

อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบ
ผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด

A HIGH EFFICIENCY MULTILEVEL INVERTER
FOR PV STAND-ALONE APPLICATIONS



๒๕๕๘
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-020-127

อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบ
ผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด

A HIGH EFFICIENCY MULTILEVEL INVERTER
FOR PV STAND-ALONE APPLICATIONS



จ.พ.
ธ 2482

เลขหมู่..... 2558
เลขทะเบียน..... 139435
วันเดือนปี... 23 11 2558

b.....
i.....

12718415

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-020-127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A HIGH EFFICIENCY MULTILEVEL INVERTER
FOR PV STAND-ALONE APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-EN-M-020-127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015




FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้า
ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด
Thesis Title A High Efficiency Multilevel Inverter for PV Stand-Alone Applications
นักศึกษา นางสาวธนาวดี แจ่มอัน
รหัสประจำตัว 53610536
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-020-127

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วรชาติ	สุวรรณงาม	
รศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
รศ.ดร.ไพบุลย์	นาคมหาชลาสินธุ์	
รศ.ประภาพร	ไพโรสุวรรณา	
รศ.ดร.สุรินทร์	คำฝอย	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-401

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นจำเป็นต้องใช้เอกสารฉบับนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ณ วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

อินพุทของโมเดลนั้นจะช่วยให้โมเดล (โมเดล PC-NN) สามารถทำนายผลการตรวจจับและระบุตำแหน่งได้ถูกต้องมากขึ้น โดยสามารถทำนายได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่หากไม่มีการลดจำนวนตัวแปรอินพุท (โมเดล NN) ความถูกต้องในการทำนายมีค่าเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A High Efficiency Multilevel Inverter for PV Stand-alone Applications
Student	Miss. Thanawadee Jaem-On
Student ID.	53610536
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Surin Khomfoi

ABSTRACT

A high efficiency multilevel inverter for a PV stand-alone application is presented in this research. The objective of this research is to propose a multilevel inverter topology, suitable for PV stand-alone system, to interconnection between low voltage dc source from PV (48V) and a load (220V_{ac}). The multi-winding transformer multilevel inverter topology can operate high power quality waveform without filter with high efficiency. The 1 kVA prototype was developed for experimental validation. The experimental results were satisfactory and agreed with simulation results. The results showed that the multi-winding transformer multilevel inverter achieved high efficiency, high power quality waveform; therefore, the proposed multilevel inverter was suitable for a low dc source with PV stand-alone applications. To operate the multi-winding transformer multilevel inverter topology with high stability and reliability, this research work also investigated the open switch fault characteristics of such topology. A neural network (NN) classification was applied to the fault diagnosis of the topology. Multilayer perceptron (MLP) network were used to identify the type and location of occurring fault. Furthermore, the principle component analysis (PCA) was utilized to reduce the dimension of the input variables of the NN classification. The comparison between MLP neural network (NN model) and principal component analysis neural network (PC-NN model) are performed. It was found that the performance of the PC-NN model classification is a 100 percent classification accuracy while the NN model classification provided only 95 percent classification accuracy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาและคำแนะนำจากบุคคลที่ข้าพเจ้ารักและเคารพอย่างสูง คือ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย ที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัย คอยดูแลให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในทุกด้าน คอยชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาโดยเฉพาะด้านวิชาการและงานทางวิศวกรรม ข้าพเจ้าขอขอบคุณจากใจจริง

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้คุณธรรมตลอดจนอบรมสั่งสอนให้มีทักษะและจรรยาบรรณในการประกอบวิชาชีพ ที่จะทำให้ข้าพเจ้าสามารถเติบโตในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และเป็นวิศวกรที่มีคุณภาพรวมถึงเป็นคนดีของสังคมต่อไป

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน (REAL LAB) ที่เอื้อเพื่อสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ในการจัดสร้างและทดสอบชิ้นงาน ขอขอบคุณทุกคนในห้องแลปที่ร่วมสร้างความทรงจำที่ดีที่สุดครั้งหนึ่งในชีวิต ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่ช่วยกันสร้างบรรยากาศในห้องแลปให้สนุกสนานอยู่เสมอ ขอขอบคุณน้อง REAL ตัวจริงที่เป็นแรงบันดาลใจของผู้สร้างห้องแลป และขอขอบคุณประสบการณ์ที่ดีที่เกิดขึ้นที่ REAL LAB

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้ที่คอยอบรมสั่งสอนและตักเตือนข้าพเจ้า ให้ข้าพเจ้าได้เรียนรู้การใช้ชีวิต ชี้แนะแนวทางและคอยเป็นกำลังใจเคียงข้างข้าพเจ้าอยู่เสมอจนถึงทุกวันนี้ และขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้

งานวิจัยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (EPPO) ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ธนาวัตี แจ่มอัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 ระเบียบวิธีวิจัย	6
บทที่ 2	7
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	7
2.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter).....	9
2.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทต่างๆ	9
2.4.1 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped).....	9
2.4.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ (Cascade H-bridge)	9
2.4.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด (Cascade H-Bridge with multi-winding transformer).....	10
2.4.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยวงจรไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทาง (Cascade H-Bridge with bi-directional DC/DC converters).....	11
2.4.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง (Multiple-transformer)	12
2.4.6 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย (Multiple-source)	12
2.4.7 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding Transformer).....	13
2.5 การเลือกและเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	14
2.6 บทสรุป	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3.....	17
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding Transformer).	
.....	17
3.2.1 เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge Inverter).....	18
3.2.2 หม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding transformer)	20
3.2.3 ชุดเอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper).....	20
3.3 การออกแบบสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง.....	25
3.4 บทสรุป	26
บทที่ 4.....	27
การจำลองการทำงาน	27
4.1 บทนำ.....	27
4.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	27
4.2.1 วัตถุประสงค์การจำลอง	27
4.2.2 ขั้นตอนการจำลอง.....	28
4.3 ผลการทดลองแบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	30
4.3.1 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	31
4.3.2 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก	32
4.3.2.1 การทดลองโดยคงที่ค่าดัชนีมอดดูเลต และทำการปรับจำนวนขั้นของแรงดัน.....	32
4.3.2.2 การทดลองโดยคงที่จำนวนขั้นของแรงดัน และทำการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต	32
4.3.2.3 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อจ่ายภาระ ไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 1 กิโลวัตต์.....	35
4.3.2.4 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อจ่ายภาระ ไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ขนาด 746 วัตต์ ตัวประกอบกำลังล้าหลัง 0.8.....	35
4.3.3 สรุปผลการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	36
4.4 บทสรุป	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5.....	39
การระบุตำแหน่งความผิดพลาดในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	39
5.1 บทนำ.....	39
5.2 การจำลองความผิดพลาดของสวิตช์กำลัง.....	39
5.3 การหาคุณลักษณะเด่นของระบบ (Feature Extraction System).....	42
5.4 การสเกลข้อมูล (Standardizes).....	45
5.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก.....	46
5.6 การออกแบบโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม.....	51
5.7 ข้อมูลที่ใช้สำหรับการสอนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม.....	54
5.7.1 กรณีโมเดล NN.....	54
5.7.2 กรณีโมเดล PC-NN.....	55
5.8 การสอนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม.....	56
5.9 ผลการสอน การให้เหตุผล และการทดสอบโมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม.....	58
5.10 บทสรุป.....	64
บทที่ 6.....	65
การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ.....	65
6.1 บทนำ.....	65
6.2 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ.....	65
6.2.1 ชุดวงจร H-bridge Inverter.....	66
6.2.2 หม้อแปลงชนิดหลายชุด (Multi-winding Transformer).....	68
6.2.2.1 พิกัดของหม้อแปลงหลายชุด.....	68
6.2.2.2 การออกแบบหม้อแปลงหลายชุด.....	69
6.2.3 ชุด AC-Chopper.....	75
6.2.4 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply) สำหรับชุดขับสัญญาณสวิตช์กำลังและชุดวงจรควบคุม.....	77
6.2.5 การออกแบบชุดวงจรขับสัญญาณสวิตช์กำลัง.....	78
6.2.5.1 วงจรสำหรับการขับสวิตช์กำลัง (Gate-drive Circuit).....	79
6.2.5.2 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Circuit).....	80
6.2.5.3 วงจรสัญญาณส่งจ่าย (Signal Transmission Circuit).....	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.5.4 วงจรกู้คืนสัญญาณ (Signal Recovery Circuit).....	80
6.2.5.5 วงจรขยายกระแสไฟฟ้า (Current Amplification Circuit).....	80
6.2.5.6 วงจรป้องกันไฟฟ้าตก (Under Voltage Lookout Circuit)	81
6.2.5.7 วงจรส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Transmission Circuit).....	81
6.2.5.8 วงจรกู้คืนกำลังไฟฟ้า (Power Recovery Circuit)	81
6.3 การออกแบบวงจรควบคุมและสัญญาณควบคุมการทำงานสวิตช์กำลัง	83
6.3.1 วงจรควบคุม.....	83
6.3.2 การออกแบบสัญญาณควบคุมการทำงานสวิตช์กำลัง.....	83
6.4 ขั้นตอนการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด	85
6.5 เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด.....	87
6.6 บทสรุป	87
บทที่ 7.....	88
ผลการทดสอบ	88
7.1 บทนำ.....	88
7.2 การทดสอบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	88
7.2.1 วัตถุประสงค์.....	89
7.2.2 ขั้นตอนในการทดสอบ.....	89
7.2.3 ผลการทดสอบ.....	89
7.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	90
7.3 การทดสอบอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อปรับค่าดัชนีมอดดูเลต	91
7.3.1 วัตถุประสงค์.....	91
7.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ	91
7.3.3 ผลการทดสอบ.....	92
7.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	93
7.4 การทดสอบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน.....	93
7.4.1 วัตถุประสงค์.....	93
7.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ	93
7.4.3 ผลการทดสอบ.....	94
7.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.5 การทดสอบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส.....	103
7.5.1 วัตถุประสงค์.....	103
7.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ	103
7.5.3 ผลการทดสอบ.....	103
7.5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	106
7.6 บทสรุป	107
บทที่ 8	108
สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	108
8.1 สรุปผลงานวิจัย	108
8.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง.....	109
8.3 แนวทางการพัฒนา.....	110
เอกสารอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก.	115
เครื่องมือวัดและอุปกรณ์	115
ภาคผนวก ข.	118
1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4431	119
2. MOSFET เบอร์ IRF3710	120
3. MOSFET เบอร์ STB55NF06	120
4. MOSFET เบอร์ IFR 530N	120
5. MOSFET เบอร์ FQP630	121
6. MOSFET เบอร์ IRFB9N60A	122
ภาคผนวก ค.	125
ภาคผนวก ง.....	138
บทความวิชาการ.....	138
ประวัติผู้เขียน	xvii

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1	ตารางแสดงคุณสมบัติที่ต้องการ สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด	14
2.2	ตารางเปรียบเทียบคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆ สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด	15
5.1	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรลำดับฮาร์มอนิก	47
5.2	โครงสร้างโมเดล NN และ PC-NN ที่ออกแบบ	54
5.3	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอนโมเดล	57
5.4	เงื่อนไขในการสอนโมเดล	57
5.5	ผลการสอน การให้เหตุผล และการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบโมเดล NN	59
5.6	ผลการสอน การให้เหตุผล และการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบโมเดล PC-NN	62
6.1	ตารางแสดงรายละเอียดอุปกรณ์เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์	67
6.2	รายละเอียดพิกัดหม้อแปลงหลายชุด	68
6.3	ตารางแสดงขนาดของแกนหม้อแปลงทอรอยด์	69
6.4	ตารางแสดงจำนวนรอบของการพันขดลวดทุติยภูมิจากการคำนวณ	70
6.5	ตารางสรุปรายละเอียดหม้อแปลงหลายชุดที่ทำการออกแบบ	71
6.6	แสดงรายละเอียดอุปกรณ์วงจรเอชซี-ชอปเปอร์ เซลล์ที่ 1 ถึงเซลล์ที่ 5	76
6.7	สรุปอุปกรณ์ของชุดวงจรเอชซี-ชอปเปอร์	77
7.1	กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแต่ละส่วนของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่าย	102

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	อาคารบ้านเรือนของประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีการนำเทคโนโลยี NZEBS มาใช้ [2]..... 2
1.2	ระบบผลิตไฟฟ้าแบบแยกโดด (STAND-ALONE SYSTEM)..... 3
2.1	วงจรฮาล์ฟบริดจ์ (HALF-BRIDGE)..... 7
2.2	รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรฮาล์ฟบริดจ์ (HALF-BRIDGE)..... 8
2.3	วงจรฟูลบริดจ์ (FULL-BRIDGE) หรือเอช-บริดจ์ (H-BRIDGE) 8
2.4	รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรฟูลบริดจ์ (FULL-BRIDGE) 8
2.5	อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (DIODE-CLAMPED) 10
2.6	อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ (CASCADE H-BRIDGE) 10
2.7	อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด (CASCADE H-BRIDGE WITH MULTI-WINDING TRANSFORMER) 11
2.8	อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยวงจรไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทาง (CASCADE H-BRIDGE WITH BI-DIRECTIONAL DC/DC CONVERTERS) 12
2.9	อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง (MULTIPLE-TRANSFORMER) 13
2.10	อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย (MULTIPLE-SOURCE) 13
2.11	อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (MULTI-WINDING TRANSFORMER) 14
3.1	โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (MULTI-WINDING TRANSFORMER) 18
3.2	สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของชุดวงจร H-BRIDGE INVERTER..... 19
3.3	การทำงานของวงจร H-BRIDGE INVERTER ในการสร้างแรงดันซีกบวก 20
3.4	การทำงานของวงจร H-BRIDGE INVERTER ในการสร้างแรงดันซีกลบ 20
3.5	วงจรเอซี-ชอปเปอร์ (AC-CHOPPER)..... 21
3.6	วงจรเอซี-ชอปเปอร์ ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 ชุด..... 21
3.7	สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของชุดเอซี-ชอปเปอร์..... 22
3.8	ลำดับการทำงานของสวิตช์กำลังของชุด AC-CHOPPER จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน ... 24
3.9	แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด 25
3.10	ตัวอย่างการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ S_7 26
4.1	แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK 27
4.2	แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับวงจร H-BRIDGE INVERTER 29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับชุด AC-CHOPPER29
4.4	แบบจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของ H-BRIDGE INVERTER30
4.5	แบบจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของชุด AC-CHOPPER30
4.6	แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับวงจร H-BRIDGE INVERTER31
4.7	แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด31
4.8	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการทดลองเมื่อคงที่ค่าดัชนีมอดดูเลตที่ $M_1=1.00/1.00$ แล้วปรับค่า $P = 15, 25$ และ 3133
4.9	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการทดลองเมื่อคงที่ค่า $P = 31$ แล้วปรับค่าดัชนีมอดดูเลต $M_1 = 0.80, 0.90$ และ $1.00/1.00$34
4.10	ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าขาออก (THD _v) ที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโคตสำหรับระบบจำหน่ายในประเทศไทย ณ $P = 31$ และ $M_1=0.832/1.00$35
4.11	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์36
4.12	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อจ่ายภาระ36
4.13	(ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก.....37
5.1	การจำลองความผิดพร่องของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด40
5.2	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ กรณีสภาวะปกติ41
5.3	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดพร่องที่ชุด AC-CHOPPER ชุดที่ 1 (FAULT AT CELL 1).....41
5.4	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดพร่องที่41
5.5	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดพร่องที่ชุด AC-CHOPPER ชุดที่ 3 (FAULT AT CELL 3).....41
5.6	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดพร่องที่ชุด AC-CHOPPER ชุดที่ 4 (FAULT AT CELL 4).....42
5.7	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดพร่องที่ชุด AC-CHOPPER ชุดที่ 5 (FAULT AT CELL 5).....42
5.8	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะปกติ.....43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติ ที่ชุด AC-CHOPPER ชุดที่ 1 (FAULT AT CELL 1).....	43
5.10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติ ที่ชุด AC-CHOPPER ชุดที่ 2 (FAULT AT CELL 2).....	43
5.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติ ที่ชุด AC-CHOPPER ชุดที่ 3 (FAULT AT CELL 3).....	44
5.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติ ที่ชุด AC-CHOPPER ชุดที่ 4 (FAULT AT CELL 4).....	44
5.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติ ที่ชุด AC-CHOPPER ชุดที่ 5 (FAULT AT CELL 5).....	44
5.14 ข้อมูลจริงก่อนกระบวนการสเกลข้อมูล	45
5.15 ข้อมูลหลังผ่านกระบวนการสเกลข้อมูล	46
5.16 โครงสร้างพื้นฐานของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับเทคนิค PCA.....	48
5.17 กราฟ SCREE PLOT	48
5.18 ผลรวมสะสมของค่าเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวน (%EXPLAINED).....	48
5.19 กราฟแสดงค่า LOADING และ SCORES ของ PC-1.....	49
5.20 กราฟแสดงค่า LOADING และ SCORES ของ PC-2.....	49
5.21 กราฟแสดงค่า LOADING และ SCORES ของ PC-3.....	49
5.22 กราฟแสดงค่า LOADING และ SCORES ของ PC-4.....	50
5.23 กราฟแสดงค่า LOADING และ SCORES ของ PC-5.....	50
5.24 กราฟแสดงค่า LOADING และ SCORES ของ PC-6.....	50
5.25 กราฟ 3 มิติระหว่าง SCORES ของ PC-1, PC-2 และ PC-3.....	51
5.26 กราฟ 3 มิติระหว่าง SCORES ของ PC-1, PC-2 และ PC-4.....	51
5.27 โครงสร้างทางสถาปัตยกรรมแบบ MLP.....	52
5.28 แผนภาพการตรวจจับและวิเคราะห์ความผิดปกติด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม....	52
5.29 โครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของโมเดล NN และ โมเดล PC-NN แบบ MLP.....	53
5.30 แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มข้อมูล.....	56
5.31 หน้าต่างของโปรแกรม MATLAB ในการสอนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม.....	57
5.32 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม.....	58
5.33 โมเดล NN ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่ 6 โหนด เมื่อถูกสอนสำเร็จ.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

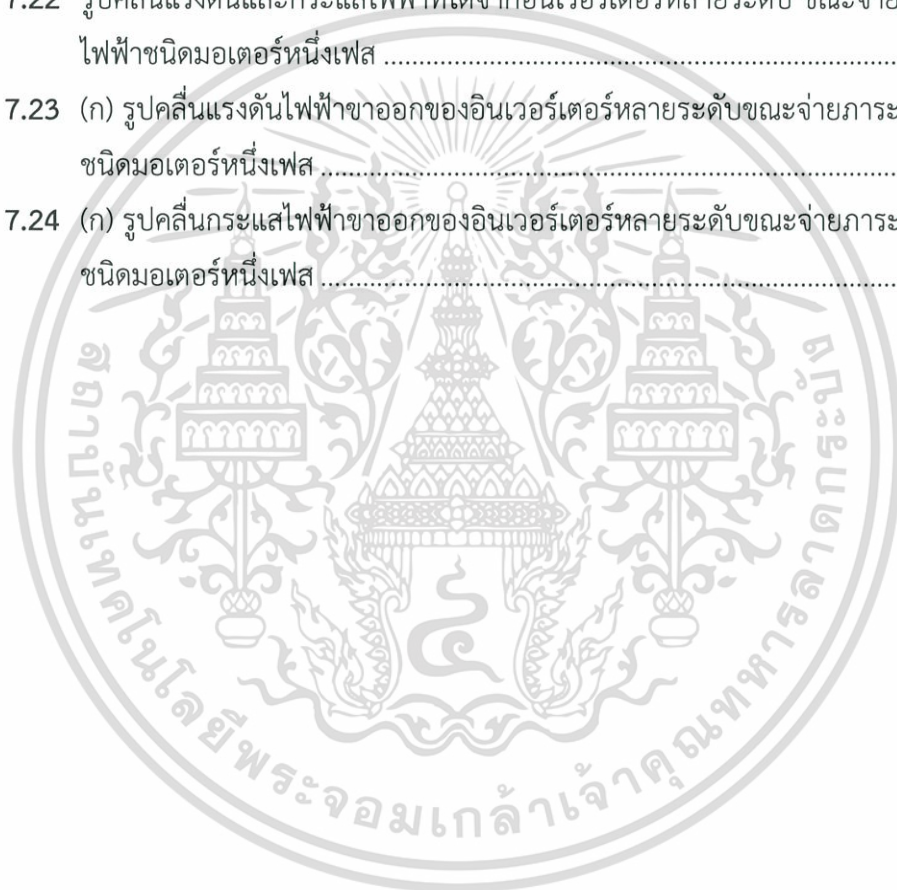
รูปที่	หน้า
5.34	กราฟแสดงค่า TRAINING ERRORS, VALIDATION ERRORS, และ TEST ERRORS ของโมเดล NN.....60
5.35	ผลการสอนโมเดล NN ที่มีโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่จำนวน 6 โหนด61
5.36	โมเดล PC-NN ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่ 6 โหนด เมื่อถูกสอนสำเร็จ.....62
5.37	กราฟแสดงค่า TRAINING ERRORS, VALIDATION ERRORS, และ TEST ERRORS ของโมเดล PC-NN63
5.38	ผลการสอนโมเดล PC-NN ที่มีโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่จำนวน 6 โหนด64
6.1	รูปชิ้นงานเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ65
6.2	ชุดวงจรกำลังของ H-BRIDGE INVERTER66
6.3	ชิ้นงานของชุดวงจร H-BRIDGE INVERTER.....67
6.4	หม้อแปลงทอรอยด์ที่ชำรุด.....69
6.5	แกนหม้อแปลงพันผ้าพันหม้อแปลง.....72
6.6	รูปการพันขดลวดที่ละชั้น.....72
6.7	รูปการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงเมื่อทำการพันในแต่ละรอบ.....73
6.8	หม้อแปลงหลายขด.....73
6.9	ลักษณะขดลวดแต่ละขดของหม้อแปลง.....74
6.10	ชิ้นงานหม้อแปลงชนิดหลายขด.....74
6.11	วงจรกำลังของชุด AC-CHOPPER จำนวน 1 ชุด.....75
6.12	ชิ้นงานจริงของวงจรชุด AC-CHOPPER จำนวน 5 ชุด.....75
6.13	วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์.....78
6.14	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์.....78
6.15	บล็อกไดอะแกรมของชุดวงจรขับสวิตช์กำลัง.....79
6.16	วงจรชุดขับสวิตช์กำลัง.....79
6.17	รูปชิ้นงานวงจรขับสวิตช์กำลัง.....80
6.18	สัญญาณที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์.....82
6.19	สัญญาณที่ผ่านวงจรขับเคลื่อน.....82
6.20	ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431.....84
6.21	ชิ้นงานวงจรควบคุมและจอแสดงผล LCD.....84
6.22	แผนผังการทำงานของส่วนควบคุม.....86
6.23	ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....87

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.1	การทดสอบเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด89
7.2	รูปวงจรการทดลองเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับกรณีที่ยังไม่มีภาระทางไฟฟ้า 90
7.3	แรงดันไฟฟ้าขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ90
7.4	แรงดันไฟฟ้าขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อใช้วงจรกรองในสโคป 91
7.5	รูปวงจรการทดสอบอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อปรับค่าดัชนีมอดดูเลต.....92
7.6	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าขาออก.....92
7.7	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับค่าเพอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า ...93
7.8	รูปวงจรการทดสอบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน 94
7.9	รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทาง ...95
7.10	(ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้า ขนาด 0.2846 กิโลวัตต์..... 96
7.11	(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้า ขนาด 0.2846 กิโลวัตต์..... 97
7.12	แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความ ต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์..... 98
7.13	รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์หลาย ระดับในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์..... 98
7.14	รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออกของส่วนวงจร H-BRIDGE INVERTER ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์ 99
7.15	รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วน ชุด AC-CHOPPER ที่ แรงดัน 12 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์99
7.16	รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วน ชุด AC-CHOPPER ที่แรงดัน 24 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์ .. 100
7.17	รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนชุด AC-CHOPPER ที่ แรงดัน 48 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์..... 100
7.18	รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนชุด AC-CHOPPER ที่ แรงดัน 96 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์..... 101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.19 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนชุด AC-CHOPPER ที่แรงดัน 192 โวลต์ ในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	101
7.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังไฟฟ้านอก	102
7.21 รูปวงจรการทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส.	104
7.22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส	104
7.23 (ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส	105
7.24 (ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส	106



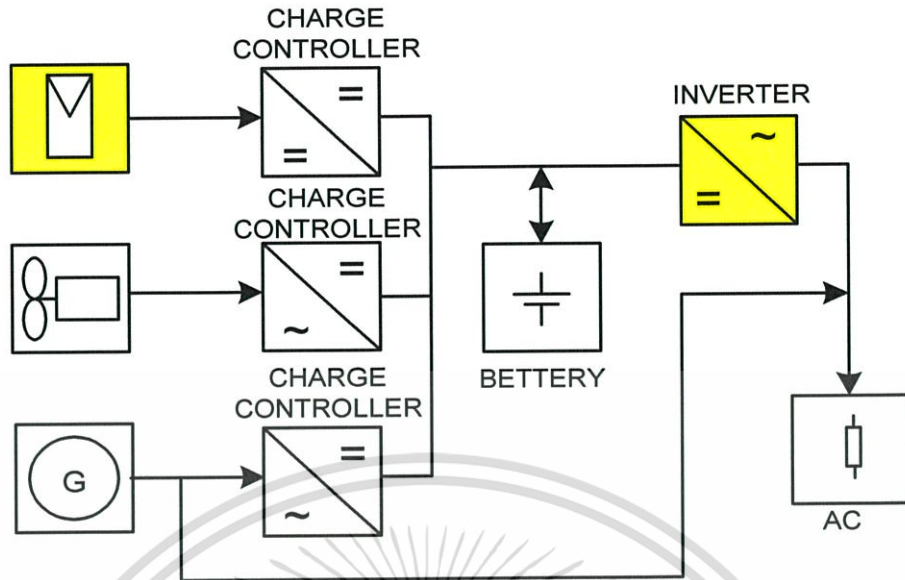
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการพื้นฐานของประชาชน และยังเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญในภาคอุตสาหกรรม รัฐบาลจึงต้องมีการจัดหาพลังงานให้มีปริมาณที่เพียงพอ มีราคาที่เหมาะสม และมีคุณภาพที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค ในด้านการผลิตไฟฟ้า ก๊าซธรรมชาติถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตไฟฟ้าในสัดส่วนที่สูงถึง 66.06% [1] ถึงแม้ว่า ก๊าซธรรมชาติส่วนใหญ่จะสามารถผลิตได้ในประเทศก็ตาม แต่การพึ่งพาพลังงานเพียงชนิดเดียวก็น่าจะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางด้านพลังงานของประเทศได้ ซึ่งจะเห็นว่า ความต้องการใช้พลังงานจะสอดคล้องกับการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศ (GDP) นั่นหมายความว่าความต้องการพลังงานมีแต่จะเพิ่มขึ้นทุกปี ดังนั้น การกำหนดยุทธศาสตร์ด้านพลังงาน จะต้องคำนึงถึงการกระจายแหล่งที่มาของพลังงานและเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ให้เกิดความสมดุล

แนวทางสำคัญที่จะช่วยลดอัตราการเพิ่มความต้องการใช้พลังงานของประเทศคือการส่งเสริมให้มีการประหยัดพลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยลดภาระการจัดหาพลังงานลงได้ นอกจากนี้ควรเร่งส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนรวมทั้งเร่งพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทดแทนอย่างจริงจัง โดยปัจจุบันมีกระแสความตื่นตัวในระดับภูมิภาคและระดับโลกเกี่ยวกับการส่งเสริมให้เกิดการใช้พลังงานทดแทนอย่างกว้างขวางขึ้น ทั้งนี้ สืบเนื่องมาจากการคาดการณ์ว่าแหล่งเชื้อเพลิงจากฟอสซิลประเภท น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และอื่นๆ จะมีปริมาณสำรองลดลงเรื่อยๆ และราคามีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับ หลายประเทศจึงหันมาทำการส่งเสริมให้เกิดการใช้พลังงานทดแทนอย่างแพร่หลาย ได้แก่ พลังงานจากแสงอาทิตย์ ลม น้ำ และชีวมวล เป็นต้น เพื่อใช้แทนพลังงานจากฟอสซิลและยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งส่งผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกได้อีกด้วย [2] โดยในรอบปีที่ผ่านมากลุ่มประเทศแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกาได้นำเสนอการจัดการพลังงานแนวใหม่เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพที่เรียกว่า Net-Zero Energy Buildings (NZEBs) ซึ่งเป็นแนวคิดในการใช้พลังงานของอาคารที่อยู่อาศัยโดยมวบรวมเป็นศูนย์ [3] โดย NZEBs เป็นแนวคิดที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่ง NZEBs สามารถช่วยให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถบริหารจัดการด้านพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าแบบแยกโดด (Stand-alone system)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำเสนอเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด โดยเลือกใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ซึ่งมีค่าการสูญเสียต่ำเนื่องจากเทคนิคที่ใช้ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันนี้เป็นเทคนิคที่มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้วงจรกรองของใหญ่ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับก่อนที่จะทำการสร้างเครื่องต้นแบบขนาด 1 กิโลวัตต์ – แอมแปร์ (kVA) ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาชนิดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด
2. เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด
3. เพื่อสร้างออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป
4. เพื่อตรวจจับและระบุตำแหน่งการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการเปิดวงจรของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดโดยใช้เทคนิคโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการออกแบบและจัดสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge Inverter) หม้อแปลงชนิดหลายชุดแรงดัน และชุดเอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper) ซึ่งชุดวงจร H-bridge Inverter จะแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave) ผ่านหม้อแปลงชนิดหลายชุด ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกจากหม้อแปลงจำนวน 5 ระดับ ส่งต่อสู่ชุด AC-Chopper ที่ถูกควบคุมด้วยสัญญาณขับสวิตช์กำลัง เพื่อแปลงลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ได้และนำมารวมเป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหลายระดับ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้สวิตช์กำลังชนิดมอสเฟต (MOSFET) เป็นสวิตช์กำลัง และออกแบบโมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมสำหรับการตรวจจับและระบุตำแหน่งการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการเปิดวงจรของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. วิทยานิพนธ์นี้จะทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด
2. เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดที่พัฒนาขึ้นสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้าที่มีคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ดีโดยไม่ต้องใช้วงจรกรอง
3. โมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมที่ออกแบบขึ้นสามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งความผิดพลาดเนื่องจากการเปิดวงจรของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดได้
4. องค์ความรู้ทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปบูรณาการกับวิทยาการทางด้านต่าง ๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบควบคุมเข้าด้วยกัน ซึ่งย่อมก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ศึกษาค้นคว้าวิจัยในสาขาดังกล่าวและเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ ในบทนี้จะนำเสนอความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย รวมถึงวิธีการดำเนินงานตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว อินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทต่างๆ รวมถึง การเลือกอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบบแยกโดด

บทที่ 3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ในบทนี้จะนำเสนอโครงสร้าง ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding Transformer) ที่เหมาะ สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด (PV Stand-alone) รวมถึงหลักการทำงานและเทคนิควิธีการควบคุมสัญญาณขับสวิตซ์กำลัง

บทที่ 4 การจำลองการทำงาน ในบทนี้จะนำเสนอการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบ แยกโดดด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเป็นการยืนยันถึงหลักการว่าถูกต้อง และเป็นไปตาม ทฤษฎี ก่อนที่นำไปสร้างเครื่องต้นแบบต่อไป

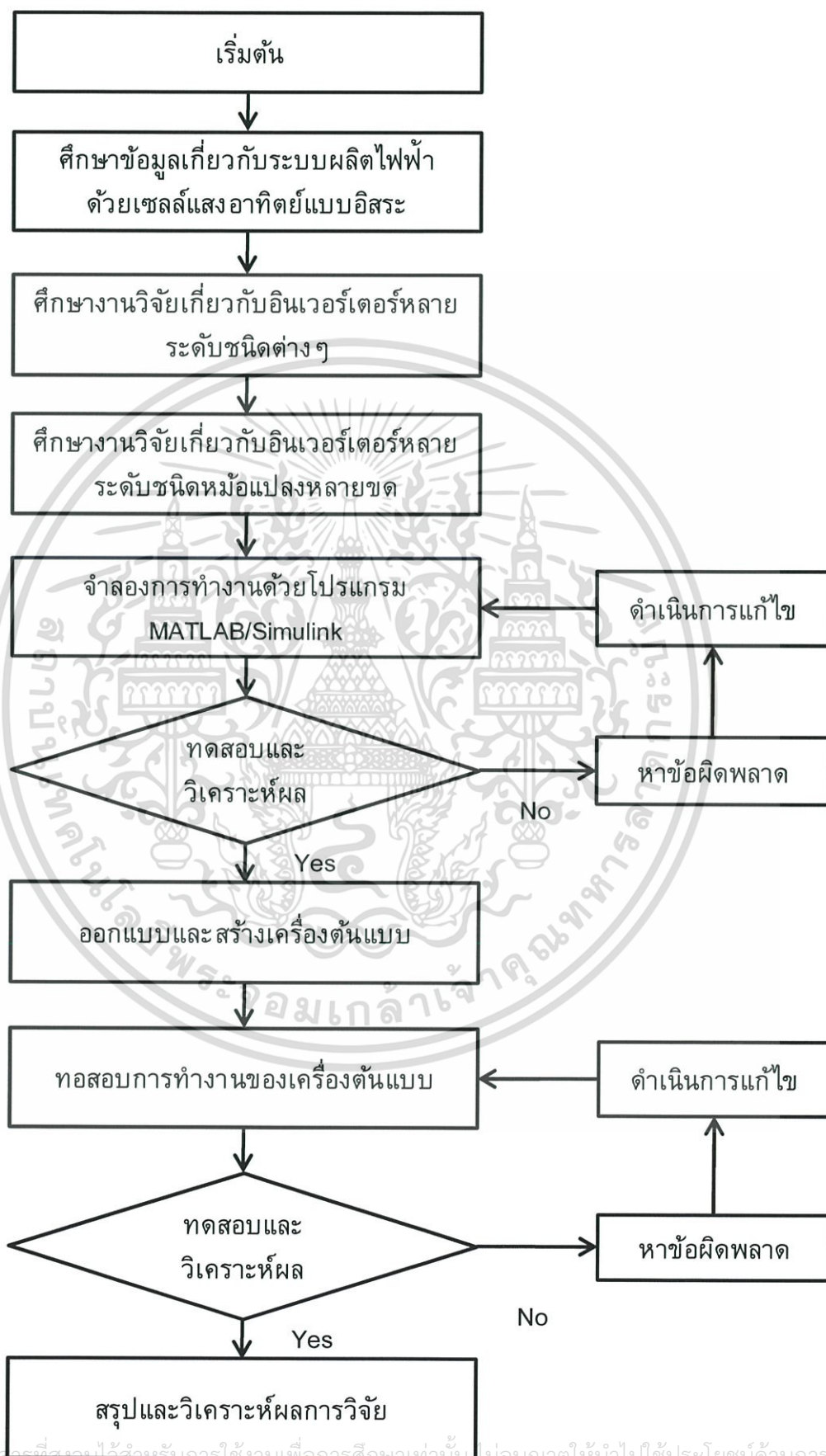
บทที่ 5 การระบุตำแหน่งความผิดปกติในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ในบทนี้จะนำเสนอ การวิเคราะห์ตำแหน่งความผิดปกติ (fault location) ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลง หลายชุดโดยใช้โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม (Neural Network) พร้อมทั้งใช้เทคนิควิเคราะห์ องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis) ในการลดจำนวนตัวแปรอินพุทของโมเดล โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม

บทที่ 6 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ ในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบและการ สร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ซึ่งมีประกอบด้วย 1) ชุดวงจร H-bridge Inverter 2) หม้อแปลงหลายชุด 3) ชุด AC-Chopper 4) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์สำหรับชุดขับสัญญาณสวิตซ์กำลังและชุดวงจรควบคุม และ 5) ชุดวงจรขับสัญญาณสวิตซ์กำลัง และชุดวงจรควบคุม การออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานและโครงสร้างของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ อย่างละเอียด เพื่อให้อุปกรณ์ต่างๆ สามารถทำงานร่วมกันและสามารถแก้ไขเมื่อเกิดปัญหาในการ ทำงานได้

บทที่ 7 ผลการทดสอบ ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลาย ระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดในการสร้างสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิต ไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด

บทที่ 8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ ในบทนี้จะนำเสนอบทสรุปของงานวิจัย ข้อเสนอแนะและ ข้อควรระวัง พร้อมทั้งแนวทางในการพัฒนาสำหรับการวิจัยในระดับต่อไป

1.6 ระเบียบวิธีวิจัย



บทที่ 2

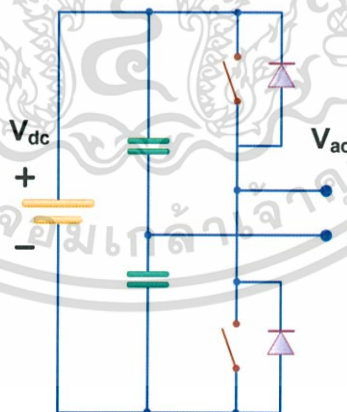
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

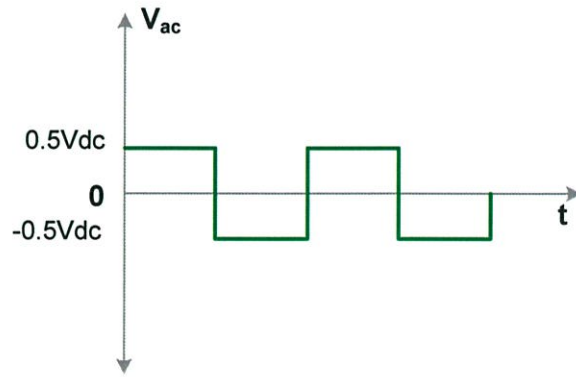
บทนี้จะนำเสนอถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว อินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทต่างๆ รวมถึงการเลือกอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด

2.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

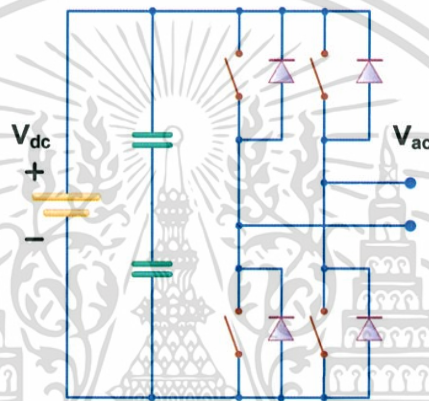
อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ 1) แบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge) และ 2) แบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge) หรือเอช-บริดจ์ (H-Bridge) โดยมีวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.3 ตามลำดับ ซึ่งหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ คือ สวิตช์กำลังในกึ่งเดียวกันจะต้องไม่ทำงานหรือไม่นำกระแสพร้อมกัน ถ้าสวิตช์กำลังในกึ่งเดียวกันทำงานหรือนำกระแสพร้อมกัน จะทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างบัสด้านบนกับบัสด้านล่าง ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันการลัดวงจรระหว่างบัสดังกล่าว สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ซึ่งเป็นช่วงเวลาก่อนที่สวิตช์กำลังจะเปลี่ยนสถานะ ทั้งนี้ แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.4 ตามลำดับ



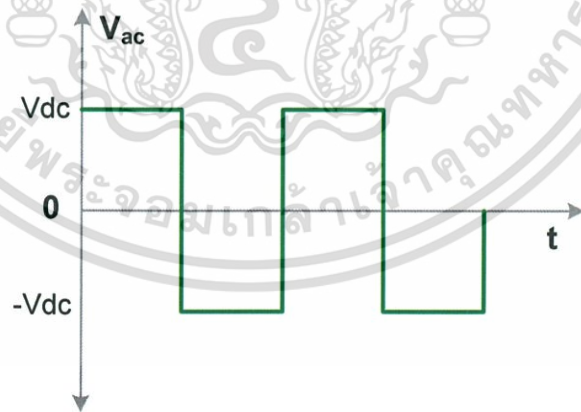
รูปที่ 2.1 วงจรฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge)



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge)



รูปที่ 2.3 วงจรฟูลบริดจ์ (Full-Bridge) หรือเอช-บริดจ์ (H-Bridge)



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรฟูลบริดจ์ (Full-Bridge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานในระบบที่มีกำลังสูงและยังสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกได้คล้ายคลึงกับรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal waveform) ทำให้ได้คุณภาพของสัญญาณดี และยังเป็น การลดค่าการสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ซิ่ง (switching loss) โดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยหม้อแปลงและฟิลเตอร์ (Filter)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับอาศัยการรวมกันของสวิตช์กำลังและแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Vdc) เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกเป็นระดับขั้น ซึ่งหากจำนวนระดับขั้นของแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่ามาก จะยิ่งทำให้ได้สัญญาณของแรงดันขาออกที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์และมีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (Total Harmonic Distortion : THD_v) ต่ำ

2.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทต่างๆ

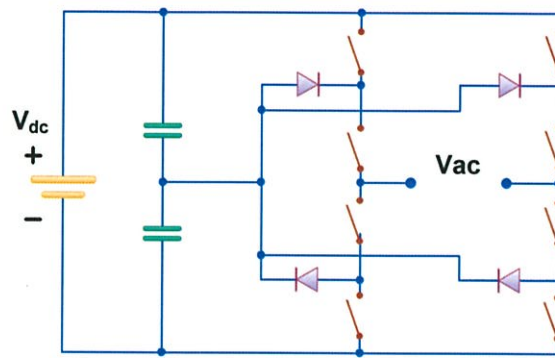
อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแต่ละประเภทต่างก็มีจุดเด่น เพื่อความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้ดังนี้

2.4.1 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped)

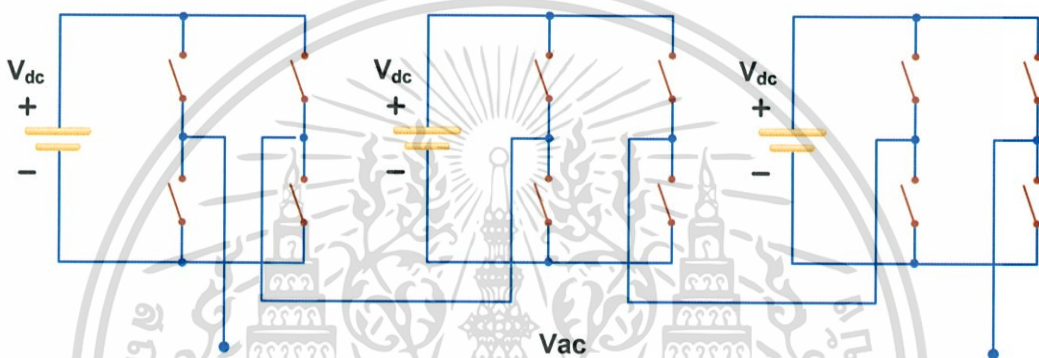
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped) ถูกคิดค้นและนำเสนอโดย Nabae et al. ในปี ค.ศ.1981 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ถือว่าเป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแรงดันคร่อมสวิตช์กำลังจะเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันขาเข้า (V_{dc}) โดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวช่วยแบ่งแรงดัน จึงทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ มีจุดเด่นคือสามารถส่งพลังงานได้สองทิศทางแต่ก็มีข้อจำกัดเนื่องจากตัวเก็บประจุด้วยเช่นกัน [7-11]

2.4.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ (Cascade H-bridge)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ พัฒนามาจากการนำวงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์มาต่ออนุกรมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทำให้สามารถใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันต่างกันได้ และยังสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันที่มีความละเอียดได้ ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกโดด (separated dc source) หลายชุด แต่ในการทำงานจริงในระบบส่วนใหญ่จะมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงแหล่งเดียว [12-15]



รูปที่ 2.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped)

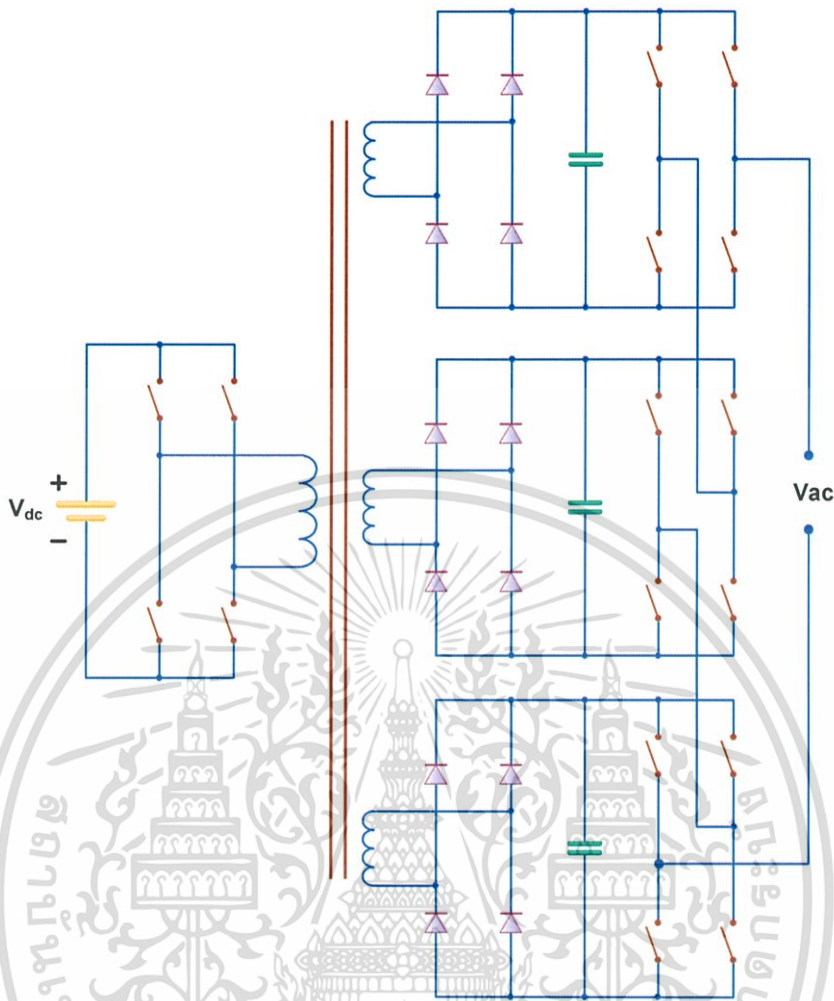


รูปที่ 2.6 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ (Cascade H-bridge)

2.4.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด (Cascade H-Bridge with multi-winding transformer)

จากการที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ มีความต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกโดดมากกว่าหนึ่งแหล่ง จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกหลายชุดขึ้นมา โดยการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และแยกเป็นระดับแรงดันต่างๆ ด้วยหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding Transformer) และผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เพื่อให้ได้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกโดดที่มีระดับแรงดันต่างกัน อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้เรียกว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด (Cascade H-Bridge with multi-winding transformer) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แต่อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุดมีข้อเสีย คือ การสูญเสีย (loss) ที่วงจรเรียงกระแส และไม่สามารถส่งพลังงานได้ทั้งสองทิศทาง [16]

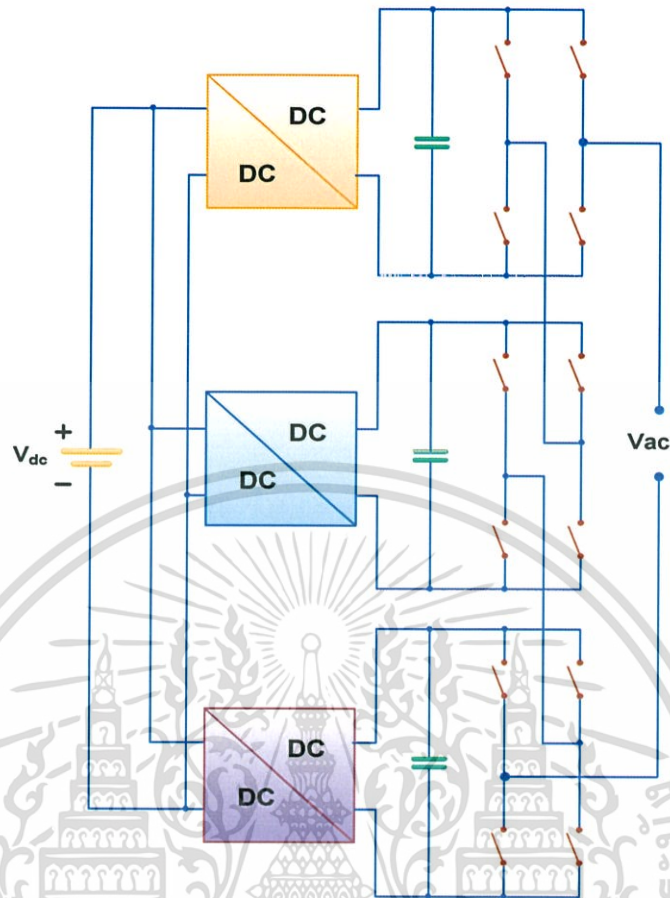
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด (Cascade H-Bridge with multi-winding transformer)

2.4.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยวงจรไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทาง (Cascade H-Bridge with bi-directional DC/DC converters)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยวงจรไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทาง (Cascade H-Bridge with bi-directional DC/DC converters) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถส่งพลังงานได้ทั้งสองทิศทาง แต่ในทางกลับกันอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้ จำเป็นต้องใช้การสวิตชิ่งที่ความถี่สูง จึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการสวิตชิ่ง (switching losses) สูงขึ้นตามไปด้วย อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยวงจรไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทางมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.8 [17]



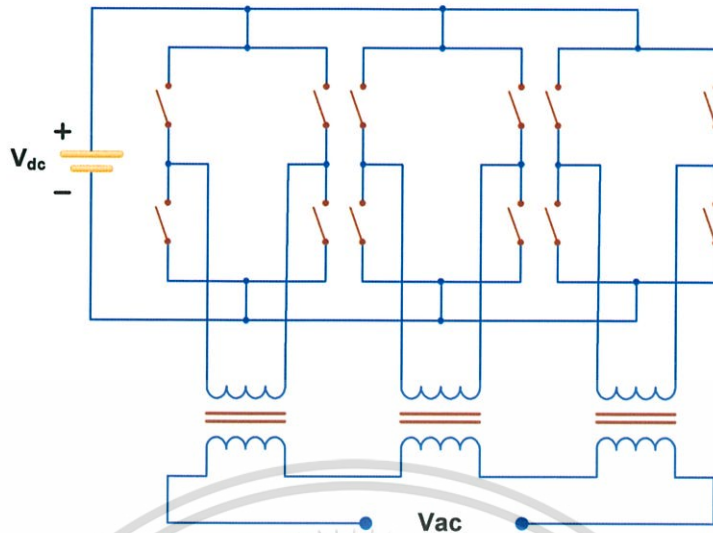
รูปที่ 2.8 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยวงจรไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทาง (Cascade H-Bridge with bi-directional DC/DC converters)

2.4.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง (Multiple-transformer)

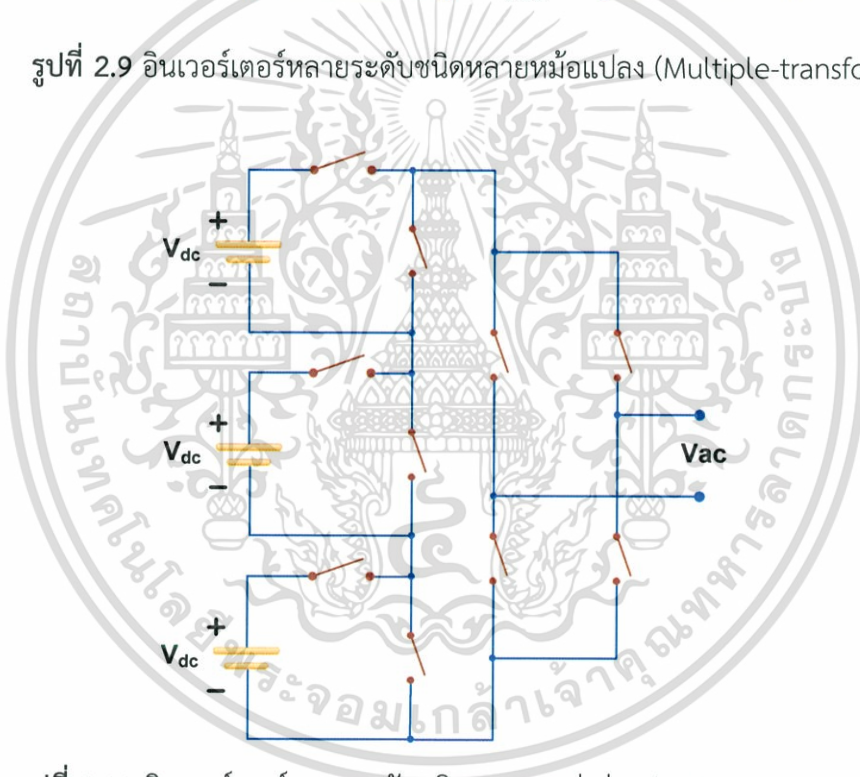
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง (Multiple-transformer) มีโครงสร้างคล้ายกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ ดังรูปที่ 2.9 โดยทางฝั่งขาออกของ H-Bridge นั้นจะต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าและถูกแยกกราวด์ทางไฟฟ้าไปในตัว ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดชนิดหลายหม้อแปลงมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่น แต่ยังมีข้อเสีย คือ หม้อแปลงที่ใช้ต้องเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำจำนวนหลายตัว [18-19]

2.4.6 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย (Multiple-source)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย (Multiple-source) ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกจำนวนหลายชุดดังรูปที่ 2.10 ทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูง มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่น แต่มีข้อเสียคือจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจำนวนหลายชุด และด้านเข้าและออกของวงจรไม่มีการแยกกันทางไฟฟ้า [20]



รูปที่ 2.9 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง (Multiple-transformer)

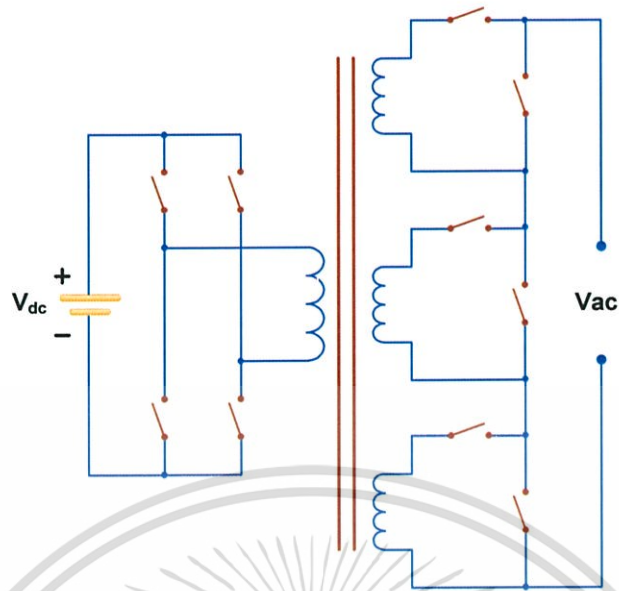


รูปที่ 2.10 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย (Multiple-source)

2.4.7 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding Transformer)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding Transformer) เป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ประยุกต์มาจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด แต่มีความแตกต่างกันตรงที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด มีความต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงแหล่งเดียว (single dc source) และหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงตัวเดียวก็สามารถทำงานได้เช่นเดียวกัน โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding Transformer)

2.5 การเลือกและเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ถูกนำไปใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด (PV Stand-alone) ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดต้องการคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการทำงานดังแสดงในตารางที่ 2.1 ส่วนตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆ สำหรับระบบ PV Stand-alone [22]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติที่ต้องการ สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด

ข้อที่	คุณสมบัติ	ความสำคัญ
1	แหล่งจ่ายกำลังขาเข้าเดียว	จำเป็น
2	ความถี่สวิตซ์ต่ำ	จำเป็น
3	สามารถจ่ายโหลดด้วยองค์ประกอบกระแสตรง	จำเป็น
4	รูปคลื่นมีคุณภาพสูงใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์	จำเป็น
5	จ่ายพลังงานได้สองทิศทาง	คุณสมบัติเสริม
6	ด้านขาเข้าและขาออกมีการแยกกันทางไฟฟ้า	คุณสมบัติเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆ สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด

ชนิดของอินเวอร์เตอร์	รูปที่	1	2	3	4	5	6
Diode clamped	2.5	✓	✓	-	-	✓	-
Cascade H-bridge	2.6	✓	✓	-	-	✓	-
H-bridge with multiwinding transformer	2.7	✓	✓	✓	✓	-	✓
H-bridge with bi-directional DC/DCconverter	2.8	✓	-	✓	✓	✓	✓
Multiple-transformer	2.9	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Multiple-source	2.10	-	✓	✓	✓	✓	✓
Multi-winding transformer	2.11	✓	✓	✓	✓	✓	✓

จากตารางที่ 2.2 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีคุณลักษณะที่จำเป็นครบถ้วนสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด มีอยู่ด้วยกันสามชนิดคือ 1) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด 2) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง และ 3) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคุณสมบัติและลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับทั้งสามประเภทจะพบข้อแตกต่างที่สำคัญดังนี้

- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอช-บริดจ์ ด้วยหม้อแปลงหลายชุด
มีความยืดหยุ่นต่ำเนื่องจากจำเป็นต้องมีตัวเก็บประจุที่รองรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของภาระไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ไม่มีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างด้านขาเข้าและขาออกของวงจร และประสิทธิภาพถูกจำกัดด้วยวงจรเรียงกระแส
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง
มีการแยกกันทางไฟฟ้าของด้านขาเข้าและขาออกของวงจร จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวนมาก และหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัวต้องรับค่ากระแสของภาระไฟฟ้าตลอดเวลา
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด
มีการแยกกันทางไฟฟ้าของด้านขาเข้าและขาออกของวงจร ใช้หม้อแปลงเพียงตัวเดียวและกระแสของภาระไฟฟ้าจะถูกแบ่งไประหว่างขดลวดด้านออกและสวิตช์กำลัง

จากการพิจารณาข้อมูลดังที่กล่าวมาพบว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดมีคุณลักษณะที่สำคัญดังนี้

- ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงแหล่งเดียว
- มีการทำงานด้วยความถี่สวิตซ์ต่ำ
- สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันได้ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และมีความผิดเพี้ยนต่ำ
- สามารถส่งพลังงานได้สองทิศทาง
- ลักษณะโครงสร้างของวงจรมีการแยกกราวด์กันทางไฟฟ้าทางด้านเข้าและออก

ดังนั้น อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด จึงเป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เหมาะสมที่สุด ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด (PV Stand-alone)

2.6 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอถึงทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์ชนิดเฟสเดียวและอินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทต่างๆ รวมถึงการเลือกอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด จากการศึกษาพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดได้ โดยรายละเอียดโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดจะกล่าวในบทที่ 3 ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด

3.1 บทนำ

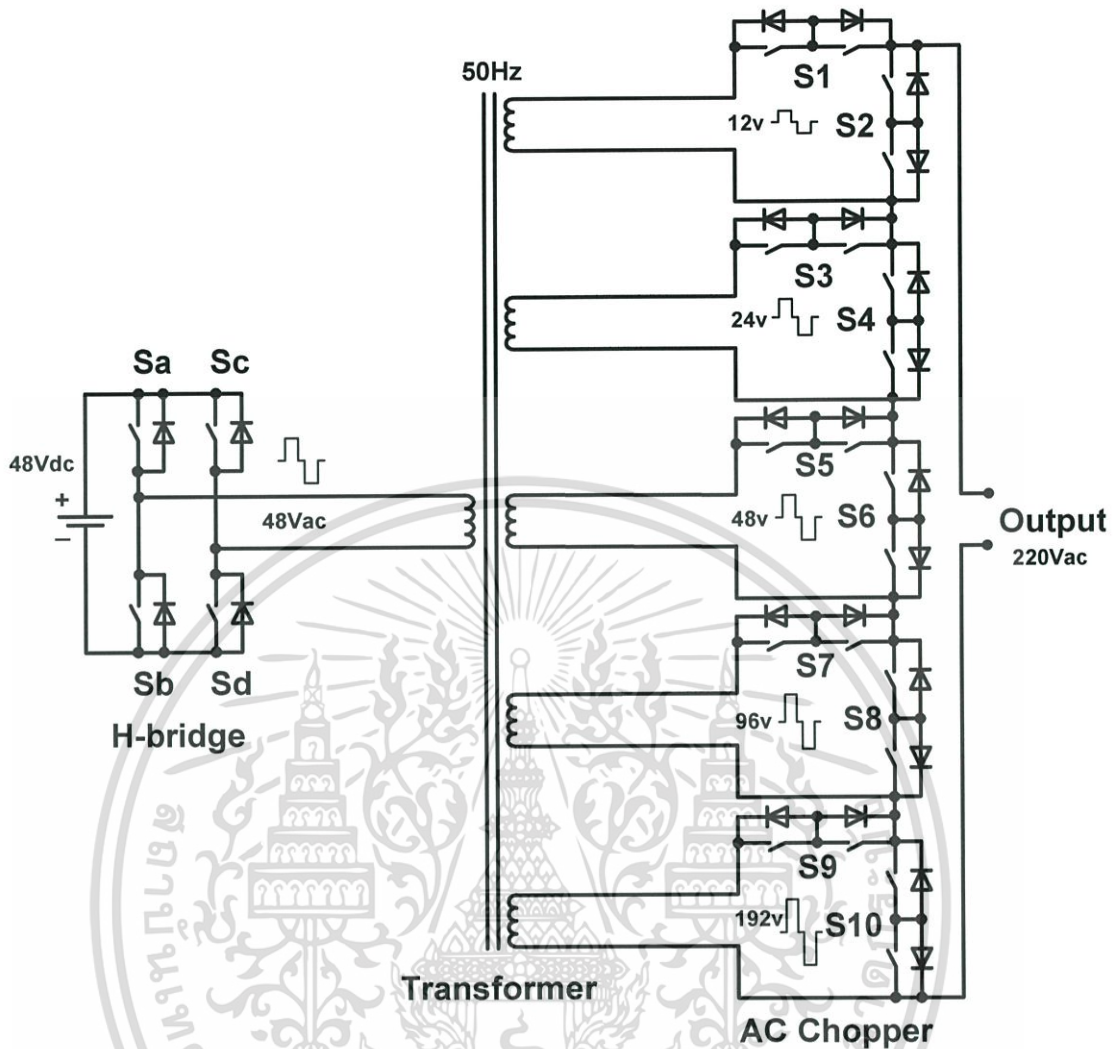
บทนี้จะนำเสนอถึงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด (Multi-winding Transformer) ที่เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด (PV Stand-alone) รวมถึงหลักการทํางานและเทคนิควิธีการควบคุมสัญญาณขับสวิตซ์กำลัง

3.2 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด (Multi-winding Transformer)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดได้โดยตรง เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 โวลต์ และอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดเองก็ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันขาเข้าเพียง 1 แหล่งจ่ายที่มีระดับแรงดันต่ำเพียง -48 โวลต์ ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีคอนเวอร์เตอร์ (DC/DC Converter) ในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้สามารถลดค่าการสูญเสียเนื่องจากการแปลงผันพลังงาน (conversion loss) ของระบบลงได้

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

1. เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge Inverter)
2. หม้อแปลงหลายขด (Multi-winding transformer)
3. ชุดเอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper)



รูปที่ 3.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding Transformer)

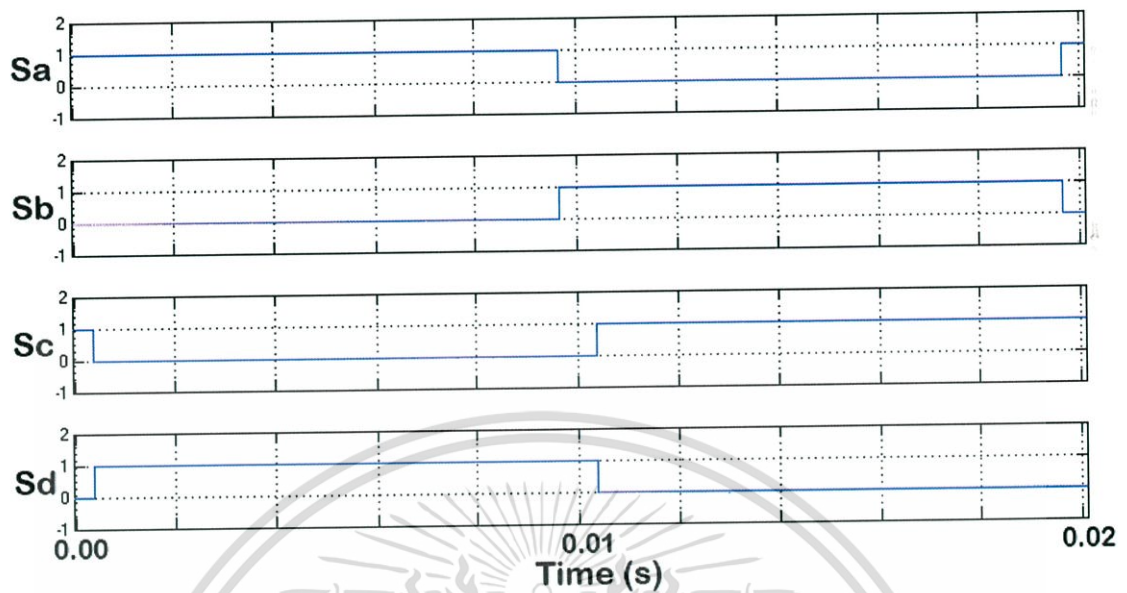
3.2.1 เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge Inverter)

เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge Inverter) ทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด - 48 โวลต์ (เซลล์แสงอาทิตย์ หรือแบตเตอรี่) เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาดแรงดันเท่ากับ ± 48 โวลต์ ความถี่เท่ากับ 50 เฮิรซ์ (Hz) เพื่อส่งพลังงานที่ได้สู่หม้อแปลงหลายชุดต่อไป

ลักษณะโครงสร้างของ H-bridge Inverter ประกอบด้วย สวิตช์กำลังชนิดมอสเฟต (MOSFET) จำนวน 4 ชุด และรับสัญญาณควบคุมจากอุปกรณ์เกตไดร์ฟ (Gate drive) จำนวน 4 สัญญาณ เพื่อควบคุมให้ทำงานของสวิตช์ตามโปรแกรมที่กำหนดสัญญาณควบคุม MOSFET ถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรมคำสั่งที่เขียนลงไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ซึ่งขนาดของสัญญาณควบคุมที่ได้จะมีขนาดแรงดันเท่ากับ 5 โวลต์ หลังจากนั้นจะส่งเข้าสู่ Gate drive เพื่อขยายสัญญาณให้มีขนาดแรงดันเท่ากับ 15 โวลต์ เพื่อควบคุม MOSFET ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Switching Signal Sequences of H-bridge



รูปที่ 3.2 สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของชุดวงจร H-bridge Inverter

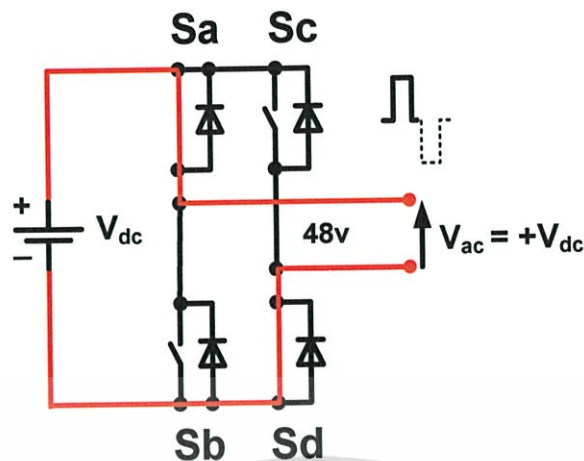
การทำงานของวงจร H-bridge Inverter สามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงสร้างรูปคลื่นแรงดันซีกบวก และช่วงสร้างรูปคลื่นแรงดันซีกลบ ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังนี้

- ช่วงสร้างรูปคลื่นแรงดันซีกบวก

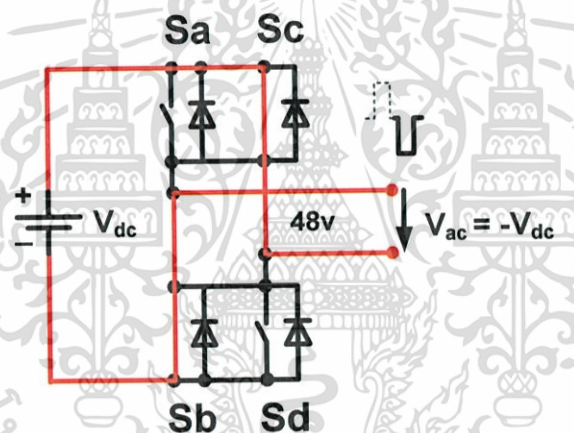
การทำงานของวงจร H-bridge Inverter ในช่วงที่มีการสร้างรูปคลื่นแรงดันซีกบวกนั้น คำสั่งควบคุมจะสั่งให้สวิตช์ S_a และสวิตช์ S_d ทำงานโดยปิดวงจรทำให้แรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ $+V_{dc}$ ซึ่งลักษณะการทำงานของสวิตช์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

- ช่วงสร้างรูปคลื่นแรงดันซีกลบ

การทำงานของวงจร H-bridge Inverter ในช่วงที่มีการสร้างรูปคลื่นแรงดันซีกลบนั้น คำสั่งควบคุมจะสั่งให้สวิตช์ S_b และสวิตช์ S_c ทำงานโดยปิดวงจรทำให้แรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ $-V_{dc}$ โดยลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 การทำงานของวงจร H-bridge Inverter ในการสร้างแรงดันซีกบวก



รูปที่ 3.4 การทำงานของวงจร H-bridge Inverter ในการสร้างแรงดันซีกลบ

3.2.2 หม้อแปลงหลายขด (Multi-winding transformer)

หม้อแปลงหลายขด (Multi-winding Transformer) ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแกนทอไรอยด์ (Toroids) โดยมีขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (primary coil) จำนวน 1 ขด มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 48 โวลต์ ส่วนขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (secondary coil) มีจำนวน 5 ขด พิกัดแรงดันเท่า 12 ,24 ,48 ,96 ,192 โวลต์ ตามลำดับ

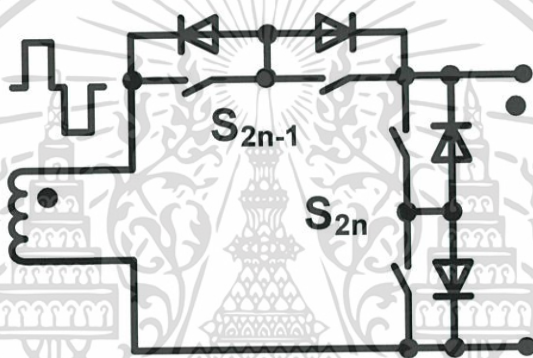
3.2.3 ชุดเอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper)

ชุดเอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper) เป็นส่วนสุดท้ายของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด โดยชุด AC-Chopper 1 ชุดมีลักษณะวงจรแสดงดังรูปที่ 3.5 ชุดวงจร AC-Chopper แต่ละชุดจะทำหน้าที่รับพลังงานจากขดลวดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงหลายขดและตัดรูปคลื่น

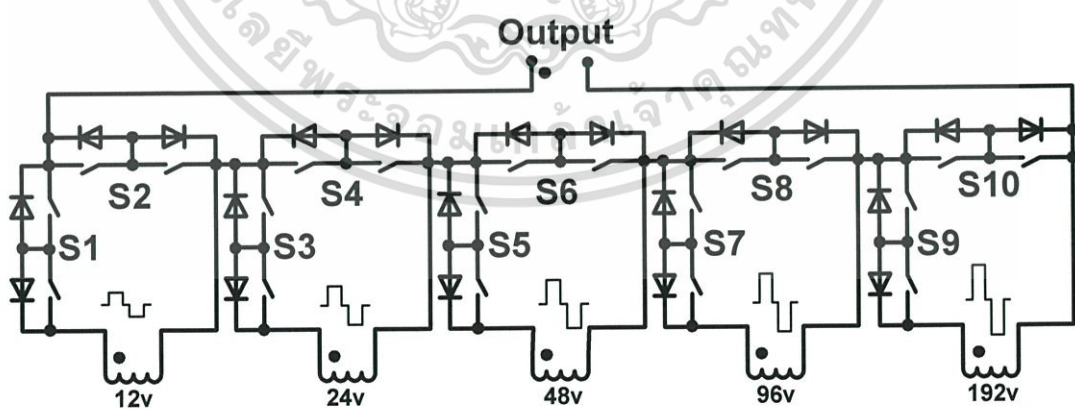
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันตามลักษณะการสวิตชิงของสวิตช์กำลัง ซึ่งในวงจร AC-Chopper จะใช้สวิตช์กำลังชนิด MOSFET และจากรูปที่ 3.5 จะเห็นว่ามีการแสดงจุด (dot) แสดงขั้วสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับขั้วของขดลวดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง เพื่อป้องกันการกลับเฟสของรูปคลื่นแรงดัน ส่วนทางด้านขาออก (output) จะต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 3.6 สำหรับสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของชุด AC-Chopper จะรับคำสั่งจากวงจรควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เช่นเดียวกับวงจร H-bridge Inverter

ชุด AC-Chopper แต่ละชุดจะประกอบด้วยสวิตช์กำลังชนิด MOSFET จำนวนสองชุด โดยแต่ละชุดจะรับสัญญาณควบคุมชุดละสัญญาณ ซึ่งชุด AC-Chopper ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ชุด AC-Chopper ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 ชุด มีสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังทั้งหมดจำนวน 10 สัญญาณ ซึ่งสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังนั้นมีลักษณะเป็นคู่สัญญาณกลับเฟสกันจำนวน 5 คู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

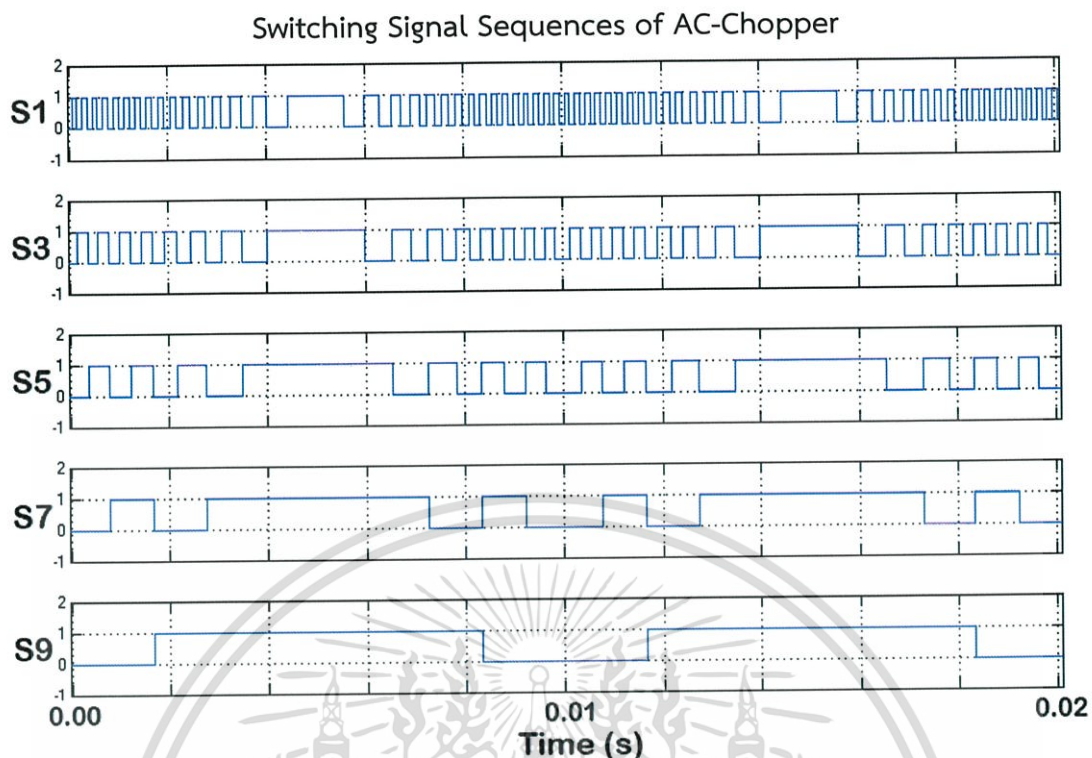


รูปที่ 3.5 วงจรเอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper)



รูปที่ 3.6 วงจรเอซี-ชอปเปอร์ ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของชุดเอซี-ชอปเปอร์

ชุด AC-Chopper มีหลักการทำงานที่สามารถข้าม (bypass) การทำงานของชุด AC-Chopper บางชุดที่ไม่ได้ทำงานได้ โดยหลักการทำงานดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยการนำชุด AC-Chopper จำนวน 2 ชุดมาต่ออนุกรมกัน ซึ่งการทำงานในช่วงรูปคลื่นซีกบวก สวิตช์ S_a และ S_c ของ H-bridge Inverter จะทำงาน ส่วนการทำงานในช่วงรูปคลื่นซีกลบ สวิตช์ S_b และ S_d ของ H-bridge Inverter จะทำงาน และจะทำงานสลับกันไป ส่วนชุด AC-Chopper มีลำดับการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

ช่วงที่ 1 สวิตช์ S_a และสวิตช์ S_d ของ H-bridge Inverter ทำงานโดยปิดวงจร แต่ส่วนของชุด AC-Chopper นั้นยังไม่ทำงาน

ช่วงที่ 2 สวิตช์ S_a และสวิตช์ S_d ของ H-bridge Inverter ทำงานโดยปิดวงจร และส่วนของชุด AC-Chopper นั้น สวิตช์ S_1 จะทำงานโดยเชื่อมต่อแรงดันจากหม้อแปลงไปสู่ด้านขาออกของวงจร และสวิตช์ S_4 ทำงานโดย by pass การเชื่อมต่อวงจรจากหม้อแปลงไป จึงทำให้ได้แรงดันขาออก ณ จุดนั้นมีค่าเท่ากับ 24 V

ช่วงที่ 3 สวิตช์ S_a และสวิตช์ S_d ของ H-bridge Inverter ทำงานโดยปิดวงจร และส่วนของชุด AC-Chopper นั้น สวิตช์ S_2 จะทำงานโดยเชื่อมต่อแรงดันจากหม้อแปลงไปสู่ด้านขาออกของวงจร และสวิตช์ S_3 ทำงานโดย by pass การเชื่อมต่อวงจรจากหม้อแปลงไป จึงทำให้ได้แรงดันขาออก ณ จุดนั้นมีค่าเท่ากับ 48 V

ช่วงที่ 4 สวิตช์ S_a และสวิตช์ S_d ของ H-bridge Inverter ทำงานโดยปิดวงจร และส่วนของชุด AC-Chopper นั้น สวิตช์ S_1 และ สวิตช์ S_3 จะทำงานโดยเชื่อมต่อแรงดันจากหม้อแปลงไปสู่

ด้านขาออกของวงจร AC-Chopper ทั้งสองชุดที่ต่ออนุกรมกัน แรงดันที่ได้จะมีค่าเสริมกัน จึงได้แรงดันขาออก ณ จุดนั้นที่มีค่าเท่ากับ 72 V

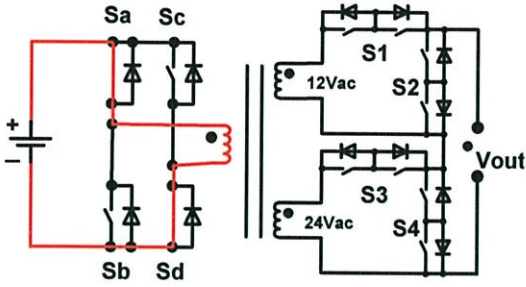
ช่วงที่ 5 สวิตช์ S_a และสวิตช์ S_d ของ H-bridge Inverter ทำงานโดยปิดวงจร และส่วนของชุด AC-Chopper นั้น สวิตช์ S_2 และ สวิตช์ S_3 จะทำงาน ทำให้แรงดันขาออกที่ได้มีค่าลดลง และมีแรงดันขาออก ณ จุดนั้นเท่ากับช่วงที่ 3 คือมีค่าเท่ากับ 48 V

ช่วงที่ 6 สวิตช์ S_a และสวิตช์ S_d ของ H-bridge Inverter ทำงานโดยปิดวงจร และส่วนของชุด AC-Chopper นั้น สวิตช์ S_1 และ สวิตช์ S_4 จะทำงาน ทำให้แรงดันขาออกที่ได้มีค่าลดลง และมีแรงดันขาออก ณ จุดนั้นเท่ากับช่วงที่ 2 คือมีค่าเท่ากับ 24 V

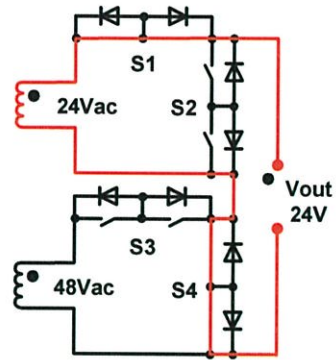
ช่วงที่ 7 สวิตช์ S_a และสวิตช์ S_d ของ H-bridge Inverter ทำงานโดยปิดวงจร และส่วนของชุด AC-Chopper นั้น สวิตช์ทุกตัวจะหยุดทำงานทำให้แรงดันขาออกที่ได้ ณ จุดนั้นจึงมีค่าเท่ากับ 0 V

ช่วงที่ 8 สวิตช์ S_b และสวิตช์ S_c ของ H-bridge Inverter ทำงานโดยปิดวงจรสร้างแรงดันซีกลบ และส่วนของชุด AC-Chopper นั้น สวิตช์ทุกตัวยังคงหยุดทำงานอยู่ จึงทำให้แรงดันขาออกที่ได้ เท่ากับ 0 V

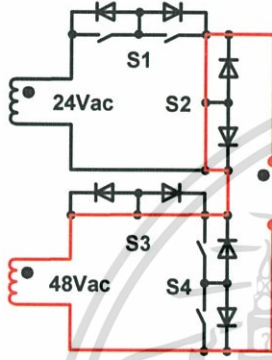
ภายหลังจากการทำงานของชุด AC-Chopper ในช่วงที่ 8 แล้ว ชุด AC-Chopper จะวนมาทำงานอีกครั้งโดยจะเริ่มทำงานตั้งแต่ช่วงที่ 2 ถึงช่วงที่ 8 ตามลำดับ ซึ่งการทำงานของชุด AC-Chopper ที่ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 ชุดนั้น ก็มีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกัน



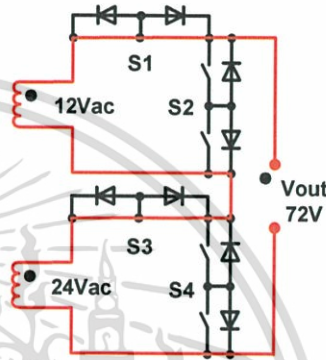
(ก) ช่วงที่ 1



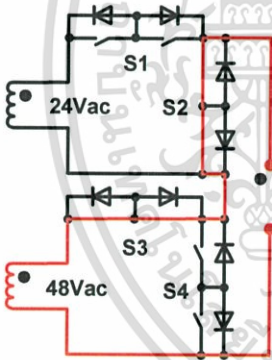
(ข) ช่วงที่ 2



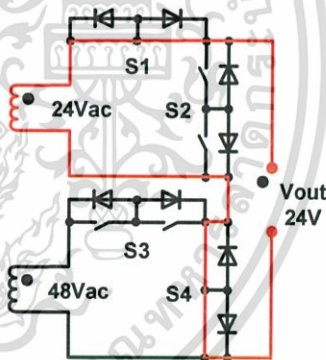
(ค) ช่วงที่ 3



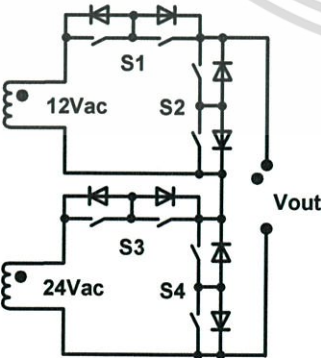
(ง) ช่วงที่ 4



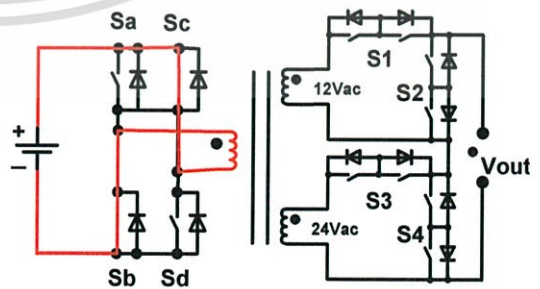
(จ) ช่วงที่ 5



(ฉ) ช่วงที่ 6

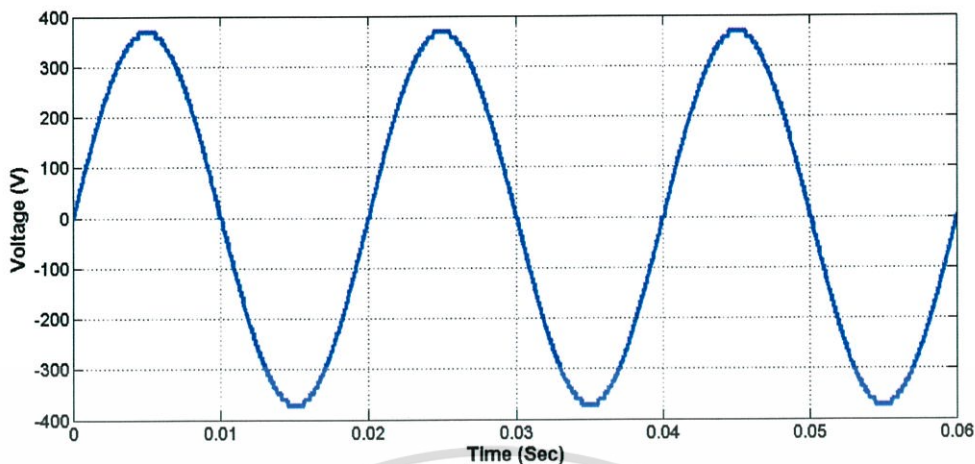


(ช) ช่วงที่ 7



(ซ) ช่วงที่ 8

รูปที่ 3.8 ลำดับการทำงานของสวิตช์กำลังของชุด AC-Chopper จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด

ดังนั้น ชุด AC-Chopper มีทำหน้าที่รวมสัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เป็นลักษณะลำดับขั้น และเมื่อทำการรวมสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดแล้วจะทำให้ได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal waveform) ดังรูปที่ 3.9

3.3 การออกแบบสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิชท์กำลัง

วงจร AC-Chopper ทำหน้าที่ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เป็นระดับขั้น ซึ่งสามารถสร้างได้จากการนำชุด AC-Chopper มาต่ออนุกรมกันจำนวน 5 ชุด และต่อเข้ากับขดลวดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ทำให้สามารถรวมเป็นรูปคลื่นแรงดันได้หลายระดับขั้น โดยเราสามารถสร้างระดับแรงดันที่แตกต่างกันได้มากที่สุดคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 ซึ่งจำนวนแรงดันที่สามารถสร้างได้คือ 63 ระดับ

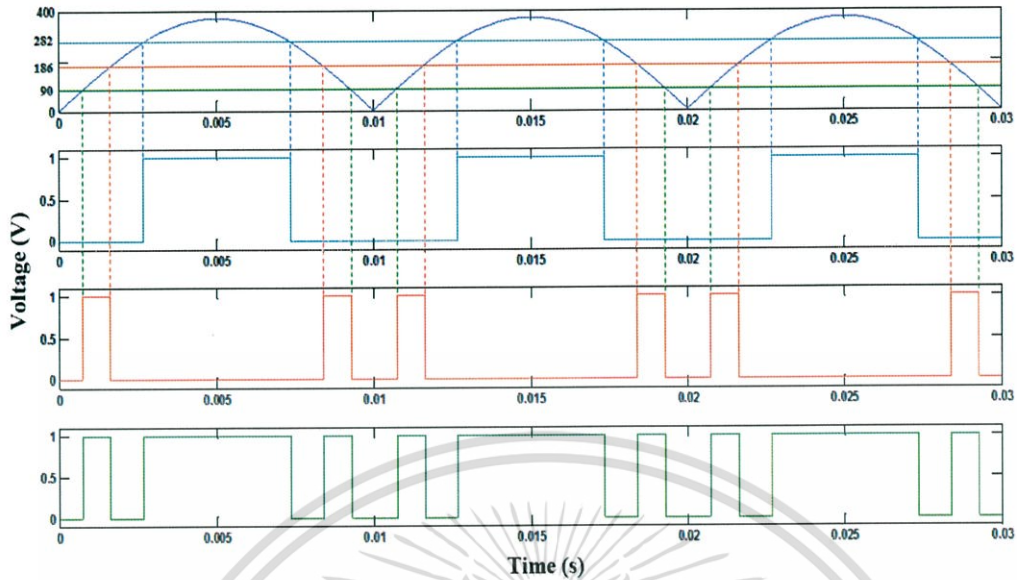
$$p = 2^n - 1 \quad (3.1)$$

$$n_{level} = (2 \times p) + 1 \quad (3.2)$$

$$m_i = \frac{V_{rms}}{V_{peak}/\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

โดยที่	n	คือ จำนวนขดของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิ
	p	คือ จำนวนของระดับขั้นใน $\frac{1}{4}$ ของ 1 ลูกคลื่น
	n_{level}	คือ จำนวนของระดับขั้นของแรงดันขาออก
	V_{rms}	คือ แรงดันเอาต์พุต rms ที่ต้องการ
	V_{peak}	คือ แรงดันเอาต์พุต peak ที่ $m_i=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ S₇

การสร้างสัญญาณควบคุมวงจร AC-Chopper ในวิทยานิพนธ์นี้ จะยกตัวอย่างการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ S₇ ที่ค่ามอดดูเลตเท่ากับ 1.00 ($m_i = 1.00/1.00$) จะสร้างรูปคลื่นสัญญาณไซน์สมบูรณ์ (Absolute sine wave) ที่มีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ 372 โวลต์ ความถี่เท่ากับ 50 Hz ตัดกับรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับแรงดันทำงานของชุด AC-Chopper ชุดที่ 4 นั่นคือที่แรงดันเท่ากับ 90, 186 และ 282 โวลต์ตามลำดับ และนำรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากแต่ละระดับมารวมเป็นสัญญาณเดียว จึงทำให้ได้สัญญาณควบคุมวงจรมีดังรูปที่ 3.10 สาเหตุที่เลือกใช้ระดับแรงดันไฟตรงดังกล่าวแทนที่จะเป็น 96, 192 และ 288 โวลต์ เนื่องจากรูปคลื่นแรงดันขาออกจะมีระดับขั้นแรงดันเปลี่ยนทุกๆ 12 โวลต์ ตามที่อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างระดับขั้นขึ้นได้ จึงต้องทำการกำหนดให้ขอบของการเปลี่ยนแรงดันในแต่ละระดับอยู่ระหว่างระดับแรงดันนั้นๆ เช่น ที่ระดับ 96 โวลต์ จะมีขอบการเปลี่ยนระดับอยู่ที่ 90 และ 102 โวลต์ ตามลำดับ เพื่อที่จะทำให้รูปคลื่นแรงดันขาออกนั้นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากที่สุด

3.4 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด (PV Stand-alone) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) H-bridge Inverter 2) หม้อแปลงหลายชุด จำนวน 5 ชุด และ 3) ชุด AC-Chopper จำนวน 5 ชุด รวมถึงหลักการทำงานและเทคนิควิธีการควบคุมสัญญาณขับสวิตช์กำลังของชุด H-bridge Inverter และชุด AC-Chopper สำหรับแบบการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะนำเสนอต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 4

การจำลองการทำงาน

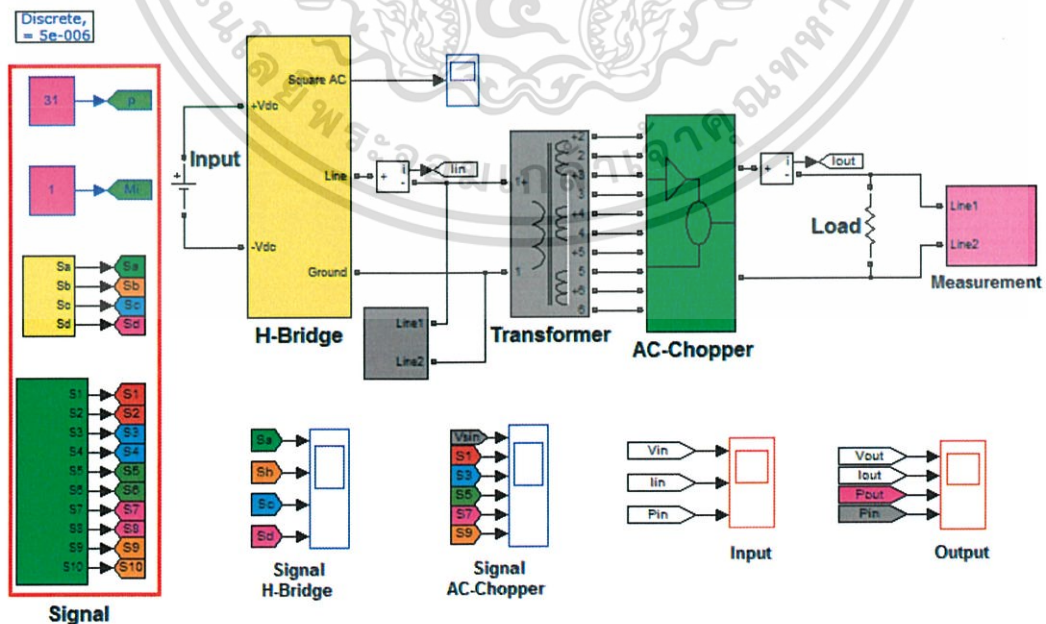
4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเป็นการยืนยันถึงหลักการว่าถูกต้อง และเป็นไปตามทฤษฎี ก่อนที่นำไปสร้างเครื่องต้นแบบต่อไป

4.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

4.2.1 วัตถุประสงค์การจำลอง

เพื่อเป็นการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองการทำงานรวมถึงการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง เพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 และ 3 ก่อนที่จะนำไปสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับต่อไป สำหรับแผนผังการจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4. 1 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

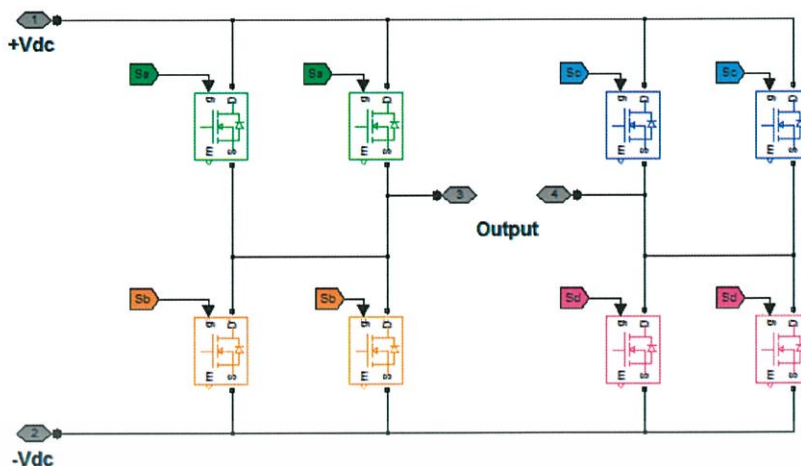
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ขั้นตอนการจำลอง

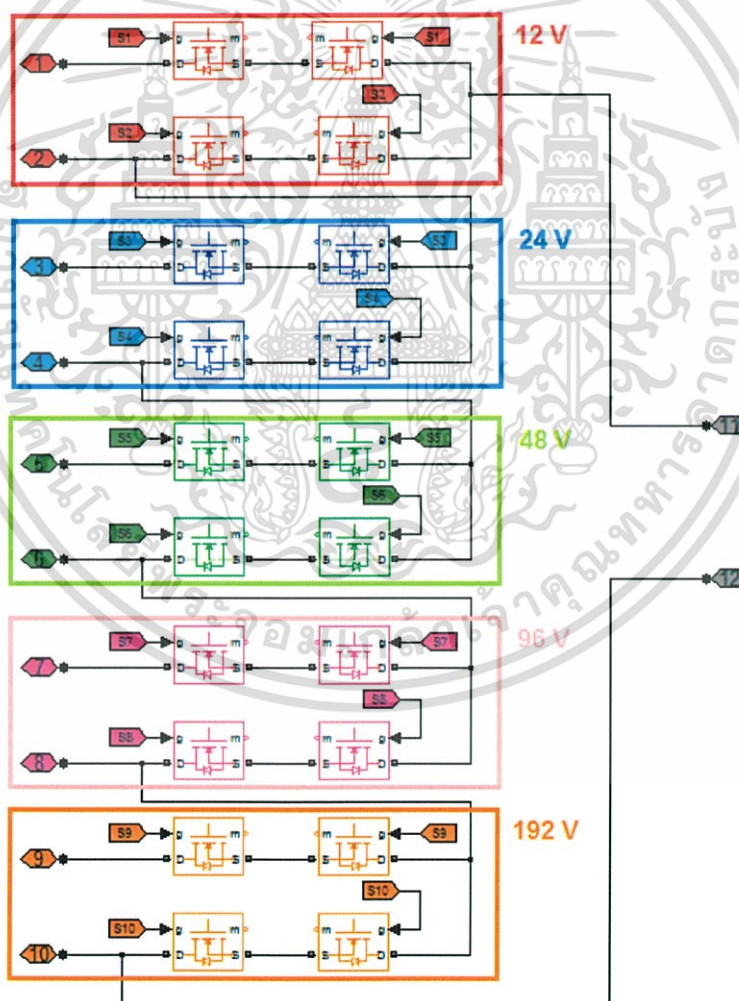
สำหรับขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ภายในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ และการสร้างแบบจำลองแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

การสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ภายในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) ชุดวงจร H-bridge Inverter (2) หม้อแปลงหลายชุด และ (3) ชุด AC-Chopper โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ให้ตรงกับค่าของอุปกรณ์ที่จะใช้จริง ซึ่งในรูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองในส่วนของวงจร H-bridge Inverter ซึ่งมีลักษณะการทำงานเริ่มจากรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 โวลต์ จากแหล่งจ่าย (เซลล์แสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่) จากนั้นให้สวิตช์กำลังของวงจร H-bridge Inverter ทำการเรียงแรงดันไฟฟ้าให้ได้อุปกรณ์แรงดันสี่เหลี่ยมขนาด 48 โวลต์ และมีความถี่เท่ากับ 50 Hz โดยให้สวิตช์กำลังชุดแรกของ H-bridge Inverter คือ S_a กับ S_d ทำงานพร้อมกัน และสวิตช์กำลังชุดสองคือ S_b และ S_c ทำงานพร้อมกัน ซึ่งสวิตช์กำลังของ H-bridge Inverter ทั้งสองชุดนี้จะต้องทำงานไม่พร้อมกัน หลังจากนั้นนำแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด 48 โวลต์ ที่ได้จาก H-bridge Inverter ไปจ่ายให้กับหม้อแปลงหลายชุดทางด้านขดปฐมภูมิเพื่อแปลงแรงขนาดแรงดันไฟฟ้าให้เป็น 5 ระดับแรงดันทางด้านทุติยภูมิดังนี้ 12, 24, 48, 96, 192 โวลต์ ตามลำดับ และจ่ายแรงดันทั้ง 5 ระดับแรงดันนั้นเข้าสู่ส่วนของชุด AC-Chopper ทั้ง 5 ชุดต่อไป เพื่อให้สวิตช์กำลังในแต่ละชุดของ AC-Chopper ทำการเรียงแรงดันไฟฟ้าให้ได้แบบที่ต้องการดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ส่วนรูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองการทำงานของสวิตช์กำลังของชุด AC-Chopper

การสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ควบคุมสวิตช์กำลังนั้นแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ (1) สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของวงจร H-bridge Inverter และ (2) สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของชุด AC-Chopper โดยสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจร H-bridge Inverter จะใช้สัญญาณควบคุมแบบ PWM (pulse width modulation) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ฐาน (fundamental frequency) เท่ากับ 50 Hz ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกจะป้อนให้กับสวิตช์ S_a และสวิตช์ S_b ซึ่งสัญญาณจะมีลักษณะตรงข้ามกัน ส่วนที่สองคือสัญญาณที่ป้อนให้กับสวิตช์ S_c และสวิตช์ S_d ที่มีลักษณะตรงข้ามกันเช่นเดียวกัน สัญญาณที่ป้อนให้กับสวิตช์ S_a จะช้ากว่าสัญญาณที่ป้อนให้กับสวิตช์ S_c เป็นเวลา 0.035 มิลลิวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังที่ป้อนให้กับชุด AC-Chopper นั้น เกิดจากการนำสัญญาณรูปคลื่นไซน์ไปคูณกับค่าดัชนีมอดดูเลต (m_i) ก่อน แล้วนำไปทำให้เป็นค่าสัมบูรณ์ (absolute) ก่อนที่จะนำไปเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสัญญาณเส้นตรงที่ได้จากการคำนวณ ถ้าค่ารูปคลื่นไซน์สัมบูรณ์ (absolute sine wave) มากกว่ารูปคลื่นเส้นตรง ให้แสดงค่าเป็น 1 แต่ถ้าค่า absolute sine wave มีค่าน้อยกว่าให้แสดงค่าเป็น 0 หลังจากนั้นจะนำรูปคลื่นสัญญาณที่ได้ไปใช้ในการควบคุมสวิตช์กำลังของชุด AC-Chopper ทั้ง 5 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4.5

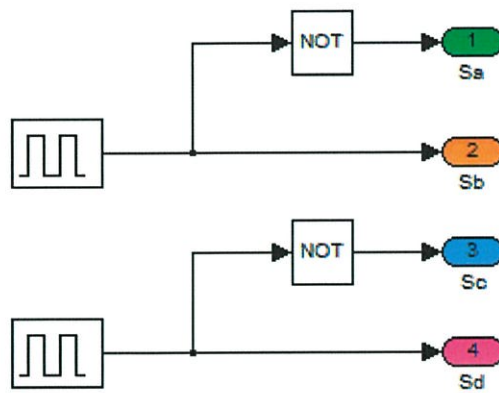


รูปที่ 4.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับวงจร H-bridge Inverter

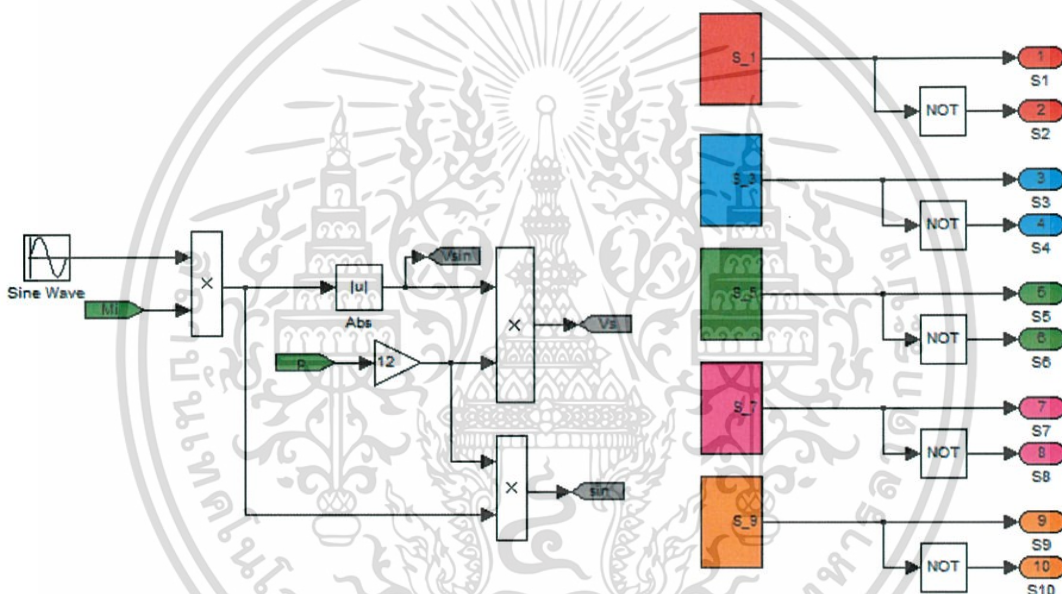


รูปที่ 4.3 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับชุด AC-Chopper

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แบบจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของ H-bridge Inverter



รูปที่ 4.5 แบบจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของชุด AC-Chopper

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 โวลต์ให้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดและการจำลองภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานและภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ไฟฟ้า

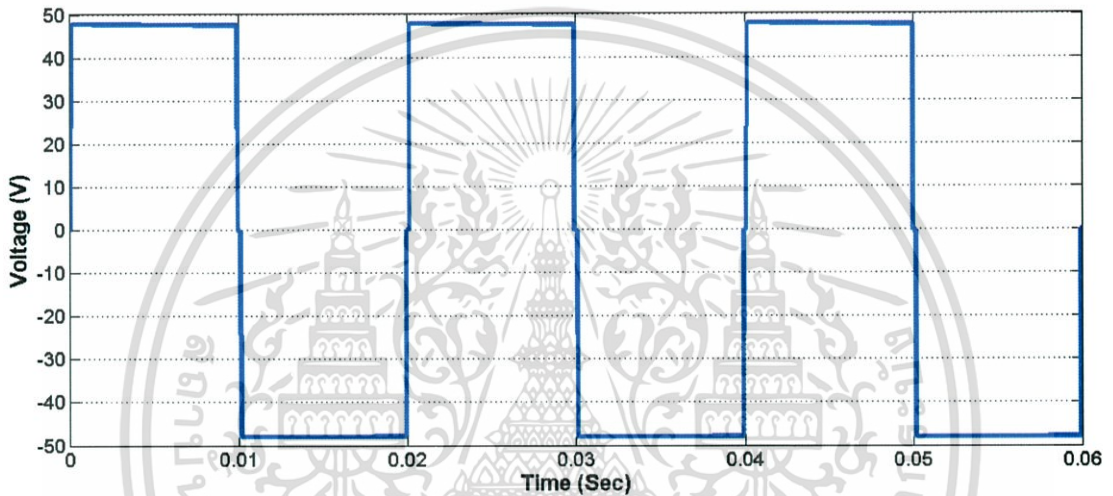
4.3 ผลการทดลองแบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink สามารถจำลองการทำงานเพื่อศึกษารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า และค่าทางไฟฟ้าก่อนนำไปสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดต่อไป โดยผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ผลเป็นดังนี้

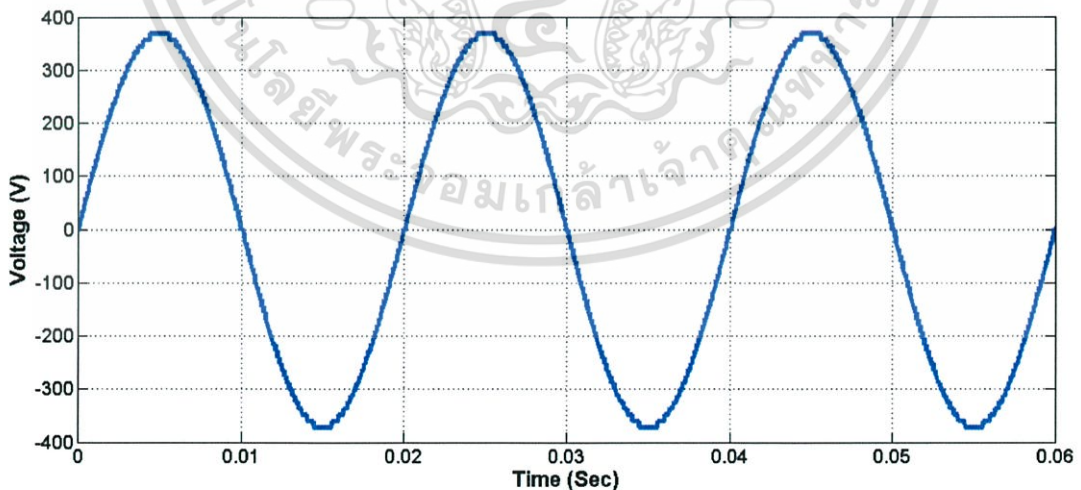
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของวงจร H-bridge Inverter จะได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในลักษณะรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) แสดงดังรูปที่ 4.6 จากนั้นได้ทำการสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าลักษณะรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 12, 24, 48, 96, 192 โวลต์ตามลำดับ ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบหลายขดแรงดันและทำการรวมรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้วยชุด AC-Chopper ซึ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด นี้จะมีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับวงจร H-bridge Inverter



รูปที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด

4.3.2 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก

การรักษาาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกหรือการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด สามารถทำได้ 2 วิธี คือ 1) การเปลี่ยนจำนวนชั้นของแรงดัน (p) และ 2) การเปลี่ยนค่าดัชนีมอดดูเลต (Modulation index, m_i) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าขาออกจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนระดับชั้นเพิ่มสูงขึ้นหรือค่าดัชนีมอดดูเลตมีค่าสูง ดังนั้น การหารูปแบบสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถทำได้โดยกำหนดให้จำนวนชั้นของแรงดันตั้งต้นที่ $p=31$ และค่าดัชนีมอดดูเลตมีค่าเท่ากับ $m_i=1.00/1.00$ ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า จะได้ระดับชั้นของแรงดันขาออกสูงสุดที่ 63 ชั้น และมีแรงดันยอดที่ 372 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่อจำนวนระดับชั้นของแรงดันลดลง ส่งผลทำให้ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (THD_v) มีค่ามากขึ้นด้วย สำหรับการควบคุมแรงดันนั้นจะใช้การควบคุมวงเปิด (Open loop) โดยการรับคำสั่งเพิ่มหรือลดระดับแรงดันจากภายนอก

4.3.2.1 การทดลองโดยคงที่ค่าดัชนีมอดดูเลต และทำการปรับจำนวนชั้นของแรงดัน

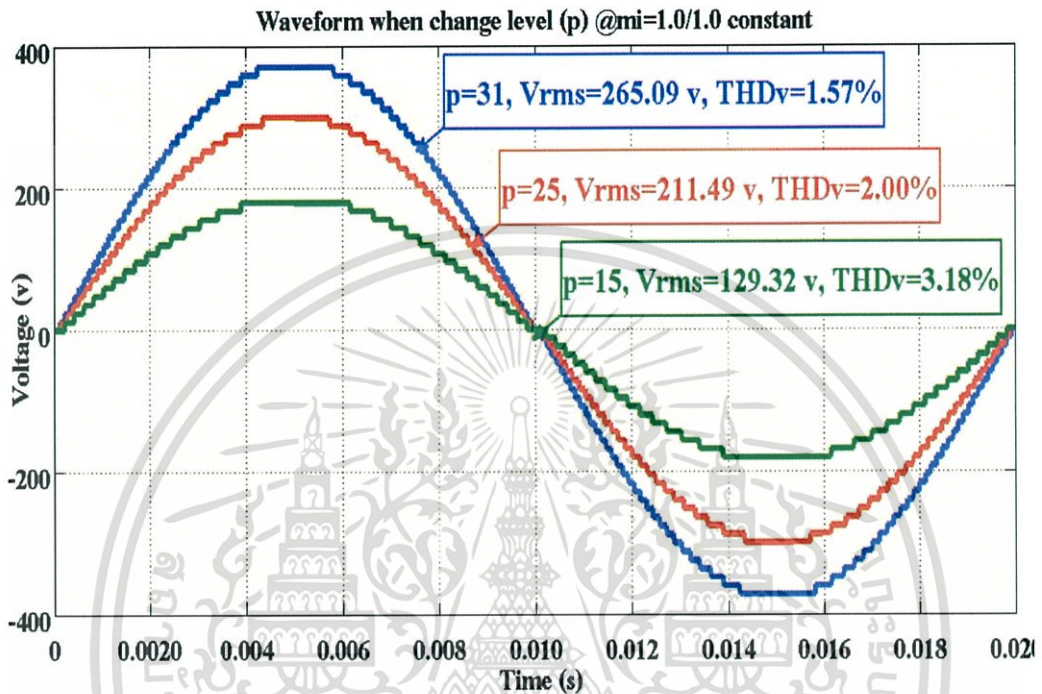
กำหนดค่าดัชนีมอดดูเลตคงที่ไว้ที่ $m_i = 1.00/1.00$ แล้วทำการปรับจำนวนชั้นของแรงดันไฟฟ้างี้ $p = 15, 25$ และ 31 ที่ $p = 15$ จะได้แรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 129.32 โวลต์ (V_{rms}) มีระดับชั้นของแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 31 ระดับ และค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า $THD_v = 3.18\%$ ต่อมาทำการปรับค่า p โดยให้ $p = 25$ จะได้แรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 211.49 โวลต์ (V_{rms}) มีระดับชั้นของแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 51 ระดับ และมีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า $THD_v = 2.00\%$ สุดท้ายทำการปรับค่า p โดยให้ $p = 31$ จะได้แรงดันขาออกเท่ากับ 265.09 โวลต์ (V_{rms}) มีระดับชั้นของแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 63 ระดับ และมีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่ำเพียง $THD_v = 1.57\%$ ดังนั้น ถ้าต้องการคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าขาออกที่มีคุณภาพดีจะต้องปรับค่า p ให้มีค่ามาก ซึ่งค่า p ควรมีค่าเท่ากับ 31 เนื่องจากให้ระดับชั้นของแรงดันขาออกที่ 63 ระดับ ทำให้คุณภาพของสัญญาณแรงดันดีที่สุดในเรื่องค่าความผิดเพี้ยนต่ำเพียง 1.57 % ดังแสดงในรูปที่ 4.8

4.3.2.2 การทดลองโดยคงที่จำนวนชั้นของแรงดัน และทำการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต

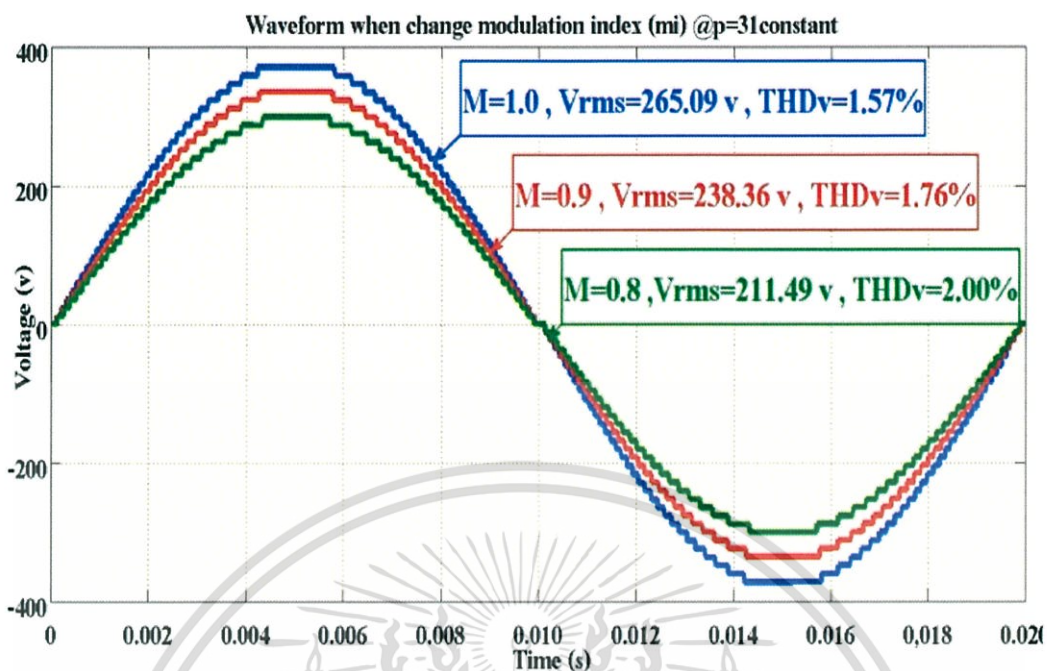
ภายหลังจากการทดลองปรับค่า p และพบว่า $p = 31$ จะทำให้ได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่มีคุณภาพดีแล้ว หลังจากนั้นจะเป็นการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต m_i เพื่อเป็นการปรับคุณภาพของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกแบบละเอียด ดังนี้ กำหนดให้ p มีค่าคงที่ $p = 31$ และทำการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต $m_i = 0.80/1.00$ พบว่า จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก เท่ากับ 211.49 โวลต์ (V_{rms}) มีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก $THD_v = 2.00\%$ ต่อมาทำการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต $m_i = 0.90/1.00$ พบว่า จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก เท่ากับ 238.36 โวลต์ (V_{rms}) มีค่าความผิดเพี้ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรูปคลื่นแรงไฟฟ้าดันไฟฟ้าขาออก $THD_v = 1.76\%$ และสุดท้ายทำการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต $m_i = 1.00/1.00$ พบว่า จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก เท่ากับ 265.09 โวลต์ (V_{rms}) มีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงไฟฟ้าดันไฟฟ้าขาออก $THD_v = 1.57\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



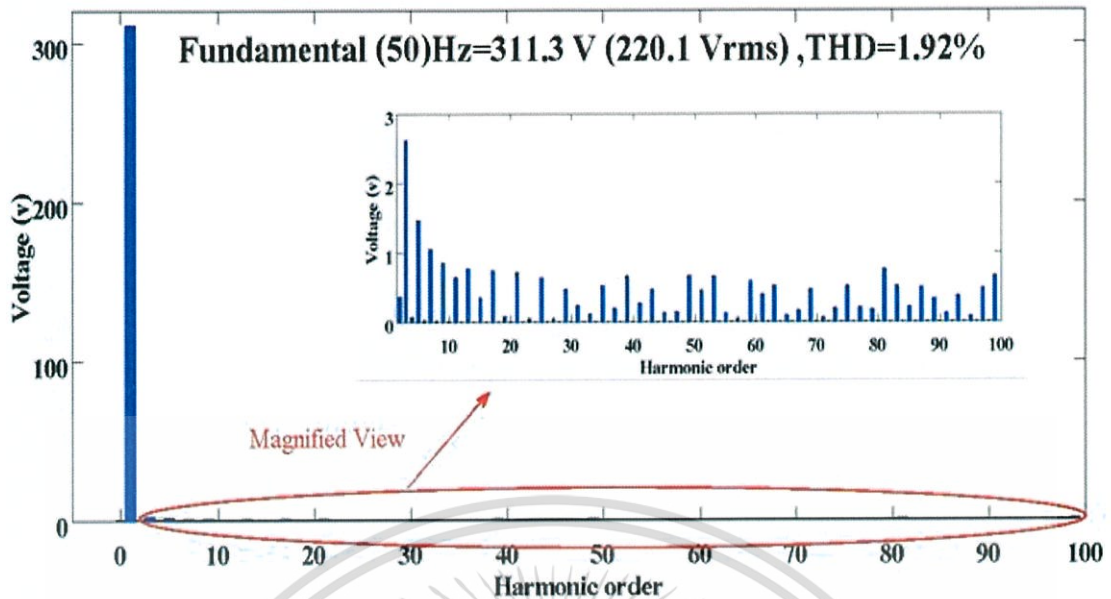
รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการทดลองเมื่อคงที่ค่าดัชนีมอดดูเลตที่ $m_i=1.00/1.00$ แล้วปรับค่า $p = 15, 25$ และ 31



รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการทดลองเมื่อคงที่ค่า $p = 31$ แล้วปรับค่าดัชนีมอดูเลต $m_i = 0.80, 0.90$ และ $1.00/1.00$

จากการจำลองพบว่า ระดับชั้นของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการปรับตัวแปร 2 ตัว คือ ค่า p และ ค่า m_i โดยถ้าต้องการคุณภาพของแรงดันสูง ตัวแปรที่นำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงคุณภาพแรงดัน คือ ค่า p ส่วนค่า m_i ก็ใช้ได้เหมือนกับค่า p เพียงแต่การปรับค่า m_i นั้นมีช่วงที่จำกัดเนื่องจาก m_i มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 จึงสรุปได้ว่า การหาระดับชั้นหรือรูปแบบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด คือ ระดับแรงดัน $p = 31$ และดัชนีมอดูเลต $m_i = 1.0/1.0$ ทำให้ได้รูปคลื่นระดับชั้นของแรงดันเท่ากับ 63 ระดับ และมีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่ำเพียง 1.57% และถึงแม้จำนวนระดับแรงดันจะมีจำนวนมากและทำให้ต้องสวิตซ์ซึ่งที่ความถี่สวิตซ์สูง แต่ค่าความสูญเสียเนื่องจากการสวิตซ์ (switching loss) ไม่มีผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียเนื่องจากการนำกระแส (conduction loss)

แต่สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายในประเทศไทยเป็นแบบ 3 เฟส 4 สาย มีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 380/220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรซ์ (Hz) ทำให้การหาระดับชั้นหรือรูปแบบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดสำหรับระบบจำหน่ายของประเทศไทย คือ $p = 31$ และ $m_i = 0.832/1.00$ จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 220 โวลต์ (V_{rms}) ความถี่เท่ากับ 50 Hz และมีค่าผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า THD_v ต่ำเพียง 1.92% ดังแสดงในรูปที่ 4.10



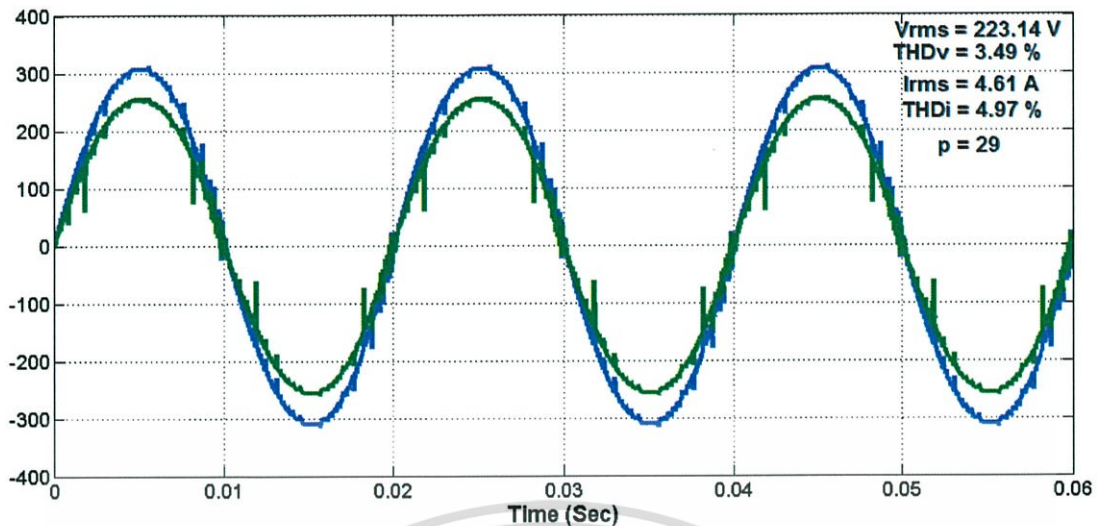
รูปที่ 4.10 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าขาออก (THD_v) ที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วย เซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดสำหรับระบบจำหน่ายในประเทศไทย ณ $p = 31$ และ $m_i = 0.832/1.00$

4.3.2.3 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อจ่ายภาระ ไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 1 กิโลวัตต์

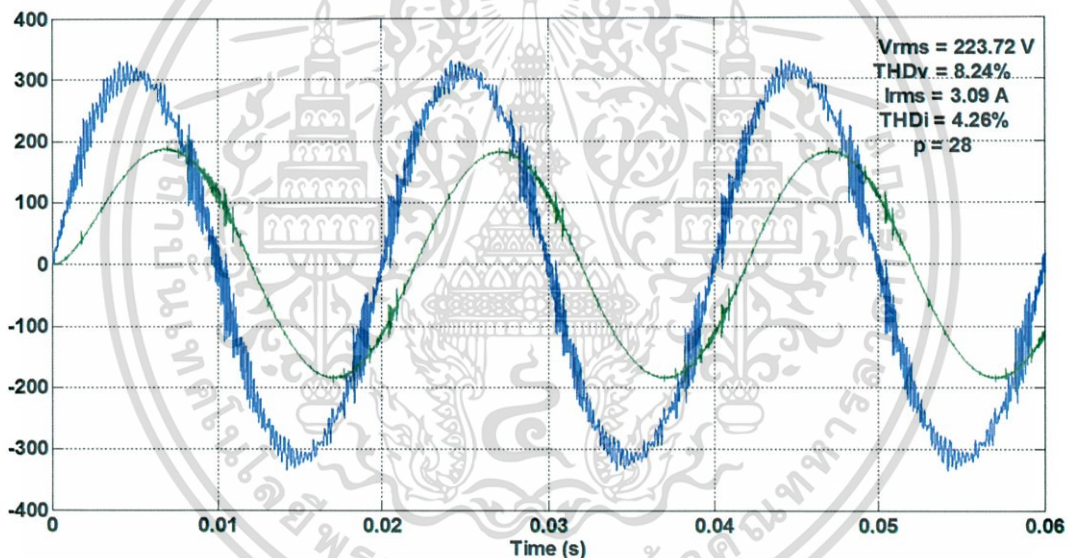
รูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของ อินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีมุมเฟสตรงกัน ($\theta = 0$) และ ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 223.14 โวลต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดัน (THD_v) มีค่าเท่ากับ 3.49 % ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4.61 แอมป์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน ของแรงดันไฟฟ้า (THD_i) มีค่าเท่ากับ 3.49 % ที่ดัชนีมอดดูเลตเท่ากับ 0.98 ($m_i = 0.98/1.00$) ซึ่งพบว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีประสิทธิภาพรวมอยู่ที่ 86 % ซึ่งมีค่าความสูญเสีย (loss) ในวงจร H-bridge Inverter เท่ากับ 8.33 % เป็นค่าความสูญเสียในหม้อแปลงเท่ากับ 2.00 % และเป็นค่าความสูญเสียในชุด AC-Chopper เท่ากับ 4.27 %

4.3.2.4 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อจ่ายภาระ ไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ขนาด 746 วัตต์ ตัวประกอบกำลังล้าหลัง 0.8

รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของ อินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ามีเฟสนำหน้า (lead) รูปคลื่น กระแสไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 223.72 โวลต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนทาง แรงดันไฟฟ้า (THD_v) มีค่าเท่ากับ 8.24 % ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.09 แอมป์ ค่าเปอร์เซ็นต์ ความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ามี่ค่า (THD_i) เท่ากับ 4.26 % ที่ดัชนีมอดดูเลตเท่ากับ 0.90 ($m_i = 0.90/1.00$) และมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 90 %



รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์

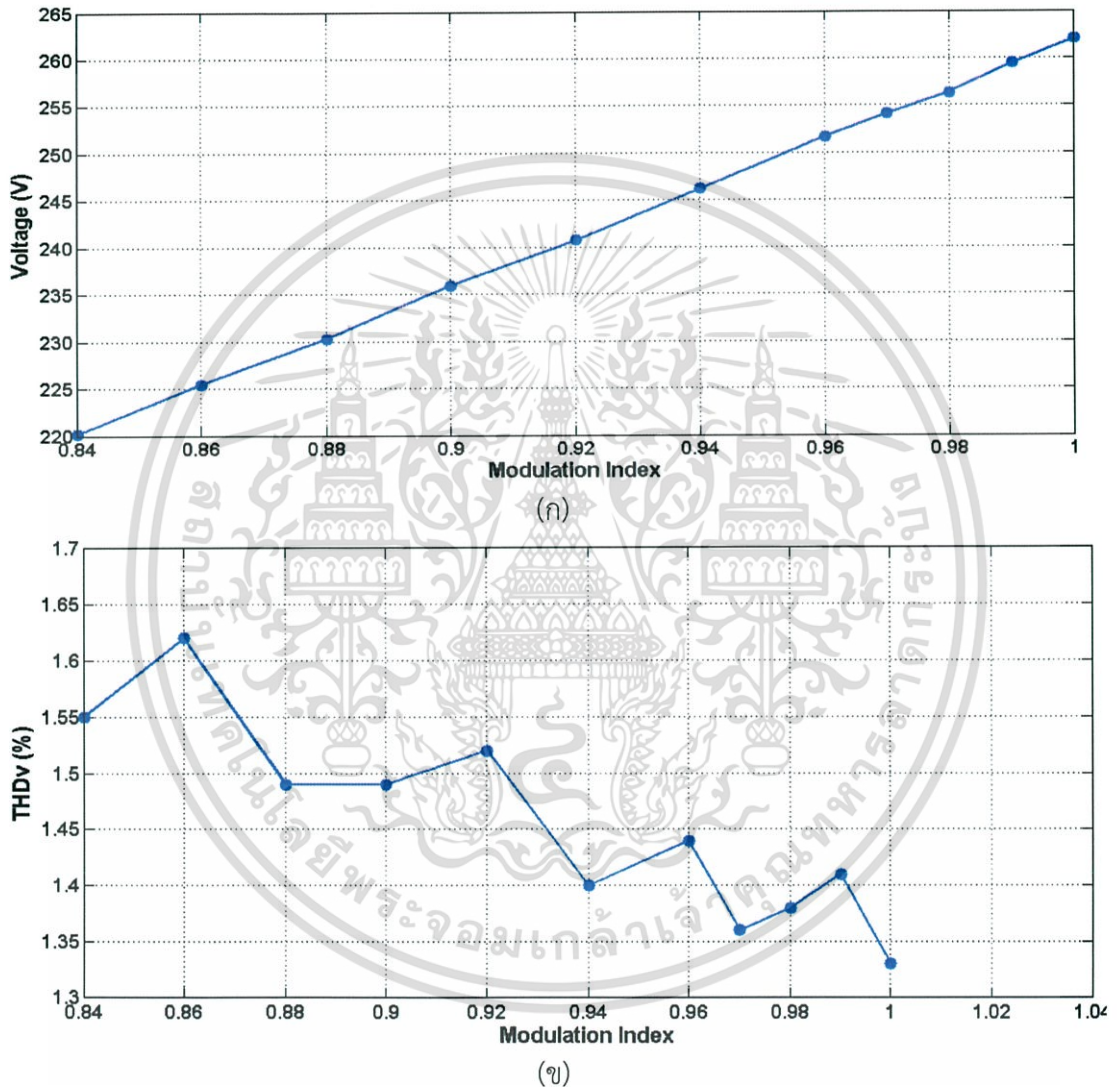


รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ขนาด 746 วัตต์

4.3.3 สรุปผลการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถปรับเปลี่ยนให้มีความใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ได้ โดยการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต (modulation index : m_i) ซึ่งการปรับค่าดัชนีมอดดูเลตเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเพิ่มขึ้น และรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์มากขึ้น ซึ่งรูปที่ 4.13 (ก) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดดูเลตกับค่าแรงดันไฟฟ้า คือ ที่สภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้า (no load) เมื่อเพิ่มค่าดัชนีมอดดูเลตขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเพิ่มขึ้นด้วย และค่าความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าก็จะลดลงด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 4.13 (ข) แสดงว่า ค่าดัชนีมอดดูเลตจะแปรผันตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าแต่จะแปรผกผันกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีการจ่ายโหลดมากขึ้นจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขาออกตกลง ดังนั้น หากต้องการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้คงที่ ก็ให้ปรับค่าดัชนีมอดูเลตในการควบคุมแรงดันไฟฟ้า สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าดัชนีมอดูเลตเท่ากับ 0.84 ($m_i = 0.84/1.00$) เป็นค่าเริ่มต้นการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้ในขณะที่ไม่มีภาระไฟฟ้ามักมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทย (220 โวลต์) และสามารถทำการเพิ่มแรงดันขึ้นได้ประมาณ 5 โวลต์ต่อการปรับดัชนีมอดูเลตที่เพิ่มขึ้น 0.02



รูปที่ 4.13 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก
(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก

4.4 บทสรุป

บทนี้นำเสนอ การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจากการจำลองพบว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับ ทั้งในสภาวะที่ยังไม่จ่ายภาระทางไฟฟ้า (no load) และจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ ซึ่งได้ผลถูกต้องตามหลักการ ในบทถัดไปจะเป็นการนำเสนอการระบุตำแหน่งความผิดพร่องในอินเวอร์เตอร์หลายระดับด้วยเทคนิคโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุตำแหน่งความผิดปกติในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

5.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการวิเคราะห์ตำแหน่งความผิดปกติ (fault location) ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดโดยใช้โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม (Neural Network : NN) เนื่องจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีสวิตช์กำลังจำนวนมาก เมื่อเกิดความผิดปกติ (fault) ขึ้น การวิเคราะห์หาตำแหน่งของความผิดปกติด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์เป็นไปได้ยากและมีความซับซ้อน เนื่องจากเป็นปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมจึงถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ซึ่งเป็นสัญญาณในโดเมนเวลา (time domain) ผ่านการแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ (frequency domain) ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อหาคุณลักษณะเด่นของสัญญาณ (Feature Extraction System) ก่อนนำไปวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งความผิดปกติในอินเวอร์เตอร์หลายระดับต่อไป เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis : PCA) ถูกนำมาใช้ในการลดจำนวนตัวแปรอินพุตของโมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมแบบหลายชั้น (Multilayer Neural Network หรือ Multilayer Perceptrons : MLP) ในการทำนายความผิดปกติในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด

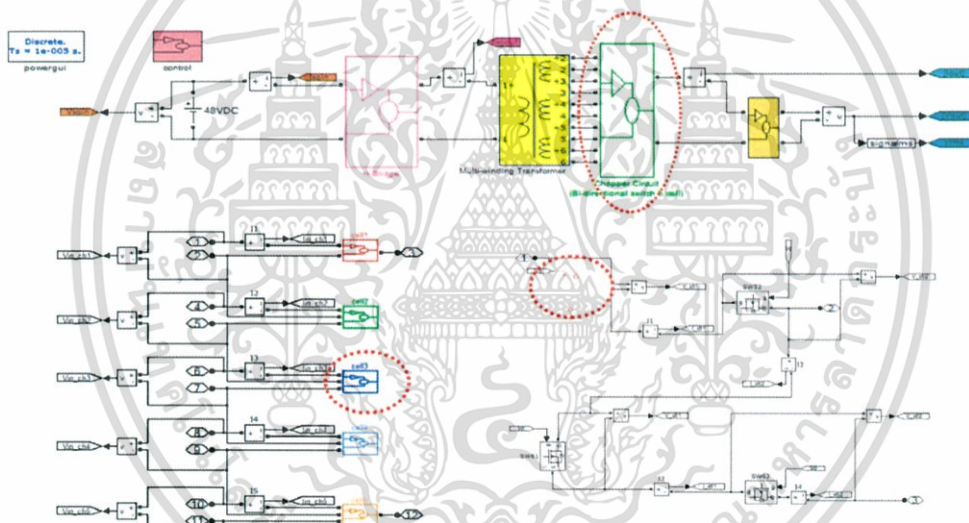
5.2 การจำลองความผิดปกติของสวิตช์กำลัง

การจำลองการทำงานเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งความผิดปกติของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ได้จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งได้อธิบายหลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดแล้วในบทที่ 3 และ 4 งานวิจัยนี้พิจารณาความผิดปกติเฉพาะการเปิดวงจร (open circuit) ของสวิตช์กำลังในชุด AC-Chopper เท่านั้น ซึ่งมีวงจรในการจำลองดังรูปที่ 5.1 โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจะถูกแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีปกติและกรณีที่มีความผิดปกติของสวิตช์เกิดขึ้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 สถานะ ดังนี้

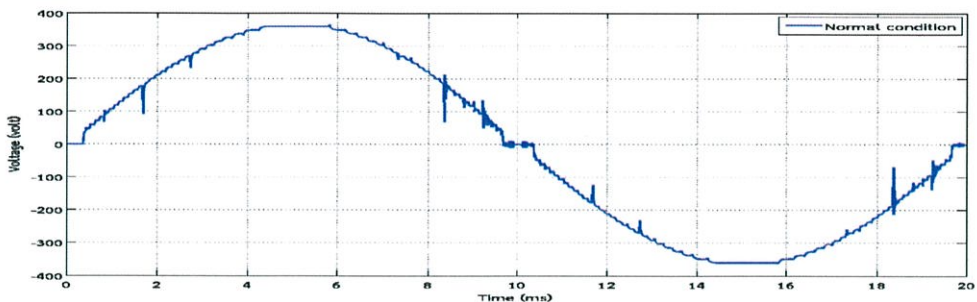
- สภาวะปกติ (normal condition)
- สภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 1 (fault at cell 1)
- สภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 2 (fault at cell 2)
- สภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 3 (fault at cell 3)
- สภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 4 (fault at cell 4)
- สภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 5 (fault at cell 5)

การจำลองความผิดพลาดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดนั้น ทำการทดลองในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน (R) ขนาด 500 วัตต์ และควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกด้วยดัชนีมอดดูเลต (Mi) และปรับค่า Mi จาก 0.60/1.00 ถึง 1.00/1.00 เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 โดยได้ทำการทดลองทั้งสิ้น 60 การทดลอง (60 observations) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดที่ได้จากการจำลองจะถูกนำไปหาคุณลักษณะเด่นของระบบด้วยเทคนิคการแบบ FFT ก่อนนำไปเป็นตัวแปรอินพุทของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งความผิดพลาดต่อไป

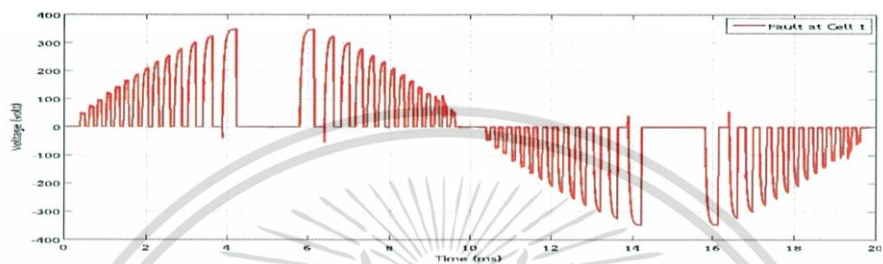
สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดที่สภาวะปกติและสภาวะที่มีความผิดพลาดของสวิตซ์กำลังในชุด AC-Chopper แต่ละชุด แสดงดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 โดยรูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด ขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 500 วัตต์ ดัชนีมอดดูเลตเท่ากับ 1.00/1.00 ที่สภาวะปกติ ส่วนรูปที่ 5.3 – 5.7 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกขณะที่เกิดความผิดพลาดของสวิตซ์กำลังที่ชุด AC-Chopper ในแต่ละชุดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด



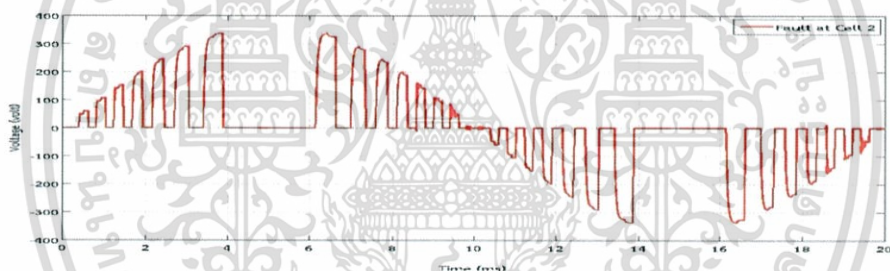
รูปที่ 5.1 การจำลองความผิดพลาดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 3



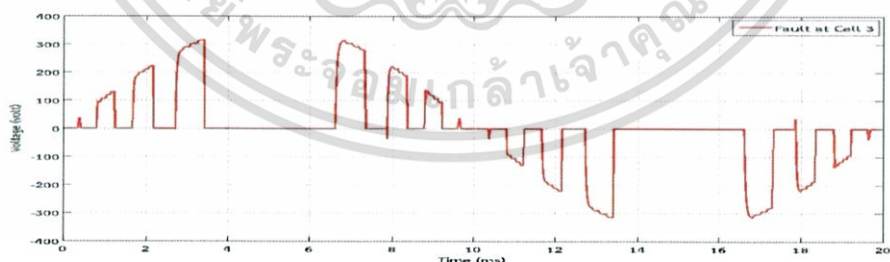
รูปที่ 5.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ กรณีสภาวะปกติ



รูปที่ 5.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดปกติที่จุด AC-Chopper ชุดที่ 1 (fault at cell 1)

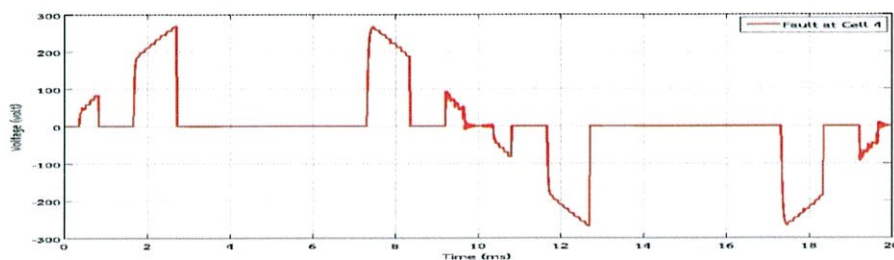


รูปที่ 5.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดปกติที่จุด AC-Chopper ชุดที่ 2 (fault at cell 2)

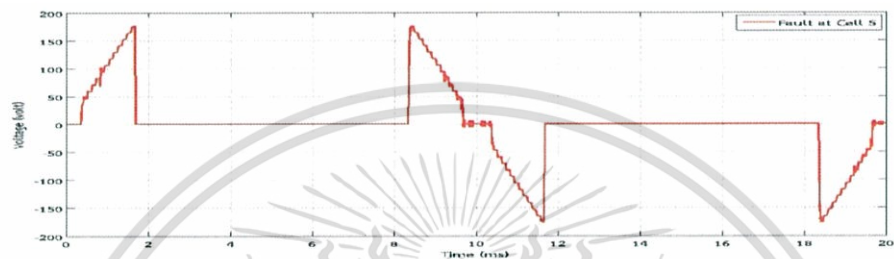


รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดปกติที่จุด AC-Chopper ชุดที่ 3 (fault at cell 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 4 (fault at cell 4)

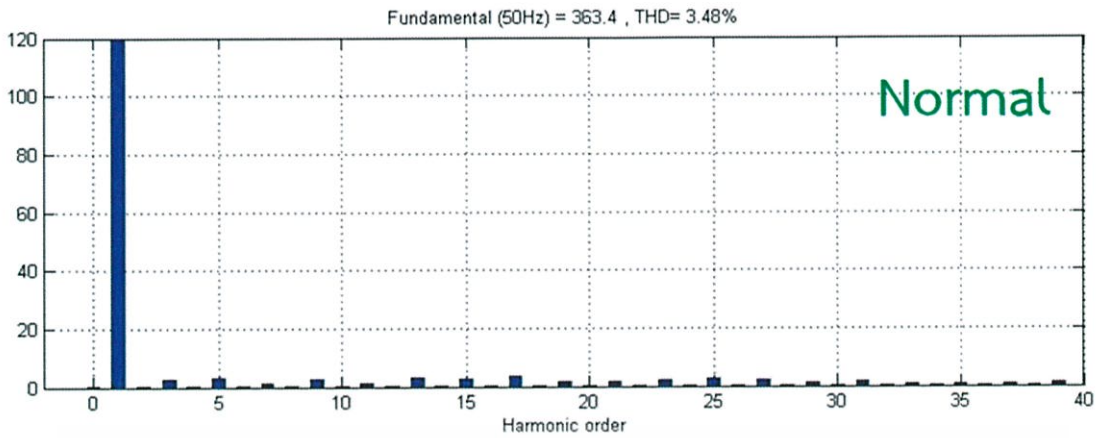


รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 5 (fault at cell 5)

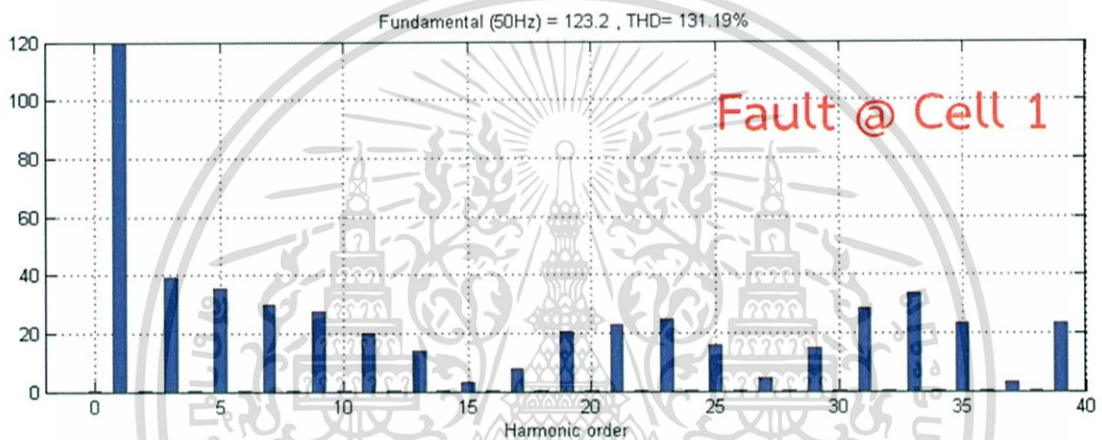
5.3 การหาคุณลักษณะเด่นของระบบ (Feature Extraction System)

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดที่สภาวะปกติและสภาวะที่เกิดความผิดปกติที่ชุด AC-Chopper แต่ละชุดนั้น อยู่ในรูปของโดเมนเวลาซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวแปรอินพุทของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมได้โดยตรง เนื่องจากแต่ละสัญญาณจะมีข้อมูลจำนวนมาก (จำนวน 2,000 ค่าใน 20 มิลลิวินาที) ดังนั้นเทคนิคการแปลงแบบ FFT จึงถูกนำมาใช้ในการแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดซึ่งเป็นข้อมูลในโดเมนเวลาไปเป็นข้อมูลในโดเมนความถี่ ก่อนนำไปใช้เป็นตัวแปรอินพุทของโครงข่ายประสาทเทียมต่อไป

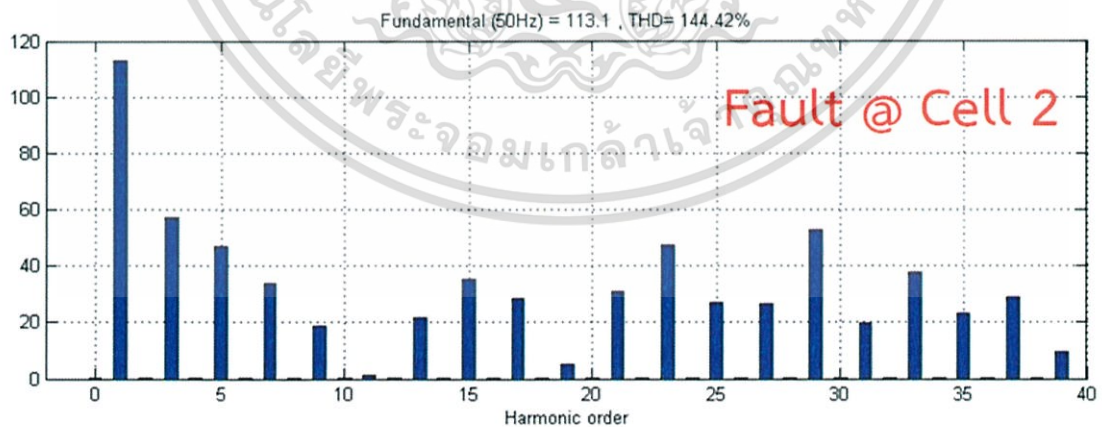
เทคนิคการแปลงแบบ FFT จะทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดที่ได้มานั้น อยู่ในรูปของลำดับฮาร์โมนิก (Harmonic orders) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะฮาร์โมนิกเลขคี่ (เนื่องจากฮาร์โมนิกเลขคู่มีค่าน้อยมาก) ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 39 (คิดเป็นจำนวนตัวแปรเท่ากับ 20 ตัวแปร) สำหรับใช้เป็นตัวแปรอินพุทให้กับโมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม โดยรูปที่ 5.8 – 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดในรูปของลำดับฮาร์โมนิกลำดับที่ 1 ถึง ลำดับที่ 39 ทั้งในสภาวะปกติและในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ



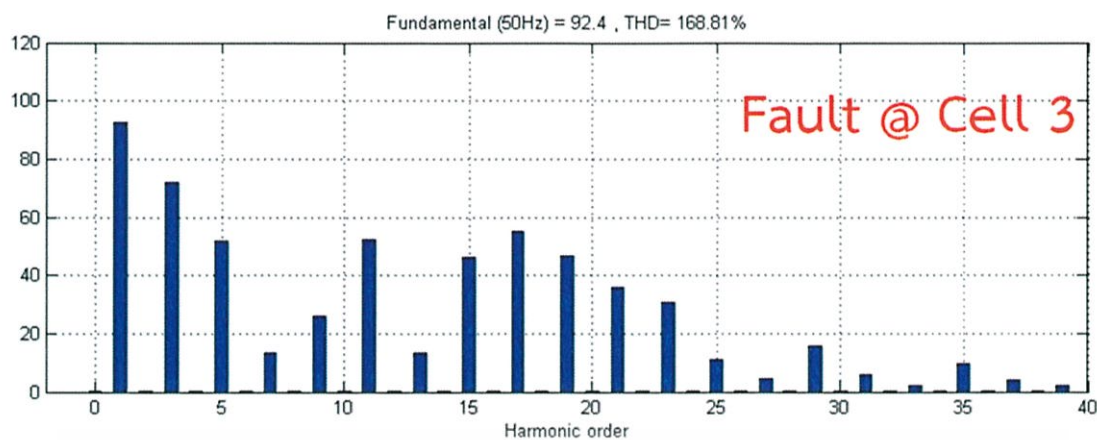
รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะปกติ



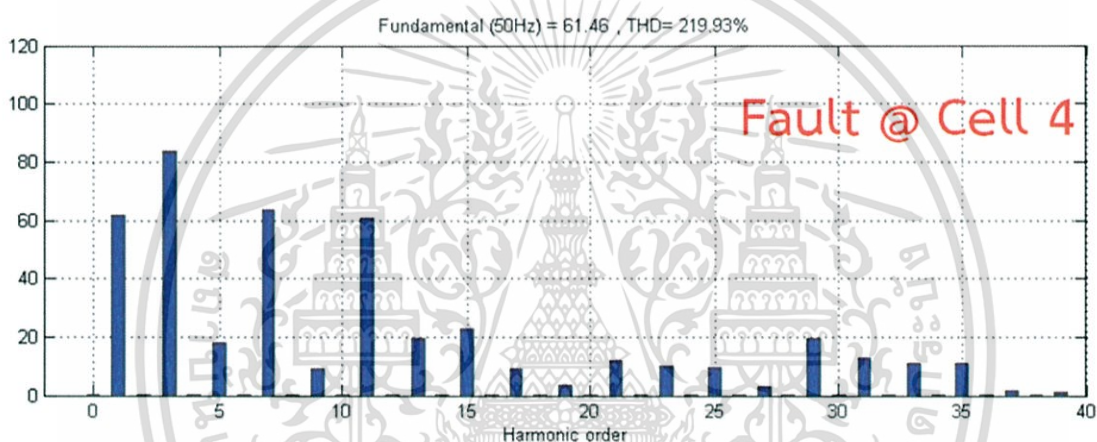
รูปที่ 5.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 1 (fault at cell 1)



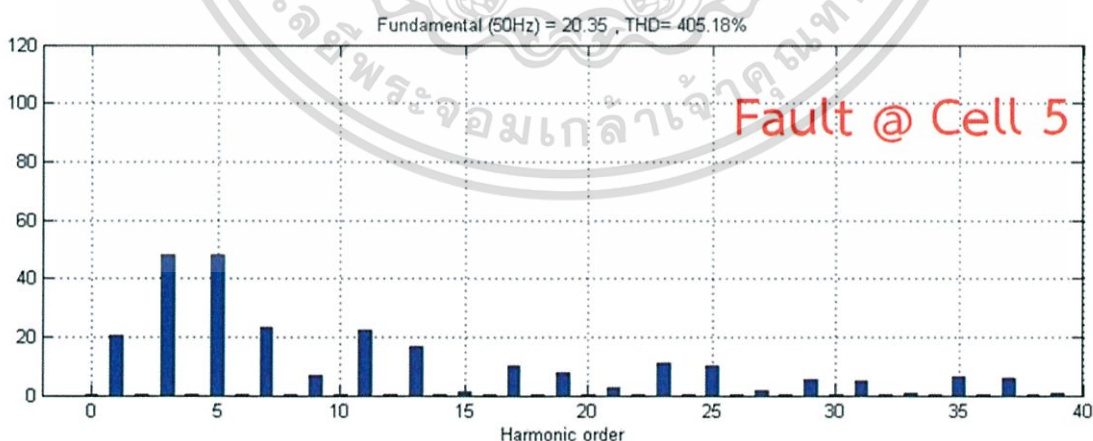
รูปที่ 5.10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 2 (fault at cell 2)



รูปที่ 5.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 3 (fault at cell 3)



รูปที่ 5.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 4 (fault at cell 4)



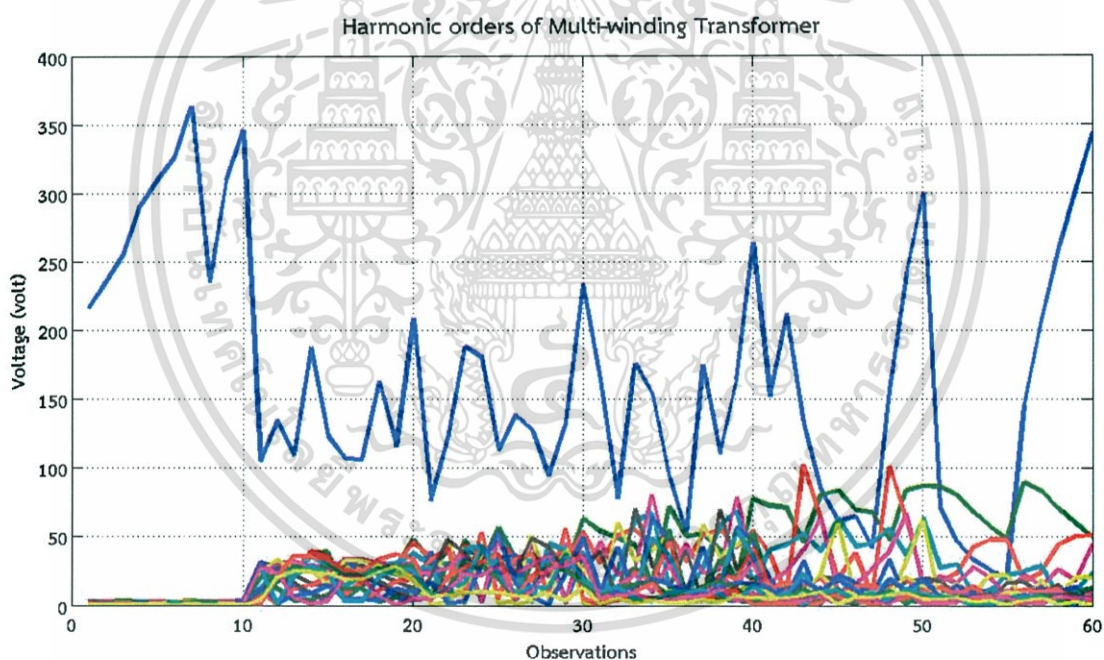
รูปที่ 5.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 39 ในสภาวะผิดปกติที่ชุด AC-Chopper ชุดที่ 5 (fault at cell 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

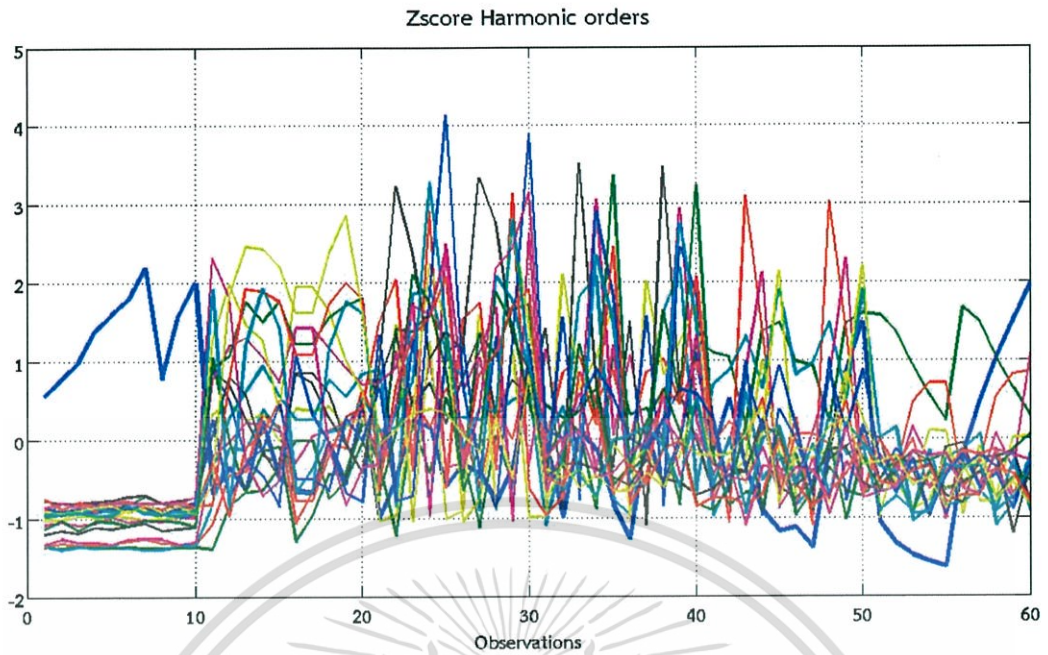
5.4 การสเกลข้อมูล (Standardizes)

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดในรูปของฮาร์มอนิกเลขคี่ลำดับที่ 1 ถึง 39 ทั้งในสภาวะวะปกติและสภาวะที่เกิดความผิดพลาดที่ได้จากการจำลองทั้งสิ้น 60 ค่าสังเกตในหัวข้อที่ 5.3 นั้น พบว่าขนาดของฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างกันจะมีขนาดแรงดันที่แตกต่างกันด้วย เช่น ในรูปที่ 5.8 พบว่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 จะมีขนาดแรงดันสูงกว่าฮาร์มอนิกลำดับอื่น ซึ่งในการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมนั้น ตัวแปรอินพุตที่มีขนาดต่างกันหรือมีหน่วยต่างกัน ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการสอน (train) โมเดลได้โดยตรง เนื่องจากอาจจะทำให้ค่าน้ำหนัก (weight) ที่ได้จากการสอนโมเดลมีค่าไม่เหมาะสม และเป็นเหตุทำให้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมทำนายผิดพลาด ดังนั้นก่อนที่จะนำข้อมูลตัวแปรอินพุตไปสอนโมเดล ควรทำให้ตัวแปรทุกตัวมีความสำคัญเท่ากัน คือ ค่าเฉลี่ยทุกตัวแปรเท่ากับศูนย์ และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1 ก่อน คำสั่ง zscore ในโปรแกรม MATLAB จึงถูกนำมาใช้ในการสเกลข้อมูลก่อนที่จะนำข้อมูลตัวแปรอินพุตไปใช้ในการสอนโมเดลต่อไป ดังสมการที่ 5.1

$$Z = \text{zscore}(D) \quad ; \text{เมื่อ } D \text{ คือข้อมูลที่ต้องการแปลง} \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.14 ข้อมูลจริงก่อนกระบวนการสเกลข้อมูล



รูปที่ 5.15 ข้อมูลหลังผ่านกระบวนการสเกลข้อมูล

รูปที่ 5.14 แสดงข้อมูลตัวแปรอินพุทจริงก่อนผ่านกระบวนการสเกลข้อมูล ส่วนรูปที่ 5.15 แสดงข้อมูลตัวแปรอินพุทหลังจากที่ผ่านการสเกลข้อมูลด้วยคำสั่ง `zscore` ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลตัวแปรอินพุทที่ได้มีความสำคัญเท่ากันหรือในหน่วยเดียวกันแล้ว

5.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักถูกนำมาใช้ในการลดมิติของข้อมูล (ตัวแปรอินพุท) โดยยังคงความสำคัญของข้อมูลไว้ ดังนั้นการวิเคราะห์ PCA จึงเป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดจำนวนตัวแปรเพื่อให้ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันแปลงไปอยู่ในตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า Score matrix (T) ซึ่งตัวแปรในเมตริกซ์ Score แต่ละตัวจะเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ดังนั้นก่อนใช้เทคนิคการวิเคราะห์ PCA จะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของตัวแปรก่อน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรก่อนทำการแปลง PCA ดังตารางที่ 5.1 โดยใช้คำสั่ง `corrcoef` ในโปรแกรม MATLAB ดังสมการที่ 5.2

$$\text{corrcoef}(D) \quad ; \quad \text{เมื่อ } D \text{ คือชุดข้อมูล} \quad (5.2)$$

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรลำดับฮาร์มอนิก

	H1	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19	H21	H23	H25	H27	H29	H31	H33	H35	H37	H39
H1	1.0	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
H3	-0.3	1.0	0.5	0.4	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.0
H5	-0.3	0.5	1.0	0.5	0.5	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
H7	-0.3	0.4	0.5	1.0	0.5	0.4	0.5	0.4	0.2	0.3	0.5	0.2	0.2	0.2	0.5	0.4	0.3	0.3	0.1	0.2
H9	-0.3	0.2	0.5	0.5	1.0	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5	0.5	0.1	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2
H11	-0.2	0.1	0.2	0.4	0.4	1.0	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.4	0.1	0.1
H13	-0.4	0.0	0.2	0.5	0.4	0.3	1.0	0.1	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2
H15	-0.2	0.1	0.4	0.4	0.3	0.3	0.1	1.0	0.4	0.1	0.6	0.4	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1	0.0	0.3	0.1
H17	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	1.0	0.6	0.5	0.5	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.6	0.0
H19	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.1	0.6	1.0	0.5	0.2	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.5	0.2	0.1
H21	-0.2	0.0	0.4	0.5	0.5	0.3	0.3	0.6	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	0.4	0.5	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
H23	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	0.4	0.5	0.2	0.5	1.0	0.5	0.6	0.4	0.6	0.7	0.4	0.6	0.6
H25	-0.2	0.0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	0.2	0.5	0.5	1.0	0.3	0.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
H27	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4	0.6	0.3	1.0	0.2	0.5	0.6	0.4	0.6	0.3
H29	-0.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.2	1.0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1
H31	-0.3	-0.1	0.2	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.7	0.6	0.7	0.5	0.3	1.0	0.9	0.7	0.6	0.7
H33	-0.2	-0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	0.6	0.7	0.7	0.6	0.4	0.9	1.0	0.7	0.5	0.8
H35	-0.2	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.0	0.4	0.5	0.5	0.4	0.7	0.4	0.5	0.7	0.7	1.0	0.5	0.5
H37	-0.2	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.4	0.3	0.6	0.2	0.4	0.6	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	1.0	0.2
H39	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.3	0.1	0.7	0.8	0.5	0.2	1.0

จากตารางที่ 5.1 พบว่าลำดับฮาร์มอนิกมีความสัมพันธ์กัน โดยเฉพาะฮาร์มอนิกที่มีลำดับสูง จะมีความสัมพันธ์กันมาก คือ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า 0.5 เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 31 กับ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 33 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9

เนื่องจากตัวแปรลำดับฮาร์มอนิกมีความสัมพันธ์กัน เทคนิคการวิเคราะห์ PCA จึงถูกนำมาใช้ในการลดจำนวนตัวแปรอินพุทของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้โมเดลมีขนาดเล็กลง และยังช่วยลดเวลาในการสอนโมเดลลงได้ด้วย คำสั่งในโปรแกรม MATLAB ถูกนำมาใช้ในการแปลง PCA ดังแสดงในสมการที่ 5.3

$$[PC, Latent, Explained] = PCACOV(\Sigma) \quad (5.3)$$

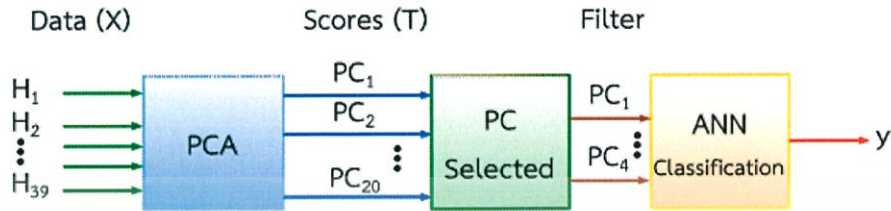
เมื่อ	Σ	คือ	เมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของเมตริกซ์ตัวแปรเดิม
	PC	คือ	ค่า eigenvector ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Loading)
	$Latent$	คือ	ค่า eigenvalue ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วม
	$Explained$	คือ	ค่าเปอร์เซ็นต์เพื่ออธิบายความแปรปรวนของแต่ละ PC

ในการแปลงข้อมูลด้วย PCA จากเมตริกซ์เดิม (X) ไปสู่เมตริกซ์ใหม่ (T) นั้น ข้อมูลในเมตริกซ์ใหม่จะเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 5.4

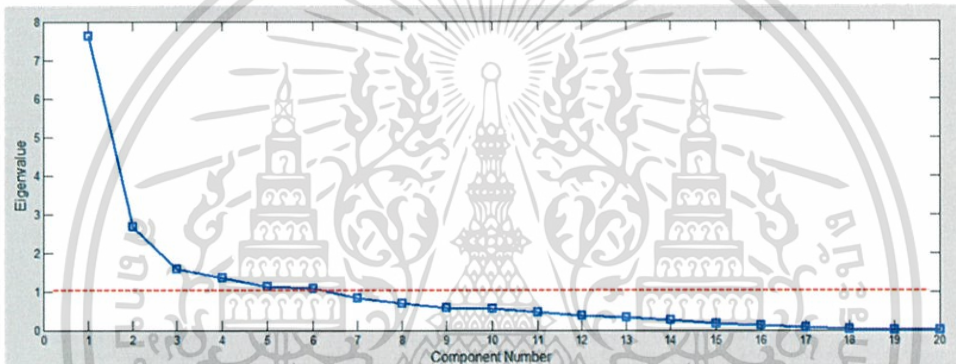
$$\mathbf{T}_{mxk} = \mathbf{X}_{mxn} \mathbf{P}_{nxk} \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

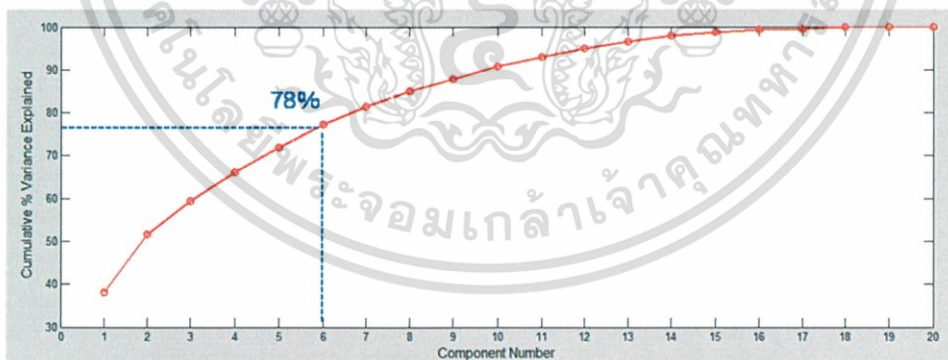
เมื่อ T คือ เมตริกซ์ใหม่เรียกว่าเมตริกซ์ Score
 X คือ เมตริกซ์ของตัวแปรเดิม
 P คือ เมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงข้อมูลเรียกว่าเมตริกซ์ Loading



รูปที่ 5.16 โครงสร้างพื้นฐานของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับเทคนิค PCA



รูปที่ 5.17 กราฟ Scree Plot

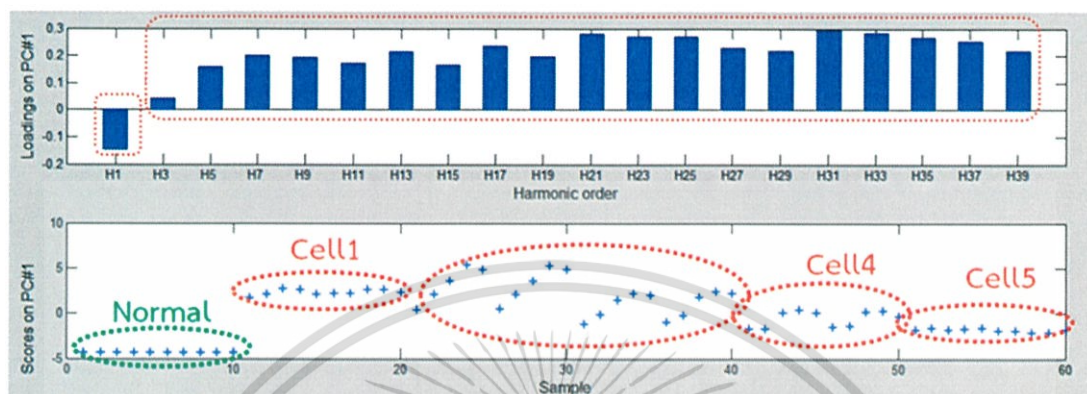


รูปที่ 5.18 ผลรวมสะสมของค่าเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวน (%Explained)

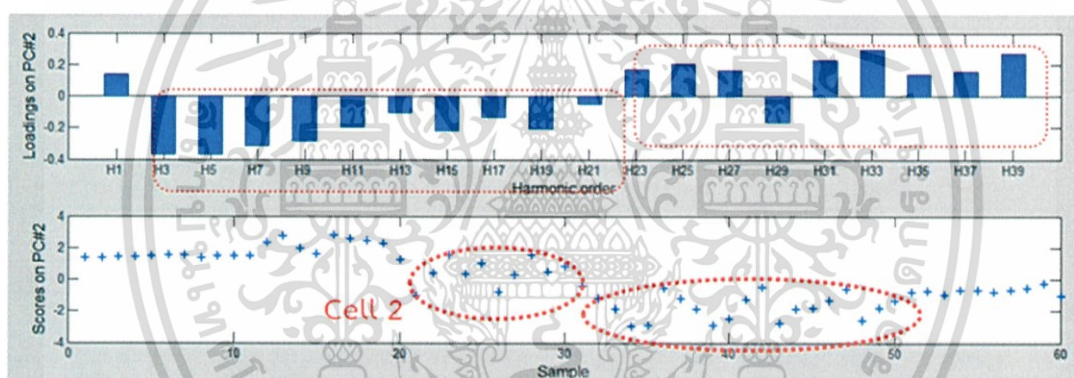
รูปที่ 5.16 เป็นแผนภาพแสดงการแปลงข้อมูลด้วย PCA และเลือกจำนวนองค์ประกอบ (Principal Component : PC) ของข้อมูลตัวแปรอินพุทหลังจากการแปลง PCA แล้ว ไปเป็นข้อมูลตัวแปรอินพุทของโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม ซึ่งการพิจารณาเลือกจำนวน PC จะพิจารณาจากค่า eigenvalue ของแต่ละ PC โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาจาก PC ที่มีค่า eigenvalue มากกว่า 1 และตัวแปร score ที่สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

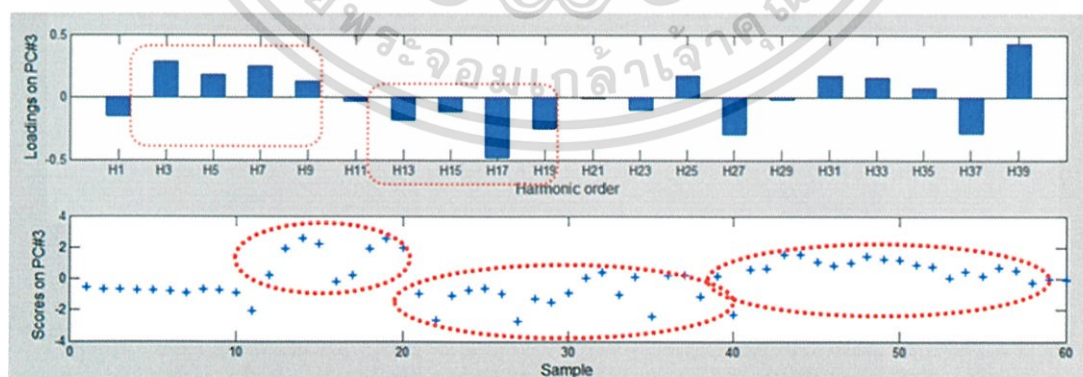
จากกราฟ Scree Plot ดังรูปที่ 5.17 พบว่า PC จำนวน 6-PC แรกที่มีค่า eigenvalue มากกว่า 1 และรูปที่ 5.18 แสดงผลรวมค่าเปอร์เซ็นต์ Explained หรือเปอร์เซ็นต์ค่าความแปรปรวนสะสมเท่ากับ 78% ส่วนรูปที่ 5.19 - 5.26 แสดงค่า eigenvector ของเมตริกซ์ Loading และค่าในเมตริกซ์ Score ตั้งแต่ PC-1 ถึง PC-6



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงค่า Loading และ Scores ของ PC-1

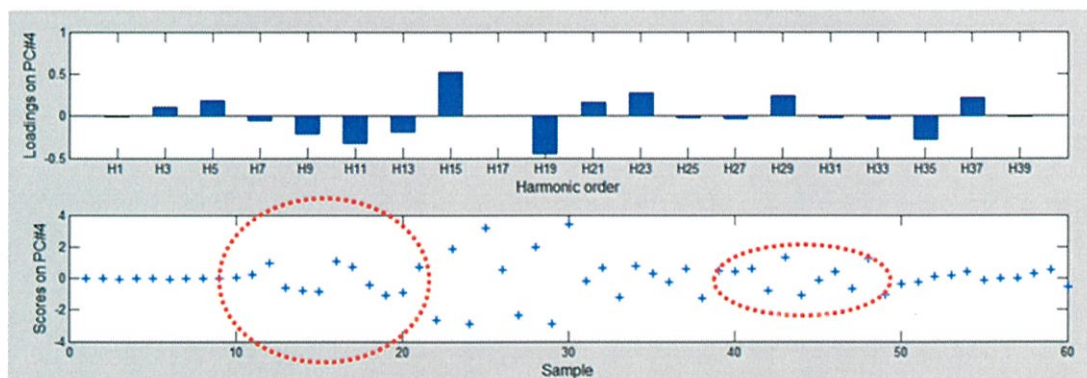


รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่า Loading และ Scores ของ PC-2

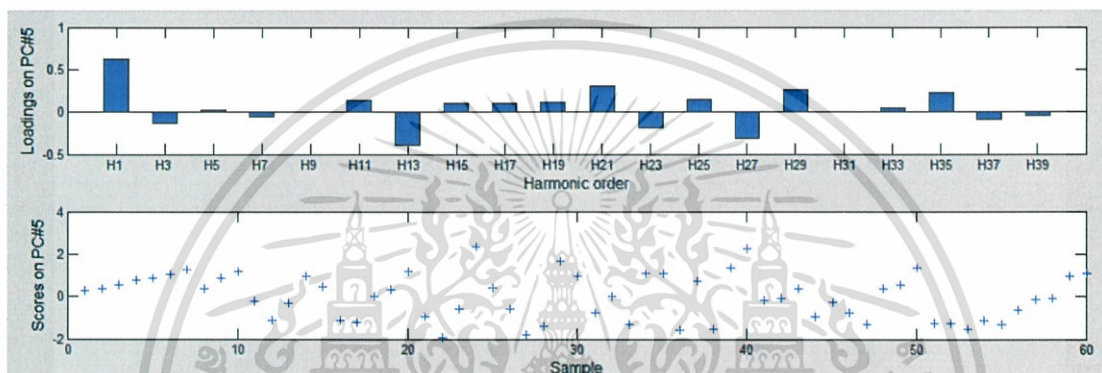


รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่า Loading และ Scores ของ PC-3

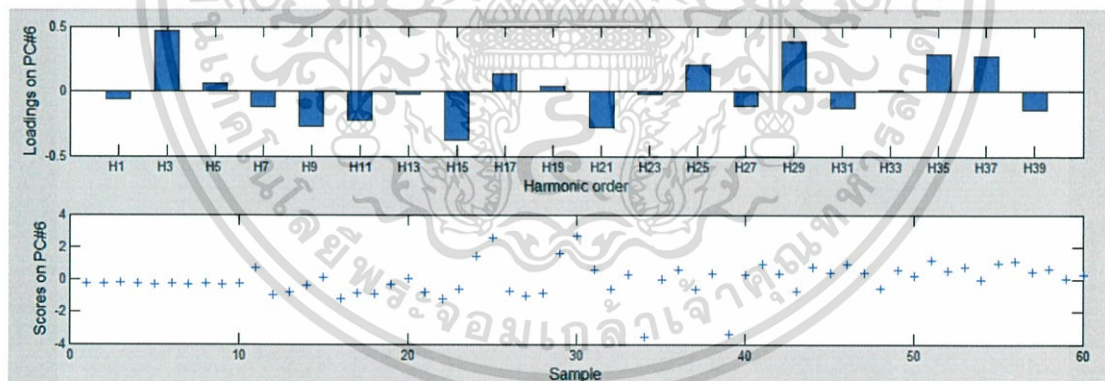
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงค่า Loading และ Scores ของ PC-4



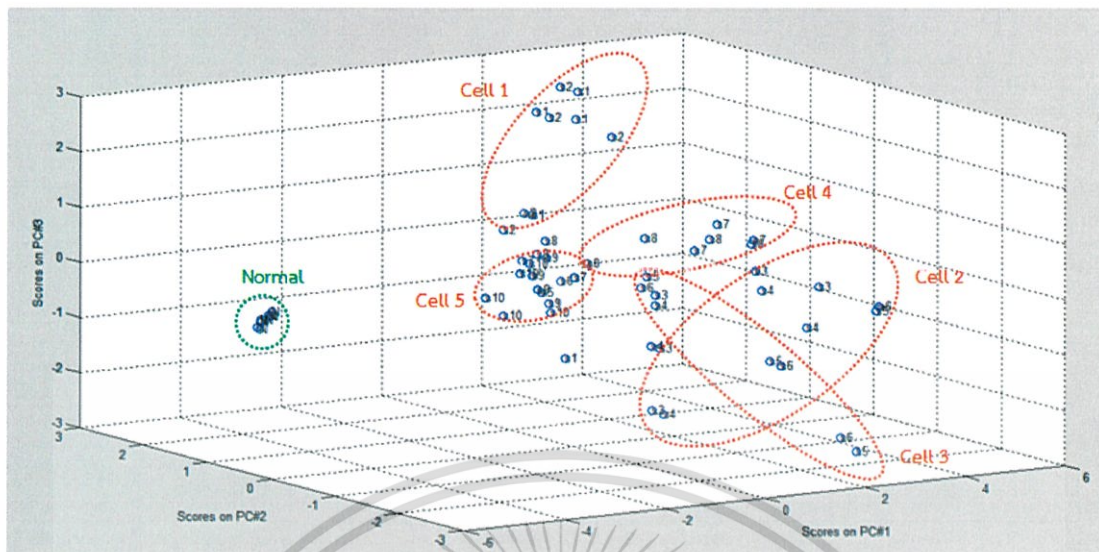
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงค่า Loading และ Scores ของ PC-5



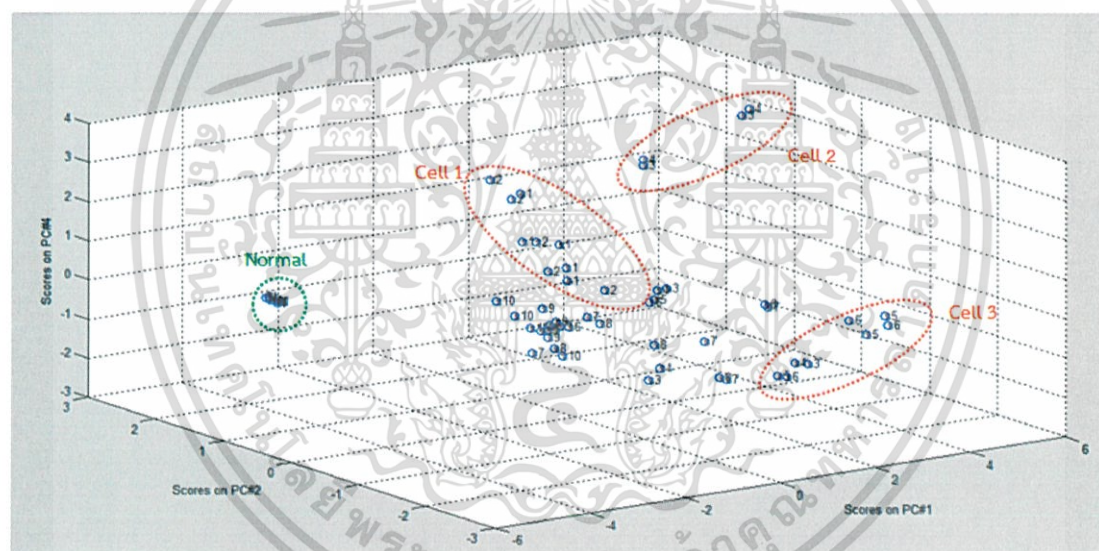
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงค่า Loading และ Scores ของ PC-6

จากรูปที่ 5.19 จะเห็นว่ากราฟ Loading ของ PC-1 สามารถแยกข้อมูลกรณีปกติออกจากกรณีเกิดความผิดปกติได้ ส่วนกราฟ Score ของ PC-1 สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลได้เป็น 4 สภาวะ คือ สภาวะปกติ สภาวะผิดปกติที่ cell 1 สภาวะผิดปกติที่ cell 4 และสภาวะผิดปกติที่ cell 5 ส่วนสภาวะผิดปกติที่ cell 2 และ cell 3 นั้น PC-1 ไม่สามารถแยกแยะได้ ส่วนรูปที่ 5.20 แสดงกราฟ Loading และ Score ของ PC-2 พบว่ากราฟ Loading ของ PC-2 สามารถแบ่งข้อมูลฮาร์มอนิกเลขคี่ลำดับต่ำ (H3-H21) ออกจากฮาร์มอนิกเลขคี่ลำดับสูง (H23-H39) ได้ ส่วนกราฟ Score ของ PC-2 สามารถแยกสภาวะความผิดปกติที่ cell 2 ออกจาก cell อื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 กราฟ 3 มิติระหว่าง Scores ของ PC-1, PC-2 และ PC-3



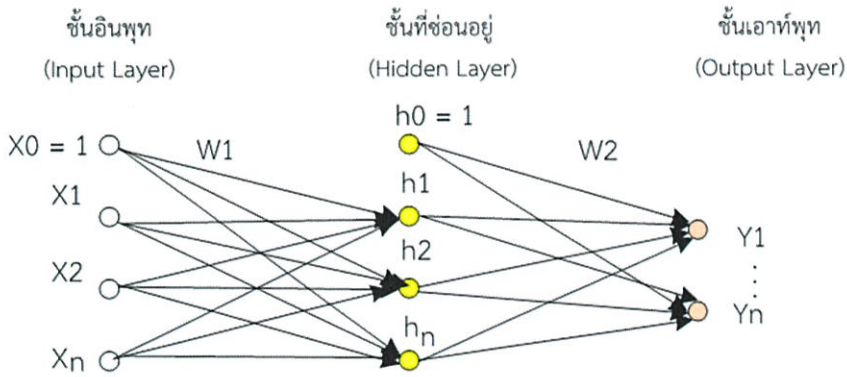
รูปที่ 5.26 กราฟ 3 มิติระหว่าง Scores ของ PC-1, PC-2 และ PC-4

รูปที่ 5.25 เป็นกราฟ 3 มิติแสดงค่า Score ระหว่าง PC-1, PC-2 และ PC-3 พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลที่เป็นกรณีปกติออกจากข้อมูลที่เกิดความผิดพลาดได้อย่างชัดเจน ส่วนรูปที่ 5.26 เป็นกราฟ 3 มิติแสดงค่า Score ระหว่าง PC-1, PC-2 และ PC-4

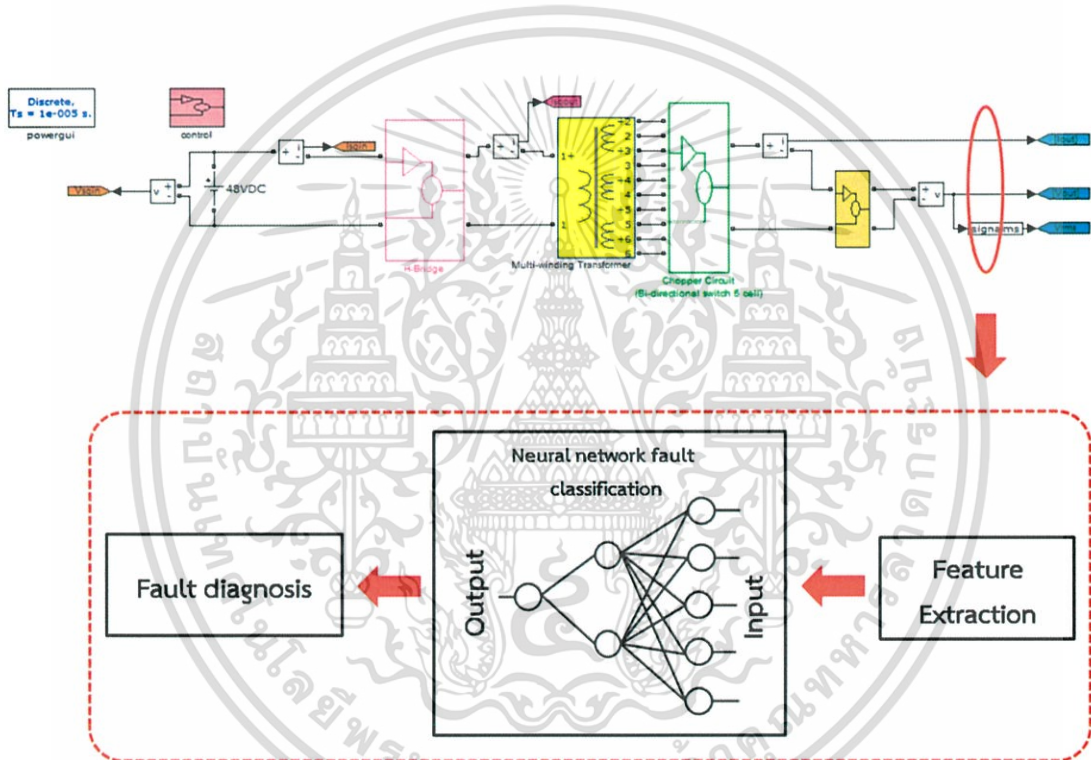
5.6 การออกแบบโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม

โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมสำหรับการทำนายตำแหน่งความผิดพลาดของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ใช้โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมที่มีโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมแบบหลายชั้นดังรูปที่ 5.27 โดยโครงสร้างแบบ MLP สามารถใช้ได้กับทั้งการประมาณค่าฟังก์ชัน (Function approximations) และการจำแนกข้อมูล (Classifications)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 โครงสร้างทางสถาปัตยกรรมแบบ MLP



รูปที่ 5.28 แผนภาพการตรวจจับและวิเคราะห์ความผิดปกติด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

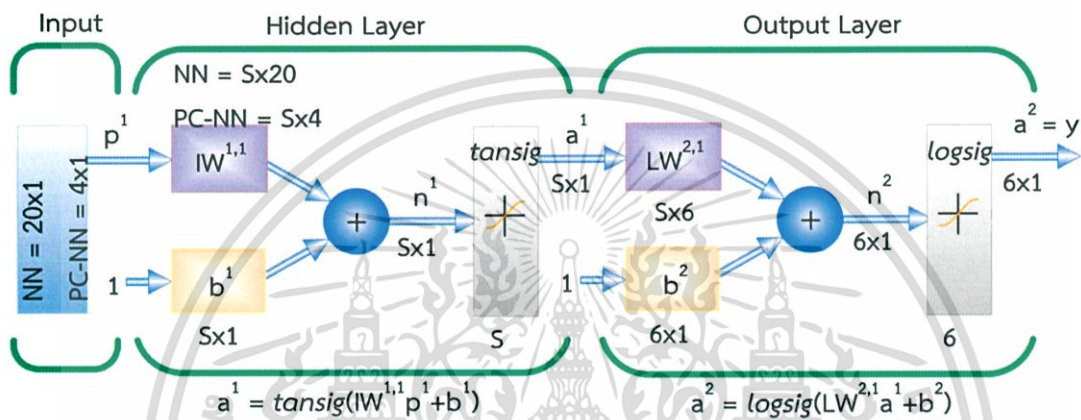
โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกนำมาใช้ในการทำนายตำแหน่งความผิดปกติในงานวิจัยนี้ แบ่งเป็น 2 โมเดล คือ โมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม (โมเดล NN) และโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับองค์ประกอบหลัก (โมเดล PC-NN) ซึ่งการตรวจจับและวิเคราะห์ความผิดปกติด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.28

สำหรับโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของโมเดล NN และ โมเดล PC-NN แบบ MLP ในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูป 5.29 ประกอบด้วย

- ชั้นอินพุท (Input Layer) จำนวน 1 ชั้น โดยจำนวนโหนด หรือนิวรอน (neuron) จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชั้นที่ซ่อนอยู่ (Hidden Layer) จำนวน 1 ชั้น ซึ่งจำนวนโหนดใน hidden layer นี้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหา และใช้ Hyperbolic tangent sigmoid transfer function (“*tansig*”) เป็นฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้น
- ชั้นเอาต์พุต (Output Layer) จำนวน 1 ชั้น โดยจำนวนโหนดจะขึ้นอยู่กับคำตอบหรือเป้าหมาย (Target) ของปัญหา และใช้ Log-sigmoid transfer function (“*logsig*”) เป็นฟังก์ชันกระตุ้น



รูปที่ 5.29 โครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของโมเดล NN และ โมเดล PC-NN แบบ MLP

- เมื่อ
- p^1 = เวกเตอร์อินพุต
 - $IW^{1,1}$ = เมทริกซ์น้ำหนักชั้นซ่อน
 - b^1 = เวกเตอร์ไบอัสชั้นซ่อน
 - $LW^{2,1}$ = เมทริกซ์น้ำหนักชั้นเอาต์พุต
 - b^2 = เวกเตอร์ไบอัสชั้นเอาต์พุต
 - y = เวกเตอร์เอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 โครงสร้างโมเดล NN และ PC-NN ที่ออกแบบ

	โมเดล NN		โมเดล PC-NN	
ชั้นอินพุท	p^1	= 20x1	p^1	= 4x1
ชั้นที่ซ่อนอยู่	Activation function	= <i>tansig</i>	Activation function	= <i>tansig</i>
	$IW^{1,1}$	= Sx20	$IW^{1,1}$	= Sx4
	b^1	= Sx1	b^1	= Sx1
ชั้นเอาต์พุท	Activation function	= <i>logsig</i>	Activation function	= <i>logsig</i>
	$LW^{2,1}$	= Sx6	$LW^{2,1}$	= Sx6
	b^2	= 6x1	b^2	= 6x1
	y	= 6x1	y	= 6x1

โดยที่ S คือจำนวนนิวรอนหรือโหนดชั้นอยู่กับการสอนโมเดล

5.7 ข้อมูลที่ใช้สำหรับการสอนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

ในการสอนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายตำแหน่งความผิดปกติของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชนิดนั้น จะแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดข้อมูลอินพุท (Input data) และชุดข้อมูลเป้าหมาย (Output Target) โดยที่ชุดข้อมูลอินพุทนั้นได้จากการจำลองความผิดปกติของสวิตช์กำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และนำมาสร้างเป็นตัวแปรเมตริกซ์อินพุท

5.7.1 กรณีโมเดล NN

ข้อมูลสำหรับใช้เป็นตัวแปรอินพุทเมตริกซ์ X ของโมเดล NN ประกอบด้วยข้อมูลลำดับฮาร์มอนิกจำนวน 20 ตัวแปร (ฮาร์มอนิกเลขคี่ ลำดับที่ 1 - 39) ซึ่งเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชนิดที่ผ่านการแปลง FFT แล้ว จำนวน 60 ค่าสังเกตดังแสดงในสมการที่ 5.5

$$X = \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{l} \text{Normal Operation} \\ \text{Cell1 Abnormal Operation} \\ \text{Cell2 Abnormal Operation} \\ \text{Cell3 Abnormal Operation} \\ \text{Cell4 Abnormal Operation} \\ \text{Cell5 Abnormal Operation} \end{array} \right]_{10 \times 20} \\ \left[\begin{array}{l} \text{Cell1 Abnormal Operation} \\ \text{Cell2 Abnormal Operation} \\ \text{Cell3 Abnormal Operation} \\ \text{Cell4 Abnormal Operation} \\ \text{Cell5 Abnormal Operation} \end{array} \right]_{10 \times 20} \\ \left[\begin{array}{l} \text{Cell2 Abnormal Operation} \\ \text{Cell3 Abnormal Operation} \\ \text{Cell4 Abnormal Operation} \\ \text{Cell5 Abnormal Operation} \end{array} \right]_{10 \times 20} \\ \left[\begin{array}{l} \text{Cell3 Abnormal Operation} \\ \text{Cell4 Abnormal Operation} \\ \text{Cell5 Abnormal Operation} \end{array} \right]_{10 \times 20} \\ \left[\begin{array}{l} \text{Cell4 Abnormal Operation} \\ \text{Cell5 Abnormal Operation} \end{array} \right]_{10 \times 20} \\ \left[\begin{array}{l} \text{Cell5 Abnormal Operation} \end{array} \right]_{10 \times 20} \end{bmatrix}_{60 \times 20} \quad (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ		
X	คือ	เมตริกซ์ข้อมูลตัวแปรฮาร์มอนิกเลขคู่ ลำดับที่ 1 - 39
แถวที่ 1 ถึง 10	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะปกติ
แถวที่ 11 ถึง 20	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 1
แถวที่ 21 ถึง 30	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 2
แถวที่ 31 ถึง 40	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 3
แถวที่ 41 ถึง 50	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 4
แถวที่ 51 ถึง 60	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 5

5.7.2 กรณีโมเดล PC-NN

ข้อมูลสำหรับใช้เป็นตัวแปรอินพุตเมตริกซ์ Score ของโมเดล PC-NN เกิดจากการแปลงข้อมูลด้วย PCA ดังที่ได้อธิบายในเรื่องการวิเคราะห์ตัวประกอบหลักแล้ว ประกอบด้วย 4 ตัวแปรใหม่เป็นจำนวน 60 ค่าสังเกต ดังแสดงในสมการที่ (5.6)

$$\text{Score} = \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{l} \text{Normal Operation} \\ \text{Cell1 Abnormal Operation} \\ \text{Cell2 Abnormal Operation} \\ \text{Cell3 Abnormal Operation} \\ \text{Cell4 Abnormal Operation} \\ \text{Cell5 Abnormal Operation} \end{array} \right] \begin{array}{l} 10 \times 4 \\ 10 \times 4 \\ 10 \times 4 \\ 10 \times 4 \\ 10 \times 4 \\ 10 \times 4 \end{array} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \quad (5.6)$$

60×4

เมื่อ		
Score	คือ	เมตริกซ์ข้อมูลตัวแปร Score จากการแปลง PCA (Score 1 - 4)
แถวที่ 1 ถึง 10	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะปกติ
แถวที่ 11 ถึง 20	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 1
แถวที่ 21 ถึง 30	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 2
แถวที่ 31 ถึง 40	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 3
แถวที่ 41 ถึง 50	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 4
แถวที่ 51 ถึง 60	คือ	ค่าสังเกตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 5

การสร้างตัวแปรเมตริกซ์เอาต์พุต สามารถทำได้โดยสมมติค่าเป้าหมายให้เท่ากับเมตริกซ์ Y เป็นข้อมูลชุดที่ 2 ดังสมการที่ 5.7 โดยกำหนดให้เมตริกซ์ Y อยู่ในรูปของเลข 0 และ 1 (Target Code) เพื่อนำไปใช้ในการจำแนกสภาวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

$$Y = \begin{bmatrix} [1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]_{10 \times 6} \\ [0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]_{10 \times 6} \\ [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0]_{10 \times 6} \\ [0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0]_{10 \times 6} \\ [0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0]_{10 \times 6} \\ [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]_{10 \times 6} \end{bmatrix}_{60 \times 6} \quad (5.7)$$

เมื่อ

Y	คือ	เมตริกซ์ค่าเป้าหมาย
แถวที่ 1 ถึง 10	คือ	ค่าเป้าหมายในสภาวะปกติ
แถวที่ 11 ถึง 20	คือ	ค่าเป้าหมายในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 1
แถวที่ 21 ถึง 30	คือ	ค่าเป้าหมายในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 2
แถวที่ 31 ถึง 40	คือ	ค่าเป้าหมายในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 3
แถวที่ 41 ถึง 50	คือ	ค่าเป้าหมายในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 4
แถวที่ 51 ถึง 60	คือ	ค่าเป้าหมายในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ AC-Chopper ชุดที่ 5

5.8 การสอนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

ในการสอนโมเดล (Training) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของโมเดลนั้น จะไม่นำข้อมูลอินพุตทั้งหมดมาใช้ในการสอนโมเดล แต่จะแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ชุด ซึ่งการแบ่งกลุ่มข้อมูล (Data Set Selection) สำหรับงานวิจัยนี้จะแบ่งข้อมูลของเมตริกซ์ตัวแปรอินพุต (X, Score) และเมตริกซ์ค่าเป้าหมาย (Y) ออกเป็น 3 ชุด แบบ 60:20:20 แสดงดังรูปที่ 5.30 ดังนี้

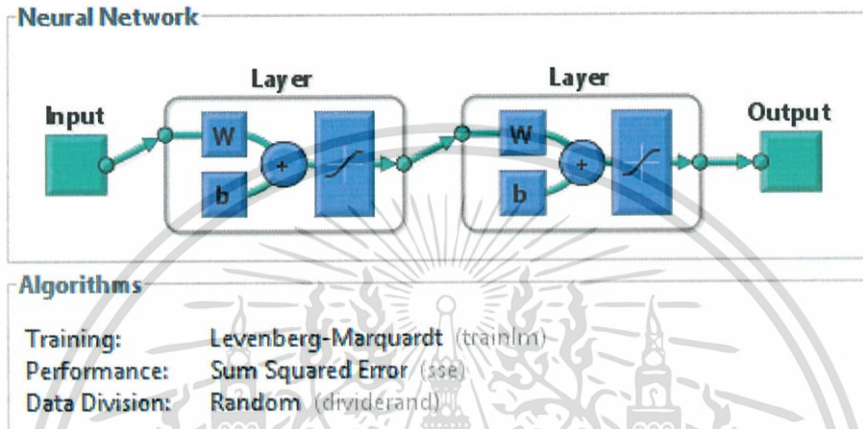


รูปที่ 5.30 แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มข้อมูล

- ชุดที่ 1 : สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการสอนโมเดล (Training set) จำนวน 60% เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ (เมตริกซ์น้ำหนัก)
- ชุดที่ 2 : สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการให้เหตุผล (Validation set) จำนวน 20% เพื่อเลือกพารามิเตอร์ (เลือกจำนวนโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่และเมตริกซ์น้ำหนักที่เหมาะสมเพื่อป้องกันปัญหา Over fitting)
- ชุดที่ 3 : สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบโมเดล (Testing set) จำนวน 20% เพื่อทดสอบความสามารถของโมเดลในการทำนายตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึม (Algorithm) ที่ถูกนำมาใช้การสอนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ คือ อัลกอริทึม Levenberg Marquardt (LM) backpropagation หรือ “trainlm” เนื่องจากมีข้อดี คือ เวลาที่ใช้ในการสอนโมเดลน้อยกว่าอัลกอริทึมแบบอื่น (แต่มีข้อเสียคือ ใช้หน่วยความจำมากกว่า อัลกอริทึมแบบอื่น) รูปที่ 5.31 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม MATLAB ในการสอนโมเดลโครงข่าย เซลล์ประสาทเทียม ซึ่งในการสอนโมเดลสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 5.3 ส่วนตาราง ที่ 5.4 แสดงเงื่อนไขการสอนโมเดล และสามารถแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโครงข่ายประสาท เทียมการทำงานได้ดังรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.31 หน้าต่างของโปรแกรม MATLAB ในการสอนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

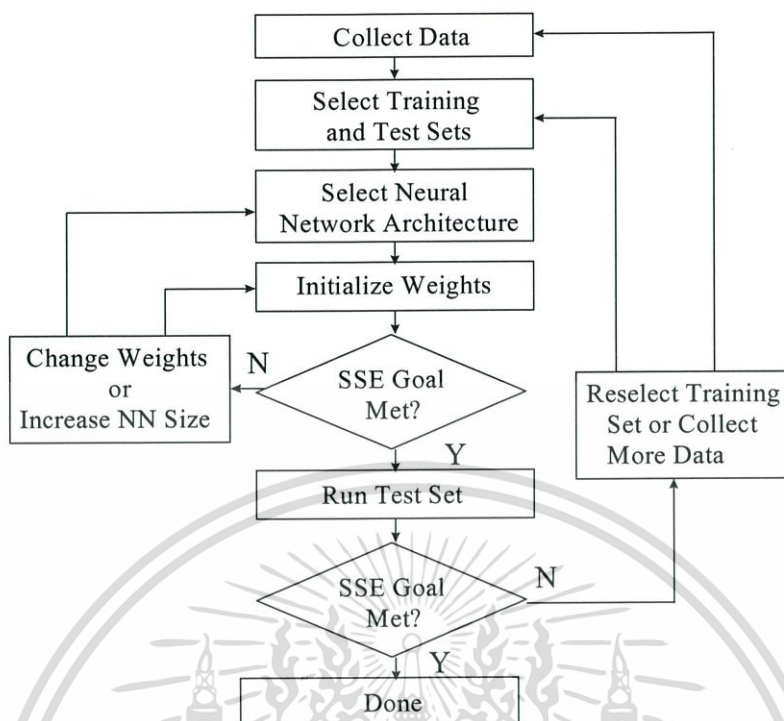
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอนโมเดล

จำนวนรอบการสอนโมเดล (Epoch)	1000
ค่าความผิดพลาดเป้าหมาย (SSE)	0.01
ค่า Gradient ต่ำสุด	1×10^{-10}
ค่าสูงสุด Adaptive value (Mu)	10
จำนวนครั้ง Validation ล้มเหลว	6

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขในการสอนโมเดล

เงื่อนไขกรณี หยุดสอนโมเดล	จำนวนรอบการสอนโมเดลถึง 1000 รอบ
	ค่าความผิดพลาด (SSE) ถึงเป้าหมายที่กำหนด
	ค่า Gradient ถึงค่าต่ำสุดที่กำหนด
	ค่าสูงสุด Adaptive value (Mu) เกินค่าที่กำหนด
	จำนวนครั้ง Validation ล้มเหลวถึงค่าที่กำหนด
เงื่อนไขกรณี สอนโมเดลไม่สำเร็จ	รีเซ็ตค่าเมตริกซ์น้ำหนักและเวกเตอร์ไบอัส และเริ่มสอนโมเดลใหม่
	เพิ่มจำนวนโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่
	เก็บตัวอย่างการทดลองเพิ่ม
	เพิ่มตัวแปรอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเปลี่ยนแปลงอัลกอริทึมที่ใช้สอนโมเดลไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



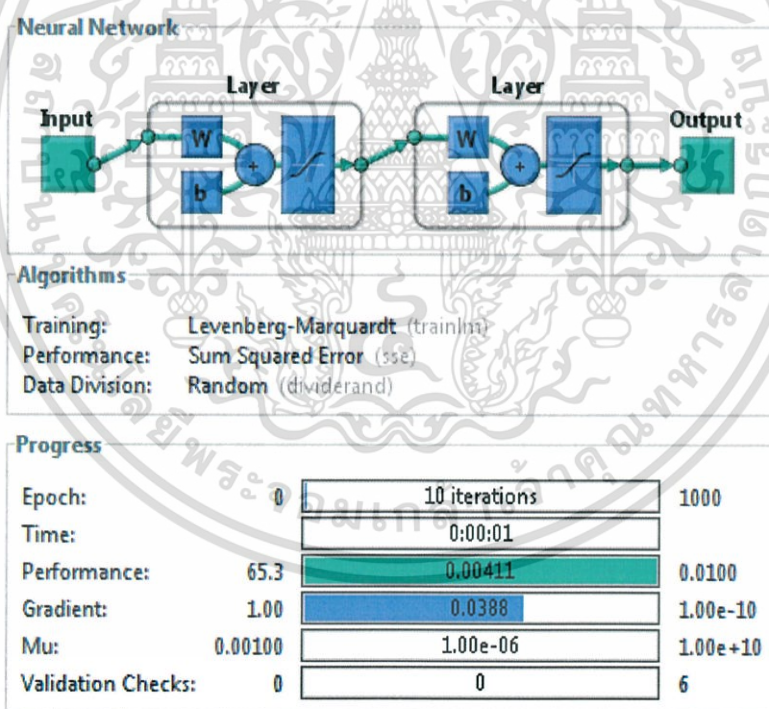
รูปที่ 5.32 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

5.9 ผลการสอน การให้เหตุผล และการทดสอบโมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม

ในการสอนโมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม จะทำการสอนโมเดลที่ออกแบบด้วยค่าเมตริกซ์น้ำหนัก เวกเตอร์ไบอัส (bias) และพารามิเตอร์ต่างๆ ค่าเดียวกันซ้ำหลายครั้ง เนื่องจากค่าความผิดพลาดอาจจะอยู่ที่ตำแหน่ง Local minimum (ต้องการค่าผิดพลาดที่ตำแหน่ง Global minimum) และเลือกค่าเมตริกซ์น้ำหนัก เวกเตอร์ไบอัส ที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องดีที่สุด ซึ่งผล การสอน การให้เหตุผล และการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบโมเดล NN แสดงดังตารางที่ 5.5 ส่วนตารางที่ 5.6 แสดงผลการสอน การให้เหตุผล และการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบโมเดล PC-NN

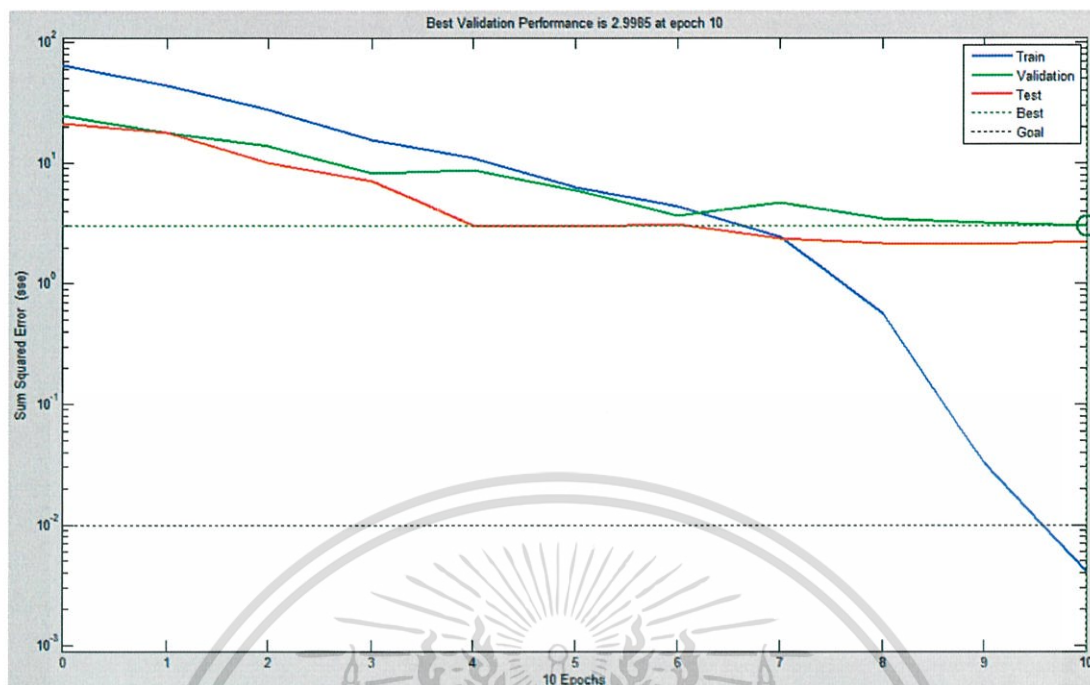
ตารางที่ 5.5 ผลการสอน การให้เหตุผล และการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบโมเดล NN

จำนวนโหนด ในชั้นที่ซ่อนอยู่	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง			
	Train	Validation	Test	รวม
1	80.6	58.3	50.0	70.0
2	97.2	66.7	66.7	85.0
3	100.0	83.3	66.7	90.0
4	100.0	91.7	75.0	93.3
5	100.0	75.0	91.7	93.3
6	100.0	83.3	91.7	95.0
7	100.0	83.3	91.7	95.0
8	100.0	91.7	83.3	95.0
9	100.0	58.3	58.3	83.3
10	100.0	83.3	83.3	93.3



รูปที่ 5.33 โมเดล NN ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่ 6 โหนด เมื่อถูกสอนสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 กราฟแสดงค่า Training errors, Validation errors, และ Test errors ของโมเดล NN

		Training Confusion Matrix						Validation Confusion Matrix							
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
Output Class	1	5 13.9%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%	2 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	2	0 0.0%	5 13.9%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	3	0 0.0%	0 0.0%	8 22.2%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 6.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	7 19.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	2 16.7%	2 16.7%	0 0.0%	50.0% 50.0%
	5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	3 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	7 19.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 8.3%	100% 0.0%
		100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	50.0% 40.0%	100% 0.0%	83.3% 16.7%	
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
		Target Class						Target Class							

(ก) ผลการสอนโมเดล

(ข) ผลการให้เหตุผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Test Confusion Matrix						
Output Class	1	3 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	2	0 0.0%	4 33.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	3	0 0.0%	0 0.0%	1 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 8.3%	0 0.0%	1 8.3%	50.0% 50.0%
	5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 8.3%	0 0.0%	100% 0.0%
	6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 8.3%	100% 0.0%
		1	2	3	4	5	6	
		All Confusion Matrix						
Output Class	1	10 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	2	0 0.0%	10 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	3	0 0.0%	0 0.0%	10 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 16.7%	2 3.3%	1 1.7%	76.9% 23.1%
	5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 13.3%	0 0.0%	100% 0.0%
	6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	9 15.0%	100% 0.0%
		1	2	3	4	5	6	
		Target Class						
		Target Class						

(ค) ผลการทดสอบ

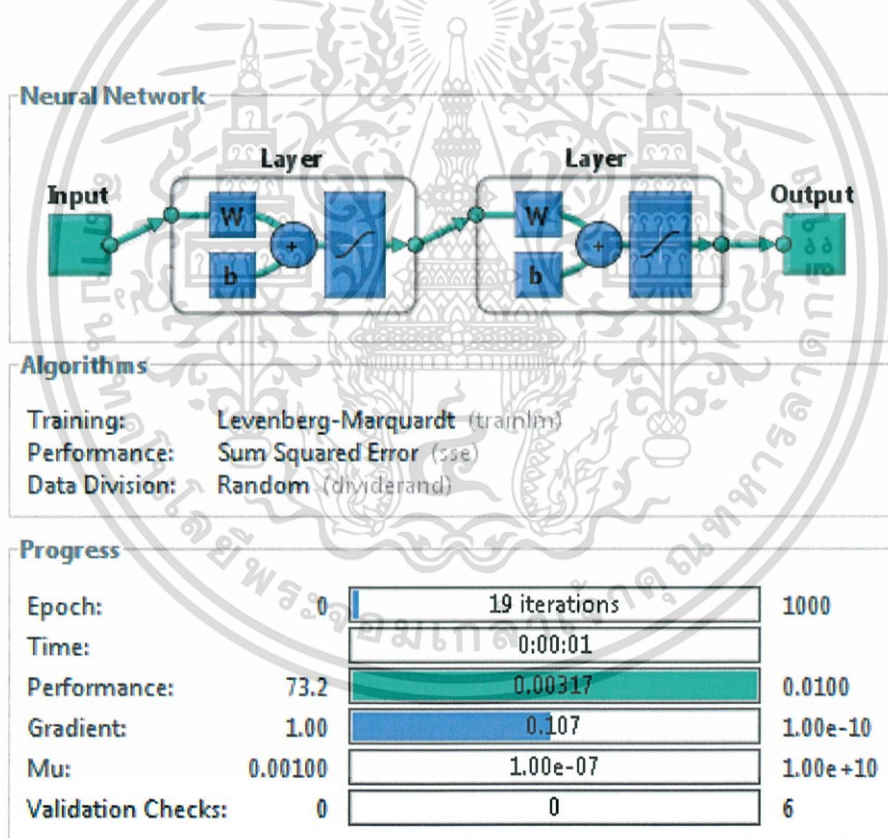
(ง) ผลการทำนายความผิดพลาดรวม

รูปที่ 5.35 ผลการสอนโมเดล NN ที่มีโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่จำนวน 6 โหนด

จากตารางที่ 5.5 จำนวนโหนดที่เหมาะสมในชั้นที่ซ่อนอยู่สำหรับโมเดล NN เท่ากับ 6 โหนด (โมเดล NN-6) โดยรูปที่ 5.33 และรูปที่ 3.34 แสดงให้เห็นว่า โมเดล NN-6 ถูกสอนสำเร็จเนื่องจากค่าความผิดพลาด (SSE) ต่ำกว่า 0.01 (ถึงเป้าหมายที่กำหนด) โดยมีจำนวนรอบการสอนเท่ากับ 10 รอบ ส่วนรูปที่ 5.35 (ก) แสดงผลการทำนายตำแหน่งความผิดพลาดจากข้อมูล Training set พบว่าจำแนกได้ถูกต้อง 100% รูปที่ 5.35 (ข) แสดงผลการทำนายตำแหน่งความผิดพลาดจากข้อมูล Validation set พบว่าจำแนกได้ถูกต้อง 83.3% ส่วนรูปที่ 5.35 (ค) แสดงผลการทำนายตำแหน่งความผิดพลาดจากข้อมูล Testing set พบว่าจำแนกได้ถูกต้อง 91.7% และผลรวมการทำนายความผิดพลาดดังรูปที่ 5.35 (ง) พบว่าทำนายได้ถูกต้อง 95% โดยแบ่งเป็นสภาวะปกติถูกต้อง 100% และที่สภาวะผิดพลาดที่ Cell 1 ทำนายได้ถูกต้อง 100% ต่อมาที่สภาวะผิดพลาดที่ Cell 2 ทำนายได้ถูกต้อง 100% ที่สภาวะผิดพลาดที่ Cell 3 ทำนายได้ถูกต้อง 76.9% ที่สภาวะผิดพลาดที่ Cell 4 ทำนายได้ถูกต้อง 100% และที่สภาวะผิดพลาดที่ Cell 5 ทำนายได้ถูกต้อง 100%

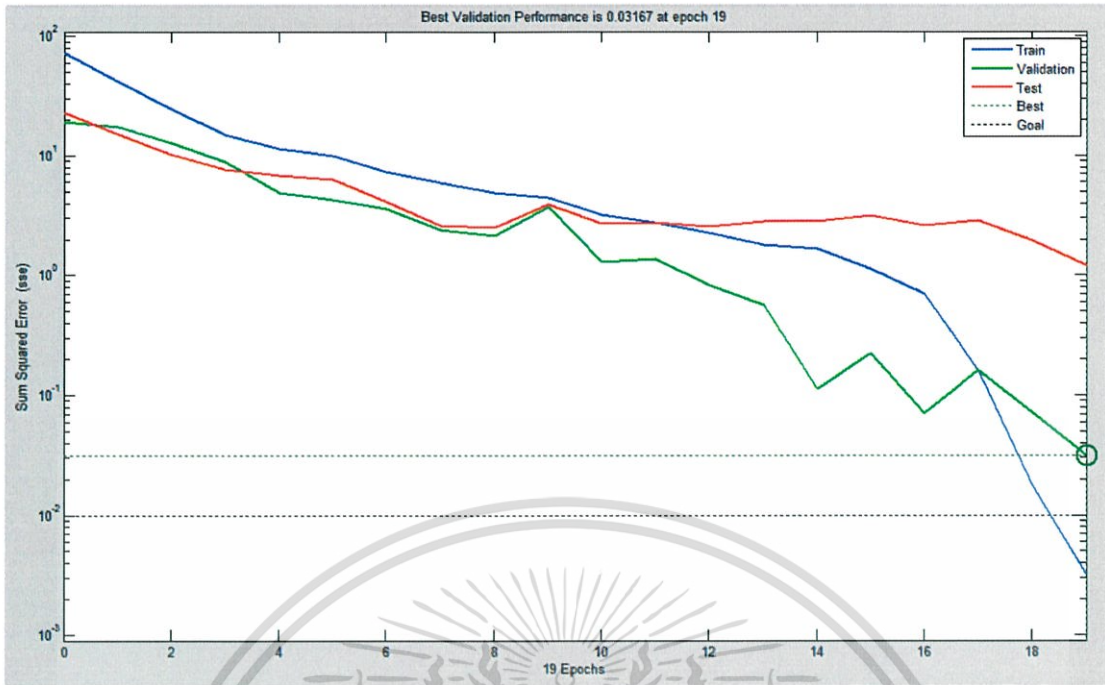
ตารางที่ 5.6 ผลการสอน การให้เหตุผล และการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบโมเดล PC-NN

จำนวนโหนดในชั้นซ่อน	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง			
	Training	validation	Test	รวม
1	69.4	58.3	41.7	61.7
2	91.7	66.7	75.0	83.3
3	100.0	83.3	75.0	91.7
4	100.0	91.7	91.7	96.7
5	100.0	91.7	91.7	96.7
6	100.0	100.0	100.0	100.0
7	100.0	100.0	83.3	96.7
8	100.0	100.0	91.7	98.3
9	100.0	83.3	91.7	95.0
10	100.0	83.3	75.0	91.7

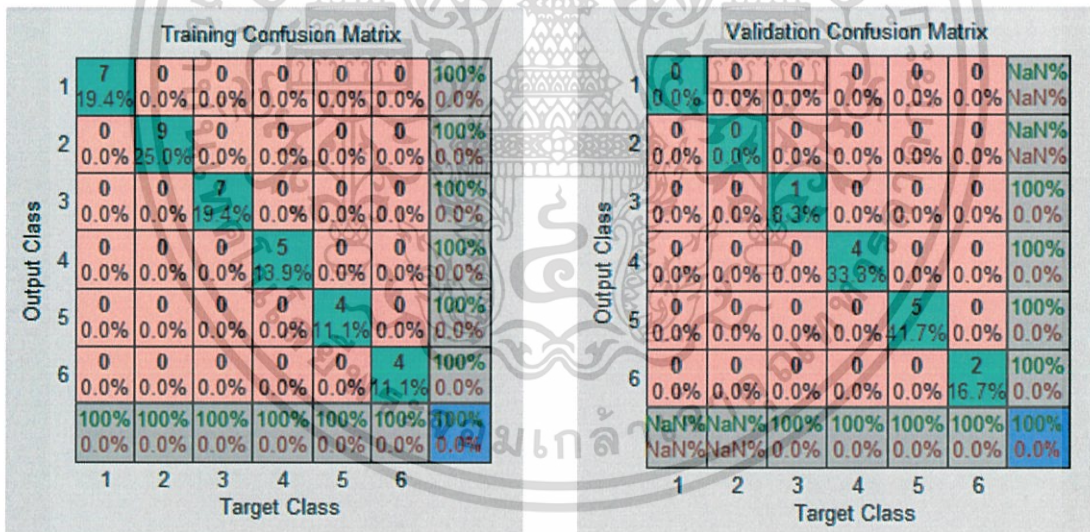


รูปที่ 5.36 โมเดล PC-NN ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่ 6 โหนด เมื่อถูกสอนสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.37 กราฟแสดงค่า Training errors, Validation errors, และ Test errors ของโมเดล PC-NN



(ก) ผลการสอนโมเดล

(ข) ผลการให้เหตุผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Confusion Matrix							
Output Class	1	2	3	4	5	6	
1	3 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	1 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	2 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 8.3%	0 0.0%	100% 0.0%
6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 33.3%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	1	2	3	4	5	6	
Target Class							

(ค) ผลการทดสอบ

All Confusion Matrix							
Output Class	1	2	3	4	5	6	
1	10 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	10 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	10 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 16.7%	0 0.0%	100% 0.0%
6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 16.7%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	1	2	3	4	5	6	
Target Class							

(ง) ผลการทำนายความผิดพลาดรวม

รูปที่ 5.38 ผลการสอนโมเดล PC-NN ที่มีโหนดในชั้นที่ซ่อนอยู่จำนวน 6 โหนด

จากตารางที่ 5.6 พบว่า จำนวนโหนดที่เหมาะสมในชั้นที่ซ่อนอยู่สำหรับโมเดล PC-NN เท่ากับ 6 โหนด (โมเดล PC-NN-6) รูปที่ 5.36 และ 5.37 แสดงให้เห็นว่าโมเดล PC-NN-6 ถูกสอนสำเร็จเนื่องจากค่าความผิดพลาด (SSE) ต่ำกว่า 0.01 (ถึงเป้าหมายที่กำหนด) โดยมีจำนวนรอบในการสอนเท่ากับ 19 รอบ รูปที่ 5.38 (ก) แสดงผลการทำนายตำแหน่งความผิดพลาดจากข้อมูล Training set พบว่าจำแนกได้ถูกต้อง 100% รูปที่ 5.38 (ข) แสดงผลการทำนายตำแหน่งความผิดพลาดจากข้อมูล Validation set พบว่าจำแนกได้ถูกต้อง 100% ส่วนรูปที่ 5.38 (ค) แสดงผลการทำนายตำแหน่งความผิดพลาดจากข้อมูล Testing set พบว่าจำแนกได้ถูกต้อง 100% และผลรวมการทำนายความผิดพลาดดังรูปที่ 5.35 (ง) พบว่าทำนายได้ถูกต้อง 100%

5.10 บทสรุป

โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม (NN) ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการทำนายตำแหน่งความผิดพลาดของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด เนื่องจากการวิเคราะห์ตำแหน่งของความผิดพลาดด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์เป็นไปได้ยากและมีความซับซ้อน เพราะเป็นปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมมีโครงสร้างแบบ MLP ใช้อัลกอริทึม trainlm ในการเรียนรู้ข้อมูล พบว่า โมเดล NN-6 สามารถทำนายตำแหน่งความผิดพลาดของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดได้ถูกต้องเท่ากับ 95% และโมเดล PC-NN-6 สามารถทำนายได้ดีกว่าโมเดล NN-6 โดยสามารถทำนายได้ 100% และในบทถัดไปจะเป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด

บทที่ 6

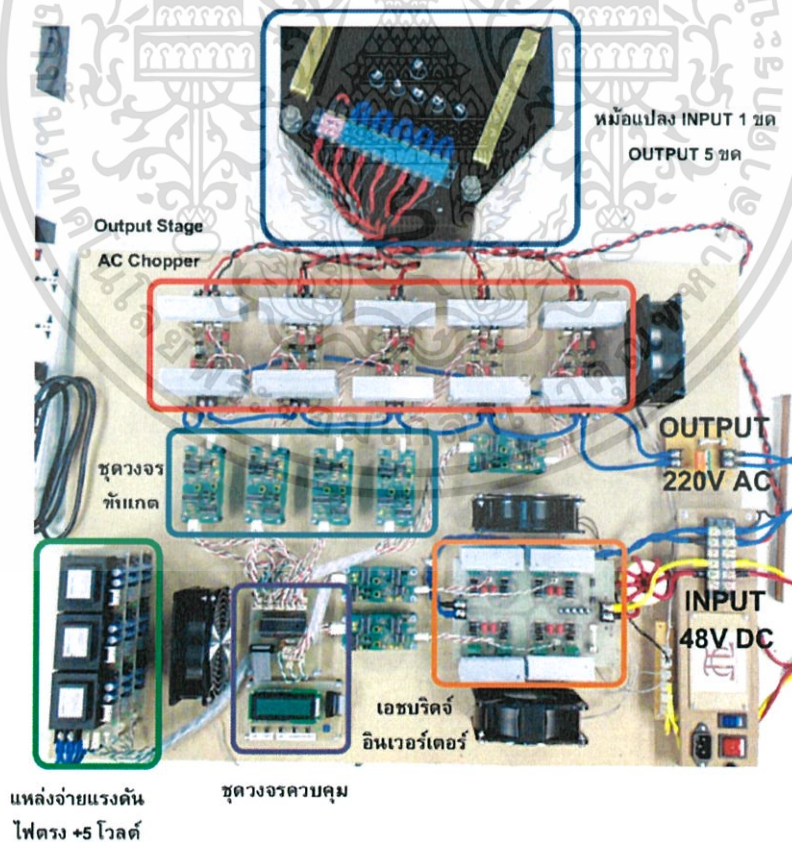
การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

6.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการออกแบบและการสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ซึ่งมีประกอบด้วย 1) ชุดวงจร H-bridge Inverter 2) หม้อแปลงหลายชุด 3) ชุด AC-Chopper 4) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ สำหรับชุดขับสัญญาณสวิตช์กำลังและชุดวงจรควบคุม และ 5) ชุดวงจรขับสัญญาณสวิตช์กำลังและชุดวงจรควบคุม การออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานและโครงสร้างของอุปกรณ์ที่นำมาใช้อย่างละเอียด เพื่อให้อุปกรณ์ต่างๆ สามารถทำงานร่วมกันและสามารถแก้ไขเมื่อเกิดปัญหาในการทำงานได้

6.2 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ประกอบด้วยวงจรต่างๆ ดังนี้



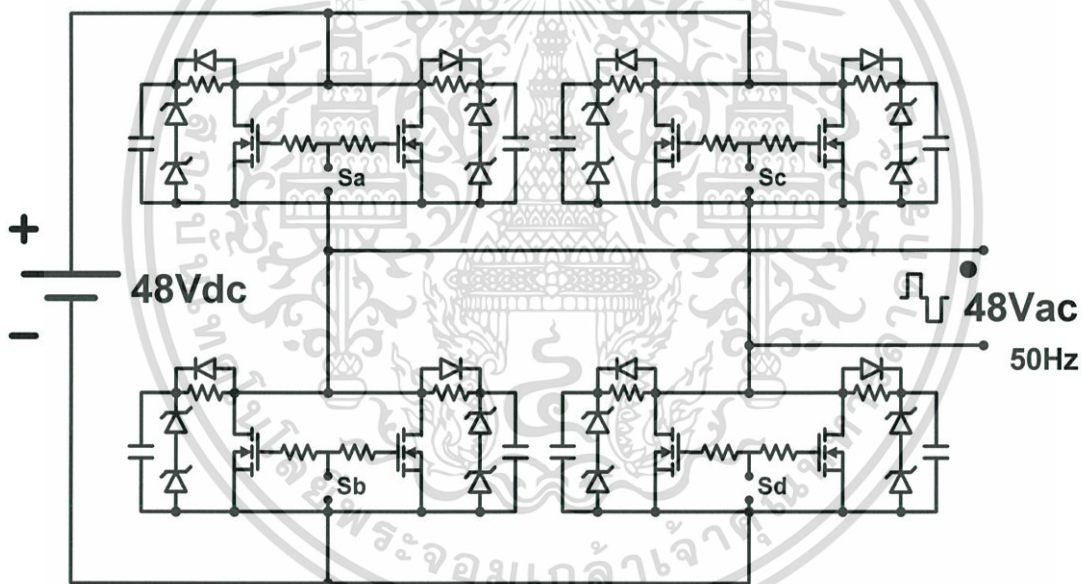
รูปที่ 6.1 รูปชิ้นงานเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1 ชุดวงจร H-bridge Inverter

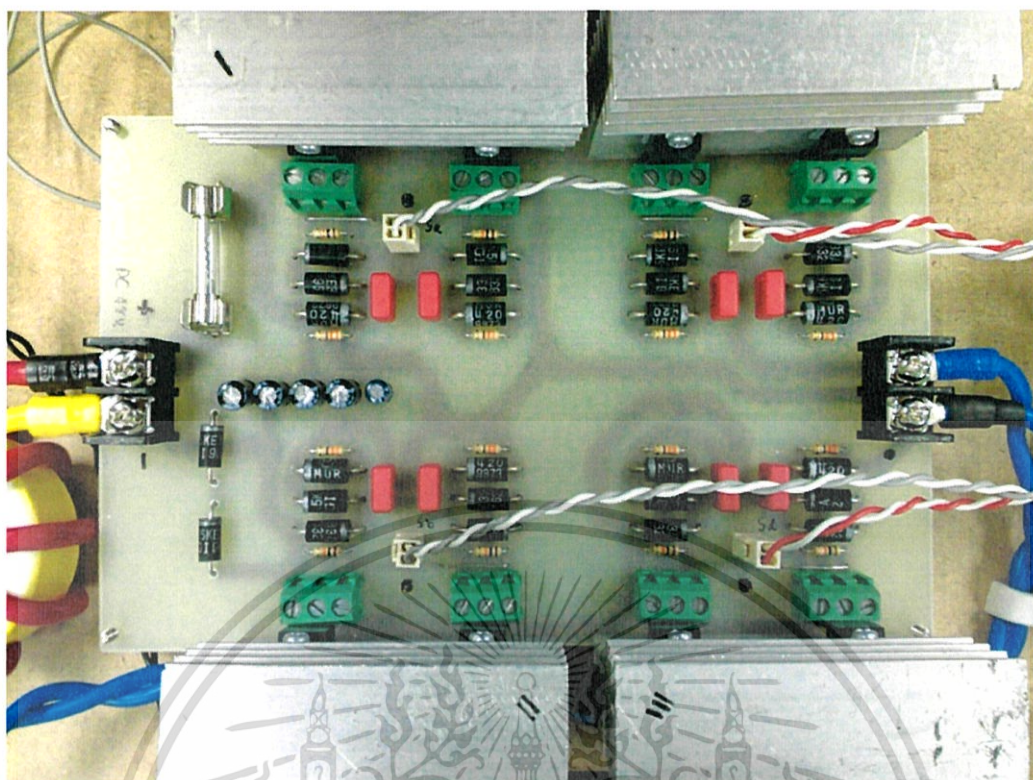
ชุดวงจร H-bridge Inverter เป็นอุปกรณ์ที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 โวลต์ เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) ที่มีขนาด 48 โวลต์ ที่ความถี่ 50 Hz และมีช่วงเวลาหน่วงระหว่างข้ามจุดแรงดันศูนย์ (hold-on-at-zero) เท่ากับ 100 μ s และจ่ายพลังงานให้กับกับหม้อแปลงหลายชุดทางด้านปฐมภูมิ (primary coil)

วงจรกำลังของ H-bridge Inverter แสดงดังรูปที่ 6.2 ประกอบด้วย สวิตช์กำลังชนิดมอสเฟต (MOSFET) เบอร์ IRF3710 มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 100 โวลต์ พิกัดกระแสเท่ากับ 57 แอมป์ นำมาต่อเป็นวงจรแบบฟูลบริดจ์ โดยใช้สวิตช์ MOSFET ต่อขนานกัน 2 ตัวต่อหนึ่งสัญญาณขับสวิตช์กำลัง เพื่อช่วยในการแบ่งกระแสและลดค่าความต้านทานภายในลงขณะที่อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งทำงานพร้อมทั้งวงจรสับเบอร์ที่ประกอบด้วยซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1.5KE33A พิกัดแรงดัน 33 โวลต์ ต่ออนุกรมกัน และสุดท้ายคือตัวเก็บประจุ ขนาด 470 นาโนฟารัด พิกัดแรงดันเท่ากับ 100 โวลต์ ดังแสดงในตารางที่ 6.1 และดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.2 ชุดวงจรกำลังของ H-bridge Inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 ชิ้นงานของชุดวงจร H-bridge Inverter

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงรายละเอียดอุปกรณ์เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์

ลำดับที่	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	พิกัด	จำนวน
1	Capacitor	Electrolyte	1uF 63V	4
		bipolar	2.2 uF	1
		WIMA	470nF 100V	8
2	Zenor Diode	1.5KE33A		18
3	Diode	MUR420		8
4	Resistors	Carbon film	330R 5% 1/4w	8
		Carbon film	10K 5% 1/4w	8
5	Mosfet	IRF3710		8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 หม้อแปลงชนิดหลายชุด (Multi-winding Transformer)

หม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding Transformer) ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้เลือกใช้แกนหม้อแปลงชนิดทอรอยด์ (Toroid) จากการนำแกนหม้อแปลงทอรอยด์ชนิดปรับค่าได้แบบ 1 เฟส (Variat 1 phase) ที่ซำรุต ดังแสดงในรูป 6.4 มาประยุกต์ใช้ทำเป็นหม้อแปลงหลายชุด โดยถอดขดลวดของหม้อแปลงชุดเดิมที่ซำรุตออกและทำการพันใหม่โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

6.2.2.1 พิกัดของหม้อแปลงหลายชุด

พิกัดของหม้อแปลงหลายชุด ที่ใช้สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดมีรายละเอียดดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 รายละเอียดพิกัดหม้อแปลงหลายชุด

พิกัดกำลัง	3000 VA
พิกัดแรงดันขดลวดปฐมภูมิ	48 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิชุดที่ 1	12 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิชุดที่ 2	24 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิชุดที่ 3	48 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิชุดที่ 4	96 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิชุดที่ 5	192 Volt
ชนิดแกนเหล็ก	แกนทอรอยด์ (Toroidal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 หม้อแปลงทอรอยด์ที่ขำรด

6.2.2.2 การออกแบบหม้อแปลงหลายชุด

การออกแบบหม้อแปลงหลายชุดมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. นำแกนเหล็กที่ได้มาทำการวัดหาขนาดโดยได้ขนาดดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงขนาดของแกนหม้อแปลงทอรอยด์

ความกว้างวงนอก (R_1)	242.8 mm
ความกว้างวงใน (R_2)	133.4 mm
ความสูงแกน (h)	60.6 mm
ความกว้างวงแหวน(L)	54.7 mm

2. คำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กจากสมการที่ 6.1

$$\text{พื้นที่หน้าตัด}(A) = \text{ความกว้างวงแหวน (L)} \times \text{ความสูงแกน (h)} \quad (6.1)$$

จะได้ $\text{พื้นที่หน้าตัด}(A) = 54.7 \text{ มิลลิเมตร} \times 60.6 \text{ มิลลิเมตร}$
 $= 3314.82 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$
 $= 0.00331482 \text{ ตารางเมตร}$

3. คำนวณหาจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ (เนื่องจากสัญญาณแรงดันเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม) จากสมการที่ 6.2 [23]

$$E = 4 \cdot f \cdot N \cdot B \cdot A \quad (6.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E	คือ แรงดันไฟฟ้า (V)
f	คือ ความถี่ไฟฟ้า (Hz)
N	คือ จำนวนรอบขดลวด (turn)
B_m	คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux intensity) (T)
A	คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m^2)
จะได้	$48 \text{ V} = 4 \cdot (50) \cdot (N) \cdot (0.9) \cdot (0.00331482)$
	$N = 80.44 \text{ turns}$
ขดลวดปฐมภูมิ (N_{pri})	$= 80 \text{ turns}$

4. คำนวณหาจำนวนขดลวดทุติยภูมิและกระแสของแต่ละขดลวดจากสมการที่ 6.3

$$\frac{V_{pri}}{V_{sec}} = \frac{N_{pri}}{N_{sec}} = \frac{I_{sec}}{I_{pri}} \quad (6.3)$$

จะทำให้ได้ค่าแรงดันทางด้านปฐมภูมิ (V_{pri}) มีค่าเท่ากับ 48 โวลต์ จำนวนขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (N_{pri}) มีค่าเท่ากับ 80 รอบ และสามารถหาจำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิได้ตามสมการที่ 6.3 ซึ่งแต่ละขดจะมีขนาดดังแสดงในตารางที่ 6.4 และ 6.5

ตารางที่ 6.4 ตารางแสดงจำนวนรอบของการพันขดลวดทุติยภูมิจากการคำนวณ

ตำแหน่งขดลวด	พิกัดแรงดัน (V)	จำนวนรอบขดลวดจากการคำนวณ (รอบ) ¹	จำนวนรอบขดลวดที่พื้นที่หม้อแปลง (รอบ) ²
ปฐมภูมิ	48	80.44	80
ทุติยภูมิขดที่ 1	12	21.78	20
ทุติยภูมิขดที่ 2	24	40.22	40
ทุติยภูมิขดที่ 3	48	80.44	80
ทุติยภูมิขดที่ 4	96	160.88	160
ทุติยภูมิขดที่ 5	192	321.76	320

¹ ปรับปรุงการคำนวณโดยใช้สูตรสำหรับสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

² ในการออกแบบในสูตรสำหรับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในการคำนวณและออกแบบ

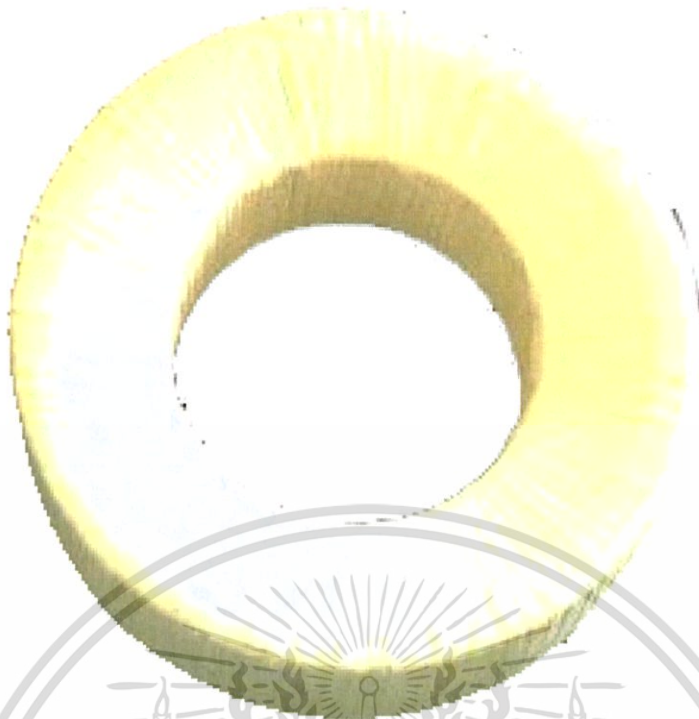
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 ตารางสรุปรายละเอียดหม้อแปลงหลายขดที่ทำการออกแบบ

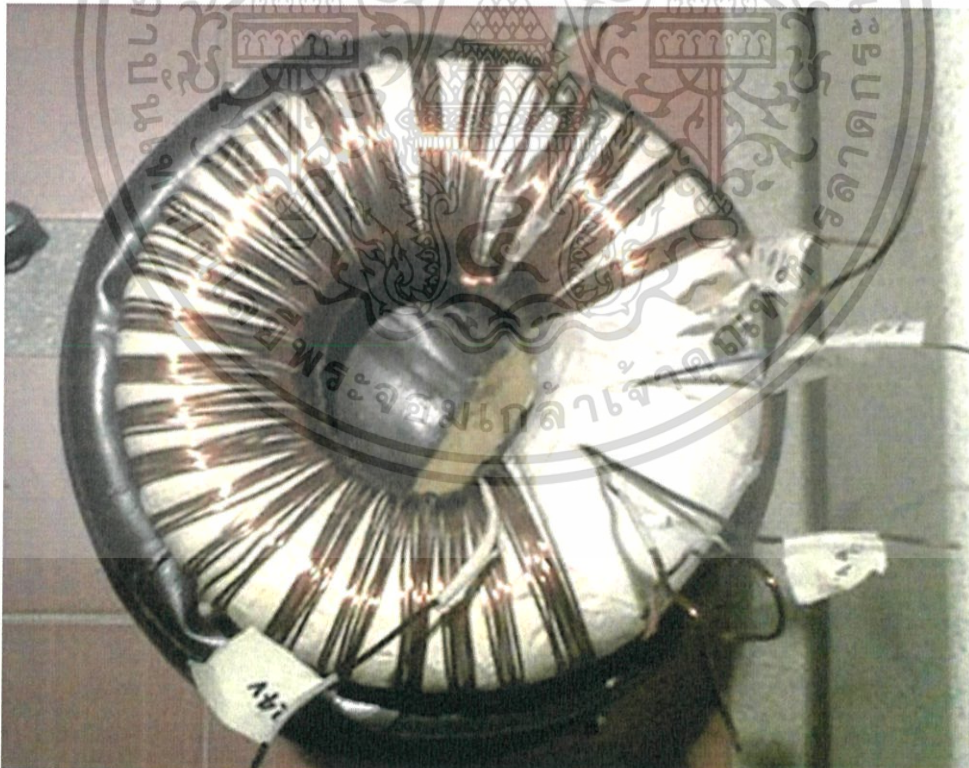
ตำแหน่งขดลวด	พิกัดแรงดัน (V)	จำนวนรอบขดลวด (รอบ)	ค่าพิกัดกระแสที่พิกัด 3kVA (A)	ขนาดเส้นลวด (SWG)	V/turn
ปฐมภูมิ	48	80	63.5	6	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 1	12	20	7.2	12	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 2	24	40	7.5	12	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 3	48	80	8	14	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 4	96	160	8.5	14	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 5	192	320	9.2	14	0.6

5. จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณนำไปพันหม้อแปลงหลายขดโดยเริ่มต้นจากการนำผ้าพันหม้อแปลงพันแกนเหล็กเพื่อป้องกันการเสียดสีของขดลวดกับเนื้อแกนเหล็กดังรูปที่ 6.5 จากนั้นทำการพันขดลวดทีละชั้นตามขนาดและจำนวนรอบของการพันขดลวดที่ทำการคำนวณดังรูปที่ 6.6 เมื่อพันขดลวดครบ 1 ชั้น จะทำการพันด้วยเทปกระดาษซ้อนทุกชั้นของการพันเพื่อป้องกันการเสียดสีระหว่างชั้น และเมื่อพันขดลวดทุติยภูมิเสร็จเรียบร้อยในแต่ละขดจะต้องทำการทดสอบการขึ้นแรงดันว่าสามารถจ่ายแรงดันขาออกได้ตามที่ออกแบบ ดังรูปที่ 6.7

6. ต่อขั้วต่อสายต่อฟิวส์ป้องกันกระแสเกินและบรรจุลงกล่องหม้อแปลง โดยต่อขั้วต่อสายเพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อหม้อแปลงเข้ากับวงจร และฟิวส์แก่ขดลวดแต่ละขดเพื่อป้องกันกระแสเกินในการทำงานและบรรจุลงกล่องหม้อแปลง ได้เป็นหม้อแปลงหลายขดที่เสร็จสมบูรณ์ ดังรูปที่ 6.8

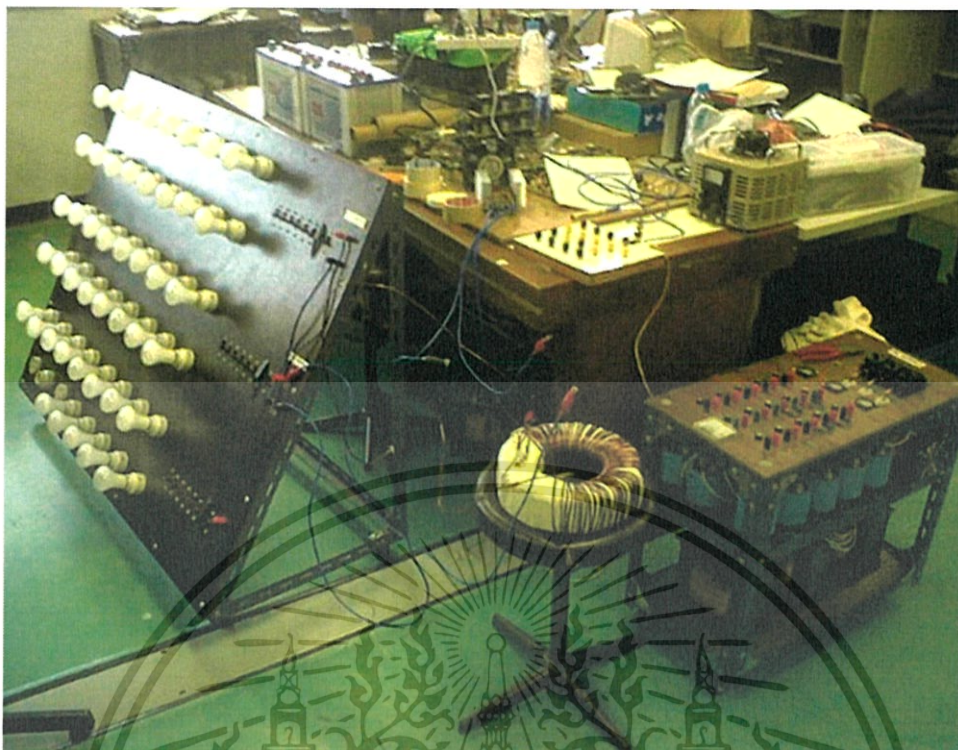


รูปที่ 6.5 แกนหม้อแปลงพันผ้าพันหม้อแปลง

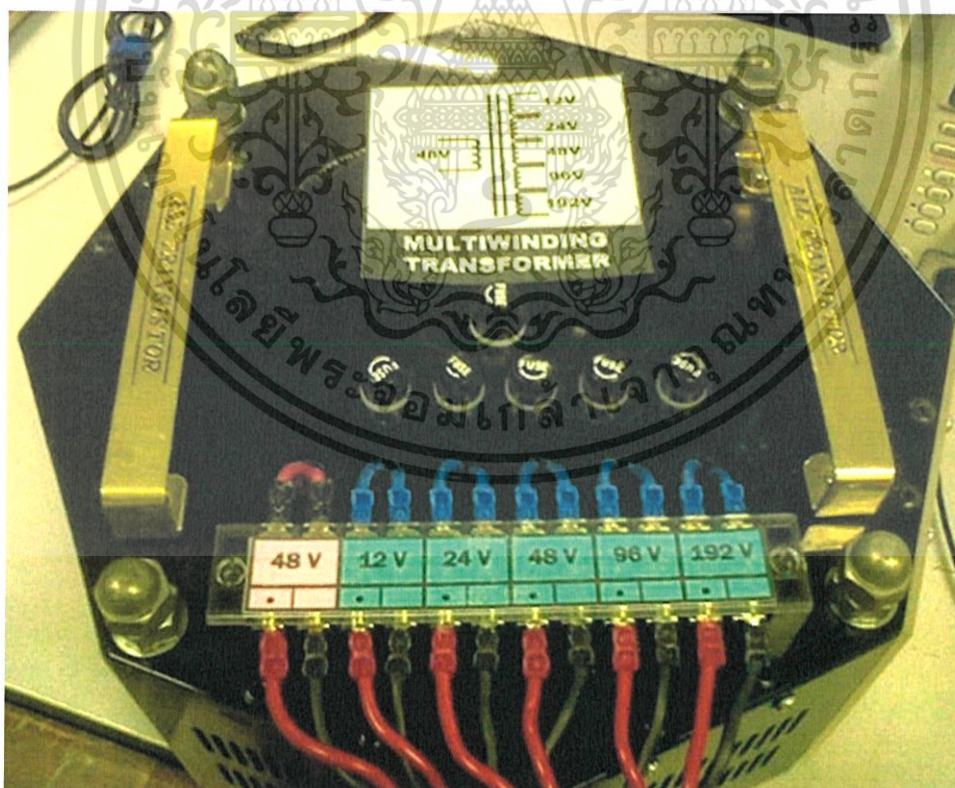


รูปที่ 6.6 รูปการพันขดลวดที่ละชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



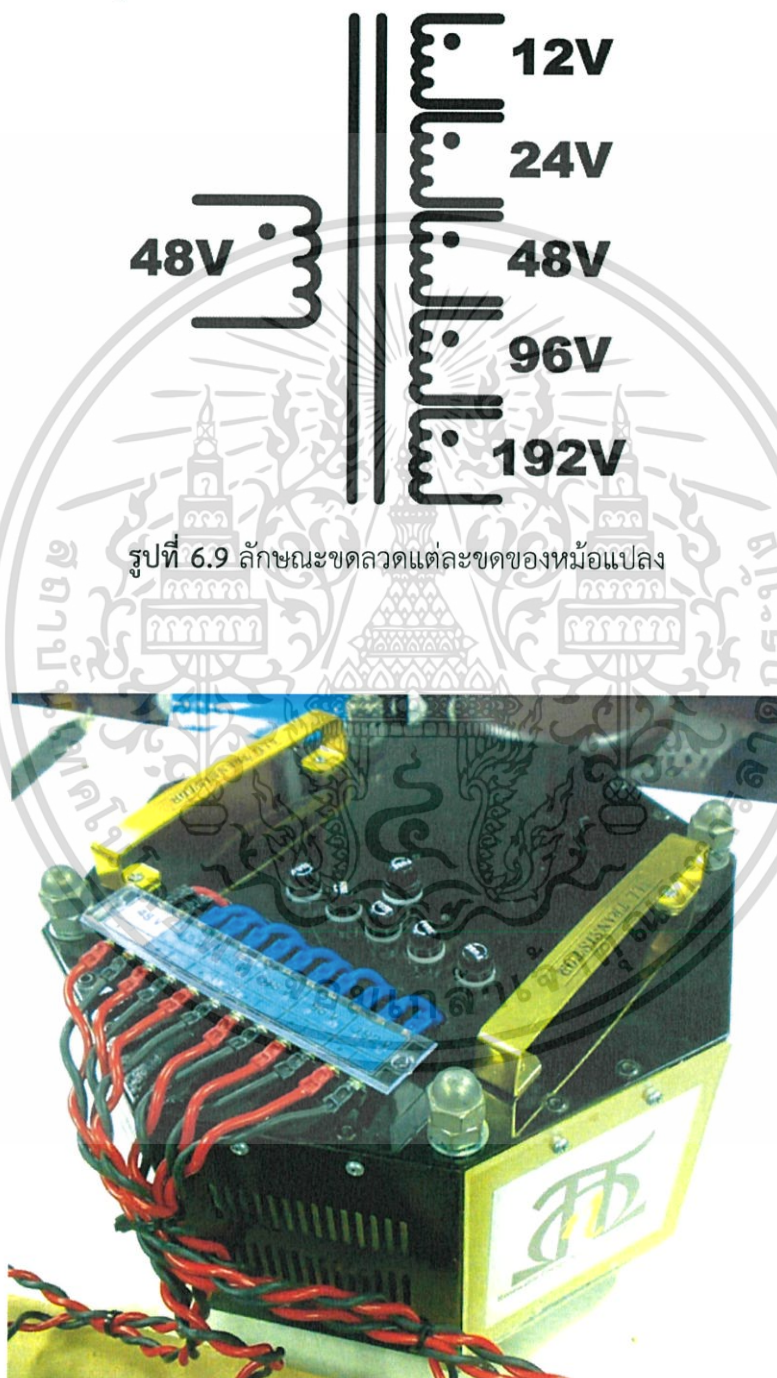
รูปที่ 6.7 รูปการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงเมื่อทำการพันในแต่ละรอบ



รูปที่ 6.8 หม้อแปลงหลายชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบหม้อแปลง จะได้จำนวนขดลวดในแต่ละขดที่ระดับแรงดันต่างๆ เมื่อนำมาพันบนแกนทอรอยด์ลักษณะดังรูปที่ 6.9 โดยที่ด้านปฐมภูมิพันจำนวน 80 รอบ และด้านทุติยภูมิ พันขดลวดจริงจำนวน 21, 41, 82, 162 และ 322 รอบตามลำดับ จะเห็นได้ว่าจำนวนขดทางด้านทุติยภูมิมากกว่าที่คำนวณได้เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการขดเซยแรงดันที่มีการสูญเสียภายในหม้อแปลงและอุปกรณ์อื่นๆ และได้มีการต่อฟิวส์ เข้ากับขดลวดแต่ละขดเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับขดลวดของหม้อแปลงดังรูปที่ 6.10

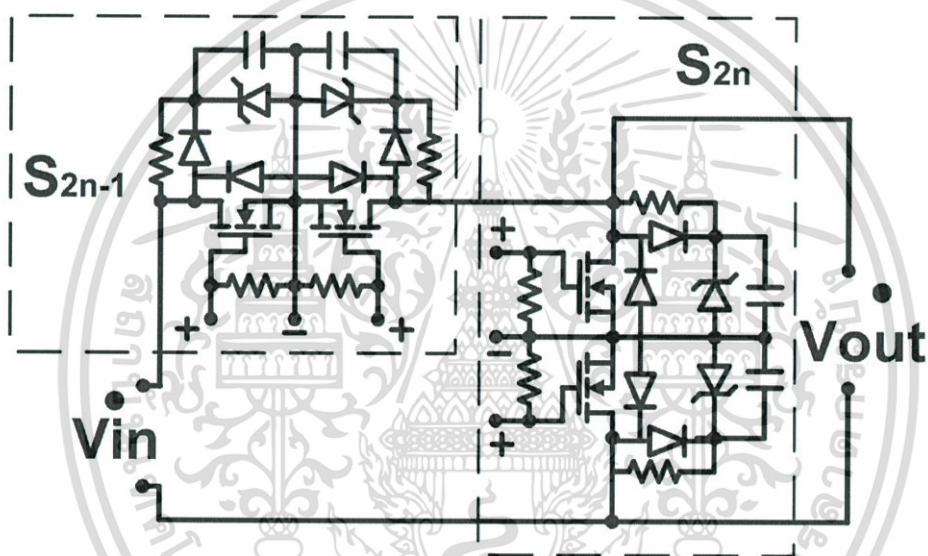


รูปที่ 6.10 ชิ้นงานหม้อแปลงชนิดหลายขด

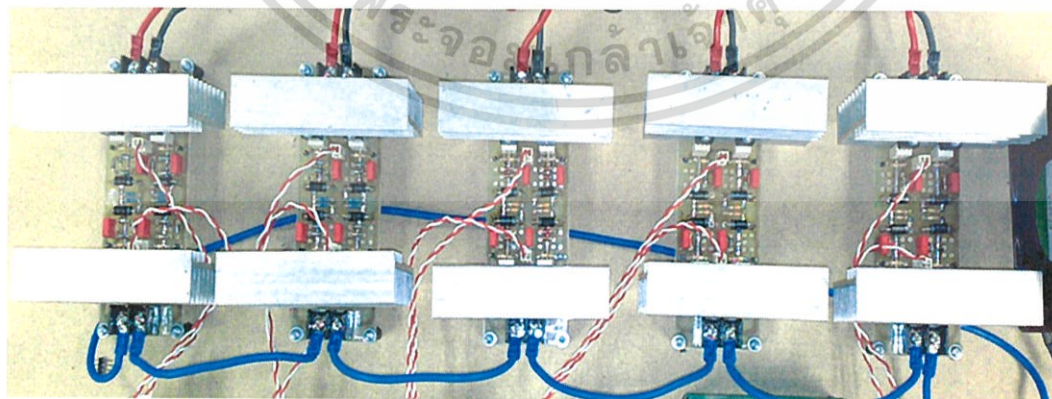
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 ชุด AC-Chopper

วงจรทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดประกอบด้วยวงจรของชุด AC-Chopper จำนวน 5 ชุด นำมาต่ออนุกรมกัน ซึ่งแต่ละชุดจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากขดทุติยภูมิทั้ง 5 ชุดของหม้อแปลงที่ระดับแรงดันต่างๆ กัน เพื่อสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เป็นระดับขั้นตามสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าไป สามารถสร้างระดับได้สูงสุด 63 ระดับ สำหรับวงจรของชุด AC-Chopper ประกอบด้วย สวิตช์กำลังชนิด MOSFET อุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง และวงจรสับเบอร์ โดยที่ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์ในแต่ละชุดของ AC-Chopper จะต่างกัน ขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันที่รับจากขดทุติยภูมิของหม้อแปลงหลายชุดดังแสดงในตารางที่ 6.6 และ 6.7 ซึ่งวงจรกำลังของชุด AC-Chopper สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.11 ส่วนรูปที่ 6.12 แสดงชิ้นงานจริงของวงจรชุด AC-Chopper



รูปที่ 6.11 วงจรกำลังของชุด AC-Chopper จำนวน 1 ชุด



รูปที่ 6.12 ชิ้นงานจริงของวงจรชุด AC-Chopper จำนวน 5 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.6 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์วงจรเอซี-ชอปเปอร์ เซลล์ที่ 1 ถึงเซลล์ที่ 5

เซลล์	ลำดับ	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	พิกัด	จำนวน
1	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4748	22V	4
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	120	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	STB55NF06	50A 60V	4	
2	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4752	33V	4
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	330	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	STB55NF06	50A 60V	4	
3	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4752	33V	8
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	330	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	IRF530N	17A 100V	4	
4	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4760	66V	8
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	470	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	FQP630	9A 200V	4	
5	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4762	82V	12
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	470	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	IRF840B	8A 500V	4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7 สรุปอุปกรณ์ของชุดวงจรเอซี-ชอปเปอร์

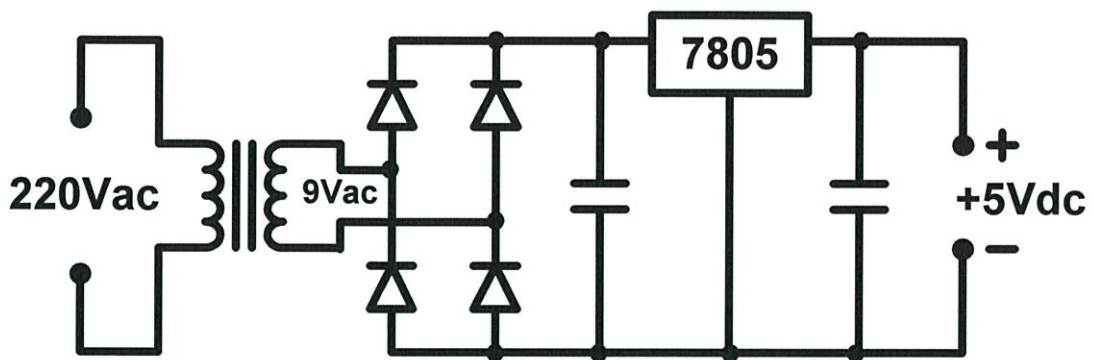
ลำดับ	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	พิกัด	จำนวน
1	Capacitors	WIMA	47nF250V	20
2	Zener diode	1N4748	22V	4
		1N4752	33V	12
		1N4760	66V	8
		1N4762	82V	12
3	Diode	MUR460		20
4	Resistors	120	Carbon film	4
		330	Carbon film	8
		470	Carbon film	8
		10K	Carbon film	20
5	MOSFET	STB55NF06	50A 60V	8
		IRF530N	17A 100V	4
		FQP630	9A 200V	4
		IRF840B	8A 500V	4

6.2.4 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply) สำหรับชุดขับสัญญาณสวิตช์กำลัง และชุดวงจรควบคุม

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ เป็นอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแกว่งจร ควบคุมและชุดวงจรขับสัญญาณสวิตช์กำลังทั้ง 14 ชุด (ชุด H-bridge Inverter จำนวน 4 ชุด และชุด AC-Chopper จำนวน 10 ชุด) ซึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ จะมีทั้งหมด 8 แหล่งจ่าย เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ชุดวงจรขับสัญญาณสวิตช์กำลัง 2 ชุดต่อหนึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และจ่ายให้กับวงจรควบคุมอีก 1 ชุด

สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 220 โวลต์ ให้ลดระดับลงเป็น 9 โวลต์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดติดตั้งลงบนแผงวงจร เพื่อความสะดวกในการรวมลายแบบพิมพ์ของวงจรไว้ในแผ่นเดียวกัน และใช้ไอซีเรียงกระแสเบอร์ DB104G เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนั้นยังมีการลดค่าระลอกคลื่นของแรงดัน (ripple voltage) ด้วยตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ และโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ (Voltage Regulation) เบอร์ 7805 เพื่อรักษาระดับแรงดัน และต้องการรักษาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาออกที่มีค่าถูกต้องและคงที่ตลอดเวลา โดยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ มีลักษณะวงจรดังรูป 6.13 และชิ้นงานจริงดังรูป 6.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์



รูปที่ 6.14 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์

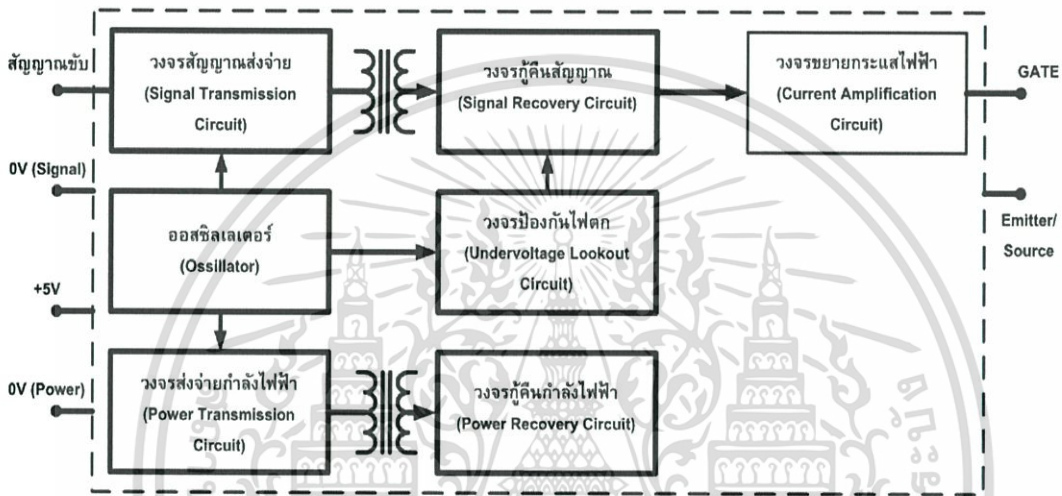
6.2.5 การออกแบบชุดวงจรขับสัญญาณสวิทช์กำลัง

วงจรขับสัญญาณสวิทช์กำลังเป็นวงจรที่จำเป็นสำหรับการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เนื่องจากสัญญาณที่จะควบคุมอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้นต้องมีแรงดันตั้งแต่ 7 - 24 โวลต์ แต่สัญญาณที่ออกจากระบบควบคุมมีเพียง +5 โวลต์ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรขับสัญญาณสวิทช์กำลัง บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรขับสัญญาณสวิทช์กำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.15 ส่วนรูปที่ 6.16 แสดงวงจรถูกขับของวงจรขับสัญญาณสวิทช์กำลัง ส่วนชิ้นงานจริงของวงจรขับสัญญาณสวิทช์กำลังแสดงดังรูปที่ 6.17 สำหรับการออกแบบวงจรขับสัญญาณสวิทช์กำลังประกอบด้วย 8 ส่วนด้วยกันดังนี้

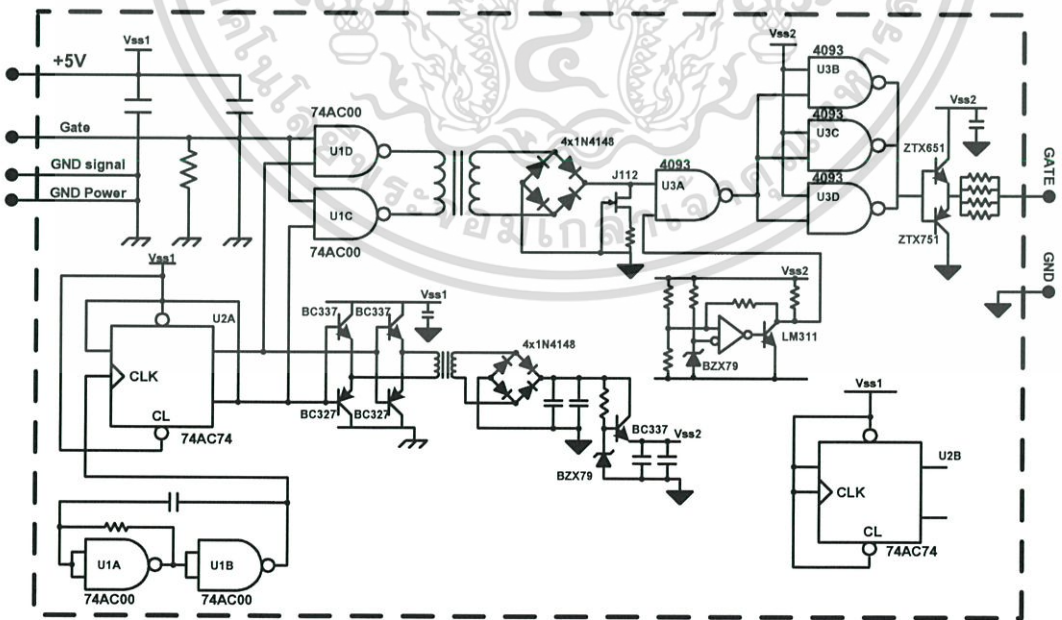
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.5.1 วงจรสำหรับการขับสวิตช์กำลัง (Gate-drive Circuit)

วงจรขับสวิตช์กำลังทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้รับจากวงจรควบคุมซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการส่งสัญญาณควบคุมขนาด 5 โวลต์ มาขยายสัญญาณให้เป็น 15 โวลต์ สำหรับส่งไปควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง ซึ่งวงจรขับสวิตช์กำลังจะมีการแยกกราวด์ทางไฟฟ้า (Isolation) ระหว่างวงจรควบคุมและวงจรถูกขับ ด้วยหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่วงจรขับ 1 วงจร จะทำหน้าที่ขับสวิตช์กำลัง MOSFET จำนวน 2 ตัว และจะใช้สัญญาณขับตัวเดียวกัน

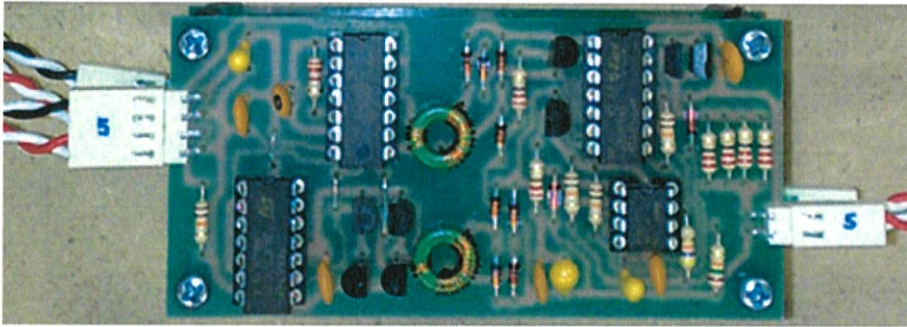


รูปที่ 6.15 บล็อกไดอะแกรมของชุดวงจรขับสวิตช์กำลัง



รูปที่ 6.16 วงจรชุดขับสวิตช์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 รูปชิ้นงานวงจรขับสวิตช์กำลัง

6.2.5.2 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Circuit)

สัญญาณที่ขาเกตของ U1A และ U1B จากตัวออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานที่ความถี่ประมาณ 4 MHz ที่ด้านขาออกของตัวออสซิลเลเตอร์นี้จะถูกแบ่งครึ่งความถี่โดยตัว U2A เพื่อที่จะสร้างสัญญาณสำหรับขับ

6.2.5.3 วงจรสัญญาณส่งจ่าย (Signal Transmission Circuit)

สัญญาณขับ (active-high) ถูกใช้เพื่อที่จะสามารถทำงานได้ที่ 2 MHz ของสัญญาณขดลวดปฏิกิริยาของหม้อแปลงตัวที่สอง เพื่อใช้ในการยกระดับของสัญญาณควบคุม

6.2.5.4 วงจรกู้คืนสัญญาณ (Signal Recovery Circuit)

สัญญาณที่ 2 MHz จากวงจรสัญญาณส่งจ่ายจะถูกจัดเรียงเพื่อที่จะได้ระดับแรงดัน 15 โวลต์และเข้าไปที่ขา 1 ของ U3A คู่วงจรถานซิสเตอร์ JFET ทำหน้าที่เหมือนความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นกับสัญญาณควบคุม ซึ่งการไม่เป็นเชิงเส้นนี้ทำให้มันทนต่อสัญญาณรบกวน และทำให้ตัวเก็บประจุใน U3A คายประจุได้อย่างรวดเร็วขณะหยุดการทำงาน (Turn Off) ส่งผลให้ค่าความสูญเสียในช่วงสถานะคงตัว (Steady-State) มีค่าน้อยกว่าการใช้ตัวต้านทานแบบเชิงเส้น

6.2.5.5 วงจรขยายกระแสไฟฟ้า (Current Amplification Circuit)

U3A, U3B, U3C, U3D และตัว ZTX651/751 ทำงานรวมกัน เพื่อรับและจ่ายกระแสสูงเพื่อทำให้ตัวเก็บประจุของไอจีบีที (IGBT) ชาร์จและดิสชาร์จเร็วขึ้น ทำให้สวิตช์ไอจีบีทีทำงานและหยุดทำงานได้เร็วขึ้น และได้ต่อตัวต้านเพิ่มที่ด้านออกเพื่อลดความร้อนในตัว ZTX651 เนื่องจากการรับและจ่ายกระแสสูง

6.2.5.6 วงจรป้องกันไฟฟ้าตก (Under Voltage Lookout Circuit)

U4 จะยับยั้งการส่งจ่ายแรงดันของสัญญาณขับเคลื่อน ถ้าแรงดัน (V_{ss2}) ต่ำกว่าประมาณ 11.6 โวลต์ ซึ่งมันจะทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) จากการทดสอบทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 - Q_2 ร้อน

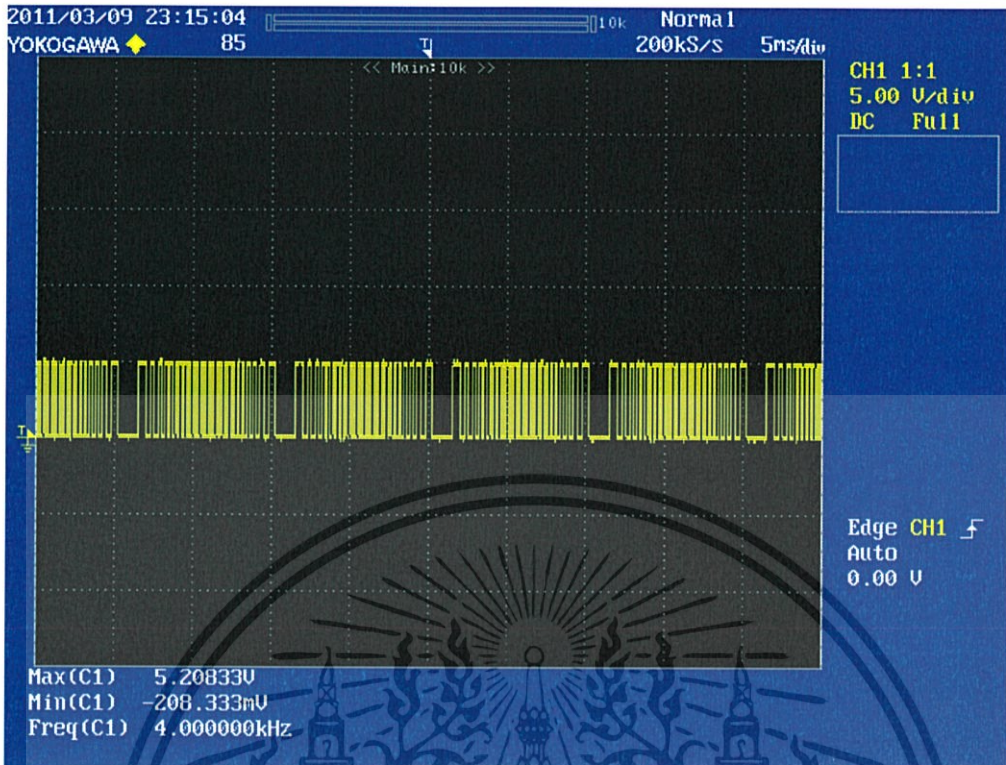
6.2.5.7 วงจรส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Transmission Circuit)

สัญญาณที่สมบูรณ์แล้วจากตัวขับออสซิลเลเตอร์ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงส่งจ่ายกำลังจะผ่านทางตัวทรานซิสเตอร์ที่ขยายกระแสไฟฟ้า

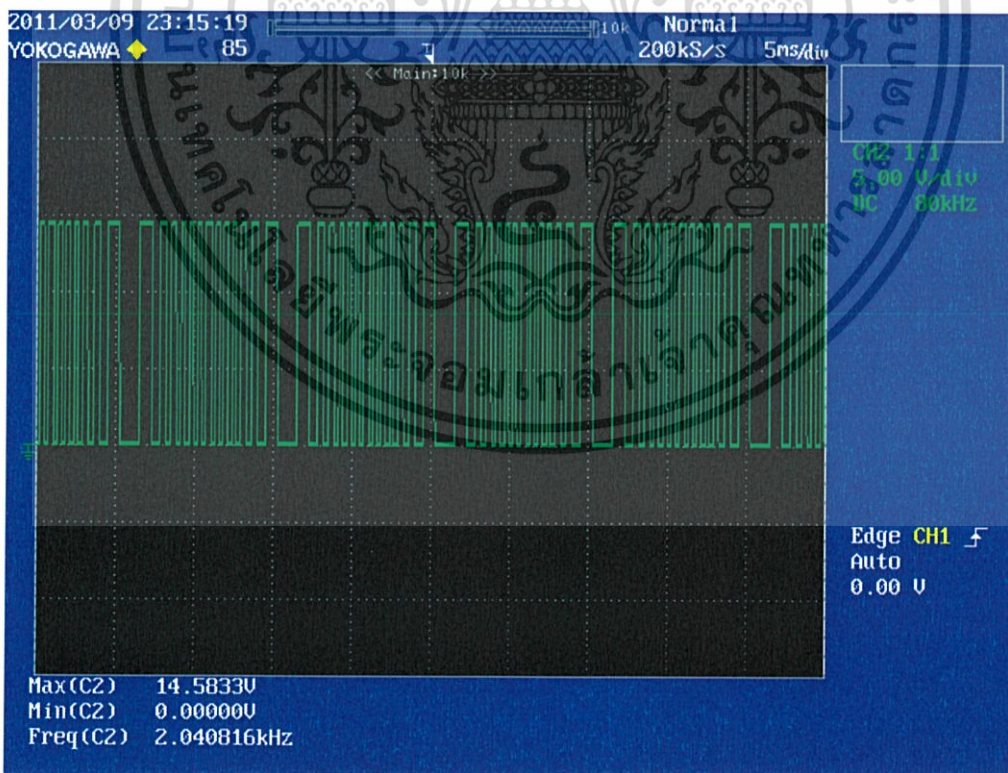
6.2.5.8 วงจรกู้คืนกำลังไฟฟ้า (Power Recovery Circuit)

สัญญาณที่ 2 เมกกะเฮิรตซ์ จากวงจรส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะถูกเรียงกระแสเพื่อได้แรงดันโดยประมาณที่ 18 โวลต์ ตัวตรวจจับแบบเชิงเส้นจะทำหน้าที่ลดแรงดันนี้ไปอยู่ที่ 15 โวลต์ และจากการทดสอบการทำงาน โดยรูปที่ 6.18 เป็นสัญญาณขับเคลื่อนจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และรูปที่ 6.19 เป็นรูปสัญญาณการขับเคลื่อนที่ผ่าน วงจรขับเคลื่อนแล้ว ซึ่งได้แรงดันประมาณ 15 โวลต์





รูปที่ 6.18 สัญญาณที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 6.19 สัญญาณที่ผ่านวงจรขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การออกแบบวงจรควบคุมและสัญญาณควบคุมการทำงานสวิตช์กำลัง

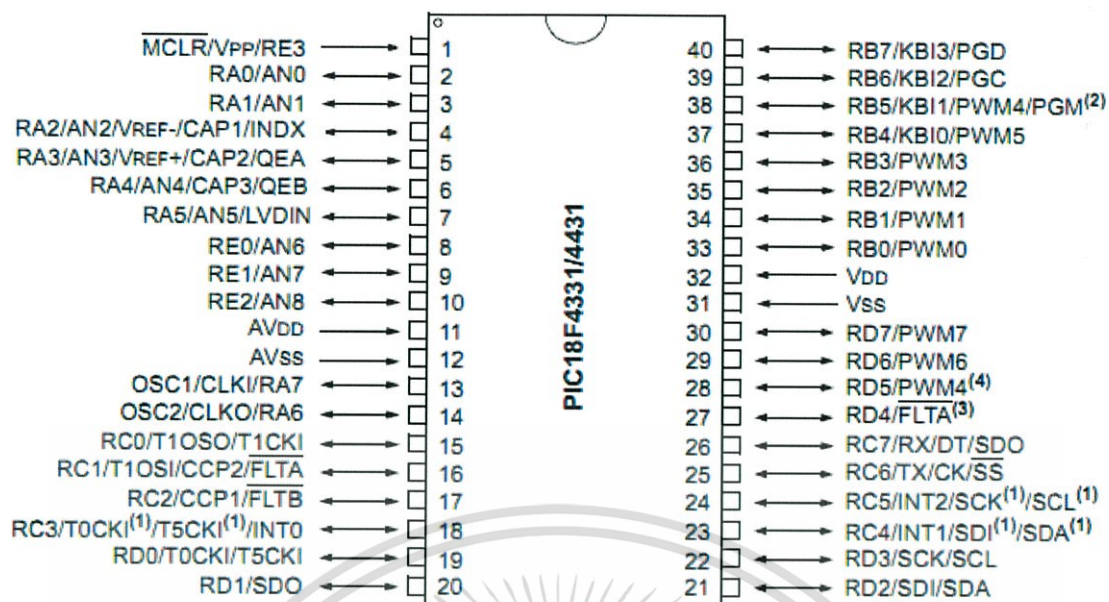
6.3.1 วงจรควบคุม

การออกแบบวงจรควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณมาควบคุมการทำงานของมอสเฟตทั้งในส่วนของชุดวงจร H-bridge Inverter และในส่วนของชุด AC-Chopper ทั้ง 5 ชุด รวมถึงการแสดงผลทางหน้าจอแสดงผลแอลซีดี (LCD display) นั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณทั้ง 14 สัญญาณ โดยแบ่งเป็นสัญญาณควบคุมมอสเฟต ในวงจร H-bridge Inverter จำนวน 4 สัญญาณ และสัญญาณควบคุมชุด AC-Chopper จำนวนชุดละ 2 สัญญาณ รวมเป็น 10 สัญญาณ

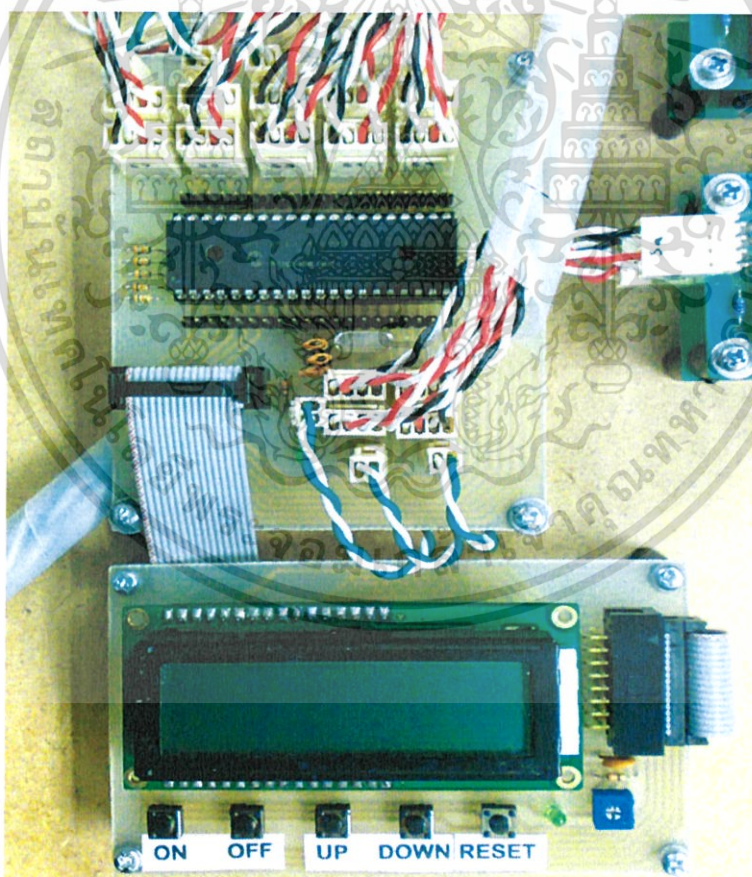
หลักการทำงานของสัญญาณขับเคลื่อนจะเริ่มจากหน่วยประมวลผล (Control Processor Unit: CPU) โดยเลือกใช้ PIC (Peripheral Interface Controller) เบอร์ 18F4431 ดังรูปที่ 3.20 แล้วทำการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี (C Language) เพื่อสร้างสัญญาณขับเคลื่อนทั้งการควบคุมการเปิด-ปิด การเพิ่ม-ลดจำนวนขั้นของแรงดันเพื่อปรับแรงดันด้านขาออก และแสดงผลออกทางจอ LCD สาเหตุที่เลือกใช้ PIC เบอร์ 18F4431 เนื่องจากมีคุณสมบัติคือ มีพอร์ตให้เลือกใช้งานถึง 36 พอร์ต และมีหน่วยความจำข้อมูล 16 กิโลไบต์ ความถี่ในการใช้งาน 20 MHz สามารถเขียนและลบโปรแกรมได้มากถึง 100,000 ครั้ง

6.3.2 การออกแบบสัญญาณควบคุมการทำงานสวิตช์กำลัง

วงจร AC-Chopper จะทำหน้าที่ในการสร้างแรงดันขาออกที่เป็นระดับขั้น โดยสามารถสร้างได้จากการนำวงจร AC-Chopper มาต่ออนุกรมกันจำนวน 5 ชุดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ทำให้สามารถรวมเป็นรูปคลื่นแรงดันได้หลายระดับขั้น โดยเราสามารถสร้างระดับแรงดันที่แตกต่างกันได้มากที่สุดคำนวณได้จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งจำนวนแรงดันที่สามารถสร้างได้คือ 63 ระดับ รูปที่ 6.21 แสดงขึ้นงานวงจรควบคุมสัญญาณ



รูปที่ 6.20 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431



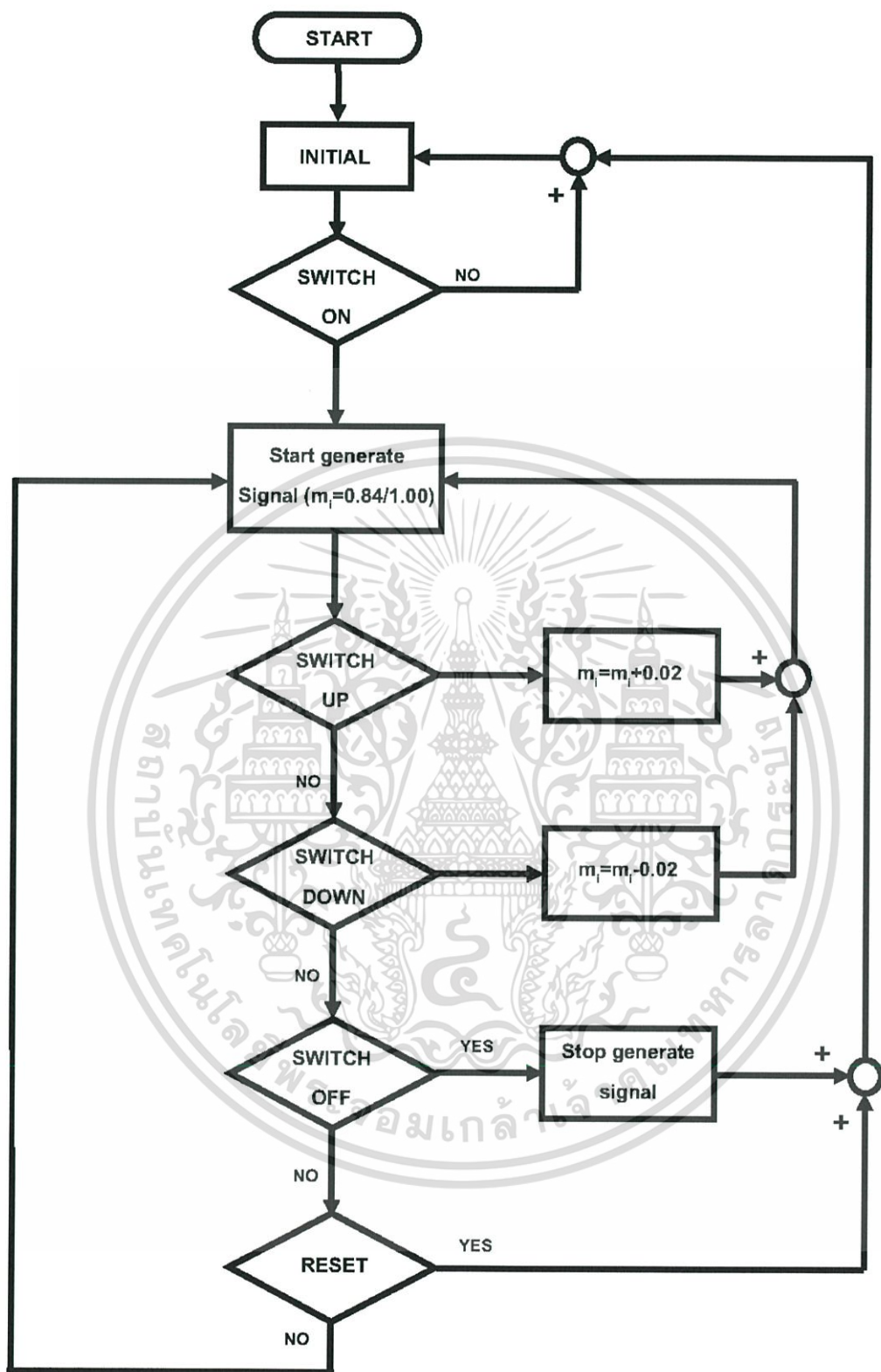
รูปที่ 6.21 ชิ้นงานวงจรควบคุมและแสดงผล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 ขั้นตอนการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด

สำหรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด มีขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 6.22 คือไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4431 จะรับคำสั่งจากการกดปุ่ม ON เพื่อเริ่มต้นการทำงานของวงจร LCD จะแสดงสถานะ เริ่มการทำงานโดยแสดงผลดัชนีมีอดดูเลต (m_i) และจำนวนระดับชั้น p พร้อมกับจำนวนระดับแรงดันขาออก ซึ่งจะเริ่มต้นที่ $m_i=0.84/1.00$ ที่ระดับชั้น $p=26$ จำนวนระดับชั้นแรงดันขาออก 53 ระดับ ซึ่งจะทำการสร้างสัญญาณทั้งหมด 14 สัญญาณออกทางพอร์ต C และ B เพื่อสร้างแรงดันทางด้านขาออกเริ่มต้นที่ 220 โวลต์ จากนั้นจะรอรับคำสั่งต่อไป เช่น ในกรณีที่มีการเพิ่มภาระทางไฟฟ้า จะทำให้แรงดันทางด้านขาออกตกลงเล็กน้อย เนื่องจากมีกระแสไหลผ่านอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จึงเกิดแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตชิงและอุปกรณ์อื่นๆ ในวงจร จึงต้องทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกโดยการกดปุ่ม UP เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับคำสั่ง ก็จะทำการเพิ่มดัชนีมีอดดูเลตขึ้นอีก 0.02 ที่ระดับชั้น $p=27$ ทำให้ได้แรงดันขาออกที่มีระดับแรงดันทั้งหมด 55 ระดับ โดยที่ชุดอินเวอร์เตอร์หลายระดับต้นแบบนี้ สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่มีระดับแรงดันได้สูงสุดถึง 63 ระดับ

ในขณะที่วงจรทำงานอยู่นั้น สามารถหยุดการทำงานได้โดยการกดปุ่ม OFF ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะหยุดการสร้างสัญญาณเพื่อไปขับมอสเฟตกำลัง และกลับเข้าสู่สถานะเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ดังนั้นเมื่อมีการเริ่มการทำงานใหม่ในครั้งต่อไป ก็จะสร้างสัญญาณขับที่ดัชนีมีอดดูเลต $m_i=0.84/1.00$ ทุกครั้ง

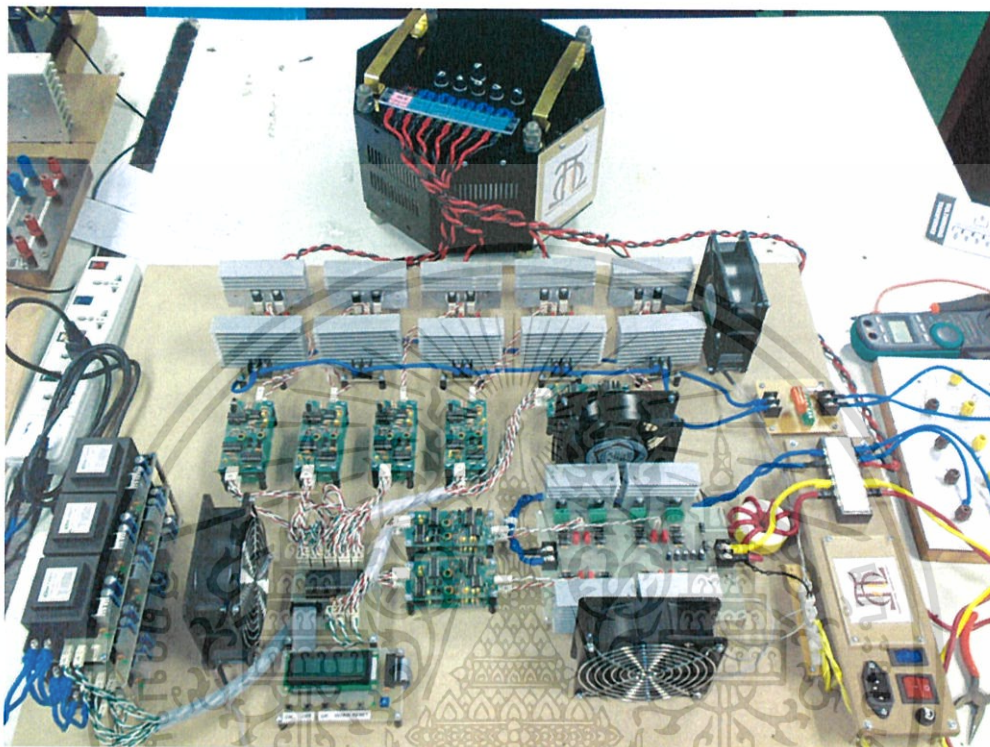


รูปที่ 6.22 แผนผังการทำงานของส่วนควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด

เมื่อนำชิ้นงานแต่ละส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันแล้ว จะได้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ดังรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

6.6 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอถึงการออกแบบและการสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ซึ่งประกอบด้วย 1) ชุดวงจร H-bridge Inverter 2) หม้อแปลงหลายชุด 3) ชุด AC-Chopper 4) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ สำหรับชุดขับสัญญาณสวิตช์กำลังและชุดวงจรควบคุม และ 5) ชุดวงจรขับสัญญาณสวิตช์กำลังและชุดวงจรควบคุม ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของวงจรและชิ้นงานจริงที่ได้จัดทำขึ้น สำหรับผลการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

ผลการทดสอบ

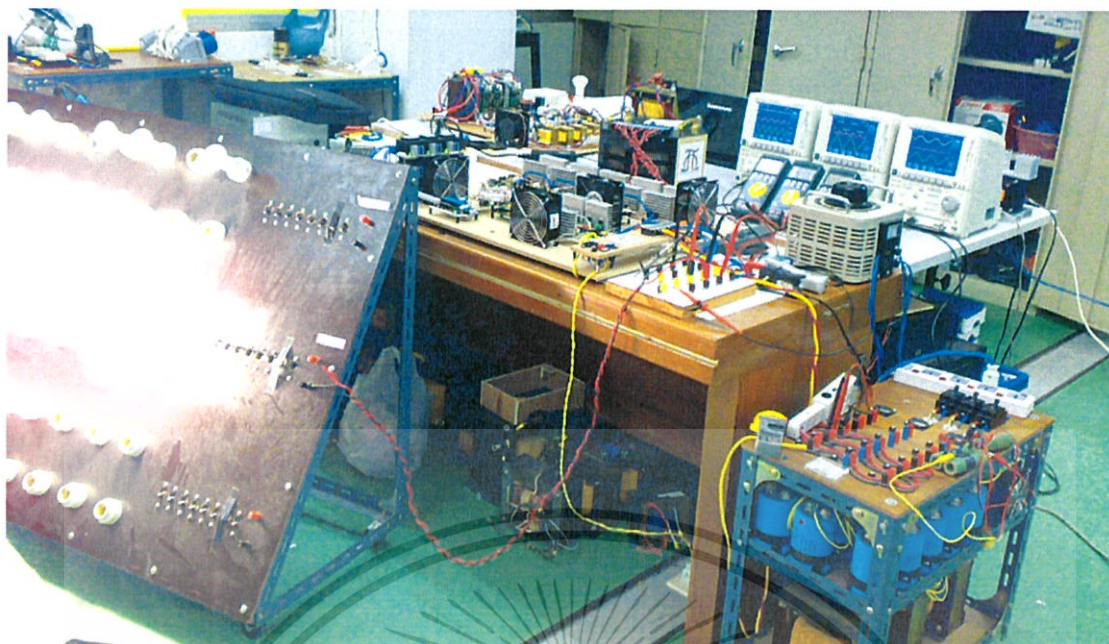
7.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอ ผลการทดสอบเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ในการสร้างสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบ แยกโหนด ซึ่งการทดสอบเครื่องต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 7.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC-Supply) เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ภาชนะทางไฟฟ้า และ อุปกรณ์ในการวัด

7.2 การทดสอบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

การทดสอบเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีอุปกรณ์ประกอบการทดลองและ เครื่องมือดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply)
2. หม้อแปลง 1 เฟสชนิดปรับค่าได้ (Variac 1 phase)
3. หม้อแปลงแยกกราวด์ 1:1 (Isolate ground transformer)
4. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 (YOKOGAWA Digital Oscilloscope DL1640)
5. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น PZ4000 (YOKOGAWA Digital Oscilloscope PZ4000)
6. มัลติมิเตอร์ (Multimeter)
7. แคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter)



รูปที่ 7.1 การทดสอบเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด

7.2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า

7.2.2 ขั้นตอนในการทดสอบ

- จ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุม วงจรแสดงผลจอ LCD และวงจรสัญญาณขั้วเกต
- จ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 48 โวลต์
- เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 48 โวลต์ เข้ากับเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ได้ของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดสอบ

7.2.3 ผลการทดสอบ

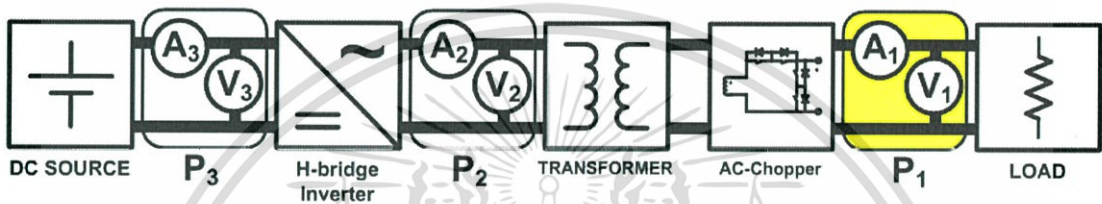
จากการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า พบว่าเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 48 โวลต์ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 226.169 โวลต์ ขณะไม่ใส่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน และเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 225.722 โวลต์ ขณะใส่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก 53 ระดับ ที่มีลักษณะคล้ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ จากนั้นได้ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

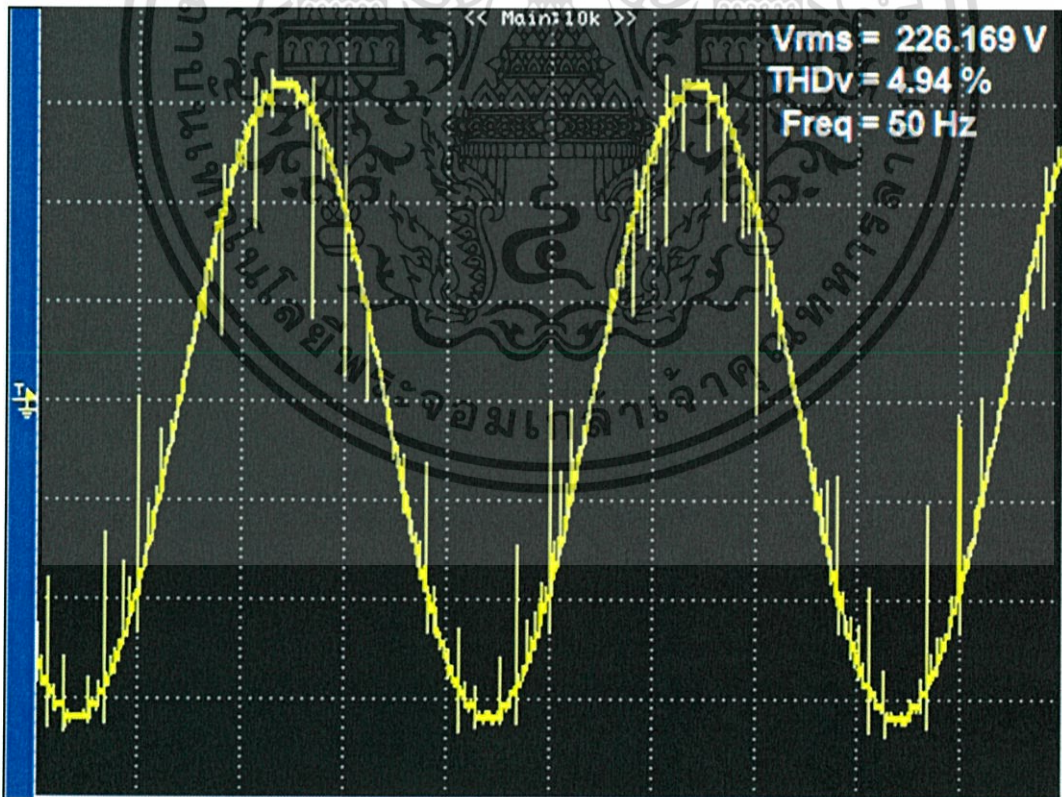
บันทึกรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก 53 ระดับที่ได้ทั้งในกรณีที่ไม่วางจรรยาบรรณความถี่ต่ำผ่าน และใส่จรรยาบรรณความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 7.2 และรูปที่ 7.3

7.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงแรงดันรูปคลื่นไซน์ และมีจำนวนของระดับแรงดัน 53 ระดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีและผลการจำลองที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และบทที่ 4 ทั้งนี้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรูปคลื่นไซน์ต่อไป

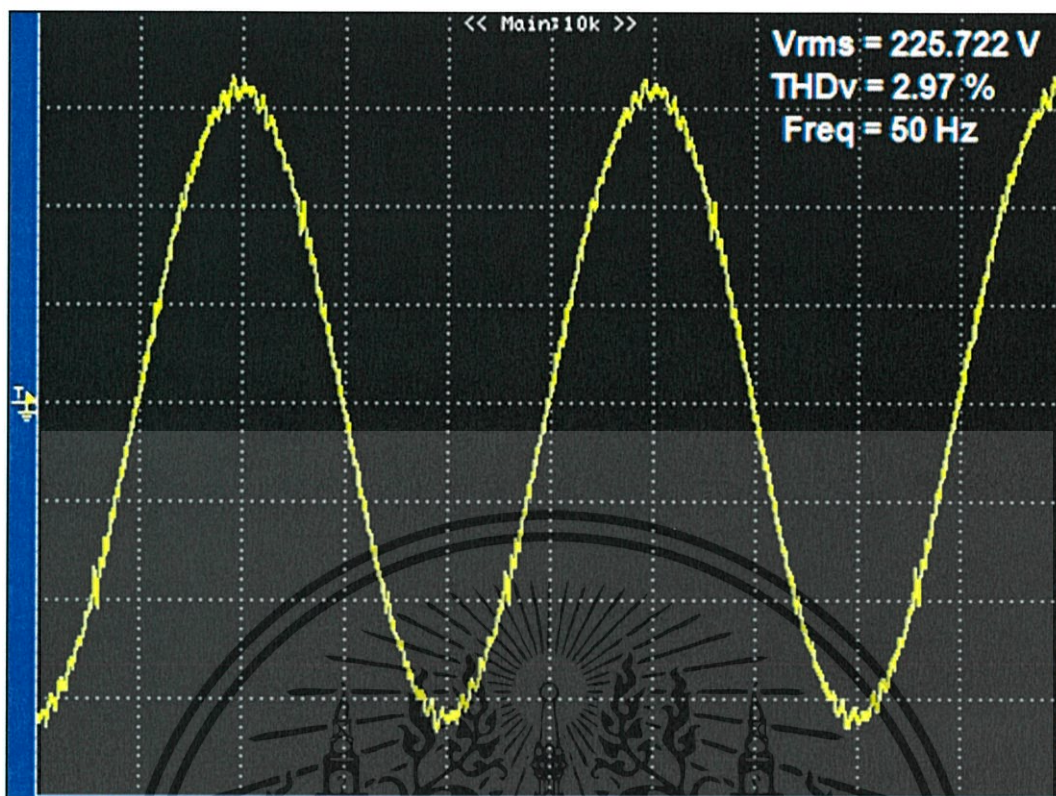


รูปที่ 7.2 รูปวงจรการทดลองเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับกรณีที่ยังไม่มีภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 7.3 แรงดันไฟฟ้าขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.4 แรงดันไฟฟ้าขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อใช้วงจรกรองในสโคป

7.3 การทดสอบอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อปรับค่าดัชนีมอดดูเลต

7.3.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าขาออก

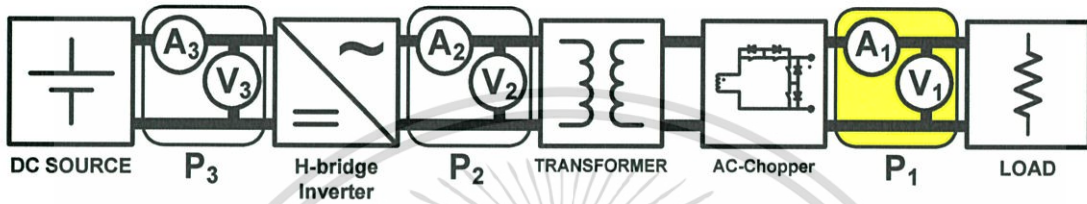
7.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- จ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุม วงจรแสดงผลจอ LCD และวงจรสัญญาณขั้วเกต
- จ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 48 โวลต์
- เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 48 โวลต์ เข้ากับเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้ของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดสอบ
- ปรับค่าดัชนีมอดดูเลตเพิ่มขึ้น แล้วทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

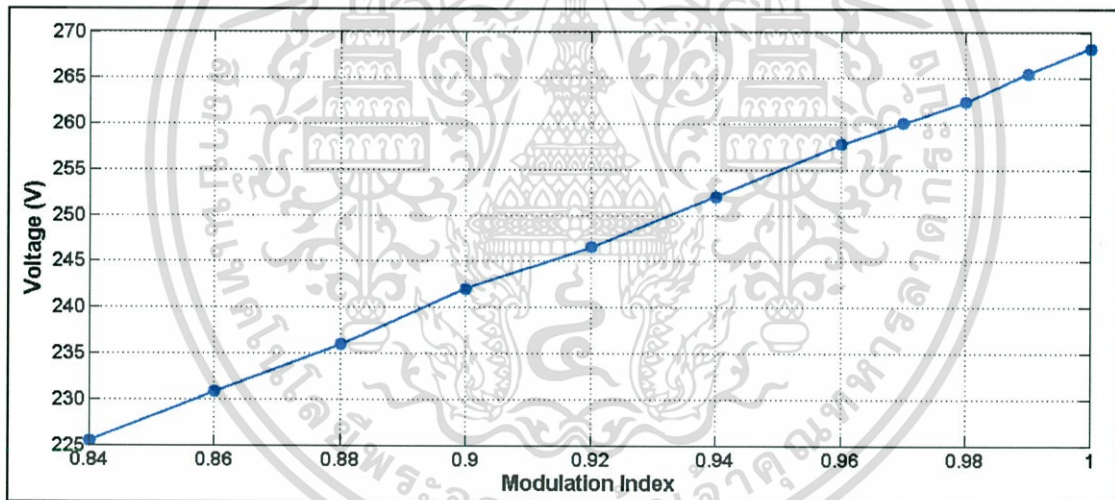
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.3 ผลการทดสอบ

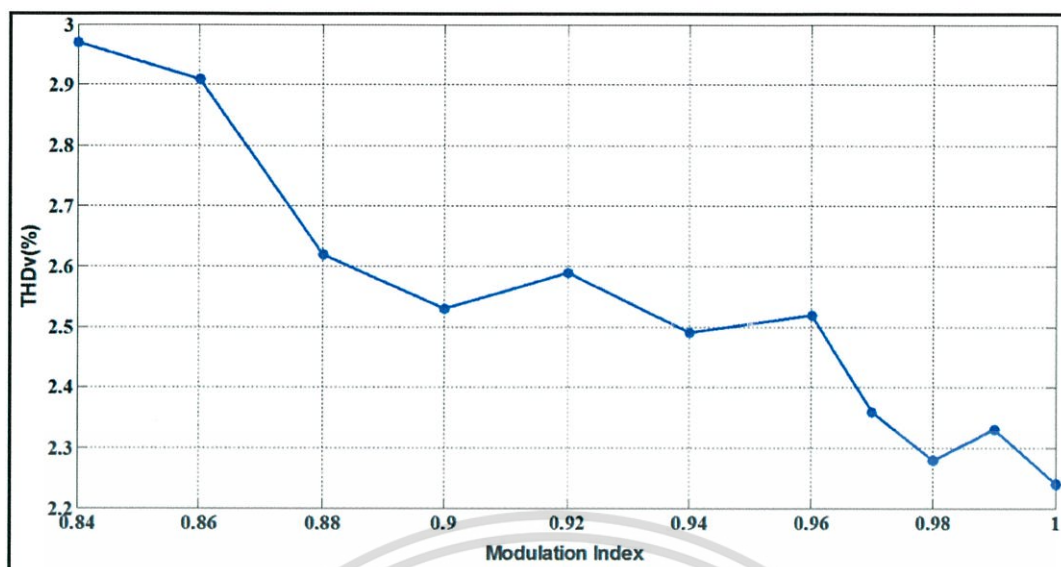
จากการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าขาออก และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าขาออก พบว่าการปรับดัชนีมอดดูเลตเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าลดลง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกได้ดังรูปที่ 7.6 และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.5 รูปวงจรการทดสอบอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อปรับค่าดัชนีมอดดูเลต



รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าขาออก



รูปที่ 7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า

7.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบ พบว่าเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้เพิ่มขึ้นได้โดยการปรับค่าดัชนีมอดูเลตเพิ่มขึ้น และการเพิ่มดัชนีมอดูเลตนี้จะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าลดลงด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีและผลการจำลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 และบทที่ 4 โดยแรงดันที่วัดได้จะเป็นแรงดันขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า และจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5 โวลต์โดยเฉลี่ยต่อการปรับเพิ่มดัชนีมอดูเลตขึ้น 0.02 สำหรับเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับนี้ สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกได้สูงสุด 268.2 โวลต์ ที่ดัชนีมอดูเลต 1.00/1.00

7.4 การทดสอบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน

7.4.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาเข้า และค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับรวมถึงค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาออกของ H-bridge Inverter และค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

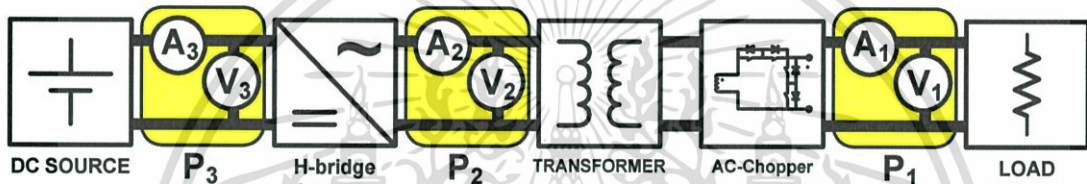
7.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- จ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุม วงจรแสดงผลจอ LCD และวงจรสัญญาณขั้วเกต
- จ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 48 โวลต์
- เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 48 โวลต์ เข้ากับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- ใช้ ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น PZ4000 แบบ 8 ช่องสัญญาณ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้าน

ขาเข้า ค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาเข้า ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาออกที่ได้ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะโดยปริยายหรือโดยนัย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ รวมทั้งวัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาออกในส่วนของวงจร H-bridge Inverter

- ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาเข้าที่ได้ของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาออกที่ได้ของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาออกที่ได้ในส่วนของวงจร H-bridge Inverter
- ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาออกที่ได้ในส่วนหม้อแปลงหลายชุด
- เพิ่มภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขึ้น และวัดค่าตามขั้นตอนที่ 4 ถึงขั้นตอนที่ 6

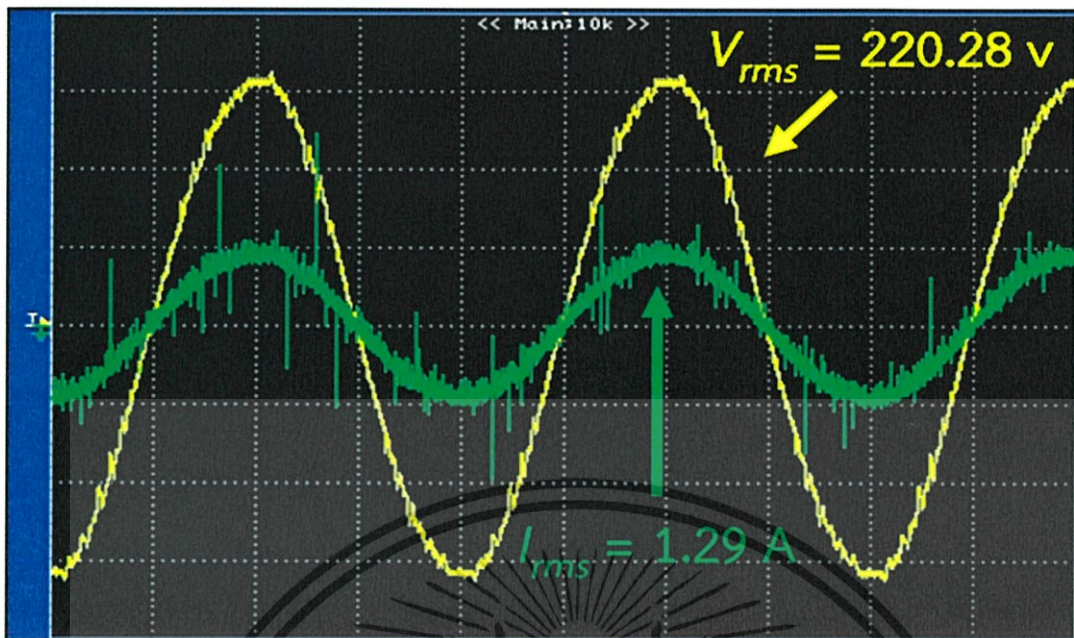


รูปที่ 7.8 รูปวงจรการทดสอบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน

7.4.3 ผลการทดสอบ

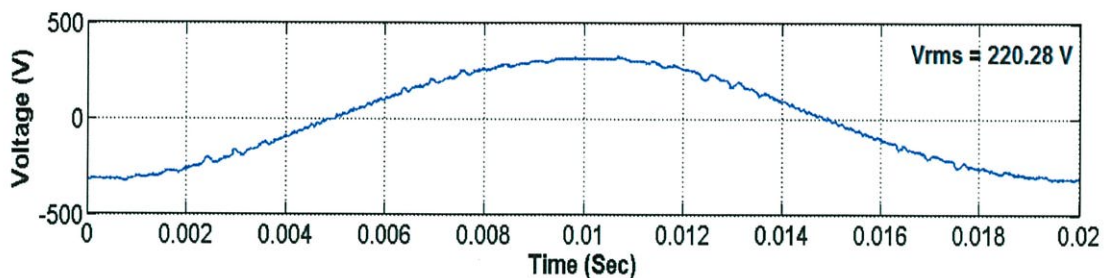
จากการทดสอบ พบว่าในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าปกติและไม่มีการเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้า เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะทำงานที่ดัชนีมือตูลุเลต $m_t = 0.84/1.00$ จะได้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่า 220.00 โวลต์ และเมื่อเพิ่มภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขึ้นจะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้ลดลง จึงจำเป็นต้องปรับค่าดัชนีมือตูลุเลตเพิ่มขึ้นเพื่อให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ภาระไฟฟ้าชนิดตัวต้านทานเพิ่มให้ใกล้เคียง 220 โวลต์ โดยในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์ สามารถบันทึกรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้ดังรูปที่ 7.9 ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เท่ากับ 220.28 โวลต์ และมีค่าความผิดเพี้ยนทางแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3.54 % ดังแสดงในรูปที่ 7.10 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 1.29 แอมป์ ค่าความผิดเพี้ยนทางกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 12.93 % ดังแสดงในรูปที่ 7.11 ซึ่งวัดค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้เท่ากับ 0.303 กิโลวัตต์ กำลังไฟฟ้าขาออกของชุดวงจร H-bridge Inverter เท่ากับ 0.286 กิโลวัตต์ และวัดกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้เท่ากับ 0.2846 กิโลวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 7.12 และสามารถวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าในจุดต่างๆได้ โดยด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแสดงดังรูปที่ 7.13 ด้านออกของส่วน H-bridge Inverter แสดงดังรูปที่ 7.14 ด้านขาเข้าของส่วน AC-Chopper ชุดที่มีแรงดัน 12 โวลต์, ชุดที่มีแรงดัน 24 โวลต์, ชุดที่มีแรงดัน 48 โวลต์, ชุดที่มีแรงดัน 86 โวลต์ และชุดที่มีแรงดัน 192 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 7.15, 7.16, 7.17, 7.18 และ 7.19 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

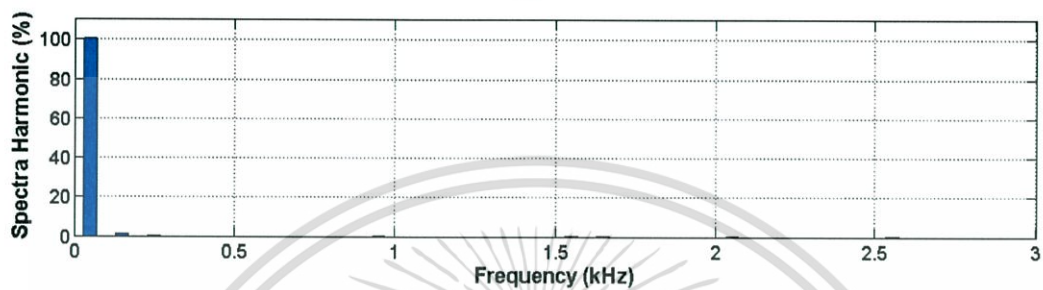


รูปที่ 7.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

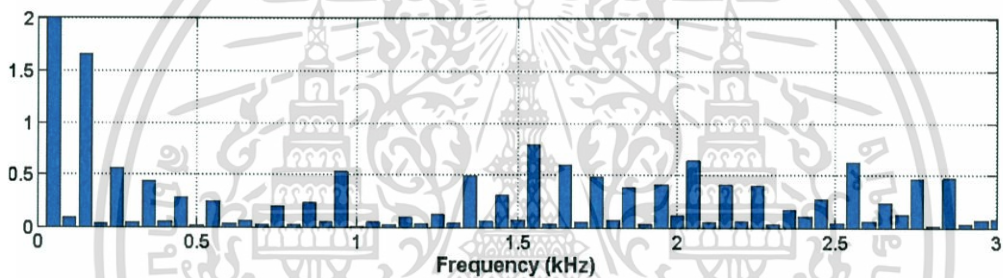
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



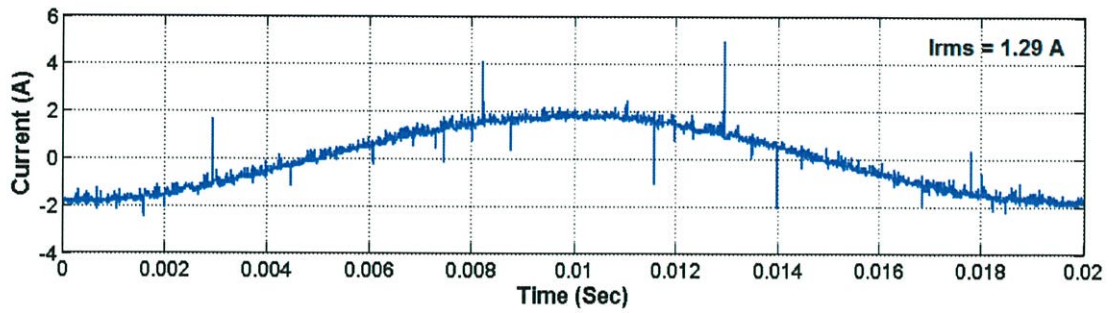
(ข)



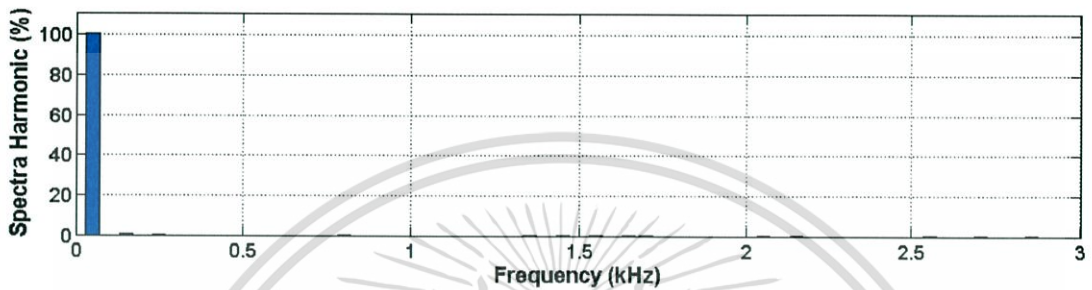
(ค)

รูปที่ 7.10

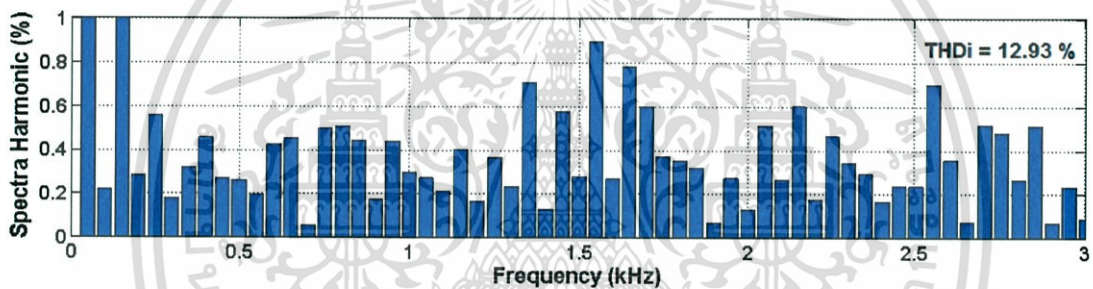
- (ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์
- (ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์
- (ค) รูปขยายแกนนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก



(ก)



(ข)



(ค)

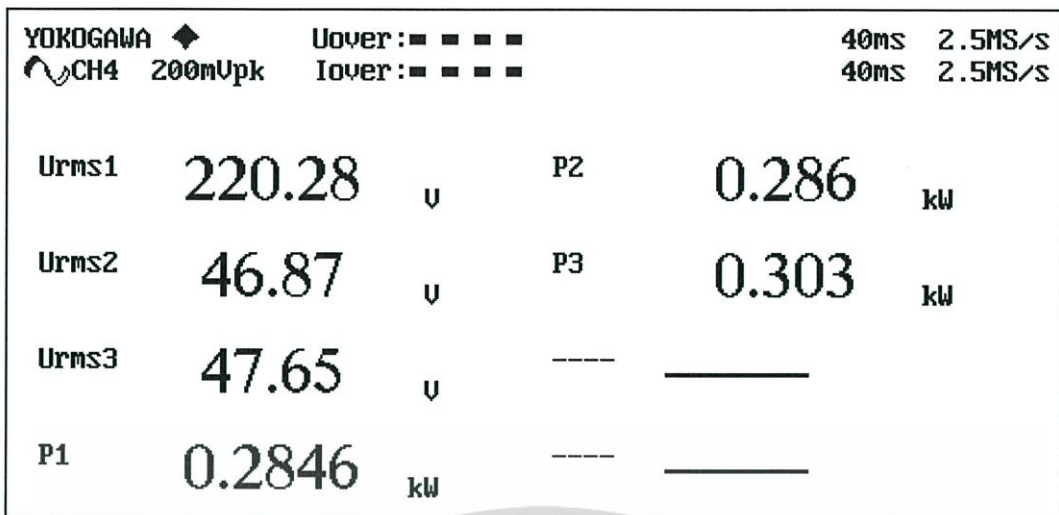
รูปที่ 7.11

(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทาง

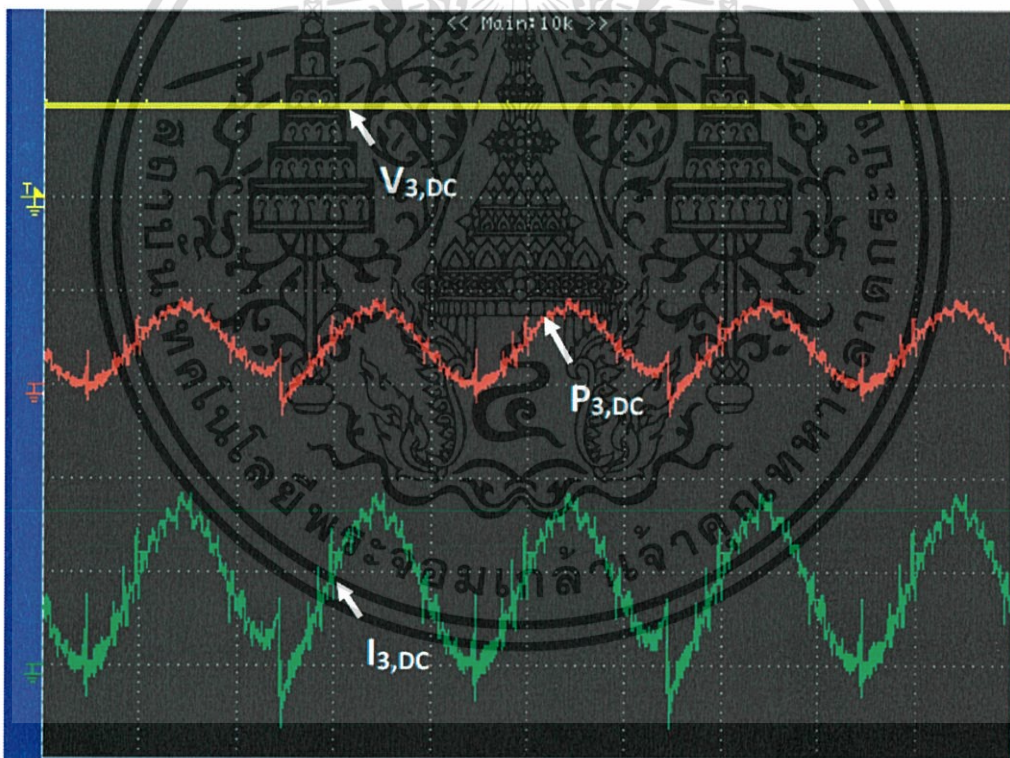
ไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

(ค) รูปขยายแกนนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออก

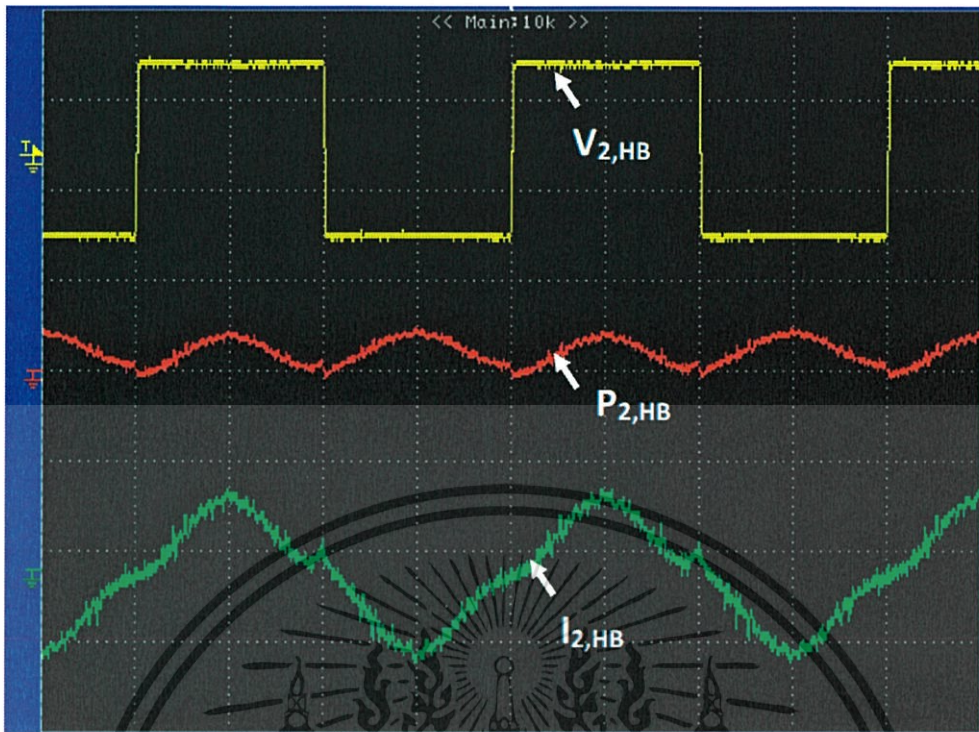


รูปที่ 7.12 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

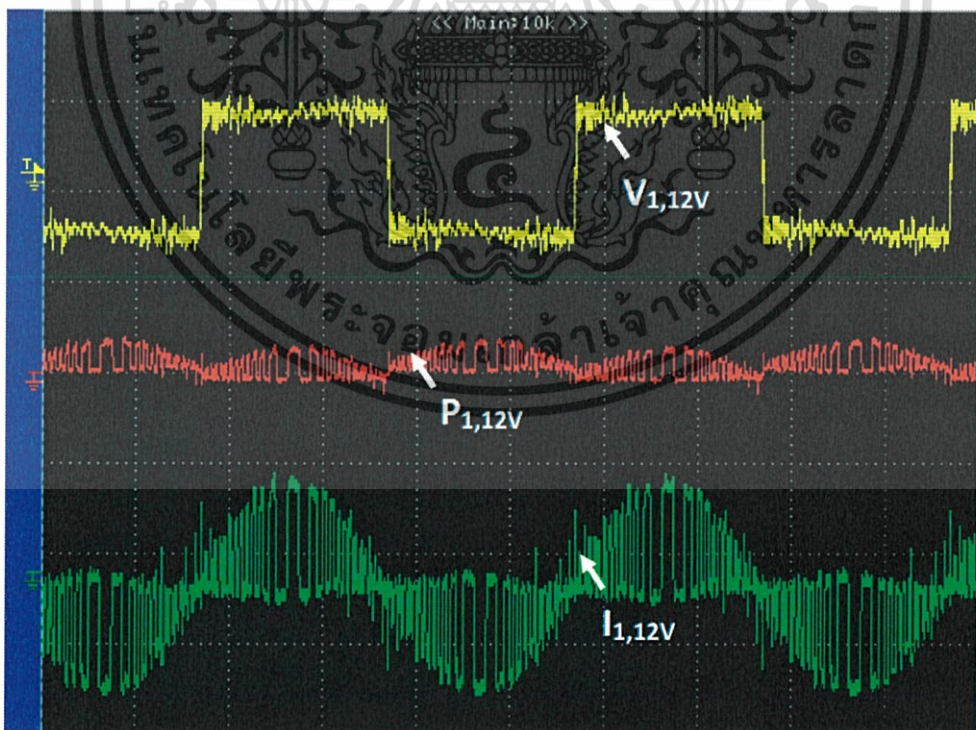


รูปที่ 7.13 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.14 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออกของส่วนวงจร H-bridge Inverter ในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

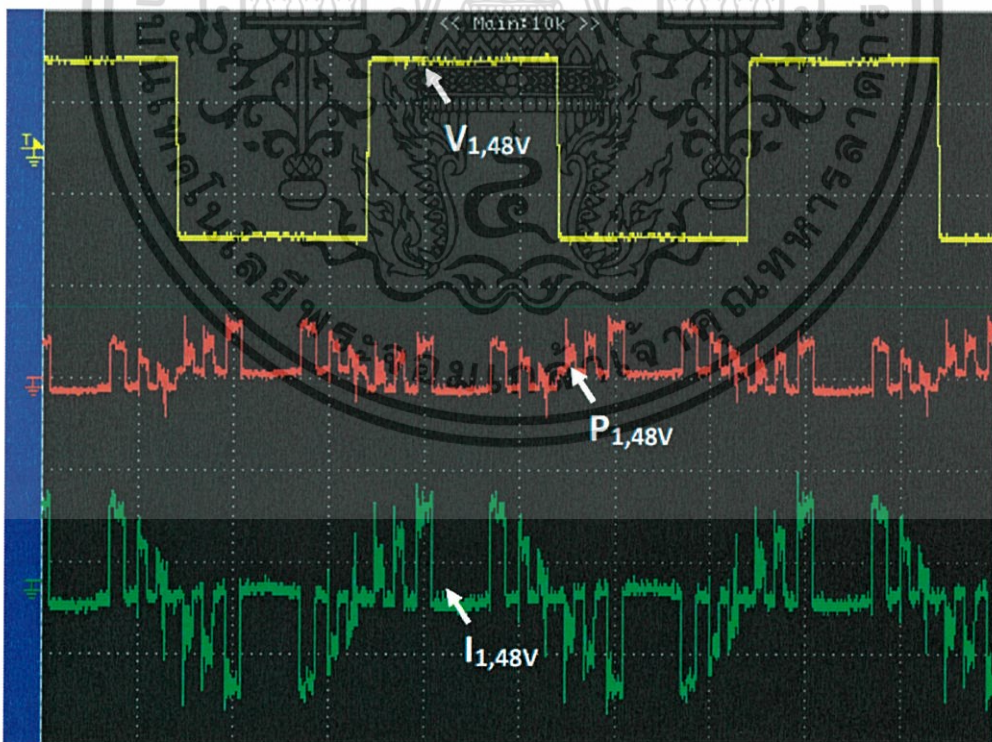


รูปที่ 7.15 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วน ชุด AC-Chopper ที่แรงดัน 12 โวลต์ ในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

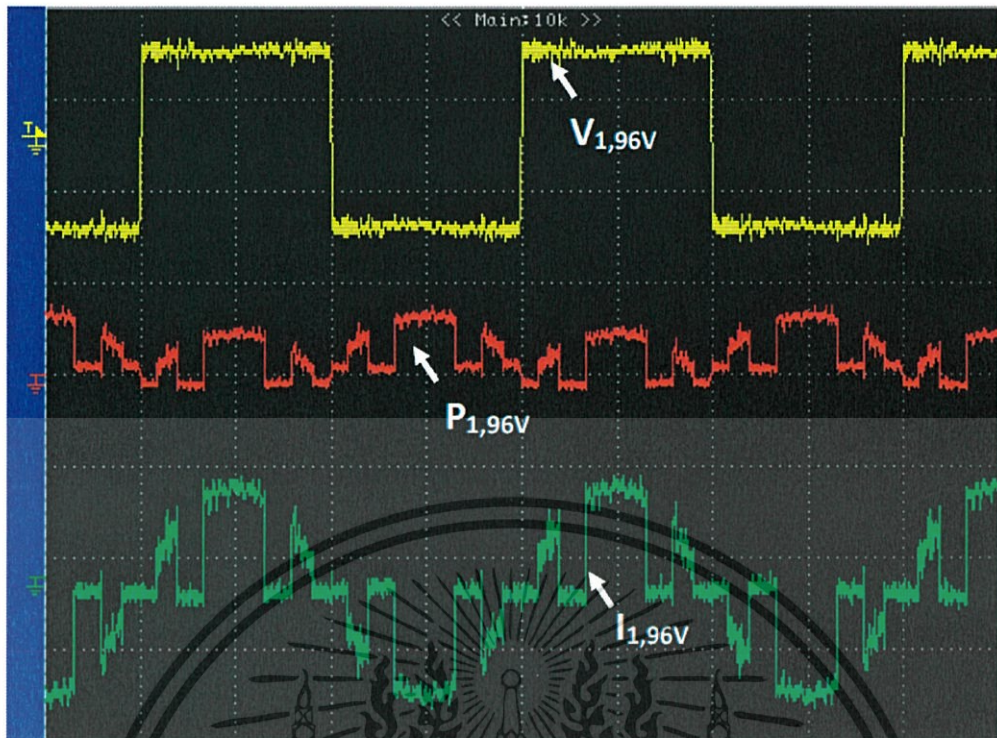


รูปที่ 7.16 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วน ชุด AC-Chopper ที่แรงดัน 24 โวลต์ ในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

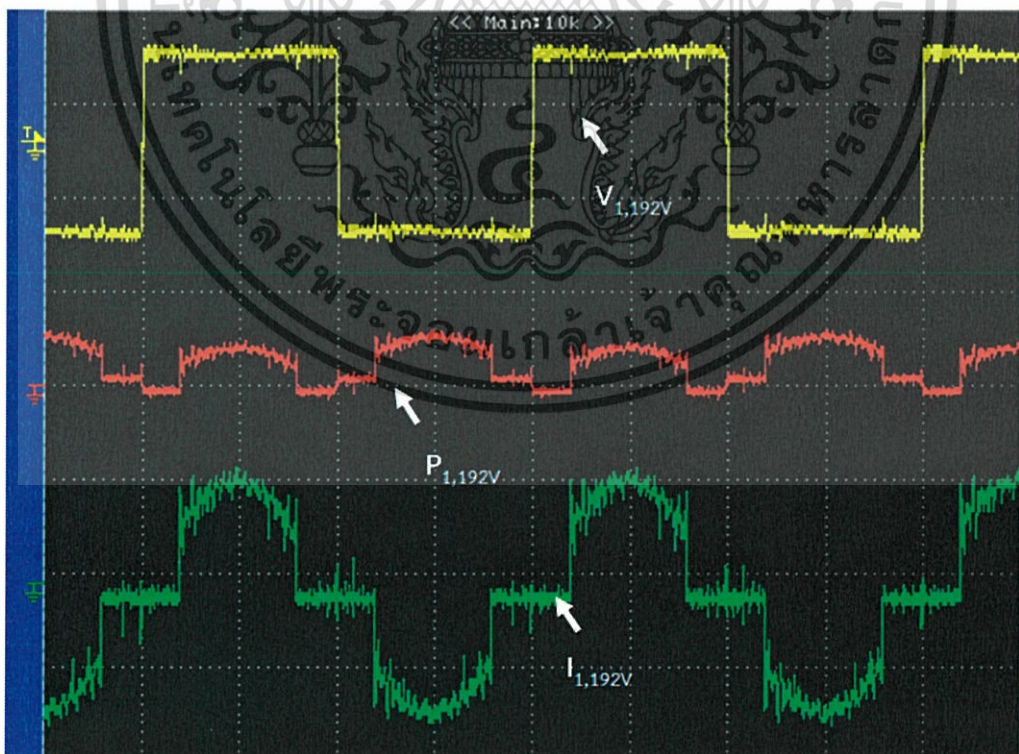


รูปที่ 7.17 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนชุด AC-Chopper ที่แรงดัน 48 โวลต์ ในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.18 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนชุด AC-Chopper ที่แรงดัน 96 โวลต์ ในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์



รูปที่ 7.19 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนชุด AC-Chopper ที่แรงดัน 192 โวลต์ ในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

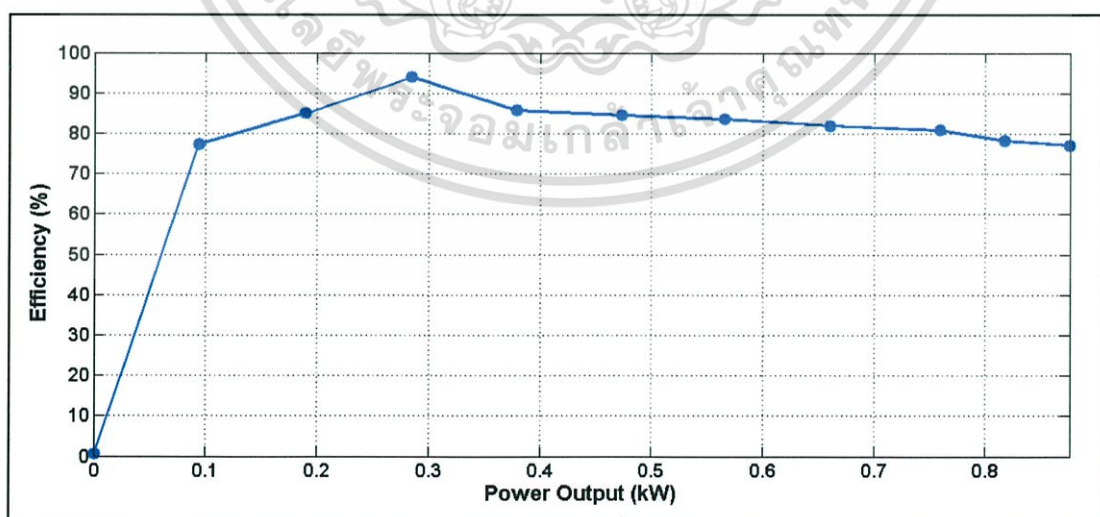
7.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด เมื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์ มีประสิทธิภาพโดยรวมเท่ากับ 93 % เป็นค่าการสูญเสียในส่วนของชุดวงจร H-bridge Inverter 5.2 % โดยเป็นค่าที่เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีประสิทธิภาพสูงสุดเนื่องจากเป็นจุดที่ยังมีกระแสไหลไม่มากนัก ทำให้การสูญเสียต่ำ โดยกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแต่ละส่วนของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้นจะแสดงดังตารางที่ 7.1 สำหรับผลการทดสอบจะเห็นว่า ส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียมาก คือ ส่วนของชุดวงจร H-bridge Inverter เนื่องจากเป็นส่วนที่มีกระแสไหลผ่านมากที่สุด รองลงมาคือ ส่วนของหม้อแปลงหลายชุดและสุดท้ายคือส่วนชุดวงจร AC-Chopper ซึ่งการวัดค่าความสูญเสียนั้นจะวัดกำลังสูญเสียรวมระหว่างหม้อแปลงหลายชุดและส่วนของชุดวงจร AC-Chopper เนื่องจากการวัดกำลังไฟฟ้าแยกออกในแต่ละส่วนจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดถึง 6 ชุด จึงจะสามารถวัดกำลังไฟฟ้าของแต่ละชุดวงจรซึ่งมีทั้งหมด 5 ชุดได้

เมื่อทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าจะทำให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 7.20 เนื่องจากมีกระแสไหลผ่านในแต่ละส่วนของวงจรมากขึ้นทำให้เกิดกำลังสูญเสียภายในอุปกรณ์ต่างๆ มากขึ้น

ตารางที่ 7.1 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแต่ละส่วนของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.2846 กิโลวัตต์

	H-Bridge	หม้อแปลง + AC-Chopper	รวม
กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (W)	16	5.8	21.8
ร้อยละของกำลังขาเข้า	5.2%	2%	7.2%



รูปที่ 7.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังไฟฟ้านำเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.5 การทดสอบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส

7.5.1 วัตถุประสงค์

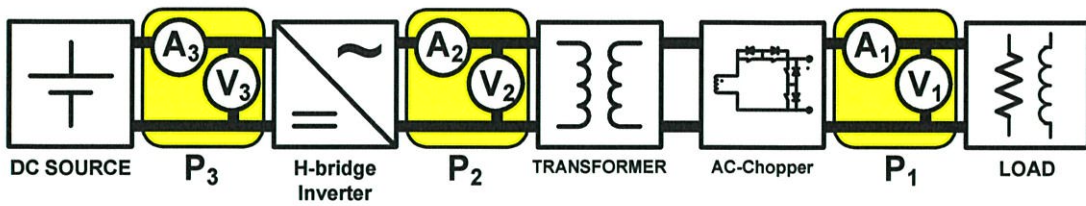
เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส และหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาเข้า ค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส

7.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

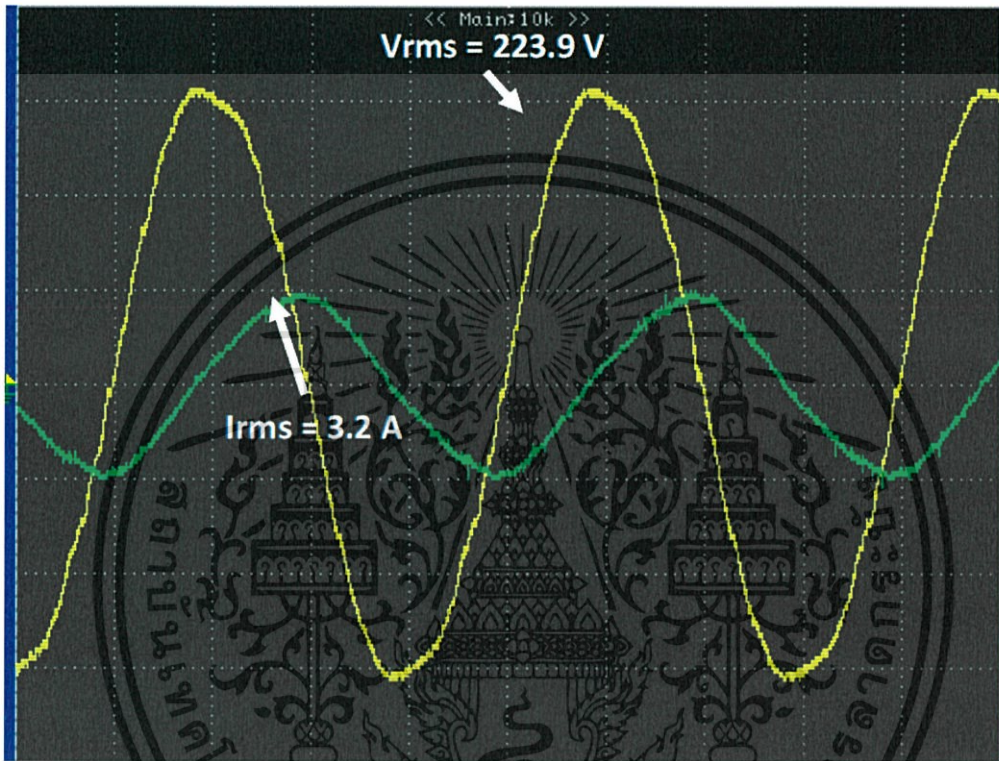
- จ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุม วงจรแสดงผลจอ LCD และวงจรสัญญาณขั้วเกิด
- จ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 48 โวลต์
- เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 48 โวลต์ เข้ากับเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- ใช้ดิจิตอลอสซิลโลสโคป รุ่น PZ4000 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า ค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาเข้า แรงดันไฟฟ้าด้านขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาออก ที่ได้ของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ รวมทั้งวัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาออก ในส่วนของชุดวงจร H-bridge Inverter
- ใช้ดิจิตอลอสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาออก ที่ได้ของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

7.5.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่า กำลังไฟฟ้าด้านขาเข้าของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีค่าเท่ากับ 0.149 กิโลวัตต์ และมีค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีค่าเท่ากับ 0.1160 กิโลวัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพเท่ากับ 78% ซึ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแสดงดังรูปที่ 7.22 โดยมีแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 220.72 โวลต์ ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 12.37 % แสดงได้ดังรูปที่ 7.23 และมีค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.07 แอมป์ ค่าความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 9.07 %แสดงได้ดังรูปที่ 7.24

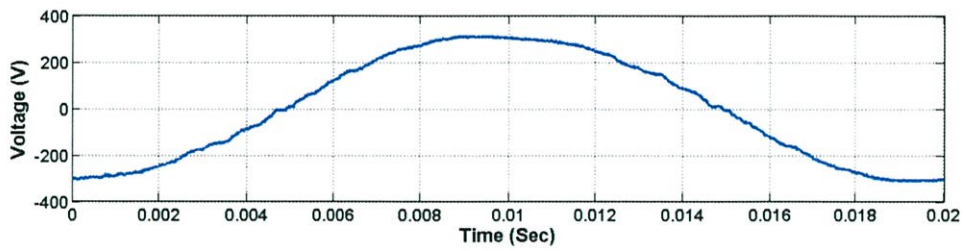


รูปที่ 7.21 รูปวงจรการทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส

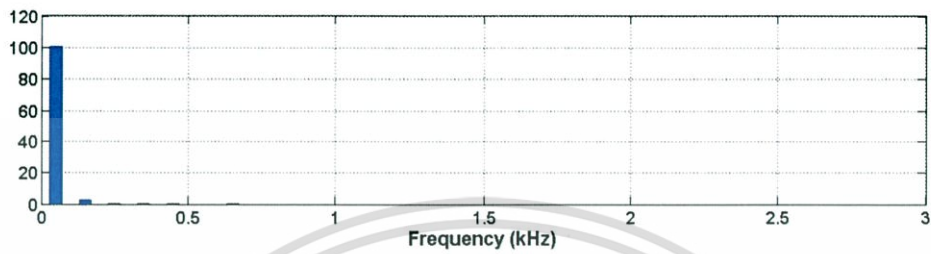


รูปที่ 7.22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส

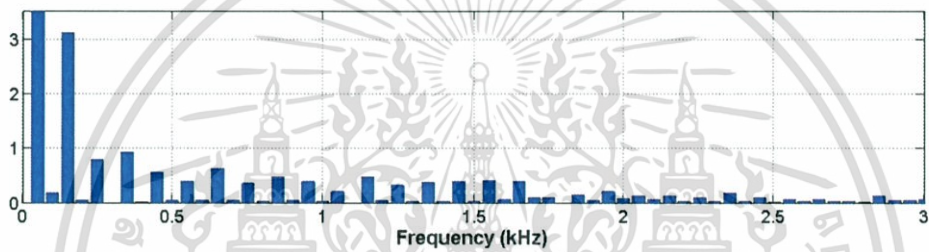
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



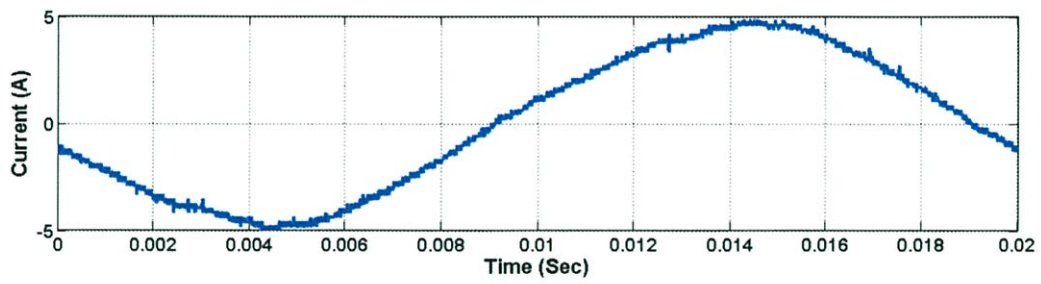
(ข)



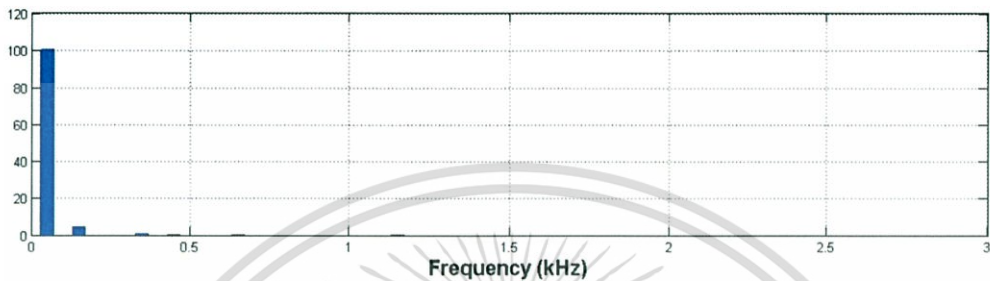
(ค)

รูปที่ 7.23

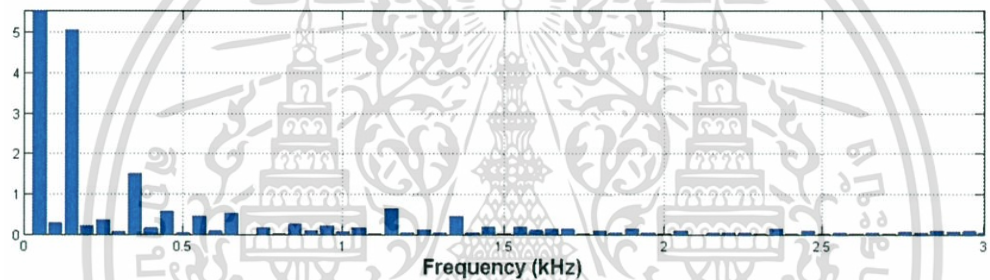
- (ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส
- (ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส
- (ค) รูปขยายแกนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก



(ก)



(ข)



(ค)

- รูปที่ 7.24 (ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส
(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์หนึ่งเฟส
(ค) รูปขยายแกนตั้งสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออก

7.5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่า เมื่อนำเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับมาจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ขนาด $1/2$ HP (0.4kW) 4 ขั้วแม่เหล็ก โดยที่มอเตอร์ดังกล่าวไม่ได้จ่ายภาระทางกล พบว่ารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าจะตามหลังรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (lagging) และมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โดยสังเกตได้จากค่า THD_i ที่มีค่าสูงถึง 6.17% เนื่องจากเกิดฮาร์มอนิกลำดับต่ำมากขึ้น สำหรับการทดลองนี้ จะใช้วิธีการค่อยๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าสำหรับการเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ เพื่อเป็นการลดกระแสขณะที่มอเตอร์เริ่มทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอถึง ผลการทดสอบเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ในการสร้างสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกที่มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้า รวมถึงได้ทำการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ตลอดจนการวิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และการวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่สร้างขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดได้ ที่ส่วนบทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา จะนำเสนอในบทต่อไป



บทที่ 8

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด ซึ่งจะต้องคำนึงถึงความสามารถของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่จะนำมาเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด เนื่องจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด สามารถเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายเพียงแหล่งจ่ายเดียว (single source) มีความถี่สวิตช์ต่ำ (low frequency switching) รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่มีคุณภาพสูง สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบที่มีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงได้ (dc level component) นอกจากนี้ยังมีการแยกกราวด์กันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (input-output isolation) ซึ่งคุณสมบัติที่กล่าวมานี้เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ชุดวงจร H-bridge Inverter จำนวน 1 ชุด หม้อแปลงหลายชุด และชุด AC-Chopper จำนวน 5 ชุด โดยชุดวงจร H-bridge Inverter เป็นส่วนที่รับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดขนาด 48 โวลต์ แล้วแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด 48 โวลต์ ความถี่ 50 Hz ก่อนที่จะส่งผ่านพลังงานเข้าสู่หม้อแปลงหลายชุดทางด้านขดปฐมภูมิ และส่งออกไปหาชุด AC-Chopper ทั้ง 5 ชุด ผ่านขดทุติยภูมิทั้ง 5 ชุดของหม้อแปลงที่ระดับแรงดัน 12, 24, 48, 96 และ 192 โวลต์ ตามลำดับ โดยชุด AC-Chopper จะทำการรวมสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ ทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดที่ได้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีคุณภาพดี มีความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าต่ำ

สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด จะใช้สัญญาณไซน์สมบูรณ์ (Absolute sine wave) ที่มีความถี่ 50 Hz ตัดกับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับทำงานของชุด AC-Chopper ทั้ง 5 ชุด โดยมีค่าดัชนีมีอดดูลิตเป็นตัวควบคุมการปรับระดับแรงดันไฟฟ้า ทำให้ได้สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังที่สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์ มีความถี่สวิตช์ต่ำเนื่องจากใช้ความถี่ฐาน (fundamental switching) ในการสวิตช์ซึ่ง โดยจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่ารูปแบบสัญญาณของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้า คือที่ดัชนีมีอดดูลิตเท่ากับ 0.832/1.00 จะให้แรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 Hz และมีความผิดเพี้ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแรงดันไฟฟ้าต่ำเพียง 1.92% และเมื่อทำการปรับค่าดัชนีมอดดูเลตให้สูงขึ้นก็จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกที่สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าก็ต่ำลงด้วยเช่นกัน ซึ่งในการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบจะได้ค่าดัชนีมอดดูเลตเริ่มต้นที่ 0.84/1.00

เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดได้ถูกออกแบบให้มีพิกัดกำลังเท่ากับ 1 กิโลวัตต์ – แอมแปร์ (kVA) และสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโอด และสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 93 % สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ในขณะที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้าตั้งแต่ 220 – 268 โวลต์ และมีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 3 % ที่ความถี่ 50 Hz ซึ่งจากผลการทดสอบในขณะที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้าโดยตั้งค่าเริ่มต้นของดัชนีมอดดูเลตเท่ากับ 0.84/1.00 พบว่า สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับ 220.00 โวลต์ มีระดับขั้นของแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 53 ขั้น และสามารถปรับระดับขั้นของแรงดันไฟฟ้าขาออกได้สูงสุดถึง 63 ขั้น โดยการปรับดัชนีมอดดูเลตเท่ากับ 1.00/1.00 และเมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 kW พบว่า มีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 2.97% โดยที่ยังไม่ใส่วงจรกรองและทำการวัดค่าสูญเสียภายในวงจร พบว่าค่าความสูญเสียในชุดวงจร H-bridge Inverter เท่ากับ 5.6% ค่าความสูญเสียในหม้อแปลงและชุด AC-Chopper เท่ากับ 2 % เมื่อนำไปคิดประสิทธิภาพรวมของระบบจะได้อยู่ที่ประมาณ 93%

ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งความผิดพลาดโดยใช้เทคนิคโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมถูกนำมาใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากการเปิดวงจรของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด โดยเปรียบเทียบ 2 โมเดล ระหว่างโมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม (โมเดล NN) และโมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมรวมกับเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบ (โมเดล PC-NN) พบว่าโมเดล PC-NN สามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งของการเกิดความผิดพลาดได้ 100% ส่วนโมเดล NN ตรวจจับและระบุตำแหน่งความผิดพลาดได้ 95% เนื่องจากโมเดล PC-NN นั้น ข้อมูลตัวแปรอินพุตได้ผ่านกระบวนการการลดมิติของข้อมูลตัวแปรอินพุตลง โดยที่ยังคงความสำคัญของข้อมูลไว้ พร้อมกันนั้นเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักยังช่วยลดสัญญาณรบกวนออกไปด้วย จึงทำให้โมเดล PC-NN สามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งความผิดพลาดได้ดีกว่าโมเดล NN

8.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโอด จากการทดสอบพบว่า

- สวิตช์กำลังของชุดวงจร H-bridge Inverter นั้น การทำงานของสวิตช์ในกิ่งเดียวกันจะต้องทำงานไม่พร้อมกัน จึงต้องมีการเพิ่มช่วงเวลาเดดไทม์จากคำสั่งควบคุมเพื่อให้สวิตช์กำลังในกิ่งเดียวกันทำงานไม่พร้อมกันทำเพื่อป้องกันการลัดวงจร
- ลายวงจรกำลังของชุด H-bridge Inverter จะต้องมียาวงจรที่ใหญ่พอและไม่วางอุปกรณ์ชิดกันเกินไป เนื่องจากวงจรกำลังของชุด H-bridge Inverter มีพิกัดแรงดันต่ำ เมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าที่พิกัดกำลังสูงจะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรชุด H-bridge Inverter สูง อาจทำให้ลายวงจรไหม้และขาดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทำงานของสวิตช์ MOSFET แต่ละตัวจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนอย่างเหมาะสมเพื่อรักษาอายุการใช้งานให้ยาวนานยิ่งขึ้น
- การเลือกจำนวน PC เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแปรอินพุทของโมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมมีผลการต่อประสิทธิภาพในการทำนายข้อมูล
- การเก็บข้อมูลเพื่อใช้สำหรับสอนให้โมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมเรียนรู้ นั้นมีความสำคัญมาก หากการเก็บข้อมูลไม่ครอบคลุมอาจเป็นเหตุให้โมเดลเรียนรู้ข้อมูลไม่ครบถ้วน เป็นเหตุให้ความสามารถในการทำนายข้อมูลของโมเดลลดลง

8.3 แนวทางการพัฒนา

งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้มีประสิทธิภาพและความหลากหลายในการใช้งานมากขึ้นได้ดังนี้

- การปรับค่ามีอตุลิตเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดในงานวิจัยนี้เป็นการควบคุมแบบเปิด (open loop) ยังไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้แบบอัตโนมัติ ดังนั้นหากต้องการให้มีการปรับเปลี่ยนได้แบบอัตโนมัติจะต้องมีการพัฒนาในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเพิ่มเติม
- วงจรชุด H-bridge Inverter เมื่อนำมาใช้งานแล้วมักจะเสียหายบ่อยครั้ง จึงควรทำการพัฒนาออกแบบวงจรกำลังและวงจรขับสัญญาณเกตให้มีเสถียรภาพ โดยคำนึงถึงพิกัดกำลังของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อความคงทนในการทำงานเพิ่มมากขึ้นรวมถึงพิกัดการทำงานที่สูงขึ้นด้วย เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโคดได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ
- โมเดลโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมยังมีโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมอื่นที่สามารถนำมาใช้สำหรับปัญหา classification เช่น โครงสร้างแบบ PNN
- ความรู้ทางด้านโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมและระบบอัจฉริยะ (Artificial Intelligent : AI) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับโครงสร้างการสวิตซ์ซิงของสวิตซ์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะที่เกิดความผิดพลาด เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กองสารสนเทศ ฝ่ายสื่อสารองค์กร กฟผ., “สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ.” [Online]. Available : http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=579&Itemid=116,
- [2] Leon M. Tolbert, The University of Tennessee, Oak Ridge National Laboratory, “Power Electronics Applications for Transportation and Energy”, PEA Conference, 11 may 2010, Part 1, pp.20
- [3] National Renewable Energy Laboratory, A national laboratory of the U.S. Department of Energy and Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “Zero Energy Buildings : A Critical Look at the Definition”, Conference Paper NREL/CP-550-39833, June 2006.
- [4] Building America, U.S. Department of Energy, “Zero Energy Homes : What? Why? And How?”
- [5] Jay Amato. “Zero-Energy Building – A World Wide Movement to ZEB” [Online]. Available : <http://www.redhookgreen.com/2009/11/zero-energy-building-world-wide.html>
- [6] Leon M. Tolbert, The University of Tennessee, Oak Ridge National Laboratory, “Power Electronics Applications for Transportation and Energy”, PEA Conference, 11 may 2010, Part 1, pp.18
- [7] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A New Neutral-Point Clamped PWM Inverter.” In Proc. Of the Industry Applications Society Conference, September/October 1980, pp. 761 – 766.
- [8] N. S. Choi et al., “A general circuit topology of multilevel inverter,” in Proc. IEEE PESC’91 Conf., Cambridge – MA, June 1991, pp. 96 – 103.
- [9] T. L. Skvarenina, “The Power Electronics Handbook,” Ed., CRC Press LLC, Boca, ISBN 0-8493-7336-0, Raton – Florida, 2002.
- [10] S. M. Tenconi, M Carpita, C. Bacigalupo and R Cali, “Multilevel Voltage Source Converters for Medium Voltage Adjustable Speed Drives,” in Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics – ISIE ’95, vol.1 , 1995, pp. 91 – 98.
- [11] T. Biskup, C. Buhner, B. Grzesil, J. Krijgsman, J. Michalak, S. Pasko and M. Zygmanski, “Multilevel Converter for Power Conditioning System with SMES,” presented at Przegląd Elektrotechniczny, pp. 609 – 614, June 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] S. Mariethoz and A. Rufer, “**Design and control of asymmetrical multi-level inverters,**” in Proc. of the International Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation – IECON’2002, Sevilla – Spain, November 2002.
- [13] S. Mariethoz and A. Rufer, “**New configurations for the three phase asymmetrical multilevel inverter,**” in Proc. of the IEEE 39th IAS Annual Meeting Conference, vol. 2, 2004, pp. 828 – 835.
- [14] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, “**Multilevel Power Converters,**” Power Electronics Handbook, 2nd Edition Elsevier, 2007, ISBN 978-0-12-088479-7, Chapter 17, pp. 451-482.
- [15] L. M. Tolbert and F. Z. Peng, “**Multilevel converters for large electric drives,**” in Proc. of the Thirteenth Annual Applied Power Electronics conference and Exposition – APEC ’98, vol. 2, 1998, pp. 530 – 536.
- [16] A. Rufer, M. Veenstra and K. Gopakumar, “**Asymmetric Multilevel Converter for High Resolution Voltage Phasor Generation,**” in Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications – EPE 99, Lausanne – Switzerland, September 1999.
- [17] N. P. Schibil, 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.
- [18] Trace Engineering Company Inc, “**SW Series Inverter/Charger,**” Owner’s Manual, September 1999.
- [19] Xantrex Technology Inc., “**Sine Wave Plus Inverter/Charger Owner’s Manual,**” 976-0043-01-02 Rev B, Burnaby – British Columbia – Canada, September 2003.
- [20] Schmid et al., “**Inverter for Converting a Direct Voltage into an Alternating Voltage,**” United States Patent, U.S. Patent 4,775,923, October 1988.
- [21] Sergio Daher, Jurgen Schmid, and Fernando L.M. Antunes, Member, IEEE “**Multilevel Inverter Topologies for Stand-Alone PV System**”, IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 55, No. 7 July 2008
- [22] S. Dahaer, “**Analysis, design and implementation of a high efficiency multilevel converter for renewable energy systems**”, Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Eng, Kassel, Brazil, 2005
- [23] Z.H. Meiksin and Philip C. Thackray, “**ELECTRONIC DESIGN WITH OFF-THE-SHELF INTEGRATED CIRCUITS**”, Prentice-Hall, Inc., Second Edition, 1984, pp. 98-99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] ผศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย. 2544. พิมพ์ครั้งที่ 1, พฤศจิกายน 2544 “โครงข่ายประสาทเทียมเชิงปฏิบัติสำหรับงานวิศวกรรมไฟฟ้า Practical Neural Network for Electrical Engineerign”, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
- [25] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, “Fault Diagnosis System for a Multilevel Inverter Using a Neural Network,” IEEE Transactions on Power Electronics, volume 22 , no. 3 , pp. 1062-1069, May 2007
- [26] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, “Fault Diagnosis System for a Multilevel Inverter Using a Principal Component Neural Network,” Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE , 18-22 June 2006







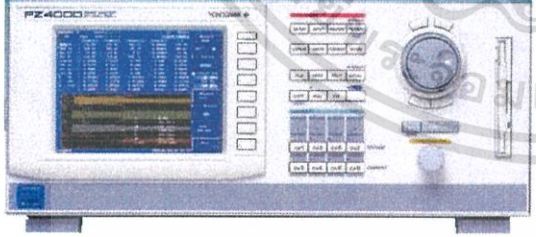
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>มัลติมิเตอร์ (Multi Meter)</p>
	<p>ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope DL 1640)</p>
	<p>PZ4000 POWER ANALYZER</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ (ต่อ)

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter)</p>
	<p>หม้อแปลง 1:1 Isolate ground Transformer</p>
	<p>หม้อแปลงแรงดัน 1 เฟส ชนิดปรับค่าได้ (Variat 1 phase)</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ (ต่อ)

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply)</p>
	<p>ชุดโหลด R (Load R)</p>
	<p>ชุดโหลด L (โหลด L)</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4431



MICROCHIP

PIC18F2331/2431/4331/4431 Data Sheet

28/40/44-Pin Enhanced Flash
Microcontrollers with nanoWatt Technology,
High-Performance PWM and A/D

2. MOSFET เบอร์ IRF3710

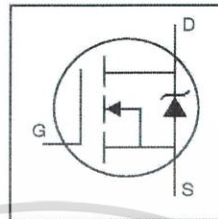
International
IR Rectifier

PD - 91309B

IRF3710

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated

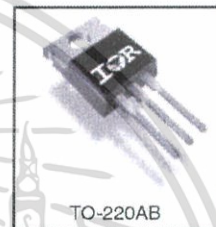


$V_{DS} = 100V$
 $R_{DS(on)} = 23m\Omega$
 $I_D = 57A$

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	57	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	40	
I_{DM}	Pulsed Drain Current $\text{\textcircled{D}}$	230	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current $\text{\textcircled{D}}$	28	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy $\text{\textcircled{D}}$	20	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt $\text{\textcircled{D}}$	5.8	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lb*in (1.1N*m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

03/24/05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. MOSFET เบอร์ STB55NF06



STB55NF06 - STB55NF06-1 STP55NF06 - STP55NF06FP

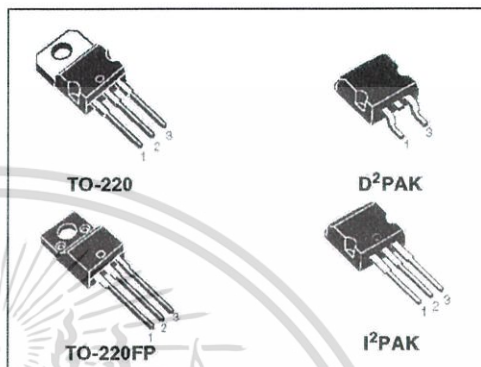
N-channel 60V - 0.015Ω - 50A - D²PAK/I²PAK/TO-220/TO-220FP
STripFET™ II Power MOSFET

General features

Type	V _{DSS}	R _{DS(on)}	I _D
STB55NF06	60V	<0.018Ω	50A
STB55NF06-1	60V	<0.018Ω	50A
STP55NF06	60V	<0.018Ω	50A
STP55NF06FP	60V	<0.018Ω	50A ⁽¹⁾

1. Refer to soa for the max allowable current value on FP-type due to R_{th} value

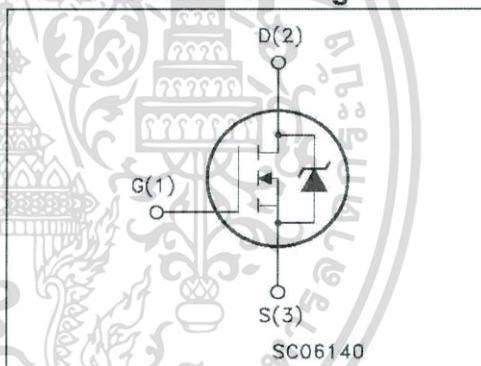
- 100% avalanche tested
- Exceptional dv/dt capability



Description

This Power MOSFET is the latest development of STMicroelectronics unique "Single Feature Size™" strip-based process. The resulting transistor shows extremely high packing density for low on-resistance, rugged avalanche characteristics and less critical alignment steps therefore a remarkable manufacturing reproducibility.

Internal schematic diagram



Applications

- Switching application

Order codes

Part number	Marking	Package	Packaging
STB55NF06T4	B55NF06	D ² PAK	Tape & reel
STB55NF06-1	B55NF06	I ² PAK	Tube
STP55NF06FP	P55NF06FP	TO-220FP	Tube
STP55NF06	P55NF06	TO-220	Tube

4. MOSFET เบอร์ IFR 530N

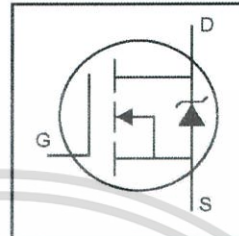
International
IR Rectifier

PD - 91351

IRF530N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated

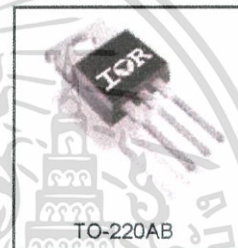


$V_{DSS} = 100V$
 $R_{DS(on)} = 90m\Omega$
 $I_D = 17A$

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	17	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	12	
I_{DM}	60	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	70	W
Linear Derating Factor	0.47	W/°C
V_{GS}	± 20	V
I_{AR}	9.0	A
E_{AR}	7.0	mJ
dv/dt	7.4	V/ns
T_J	-55 to +175	°C
T_{STG}		
Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	—	2.15	°C/W
$R_{\theta CS}$	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	—	62	

www.irf.com

1

3/16/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

โปรแกรมสำหรับควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

////////////////////////////////////
////      High Efficiency      ////
////  Multilevel Inverter 63 level  ////
////////////////////////////////////
/*****
FILE      : signal.c
Year      : 2011
Purpose   : Project
Compiler  : CCS C Compiler
Target    : PIC18f4431
Programmed by : Bosz, bossk125@hotmail.com
Renewable Energy Application Laboratory , ECC406
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

*****/
/*  PORT CONNECTION:
****Switch****
PORTA.0 = SW_ON
PORTA.1 = SW_OFF
PORTA.2 = SW_UP
PORTA.3 = SW_DOWN
****H-Bridge****
PORTC.0 = SA
PORTC.1 = SB
PORTC.2 = SC
PORTC.3 = SD
***Output Stage***
PORTB.0 = S1
PORTB.1 = S2
PORTB.2 = S3
PORTB.3 = S4
PORTB.4 = S5
PORTB.5 = S6
PORTB.6 = S7
PORTC.6 = S9
PORTC.7 = S10 */
////////////////////////////////////
#include <18f4431.h>                                //Using PIC 18F4431
#define HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#define use_delay (clock=20000000)                 //Clock frequency
20MHz
#include <LCD.c>                                    //Using LCD display

int i=0,a,b,x;
int p[11]={26 27 27 28 29 29 30 30 30 31 31};
int l[11]={53 55 55 57 59 59 61 61 61 63 63};
int dt=2;
//Dead Time (us)
float m[11]={0.84 0.86 0.88 0.90 0.92 0.94 0.961 0.97 0.98 0.99 1.00};

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int D[11][32]={
    15,104,106,108,109,111,112,113,115,116,118,121,124,127,131,
    136,141,148,154,184,175,191,214,237,303,436,632,0,0,0,0,
    16,105,105,106,106,107,109,110,111,113,115,117,120,123,126,
    131,135,141,148,156,157,180,197,222,261,333,579,332,0,0,0,0,
    22,102,102,103,104,105,106,106,108,110,111,114,116,119,122,
    126,129,134,141,149,155,165,182,202,229,276,377,745,0,0,0,0,
    20,96,98,99,100,101,103,104,105,107,108,110,112,115,118,
    121,125,129,133,141,150,158,170,185,209,243,302,468,522,0,0,0,
    18,94,95,97,98,99,100,101,102,104,105,107,109,111,114,
    116,121,125,131,136,143,151,161,172,190,214,258,337,720,100,0,0,
    15,93,94,95,96,97,97,99,100,101,102,104,106,108,111,
    113,117,121,125,129,135,143,152,161,173,195,228,278,390,651,0,0,
    15,92,93,94,95,95,96,96,97,98,100,101,103,104,107,
    110,113,116,120,125,131,135,142,150,164,180,202,240,304,0,0,0,
    15,90,91,92,93,93,94,95,96,97,98,100,101,103,106,109,
    111,113,116,123,127,134,140,150,158,176,194,226,0,0,0,0,
    17,91,91,91,92,92,93,94,96,96,97,98,100,102,104,
    107,109,113,116,120,125,128,134,146,154,170,185,212,0,0,0,0,
    15,89,90,90,91,91,92,93,93,95,96,97,99,101,103,
    105,108,112,114,118,123,125,131,140,148,159,180,201,242,0,0,0,
    15,89,89,89,90,90,91,91,92,93,96,96,97,99,101,
    103,104,107,112,116,121,123,129,138,144,158,173,194,224,0,0,0};

int16 T[11][4]={239,303,434,1272,
                262,334,578,676,
                274,375,1504,0,
                245,303,458,1055,
                255,336,716,224,
                277,386,1310,0,
                303,488,816,0,
                274,396,1203,0,
                248,340,1504,0,
                298,521,680,0,
                272,403,1120,0};

void main()
{
    setup_adc(ADC_OFF); // OFF ADC
    set_tris_a(0x00); // Set PORTA for output
    set_tris_b(0x00); // Set PORTB for output
    set_tris_c(0x00); // Set PORTC for output
    set_tris_d(0x00); // Set PORTD for output

    while(TRUE)
    {
        delay_ms(100);
        lcd_init(); // LCD initialize
        wait : if(input(PIN_A0)==0)
                {
                    output_high(PIN_A4);
                }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        lcd_putc("\f");
        lcd_gotoxy(6,1);
        printf(lcd_putc,"Mi=%f\n",m[i]);
        printf(lcd_putc," P=%d (%d level)",p[i],l[i]);
        goto pos;
    }
    output_low(PIN_A4);
    lcd_putc("\f");
    lcd_putc("High Efficiency Multilevel inverter");
    lcd_gotoxy(6,2); // start 2nd line
    lcd_putc("**** Press Switch ON ****");
    delay_ms(500);
    for(b=0; b<23; b++){
        if(input(PIN_A0)==0)goto run;
        lcd_send_byte(0,0x18); //shift left display
        delay_ms(250);}
        goto wait;
    check : if(input(PIN_A1) == 0)
    {
        i=0;
        x=0;
        output_low(PIN_A4);
        output_b(00000000);
        output_c(00000000);
        goto wait;
    }
    if(x>20)
    {
        x=20;
        if(input(PIN_A2)==0&& i<10){
            x=0;
            i++;
            lcd_putc("\f");
            lcd_gotoxy(6,1);
            printf(lcd_putc,"Mi=%f\n",m[i]);
            printf(lcd_putc," P=%d (%d level)",p[i],l[i]);
        }
        if(input(PIN_A3)==0&& i>0){
            x=0;
            i--;
            lcd_putc("\f");
            lcd_gotoxy(6,1);
            printf(lcd_putc,"Mi=%f\n",m[i]);
            printf(lcd_putc," P=%d (%d level)",p[i],l[i]);
        }
    }
    goto pos;
pos :    x++;
        output_low(PIN_C1);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_C0);
        delay_us(100);
        output_low(PIN_C2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        delay_us(dt);
        output_high(PIN_C3);
        a=0;
        goto signal;
neg :   output_low(PIN_C0);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_C1);
        delay_us(100);
        output_low(PIN_C3);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_C2);
        a++;
        goto signal;

signal:  output_low(PIN_B0); // 0V
        output_low(PIN_B2);
        output_low(PIN_B4);
        output_low(PIN_B6);
        output_low(PIN_C6);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B1);
        output_high(PIN_B3);
        output_high(PIN_B5);
        output_high(PIN_B7);
        output_high(PIN_C7);
        delay_us(D[i][0]);
        output_low(PIN_B1); // 12V
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B0);
        delay_us(D[i][1]);
        output_low(PIN_B0); // 24V
        output_low(PIN_B3);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B1);
        output_high(PIN_B2);
        delay_us(D[i][2]);
        output_low(PIN_B1); // 12+24=36V
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B0);
        delay_us(D[i][3]);
        output_low(PIN_B0); // 48V
        output_low(PIN_B2);
        output_low(PIN_B5);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B1);
        output_high(PIN_B3);
        output_high(PIN_B4);
        delay_us(D[i][4]);
        output_low(PIN_B1); // 12+48=60V
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay_us(D[i][5]);
output_low(PIN_B0); // 24+48=72V
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][6]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48=84V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][7]);
output_low(PIN_B0); // 96V
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B7);
output_high(PIN_B6);
output_low(PIN_B4);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B5);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][8]);
output_low(PIN_B1); // 12+96=108V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][9]);
output_low(PIN_B0); // 24+96=120V
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][10]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+96=132V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][11]);
output_low(PIN_B0); // 48+96=144V
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B5);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
output_high(PIN_B4);
delay_us(D[i][12]);
output_low(PIN_B1); // 12+48+96=156V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][13]);
output_low(PIN_B0); // 24+48+96=168V
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][14]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48+96=180V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][15]); // 192V
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B4);
output_low(PIN_C7);
output_high(PIN_C6);
output_low(PIN_B6);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B7);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B5);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][16]); // 12+192=204V
output_low(PIN_B1);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][17]); // 24+192=216V
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][18]); // 12+24+192=228V
output_low(PIN_B1);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][19]); // 48+192=240V
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B5);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
output_high(PIN_B4);
delay_us(D[i][20]); // 12+48+192=252V
output_low(PIN_B1);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][21]); // 24+48+192=264V
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][22]); // 12+24+48+192=276V
output_low(PIN_B1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
if(i==0)delay_us(T[i][0]);
if(i>0) delay_us(D[i][23]);
output_low(PIN_B0); // 96+192=288V
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B7);
output_high(PIN_B6);
output_low(PIN_B4);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B5);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
if(i==0)delay_us(T[i][1]);
if(i==1)delay_us(T[i][0]);
if(i>1) delay_us(D[i][24]);
output_low(PIN_B1); // 12+96+192=300V*****p=25
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
if(i==0)delay_us(T[i][2]);
if(i==1)delay_us(T[i][1]);
if(i==2)delay_us(T[i][0]);
if(i==3)delay_us(T[i][0]);
if(i>3) delay_us(D[i][25]);
output_low(PIN_B0); // 24+96+192=312V*****p=26
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
if(i==0){
    delay_us(T[i][3]);
    goto p26;}
if(i==1)delay_us(T[i][2]);
if(i==2)delay_us(T[i][1]);
if(i==3)delay_us(T[i][1]);
if(i==4)delay_us(T[i][0]);
if(i>4) delay_us(D[i][26]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+96+192=324V*****p=27
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
if(i==1){
    delay_us(T[i][3]);
    goto p27;}
if(i==2){
    delay_us(T[i][2]);
    goto p27;}
if(i==3)delay_us(T[i][2]);
if(i==4)delay_us(T[i][1]);
if(i==5)delay_us(T[i][0]);
if(i>5) delay_us(D[i][27]);
output_low(PIN_B0); // 48+96+192=336V*****p=28

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B5);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
output_high(PIN_B4);
if(i==3){
    delay_us(T[i][3]);
    goto p28;}
if(i==4)delay_us(T[i][2]);
if(i==5)delay_us(T[i][1]);
if(i==6)delay_us(T[i][0]);
if(i==7)delay_us(T[i][0]);
if(i==8)delay_us(T[i][0]);
if(i>8) delay_us(D[i][28]);
output_low(PIN_B1); // 12+48+96+192=348V*****p=29
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
if(j==4){
    delay_us(T[i][3]);
    goto p29;}
if(i==5){
    delay_us(T[i][2]);
    goto p29;}
if(i<9)delay_us(T[i][1]);
if(i>8)delay_us(T[i][0]);
output_low(PIN_B0); // 24+48+96+192=360V*****p=30
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
if(i<9){
    delay_us(T[i][2]);
    goto p30;}
delay_us(T[i][1]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48+96+192=372V*****p=31
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(T[i][2]);

```

////////////////////////////////////

```

output_low(PIN_B0); // 24+48+96+192=360V*****p=30
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(T[i][1]);
p30: output_low(PIN_B1); // 12+48+96+192=348V*****p=29
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

                if(i<9)delay_us(T[i][1]);
                if(i>8)delay_us(T[i][0]);
p29:   output_low(PIN_B0);                               // 48+96+192=336V*****p=28
                delay_us(dt);
                output_high(PIN_B1);
                if(i==4)delay_us(T[i][2]);
                if(i==5)delay_us(T[i][1]);
                if(i==6)delay_us(T[i][0]);
                if(i==7)delay_us(T[i][0]);
                if(i==8)delay_us(T[i][0]);
                if(i>8) delay_us(D[i][28]);
p28:   output_low(PIN_B1);                               // 12+24+96+192=324V*****p=27
                output_low(PIN_B3);
                output_low(PIN_B4);
                delay_us(dt);
                output_high(PIN_B0);
                output_high(PIN_B2);
                output_high(PIN_B5);
                if(j==3)delay_us(T[i][2]);
                if(j==4)delay_us(T[i][1]);
                if(i==5)delay_us(T[i][0]);
                if(i>5) delay_us(D[i][27]);
p27:   output_low(PIN_B0);                               // 24+96+192=312V*****p=26
                delay_us(dt);
                output_high(PIN_B1);
                if(i==1)delay_us(T[i][2]);
                if(j==2)delay_us(T[i][1]);
                if(i==3)delay_us(T[i][1]);
                if(j==4)delay_us(T[i][0]);
                if(i>4) delay_us(D[i][26]);
p26:   output_low(PIN_B1);                               // 12+96+192=300V*****p=25
                output_low(PIN_B2);
                delay_us(dt);
                output_high(PIN_B0);
                output_high(PIN_B3);
                if(i==0)delay_us(T[i][2]);
                if(i==1)delay_us(T[i][1]);
                if(i==2)delay_us(T[i][0]);
                if(i==3)delay_us(T[i][0]);
                if(i>3) delay_us(D[i][25]);
p25:   output_low(PIN_B0);                               // 96+192=288V
                delay_us(dt);
                output_high(PIN_B1);
                if(i==0)delay_us(T[i][1]);
                if(i==1)delay_us(T[i][0]);
                if(i>1) delay_us(D[i][24]);
                output_low(PIN_B1);                       // 12+24+48+192=276V
                output_low(PIN_B3);
                output_low(PIN_B6);
                output_high(PIN_B7);
                output_low(PIN_B5);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

                if(i<9)delay_us(T[i][1]);
                if(i>8)delay_us(T[i][0]);
p29:   output_low(PIN_B0); // 48+96+192=336V*****p=28
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B1);
        if(i==4)delay_us(T[i][2]);
        if(i==5)delay_us(T[i][1]);
        if(i==6)delay_us(T[i][0]);
        if(i==7)delay_us(T[i][0]);
        if(i==8)delay_us(T[i][0]);
        if(i>8) delay_us(D[i][28]);
p28:   output_low(PIN_B1); // 12+24+96+192=324V*****p=27
        output_low(PIN_B3);
        output_low(PIN_B4);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B0);
        output_high(PIN_B2);
        output_high(PIN_B5);
        if(i==3)delay_us(T[i][2]);
        if(i==4)delay_us(T[i][1]);
        if(i==5)delay_us(T[i][0]);
        if(i>5) delay_us(D[i][27]);
p27:   output_low(PIN_B0); // 24+96+192=312V*****p=26
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B1);
        if(i==1)delay_us(T[i][2]);
        if(i==2)delay_us(T[i][1]);
        if(i==3)delay_us(T[i][1]);
        if(i==4)delay_us(T[i][0]);
        if(i>4) delay_us(D[i][26]);
p26:   output_low(PIN_B1); // 12+96+192=300V*****p=25
        output_low(PIN_B2);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B0);
        output_high(PIN_B3);
        if(i==0)delay_us(T[i][2]);
        if(i==1)delay_us(T[i][1]);
        if(i==2)delay_us(T[i][0]);
        if(i==3)delay_us(T[i][0]);
        if(i>3) delay_us(D[i][25]);
p25:   output_low(PIN_B0); // 96+192=288V
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B1);
        if(i==0)delay_us(T[i][1]);
        if(i==1)delay_us(T[i][0]);
        if(i>1) delay_us(D[i][24]);
        output_low(PIN_B1); // 12+24+48+192=276V
        output_low(PIN_B3);
        output_low(PIN_B6);
        output_high(PIN_B7);
        output_low(PIN_B5);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][15]);
output_low(PIN_B0); // 24+48+96=168V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][14]);
output_low(PIN_B1); // 12+48+96=156V
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][13]);
output_low(PIN_B0); // 48+96=144V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][12]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+96=132V
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B4);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B2);
output_high(PIN_B5);
delay_us(D[i][11]);
output_low(PIN_B0); // 24+96=120V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][10]);
output_low(PIN_B1); // 12+96=108V
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][9]);
output_low(PIN_B0); // 96V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][8]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48=84V
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B6);
output_high(PIN_B7);
output_low(PIN_B5);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B4);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][7]);
output_low(PIN_B0); // 24+48=72V
delay_us(dt);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][6]);
output_low(PIN_B1); // 12+48=60V
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][5]);
output_low(PIN_B0); // 48V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][4]);
output_low(PIN_B1); // 12+24=36V
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B4);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B2);
output_high(PIN_B5);
delay_us(D[i][3]); // 24V
output_low(PIN_B0);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][2]); // 12V
output_low(PIN_B1);
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][1]); // 0V
output_low(PIN_B0);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][0]);
if (a<1)goto neg;
goto check;

```

```

}

```

```

}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33)

คำนำ

Keynote Speakers

บทความรับเชิญ

บทความดีเด่น

ดัชนีผู้เขียนบทความ Vol.1 (Author Index Vol.1)

ดัชนีผู้เขียนบทความ Vol.2 (Author Index Vol.2)

ดัชนีคำสำคัญ Vol.1 (Keyword Index Vol.1)

ดัชนีคำสำคัญ Vol.2 (Keyword Index Vol.2)

กำหนดการ

Sponsor

หน้าปก Proceedings

Proceeding Vol.1

Proceeding Vol.2

Abstract Program

บทความทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ไฟฟ้ากำลัง (PW)

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

อิเล็กทรอนิกส์ (EL)

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)

ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

โฟโตนิกส์ (PH)

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)

ร่วมจัดโดย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



111 Years Engineering
Innovation



รูปแบบสัญญาณที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ แสงอาทิตย์แบบอิสระ

Waveform optimization of a multilevel inverter for PV stand-alone applications

ธนาวดี แจ่มอัน¹, สุรินทร์ คำฝอย²

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²ศูนย์วิศวกรรมระบบพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย หลอดกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Email : j_thanawadee@yahoo.com , kkbsurin@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับ รูปแบบสัญญาณที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ซึ่งต้องการคุณสมบัติดังนี้ จ่ายพลังงาน ได้สองทิศทาง, แหล่งจ่ายเดียว, ค่าความผิดเพี้ยนต่ำ โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer สามารถรองรับความต้องการดังกล่าวได้ โปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer จากผลการจำลองชี้ให้เห็นว่ารูปแบบสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer คือ 63 ระดับแรงดัน ซึ่งจะทำได้รูปคลื่นแรงดันที่มีคุณภาพสูง

คำสำคัญ : อินเวอร์เตอร์หลายระดับ, ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

Abstract

Waveform optimization of a multilevel inverter for PV stand alone applications is discussed in this paper. Bidirectional power flow, single dc source, and low total harmonic distortion are required for PV stand-alone application. Thereupon, the multilevel inverter with multi-winding configuration is suitable for this particular application. Also, the waveform optimization for high quality output voltages is also analyzed. The MATLAB/Simulink software package is utilized for the waveform optimization of a multi-winding multilevel inverter. The results show that the 63 levels of the output voltage is suitable for a multi-winding multilevel inverter with high quality output voltage waveform.

Keywords : Multilevel inverter, PV Stand-alone

1. บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone) ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้า โดยมีหลักการทำงานแบ่งได้เป็น 2 ช่วงเวลา กล่าวคือ ช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดพร้อมทั้งประจุพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้ในแบตเตอรี่พร้อมๆ กัน ส่วนในช่วงกลางคืน เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับแสงแดดจึงไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ดังนั้น พลังงานจากแบตเตอรี่ที่เก็บประจุไว้ในช่วงกลางวันจะถูกจ่ายให้แก่โหลด จึงสามารถกล่าวได้ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดได้ทั้งกลางวันและกลางคืน อุปกรณ์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่สำคัญประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Charge controller) แบตเตอรี่ (Battery) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) สำหรับเปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ดังแสดงในรูปที่ 1

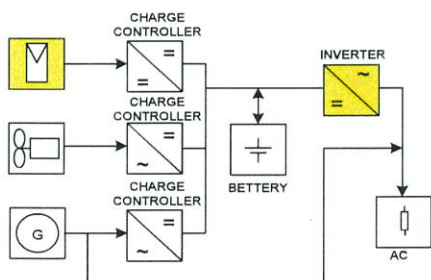
อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel inverter) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานในระบบที่มีพิกัดกำลังสูงและยังสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่คล้ายคลึงกับรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) ทำให้ได้คุณภาพของสัญญาณดี และยังเป็นทางเลือกการสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ (Switching loss) โดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยหม้อแปลงและตัวฟิวเจอร์ (Filter) นอกจากนี้ อินเวอร์เตอร์หลายระดับยังสามารถนำไปใช้กับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน (Renewable Energy Source) เช่น แหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ แหล่งจ่ายพลังงานจากลม แหล่งจ่ายพลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้สามารถนำไปใช้เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้โดยตรง อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีด้วยกันอยู่หลายชนิดได้ถูกอธิบายไว้แล้วใน [1-2]

คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่สำคัญต่อระบบ PV Stand-alone สามารถแยกพิจารณาได้ดังตารางที่ 1 และ 2 [2] โดยพบว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Diode-Clamped ไม่สามารถรองรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้ เนื่องจากไม่สามารถจ่ายโหลดได้ด้วย dc level component และไม่สามารถ

สามารถแยกแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตอย่างอิสระได้ (Not Input-output isolation) ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Cascade H-bridge with multi-winding transformer ไม่เหมาะสมเนื่องจากไม่สามารถรองรับการจ่ายพลังงานสองทิศทางได้ ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Cascade H-bridge with bi-directional DC/DC converter นั้นไม่เหมาะสมอีกเช่นกันเนื่องจากไม่สามารถสวิตช์ที่ความถี่สวิตช์ต่ำได้ ดังนั้น จากตารางที่ 1 และ 2 [2] จะเห็นว่ามีเพียงอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer เพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ และแนวคิดเกี่ยวกับรูปแบบสัญญาณที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer

2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้โดยตรง ซึ่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer มีข้อดีคือ ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันด้านอินพุต (input) เพียง 1 แหล่งจ่าย และยังสามารถแยกแรงดันด้านอินพุตและแรงดันด้านเอาต์พุตออกจากกันได้อย่างอิสระ (input-output isolated) โดยโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer ได้ถูกแบ่งเป็นสองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2 คือ ส่วนของวงจรเอช-บริดจ์ (H-Bridge) ที่ต่อเข้ากับขดลวดปฐมภูมิ (primary) ของหม้อแปลง และส่วนที่สองเป็นส่วนที่ต่ออยู่กับขดลวดทุติยภูมิ (secondary) ของหม้อแปลง คือ วงจรสวิตช์สองทางซึ่งมีข้อดีคือรองรับการจ่ายพลังงานได้สองทิศทาง โดยส่วนที่เป็นวงจร H-Bridge นั้นจะสร้างแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave) ออกมา เพื่อที่จะนำมาเป็นแหล่งจ่ายให้กับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง แต่ถ้าต้องการเพิ่มระดับแรงดันทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนเซลล์ของวงจรสวิตช์สองทางเข้าไปต่อкасัดกัน



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ (Stand-alone system)

ตาราง 1 คุณสมบัติสำหรับระบบ PV Stand-alone [2]

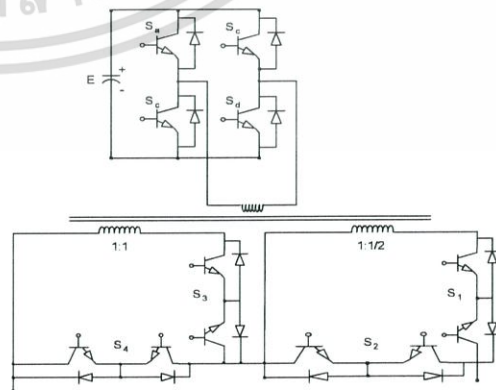
Id.	คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบ PV Stand-alone
M1	แหล่งจ่ายเดียว(single source input)
M2	ความถี่สวิตช์ต่ำ (Mainly based on low-frequency switching)
M3	สามารถจ่ายโหลดได้ด้วย dc level component
M4	คุณภาพแรงดันสูง
O1	จ่ายพลังงานได้สองทิศทาง (Bi-directional power flow)
O2	แรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตแยกกัน (Input-output isolation)

*M=mandatory (ความจำเป็น) ; O= (ทางเลือกเสริม)

ตาราง 2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับระบบ PV Stand-alone [2]

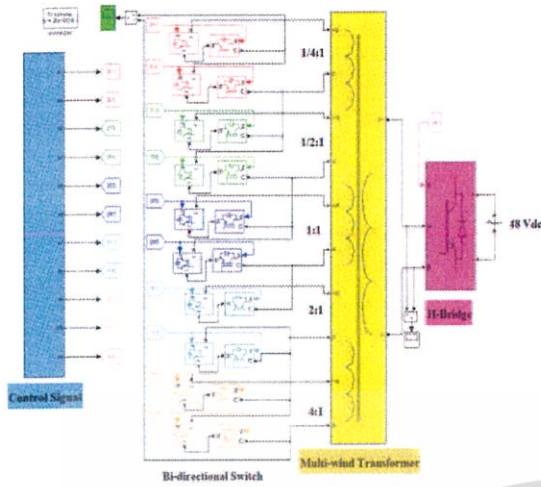
No.	ชนิดของอินเวอร์เตอร์	M1	M2	M3	M4	O1	O2
1.	อินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบทั่วไป	Y	Y	N	N	N	N
2.	Diode clamped	Y	Y	N	N	Y	N
3.	Cascade H-bridge with multi-winding transformer	Y	Y	Y	Y	N	Y
4.	Cascade H-bridge with bi-directional DC/DC converter	Y	N	Y	Y	Y	Y
5.	Multi-winding transformer	Y	Y	Y	Y	Y	Y

*Y=Yes(มี) , N=No(ไม่มี)



รูป 2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer

แบบ 2 เซลล์



รูป 3 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer แบบ 5 เซลล์ โดยใช้ MATLAB/Simulink

3. ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองการสร้างสัญญาณในการขับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer แบบ 5 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยสัญญาณที่ใช้เป็นแบบ Fundamental Frequency Switching ซึ่งรูปแบบสัญญาณที่ได้มีค่าการสูญเสียเนื่องจากสวิตช์ (Switching loss) ต่ำกว่าสัญญาณแบบ SPWM (Sinusoidal Pulse Wide Modulation) โดยเทคนิคในการสร้างสัญญาณดังกล่าวนี้ได้ถูกอธิบายไว้แล้ว [2-3] ในการจำลองวงจรของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer แบบ 5 เซลล์ นี้ได้กำหนดแรงดันอินพุตดีซี (DC-link) เท่ากับ 48 โวลต์ (v) โดยอัตราส่วนของหม้อแปลงกำหนดดังนี้ คือ เซลล์ที่ 1 (เซลล์บนสุด) มีอัตราส่วนหม้อแปลงเป็น 1:1/4 เซลล์ที่ 2 มีอัตราส่วนหม้อแปลงเป็น 1:1/2 เซลล์ที่ 3 มีอัตราส่วนหม้อแปลงเป็น 1:1 เซลล์ที่ 4 มีอัตราส่วนหม้อแปลงเป็น 1:2 และเซลล์ที่ 5 (เซลล์ล่างสุด) มีอัตราส่วนหม้อแปลงเป็น 1:4 และได้ทำการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน (p) และการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีมอดูเลชัน (Modulation index, m_i) เพื่อทำการหาค่าความผิดเพี้ยน (THD_v) และระดับแรงดันเอาต์พุต (V_{out,level}) แล้วนำมาเปรียบเทียบกันว่าค่า p และ m_i ที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone) สำหรับประเทศไทย ซึ่งการหาค่า p และ V_{out,level} สามารถหาได้จากสมการที่ (1) และ (2) ส่วน m_i สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

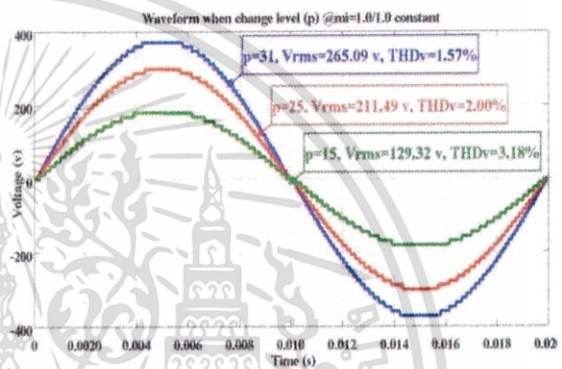
$$p = 2^N - 1 \quad (1)$$

$$V_{out,level} = 2p + 1 \quad (2)$$

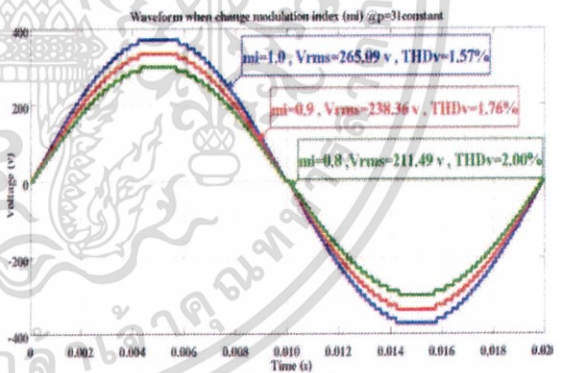
$$m_i = \frac{V_{rms}}{V_{peak}/\sqrt{2}} \quad (3)$$

โดยที่

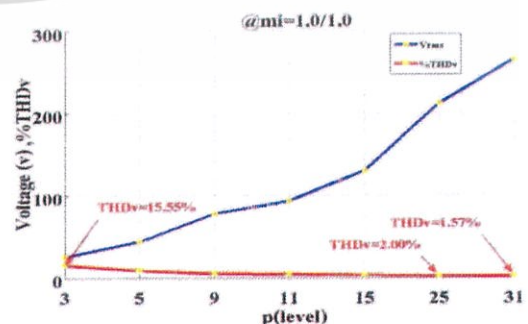
- p คือ ระดับแรงดันที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง
- N คือ จำนวนเซลล์ของอินเวอร์เตอร์ฝั่งทุกขั้วของหม้อแปลง
- m_i คือ ดัชนีค่ามอดูเลชัน (0.0-1.0/1.0)
- V_{out,level} คือ ระดับแรงดันเอาต์พุต (ระดับ)
- V_{rms} คือ แรงดันเอาต์พุต rms ที่ต้องการ (โวลต์,v)
- V_{peak} คือ แรงดันเอาต์พุต peak ณ m_i=1.0/1.0 (โวลต์,v)



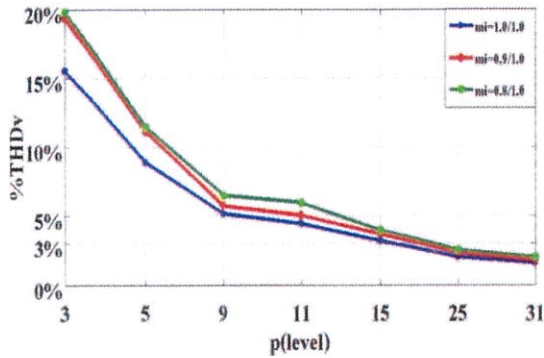
รูป 4 ระดับแรงดันเอาต์พุต ที่ m_i=1.0/1.0 คงที่ ที่ p=15, 25 และ 31



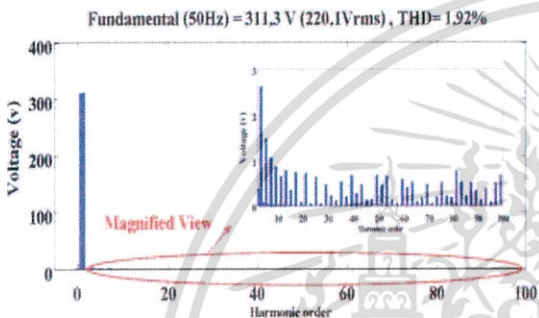
รูป 5 ระดับแรงดันเอาต์พุต ที่ p=31 คงที่ ที่ m_i=0.8, 0.9 และ 1.0/1.0



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบ V_{rms} และ %THD_v ที่ m_i=1.0/1.0 p= 3, 5, 9, 11, 15, 25 และ 31



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบ %THD_v ที่ $m_1=0.8, 0.9$ และ $1.0/1.0$
 $p=3, 5, 9, 11, 15, 25$ และ 31



รูปที่ 8 แสดงค่า %THD_v ของแรงดันเอาต์พุตที่เหมาะสมสำหรับระบบ
 PV Stand-alone ในประเทศไทย ที่ $p=31$ $m_1=0.832/1.0$

จากผลการจำลอง เมื่อครั้งที่ $m_1=1.0/1.0$ แล้วทำการเปลี่ยนค่า p พบว่า ที่ $p=15$ จะได้แรงดันเอาต์พุต $V_{rms}=129.32$ v และระดับแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 31 ระดับ THD_v=3.18% ส่วนที่ $p=31$ จะได้แรงดันเอาต์พุต $V_{rms}=265.09$ v ($V_{peak}=374.00$ v) และระดับแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 63 ระดับ THD_v=1.57% ดังแสดงในรูปที่ 4 ส่วนรูปที่ 5 แสดงแรงดันเอาต์พุต เมื่อครั้งที่ $p=31$ แล้วเปลี่ยนค่า m_1 พบว่า ที่ $m_1=0.8/1.0$ จะได้แรงดันเอาต์พุต $V_{rms}=211.49$ v และค่า THD_v=2.00 % ส่วนที่ $m_1=1.0/1.0$ จะได้แรงดันเอาต์พุต $V_{rms}=265.09$ v ($V_{peak}=374.00$ v) และ THD_v = 1.57% ดังนั้นถ้าต้องการแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer แบบ 5 เซลล์ ที่มีความผิดเพี้ยนต่ำ (THD_v < 3%) สามารถทำได้โดยการปรับตัวแปร 2 ตัว คือ ค่า p และ ค่า m_1 ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 โดยพบว่า ค่า p ควรมีค่าระหว่าง $p=25-31$ เนื่องจากให้ค่า THD_v ต่ำกว่า 3% และหากพิจารณาค่า m_1 พบว่า ค่า m_1 ควรมีค่าระหว่าง $m_1=0.8-1.0/1.0$

จึงได้ว่า การหารูปแบบของสัญญาณเอาต์พุตที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer แบบ 5 เซลล์ คือ ที่ระดับแรงดัน $p=25$ ถึง $p=31$ และค่าดัชนีมือคดเลข $m_1=0.8/1.0$ ถึง $m_1=1.0/1.0$ ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าความผิดเพี้ยนต่ำ (THD_v < 3%) แต่ถึงแม้จำนวนระดับแรงดันจะมีมากและทำให้ต้องสวิตช์ที่ความถี่สวิตช์สูง แต่ค่า

ความสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ไม่ได้มีผลมากนักต่อจำนวนระดับแรงดันเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียเนื่องจากการนำกระแส (conduction loss)

สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายในประเทศไทยเป็นแบบ 3 เฟส 4 สาย ระดับแรงดัน 380/220 โวลต์ (v) ความถี่ 50 เฮิรซ์ (Hz) ทำให้การหาค่าระดับแรงดันเอาต์พุตหรือรูปแบบของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer แบบ 5 เซลล์ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone) สำหรับประเทศไทย คือ ที่ระดับแรงดัน $p=31$ และค่าดัชนีมือคดเลข $m_1=0.832/1.0$ จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุต $V_{rms}=220$ v ความถี่เท่ากับ 50 Hz และมีค่าผิดเพี้ยน THD_v ต่ำเพียง 1.92% ดังแสดงในรูปที่ 8

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ภายใต้สัญญาเลขที่ MRG5280027

6. สรุป

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer (แบบ 5 เซลล์) สามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตได้ 63 ระดับแรงดัน ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์ โดยการปรับค่าระดับแรงดัน $p=31$ ระดับ ส่วนค่าดัชนีมือคดเลข $m_1=1.0/1.0$ ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุต $V_{rms}=265.09$ v ($V_{peak}=374.00$ v) และมีค่าความผิดเพี้ยน THD_v = 1.57% แต่ระดับแรงดันเอาต์พุตหรือรูปแบบของสัญญาณเอาต์พุตที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Multi-winding Transformer (แบบ 5 เซลล์) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone) สำหรับประเทศไทย คือ ที่ระดับแรงดัน $p=31$ และ ค่าดัชนีมือคดเลข $m_1=0.832/1.0$ ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุต $V_{rms}=220$ v ความถี่เท่ากับ 50 Hz และมีค่าผิดเพี้ยน THD_v ต่ำเพียง 1.92%

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, "Multilevel Power Converters," *Power Electronics Handbook*, 2nd Edition Elsevier, 2007, ISBN 978-0-12-088479-7, Chapter 17, pp. 451-482.
- [2] Sergio Daher, Jurgen Schmid, and Fernando L.M. Antunes, Member, IEEE "Multilevel Inverter Topologies for Stand-Alone PV System", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 55, No. 7 July 2008
- [3] S. Dohaer, "Analysis, design and implementation of a high efficiency multilevel converter for renewable energy systems", Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Eng, Kassel, Brazil, 2005



The 34th Electrical Engineering Conference (EECON-34)
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

Volume I

- ✿ ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ✿ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ✿ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

30 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม 2554
 ณ โรงแรมแอมบาสเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี
 ดำเนินการโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม



อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

A High Efficiency Multilevel Inverter for a PV Stand-alone Application

ธนาวัต แจ่มอัน¹, สุรินทร์ คำผอย^{1,2}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
²ศูนย์นวัตกรรมระบบพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร. 02-329-8331

Email : j_thanawadee@yahoo.com , kksurin@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ โดยเลือกใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ซึ่งมีค่าการสูญเสียต่ำเนื่องจากเทคนิคที่ใช้ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันนี้เป็นเทคนิคที่มีความคิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้วงจรกรองของใหญ่ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ก่อนที่จะทำการสร้างเครื่องต้นแบบขนาด 1 kVA โดยจากผลการจำลองและทดลองพบว่าเครื่องต้นแบบมีประสิทธิภาพสูงสามารถให้คุณภาพของสัญญาณแรงดันเอาท์พุทดีกว่าอินเวอร์เตอร์ทั่วไป โดยมีประสิทธิภาพสูงถึง 93% และเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์หลายระดับ, หม้อแปลงหลายชุด

Abstract

A high efficiency multilevel inverter for a PV stand-alone application is presented in this paper. The multilevel inverter is used to interconnection between low voltage dc distribution (48V) with PV stand-alone system and a load (220V_{ac}). The proposed multilevel inverter topology can operate high power quality waveform without filter with high efficiency. The MATLAB/Simulink is used to simulate the operation of the proposed multilevel inverter topology. The 1 kVA prototype is developed for experimental validation. The experimental results are satisfactory and agree with simulation results. The results show that multi-winding transformer multilevel inverter can achieve high efficiency, high power quality waveform; therefore, this proposed multilevel inverter is suitable for a low dc voltage distribution with PV stand-alone applications.

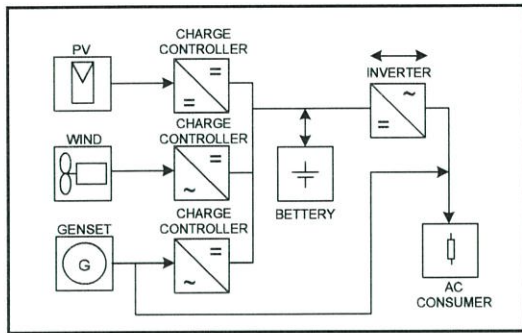
Keyword: Multilevel inverter, Multi-winding transformer

1. บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone) ประกอบด้วย แหล่งจ่ายพลังงานทดแทนชนิดต่างๆ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Charge controller) แบตเตอรี่ (Battery) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดย อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์หรือแหล่งพลังงานทดแทนอื่น ไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้า [1]

อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel inverter) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานในระบบที่มีพิกัดกำลังสูงและยังสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่คล้ายคลึงกับรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) ทำให้ได้คุณภาพของสัญญาณที่ดี มีความคิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน (THD) ต่ำ ซึ่งในบทความวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาไปที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีแรงดันกระแสตรงขาเข้าขนาด 48 Vdc เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระนั้นจะให้แรงดันกระแสตรงออกมาเท่ากับ -48 Vdc ซึ่งถือว่าเป็นแรงดันระดับต่ำสำหรับระบบจำหน่าย (low DC distribution) ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องมีคอนเวอร์เตอร์ DC/DC ในการแปลงผันพลังงานเพื่อเพิ่มระดับแรงดันส่งผลให้สามารถลดค่าความสูญเสียเนื่องจากการแปลงผันพลังงานของระบบลงได้ ส่วนความดีสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในบทความวิจัยนี้ความถี่ของสวิตซ์เท่ากับความถี่การใช้งานของภาระไฟฟ้า (50 Hz) ส่งผลทำให้ค่าการสูญเสียเนื่องจากสวิตซ์ลดลงนอกจากนั้นอินเวอร์เตอร์หลายระดับในโครงการวิจัยนี้ยังมีความยืดหยุ่นคือ สามารถจ่ายพลังงานได้ทั้งสองทิศทางเพื่อรองรับภาระทางไฟฟ้าสมัยใหม่ เช่นรถยนต์แบบ plug-in hybrid car ในอนาคต และมีสัญญาณแรงดันขาออกที่ใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์ทำให้ได้คุณภาพสัญญาณที่ดี มีค่าความคิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน (THD) ต่ำโดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยวงจรกรองขนาดใหญ่ โดยคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ที่จำเป็นต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้ถูกอธิบายไว้แล้วใน [2] ทำให้ได้ว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ คือ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multilevel inverter with Multi-winding Transformer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 (ECON-34) 30 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม 2554 มหาวิทยาลัยสยาม



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone)

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

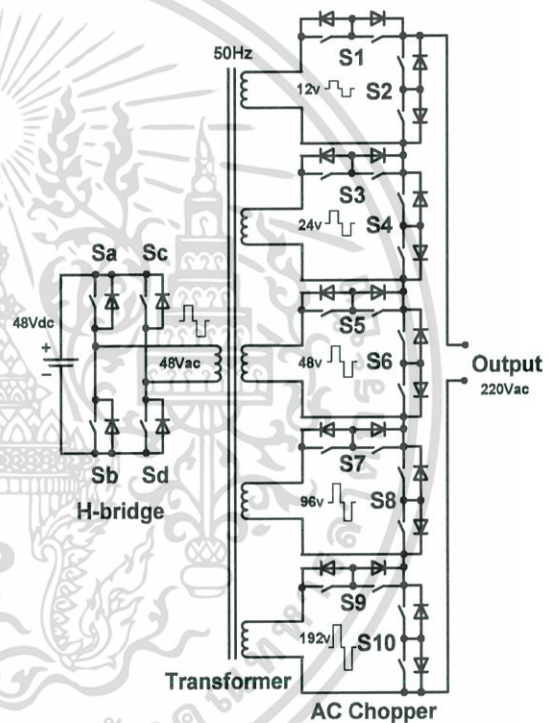
$$n_{level} = (2 \times p) + 1 \quad (2)$$

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

โดยที่	n	คือ จำนวนขดของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิ
	p	คือ จำนวนของระดับขั้นใน $\frac{1}{4}$ ของ 1 ลูกคลื่น
	n_{level}	คือ จำนวนของระดับขั้น
	V_{rms}	คือ แรงดันขาออก (rms) ที่ต้องการ
	V_{peak}	คือ แรงดันขาออก (peak) ที่ $m_i = 1.0$
	m_i	คือ ดัชนีมอดคูลชัน (0.0-1.0/1.0)

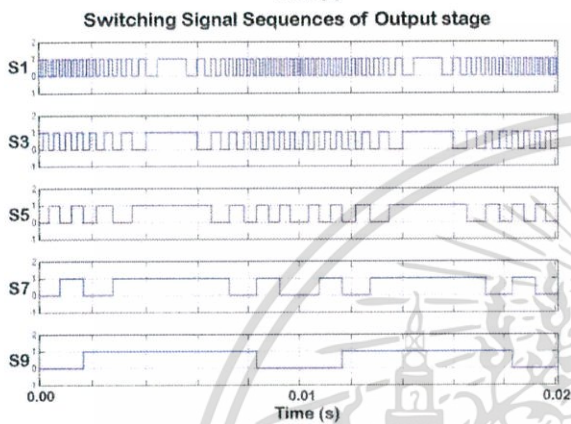
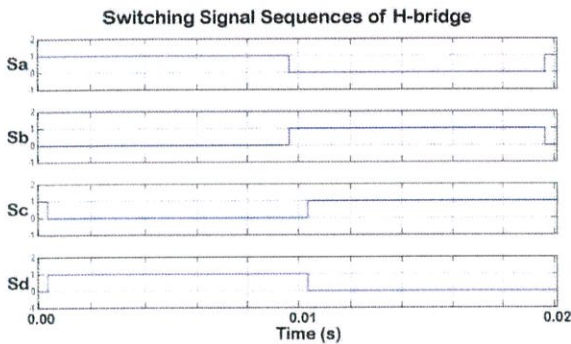
2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด (Multilevel inverter with Multi-winding Transformer)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้โดยตรง ซึ่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด มีข้อดี คือ ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันด้านอินพุตเพียง 1 แหล่งจ่ายและมีระดับแรงดันต่ำเพียง -48 Vdc ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องมีคอนเวอร์เตอร์ DC/DC ในการแปลงผันพลังงานเพื่อเพิ่มระดับแรงดันส่งผลให้สามารถลดค่าความสูญเสียเนื่องจากการแปลงผันพลังงานของระบบลงได้ และยังสามารถแยกแรงดันด้านอินพุตและแรงดันด้านเอาต์พุตออกจากกันได้อย่างอิสระ (input-output isolated) นอกจากนี้ยังสามารถส่งจ่ายพลังงานได้ทั้งสองทิศทาง (bi-directional) เพื่อรองรับโหนดสมัยใหม่ โดยโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหม้อแปลงหลายขด ได้ถูกแบ่งเป็นสามส่วนดังแสดงในรูปที่ 2 คือ ส่วนวงจรเอช-บริดจ์ (H-Bridge Inverter) ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) ที่มีขนาดของแรงดันเท่ากับ 48 Vdc มีความถี่ 50 Hz และมีช่วงเวลาไทม์ที่หน่วงเวลาขณะแรงดันเปลี่ยนจากแรงดันด้านบวกเป็นแรงดันด้านลบ 100 μ s เพื่อนำมาเป็นแหล่งจ่ายให้กับทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแบบหลายขด โดยหม้อแปลงหลายขดทำหน้าที่แปลงแรงดันออกเป็น 5 ระดับด้วยขดลวดทุติยภูมิ 5 ขดได้แรงดันขาออกเป็น 12, 24, 48, 96, 192 โวลต์ตามลำดับเพื่อจ่ายแรงดันที่ได้ให้กับชุดวงจรเอช-ชอปเปอร์ต่อไป และส่วนที่สามคือ ชุดวงจรเอช-ชอปเปอร์ (AC-Chopper) จำนวน 5 ชุดต่อกันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ทำหน้าที่รวมรูปคลื่นแรงดันทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันขาออกที่เป็นลักษณะลำดับขั้น ส่วนการสร้างระดับแรงดันนั้นเราสามารถสร้างระดับแรงดันที่แตกต่างกันได้มากที่สุดค่ารวมได้จกสมการที่ 1 และสมการที่ 2 ซึ่งจำนวนแรงดันที่สามารถสร้างได้คือ 63 ระดับ ให้มีค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันต่ำโดยไม่ต้องใช้วงจรกรองขนาดใหญ่ ส่วนสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิทช์กำลังของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด (Multi-winding Transformer) แบบ 5 เซลล์

การรักษาระดับแรงดันหรือการควบคุมแรงดันด้านออก จะใช้วิธีการเปลี่ยนจำนวนขั้นของแรงดัน ซึ่งแรงดันขาออกจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนระดับขั้น โดยจะให้แรงดันขาออกสูงสุดที่ 63 ขั้น แรงดันขดที่ 372 V ขณะไม่มีโหลด และจะลดลงเมื่อจำนวนระดับขั้นของแรงดันลดลง แต่จะส่งผลทำให้ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน (THD) มีค่ามากขึ้นด้วย สำหรับการควบคุมแรงดันนั้นจะใช้การควบคุมวงเปิด (Open loop) โดยการรับคำสั่งเพิ่มหรือลดระดับแรงดันจากภายนอก และแสดงผลออกทางจอแสดงผล

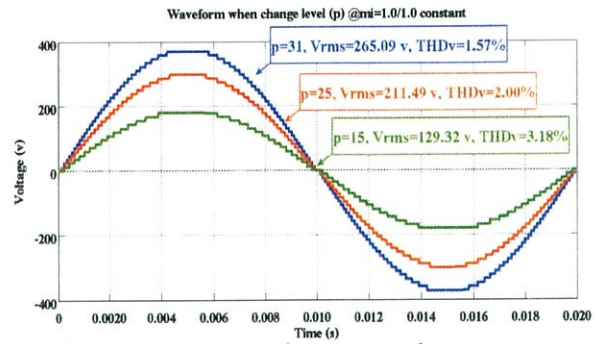


รูปที่ 3 สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหม้อแปลงหลายชนิดแบบ 5 เซลล์

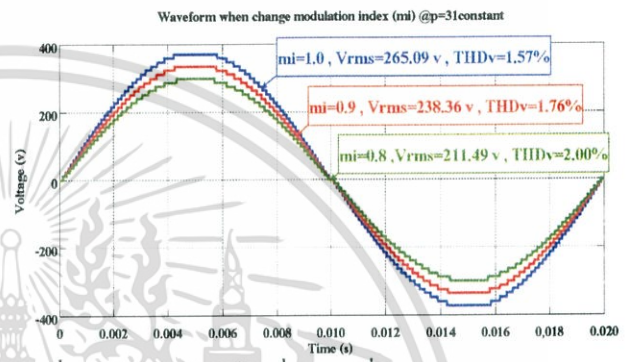
3. การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูง ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ผลการจำลองจากโปรแกรม ดังรูปที่ 4-5 เป็นรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถ สร้างระดับขั้นของแรงดันได้ถึง 63 ระดับขั้น

จากผลการจำลอง เมื่อครั้งที่ $m_i=1.0/1.0$ แล้วทำการเปลี่ยนค่า p พบว่าที่ $p=15$ จะได้แรงดันขาออก $V_{rms}=129.32$ v และระดับแรงดันขาออกเท่ากับ 31 ระดับ THD_v=3.18% ส่วนที่ $p=31$ จะได้แรงดันขาออก $V_{rms}=265.09$ v ($V_{peak}=374.00$ v) และระดับแรงดันขาออกเท่ากับ 63 ระดับ THD_v=1.57% ดังแสดงในรูปที่ 4 ส่วนรูปที่ 5 แสดงแรงดันขาออก เมื่อครั้งที่ $p=31$ แล้วเปลี่ยนค่า m_i พบว่าที่ $m_i=0.8/1.0$ จะได้แรงดันขาออก $V_{rms}=211.49$ v และค่า THD_v=2.00 % ส่วนที่ $m_i=1.0/1.0$ จะได้แรงดันขาออก $V_{rms}=265.09$ v ($V_{peak}=374.00$ v) และ THD_v = 1.57% ดังนั้นถ้าต้องการแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชนิดแบบ 5 เซลล์ ที่มีความผิดเพี้ยนของแรงดันต่ำ (THD_v < 3%) สามารถทำได้โดยการปรับตัวแปร 2 ตัว คือ ค่า p และ ค่า m_i จาก [2] พบว่าการหารูปแบบของสัญญาณขาออกที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชนิดแบบ 5 เซลล์ เพื่อนำไปใช้ในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าของประเทศไทย คือ ที่ระดับแรงดัน $p=25$ ถึง $p=31$ และ ค่าดัชนีมอดดูเลชั่น $m_i=0.8/1.0$ ถึง $m_i=1.0/1.0$ ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันต่ำ (THD_v < 3%)



รูปที่ 4 ระดับแรงดันเอาต์พุตที่ $m_i=1.0/1.0$ ครั้งที่ $p=15, 25$ และ 31



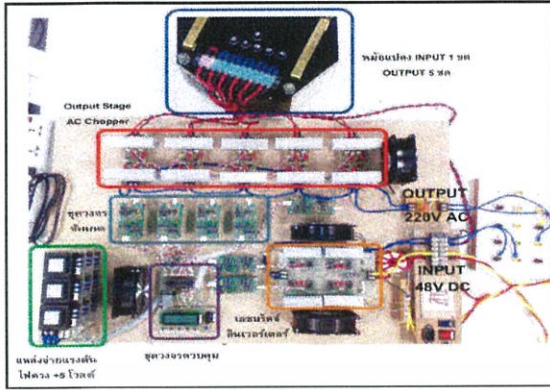
รูปที่ 5 ระดับแรงดันเอาต์พุตที่ $p=31$ ครั้งที่ $m_i=0.8, 0.9$ และ $1.0/1.0$

4. การทดลองและผลการทดลอง

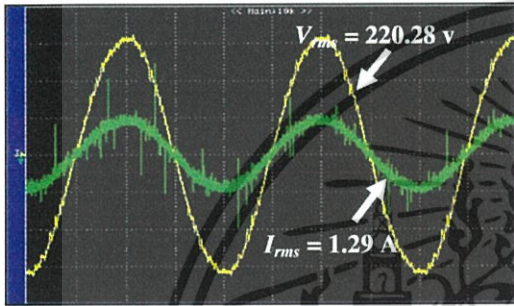
เมื่อทำการรวมส่วนต่างๆของชิ้นงานเข้าด้วยกัน เพื่อเตรียมจ่ายภาระทางไฟฟ้าจะได้เครื่องต้นแบบดังรูปที่ 6 โดยจะรับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟตรง 48 Vdc ผ่านวงจรถอ-บริดจ์อินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงให้เป็นแรงดันไฟสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเข้าสู่หม้อแปลงหลายชนิด จะได้แรงดันออกทั้งหมด 5 ระดับและเข้าสู่ส่วนวงจรถอ-บริดจ์เพื่อสร้างแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz อินเวอร์เตอร์หลายระดับเครื่องต้นแบบนี้ มีพิกัด 1 kVA

การทดลองจ่ายภาระทางไฟฟ้ารูปที่ 7 คลื่นแรงดันเอาต์พุตขณะจ่ายโหลดขนาด 200 W ที่ $m_i=0.86/1.0$ จะได้แรงดันขาออก $V_{rms}=220.28$ v และกระแส $I_{rms}=1.29$ A เมื่อทำการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันพบว่าค่า THD_v = 3.54% และความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแส THD_i = 12.93% ดังแสดงในรูปที่ 8 ส่วนตารางที่ 1 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายโหลดขนาด 200 W พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์นี้มีค่าเท่ากับ 21.8 W โดยค่าการสูญเสียส่วนใหญ่อยู่ที่วงจรถอ-บริดจ์ เนื่องจากในส่วนนี้ใช้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในการขับสวิตช์กำลังโดยมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 16 W คิดเป็น 5.2 % ของค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมด แต่ส่วนของหม้อแปลงหลายชนิดและวงจรถอ-บริดจ์อินเวอร์ชั่นนั้นจะเห็นว่าไม่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำกว่า เนื่องจากสัญญาณที่ใช้ในการขับสวิตช์กำลังของวงจรถอ-บริดจ์อินเวอร์ชั่น มีความใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์ โดยจะเห็นว่าไม่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 3.8 W คิดเป็น 1.3 %

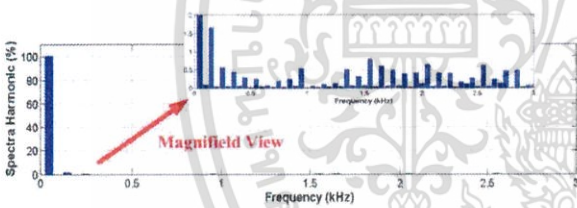
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ล้วนทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม ไฟฟ้า ครั้งที่ 34 (BECON-34) 30 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม 2554 มหาวิทยาลัยสยาม



รูปที่ 6 เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดมือแปลงหลายขด



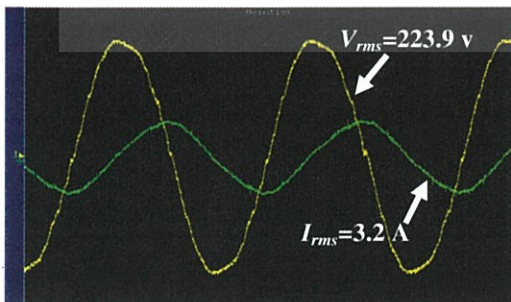
รูปที่ 7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะจ่ายโหลด 200 W



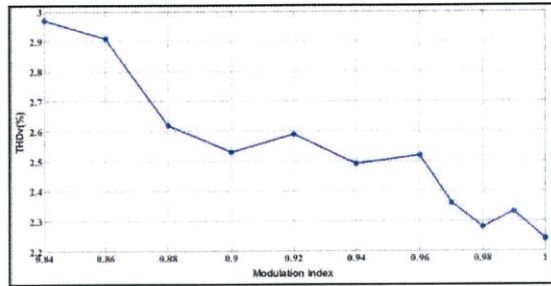
รูปที่ 8 รูปคลื่นสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก

ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแต่ละส่วนขณะจ่ายโหลด 200 W

	H-Bridge	มือแปลง + AC-Chopper	Gate-drive	รวม
กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (W)	16	3.8	2	21.8
ร้อยละของกำลังขาเข้า	5.2%	1.3%	0.7%	7.2%



รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะจ่ายโหลดมอเตอร์ 0.5 แรงม้า



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่านี้อัตราความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THD) กับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THD)

รูปที่ 9 แสดงผลการทดลองจากจ่ายโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสขนาด 0.5 แรงม้า (0.4 kW) โดยจะเห็นว่า $V_{rms} = 223.9$ v ที่ $m_i = 0.88/1.0$ และมีค่า $THD_v = 3.9$ % และมีค่า $I_{rms} = 3.2$ A ส่วน $THD_i = 6.17$ % ส่วนรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านี้อัตราความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THD) โดยพบว่ายิ่งค่าค่านี้อัตราความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THD) ยิ่งสูงจะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน (THD) ต่ำลง

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดมือแปลงหลายขด โดยได้ทำการทดลองทั้งในส่วนของการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดมือแปลงหลายขดนี้สามารถนำไปใช้ในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้จริงโดยมีประสิทธิภาพสูงถึง 93% และสามารถสร้างแรงดันสูงขณะไม่จ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 220 - 268 v แต่มีความผิดเพี้ยนของแรงดันต่ำโดยมีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันต่ำกว่า 3% ที่ความถี่ 50 Hz จึงเห็นได้ว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดมือแปลงหลายขดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (EPPO) ประจำปีงบประมาณ 2554

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sérgio Daher. "Analysis, Design and Implementation of a High Efficiency Multilevel Converter for Renewable Energy Systems", Ph.D. dissertation, University of Kassel, Brazil, 2005.
- [2] Thanawadee Jaem-On and Surin khomfoi. "Waveform optimization of a multilevel inverter for PV stand-alone applications" BECON33, 1-3 Dec 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ล้วนทั้งห้าฉบับให้คัดลอกไปเพื่อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 (BECON-34) 30 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม 2554 มหาวิทยาลัยสยาม

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว ธนาวดี แจ่มอ้น
ภูมิลำเนา	จังหวัดชลบุรี
ประวัติการศึกษา	ปี 2553 สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
งานวิจัยที่ชื่นชอบ	ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานทดแทน
ผลงานวิจัย	[1] ธนาวดี แจ่มอ้น, สุรินทร์ คำฝอย, “อินเวอร์เตอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์ 5 ระดับแรงดันโดยใช้เทคนิคไฮบริดจ์สำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON 33), เชียงใหม่, 1 - 3 ธันวาคม 2553, หน้า 569 - 572. [2] ธนาวดี แจ่มอ้น, สุรินทร์ คำฝอย, “รูปแบบสัญญาณที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON 33), เชียงใหม่, 1 - 3 ธันวาคม 2553, หน้า 753 - 756. [3] ธนาวดี แจ่มอ้น, สุรินทร์ คำฝอย, “อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ,” การประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 34 (EECON 34), ชลบุรี, 30 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม 2554, หน้า 429-432.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้