที่ไม่ได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

- ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าให้ถึงค่าเครื่องหนึ่งของพิกัด 200 W
5. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
6. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่เครื่องหนึ่งของพิกัด 200 W อัตราमितดูละเช่นเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 V ขณะที่ไม่ได้ใส่วงจรกรองความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 รูปคลื่นแรงดันเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 200 W และไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

### 5.2.5 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 120 W

- วัตถุประสงค์

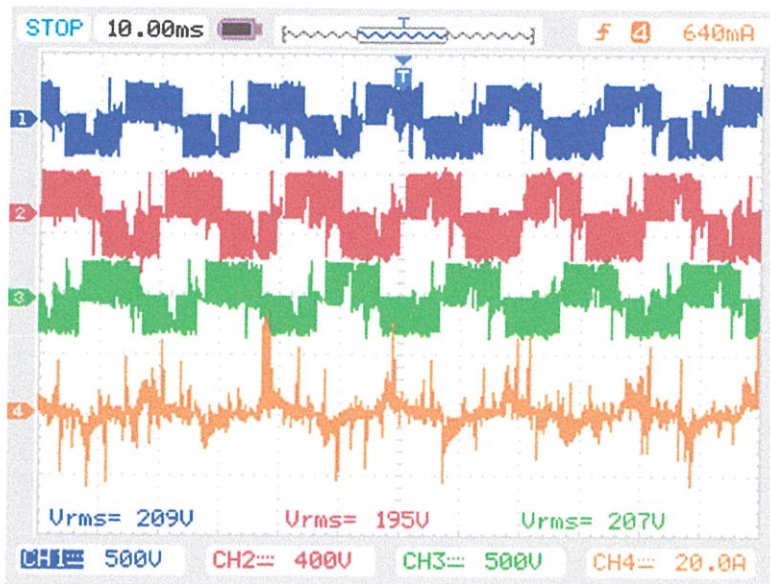
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่ครึ่งหนึ่งของพิกัดประมาณ 120 W ที่อัตรามอดดูเลชันเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกในกรณีที่ไม่ได้ต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

- ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าให้ถึงค่าครึ่งหนึ่งของพิกัด 120 W
5. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
6. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่ครึ่งหนึ่งของพิกัด 120 W อัตรามอดดูเลชันเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 207 V ขณะที่ไม่ได้ใส่วงจรรองความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 รูปคลื่นแรงดันเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 120 W และไม่ได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

### 5.3 การทำลองอินเวอร์เตอร์เมื่อต่อวงจรกรองความถี่ต่ำด้านขาออก

#### 5.3.1 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้า

- วัตถุประสงค์

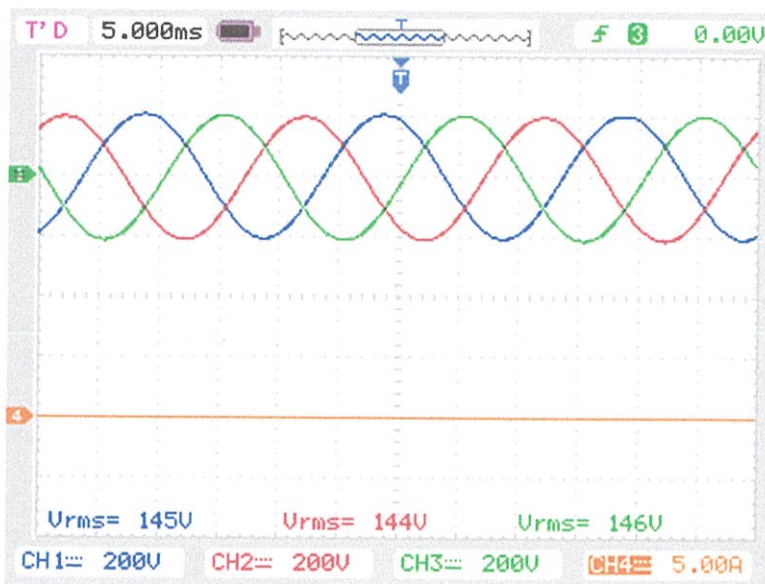
เพื่อทดสอบการทำงานของ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ ในกรณีที่ยังไม่มี การเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า ที่อัตรามอดดูเลขชั้นเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกเมื่อต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ

- ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ไม่มี การเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 190 V ที่อัตรามอดดูเลขชั้นเท่ากับ 0.85 ขณะใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงรูปที่ 5.6 เนื่องจากไม่มีภาระทางไฟฟ้าทำให้ไม่มีกระแสขาออกไหล



รูปที่ 5.6 รูปคลื่นแรงดันเมื่อไม่ได้ต่อภาระไฟฟ้าและต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

### 5.3.2 การทดลองอินเวอร์เตอร์เมื่อปรับค่าอัตรามอดดูเลชัน

#### ● วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการทำงานของ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ ในกรณีที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรามอดดูเลชันกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก

#### ● ขั้นตอนการทดลอง

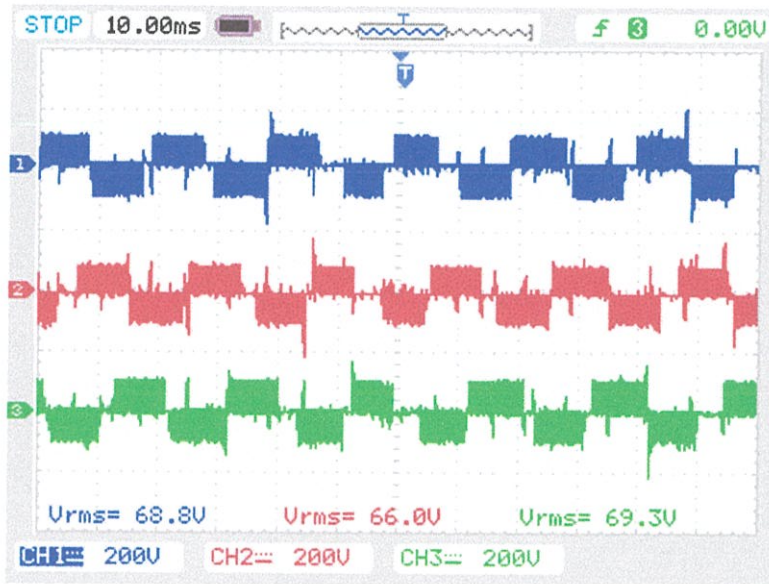
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง
6. ปรับอัตรามอดดูเลชันเพิ่มขึ้น แล้วทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

#### ● ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรามอดดูเลชันกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก พบว่าการปรับอัตรามอดดูเลชันเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเพิ่มขึ้น

### 5.3.2.1 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามีอดดูเลขชั้น 0.2

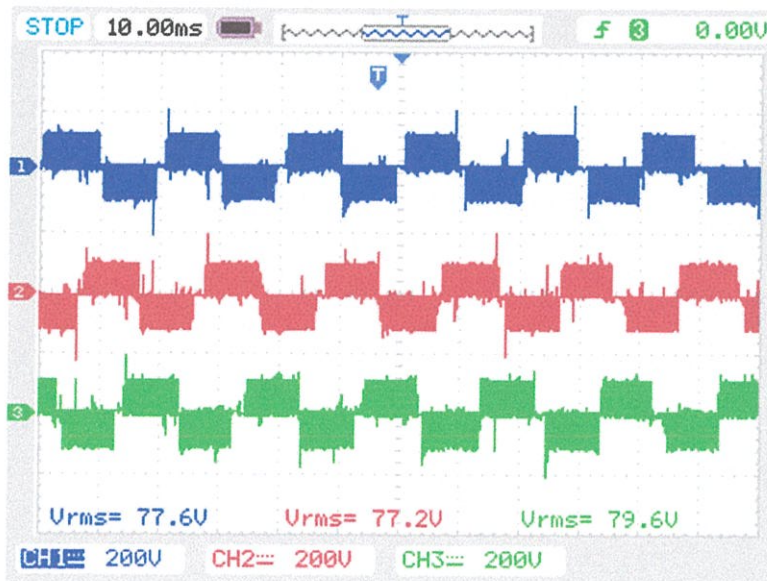
ทำการปรับอัตรามีอดดูเลขชั้นที่ 0.2 และทำการวัดค่าแรงดันขาออกจากชิ้นงาน ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 5.7 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 69.3 V



รูปที่ 5.7 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามีอดดูเลขชั้น 0.2

### 5.3.2.2 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามีอดดูเลขชั้น 0.4

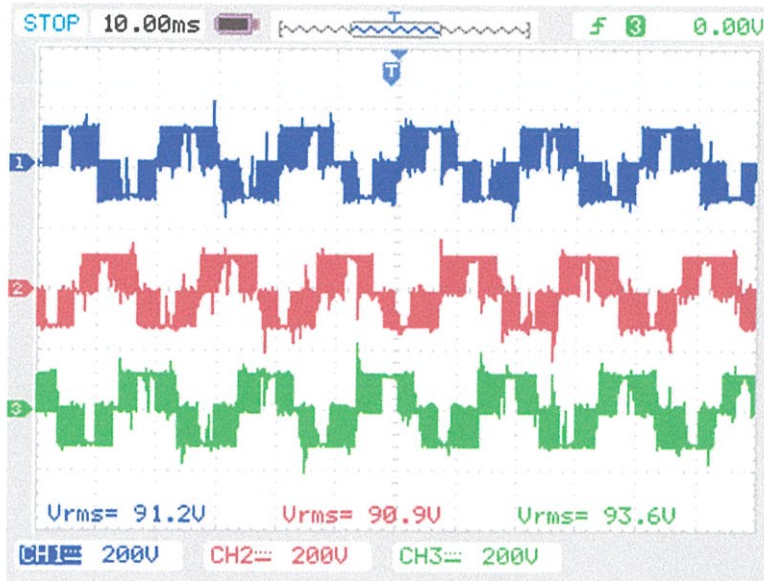
ทำการปรับอัตรามีอดดูเลขชั้นที่ 0.4 และทำการวัดค่าแรงดันขาออกจากชิ้นงาน ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 5.8 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 79.6 V



รูปที่ 5.8 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามีอดดูเลขชั้น 0.4

### 5.3.2.3 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามอดดูเลชัน 0.6

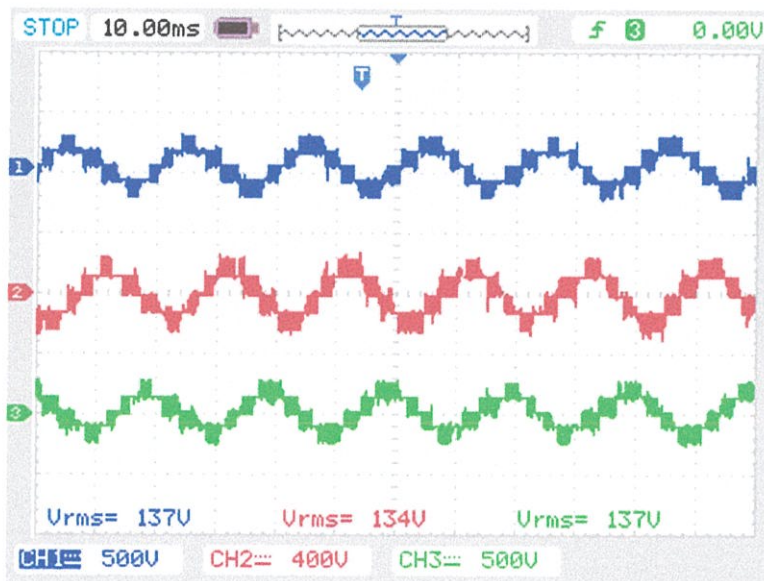
ทำการปรับอัตรามอดดูเลชันที่ 0.6 และทำการวัดค่าแรงดันขาออกจากชิ้นงาน ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 5.9 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 93.6 V



รูปที่ 5.9 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามอดดูเลชัน 0.6

### 5.3.2.4 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามอดดูเลชัน 0.8

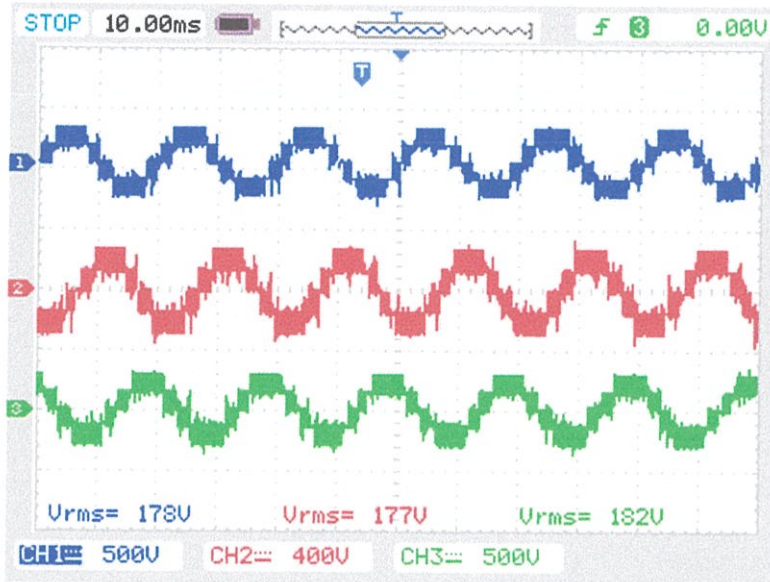
ทำการปรับอัตรามอดดูเลชันที่ 0.8 และทำการวัดค่าแรงดันขาออกจากชิ้นงาน ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 5.10 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 137 V



รูปที่ 5.10 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามอดดูเลชัน 0.8

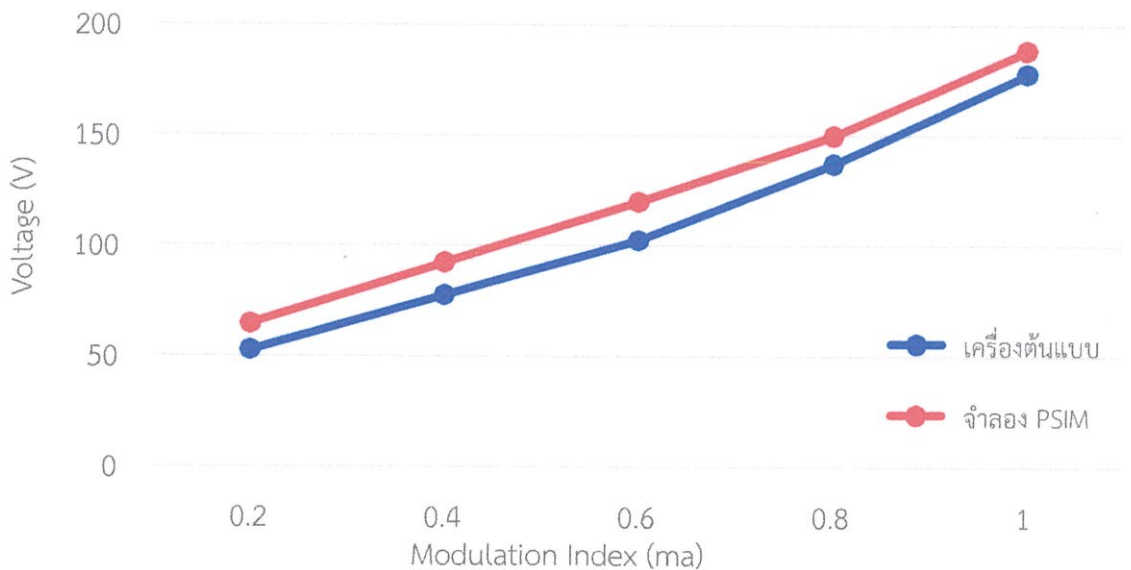
### 5.3.2.5 วัดค่าแรงดันขาออกที่อัตรามอดดูเลชัน 1.0

ทำการปรับอัตรามอดดูเลชันที่ 1.0 และทำการวัดค่าแรงดันขาออกจากชิ้นงาน ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันขาออกดังรูปที่ 5.11 และจากการวัดค่าแรงดันเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าเท่ากับ 182 V



รูปที่ 5.11 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่ออัตรามอดดูเลชัน 1.0

จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรามอดดูเลชันกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกระหว่างค่าจากการจำลอง และค่าที่ได้จากการวัดผ่านตัวชิ้นงาน ได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการมอดดูเลชันกับแรงดันขาออก ระหว่างผลที่วัดได้จากการจำลอง และผลที่วัดได้จากตัวชิ้นงาน

### 5.3.3 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 300 W

- วัตถุประสงค์

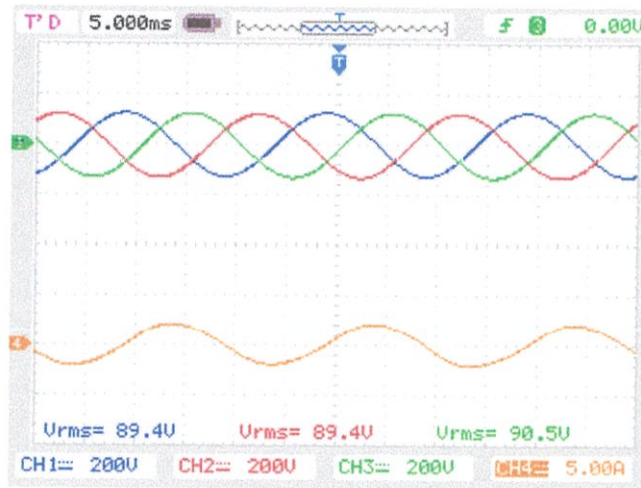
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 300 W ที่อัตราบิดดูละชั้นเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ ดูค่า  $THD_v$  และ  $THD_i$  ในขณะที่ต้องจรรองความถี่ต่ำ

- ขั้นตอนการทดลอง

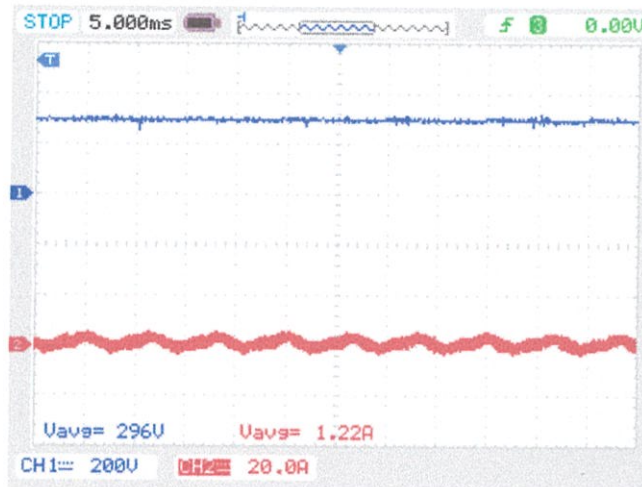
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าให้ถึงค่าพิกัด 300 W
6. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
7. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาเข้าที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
8. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าและปลดภาระทางไฟฟ้าทันทีและทำการวัดค่า
9. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ต้องภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 300 W อัตราบิดดูละชั้นเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 104 V กระแสขาออกวัดค่าได้ 1.7 A ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้ ดังรูปที่ 5.12 เนื่องจากต้องการวัดค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ จึงต้องวัดกระแสและแรงดันขาเข้า ได้ค่าแรงดัน 296 V กระแส 1.22 A ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพได้ 85.56 เปอร์เซ็นต์

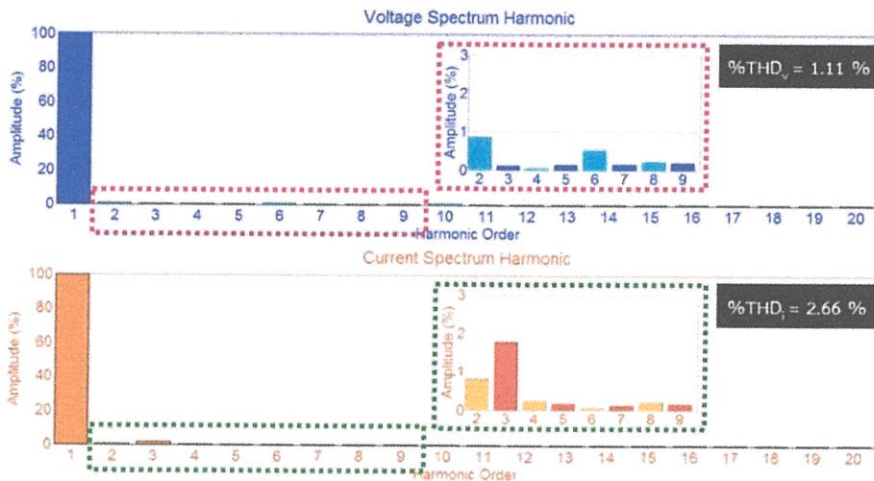


รูปที่ 5.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 300 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 5.14 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระที่พิกัด

และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน ( $THD_v$ ) และกระแส ( $THD_i$ ) ซึ่งนำมาวัดเป็นสเปกตรัมได้ ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งจากรูปจะวัดค่า  $THD_v$  ได้ 1.11% และ  $THD_i$  ได้ 2.66%



รูปที่ 5.15 สเปกตรัมของ  $THD_v$  และ  $THD_i$  ที่ 300 W

#### 5.3.4 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 260 W

- วัตถุประสงค์

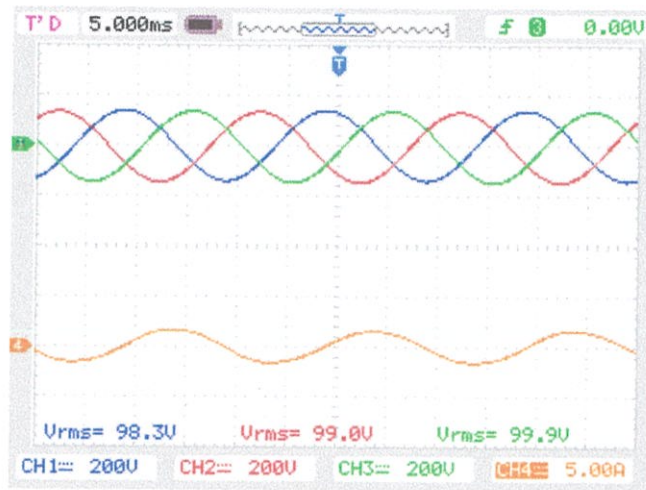
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่เครื่องหนึ่งของพิกัดประมาณ 260 W ที่อัตราमितคูณเลขนเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ ดูค่า  $THD_v$  และ  $THD_i$  ในขณะที่ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ

- ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าให้ถึงค่าเครื่องหนึ่งของพิกัด 260 W
6. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
7. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาเข้าที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
8. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าและปลดภาระทางไฟฟ้าทันทีและทำการวัดค่า
9. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่เครื่องหนึ่งของพิกัด 260 W อัตราमितคูณเลขนเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 115 V กระแสขาออกวัดค่าได้ 1.3 A ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้ ดังรูปที่ 5.14 เนื่องจากต้องการวัดค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ จึงต้องวัดกระแสและแรงดันขาเข้า ได้ค่าแรงดัน 296 V กระแส 1.08 A ดังรูปที่ 5.11 ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพได้ 81.9 เปอร์เซ็นต์

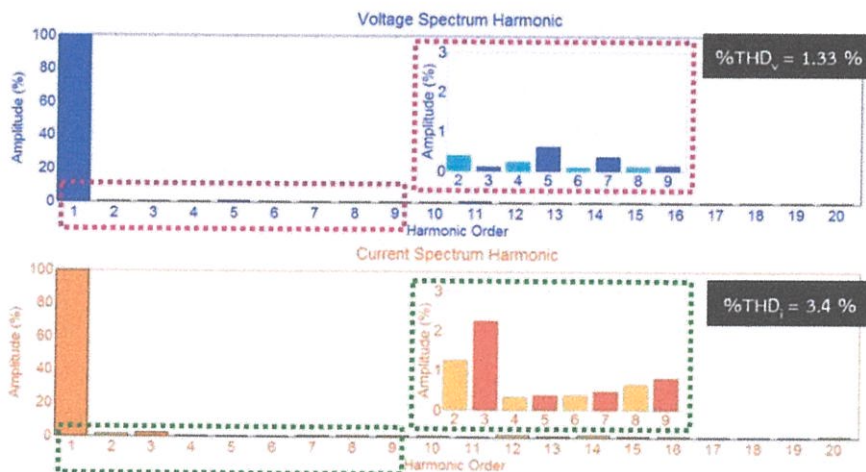


รูปที่ 5.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 260 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 5.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระที่ 260 W

และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน ( $\text{THD}_v$ ) และกระแส ( $\text{THD}_i$ ) ซึ่งนำมาวาดเป็นสเปกตรัมได้ ดังรูปที่ 5.18 ซึ่งจากรูปจะวัดค่า  $\text{THD}_v$  ได้ 1.33% และ  $\text{THD}_i$  ได้ 3.4%



รูปที่ 5.18 สเปกตรัมของ  $\text{THD}_v$  และ  $\text{THD}_i$  ที่ 260 W

### 5.3.5 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 200 W

#### ● วัตถุประสงค์

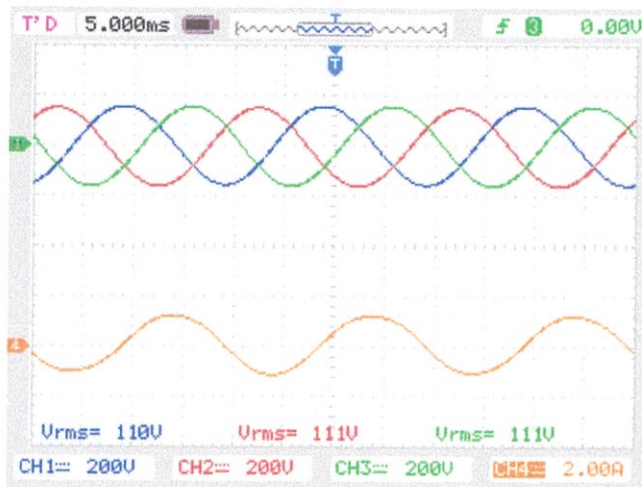
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่ครั้งหนึ่งของพิกัดประมาณ 200 W ที่อัตรามอดดูเลชันเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ ดูค่า  $THD_v$  และ  $THD_i$  ในขณะที่ต่อวงจรรองความถี่ต่ำ

#### ● ขั้นตอนการทดลอง

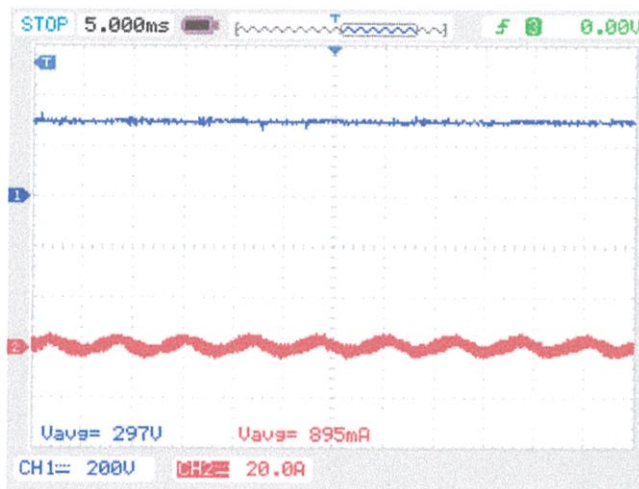
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าให้ถึงค่าครั้งหนึ่งของพิกัด 200 W
6. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
7. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาเข้าที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
8. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าและปลดภาระทางไฟฟ้าทันทีและทำการวัดค่า
9. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

#### ● ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีต่อภาระทางไฟฟ้าที่ครั้งหนึ่งของพิกัด 200 W อัตรามอดดูเลชันเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 129 V กระแสขาออกวัดค่าได้ 0.9 A ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้ ดังรูปที่ 5.14 เนื่องจากต้องการวัดค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ จึงต้องวัดกระแสและแรงดันขาเข้า ได้ค่าแรงดัน 297 V กระแส 0.89 A ดังรูปที่ 5.11 ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพได้ 77.64 เปอร์เซ็นต์

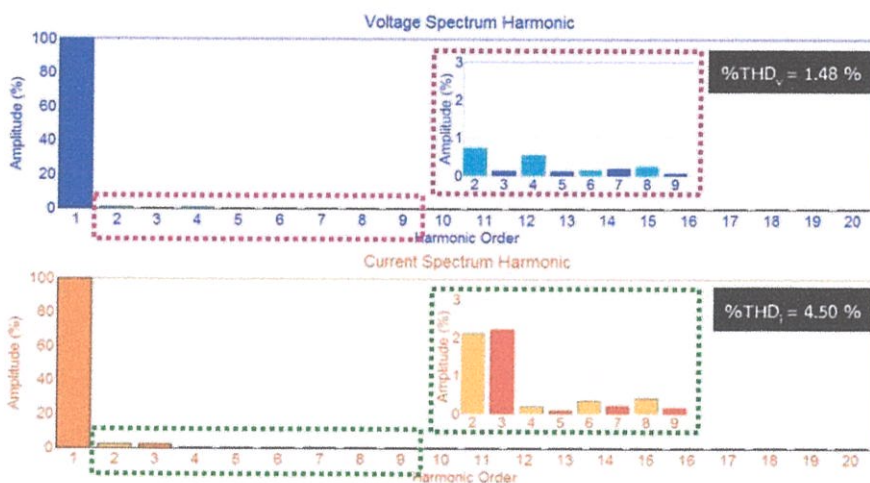


รูปที่ 5.19 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 200 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 5.20 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระที่ 200 W

และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน ( $THD_v$ ) และกระแส ( $THD_i$ ) ซึ่งนำมาวัดเป็นสเปกตรัมได้ ดังรูปที่ 5.21 ซึ่งจากรูปจะวัดค่า  $THD_v$  ได้ 1.48% และ  $THD_i$  ได้ 4.5%



รูปที่ 5.21 สเปกตรัมของ  $THD_v$  และ  $THD_i$  ที่ 200 W

### 5.3.6 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระที่ 120 W

- วัตถุประสงค์

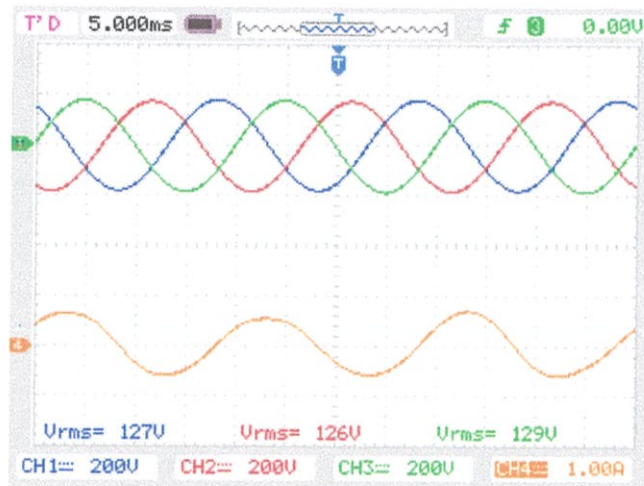
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่ครั้งหนึ่งของพิกัดประมาณ 120 W ที่อัตราमितคูณเลขน้เท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ ดูค่า  $THD_v$  และ  $THD_i$  ในขณะที่ต่อวงจรรองความถี่ต่ำ

- ขั้นตอนการทดลอง

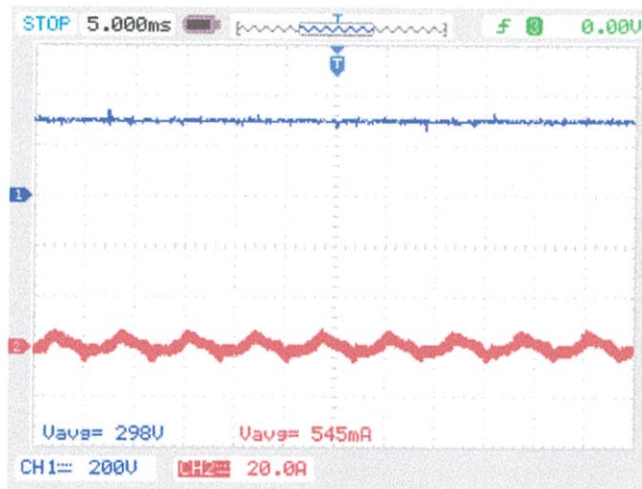
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าให้ถึงค่าครั้งหนึ่งของพิกัด 120 W
6. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
7. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาเข้าที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
8. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าและปลดภาระทางไฟฟ้าทันทีและทำการวัดค่า
9. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีี่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่ครั้งหนึ่งของพิกัด 120 W อัตราमितคูณเลขน้เท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 145 V กระแสขาออกวัดค่าได้ 0.5 A ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้ ดังรูปที่ 5.14 เนื่องจากต้องการวัดค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ จึงต้องวัดกระแสและแรงดันขาเข้า ได้ค่าแรงดัน 298 V กระแส 0.54 A ดังรูปที่ 5.11 ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพได้ 74.99 เปอร์เซ็นต์

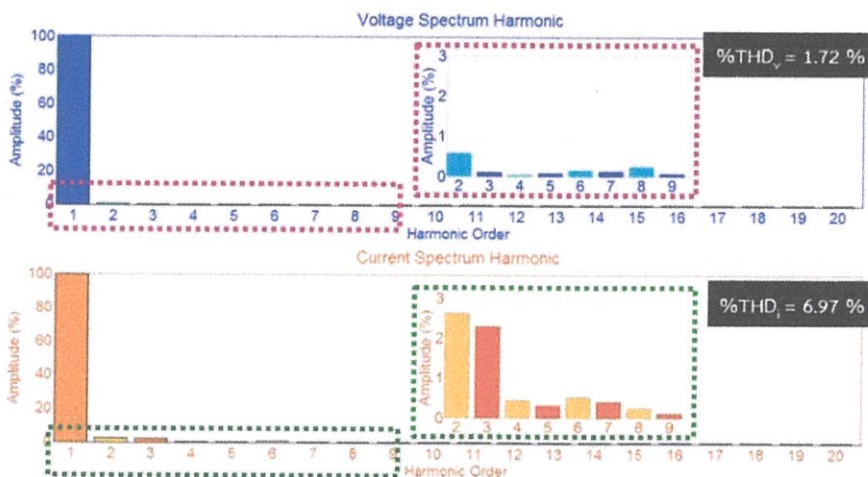


รูปที่ 5.22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่ 120 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 5.23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระที่ 120 W

และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน ( $THD_v$ ) และกระแส ( $THD_i$ ) ซึ่งนำมาวาดเป็นสเปกตรัมได้ ดังรูปที่ 5.24 ซึ่งจากรูปจะวัดค่า  $THD_v$  ได้ 1.79% และ  $THD_i$  ได้ 6.97%



รูปที่ 5.24 สเปกตรัมของ  $THD_v$  และ  $THD_i$  ที่ 120 W

### 5.3.7 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระ 300 W และมอเตอร์ 250 W

#### ● วัตถุประสงค์

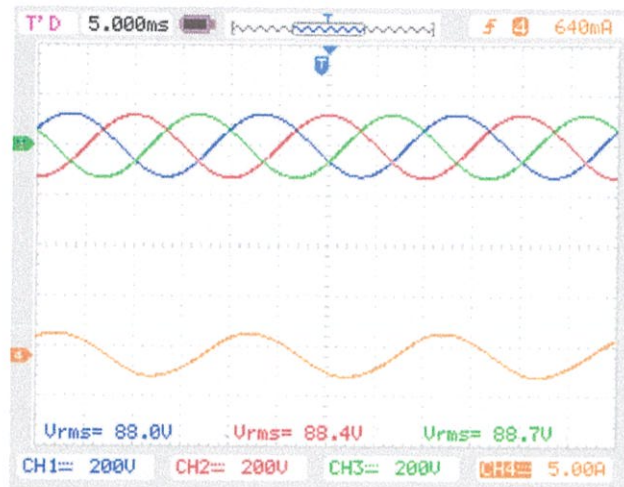
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระแบบ Non-linear ซึ่งใช้โหลดหลอดไฟขนาด 300 W และมอเตอร์ 250 W ที่อัตราบิดดูเลชันเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ ค่า  $THD_v$  และ  $THD_i$  ในขณะที่ต้องวงจรกรองความถี่ต่ำ

#### ● ขั้นตอนการทดลอง

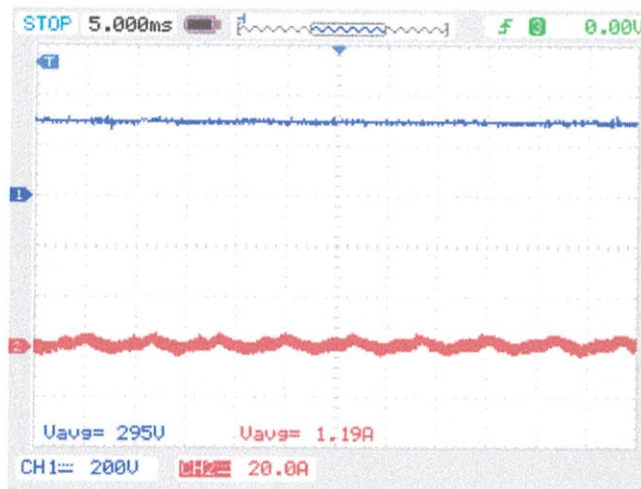
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. ทำการเพิ่มภาระที่ 300 W และมอเตอร์ 250 W
6. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
7. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาเข้าที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
8. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าและปลดภาระทางไฟฟ้าทันทีและทำการวัดค่า
9. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

#### ● ผลการทดลอง

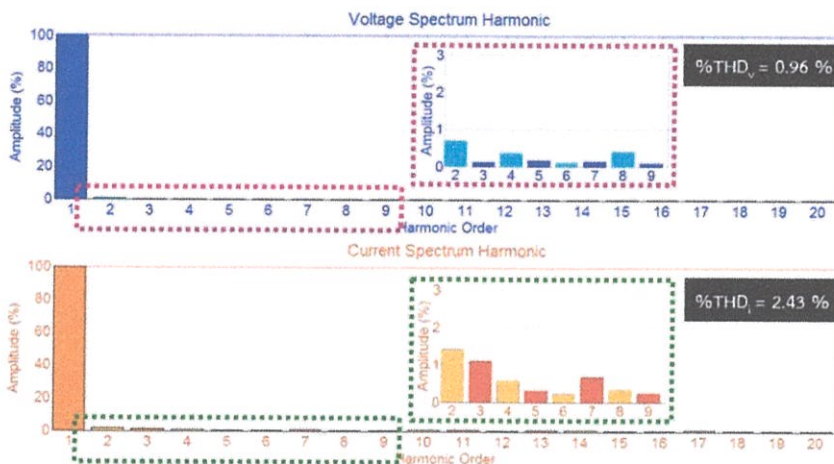
จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ 300 W และมอเตอร์ 250 W อัตราบิดดูเลชันเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 102 V กระแสขาออกวัดค่าได้ 1.7 A ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้ ดังรูปที่ 5.16 เนื่องจากต้องการวัดค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ จึงต้องวัดกระแสและแรงดันขาเข้า ได้ค่าแรงดัน 295 V กระแส 1.19 A ดังรูปที่ 5.17 ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพได้ 85.97 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระ 300 W และมอเตอร์ 250 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 5.26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระ 300 W และมอเตอร์ 250 W และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน ( $THD_v$ ) และกระแส ( $THD_i$ ) ซึ่งนำมาวาดเป็นสเปกตรัมได้ ดังรูปที่ 5.27 ซึ่งจากรูปจะวัดค่า  $THD_v$  ได้ 1.79% และ  $THD_i$  ได้ 6.97%



รูปที่ 5.27 สเปกตรัมของ  $THD_v$  และ  $THD_i$  ที่ภาระไฟฟ้า 300 W มอเตอร์ 250 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

### 5.3.8 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระ 260 W และมอเตอร์ 250 W

#### ● วัตถุประสงค์

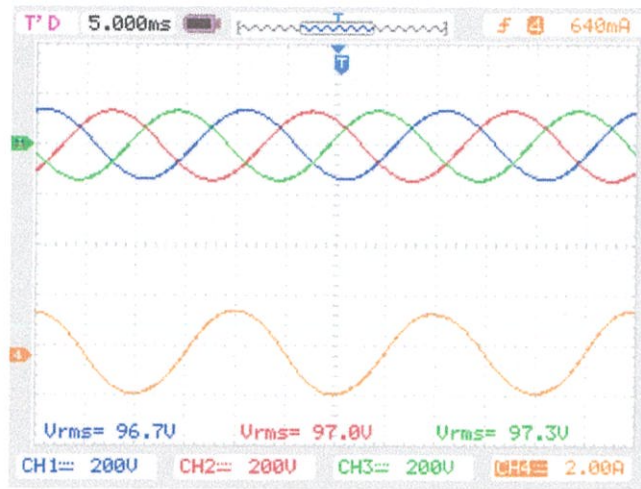
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระแบบ Non-linear ซึ่งใช้โหลดหลอดไฟขนาด 260 W และมอเตอร์ 250 W ที่อัตรามือถือดูเลชันเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ ดูค่า  $THD_v$  และ  $THD_i$  ในขณะที่ต้องวงจรกรองความถี่ต่ำ

#### ● ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. ทำการเพิ่มภาระที่ 260 W และมอเตอร์ 250 W
6. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
7. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาเข้าที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
8. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าและปลดภาระทางไฟฟ้าทันทีและทำการวัดค่า
9. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

#### ● ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ 260 W และมอเตอร์ 250 W อัตรามือถือดูเลชันเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 111 V กระแสขาออกวัดค่าได้ 1.4 A ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้ ดังรูปที่ 5.16 เนื่องจากต้องการวัดค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ จึงต้องวัดกระแสและแรงดันขาเข้า ได้ค่าแรงดัน 295 V กระแส 1.05 A ดังรูปที่ 5.17 ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพได้ 83.48 เปอร์เซ็นต์

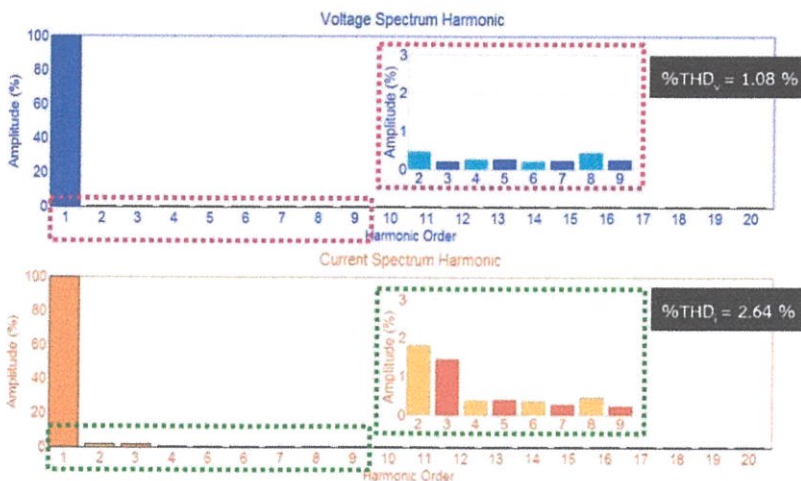


รูปที่ 5.28 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระ 260 W และมอเตอร์ 250 W และต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 5.29 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระ 260 W และมอเตอร์ 250 W

และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน (THD<sub>v</sub>) และกระแส (THD<sub>i</sub>) ซึ่งนำมาวาดเป็นสเปกตรัมได้ ดังรูปที่ 5.30 ซึ่งจากรูปจะวัดค่า THD<sub>v</sub> ได้ 1.79% และ THD<sub>i</sub> ได้ 6.97%



รูปที่ 5.30 สเปกตรัมของ THD<sub>v</sub> และ THD<sub>i</sub> ที่ภาระไฟฟ้า 300 W มอเตอร์ 250 W

### 5.3.9 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระ 200 W และมอเตอร์ 250 W

#### ● วัตถุประสงค์

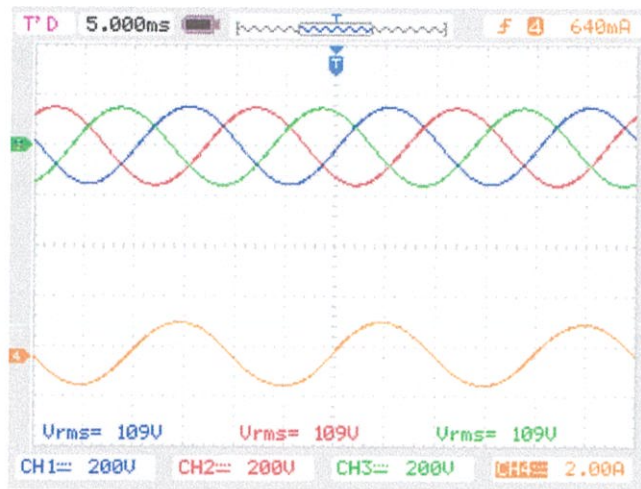
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระแบบ Non-linear ซึ่งใช้โหลดหลอดไฟขนาด 200 W และมอเตอร์ 250 W ที่อัตราเมื่อคูณขึ้นเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ ดูค่า  $THD_v$  และ  $THD_i$  ในขณะที่ต้องวงจรกรองความถี่ต่ำ

#### ● ขั้นตอนการทดลอง

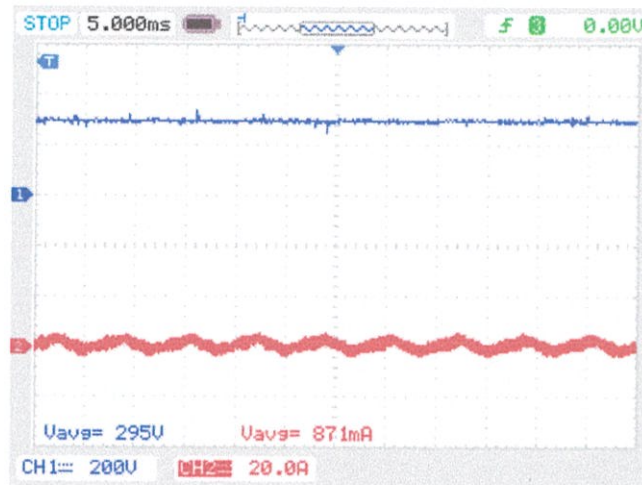
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. ทำการเพิ่มภาระที่ 200 W และมอเตอร์ 250 W
6. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
7. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาเข้าที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
8. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าและปลดภาระทางไฟฟ้าทันทีและทำการวัดค่า
9. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

#### ● ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ 260 W และมอเตอร์ 200 W อัตราเมื่อคูณขึ้นเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 129 V กระแสขาออกวัดค่าได้ 0.9 A ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้ ดังรูปที่ 5.16 เนื่องจากต้องการวัดค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ จึงต้องวัดกระแสและแรงดันขาเข้า ได้ค่าแรงดัน 295 V กระแส 0.87 A ดังรูปที่ 5.17 ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพได้ 80.91 เปอร์เซ็นต์

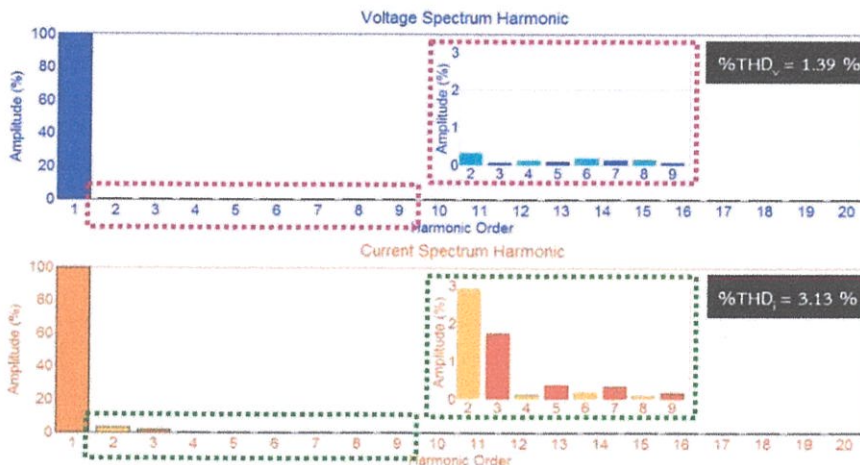


รูปที่ 5.31 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระ 200 W และมอเตอร์ 250 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 5.32 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระ 200 W และมอเตอร์ 250 W

และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน ( $THD_v$ ) และกระแส ( $THD_i$ ) ซึ่งนำมาวาดเป็นสเปกตรัมได้ ดังรูปที่ 5.33 ซึ่งจากรูปจะวัดค่า  $THD_v$  ได้ 1.39% และ  $THD_i$  ได้ 3.13%



รูปที่ 5.33 สเปกตรัมของ  $THD_v$  และ  $THD_i$  ที่ภาระไฟฟ้า 200 W มอเตอร์ 250 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

### 5.3.10 การทดลองอินเวอร์เตอร์ขณะที่ต่อภาระ 140 W และมอเตอร์ 250 W

#### ● วัตถุประสงค์

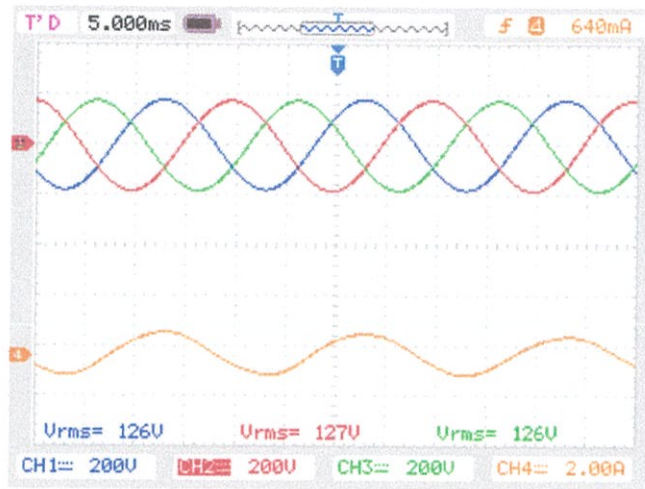
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะที่ต่อภาระแบบ Non-linear ซึ่งใช้โหลดหลอดไฟขนาด 140 W และมอเตอร์ 250 W ที่อัตรามือถือดูเลชั่นเท่ากับ 0.85 เพื่อดูค่าและรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ ดูค่า  $THD_v$  และ  $THD_i$  ในขณะที่ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ

#### ● ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. ทำการเพิ่มภาระที่ 140 W และมอเตอร์ 250 W
6. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
7. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาเข้าที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
8. ทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าและปลดภาระทางไฟฟ้าทันทีและทำการวัดค่า
9. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

#### ● ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ 140 W และมอเตอร์ 250 W อัตรามือถือดูเลชั่นเท่ากับ 0.85 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 144 V กระแสขาออกวัดค่าได้ 0.6 A ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้ ดังรูปที่ 5.16 เนื่องจากต้องการวัดค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ จึงต้องวัดกระแสและแรงดันขาเข้า ได้ค่าแรงดัน 300 V กระแส 0.59 A ดังรูปที่ 5.17 ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพได้ 80.91 เปอร์เซ็นต์

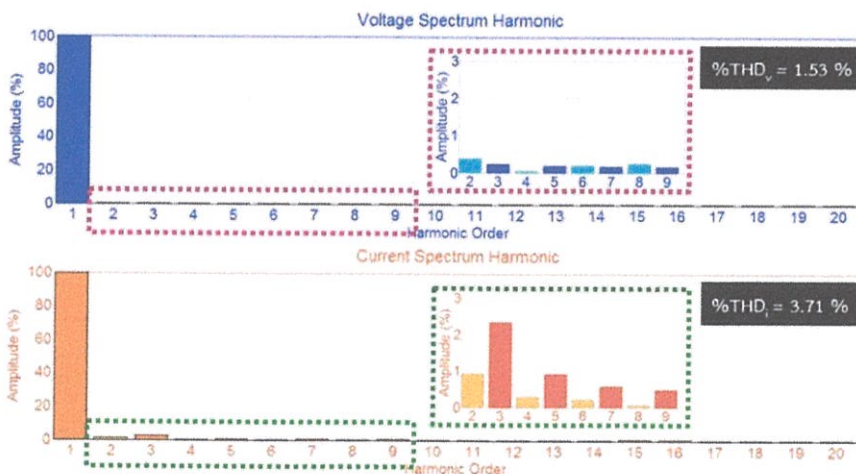


รูปที่ 5.34 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกเมื่อต่อภาระ 140 W และมอเตอร์ 250 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



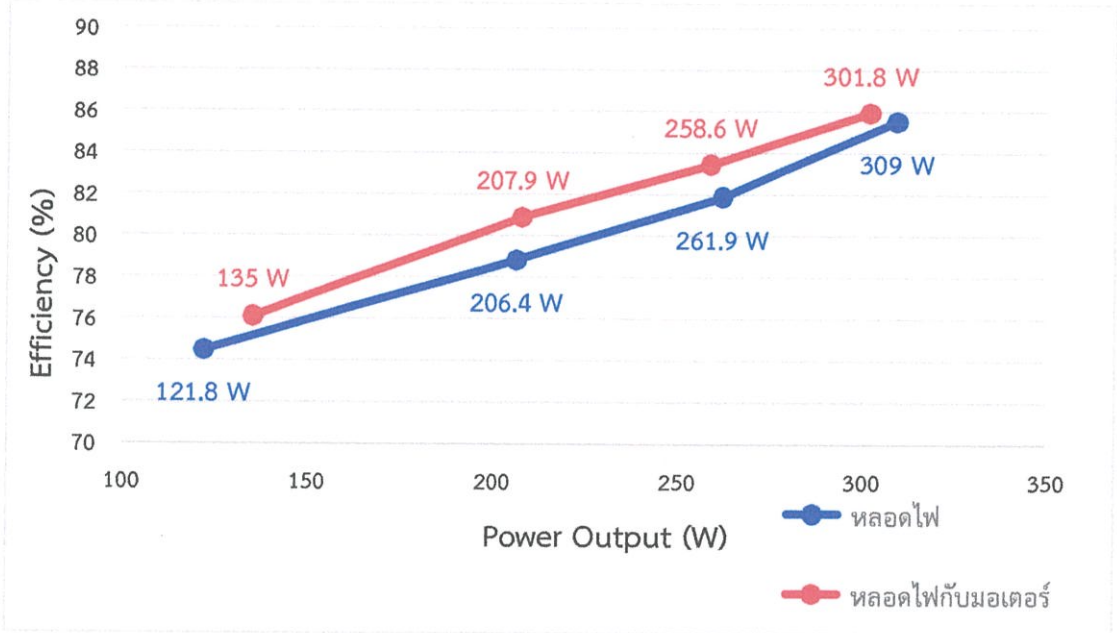
รูปที่ 5.35 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าเมื่อต่อภาระ 140 W และมอเตอร์ 250 W

และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน ( $THD_v$ ) และกระแส ( $THD_i$ ) ซึ่งนำมาวาดเป็นสเปกตรัมได้ ดังรูปที่ 5.36 ซึ่งจากรูปจะวัดค่า  $THD_v$  ได้ 1.53% และ  $THD_i$  ได้ 3.71%

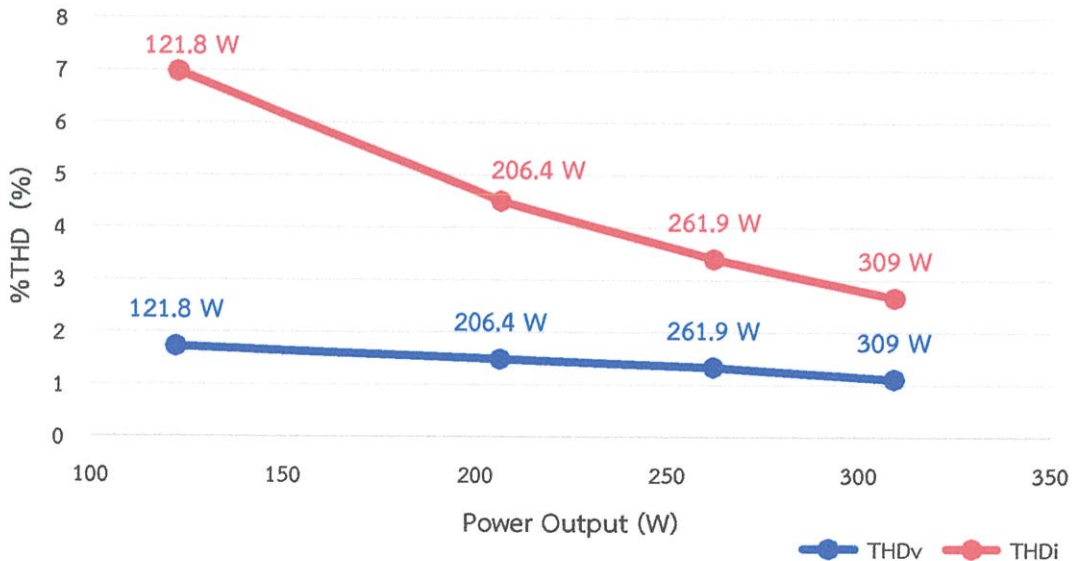


รูปที่ 5.36 สเปกตรัมของ  $THD_v$  และ  $THD_i$  ที่ภาระไฟฟ้า 140 W มอเตอร์ 250 W และต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากการทดลองเพื่อหาค่าและรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออก ทำการวัดประสิทธิภาพ ค่า  $THD_v$  และ  $THD_i$  ในขณะที่ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ สามารถนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพและกำลังขาออกได้ดังรูปที่ 5.37 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $THD_i$ ,  $THD_v$  และกำลังขาออก ดังรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังขาออก



รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดเพี้ยนกับกำลังขาออก

จากการทดลองเครื่องต้นแบบสามารถนำค่าต่างๆมาเปรียบเทียบกันได้ตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าจากการทดลองที่สภาวะต่างๆ

	ภาระโหลดไฟ				ภาระโหลดไฟและมอเตอร์ 250 W			
	300 W	260 W	200 W	120 W	300 W	260 W	200 W	140 W
$V_{out,rms}$ (V)	104	115	129	145	102	111	126	144
$I_{out,rms}$ (A)	1.7	1.3	0.9	0.5	1.7	1.4	1.0	0.6
$P_{out}$ (W)	309	261.9	206.4	121.8	301.8	258.6	207.9	135
$V_{in}$ (V)	296	296	297	298	295	295	295	300
$I_{in,rms}$ (A)	1.22	1.08	0.895	0.545	1.19	1.05	0.871	0.591
$P_{in}$ (W)	361.1	319.6	265.8	126.4	351.0	309.7	256.9	177.3
Efficiency (%)	85.56	81.9	77.64	74.99	85.97	83.48	80.91	76.14
THDv (%)	1.10	1.33	1.48	1.73	0.95	1.08	1.39	1.53
THDi (%)	2.66	3.40	4.50	6.97	2.43	2.64	3.12	3.71

#### 5.4 การทดลองวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

- วัดอุปสงค์

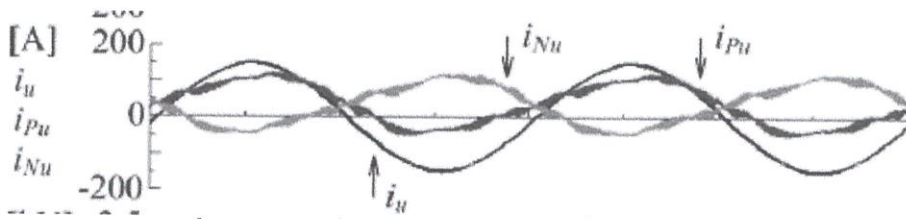
เพื่อทดสอบการไหลของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่อยู่บนวงจร Modular Multilevel Inverter ว่าเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษา

- ขั้นตอนการทดลอง

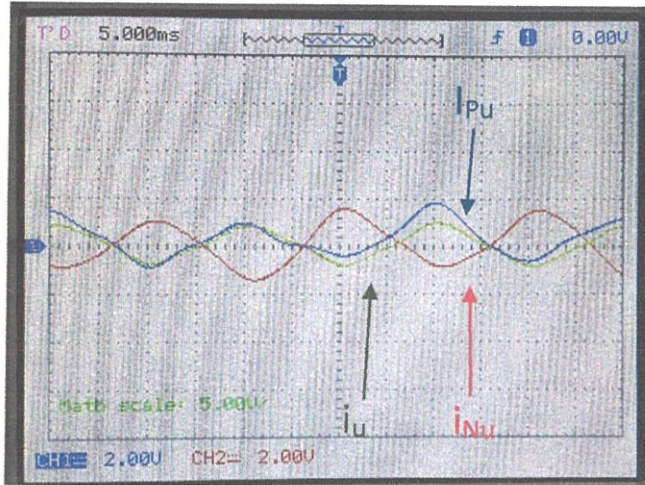
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรเรียงกระแส วงจรควบคุม วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. ปรับระดับแรงดันให้ชุดวงจรเรียงกระแสมีแรงดันขาออกเป็น 300 V
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 300 V เข้ากับอินเวอร์เตอร์
4. ใช้ดิจิตอลอสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นกระแสที่กึ่งบนของตัวเหนี่ยวนำ
5. ใช้ดิจิตอลอสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นกระแสที่กึ่งล่างของตัวเหนี่ยวนำ
6. ใช้ดิจิตอลอสซิลโลสโคป รุ่น DS1104B วัดรูปคลื่นกระแสด้านขาออกของตัวเหนี่ยวนำ
7. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

- ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในการวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ในวงจร Modular Multilevel Inverter ซึ่งจากทฤษฎีนั้นจะมีรูปคลื่นดังรูปที่ 5.23 และจากการทดลองวัดจากชิ้นงานต้นแบบโดยใช้ดิจิตอลอสซิลโลสโคปในการกรองสัญญาณได้รูปคลื่นดังรูปที่ 5.24 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ศึกษามา [4]



รูปที่ 5.39 รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากทฤษฎี



รูปที่ 5.40 รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากการทดลอง

## 5.5 สรุป

จากการทดลองสร้างเครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ ซึ่งได้ทดสอบการทำงานที่สภาวะต่างๆ เช่น การทำงานเมื่อไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้า การทำงานเมื่อต่อภาระไฟฟ้าที่พิกัด การทำงานเมื่อต่อภาระด้วยตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งได้มีการวัดค่ากระแสและแรงดันทั้งด้านขาเข้าและขาออก เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงาน เพื่อหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดัน และได้มีการวัดค่าของกระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำเพื่อพิสูจน์ว่าเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ศึกษามา

## บทที่ 6

### บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

#### 6.1 บทสรุป

จากการศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับโซลาฟาร์มจึงรู้ว่าในตอนกลางคืนเมื่อโซลาฟาร์มไม่ได้มีการผลิตไฟฟ้า จะเกิดค่าใช้จ่ายที่สูญเสียเกิดขึ้น โดยค่าใช้จ่ายที่สูญเสียนี้เกิดขึ้นจากการที่ต้องเปิดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ทั้งตอนกลางคืน และเกิดจากสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า และยังมีปัญหาของระบบที่เสถียรเช่น การเกิดแรงดันเกิน และแรงดันตก ซึ่งจากการศึกษาหาข้อมูลจึงเลือกที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Solid State Transformer) ซึ่งเป็นการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังร่วมกับหม้อแปลงความถี่สูง โดยหลักการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะรับไฟฟ้ากระแสตรงจากโซลาฟาร์มแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง และผ่านหม้อแปลงหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อปรับระดับแรงดัน จากนั้นจึงทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบ โดยจากการศึกษาปริญญาโทนิพนธ์นี้จะศึกษาในส่วนอินเวอร์เตอร์ที่ต่อเข้ากับระบบ ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้นี้เลือกใช้ วงจร Modular Multilevel Inverter ซึ่งได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่เลือกมาใช้คือโปรแกรม PowerSIM เพื่อทำการจำลองผลการทำงานในรูปแบบต่างๆ จากนั้นจึงทำการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ

จากการทำการทดลองพบว่า เครื่องต้นแบบ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ ที่ได้จัดสร้างขึ้นสร้างสัญญาณรูปคลื่นแรงดันมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ มีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันต่ำ และเมื่อนำไปจ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นภาระไฟฟ้าประเภทหลอดไฟพบว่า รูปคลื่นสัญญาณแรงดันยังคงมีลักษณะเช่นเดิม แต่ขนาดของแรงดันลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตอนที่ยังไม่ได้จ่ายภาระทางไฟฟ้า และทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าตัวต้านทานร่วมกับมอเตอร์ รูปคลื่นสัญญาณขาออกยังคงเป็นรูปสัญญาณใกล้เคียงไซน์ โดยหลักการควบคุมอินเวอร์เตอร์ใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุม โดยวิธีการที่ใช้การสร้างสัญญาณนี้ใช้วิธี Phase Disposition PWM ในการสร้างสัญญาณ ซึ่งหากทำการปรับอัตราการมอดูเลชัน จะสามารถควบคุมแรงดันขาออกได้ โดยจากการสร้างเครื่องต้นแบบเมื่อทำการใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จะสามารถวัดเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน (THD<sub>v</sub>) และกระแส (THD<sub>i</sub>) ได้และประสิทธิภาพการทำงานของ Modular Multilevel Inverter 3 ระดับ อยู่ที่ประมาณ 70%

จากการศึกษาและทดลองพบว่า Modular Multilevel Inverter สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้

## 6.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ

จากการดำเนินการทดลองตลอดโครงการวิจัยนี้พบว่า มีข้อควรเสนอแนะและข้อควรระวัง ดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์สวิตช์กำลัง (MOSFET) มีการทำงานที่ความถี่สูงจึงทำให้ตัวอุปกรณ์มีอุณหภูมิที่สูง แต่เนื่องจากการออกแบบ Heat-sink ที่มีขนาดไม่เพียงพอต่อการใช้งานร่วมกับ MOSFET ที่ความถี่สูง จึงทำให้อุปกรณ์อุณหภูมิสูงมาก ๆ เสี่ยงต่อการเสียหายได้
2. ในส่วนของแรงดันขาออกที่ลดลง หลักจากทำการตรวจสอบดูแล้วพบแรงดันที่ลดลงหายไปตกคร่อมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
3. การทำงานของ MOSFET ในอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนอย่างเหมาะสม เพื่อรักษาอายุการใช้งานของอินเวอร์เตอร์ให้ยาวนานยิ่งขึ้น

## 6.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานให้มีประสิทธิภาพ และความหลากหลายในการใช้งานมากขึ้น ดังต่อไปนี้

1. การปรับค่ามอดูเลตเพื่อชดเชยแรงดันขาออก โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับในโครงการวิจัยนี้ เป็นการควบคุมแบบเปิด (open loop) ยังไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้แบบอัตโนมัติด้วยตัวของอินเวอร์เตอร์เอง แต่เป็นการปรับค่ามอดูเลตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยการใช้หมุนตัวต้านปรับค่าได้เพื่อปรับอัตรามอดูเลชันเพิ่มขึ้น หรือปรับค่าลดลง ดังนั้นหากต้องการให้มีการปรับเปลี่ยนได้แบบอัตโนมัติจะต้องมีการพัฒนาในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเพิ่มเติม
2. ในส่วนนี้เป็นการศึกษาอินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับระบบใน หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งยังมีส่วนที่เป็นหม้อแปลงความถี่สูงและอินเวอร์เตอร์ส่วนที่รับไฟจากโซล่าฟาร์มซึ่งจะทำการศึกษาและทำต่อไปในส่วนดังกล่าวเพื่อให้สร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สมบูรณ์

## เอกสารอ้างอิง

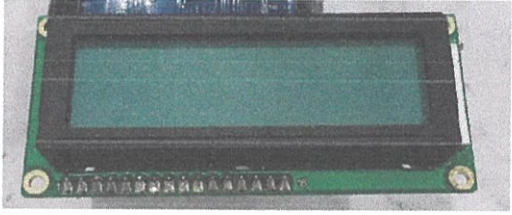
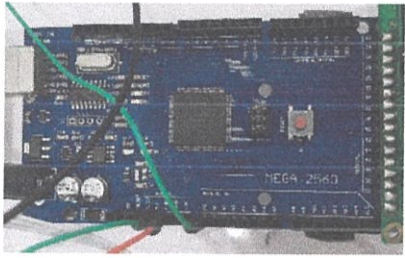

- [1] Surin Khomfoi; Nattapat Praisuwan; “Suitable Transformers for a Solar farm” Electrical Engineering Department King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang
- [2] J.W. Kolar; G.I. Ortiz, “Solid State Transformer Concepts in Traction and Smart Grid Applications” Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Power Electronic Systems Laboratory 4
- [3] ANDREAS NORDVALL; “Multilevel Inverter Topology Survey” , Department of Energy and Environment Division of Electric Power Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden, 2011
- [4] Makoto Hagiwara, Member, IEEE, and Hirofumi Akagi, Fellow, IEEE; “Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 7, JULY 2009
- [5] Wei LI; Luc-Andre GREGOIRE; Jean BÉLANGER, “Control and Performance of a Modular Multilevel Converter System” OPAL-RT Technologies (CAN)
- [6] “SVM Space Vector Modulation Improved output performance through advanced inverter control” GE Industrial Systems Via Cantonale, 50, 6595 Riazzino, Switzerland
- [7] “Solid-State-Transformers: Key Components of Future Traction and Smart Grid Systems” Power Electronic Systems Laboratory, ETH Zurich, Switzerland
- [8] Dominic Paradis, “Real-time simulation of Modular Multilevel Converters”
- [9] Min Huang; Frede Blaabjerg; Yongheng Yang; Weimin Wu, “Step by Step Design of a High Order Power Filter for Three-Phase Three-Wire Grid-connected Inverter in Renewable Energy System” Department of Energy Technology Aalborg University Aalborg, Denmark; Electrical Engineering Shanghai Maritime University Shanghai, China
- [10] Prof. S. V. Kulkarni, “ISGD Plenary V- Solid State Transformers by SV Kulkarni” Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology Bombay, INDIA

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างขึ้นจริงในปริญญานิพนธ์

## เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างจริงในปริญญานิพนธ์

รูปเครื่องต้นแบบ	รายละเอียด
	<p>LCD Module</p>
	<p>Arduino ATmega2560</p>
	<p>Analog Amp meter</p>

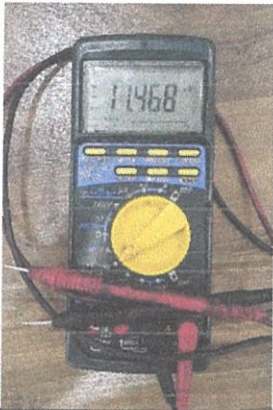
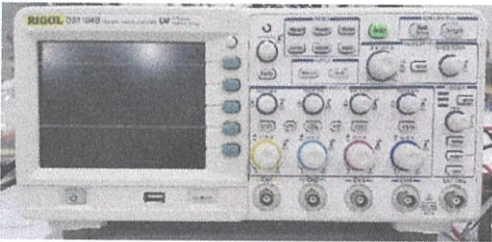
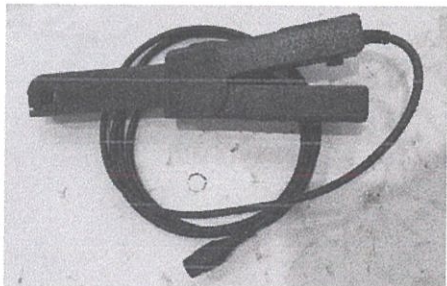
## เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างจริงในปริญญาโท (ต่อ)

รูปเครื่องต้นแบบ	รายละเอียด
 <p>A photograph of an analog volt meter. The meter has a black casing and a white face with a scale from 0 to 500. The needle is pointing to approximately 100. The brand name 'J&amp;L' and model 'MU-45' are visible on the left, and 'D.I. CLASS-2.5' is on the right. The unit 'V' is printed in the center of the scale.</p>	<p>Analog Volt Meter</p>
 <p>A photograph of a green printed circuit board (PCB) populated with various electronic components. A prominent feature is a large integrated circuit (IC) chip, which is the TMS320F28335. The board is connected to a breadboard and other components via jumper wires and ribbon cables.</p>	<p>TMS320F28335</p>
 <p>A photograph of a metal transformer. It has a rectangular metal housing with a yellow label on top. The transformer is connected to a power source and a load via thick black and blue wires. The label on the transformer indicates its specifications as 220/24 V.</p>	<p>Transformer 220/24 V</p>


## ภาคผนวก ข.

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริิถนุญานินพนธ์


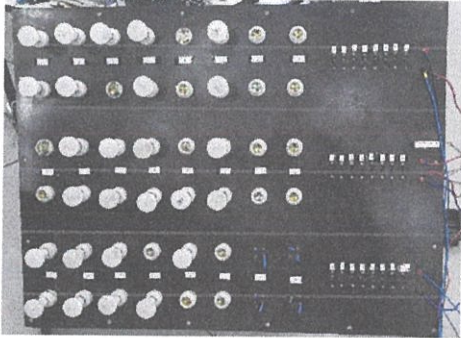

## เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ในปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>มัลติมิเตอร์ (Multi Meter)</p>
	<p>ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope DS1104B)</p>
	<p>Current Probe</p>


## เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์ (ต่อ)

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter)</p>
	<p>หม้อแปลงแรงดัน 1 เฟส ชนิดปรับค่าได้ (Variac 1 phase)</p>
	<p>Differential Probe</p>

## เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์ (ต่อ)

รูปเครื่องต้นแบบ	รายละเอียด
	<p>เครื่องวัดอุณหภูมิ</p>
	<p>ชุดโหลด R (Load R)</p>
	<p>ชุดโหลด L (มอเตอร์ 250 W)</p>

## เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ในปริญญาโท (ต่อ)

รูปเครื่องต้นแบบ	รายละเอียด
	Power Quality Meter Chauvin C.A. 8334

## ภาคผนวก ค.

โปรแกรมที่ใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์

```

/*****
*****
// This code is created by SimCoder Version 9.1 for TI F28335 Hardware Target
//
// SimCoder is copyright by Powersim Inc., 2009-2011
//
// For 3 level Modular Multilevel Inverter; Solid State Transformer 2014
*****/
*****/
#include    <math.h>
#include    "PS_bios.h"
typedef float DefaultType;
#define     GetCurTime() PS_GetSysTimer()

interrupt void Task();
void Task_1();

DefaultType fGblV20 = 0.0;
DefaultType fGblVsina = 0.0;
DefaultType fGblVsinb = 0.0;
DefaultType fGblVsinc = 0.0;
typedef struct {
    unsigned long tmLow;
    unsigned long tmHigh;
}    _CBigTime;

_CBigTime GetBigTime(void)
{
    static _CBigTime tm = {0,0};
    unsigned long curTime = GetCurTime();
    if (curTime < tm.tmLow)
        tm.tmHigh++;
    tm.tmLow = curTime;
    return tm;
}

interrupt void Task()

```

```

{
    DefaultType ftheta, fSIN1, fTI_ADC1, fLIM2, fMULT3, fVCC2, fSUM2, fSIN2,
fMULT2, fVCC3;
    DefaultType fSUM3, fSIN3, fMULT1;
    PS_EnableIntr();

    fTI_ADC1 = PS_GetDcAdc(0);
    {
        static unsigned long period = (unsigned long)(150000000L / 50);
        static float fPeriod = ((float)50) / 150000000L;
        static _CBigTime tmCarrierStart = {0, 0};
        _CBigTime tm = GetBigTime();
        unsigned long tmp1, tmp2;
        tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
        tmp2 = tm.tmHigh - tmCarrierStart.tmHigh;
        if (tm.tmLow > tmCarrierStart.tmLow)
            tmp2++;
        if (tmp2 || (!tmp2 && (tmp1 >= period))) {
            tmp1 = tmCarrierStart.tmLow + period;
            if ((tmp1 < tmCarrierStart.tmLow) || (tmp1 < period))
                tmCarrierStart.tmHigh++;
            tmCarrierStart.tmLow = tmp1;
        }
        tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
        ftheta = 360 * tmp1 * fPeriod;
    }
    fSIN1 = sin(ftheta * (3.14159265 / 180.));
    fLIM2 = (fTI_ADC1 > 1.2) ? 1.2 : ((fTI_ADC1 < 0.1) ? 0.1 : fTI_ADC1);
    fMULT3 = fSIN1 * fLIM2;
    PS_SetPwm2Rate(fMULT3);
    PS_SetPwm1Rate(fMULT3);
    fVCC2 = -120;
    fSUM2 = ftheta - fVCC2;
    fSIN2 = sin(fSUM2 * (3.14159265 / 180.));
    fMULT2 = fSIN2 * fLIM2;
    PS_SetPwm4Rate(fMULT2);
    PS_SetPwm3Rate(fMULT2);
    fVCC3 = 120;
}

```

```

    fSUM3 = ftheta - fVCC3;
    fSIN3 = sin(fSUM3 * (3.14159265 / 180.));
    fMULT1 = fSIN3 * fLIM2;
    PS_SetPwm6Rate(fMULT1);
    PS_SetPwm5Rate(fMULT1);
#ifdef _DEBUG
    fGblV20 = fLIM2;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVsina = fMULT3;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVsinb = fMULT2;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVsinc = fMULT1;
#endif
    PS_ExitPwm2General();
}

void Task_10
{
    DefaultType fC14;

    fC14 = 1;
    (fC14 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitB((Uint32)1 << (34 - 32)) :
PS_SetDigitOutBitB((Uint32)1 << (34 - 32));
}

void Initialize(void)
{
    PS_SysInit(30, 10);
    PS_StartStopPwmClock(0);
    PS_InitTimer(0, 0xffffffff);
    PS_InitPwm(2, 1, 10000*1, (5e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 35549); // pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
    PS_SetPwmPeakOffset(2, 1, (-1), 1.0/1);
}

```

```

PS_SetPwmIntrType(2, ePwmNoAdc, 1, 0);
PS_SetPwmVector(2, ePwmNoAdc, Task);
PS_SetPwm2Rate(0);
PS_StartPwm(2);

```

```

PS_InitPwm(1, 1, 10000*1, (5e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 35549);// pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
PS_SetPwmPeakOffset(1, 1, 0, 1.0/1);
PS_SetPwmIntrType(1, ePwmNoAdc, 1, 0);
PS_SetPwm1Rate(0);
PS_StartPwm(1);

```

```

PS_InitPwm(4, 1, 10000*1, (5e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 35549);// pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
PS_SetPwmPeakOffset(4, 1, (-1), 1.0/1);
PS_SetPwmIntrType(4, ePwmNoAdc, 1, 0);
PS_SetPwm4Rate(0);
PS_StartPwm(4);

```

```

PS_InitPwm(3, 1, 10000*1, (5e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 35549);// pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
PS_SetPwmPeakOffset(3, 1, 0, 1.0/1);
PS_SetPwmIntrType(3, ePwmNoAdc, 1, 0);
PS_SetPwm3Rate(0);
PS_StartPwm(3);

```

```

PS_InitPwm(6, 1, 10000*1, (5e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 35549);// pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
PS_SetPwmPeakOffset(6, 1, (-1), 1.0/1);
PS_SetPwmIntrType(6, ePwmNoAdc, 1, 0);
PS_SetPwm6Rate(0);
PS_StartPwm(6);

```

```

PS_InitPwm(5, 1, 10000*1, (5e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 35549);// pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
PS_SetPwmPeakOffset(5, 1, 0, 1.0/1);
PS_SetPwmIntrType(5, ePwmNoAdc, 1, 0);
PS_SetPwm5Rate(0);

```

```
PS_StartPwm(5);

PS_ResetAdcConvSeq();
PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 0, 1);
PS_Adclnit(0, !0);

PS_InitDigitOut(34);

PS_StartStopPwmClock(1);
}

void main()
{
    Initialize();
    PS_EnableIntr(); // Enable Global interrupt INTM
    PS_EnableDbgm();
    for (;;) {
        Task_10();
    }
}
```

## ภาคผนวก ง.

ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในปริิณยานิพนธ์

# 2SK1082-01 SIPMOS® FUJI POWER MOS-FET

N-CHANNEL SILICON POWER MOS-FET

FAP-II SERIES

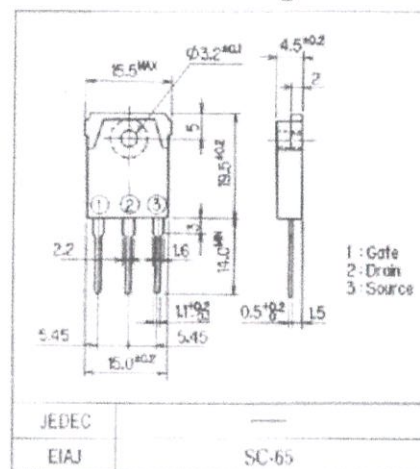
## ■ Features

- High speed switching
- Low on-resistance
- No secondary breakdown
- Low driving power
- High voltage
- $V_{GS} = \pm 30V$  Guarantee
- Avalanche-proof

## ■ Applications

- Switching regulators
- UPS
- DC-DC converters
- General purpose power amplifier

## ■ Outline Drawings

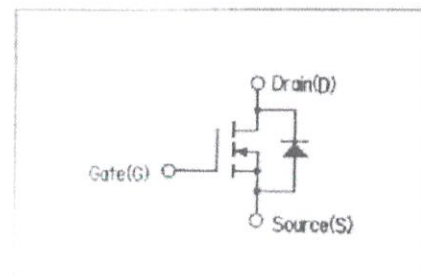


## ■ Max. Ratings and Characteristics

### ● Absolute Maximum Ratings ( $T_c = 25^\circ C$ )

Items	Symbols	Ratings	Units
Drain-source voltage	$V_{DS}$	900	V
Continuous drain current	$I_D$	6	A
Pulsed drain current	$I_{D(pulse)}$	18	A
Continuous reverse drain current	$I_{DR}$	6	A
Gate-source peak voltage	$V_{GS}$	$\pm 30$	V
Max. power dissipation	$P_D$	125	W
Operating and storage temperature range	$T_{cst}$	150	$^\circ C$
	$T_{stg}$	55 - +150	$^\circ C$

## ■ Equivalent Circuit Schematic



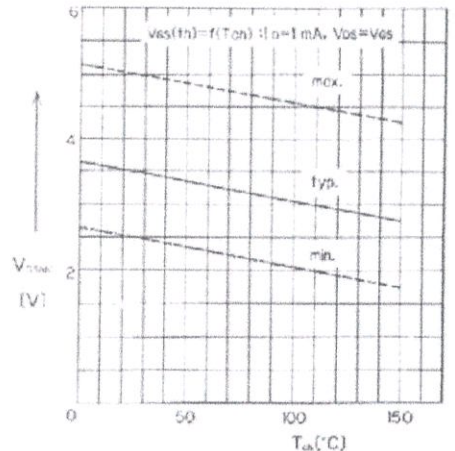
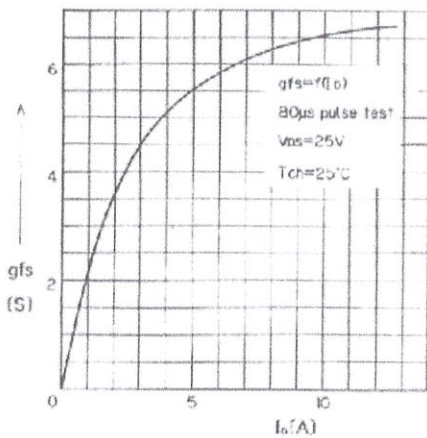
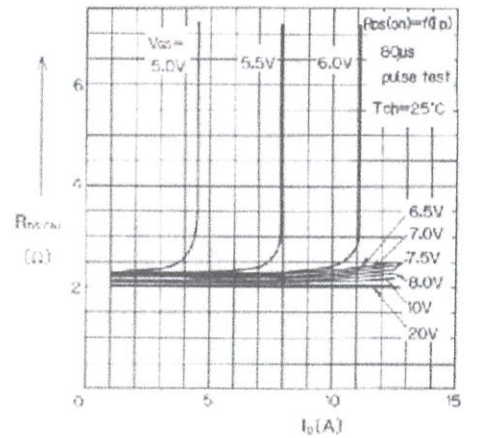
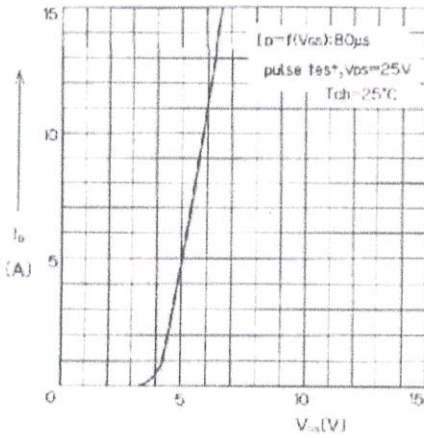
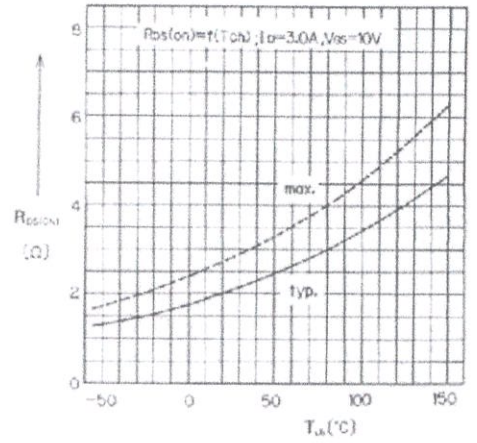
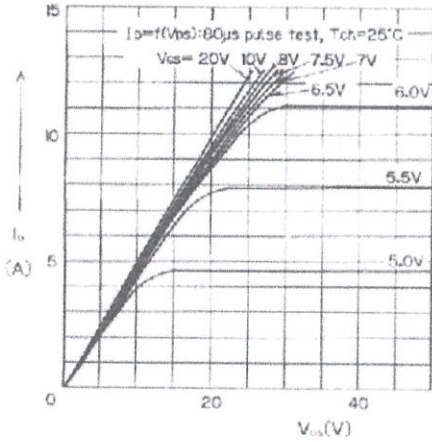
### ● Electrical Characteristics ( $T_c = 25^\circ C$ )

Items	Symbols	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DSS}$	$I_D = 1mA$ $V_{GS} = 0V$	900			V
Gate threshold voltage	$V_{GS(th)}$	$I_D = 1mA$ $V_{DS} = V_{GS}$	2.5	3.5	5.0	V
Zero gate voltage drain current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = 900V$ $V_{GS} = 0V$		10	500	$\mu A$
		$T_{cst} = 25^\circ C$		0.2	1.0	mA
Gate-source leakage current	$I_{GSS}$	$V_{GS} = \pm 30V$ $V_{DS} = 0V$		10	100	nA
Drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	$I_D = 3A$ $V_{GS} = 10V$		2.1	2.8	$\Omega$
Forward transconductance	$g_{fs}$	$I_D = 3A$ $V_{DS} = 25V$	2.0	4.5		S
Input capacitance	$C_{iss}$	$V_{DS} = 25V$		1200	1800	pF
Output capacitance	$C_{oss}$	$V_{GS} = 0V$		140	210	pF
Reverse transfer capacitance	$C_{rss}$	$f = 1MHz$		50	75	pF
Turn-on time $t_{on}$ ( $t_{on} = t_{d(on)} + t_r$ )	$t_{d(on)}$	$V_{CC} = 600V$ $I_D = 6A$		35	55	ns
	$t_r$	$V_{GS} = 10V$		110	170	ns
Turn-off time $t_{off}$ ( $t_{off} = t_f + t_r$ )	$t_{d(off)}$	$R_{\theta} = 25\Omega$		150	230	ns
	$t_f$			100	150	ns
Diode forward on voltage	$V_{SD}$	$I_f = 2 \times I_{DR}$ $V_{GS} = 0V$ $T_{cst} = 25^\circ C$		1.0	1.5	V
Reverse recovery time	$t_{rr}$	$I_f = I_{DR}$ $dI/dt = 100A/\mu s$ $T_{cst} = 25^\circ C$		800		ns

### ● Thermal Characteristics

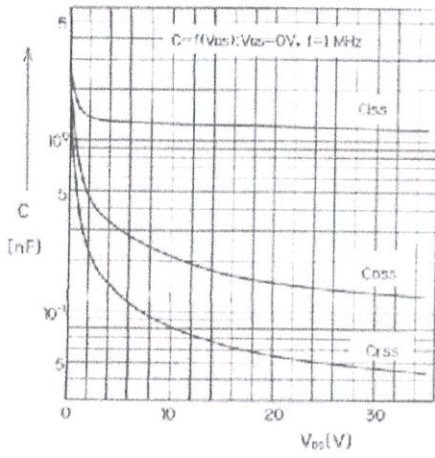
Items	Symbols	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Thermal Resistance	$R_{\theta(ch-a)}$	channel to air			35.0	$^\circ C/W$
	$R_{\theta(ch-c)}$	channel to case			1.0	$^\circ C/W$

■ Characteristics

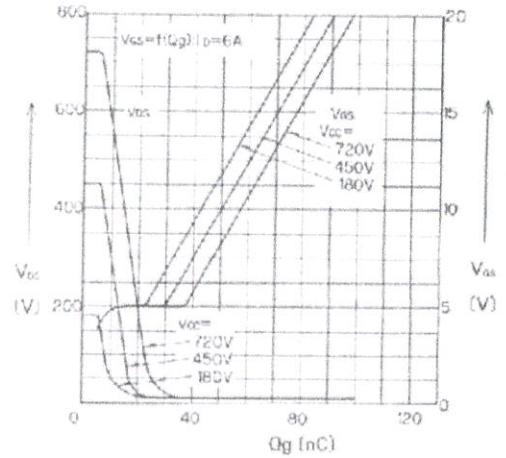


2SK 1082-01

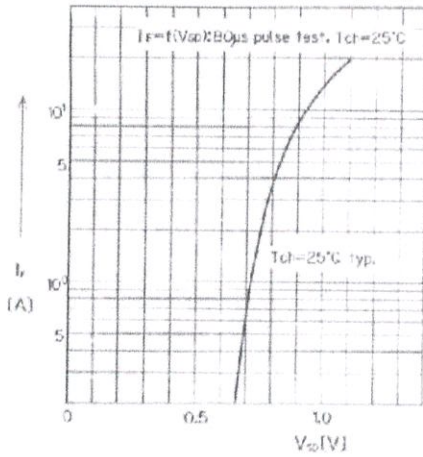
SIPMOS<sup>®</sup> FUJI POWER MOS-FET



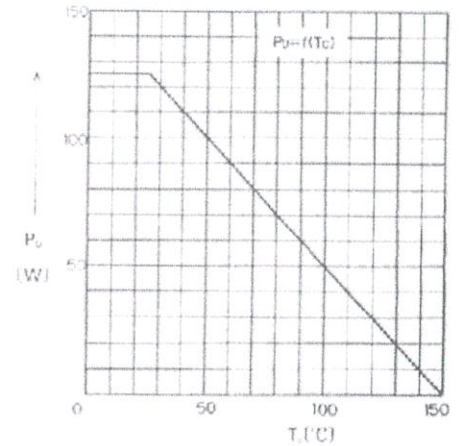
Typical Capacitance vs.  $V_{GS}$



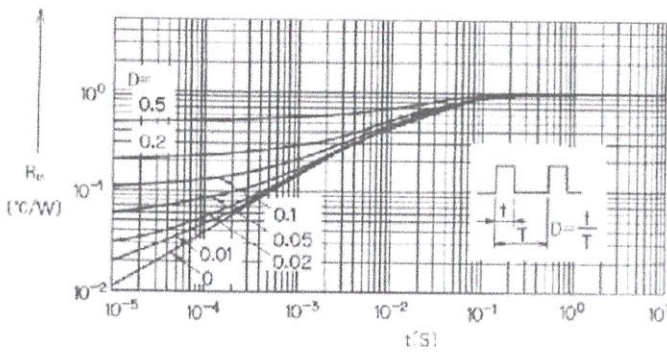
Typical Input Charge



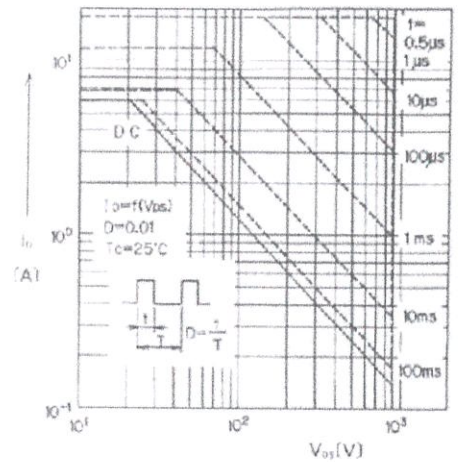
Forward Characteristics of Reverse Diode



Allowable Power Dissipation vs.  $T_c$



Transient Thermal Impedance



Safe Operating Area



DBL104G ..... DBL107G

### Single Phase 1.0 Amp. Glass Passivated Bridge Rectifiers

Dimensions in mm.	CASE: THIN DF-M	Voltage 400 V-1000V	Current 1.0 A
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glass passivated junction</li> <li>• Ideal for printed circuit board</li> <li>• Reliable low cost construction utilizing molded plastic technique</li> <li>• High temperature soldering guaranteed: 260 °C / 10 seconds / 9.5mm lead length at 5 lbs., (2.3 Kg) tension</li> <li>• Small size, simple installation Pure tin plated terminal, Lead free. Leads solderable per MIL-STD-202, Method 208</li> <li>• High surge current capability</li> </ul>

### Maximum Ratings and Electrical Characteristics

		DBL 104G	DBL 105G	DBL 106G	DBL 107G
$V_{RRM}$	Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage (V)	400	600	800	1000
$V_{RMS}$	Maximum RMS Voltage (V)	280	420	560	700
$V_{DC}$	Maximum DC Blocking Voltage (V)	400	600	800	1000
$I_{F(AV)}$	Maximum average Forward Rectified Current @ $T_A = 40\text{ °C}$	1.0 A			
$I_{FSM}$	Peak Forward Surge Current, 8.3 ms Single Half Sine-wave Superimposed on Rated Load (JEDEC method)	50 A			
$C_j$	Typical Junction Capacitance	25 pF			
$R_{th(j-l)}$	Typical Thermal Resistance (Note 1)	15 °C/W			
$R_{th(j-a)}$		40 °C/W			
$T_j$	Operating Temperature Range	-50 to + 150 °C			
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	-50 to + 150 °C			

### Electrical Characteristics at $T_{amb} = 25\text{ °C}$

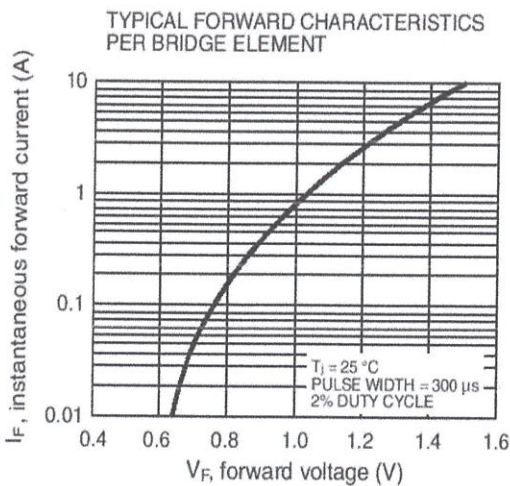
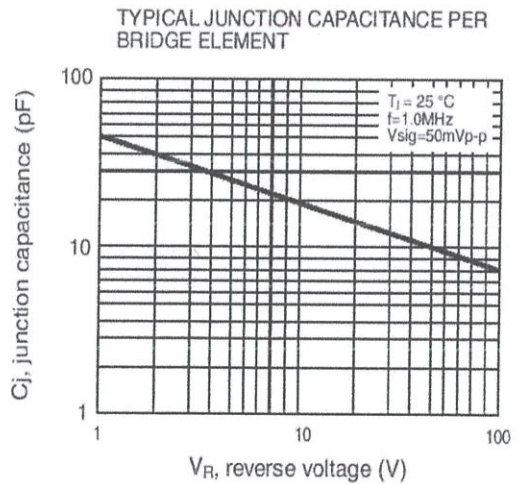
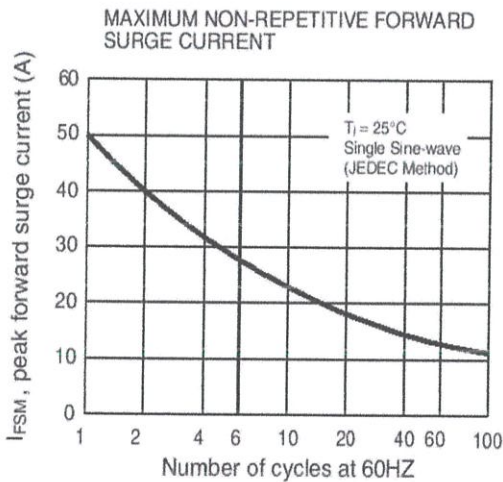
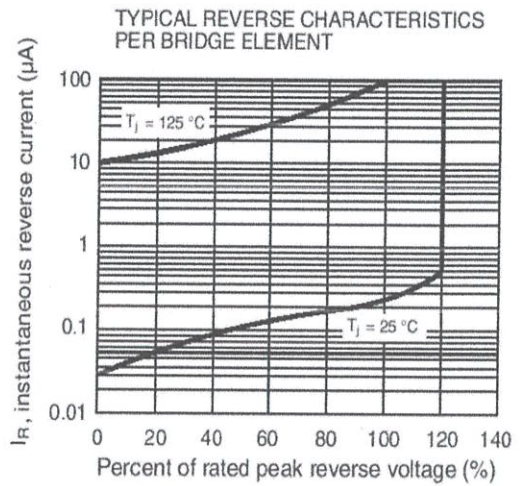
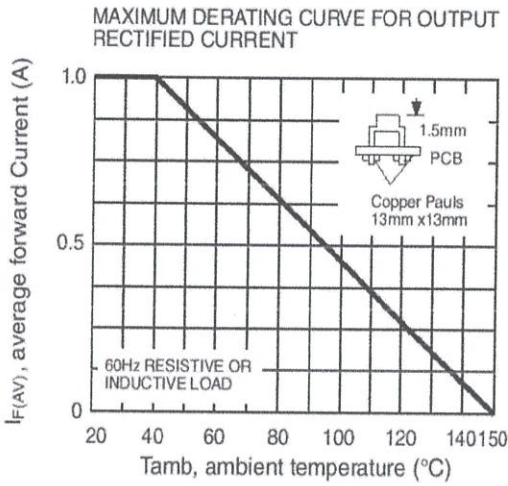
		DBL 104G	DBL 105G	DBL 106G	DBL 107G
$V_F$	Max. Instantaneous Forward Voltage @ 1.0A	1.1 V			
$I_R$	Maximum DC Reverse Current @ $T_A = 25\text{ °C}$ at Rated DC Blocking Voltage @ $T_A = 125\text{ °C}$	10 $\mu$ A 500 $\mu$ A			

Note: 1. Thermal Resistance from Junction to Ambient and from Junction to Lead Mounted  
On P.C.B. with 5 x 5mm Copper Pads.  
2. DBLS for Surface Mount Package.



DBL104G ..... DBL107G

**Rating And Characteristic Curves**



Distributed by:

**JAMECO**<sup>®</sup>  
ELECTRONICS

[www.Jameco.com](http://www.Jameco.com) ♦ 1-800-831-4242

The content and copyrights of the attached  
material are the property of its owner.

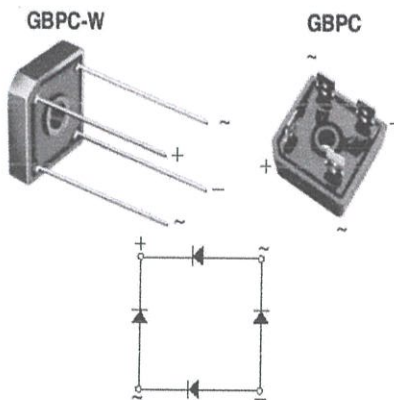
Jameco Part Number 1544763



# GBPC12, GBPC15, GBPC25 & GBPC35

Vishay General Semiconductor

## Glass Passivated Single-Phase Bridge Rectifier



### FEATURES

- UL recognition file number E54214
- Universal 3-way terminals: snap-on, wire wrap-around, or P.C.B. mounting
- Typical  $I_R$  less than 0.3  $\mu\text{A}$
- High surge current capability
- Low thermal resistance
- Solder dip 260 °C, 40 s
- Component in accordance to RoHS 2002/95/EC and WEEE 2002/96/EC



RoHS  
COMPLIANT

### TYPICAL APPLICATIONS

General purpose use in ac-to-dc bridge full wave rectification for power supply, home appliances, office equipment, industrial automation applications.

### PRIMARY CHARACTERISTICS

$I_{F(AV)}$	12 A, 15 A, 25 A, 35 A
$V_{RRM}$	50 V to 1000 V
$I_{FSM}$	200 A, 300 A, 300 A, 400 A
$I_R$	5 $\mu\text{A}$
$V_F$	1.1 V
$T_J$ max.	150 °C

### MECHANICAL DATA

**Case:** GBPC, GBPC-W

Epoxy meets UL 94V-0 flammability rating

**Terminals:** Nickel plated on faston lugs or silver plated on wire leads, solderable per J-STD-002 and JESD22-B102. E4 suffix for consumer grade. Suffix letter "W" added to indicate wire leads (e.g. GBPC12005W).

**Polarity:** As marked, positive lead by beveled corner

**Mounting Torque:** 20 inches-lbs. max.

### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25$ °C unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	GBPC12, 15, 25, 35							UNIT
		005	01	02	04	06	08	10	
Maximum repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS voltage	$V_{RMS}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC blocking voltage	$V_{DC}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum average forward rectified output current (Fig. 1)	$I_{F(AV)}$	GBPC12: 12 GBPC15: 15 GBPC25: 25 GBPC35: 35							A
Peak forward surge current single sine-wave superimposed on rated load	$I_{FSM}$	GBPC12: 200 GBPC15: 300 GBPC25: 300 GBPC35: 400							A
Rating (non-repetitive, for $t$ greater than 1 ms and less than 8.3 ms) for fusing	$I^2t$	GBPC12: 160 GBPC15: 375 GBPC25: 375 GBPC35: 660							A <sup>2</sup> s
RMS isolation voltage from case to leads	$V_{ISO}$	2500							V
Operating junction storage temperature range	$T_J, T_{STG}$	- 55 to + 150							°C

# GBPC12, GBPC15, GBPC25 & GBPC35

Vishay General Semiconductor



ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)										
PARAMETER	TEST CONDITIONS	SYMBOL	GBPC12, 15, 25, 35						UNIT	
			005	01	02	04	06	08		10
Maximum instantaneous forward drop per diode	GBPC12 GBPC15 GBPC25 GBPC35	$I_F = 6.0\text{ A}$ $I_F = 7.5\text{ A}$ $I_F = 12.5\text{ A}$ $I_F = 17.5\text{ A}$	$V_F$	1.1						V
Maximum reverse DC current at rated DC blocking voltage per diode		$T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ $T_A = 125\text{ }^\circ\text{C}$	$I_R$	5.0 500						$\mu\text{A}$
Typical junction capacitance per diode		4 V, 1 MHz	$C_J$	300						pF

THERMAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)									
PARAMETER	SYMBOL	GBPC12, 15, 25, 35						UNIT	
		005	01	02	04	06	08		10
Typical thermal resistance <sup>(1)</sup>	GBPC12-25 GBPC35	$R_{\theta JC}$	1.9 1.4						$^\circ\text{C/W}$

**Notes:**

- (1) With heatsink
- (2) Bolt down on heatsink with silicone thermal compound between bridge and mounting surface for maximum heat transfer with #10 screw

ORDERING INFORMATION (Example)				
PREFERRED P/N	UNIT WEIGHT (g)	PREFERRED PACKAGE CODE	BASE QUANTITY	DELIVERY MODE
GBPC1206-E4/51	15.79	51	100	Paper box
GBPC1506-E4/51	15.79	51	100	Paper box
GBPC2506-E4/51	15.79	51	100	Paper box
GBPC3506-E4/51	15.79	51	100	Paper box
GBPC1206W-E4/51	13.8	51	100	Paper box
GBPC1506W-E4/51	13.8	51	100	Paper box
GBPC2506W-E4/51	13.8	51	100	Paper box
GBPC3506W-E4/51	13.8	51	100	Paper box



# GBPC12, GBPC15, GBPC25 & GBPC35

Vishay General Semiconductor

## RATINGS AND CHARACTERISTICS CURVES

( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

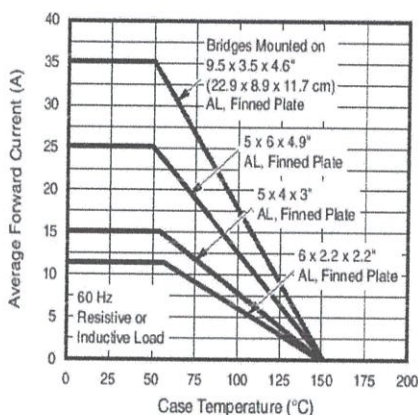


Figure 1. Maximum Output Rectified Current

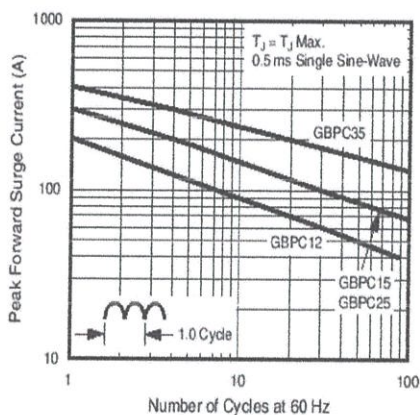


Figure 4. Maximum Non-Repetitive Peak Forward Surge Current Per Diode

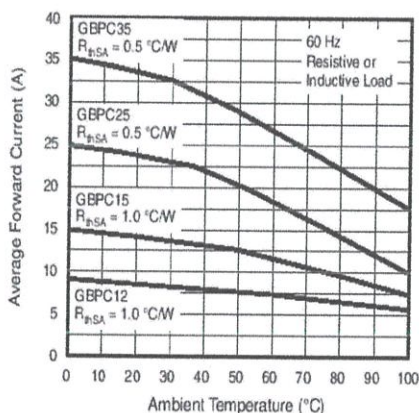


Figure 2. Maximum Output Rectified Current

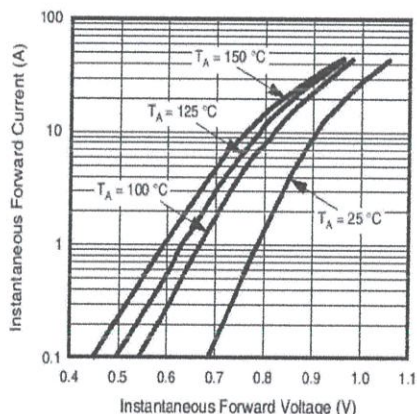


Figure 5. Typical Instantaneous Forward Characteristics Per Diode

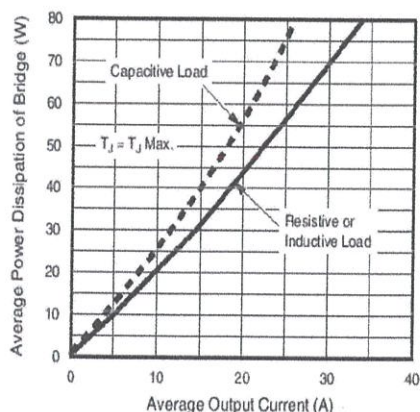


Figure 3. Maximum Power Dissipation

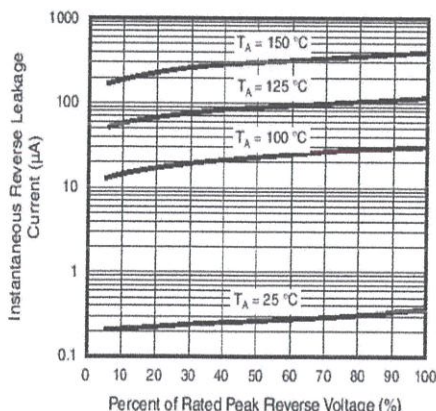


Figure 6. Typical Reverse Leakage Characteristics Per Diode

# GBPC12, GBPC15, GBPC25 & GBPC35

Vishay General Semiconductor

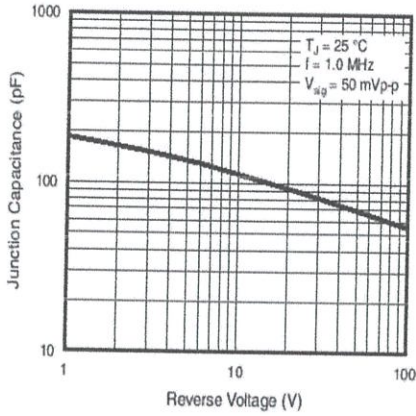


Figure 7. Typical Junction Capacitance Per Diode

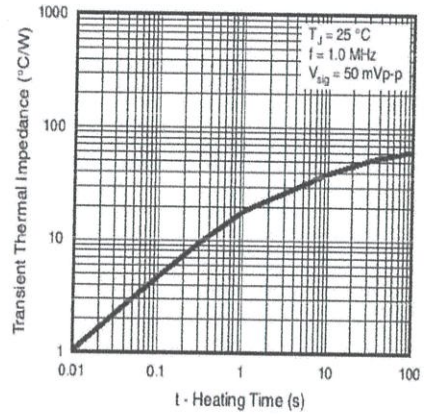
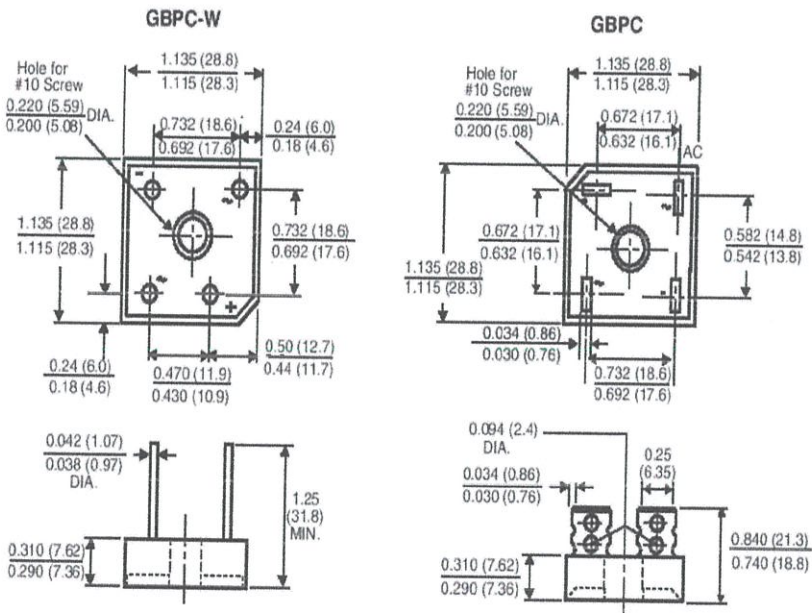


Figure 8. Typical Transient Thermal Impedance Per Diode

## PACKAGE OUTLINE DIMENSIONS in inches (millimeters)





## Legal Disclaimer Notice

---

Vishay

### Notice

Specifications of the products displayed herein are subject to change without notice. Vishay Intertechnology, Inc., or anyone on its behalf, assumes no responsibility or liability for any errors or inaccuracies.

Information contained herein is intended to provide a product description only. No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document. Except as provided in Vishay's terms and conditions of sale for such products, Vishay assumes no liability whatsoever, and disclaims any express or implied warranty, relating to sale and/or use of Vishay products including liability or warranties relating to fitness for a particular purpose, merchantability, or infringement of any patent, copyright, or other intellectual property right.

The products shown herein are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications. Customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Vishay for any damages resulting from such improper use or sale.

**TOSHIBA****TLP250**

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired &amp; Photo-IC

# TLP250

Transistor Inverter  
 Inverter For Air Conditionor  
 IGBT Gate Drive  
 Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.

This unit is 8-lead DIP package.

TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current:  $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current ( $I_{CC}$ ):  $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage ( $V_{CC}$ ):  $10\text{--}35\text{V}$
- Output current ( $I_O$ ):  $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time ( $t_{pLH}/t_{pHL}$ ):  $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage:  $2500V_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type

VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823

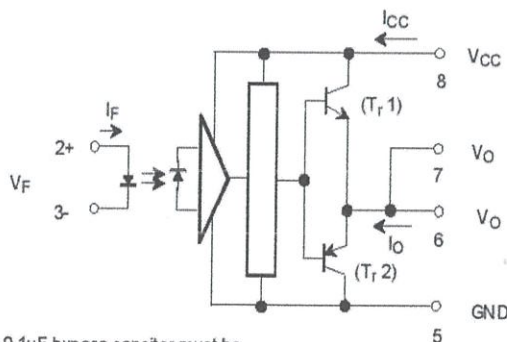
Maximum operating insulation voltage:  $630V_{\text{PK}}$

Highest permissible over voltage:  $4000V_{\text{PK}}$

**(Note) When a VDE0884 approved type is needed,  
 please designate the "option (D4)"**

- Creepage distance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$
- Clearance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$

## Schematic

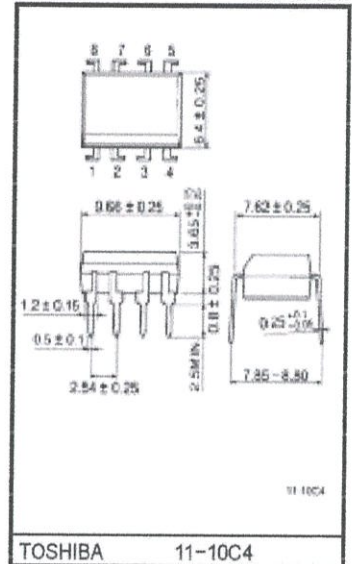


A  $0.1\mu\text{F}$  bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

## Truth Table

	Tr1	Tr2
Input LED On	On	Off
Input LED Off	Off	On

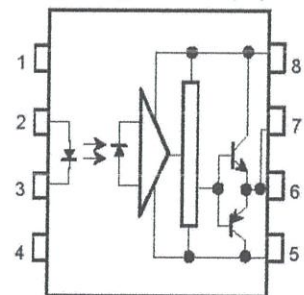
Unit in mm



TOSHIBA 11-10C4

Weight: 0.54 g

## Pin Configuration (top view)



- 1: N.C.
- 2: Anode
- 3: Cathode
- 4: N.C.
- 5: GND
- 6:  $V_O$  (Output)
- 7:  $V_O$
- 8:  $V_{CC}$

## Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	$I_F$	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	$I_{FPT}$	1	A	
	Reverse voltage	$V_R$	5	V	
	Junction temperature	$T_J$	125	°C	
Detector	*H*peak output current (P <sub>W</sub> ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	$I_{OPH}$	-1.5	A	
	*L*peak output current (P <sub>W</sub> ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	$I_{OPL}$	+1.5	A	
	Output voltage	$V_O$	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Supply voltage	$V_{CC}$	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
Junction temperature	$T_J$	125	°C		
Operating frequency (Note 3)	f	25	kHz		
Operating temperature range	$T_{opr}$	-20~85	°C		
Storage temperature range	$T_{stg}$	-55~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s) (Note 4)	$T_{sol}$	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 5)	$BV_S$	2500	Vrms		

Note 1: Pulse width  $P_W \leq 1\mu s$ , 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform,  $I_{OPH} \leq -1.0A$  ( $\leq 2.5\mu s$ ),  $I_{OPL} \leq +1.0A$  ( $\leq 2.5\mu s$ )

Note 4: It is 2 mm or more from a lead root.

Note 5: Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 6: A ceramic capacitor (0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

## Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input current, on (Note 7)	$I_{F(ON)}$	7	8	10	mA
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V
Supply voltage	$V_{CC}$	15	—	30   20	V
Peak output current	$I_{OPH}/I_{OPL}$	—	—	±0.5	A
Operating temperature	$T_{opr}$	-20	25	70   85	°C

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

## Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit	
Input forward voltage		V <sub>F</sub>	—	I <sub>F</sub> = 10 mA, Ta = 25°C		1.6	1.8	V	
Temperature coefficient of forward voltage		ΔV <sub>F</sub> / ΔTa	—	I <sub>F</sub> = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C	
Input reverse current		I <sub>R</sub>	—	V <sub>R</sub> = 5V, Ta = 25°C		—	10	μA	
Input capacitance		C <sub>T</sub>	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF	
Output current	"H" level	I <sub>OPH</sub>	3	V <sub>CC</sub> = 30V (*1)	I <sub>F</sub> = 10 mA V <sub>8-6</sub> = 4V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I <sub>OPL</sub>	2		I <sub>F</sub> = 0 V <sub>6-5</sub> = 2.5V	0.5	2	—	
Output voltage	"H" level	V <sub>OH</sub>	4	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, I <sub>F</sub> = 5mA	11	12.8	—	V	
	"L" level	V <sub>OL</sub>	5	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>F</sub> = 0.8V	—	-14.2	-12.5		
Supply current	"H" level	I <sub>CCH</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA	
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA	—	—	11		
	"L" level	I <sub>CCL</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—		
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA	—	—	11		
Threshold input current	"Output L→H"	I <sub>FLH</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> > 0V	—	1.2	5	mA	
Threshold input voltage	"Output H→L"	I <sub>FHL</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> < 0V	0.8	—	—	V	
Supply voltage		V <sub>CC</sub>	—		10	—	35	V	
Capacitance (input-output)		C <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF	
Resistance(input-output)		R <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1×10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup>	—	Ω	

\* All typical values are at Ta = 25°C (\*1): Duration of I<sub>O</sub> time ≤ 50μs

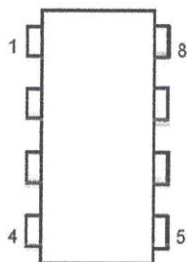
**TOSHIBA****TLP250****Switching Characteristics (Ta = -20~70°C , unless otherwise specified)**

Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	$t_{pLH}$	$I_F = 8\text{mA}$ (Note 7) $V_{CC1} = +15\text{V}$ , $V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$	—	0.15	0.5	$\mu\text{s}$
	H→L	$t_{pHL}$		—	0.15	0.5	
Output rise time	$t_r$	6		—	—	—	
Output fall time	$t_f$			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output	$C_{MH}$	7	$V_{CM} = 600\text{V}$ , $I_F = 8\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$	-5000	—	—	$\text{V} / \mu\text{s}$
Common mode transient immunity at low level output	$C_{ML}$	7	$V_{CM} = 600\text{V}$ , $I_F = 0\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$	5000	—	—	$\text{V} / \mu\text{s}$

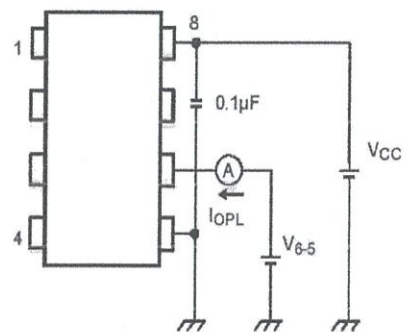
\* All typical values are at  $T_a = 25^\circ\text{C}$ Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5  $\mu\text{s}$ .

**TOSHIBA****TLP250**

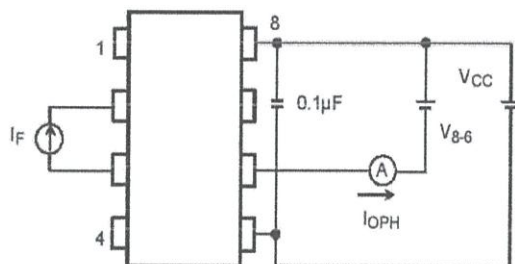
Test Circuit 1 :



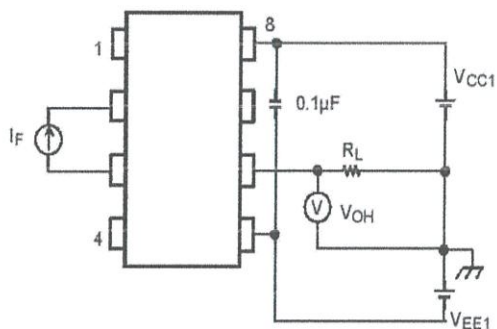
Test Circuit 2 : IOPL



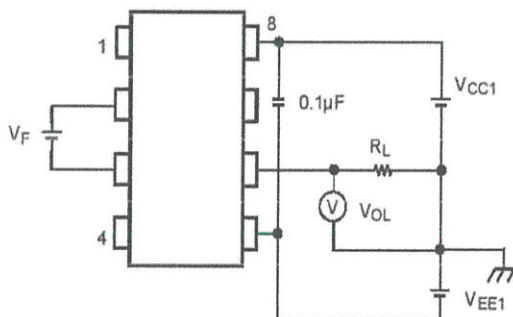
Test Circuit 3 : IOPH



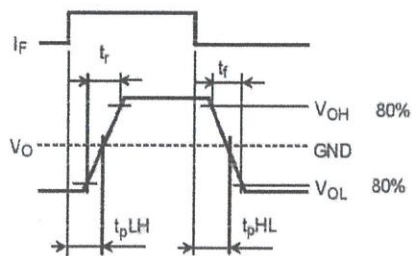
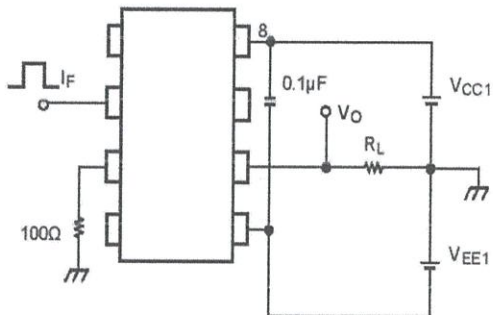
Test Circuit 4 : VOH



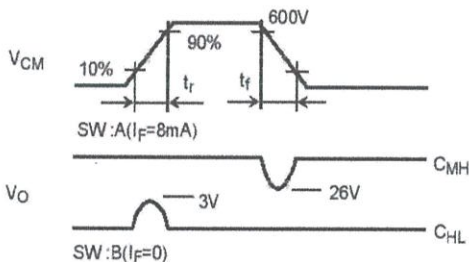
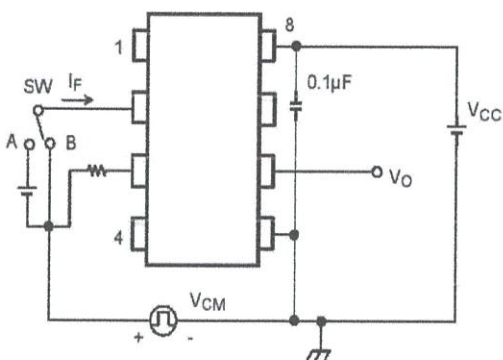
Test Circuit 5 : VOL



Test Circuit 6:  $t_{pLH}$ ,  $t_{pHL}$ ,  $t_r$ ,  $t_f$



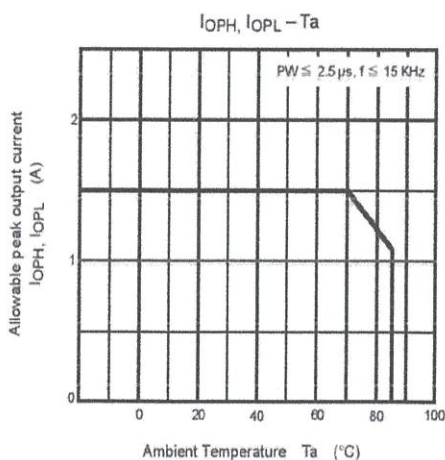
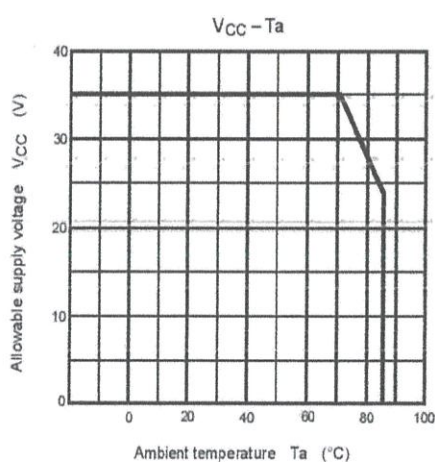
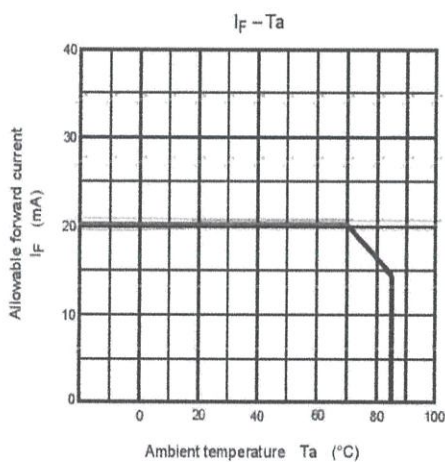
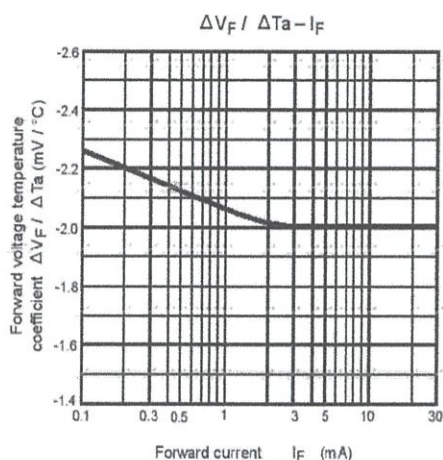
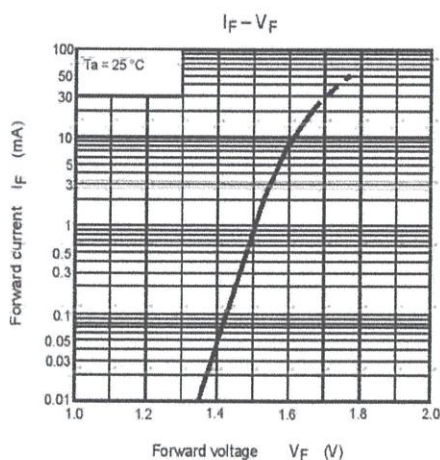
Test Circuit 7:  $C_{MH}$ ,  $C_{ML}$



$$C_{ML} = \frac{480 (V)}{t_r (\mu s)}$$

$$C_{MH} = \frac{480 (V)}{t_f (\mu s)}$$

$C_{ML}(C_{MH})$  is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.



**RESTRICTIONS ON PRODUCT USE**

- The information contained herein is subject to change without notice.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringements of patents or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of TOSHIBA or others.
- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.  
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- TOSHIBA products should not be embedded to the downstream products which are prohibited to be produced and sold, under any law and regulations.
- GaAs(Gallium Arsenide) is used in this product. The dust or vapor is harmful to the human body. Do not break, cut, crush or dissolve chemically.

# ภาคผนวก ง.

บทความทางวิชาการ

# หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

## Solid State Transformer

เจษฎา วัฒนคุ้ม ชนาธิป เลหาสม ชัยรัชช ขุนระงับสังข์ และชาญปกรณ์ ณ โธโรจน์  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ถนนลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร. 02-329-8331

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Solid State Transformer) ซึ่งเป็นการใช้งานร่วมกันระหว่างหม้อแปลงความถี่สูงและวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หม้อแปลงชนิดนี้สามารถลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากระบบโซลาร์ฟาร์มได้ โดยค่าความสูญเสียดังกล่าวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลากลางคืน อันเป็นช่วงที่โซลาร์ฟาร์มไม่มีการผลิตพลังงาน นอกจากนี้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้ยังมีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าหม้อแปลงความถี่ต่ำที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน คือการป้องกันการเกิดปัญหาแรงดันตกและแรงดันเกินได้ ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ส่วนที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษานี้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ มุ่งเน้นไปที่การศึกษาและพัฒนางจรอินเวอร์เตอร์ชนิด modular multilevel inverter แบบสามระดับ โดยจะใช้โปรแกรม PSIM 9.0 ในจำลองผลด้วยการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวิธี Phase disposition รวมไปถึงการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบที่พิกัดกำลัง 300 วัตต์เพื่อนำมาใช้ในการทดลองนี้ ในการศึกษาทดลอง จะมีการทดสอบที่หลายๆสภาวะ ไม่ว่าจะเป็น สภาวะเชิงเส้น (linear) ทั้งแบบที่พิกัด และครึ่งหนึ่งของพิกัด รวมไปถึงสภาวะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ซึ่งจะเป็นการนำโพลเป็นมอเตอร์ร่วมกับโหลดไฟทำการวัดค่าที่ได้จากการทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ค่าความผิดพลาดของแรงดันและกระแส เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าเป็นไปตามทฤษฎี และเมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพเมื่อทำงานอยู่ที่พิกัดอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ :** อินเวอร์เตอร์หลายระดับ, อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดมอดูลูลา

### Abstract

Solid state transformer (SST) is presented in this thesis. SST is the combination of high-frequency transformers and power electronics circuits. The total losses of the solar farm system can be reduce while solar-farms are not used in the night time by using SST. Under voltage and over voltage prevention are also the advantages of a SST compared to a low frequency transformer. The inverter which is connected to utility system is specifically interested and developed in this thesis by using three-level modular multilevel inverter topology. PSIM 9.0 is used to

simulate by generating PWM signal with a phase disposition PWM method. The 300 watt prototype is also developed for experimental validation. The tests are operated on several conditions such as full-load, half-load, and an induction motor with lamp load. The efficiency measurement, THD, and THD<sub>v</sub>, are also validated. The study illustrate that the simulation and experimental results are in good agreement. The total efficiency of the developed prototype is about 70%.

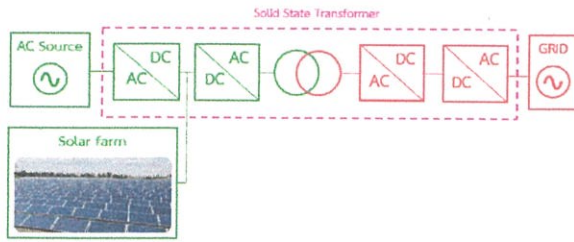
**Keyword :** Multilevel inverter, Modula Multilevel Inverter

### 1. บทนำ

พลังงานทางเลือกที่มีในปัจจุบันมีหลายชนิด เป็นพลังงานที่ไม่มีต้นทุนทางด้านทรัพยากรและอีกทั้งยังไม่มีผลเสียต่อระบบนิเวศอีกด้วย โดยพลังงานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์แปลงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบันยังมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่ค่อนข้างมาก และยังมีค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปในการทำงานของอุปกรณ์ในระบบเนื่องจากในช่วงเวลากลางคืนจะไม่มีการผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้นเพราะไม่มีแสงอาทิตย์ แต่อุปกรณ์ในระบบยังคงทำงานอยู่ อุปกรณ์ที่ว่านั้นคือ อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ ต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้ตลอดเวลา ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เสียไปกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้ และนอกจากนี้ยังมีความสูญเสียภายในหม้อแปลงไฟฟ้า (Core loss) ถึงแม้จะไม่มีการใช้งานเช่นกัน โดยช่วงเวลากลางคืน คือช่วงเวลาประมาณ 20.00 น. ถึง 8.00 น. จะไม่มีการผลิตไฟฟ้าซึ่งทำให้การสูญเสียของการทำงานของอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น และนอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องแรงดันเกินและแรงดันตกที่หม้อแปลงความถี่ต่ำไม่สามารถแก้ไขได้อีกด้วย

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการจัตุสร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ โมดูลูลา มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ เพื่อนำเป็นชุดอินเวอร์เตอร์ก่อนที่จะส่งกำลังไฟฟ้ากลับสู่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า พิกัดของแบบจำลอง Modular Multilevel Inverter (MMI) มีระดับแรงดัน 3 ระดับ  $V_{input} = 300 V_{dc}$ ,  $P_{output} = 300 W$ , และ  $m_a = 0.85/1$  โดยใช้การควบคุมสวิตซ์แบบ Phase Disposition Pulse-width modulation (PDPWM) เมื่อได้แรงดันตามที่ต้องการในการเชิงโครในสักระบบไฟฟ้าเพื่อที่จะจ่ายกำลังกลับไปนั้น ต้องมีความผิดพลาดของรูปคลื่นแรงดัน (%THD<sub>v</sub>) และความผิดพลาดของรูปคลื่นกระแส (%THD<sub>i</sub>) ไม่

เกิน 5% ทำให้จำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรกรองความถี่ เพื่อให้เป็นไปตามข้างต้นที่กล่าวมา ประสิทธิภาพของการทำงานของแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ในงานวิจัยนี้ในทุกสภาวะการทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้มีขนาดเกินกว่า 80% ในทุกแบบที่กำหนดขึ้น



รูปที่ 1 แผนผังการต่อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการทำงานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม

2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่แปลงต้นกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถใช้ในระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันขาออกที่เป็นระดับขั้น โดยหลักการของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ คือ การรวมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นขั้นๆ จำนวนระดับขั้นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้รูปคลื่นแรงดันที่ได้มีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal waveform) ทำให้ได้สัญญาณแรงดันที่มีความผิดเพี้ยนลดลง คุณสมบัตินี้ของอินเวอร์เตอร์แต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆมีคุณลักษณะความสามารถที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2 จากตารางพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ Modular Multilevel Inverter มีประสิทธิภาพและคุณสมบัตินี้เหมาะสมที่สุด สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม ซึ่งโครงสร้างมีตัวเหนี่ยวนำติดตั้งอยู่ก่อนที่จะส่งกำลังออก ทำให้มีคุณสมบัติที่สามารถป้องกันการหรือหน่วงต่อการเกิดความคิดพ่วงในระบบได้ หากทำการเพิ่มโมดูลให้มากขึ้นในแต่ละกิ่งจะทำให้มีค่าความผิดเพี้ยน (Total harmonics distortions) ของรูปคลื่นแรงดันที่ต่ำ โดยไม่ต้องใช้วงจรกรองขนาดใหญ่

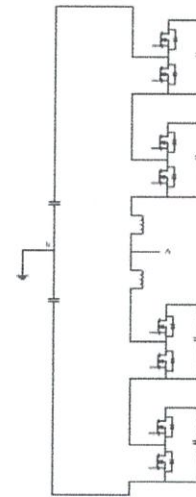
ตารางที่ 1 ตารางแสดงคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์

ข้อที่	คุณสมบัตินี้	ความสำคัญ
1	แหล่งจ่ายกำลังขาเข้าเดียว	จำเป็น
2	ความถี่สวิตซ์ต่ำ	จำเป็น
3	สามารถจ่ายโหลดด้วยองค์ประกอบกระแสตรง	จำเป็น
4	รูปคลื่นมีคุณภาพสูงใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์	จำเป็น
5	จ่ายพลังงานได้สองทิศทาง	คุณสมบัตินี้เสริม
6	สามารถทนทานต่อการเกิดความคิดพลาในในระบบได้	คุณสมบัตินี้เสริม

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบความสามารถของอินเวอร์เตอร์

ชนิดของอินเวอร์เตอร์	1	2	3	4	5	6
Diode clamped	✓	✓	-	-	✓	-
Cascade H-bridge	✓	✓	-	-	✓	-
H-bridge with multiwinding transformer	✓	✓	✓	✓	-	✓
H-bridge with bi-directional DC/DC	✓	-	✓	✓	✓	✓
Modular Multilevel Inverter	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ = มีคุณสมบัตินี้



รูปที่ 2 Modular Multilevel Inverter ชนิด 3 ระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้มีจุดดูลานี้ เป็นการสร้างแรงดันกระแสสลับขาออก จากการสั่งให้โมดูลแต่ละโมดูล ทำงาน (activate) หรือไม่ทำงาน (bypass) ซึ่งการออกแบบโมดูลสามารถเลือกออกแบบได้หลายวิธี อาทิเช่น แบบครึ่งคลื่น แบบครึ่งคลื่นร่วมกับทริสคอร์บายพาส แบบเต็มคลื่น และแบบแคลมป์ครึ่งคลื่นสองชั้น เป็นต้น ในทุกๆขาเฟสจะประกอบไปด้วย 2 แขน และในแต่ละแขนจะมี โมดูลจำนวนทั้งสิ้น n โมดูล ซึ่งจำนวนโมดูลเหล่านี้จะหาได้จากสูตร  $n = m-1$  โดยที่ m คือระดับแรงดันตัวอย่างในการสร้างแรงดันไฟฟ้าขาออกกระแสสลับของโมดูลชนิดครึ่งคลื่น จะมีหลักการคือหากต้องการให้โมดูลตัวใดทำงาน (activate) สวิตซ์ด้านบนจะถูกเซ็ทให้ on และเซ็ทสวิตซ์ด้านล่างให้ off หากต้องการให้โมดูลตัวใดไม่ทำงาน (bypass) ก็จะเซ็ทสวิตซ์ด้านบนให้ off และเซ็ทสวิตซ์ด้านล่างให้ on ซึ่งรูปที่ 2 จะแสดงวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้มีจุดดูลานี้

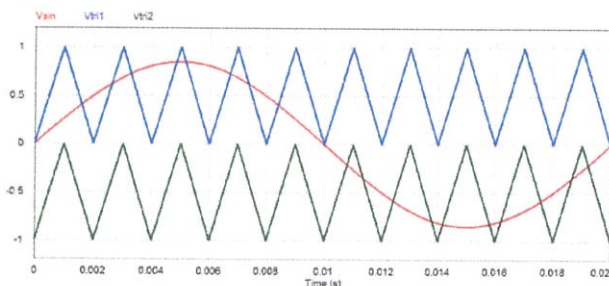
2.1 การมอดูเลชัน

เมื่อก้าวถึงการมอดูเลชันของอินเวอร์เตอร์ จะแบ่งได้ออกเป็นสองวิธีการหลักๆ ได้แก่วิธีการมอดูเลชันที่ความถี่สวิชชิงมูลฐาน และ วิธีการมอดูเลชันที่ความถี่สวิชชิงสูง PWM ซึ่งทั้งคู่จะให้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกัน คือ กราฟขาออกในรูปของ กราฟขั้นบันได

2.2 Phase Distortion PWM (PDPWM)

ในเทคนิค PDPWM นี้ มีข้อดีคือเป็นวิธีที่สร้างความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกได้ต่ำที่สุดในแรงดันระหว่างสาย (line-to-line) โดยจะให้สัญญาณพาหะทุกสัญญาณจะมีเฟสเดียวกัน

เมื่อใช้ในอินเวอร์เตอร์แบบ NPCMLI ที่มีระดับแรงดันเท่ากับ  $m$  จะมีการใช้สัญญาณพาหะเป็น  $m-1$  สัญญาณ สัญญาณพาหะเหล่านี้มีความถี่เดียวกันและถูกจัดให้เรียงซ้อนกันโดยที่ไม่มี การเลื่อนเฟส ทำให้ได้ค่าแรงดันขาออกสูงสุดไปจนถึงต่ำสุด ยอดคลื่นของสัญญาณพาหะจะถูกมอดูเลทโดยยอดคลื่นแรงดันต่ำสุดตามลำดับของระดับแรงดันสัญญาณพาหะแต่ละสัญญาณจะถูกคั่นกับแรงดันขาออกที่ระดับต่างๆกันไป ถ้าสัญญาณพาหะไม่ถูกมอดูเลทอย่างถูกต้อง แรงดันขาออกที่ได้ก็จะมีค่าออกมาไม่ถูกต้อง เนื่องจากระดับแหล่งจ่ายแรงดันเปลี่ยนไปจากค่าที่ควรจะเป็น (เกิดความไม่สมดุล) ถ้ายอดคลื่นของแหล่งจ่ายเปลี่ยนโดยที่สัญญาณพาหะไม่ถูกมอดูเลท ก็จะไม่ได้ออกแรงดันขาออกที่ถูกต้อง เมื่อสัญญาณพาหะถูกตัด โดยสัญญาณอ้างอิง กราฟขาออกจะเพิ่มขึ้นหนึ่งหรือลดลงหนึ่งระดับ



รูปที่ 3 สัญญาณอ้างอิง (โคไซน์) และสัญญาณพาหะ (ตามเหลี่ยม)

$$p = 2^n - 1 \dots\dots\dots(1)$$

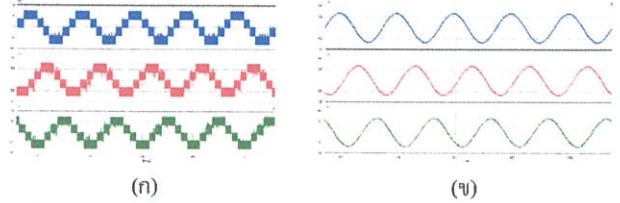
$$n_{level} = (2 \times p) - 1 \dots\dots\dots(2)$$

$$m_i = \frac{V_{rms}}{V_{peak} / \sqrt{2}} \dots\dots\dots(3)$$

- โดยที่ P คือ จำนวนระดับของแรงดันเฟส
- $n_{level}$  คือ จำนวนของระดับขั้น
- $V_{rms}$  คือ แรงดันเอาต์พุต rms ที่ต้องการ
- $V_{peak}$  คือ แรงดันเอาต์พุต peak ที่  $m_i = 1$

3. การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองการทำงานของ MMI ด้วยโปรแกรม Psim ได้ผลการจำลองจากโปรแกรมที่เป็นรูปคลื่นแรงดันในขณะที่ไม่มียังจรกรองความถี่ได้ดังรูปที่ 4 (ก)

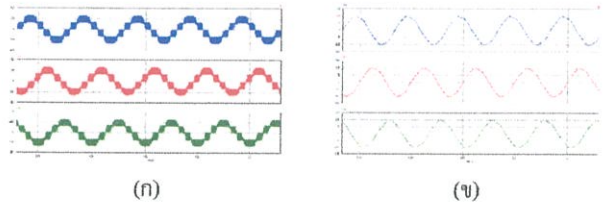


รูปที่ 4 (ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้าและไม่ได้ต่อ

ต่อวงจรกรองความถี่ค่า  $V_{input} = 300 V_{dc}$  และ  $m_u = 0.85/1$

(ข) รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อได้ต่อวงจรกรองความถี่ค่า ไม่ได้ต่อภาระทางไฟฟ้า  $V_{input} = 300 V_{dc}$  และ  $m_u = 0.85/1$

เมื่อทำการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ 50 เฮิร์ตแล้วนำมาต่อกับวงจรเดิม จากนั้นทำการจำลองการทำงานของวงจร ผลของการจำลองของวงจรได้ดัง รูปที่ 4 (ข) จากนั้นทำการทดลองให้วงจร MMI จ่ายภาระไฟฟ้าขนาด 300 W ผลของการจำลองทั้งแบบที่มีวงจรกรองความถี่และไม่มียังจรกรองความถี่แสดงดังรูปที่ 5 (ก) และ รูปที่ 5 (ข) ตามลำดับ



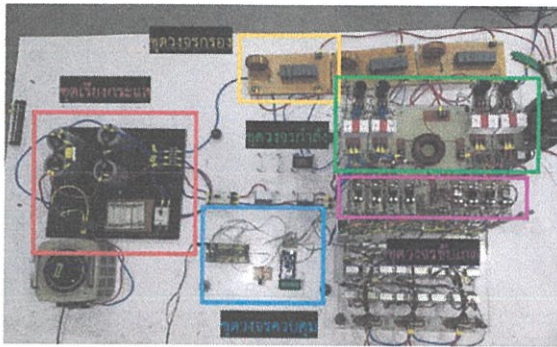
รูปที่ 5 (ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าและไม่ได้ต่อ

วงจรกรองความถี่ค่า  $V_{input} = 300 V_{dc}$  และ  $m_u = 0.85/1$

(ข) รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อได้ต่อวงจรกรองความถี่ค่า ต่อภาระทางไฟฟ้า  $V_{input} = 300 V_{dc}$  และ  $m_u = 0.85/1$

4. การสร้างเครื่องต้นแบบ

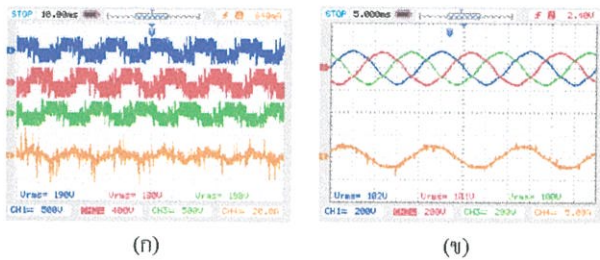
หลังจากทำการจำลองการทำงานของ MMI ว่าสามารถทำงานได้ จึงทำการเลือกอุปกรณ์ในการจัดสร้างเครื่องต้นแบบของ MMI โดยสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วนดังรูปที่ 6 ได้แก่ ชุดเรียงกระแส ชุดวงจรควบคุม ชุดวงจรขับเคลื่อน ชุดวงจรกำลัง และชุดวงจรกรอง ทำการเลือกอุปกรณ์ต่างๆ ให้เหมาะสมกับพิกัดของแต่ละชุดวงจรแล้วนำมาประกอบให้เป็นชุดต่างๆ ก่อนนำแต่ละชุดมาใช้งานร่วมกันก่อนทำการทดสอบต่างๆ



รูปที่ 6 เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

5.ผลการทดสอบเครื่องต้นแบบ

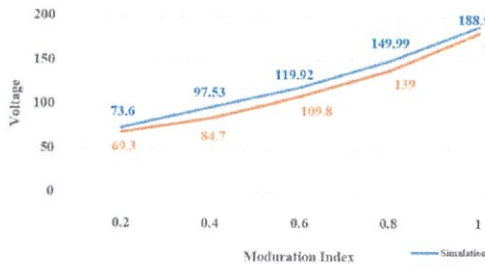
ในการทดสอบเครื่องต้นแบบนั้นในทุกการทดสอบจะทำการกำหนดแรงดันกระแสตรงไว้ที่ 300 V<sub>dc</sub> และค่า  $m_a = 0.85$



รูปที่ 7 (ก) เอาท์พุทเมื่อต่อภาระไฟฟ้าแบบโหลดไฟ 300 วัตต์ ไม่ต่อวงจรกรอง  
(ข) เอาท์พุทเมื่อต่อภาระไฟฟ้าแบบโหลดไฟ 300 วัตต์ ต่อวงจรกรอง

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอัตราบิดดูละชัน

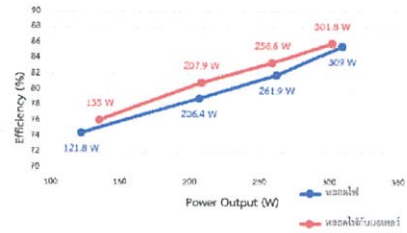
กรณีที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า สรุปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดดูละชันกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดดูละชันกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก

5.2 ทดสอบประสิทธิภาพที่สภาวะโหลดต่างๆ

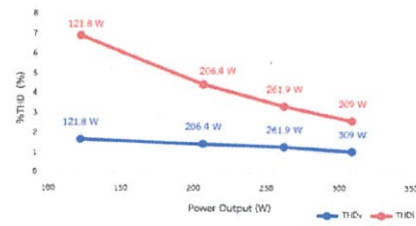
สรุปความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์กับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกที่ภาระไฟฟ้าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบ %eff ในสภาวะภาระไฟฟ้าต่างๆ

5.3 ทดสอบความคิดเพี้ยนของค่าแรงดันและกระแส

เป็นการเปรียบเทียบค่าความคิดเพี้ยนของรูปคลื่นของภาระทางไฟฟ้าที่ต่างกันดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบ %THD<sub>v</sub>, %THD<sub>i</sub> ในสภาวะภาระไฟฟ้าต่างๆ

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและจัดสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ชนิด MMI ขนาด 300 W 3 ระดับแรงดัน โดยใช้การควบคุมสวิตช์แบบ PDPWM และทำการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ จากผลการทดสอบเครื่องมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า 70% ในทุกกรณีของการทดสอบ อีกทั้งยังสามารถปรับค่าแรงดันด้านขาออกได้ด้วยการปรับ  $m_a$  นั่นคือเมื่อ  $m_a$  เพิ่มขึ้นแรงดันจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เปอร์เซ็นต์ความคิดเพี้ยนของรูปคลื่น (THD) ทั้งแรงดันและกระแสนั้นยังมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน เพื่อที่จะจ่ายกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] "Solid-State-Transformers: Key Components of Future Traction and Smart Grid Systems" Power Electronic Systems Laboratory, ETH Zurich, Switzerland
- [2] J.W. Kolar; G.I. Ortiz, "Solid State Transformer Concepts in Traction and Smart Grid Applications" Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Power Electronic Systems Laboratory 4
- [3] Prof.S.V. Kulkarni, "ISGD Plenary V- Solid State Transformers by SV Kulkarni" Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology Bombay, INDIA
- [4] Dominic Paradis, "Real-time simulation of Modular Multilevel Converters"

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล : เจษฎา วัฒนคุ้ม ชื่อเล่น แต้ก  
 วันเดือนปีเกิด : 5 เมษายน 2536  
 ที่อยู่ 167/3 ซอยวงศ์สว่าง11 ถนนวงศ์สว่าง แขวงวงศ์สว่าง  
 เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

ประวัติการศึกษา  
 ปีการศึกษา 2554

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนหอวัง  
 กรุงเทพมหานคร

ปีการศึกษา 2558

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่

ระหว่างวันที่ 24 มีนาคม 2557 ถึง 23 พฤษภาคม 2557



ชื่อ - นามสกุล : ชนาธิป เลาสสม ชื่อเล่น ชนุน  
 วันเดือนปีเกิด : 23 มกราคม 2536  
 ที่อยู่ : 716/2 ถ.ฉวย ต.ท่าฉลอม อ.เมือง จ.สมุทรสาคร 74000

ประวัติการศึกษา  
 ปีการศึกษา 2554

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดราชบพิธ  
 กรุงเทพมหานคร

ปีการศึกษา 2558

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 บริษัท เอปี่ จำกัด

ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่

ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2557 ถึง 30 มิถุนายน 2557



ชื่อ - นามสกุล : ชัยวัช ชุนระงับสังข์ ชื่อเล่น เบนซ์  
 วันเดือนปีเกิด : 26 กรกฎาคม 2536  
 ที่อยู่ : 51 ซอยสมเด็จเจ้า1 ถนนสมเด็จเจ้า แขวงสมเด็จเจ้า เขตคลอง  
 สาน กรุงเทพฯ 10600

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2554

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดราชพิศ  
 กรุงเทพมหานคร

ปีการศึกษา 2558

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่

บริษัท เทอร์โมเทรเซอร์ จำกัด

ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2557 ถึง 31 พฤษภาคม 2557



ชื่อ - นามสกุล : ชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์ ชื่อเล่น น็อต  
 วันเดือนปีเกิด : 30 กรกฎาคม 2535  
 ที่อยู่ : 31 หมู่ที่10 ต.ชะมวง อ.ควนขนุน จ.พัทลุง 93110

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2554

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก  
 โรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย สงขลา

ปีการศึกษา 2558

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่

บริษัท เทอร์โมเทรเซอร์ จำกัด

ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2557 ถึง 31 พฤษภาคม 2557