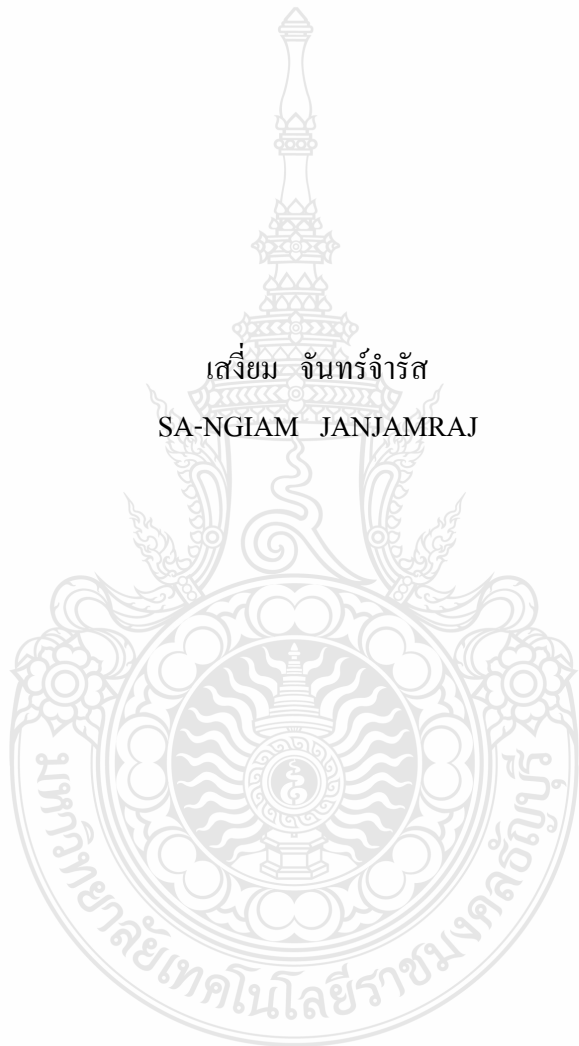


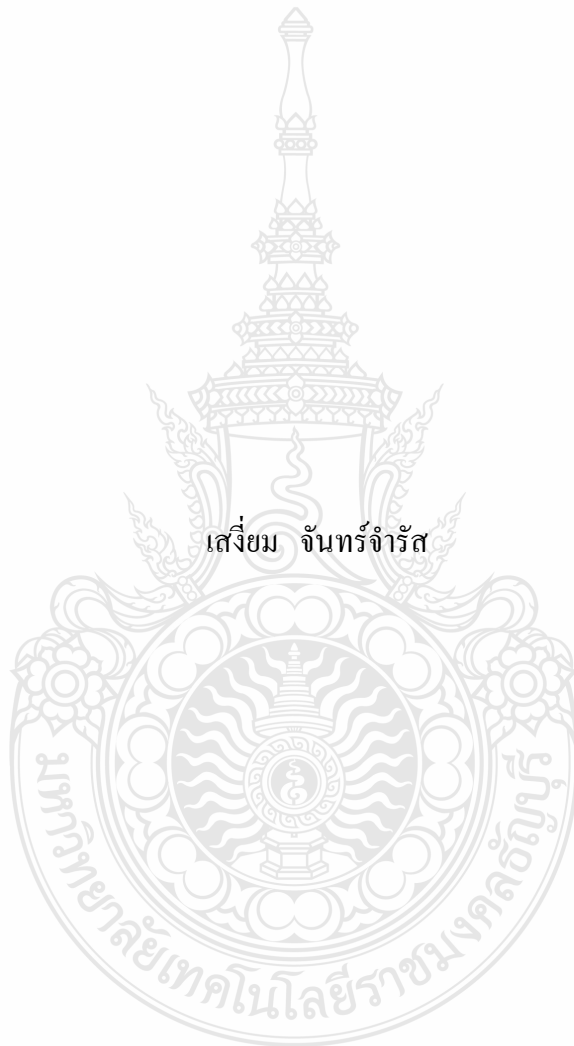
การออกแบบและวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบ 4 สถานะ
DESIGN AND ANALYSIS OF 4 STAGE MULTILEVEL CONVERTERS

เสงี่ยม จันทร์จำรัส
SA-NGIAM JANJAMRAJ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2553

การออกแบบและวิเคราะห์คอนเวอเตอร์หลายระดับ แบบ 4 สถานะ

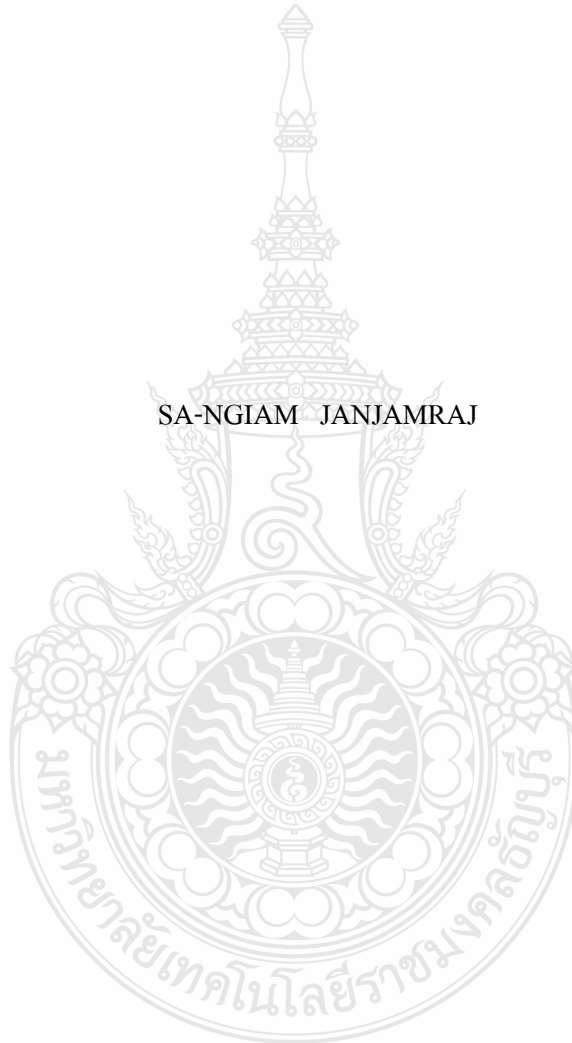


เสงี่ยม จันทรจรัส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะเชิงเทนา
พ.ศ. 2553

DESIGN AND ANALYSIS OF 4 STAGE MULTILEVEL CONVERTERS

SA-NGIAM JANJAMRAJ



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE
DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์นี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

เสงี่ยม จันทร์จรัส



COPYRIGHT © 2010

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2533

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบ 4 สถานะ
DESIGN AND ANALYSIS OF 4 STAGE MULTILEVEL
CONVERTERS

ชื่อนักศึกษา

นายเสงี่ยม จันทร์จรัส

รหัสประจำตัว

114960402003-6

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์

วัน เดือน ปี ที่สอบ

9 ตุลาคม 2553

สถานที่สอบ

ห้องประชุมชมพูพันธุ์ทิพย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม)

..... กรรมการ
(ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ)

..... กรรมการ
(ดร.บุญยง ปลั่งกลาง)

..... กรรมการ
(ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบ 4 สถานะ
นักศึกษา	นายเสงี่ยม จันทร์จรัส
รหัสประจำตัว	114960402003-6
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ โดยใช้เอช-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลงคาสเคด ซึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเดียวกัน และด้านออกของหม้อแปลงแต่ละชุดต่อกันแบบอนุกรม เพื่อสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้มีคุณภาพสูง สามารถสร้างจำนวนระดับได้จำนวนมาก เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบพลังงานทดแทน

การทวนสอบทำโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลอง MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดัน และความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (THD_v) ของ 2, 3 และ 4 สถานะ ซึ่งสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันด้านออกเป็นพีคดับเบิลยูเอ็มได้ 5, 11 และ 27 ระดับ ตามลำดับ และสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันด้านออกเป็นคอนเวอร์เตอร์หลายระดับจำนวน 9, 27 และ 81 ระดับตามลำดับ

ผลการจำลองโดย MATLAB/Simulink คอนเวอร์เตอร์ 27 และ 81 ระดับ และพีคดับเบิลยูเอ็ม 29 ระดับ มีความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันรวม (THD_v) ไม่เกิน 5% โดยที่ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันรวมของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ มีค่า 3.018% น้อยกว่าพีคดับเบิลยูเอ็ม 29 ระดับ และสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ได้ 4 ตัว หรือสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์จากคอนเวอร์เตอร์ทั่วไปถึง 40 ตัว ดังนั้นจึงออกแบบสร้างเครื่องต้นแบบคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ แบบ 3-สถานะ โดยใช้ MATLAB/Simulink ในการสร้างสัญญาณผ่าน eZdspTMS320F2812 เพื่อไปควบคุมวงจรมอเตอร์กำลัง ผลการทดลองการทำงานของเครื่องต้นแบบ 27 ระดับ แบบ 3-สถานะ สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันด้านออกได้คุณภาพสูง และความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันรวมไม่เกิน 5% จากประโยชน์ที่กล่าวมาแล้วนั้น คอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอจึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานแทนคอนเวอร์เตอร์แบบเดิมที่ใช้อุปกรณ์สวิตซ์จำนวนมาก ในการนำไปใช้งานกับระบบพลังงานทดแทน

คำสำคัญ: คอนเวอร์เตอร์หลายระดับ, คอนเวอร์เตอร์หลายสถานะ, ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม

Thesis Title : DESIGN AND ANALYSIS OF 4 STAGE MULTILEVEL CONVERTERS

Student Name : Mr. Sa-Ngiam Janjamraj

Student ID : 114960402003-6

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Electrical Engineering

Academic Year : 2010

Thesis Advisor : Dr. Wanchai Subsingha

ABSTRACT

This thesis is designed and analysis of multi-stage multilevel converters. It consists of H-bridge converters and cascade transformers connected to the same dc linkvoltage and their output connected in series through output transformers. To product high-quality output voltage wave, it synchronizes a large number of output voltages, for application of renewable energy system.

The validity of the proposed system is verified by MATLAB/Simulink computer-aided simulation for analysis of voltage waveforms and total harmonic distorsion of voltages (THD_v) of 2, 3 and 4 stages. Its can generated 5, 11 and 29 level respectively for multilevel PWM converters, and can generated 9, 27 and 81 levels respectively for multilevel converters.

MATLAB/Simulink simulation result, THD_v of 27, 81 levels converters and 29 levels PWM converters are less than 5%, and THD_v of 27 level converter is 3.018% less than 29 level PWM converter and it can saved 4 switching devides or can saved 40 switching devices from conventional multilevel converter. There for, design the prototype of 3-stage 27 level converter, by use MATLAB/Simulink program generated control signal through eZdspTMS320F2812 Digital signal processor for controll power MOSFETs circuits. Experimental results, it can generated high-quality output voltage waveform and THD_v less than 5% . Base on these merits, the proposed converters is likely to substitute for the conventional counterparts in a practical application of renewable energy system.

Keywords: Multilevel converters, Multi-stage converters, Total harmonics distortion

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านายเสงี่ยม จันทรจรัส ขอกราบขอบคุณบุคลากร และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทความรู้ให้ข้าพเจ้า โดยเฉพาะคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้แนวความคิดในการศึกษาวิจัย

ขอกราบขอบคุณ ผศ.ดร. สมชัย หิรัญโรดม คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้ข้อคิดเห็น และแนวคิดในการทำวิจัยแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบคุณอาจารย์ ดร.วันชัย ททรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้ข้อคิดเห็น และแนวคิดในการจัดทำงานวิจัยชิ้นนี้ และให้ความช่วยเหลือในการจำลองการทำงานของวงจรที่ออกแบบ

ขอกราบขอบคุณ รศ. ดร.วีรเชษฐ์ ชันเงิน ผู้สอนวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และวิชาความเข้าใจของแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ก่อให้เกิดแนวความคิดในการทำงานวิจัยชิ้นนี้โดยใช้ความรู้หลักจากวิชาเหล่านี้ในการศึกษาวิจัยชิ้นนี้

เสงี่ยม จันทรจรัส

9 ตุลาคม 2553



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	4
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา	5
บทที่ 2 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เทคโนโลยีของอินเวอร์เตอร์	6
2.2 รูปแบบโครงสร้างหลายระดับ	7
2.3 การนำไปใช้งานในปัจจุบันและแนวโน้ม	8
2.4 รูปแบบโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	8
2.5 ข้อเปรียบเทียบของแต่ละรูปแบบโครงสร้าง	15
บทที่ 3 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์หลาย แบบ 4 สถานะ	17
3.1 บทนำ	17
3.1 คอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ	18
3.3 หลักการและแนวความคิด	19
3.4 สัญญาณควบคุม	23
3.5 การออกแบบมุมในการสวิตซ์แบบเลื่อนเฟส	26
3.6 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ	25
3.7 พัดเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ	43
3.8 การออกแบบพัดเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ	47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.9 การออกแบบเครื่องต้นแบบ	54
บทที่ 4 ผลการทดลอง	65
4.1 บทนำ	65
4.2 การจำลองการทำงานคอนเวอเตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ	65
4.3 คอนเวอเตอร์แบบหลายสถานะ แรงดันด้านออกเป็นแบบพีคเบิ้ลยูเอ็มหลายระดับ	71
4.4 การทดลองเครื่องต้นแบบ	78
บทที่ 5 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	80
5.1 บทนำ	80
5.2 สรุปผล	82
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	
ก. การออกแบบหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง	90
ข. ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่	93
ประวัติผู้เขียน	105



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รายการสิ่งที่สำคัญที่อินเวอร์เตอร์สำหรับระบบพลังงานทดแทนแบบติดตั้งเดี่ยวควรมี	15
2.2 สรุปคุณลักษณะของคอนเวอร์เตอร์ในแต่ละรูปแบบโครงสร้าง	15
3.1 เปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์	17
3.2 หลักการสร้างจำนวนระดับแรงดันด้านบวก	19
3.3 อัตราส่วนของหม้อแปลงและระดับด้านออกของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ	22
3.4 สวิตซ์ฟังก์ชันและระดับด้านออกของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ	23
3.5 สวิตซ์ฟังก์ชันของคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ	26
3.6 ตารางการเปลี่ยนมุมของสวิตซ์ฟังก์ชัน	30
3.7 สวิตซ์ฟังก์ชันของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ	31
3.8 แรงดันที่เปลี่ยนระดับและระดับแรงดันที่แต่ละระดับของอินเวอร์เตอร์ 27 ระดับ	35
3.9 แรงดันการเปลี่ยนระดับและระดับแรงดันที่แต่ละระดับของคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ	41
3.10 อัตราส่วนของหม้อแปลงและจำนวนระดับด้านออกจากหม้อแปลงคาสเคด	46
3.11 สวิตซ์ฟังก์ชันและระดับด้านออกจากหม้อแปลงคาสเคด	46
3.12 การเปลี่ยนแปลงแรงดันของพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ	51
3.13 ตำแหน่งของ P4 และ P8 ของ eZdspTMS320F2812	57
5.1 เปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอกับคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป	80
5.2 เปรียบเทียบค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันรวมระหว่างอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ 4 สถานะ	2
2.1 รูปคลื่นของเทคโนโลยีคอนเวอร์เตอร์ชนิดต่างๆ	6
2.2 การสร้างระดับเป็นขั้นๆ ของรูปคลื่น	7
2.3 ลักษณะโครงสร้างแบบไดโอด-แคปซิทอร์คอนเวอร์เตอร์ (p=3)	9
2.4 ลักษณะโครงสร้างแบบของฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (p=3)	9
2.5 คาสเคด เอช-บริดจ์ (3 เซลล์)	10
2.6 คาสเคด เอช-บริดจ์ แบบหม้อแปลงหลายขดลวด	11
2.7 คาสเคด เอช-บริดจ์ ชนิดมีคอนเวอร์เตอร์กระแสตรงเป็นกระแสตรงสองทิศทาง	11
2.8 เอช-บริดจ์ แบบคาสเคดหม้อแปลง (3 สถานะ)	12
2.9 รูปแบบโครงสร้างแบบหลายแหล่งจ่าย	13
2.10 รูปแบบโครงสร้างแบบหม้อแปลงหลายขดลวด	13
2.11 รูปแบบโครงสร้างแบบโมดูล (8 โมดูล)	14
3.1 ไดอะแกรมการทำงานอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบหลายสถานะ	18
3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ 4 สถานะ	19
3.3 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับ แบบ 2 สถานะ	25
3.4 การทำงานของสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ	27
3.5 สัญญาณควบคุมและรูปคลื่นด้านออกจากหม้อแปลงคาสเคด	28
3.6 แรงดันด้านออกของหม้อแปลงแต่ละตัวและแรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์	29
3.7 ระดับแรงดันและช่วงเวลาแต่ละระดับของคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ	29
3.8 มุมในการควบคุมการทำงานของสวิตช์	30
3.9 วงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ แบบ 3 สถานะ	31
3.10 สัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ 27 ระดับ	32
3.11 แรงดันด้านออกจากหม้อแปลงและแรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ	34
3.12 การเปลี่ยนแปลงแรงดันและระดับของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ	36
3.12 วงจรกำลังคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับแบบ 4 สถานะ	37
3.13 (ก), (ข), (ค) และ (ง) สัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับแบบ 4 สถานะ	38
3.14 รูปคลื่นแรงดันด้านออกจากหม้อแปลงของคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับแบบ 4 สถานะ	39
3.15 แรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับแบบ 4 สถานะ	40
3.16 การเปลี่ยนแปลงแรงดันและระดับของอินเวอร์เตอร์ 81 ระดับ	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 วงจรกำลังพีคดับเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ (ก) 5 ระดับ (ข) 11 ระดับ (ค) 29 ระดับ	44
3.18 วงจรกำลังของพีคดับเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ แบบ 2 สถานะ	47
3.19 แรงดันด้านออกของพีคดับเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ	48
3.20 วงจรกำลังของพีคดับเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ	49
3.21 แรงดันด้านออกพีคดับเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ	50
3.22 วงจรกำลังของพีคดับเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ	51
3.23 สัญญาณด้านออกของพีคดับเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ	52
3.24 การเปลี่ยนระดับพีคดับเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับเทียบกับรูปคลื่นไซน์	53
3.25 แผนผังในการสร้างเครื่องต้นแบบ	54
3.26 สัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับที่ออกแบบ	55
3.27 Chip Support ของ TC2000 ใน MATLAB/Simulink	55
3.28 ลักษณะการสร้างสัญญาณควบคุม โดย MATLAB/Simulink เพื่อส่งสัญญาณออก eZdspTMS320F2812	56
3.29 ตำแหน่งของ P4 และ P8 ของ eZdspTMS320F2812	56
3.30 (ก), (ข) และ(ค) สัญญาณควบคุมระดับจากการสร้างในโปรแกรม MATLAB/Simulink	57
3.31 หน้าต่างของโปรแกรม CCStudio	58
3.32 วงจรขั้วเกต	59
3.33 การกระตุ้นการนำกระแสของมอสเฟต	60
3.34 การกระตุ้นการหยุดนำกระแสของมอสเฟต	60
3.35 (ก) และ (ข) วงจรกำลังคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ แบบ 3 สถานะ เครื่องต้นแบบ	61
3.36 กำลังไฟฟ้าจากการจำลอง โดย MATLAB/Simulink	63
3.37 อุปกรณ์ภายในเครื่องต้นแบบ	64
4.1 วงจรจำลองการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ	65
4.2 รูปคลื่นสัญญาณด้านออก (ก) อินเวอร์เตอร์ 9 ระดับ (ข) เทียบกับรูปคลื่นไซน์	66
4.3 THD_v ของคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม	66
4.4 วงจรจำลองการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ	67
4.5 รูปคลื่นแรงดันด้านออก (ก) ของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ (ข) เทียบกับรูปคลื่นไซน์	68
4.6 THD_v ของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม	68
4.7 วงจรจำลองการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 รูปคลื่นแรงดันด้านออก (ก) ของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ (ข) เทียบกับรูปคลื่นไซน์	70
4.9 รูปคลื่นแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ 81ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม (ค) โหลด 2000 โอห์ม	70
4.10 THD_V คอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลดความต้านทาน 1000โอห์ม	71
4.11 วงจรการจำลองวงจรกำลังพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ	72
4.12 แรงดันด้านออก (ก) จากหม้อแปลงและแรงดันด้านออกพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ (ข) เทียบกับรูปคลื่นไซน์	72
4.13 THD_V ของ พีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม	73
4.14 วงจรจำลองการทำงานพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ	74
4.15 (ก) แรงดันด้านออกพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ (ข) เปรียบเทียบกับรูปคลื่น ไซน์	74
4.16 รูปคลื่นแรงดันด้านออกพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม	75
4.17 THD_V แรงดันด้านออกพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ(ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม	75
4.18 วงจรจำลองการทำงานพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ	76
4.19 แรงดันด้านออก (ก) พีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ (ข) เปรียบเทียบกับรูปคลื่น ไซน์	77
4.20 รูปคลื่นแรงดันของพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม	77
4.21 THD_V ของพีคเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม	78
4.22 การทดลองเครื่องต้นแบบ	78
4.23 รูปคลื่นแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ จากเครื่องต้นแบบ (ก) เต็มคลื่น (ข) ครึ่งคลื่น	79
4.24 รูปคลื่นแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 2000 โอห์ม	79
5.1 เปรียบเทียบ THD_V ของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอกับจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์	81
5.2 เปรียบเทียบ THD_V ของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอกับจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ที่โหลดต่างๆ	82
5.3 เปรียบเทียบ THD_V ของคอนเวอร์เตอร์จากการจำลองและเครื่องต้นแบบที่ 27 ระดับ	82

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AC	=	ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current)
CMI	=	คาสเคดมัลติเซลล์อินเวอร์เตอร์ (Cascade multi-cell inverter)
DC	=	ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current)
DC/DC	=	Direct current/Direct current
DCI	=	ไดโอดแคลมป์อินเวอร์เตอร์ (Diode-clamped inverter)
DSP	=	Digital signal processor
EMC	=	ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic compatibility)
EMI	=	การสอดแทรกทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference)
FCI	=	ฟลายอิงคาปาซิเตอร์อินเวอร์เตอร์ (Flying capacitor inverter)
H-Bridge	=	รูปแบบโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย 4 สวิตช์
HF-PWM	=	High frequency pulse width modulation
IEC	=	International Electrotechnical Commission
IEEE	=	Institute of Electrical and Electronics Engineering
IHD	=	ความเพี้ยนฮาร์มอนิกเฉพาะ (Individual harmonic distortion)
Mi	=	ดัชนีการมอดูเลชัน (Modulation index)
NPC	=	Neutral point converter
P_{Tr_n}	=	กำลังกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง
PWM	=	พีดีบีเอ็ม (Pulse width modulation)
n	=	ลำดับสถานะของหม้อแปลง
N	=	จำนวนระดับด้านออก
rms	=	ค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square)
s	=	จำนวนสถานะ
SARES	=	Stand alone renewable energy system
SF	=	Switching function
SVC	=	Static var compensator
THD	=	ความเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total harmonic distortion)
THD_V	=	ความเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมดของแรงดัน
Tr_n	=	ลำดับของหม้อแปลง
Tr_{n_sec}	=	ลำดับของอัตราส่วนขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง
V	=	Voltage

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V_{dc}	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
V_n	=	แรงดันที่ขั้วของหม้อแปลงลำดับที่ n
V_{pk}	=	ค่ายอดของแรงดัน
V_{rms}	=	ค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของแรงดันไฟฟ้า
θ	=	มุมในการสวิตชิง



บทที่ 1

บทนำ

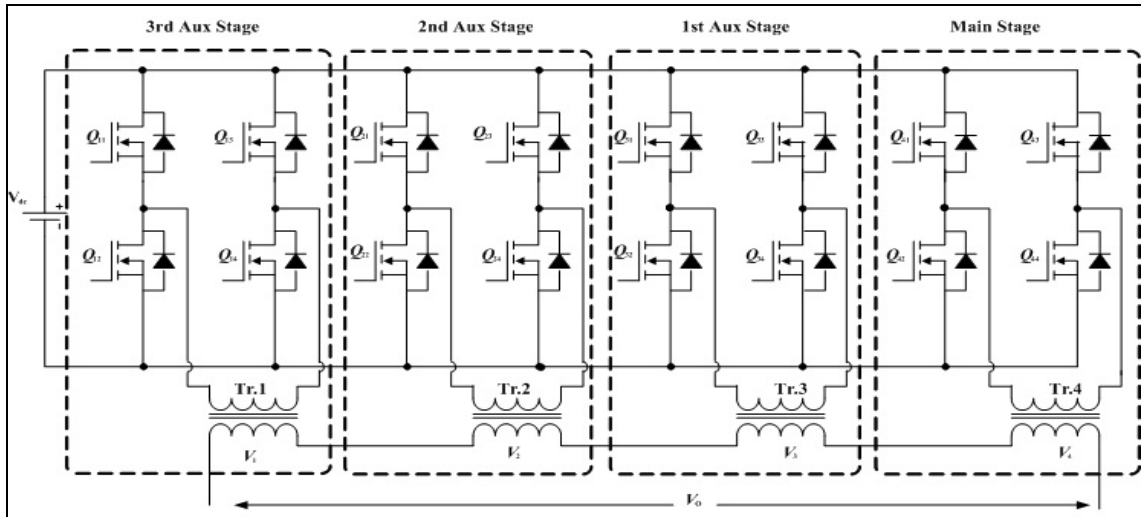
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง (Switching power supply) ไทริสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ (Thyristor converters) เครื่องแก้กำลังไฟฟ้าไฟฟ้าสูญเสีย (Static var compensator; SVC) และใช้เป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับพลังงานทดแทน แต่ปัจจุบันวิธีการพีดีบีเอ็มในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ เช่น การขับเครื่องกลไฟฟ้า การแก้เพาเวอร์แฟคเตอร์ หรือ การกรองกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ไม่สามารถสร้างรูปคลื่นที่สมบูรณ์ ขึ้นอยู่กับความถี่ในการสวิตชิงของอุปกรณ์กึ่งตัวนำ โดยทั่วไปแล้วคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดัน และคอนเวอร์เตอร์แบบกระแสจะสร้างสัญญาณด้านออกที่ไม่ต่อเนื่องเข้าไปขับเครื่องกลไฟฟ้า หรือจะกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าจากการสวิตชิงที่รูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมก่อให้เกิดความถี่หรือฮาร์มอนิกส์ที่ไม่ต้องการ มีปัญหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion: THD) สูง ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และการสวิตชิงที่ความถี่สูงของพีดีบีเอ็มก่อให้เกิดปัญหาสัญญาณรบกวนความถี่สูง ซึ่งเป็นปัญหาการสอดแทรกแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) หรือความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) จากปัญหาของคุณลักษณะที่ไม่ต้องการของพีดีบีเอ็มคอนเวอร์เตอร์ จึงมีการพัฒนาคอนเวอร์เตอร์มาเป็นคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Converters) ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณให้มีจำนวนระดับมากขึ้นได้ [1-8]

ปัญหาทางด้านความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่ใช่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าของโหลดเท่านั้น แต่ยังถูกควบคุมโดยมาตรฐานจากหน่วยงานต่างๆ เช่น การต่อพลังงานทดแทนเข้ากับระบบไฟฟ้า และการควบคุมค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ในการต่ออุปกรณ์ต่างๆ เข้าระบบไฟฟ้าของหน่วยงานที่ดูแลระบบไฟฟ้าซึ่งกำหนดให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมไม่เกิน 5% [9-12]

คอนเวอร์เตอร์หลายระดับ ทำให้คุณภาพของแรงดันไฟฟ้าดีขึ้น คือรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้น สามารถลดฮาร์มอนิกส์ที่ไม่ต้องการได้ โดยยังมีจำนวนระดับมากสัญญาณจะยิ่งใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมจะยิ่งต่ำ แต่ต้องใช้อุปกรณ์สวิตชิงจำนวนมาก คอนเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้คือ นิวทรัลพอยท์คอนเวอร์เตอร์ (Neutral point converter; NPC) ไดโอด-แคลมป์อินเวอร์เตอร์ (Diode-Clamped Inverter) ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor) และคาสเคดเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Cascaded H-bridge inverter) [6, 7], [13-15]

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอคอนเวอร์เตอร์แบบหลายหม้อแปลง (Multiple-transformers topology) ซึ่งต่อแบบเอช-บริดจ์ ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน และชุดเอช-บริดจ์แต่ละชุดต่อกับหม้อแปลง โดยที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงแต่ละชุดต่อกันแบบอนุกรมเพื่อสร้างรูปคลื่นแรงดันด้านออกให้มีหลายระดับ เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันมีคุณภาพสูง ใกล้เคียงกับไซน์ ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมต่ำ และเพื่อลดปัญหาทางด้านความเข้ากันได้ของแม่เหล็กไฟฟ้าจากการสวิตชิงที่ความถี่สูง ลักษณะวงจรของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ 4 สถานะ

ประโยชน์ของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้มีอีกหลายอย่างคือ

1. สามารถที่จะเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจากไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันต่ำ โดยไม่ต้องใช้บูสต์คอนเวอร์เตอร์
2. แยกส่วนที่เป็นแรงดันต่ำและอุปกรณ์สวิตชิงออกจากส่วนที่เป็นแรงดันสูงหรือแรงดันด้านออกโดยหม้อแปลงคาสเคด
3. สามารถสร้างระดับแรงดันโดยลดจำนวนอุปกรณ์สวิตชิง
4. ไม่จำเป็นต้องมีวงจรกรองด้านออกเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สูงถูกกรองออกไปโดยหม้อแปลงคาสเคด ดังนั้นสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันด้านออกที่มีคุณภาพสูง
5. สามารถลดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลา (dv/dt) และการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลา (di/dt) ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาค่าความเข้ากันได้ของแม่เหล็กไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

จากปัญหาทางด้านประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่กล่าวมาแล้วนั้น จุดประสงค์ของการวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบเอช-บริดจ์ แบบคาสเคดหม้อแปลงเพื่อสร้างระดับแรงดันหลายระดับ ที่ 2 สถานะ ถึง 4 สถานะ โดยมีจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2.1 ออกแบบคอนเวอร์เตอร์แบบเอช-บริดจ์หม้อแปลงคาสเคดที่ 2 สถานะ ถึง 4 สถานะ เพื่อสร้างรูปคลื่นมีประสิทธิภาพสูงมีรูปคลื่นสัญญาณใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์

1.2.2 จำลองผลและเปรียบเทียบระหว่างการสร้างรูปคลื่นแรงดันด้านออกแบบหลายระดับ และรูปคลื่นแรงดันด้านออกแบบพีคดับเบิลยูเอ็มหลายระดับ เพื่อเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน

1.2.3 เปรียบเทียบผลค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันกับจำนวนสถานะเพื่อที่จะสามารถสร้างคอนเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพและใช้อุปกรณ์สวิตซ์น้อยกว่า

1.2.4 สามารถออกแบบสร้างเครื่องต้นแบบได้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 สามารถออกแบบสัญญาณควบคุมเพื่อสร้างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบหลายหม้อแปลง 2, 3 และ 4 สถานะ เพื่อที่จะสามารถสร้างสัญญาณด้านออกแบบพีคดับเบิลยูเอ็มที่ 5, 11 และ 29 ระดับ ตามลำดับ

1.3.2 สามารถออกแบบสัญญาณควบคุมเพื่อสร้างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบหลายหม้อแปลง 2, 3 และ 4 สถานะ เพื่อที่จะสามารถสร้างสัญญาณด้านออกแบบขั้นบันไดที่ 9, 27 และ 81 ระดับ ตามลำดับ

1.3.3 สามารถวิเคราะห์หาวิธีการสร้างสัญญาณควบคุมที่จะสามารถสร้างคอนเวอร์เตอร์ให้มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ได้ไม่เกิน 5% และสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับเดิมที่มีใช้อยู่ทั่วไป

1.3.4 สามารถออกแบบสร้างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับตามทีออกแบบโดยใช้ DSP Board ชนิด eZdsp230F2812 ในการควบคุม

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ออกแบบสัญญาณควบคุมเพื่อสร้างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบหลายหม้อแปลง 2, 3 และ 4 สถานะ เพื่อที่จะสามารถสร้างสัญญาณด้านออกแบบพีดับเบิลยูเอ็ม 5, 11 และ 29 ระดับ ตามลำดับ

1.4.2 ออกแบบสัญญาณควบคุมเพื่อสร้างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบหลายหม้อแปลง 2, 3 และ 4 สถานะ เพื่อที่จะสามารถสร้างสัญญาณด้านออกแบบขั้นบันได 9, 27 และ 81 ระดับ ตามลำดับ

1.4.3 ทบทวนผลของการออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย จำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันด้านออก ค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน (V_{rms}) และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของแรงดัน (THD_V) ของคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ ทั้ง 6 แบบ เพื่อหาคอนเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมคือ THD_V ต่ำ ใช้อุปกรณ์สวิตซ์ชิ่งน้อย

1.4.4 ออกแบบสร้างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับตามที่ออกแบบและวิเคราะห์จากการจำลอง และเปรียบเทียบกับจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ชิ่งที่ใช้โดยเลือกคอนเวอร์เตอร์ที่ THD_V ไม่เกิน 5% และใช้ อุปกรณ์สวิตซ์ชิ่งน้อยที่สุด โดยการใช้ DSP Board ชนิด eZdsp230F2812 ในการควบคุม

1.4.5 เปรียบเทียบผลรูปคลื่นแรงดันด้านออก และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของแรงดัน (THD_V) จากเครื่องต้นแบบและจากการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่มีใช้งานอยู่ทั่วไป และที่มีการศึกษาวิจัยมาแล้ว เพื่อมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถลดอุปกรณ์ชิ่ง ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนให้ต่ำลง เพื่อที่จะสามารถพัฒนาเพื่ออุตสาหกรรม และการค้าได้

1.5.2 ศึกษามาตรฐานและข้อกำหนดของคอนเวอร์เตอร์ และการต่อกับระบบไฟฟ้า สาธารณะ

1.5.3 ออกแบบสัญญาณควบคุมเพื่อสร้างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบหลายหม้อแปลง 2, 3 และ 4 สถานะ เพื่อที่จะสามารถสร้างสัญญาณด้านออกแบบพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ที่ 5, 11 และ 29 ระดับ ตามลำดับ และสร้างสัญญาณด้านออกแบบขั้นบันไดที่ 9, 27 และ 81 ระดับ ตามลำดับ

1.5.4 จำลองการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย MATLAB/Simulink

1.5.5 วิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันด้านออก ค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน (V_{rms}) และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของแรงดัน (THD_V) ของคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบทั้ง 6 แบบ เพื่อหาคอนเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมคือ THD_V ต่ำ ใช้อุปกรณ์สวิตซ์ิ่งน้อย

1.5.6 ศึกษาการใช้งานแผง eZdspTMS320F2812 Digital signal processor

1.5.7 ศึกษาวิธีการในการสร้างสัญญาณควบคุมจากโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อที่จะสามารถสร้างสัญญาณควบคุม และแปลงสัญญาณเป็นภาษา C++ เพื่อส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกโดยใช้ DSP Board ชนิด eZdsp230F2812

1.5.8 ออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบ (Prototype) โดยใช้การควบคุมจาก DSP Board ชนิด eZdsp230F2812 และขยายสัญญาณควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ทางแสงไปควบคุมมอสเฟตกำลัง

1.5.9 ทดลองเปรียบเทียบผลรูปคลื่นแรงดันด้านออก และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของแรงดัน (THD_V) จากเครื่องต้นแบบและจากการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.5.10 สรุปผล

1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

1.6.1 ต้องศึกษาข้อมูล ทฤษฎี และการวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เพื่อพัฒนาคอนเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพสัญญาณแรงดันด้านออกสูง และสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งกำลังได้จำนวนมาก

1.6.2 ต้องใช้เวลานานเนื่องจากต้องศึกษา ออกแบบ และจำลองคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ จำนวนหลายแบบและศึกษาเปรียบเทียบค่าจำนวนมาก เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสม

1.6.3 ในการพัฒนาเครื่องต้นแบบจะมีปัญหาหลายด้านทั้งการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อ Interface กับ DSP Board การสร้างวงจรขยายสัญญาณควบคุมและวงจรจับเกต ปัญหาเวลาในการสวิตซ์ิ่งของมอสเฟตกำลัง และปัญหาในการออกแบบหม้อแปลง เนื่องจากการออกแบบจริงจะต้องศึกษาข้อมูล และรายละเอียดจำนวนมาก รวมถึงปัญหาที่เจอและต้องแก้ไขให้สำเร็จ

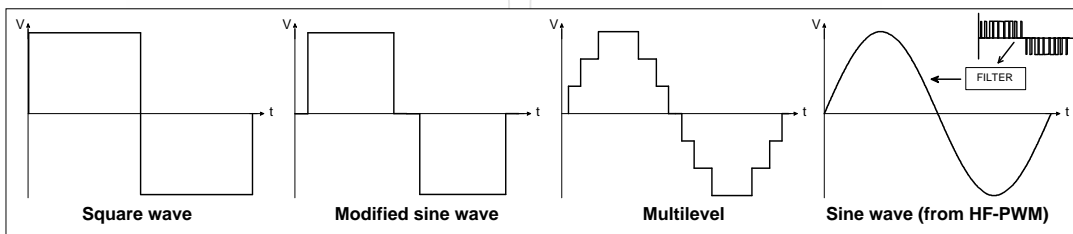
1.6.4 ไม่มีความพร้อมในเรื่องของเครื่องมือในการทดสอบ

บทที่ 2

วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งตามสัญญาณรูปคลื่นด้านออกได้ 4 กลุ่มคือ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม, รูปคลื่นไซน์ประยุกต์, แบบหลายระดับ และแบบรูปคลื่นไซน์ โดยการสังเคราะห์จากพีคดับเบิ้ลยูเอ็มความถี่สูง (High frequency pulse width modulation: HF-PWM) รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงรูปคลื่นของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละกลุ่ม



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นของเทคโนโลยีคอนเวอร์เตอร์ชนิดต่างๆ

แม้ว่าอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยมและรูปคลื่นไซน์ประยุกต์ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการใช้งานทั่วไปในตลาดในปัจจุบัน แต่ไม่แนะนำในการออกแบบเพราะมีปัญหาเนื่องจากมีรูปคลื่นที่ขมมาก มีค่าฮาร์มอนิกส์ลำดับต้นๆ และ THD_v สูงมากซึ่งเป็นผลให้ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าสูง

อินเวอร์เตอร์หลายระดับและอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นไซน์ เทคโนโลยีนี้ได้ถูกพิจารณาแล้วว่าสามารถใช้งานได้ ข้อแตกต่างหลักของอินเวอร์เตอร์หลายระดับกับอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นไซน์คือความถี่ในการสวิตชิ่ง คืออินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นไซน์โดยใช้เทคนิค HF-PWM เกิดจากการสวิตชิ่งที่ความถี่สูงซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับในการประยุกต์ใช้งานกับระบบกำลังไฟฟ้าสูงคือมากกว่า 5 เมกกะวัตต์ จะเหมาะสมมากในการนำไปใช้ สำหรับการนำไปใช้งานกับระบบกำลังไฟฟ้ากลางหรือต่ำนั้นยังมีข้อได้เปรียบกันอยู่ ผู้เชี่ยวชาญทางด้านคอนเวอร์เตอร์ความถี่สูงได้ชี้ประเด็นจุดแข็งที่สุดคือสามารถให้การสวิตชิ่งที่ความถี่สูงได้ในราคาที่ต่ำกว่า [16-18] ในขณะที่อีกฝ่ายหนึ่งผู้เชี่ยวชาญทางด้านคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การสวิตชิ่งที่ความถี่ต่ำอ้างว่าโครงสร้างแบบการสวิตชิ่งที่ความถี่ต่ำมีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก และแข็งแรงทนทานมากกว่า [19-22]

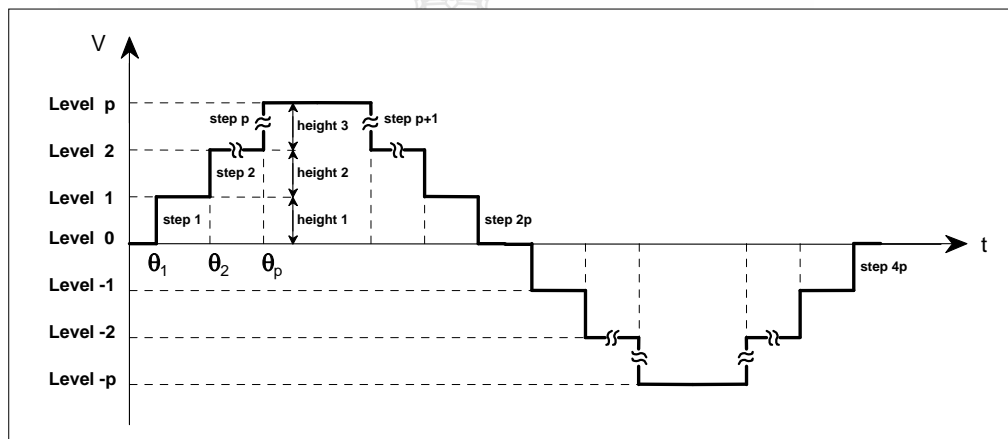
ข้อเท็จจริงในการจะตัดสินใจว่าคอนเวอเตอร์แบบไหนขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานมากกว่า และตัวแปรต่างๆในการใช้มากกว่าหลักเกณฑ์ทางด้านสมรรถนะ [23]

2.2 รูปแบบโครงสร้างหลายระดับ

ที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันรูปแบบโครงสร้างของคอนเวอเตอร์แบบหลายระดับเป็นทางเลือกที่ดีในการใช้งานของอินเวอเตอร์ความถี่ต่ำซึ่งมีรูปคลื่นแรงดันด้านออกผิดเพี้ยนต่ำ บทนี้จะเป็นการทบทวนเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างของคอนเวอเตอร์ที่ใช้กันมาก

2.2.1 หลักการของคอนเวอเตอร์หลายระดับ

คอนเวอเตอร์หลายระดับ สามารถนิยามได้ว่า อุปกรณ์ซึ่งสามารถที่จะสร้างรูปคลื่นเป็นขั้นๆ การสร้างขั้นของรูปคลื่นเป็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสร้างระดับเป็นขั้นๆ ของรูปคลื่น

โดยปกติ ในงานนี้ จะสามารถนิยามได้ว่า

p : คือ จำนวนขั้นในครึ่งคาบ;

$2 * p + 1$: คือ จำนวนระดับของคอนเวอเตอร์;

$4 * p$: คือ จำนวนขั้นของคอนเวอเตอร์

ปกติรูปคลื่นทั้งความกว้างและความสูงของขั้นสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ แต่อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วความสูงของขั้นจะทำให้มีขนาดเท่ากันเท่านั้น ส่วนความกว้างของแต่ละชั้นจะเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้รูปคลื่นแบบหลายระดับจะมีคุณลักษณะที่สมบูรณ์โดยมุมของแต่ละระดับ ($\theta_1, \theta_2 \dots \theta_p$) [24-25]

เพราะว่าแต่ละรูปคลื่นของแรงดันหลายระดับขึ้นอยู่กับจำนวนระดับที่กำหนด ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่จะต้องพิจารณาค่ายอดของมัน ซึ่งจะแตกต่างจากค่าที่คำนวณจากค่าเฉลี่ยของรากกำลัง

$$M_i = \frac{(V_{pk} / \sqrt{2})}{V_{RMS}} \quad (2.1)$$

เมื่อ V_{pk} และ V_{RMS} คือค่ายอดและค่าเฉลี่ยของรากกำลังสองของแรงดันไฟฟ้าตามลำดับ

2.3 การนำไปใช้งานในปัจจุบันและแนวโน้ม

คอนเวอร์เตอร์หลายระดับได้ถูกนำไปใช้งานในระบบกำลังไฟฟ้าขนาดกลางและสูงเป็นหลัก เช่นการแก้กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และปรับความเร็วมอเตอร์ [26-30] ในการใช้งานในลักษณะนี้ข้อจำกัดของกระแสขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของอุปกรณ์กึ่งตัวนำกำลัง หลักการของหลายระดับโดยปกติจะไม่เหมือนกับอย่างอื่น เพราะว่าจะอยู่บนหลักการของการสวิตชิงที่ความถี่ต่ำ และจะเป็นการแบ่งแรงดันและ/หรือกระแสระหว่างอุปกรณ์สวิตชิงกำลัง [31-32]

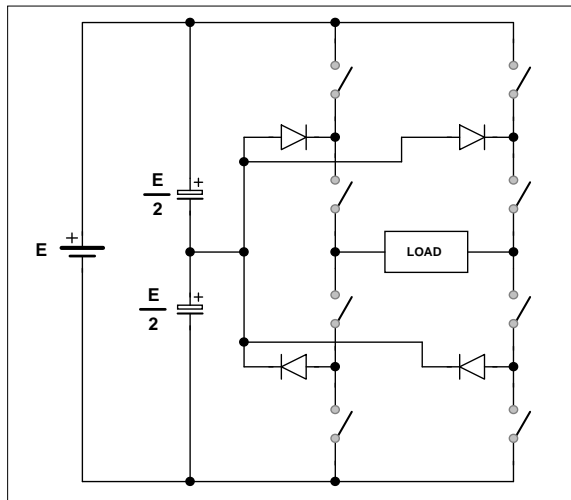
ในการใช้งานอย่างอื่น ในระบบกำลังไฟฟ้าขนาดเล็ก (น้อยกว่า 10 กิโลวัตต์) การใช้งานคอนเวอร์เตอร์หลายระดับได้เข้ามาแข่งขันกับคอนเวอร์เตอร์แบบพีคเบิ้ลยูเอ็มความถี่สูง เมื่อต้องการหรือให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพสูงเป็นหลัก และที่มากกว่านั้นคือราคาของอุปกรณ์สวิตชิงต่ำ และเทคโนโลยีของอุปกรณ์กึ่งตัวนำแบบใหม่สามารถนำกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงตามทีอินเวอร์เตอร์ต้องการ ซึ่งจะนิยมใช้กับระบบพลังงานทดแทน [34-37]

2.4 รูปแบบโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรูปแบบลักษณะโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับได้นำไปใช้งานโดยทั่วไป โดยจะทบทวนอย่างสั้นๆ ของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีใช้กันอยู่

2.4.1 นิวทรัลพอยต์คอนเวอร์เตอร์ (Neutral-Point Converter: NCP)/ลักษณะโครงสร้างแบบไดโอด-แคลมป์ (Diode-Clamped topology)

นิวทรัลพอยต์คอนเวอร์เตอร์ ลักษณะโครงสร้างแบบไดโอด-แคลมป์ ถูกนำเสนอ โดย Nabae et al. ในปี ค.ศ. 1981 รูปแบบของคอนเวอร์เตอร์แบบนี้แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.3 เรียกว่าอินเวอร์เตอร์แบบนิวทรัลพอยต์คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับ [38] ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการใช้งานอย่างกว้างขวางของรูปแบบคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ และได้ขยายมาใช้ในการอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นอินเวอร์เตอร์แบบนิวทรัลพอยต์คอนเวอร์เตอร์สามารถสร้างจำนวนของระดับได้มากขึ้น โดยใช้หลักการเดียวกัน ได้มีการพัฒนามาเป็นระดับแรงดันแบบไดโอด-แคลมป์ (Diode-Clamped Voltage

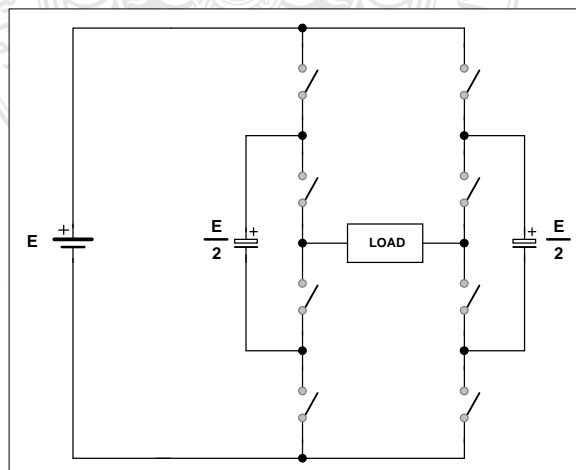


รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างแบบไดโอด-แคปซิปคอนเวอร์เตอร์ (p=3)

จากรูปที่ 2.3 คืออินเวอร์เตอร์แบบนิวตริลพอยต์คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับ จะใช้คาปาซิเตอร์ในการสร้างระดับแรงดันระหว่างกลาง และแรงดันตกคร่อมสวิตช์จะเป็นครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น คาปาซิเตอร์จะถูกกำหนดให้ทำหน้าที่รักษาความสมดุลของแรงดัน ในการใช้งานไดโอด-แคปซิป อินเวอร์เตอร์ส่วนมากจะถูกจำกัดไว้ตามโครงสร้างดั้งเดิมคือ 3 ระดับ [13, 40-41]

2.4.2 ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor)

รูปแบบโครงสร้างของฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 3 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากการพิจารณาทางเลือกที่ดี แก้อินเวอร์เตอร์แบบนิวตริลพอยต์คอนเวอร์เตอร์ [42-43]

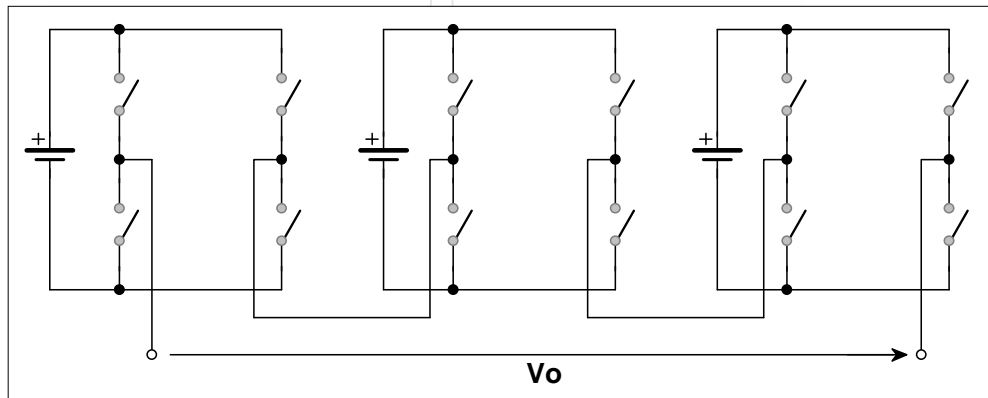


รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างแบบของฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (p=3)

คอนเวอร์เตอร์รูปแบบนี้ การเพิ่มจำนวนระดับและแรงดันได้รับโดยค่าเฉลี่ยของคาปาซิเตอร์ซึ่งต่อแบบลอยอยู่ ซึ่งเกี่ยวกับแหล่งจ่ายกระแสตรงที่อ้างอิง แต่ไม่ต้องการการต่อแคลมป์ไดโอด แต่จะต้องจัดเตรียมสถานะของสวิตช์มากขึ้นไป เพื่อใช้ในการควบคุมการชาร์จคาปาซิเตอร์ให้เรียบภายใต้โหลดซึ่งเป็นระดับกระแสตรง [44] แต่กระนั้น ในระบบที่ใหญ่จะต้องมีคาปาซิเตอร์จำนวนมากเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น และนอกจากนั้นวงจรยังจะต้องมีการชาร์จคาร์ปาร์ซิเตอร์ไว้ก่อน

2.4.3 คาสเคด เอช-บริดจ์ (Cascaded H-Bridge)

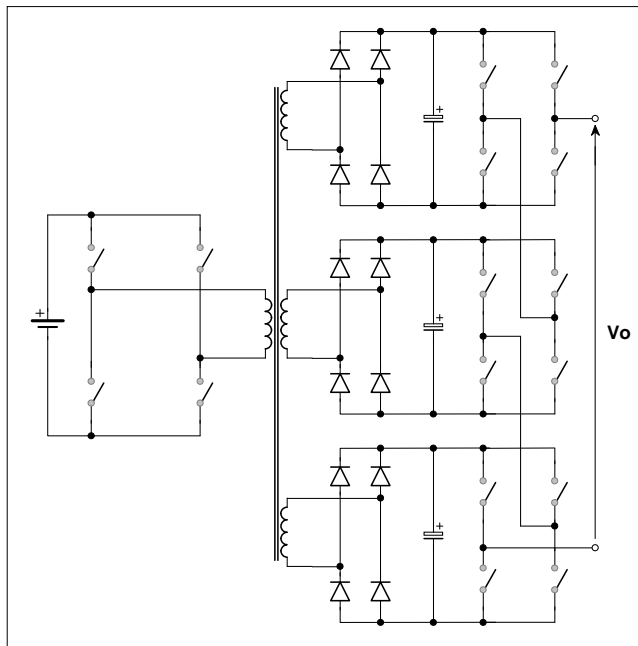
รูปแบบโครงสร้างแบบคาสเคดเอช-บริดจ์ จะประกอบไปด้วยวงจรเอช-บริดจ์ (บางครั้งเรียกว่าฟูลบริดจ์) คอนเวอร์เตอร์ ต่อกันแบบคาสเคด ดังในรูปที่ 2.5 แสดงวงจรคาสเคด เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ 3 เซลล์



รูปที่ 2.5 คาสเคด เอช-บริดจ์ (3 เซลล์)

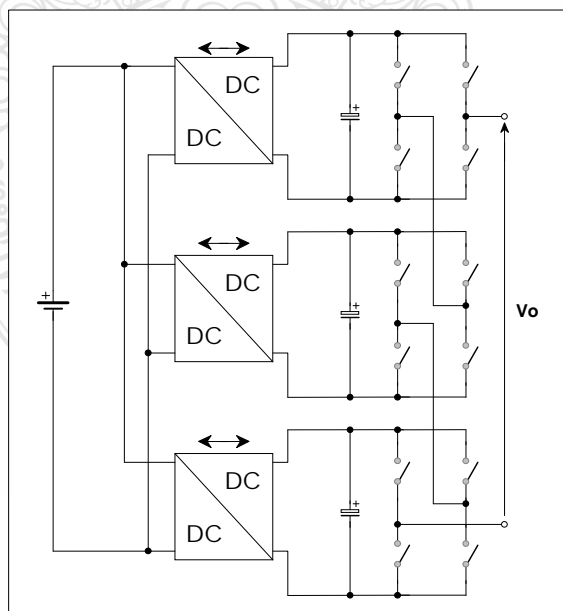
รูปแบบโครงสร้างของคาสเคดเอช-บริดจ์ จะสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับแรงดันที่แตกต่างกัน และสามารถที่จะสร้างจำนวนระดับของแรงดันได้มาก โดยสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ [45-48] และนอกจากนั้นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถที่จะรวมกันหรือแยกออกจากกัน ซึ่งสร้างจำนวนของระดับด้านออกได้มากขึ้น

แม้ว่ารูปแบบนี้จะต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แต่ในบางระบบสามารถที่จะใช้แบตเตอรี่หรือแผงวงจรโฟโตโวลตาอิก และยังคงถูกนำไปใช้งานในลักษณะงานอินเวอร์เตอร์ไร้หม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพสูง [49] และเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหาได้ง่าย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบหลายแหล่งจ่ายก็สามารถที่จะทำได้โดยการใช้หม้อแปลงแยกส่วนและวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แต่ถ้ามีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงแหล่งจ่ายเดียว ก็จะสามารถใช้รูปแบบโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.6 [50]



รูปที่ 2.6 คาสเคด เอช-บริดจ์ แบบหม้อแปลงหลายขดลวด

รูปแบบโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะง่ายแต่จะเกิดความสูญเสียในการที่ต้องเพิ่มไดโอดในการแปลงไฟฟ้าตามที่แสดง และสามารถไม่รองรับการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ทั้งสองทิศทาง จากปัญหานี้จึงถูกเข้ามาแทนที่โดยรูปแบบโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.7 [51]

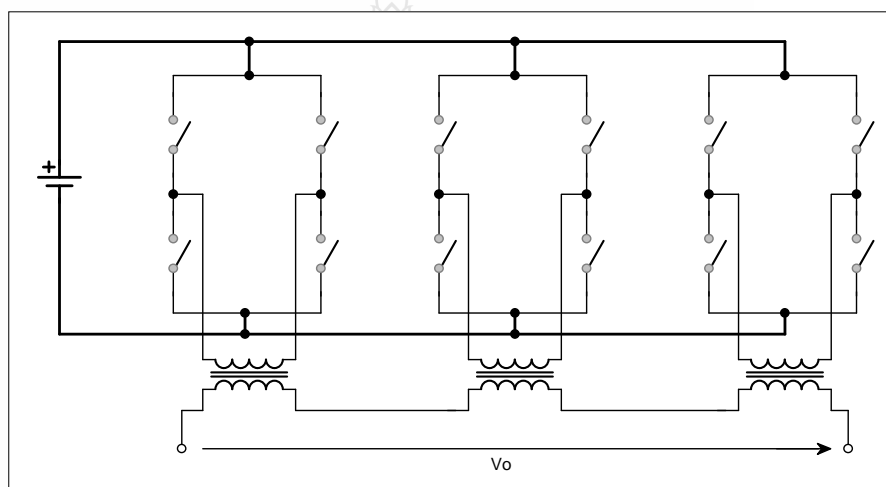


รูปที่ 2.7 คาสเคด เอช-บริดจ์ ชนิดมีคอนเวอร์เตอร์กระแสตรงเป็นกระแสตรงสองทิศทาง

รูปแบบโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะมีประสิทธิภาพสูงถ้าวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงมีการสวิตซ์ที่ดี [52] ในการใช้งานบางครั้งรูปแบบโครงสร้างนี้จะใช้พื้นฐานการสวิตซ์ที่ความถี่สูง และผลที่ได้รับโดยปกติแล้วการสวิตซ์ที่ความถี่ต่ำทำให้เกิดความเสียหายได้

2.4.4 โครงสร้างแบบหลายสถานะ (Multi-stage) หรือแบบหลายหม้อแปลง (Multiple-transformer topology)

รูปที่ 2.8 แสดงรูปแบบโครงสร้างแบบหลายหม้อแปลง ประกอบด้วยรูปแบบเอช-บริดจ์ 3 สถานะ แต่ละสถานะต่อกับหม้อแปลง และด้านออกของหม้อแปลงแยกส่วนของแต่ละสถานะจะต่อกันแบบคาสเคด โดยที่ชุดเอช-บริดจ์แต่ละชุดต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเดียวกัน



รูปที่ 2.8 เอช-บริดจ์ แบบคาสเคดหม้อแปลง (3 สถานะ)

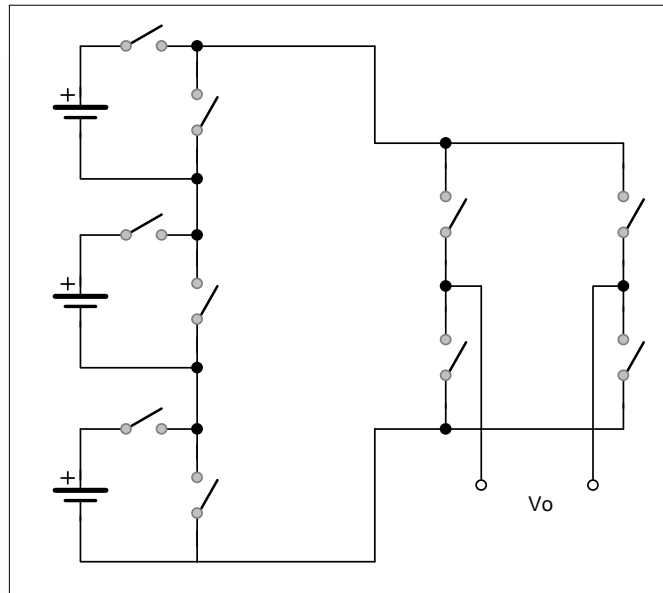
ในปัจจุบันคอนเวอร์เตอร์รูปแบบนี้ได้รับความสนใจในการใช้กับระบบพลังงานทดแทน โดยใช้พื้นฐานจากรูปแบบลักษณะนี้ [1, 37] ในการใช้งานได้รับการตรวจสอบแล้วว่ามี ความแข็งแรง ทนทาน และไว้ใจได้ และสามารถสร้างระดับแรงดันได้หลายระดับโดยสามารถลดจำนวนอุปกรณ์ สวิตซ์ [53]

การออกแบบวงจรควบคุม และการศึกษาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบโครงสร้างแบบเอช-บริดจ์ แบบคาสเคดหม้อแปลงนี้ โดยการออกแบบสัญญาณควบคุม เพื่อสร้างรูปคลื่นแรงดันด้าน ออกเป็นแบบหลายระดับ และพีดีบีเอ็มหลายระดับ เพื่อเปรียบเทียบหารูปแบบที่เหมาะสมในการ นำไปใช้งาน

2.4.5 โครงสร้างแบบหลายแหล่งจ่าย (Multiple-source topology)

รูปแบบโครงสร้างแบบหลายแหล่งจ่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แยกจากกัน เพื่อสร้างรูปคลื่นหลายระดับเพื่อสร้างเป็นแรงดันกระแสตรงหลายระดับ [54-55]

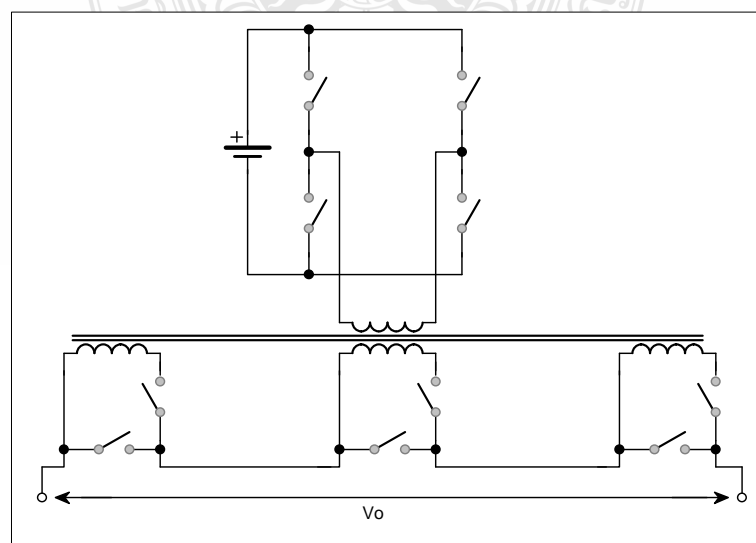
โครงสร้างแบบหลายแหล่งจ่ายที่จำนวนระดับครึ่งคาบมากกว่า 4 จะต้องการจำนวนอุปกรณ์ สวิตซ์ขั้วน้อยที่สุด เพื่อสร้างประสิทธิภาพที่ดีกว่าคอนเวอร์เตอร์แบบกระแสรูปแบบอื่น อินเวอร์เตอร์ แบบนี้ได้ผ่านการทดสอบกับระบบพลังงานทดแทนมามากกว่า 10 ปี และได้รับการยอมรับว่ามี ประสิทธิภาพสูง แข็งแรงทนทาน และไว้ใจได้ [56] สิ่งที่แตกต่างกันก็คือต้องการแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงแยกจากกัน และไม่มีการแยกส่วนระหว่างแรงดันด้านเข้าและด้านออก



รูปที่ 2.9 รูปแบบโครงสร้างแบบหลายแหล่งจ่าย

2.4.6 โครงสร้างแบบหม้อแปลงหลายขดลวด (Multi-Winding-transformer topology)

รูปแบบโครงสร้างแบบหม้อแปลงหลายขดลวด ได้การรับการพัฒนาจากโครงสร้างแบบ หลายแหล่งจ่าย ลักษณะ โครงสร้างของหม้อแปลงหลายขดลวด 3 เซลล์ แสดงในรูปที่ 2.10

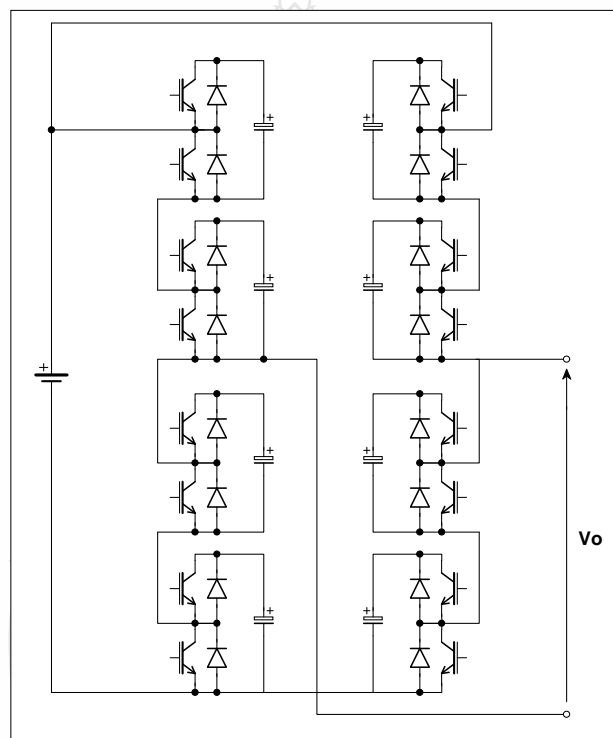


รูปที่ 2.10 รูปแบบโครงสร้างแบบหม้อแปลงหลายขดลวด

โครงสร้างแบบหม้อแปลงหลายขดลวดจะไม่เหมือนกับโครงสร้างแบบหลายแหล่งจ่าย ซึ่งจะสามารถทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงชุดเดียว แต่จะต้องเพิ่มหม้อแปลงหลายขดลวด ซึ่งจะทำหน้าที่แยกส่วนที่เป็นด้านเข้าและด้านออก และหม้อแปลงตัวเดียวได้รับการตรวจสอบแล้วว่า มีประสิทธิภาพ ข้อเสียคือความสัมพันธ์ระหว่างต้องใช้สวิตช์จำนวนมากกับความจำเป็นต้องใช้สวิตช์สองทิศทาง และวงจรซับซ้อนแบบแยกส่วน (ที่สถานะด้านออก) [23]

2.4.7 โครงสร้างแบบโมดูล (Modular topology)

รูปที่ 2.11 แสดงรูปแบบโครงสร้างแบบโมดูล แบบ 8 โมดูล ซึ่งไม่นานมานี้ได้มีการนำเสนอในการใช้งานกับกำลังไฟฟ้าสูง [57-58]



รูปที่ 2.11 รูปแบบโครงสร้างแบบโมดูล (8 โมดูล)

โครงสร้างแบบนี้ประกอบเป็นโมดูลจำนวนมาก และในแต่ละโมดูลจะมี 2 จุดต่อที่ประกอบด้วย 2 สวิตช์ และคาปาซิเตอร์สำหรับเก็บแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในแต่ละโมดูล ข้อเสียคือจะต้องมีวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าในคาปาซิเตอร์แต่ละโมดูล และไม่สามารถรองรับการไหลของกระแสที่ไหลคี่ทิศทางเดียว

2.4.8 โครงสร้างแบบคอนเวอร์เตอร์แบบผสม (Hybrid converter topology)

คอนเวอร์เตอร์แบบผสมไม่ได้มีการกำหนดเป็นรูปแบบโครงสร้างเฉพาะ ซึ่งเป็นการรวมเอาคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ เข้าด้วยกัน จะอ้างอิงไปที่การทำงานของในการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ [31, 59]

2.5 ข้อเปรียบเทียบของแต่ละรูปแบบโครงสร้าง

ในการใช้งานคอนเวอร์เตอร์ส่วนมาก โดยเฉพาะใช้กับระบบพลังงานทดแทนแบบติดตั้งเดี่ยว (Stand Alone Renewable Energy System: SARES) จะต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแหล่งจ่ายเดียว และต้องการปรับปรุงคุณลักษณะทางด้านความไว้วางใจได้ มีสมรรถนะ และความสามารถในการจ่ายกำลัง นอกจากนี้ประโยชน์ของอินเวอร์เตอร์ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับที่อยู่อาศัย จะต้องจ่ายให้กับโหลดเช่นเครื่องใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องสร้างแรงดันที่มีรูปคลื่นที่มีคุณภาพสูง

ตารางที่ 2.1 รายการสิ่งที่สำคัญที่อินเวอร์เตอร์สำหรับระบบพลังงานทดแทนแบบติดตั้งเดี่ยวควรมี

สัญลักษณ์	คุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์	ความจำเป็น
M1	แหล่งจ่ายไฟฟ้าชุดเดียว	จำเป็น
M2	การสวิตซ์หลักเป็นแบบการสวิตซ์ที่ความถี่ต่ำ	จำเป็น
M3	ความสามารถในการจ่ายโหลด	จำเป็น
M4	สามารถสร้างรูปคลื่นได้หลายระดับ	จำเป็น
A1	สองทิศทาง (ในการทำงาน 4-quadrant)	ควรจะมี
A2	แยกส่วนระหว่างด้านเข้า-ด้านออก	ควรจะมี

จากตารางที่ 2.1 จะแสดงให้เห็นคุณลักษณะของคอนเวอร์เตอร์ที่จำเป็น ในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบพลังงานทดแทน และจะสรุปคอนเวอร์เตอร์ในแต่ละรูปแบบโครงสร้างตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปคุณลักษณะของคอนเวอร์เตอร์ในแต่ละรูปแบบโครงสร้าง

รูปแบบโครงสร้าง	รูปที่	M1	M2	M3	M4	A1	A2
ไดโอด-แคปซิป	2.3	Y	Y	-	-	Y	-
ฟลายอิงคาปาซิเตอร์	2.4	Y	Y	Y	-	Y	-
เอช-บริดจ์ (แยกแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง)	2.5	-	Y	Y	Y	Y	-
เอช-บริดจ์ (+หม้อแปลงหลายขดลวด)	2.6	Y	Y	Y	Y	-	Y
เอช-บริดจ์ (+ isolated DC/DC converters)	2.7	Y	-	Y	Y	Y	Y
หลายสถานะ (หลายหม้อแปลง)	2.8	Y	Y	Y	Y	Y	Y
หลายแหล่งจ่าย	2.9	-	Y	Y	Y	Y	Y
หม้อแปลงหลายขดลวด	2.10	Y	Y	Y	Y	Y	Y
โมดูล	2.11	Y	Y	-	Y	Y	-

เมื่อ "Y": Yes, มี "-": ไม่มี

จากรูปที่ 2.3 ถึงรูปที่ 2.11 จะเห็นว่ามี 2 รูปแบบเท่านั้นที่มีคุณสมบัติครบทุกประการตามที่ต้องการ คือ โครงสร้างแบบหลายสถานะ และ โครงสร้างแบบหม้อแปลงหลายขดลวด และ ส่วนโครงสร้างแบบคาสเคด เอช-บริดจ์ แบบหม้อแปลงหลายขดลวดจะขาดคุณสมบัติทางด้านสองทิศทางงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษา ออกแบบ และจำลองการทำงาน คอนเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบหลายสถานะ โดยจะทำการออกแบบและจำลองโครงสร้างแบบหลายสถานะที่ 2, 3, และ 4 สถานะ และสร้างเครื่องต้นแบบ โดยพิจารณาจากผลการจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมไม่เกิน 5% และใช้อุปกรณ์สวิตซิ่งน้อยที่สุด



บทที่ 3

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบ 4 สถานะ

3.1 บทนำ

จากที่กล่าวมาแล้วจากการที่ใช้อินเวอร์เตอร์ในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้ พลังงานทดแทนเพื่อเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อให้เหมาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้าเกือบทุกชนิดที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งปกติจะเป็น 100-120 โวลต์ 60 เฮิร์ตซ์ หรือ 220-230 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ สำหรับประเทศไทยใช้ระบบไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์

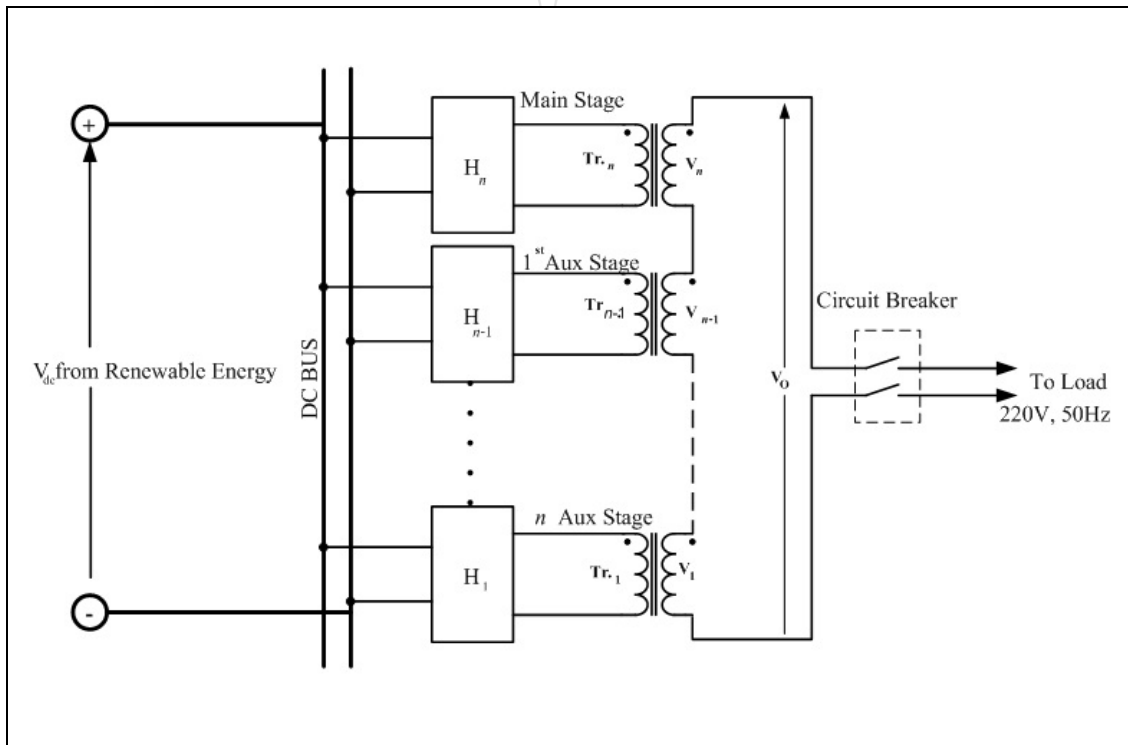
งานวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบ และศึกษาวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์หลายระดับโดยใช้ แบบหลายสถานะ เพื่อประยุกต์ใช้กับพลังงานทดแทน โดยต้องการที่จะสร้างสัญญาณแรงดันด้านออกให้มีคุณภาพสูง ให้ได้รูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดัน (THD_v) ต่ำ และสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์จากคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบทั่วไป

การออกแบบ จะออกแบบโดยใช้โดยการออกแบบสัญญาณควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์แบบเอช-บริดจ์ (H-bridge topology) ที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน ด้านออกของเอช-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงโดยที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวต่อคาสเกดกัน และจะจำลองการทำงานเพื่อหาค่า THD_v เปรียบเทียบกับจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่ใช้ที่ 2, 3 และ 4 สถานะ เพื่อสร้างสัญญาณด้านออกเป็นหลายระดับที่ 9, 27 และ 81 ระดับ ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับการสร้างสัญญาณด้านออกเป็นรูปคลื่นแบบพีคดับเบิลยูเอ็มที่มีจำนวนระดับเป็น 5, 11 และ 29 ระดับ ตามลำดับ ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์

จำนวนระดับ	อินเวอร์เตอร์ทั่วไป	แรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ที่ศึกษา	
		พีคดับเบิลยูเอ็มหลายระดับ	หลายระดับ
3 ระดับ	4	4	4
5 ระดับ	8	8	-
9 ระดับ	16	-	8
11 ระดับ	20	12	-
27 ระดับ	52	-	12
29 ระดับ	56	16	-
81 ระดับ	160	-	16

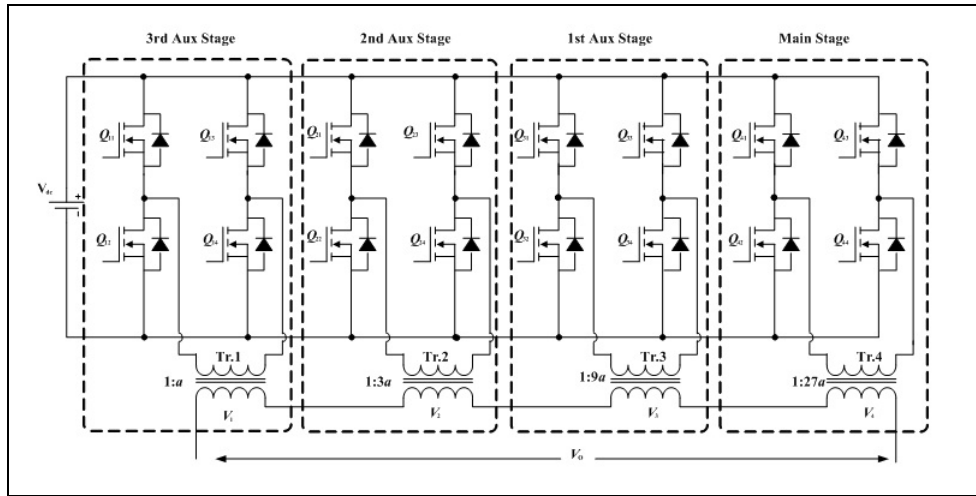
3.2 คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบหลายสถานะ

การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะเพื่อจะเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ทำการศึกษานี้จะประกอบด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์แบบเอช-บริดจ์ (H-bridge topology) ที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน ด้านออกของเอช-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลง โดยที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวต่อคาสเคดกัน เพื่อแยกส่วนที่เป็นอุปกรณ์สวิตชิงกับ โหลดและยกระดับแรงดันในแต่ละระดับ โดยอัตราส่วนของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับหม้อแปลงแต่ละตัว โดยหม้อแปลงจะต่ออนุกรมขดลวดด้านทุติยภูมิเพื่อจ่ายแรงดันด้านออก



รูปที่ 3.1 โดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบหลายสถานะ

จากรูปที่ 3.1 ชุดเอช-บริดจ์แต่ละชุดจะต่อทางด้านออกเข้ากับหม้อแปลง โดยชุดที่ n จะเป็นสถานะหลัก ในการทำงานที่ความถี่ที่ต้องการคือ 50 เฮิร์ตซ์ ส่วน ชุดเอช-บริดจ์ชุดที่ $n-1$ จนถึงชุดที่ 1 จะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเพื่อปรับรูปคลื่นให้ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ ลักษณะวงจรดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ 4 สถานะ

3.3 หลักการและแนวความคิด

หลักการของของการศึกษาวิจัยนี้คือการออกแบบสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเพื่อสร้างสัญญาณให้ได้หลายระดับ โดยใช้หลักการของการบวก ลบของเลขฐาน ซึ่งแรงดันที่ออกจากหม้อแปลงแต่ละชุดจะเป็น $3^0, 3^1, 3^2, 3^3 \dots 3^{n-1}$ ตามลำดับ และสัญญาณด้านออกของหม้อแปลงแต่ละชุดมารวมกัน ก็จะได้เป็นสัญญาณด้านออกหรือจำนวนระดับของคอนเวอร์เตอร์ที่น่าเสนอ จะได้แรงดันด้านออกของหม้อแปลงแต่ละตัวดังสมการที่ (3.1)

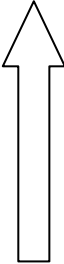
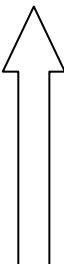
$$V_n = 3^{n-1}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

- เมื่อ V_n : คือ แรงดันที่ขั้วทุติยภูมิของหม้อแปลง
 n : คือ ลำดับสถานะของหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับเอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

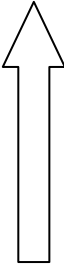
ตารางที่ 3.2 หลักการสร้างจำนวนระดับแรงดันด้านบวก

คอนเวอร์เตอร์	Switch function				แรงดันที่ขั้ว				ระดับ (n)
	SF ₁	SF ₂	SF ₃	SF ₄	V ₁ =3 ⁰	V ₂ =3 ¹	V ₃ =3 ¹	V ₄ =3 ³	
9 ระดับ ↑	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	-1	1	0	0	-1	3	0	0	2
	0	1	0	0	0	3	0	0	3
	1	1	0	0	1	3	0	0	4

ตารางที่ 3.2 หลักการสร้างจำนวนระดับแรงดันด้านบวก (ต่อ)

อินเวอร์เตอร์	Switch function				แรงดันที่ขั้ว				ระดับ (n)
	SF ₁	SF ₂	SF ₃	SF ₄	V ₁ =3 ⁰	V ₂ =3 ¹	V ₃ =3 ¹	V ₄ =3 ³	
 27 ระดับ	-1	-1	1	0	-1	-3	9	0	5
	0	-1	1	0	0	-3	9	0	6
	1	-1	1	0	1	-3	9	0	7
	-1	0	1	0	-1	0	9	0	8
	0	0	1	0	0	0	9	0	9
	1	0	1	0	1	0	9	0	10
	-1	1	1	0	-1	3	9	0	11
	0	1	1	0	0	3	9	0	12
	1	1	1	0	1	3	9	0	13
 81 ระดับ	-1	-1	-1	1	-1	-3	-9	27	14
	0	-1	-1	1	0	-3	-9	27	15
	1	-1	-1	1	1	-3	-9	27	16
	-1	0	-1	1	-1	0	-9	27	17
	0	0	-1	1	0	0	-9	27	18
	1	0	-1	1	1	0	-9	27	19
	-1	1	-1	1	-1	3	-9	27	20
	0	1	-1	1	0	3	-9	27	21
	1	1	-1	1	1	3	-9	27	22
	-1	-1	0	1	-1	-3	0	27	23
	0	-1	0	1	0	-3	0	27	24
	1	-1	0	1	1	-3	0	27	25
	-1	0	0	1	-1	0	0	27	26
	0	0	0	1	0	0	0	27	27
	1	0	0	1	1	0	0	27	28
	-1	1	0	1	-1	3	0	27	29
	0	1	0	1	0	3	0	27	30
	1	1	0	1	1	3	0	27	31
	-1	-1	1	1	-1	-3	9	27	32

ตารางที่ 3.2 หลักการสร้างจำนวนระดับแรงดันด้านบวก (ต่อ)

อินเวอร์เตอร์	Switch function				แรงดันที่ขั้ว				ระดับ (n)
	SF ₁	SF ₂	SF ₃	SF ₄	V ₁ =3 ⁰	V ₂ =3 ¹	V ₃ =3 ¹	V ₄ =3 ³	
 81 ระดับ	0	-1	1	1	0	-3	9	27	33
	1	-1	1	1	1	-3	9	27	34
	-1	0	1	1	-1	0	9	27	35
	0	0	1	1	0	0	9	27	36
	1	0	1	1	1	0	9	27	37
	-1	1	1	1	-1	3	9	27	38
	0	1	1	1	0	3	9	27	39
	1	1	1	1	1	3	9	27	40

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าถ้าใช้การทำงานของสวิตช์ SF₁ และ SF₂ ก็คือการใช้เอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ 2 สถานะก็จะได้สัญญาณด้านบวกเป็น 4 ระดับ การควบคุมด้านลบก็จะเหมือนกับด้านบวก โดยคูณกับ -1 ก็จะได้สัญญาณด้านลบอีก 4 ระดับ จะรวมกันได้ 8 ระดับและรวมกับ 0 ก็จะเป็น 9 ระดับ

ถ้าใช้การทำงานของสวิตช์ SF₁, SF₂ และ SF₃ ก็คือการใช้เอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ 3 สถานะ ก็จะได้สัญญาณด้านบวก เป็น 13 ระดับการควบคุมด้านลบก็จะเหมือนกับด้านบวกโดยคูณกับ -1 จะรวมกันจะได้ 26 ระดับและรวมกับ 0 ก็จะเป็น 27 ระดับ และถ้าหากเอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ 4 สถานะ ก็จะสามารถสร้างระดับแรงดันได้เป็น 81 ระดับ สามารถหาจำนวนระดับของแรงดันด้านบวก โดย สมการที่ 3.2

$$N = 3^s, \quad s = 1, 2, 3, \dots \quad (3.2)$$

เมื่อ N : คือ จำนวนระดับด้านบวก
 s : คือ จำนวนสถานะของเอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

จากสมการที่ (3.2) ถ้าออกแบบคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ 2 สถานะจะได้จำนวนระดับของแรงดันเป็น $N = 3^2 = 9$ ระดับ อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ 3 สถานะจะได้จำนวนระดับของแรงดันเป็น $N = 3^3 = 27$ ระดับ และอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ 4 สถานะจะได้จำนวนระดับของ

จากวงจรในรูปที่ 3.2 ชุดเอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ต่อกับหม้อแปลงคาสเคดชุดที่ n จะทำหน้าที่เป็นสถานะหลักของคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลง Tr_n จะต้องมีอัตราขยายแรงดันสูงสุด ตามด้วย Tr_{n-1} และลดลงตามลำดับจนถึง Tr_1 อัตราส่วนของหม้อแปลงแต่ละตัวสามารถหาได้โดยสมการที่ 3.3

$$Tr_n = 1:3^{n-1} a V_{dc} \quad (3.3)$$

- เมื่อ Tr_n : คือ หม้อแปลงของคาสเคดชุดที่ n
 a : คือ อัตราส่วนการขยายระหว่างค่าสูงสุดแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากดีซีบัส
 n : คือ ลำดับสถานะของหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับเอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์
 V_{dc} : คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากดีซีบัส

จากสมการที่ (3.3) จะได้อัตราการขยายของหม้อแปลงแต่ละตัวขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการขยายระหว่างค่าสูงสุดแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากดีซีบัส โดยในการออกแบบอัตราส่วนของหม้อแปลงที่มีจำนวนสถานะ แรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และค่าของแรงดันที่แตกต่างกันจะมีค่าตัวแปร a ที่แตกต่างกัน จากสมการสามารถสรุปอัตราส่วนของหม้อแปลงได้ดังตารางที่

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของหม้อแปลงและระดับด้านออกของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ

หม้อแปลงคาสเคด	คอนเวอร์เตอร์หลายระดับ				
	Tr_1	Tr_2	Tr_3	Tr_4	$\dots Tr_n$
อัตราส่วนหม้อแปลง	$1:aV_{dc}$	$1:3aV_{dc}$	$1:9aV_{dc}$	$1:27aV_{dc}$	$1:3^{n-1}aV_{dc}$
จำนวนระดับด้านออก (Level)	3				
	← 9				
		← 27			
			← 81		
				← N	

จากการหาค่าอัตราส่วนหม้อแปลง ก็จะได้ระดับแรงดันของหม้อแปลงแต่ละตัว ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงแต่ละตัวก็จะสามารถหาได้จากอัตราของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังสมการที่ 3.4

$$P_{Tr.n} = \frac{Tr. n_{sec}}{\sum_{n=1}^k Tr. n_{sec}} \times 100 (\%) \quad (3.4)$$

- เมื่อ P_{Trn} : คือ กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงของคาสเคดชุดที่ n
 Tr_{n_sec} : คือ อัตราส่วนขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงของคาสเคดชุดที่ n
 n : คือ ลำดับสถานะของหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับเอช-บริดจ์

3.4 สัญญาณควบคุม

จากหลักการในการออกแบบจำนวนระดับ และการหาอัตราส่วนของหม้อแปลงตามที่กล่าวมาแล้วนั้น ในการออกแบบสัญญาณควบคุมสามารถสร้างสัญญาณควบคุมโดยสวิตชิงฟังก์ชันสัญญาณด้านบวกดังตารางที่ 3.4 คือคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับใช้สวิตชิงฟังก์ชัน SF₁ และ SF₂ คอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับใช้สวิตชิงฟังก์ชัน SF₁, SF₂ และ SF₃ ส่วนคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับใช้สวิตชิงฟังก์ชัน SF₁, SF₂, SF₃ และ SF₄ ส่วนค่าทางด้านลบสามารถหาได้โดยใช้ค่าเดียวกันและคูณด้วย -1

ตารางที่ 3.4 สวิตชิงฟังก์ชันและระดับด้านออกของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ

ระดับ (n)	Switch function				แรงดันที่เข้า (aV _{dc})				แรงดันด้านออก V _O
	SF ₁	SF ₂	SF ₃	SF ₄	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1aV _{dc}
2	-1	1	0	0	-1	3	0	0	2aV _{dc}
3	0	1	0	0	0	3	0	0	3aV _{dc}
4	1	1	0	0	1	3	0	0	4aV _{dc}
5	-1	-1	1	0	-1	-3	9	0	5aV _{dc}
6	0	-1	1	0	0	-3	9	0	6aV _{dc}
7	1	-1	1	0	1	-3	9	0	7aV _{dc}
8	-1	0	1	0	-1	0	9	0	8aV _{dc}

ตารางที่ 3.4 สวิตชิงฟังก์ชันและระดับด้านออกของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ (ต่อ)

ระดับ (n)	Switch function				แรงดันที่ขั้ว (aV_{dc})				แรงดันด้านออก
	SF ₁	SF ₂	SF ₃	SF ₄	V_1	V_2	V_3	V_4	V_O
9	0	0	1	0	0	0	9	0	$9aV_{dc}$
10	1	0	1	0	1	0	9	0	$10aV_{dc}$
11	-1	1	1	0	-1	3	9	0	$11aV_{dc}$
12	0	1	1	0	0	3	9	0	$12aV_{dc}$
13	1	1	1	0	1	3	9	0	$13aV_{dc}$
14	-1	-1	-1	1	-1	-3	-9	27	$14aV_{dc}$
15	0	-1	-1	1	0	-3	-9	27	$15aV_{dc}$
16	1	-1	-1	1	1	-3	-9	27	$16aV_{dc}$
17	-1	0	-1	1	-1	0	-9	27	$17aV_{dc}$
18	0	0	-1	1	0	0	-9	27	$18aV_{dc}$
19	1	0	-1	1	1	0	-9	27	$19aV_{dc}$
20	-1	1	-1	1	-1	3	-9	27	$20aV_{dc}$
21	0	1	-1	1	0	3	-9	27	$21aV_{dc}$
22	1	1	-1	1	1	3	-9	27	$22aV_{dc}$
23	-1	-1	0	1	-1	-3	0	27	$23aV_{dc}$
24	0	-1	0	1	0	-3	0	27	$24aV_{dc}$
25	1	-1	0	1	1	-3	0	27	$25aV_{dc}$
26	-1	0	0	1	-1	0	0	27	$26aV_{dc}$
27	0	0	0	1	0	0	0	27	$27aV_{dc}$
28	1	0	0	1	1	0	0	27	$28aV_{dc}$
29	-1	1	0	1	-1	3	0	27	$29aV_{dc}$
30	0	1	0	1	0	3	0	27	$30aV_{dc}$
31	1	1	0	1	1	3	0	27	$31aV_{dc}$
32	-1	-1	1	1	-1	-3	9	27	$32aV_{dc}$
33	0	-1	1	1	0	-3	9	27	$33aV_{dc}$
34	1	-1	1	1	1	-3	9	27	$34aV_{dc}$
35	-1	0	1	1	-1	0	9	27	$35aV_{dc}$

ตารางที่ 3.4 สวิตชิงฟังก์ชันและระดับด้านออกของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ (ต่อ)

ระดับ (n)	Switch function				แรงดันที่ขั้ว (aV_{dc})				แรงดันด้านออก
	SF ₁	SF ₂	SF ₃	SF ₄	V_1	V_2	V_3	V_4	V_O
36	0	0	1	1	0	0	9	27	$36aV_{dc}$
37	1	0	1	1	1	0	9	27	$37aV_{dc}$
38	-1	1	1	1	-1	3	9	27	$38aV_{dc}$
39	0	1	1	1	0	3	9	27	$39aV_{dc}$
40	1	1	1	1	1	3	9	27	$40aV_{dc}$

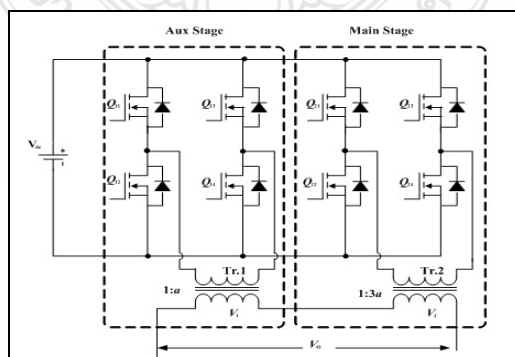
3.5 การออกแบบมุมในการสวิตชิงแบบเลื่อนเฟส

ในการออกแบบมุมในการสวิตชิงจะต้องใช้การเลื่อนเฟส โดยให้แรงดันแต่ละระดับคงที่ เนื่องจากการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแหล่งจ่ายเดียว และใช้หม้อแปลงในการยกระดับแรงดัน ทำให้ค่าแรงดันแต่ละค่าคงที่ ไม่สามารถเปลี่ยนได้ ฉะนั้นเมื่อต้องการออกแบบให้รูปคลื่นแรงดันด้านออกใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ ควรที่จะออกแบบให้ การเปลี่ยนแรงดันให้ค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับ ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ ตัวอย่างการออกแบบมุมในการสวิตชิงดังรูปที่ 3.7

3.6 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ

3.6.1 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ แบบ 2 สถานะ

ในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับแบบ 2 สถานะนั้น วงจรกำลังจะประกอบด้วยชุดเอชบริดจ์ ต่อกับหม้อแปลงคาสเคด จำนวน 2 ชุด ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับ แบบ 2 สถานะ

อัตราส่วนของหม้อแปลงสามารถหาได้โดยสมการที่ (3.3) ฉะนั้นจะได้อัตราส่วนของหม้อแปลง คือ

$$\begin{aligned} Tr_1 &= 1:3^{1-1} aV_{dc} \\ &= 1: aV_{dc} \\ Tr_2 &= 1:3^{2-1} aV_{dc} \\ &= 1:3aV_{dc} \end{aligned}$$

ดังนั้นในการออกแบบหากสัญญาณแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็น $12V_{dc}$ และต้องการออกแบบแรงดันด้านออกเป็นกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ จะได้ อัตราการขยายหรือค่า a คือ

$$\begin{aligned} 4aV_{dc} &= 311V_p \\ a &= 311V_p / 4V_{dc} = 6.47917 \end{aligned}$$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_1 คือ $= 1: aV_{dc} = 12V: 6.47917 \times 12V$ หรือ $12V: 77.75V$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_2 คือ $= 1: 3aV_{dc} = 12V: 3 \times 6.47917 \times 12V$ หรือ $12V: 233.25V$

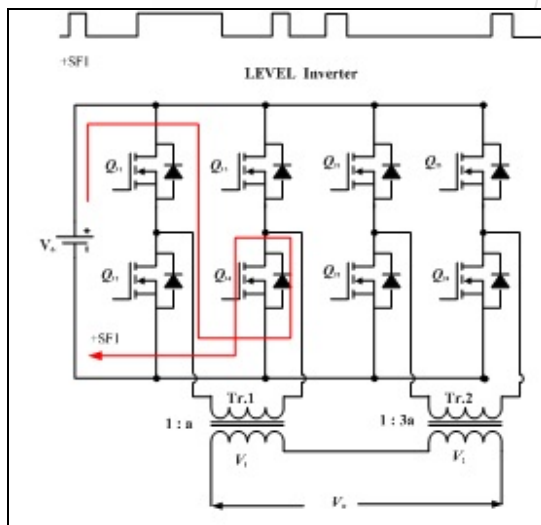
ตารางที่ 3.5 คือสวิตชิงฟังก์ชันของคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ การควบคุมการสวิตชิงทำได้โดยการสร้างสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 3.4 คือสัญญาณควบคุมชุดพัลส์บวกลบ SF_1 จะควบคุมการทำงานของสวิตชิง Q_{11} และ Q_{14} และสัญญาณควบคุมชุดพัลส์ลบ SF_1 จะควบคุมการทำงานของสวิตชิง Q_{13} และ Q_{12} โดยที่ 2 ชุดจะสลับกันทำงานและจะทำให้รวมกันได้เป็นสัญญาณ SF_1 และหม้อแปลงจะขยายสัญญาณเพิ่มขึ้นเป็น aV_{dc} และ $-aV_{dc}$ คือถ้าหากออกแบบคอนเวอร์เตอร์ในการแปลงไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรง $12 V_{dc}$ เป็น 220 โวลต์ ก็จะได้เป็น 77.75 โวลต์

ตารางที่ 3.5 สวิตชิงฟังก์ชันของคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ

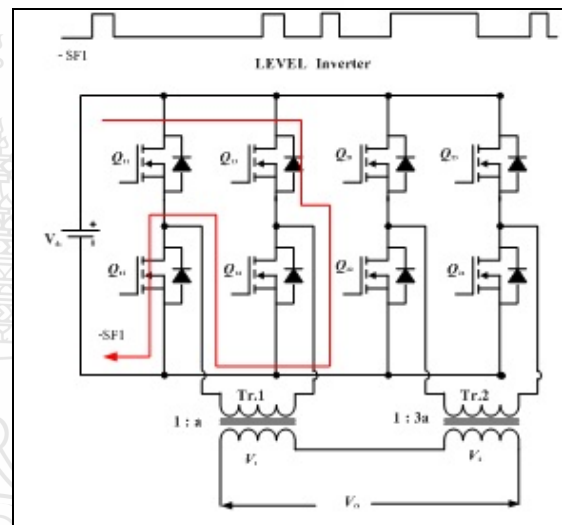
ระดับ (n)	Switch function		แรงดันที่เข้า (aV_{dc})		แรงดันด้านออก V_o
	SF_1	SF_2	V_1	V_2	
0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	$1aV_{dc}$
2	-1	1	-1	3	$2aV_{dc}$
3	0	1	0	3	$3aV_{dc}$
4	1	1	1	3	$4aV_{dc}$

สัญญาณควบคุมชุดพัลส์บวกลบ SF_2 จะควบคุมการทำงานของสวิตชิง Q_{21} และ Q_{24} และสัญญาณควบคุมชุดพัลส์ลบ SF_2 จะควบคุมการทำงานของสวิตชิง Q_{23} และ Q_{22} โดยที่ 2 ชุดจะสลับกันทำงานและจะทำให้รวมกันได้เป็นสัญญาณ SF_2 และหม้อแปลงจะขยายสัญญาณเพิ่มขึ้นเป็น $3aV_{dc}$

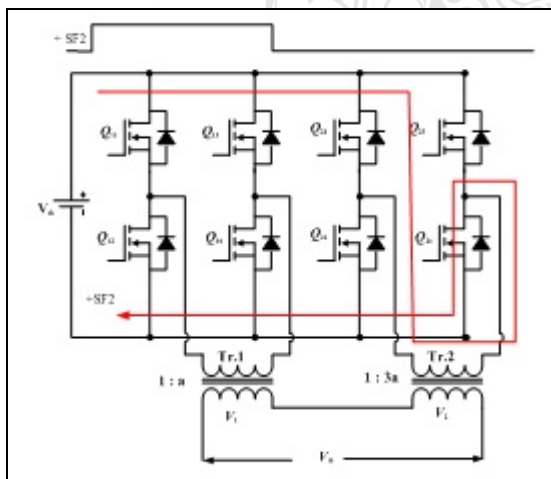
รูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นการทำงานของสวิตซ์ซึ่งฟังก์ชันในการควบคุมทั้ง 4 และรูปที่ 3.5 จะแสดงสัญญาณควบคุมและสัญญาณด้านออกจากหม้อแปลงคาสเคด และรูปที่ 3.6 แสดงการรวมระดับแรงดันด้านออกจากหม้อแปลงคาสเคดเป็นเป็นคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ จะประกอบด้วยแรงดันที่ออกจากหม้อแปลง Tr_1 คือ aV_{dc} หรือ 77.75V และแรงดันด้านออกที่ Tr_2 คือ $3aV_{dc}$ หรือ 233.25V และเมื่อแรงดัน V_1 และ V_2 รวมกันก็จะได้เป็น 9 ระดับ ที่ 220 โวลต์ (311 V_p)



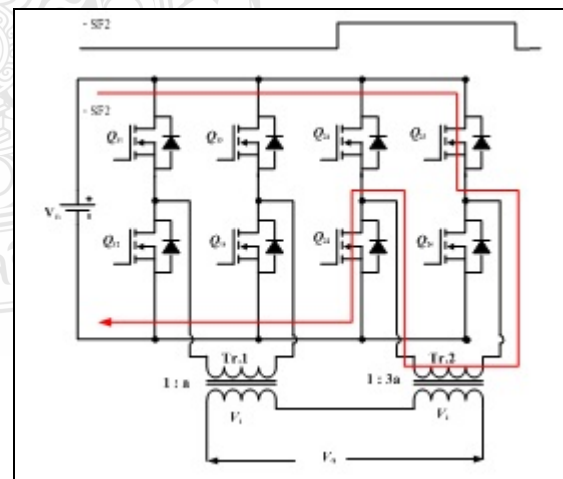
(ก)



(ข)

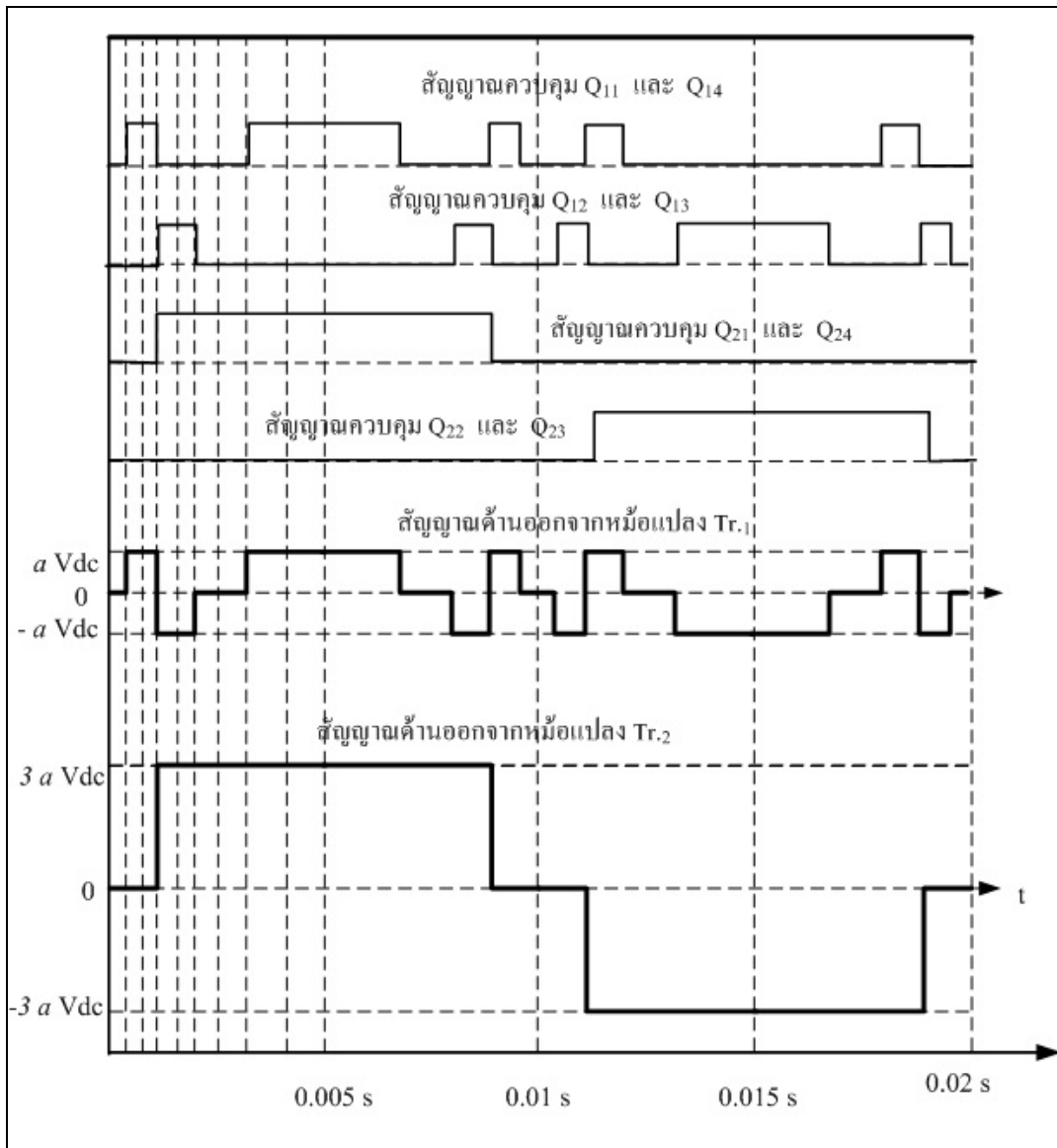


(ค)

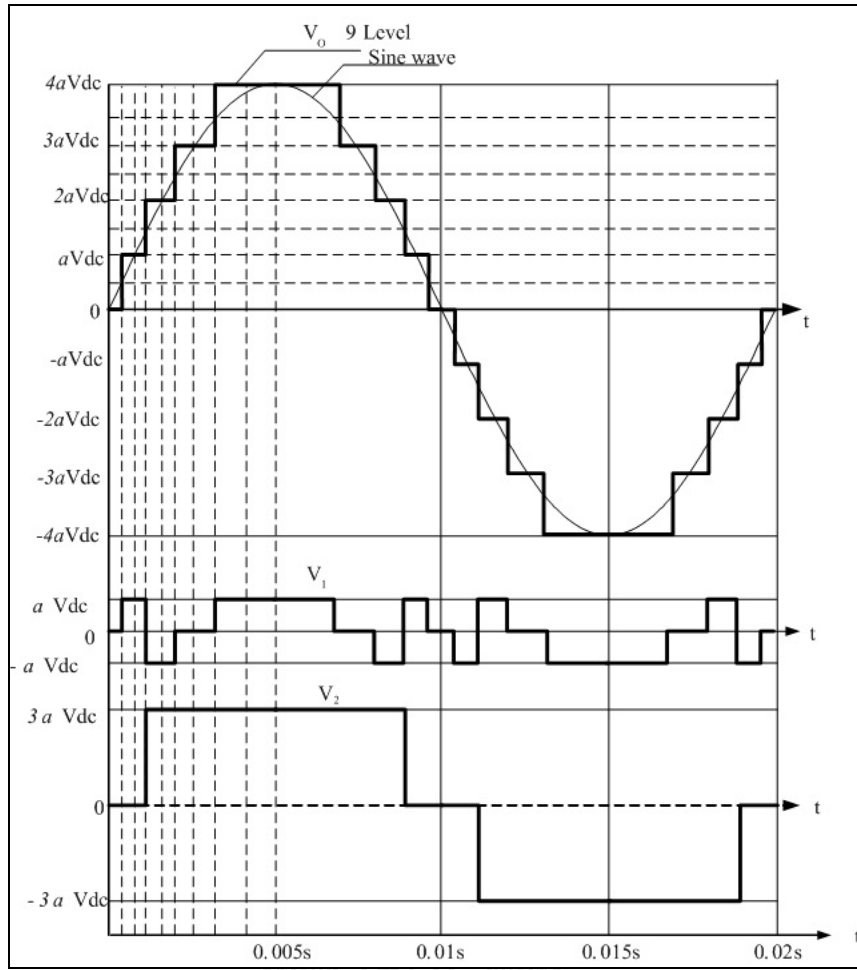


(ง)

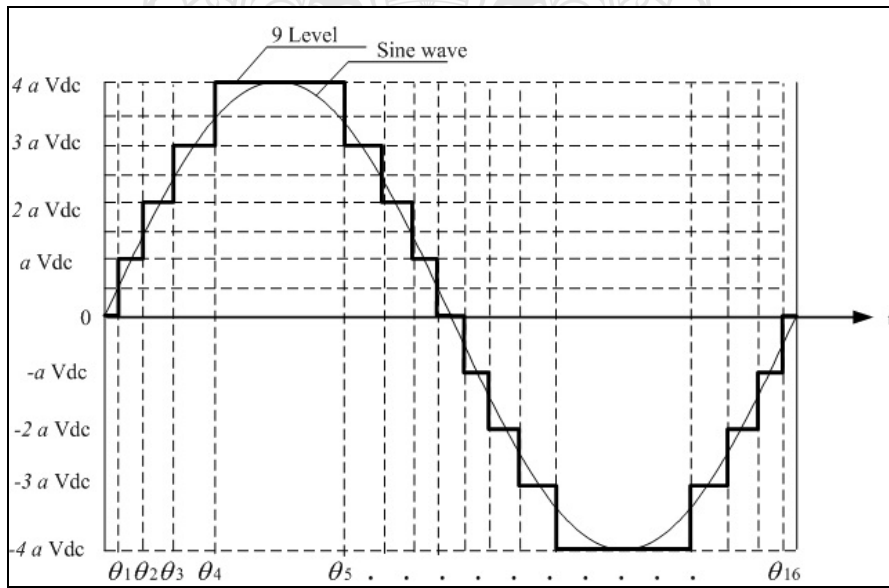
รูปที่ 3.4 (ก), (ข), (ค) และ (ง) การทำงานของสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ



รูปที่ 3.5 สัญญาณควบคุมและรูปคลื่นด้านออกจากหม้อแปลงคาสแคด



รูปที่ 3.6 แรงดันด้านออกของหม้อแปลงแต่ละตัวและแรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์



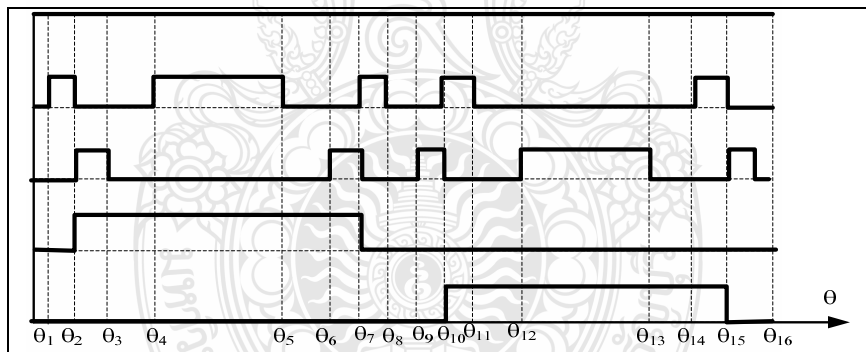
รูปที่ 3.7 ระดับแรงดันและช่วงเวลาแต่ละระดับของคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ

เพื่อให้สัญญาณมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ควรรอบแบบให้ระดับแรงดันในแต่ละช่วงแรงดันโดย

$$\begin{aligned} \text{แรงดันแต่ละระดับ} &= V_p / \text{จำนวนระดับแต่ละด้าน} \\ &= 311 / 4 \\ &= 77.75 \text{ V} \end{aligned}$$

จะได้ระดับแรงดันแต่ละระดับคือ 77.75, 155.50, 233.25 และ 311 โวลต์ เพื่อให้ค่าแรงดันด้านออกที่ใกล้เคียงกับรูปไซน์มากขึ้น จึงควรรอบแบบให้แต่ละระดับเปลี่ยนแปลงที่ครึ่งหนึ่งของค่าแรงดันแต่ละระดับดังรูปที่ 3.7 คือให้สวิตซ์ฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่ แรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ 33.875, 116.625, 194.375 และ 272.125 โวลต์ การกำหนดช่วงเวลาที่ทำได้โดยการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันรากเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square, rms) และรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับไซน์มากขึ้น

ดังนั้นจะได้สัญญาณควบคุมสามารถสร้างสัญญาณควบคุมโดยสวิตซ์ฟังก์ชันสัญญาณด้านบวกคืออินเวอร์เตอร์ 9 ระดับใช้สวิตซ์ฟังก์ชัน SF₁ และ SF₂ โดยใช้ระดับที่ 0 ถึง 4 และช่วงเวลาในการเปลี่ยนสวิตซ์ดังรูปที่ 3.8 และจะได้มุมในการเปลี่ยนดังตารางที่ 3.6



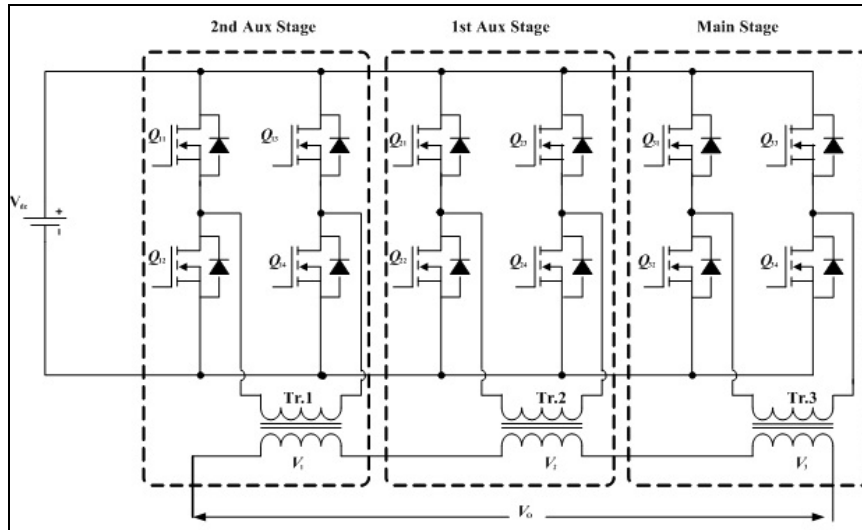
รูปที่ 3.8 มุมในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์

ตารางที่ 3.6 ตารางการเปลี่ยนมุมของสวิตซ์ฟังก์ชัน

มุม	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8
(องศา)	6.3	22.0	38.7	61.0	119	141.3	158	173.7
มุม	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}
(องศา)	186.3	202.0	218.7	241.0	299	321.3	338.0	357.7

3.6.2 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ แบบ 3 สถานะ

สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ แบบ 3 สถานะ วงจรกำลังจะประกอบด้วยเอช-บริดจ์ ต่ออยู่กับหม้อแปลงคาสเคดจำนวน 3 ชุด ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ แบบ 3 สถานะ

ตารางที่ 3.7 คือสวิตช์ฟังก์ชันของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ ซึ่งประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบเอช-บริดจ์ต่ออยู่กับหม้อแปลงจำนวน 3 ชุด สัญญาณควบคุมชุดพัลส์ชวกร SF₁ จะควบคุมการทำงานของสวิตช์ Q₁₁ และ Q₁₄ และสัญญาณควบคุมชุดพัลส์ชวกร SF₁ จะควบคุมการทำงานของสวิตช์ Q₁₃ และ Q₁₂ โดยที่ 2 ชุดจะสลับกันทำงานและจะทำได้เป็นสัญญาณ SF₁

สัญญาณควบคุมชุดพัลส์ชวกร SF₂ จะควบคุมการทำงานของสวิตช์ Q₂₁ และ Q₂₄ และสัญญาณควบคุมชุดพัลส์ชวกร SF₂ จะควบคุมการทำงานของสวิตช์ Q₂₃ และ Q₂₂ โดยที่ 2 ชุดจะสลับกันทำงานและจะทำได้เป็นสัญญาณ SF₂

สัญญาณควบคุมชุดพัลส์ชวกร SF₃ จะควบคุมการทำงานของสวิตช์ Q₃₁ และ Q₃₄ และสัญญาณควบคุมชุดพัลส์ชวกร SF₃ จะควบคุมการทำงานของสวิตช์ Q₃₃ และ Q₃₂ โดยที่ 2 ชุดจะสลับกันทำงานและจะทำได้เป็นสัญญาณ SF₃

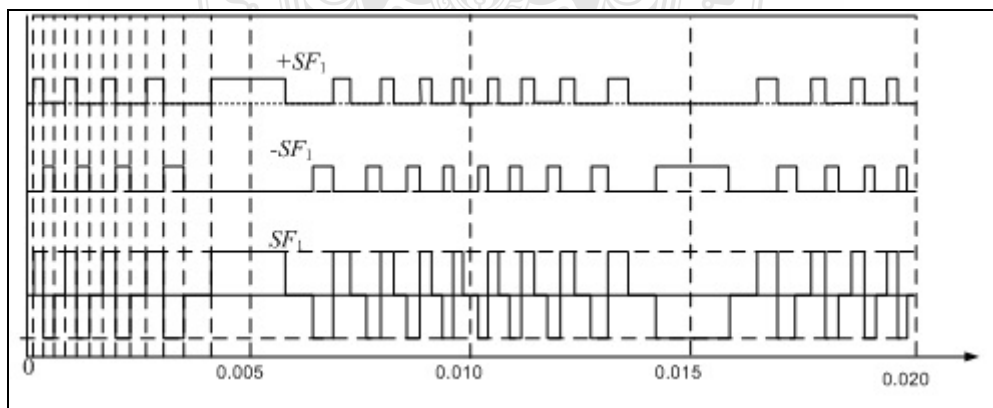
ตารางที่ 3.7 สวิตช์ฟังก์ชันของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ

ระดับ (n)	Switch function			แรงดันที่ขั้ว (aV _{dc})			แรงดันด้านออก V _O
	SF ₁	SF ₂	SF ₃	V ₁	V ₂	V ₃	
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0	1aVdc

ตารางที่ 3.7 สวิตซ์ฟังก์ชันของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ (ต่อ)

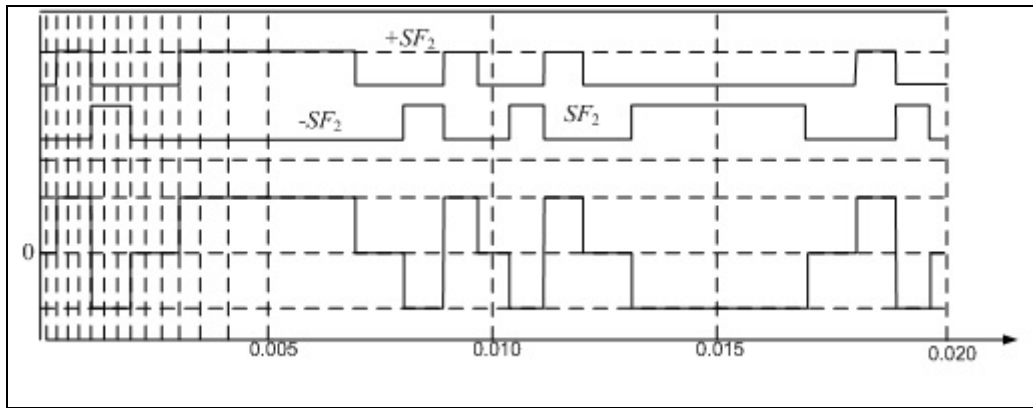
ระดับ (n)	Switch function			แรงดันที่ขั้ว (aV_{dc})			แรงดันด้านออก
	SF_1	SF_2	SF_3	V_1	V_2	V_3	V_o
2	-1	1	0	-1	3	0	$2aV_{dc}$
3	0	1	0	0	3	0	$3aV_{dc}$
4	1	1	0	1	3	0	$4aV_{dc}$
5	-1	-1	1	-1	-3	9	$5aV_{dc}$
6	0	-1	1	0	-3	9	$6aV_{dc}$
7	1	-1	1	1	-3	9	$7aV_{dc}$
8	-1	0	1	-1	0	9	$8aV_{dc}$
9	0	0	1	0	0	9	$9aV_{dc}$
10	1	0	1	1	0	9	$10aV_{dc}$
11	-1	1	1	-1	3	9	$11aV_{dc}$
12	0	1	1	0	3	9	$12aV_{dc}$
13	1	1	1	1	3	9	$13aV_{dc}$

รูปที่ 3.9 แสดงการสวิตซ์ของ 27 ระดับ ซึ่งประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ 3 ชุด เพื่อควบคุมชุดพัลส์ SF_1 ตามรูป (ก) ควบคุม SF_2 ตามรูป (ข) และควบคุม SF_3 ตามรูป (ค)

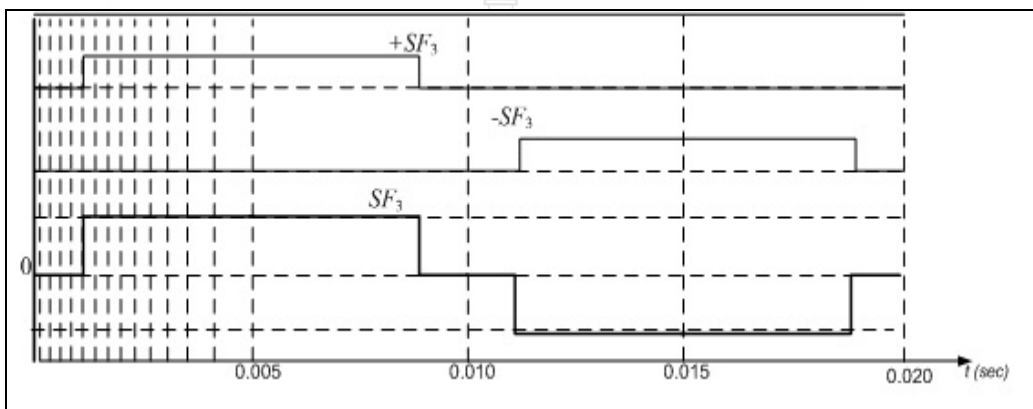


(ก)

รูปที่ 3.10 (ก), (ข) และ (ค) สัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ 27 ระดับ



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.10 (ก), (ข) และ (ค) สัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ 27 ระดับ (ต่อ)

อัตราส่วนของหม้อแปลงสามารถหาได้โดยสมการที่ (3.3) ฉะนั้นจะได้ คือ

$$\begin{aligned}
 Tr_1 &= 1:3^{1-1} aV_{dc} \\
 &= 1: aV_{dc} \\
 Tr_2 &= 1:3^{2-1} aV_{dc} \\
 &= 1:3aV_{dc} \\
 Tr_3 &= 1:3^{3-1} aV_{dc} \\
 &= 1:9aV_{dc}
 \end{aligned}$$

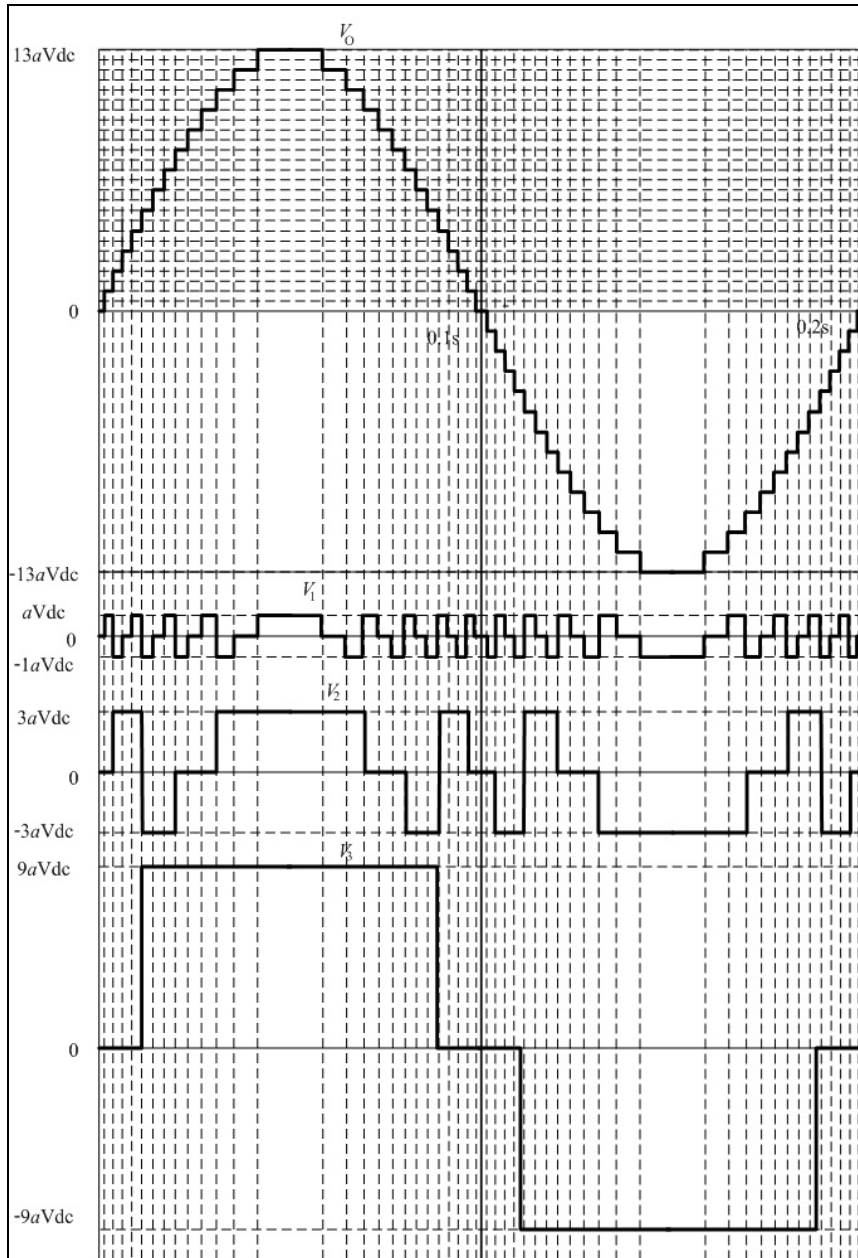
ดังนั้นในการออกแบบหากสัญญาณแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็น $12 V_{dc}$ และต้องการออกแบบแรงดันด้านออกเป็นกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ จะได้ อัตราการขยายหรือค่า a คือ

$$\begin{aligned}
 13aV_{dc} &= 311 V_p \\
 a V_d &= 311 V_p / 13 = 23.9230
 \end{aligned}$$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_1 คือ $= 1: aV_{dc} = 12V: 23.9230V$

$$\begin{aligned} \text{อัตราส่วนของหม้อแปลง } Tr_2 \text{ คือ} &= 1:3aV_{dc} = 12V:71.7692V \\ \text{อัตราส่วนของหม้อแปลง } Tr_3 \text{ คือ} &= 1:9aV_{dc} = 12V:215.3077V \end{aligned}$$

แรงดันด้านออกจะได้ตามรูปที่ 3.10 คือสัญญาณด้านบวก 13 ระดับ คือ $0, 1aV_{dc}, 2aV_{dc}, 3aV_{dc}, \dots, 11aV_{dc}, 12aV_{dc},$ และ $13aV_{dc}$ สัญญาณด้านลบ 13 ระดับ คือ $-1aV_{dc}, -2aV_{dc}, -3aV_{dc}, \dots, -11aV_{dc}, -12aV_{dc},$ และ $-13aV_{dc}$ เมื่อรวมกับ 0 จะได้เป็น 27 ระดับ



รูปที่ 3.11 แรงดันด้านออกจากหม้อแปลงและแรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ

จากรูปที่ 3.11 แรงดันด้านออกที่ 27 ระดับจะประกอบด้วยแรงดันที่ออกจากหม้อแปลง Tr_1 คือ aV_{dc} หรือ 24 V และแรงดันด้านออกที่ Tr_2 คือ $3aV_{dc}$ หรือ 72 V และแรงดันด้านออกที่ Tr_3 คือ

ในการออกแบบระดับแรงดันในแต่ละช่วงแรงดันสามารถหาค่าแรงดันแต่ละระดับได้โดย

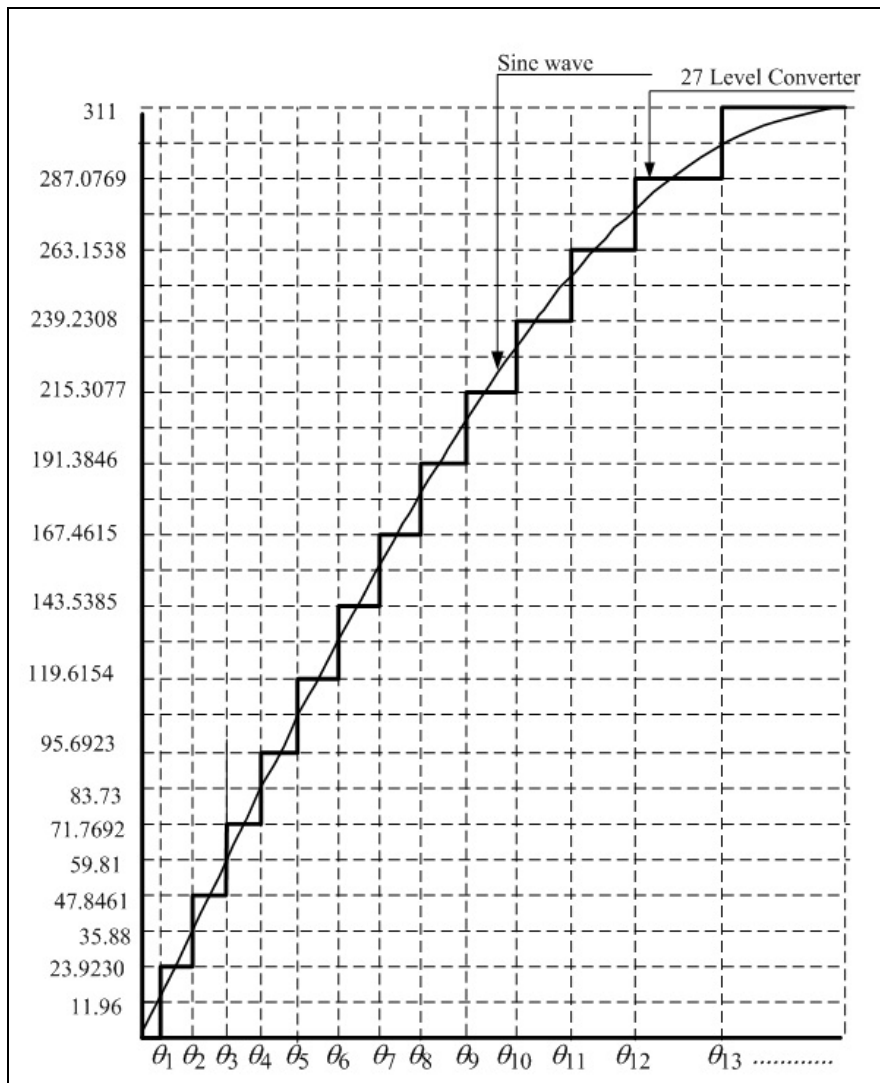
$$\begin{aligned} \text{แรงดันแต่ละระดับ} &= V_p / \text{จำนวนระดับแต่ละด้าน} \\ &= 311 / 13 \\ &= 23.9230 \text{ V} \end{aligned}$$

จะได้ระดับแรงดันแต่ละระดับในด้านบวกดังตารางที่ 3.8 คือเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมกับคลื่นไซน์เมื่อระดับแรงดันของรูปคลื่นไซน์ 11.6915 โวลต์ อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจะเปลี่ยนแรงดันเป็น 23.9230 โวลต์ และเมื่อคลื่นไซน์ได้ค่าที่ 35.8845 โวลต์ จะเปลี่ยนแรงดันเป็น 47.8461 และการเปลี่ยนระดับแรงดันจะเปลี่ยนไปเรื่อยๆจะครบ 13 ระดับในรูปคลื่นด้านบวก และเป็น 13 ระดับของรูปคลื่นด้านลบ และเมื่อรวมกับ 0 แล้วจะได้ 27 ระดับ ดังรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.8 แรงดันที่เปลี่ยนระดับและระดับแรงดันที่แต่ละระดับของอินเวอร์เตอร์ 27 ระดับ

ระดับที่	แรงดันที่เปลี่ยนระดับ (โวลต์)	แรงดันที่ระดับ (โวลต์)
1	11.9615	23.9230
2	35.8845	47.8461
3	59.8075	71.7692
4	83.7305	95.6923
5	107.6535	119.6154
6	131.5767	143.5385
7	155.4995	167.4615
8	179.4225	191.3846
9	203.3455	215.3077
10	227.2635	239.2308
11	251.1915	263.1538
12	275.1145	287.0769
13	299.0375	311

เพื่อให้ค่าแรงดันด้านออกที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากขึ้น จึงควรออกแบบให้แต่ละระดับเปลี่ยนแปลงที่ครึ่งหนึ่งของค่าแรงดันแต่ละระดับดังรูปที่ 3.11 คือให้สวิตซ์ซึ่งฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่ แรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ครึ่งหนึ่งของระดับ การกำหนดช่วงเวลาทำโดยการเปรียบเทียบกับค่า



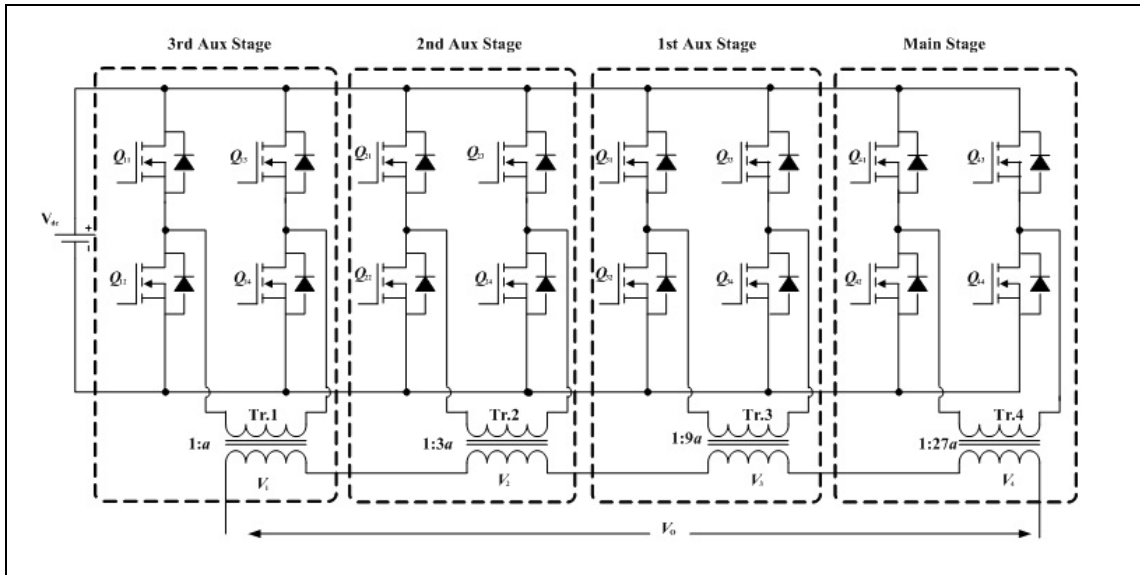
รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงแรงดันและระดับของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ

ดังนั้นจะได้สัญญาณควบคุมสามารถสร้างสัญญาณควบคุมโดยสวิตซ์ฟังก์ชันสัญญาณด้านบวกดังตารางที่ 3.4 คือคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับใช้สวิตซ์ฟังก์ชัน SF_1 , SF_2 และ SF_3 โดยใช้ระดับที่ 0 ถึง 13 และจะได้สัญญาณควบคุมแปรผันกับช่วงเวลาในการเปลี่ยนสวิตซ์ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นเราก็สามารถออกแบบมุมในการสวิตซ์ของแต่ละระดับได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่ามุมในการสวิตซ์ได้โดยไม่ยาก

3.6.3 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ แบบ 4 สถานะ

สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ แบบ 4 สถานะ วงจรกำลังจะประกอบด้วยเอช-บริดจ์ต่ออยู่กับหม้อแปลงคาสเคดจำนวน 4 ชุด ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 วงจรกำลังคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับแบบ 4 สถานะ

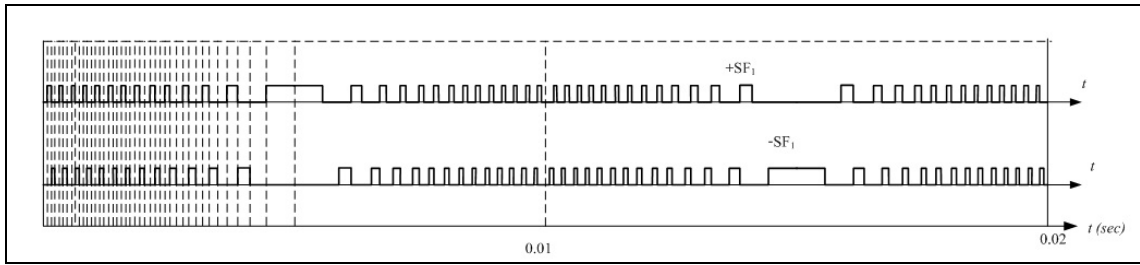
จากรูปที่ 3.12 จะได้แรงดันด้านออกเป็น 81 ระดับ คือสัญญาณด้านบวก 40 ระดับ คือ $1aV_{dc}$, $2aV_{dc}$, $3aV_{dc}$, ..., $38aV_{dc}$, $39aV_{dc}$, และ $40aV_{dc}$ สัญญาณด้านลบ 40 ระดับ คือ $-1aV_{dc}$, $-2aV_{dc}$, $-3aV_{dc}$, ..., $-38aV_{dc}$, $-39aV_{dc}$, และ $-40aV_{dc}$ เมื่อรวมกับ 0 จะได้เป็น 81 ระดับ

การออกแบบสัญญาณควบคุมสามารถออกแบบโดยสวิตซ์ฟังก์ชันตามตารางที่ 3.4 โดยใช้สัญญาณควบคุมทั้ง SF_1 , SF_2 , SF_3 และ SF_4 โดยสัญญาณควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง Q_{11} และ Q_{14} คือ สัญญาณจาก SF_1 จะได้สัญญาณควบคุมเป็น $+SF_1$ และสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง Q_{12} และ Q_{13} จะเป็น $-SF_1$ ดังรูปที่ 3.13 (ก)

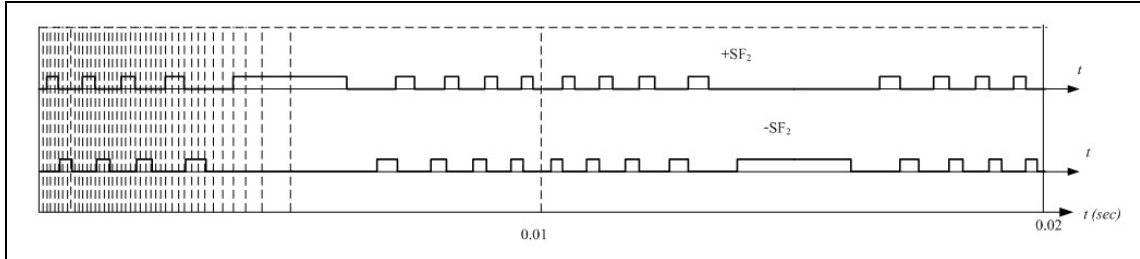
สัญญาณควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง Q_{21} และ Q_{24} คือ สัญญาณจาก SF_2 จะได้สัญญาณควบคุมเป็น $+SF_2$ และสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง Q_{22} และ Q_{23} จะเป็น $-SF_2$ ดังรูปที่ 3.13 (ข)

สัญญาณควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 3 ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง Q_{31} และ Q_{34} คือ สัญญาณจาก SF_3 จะได้สัญญาณควบคุมเป็น $+SF_3$ และสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง Q_{32} และ Q_{33} จะเป็น $-SF_3$ ดังรูปที่ 3.13 (ค)

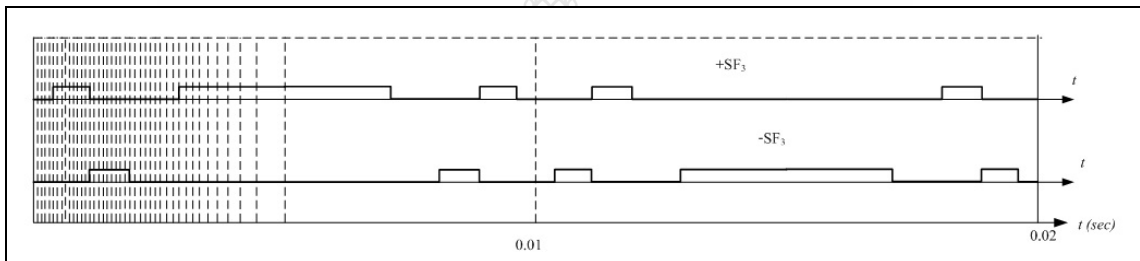
สัญญาณควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 4 ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง Q_{41} และ Q_{44} คือ สัญญาณจาก SF_4 จะได้สัญญาณควบคุมเป็น $+SF_4$ และสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง Q_{42} และ Q_{43} จะเป็น $-SF_4$ ดังรูปที่ 3.13 (ง)



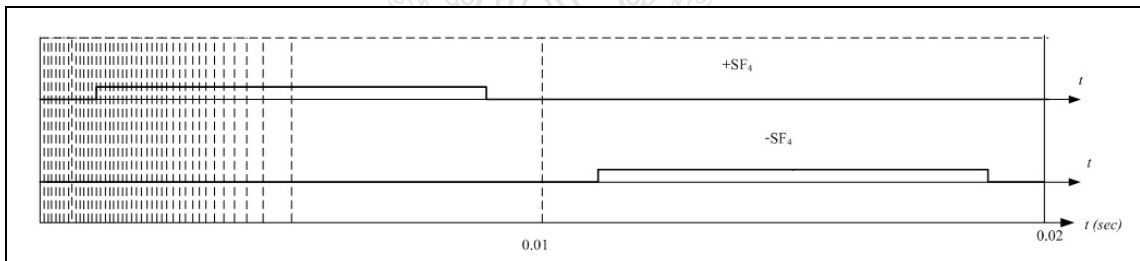
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.13 (ก), (ข), (ค) และ (ง) สัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับแบบ 4 สถานะ

อัตราส่วนของหม้อแปลงสามารถหาได้โดยสมการที่ (3.3) ฉะนั้นจะได้ คือ

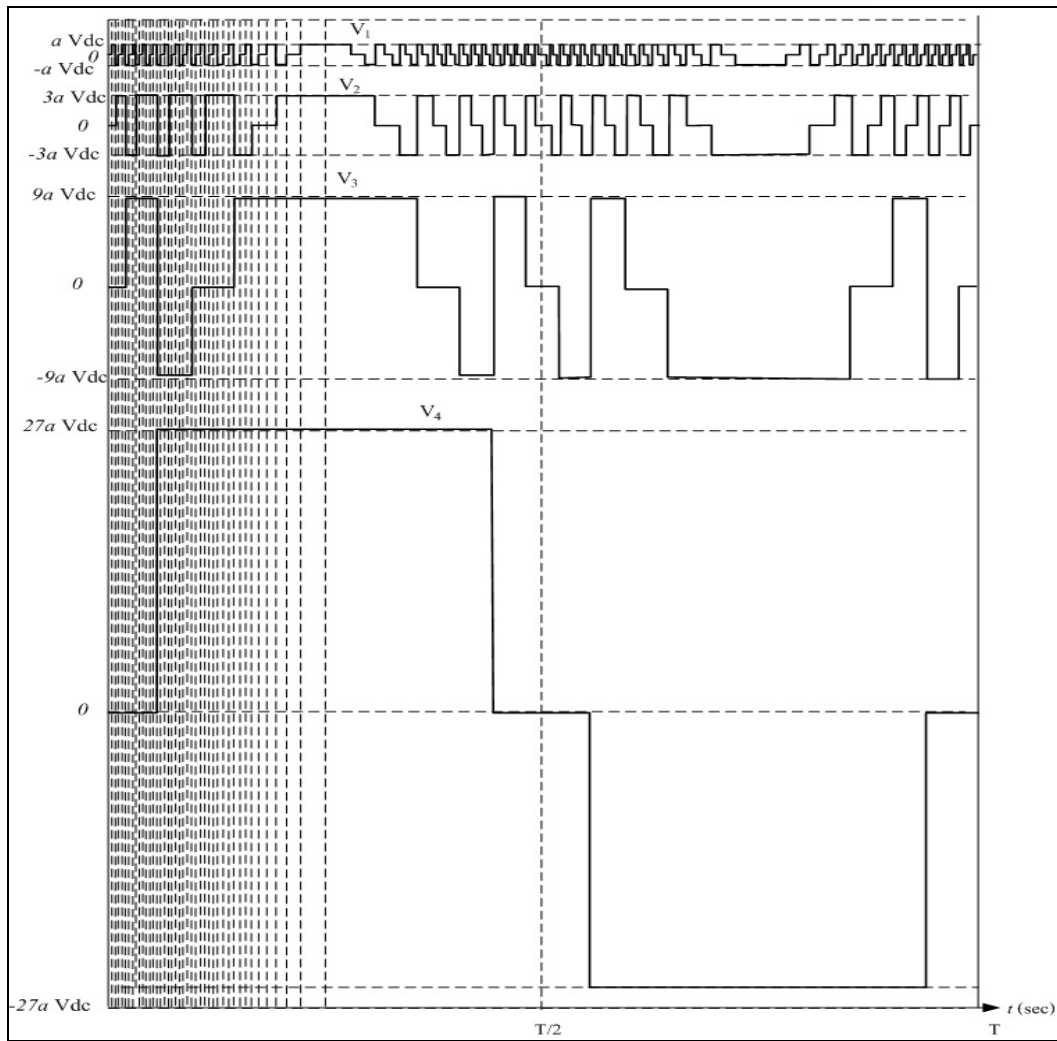
$$Tr_1 = 1: aV_{dc}$$

$$Tr_2 = 1: 3aV_{dc}$$

$$Tr_3 = 1: 9aV_{dc}$$

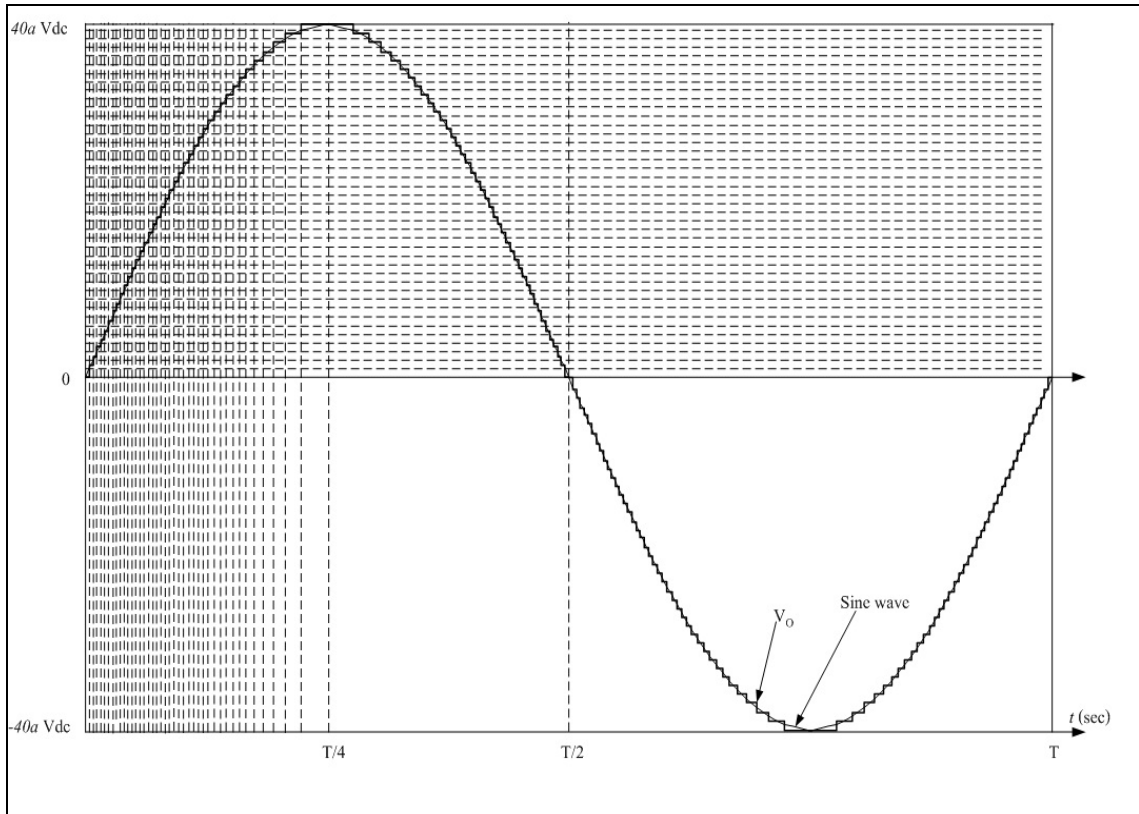
$$Tr_4 = 1: 27aV_{dc}$$

จากการออกแบบสัญญาณควบคุมดังตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.13 สัญญาณ+SF₁ จะควบคุมการทำงานของ Q₁₁ และ Q₁₄ คือ และสัญญาณ -SF₁ควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ Q₁₂ และ Q₁₃ จะ โดยจะสลับกัน



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นแรงดันด้านออกจากหม้อแปลงของคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับแบบ 4 สถานะ

เมื่อแรงดัน ไฟฟ้าด้านออกจากหม้อแปลงจากรูปที่ 3.14 ถูกต่อกันแบบอนุกรมทางด้านขดลวด
 ทดขั้วกัน เป็นผลให้แรงดันทั้งหมดรวมกัน จะได้สัญญาณด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์เป็น 81 ระดับ ดัง
 รูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับแบบ 4 สถานะ

ดังนั้นในการออกแบบหากสัญญาณแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็น $12V_{dc}$ และต้องการ
ออกแบบแรงดันด้านออกเป็นกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ จะได้

$$40aV_{dc} = 311V_p$$

$$aV_{dc} = 311V_p / 13 = 7.775$$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_1 คือ $= 1: aV_{dc} = 12V: 7.775V$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_2 คือ $= 1: 3aV_{dc} = 12V: 23.325V$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_3 คือ $= 1: 9aV_{dc} = 12V: 69.975V$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_4 คือ $= 1: 27aV_{dc} = 12V: 209.925V$

จากรูปที่ 3.15 แรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ที่ 81 ระดับจะประกอบด้วยแรงดันที่ออก
จากหม้อแปลง Tr_1 คือ aV_{dc} หรือ $7.775V$ และแรงดันด้านออกที่ Tr_2 คือ $3aV_{dc}$ หรือ $23.325V$ แรงดัน
ด้านออกที่ Tr_3 คือ $9aV_{dc}$ หรือ $69.975V$ และแรงดันด้านออกที่ Tr_4 คือ $27aV_{dc}$ หรือ $209.925V$ และ
เมื่อแรงดัน V_1, V_2, V_3 และ V_4 รวมกันก็จะได้เป็น 81 ระดับ ที่ โดยควบคุมช่วงเวลาจากสัญญาณ
ควบคุมจากสวิทช์ฟังก์ชัน SF_1, SF_2, SF_3 และ SF_4 ตามลำดับโดยควบคุมถึงระดับ 40 จากตารางที่ 3.4

ในการออกแบบระดับแรงดันในแต่ละช่วงแรงดันสามารถหาค่าแรงดันแต่ละระดับได้โดย

$$\begin{aligned}
 \text{แรงดันแต่ละระดับ} &= V_p / \text{จำนวนระดับแต่ละด้าน} \\
 &= 311 / 13 \\
 &= 23.9230 \text{ V}
 \end{aligned}$$

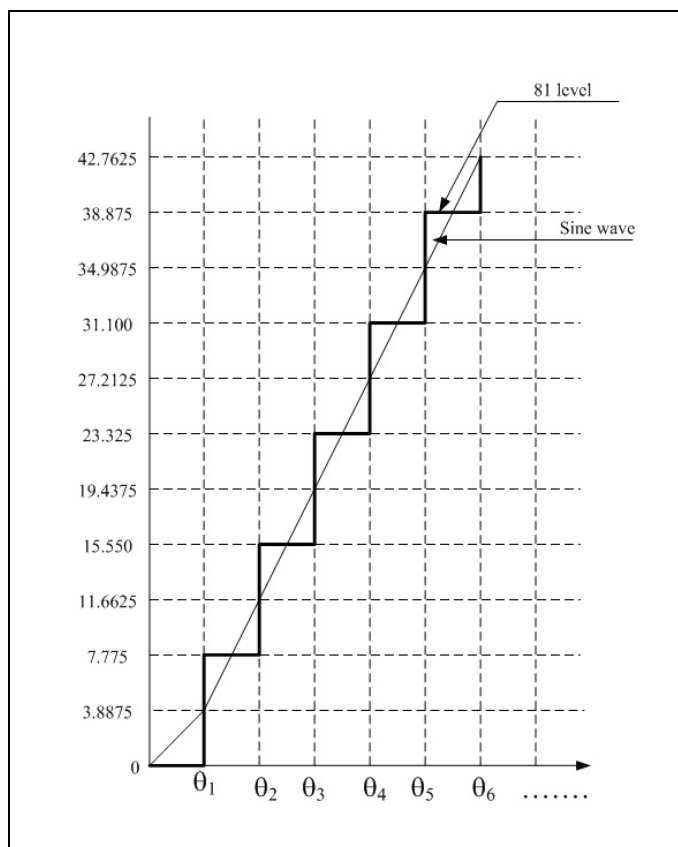
ตารางที่ 3.9 แรงดันการเปลี่ยนระดับและระดับแรงดันที่แต่ละระดับของคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ

ระดับที่	แรงดันที่เปลี่ยนระดับ (โวลต์)	แรงดันที่ระดับ (โวลต์)
1	3.8875	7.775
2	11.6625	15.550
3	19.4375	23.325
4	27.2125	31.100
5	34.9875	38.875
6	42.7625	46.650
7	50.5375	54.425
8	58.3125	62.200
9	66.0875	69.975
10	73.8625	77.750
11	81.6375	85.525
12	89.4125	93.300
13	97.1875	101.075
14	104.9625	108.850
15	112.7375	116.625
16	120.5125	124.400
17	128.2875	132.175
18	136.0625	139.950
19	143.8375	147.725
20	151.6125	155.500
21	159.3875	163.275
22	167.1625	171.050
23	174.9375	178.825
24	182.7125	186.600
25	190.4875	194.375

ตารางที่ 3.9 แรงดันการเปลี่ยนระดับและระดับแรงดันที่แต่ละระดับของคอนเวอร์เตอร์ 81
ระดับ (ต่อ)

ระดับที่	แรงดันที่เปลี่ยนระดับ (โวลต์)	แรงดันที่ระดับ (โวลต์)
26	198.2625	202.150
27	206.0375	209.925
28	213.8125	217.700
29	221.5875	225.475
30	229.3625	233.250
31	237.1375	241.025
32	244.9125	248.800
33	252.6875	256.575
34	260.4625	264.350
35	268.2375	272.125
36	276.0125	279.900
37	283.7875	287.675
38	291.5625	295.450
39	299.3375	303.225
40	307.1125	311.000

จะได้รับการเปลี่ยนระดับแรงดันแต่ละระดับในด้านบวกดังตารางที่ 3.9 คือเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมกับคลื่นไซน์เมื่อระดับแรงดันของรูปคลื่นไซน์ 3.8875 โวลต์ อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจะเปลี่ยนแรงดันเป็น 7.775 โวลต์ และเมื่อคลื่นไซน์ได้ค่าที่ 11.6625 โวลต์ จะเปลี่ยนแรงดันเป็น 15.550 โวลต์ และการเปลี่ยนระดับแรงดันจะเปลี่ยนไปเรื่อยๆจะครบ 40 ระดับในรูปคลื่นด้านบวก และเป็น 40 ระดับของรูปคลื่นด้านลบ และเมื่อรวมกับ 0 แล้วจะได้ 81 ระดับ เพื่อให้ค่าแรงดันด้านออกที่ใกล้เคียงกับรูปไซน์มากขึ้น จึงควรออกแบบให้แต่ละระดับเปลี่ยนแปลงที่ครึ่งหนึ่งของค่าแรงดันแต่ละระดับดังรูปที่ 3.16 คือให้สวิตซ์ฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่ แรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ครึ่งหนึ่งของระดับ การกำหนดช่วงเวลาทำโดยการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันรากเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square, rms) และรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับไซน์มากขึ้น การหาค่ามูมในการสวิตซ์ซึ่งก็จะสามารถทำได้ไม่ยาก โดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ก็จะสามารหามูมในการสวิตซ์ได้



รูปที่ 3.16 การเปลี่ยนแปลงแรงดันและระดับของอินเวอร์เตอร์ 81 ระดับ

3.7 พัดับเบิ้ลยูเอ็มคอนนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ

พัดับเบิ้ลยูเอ็มคอนนเวอร์เตอร์หลายระดับ หลายสถานะที่น่าเสนอจะใช้การควบคุมชุดหนึ่งเป็นพัดับเบิ้ลยูเอ็มซึ่งจะใช้หลักการมอดูเลชั่นแบบยูนิโพลาร์ และชุดที่เหลือก็จะใช้วิธีการรวมกันเหมือนกับคอนนเวอร์เตอร์หลายระดับที่น่าเสนอไปแล้ว ดังนั้นถ้าใช้สวิตช์ SF_1 , SF_2 และ SF_3 ก็คือการใช้อะซ-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงคาสเคด 3 สถานะ ก็จะรวมแรงดันด้านออกของสถานะที่ 2 และสถานะที่ 3 รวมเป็น 9 ระดับและรวมกับพัดับเบิ้ลยูเอ็มจากสถานะที่ 1 ซึ่งเป็นการมอดูเลชั่นแบบยูนิโพลาร์จำนวน 2 ระดับ ก็จะรวมกัน 11 ระดับ และถ้าหากใช้อะซ-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงคาสเคด 4 ชุดก็จะ เป็น 27 ระดับ

คอนนเวอร์เตอร์หลายระดับที่น่าเสนอสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งได้จำนวนมากเมื่อเลือกจำนวนระดับที่มากขึ้น ในขณะที่ 3 ระดับก็ยังใช้จำนวนอุปกรณ์สวิตซ์เท่ากันคือ 4 ตัว ดังนั้นการศึกษาในงานวิจัยนี้จะศึกษาที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่น่าเสนอที่ใช้วงจรอะซ-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงคาสเคดตั้งแต่ 2 สถานะ ถึง 4 สถานะ หรือพัดับเบิ้ลยูเอ็มคอนนเวอร์เตอร์ 5, 11 และ 29 ระดับ

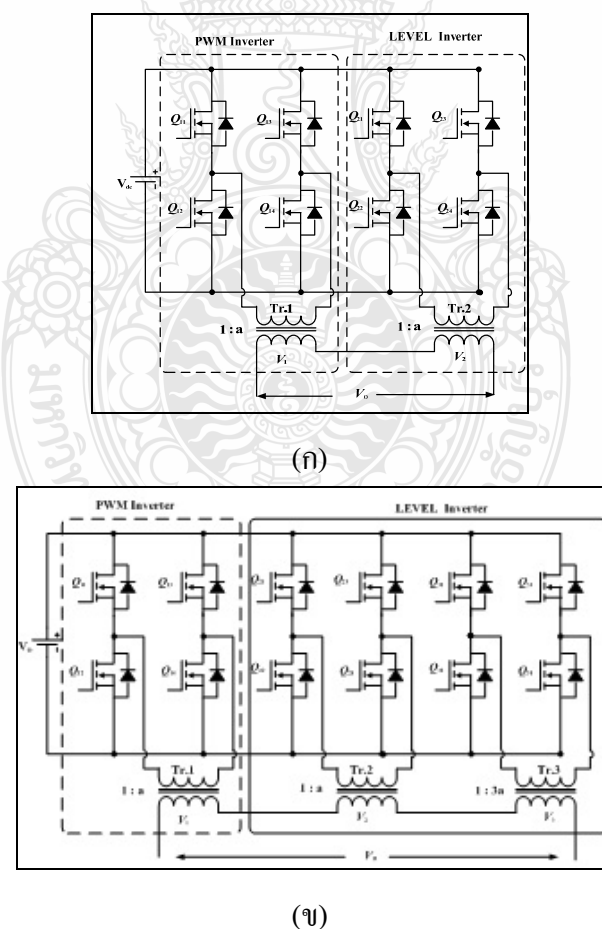
สามารถหาค่าระดับของแรงดันด้านออกสามารถหาได้โดย

$$N = 3^{s-1} + 2, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (3.5)$$

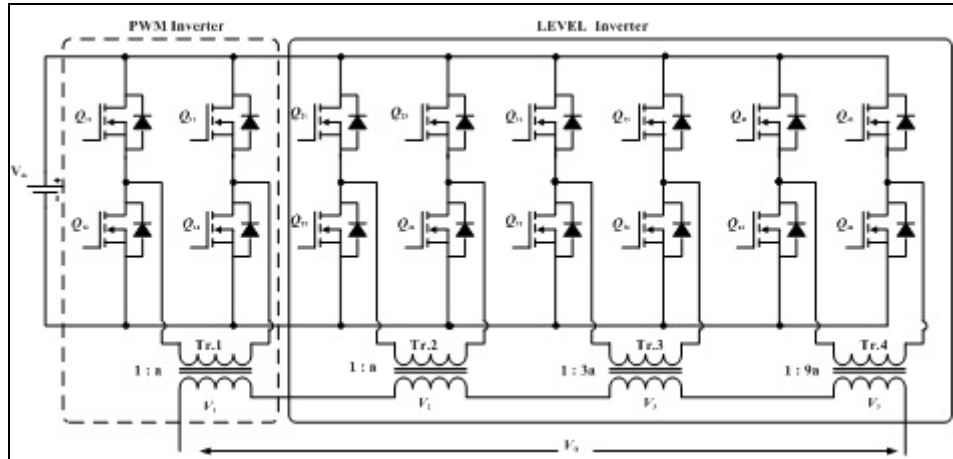
เมื่อ N : คือ จำนวนระดับด้านออก

s : คือ จำนวนสถานะ

ตัวอย่างวงจรพีดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ เป็นไปตามรูปที่ 3.16 (a) เมื่อ s คือ จำนวนสถานะจะได้ ชุดของเอช-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงคาสเคด จำนวน 3 ชุดคือ $3^{2-1} + 2 = 5$ ระดับ พัลส์วิดท์มอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 11 ระดับจะประกอบด้วยวงจรเอช-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงคาสเคด จำนวน 3 ชุด และพัลส์วิดท์มอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 29 ระดับจะประกอบด้วยวงจรเอช-บริดจ์ 4 ชุดแต่ละชุดต่อเข้ากับหม้อแปลง ซึ่งขดลวดด้านทุติยภูมิต่ออนุกรมกันอยู่ โดยหม้อแปลงคาสเคดจะทำหน้าที่ยกระดับแรงดันเพื่อสร้างจำนวนระดับของแรงดันด้านออก รูปที่ 4.2 แสดงวงจรกำลังพีดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ, 11 ระดับ และ 29 ระดับ



รูปที่ 3.17 วงจรกำลังพีดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ (ก) 5 ระดับ (ข) 11 ระดับ



(ค)

รูปที่ 3.17 วงจรกำลังพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ (ค) 29 ระดับ (ต่อ)

สามารถหาค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงของหม้อแปลงได้คือ หม้อแปลงตัวที่ 1 (Tr.1) คือ $1: a$ และหม้อแปลงตัวอื่นสามารถหาได้โดย

$$Tr_n = 1:3^{n-1} a V_{dc} \quad (3.6)$$

- เมื่อ Tr_n : คือ หม้อแปลงของคาสเคดชุดที่ n
 a : คือ อัตราส่วนการขยายระหว่างค่าสูงสุดแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากดิซิปัส
 n : คือ ลำดับสถานะของหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับเอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์
 V_{dc} : คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากดิซิปัส

อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงของหม้อแปลงตัวที่ 1 (Tr.) คือ $1: a$ และหม้อแปลงตัวอื่นสามารถหาได้โดย 3^{n-1} ระดับแรงดันด้านออกสามารถหาโดยอัตราส่วนที่ได้คูณกับแรงดันด้านเข้า (V_{dc}) ตัวอย่างสำหรับพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับจะประกอบด้วยแรงดันด้านออกหลัก 9 ระดับ รวมทั้ง $0 (\pm 4aV_{dc}, \pm 3aV_{dc}, \pm 2aV_{dc}, \pm aV_{dc}$ และ 0) และเพิ่มอีก 2 ระดับจากพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์

ตารางที่ 3.10 อัตราส่วนของหม้อแปลงและจำนวนระดับด้านออกจากหม้อแปลงคาสเคด

หม้อแปลงคาสเคด	พีดับเบิลยูเอ็ม	หลายระดับ			
	Tr.1	Tr.2	Tr.3	Tr.4	...Tr. _n
อัตราส่วนหม้อแปลง	1:a	1:a	1:3a	1:9a	1:3 ⁿ⁻¹ a
ระดับด้านออก (Level)	3				
	←	5			
	←←		11		
		←		29	
			←		N

3.7.2 สัญญาณควบคุม

ในการออกแบบสัญญาณควบคุมสามารถสร้างสัญญาณควบคุมโดยสวิตชิงฟังก์ชันสัญญาณด้านบวกดังตารางที่ 3.11 พีดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับใช้สวิตชิงฟังก์ชัน SF₁ และ SF₂ พีดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับใช้สวิตชิงฟังก์ชัน SF₁, SF₂ และ SF₃ พีดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับใช้สวิตชิงฟังก์ชัน SF₁, SF₂, SF₃ และ SF₄ ส่วนค่าทางด้านลบสามารถหาได้โดยใช้ค่าเดียวกันและคูณด้วย -1

ตารางที่ 3.11 สวิตชิงฟังก์ชันและระดับด้านออกจากหม้อแปลงคาสเคด

ระดับด้านออก (n)	สวิตชิงฟังก์ชัน				แรงดันที่ขั้ว				แรงดันด้านออก
	SF ₁	SF ₂	SF ₃	SF ₄	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V _o
0	0↔0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0↔1	0	0	0	0↔aVdc	0	0	0	aVdc
2	0↔1	1	0	0	0↔aVdc	aVdc	0	0	2aVdc
3	0↔1	-1	1	0	0↔aVdc	-aVdc	3aVdc	0	3aVd
4	0↔1	0	1	0	0↔aVdc	0	3aVdc	0	4aVdc
5	0↔1	1	1	0	0↔aVdc	aVdc	3aVdc	0	5aVdc
6	0↔1	-1	-1	1	0↔aVdc	-aVdc	-3aVdc	9aVdc	6aVdc
7	0↔1	0	-1	1	0↔aVdc	0	-3aVdc	9aVdc	7aVdc
8	0↔1	1	-1	1	0↔aVdc	aVdc	-3aVdc	9aVdc	8aVdc
9	0↔1	-1	0	1	0↔aVdc	-aVdc	0	9aVdc	9aVdc

ตารางที่ 3.11 สวิตซ์ฟังก์ชันและระดับด้านออกจากหม้อแปลงคาสเคด (ต่อ)

ระดับด้านออก (n)	สวิตซ์ฟังก์ชัน				แรงดันที่ขั้ว				แรงดันด้านออก
	SF1	SF2	SF3	SF4	V_1	V_2	V_3	V_4	V_o
10	0↔1	0	0	1	$0↔aV_{dc}$	0	0	$9aV_{dc}$	$10aV_{dc}$
11	0↔1	1	0	1	$0↔aV_{dc}$	aV_{dc}	0	$9aV_{dc}$	$11aV_{dc}$
12	0↔1	-1	1	1	$0↔aV_{dc}$	$-aV_{dc}$	$3aV_{dc}$	$9aV_{dc}$	$12aV_{dc}$
13	0↔1	0	1	1	$0↔aV_{dc}$	0	$3aV_{dc}$	$9aV_{dc}$	$13aV_{dc}$
14	0↔1	1	1	1	$0↔aV_{dc}$	aV_{dc}	$3aV_{dc}$	$9aV_{dc}$	$14aV_{dc}$

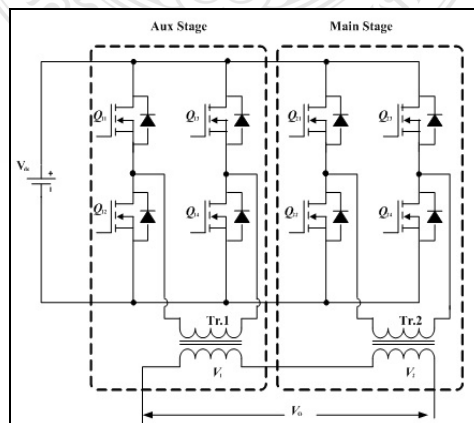
3.7.3 สัญญาณด้านออก

รูปคลื่นแรงดันด้านออก (V_o) ของพีคัปเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยผลรวมของแรงดันที่ด้านออกของหม้อแปลงเช่นที่ พีคัปเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับจะประกอบด้วยพีคัปเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ และหม้อแปลงตัวที่ 1 (V_1) เพียงอย่างเดียว สำหรับของพัลส์วิดท์มอดูเลชันอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับจะประกอบด้วยพีคัปเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลงตัวที่ 1 (V_1) รวมกับชุดที่ 2 (V_2) และ 29 ระดับแรงดันด้านออก V_o จะเป็นผลรวมของ $(V_2 + V_3 + V_4) + V_1$

3.8 การออกแบบพีคัปเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ

3.8.1 การออกแบบพีคัปเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ แบบ 2 สถานะ

วงจรกำลังพีคัปเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับจะประกอบด้วยชุดเอช-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงคาสเคดจำนวน 2 ชุด ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรกำลังของพีคัปเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ แบบ 2 สถานะ

จากรูปวงจรกำลังวงจรที่ 3.18 ประกอบด้วยชุดเอช-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงคาบจำนวน 2 ชุด ชุดแรกคือชุดที่ต่อกับหม้อแปลง Tr_1 จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มและชุดที่ 2 คือชุดที่ต่อกับ Tr_2 ทำหน้าที่สร้างระดับแรงดันที่ 2 ระดับ และเมื่อนำสัญญาณจาก 2 ชุดรวมกันจะได้แรงดันด้านออกเป็น 5 ระดับ คือ $0, 1aV_{dc}, 2aV_{dc}, -1aV_{dc}$, และ $-2aV_{dc}$, อัตราส่วนของหม้อแปลงสามารถหาได้โดยสมการที่ (3.6) ฉะนั้นจะได้

$$Tr_1 = 1: aV_{dc}$$

$$Tr_2 = 1:aV_{dc}$$

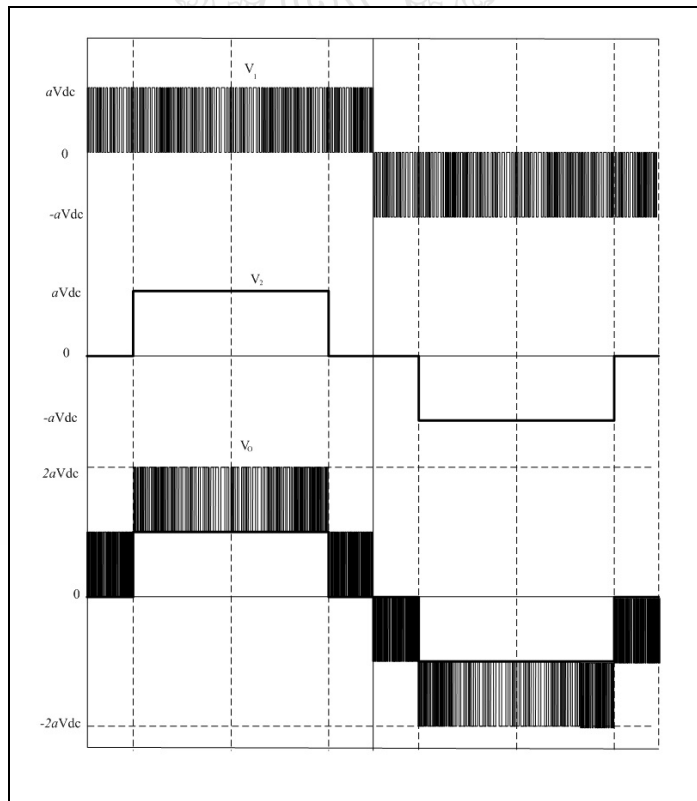
ดังนั้นในการออกแบบหากสัญญาณแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็น $12 V_{dc}$ และต้องการออกแบบแรงดันด้านออกเป็นกระแสกลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ จะได้ อัตราการขยายหรือค่า a คือ

$$4aV_{dc} = 311 V_p$$

$$a V_{dc} = 311 V_p / 2 = 155.58 V$$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_1 คือ $= 1:aV_{dc}$ หรือ $12V : 155.58V$

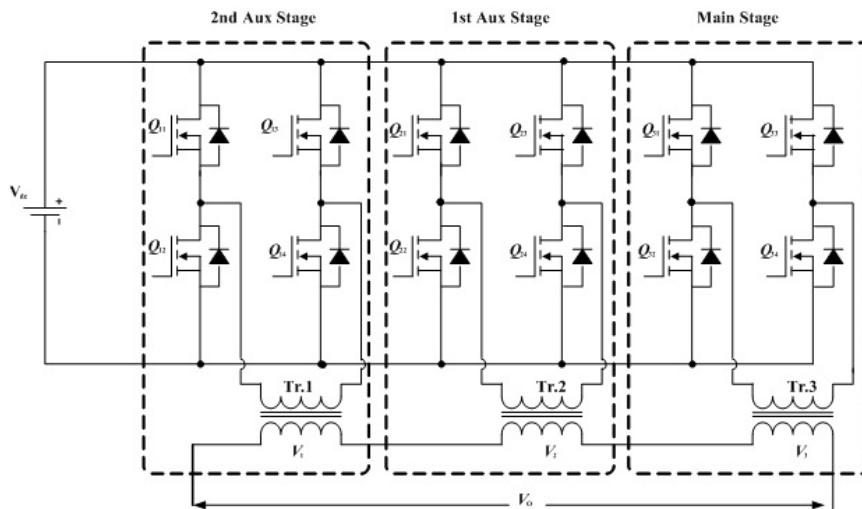
อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_2 คือ $= 1: aV_{dc}$ หรือ $12V: 155.58 V$



รูปที่ 3.19 แรงดันด้านออกของพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

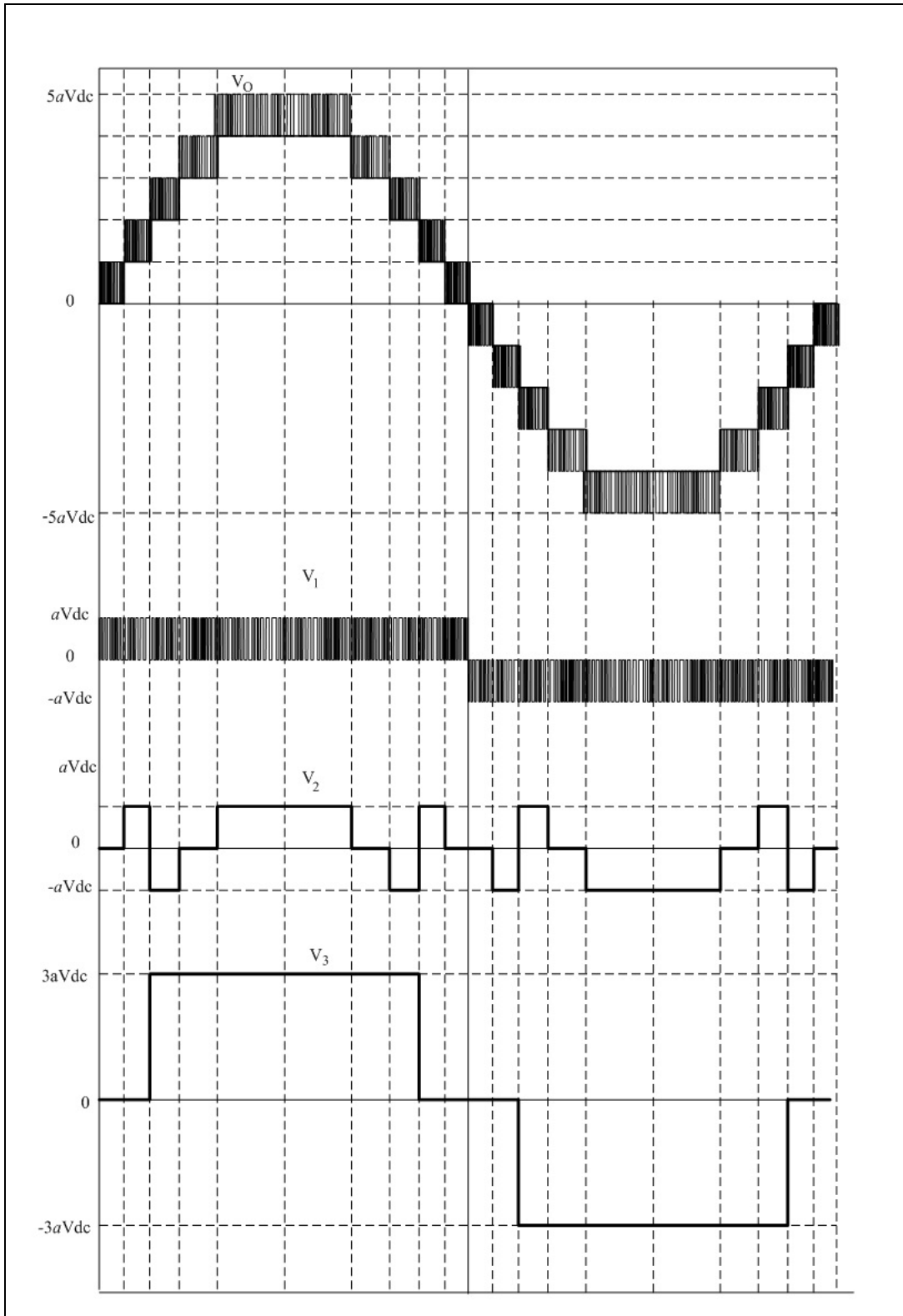
3.8.2 การออกแบบพีดีบีเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ แบบ 3 สถานะ

วงจรกำลังพีดีบีเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับจะประกอบด้วยชุดเอช-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงคาสเคดจำนวน 3 ชุด ชุดแรกคือชุดที่ต่อกับหม้อแปลง Tr_1 จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพีดีบีเบิ้ลยูเอ็ม ส่วนชุดที่ 2 คือชุดที่ต่อกับ Tr_2 และชุดที่ 3 ที่ต่อกับ Tr_3 ทำหน้าที่สร้างระดับแรงดันที่ 9 ระดับ จากรูปที่ 3.20 จะเห็นว่าชุดสร้างระดับแรงดันคือชุดเอช-บริดจ์จำนวน 2 ชุด คือชุดที่ต่อกับหม้อแปลง Tr_1 และ Tr_2



รูปที่ 3.20 วงจรกำลังของพีดีบีเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ

สัญญาณควบคุม V_2 คือ SF_2 และอัตราส่วนของหม้อแปลงคือ $1: aV_{dc}$ จะได้สัญญาณออกจากหม้อแปลงคือ V_2 และเมื่อนำสัญญาณจาก 2 ชุดรวมกันจะได้แรงดันดังรูป และสัญญาณควบคุม V_3 คือ SF_3 จะได้สัญญาณออกจากหม้อแปลงคือ V_3 โดยมีอัตราขยาย 3 เท่า เมื่อ V_2 รวมกับ V_3 จะได้รูปคลื่นเป็น 9 ระดับ และเมื่อรวมกับพีดีบีเบิ้ลยูเอ็มและ 0 จะรวมสัญญาณเป็น 11 ระดับ



รูปที่ 3.21 แรงดันด้านออกพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ

เพื่อให้สัญญาณใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ การกำหนดช่วงเวลาในการเปลี่ยนแรงดันจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ควรให้ช่วงเวลาสัมพันธ์กับรูปคลื่นไซน์ คือให้เปลี่ยนช่วงเวลาสัญญาณไซน์ที่ 62.2, 124.4, 186.6, 248.8 V ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงแรงดันของพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ

แรงดันรูปคลื่นไซน์ (V)	สวิตชิงฟังก์ชัน			แรงดันที่ขั้ว			แรงดันด้านออก V_o
	SF1	SF2	SF3	V_1	V_2	V_3	
0	0↔0	0	0	0↔0	0	0	0
0	0↔1	0	0	0↔62.2	0	0	62.2
62.2	0↔1	1	0	62.2	62.2	0	124.4
124.4	0↔1	-1	1	62.2	-62.2	186.6	186.6
186.6	0↔1	0	1	62.2	0	186.6	248.8
248.8	0↔1	1	1	62.2	62.2	186.6	311

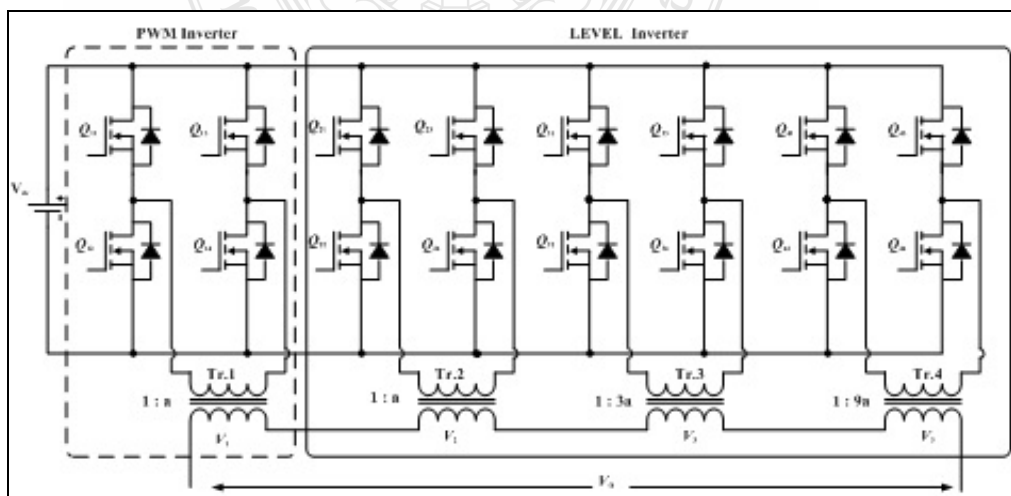
3.8.3 การออกแบบพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ แบบ 4 สถานะ

การออกแบบพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับวงจรกำลังจะประกอบด้วยชุดเอช-บริดจ์ที่ต่ออยู่กับหม้อแปลงคาสเคดจำนวน 4 ชุดดังรูปที่ 3.20 โดยชุดที่ 1 ทำหน้าที่สร้างพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ และชุดที่ 2 ถึง 4 ทำหน้าที่เป็นคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ คือระดับด้านบวกและด้านลบ ด้านละ 13 ระดับเมื่อรวมกับและเมื่อรวมกับพัลส์วิดท์มอดูเลชันด้านละ 1 ระดับ ก็จะได้ด้านละ 14 ระดับเมื่อรวมกับ 0 จะได้จำนวนระดับรวมทั้งสิ้น 29 ระดับ อัตราส่วนของหม้อแปลงจะได้

$$Tr_1 = Tr_2 = 1: aVdc$$

$$Tr_3 = 1: 3aVdc$$

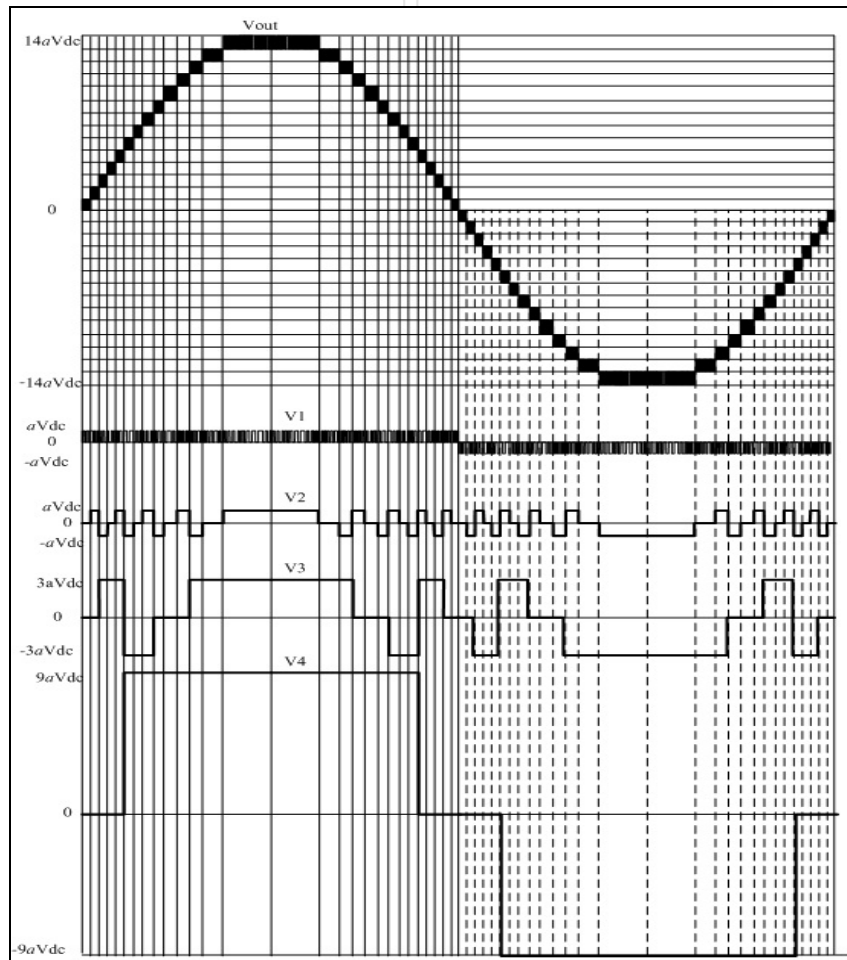
$$Tr_4 = 1: 9aVdc$$



รูปที่ 3.22 วงจรกำลังของพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ

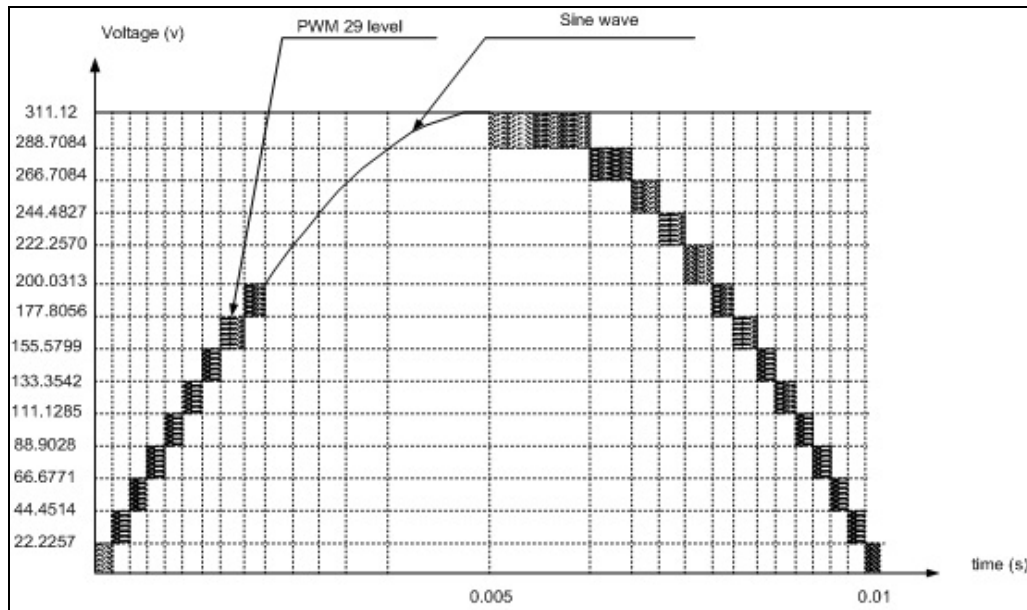
การออกแบบสัญญาณควบคุมให้สร้างสัญญาณได้ 29 ระดับ โดยใช้สวิตชิงฟังก์ชันตามตารางที่ 3.11 โดยให้ SF₁ ควบคุมชุดเอช-บริดจ์ชุดที่ 1 ซึ่งเป็นพีคดับเบิลยูเอ็ม และ SF₂, SF₃ และ SF₄ ควบคุมชุดกำลังสถานะที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยสถานะที่ 2 ถึง 4 จะทำหน้าที่สร้างระดับแรงดันที่ 27 ระดับเมื่อรวมกับพีคดับเบิลยูเอ็ม 2 ระดับ ก็จะได้เป็น 29 ระดับ

จากสัญญาณควบคุมที่ควบคุมวงจรกำลังให้ทำงานดังกล่าวแล้วเมื่อแต่ละชุดถูกขยายโดยหม้อแปลงตามที่กล่าวมาแล้วสัญญาณด้านออกจากหม้อแปลงแต่ละชุดและสัญญาณด้านออกรวมจะเป็นดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 สัญญาณด้านออกของพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ

การกำหนดช่วงเวลาในการสวิตชิงเพื่อให้สัญญาณออกมาใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากที่สุด จึงต้องออกแบบการเปลี่ยนเวลาควบคุมเทียบกับแรงดันรูปคลื่น ไซน์ จึงต้องออกแบบให้ระดับแรงดันของ 27 ระดับเปลี่ยนค่าแรงดันที่ทุกๆ 22.22 โวลต์ และเมื่อรวมกับพีคดับเบิลยูเอ็ม 2 ระดับก็จะได้ 29 ระดับแล้วจะได้ค่าเฉลี่ยแต่ละระดับ และค่าเฉลี่ยทั้งรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การเปลี่ยนระดับพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับเทียบกับรูปคลื่นไซน์

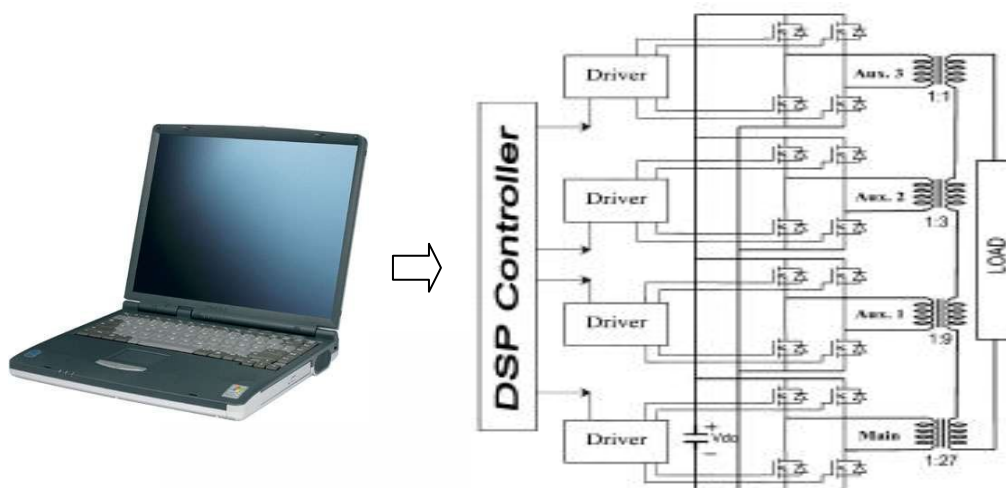
3.9 การออกแบบเครื่องต้นแบบ

จากวิธีการออกแบบที่กล่าวมาแล้ว และผลการจำลองโปรแกรมในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่า สมมุติฐานในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ และพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ ที่นำเสนอ นั้น สามารถใช้ได้ โดยสามารถลดอุปกรณ์สวิตชิ่งได้จำนวนมาก และการออกแบบที่มี จำนวนระดับยิ่งมากจะได้สัญญาณที่ใกล้เคียงไซน์มากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ค่า THD_v ต่ำลงด้วย โดยทั้งนี้ อินเวอร์เตอร์ 27 ระดับซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตชิ่ง 12 ตัว ยังมีค่า THD_v ต่ำกว่าพัลส์วิดธมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 29 ระดับ ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตชิ่งที่ 16 ตัว

ดังนั้นในการออกแบบเครื่องต้นแบบจึงทำการศึกษาและออกแบบที่ 27 ระดับ จะสามารถทำได้ง่ายกว่าและต้นทุนที่ต่ำกว่าเนื่องจากสามารถใช้เพียง 3 สถานะ ฉะนั้นการออกแบบสามารถลดความยุ่งยากในการสร้างสัญญาณควบคุม และลดอุปกรณ์ที่วงจรจับเกิดสำหรับมอสเฟตกำลัง วงจรกำลัง อุปกรณ์สวิตชิ่ง และจำนวนหม้อแปลง

3.9.1 การออกแบบสัญญาณควบคุม

การออกแบบเครื่องต้นแบบคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ ทำโดยการสร้างสัญญาณควบคุมโดยโปรแกรม Matlab/Simulink ส่งสัญญาณผ่าน DSP Controller ของบริษัท Texas Instrument รุ่น eZdspTMS320F2812 สร้างวงจรขยายสัญญาณควบคุมเพื่อขับเกิดของมอสเฟตและแยกส่วน (Isolation) สัญญาณควบคุมที่ได้จาก DSP กับแรงดันสูงที่ใช้ควบคุมมอสเฟตโดยใช้ตัวเชื่อมต่อโยงทางแสง (Opto-coupler) รุ่น HCPL-817 และขยายสัญญาณไปควบคุมมอสเฟตแต่ละชุด

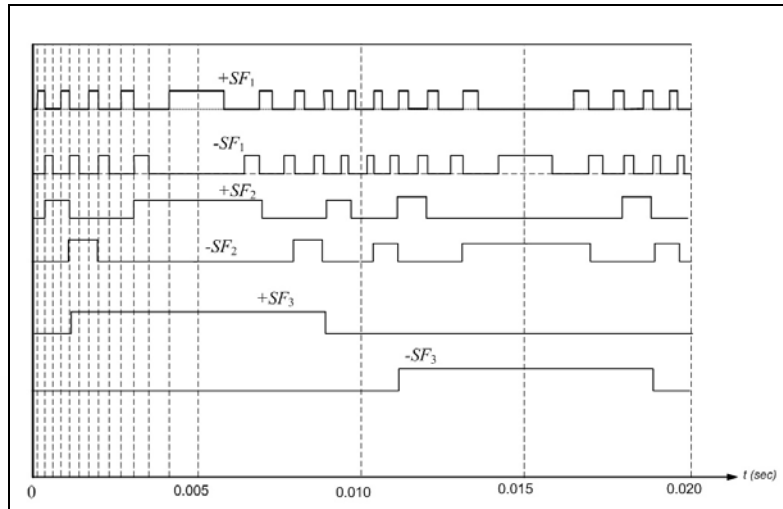


รูปที่ 3.25 แผนผังในการสร้างเครื่องต้นแบบ

3.9.2 การสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

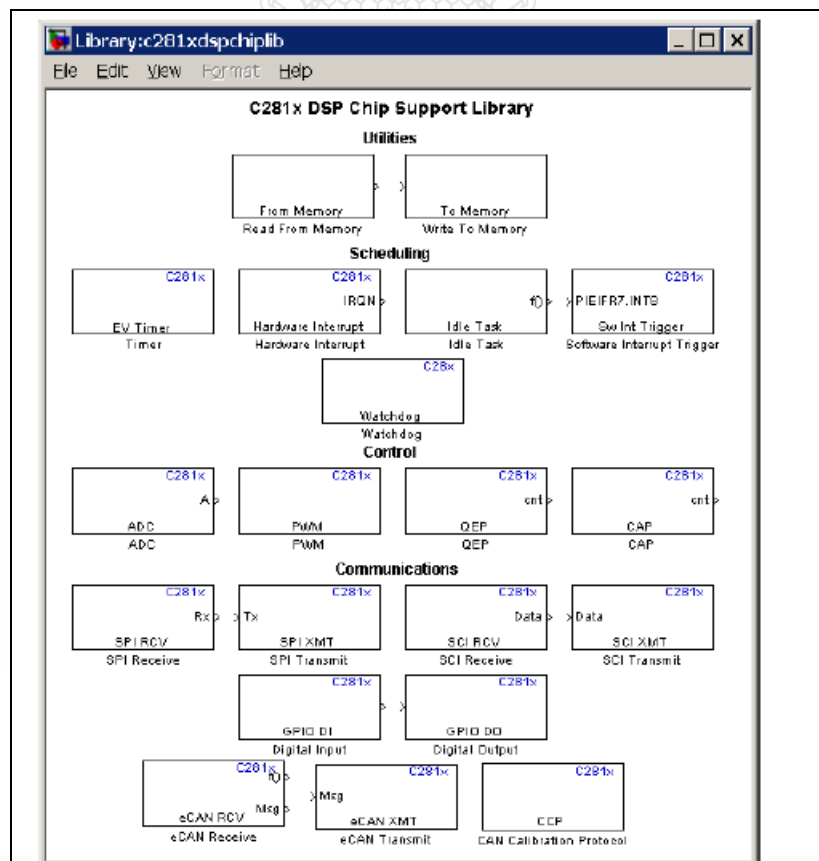
การออกแบบสร้างสัญญาณควบคุมโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink ส่งสัญญาณผ่าน DSP Controller ของบริษัท Texas Instrument รุ่น eZdspTMS320F2811 ก็คือการใช้สัญญาณที่สร้างขึ้นใน Simulink จากการจำลองการทำงานส่งผ่านอินเทอร์เน็ตเฟส โดยโปรแกรมจะแปลงภาษาโดย C++ Compiler ส่งออกมา ทาง eZdspTMS320F2812

จากสวิตซ์ฟังก์ชันของ 27 ระดับ ซึ่งประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 3 สถานะ สัญญาณควบคุมชุดพัลส์บวก SF₁ จะควบคุมการทำงานของสวิตซ์ Q₁₁ และ Q₁₄ และสัญญาณควบคุมชุดพัลส์ลบ SF₁ จะควบคุมการทำงานของสวิตซ์ Q₁₃ และ Q₁₂ สัญญาณควบคุมชุดพัลส์บวก SF₂ จะควบคุมการทำงานของสวิตซ์ Q₂₁ และ Q₂₄ และสัญญาณควบคุมชุดพัลส์ลบ SF₂ จะควบคุมการทำงานของสวิตซ์ Q₂₃ และ Q₂₂ สัญญาณควบคุมชุดพัลส์บวก SF₃ จะควบคุมการทำงานของสวิตซ์ Q₃₁ และ Q₃₄ และสัญญาณควบคุมชุดพัลส์ลบ SF₃ จะควบคุมการทำงานของสวิตซ์ Q₃₃ และ Q₃₂ สัญญาณควบคุมดังรูปที่ 3.26



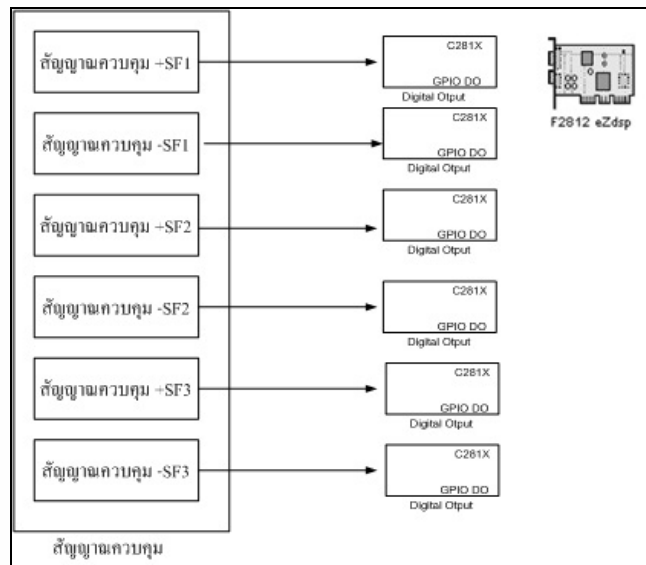
รูปที่ 3.26 สัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับที่ออกแบบ

จากการที่สร้างสัญญาณควบคุมแล้วนั้นก็ให้ต่อสัญญาณออกทาง Chip Support ของ TC2000 ใน MATLAB/Simulink ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.27

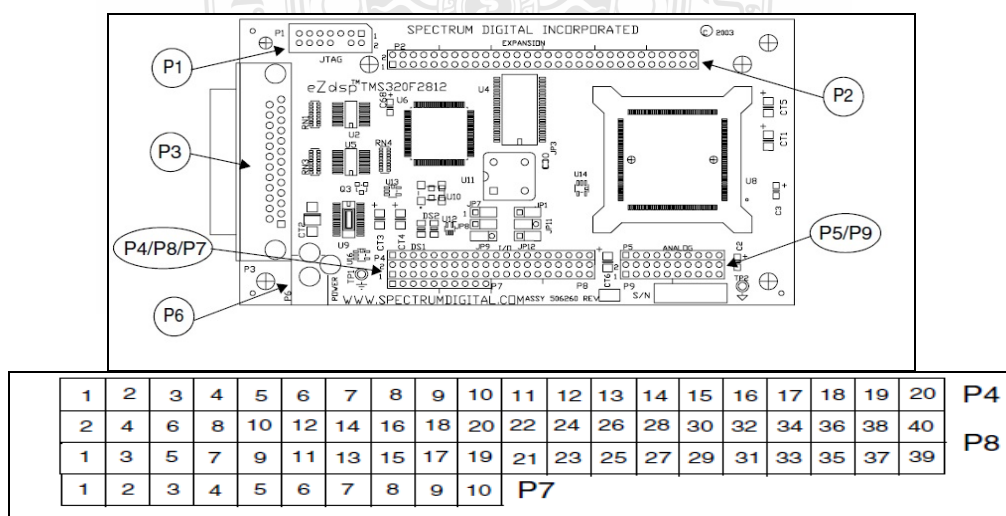


รูปที่ 3.27 Chip Support ของ TC2000 ใน MATLAB/Simulink

ในงานวิจัยนี้ใช้ Digital Output เพื่อส่งสัญญาณ ทั้งนี้จะต้องใช้ Chip Support F2812 eZdsp มาวางด้วย เพื่อให้ Simulink รับทราบและประเมินผลส่งไปที่ F2812 eZdsp Board แล้วสั่งให้โปรแกรม Build เพื่อแปลงสัญญาณเป็นภาษา C++ ส่งผ่านพอร์ตของคอมพิวเตอร์ และส่งไปประมวลผลโดย Microprocessor ของ eZdspTMS320F2812 จะได้สัญญาณขาออกจาก DSP Board ที่พอร์ต P4 และ P8 โดยตำแหน่งของ P4 และ P8 ดังรูปที่ 3.29 การกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ในแต่ละบล็อกของ Chip ที่เราเลือกจะได้ค่าตามพอร์ตหมายเลขต่างๆ ดังตารางที่ 3.13



รูปที่ 3.28 ลักษณะการสร้างสัญญาณควบคุมโดย MATLAB/Simulink เพื่อส่งสัญญาณออก eZdspTMS320F2812

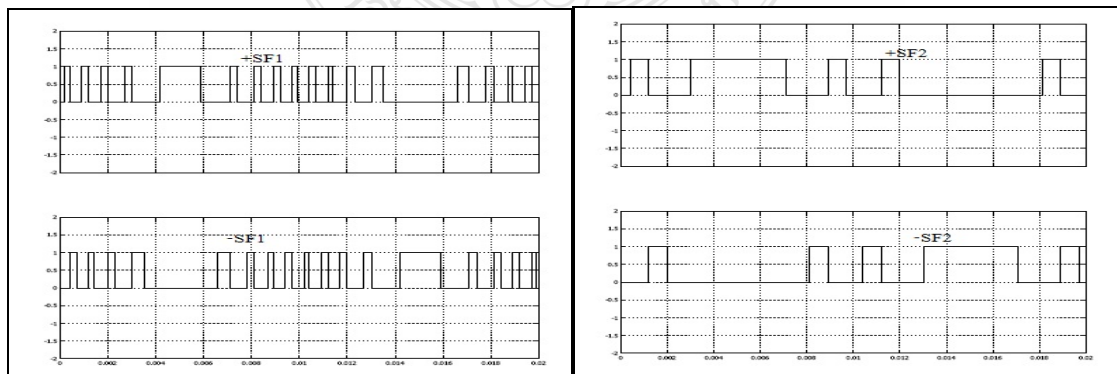


รูปที่ 3.29 ตำแหน่งของ P4 และ P8 ของ eZdspTMS320F2812

ตารางที่ 3.13 ตำแหน่งของ P4 และ P8 ของ eZdspTMS320F2812

P4 Pin #	P4 Signal	P8 Pin #	P8 Signal	P8 Pin #	P8 Signal
1	+3.3V/+5V/NC *	1	+3.3V/+5V/NC *	2	+3.3V/+5V/NC *
2	XINT2/ADCSOC	3	SCITXDA	4	SCIRXDA
3	MCLKXA	5	XINT1n/XBIO _n	6	CAP1/QEP1
4	MCLKRA	7	CAP2/QEP2	8	CAP3/QEP11
5	MFSXA	9	PWM1	10	PWM2
6	MFSRA	11	PWM3	12	PWM4
7	MDXA	13	PWM5	14	PWM6
8	MDRA	15	T1PWM/T1CMP	16	T2PWM/T2CMP
9	No connect	17	TDIRA	18	TCLKINA
10	GND	19	GND	20	GND
11	CAP5/QEP4	21	No connect	22	XINT1N/XBIO _n
12	CAP6/QEPI2	23	SPISIMOA	24	SPISOMIA
13	T3PWM/T3CMP	25	SPICLKA	26	SPISTEA
14	T4PWM/T4CMP	27	CANTXA	28	CANRXA
15	TDIRB	29	XCLKOUT	30	PWM7
16	TCLKINB	31	PWM8	32	PWM9
17	XF/XPLLDIS _n	33	PWM10	34	PWM11
18	SCITXDB	35	PWM12	36	CAP4/QEP3
19	SCIRXDB	37	T1CTRIIP/PDPINT _{An}	38	T3CTRIIP/PDPINT _{Bn}
20	GND	39	GND	40	GND

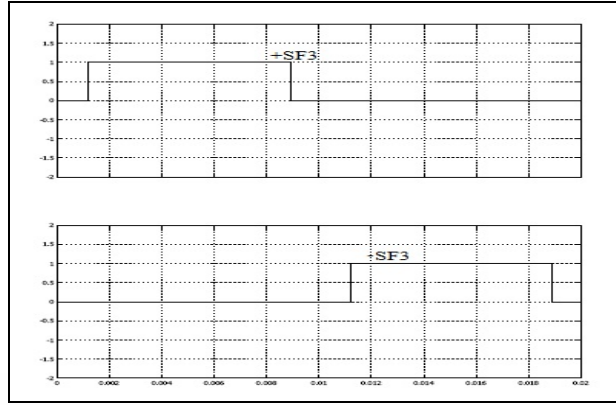
จากการสร้างสัญญาณควบคุมดังกล่าวและทดลองจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะได้รูปสัญญาณควบคุมที่ต้องการดังรูปที่ 3.30 โดยสัญญาณในรูป (ก) คือสัญญาณ SF₁ สัญญาณในรูป (ข) คือสัญญาณ SF₂ และสัญญาณในรูป (ค) คือสัญญาณ SF₃ จากผลการจำลองจะเห็นว่าได้รูปสัญญาณตามที่ต้องการ



(ก)

(ข)

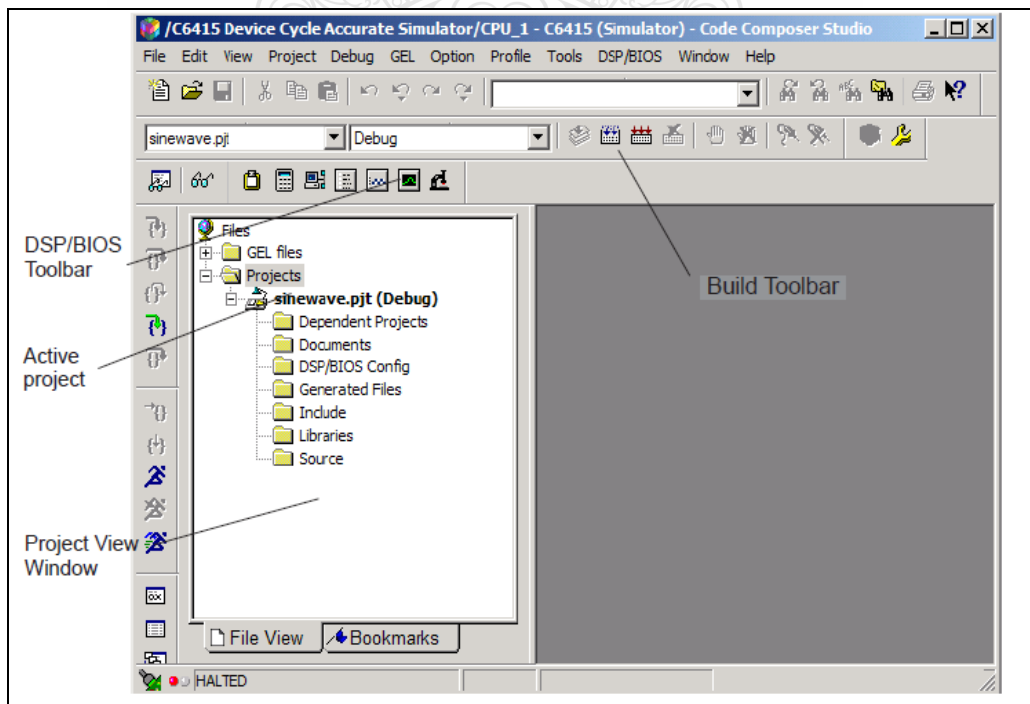
รูปที่ 3.30 (ก), (ข) และ (ค) สัญญาณควบคุมจากโปรแกรม MATLAB/Simulink



(ก)

รูปที่ 3.30 (ก), (ข) และ (ค) สัญญาณควบคุมจากโปรแกรม MATLAB/Simulink (ต่อ)

เมื่อต้องการที่จะสั่งให้สัญญาณควบคุมที่สร้างโดยโปรแกรมแปลงเป็นภาษา C++ ให้เปิดโปรแกรม F2812eZdspCC Studio v 3.1 จะขึ้น windows ดังรูปที่ และสั่งให้ต่อกับ DSP Board ที่คำสั่ง Debug และ Connected โปรแกรม CC Studio จะเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับ DSP Board และเมื่อต้องการที่จะส่งโปรแกรมออกไปสู่บอร์ดให้เปิดไฟล์ที่เขียนโดย MATLAB/Simulink และสั่งให้ส่งสัญญาณออกโดยใช้ Build Toolbar บนหน้าต่างของ CC Studio หรือสามารถสั่งทาง Build Toolbar บนหน้าต่างของ MATLAB/Simulink ก็ได้ หน้าต่างของ CCStudio เป็นดังรูปที่ 3.31

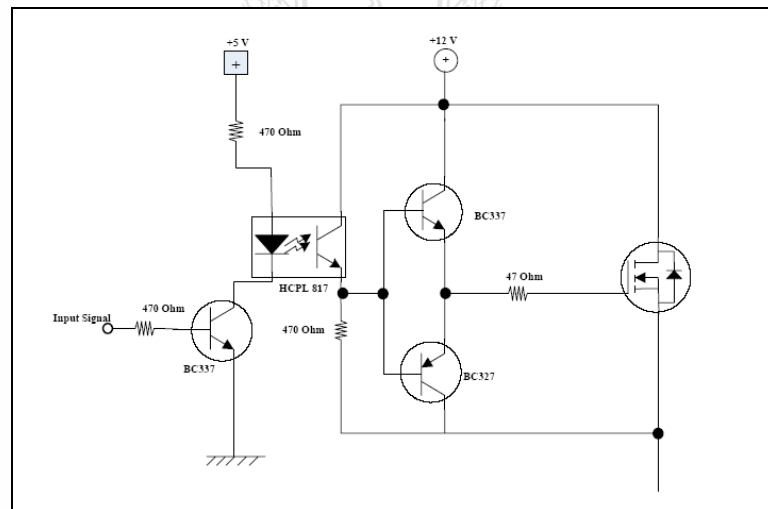


รูปที่ 3.31 หน้าต่างของโปรแกรม CCStudio

3.9.3 การออกแบบวงจรขับเกต

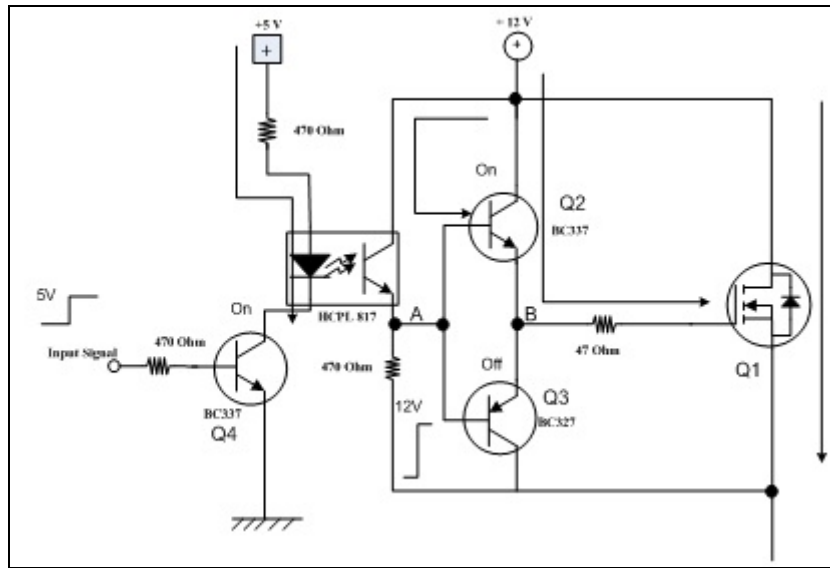
โดยทั่วไปวงจรขับเกตจะต้องการคุณสมบัติที่สำคัญสองประการคือการแยกโดด (Isolation) สัญญาณควบคุมที่มีกำลังต่ำออกจากสัญญาณมอสเฟตที่มีกำลังสูง เพื่อป้องกันการรบกวนกันของสัญญาณ ประการที่สองมอสเฟตต้องสามารถนำหรือหยุดนำกระแสได้อย่างรวดเร็วเพื่อลดการสูญเสีย (Switching loss) ซึ่งในปัจจุบันวงจรขับเกตที่สร้างขึ้นมีความยุ่งยากซับซ้อนในการประกอบเพราะมีอุปกรณ์หลายตัวทั้งทรานซิสเตอร์และลอจิกเกตหรือถ้าใช้วงจรรวม (Integrate Circuit) ทำหน้าที่เป็นวงจรขับเกตโดยเฉพาะก็มีราคาสูง ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนในการผลิตลงวงจรขับเกตจึงออกแบบดังนี้

การแยกโดดสัญญาณทำได้โดยการเชื่อมโยงทางแสง (Opto-coupler) ที่สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงและมีการเปลี่ยนแปลงสถานะได้อย่างรวดเร็วแทนการใช้หม้อแปลงแยกขด (Isolated transformer) ที่มีราคาสูง การทำให้มอสเฟตนำกระแสและหยุดนำกระแสอย่างรวดเร็ว ทำได้โดยการใช้ทรานซิสเตอร์คู่คอมพลีเมนต์ต่อร่วมกันแบบวงจรคอลเลกเตอร์ร่วมทำหน้าที่ใส่ประจุและดึงประจุและการคายประจุของเกตในมอสเฟตเพื่อกระตุ้นให้การสะสมประจุและการคายประจุของเกตในมอสเฟตเป็นไปอย่างรวดเร็ว จากหลักการดังกล่าวจึงได้วงจรขับเกตเป็นดังรูปที่ 3.32



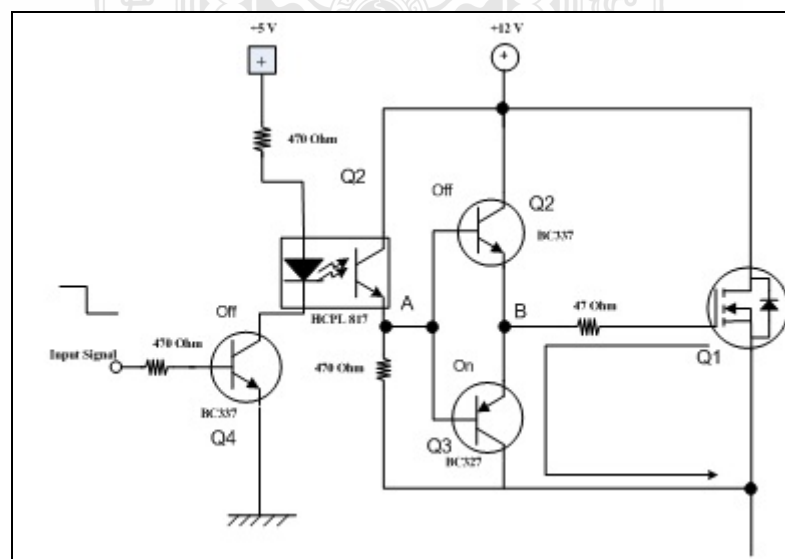
รูปที่ 3.32 วงจรขับเกต

การกระตุ้นการนำกระแสของมอสเฟต เมื่อสัญญาณควบคุมเป็น +5V ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q4 ชนิด PNP และไดโอดเปล่งแสงในตัวเชื่อมโยงทางแสงนำกระแส และทำให้แรงดันที่จุด A มีค่าสูงเกือบเท่าแหล่งจ่ายไฟ (+15V) ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 ได้รับไบอัสตรงและนำกระแส ในขณะเดียวกันทรานซิสเตอร์ Q3 ก็จะได้รับไบอัสกลับก็จะไม่นำกระแส แรงดันที่จุด B จึงสูงขึ้นเกือบเท่าแหล่งจ่ายไฟเป็นการกระตุ้นให้เกิดการสะสมประจุที่เกตของมอสเฟต ทำให้มอสเฟต Q1 นำกระแสทันทีทันใด การทำงานเป็นดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 การกระตุ้นการนำกระแสของมอสเฟต

การกระตุ้นการหยุดนำกระแสของมอสเฟต เมื่อสัญญาณควบคุมเป็น 0 V ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q4 และไดโอดเปล่งแสงในตัวเชื่อมโยงทางแสงหยุดนำกระแส จะทำให้แรงดันที่จุด A มีค่าเป็น 0 V ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 ได้รับไบอัสกลับและไม่นำกระแส ในขณะที่เดียวกันทรานซิสเตอร์ Q3 ก็จะได้รับไบอัสตรงก็จะนำกระแสเนื่องจากแรงดันสะสมที่ขาเกิดของมอสเฟต Q1 จึงทำให้แรงดันที่จุด B จึงมีค่าเป็น 0 V จึงเป็นการดึงประจุออกจากขาเกิดของมอสเฟต ทำให้มอสเฟต หยุดนำกระแสทันทีทันใด การทำงานเป็นดังรูปที่ 3.34

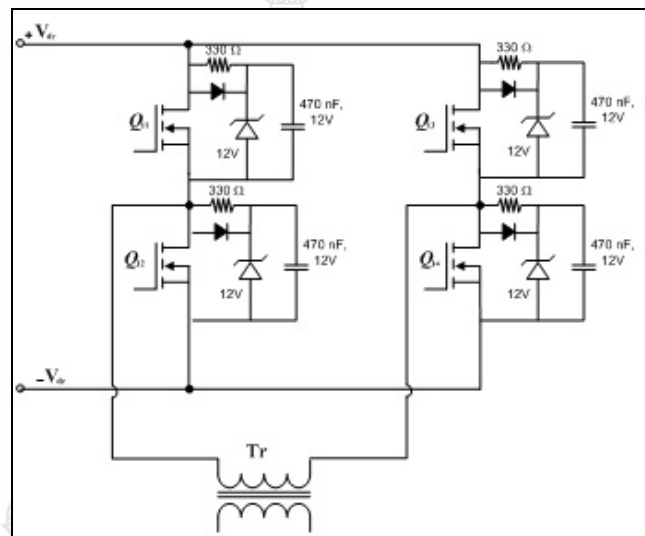


รูปที่ 3.34 การกระตุ้นการหยุดนำกระแสของมอสเฟต

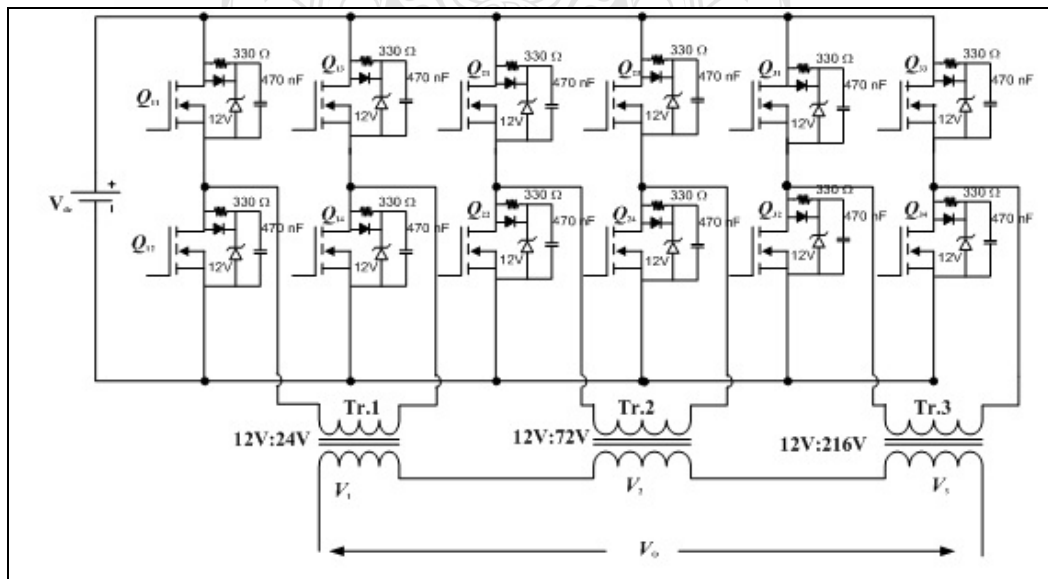
ในการศึกษาวิจัยนี้จะต้องใช้วงจรขับเคลื่อนจำนวน 6 ชุดเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์จำนวนที่ต่อกันแบบเอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จำนวน 3 สถานะ หรือจำนวน 6 คู่

3.9.4 การออกแบบวงจรกำลัง

สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ 27 ระดับที่นำเสนอ นั้น วงจรกำลังจะประกอบด้วยชุดเอช-บริดจ์ที่ต่ออยู่กับหม้อแปลงคาสเคดจำนวน 3 ชุด โดยในการออกแบบวงจรกำลังเครื่องต้นแบบ เพื่อป้องกันมอเตอร์ทำงานในสถานะไม่มีสัญญาณขับเคลื่อน และป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับมอเตอร์จึงต้องมีวงจรป้องกันหรือวงจรสแน็บเบอร์ โดยใช้วงจร RCD วงจรขับเคลื่อนสำหรับชุดฟูลบริดจ์ 1 ชุดจะแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.35 (ก) และเมื่อประกอบเป็นชุดสำหรับอินเวอร์เตอร์จะเป็นดังรูปที่ 3.35 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.35 (ก) และ (ข) วงจรกำลังคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ แบบ 3 สถานะ เครื่องต้นแบบ

3.9.5 การออกแบบหม้อแปลง

จากวงจรกำลังในรูปที่ 3.35 วงจรกำลังจะประกอบด้วยชุดเอช-บริดจ์ แต่ละชุดต่ออยู่กับหม้อแปลงโดยที่ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงต่อคาสเคดกันอยู่ โดยหม้อแปลงแต่ละตัวมีอัตราขยายที่ต่างกัน และการรับโหลดที่แตกต่างกัน ดังนั้น การหาอัตราส่วนของหม้อแปลงสามารถหาได้ดังนี้

$$Tr_1 = 1:3^{1-1} aV_{dc}$$

$$= 1: aV_{dc}$$

$$Tr_2 = 1:3^{2-1} aV_{dc}$$

$$= 1:3aV_{dc}$$

$$Tr_3 = 1:3^{3-1} aV_{dc}$$

$$= 1:9aV_{dc}$$

ดังนั้นในการออกแบบสัญญาณแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็น 12 Vdc และต้องการออกแบบแรงดันด้านออกเป็นกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ จะได้ อัตราการขยายหรือค่า a คือ

$$13aV_{dc} = 311 V_p$$

$$a V_{dc} = 311 V_p / 13 = 24$$

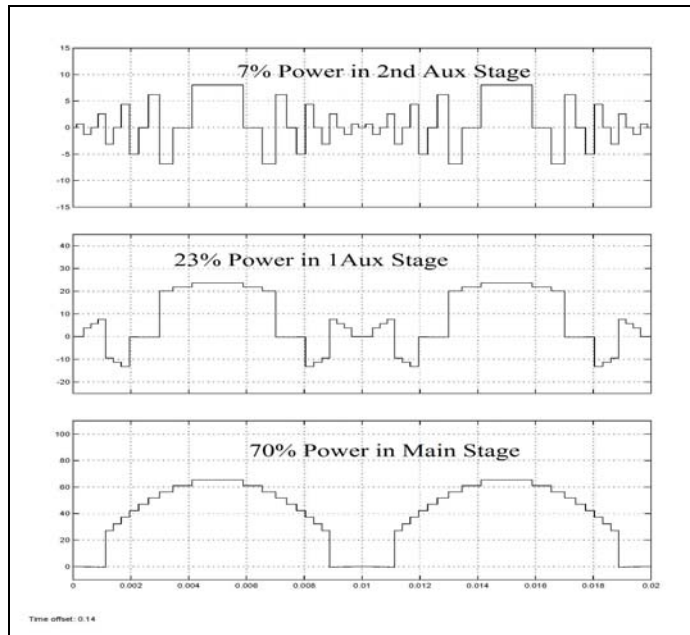
อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_1 คือ $1: aV_{dc} = 12V: 24V$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_2 คือ $1: 3aV_{dc} = 12V: 72V$

อัตราส่วนของหม้อแปลง Tr_3 คือ $1: 9aV_{dc} = 12V: 216V$

และจากสมการที่ (3.4) สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับสถานะหลัก หรือหม้อแปลง TR_3 มีกำลังไฟฟ้า 70 % ของกำลังไฟฟ้าทั้งหมด หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับสถานะช่วยตัวที่ 1 หรือหม้อแปลง TR_2 กำลังไฟฟ้า 23% และหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับสถานะช่วยตัวที่ 2 หรือหม้อแปลง TR_1 กำลังไฟฟ้า 7% ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงจะต้องออกแบบ TR_3 มีกำลังไฟฟ้า 70 % ของที่กำลังไฟฟ้าที่ต้องการ หรือเป็นสถานะหลัก ส่วนหม้อแปลงตัวอื่นมีขนาดเล็ก ทำหน้าที่ปรับปรุงรูปคลื่น

สำหรับการออกแบบ เพื่อตรวจสอบการทำงานนี้ได้ออกแบบการทำงานที่ 200 W ดังนั้นจึงออกแบบหม้อแปลง TR_1 ที่แรงดันไฟฟ้า 12V: 24V กำลังไฟฟ้า 15W ออกแบบหม้อแปลง TR_2 ที่แรงดันไฟฟ้า 12V: 72V กำลังไฟฟ้า 46 W และออกแบบหม้อแปลง TR_3 ที่แรงดันไฟฟ้า 12V: 216V กำลังไฟฟ้า 140 W ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์ในการวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออก และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเท่านั้น โดยจะทำการทดสอบกับโหลดความต้านทานที่ 1000 โอห์ม และ 2000 โอห์ม หรือกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 0.25 แอมแปร์เท่านั้น

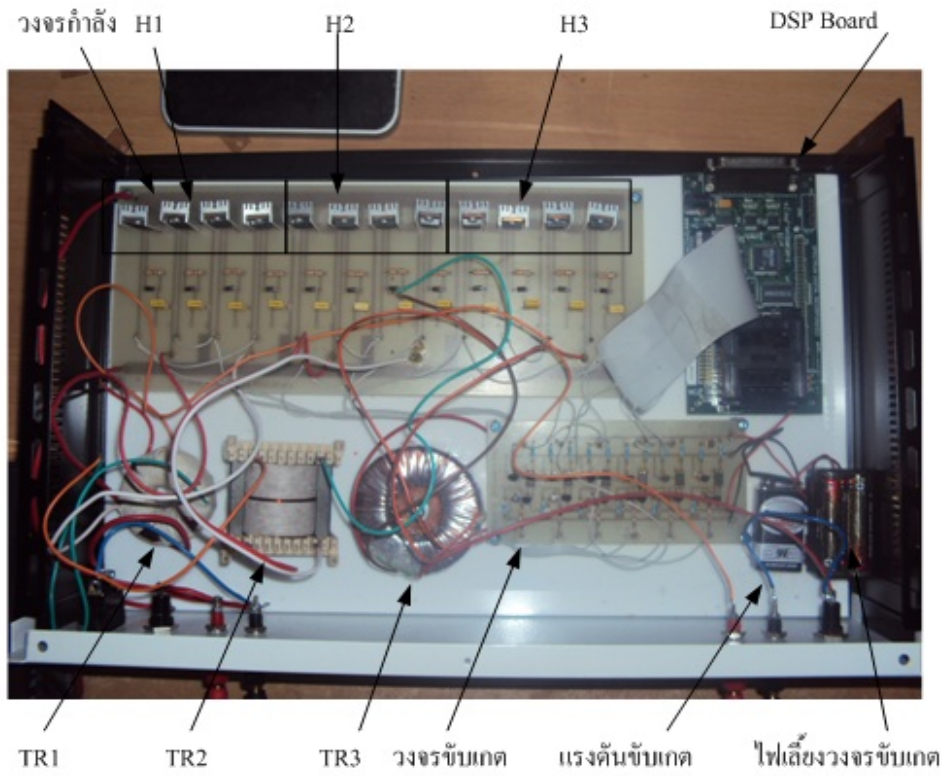


รูปที่ 3.36 กำลังไฟฟ้าจากการจำลองโดย MATLAB/Simulink

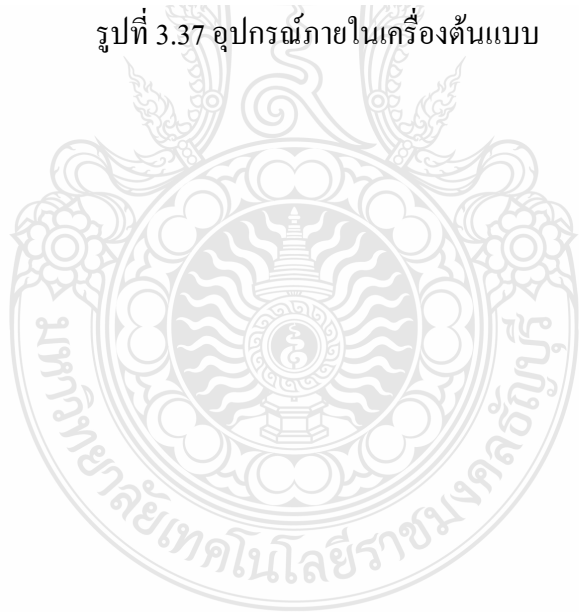
3.9.6 เครื่องต้นแบบ

การออกแบบเครื่องต้นแบบทำโดยการออกแบบวงจรขับเคลื่อน วงจรกำลัง และหม้อแปลงคาสเคด โดยการต่อ eZdspTMS320F2812 รับสัญญาณควบคุมที่ออกแบบโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink ไปขยายสัญญาณโดยวงจรขับเคลื่อน และส่งสัญญาณควบคุมที่เพิ่มแรงดันแล้วไปขับการทำงานของมอสเฟตในวงจรกำลัง

ในการออกแบบเครื่องต้นแบบเพื่อทดลอง จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเป็นแหล่งจ่ายให้กับคอนเวอร์เตอร์โดยใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด 12 โวลต์ 7.8 แอมแปร์ชั่วโมง โดยมีแรงดันจากแหล่งจ่ายขณะเปิดวงจร 13.5-13.8 โวลต์ มอสเฟตกำลังในวงจรกำลังใช้เบอร์ IRF3205 และใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรขับเคลื่อนจากแบตเตอรี่ชนิดก้อน อุปกรณ์ภายในเครื่องต้นแบบดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 อุปกรณ์ภายในเครื่องต้นแบบ



บทที่ 4

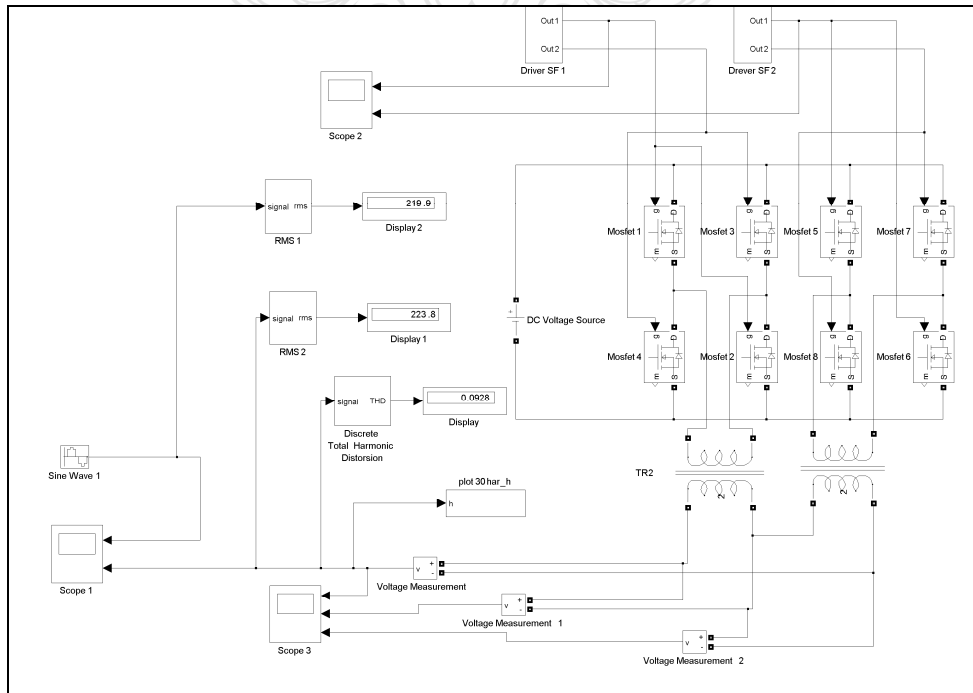
ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

จากการออกแบบคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ ที่ออกแบบรูปคลื่นด้านออกให้เป็นพีคดับเบิลยูเอ็มหลายระดับ และสัญญาณด้านออกเป็นคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 นั้น เพื่อทดสอบทฤษฎีและหลักการในการออกแบบดังกล่าวว่าเป็นไปตามทฤษฎีและการออกแบบเป็นไปตามที่เสนอหรือไม่ จึงได้ให้มีการทดสอบการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยเพื่อศึกษาวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink วิเคราะห์รูปคลื่นเพื่อต้องการรูปคลื่นแรงดันด้านออกที่ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของแรงดันไฟฟ้า (THD_v) ไม่เกิน 5% และสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตชิงได้มากที่สุด เพื่อศึกษาวิเคราะห์หารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด ในการสร้างเครื่องต้นแบบ และตรวจสอบเปรียบเทียบผลจากเครื่องต้นแบบกับการจำลองอีกครั้งหนึ่ง

4.2 การจำลองการทำงานคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบหลายสถานะ

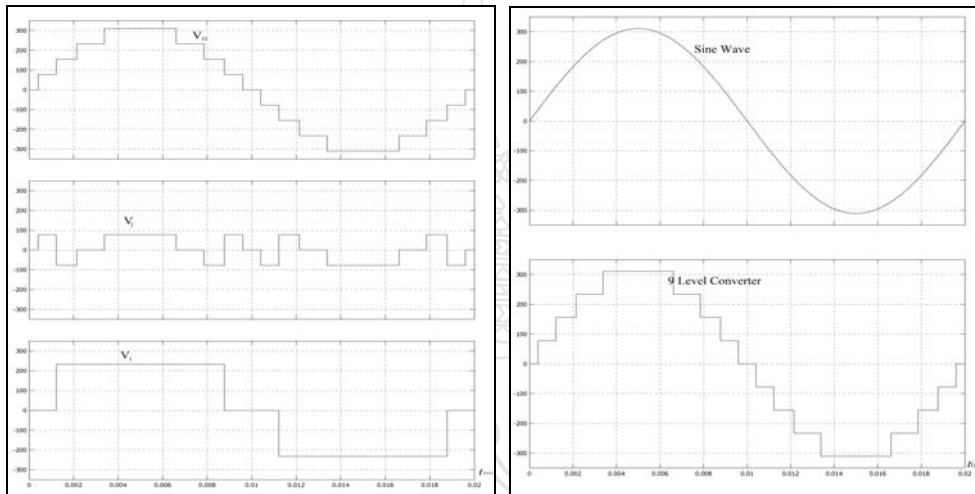
4.2.1 การจำลองการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ



รูปที่ 4.1 วงจรจำลองการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ

การออกแบบวงจรการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับจะออกแบบวงจรกำลังโดยประกอบด้วย ชุดเอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ต่ออยู่กับหม้อแปลงคาสเคด จำนวน 2 สถานะ โดยกำหนดให้ออกแบบที่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ อัตราส่วนของหม้อแปลงชุดที่ 1 เป็น 12V:77.75V หม้อแปลงชุด ที่ 2 เป็น 12V:233.25 V วงจรการจำลองออกแบบให้วัดค่าแรงดัน ค่า THD_V ดังรูปที่ 4.1

ผลการจำลองการทำงานอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับ จากการออกแบบวงจรควบคุมดังกล่าวจะได้ แรงดันไฟฟ้าด้านออกจากหม้อแปลง V_1 , V_2 และรวมกันเป็นแรงดัน V_o ดังรูปที่ 4.2 (ก) และรูปคลื่น เปรียบเทียบกับรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 4.2 (ข) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์วัดแรงดันด้านออกได้ 223.8 โวลต์

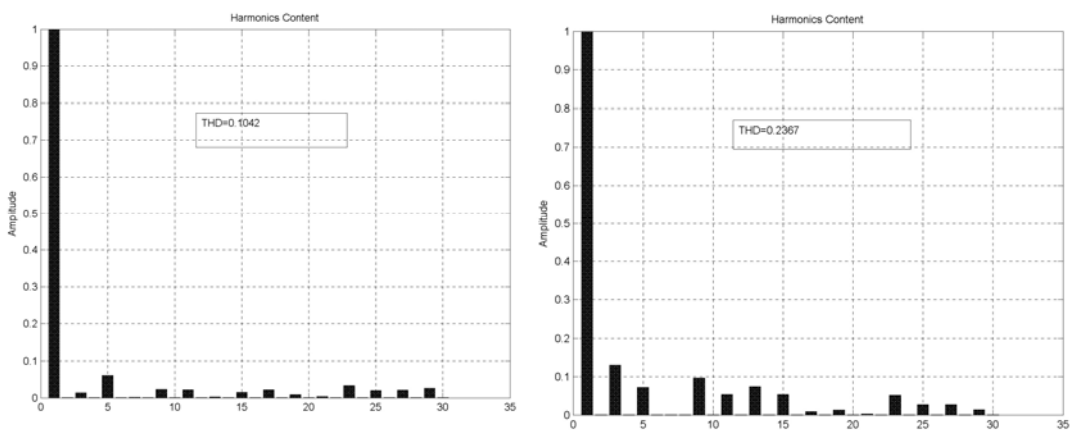


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันด้านออก (ก) ของคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ (ข) เทียบกับรูปคลื่นไซน์

และวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันขณะไม่มีโหลดเป็น 9.28% ดังรูปที่ 4.3 (ก) และ ขณะต่อกับโหลดความต้านทาน 1 กิโลโอห์มจะมีค่า 23.67% ดังรูปที่ 4.3 (ข)



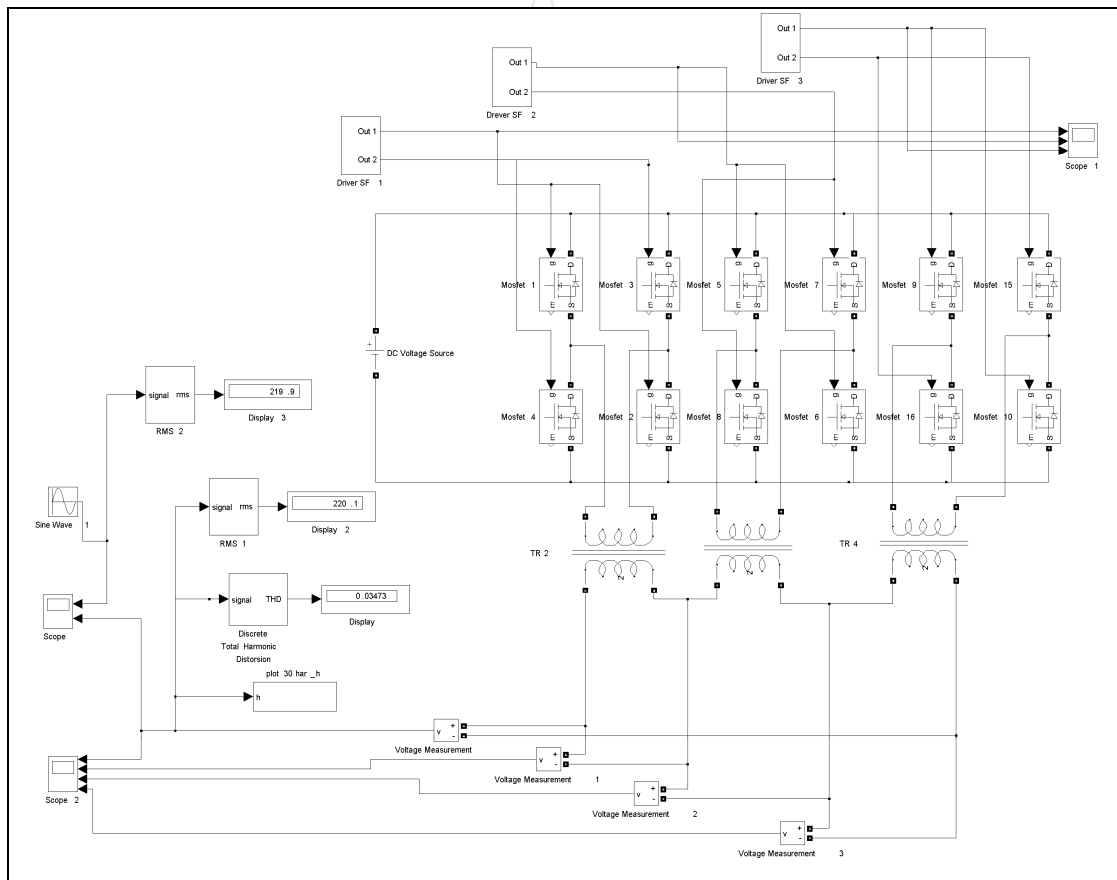
(ก)

(ข)

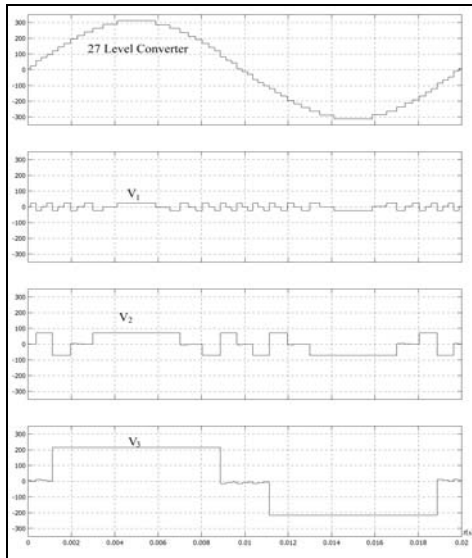
รูปที่ 4.3 THD_V ของคอนเวอร์เตอร์ 9 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม

4.2.2 การจำลองการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ

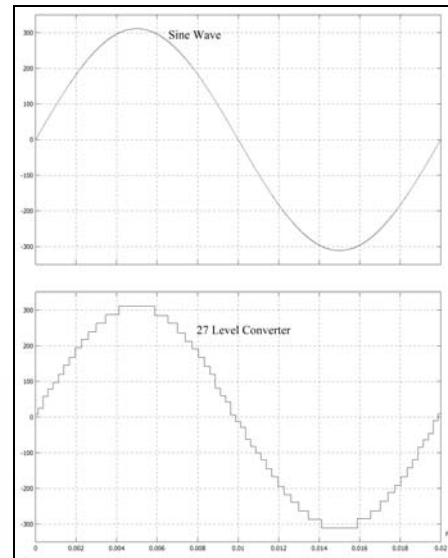
การออกแบบวงจรในการจำลองคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับนั้น การออกแบบดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 4.4 โดยมีสัญญาณควบคุม SF₁, SF₂ และ SF₃ ควบคุมชุดมอสเฟตแต่ละชุด จากสัญญาณควบคุมดังกล่าวมาขับมอสเฟตแต่ละชุดและเมื่อผ่านการเพิ่มแรงดันโดยหม้อแปลงคาสเคดจะได้สัญญาณด้านออกจากหม้อแปลงแต่ละตัวและรวมเป็นเป็น 27 ระดับ ดังรูปที่ 4.5 (ก) และรูปคลื่นเปรียบเทียบกับรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 4.5 (ข) ซึ่งจะเห็นว่ารูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากขึ้น



รูปที่ 4.4 วงจรจำลองการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ



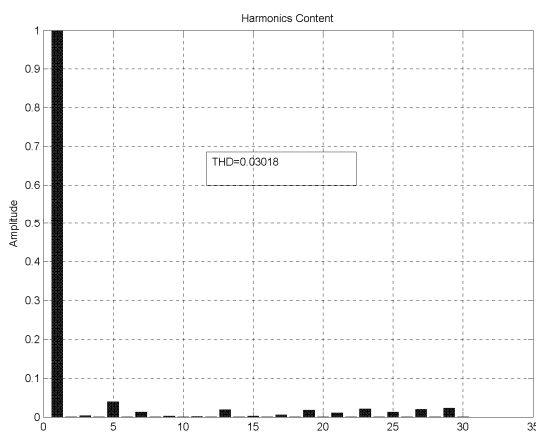
(ก)



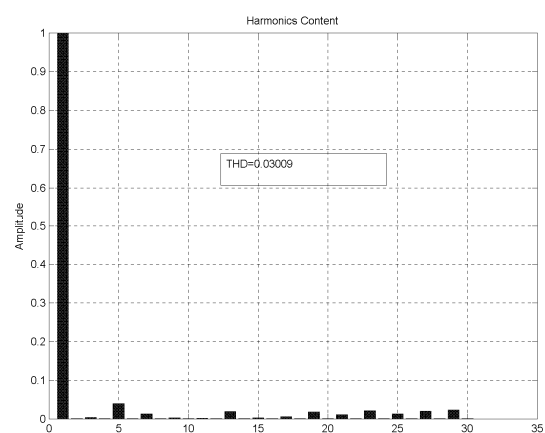
(ข)

รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันด้านออก (ก) ของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ (ข) เทียบกับรูปคลื่นไซน์

จะเห็นว่าสามารถใช้ชุดเอช-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ต่อกับหม้อแปลงคาสเคดเพียง 3 สถานะ หรือ 12 ตัวในการสร้างอินเวอร์เตอร์ 27 ระดับโดยใช้การขยายแรงดันและการบวกลบแรงดัน และสัญญาณที่ออกแบบมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากการออกแบบให้เปลี่ยนระดับที่ทำให้ค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับไซน์ตามที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ดังนั้น และจากการวัดค่าแรงดันรากเฉลี่ยกำลังสองได้ 220.1 โวลต์ ซึ่งค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับรูปไซน์ที่ต้องการมาก และจากการวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันได้ 3.44% ซึ่งได้น้อยกว่า 5% ตามที่ต้องการ และเมื่อเทียบกับโหลดความต้านทานที่ 1 กิโลโอห์ม และ 2 กิโลโอห์ม ก็จะวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันได้ 3.009% และ 3.005% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6



(ก)

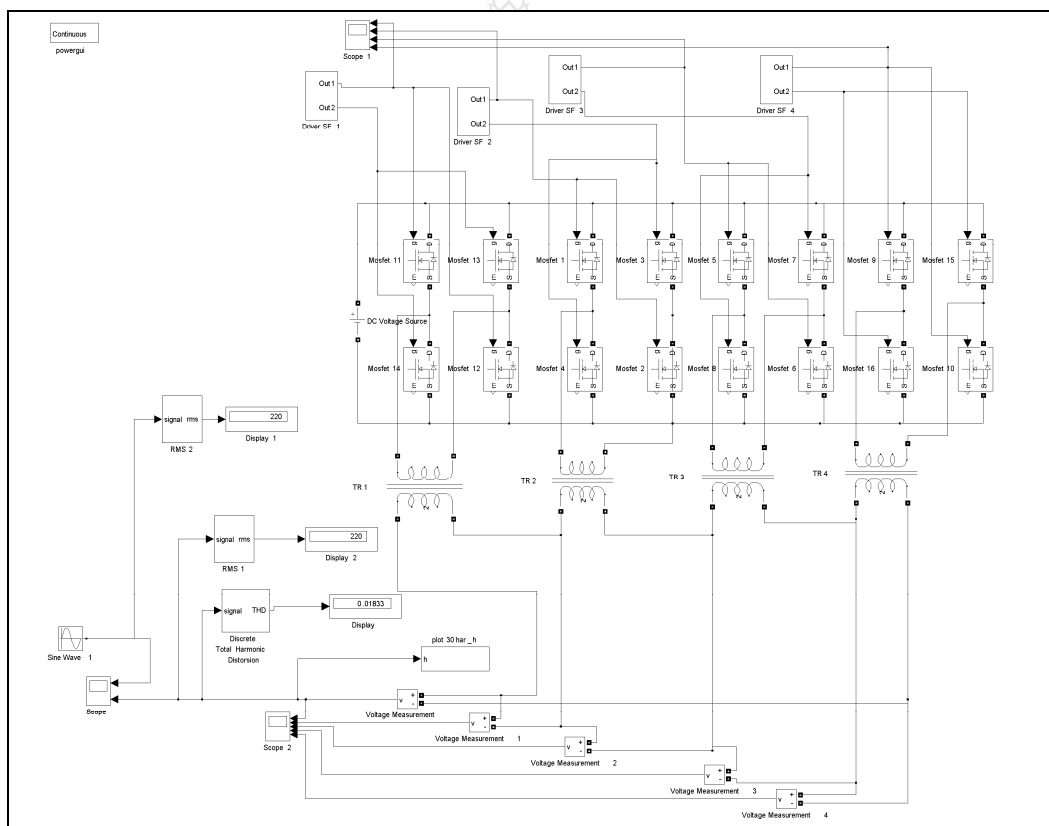


(ข)

รูปที่ 4.6 THD_v ของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม

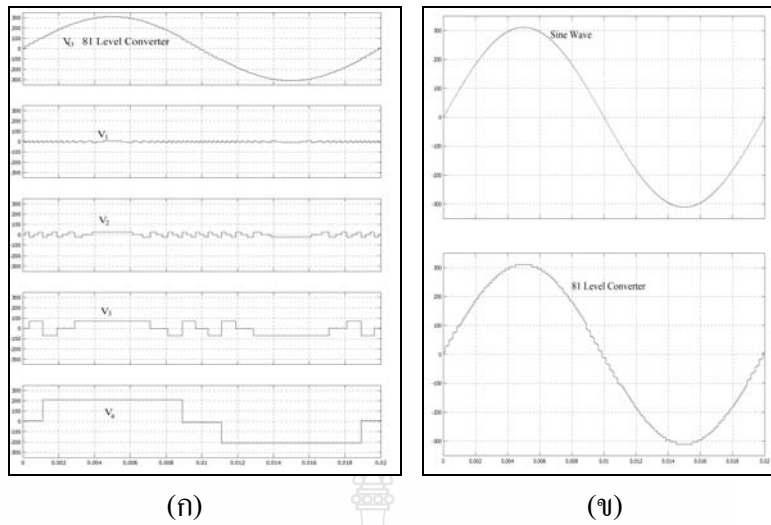
4.2.3 การจำลองการทำงานอินเวอร์เตอร์ 81 ระดับ

การจำลองคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ การออกแบบดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 คือวงจรกำลังจะประกอบด้วยชุดเอช-บริดจ์ที่ต่ออยู่กับหม้อแปลงคาสเคด 4 ชุด ในการจำลองนี้ใช้มอสเฟตจำนวน 16 ตัว และกำหนดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ อัตราส่วนหม้อแปลง Tr_1 คือ 12V:7.775V อัตราส่วนหม้อแปลง Tr_2 คือ 12V:24V อัตราส่วนหม้อแปลง Tr_3 คือ 12V:70V และอัตราส่วนหม้อแปลง Tr_4 คือ 12V:210V และต่ออุปกรณ์สำหรับวัดค่าต่างๆ เช่น V_{rms} , THD_V และออสซิลโลสโคป วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 4.7 โดยมีสัญญาณควบคุม SF_1 , SF_2 , SF_3 และ SF_4 ควบคุมชุดมอสเฟตแต่ละชุด ตามลำดับ

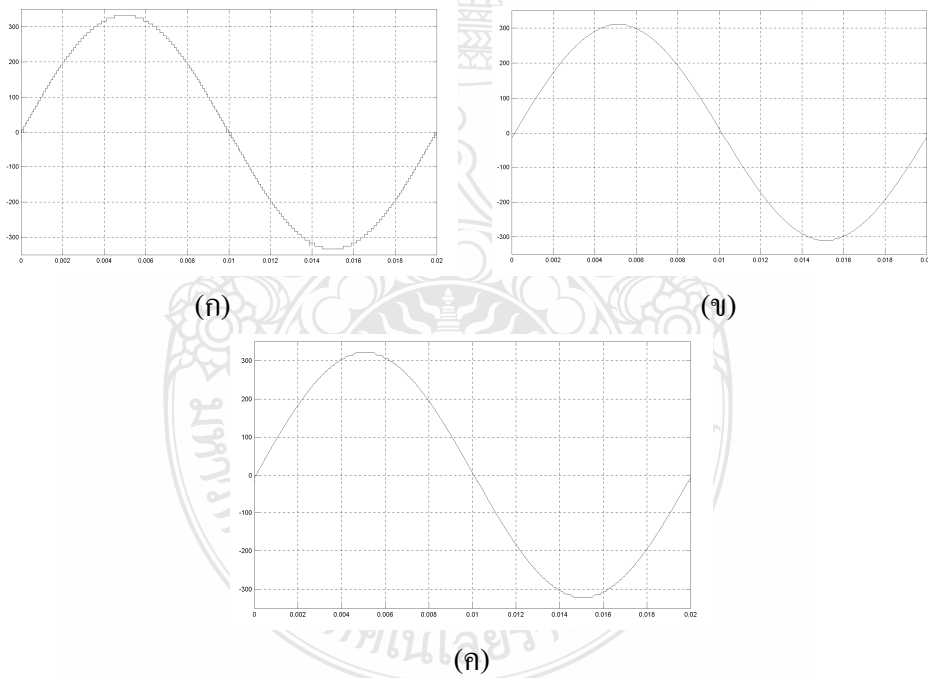


รูปที่ 4.7 วงจรจำลองการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ

จากสัญญาณควบคุมไปควบคุมการทำงานในการสวิตชิงของมอสเฟตแต่ละชุดและเมื่อผ่านหม้อแปลงคาสเคดจะแรงดันที่ออกจากหม้อแปลงแต่ละตัวและแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์จะเป็นดังรูปที่ 4.8 (ก) ซึ่งจะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของ 81 ระดับ มีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มาก และเมื่อวัดค่าแรงดันรากเฉลี่ยกำลังสองจะวัดค่าได้ 220 โวลต์ รูปคลื่นของอินเวอร์เตอร์ 81 ระดับเปรียบเทียบกับรูปคลื่นไซน์ เป็นดังรูปที่ 4.8 (ข) โดยรูปคลื่นแรงดันขณะไม่มีโหลด โหลดความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม และ 2 กิโลโอห์ม เป็นดังรูปที่ 4.9

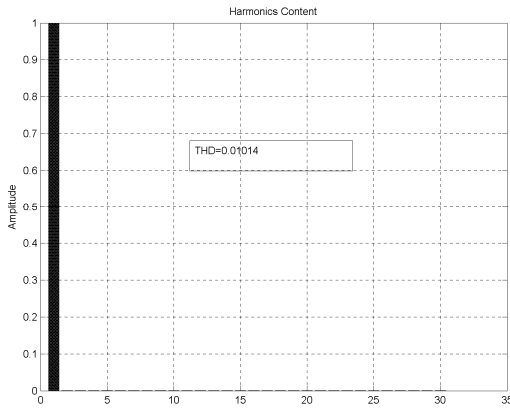


รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันด้านออก (ก) ของคอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ (ข) เทียบกับรูปคลื่นไซน์

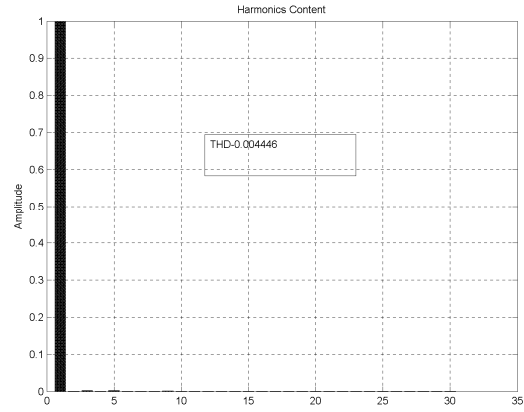


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ 81ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000โอห์ม
(ค) โหลด 2000 โอห์ม

โดยวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันด้านออกได้ขณะไม่มีโหลดได้ 1.014% และ
ขณะต่อกับโหลดความต้านทาน 1000 โอห์ม และ 2000 โอห์ม ได้ 0.4446% และ 0.3779% ตามลำดับ



(ก)



(ข)

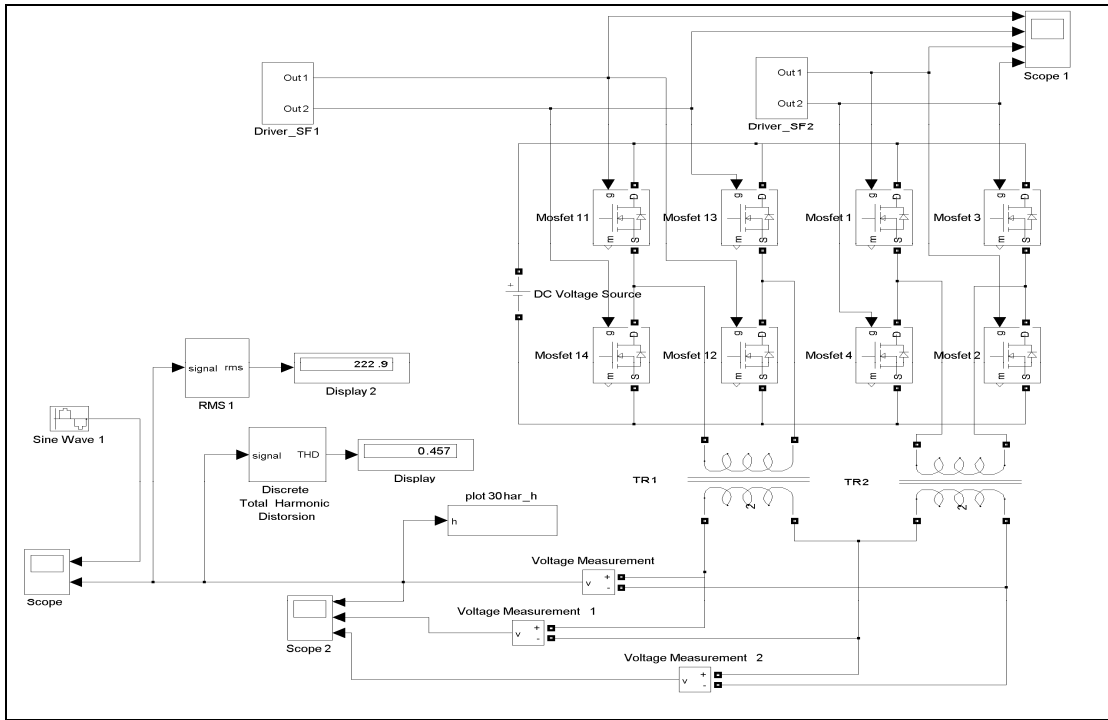
รูปที่ 4.10 THD_v คอนเวอร์เตอร์ 81 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลดความต้านทาน 1000โอห์ม

4.3 คอนเวอร์เตอร์แบบหลายสถานะ แรงดันด้านออกเป็นแบบพีคดับเบิลยูเอ็มหลายระดับ

4.3.1 วงจรการจำลองการทำงานพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

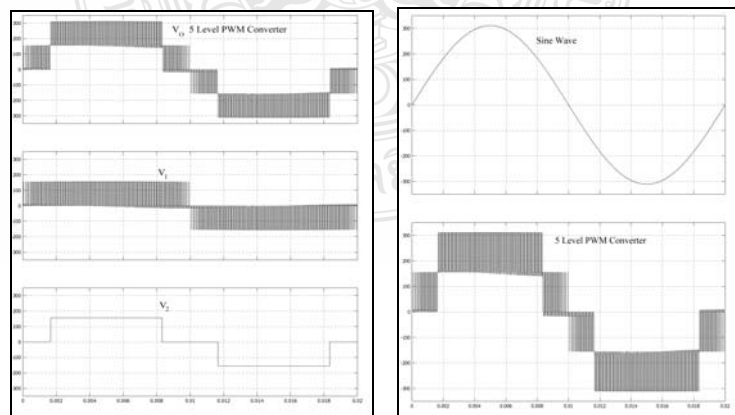
ในการจำลองการทำงานพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ จากการออกแบบที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink นั้น การจำลองโดยใช้อุปกรณ์สวิตชิงที่ควบคุมโดยแรงดัน ในที่นี้จะใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตชิง โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 12 โวลต์ และหม้อแปลงไฟฟ้า Tr₁ และ Tr₂ อัตราส่วน 12V: 155.56V ซึ่งได้ต่ออุปกรณ์เพื่อวัดค่ารูปคลื่นโดยออสซิลโลสโคป วัดค่าแรงดันเป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง และวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันรวม (THD_v) ดังรูปที่ 4.11

การควบคุมการสวิตชิงของมอสเฟตทำโดยใช้การสวิตชิงการทำงานตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยใช้ SF₁ และ SF₂ โดยกำหนดให้ SF₁ เป็นการมอดูเลชันแบบยูนิโพลาร์โดยใช้สัญญาณความถี่ในการสวิตชิงที่ 3000 Hz



รูปที่ 4.11 วงจรการจำลองวงจรกำลังพีคับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

จากสัญญาณควบคุมดังกล่าวได้ไปกระตุ้นหรือควบคุมการทำงานของมอสเฟต และหม้อแปลงไฟฟ้า Tr_1 และ Tr_2 ได้เพิ่มระดับแรงดันจาก $12 V_{dc}$ เป็น $155.5635 V$ ตามสวิตซ์ฟังก์ชันที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะได้สัญญาณออกจากหม้อแปลงทั้งสองชุด และสัญญาณรวมที่เป็นพีคับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ดังรูปที่ 4.12 (ก) และรูปคลื่นแรงดันพีคับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับเปรียบเทียบกับรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 4.12 (ข)

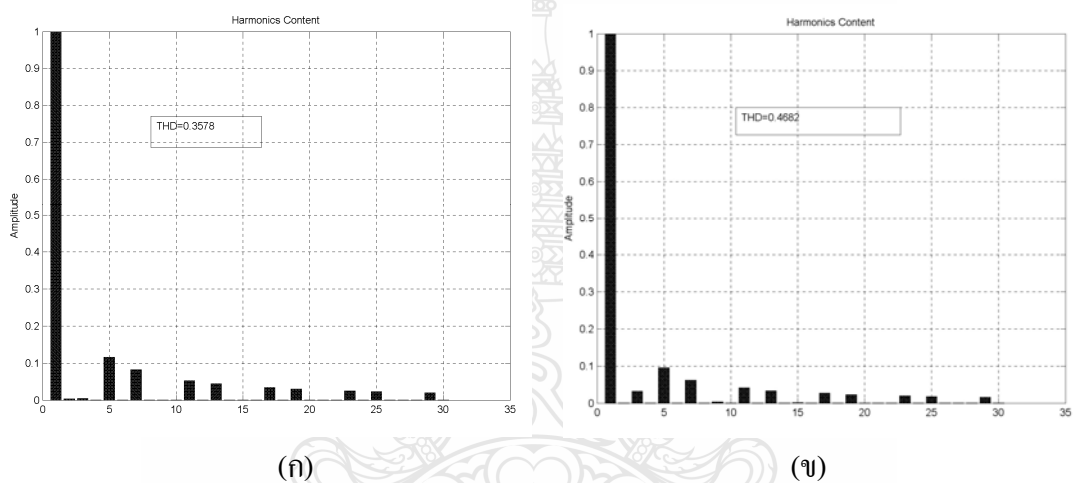


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.12 แรงดันด้านออก (ก) จากหม้อแปลงและพีคับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ (ข) เทียบกับรูปคลื่นไซน์

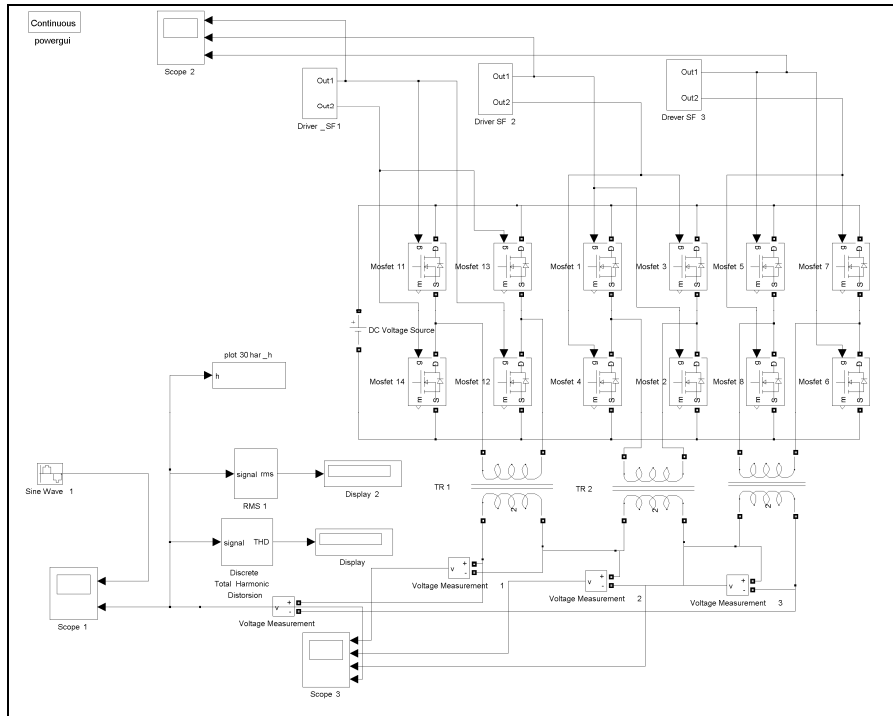
รูปคลื่นแรงดันด้านออกเปรียบเทียบกับรูปคลื่นไซน์ เป็นดังรูปที่ 4.12 โดยจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันและค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับไซน์โดยสามารถวัดค่าแรงดันรากเฉลี่ยกำลังสอง ได้ 222.9 โวลต์ และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันรวมวัดได้ 45.7% และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกเฉพาะ (Individual Harmonic distortion, IHD) ซึ่งยังสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดในการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า คือฮาร์มอนิกที่ 5, 7, 11 และ 13 วัดได้ 11.6%, 8.28% และ 5.28% 4.445% ซึ่งมาตรฐานกำหนดให้ฮาร์มอนิกลำดับที่ไม่เกิน 4% และลำดับคู่ไม่เกิน 2% ผลการวัดฮาร์มอนิกดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 THD_V ของ พัดใบเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 5 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม

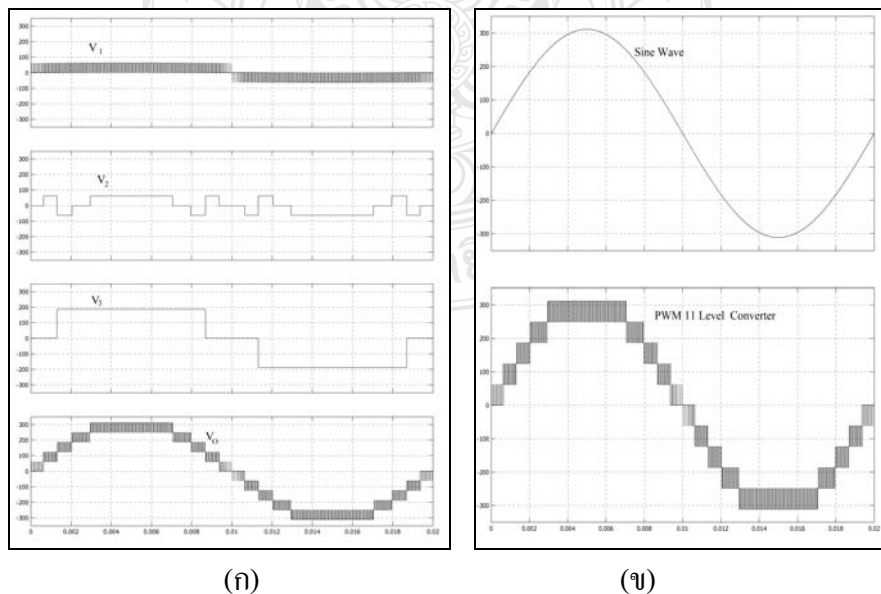
4.3.2 การจำลองการทำงานพัดใบเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ

ในการจำลองการทำงานพัดใบเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ จากการออกแบบที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 การจำลองโดยใช้อุปกรณ์สวิตซ์ที่ควบคุมโดยแรงดัน ในที่นี้จะใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งต่อเป็นซดเอช-บริดจ์ต่อกับหม้อแปลงคาสเตดจำนวน 3 ชุด โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 12 โวลต์ และหม้อแปลงไฟฟ้า Tr_1 และ Tr_2 อัตราส่วน 12V: 62.2 V และ Tr_3 อัตราส่วน 12V: 186.6 V ซึ่งได้ต่ออุปกรณ์เพื่อวัดค่ารูปคลื่นโดยออสซิลโลสโคป วัดค่าแรงดันเป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง และวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันรวม ดังรูปที่ 4.14



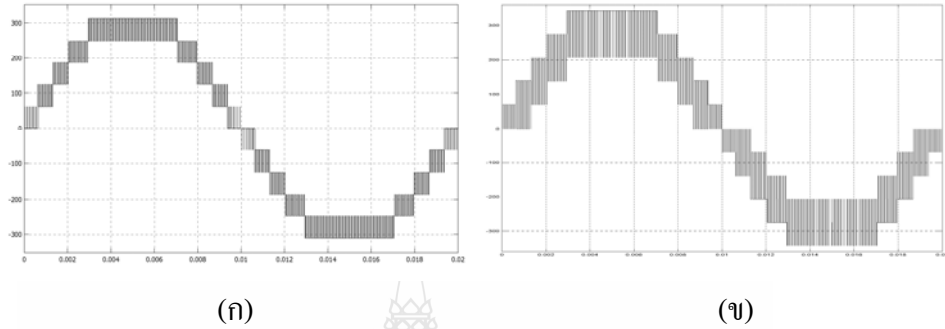
รูปที่ 4.14 วงจรจำลองการทำงานพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ

การควบคุมการสวิตชิงของมอสเฟตทำโดยใช้การสวิตชิงการทำงานตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 จากการออกแบบวงจรควบคุมดังกล่าวไปควบคุมการทำงานของมอสเฟต เมื่อเมื่อผ่านการเพิ่มแรงดันโดยหม้อแปลงจากการออกแบบตามที่กล่าวมาแล้ว จะได้รูปคลื่นที่ออกจากหม้อแปลงแต่ละตัว คือ Tr_1 , Tr_2 , Tr_3 และ แรงดันด้านออกรวมเป็นพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ ดังรูปที่ 4.15



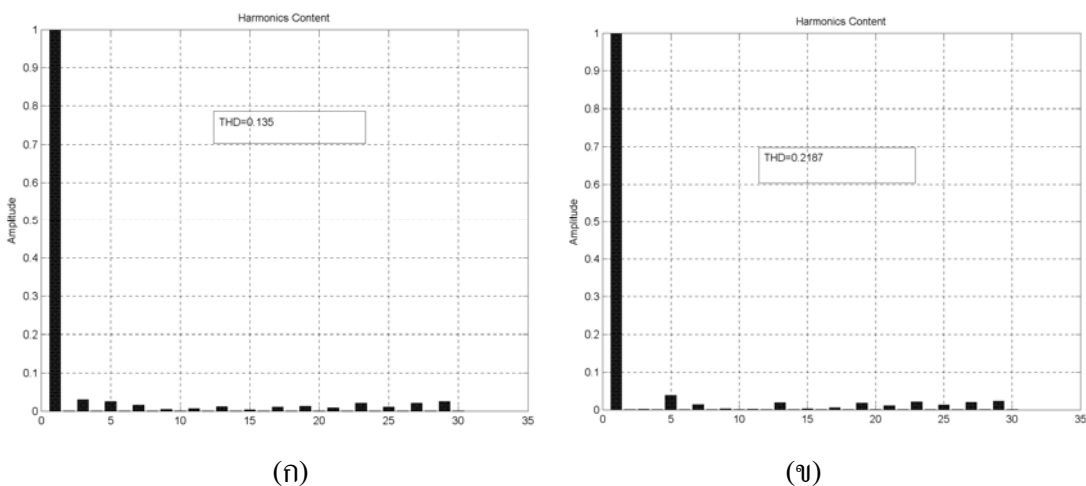
รูปที่ 4.15 (ก) แรงดันด้านออกพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ (ข) เปรียบเทียบกับรูปคลื่นไซน์

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าแรงดันด้านออกของฟีดแบ็คเบิ่ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับมีค่าและลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ โดยเป็นลักษณะของฟีดแบ็คเบิ่ลยูเอ็มต่อกันเป็นด้านบวก 5 ระดับ รูปคลื่นด้านลบ 5 ระดับ และรวมกับ 0 เป็น 11 ระดับ และสามารถวัดค่าแรงดันรากเฉลี่ยกำลังสองได้ 222.23 โวลต์ และแรงดันขณะต่อกับโหลดความต้านทานเป็นดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันด้านออกฟีดแบ็คเบิ่ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม

วัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันรวมได้ 17.14% และฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 คือ 5.13% ซึ่งยังสูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย และเมื่อต่อกับโหลดความต้านทาน 1000 โอห์ม และ 2000 โอห์ม วัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันรวมได้ 21.87% และ 21.86% ตามลำดับ หากต้องการใช้งานสามารถแก้ไขโดยการใช่วงจรกรองเพื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่เกินไปออกได้ ฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้เป็นดังรูปที่ 4.17

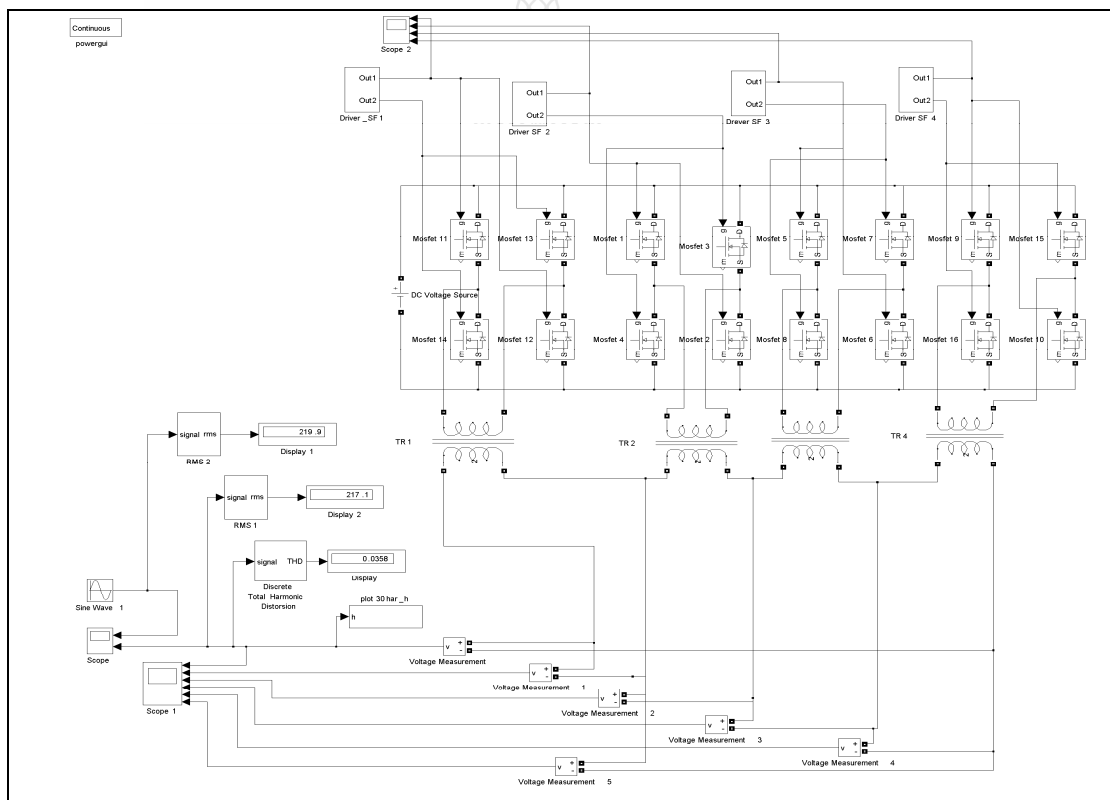


รูปที่ 4.17 THD_V แรงดันด้านออกฟีดแบ็คเบิ่ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 11 ระดับ (ก) ไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม

4.3.3 วงจรการจำลองการทำงานพัลส์วิดท์มอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 29 ระดับ

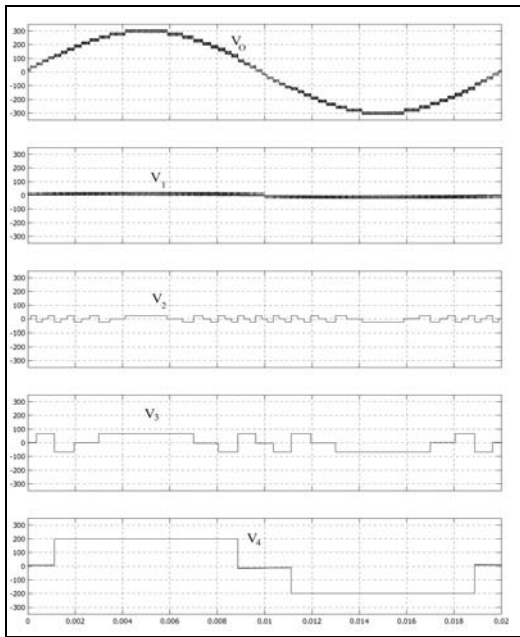
ในการจำลองการทำงานพัลส์เบิ่ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ จากการออกแบบที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 การจำลองในที่นี้จะใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งต่อเป็นชุดเอช-บริดจ์ต่อเข้ากับหม้อแปลงคาสเตดจำนวน 4 สถานะ โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 12 โวลต์ และหม้อแปลงไฟฟ้า Tr₁ และ Tr₂ อัตราส่วน 12V: 22.223V, Tr₃ อัตราส่วน 12V: 66.67V และ Tr₄ อัตราส่วน 12V: 200V ซึ่งได้ต่ออุปกรณ์เพื่อวัดค่ารูปคลื่น โดยใช้ออสซิลโลสโคป วัดค่าแรงดันเป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสองและวัดค่าฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 4.18

การออกแบบวงจรควบคุมจะเปรียบเทียบค่าแรงดันสถานะที่ 1 จะเป็นการมอดูเลชั่นแบบยูนิโพลาร์ ความถี่สวิตซ์ 3000 เฮิรตซ์

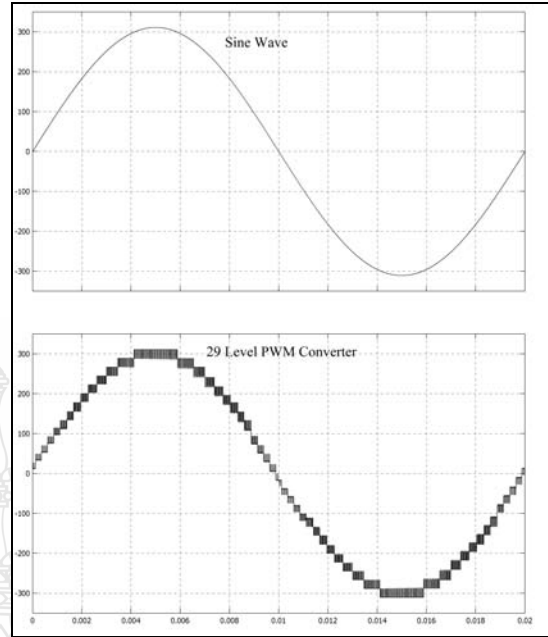


รูปที่ 4.18 วงจรจำลองการทำงานพัลส์เบิ่ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ

จากสัญญาณควบคุมมาควบคุมการทำงานของมอสเฟตแล้วเมื่อผ่านการเพิ่มแรงดันโดยหม้อแปลงคาสเตด สัญญาณด้านออกที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 4.19 คือแรงดันที่ออกจากหม้อแปลงชุดที่ 2, 3 และ 4 รวมกันเป็น 27 ระดับและเมื่อรวมกับพัลส์เบิ่ลยูเอ็มก็จะได้ 29 ระดับ ซึ่งจะได้รูปคลื่นแรงดันที่มีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มาก



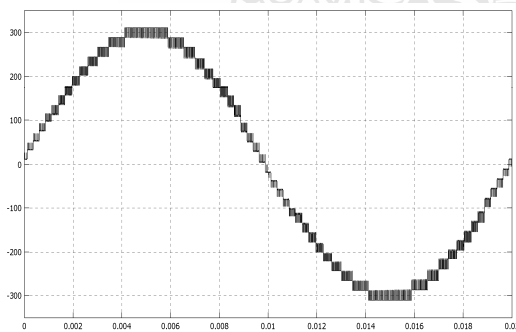
(ก)



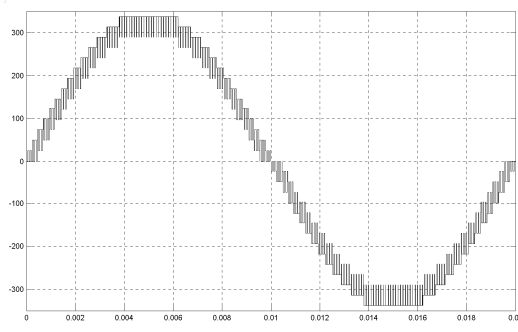
(ข)

รูปที่ 4.19 แรงดันด้านออก (ก) พีคัพเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ (ข) เทียบกับรูปคลื่นไซน์

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันด้านออกของพีคัพเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ มีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มาก โดยสามารถวัดค่าแรงดันรากเฉลี่ยกำลังสองได้ 217.1 โวลต์ โดยมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันรวม 3.58% ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน โดยไม่ต้องใช้วงจรกรอง

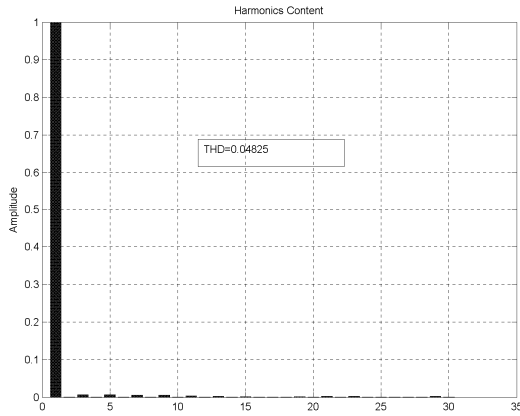


(ก)

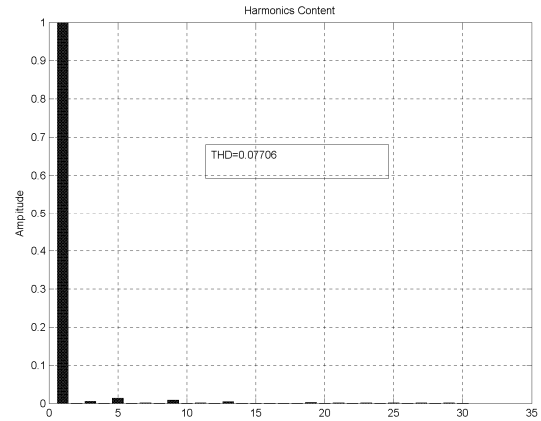


(ข)

รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันของพีคัพเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ (ก) ขณะไม่มีโหลด (ข) โหลด 1000 โอห์ม



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.21 THD_V ของพีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับ (ก) ขณะไม่มีโหลด
(ข) โหลด 1000 โอห์ม

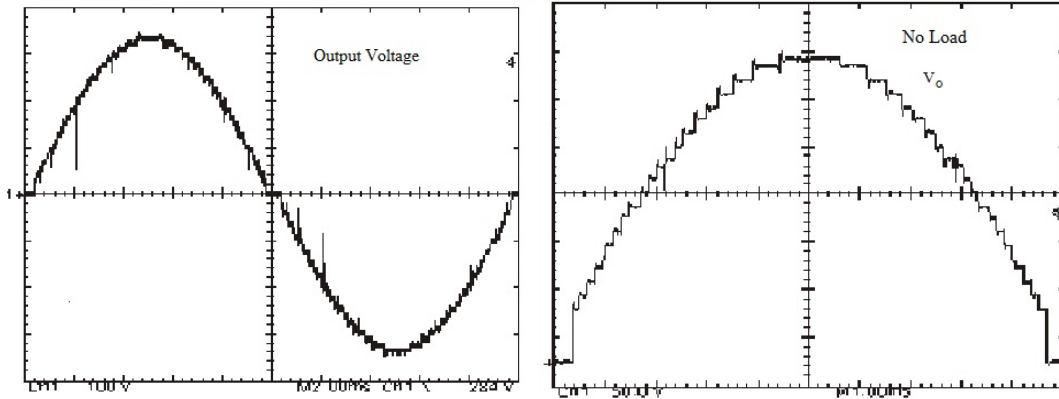
4.4 การทดลองเครื่องต้นแบบ

จากการออกแบบเครื่องต้นแบบ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 การทดลองทำโดยการสร้างสัญญาณควบคุมโดยโปรแกรมตามที่ได้กล่าวมาแล้ว และออกแบบสัญญาณควบคุมตามที่ต้องการแล้วส่งสัญญาณผ่านพอร์ตปรีนเตอร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ากับ eZdspTMS320F2812 โดยส่งผ่านทางโปรแกรม CCSstudio 3.1 โดยใช้แหล่งจ่ายจากแบตเตอรี่ชนิด Lead Acid Battery และใช้ โหลด ความต้านทานตัวละ 1,000 โอห์ม จำนวน 2 ตัว เพื่อทดสอบที่โหลด 1,000 โอห์ม และ 2,000 โอห์ม ตามที่กล่าวมาแล้ว การทดลองดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 การทดลองเครื่องต้นแบบ

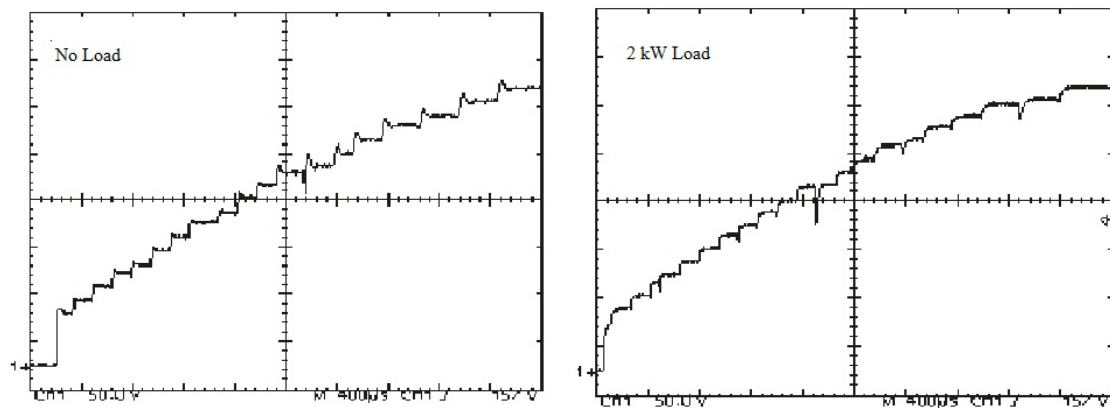
จากรูปสัญญาณแรงดันค้ำด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับขณะไม่ได้ต่อกับโหลดดังรูปที่ 4.23 (ก) จะเห็นว่าสัญญาณมีค่าใกล้เคียงไซน์มาก เมื่อขยายสัญญาณรูปคลื่นแรงดันเป็นครั้งคลื่นจะเป็นดังรูปที่ 4.23 (ข) โดยค่าความถี่สูงส่วนหนึ่งจะถูกกรองโดยค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง และวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกขณะที่ต่อโหลด 1,000 โอห์ม และ 2,000 โอห์ม จะได้ 3.42% และ 3.28% ซึ่งใกล้เคียงกับการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ จากเครื่องต้นแบบ (ก) เติมคลื่น (ข) ครั้งคลื่น



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับ (ก) ขณะไม่มีโหลด (ข) โหลด 2000 โอห์ม

บทที่ 5

การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 บทนำ

จากการออกแบบ การจำลองผลโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์หลายระดับและฟีดแบ็คเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอ สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันที่มีคุณภาพสูง การสร้างระดับแรงดันจำนวนมากโดยใช้หม้อแปลงคาสเคดซึ่งขดลวดทุกขดขมิต่อกันแบบอนุกรม

คอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวยังสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ได้จำนวนมาก จะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถสร้างจำนวนระดับแรงดันได้มากกว่าจากการใช้จำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ที่เท่ากัน เช่นฟีดแบ็คเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์จากคอนเวอร์เตอร์หลายระดับทั่วไปได้ 40 ตัว และ 11 ระดับสามารถลดได้ 28 ตัว ในขณะที่คอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอ 27 ระดับ สามารถลดอุปกรณ์สวิตซ์ได้ 40 ตัว และคอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอ 81 ระดับ สามารถลดได้ถึง 144 ตัว รายละเอียดดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอกับคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป

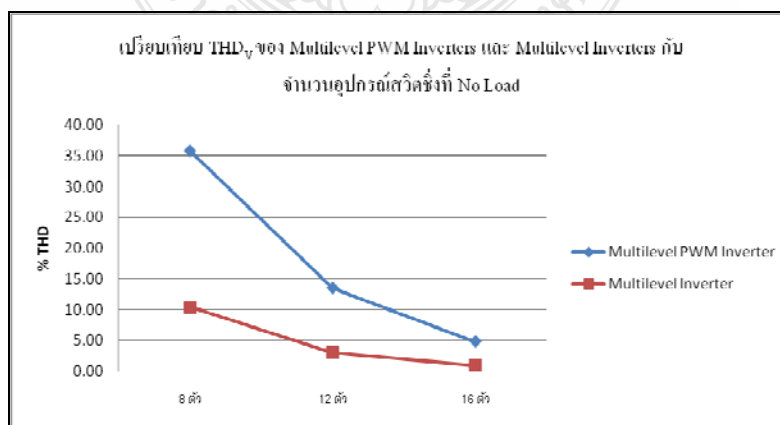
จำนวนระดับ	คอนเวอร์เตอร์ทั่วไป	ฟีดแบ็คเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอ	คอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอ
3 ระดับ	4	4	4
5 ระดับ	16	8	-
9 ระดับ	32	-	8
11 ระดับ	40	12	-
27 ระดับ	52	-	12
29 ระดับ	56	16	-
81 ระดับ	160	-	16

จากการจำลองโดยคอมพิวเตอร์จะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันใกล้เคียงไซน์มากกว่า และมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันรวม (THD_v) ต่ำฟีดแบ็คเบิ้ลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมน้อยกว่า

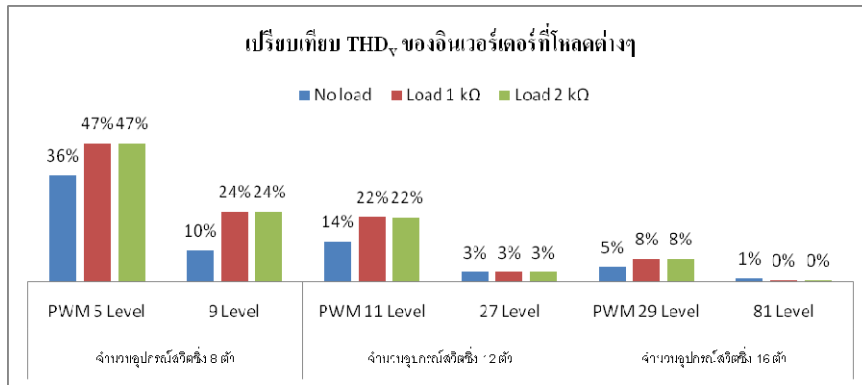
จากการสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ 27 ระดับ จะเห็นว่าจากการทดลองจะได้รูปคลื่นใกล้เคียงกับจากการจำลองโดยคอมพิวเตอร์ แต่จะมีสัญญาณที่ไม่เรียบบ้าง เนื่องจากการออกแบบงานจริงนั้นจะต้องมีการป้องกันการลัดวงจรในช่วงแคดโคม จึงต้องมีการปรับช่วงเวลา สัญญาณที่ได้จึงไม่เหมือนในอุดมคติ และจากการวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันรวมมีค่าน้อยกว่า 5% ตามที่ต้องการ แต่จะมีค่าสูงกว่าจากการจำลองโดยคอมพิวเตอร์เล็กน้อย เนื่องจากการออกแบบระดับแรงดันของหม้อแปลง และการปรับช่วงเวลาแคดโคม รายละเอียดดังตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันรวมระหว่างอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป

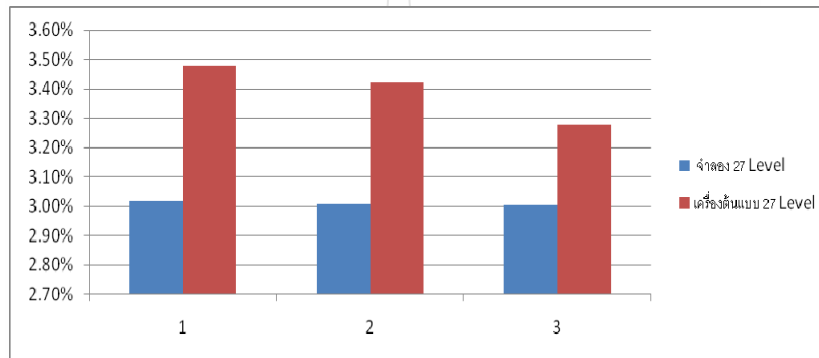
จำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ชิ่ง (ตัว)	อินเวอร์เตอร์ชนิด	ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันรวม		
		ไม่มีโหลด	โหลด 1000 โอม	โหลด 2000 โอม
8	PWM 5 Level	35.78%	46.82%	46.82%
	9 Level	10.42%	23.67%	23.73%
12	PWM 11 Level	13.50%	21.87%	21.86%
	27 Level	3.018%	3.009%	3.005%
	เครื่องต้นแบบ 27 Level	3.48%	3.42%	3.28%
16	PWM 29 Level	4.825%	7.706%	7.680%
	81 Level	1.014%	0.4446%	0.3779%



รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบ THD_v ของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอกับจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ชิ่ง



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบ THD_v ของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอกับจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ที่โหลดต่างๆ



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบ THD_v ของคอนเวอร์เตอร์จากการจำลองและเครื่องต้นแบบที่ 27 ระดับ

5.2 สรุปผล

จากการออกแบบและจำลองการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink จะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์หลายระดับและพีดีบีเอ็มคอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำเสนอสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีคุณภาพสูง โดยสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ได้จำนวนมาก โดยคอนเวอร์เตอร์หลายระดับจะสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันใกล้เคียงไซน์มากกว่า และมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันรวมต่ำกว่าพีดีบีเอ็มคอนเวอร์เตอร์หลายระดับ และอินเวอร์เตอร์ 27 ระดับจะมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมน้อยกว่าพีดีบีเอ็มคอนเวอร์เตอร์ 29 ระดับโดยใช้อุปกรณ์สวิตซ์น้อยกว่า 4 ตัว และเป็นไปตามมาตรฐานซึ่งส่วนมากจะกำหนดให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมไม่เกิน 5% และการใช้หม้อแปลงคาสเคดยังสามารถแยกส่วนที่เป็นอุปกรณ์สวิตซ์และด้านแรงดันต่ำออกจากส่วนที่เป็นแรงดันสูงและช่วยในการกรองความถี่สูงได้ด้วย และจากประโยชน์ดังกล่าวคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวโดยเฉพาะคอนเวอร์เตอร์ 27 ระดับเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานจริงแทนการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบเก่าที่มีระดับน้อยจะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมสูง และคอนเวอร์เตอร์ชนิดรูปคลื่นไซน์ที่สร้างโดยการสวิตซ์ที่ความถี่สูงมีปัญหาทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า และการใช้วงจร

จากการพิสูจน์การทำงานจริงโดยการสร้างเครื่องต้นแบบที่ 27 ระดับ โดยแปลงไฟฟ้า
กระแสตรงเป็นกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ โดยการสร้างสัญญาณควบคุมโดยโปรแกรม
MATLAB/Simulink และแปลงสัญญาณผ่านอินเตอร์เฟซไปควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
eZdspTMS320F2812 จะเห็นว่าสามารถที่จะนำอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- [1] เสียงยม จันทรจำรัส, วันชัย ทรัพย์สิงห์ “การออกแบบพัลส์วิดท์โมดูเลตอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับการต่อเชื่อมระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบส่งจ่ายไฟฟ้า” การประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาศาสน์เทคโนโลยีลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 28 สิงหาคม 2551.
- [2] Leon M. Tolbert, Fang Z. Peng, “Multilevel Converters as Utility Interface for Renewable Energy Systems” The University of Tennessee, USA, 18th May 1988.
- [3] Leon M. Tolbert, Burak Ozpineci, “Optimum Fuel Cell Utility with Multilevel Inverters” 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [4] Timothy C. Neugebauer, David J. Perreault, Jeffrey H. Lang and Carol Livermore, “A Six-Phase Multilevel Inverter for MEMS Electrostatic Induction Micromotors”, IEEE Transactions on Circuit and Systems-II: Express Briefs, Vol. 51, No.2, February 2004
- [5] Li Li, Dariusz Czarkowski, Yaguang Lui, Pragasen Pillay, “Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM Technique in Series-Connected Voltage Inverters” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No.1, January/February 2000
- [6] J.S.Lai and F.Z. Peng, “Multilevel Converters – A new breed of power converter”, Conference Record of the IEEE-IAS Annual Meeting, 1995, pp. 2348-2356.
- [7] Rodriguez, J. S. Lai and F.Z. Peng, “Multilevel Inverters: A Survey of Technologies, Controls, and Applications”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.49, No.4, August 2002, pp. 724-737.
- [8] M. Manjrekar and G. Venkataramanan, “Advanced topologies and modulation strategies for multilevel”, Conference Record of the IEEE-PESC, 1996, pp. 1013-1018.
- [9] IEEE Std 929-2000 “IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems” IEEE Std, New York, USA, 30th January 2000.
- [10] IEEE Std 519-1992 “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems” IEEE Std, New York, USA, 12th April 1993.
- [11] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า “ข้อกำหนดคกฏเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม” คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า กรุงเทพมหานคร, 1998.

- [12] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม “ระเบียบการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายว่าด้วยการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายสำหรับปริมาณพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 1 เมกกะวัตต์”, การไฟฟ้านครหลวง/การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กรุงเทพมหานคร, พฤษภาคม 2545.
- [13] In-Dong Kim, Eui-Cheol Nho, “A Generalized Undeland Snubber for Flying Capacitor Multilevel Inverters and Converter” IEEE Transaction on Industrial Electronics” Vol.51, No.6, December 2004.
- [14] A. Tahri and A. Draou, “A Comparative Modeling Study of PWM Control Techniques for Multilevel Cascade Inverters” Leonado Journal of Science, Issue 6, January-June 2005
- [15] B. P. McGrath and D.G. Holmes, “A Comparison of Multicarrier PWM Strategies of Cascaded and Neutral Point Clamp Multilevel Inverters”, Conference Record of the IEEE-IAS Annual Meeting, 2000.
- [16] A. K. S Bhat and S. B. Dewan, “A Novel utility interfaced high-frequency link photovoltaic power conditioning system”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.35, pp.153-159, February 1988.
- [17] P. T. Krein, R. S. Balog and X. Geng, “High-frequency Link Inverter for Fuel Cells Based on Multiple-Carrier PWM”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.19, No.5, September 2004.
- [18] E. Hiraki et al, “Zero-Voltage and Zero-Current Soft-Switching PWM Inverter with a Single ARDCL Cell”, IEEE 36th Annual Power Electronics Specialists Conference-PESC05, Recife-Brazil, pp. 798-803, June 2005.
- [19] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, and T. G. Habetler, “Multilevel Converters for Large Electric Drives”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 1, pp. 36-44, January/February 1999.
- [20] R. Teodorescu and J. K. Pedersen, “Multilevel Inverters by Cascading Industrial VSI”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 4, pp. 832-838, August 2002.
- [21] F. Z. Peng, “A Generalized Multilevel Inverters Topology with Self Voltage Balancing”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 2, pp. 611-618, March-April 2001.
- [22] K. A. Corzine and J. R. Baker, “Multilevel Voltage-Source Duty-Cycle Modulation: Analysis and Implementation”, IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 49, No. 4, pp. 832-838, August 2002.
- [23] Sergio Daher, “Analysis, design and implementation of a high efficiency multilevel converter for renewable energy”, Doctor Thesis, University of Kassel, Kassel, Germany, 2006

- [24] P. Bhagwat and V.R. Stefanovic, "Generalized Structure of Multilevel PWM Inverters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 1A-19, No. 6, pp. 1057-1069, November/December 1983.
- [25] S. Daher, R. S. The and F. Antunes, "Multilevel Current Source Inverters – The Switching Control Strategy for High Power Application", Conference of IEEE Industrial Electronics Socociety-IECON96, Taipei-Taiwan, 1996.
- [26] Juan W. Dixon, Felip Rios and Alberter Breton, "Multi-Stage Converters: A New Technology for Traction Drives Systems", 20th Electric Vehicle Symposium, Long Beach, California, USA, November 2003.
- [27] L. M. Tolbert and F. Z. Peng, "Multilevel Converters for Large Electric Drives", Conference Proceeding of 13th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC'98, Vol. 2, pp. 530-536, 1998.
- [28] D. E. Soto-Sanchez and T. C. Green, "Voltage Balance and Control in a Multilevel Unified Power Controller", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 732-738, October 2001.
- [29] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, and T. G. Habetler, "Multilevel Converters-based universal power conditioner", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 2, pp. 596-603, March-April 2000.
- [30] F. Z. Peng, "A Generalized Multilevel Inverters Topology with Self Voltage Balancing", Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference 2000, Vol. 3, No. 2, pp. 2024-2031, 2000.
- [31] M. D. Manjrekar, K. P. Steimer and T. A. Lipo, "A Hybrid Multilevel Power Conversion System: a competitive solution for high-power solution for high-power applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 3, pp. 834-841, March-April 2000.
- [32] T. A. Maynard, H. Foch, P. Thomas, J. Courault, R. Jakob, and M. Nahrsteadt, "Multilevel Converters: Basic Concept and Industry Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 5, pp. 955-964, October 2002.
- [33] Leon M. Tolbert, Fang Z. Peng, "Multilevel Converters as Utility Interface for Renewable Energy Systems", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, No. 5, pp. 1271-1274, 2002.
- [34] Leon M. Tolbert, Burak Ozpineci "Optimum Fuel Cell Utility with Multilevel Inverters" 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.

- [35] Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, Zhong Du “Optimum Fuel Cell Utilization with Multilevel Inverters” 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004
- [36] S. Chandhaket, Y. Konishi, K. Ogura, E. Hiraki, M. Nakaoka “A Sinusoidal Pulse Width Modulated Inverter Using Three-Winding High-Frequency Flyback Transformer for PV Power Conditioner” Yamakuchi University, Yamaguchi, Japan, 2003
- [37] Feel-Soon Kang, Sung-Jun Park, Su Eog Cho, Cheul-K Kim, Toshifumi Ise “Multilevel PWM Inverters Suitable for the Use of Stand-Alone Photovoltaic Power System”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No.4, December 2005
- [38] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, “A New Neutral-Point Clamped PWM Inverter”, Proceeding of the Industry Applications Society Conference, pp. 171-176, September/October 1980.
- [39] N. S. Choi et al., “A General Circuit Topology of Multilevel Inverter”, Proceeding of the IEEE PESC’91 Conference, Cambridge, MA, pp. 96-103, 1991.
- [40] S. M. Tencony, M. Carpita, C. Bacigalupo and R. Cali, “Multilevel Voltage Source Converters for Medium Voltage Adjustable Speed Drives”, Proceeding of the IEEE International Symposium of Industrial Electronics, ISIE’95 Conference, Vol. 1, pp. 91-98, 1991.
- [41] T. Biskup, C. Buhner, B. Grzesik, J. Krijgsman, J. Michalak, S. Pasko and M. Zygmowski “Multilevel Converter for Power Conditioning System with SMES” Przegląd Elektrotechniczny, pp. 609-614, June 2004.
- [42] J. Hung and K. A. Corzine, “Extended Operation of Flying Capacitor Multilevel Inverters”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.21, No.1, January 2006.
- [43] S. Sirisukprasert, "Optimized Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Inverter", Master Dissertation - Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg - Virginia, September, 1999.
- [44] Nikola Celanovic, “Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters”, Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg - Virginia, September 20, 2000.
- [45] S. Mariethoz and A. Rufer, “Design and control of asymmetrical multi-level inverters”, International Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation - IECON’2002, 5-8 November, Sevilla, Spain.

- [46] C. Rech, H. A. Gründling, H. L. Hey, H. Pinheiro and J. R. Pinheiro, “Uma Metodologia de Projeto Generalizada para Inversores Multiníveis Híbridos”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, Brazil, pp. 763-769, September, 2002.
- [47] S. Mariethoz, A. Rufer, Design and control of asymmetrical multi-level inverters, IECON 2002 : The 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 5-8 November, Sevilla, Spain.
- [48] S. Mariethoz and A. Rufer, “New configurations for the three phase asymmetrical multilevel inverter,” IEEE 39th IAS Annual Meeting Conference Record, vol. 2, pp. 828-835, 2004.
- [49] M. Calais, V. G. Agelidis and M. S. Dymond, “A Cascaded Inverter for Transformerless Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems”, Renewable Energy, No.22, pp. 255-262, 2001.
- [50] A. Rufer, M. Veenstra and K. Gopakumar, “Asymmetric Multilevel Converter for High Resolution Voltage Phasor Generation“, European Conference on Power Electronics and Applications - EPE 99, 7-9 September, Lausanne, Switzerland.
- [51] N. P. Schibli, T. Nguyen and A. C. Rufer, “A three-phase multilevel converter for high-power induction motors”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, No. 5, pp. 978-986, September 1998.
- [52] H. Ertl, J. W. Kolar and F. C. Zach, “A Novel Multicell DC-AC Converter for Applications in Renewable Energy Systems”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 5, October 2002.
- [53] เสถียร จันทิมาจารย์, วันชัย ทรัพย์สิงห์ “การออกแบบและวิเคราะห์อินเวอร์เตอร์หลายระดับ และพัลส์วิดท์มอดูเลตอินเวอร์เตอร์หลายระดับ” การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32, ปราณบุรี, 28-30 ตุลาคม 2552.
- [54] Institut für Rationelle Energiewandlung - IEE, "Photovoltaic Systems Technology", Script, Universität Kassel, Kassel - Germany, 2003.
- [55] C. Rech, H. A. Gründling, H. L. Hey, H. Pinheiro and J. R. Pinheiro, “Uma Metodologia de Projeto Generalizada para Inversores Multiníveis Híbridos”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, Brazil, pp. 763-769, September, 2002.
- [56] Fraunhofer - Institut Solare Energiesysteme - ISE, "Compendium of Projects on Rural Electrification and Off-Grid Power Supply", www.ise.fhg.de / www.off-grid.de, Freiburg - Germany, 2001.

- [57] M. Glinka, "Prototype of multiphase modular-multilevel-converter with 2 MW power rating and 17-level-output-voltage", Power Electronics Specialists Conference - PESC 04, Vol.4, pp. 2572-2576, Aachen - Germany, 2004.
- [58] M. Glinka and R. Marquardt, "A new AC/AC multilevel converter family", IEEE Transactions on Industrial Electronics, , Volume: 52, Issue: 3, pp. 662- 669, June 2005.
- [59] T.A. Lipo and D. M. Manjrekar, "Hybrid Topology for Multilevel Power Conversion", World Intellectual Property Organization, No. WO 99/41828, August 19, 1999.



ภาคผนวก ก

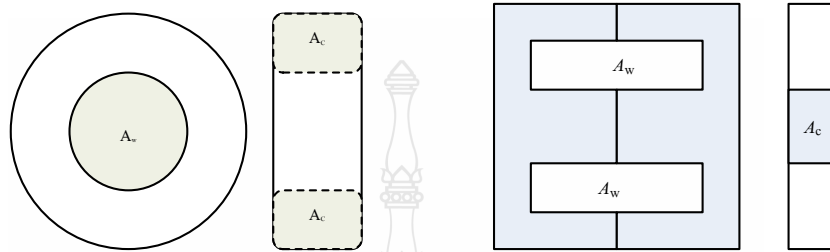
การออกแบบหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง



ก.1 การออกแบบหม้อแปลงโดยความถี่สูงโดยวิธีผลคูณพื้นที่

การออกแบบหม้อแปลงในการวิจัยนี้ใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะทำให้มีกระแสไหลวนต่ำที่ความถี่สูง วิธีการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณพื้นที่ (Area Product) ซึ่งนิยามสมการดังนี้

$$A_p = \text{area product} = \text{Core cross section } (A_c) \times \text{Window area } (A_w) \quad (\text{ก.1})$$



รูปที่ 5.18 แกนแม่เหล็กหม้อแปลงความถี่สูง

สามารถหาจำนวนรอบของขดลวดได้จาก

$$N_1 = \frac{E_1}{4K_f A_c B_m f} \quad \text{และ} \quad N_2 = \frac{E_2}{4K_f A_c B_m f} \quad (\text{ก.2})$$

ในการออกแบบหม้อแปลง Tr1 ใช้แกนแบบเทอร์รอยด์ $A_c = 216 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ จะได้ และเลือกความถี่ที่ 450 Hz เนื่องจากรูปคลื่นของสัญญาณมีหลายความถี่ควรเลือกความถี่ที่ใกล้เคียงค่าความถี่ต่ำเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กอิ่มตัว จะเป็นผลให้ความต้านทานลดลงทันทีทันใดจนมีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลให้มอสเฟตเกิดการลัดวงจรได้ จะได้

$$\begin{aligned} K_f &= 1 \text{ สำหรับแรงดันรูปสี่เหลี่ยม} \\ A_c &= 216 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \\ f &= 450 \text{ Hz} \\ B_m &= 0.3 \text{ T} \end{aligned}$$

ฉะนั้น

$$N_1 = \frac{E_1}{4K_f A_c B_m f} = \frac{12V}{4 \times 1 \times 216 \times 10^{-6} \times 0.3 \times 450} = 102 \text{ รอบ}$$

$$N_2 = 204 \text{ รอบ}$$

หม้อแปลง Tr2 ใช้แกนแบบ T45 $A_c = 314 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ จะได้ และเลือกความถี่ที่ 300 Hz เนื่องจากรูปคลื่นของสัญญาณมีหลายความถี่ควรเลือกความถี่ที่ใกล้เคียงค่าความถี่ต่ำเพื่อป้องกัน

$$N_1 = \frac{E_1}{4K_f A_c B_m f} = \frac{12V}{4 \times 1 \times -314 \times 10^{-6} \times 0.3 \times 300} = 106 \text{ รอบ}$$

$$N_2 = 636 \text{ รอบ}$$

หม้อแปลง Tr3 ใช้แกนแบบเทอร์รอยด์ $A_c = 300 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ จะได้ และเลือกความถี่ที่ 50 Hz จะ
ได้จำนวนรอบคือ

$$N_1 = \frac{E_1}{4K_f A_c B_m f} = \frac{12V}{4 \times 1 \times -300 \times 10^{-6} \times 0.3 \times 50} = 666 \text{ รอบ}$$

$$N_2 = 11,448 \text{ รอบ}$$

