

เทคนิคการควบคุมแรงดันโวลเทจร่วมด้วยวิธีใช้ตัวเก็บประจุหลายระดับเพื่อลดแรงดันโวลเทจ
แบบโวลเทจร่วมเพื่อใช้ตัวเก็บประจุหลายระดับเพื่อลดแรงดันโวลเทจร่วม
COMMON-MODE VOLTAGE REDUCTION TECHNIQUE FOR
TRANSFORMERLESS PV INVERTER USING MULTILEVEL FLYING CAPACITOR
INVERTER

โดย

นายณัฐกร	นางสาวนิตยา
นายเปรม	ศรีนันทพร
นายเปรม	สุวรรณี
นายภาณุ	ศรีนันท

ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

ปีการศึกษา 2557

เทคนิคการควบคุมแรงดันโหมตร่วมสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า
แบบไร้หม้อแปลงโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์
COMMON-MODE VOLTAGE REDUCTION TECHNIQUE FOR
TRANSFORMERLESS PV INVERTER USING MULTILEVEL FLYING CAPACITOR
INVERTER

โดย

นายนพรุจ	มานะชาติสกุล
นายปณต	ตรีสุขจรมงคล
นายปณิธาน	สุวรรณชื่น
นางสาวประภาพร	ตรีนนท์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

COMMON-MODE VOLTAGE REDUCTION TECHNIQUE FOR
TRANSFORMERLESS PV INVERTER USING MULTILEVEL FLYING CAPACITOR
INVERTER

Nopparuj	Manachartsakul
Panot	Truskajonmongkol
Panitan	Suwannachuen
Praphaphorn	Treenon

A PAPER 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

เทคนิคการควบคุมแรงดันโหมตร่วมสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบ
ไร้หม้อแปลงโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์
COMMON-MODE VOLTAGE REDUCTION TECHNIQUE FOR TRANSFORMERLESS PV
INVERTER USING MULTILEVEL FLYING CAPACITOR INVERTER

โดย

นาย นพรุจ มานะชาติสกุล

นาย ปณต ตรัสขจรมงคล

นาย ปณิธาน สุวรรณชื่น

นางสาว ประภาพร ตรีนนท์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สมภาพ ผลไม้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เทคนิคการควบคุมแรงดันโหมตร่วมสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า
แบบไร้หม้อแปลงโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นาย นพรุจ มานะชาติสกุล
2. นาย ปณต ตรีสุขจรมงคล
3. นาย ปณิธาน สุวรรณชื่น
4. นางสาว ประภาพร ตรีนนท์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. สมภาพ ผลไม้)

เทคนิคการควบคุมแรงดันโหมตร่วมสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

นาย นพรุจ มานะชาติสกุล

นาย ปณต ตรีสุขจรมงคล

นาย ปณิธาน สุวรรณชื่น

นางสาว ประภาพร ตรีนนท์

ดร. สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแรงดันโหมตร่วมสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แรงดันโหมตร่วมก่อให้เกิดกระแสรั่วไหล ไหลผ่านตัวเก็บประจุแฝงในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงต้องทำให้แรงดันโหมตร่วมมีค่าคงที่ ซึ่งปัญหานี้ได้มีการแก้ไขโดยการใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ นิวทรอล พอยน์ แคลมป์ มาแล้วแต่ยังมีข้อเสียคือยังไม่สามารถรักษาแรงดันที่ตัวเก็บประจุในวงจรให้คงที่ได้ ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของตัวเก็บประจุนั้น ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดกับอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ นิวทรอล พอยน์ แคลมป์ และรักษาแรงดันโหมตร่วมให้มีค่าคงที่จึงนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์มาใช้ ในปริญญานิพนธ์นี้การจำลองการทำงานของระบบใช้โปรแกรม PSIM ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าภายใต้การทำงานพื้นฐาน แรงดันโหมตร่วมสามารถรักษาให้มีค่าคงที่ ที่ครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซีบัสได้ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิคที่นำเสนอ ได้มีการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบที่พิกัด 2 กิโลวัตต์สำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการ เครื่องต้นแบบถูกควบคุมให้มีการทำงานในโหมตเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า แรงดันดีซีบัสถูกจ่ายจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงที่ปรับค่าได้ แรงดันโหมตร่วมได้มีการวัดทางอ้อมโดยใช้การทำงานทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณที่วัด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันโหมตร่วมถูกรักษาให้มีค่าคงที่ ที่ครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซีบัสและสอดคล้องกับผลการจำลองเป็นอย่างดี

COMMON-MODE VOLTAGE REDUCTION TECHNIQUE FOR TRANSFORMERLESS PV INVERTER USING MULTILEVEL FLYING CAPACITOR INVERTER

Mr. Nopparuj Manachartsakul

Mr. Panot Truskajonmongkol

Mr. Panitan Suwannachuen

Ms. Praphaphorn Treenon

Dr. Sompob Polmai Advisor

Abstract

A paper presents common-mode voltage reduction technique for transformerless PV inverter using multilevel inverter type flying capacitor. The common-mode voltage contributes to the leakage current through the parasitic capacitance in the solar cell, can harm humans. To remedy this, the common-mode voltage is maintained. For this problem was fixed by using full-bridge neutral point clamped inverter but it could not still maintain stably voltage at capacitor in the circuit. This problem affect to the useful life of this capacitor. In order to avoid this problem that happened to full-bridge neutral point clamped inverter and maintain common-mode voltage stably, multilevel inverter type flying capacitor has to be used. In this paper, simulations of the proposed system are carried out using PSIM. The simulation results show that under normal operation, the common-mode voltage can be maintained at a half of the DC bus voltage. To validate the proposed technique, a 2 kW prototype inverter is designed and constructed for laboratory experiments. The prototype inverter is controlled to operate in grid-connected mode. The DC bus voltage is supplied by the programmable DC power supply. The common-mode voltage is indirectly observed using mathematic operation of the measured signals. The experimental results show that the observed common-mode voltage is maintained at a half of the DC bus voltage and have a good agreement with those the simulations.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำจาก ดร. สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณและความกรุณาจากท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้แก่ผู้จัดทำตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกเงินของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการPower Electronic Applications and Energy Conversion Research Laboratory (PEARL LAB) ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือร่วมทุกข์ ร่วมสุข เป็นกำลังใจให้กันและกันในตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยสอนและแนะนำเกี่ยวกับโปรแกรม Altium PCB Designer ให้กับผู้จัดทำเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติสนิทมิตรสหายทุกท่านที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ผู้จัดทำสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้จัดทำขอถือโอกาสอันดีงามมอบคุณงามความดีและประโยชน์ที่ได้จากปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ ให้แก่ผู้มีพระคุณของผู้จัดทำทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	3
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์	5
2.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.1.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	8
2.1.3 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.2 แรงดันโหมตร่วมในอินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลง	9
อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบรรบบไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์	12
2.3.1 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบชั้นเดียว	13
2.3.2 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองชั้น	13
2.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ	14
2.4.1 ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิจัย	16
2.4.2 โครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	17
ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	
2.4.3 ข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	21
เทคนิคการพีดับเบิลยูเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	
2.5 เทคนิคการพีดับเบิลยูเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	21
2.5.1 เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบหลายพหุหะชนิดเลื่อนเฟส	22
2.5.2 เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบหลายพหุหะชนิดเลื่อนระดับ	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การจำลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง	26
3.1 แบบจำลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง	26
3.1.1 เทคนิคการมอดดูเลตเพื่อควบคุมแรงดันโหมมตร่วม	28
3.2 โครงสร้างระบบควบคุม PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง	32
3.3 การออกแบบอินเวอร์เตอร์	33
3.3.1 วงจรสวิตช์กำลัง	33
3.3.2 แหล่งจ่ายแรงดันกระแสไฟฟ้ากระแสตรง	34
3.3.3 วงจรขับนำเกต	35
3.3.4 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรขับนำเกต	37
3.3.5 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรกรองกระแส	38
3.4 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง	40
4.1 บทนำ	40
4.2 ผลการทดลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์เกี่ยวกับการควบคุมแรงดันโหมมตร่วม	40
4.2.1 ผลการทดลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟสตรงกัน	40
4.2.2 ผลการจำลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟสล้าหลัง	45
4.2.3 ผลการจำลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟสนำหน้า	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการ	54
ภาคผนวก ข. โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องต้นแบบโดยใช้ DSP	59

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค. เครื่องมือที่ใช้ในการวัด	74
ประวัติผู้เขียน	77

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 อินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบฟูลบริดจ์ นิวทรอล พอยท์ แคลมป์ (NPC)	1
1.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	2
2.1 วงจรสมมูลทางอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25 °C คงที่ เปลี่ยนแปลงระดับค่าความเข้มแสงที่ค่าต่างๆ	7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1000 W/m ² คงที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ	8
2.5 กระแสรั่วไหลโหมตร่วมใน PV อินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลง	10
2.6 รูปแบบโหมตร่วมและโหมตต่างของแรงดัน	11
2.7 รูปแบบโหมตร่วมและโหมตต่างของแรงดันที่ลดรูป V_{cm}	11
2.8 รูปแบบอย่างง่ายของวงจรเรโซแนนซ์โหมตร่วม	
(ก) รูปแบบโหมตร่วมและโหมตต่างของแรงดันที่ทำการลดรูปวงจร	12
(ข) เงื่อนไขการกำจัดกระแสรั่วไหลโหมตร่วม	12
2.9 บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบชั้นเดียว	13
2.10 บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองชั้น	14
2.11 แผนภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	14
2.12 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 5 ระดับ	16
2.13 กิ่งหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	18
2.14 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบบริดจ์ 1 เฟส	19
2.15 ตัวอย่างการสร้างระดับแรงดันด้านขาออกบางสถานะ	
(ก) แรงดันด้านขาออก คือ 2E	20
(ข) แรงดันด้านขาออก คือ 1E	20
(ค) แรงดันด้านขาออก คือ 1E	21
(ง) แรงดันด้านขาออก คือ 0	21
2.16 รูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์	22
2.17 ตัวอย่างเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์	23
2.18 ตัวอย่างเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์	24
3.1 แบบจำลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	27
3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM แบบ PSPWM	27
3.3 เทคนิคการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	29

สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
3.4 การทำงานของอินเวอร์เตอร์โหมดที่ 1	30
3.5 การทำงานของอินเวอร์เตอร์โหมดที่ 2	30
3.6 การทำงานของอินเวอร์เตอร์โหมดที่ 3	31
3.7 การทำงานของอินเวอร์เตอร์โหมดที่ 4	31
3.8 โครงสร้างของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง	32
3.9 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FCI)	33
3.10 วงจรสวิตซ์กำลังของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ที่สร้างขึ้น	34
3.11 วงจรทวิแรงดัน	34
3.12 วงจรทวิแรงดันที่สร้างขึ้น	35
3.13 วงจรขับนำเกต	35
3.14 วงจรขับนำเกตที่สร้างขึ้น	36
3.15 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรขับนำเกต	37
3.16 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรขับนำเกตที่สร้างขึ้น	38
3.17 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)	39
4.1 ผลการทดลองของ V_{AN}, V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน	41
4.2 ผลการจำลองของ V_{AN}, V_{BN} และแรงดันโหมดรวม (V_{cm}) ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน	41
4.3 ผลการทดลองของ V_{AN}, V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ที่ความถี่สวิตซ์ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน	42
4.4 ผลการจำลองของ V_{AN}, V_{BN} และแรงดันโหมดรวม (V_{cm}) ที่ความถี่สวิตซ์ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน	42
4.5 ผลการทดลองของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ ($V_{AB,}$) แรงดันขาออก (V_o) และกระแสขาออก (I_o) ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน	43
4.6 ผลการจำลองของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}) แรงดันขาออก (V_o)ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน	43
4.7 ผลการทดลองของแรงดันตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน	44
4.8 ผลการทดลองของกระแสตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน	44
4.9 ผลการทดลองของ V_{AN}, V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ของโหลดที่มีเฟสล้าหลัง	45
4.10 ผลการทดลองของ V_{AN}, V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ที่ความถี่สวิตซ์ของโหลดที่มีเฟสล้าหลัง	46
4.11 ผลการทดลองของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ ($V_{AB,}$) แรงดันขาออก (V_o) และกระแสขาออก (I_o) ของโหลดที่มีเฟสล้าหลัง	46
4.12 ผลการทดลองของแรงดันตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟสล้าหลัง	47

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
4.13 ผลการทดลองของกระแสตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟส ล่าหลัง	47
4.14 ผลการทดลองของ V_{AN}, V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ของโหลดที่มีเฟสนำหน้า	48
4.15 ผลการทดลองของ V_{AN}, V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ที่ความถี่สวิตซิ่งของโหลดที่มีเฟสนำหน้า	49
4.16 ผลการทดลองของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}) แรงดันขาออก (V_o) และกระแสขาออก (I_o) ของโหลดที่มีเฟสนำหน้า	49
4.17 ผลการทดลองของแรงดันตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟส นำหน้า	50
4.18 ผลการทดลองของกระแสตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟส นำหน้า	50
ค.1 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป YOKOGAWA รุ่น DL1740E	75
ค.2 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป RIGOL รุ่น DS1204B	75
ค.3 Differential Probe YOKOGAWA รุ่น 700625	76
ค.4 Current Probe FLUKE	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การทำงานของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (1เฟส)	19
2.2 การหาค่ามอดดูเลตโดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ	25
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทดลอง	26

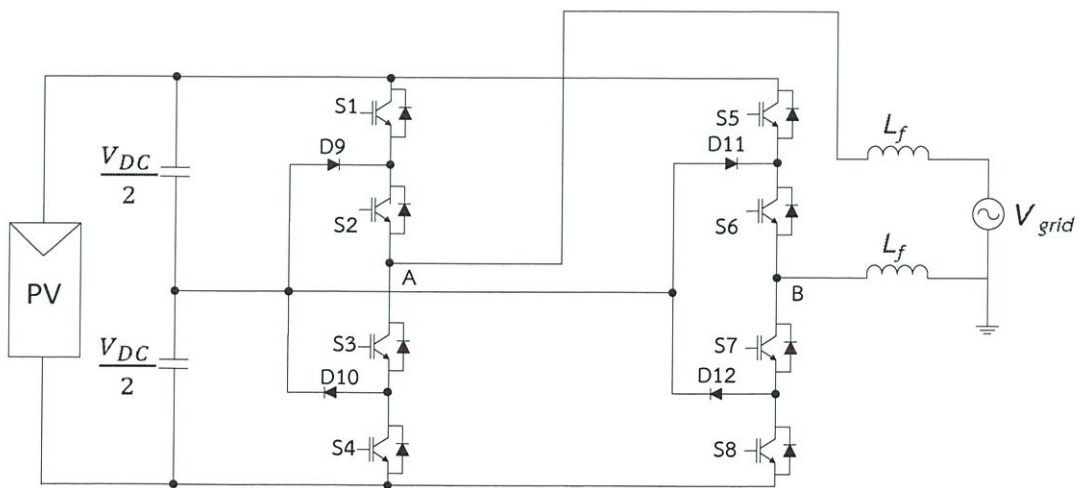
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยส่วนใหญ่อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีการแยกกันทางไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงซึ่งหม้อแปลงที่ใช้นั้นมีทั้งหม้อแปลงความถี่ต่ำและความถี่สูง โดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะมีขนาดใหญ่ และน้ำหนักมาก ทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ การติดตั้งจึงทำได้ยากและยังมีราคาต้นทุนสูง ส่วนอินเวอร์เตอร์ที่ใช้หม้อแปลงความถี่สูงทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ระบบจะมีการทำงานหลายขั้นตอน ระบบมีความซับซ้อน จึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าในระบบหนึ่งเฟสที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำต้องใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าในการนำไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้งาน ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่ดีควรมี ประสิทธิภาพสูง ขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและต้นทุนต่ำ เพื่อให้ได้อินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะตามต้องการ จึงใช้อินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลงซึ่งอาจจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหล ซึ่งกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า 0.5mA อาจส่งผลกระทบต่อโซลาร์เซลล์หรือทำอันตรายต่อมนุษย์ได้

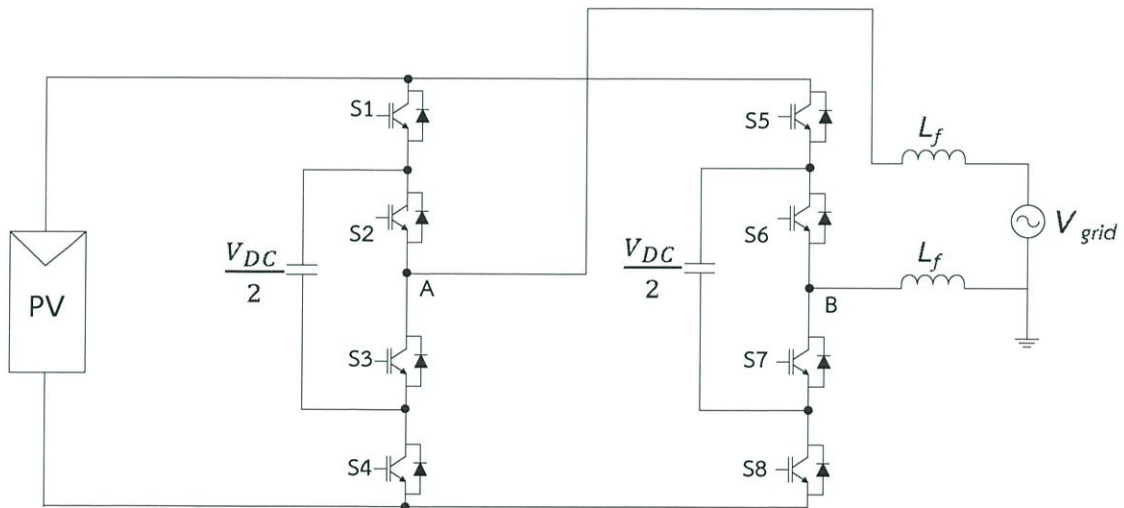
เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสรั่วไหลโดยรวมจากการใช้อินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลง จึงมีการใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบฟูลบริดจ์ นิวทรอล พอยท์ แคลมป์ (NPC) และใช้เทคนิคการมอดดูเลตแบบ Unipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) เพราะไม่มีเงื่อนไขการทำงานที่สร้างกระแสรั่วไหลโดยรวม การเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ไม่ส่งผลกระทบต่อควบคุมแรงดันโดยรวม สามารถควบคุมแรงดันโดยรวมให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงการทำงาน



รูปที่ 1.1 อินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบฟูลบริดจ์ นิวทรอล พอยท์ แคลมป์ (NPC)

แต่การใช้ฟูลบริดจ์ NPC อินเวอร์เตอร์นั้น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันดีซีบัสขาเข้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีผลต่อการควบคุมแรงดันโหมตร่วม ยิ่งมีความแตกต่างของแรงดันมากก็ส่งผลให้เกิดกระแสรั่วไหลมากตามไปด้วย

เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุที่ดีซีบัสกระแสตรงให้มีค่าเท่ากันเสมอเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันโหมตร่วมจึงใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor Multilevel Inverter) แทนฟูลบริดจ์ NPC อินเวอร์เตอร์ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (Phase-shifted Pulse Width Modulation) เพราะอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ มีแรงดันโหมตร่วมต่ำ กระแสรั่วไหลโหมตร่วมจึงน้อย รูปคลื่นแรงดันขาออกมีคุณภาพสูงมีความใกล้เคียงคลื่นไซน์ และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุที่ดีซีบัส แต่ข้อเสียคือต้องใช้ตัวเก็บประจุในวงจรจำนวนมากและเนื่องจากใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังจำนวนมากทำให้ต้องใช้สัญญาณเกตจำนวนมากตามไปด้วย



รูปที่ 1.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

ปัญหานี้นำเสนอการใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์สำหรับระบบ PV ชนิดเชื่อมต่อบริษัทไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง ซึ่งมีการควบคุมแรงดันโหมตร่วมให้มีค่าเป็นแรงดันกระแสตรงส่งผลกระแสรั่วไหลมีค่าน้อย นอกจากนี้ระดับแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมี 3 ระดับ ทำให้กระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์มีรูปร่างใกล้เคียงสัญญาณไซน์และการกระเพื่อมของกระแสมีค่าน้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มุ่งหวังเพื่อศึกษาอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงและใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เพื่อควบคุมแรงดันโหมตร่วมและแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันดีซีบัสขาเข้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวของอินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบฟูลบริดจ์ นิวทรอล พอยท์ แคลมป์ (NPC) ทั้งยังช่วยลดต้นทุน ติดตั้งง่าย น้ำหนักเบา ขนาดของระบบมีขนาดเล็กและระบบมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 สร้างแบบจำลองของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงเพื่อศึกษาการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม PSIM

1.3.2 ออกแบบและสร้าง PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง โดยให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเหมือนกับแบบจำลอง

1.3.3 ทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการควบคุมแรงดันโหมตร่วมของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงโดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ซึ่งใช้เทคนิคการมอดูเลตโดยใช้เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (Phase-Shift Pulse Width Modulation)

1.5 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินการ	ช่วงเวลา								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยเกี่ยวกับ แรงดันโหมตร่วมสำหรับ PV อินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลงโดยใช้ อินเวอร์เตอร์หลายระดับ	■	■							
ศึกษาและทดลองโครงสร้างการเขียน โปรแกรมด้วยโปรแกรม PSIM		■	■						
ออกแบบรูปแบบของอินเวอร์เตอร์ที่จะ ศึกษา			■						
เตรียมนำเสนอและจัดทำเอกสารทาง วิชาการผลการศึกษาในภาคเรียนที่ 1				■					
ออกแบบรูปแบบของอินเวอร์เตอร์ใน โปรแกรม PSIM ที่ใช้งานได้จริง					■	■	■		
ทำการสร้างอินเวอร์เตอร์ที่สามารถใช้ งานได้จริง							■	■	
ทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟ DC ของจริง หรือต่อเข้ากับกริดทางไฟฟ้าที่ใช้ใน ปัจจุบัน								■	
เตรียมนำเสนอโครงการ จัดทำเอกสาร ทางวิชาการ และปริญญาานิพนธ์									■

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.6.1 เข้าใจหลักการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง

1.6.2 เข้าใจหลักการควบคุมแรงดันโหมตร่วมของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงได้

1.6.3 เข้าใจหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

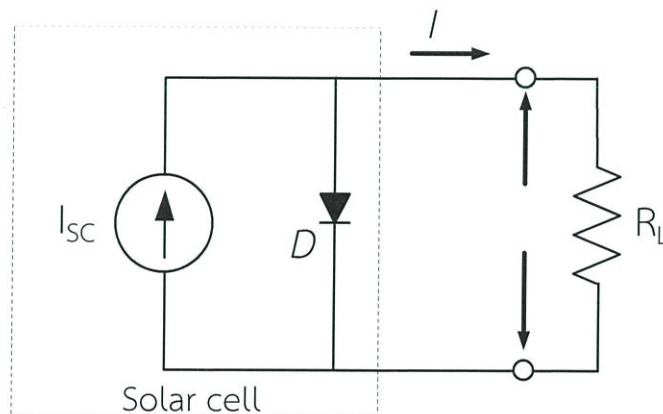
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic phenomenon) การเปลี่ยนแปลงพลังงานด้วยวิธีนี้จะไม่มีส่วนเคลื่อนที่ใดๆ ทำให้มีข้อดีในเรื่องความสะดวกต่อการนำไปใช้งาน มีการบำรุงรักษาที่ง่าย และอายุการใช้งานยาวนาน การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้ายังมีอุปสรรคในเรื่องราคาเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ เนื่องจากประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 8-15 % เท่านั้น ดังนั้นการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลาจึงเป็นสิ่งจำเป็น

2.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

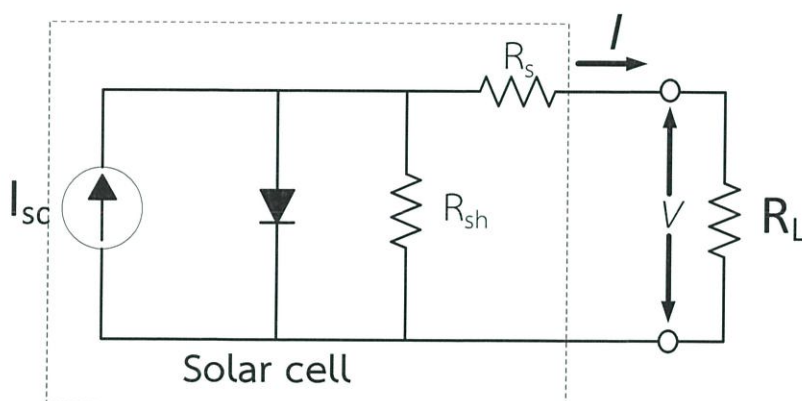
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นมาจากวัสดุกึ่งตัวนำเหมือนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โครงสร้างวัสดุสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) เหมือนไดโอด ดังนั้นคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติจึงสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสขนานกับไดโอดรูปที่ 2.1 ซึ่งปริมาณกระแส I_{sc} นี้กำเนิดจากปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิกที่มีความเข้มข้นของแสงค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายกระแสที่ ส่วนไดโอดจะแสดงถึงคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นค่ากระแสจ่ายออก I จึงสามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างของกระแส I_{sc} ที่กำเนิดจากแสงอาทิตย์กับกระแสของไดโอดดังแสดงในสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลทางอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = I_{sc} - I_0 \left[e^{\frac{qv}{Akt}} - 1 \right] \quad (2.1)$$

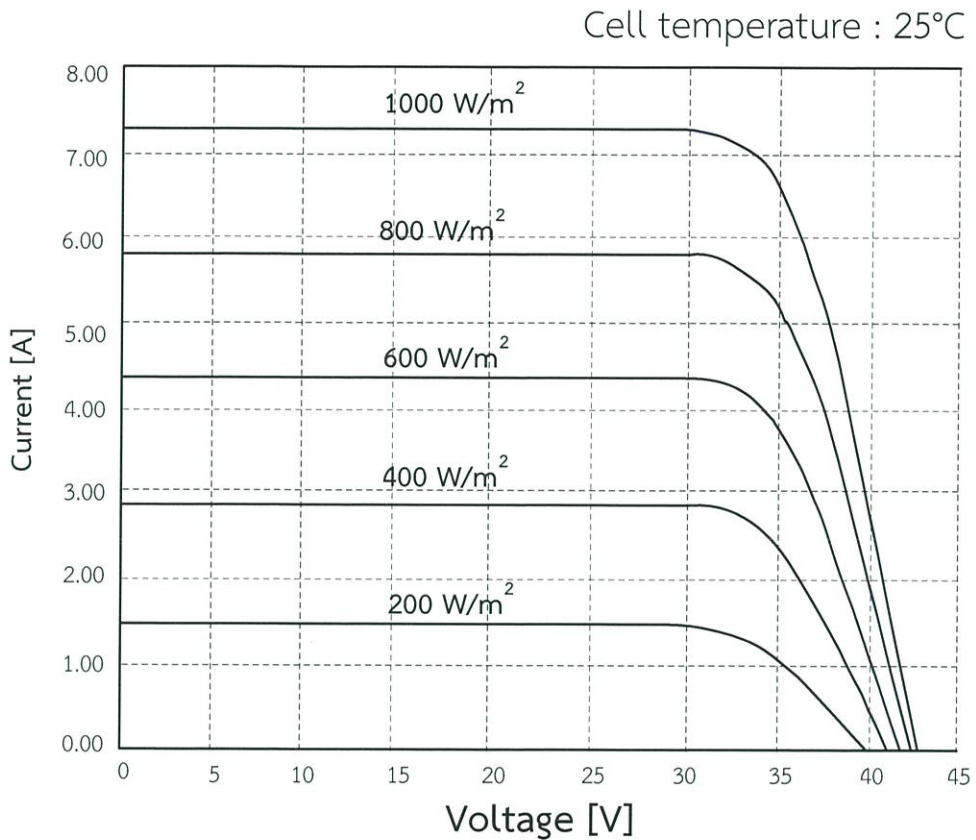
อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.2 มีทั้งความต้านทานที่ขนานและความต้านทานที่อนุกรมกับวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ สมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

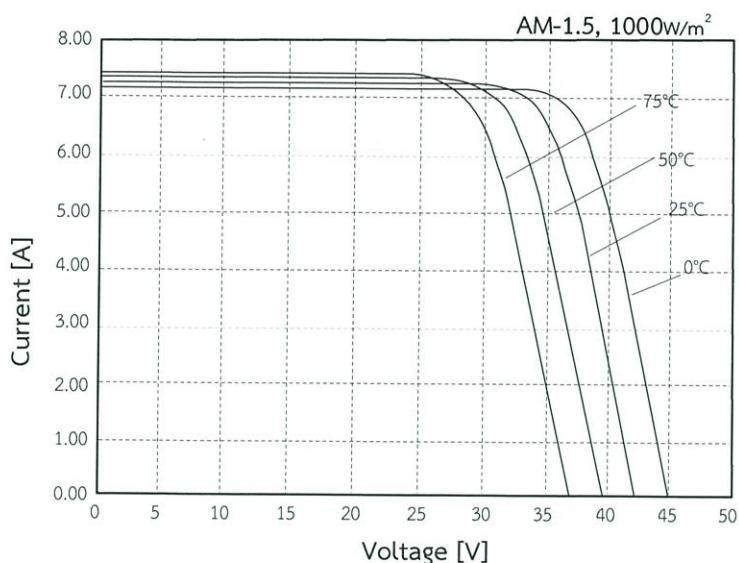
$$I = I_{sc} - I_0 \left[e^{\frac{qv}{Akt}} - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 อธิบายความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันจ่ายออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ในสภาวะที่ไม่มีแสงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีคุณสมบัติเหมือนไดโอด เนื่องจากมีโครงสร้างของวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกัน แต่เมื่อให้แสงกับเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิกขึ้นทำให้เกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้าออกมา เมื่อพิจารณาในสภาวะเปิดวงจร กระแสจะไหลเข้าไดโอดทั้งหมดทำให้กระแสจ่ายออกมีค่าเป็นศูนย์ ในทางกลับกันถ้าลัดวงจรกระแสจ่ายออกก็จะไหลออกสู่วงจรภายนอกทั้งหมด เมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มของแสงจะเป็นผลให้ค่ากระแส I_{sc} มีค่าเปลี่ยนไปด้วยซึ่งแปรผันตรงกับความเข้มของแสง ในขณะที่แรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย แต่เมื่อความเข้มแสงมีค่าคงที่กระแส I_{sc} จะมีค่าคงที่ถึงแม้แรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงหรืออาจกล่าวได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ความเข้มแสงค่าใดค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25 °C คงที่ เปลี่ยนแปลงระดับค่าความเข้มแสงที่ค่าต่างๆ

ความเข้มแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าแสงมีความเข้มแสงต่ำจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ต่ำเช่นเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความเข้มแสงมากก็จะผลิตไฟฟ้าได้มากเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปเมื่อปริมาณความเข้มแสงเปลี่ยนไปค่ากระแสสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะมีค่าเปลี่ยนตามในขณะที่แรงดันมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1000 W/m² คงที่ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ

รูปที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่ออุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ลดลง จากรูปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงในขณะที่กระแสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.1.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

วิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์มีมาหลายทศวรรษแล้ว เซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงแรกผลิตจากซิลิเนียม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานประมาณ 1-2 % จึงทำให้การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ไม่แพร่หลายมากนัก จนถึงในช่วง พ.ศ. 2493 ได้มีการผลิตซิลิกอนขึ้นได้สำเร็จเป็นครั้งแรก โดยกระบวนการ Czochraki ซึ่งเป็นจุดสำคัญต่อวิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ถูกลง เพิ่มอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานให้สูงขึ้นด้วย ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท

2.1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Crystalline Solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกที่ใช้กันในปัจจุบันส่วนมากผลิตจากซิลิกอนเนื่องจากได้มีการพัฒนาทั้งด้านราคา อายุการใช้งาน และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานเรื่อยมา ในช่วงแรกเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวจะมีราคาประมาณ 1000 บาทต่อวัตต์ในช่วง พ.ศ. 2516 ลดลงเป็นประมาณ 125 บาทต่อวัตต์ในปี พ.ศ. 2534 ในด้านประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนถูกจำกัดด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิกอน คือมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 29% จากเหตุผล

ดังกล่าวจึงมีการคิดค้นพัฒนาในการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ มาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แทนซิลิกอน เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงกว่าซิลิกอน คือจะมีค่าประมาณ 31% แต่ยังคงถูกจำกัดโดยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากราคาของสารดังกล่าวยังแพงกว่าซิลิกอน

2.1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบาง (Thin-Film Solar Cell)

เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นมาเพื่อลดราคาให้ถูกกว่าแบบแรก เนื่องจากกระบวนการผลิตใช้สารกึ่งตัวนำน้อยกว่าแบบแรก โดยปกติใช้อะมอर्फัสซิลิกอน (a-si) จำนวนเล็กน้อยฉาบลงบนผิวของวัสดุชนิดอื่น แต่จะมีข้อเสียคือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่ำกว่าแบบแรก มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงาน 12% ในห้องปฏิบัติการ และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในการใช้งานจริงภาคสนามประมาณ 8% มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบางที่ทำจากอะมอर्फัสซิลิกอนมีค่าสูงสุดไม่เกิน 27% เนื่องจากถูกจำกัดโดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอะมอर्फัสซิลิกอน

2.1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Solar cell)

เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากฐานชั้น P บนฐานของซิลิกอนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ชนิด N และสร้างชั้น P ชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ลักษณะโครงสร้างจะคล้ายผลึกเดี่ยว เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงกว่า 31% สามารถใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงกว่า 200 °C นิยมใช้บนยานอวกาศและเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับดาวเทียม แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาสูงมาก

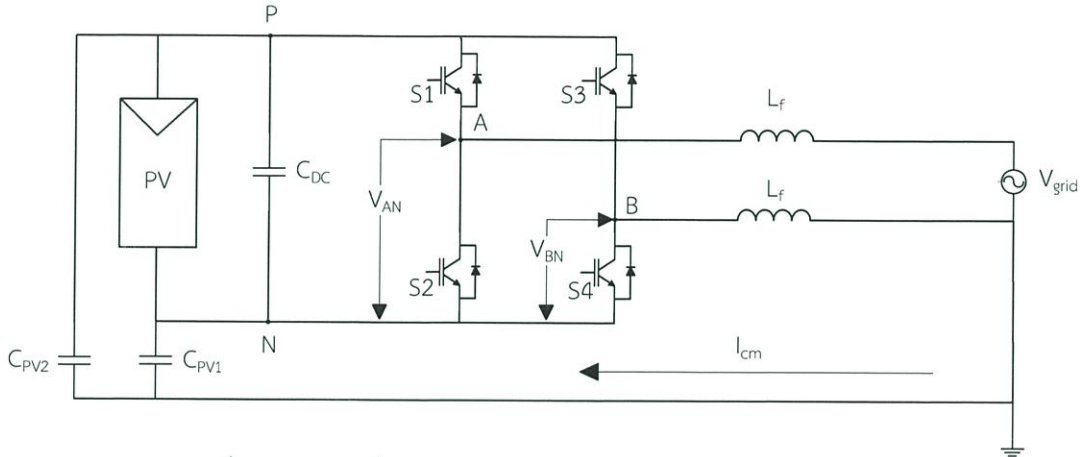
2.1.3 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรติดตั้งให้มีความลาดเอียงเพียงพอที่ได้รับแสงมากที่สุดและอีกเหตุผลหนึ่ง เพื่อให้เกิดการระบายน้ำฝนได้อย่างรวดเร็วเพื่อใช้ในการชำระสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่บนแผงได้อีกด้วย การเลือกมุมความลาดเอียงและทิศทางของแผงที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานที่ สำหรับประเทศไทยค่าที่ดีที่สุดคือ 15 องศา โดยหันไปทางทิศใต้ อีกวิธีหนึ่งที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ การปรับแผงให้เอียงตามการโคจรของดวงอาทิตย์ แต่วิธีนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงติดตั้งแผงเซลล์ให้มีความลาดเอียงที่ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น

2.2 แรงดันโหมตร่วมในอินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลง

เมื่อระบบ PV ชนิดเชื่อมต่อไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงแยกทางไฟฟ้า ทำให้มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างระบบไฟฟ้ากับแผง PV ซึ่งทำให้เกิดวงจรเรโซแนนซ์โหมตร่วม และมีอิทธิพลต่อกระแสรั่วไหลโหมตร่วม ซึ่งการไหลของกระแสรั่วไหลโหมตร่วมและส่วนประกอบที่สำคัญแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่ง

จากรูปประกอบด้วยตัวเก็บประจุแผงของแผงโซลาร์เซลล์ (C_{pv}) ที่ต่อระหว่างแต่ละขั้วต่อของแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ 2.5 กระแสรั่วไหลโหมดร่วมใน PV อินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลง

ในการพิจารณาการเกิดกระแสรั่วไหลโหมดร่วมของระบบหนึ่งเฟสได้มีการดัดแปลงมาจากระบบสามเฟส โดยการนำแรงดันโหมดร่วมและแรงดันโหมดต่างของเฟส A และ เฟส B มาใช้ในการพิจารณาซึ่งแรงดันโหมดร่วมและแรงดันโหมดต่างสามารถหาได้จาก [2], [3]

$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} \quad (2.3)$$

$$V_{dm} = V_{AN} - V_{BN} = V_{AB} \quad (2.4)$$

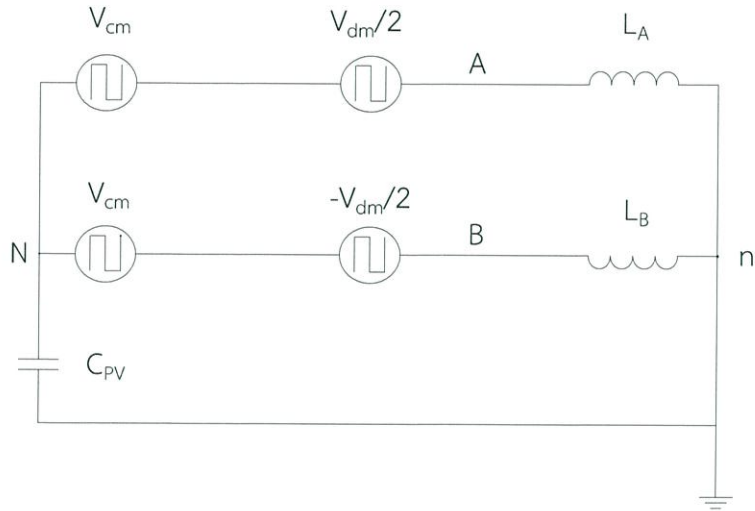
เมื่อ V_{cm} คือแรงดันโหมดร่วม, V_{dm} คือแรงดันโหมดต่าง, V_{AN} และ V_{BN} คือแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับขั้วลบ N ของแรงดันบัสกระแสตรงซึ่งเป็นจุดการอ้างอิงร่วม

จากสมการแรงดันโหมดร่วม (2.3) และโหมดต่าง (2.4) สามารถนำมาหาค่าแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงดังนี้

$$V_{AN} = \frac{V_{dm}}{2} + V_{cm} \quad (2.5)$$

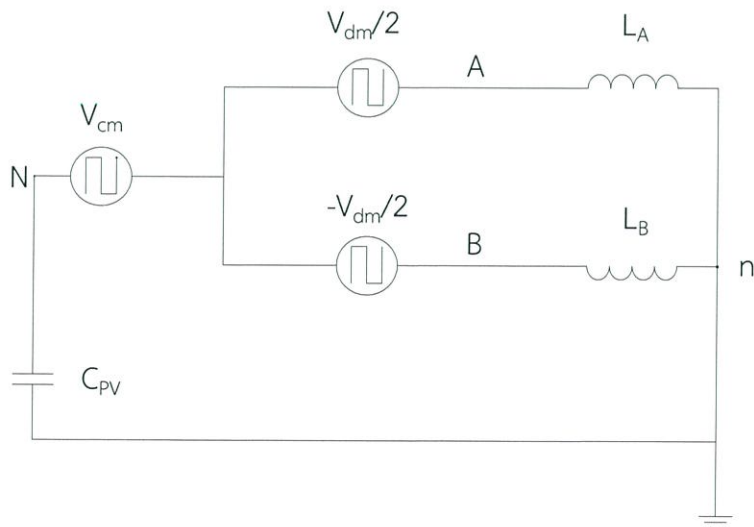
$$V_{BN} = -\frac{V_{dm}}{2} + V_{cm} \quad (2.6)$$

จาก (2.5), (2.6) สามารถนำมาสร้างรูปแบบของแรงดันโหมตร่วมและแรงดันโหมตต่างได้ดังแสดงใน รูปที่ 2.6 L_A และ L_B คือตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแส ซึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดเท่าๆกัน เนื่องจากการดัดแปลงมาจากกระแสสามเฟส



รูปที่ 2.6 รูปแบบโหมตร่วมและโหมตต่างของแรงดัน

เนื่องจากมีแรงดันโหมตร่วมปรากฏทั้งสองกิ่งจึงสามารถลดรูปวงจรได้ดังรูปที่ 2.7

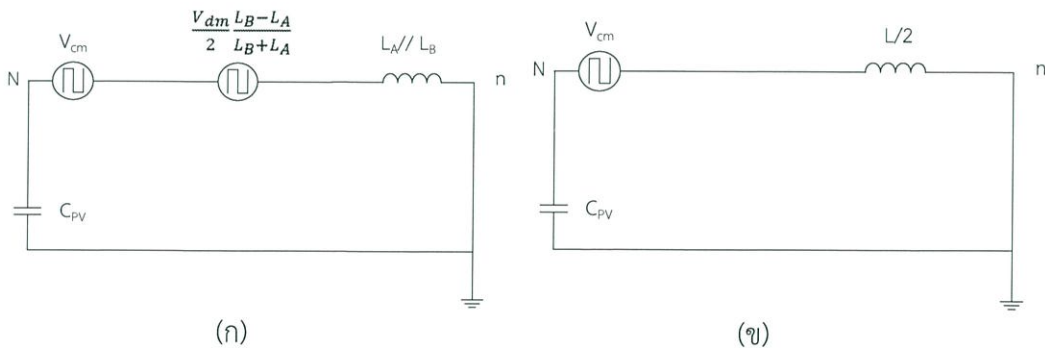


รูปที่ 2.7 รูปแบบโหมตร่วมและโหมตต่างของแรงดันที่ลดรูป V_{cm}

จากนั้นทำการลดรูปวงจรของ V_{dm} ซึ่งสามารถหาได้จาก [2] แสดงดังรูปที่ 2.8 (ก) โดยทั่วไปแล้วสำหรับการเลือกขนาดของตัวเหนี่ยวนำ L_A และ L_B สำหรับวงจรกรองกระแส นิยมเลือกให้มีค่าเท่ากันเนื่องจากรูปแบบการเกิดกระแสรั่วไหลพัฒนามาจากระบบสามเฟส ซึ่งส่งผลให้แรงดันโหมตต่างมีค่ากลายเป็นศูนย์ ทำให้ได้รูปอย่างง่ายของการเกิดกระแสโหมตร่วมดังแสดงรูปที่ 2.8 (ข) ซึ่งการเกิดกระแสรั่วไหลโหมตร่วม (I_{cm}) ถูกกระตุ้นจากแรงดันโหมตร่วมเท่านั้นเพราะฉะนั้นการกำจัดกระแสรั่วไหลโหมตร่วมสามารถทำได้โดยการควบคุมแรงดันโหมตร่วมให้มีค่าคงที่ เพราะกระแสรั่วไหลโหมตร่วมคือกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแฝง ซึ่งมีค่าดังนี้

$$I_{cpv} = C_{pv} \frac{dv_{cpv}}{dt} \quad (2.7)$$

เมื่อแรงดันโหมตร่วมมีค่าคงที่แล้ว ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ กระแสรั่วไหลโหมตร่วมจึงกลายเป็นศูนย์ไปด้วย



รูปที่ 2.8 รูปแบบอย่างง่ายของวงจรเรโซแนนซ์โหมตร่วม

(ก) รูปแบบโหมตร่วมและโหมตต่างของแรงดันที่ทำการลดรูปวงจร

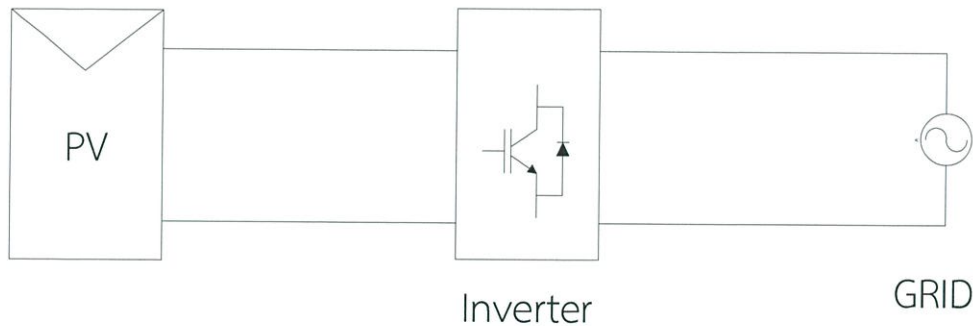
(ข) เงื่อนไขการกำจัดกระแสรั่วไหลโหมตร่วม

2.3 อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงออกมา ดังนั้นการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั่วไปจำเป็นต้องเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า โดยทั่วไปจะแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของวงจรเป็น 2 แบบ คือ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบขั้วเดียวและอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบสองขั้ว

2.3.1 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว (Single state inverter) [1]

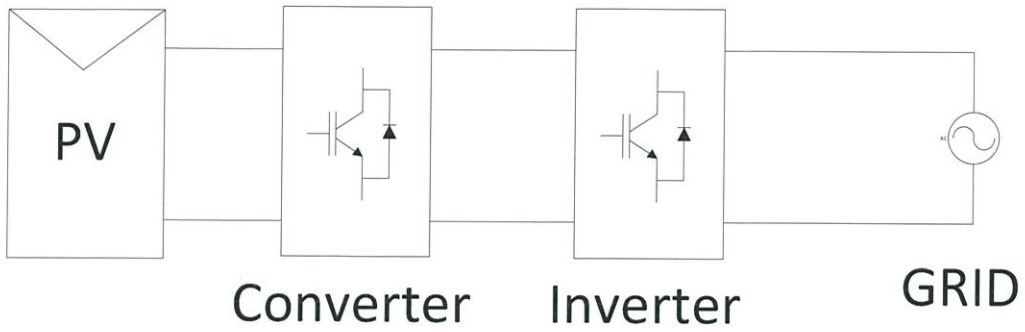
บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบขั้นเดียว แสดงดังรูปที่ 2.9 ตามลำดับ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดี่ยวนี้นำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยไม่มีการจัดการพลังงานที่ด้านไฟฟ้ากระแสตรงก่อนหรือไม่มีวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อการไฟฟ้าแบบนี้มีข้อดีตรงที่ค่าสูญเสียเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์มีค่าต่ำเพราะมีอุปกรณ์สวิตช์ที่ทำงานที่ความถี่สูงน้อย แต่มีข้อเสียในการควบคุมที่ยุ่งยาก เนื่องจากอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบนี้ นอกจากทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์แล้วยังต้องทำหน้าที่ควบคุมการทำงานที่จุดให้กำลังสูงสุดอีกด้วยและอีกเหตุผลที่สำคัญคือ ค่าแรงดันที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสออกสู่ระบบการไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบขั้นเดียว

2.3.2 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองขั้น (Two state inverter) [1]

บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบสองขั้นดังแสดงในรูปที่ 2.10 อินเวอร์เตอร์แบบนี้จะประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ ดีซี-ดีซี บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและปรับระดับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ ส่วนอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นการจัดการพลังงานสองครั้ง ทำให้ค่าสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์จึงสูงกว่าแบบแรก เนื่องจากจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สวิตช์ทำงานที่ความถี่สูงมากกว่าขั้นเดียว

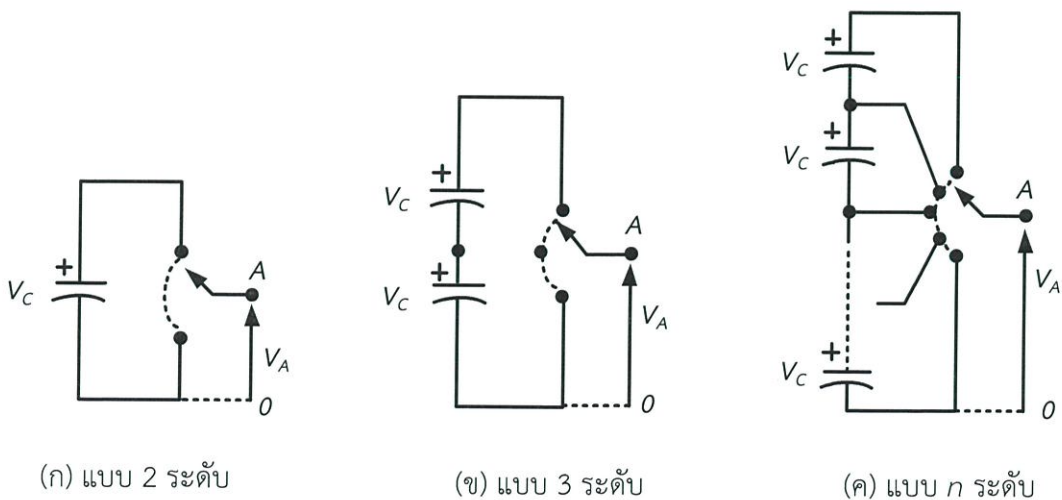


รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายส่งแบบสองชั้น

2.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับจะอาศัยการต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง เพื่อใช้ในการแบ่งแรงดันและเพิ่มจำนวนระดับของสัญญาณด้านขาออกระหว่างสายมีลักษณะเข้าใกล้เคียงไซน์มากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ การอนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์กำลังดังกล่าว ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีความสามารถในการทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

ในการสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับในครั้งแรกถูกสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ต่อมามีการเพิ่มจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ ทำให้แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ได้มีระดับเป็นขั้นบันไดมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยลดฮาร์มอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมก็ทำให้ยากขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากสวิตช์กำลังที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีจำนวนมาก



รูปที่ 2.11 แผนภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

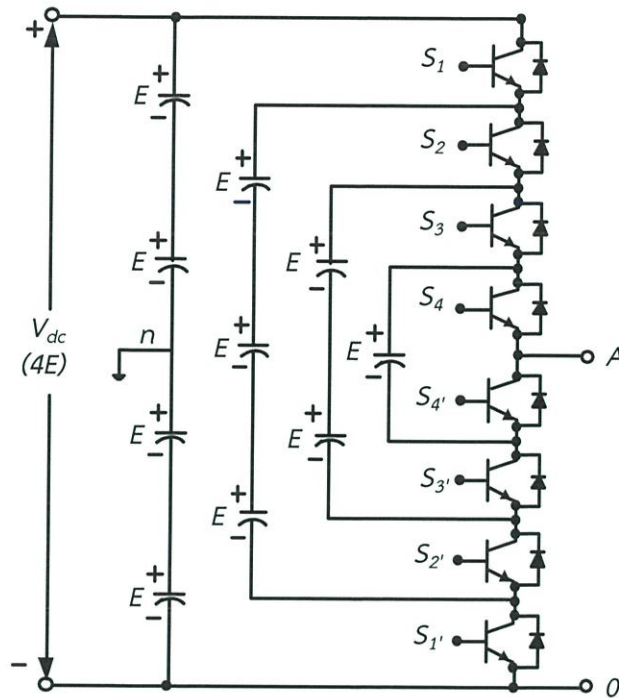
จากรูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยในที่นี้อุปกรณ์สวิตช์กำลังถูกสมมติให้เป็นสวิตช์ในอุดมคติ อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) จะสามารถสร้างแรงดันได้ 2 ค่า เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง ซึ่งจุดอ้างอิงในที่นี้ คือ ขาลบของตัวเก็บประจุ (Negative DC-link) ขณะที่อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ดังแสดงในรูป 2.11 (ข) จะสามารถสร้างแรงดันได้ 3 ค่า เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง ขณะที่อินเวอร์เตอร์ n ระดับ ดังรูปที่ 2.11 (ค) จะสามารถสร้างแรงดันได้ n ค่า เช่นเดียวกัน คุณสมบัติที่น่าสนใจของอินเวอร์เตอร์

- ในด้านของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จะให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงไซน์

- แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมีความผิดเพี้ยนน้อย และ dv/dt ต่ำ
- กระแสด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนน้อย
- สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานที่สวิตช์ซึ่งความถี่ต่ำ

ในการประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีหลากหลายรูปแบบทั้งใช้เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ แก๊วค่าฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า หรือใช้เป็นตัวจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟให้กับภาระทางไฟฟ้าแทนระบบเป็นต้น

อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ได้ทำการวิจัยและศึกษาอยู่ คือ อินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor Inverter, FCI) โดยวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับอินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor Inverter, FCI) จะมีส่วนประกอบหลัก คือ อุปกรณ์สวิตช์กำลังจำนวนมากและมีตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายอิสระจำนวนมาก เพื่อที่จะทำการสร้างระดับแรงดันเป็นรูปคลื่นขั้นบันไดโดยค่าแรงดันที่ได้นั้นเกิดจากการจัดเรียงแรงดันที่ตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายอิสระ ทำให้ได้ค่าระดับแรงดันมีค่าที่สูงขึ้น [5-6]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 5 ระดับ

จากรูปที่ 2.12 เมื่อพิจารณาอินเวอร์เตอร์หลายระดับฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ทำให้สามารถเห็นข้อจำกัด และข้อเด่น

ใช้แหล่งจ่าย DC-link เพียงแหล่งจ่ายเดียว อีกทั้งยังสามารถรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้เองโดยไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เฉพาะเพิ่มขึ้น จากข้อได้เปรียบที่กล่าวไว้ข้างต้นของ FCI ในปริญญานิพนธ์นี้จึงได้เลือกวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor Inverter, FCI) มาทำการศึกษาและวิจัย

2.4.1 ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิจัย

M	คือ จำนวนระดับของแรงดันเมื่อเทียบกับขั้วลบของดิซีลิงค์ (Voltage Level)
SW	คือ จำนวนสวิตช์กำลัง (Power Semi-conductor)
c	คือ จำนวนตัวเก็บประจุแบบฟลายอิง (Flying Capacitor)
k	คือ จำนวนระดับของแรงดันระหว่างสาย (Line Voltage)
p	คือ จำนวนระดับของแรงดันเฟสของภาระไฟฟ้า 3 เฟส (Phase Voltage)
f_m	คือ ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency)(Carrier Frequency) Of Inverter

f_{cr}	คือ ความถี่แคเรียร์ (Carrier Frequency)
$f_{sw,dev}$	คือ ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง (Frequency Switching Device)
$f_{sw,inv}$	คือ ความถี่ของการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching Frequency Of Inverter)
m_f	คือ อัตราส่วนระหว่าง f_{cr}/f_m (Frequency Modulation Index)
m_a	คือ อัตราการมอดดูเลตระหว่างสัญญาณมูลฐานและสัญญาณแคเรียร์
v_{cr}	คือ แรงดันสัญญาณแคเรียร์
v_m	คือ แรงดันสัญญาณมูลฐาน หรือสัญญาณไซน์
\hat{V}_{cr}	คือ แรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณแคเรียร์
\hat{V}_m	คือ แรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณมูลฐาน หรือแรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณไซน์

2.4.2 โครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์หรือเรียกว่าคาปาซิเตอร์แคลมป์ (Capacitor-clamped) แสดงดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 ซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 2 ส่วน คือ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง (Power Semi-conductor) โดยตัวเก็บประจุนอกสุดเรียกว่า คอมมอนดีซีลิงค์ (Common DC Link) เป็นตัวสะสมพลังงาน ขณะที่ตัวเก็บประจิวัดอื่นๆ เรียกว่า ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิง (Flying Capacitor) เป็นตัวสร้างแรงดันระดับต่างๆ โดยแรงดันที่ได้ในแต่ละระดับ เกิดจากผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงแต่ละตัว ที่ต่ออนุกรมกันในวงนั้น ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมแต่ละตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงในแต่ละตัว คือ 1E โดยอินเวอร์เตอร์ที่ศึกษาในปริญญานิพนธ์นี้เป็นอินเวอร์เตอร์ประเภท 5 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 ซึ่งสมการพื้นฐานของวงจรมินิเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์สามารถสรุปเป็นสมการ ได้ดังนี้

เมื่อทำการพิจารณาองค์ประกอบของวงจรมินิเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.13

$$SW = (m - 1) \times 2 \quad (2.8)$$

$$C = \frac{(m-1) \times (m-2)}{2} \quad (2.9)$$

$$m = \frac{SW}{2} + 1 \quad (2.10)$$

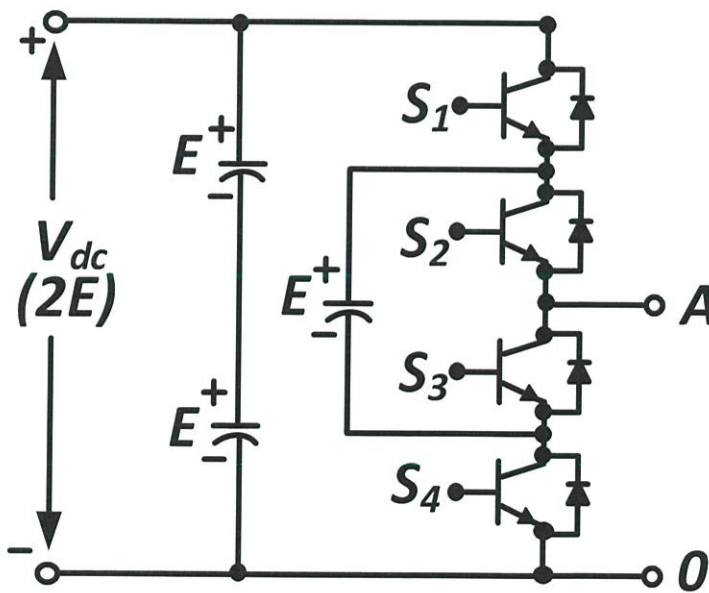
เมื่อทำการพิจารณาองค์ประกอบของวงจรในแบบ 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.14

$$SW = ((m - 1) \times 2) \times 3 \quad (2.11)$$

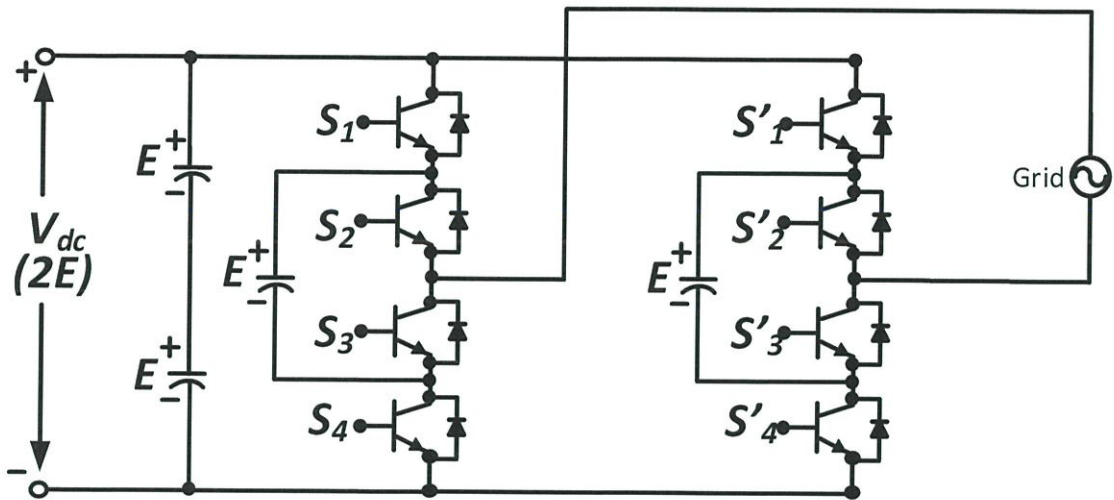
$$C = \left(\frac{(m-1) \times (m-2)}{2} \right) \times 3 \quad (2.12)$$

$$k = 2m - 1 \quad (2.13)$$

$$p = 2k - 1 \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.13 กิ่งหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์



รูปที่ 2.14 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบบริดจ์ 1 เฟส

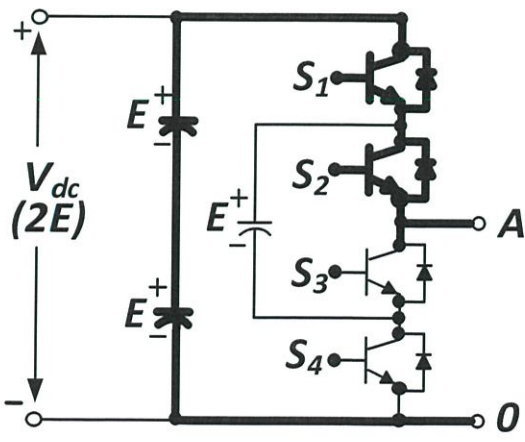
จากรูปที่ 2.14 เมื่อทำการกำหนดแหล่งจ่ายไฟ DC ให้มีค่าเท่ากับ V_{dc} โดยที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงในแต่ละตัวจะมีแรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุเท่ากัน คือ $1E$ ดังนั้นแรงดันของตัวเก็บประจุวงนอกสุดจะมีระดับแรงดันเป็น $2E$ และวงในสุดมีระดับแรงดัน $1E$ ตามลำดับโดยจะขึ้นอยู่กับการ “ON” และ “OFF” ของสวิตช์กำลังแต่ละตัว นอกจากนั้นระดับแรงดันขาออกเดียวกันยังสามารถสร้างได้หลายวิธี แต่มีผลการประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุแต่ละวงที่แตกต่างกัน โดยที่สามารถนำข้อมูลมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ของระดับแรงดันด้านขาออกได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การทำงานของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (1 เฟส)

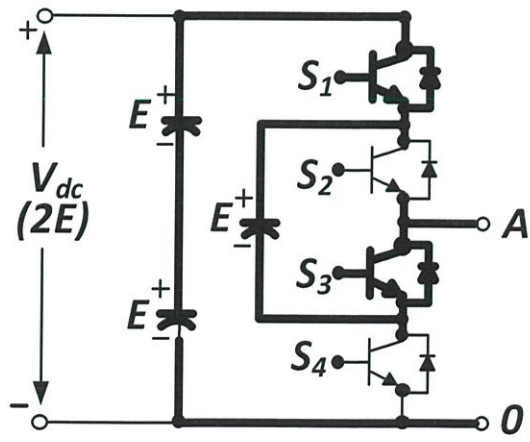
Switching states				Output voltage related of capacitor	Output phase voltage V_{A0}	C_1
S_1	S_2	S_3	S_4			
1	1	0	0	$2E$	$V_{dc} (2E)$	N
1	0	1	0	$2E-1E$	$1E$	-
0	1	0	1	$1E$	$1E$	+
0	0	1	1	0	0	N

- กำหนดให้ 1 คือ สถานะ SW-On
- 0 คือ สถานะ SW-Off
- N คือ ไม่ใช้งาน
- + คือ สถานการณ์การอัดประจุ (Charging Mode)
- คือ สถานการณ์การคายประจุ (Discharge Mode)

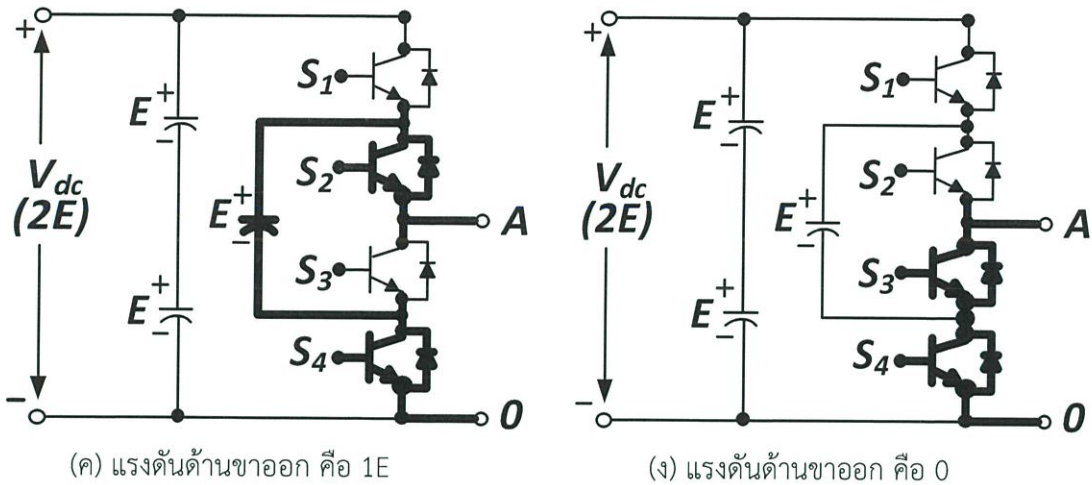
ข้อสังเกตการทำงานของสวิตช์กำลัง โดยพิจารณาที่ระดับแรงดันทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ คือ หากต้องการระดับแรงดันที่ $2E$ ก็ให้เลือกสวิตช์กำลังทำงาน 2 ตัว หรือถ้าต้องการระดับแรงดัน $1E$ ก็เลือกสวิตช์กำลัง 1 ใน 2 ตัวทำงาน จะเห็นได้ว่าลักษณะการทำงานของสวิตช์กำลังสามารถเลือกทำงานได้หลายแบบตามระดับแรงดันที่ต้องการ ซึ่งการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังจะเกิดการนำค่าสัญญาณมูลฐานกับสัญญาณแคเรียร์มาทำการเปรียบเทียบกัน ทำให้ได้เป็นสัญญาณขับเกต เพื่อนำไปขับสวิตช์กำลัง ซึ่งเรียกว่าวิธีมัลติเพล็กซ์ชอยดอลพัลส์วิตม็อดดูเลตชัน ซึ่งมีด้วยกันหลายเทคนิค โดยแบ่งตามลักษณะการจัดรูปแบบของสัญญาณแคเรียร์ สัญญาณขับเกตที่ได้จากการม็อดดูเลตในช่วง 1 cycle จึงมีโอกาที่จะทำให้สวิตช์กำลังทำงานไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลทำให้เกิดกำลังสูญเสียที่สวิตช์กำลังมีค่าไม่เท่ากันทำให้อัตราของกระแสการอัดประจุและคายประจุไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดระดับของแรงดันที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิง ในการใช้งานอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ จึงต้องคำนึงถึงการทำงานของสวิตช์กำลังเฉลี่ยเป็นหลัก ในรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างการสร้างระดับแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ในบางสถานะ [4-6]



(ก) แรงดันด้านขาออก คือ $2E$



(ข) แรงดันด้านขาออก คือ $1E$



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการสร้างระดับแรงดันด้านขาออกบางสถานะ

2.4.3 ข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

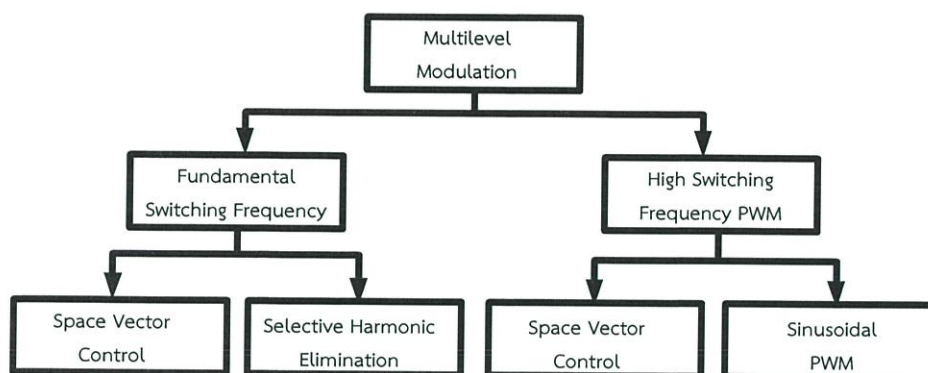
ข้อดี

- แรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังแต่ละตัวมีขนาดต่ำ จึงสามารถนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทนแรงดันต่ำมาสร้างแรงดันด้านขาออกที่สูงขึ้นได้
- ให้คุณภาพของรูปคลื่นของแรงดันขาออกที่มีคุณภาพสูงมีความใกล้เคียงไซน์โดยที่สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานที่สวิตช์ความถี่ต่ำ
- ด้านแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก จะมี dv/dt ต่ำซึ่งจะลดปัญหาเกี่ยวกับ EMC
- มีแรงดันโหมดผลร่วมต่ำ (Common Mode Voltage) จะช่วยลดผลสัญญาณรบกวนข้อเสีย
- ต้องใช้ตัวเก็บประจุในวงจรจำนวนมาก
- เนื่องจากใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังจำนวนมากทำให้ต้องใช้สัญญาณเกตจำนวนมากตามไปด้วย (ความน่าเชื่อถือของวงจรลดลง)

2.5 เทคนิคการพีดีบีเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

ในการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้น สามารถใช้ได้กับเทคนิคการมอดูเลตแบบต่างๆ ซึ่งเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาและนำมาใช้ในอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไป มีด้วยกันหลายแบบ ซึ่งสามารถแบ่งตามความถี่ของสวิตช์กำลังได้ดังในรูปที่ 2.16 เช่น มัลติเลเวลไซน์ซอชอยดอลพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน (Multilevel Sinusoidal Pulse Width Modulation,

SPWM) สเปซเวกเตอร์คอนโทรล (Space Vector Control, SVC) และมัลติเลเวลซีเลคทีฟฮาร์โมนิกส์อีลิมีเนชัน (Multilevel Selective Harmonic Elimination) เป็นต้น [4]

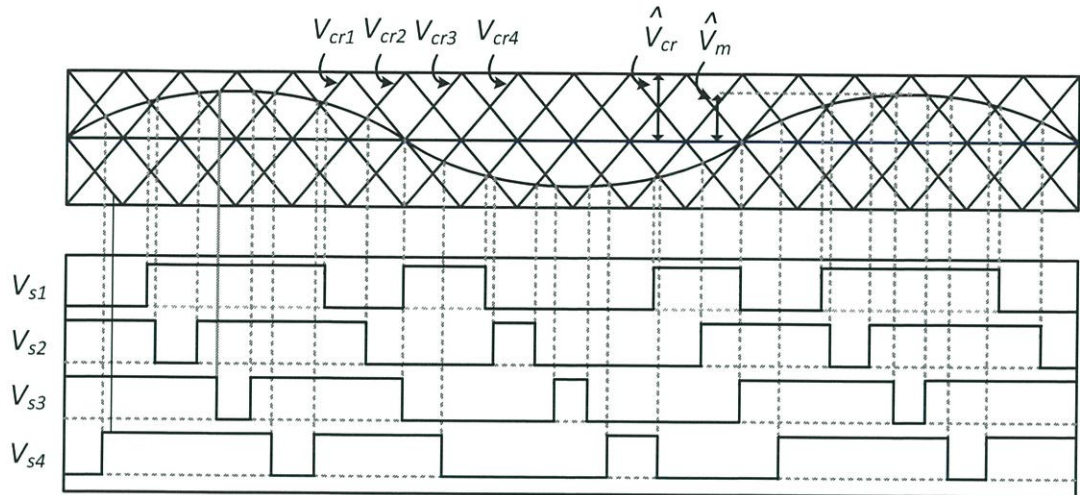


รูปที่ 2.16 รูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์

จากข้างต้นเทคนิคการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง ที่นำมาใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สามารถใช้ได้กับเทคนิคการมอดูเลตแบบต่างๆ แต่เทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณชั้บเกิดมากที่สุด คือ วิธีการมัลติเลเวลไซน์ซอชอยดอลพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน (Multilevel Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) [4] ซึ่งมีด้วยกัน 2 แบบ คือ เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (Phase-shifted Pulse Width Modulation) หรือเรียกว่า PSPWM และเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (Level-shifted Pulse Width Modulation) หรือเรียกว่า IPDPWM [4-6]

2.5.1 เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟส (Phase-shifted Multi-carrier PWM Scheme)

เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟส (Phase-shifted Multi-carrier PWM Scheme) ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่า PSPWM มีลักษณะของการจัดเรียงสัญญาณพาหะแบบเลื่อนเฟสเป็นมุมเท่าๆกันตามจำนวนของสัญญาณพาหะที่ใช้ โดยในรูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างของเทคนิค PSPWM ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบ 5 ระดับ ($m=5$) ดังนั้นจำนวนของสัญญาณพาหะที่ใช้จึงเท่ากับ $(m - 1) = 4$ สัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จากการนำเทคนิค PSPWM ไปใช้งาน มีผลทำให้ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Device Switching Frequency, $f_{sw,dev}$) มีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณพาหะ (Carrier Frequency, f_{cr})



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์

คุณสมบัติต่างๆที่ได้จากเทคนิค PSPWM [5]

- อัตราการมอดดูเลชัน

$$m_a = \hat{V}_m / \hat{V}_{cr} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq m_a \leq 1 \quad (2.15)$$

- อัตราส่วนจำนวนเท่าระหว่างความถี่สัญญาณพาหะและความถี่สัญญาณมูลฐาน

$$m_f = f_{cr} / f_m \quad (2.16)$$

- ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง(Frequency Switching Device)

$$f_{sw,dev} = f_{cr} \quad (2.17)$$

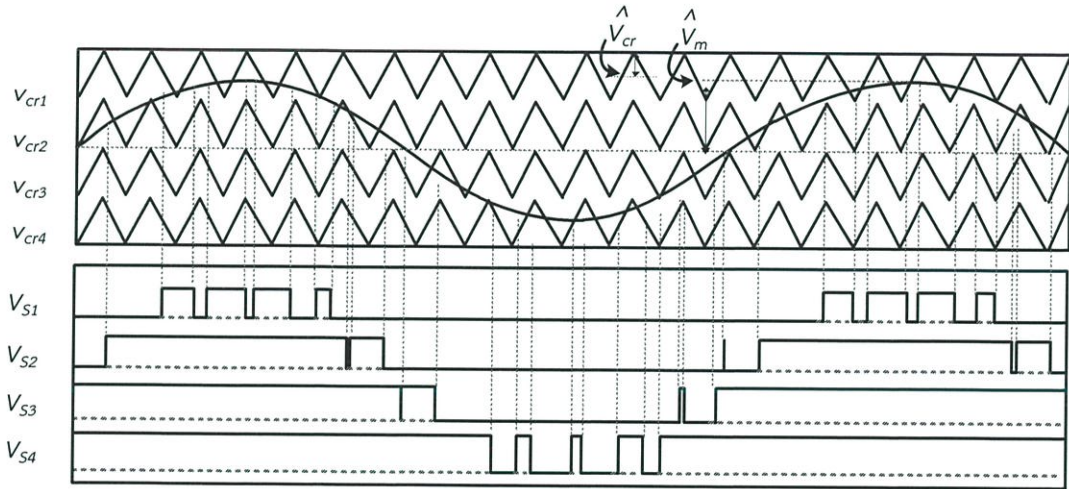
- ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching Frequency Of Inverter)

$$f_{sw,inv} = (m - 1)f_{sw,dev} \quad (2.18)$$

ซึ่งแรงดันด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์ FCI จะมีฮาร์โมนิกส์ปรากฏที่อันดับสูงคือ ปรากฏขึ้นบริเวณรอบๆ ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ $(m - 1)m_f = 4m_f$ จึงทำให้สามารถกรองฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำได้ง่าย โดยที่อินเวอร์เตอร์เป็นแบบสามเฟส มีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบไซน์ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งก็คือสัญญาณพาหะแบบเลื่อนเฟสจำนวน 4 สัญญาณ แล้วนำมาผลของสัญญาณพาหะจำนวน $(m - 1) = 4$ สัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณมีมุมเลื่อนเฟสกัน $\theta_{cr} = 360^\circ / (m - 1) = 90^\circ$ [6]

2.5.2 เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนระดับ (Level-shifted Pulse Width Modulation)

เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนระดับ (Level-shifted Pulse Width Modulation) ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่า IPDPWM มีลักษณะของการจัดเรียงมุมเฟสระหว่างสัญญาณแคเรียร์ $v_{cr1} - v_{cr4}$ เป็นแบบอินเฟสกัน (in-phase) โดยในรูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างของเทคนิค IPDPWM ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบ 5 ระดับ ($m=5$) ดังนั้นจำนวนของสัญญาณแคเรียร์ ที่ใช้จึงเท่ากับ $(m - 1) = 4$ สัญญาณ ด้วยคุณสมบัติของเทคนิค IPDPWM จากการนำไปใช้งานมีผลทำให้ความถี่ของการสวิตช์ซิงของอินเวอร์เตอร์ (Switching Frequency Of Inverter, $f_{sw,inv}$) จะเท่ากับความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ (Carrier Frequency, f_{cr})



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์

คุณสมบัติต่างๆของรูปแบบพีดับเบิลยูเอ็มด้วยวิธีเลื่อนระดับ (Level-shifted Multi-carrier PWM Scheme) สามารถสรุปได้ดังนี้ [5]

- อัตราการมอดดูเลชัน

$$m_a = \hat{V}_m / \hat{V}_{cr} (m - 1) \quad \text{เมื่อ } 0 \leq m_a \leq 1 \quad (2.19)$$

- อัตราส่วนจำนวนเท่าระหว่างความถี่สัญญาณพาหะและความถี่สัญญาณมูลฐาน

$$m_f = f_{cr} / f_m \quad (2.20)$$

- ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง(Frequency Switching Device)

$$f_{sw,dev} = \frac{f_{cr}}{m-1} \quad (2.21)$$

- ความถี่การสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์ (Switching Frequency Of Inverter)

$$f_{sw,inv} = f_{cr} \quad (2.22)$$

ซึ่งแรงดันด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์ FCI จะมีฮาร์มอนิกปรากฏที่อันดับสูงคือ ปรากฏขึ้นบริเวณรอบๆฮาร์มอนิกอันดับที่ m_f จึงทำให้สามารถกรองฮาร์มอนิกลำดับต่ำได้ง่าย โดยที่อินเวอร์เตอร์เป็นแบบสามเฟส มีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณไซน์ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งก็คือสัญญาณพาหะแบบเลื้อนระดับจำนวน 4 สัญญาณ แล้วนำผลของสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์กำลังในแต่ละเฟส โดยจำนวนระดับสัญญาณแคเรียร์หาได้จากจำนวนระดับของแรงดันที่ได้ในอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ จึงเป็น $(m - 1) = 4$ ระดับ

ตารางที่ 2.2 การหาค่ามอดดูเลตโดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ [6]

ค่ามอดดูเลต	IPDPWM	PSPWM
m_a	$\frac{\hat{V}_m}{\frac{m-1}{2} \hat{V}_{cr}}$	$\frac{\hat{V}_m}{\hat{V}_{cr}}$

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ สำหรับระบบ PV ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง

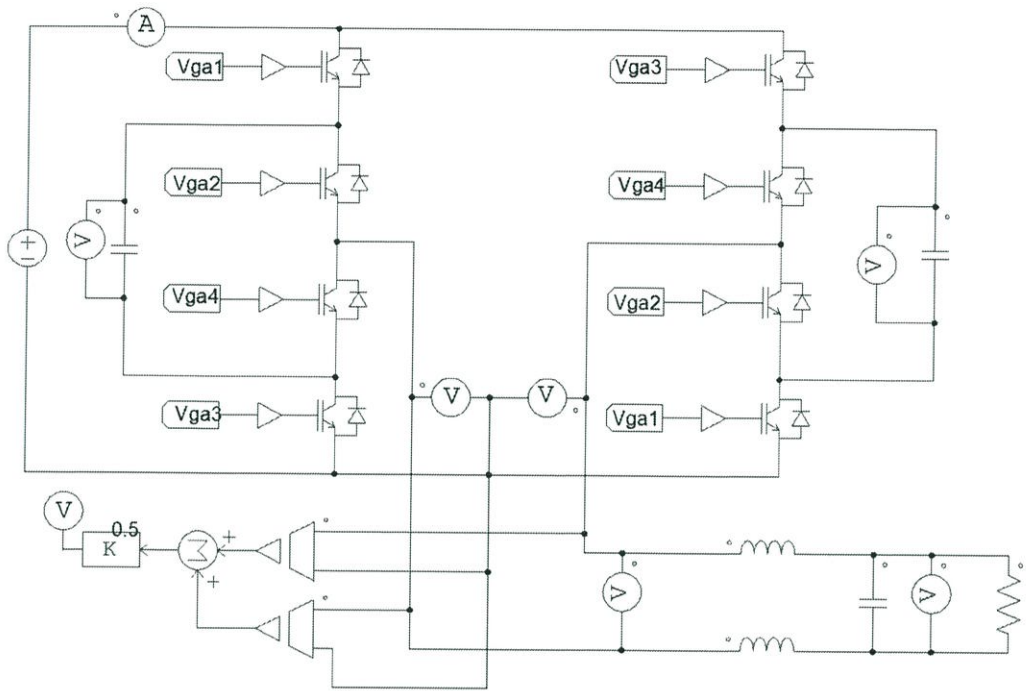
3.1 แบบจำลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง

จากรูปที่ 3.1 เป็นการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์อินเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม POWERSIM ในการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าได้ทำการจำลองเป็นแบบ 1 เฟส เชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า การทำงานของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ประกอบไปด้วยสวิตช์กำลังทั้งหมด 8 ตัว แหล่งจ่ายกระแสตรงแหล่งจ่ายเดียว โดยมีการนำวิธีพีดับเบิลยูเอ็มแบบหลายพหุชนิดเลื่อนเฟส (PSPWM) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 มาใช้ในการควบคุมสวิตช์กำลังในการสร้างแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่จะรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุให้มีค่าคงที่ โดยทำการกำหนดแรงดันดีซีลิงค์เท่ากับ 200 โวลต์

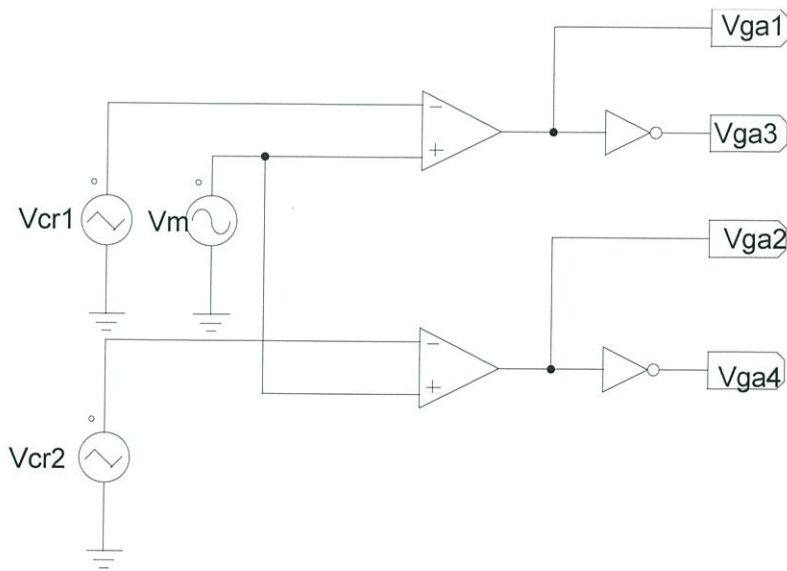
ในการจำลองการทำงานของระบบนั้นได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทดลอง

พารามิเตอร์	ขนาด
แรงดัน/ความถี่ระบบไฟฟ้า	230 V / 50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้า	2 kW
แรงดันขาเข้า	200 V
ความถี่ในการสวิตช์	18 kHz
ตัวเหนี่ยวนำ (L_f)	4 mH / ตัว
ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิง (C_1, C_2)	3300 uF



รูปที่ 3.1 แบบจำลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

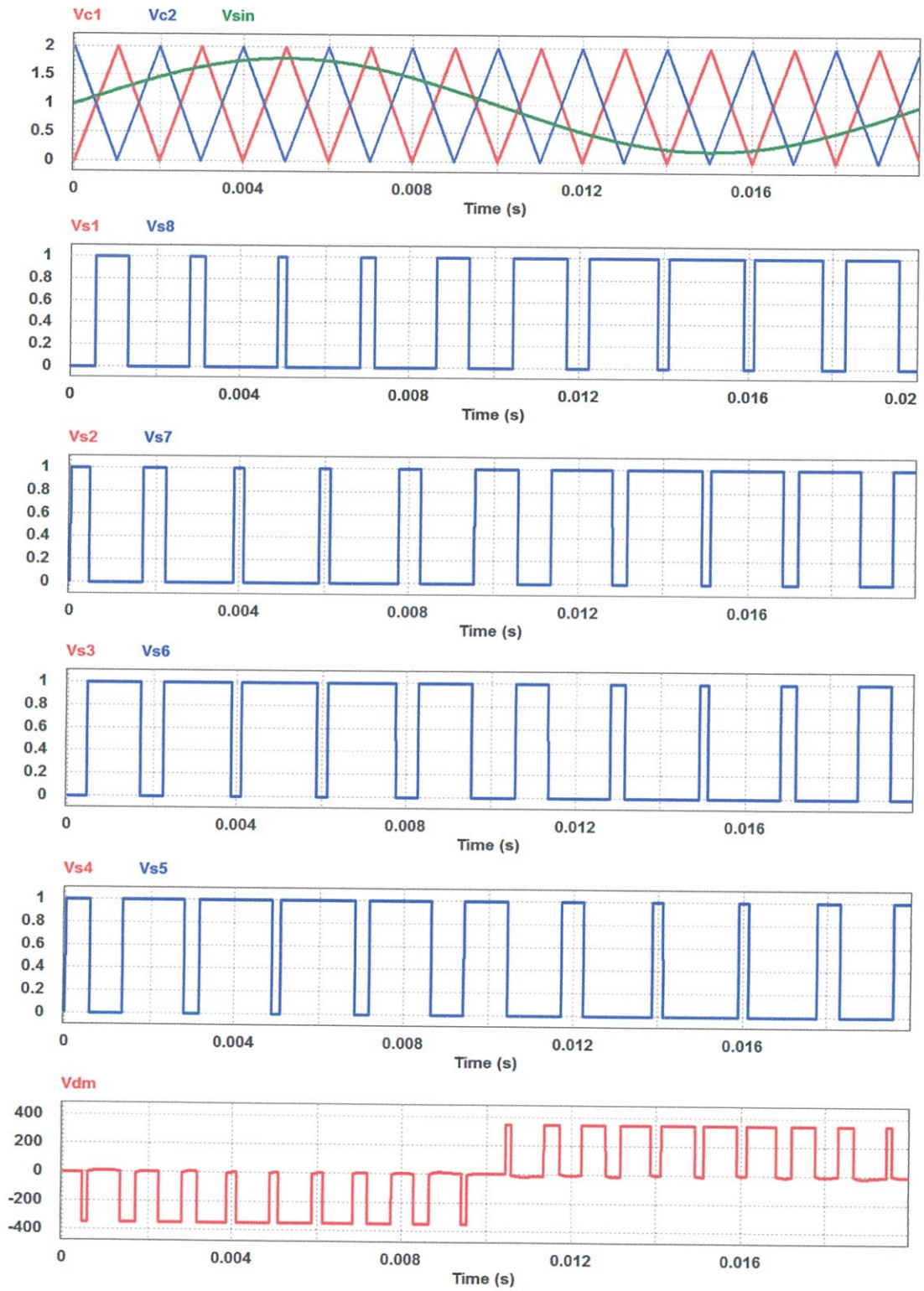


รูปที่ 3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM แบบ PSPWM

รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มโดยวิธีการสร้างนั้นเกิดจากเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงที่เป็นสัญญาณไซน์ ซึ่งได้จากฟลายอิงคาปาซิเตอร์อินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียว 3 ระดับ เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งก็คือสัญญาณพาหะแบบเลื่อนเฟสจำนวน 2 สัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณมีมุมเลื่อนเฟสเท่ากับ 180° แล้วนำผลของสัญญาณพัลส์ที่ได้นำไปใช้ในการควบคุมสวิตช์กำลัง

3.1.1 เทคนิคการมอดดูเลตเพื่อควบคุมแรงดันโหมตร่วม

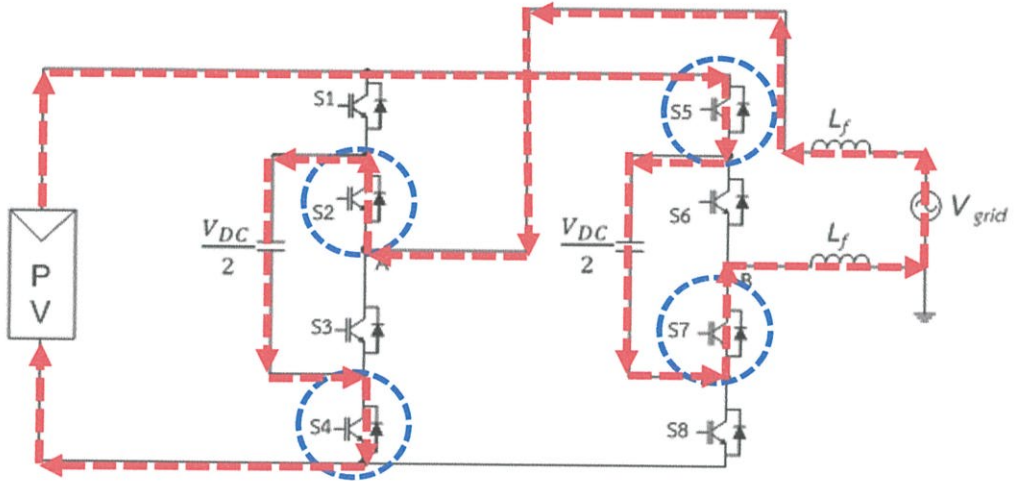
เทคนิคการมอดดูเลตเพื่อควบคุมแรงดันโหมตร่วม โดยใช้เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟส สามารถนำมาใช้กับโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ได้ โดยโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์นั้นมีการทำงานพร้อมกันของสวิตช์เป็นคู่ ทำให้สามารถสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์เพียง 4 สัญญาณเท่านั้น โดยที่ S1 กับ S8 ทำงานเหมือนกัน และทำงานตรงข้ามกับ S4 กับ S5 และ S2 กับ S7ทำงานเหมือนกัน และทำงานตรงข้ามกับ S3 กับ S6 โดยการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ แบ่งการทำงานเป็น 4 โหมต



รูปที่ 3.3 เทคนิคการมอดดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

โหมดที่ 1 สวิตช์ S2 , S4 , S5 และ S7 ทำงาน แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีเท่ากับ 0 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 แรงดันโหมตร่วมเท่ากับ

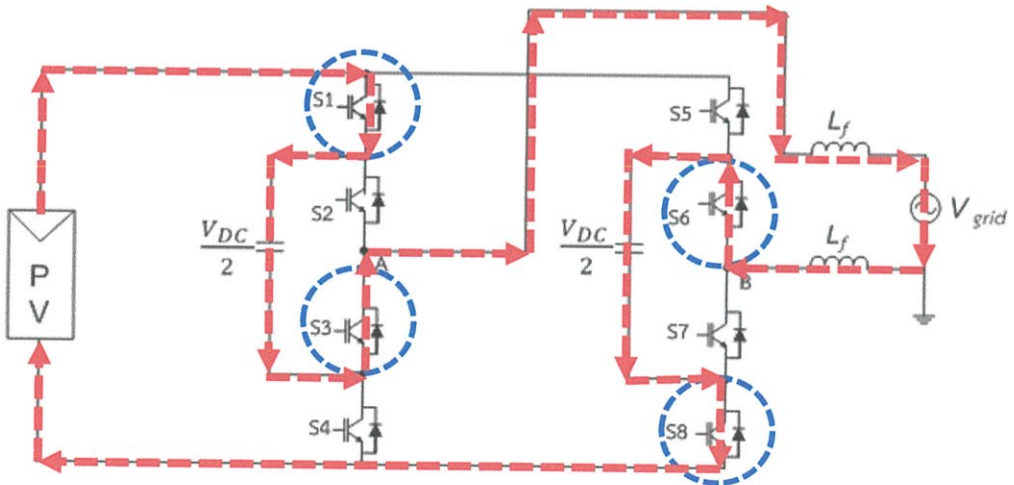
$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} = \frac{\frac{V_{DC}}{2} + \frac{V_{DC}}{2}}{2} = \frac{V_{DC}}{2}$$



รูปที่ 3.4 การทำงานของอินเวอร์เตอร์โหมดที่ 1

โหมดที่ 2 สวิตช์ S1 , S3 , S6 และ S8 ทำงาน แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีเท่ากับ 0 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 แรงดันโหมตร่วมเท่ากับ

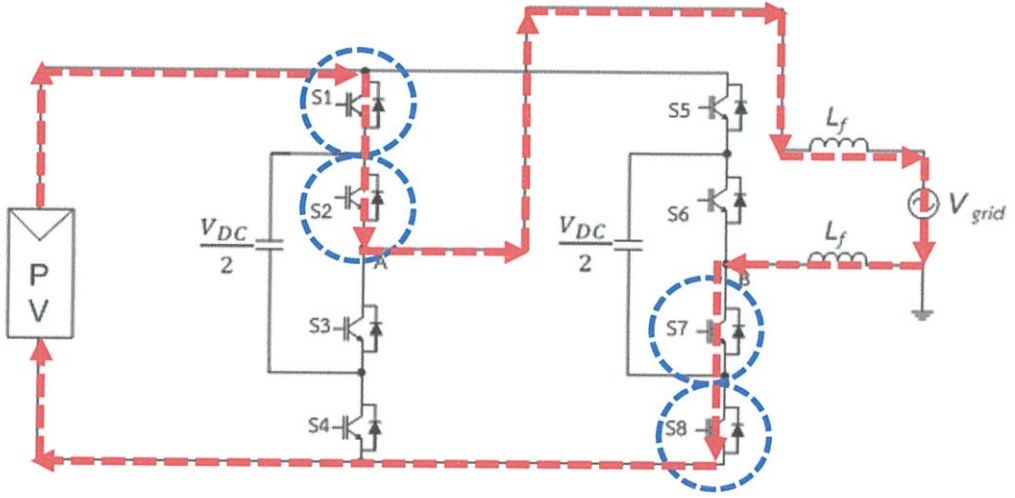
$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} = \frac{\frac{V_{DC}}{2} + \frac{V_{DC}}{2}}{2} = \frac{V_{DC}}{2}$$



รูปที่ 3.5 การทำงานของอินเวอร์เตอร์โหมดที่ 2

โหมดที่ 3 สวิตช์ S1 , S2 , S7 และ S8 ทำงาน แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีเท่ากับ V_{DC} ดังแสดงในรูปที่ 3.6 แรงดันโหมตร่วมเท่ากับ

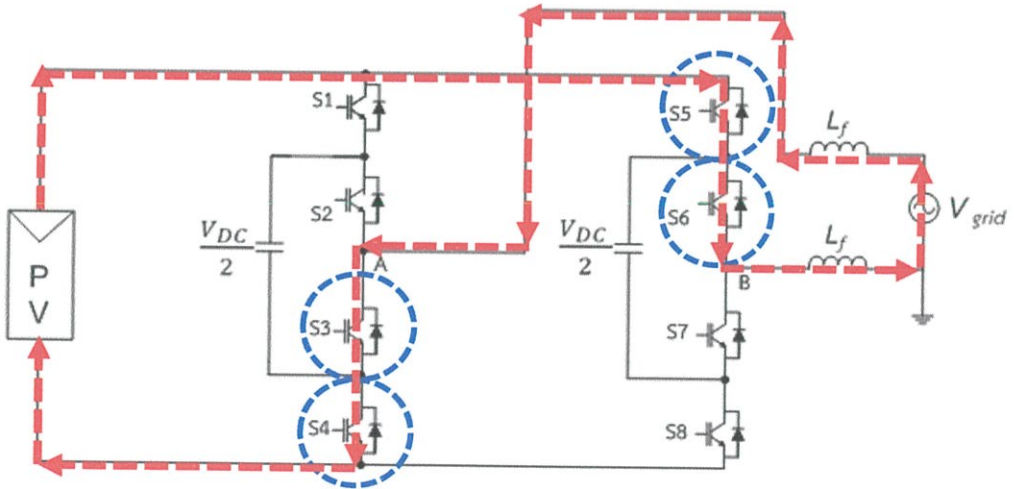
$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} = \frac{V_{DC} + 0}{2} = \frac{V_{DC}}{2}$$



รูปที่ 3.6 การทำงานของอินเวอร์เตอร์โหมดที่ 3

โหมดที่ 4 สวิตช์ S3 , S4 , S5 และ S6 ทำงาน แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีเท่ากับ $-V_{DC}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 แรงดันโหมตร่วมเท่ากับ

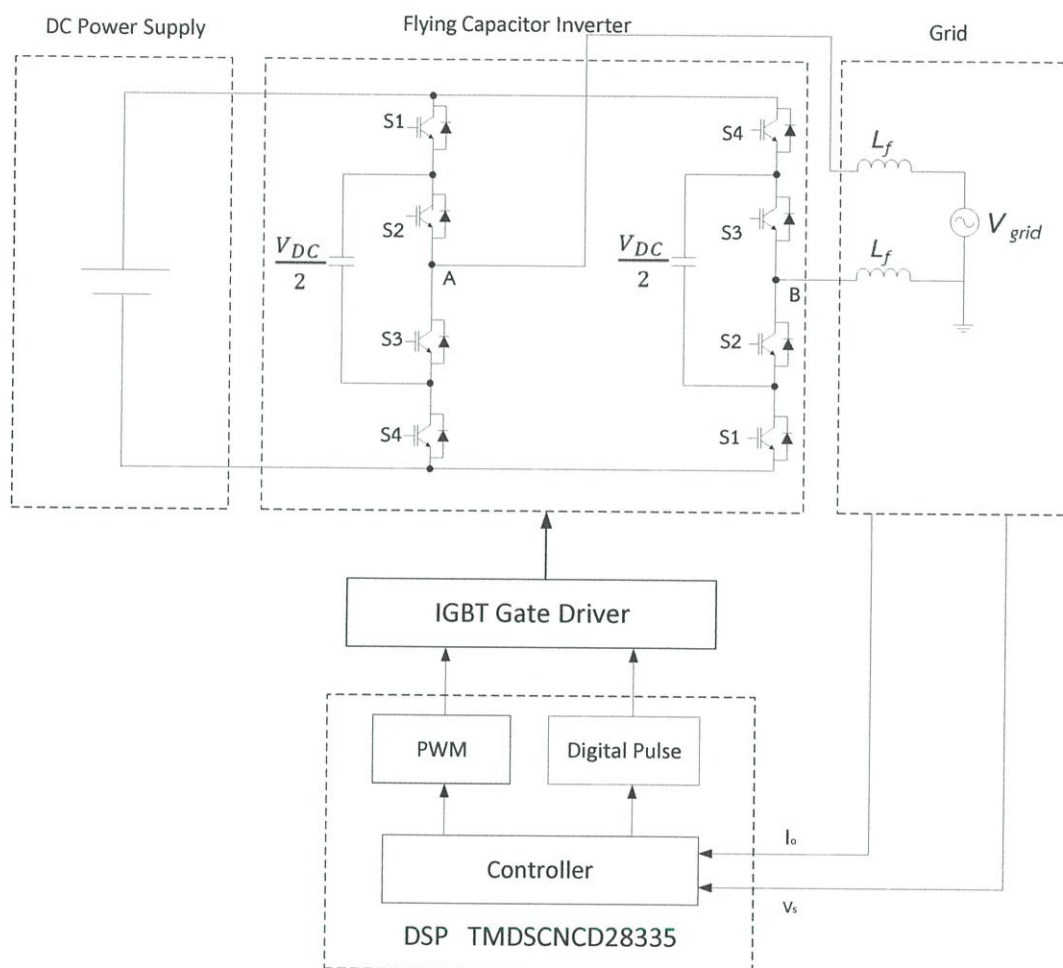
$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} = \frac{0 + V_{DC}}{2} = \frac{V_{DC}}{2}$$



รูปที่ 3.7 การทำงานของอินเวอร์เตอร์โหมดที่ 4

3.2 โครงสร้างระบบควบคุม PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง

บทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบควบคุมและวงจรกำลังสำหรับ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง โดยเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์ชุดวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแส วงจรขับนำเกต และตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)

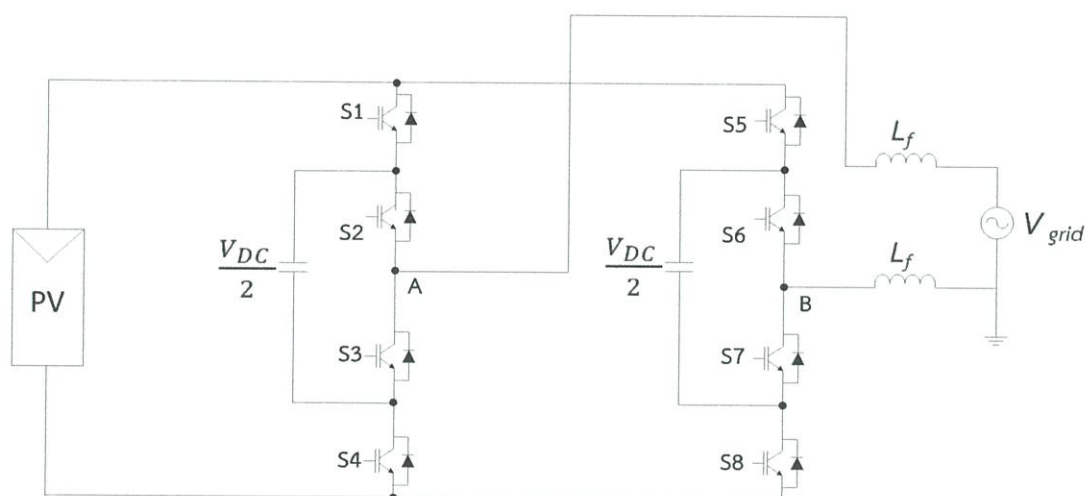


รูปที่ 3.8 โครงสร้างของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง

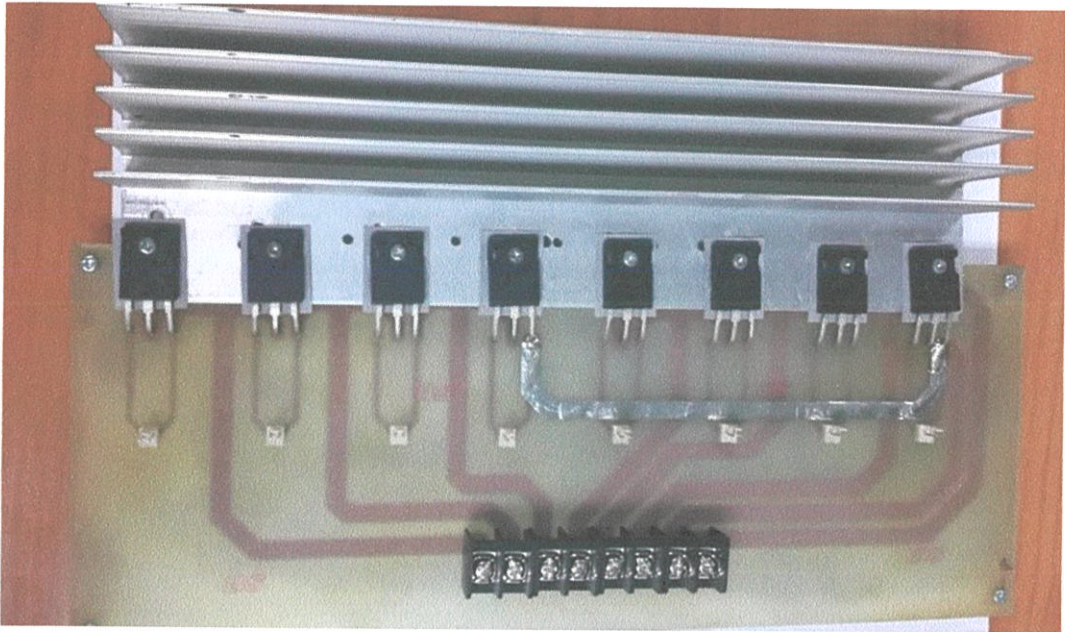
3.3 การออกแบบอินเวอร์เตอร์

3.3.1 วงจรสวิตช์กำลัง

วงจรสวิตช์กำลังของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงได้ออกแบบที่พิกัด 2 kW และพิกัดแรงดัน 200 V และยังได้มีการพัฒนาโครงสร้างให้มีความสามารถในการจำกัดกระแสรั่วไหลโดยรวม โดยมีการประยุกต์โดยนำโครงสร้างของอินเวอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์มาต่อแบบบริดจ์ 1 เฟส ซึ่งประกอบไปด้วยสวิตช์กำลังทั้งหมด 8 ตัว โดยสวิตช์กำลังแต่ละตัวจะใช้ IGBT เบอร์ G20N60B3D ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 600 V และพิกัดกระแส 40 A ซึ่งพิกัดแรงดันดังกล่าวเพียงพอสำหรับแรงดันขาเข้าเนื่องจากสวิตช์กำลังแต่ละตัวสามารถรับแรงดันเพียง $V_{DC}/2$ ตลอดช่วงเวลาการทำงาน

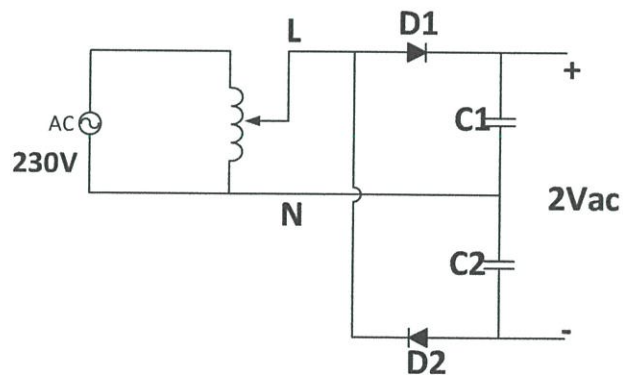


รูปที่ 3.9 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FCI)

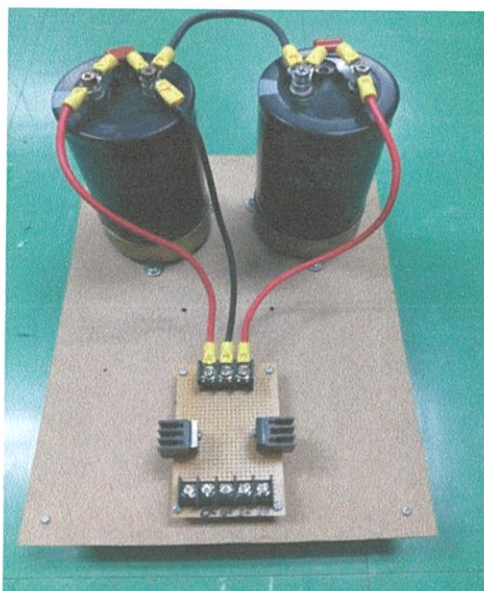


3.3.2 แหล่งจ่ายแรงดันกระแสไฟฟ้ากระแสตรง

เนื่องจากการทดลองนี้ยังไม่ได้มีการต่อโดยตรงกับแผงโซลาร์เซลล์ จึงมีการทดสอบการทำงานโดยใช้วงจรหม้อแปลงแรงดันที่ทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้า แล้วแปลงแรงดันขาออกเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและมีค่าเป็นสองเท่าของแรงดันขาเข้า ซึ่งในวงจรประกอบไปด้วยไดโอดจำนวน 2 ตัว และตัวเก็บประจุ 2 ตัว



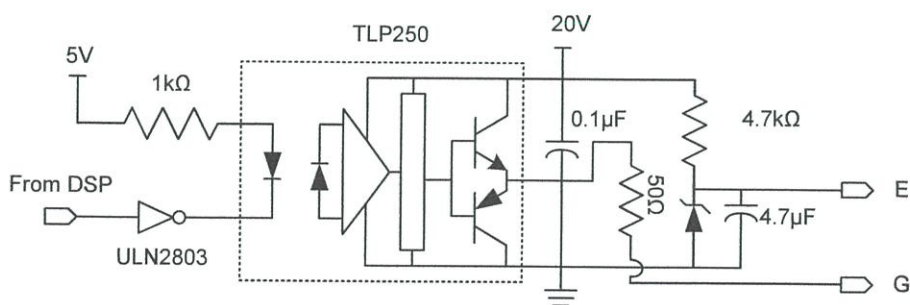
รูปที่ 3.11 วงจรหม้อแปลงแรงดัน



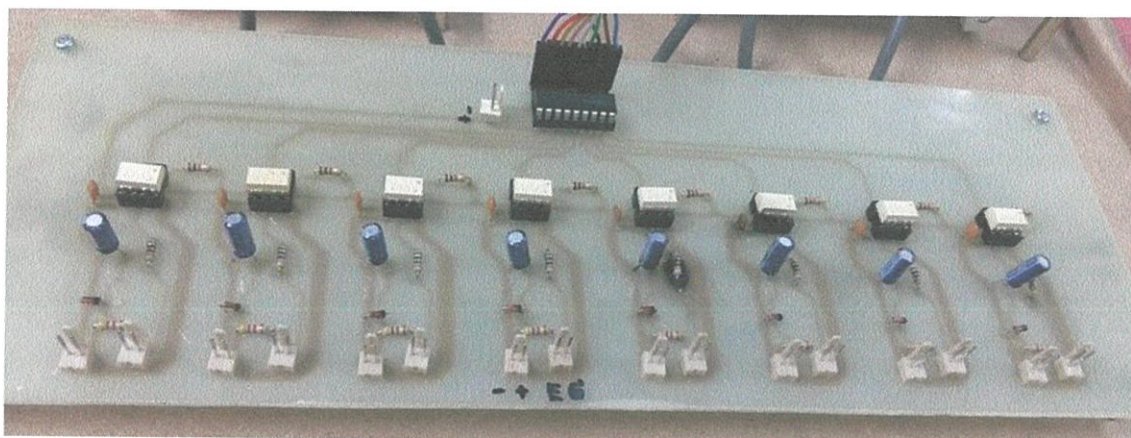
รูปที่ 3.12 วงจรทวีแรงดันที่สร้างขึ้น

3.3.3 วงจรขับนำเกต

วงจรขับนำเกต แสดงในรูปที่ 3.13 จะใช้ไอซีเบอร์ TLP250 ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถแยกโหนดทางแสงเพื่อแยกกราวด์ระหว่างสัญญาณควบคุมและสัญญาณขับสวิตช์ได้ และสามารถทำงานที่ความถี่สูงสุด 25 kHz ในส่วนของสัญญาณควบคุมจะรับสัญญาณจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ส่งต่อไปยังวงจรบัฟเฟอร์เพื่อช่วยในการรับกระแสที่มากขึ้นได้ ในส่วนของสัญญาณขับสวิตช์จะรับแรงดันจากแหล่งจ่ายภายนอก ซึ่งจะใช้ขนาดแรงดันเท่ากับ 20 V และจะมีการต่อซีเนอร์ไดโอด 5.1 V ไว้ที่ขาอีมีเตอร์ของ IGBT เพื่อสร้างแรงดัน -5 V ที่ขาเกตกับขาอีมีเตอร์ขณะหยุดทำงาน และมีแรงดัน 15 V ที่ขาเกตกับขาอีมีเตอร์ขณะทำงาน



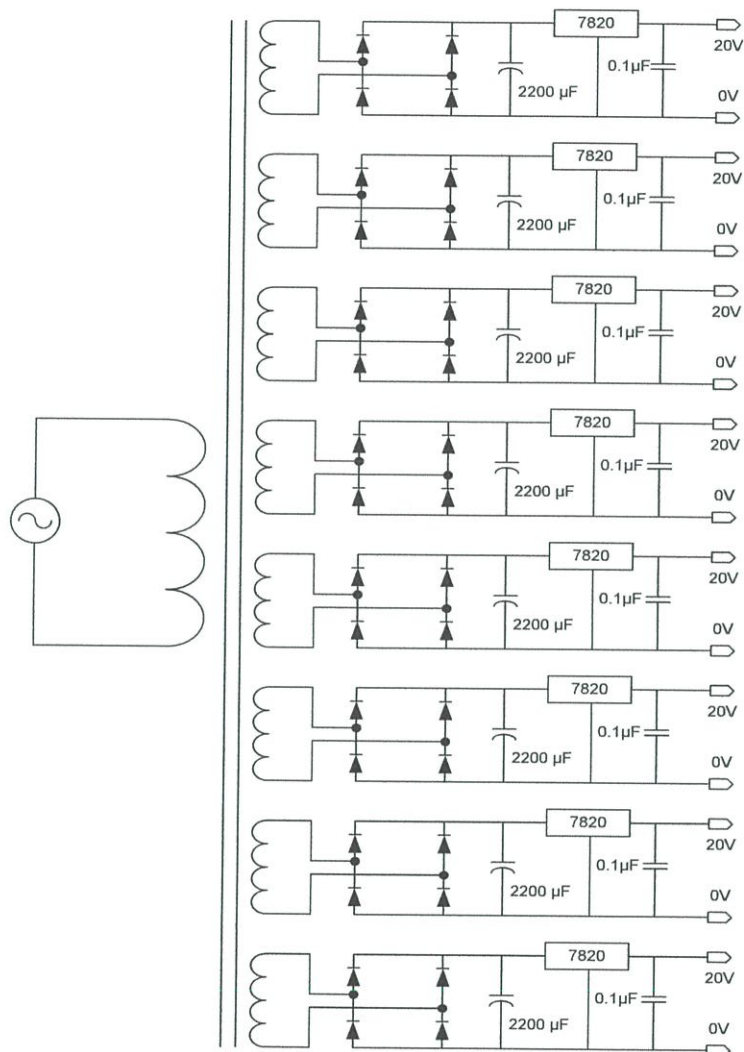
รูปที่ 3.13 วงจรขับนำเกต



รูปที่ 3.14 วงจรขับนำเกตที่สร้างขึ้น

3.3.4 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรขับนำเกต

วงจรเรียงกระแสจะใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันต้นกระแสตรงสำหรับขับนำเกต ซึ่งจำเป็นต้องใช้แรงดัน 20 V จำนวน 8 ชุดเท่ากับจำนวนสวิตช์กำลัง



รูปที่ 3.15 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรขับนำเกต



รูปที่ 3.16 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรขับนำเกตที่สร้างขึ้น

3.3.5 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรกรองกระแส

การเชื่อมต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์กับระบบไฟฟ้านั้นต้องทำการเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำที่เป็นวงจรกรอง ซึ่งทำหน้าที่กรองระลอกคลื่นกระแสที่เกิดจากสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ทำให้ระลอกคลื่นมีลักษณะเรียบมากขึ้น โดยค่าตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

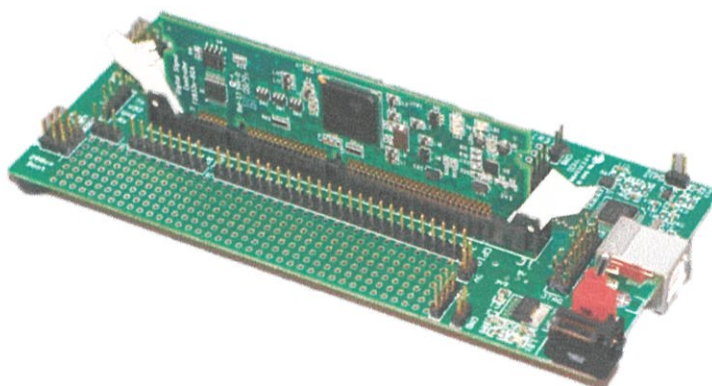
$$f_c = \frac{0.25V_{DC}}{(HB)L} \quad (3.1)$$

- โดยที่ f_c คือ ความถี่ในการสวิตช์
 V_{DC} คือ แรงดันดีซีขาเข้า
 HB คือ ขอบเขตฮีสเตอร์รีสของกระแส
 L คือ ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรกรองกระแส

โดยกำหนดค่าในการหาตัวเหนี่ยวนำ ดังนี้ ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 18 kHz แรงดันดีซีขาเข้าเท่ากับ 200 V และขอบเขตฮีสเตอร์รีสของกระแสเท่ากับ 0.7 A ดังนั้นจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 4 mH

3.4 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing, DSP)

ในปฏิยานิพนธ์เลือกใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ของบริษัท Texas Instruments ซึ่งเป็นชุด C2000™ Experimenter's Kit ซึ่งชุดนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆสองส่วนคือ ส่วน docking station จะเป็นส่วนที่ต่อขาอินพุตเอาท์พุต และชุดไฟเลี้ยง อีกส่วนคือ controlCARD ซึ่งตัว controlCARD ในที่นี้ใช้รุ่น F28335 ซึ่งมีความเร็วในการประมวลผลที่ 150 MHz



รูปที่ 3.17 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)

บทที่ 4

ผลการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง

4.1 บทนำ

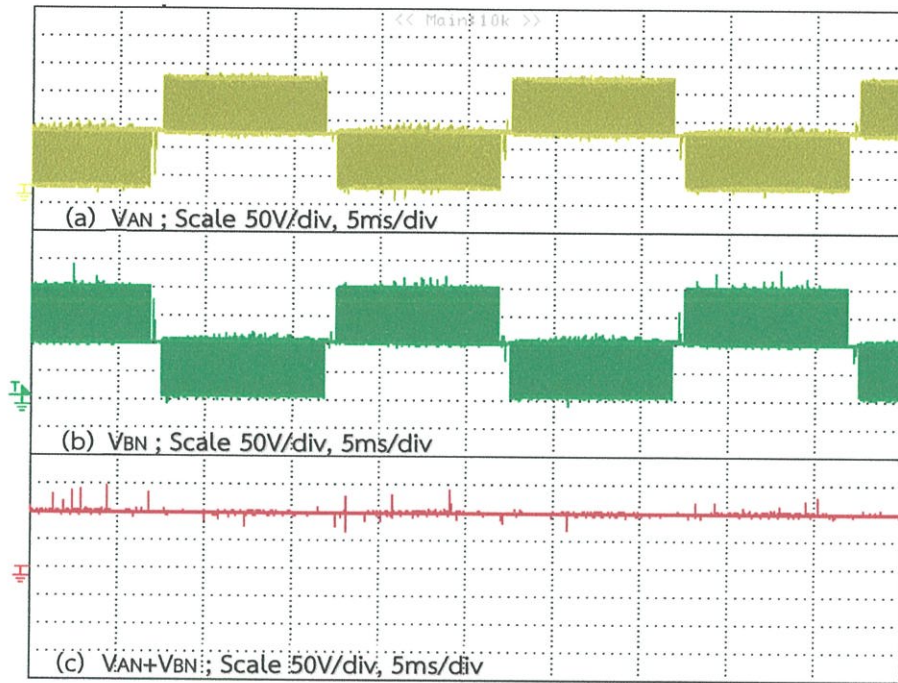
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์และผลการจำลองของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงด้วยอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยใช้โปรแกรม POWERSIM ที่ใช้เทคนิคการควบคุมชนิดพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟส (Phase-Shift Pulse Width Modulation) สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยใช้ภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเฟสตรงกัน เฟสนำหน้า และเฟสล้าหลัง เพื่อทำการพิสูจน์ว่าแรงดันโหมตร่วมของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงด้วยอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ และสามารถรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุชนิดฟลายอิงให้มีความเท่ากันเสมอทำให้กระแสรั่วไหลน้อย และยังทำให้กระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์รูปร่างใกล้เคียงสัญญาณไซน์ และการกระเพื่อมของกระแสมีค่าน้อย

4.2 ผลการทดลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์เกี่ยวกับการควบคุมแรงดันโหมตร่วม

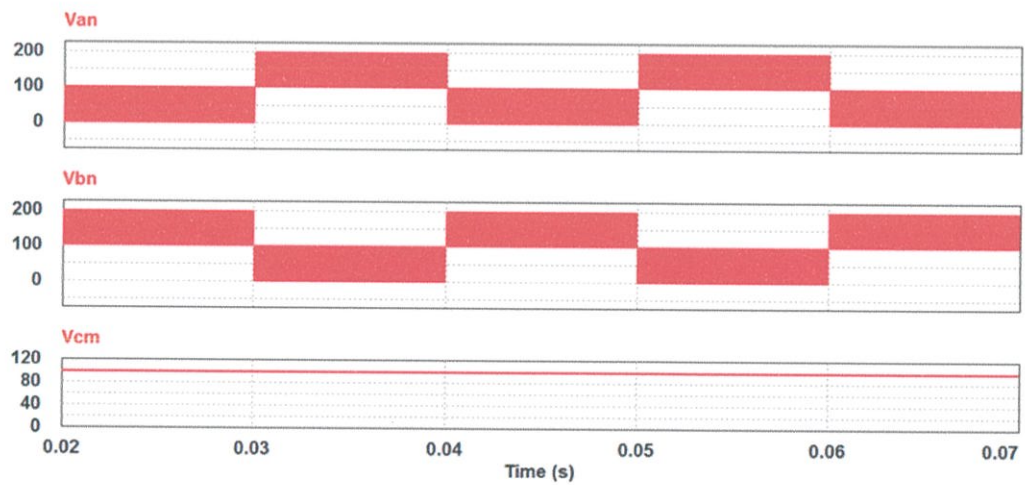
4.2.1 ผลการทดลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟสตรงกัน

การควบคุมกระแสโหมตร่วมนั้น สามารถทำได้โดยการควบคุมแรงดันโหมตร่วมให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาการทำงาน ซึ่งค่าแรงดันที่ถูกรักษาให้คงที่นั้นจะมีค่าเท่ากับ $V_{DC}/2$ ผลการทดลองการทำงานของ V_{AN} V_{BN} และ V_{cm} ดังแสดงในรูป 4.1 ในขณะที่ผลการจำลองจะแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งทั้งผลการทดลองและผลจำลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันโหมตร่วม V_{cm} ถูกควบคุมให้สามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ที่ครึ่งหนึ่งของแรงดันขาเข้า ตลอดทั้งช่วงเวลาการทำงานที่ความถี่ของระบบไฟฟ้า และเมื่อทำการพิจารณาที่ความถี่สวิตชิง V_{AN} และ V_{BN} มีการเสริมกันอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการทำงาน และแรงดันโหมตร่วม ยังคงรักษาระดับแรงดันให้คงที่ที่ $V_{DC}/2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 เป็นผลการจำลอง

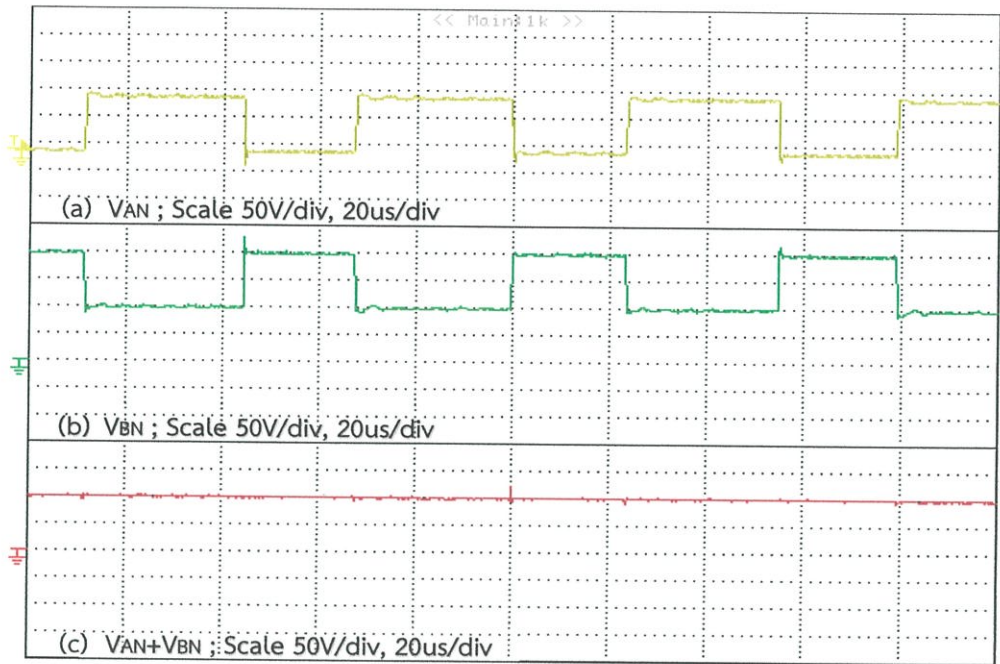
กำหนดให้ค่าภาระทางไฟฟ้ามีค่า $R=80.6667$ Ohm



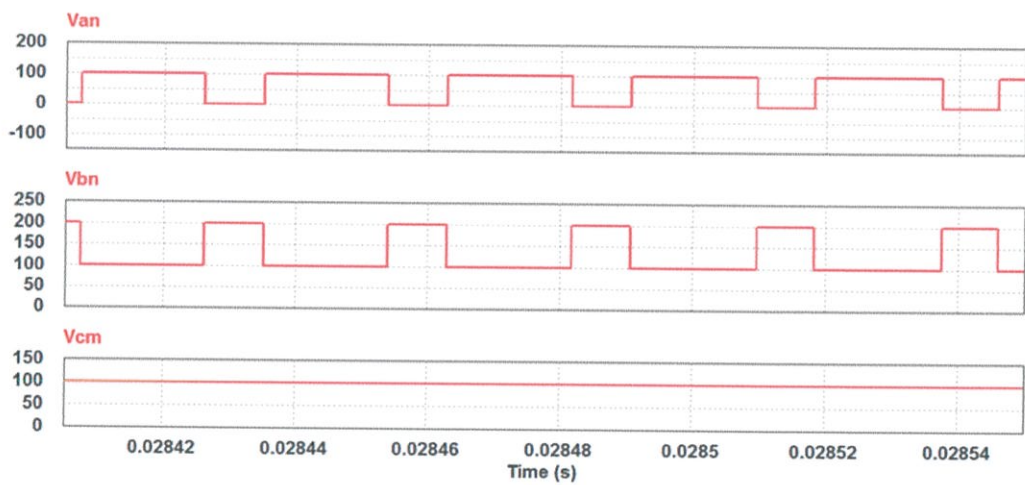
รูปที่ 4.1 ผลการทดลองของ V_{AN} , V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ของโหนดที่มีเฟสตรงกัน



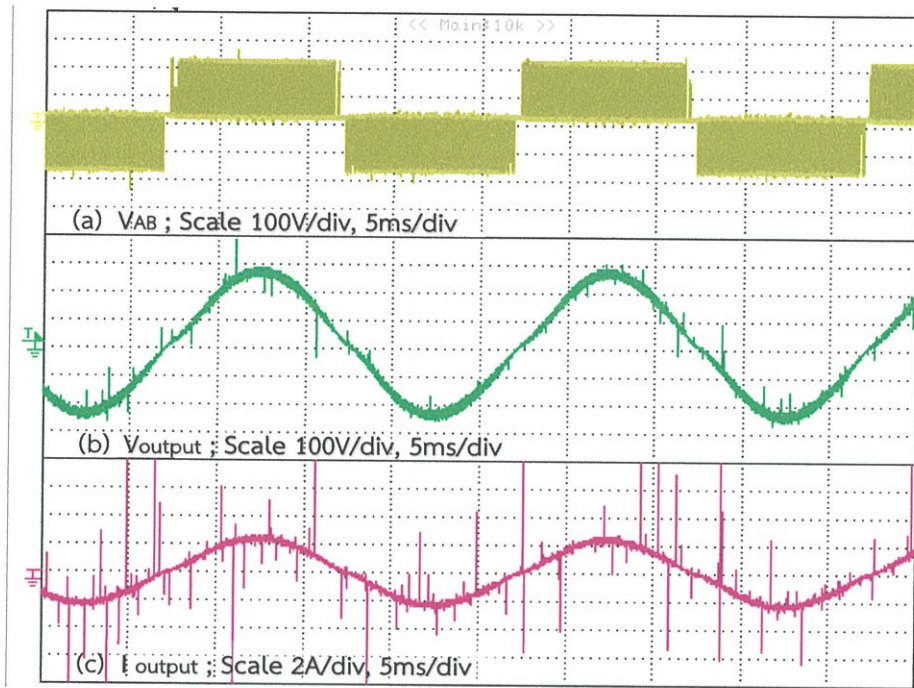
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองของ V_{AN} , V_{BN} และแรงดันโหนดร่วม (V_{cm}) ของโหนดที่มีเฟสตรงกัน



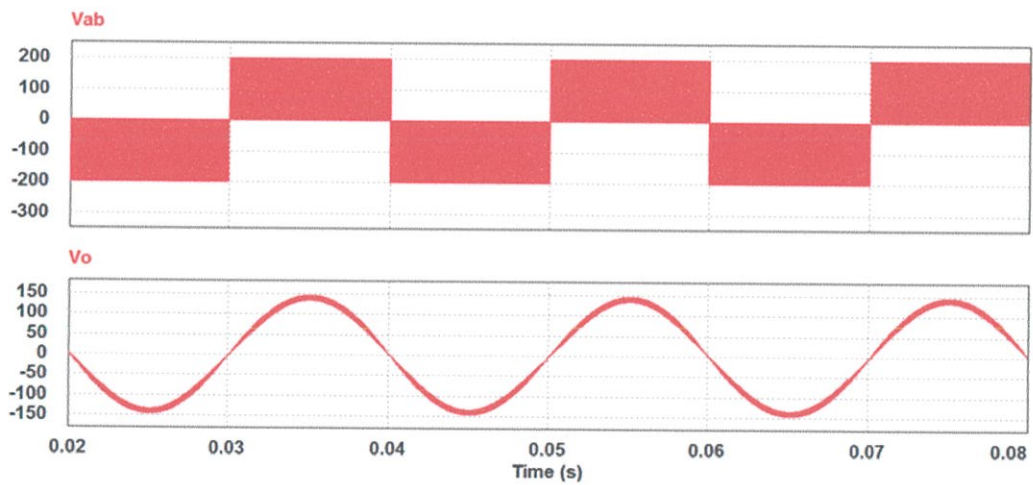
รูปที่ 4.3 ผลการทดลองของ V_{AN} , V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ที่ความถี่สวิตชิงของโหนดที่มีเฟสตรงกัน



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองของ V_{AN} , V_{BN} และแรงดันโหมตร่วม (V_{cm}) ที่ความถี่สวิตชิงของโหนดที่มีเฟสตรงกัน

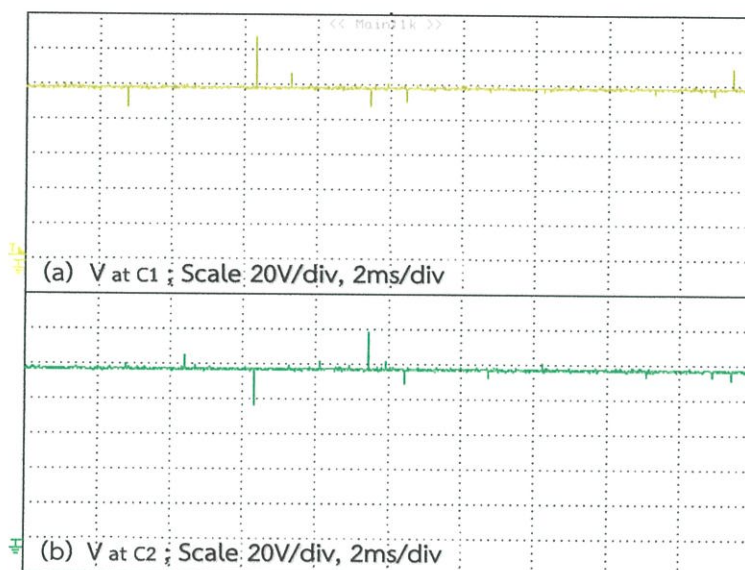


รูปที่ 4.5 ผลการทดลองของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}), แรงดันขาออก (V_o) และกระแสขาออก (I_o) ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน

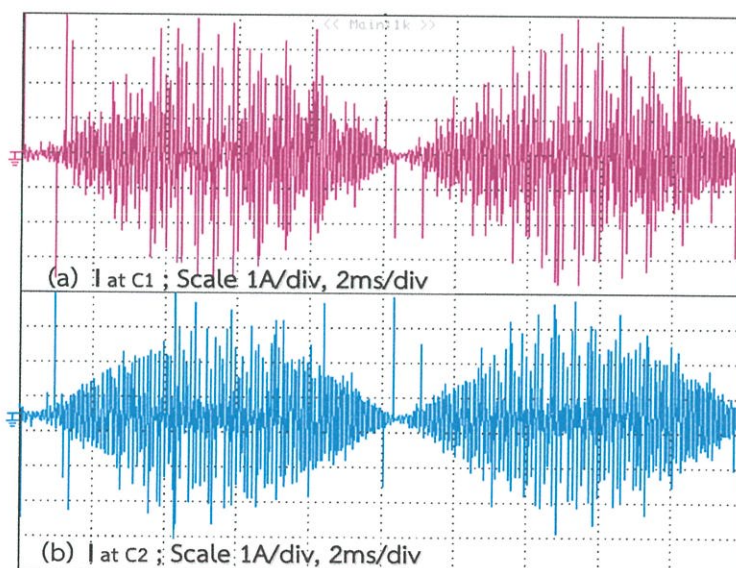


รูปที่ 4.6 ผลการจำลองของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}), แรงดันขาออก (V_o) ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน

รูปที่ 4.5 แสดงแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}) ซึ่งมีระดับแรงดันอยู่ที่ 3 ระดับ เนื่องจาก V_{AN} และ V_{BN} ที่ได้มีลักษณะอินเวอร์ตกันเพื่อให้แรงดันโหมตร่วมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นแรงดันโหมตต่างหรือแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์จึงมีระดับแรงดันอยู่ที่ 3 ระดับ ในขณะที่แรงดันขาออกจะมีรูปร่างสัญญาณไซน์ ซึ่งผลการจำลองจะแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองของแรงดันตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน



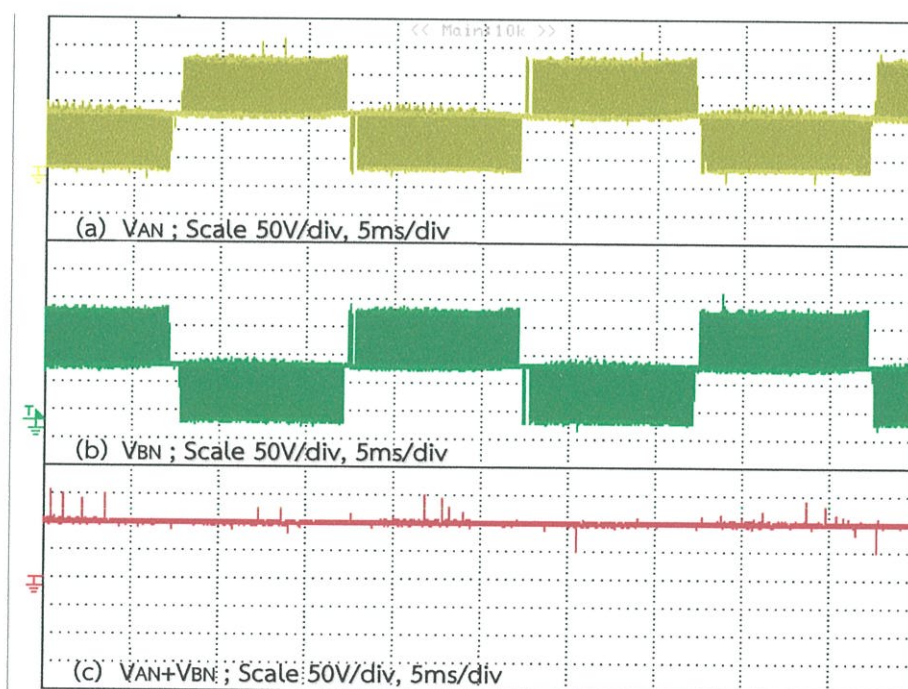
รูปที่ 4.8 ผลการทดลองของกระแสตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟสตรงกัน

รูปที่ 4.7 เป็นผลการทดลอง แสดงลักษณะแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสำหรับ อินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ซึ่งมีระดับแรงดันคงที่ที่ $V_{DC}/2$ แสดงให้เห็นว่า การลดแรงดัน โหมดร่วมโดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสนั้น สามารถรักษาระดับแรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์ให้คงที่ได้

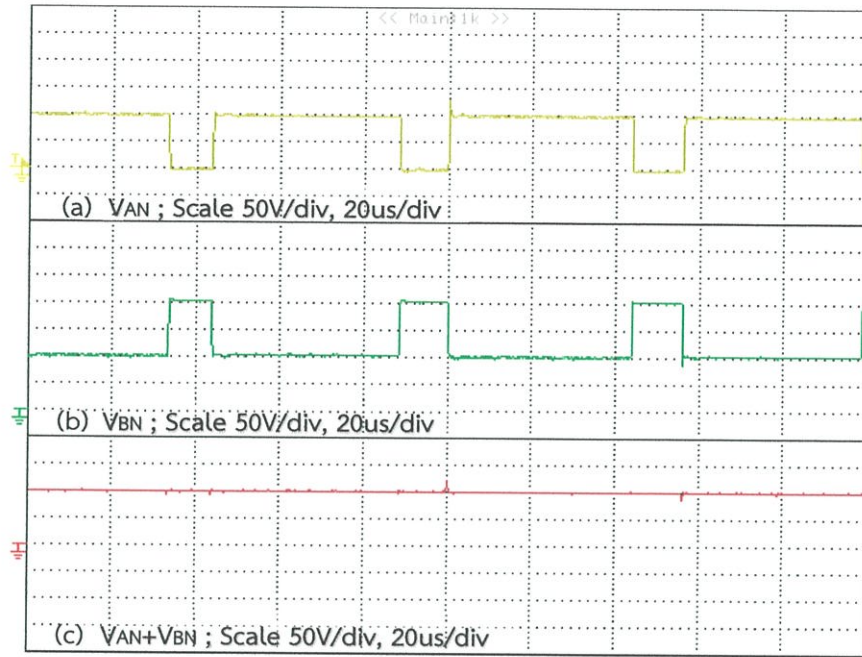
4.2.2 ผลการจำลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟสล่า หลัง

กำหนดให้ค่าภาระทางไฟฟ้ามีค่า $R=95 \text{ Ohm}$ และ $L=0.216 \text{ mH}$

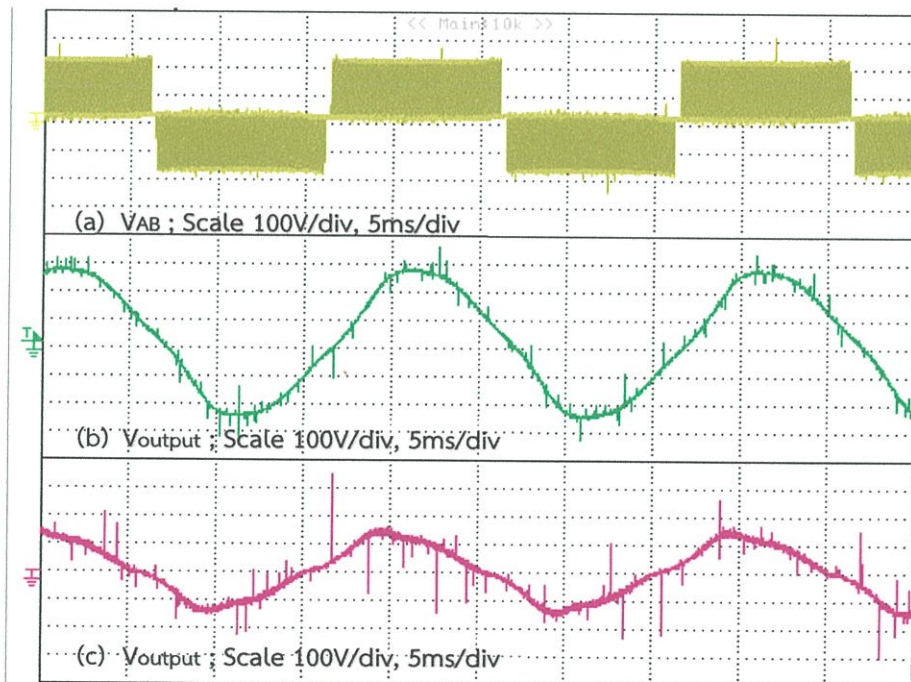
ผลการทดลองเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟสล่าหลังจะพบว่าผลการทดลองที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟสตรงกัน นั่นแสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันโหมดร่วมให้มีค่าคงที่ได้ โดยมีค่าเท่ากับ $V_{DC}/2$ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ได้ที่ค่า $V_{DC}/2$ ได้ตลอดช่วงการทำงาน



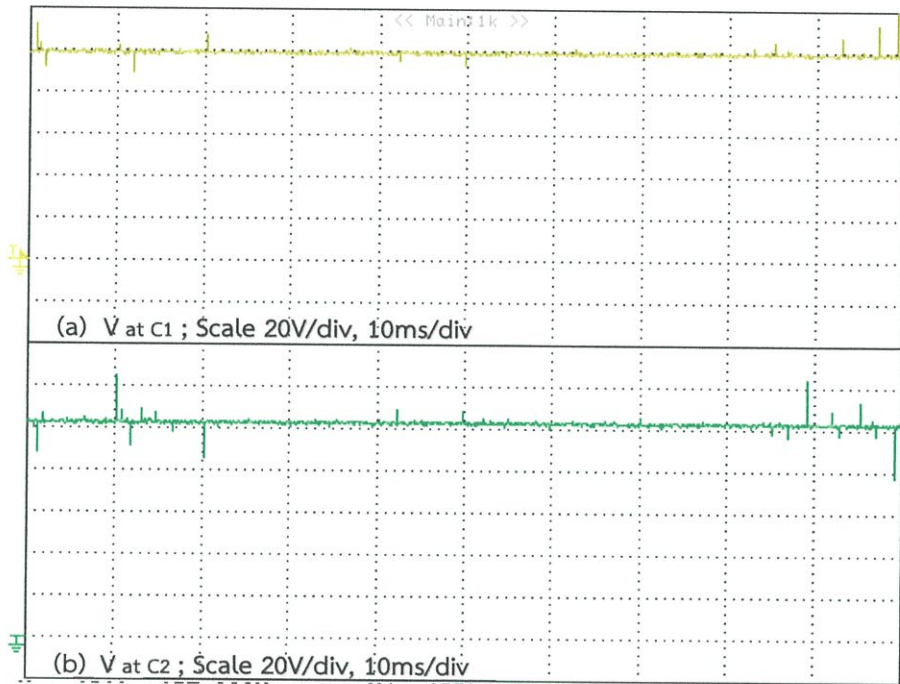
รูปที่ 4.9 ผลการทดลองของ V_{AN} , V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ของโหลดที่มีเฟสล่าหลัง



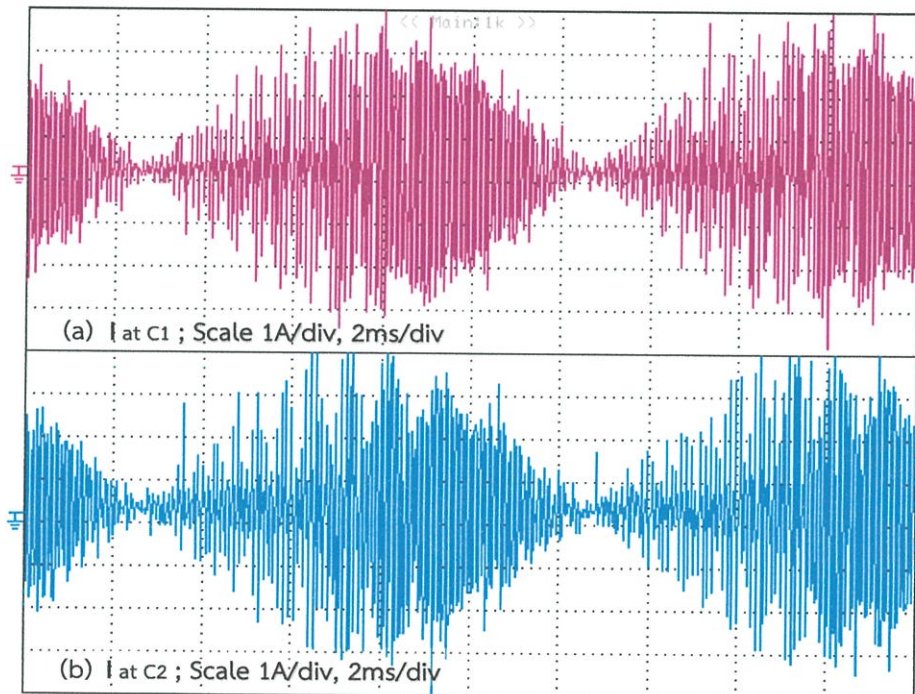
รูปที่ 4.10 ผลการทดลองของ V_{AN} , V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ที่ความถี่สวิตชิงของโหลดที่มีเฟสล่าหลัง



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}), แรงดันขาออก (V_o) และกระแสขาออก (I_o) ของโหลดที่มีเฟสล่าหลัง



รูปที่ 4.12 ผลการทดลองของแรงดันตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟสล่าหลัง

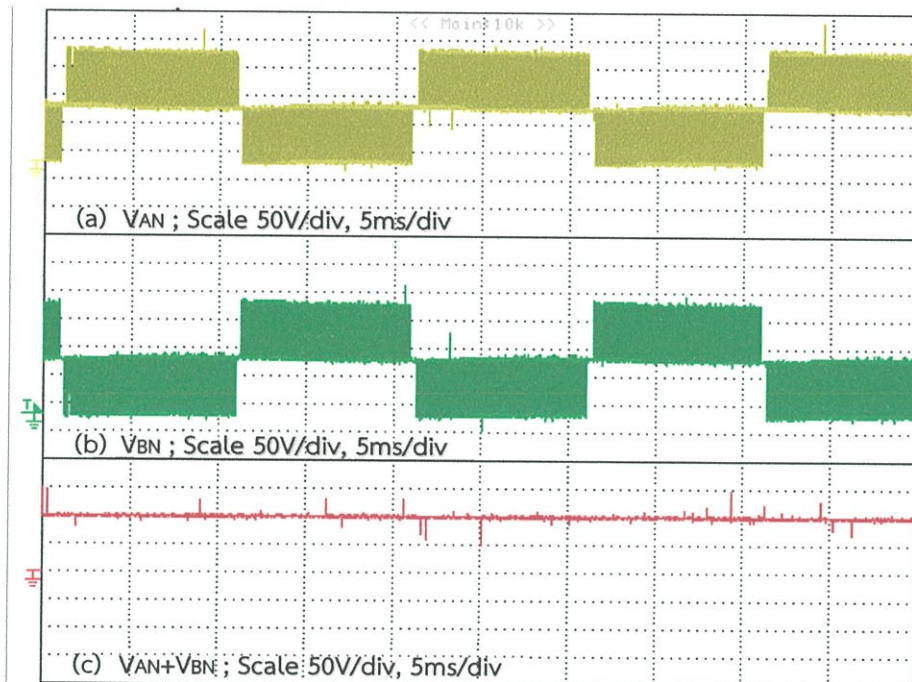


รูปที่ 4.13 ผลการทดลองของกระแสตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟสล่าหลัง

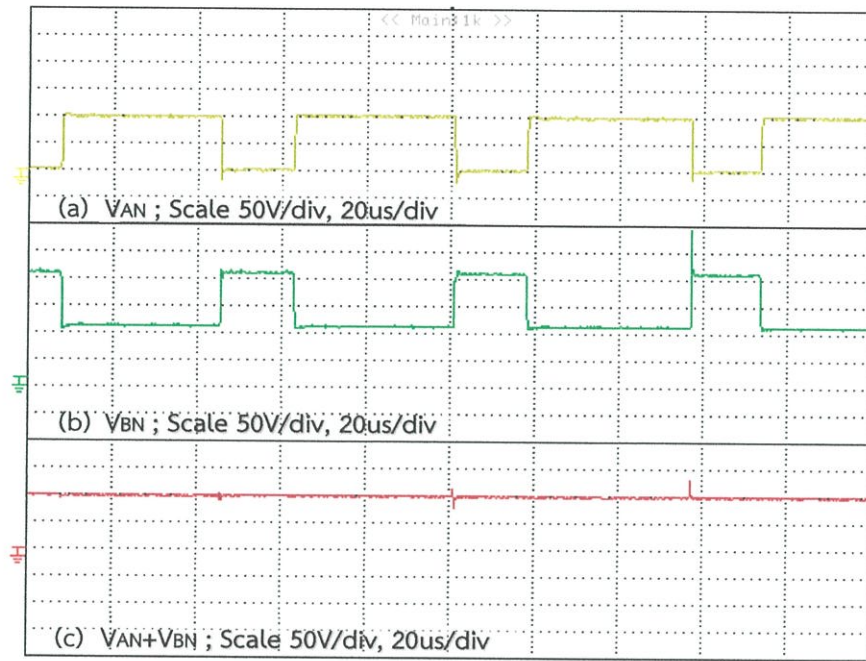
4.2.3 ผลการจำลองการทำงานของ PV อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟส นำหน้า

กำหนดให้ค่าภาระทางไฟฟ้ามีค่า $R=80.6667 \text{ Ohm}$ และ $C=25 \text{ uF}$

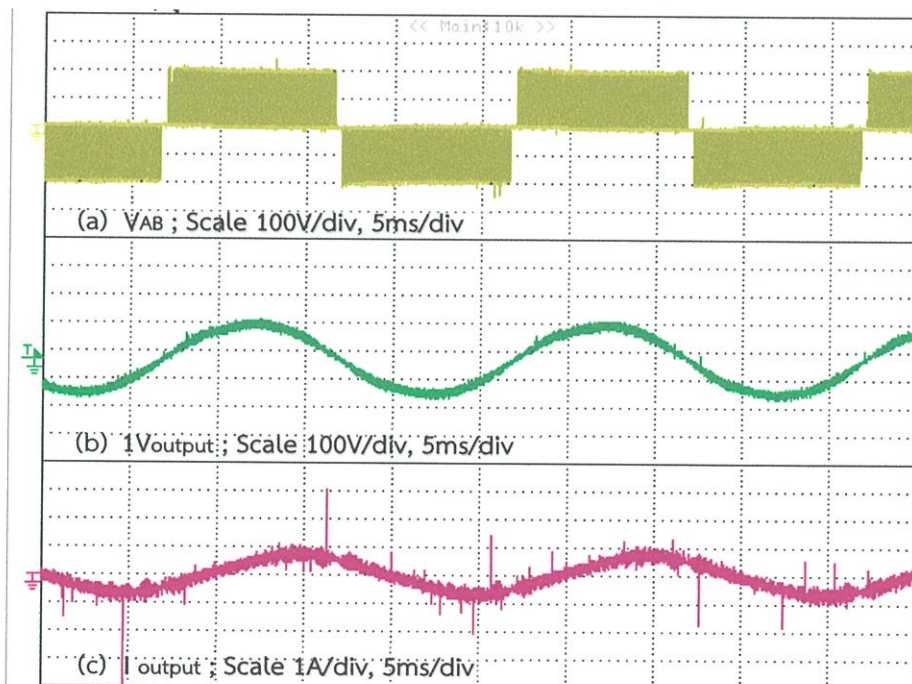
ผลการทดลองเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟสนำหน้าจะพบว่าผลการทดลองที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีเฟสตรงกัน นั่นแสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันโหมมตร่วมให้มีค่าคงที่ได้ โดยมีค่าเท่ากับ $V_{DC}/2$ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ได้ที่ค่า $V_{DC}/2$ ได้ตลอดช่วงการทำงาน



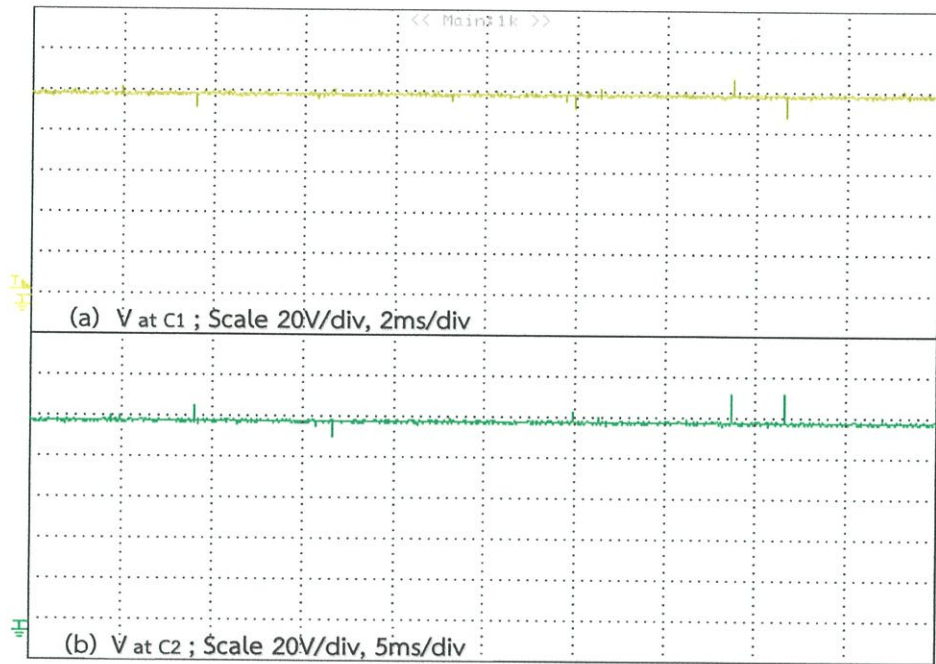
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองของ V_{AN} , V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ของโหมมที่มีเฟสนำหน้า



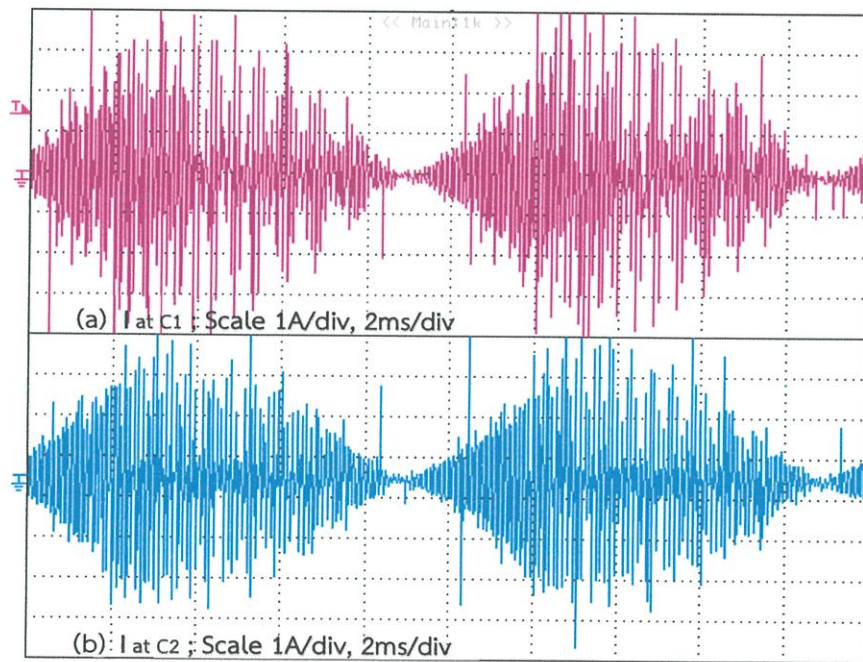
รูปที่ 4.15 ผลการทดลองของ V_{AN} , V_{BN} และ $V_{AN}+V_{BN}$ ที่ความถี่สวิตชิงของโพลที่มีเฟสนำหน้า



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}), แรงดันขาออก (V_o) และกระแสขาออก (I_o) ของโพลที่มีเฟสนำหน้า



รูปที่ 4.17 ผลการทดลองของแรงดันตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2 ของโหลดที่มีเฟสนำหน้า



รูปที่ 4.18 ผลการทดลองของกระแสตกคร่อม Flying Capacitor ตัวที่1และ2ของโหลดที่มีเฟสนำหน้า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบแบบจำลองของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง เห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันโหมตร่วมให้มีค่าคงที่ที่ $V_{DC}/2$ ได้ จึงทำให้ไม่มีกระแสรั่วไหลเกิดขึ้นที่ตัวเก็บประจุแฝงได้ นอกจากนี้ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงที่ได้จำลองขึ้นมีการสร้างระดับแรงดันขาออกมี 3 ระดับ ทำให้ได้กระแสขาออกมีรูปร่างใกล้เคียงสัญญาณไซน์ เพื่อให้แน่ใจว่าระบบสามารถควบคุมแรงดันโหมตร่วมให้มีค่าคงที่ที่ $V_{DC}/2$ ตลอดช่วงการทำงาน และแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงสามารถรักษาระดับให้มีค่าคงที่ได้ที่ $V_{DC}/2$ จึงได้ทำการทดลองจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเฟสนำหน้า (Leading phase) เฟสตรงกัน (In phase) และเฟสล้าหลัง (Lagging phase)

ผลการทดลองการทำงาน PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงที่ได้จำลองขึ้น โดยใช้โครงสร้างของฟลายอิงคาปาซิเตอร์อินเวอร์เตอร์ ที่ใช้เทคนิคการมอดดูเลตแบบ Unipolar SPWM ชนิดเลื่อนเฟสแคเรียร์ โดยเมื่อทำการทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเฟสนำหน้า (Leading phase) เฟสตรงกัน (In phase) และเฟสล้าหลัง (Lagging phase) จะพบว่าอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันโหมตร่วมให้มีค่าคงที่ที่ $V_{DC}/2$ ตลอดช่วงการทำงาน และแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงสามารถรักษาระดับให้มีค่าคงที่ได้ที่ $V_{DC}/2$ ในขณะที่แรงดันขาออกจะมีระดับแรงดัน 3 ระดับ แรงดันและกระแสขาออกที่ผ่านวงจรกรองจะมีรูปร่างเป็นสัญญาณไซน์

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

- 1.ควรมีการออกแบบอินเวอร์เตอร์ให้สามารถรับแรงดันดีซีบัสที่ 400 v เพื่อให้สามารถต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้
- 2.เพิ่มวงจรป้องกันสำหรับสวิตช์กำลังเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น
- 3.สายสัญญาณในวงจรควรใช้สายที่สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้
- 4.ควรมีการแยกกราวด์ระหว่างอินเวอร์เตอร์กับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากอินเวอร์เตอร์
- 5.ควรมีการป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกระบบให้กับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิฒิชัย ชูรัชย์. “ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [2] M. C. Cavalcanti, K. C. de Oliveira, A. M. de Farias, F. A. S. Neves, G. M. S. Azevedo, And F. C. Camboim, “Modulation Technique to Eliminate Leakage Currents In Transformerless Three-phase Photovoltaic System”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.57, no.4, April 2010., pp.1360-1368.
- [3] T. Kerkes, R. Teodorescu, and M. Liserre, “Common Mode Voltage in case of Transformerless PV Inverter Connected to the Grid”, in *Proc. IEEE Int. Symp. Ind Electron.*, Jun/Jul. 2008., pp.2390-2395.
- [4] Feng Peng, Rodriguez, and J. Sheng Lai, “Multilevel Inverter: A survey Topologies, Control, and Application”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 4, August 2002
- [5] Bin Wu, *High Power Converter and AC Drive*, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., 2006, pp.127-136.
- [6] G. Ebersohn and M. N. Gitau, “FPGA-implemented Carrier Based SPWM Multilevel Controller”, *Proceeding of the 7th AFRICON Conference in Africa 2004*, Vol. 2, pp. 1175-1178, 2004
- [7] ไพศักรดี พูลผลกา. “เทคนิคการมอดูเลตเชิงความกว้างพัลส์เพื่อควบคุมแรงดันโหมตร่วมของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

เทคนิคการควบคุมแรงดันโหมคร่วมสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงโดยใช้ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

COMMON-MODE VOLTAGE REDUCTION TECHNIQUE FOR TRANSFORMERLESS PV INVERTER USING MULTILEVEL FLYING CAPACITOR INVERTER

นพรุจ มานะชาติสกุล¹ ปณิต ตรีสุขอมงคล¹ ปณิธาน สุวรรณชื่น¹ ประภาพร ตรีรินทร์¹

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจอนคมุททหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email: phatara08@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแรงดันโหมคร่วมของ PV อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลงโดยใช้เทคนิคมอดูเลชันแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ในบทความนี้ได้จำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม PSIM ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าภายใต้การทำงานพื้นฐาน แรงดันโหมคร่วมสามารถรักษาให้มีค่าคงที่ที่ครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซีบัสได้ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิคที่นำเสนอได้มีการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบขึ้น ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันโหมคร่วมถูกรักษาให้มีค่าคงที่ที่ครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซีบัสและสอดคล้องกับผลการจำลองเป็นอย่างดี จากผลลัพธ์ที่ได้ เทคนิคที่นำเสนอสามารถจำกัดกระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแฝงของแผงโซลาร์เซลล์ได้

คำสำคัญ: แรงดันโหมคร่วม, อินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลง, อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

Abstract

A paper presents common-mode voltage reduction technique for transformerless PV inverter using unipolar PSPWM technique for multilevel inverter type flying capacitor. In this paper, simulations of the proposed system are carried out using PSIM. The simulation results show that under normal operation, the common-mode voltage can be maintained at a half of the DC bus voltage. The experimental results show that the observed common-mode voltage is maintained at a half of the DC bus voltage and have a good agreement with those the simulations. The common-mode voltage contributes to the leakage current through the parasitic capacitance in the solar cell were eliminated.

Keywords: common-mode voltage, transformerless inverter, flying-capacitor multilevel inverter

1. บทนำ

โดยส่วนใหญ่อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีการแยกกันทางไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลง อินเวอร์เตอร์ที่ใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ การติดตั้งจึงทำได้ยากและยังมีราคาต้นทุนสูง ส่วนอินเวอร์เตอร์ที่ใช้หม้อแปลงความถี่สูงทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ระบบจะมีการทำงานหลายขั้นตอน ระบบมีความซับซ้อน จึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่คิดควรมีประสิทธิภาพสูง ขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและต้นทุนต่ำ เพื่อให้ได้อินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะตามต้องการ จึงใช้อินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลงซึ่งอาจจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหล เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสรั่วไหลโหมคร่วม จึงมีการใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบฟูลบริดจ์ นิวทรอลพอยท์ แคลมป์ (NPC) และใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ Unipolar SPWM แต่การใช้ฟูลบริดจ์ NPC อินเวอร์เตอร์นั้น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันดีซีบัสเข้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีผลต่อการควบคุมแรงดันโหมคร่วม ซึ่งมีความแตกต่างของแรงดันมากที่ส่งผลให้เกิดกระแสรั่วไหลมากตามไปด้วย เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุที่ดีซีบัสกระแสตรงให้มีค่าเท่ากันเสมอ จึงใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FCI) โดยใช้เทคนิคการมอดูเลต PSPWM

บทความฉบับนี้นำเสนอการใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์สำหรับระบบ PV ชนิดเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง ซึ่งมีการควบคุมแรงดันโหมคร่วมให้มีค่าคงที่ ส่งผลให้กระแสรั่วไหลมีค่าน้อย และยังสามารถรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุที่ดีซีบัส นอกจากนี้ระดับแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอthis ยังมี 3 ระดับ ทำให้แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีรูปร่างใกล้เคียงสัญญาณไซน์

2. แรงดันโหมคร่วมในอินเวอร์เตอร์แบบไร้หม้อแปลง

เมื่อระบบ PV ชนิดเชื่อมต่อไฟฟ้าไม่มีหม้อแปลงแยกทางไฟฟ้า ทำให้มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างระบบไฟฟ้ากับแผง PV ซึ่งทำให้เกิดจรรยาจร โชนั้นที่โหมคร่วม และมีอิทธิพลต่อกระแสรั่วไหลโหมคร่วม แรงดันโหมคร่วมและแรงดันโหมคร่วมต่างสามารถหาได้จาก

$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} \tag{1}$$

$$V_{dm} = V_{AN} - V_{BN} = V_{AB} \tag{2}$$

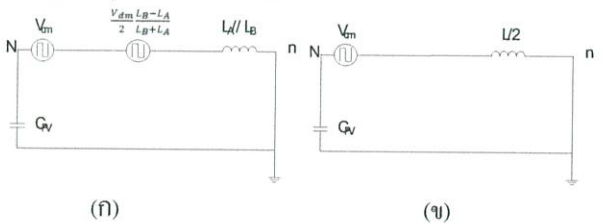
เมื่อ V_{cm} คือแรงดันโหมคร่วม, V_{dm} คือแรงดันโหมคร่วมต่าง, V_{AN} และ V_{BN} คือแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับขั้วลบ N ของแรงดันบัสกระแสตรงซึ่งเป็นจุดอ้างอิงร่วม

จากสมการแรงดันโหมคร่วมและโหมคร่วมต่าง สามารถนำมาหาค่าแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงดังนี้

$$V_{AN} = \frac{V_{dm}}{2} + V_{cm} \tag{3}$$

$$V_{BN} = -\frac{V_{dm}}{2} + V_{cm} \tag{4}$$

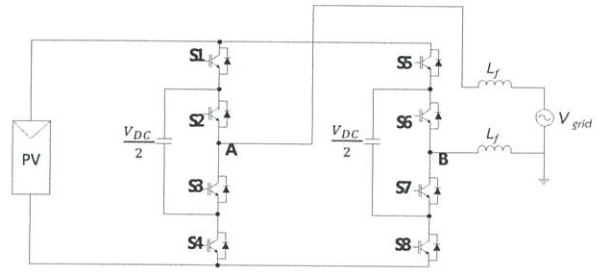
จาก (3), (4) สามารถนำมาสร้างรูปแบบอย่างง่ายของวงจรโชนั้นที่โหมคร่วมได้ ดังแสดงใน รูปที่ 1 (ก) เมื่อ C_{pv} คือตัวเก็บประจุแผงของแผง PV L_A และ L_B คือตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแส ซึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งส่งผลให้แรงดันโหมคร่วมมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ได้รูปแบบอย่างง่ายของการเกิดกระแสโหมคร่วมดังแสดงรูปที่ 1 (ข) ซึ่งการเกิดกระแสรั่วไหลโหมคร่วม (I_{cm}) ถูกกระตุ้นจากแรงดันโหมคร่วมเท่านั้นเพราะฉะนั้นการกำจัดกระแสรั่วไหลโหมคร่วมสามารถทำได้โดยการควบคุมแรงดันโหมคร่วมให้มีค่าคงที่



รูปที่ 1 รูปแบบอย่างง่ายของวงจรโชนั้นที่โหมคร่วม

3. โครงสร้างของฟลายอิงคาปาซิเตอร์อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง

โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง ที่พัฒนาโครงสร้างให้มีความสามารถในการกำจัดกระแสรั่วไหลโหมคร่วม โดยมีการประยุกต์นำโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ มาต่อขนานกัน ซึ่งประกอบไปด้วยสวิตช์กำลังทั้งหมด 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2

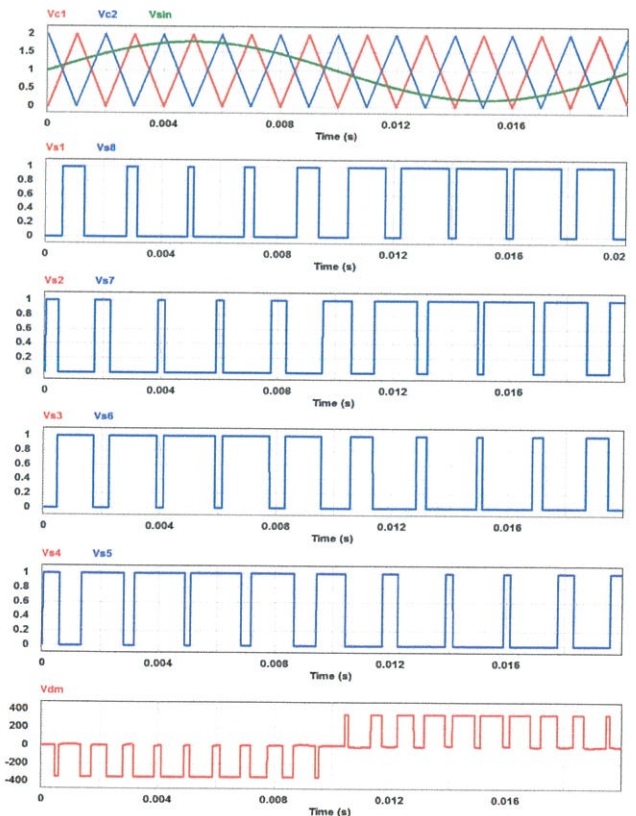


รูปที่ 2 โครงสร้างของฟลายอิงคาปาซิเตอร์อินเวอร์เตอร์

4. ผลการจำลองและผลการทดสอบ

4.1 เทคนิคการมอดูเลตเพื่อควบคุมแรงดันโหมคร่วม

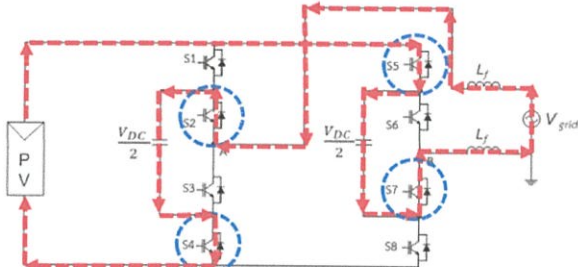
เทคนิคการมอดูเลตเพื่อควบคุมแรงดันโหมคร่วม โดยใช้เทคนิคที่ดัดแปลงแบบหลายพหุหะชนิดเลื่อนเฟส สามารถนำมาใช้กับโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ได้ โดยโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์นั้นมีการทำงานพร้อมกันของสวิตช์เป็นคู่ ทำให้สามารถสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์เพียง 4 สัญญาณเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยการทำงานของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์จะแบ่งการทำงานเป็น 4 โหมค



รูปที่ 3 เทคนิคการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์

โหมดที่ 1 สวิตช์ S2, S4, S5 และ S7 ทำงาน แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 0 ดังแสดงในรูปที่ 4 แรงดันโหมคร่วมเท่ากับ

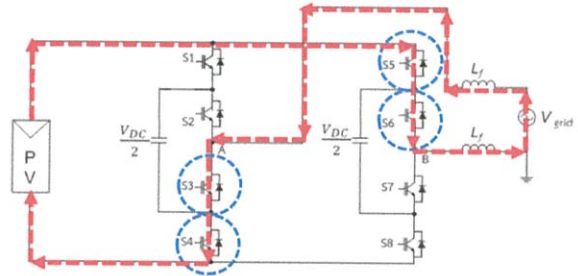
$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} = \frac{\frac{V_{DC}}{2} + \frac{V_{DC}}{2}}{2} = \frac{V_{DC}}{2}$$



รูปที่ 4 การทำงานในโหมดที่ 1

โหมดที่ 4 สวิตช์ S3, S4, S5 และ S6 ทำงาน แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีเท่ากับ $-V_{DC}$ ดังแสดงในรูปที่ 7 แรงดันโหมคร่วมเท่ากับ

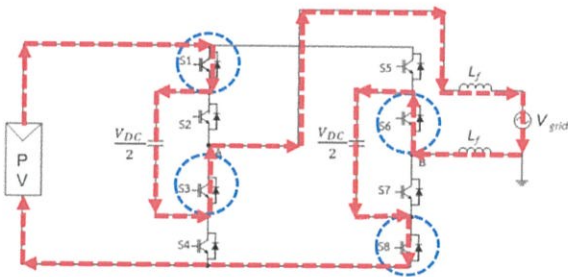
$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} = \frac{0 + V_{DC}}{2} = \frac{V_{DC}}{2}$$



รูปที่ 7 การทำงานในโหมดที่ 4

โหมดที่ 2 สวิตช์ S1, S3, S6 และ S8 ทำงาน แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 0 ดังแสดงในรูปที่ 5 แรงดันโหมคร่วมเท่ากับ

$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} = \frac{\frac{V_{DC}}{2} + \frac{V_{DC}}{2}}{2} = \frac{V_{DC}}{2}$$



รูปที่ 5 การทำงานในโหมดที่ 2

4.2 ผลการจำลอง

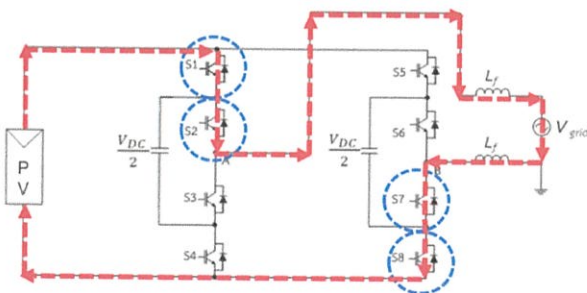
ในการจำลองจะใช้โปรแกรม POWERSIM ในการวิเคราะห์ระบบ ก่อนที่จะทำการสร้างเครื่องต้นแบบ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองระบบแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้นำไปสร้างเครื่องต้นแบบด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทดลอง

พารามิเตอร์	ขนาด
แรงดัน/ความถี่ระบบไฟฟ้า	230 V / 50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้า	2 kW
แรงดันขาเข้า	200 V
ความถี่ในการสวิตช์	18 kHz
ตัวเหนี่ยวนำ (L_f)	4 mH / ตัว
ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิง (C_1, C_2)	3300 uF

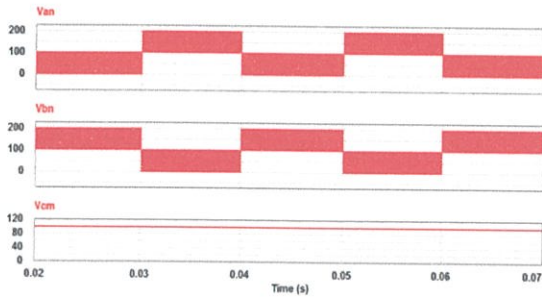
โหมดที่ 3 สวิตช์ S1, S2, S7 และ S8 ทำงาน แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ V_{DC} ดังแสดงในรูปที่ 6 แรงดันโหมคร่วมเท่ากับ

$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} = \frac{V_{DC} + 0}{2} = \frac{V_{DC}}{2}$$

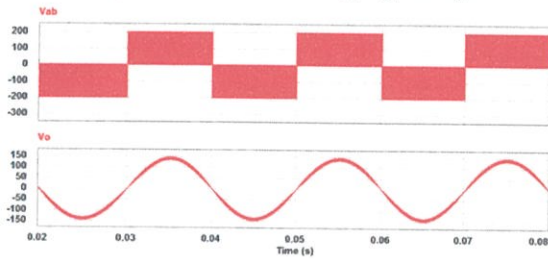


รูปที่ 6 การทำงานในโหมดที่ 3

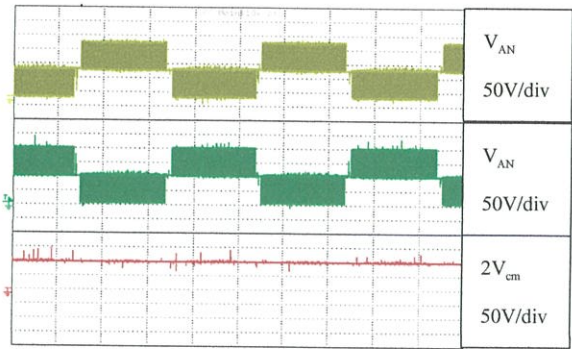
จากรูปที่ 8,9 แสดงผลการจำลองการทำงานของ V_{AN} V_{BN} V_{cm} V_{AB} และ V_o ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันโหมคร่วม V_{cm} สามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ ที่ครึ่งหนึ่งของแรงดันขาเข้า (100 V) ตลอดช่วงเวลาการทำงาน นอกจากนี้ระดับแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ยังมี 3 ระดับ ทำให้แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์มีรูปร่างใกล้เคียงสัญญาณไซน์



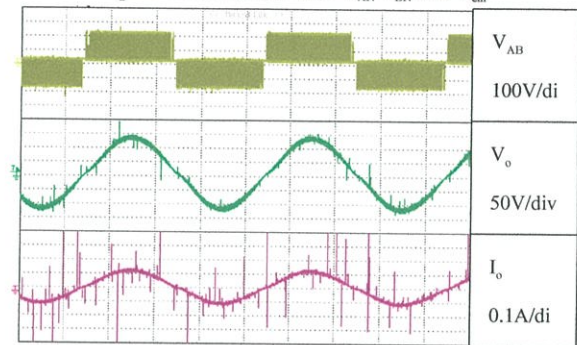
รูปที่ 8 ผลการจำลองของ V_{AN} V_{BN} และ V_{cm}



รูปที่ 9 ผลการจำลองของ V_{AB} และ V_o



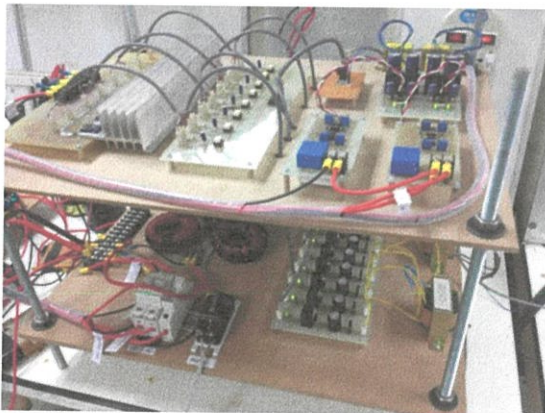
รูปที่ 11 ผลการทดลองของ V_{AN} V_{BN} และ V_{cm}



รูปที่ 12 ผลการจำลองของ V_{AB} และ I_o

4.2 ผลการทดลอง

ในการทดสอบจะใช้ DSP เบอร์ TMS320F28335 ในการประมวลผล โดยส่วนประกอบต่างๆของเครื่องต้นแบบ แสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

รูปที่ 11,12 แสดงผลการทดลองที่ได้ ซึ่งเป็นไปตามผลการจำลองข้างต้น ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์สามารถรักษาระดับแรงดันโหมคร่วม v_{cm} ให้มีค่าคงที่ได้ จึงทำให้สามารถกำจัดกระแสรั่วไหลโหมคร่วมที่โหมผ่านตัวเก็บประจุแห่งของของแผงโซลาร์เซลล์ได้

5.สรุป

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยใช้เทคนิคมอดดูเลชั่นแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ ในการทำให้แรงดันโหมคร่วม V_{cm} มีระดับแรงดันคงที่ที่ $V_{DC}/2$ ตลอดช่วงเวลาการทำงาน ส่งผลให้การเกิดกระแสรั่วไหลมีค่าน้อยมาก นอกจากนี้ยังสามารถรักษาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงให้มีความคงที่ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fritz Schimpf, Lars E. Norum, "Grid connected Converters for Photovoltaic, State of Art, Ideas for Improvement of Transformerless Inverters", NORPIE, June 9-11, 2008.
- [2] Roberto Gonzalez, Jesus Lopez, Pablo Sanchis, and Luis Marroyo, "Transformerless Inverter for Single-Phase Photovoltaic Systems", IEEE Trans. Pow. Electron., vol.22, no2, March 2007.
- [3] M. C. Cavalcanti, K. C. de Oliveira, A. M. de Farias, F. A. S. Neves, G. M. S. Azevedo, and F. C. Camboim, "Modulation Technique to Eliminate Leakage Currents in Transforless Three-phase Photovoltaic System", IEEE Trans.Ind. Electron., vol 57, no.4, April 2010.

ภาคผนวก ข
โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องต้นแบบโดยใช้ DSP

```

#include "DSP28x_Project.h" // Device Headerfile and Examples Include File
#include "math.h"
#define T 4166 //period of carrier f = 18k
#define As 1458 //Amplitude of sine ( $M_a = 0.7$ )
#define Td2 2083 //period of carrier divide by 2 (Amplitude of carrier)
#define DBF 150 //Dead time fall
#define DBR 150 //Dead time rise
#define EN0_on GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO15
#define EN0_off GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO15
#define EN1_on GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO24
#define EN1_off GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO24
#define EN2_on GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO26
#define EN2_off GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO26
#define EN_on GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO12
#define EN_off GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO12
#define sw GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34
// Prototype statements for functions found within this file.
void spi_fifo_init(void);
void spi_init(void);
interrupt void adc_isr(void);
interrupt void cpu_timer2_isr(void);
void scia_echoback_init(void);
void scia_fifo_init(void);

// Global variables used in this example:
Uint16 rdata;
Uint16 n=0;
Uint16 D_out0=0,D_out1=0,D_out2=0;
Uint16 A0=0,A1=0,A2=0,A3=0,B0=0,B1=0,B2=0,B3=0,B4=0,B5=0;
Uint16 vsinA=0,vsinB=0,vsinC=0;
Uint16 vmA=0,vmB=0,vmC=0;
int m=0;
float V2_A=0,Q1_A=0,Q1_1_A=0;

```

```

float      Offset_Vs_A=0,Offset_Vs_B=0,Offset_Vs_C=0;
float      Offset_is_A=0,Offset_is_B=0,Offset_is_C=0;
float      Offset_iL_A=0,Offset_iL_B=0,Offset_iL_C=0;
float      va=0,vb=0,vc=0,vdc_bus=0,isa=0,isb=0,isc=0,iLa=0,iLb=0,iLc=0;
float      vds=0,vqs=0,vd=0,vq=0;
float      theta=0,theta_1=0;
float      Er_P=0,Er=0,Er_l=0,Er_l_old=0,Omega1=0,Omega2=0;
float      theta5=0,theta_a=0,theta_b=0,theta_c=0;
float      isds=0,isqs=0,iLds=0,iLqs=0;
float      isd=0,isq=0,iLd=0,iLq=0;
float      Q1_isd=0,Q2_isd=0,isd_2=0;
float      Q1_isq=0,Q2_isq=0,isq_2=0;
float      Q1_iLd=0,Q2_iLd=0,iLd_5=0;
float      Q1_iLq=0,Q2_iLq=0,iLq_5=0;
float      vd5_star=0,vq5_star=0;
float      isds2=0,isqs2=0;
float      vd_star=80;    //<-----vdc Bus cmd
float      k=54;
float      g=1;
float      isha=0,ishb=0,ishc=0,vaFfb=0,vbFfb=0,vcFfb=0;
float      vd5s_star=0,vq5s_star=0,vaFff=0,vbFff=0,vcFff=0;
float      vAFa_star=0,vAFb_star=0,vAFc_star=0;
float      er_vd=0,erp=0,eri=0,delta_iq_star=0;
float      kp=0.05,ki=0.000005;
Uint16     count=0;
Uint16     data[3];
//float     a=0,b=0,v=0;
float      v_d=0; //pu of dc bus
void main(void)
{
    er_vd=0,erp=0,eri=0,delta_iq_star=0;
    v_d=1/vd_star;
    // Step 1. Initialize System Control:

```

```

// PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
// This example function is found in the DSP2833x_SysCtrl.c file.
InitSysCtrl();
InitSciaGpio();
//          Initial GPIO    //
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO12 = 0; // PIN 10 is GPIO
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO12 = 1; //GPIO 10 is output
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO15 = 0; // PIN 15 is GPIO
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO15 = 1; //GPIO 15 is output
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO24 = 0; // PIN 24 is GPIO
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO24 = 1; //GPIO 24 is output
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO26 = 0; // PIN 26 is GPIO
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO26 = 1; //GPIO 26 is output
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO0 = 0; // Enable pullup on GPIO0
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO1 = 0; // Enable pullup on GPIO1
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO2 = 0; // Enable pullup on GPIO2
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO3 = 0; // Enable pullup on GPIO3
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO4 = 0; // Enable pullup on GPIO4
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO5 = 0; // Enable pullup on GPIO5
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO6 = 0; // Enable pullup on GPIO6
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO7 = 0; // Enable pullup on GPIO7
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO8 = 0; // Enable pullup on GPIO8
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO9 = 0; // Enable pullup on GPIO9
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO10 = 0; // Enable pullup on GPIO10
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO11 = 0; // Enable pullup on GPIO11
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1; // GPIO0 = PWM1A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO1 = 1; // GPIO1 = PWM1B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 1; // GPIO2 = PWM2A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 1; // GPIO3 = PWM2B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 1; // GPIO4 = PWM3A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 1; // GPIO5 = PWM3B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO6 = 1; // GPIO0 = PWM4A

```

```

    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO7 = 1; // GPIO1 = PWM4B
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO8 = 1; // GPIO2 = PWM5A
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO9 = 1; // GPIO3 = PWM5B
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO10 = 1; // GPIO4 = PWM6A
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO11 = 1; // GPIO5 = PWM6B
    GpioCtrlRegs.GPBPUD.bit.GPIO34 = 0; // Enable pullup on GPIO34
    GpioCtrlRegs.GPBMUX1.bit.GPIO34 = 0; // GPIO34 = GPIO34
    GpioCtrlRegs.GPBDIR.bit.GPIO34 = 0; // GPIO34 = input
    EDIS;
    EALLOW;

    #if (CPU_FRQ_150MHZ) // Default - 150 MHz SYSCLKOUT
    #define ADC_MODCLK 0x3 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 = 150/(2*3) =
    25.0 MHz
    #endif
    #if (CPU_FRQ_100MHZ)
    #define ADC_MODCLK 0x2 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 = 100/(2*2) =
    25.0 MHz
    #endif

    // Specific clock setting for this example:
    // Define ADCCLK clock frequency ( less than or equal to 25 MHz )
    // Assuming InitSysCtrl() has set SYSCLKOUT to 150 MHz
    SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK; // HSPCLK =
SYSCLKOUT/ADC_MODCLK
    EDIS;

    // Step 2. Initialize GPIO:
    InitSpiaGpio();
    DINT;
    InitPieCtrl();

    // Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
    IER = 0x0000;
    IFR = 0x0000;
    InitPieVectTable();

```

```

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

InitCpuTimers();
ConfigCpuTimer(&CpuTimer2, 150, 100);
CpuTimer2Regs.TCR.all = 0x4001; // Use write-only instruction to set
TSS bit = 0

//SPI initial
spi_fifo_init(); // Initialize the Spi FIFO
spi_init(); // init SPI
InitAdc(); // init the ADC
// Step 5. User specific code, enable interrupts:
// Enable ADCINT in PIE
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx6 = 1;
IER |= M_INT1; // Enable CPU Interrupt 1
IER |= M_INT14;
EINT; // Enable Global interrupt INTM
ERTM; // Enable Global realtime interrupt DBGM
// Configure ADC
AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = 0x0;
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CPS = 0x1;
AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = 0x0;
//just make sure ADCCLK = 12.5MHz(not MAX) and ACQ_PS = 0
//for 12.5 MSPS or 80 ns per sample
AdcRegs.ADCTRL3.bit.SMODE_SEL = 0x1; // Setup simultaneous
sampling mode

AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 0x1; // Setup cascaded sequencer
mode

AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0007; // Setup 16 conv's on SEQ1

```

```

        AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; // Setup ADCINA0 as 1st
SEQ1 conv. Voltage sensor A
        AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; // Setup ADCINA1 as 1st
SEQ1 conv. Voltage sensor B
        AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; // Setup ADCINA2 as 1st
SEQ1 conv. Voltage sensor C
        AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x3; // Setup ADCINA3 as 1st
SEQ1 conv. Current sensor A
        AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV04 = 0x4; // Setup ADCINA4 as 2nd
SEQ1 conv. Current sensor B
        AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV05 = 0x5; // Setup ADCINA5 as 2nd
SEQ1 conv. Current sensor C
        AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0; // stop after reaching End of
Sequence
        //AdcRegs.ADCTRL2.bit.EPWM_SOCA_SEQ1 = 1;// Enable SOCA from
ePWM to start SEQ1
        AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 1; // Enable SEQ1 interrupt
(every EOS)( end-of-sequence)
        //=====
=====
        // Configuration epwm
        //=====
=====
        // Initialization Time
        //=====//
        //EPWM Module 1 config cr1 Shift 180 degree
        EPwm1Regs.TBPRD = T; // Period = T TBCLK counts
        EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // Set Phase register to zero
        EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; //
Symmetrical mode
        EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Master module
        EPwm1Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW;

```

```

        EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_CTR_ZERO; // Sync down-
stream module
        EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
        EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
        EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on
CTR=Zero
        EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on
CTR=Zero
        EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR; // set actions for EPWM1A
        EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CBD = AQ_SET ; //if (vref >
cr)-> EPWM1A=logic0
        EPwm1Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable
Dead-band module
        EPwm1Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HI; // Active Hi
complementary
        EPwm1Regs.DBFED = DBF; // FED = 50 TBCLKs
        EPwm1Regs.DBRED = DBR; // RED = 50 TBCLKs

// EPWM Module 2 config cr2 no Shift
        EPwm2Regs.TBPRD = T; // Period = T TBCLK counts
        EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = T; // Set Phase register to zero
        EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; //
Symmetrical mode
        EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_ENABLE; // Slave module
        EPwm2Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW;
        EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN; // sync flow-through
        EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
        EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
        EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on
CTR=Zero
        EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on
CTR=Zero
        EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR; // set actions for EPWM2A

```

```

        EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CBD = AQ_SET;
        EPwm2Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable
Dead-band module
        EPwm2Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // Active Hi
complementary
        EPwm2Regs.DBFED = DBF; // FED = DBF TBCLKs
        EPwm2Regs.DBRED = DBR; // RED = DBR TBCLKs
        scia_fifo_init(); // Initialize the SCI FIFO
        scia_echoback_init(); // Initialize SCI for echoback
        //          Infinite loops //
        for(;;)
        {
        }
}

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

interrupt void adc_isr(void)
{
        EN_on=1;
        //V-source
        A0 = AdcRegs.ADCRESULT0>>4;
        A1 = AdcRegs.ADCRESULT2>>4;
        A2 = AdcRegs.ADCRESULT4>>4;
        //v-dc-bus

```

```

A3 = AdcRegs.ADCRESULT6>>4;
//i-Source
B0 = AdcRegs.ADCRESULT1>>4;
B1 = AdcRegs.ADCRESULT3>>4;
B2 = AdcRegs.ADCRESULT5>>4;
//i-LOAD
B3 = AdcRegs.ADCRESULT7>>4;
B4 = AdcRegs.ADCRESULT9>>4;
B5 = AdcRegs.ADCRESULT11>>4;
if(n<200)
{
    //vs
    Offset_Vs_A = Offset_Vs_A+ (A0*7.326e-4);
    //is
    Offset_is_A = Offset_is_A+(B0*7.326e-4);
    //iL
    Offset_iL_A = Offset_iL_A+(B3*7.326e-4);
    n++;

}else if(n==200)

{
    Offset_Vs_A = Offset_Vs_A*0.005;           //1/200
    //is
    Offset_is_A = Offset_is_A*0.005;
    //iL
    Offset_iL_A = Offset_iL_A*0.005;
    n++;

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

```

```

vdc_bus=200*(A3*7.326e-4);
isa=10*((B0*7.326e-4) -Offset_is_A );
iLa=10*((B3*7.326e-4) -Offset_iL_A );
//PLL
    //if(data_rec[12]==1)    //enable phase A
    //{
        Q1_A = va + (0.9761*Q1_1_A); //make
phase shift
        V2_A = (0.9761*Q1_A) - Q1_1_A;
        Q1_1_A = Q1_A;
        Er = va*cos(theta_1) - V2_A*sin(theta_1);
// er = vq
        //PI
        Er_P = Er*1e-4;//kp
        Er_I = Er_I_old + (Er*5e-4);//ki
        Er_I_old = Er_I;
        Omega1 = 0 ;//Er_P + Er_I;
        Omega2 = Omega1+ 0.0314159;
        theta = theta_1 + Omega2;
        if(theta>=6.283185308)
        {
            theta = theta - 6.283185308;
        }
        theta_1 = theta;
        //End PLL phase A

//          //PLL////////////////////////////////////
//          //PI
//          Er_P = Er *0.001;          //kp
//          Er_I = Er_I_old + (Er*0.0005); //ki
//          Er_I_old = Er_I;
//          Omega1 = Er_P + Er_I;
//          Omega2 = Omega1+ 0.0314159;

```

```

//          theta = theta_1 + Omega2;
//          if(theta>=6.283185308)
//          {
//              theta = theta - 6.283185308;
//          }
//          theta_1 = theta;
//=====
vmA=(sin(theta_a)*As)+Td2;
    //Signal drive switch both right and left
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA =vmA; // adjust duty for output EPWM1A
    EPwm1Regs.CMPB=vmA;
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA =vmA; // adjust duty for output EPWM2A
    EPwm2Regs.CMPB=vmA;
    EN_off=1;
}

    EN0_on = 1;
    SpiaRegs.SPITXBUF = D_out0;// Transmit data
    while(SpiaRegs.SPIFFRX.bit.RXFFST !=1) { }// Wait until data is received
    rdata = SpiaRegs.SPIRXBUF;// Check against sent data
    EN0_off = 1;
    // Transmit data ch1 D2A
    EN1_on = 1;
    SpiaRegs.SPITXBUF = D_out1;// Transmit data
    while(SpiaRegs.SPIFFRX.bit.RXFFST !=1) { }// Wait until data is received
    rdata = SpiaRegs.SPIRXBUF;// Check against sent data
    EN1_off = 1;
    // Transmit data ch2 D2A
    EN2_on = 1;
    SpiaRegs.SPITXBUF = D_out2;// Transmit data
    while(SpiaRegs.SPIFFRX.bit.RXFFST !=1) { }// Wait until data is received
    rdata = SpiaRegs.SPIRXBUF;// Check against sent data
    EN2_off = 1;
//    RELAY_Coff=1;

```

```

//          End interrupt //
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;    // Clear INT SEQ1 bit
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ2_CLR = 1;    // Clear INT SEQ1 bit
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; // Acknowledge interrupt to
PIE
}
void receive_array(int byte[],int size)
{
int j=0;
    for(j=0;j<size;j++)
    {
        // Wait for inc character
        while(SciaRegs.SCIFFRX.bit.RXFFST !=1) { } // wait for
XRDY =1 for empty state
        // Get character
        byte[j]= SciaRegs.SCIRXBUF.all;
    }
}
// Test 1,SCIA DLB, 8-bit word, baud rate 0x000F, default, 1 STOP bit, no parity
void scia_echoback_init()
{
    // Note: Clocks were turned on to the SCIA peripheral
    // in the InitSysCtrl() function
    SciaRegs.SCICCR.all =0x0007; // 1 stop bit, No loopback
    // No parity,8 char bits,
    // async mode, idle-line protocol
    SciaRegs.SCICTL1.all =0x0003; // enable TX, RX, internal SCICLK,
    // Disable RX ERR, SLEEP, TXWAKE
    SciaRegs.SCICTL2.all =0x0003;
    SciaRegs.SCICTL2.bit.TXINTENA =1;
    SciaRegs.SCICTL2.bit.RXBKINTENA =1;
    //          Baud rate = LSPCLK/(SPIBRR+1)
#if (CPU_FRQ_150MHZ)

```

```

//          01 E7 hex = 487 dec for 9600
//          00 1D hex = 29 dec for 156250
SciaRegs.SCIHBAUD  =0x0000; // 937500 baud @LSPCLK = 37.5MHz.
SciaRegs.SCILBAUD  =0x0004;

#endif

#if (CPU_FRQ_100MHZ)
//          01 44 hex = 324 dec for 9600
SciaRegs.SCIHBAUD  =0x0001; // 9600 baud @LSPCLK = 20MHz.
SciaRegs.SCILBAUD  =0x0044;

#endif

SciaRegs.SCICTL1.all =0x0023; // Relinquish SCI from Reset
}
// Transmit a character from the SCI
// Initialize the SCI FIFO
void scia_fifo_init()
{
    SciaRegs.SCIFFTX.all=0xE040;
    SciaRegs.SCIFFRX.all=0x204f;
    SciaRegs.SCIFFCT.all=0x0;
}

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

```

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

ภาคผนวก ค
เครื่องมือที่ใช้ในการวัด



รูปที่ ค.1 ดิจิตอลอสซิลโลสโคป YOKOGAWA รุ่น DL1740E



รูปที่ ค.2 ดิจิตอลอสซิลโลสโคป RIGOL รุ่น DS1204B



รูปที่ ค.3 Differential Probe YOKOGAWA รุ่น 700625



รูปที่ ค.4 Current Probe FLUKE

ประวัติผู้เขียน



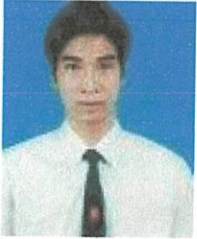
นาย นพรุจ มานะชาติสกุล

เกิดวันที่ 9 มกราคม 2536

ที่อยู่ 203/15 ซอยภาวนา ถนนลาดพร้าว เขตห้วยขวาง แขวงสามเสนนอก
กรุงเทพฯ

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนทอวัง

E-mail : underground_noppy@hotmail.com



นาย ปณต ตรัสขจรมงคล

เกิดวันที่ 8 มีนาคม 2536

ที่อยู่ 144/117 หมู่ที่ 20 ต.บ้านเป็ด อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น

E-mail : panot_smd@hotmail.com



นาย ปณิธาน สุวรรณชื่น

เกิดวันที่ 18 กันยายน 2535

ที่อยู่ 222 หมู่ที่ 4 ต.คลองยาง อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวรรคค่อนันต์วิทยา

E-mail : aomza_panithan@hotmail.com



นางสาว ประภาพร ตรีนนท์

เกิดวันที่ 25 พฤษภาคม 2536

ที่อยู่ 22/12 ถ.ประชาราษฎร์ ต.สวนใหญ่ อ.เมือง จ.นนทบุรี

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนโยธินบูรณะ

E-mail : Praphaphorn.Treeranon@hotmail.com