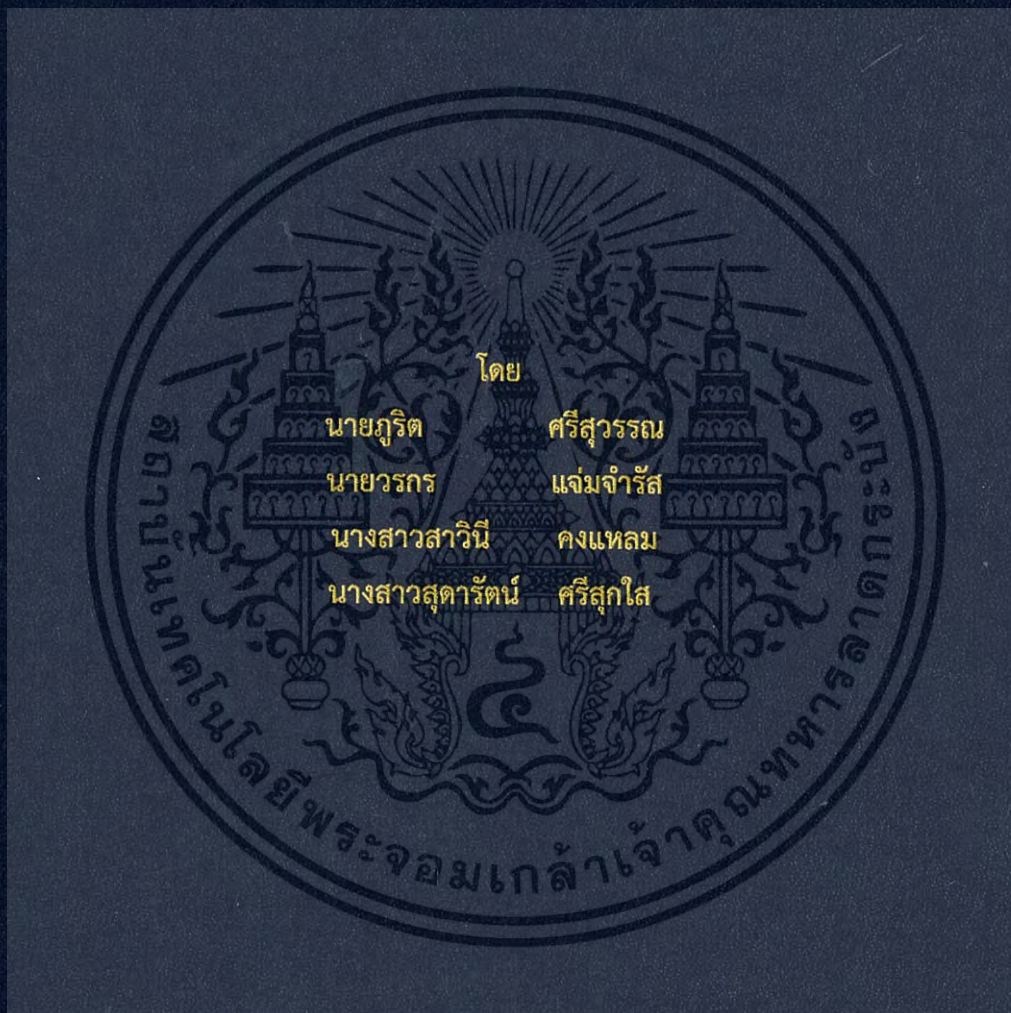


คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่สำหรับการทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำในหม้อแปลง
FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCED VOLTAGE TEST
ON TRANSFORMER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่สำหรับการทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำในหม้อแปลง
FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCED VOLTAGE TEST
ON TRANSFORMER



โดย

นายภูริต

ศรีสุวรรณ

นายวรกร

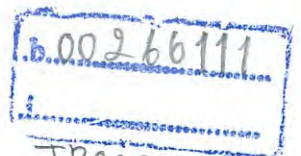
แจ่มจำรัส

นางสาวสาวิณี

คงแหลม

นางสาวสุดารัตน์

ศรีสุกใส



TB00261

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCED VOLTAGE TEST
ON TRANSFORMER



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่สำหรับการทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำในหม้อแปลง

FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCED VOLTAGE TEST
ON TRANSFORMER



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. พีรุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อุปกรณ์แปลงความถี่สำหรับการทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำในหม้อแปลง

ผู้จัดทำ

1. นายภูริต ศรีสุวรรณ
2. นายวรกร แจ่มจำรัส
3. นางสาวสาวินี คงแหลม
4. นางสาวสุตารัตน์ ศรีสุกใส





..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรุดิ ยูทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่สำหรับการทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำในหม้อแปลง

นายภูริต	ศรีสุวรรณ	
นายวรกร	แจ่มจรัส	
นางสาวสาวิณี	คงแหลม	
นางสาวสุดารัตน์	ศรีสุกใส	
ผศ.ดร.พีรภูมิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ที่มีความถี่ 200 Hz สำหรับการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ในการออกแบบและประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้ได้ใช้หลักการมัลติเซลล์อินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด แบบ 5 ระดับแรงดัน ที่มีโอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ และมีไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น STM32F429ZI เป็นอุปกรณ์สร้างสัญญาณควบคุมวงจรสวิตซ์กำลัง ซึ่งสัญญาณควบคุมนี้ได้ใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบเฟสดิสทอร์ชันในการสร้าง และได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ในการออกแบบและจำลองผลวงจรถนคอนเวอร์เตอร์ รวมถึงการเขียนคำสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานตามความต้องการ โดยในการจำลอง เริ่มจากการเลือกสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมกับการทดสอบ โดยทำการปรับค่าดัชนีมอดูเลต และความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุต, ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่เกิด และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม แล้วจึงนำผลที่ได้มาทำการออกแบบตัวกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter, LPF) พบว่าสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ที่เหมาะสม มีค่าดัชนีมอดูเลตเท่ากับ 1 และความถี่คลื่นสัญญาณพาหะเท่ากับ 2 kHz และเมื่อได้สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมแล้ว จึงนำคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้ไปทำการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ที่มีพิกัดกำลัง 50 VA และพิกัดแรงดัน 110V/22kV ซึ่งผลการทดสอบพบว่า คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้สามารถแปลงความถี่ได้ 200 Hz แล้วทำการทดสอบขึ้นแรงดันได้ตามมาตรฐานกำหนด

FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCED VOLTAGE TEST ON TRANSFORMER

Mr.Phurit	Srisuwan	
Mr.Worakorn	Jamjumrus	
Ms.Savinee	Khonglam	
Ms.Sudarat	Srisuksai	
Asst.Prof.Dr.Peerawut	Yutthagowith	Advisor

ABSTRACT

This senior project presents a design and construction of multilevel frequency converter with frequency of 200 Hz for induced voltage test on high-voltage transformers. The Converter based on the cascade multi-cell inverter technique with 5 voltage levels. It uses IGBT as switching equipment in power circuit and use microcontroller type STM32F429ZI to generate control signal for the converter. The control signal is made by Phase Distortion Pulse Width Modulation, PDPWM technique and use MATLAB program to design and simulate the circuit including create code for microcontroller to work follow the step. In simulation, start with choosing the appropriate control signal for frequency converter by adjusting the modulation index and the carrier frequency of control signal to analyze output signal, harmonic order, and total harmonic distortion then use these results to design the low pass filter. From the results, the control signal with modulation index of 1 and frequency of 2 kHz is the most appropriate signal. The developed frequency converter was applied in induced voltage test of high-voltage transformers with frequency of 200 Hz. The transformer rating are 50 kVA and 110V/22kV. The converter has promising ability for testing high-voltage transformers according to the standard requirement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา || และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำโครงการด้วยดีมาโดยตลอด นอกจากนี้ยังได้สนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการอีกด้วย

ขอขอบคุณ คุณบุญยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ รวมไปถึงการตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนโดยเฉพาะ คุณทองเพ็ชร พรหมบุตร ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในด้านการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับโครงการ และ คุณภัทริน กิจเจริญ ที่เป็นผู้ควบคุมการทดสอบและให้คำแนะนำในการจัดทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ช่วยกันดูแลห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และเป็นกำลังใจในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนด	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า	5
2.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	5
2.2.1 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced AC voltage test)	6
2.3 คอนเวอร์เตอร์	8
2.3.1 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)	9
2.3.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว (Single Phase Inverter)	10
2.3.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multi-level inverter)	11
2.3.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบไดโอดแคลมป์	11
2.3.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบคาปาซิเตอร์แคลมป์	13
2.3.3.3 อินเวอร์เตอร์แบบคาสเคด	14
2.4 เทคนิคการมอดูเลต	15
2.4.1 เทคนิคการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ	15
2.4.1.1 การสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์	16
2.4.1.2 การสวิตชิงแรงดันแบบยูนิโพลาร์	17
2.4.2 เทคนิคการมอดูเลตหลายระดับ	18
2.5 วงจรเรียงกระแส	19
2.5.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งลูกคลื่น	20
2.5.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่น	20
2.6 อุปกรณ์สวิตชิง	21
2.6.1 ไดโอด (Diode)	21
2.6.2 ไอจีบีที (IGBT)	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ตัวกรองกรองความถี่	23
2.7.1 ตัวกรองพาสซีฟ	24
2.7.2 ตัวกรองพาสซีฟสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส	25
2.8 วงจรสับเบอร์	26
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	28
3.1 การออกแบบและจำลองผลของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	28
3.1.1 จำลองผลการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ โดยต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 1,000 W	29
3.1.1.1 กราฟแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ ดัชนีมอดูเลต 0.8, 1 และ 1.2	30
3.1.1.2 สรุปผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับโดยต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 1,000 W	37
3.1.2 จำลองผลการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ โดยต่อวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่าน (Low Pass Filter Circuit, LPF)	38
3.1.2.1 กราฟแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ เมื่อต่อวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่าน	38
3.1.2.2 สรุปผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ โดยต่อวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่าน	39
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่	39
3.2.1 องค์ประกอบวงจรในคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่	40
3.2.1.1 วงจรเรียงกระแส	40
3.2.1.2 วงจรสวิตซ์กำลัง	40
3.2.1.3 วงจรควบคุมการสวิตซ์	41
3.2.1.4 ตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน	42
3.2.2 ขั้นตอนการออกแบบและประกอบสร้าง	43
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องต้นแบบ	47
4.1 การทดสอบสัญญาณโดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน	47
4.2 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลง	52
4.2.1 การเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์	53
4.2.2 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลง	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการทดสอบ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก บทความวิชาการ	66
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	71
ประวัติผู้เขียน	79



สารบัญญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภาพการตรวจสอบฉนวนของเส้นลวด	7
2.2	คอนเวอร์เตอร์ที่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง	8
2.3	แผนภาพตัวปรับความเร็วของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ	9
2.4	สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้เพียงด้านเดียว	9
2.5	สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง	10
2.6	อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริจ	11
2.7	อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริจ	11
2.8	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบไดโอดแคลมป์ที่สร้างแรงดัน 5 ระดับ	12
2.9	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบคาปาซิเตอร์แคลมป์ที่สร้างแรงดัน 5 ระดับ	13
2.10	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแคสเคดที่สร้างแรงดัน 5 ระดับ	14
2.11	การมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับโดยการสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์	15
2.12	การมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับโดยการสวิตชิงแรงดันแบบยูนิโพลาร์	17
2.13	เทคนิคการเลื่อนเฟส (Phase Shifted Carrier PWM: SPCPWM) โดยมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์และสัญญาณพาหะ 2 สัญญาณที่มีเฟสต่างกัน	19
2.14	เทคนิคเฟสดีสทอร์ชัน (Phase Distortion PWM: PDPWM) โดยมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์และสัญญาณพาหะ 4 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตที่ระดับสัญญาณต่างกัน	19
2.15	วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งลูกคลื่น	20
2.16	วงจรเรียงกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแทปตรงกลาง	21
2.17	วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์	21
2.18	สัญลักษณ์ของไดโอด	21
2.19	กราฟแสดงคุณลักษณะของไดโอด	22
2.20	สัญลักษณ์ของไอจีบีที	22
2.21	กราฟแสดงคุณลักษณะของไอจีบีที	23
2.22	ความถี่ตอบสนองของตัวกรองแบบต่างๆ	24
2.23	วงจรกรองความถี่	25
2.24	วงจรสแน็บเบอร์	27
2.25	วงจรสแน็บเบอร์สำหรับอินเวอร์เตอร์	28
3.1	วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ	28
3.2	วงจรสัญญาณควบคุม แบบ PSPWM	29
3.3	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.4	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 4 kHz	30
3.5	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 8 kHz	31
3.6	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 16 kHz	31
3.7	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 20 kHz	32
3.8	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz	32
3.9	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 4 kHz	33
3.10	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 8 kHz	33
3.11	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 16 kHz	34
3.12	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 20 kHz	34
3.13	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz	35
3.14	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 4 kHz	35
3.15	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 8 kHz	36
3.16	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 16 kHz	36
3.17	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 20 kHz	37
3.18	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิกเมื่อต่อวงจรรองความถี่แบบต่ำผ่าน ดัชนีมอดูเลต 1 และความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz	38
3.19	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิกเมื่อต่อวงจรรองความถี่แบบต่ำผ่าน ดัชนีมอดูเลต 1 และความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 4 kHz	39
3.20	องค์ประกอบของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่	40
3.21	วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส	40
3.22	วงจรสมมูลของวงจรควบคุมการสวิตช์	41
3.23	วงจรสมมูลของวงจรรองความถี่แบบต่ำผ่าน	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.24	แบบพิมพ์วงจรสวิตซ์กำลัง ด้วยโปรแกรม Circuit Wizard	43
3.25	แบบจำลองสามมิติของคอนเวอเตอร์กรองความถี่ ด้วยโปรแกรม SketchUp	44
3.26	แผ่นวงจรสวิตซ์กำลังในคอนเวอเตอร์แปลงความถี่	44
3.27	แผ่นวงจรควบคุมการสวิตซ์ในคอนเวอเตอร์แปลงความถี่	45
3.28	ภาพภายนอกของคอนเวอเตอร์แปลงความถี่	45
3.29	ภาพภายในของคอนเวอเตอร์แปลงความถี่	46
4.1	วงจรสำหรับการทดสอบสัญญาณโดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน	47
4.2	การทดสอบสัญญาณโดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน	48
4.3	วงจรการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลง	52
4.4	การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลง	53
4.5	รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของคอนเวอเตอร์	61
4.6	รูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน	61



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน	3
2.1	ระบบแรงดันและโหลดในการจ่ายไฟของการไฟฟ้า	5
2.2	สถานการณ์ทำงานของสวิตช์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบไดโอดแคลมป์ ที่สร้างแรงดัน 5 ระดับ	12
2.3	สถานการณ์ทำงานของสวิตช์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบคาปาซิเตอร์แคลมป์ ที่สร้างแรงดัน 5 ระดับ	14
2.4	สถานการณ์ทำงานของสวิตช์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแคสเคด ที่สร้างแรงดัน 5 ระดับ	15
3.1	สรุปผลการจำลอง เมื่อปรับค่าดัชนีมอดูเลตและความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ	37
3.2	สรุปผลการจำลอง เมื่อต่อวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่าน	39
4.1	แรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่	48
4.2	การเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตก่อนและหลังผ่านตัวกรองความถี่ แบบต่ำผ่าน	54
4.3	บันทึกรูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ	56
4.4	บันทึกค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดัน (%THDv)	60
4.5	แรงดันมาตรฐานสำหรับทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้าประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้าซึ่งหมายถึงโรงไฟฟ้าต่างๆ ที่ทำหน้าที่ผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าระบบ ระบบส่งกำลังไฟฟ้าหมายถึงระบบส่งกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไปยังระบบจำหน่ายประกอบด้วยเสาส่งและสายส่ง และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้งานในระยะทางที่ไกลออกไป ซึ่งการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกลมักจะทำให้เกิดปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและแรงดันตก (Voltage drop) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความต้านทานในสายส่ง ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มระดับแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้ส่งกำลังไฟฟ้าได้ในระยะไกล แล้วจึงลดระดับแรงดันลงเพื่อจ่ายไฟให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำหรับการปรับเพิ่มหรือลดระดับแรงดัน

สำหรับการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายนั้น หม้อแปลงไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบจากความเครียดสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันที่ใช้งาน รวมทั้งมีโอกาสจะได้รับแรงดันเกินเนื่องจากการตัดต่อวงจรและการเกิดฟ้าผ่า ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย การทดสอบที่สำคัญคือการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced AC voltage test) ซึ่งเป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ และการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ของหม้อแปลงไฟฟ้า ปัญหาของการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือจะต้องเพิ่มแรงดันที่ประมาณสองเท่าของค่าที่กีดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการอิ่มตัวทำให้ไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันทดสอบได้ตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการเพิ่มความถี่ของแรงดันที่ทดสอบเพื่อให้สามารถเพิ่มแรงดันทดสอบให้มีค่าสูงขึ้นได้

ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60076-3 ที่กำหนดให้ทดสอบที่ความถี่แรงดันไฟฟ้ามากกว่าสองเท่า จึงต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีแรงดันความถี่มากกว่าสองเท่า เพื่อให้การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน แต่เนื่องจากการใช้แหล่งจ่ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีราคาสูง เนื่องจากต้องมีการออกแบบโดยเฉพาะ รวมทั้งมีน้ำหนักมาก ใช้พื้นที่มากและต้องมีการดูแลรักษาเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงได้มีการนำความรู้เกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ปรับความถี่ได้หลายระดับ ซึ่งจะมีข้อดีคือราคาถูก น้ำหนักเบา และใช้พื้นที่น้อย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและออกแบบคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่าย

ไฟฟ้าในการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อทำการประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า สำหรับการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. เพื่อเพิ่มศักยภาพในการรองรับการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าของห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาต่อยอดผลงานวิจัยทางด้านวิศวกรรม ไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนด

1. ออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า ในการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่มีความถี่ 200 Hz
2. ใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองวงจรของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าในการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ในการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ทดสอบมีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 50 VA พิกัดแรงดัน 110V/22kV

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และมาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าในการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองผลของวงจรอินเวอร์เตอร์แปลงความถี่ที่ใช้ในการประกอบสร้าง
3. ศึกษาการใช้งาน จัดเตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
4. ประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายในวงจรการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
5. ทดสอบการใช้งานของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ต้นแบบ สำหรับวงจรการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
6. พัฒนาและปรับปรุงคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ต้นแบบ สำหรับวงจรการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
7. วิเคราะห์ผลการทดสอบ
8. สรุปผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงาน

คณะผู้จัดทำได้ทำการสืบค้นข้อมูลและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องรวมไปถึงงานวิจัยต่างๆ ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการจำลองการทำงานและการประกอบการสร้างชิ้นงาน โดยมีระยะเวลาในการดำเนินงานตั้งแต่ เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561 และมีแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←-----→									
2. ศึกษาผลการจำลองของสัญญาณควบคุมในโปรแกรม MATLAB			←-----→							
3. รวบรวมผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล				←-----→						
4. จัดเตรียมอุปกรณ์และศึกษาการใช้เครื่องมือ				←-----→						
5. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่				←-----→						
6. สร้างเครื่องต้นแบบของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่						←-----→				
7. ทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบและบันทึกผลการทดสอบ							←-----→			
8. สรุปและวิเคราะห์งานวิจัยและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์	←-----→									

วางแผน ←-----→ ปฏิบัติจริง ←-----→ ประโยชน์ด้านการค้า
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้ใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้เกิดความเข้าใจหลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่เพื่อใช้สำหรับการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
2. สามารถนำผลของงานวิจัยนี้ไปต่อยอดเพื่อพัฒนาการสร้างแหล่งจ่ายที่มีความถี่ 200 Hz สำหรับการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
3. ได้คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบสำหรับเป็นแหล่งจ่ายที่มีความถี่ที่มีความถี่ 200 Hz สำหรับการทดสอบแรงดันเกินเหนี่ยวนำ ทำให้การทดสอบแรงดันเกินเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น
4. ช่วยสนับสนุนการพัฒนาและส่งเสริมการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงความหมาย หลักการทำงาน การทดสอบ และหน้าที่ของอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์ เทคนิคการมอดูเลต วงจรเรียงกระแส อุปกรณ์สวิตชิง ตัวกรองความถี่ และวงจรสับเบอร์

2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า [1]

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่งด้วยความถี่เท่าเดิม หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า คือ การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กผ่านขดลวดตัวนำและแกนเหล็ก หม้อแปลงแบ่งตามประเภทการใช้งาน ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) ใช้ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า หม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformer) ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง โดยใช้แปลงระดับแรงดันจากระบบแรงดันปานกลาง (Medium Voltage) ไปเป็นระบบแรงดันต่ำ (Low Voltage) และหม้อแปลงเครื่องมือวัด (Instrument Transformer) ใช้เพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับเครื่องมือวัด

ตารางที่ 2.1 ระบบแรงดันและโหนดในการจ่ายไฟของการไฟฟ้า

ระบบจำหน่าย	กฟน. (MEA)	กฟภ. (PEA)
ระบบแรงดันสูง	มากกว่า 15,000 kVA 69/115 kV 3 เฟส 3 สาย	มากกว่า 1,000 kVA 115 kV 3 เฟส 3 สาย
ระบบแรงดันปานกลาง	300-15,000 kVA 12/24 kV 3 เฟส 3 สาย	250-1,000 kVA 22/33 kV 3 เฟส 3 สาย
ระบบแรงดันต่ำ	น้อยกว่า 300 kVA 240/416 kV	น้อยกว่า 250 kVA 230/400 V

2.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า [2]

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็นสามประเภท คือ การทดสอบประจำ (Routine test) การทดสอบเฉพาะ (Type test) และการทดสอบเฉพาะลักษณะพิเศษ (Special test) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบประจำเท่านั้น โดยมีรายการการทดสอบดังนี้

1.) การวัดความต้านทานของขดลวดแต่ละขด (Measurement of Winding Resistance) เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ระหว่างเฟสว่ามีขดลวดใดผิดปกติหรือไม่ และนำค่าที่วัดได้มาอ้างอิงกับอุณหภูมิปัจจุบันสำหรับการแปลงค่าอ้างอิงไปที่อุณหภูมิอื่น

2.) การวัดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด (Measurement of Voltage Ratio and Phase Displacement) เพื่อวัดอัตราส่วนแรงดันของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงไฟฟ้าเทียบกับค่าที่กำหนด ว่ามีค่าถูกต้องและมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในพิสัยมาตรฐานหรือไม่ และเป็นการวัดค่าความต่างเฟสของขดลวดทั้งสองด้านหรือที่เรียกว่าการหาเวกเตอร์กรุป (Vector- group) ของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.) การวัดหาค่าความสูญเสียขณะจ่ายโหลด (Measurement of short-circuit impedance and load loss) เป็นการวัดขณะจ่ายโหลดเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss) และวัดหาแรงดันอิมพีแดนซ์ (Impedance voltage) ด้วยวิธีการลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการตรวจวัด

4.) การวัดหาค่าความสูญเสียขณะที่ไม่ได้จ่ายโหลด (Measurement of no-load and current) เพื่อวัดหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และวัดหาค่ากระแสในขดลวดขณะไม่ได้จ่ายโหลด (No-load current)

5.) การตรวจสอบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า (Separate source AC withstand voltage test) เป็นการตรวจสอบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่คั่นอยู่ระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับแรงดันต่ำ แรงดันสูงกับกราวด์ และแรงดันต่ำกับกราวด์ ด้วยการจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ระหว่างจุดที่จะทดสอบตามค่าและเวลาที่มาตรฐานกำหนด

6.) การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced AC voltage test) เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละเส้นที่พันเป็นขดลวด ด้วยการจ่ายแรงดันเหนี่ยวนำให้มีค่าสองเท่าหรือมากกว่าแรงดันพิกัดของด้านแรงดันสูงตามระยะเวลาที่มาตรฐานกำหนด

7.) การตรวจวัดค่าความเป็นฉนวนโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า (Measurement of insulation resistance) หรืออุปกรณ์การวัดที่เรียกว่า Mega ohmmeter โดยค่าที่วัดได้ต้องสูงตามที่กำหนด

สำหรับปริญญาโทฉบับนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced AC voltage test) เท่านั้น

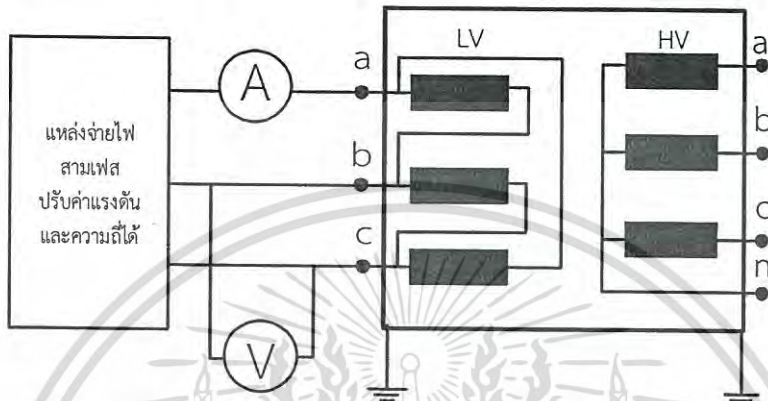
2.2.1 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced AC voltage test) [3, 4]

การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทดสอบความคงทนของฉนวนในแต่ละเฟส ว่าสามารถทนแรงดันได้ตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งตามมาตรฐานของ IEC อาจต้องมีการทดสอบการวัดหาค่าการดิสชาร์จบางส่วนควบคู่ด้วย สิ่งที่จะกำหนดว่าจะต้องมีการวัดหาค่าการดิสชาร์จบางส่วนด้วยหรือไม่ คือ ค่าแรงดันสูงสุดที่สามารถทนได้ (U_m) สำหรับทดสอบขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

หลักการทดสอบ หากแรงดันทดสอบ (U_p) ที่ใช้ในการทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสองเท่าหรือมากกว่าแรงดันพิกัดของแรงดันด้านแรงสูง อาจส่งผลให้เกิดการอิมพัลส์ของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กจนไม่สามารถทำการปรับระดับแรงดันให้สูงขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนเริ่มการทดสอบนี้ เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการจะทดสอบมีการใส่น้ำมันแล้ว ต้องรอให้น้ำมันนั้นซึมเข้าไปในเนื้อฉนวนด้วย เรียกกระบวนการนี้ว่า “Standing Time” ซึ่งเวลาที่จ้รอให้น้ำมันซึมเข้าไปในเนื้อฉนวนนี้ จะขึ้นอยู่กับแรงดันพิกัดด้านต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละลูก การจ่ายแรงดันต้องจ่ายด้านแรงดันต่ำ เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำไปทางด้านแรงดันสูงจนทำให้ได้ค่าเป็นสองเท่าของแรงดันพิกัดด้านต่ำ



รูปที่ 2.1 วงจรทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.1 การทดสอบจะเริ่มด้วยการจ่ายไฟเข้าที่ด้านแรงดันต่ำจากแหล่งจ่ายไฟสามเฟสที่สามารถปรับค่าแรงดันและความถี่ได้ โดยเริ่มปรับค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าหนึ่งในสามของแรงดันไฟฟ้าทดสอบสูงสุด และจะเพิ่มระดับแรงดันขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าที่ต้องการทดสอบ การทดสอบจะประสบความสำเร็จหากไม่มีการเบรกดาวขึ้นที่แรงดันทดสอบสูงสุดระหว่างการทดสอบ การฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีทั้งแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งระยะเวลาในการทดสอบนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายและหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกทดสอบ หากค่าความถี่ของแหล่งจ่ายเป็นสองเท่าของความถี่พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ ระยะเวลาในการทดสอบจะเป็น 60 วินาที แต่หากความถี่ของแหล่งจ่ายมากกว่าสองเท่าของความถี่พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกทดสอบ จะต้องคำนวณหาระยะเวลาการทดสอบตามสมการที่ 2.2

$$t = \frac{120 f_r}{f_p} \quad (2.2)$$

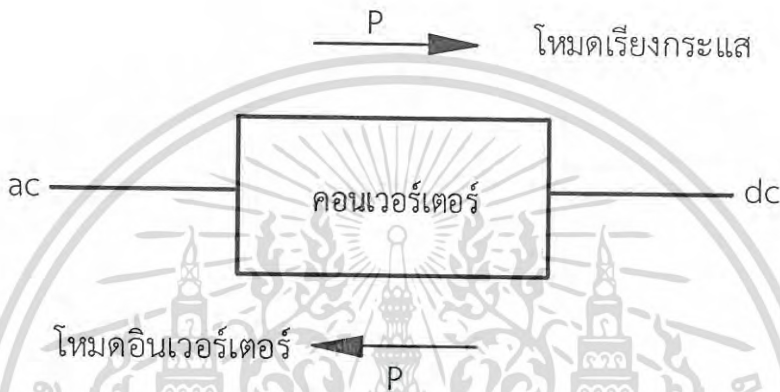
เมื่อ t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

f_r คือ ความถี่พิกัดของหม้อแปลงทดสอบ

f_p คือ ความถี่พิกัดของแหล่งจ่ายสำหรับการทดสอบ

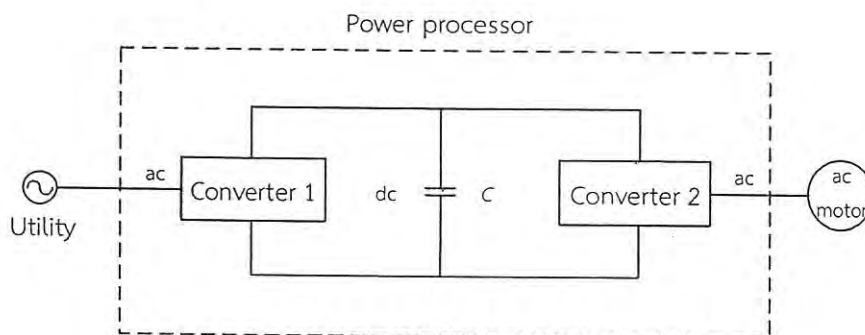
2.3 คอนเวอร์เตอร์ [5]

คอนเวอร์เตอร์ (Converter) เป็นหน่วยพื้นฐานของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ประกอบด้วย อุปกรณ์กึ่งตัวนำที่ถูกควบคุมการทำงานโดยสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ที่สะสมกำลังไฟฟ้า เช่น ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบความถี่ของทั้งสองด้าน คอนเวอร์เตอร์สามารถแบ่งตามลักษณะการแปลงกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้ การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง การแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ การแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง และการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับ



รูปที่ 2.2 คอนเวอร์เตอร์ที่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง

คอนเวอร์เตอร์โดยทั่วไปจะหมายถึงการแปลงกำลังไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง หรือการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเป็นการระบุให้ชัดเจนจึงมีชื่อเรียกสำหรับการแปลงกำลังไฟฟ้าในฟังก์ชันต่างๆ ได้แก่ การเรียงกระแส (Rectifier) หมายถึงการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์ (Inverter) หมายถึงการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ในความเป็นจริงนั้น กำลังไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนไป-มาระหว่างโหมตการเรียงกระแสและโหมตอินเวอร์เตอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้คอนเวอร์เตอร์ยังสามารถแบ่งประเภทตามอุปกรณ์ตามการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ได้สามแบบ ได้แก่ คอนเวอร์เตอร์ที่มีความถี่เชิงเส้น (Line frequency converter) คอนเวอร์เตอร์สวิตชิง (Switching converter) และคอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนท์และเสมือนเรโซแนนท์ (Resonant and quasi-resonant converter) สำหรับปริญญานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงเฉพาะการเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์เท่านั้น

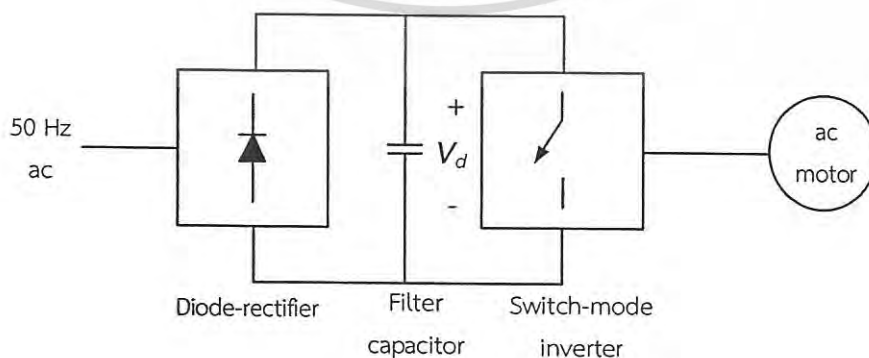


รูปที่ 2.3 แผนภาพคอนเวอร์เตอร์ปรับความเร็วของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพคอนเวอร์เตอร์ปรับความเร็วของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์สองชนิดคือ คือ คอนเวอร์เตอร์ 1 มีการทำงานเป็นโหมตเรียงกระแส โดยจะเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความถี่เชิงเส้นเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง และคอนเวอร์เตอร์ 2 มีการทำงานเป็นโหมตอินเวอร์เตอร์ที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งสามารถปรับขนาดและความถี่ได้

2.3.1 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) [5, 6]

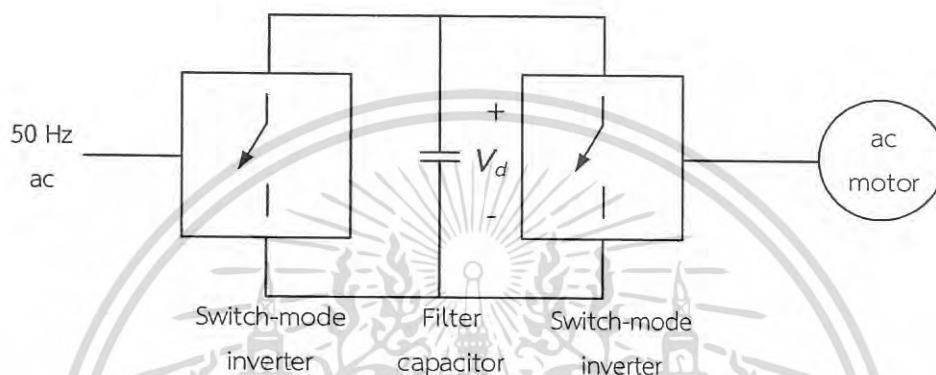
อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้มีความถี่และแรงดันตามที่ต้องการ อินเวอร์เตอร์มักใช้ใน ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าหรือระบบป้องกันกำลังไฟฟ้าขาดช่วง อินเวอร์เตอร์มีสองประเภทใหญ่คือ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) และอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI) โดยอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันแบ่งการสวิตช์ได้ 3 แบบคือ การมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation : PWM) อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นจัตุรัส (Square Wave Inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบยกเลิกแรงดัน (Voltage cancellation Inverter)



รูปที่ 2.4 สวิตช์โหมตอินเวอร์เตอร์ของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับซึ่งส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้เพียงด้านเดียว อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 เป็นสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้เพียงทิศทางเดียว คือ รับกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายแล้วจึงส่งไปยังวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้ไดโอดเพื่อเปลี่ยนเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง และส่งต่อไปยังสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความถี่และขนาดของกำลังไฟฟ้ากระแสสลับของเอาต์พุต แล้วจึงส่งต่อไปยังมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ แต่หากต้องการให้กำลังไฟฟ้าสามารถส่งผ่านได้สองทิศทาง จะสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่ใช้ไดโอด ไปเป็นสวิตช์โหมดแบบคอนเวอร์เตอร์แทน ดังแสดงในรูปที่ 2.5

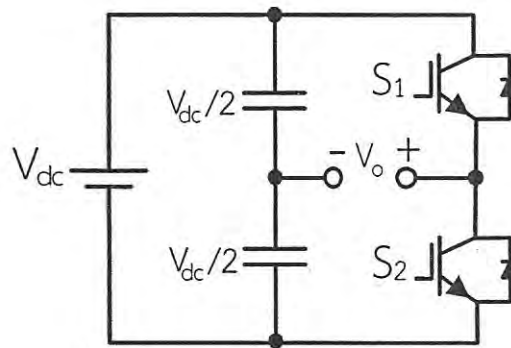


รูปที่ 2.5 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง

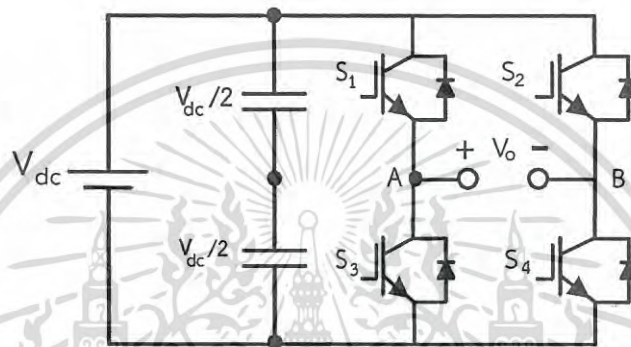
การปรับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ทำได้ โดยคงที่ความถี่เพื่อให้อัตราขยายของอินเวอร์เตอร์คงที่แล้วจึงปรับแรงดันอินพุต หรือ คงที่ค่าแรงดันอินพุตแล้วปรับอัตราขยายของอินเวอร์เตอร์ได้เช่นกัน ซึ่งอัตราขยายของอินเวอร์เตอร์หาได้จากอัตราส่วนแรงดันเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุต หรือทำได้โดยการปรับค่าการมอดูเลต (Modulation : m_a)

2.3.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว (Single Phase Inverter) [6, 7]

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบ่งได้สองแบบ คือ อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half Bridge) และอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge) อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ประกอบด้วยสวิตช์สองตัวบนกึ่งเดียวกัน โดยที่แต่ละตัวจะมีตัวเก็บประจุที่จ่ายแรงดันเท่ากันซึ่งจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุตกระแสตรง ซึ่งสวิตช์ทั้งสองตัวนี้จะไม่นำกระแสในเวลาเดียวกัน เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจร และในทางปฏิบัติจะมีช่วงเวลาที่ยอดสวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแสเรียกว่า เดดไทม์ (Deadtime) ซึ่งหมายถึงช่วงเวลาก่อนการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์ อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์มีการทำงานเหมือนกับอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์แต่เพิ่มกึ่งที่วางสวิตช์ทำให้สามารถทำให้เกิดการสวิตช์ซึ่งแรงดันแบบไบโพลาร์ (Bipolar Voltage Switching) และยูนิโพลาร์ (Unipolar Voltage Switching)



รูปที่ 2.6 อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์



รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

2.3.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multi-level inverter) [7]

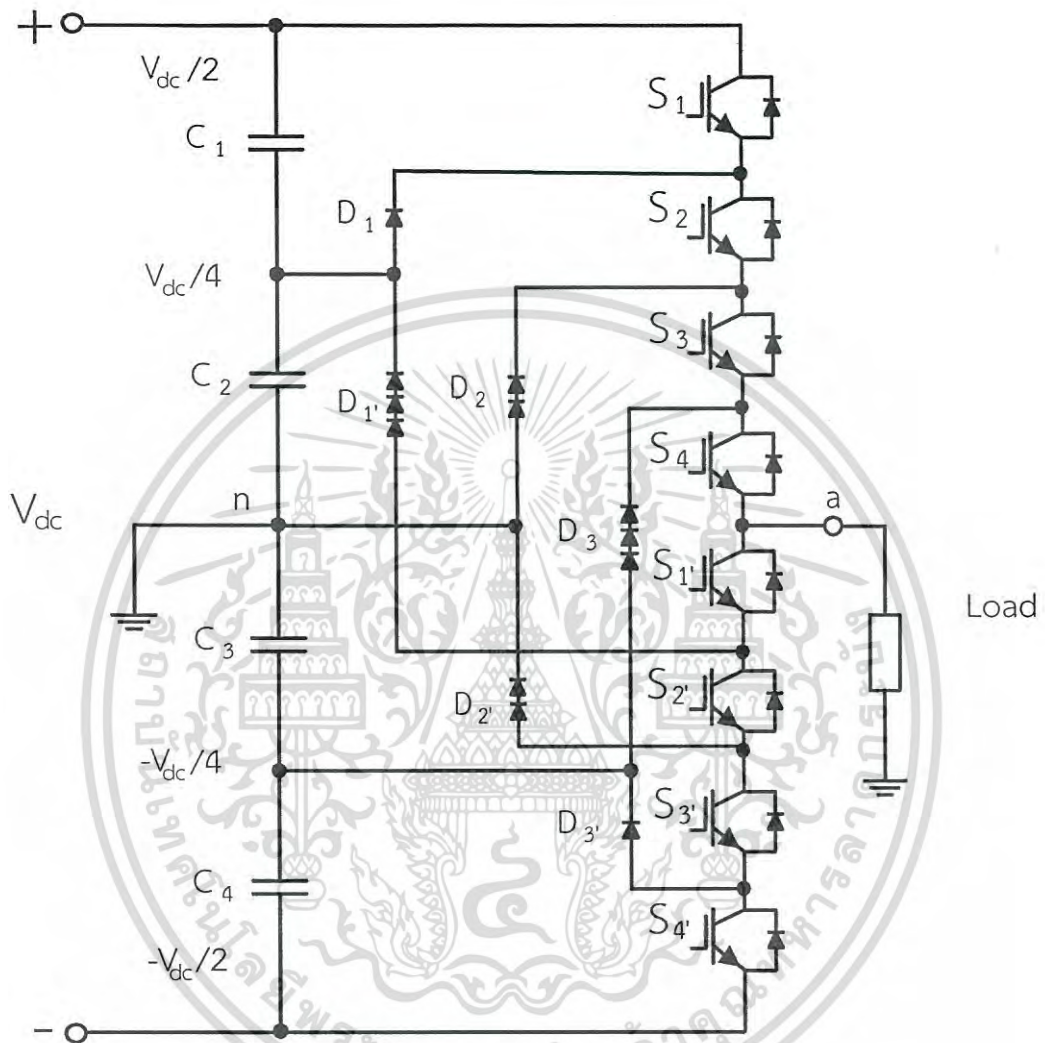
อินเวอร์เตอร์สองระดับสามารถสร้างแรงดันได้สองค่าคือ $V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$ แต่อินเวอร์เตอร์หลายระดับจะสามารถสร้างแรงดันได้หลายระดับมากกว่า ทำให้แรงดันเอาท์พุทที่ได้มีความใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้น โดยมีข้อดีคือค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion: THD) จะน้อยลง หลักการสำคัญของอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้น จะใช้หลักการแบ่งแรงดันจากบัสกระแสตรง (DC bus) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายและมีตัวเก็บประจุสำหรับช่วยจ่ายแรงดัน การสร้างอินเวอร์เตอร์ที่มีหลายระดับนั้นมีโครงสร้างหลายแบบและต้องใช้อุปกรณ์ควบคุมสวิตช์ที่ซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งในปริญญาณิพนธ์เล่มนี้ จะกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบไดโอดแคลมป์ (Multilevel Diode Clamp) แบบคาปาซิเตอร์แคลมป์ (Multilevel Capacitor Clamp) และแบบคาสเคด (Cascaded Multicell Inverter)

2.3.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบไดโอดแคลมป์ [7]

อินเวอร์เตอร์แบบไดโอดแคลมป์ (Multilevel Diode Clamp) เป็นโครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับโครงสร้างอื่น ๆ ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบไดโอดแคลมป์คือ มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีความถี่สวิตช์พื้นฐานสามารถนำไปใช้ได้กับทุกอุปกรณ์ สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) ได้และสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง ขณะที่ข้อด้อยคือต้องใช้ไดโอดจำนวนมากเมื่อต้องการสร้างระดับแรงดันที่มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (Active power) ได้ยากและเกิดปัญหาของตัวเก็บประจุที่ใช้รักษาความสมดุลของแรงดันเมื่อต้องมีการมอดูเลชั่นที่ซับซ้อนมากขึ้น



รูปที่ 2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบไดโอดแคสเคดที่สร้างแรงดัน 5 ระดับ

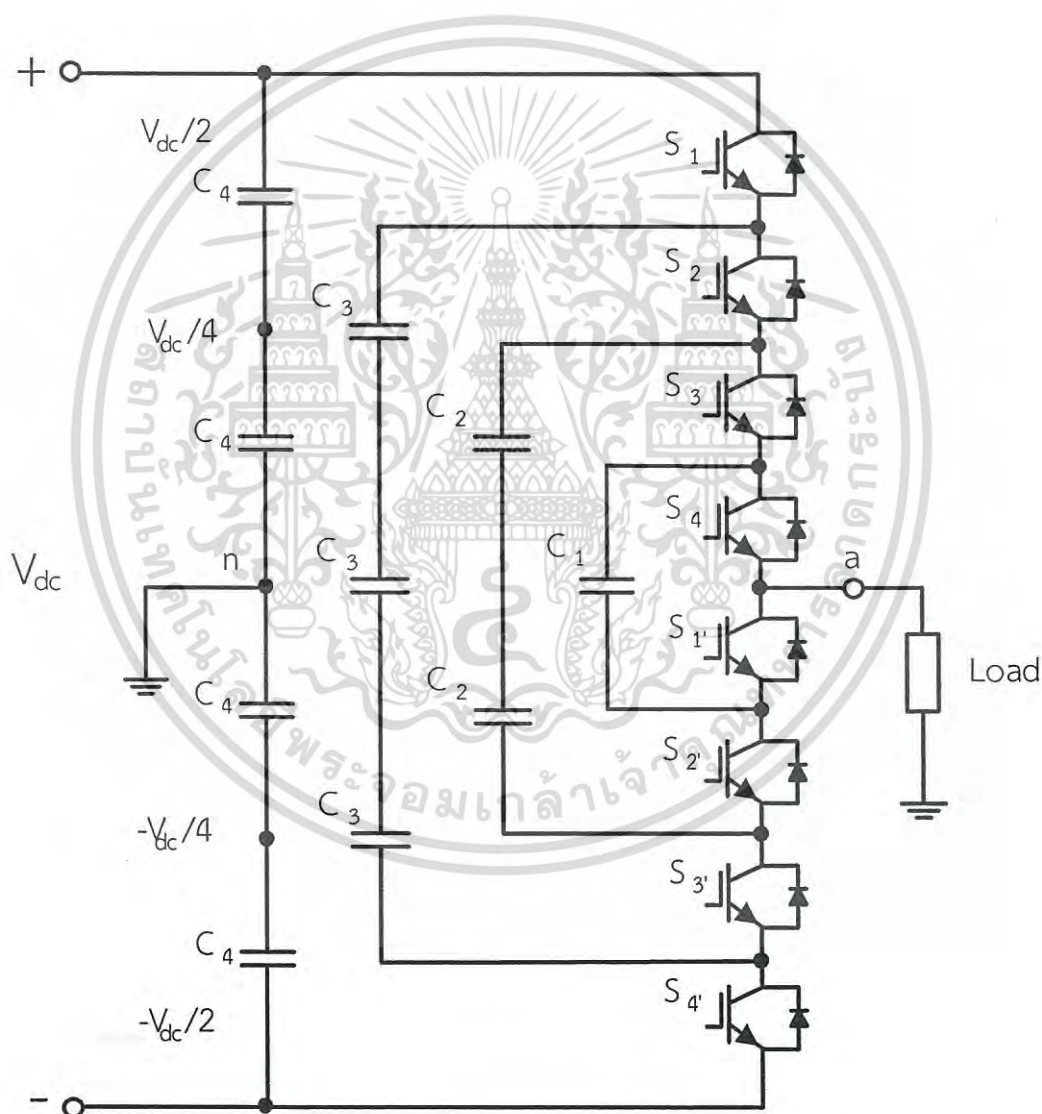
ตารางที่ 2.2 ลำดับการทำงานของสวิตช์ในวงจรไดโอดแคสเคดอินเวอร์เตอร์แรงดัน 5 ระดับ

Output Voltage	S_1	S_2	S_3	S_4	$S_{1'}$	$S_{2'}$	$S_{3'}$	$S_{4'}$
$V_{dc}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_{dc}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
$-V_{dc}/2$	0	0	0	1	1	1	1	0
$-V_{dc}/4$	0	0	0	0	1	1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบคาปาซิเตอร์แคลมป์ [7]

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบคาปาซิเตอร์แคลมป์ (Multilevel Capacitor Clamp) มีลักษณะคล้ายกันกับอินเวอร์เตอร์แบบไดโอดแคลมป์โดยใช้ตัวเก็บประจุแทนไดโอด มีข้อดีคือตัวเก็บประจุสามารถเป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าระหว่างไฟดับได้ มีการสมดุลแรงดันตามสถานะการสวิตช์ซึ่งมากมาย และสามารถควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ข้อด้อยของอินเวอร์เตอร์แบบคาปาซิเตอร์คือต้องใช้ตัวเก็บประจุจำนวนมากเมื่อต้องการสร้างระดับแรงดันมากขึ้น และการควบคุมสวิตช์ที่ซับซ้อนทำให้เกิดความถี่สวิตช์สูงทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อมีการส่งกำลังไฟฟ้าจริง



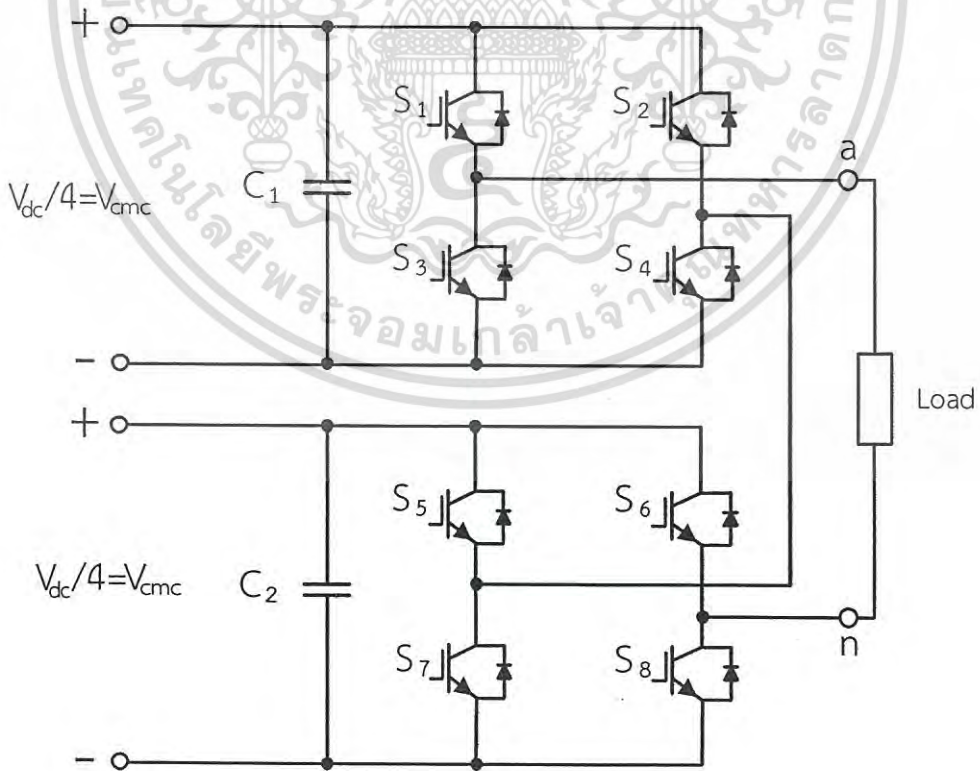
รูป 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบคาปาซิเตอร์แคลมป์ที่สร้างแรงดัน 5 ระดับ

ตารางที่ 2.3 ลำดับการทำงานของสวิตช์ในวงจรปาซีเตอร์แคลมป์อินเวอร์เตอร์แรงดัน 5 ระดับ

Output Voltage	S_1	S_2	S_3	S_4	$S_{1'}$	$S_{2'}$	$S_{3'}$	$S_{4'}$
$V_{dc}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_{dc}/4$	1	1	1	0	1	0	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
$-V_{dc}/2$	1	0	0	0	1	1	1	0
$-V_{dc}/4$	0	0	0	0	1	1	1	1

2.3.3.3 อินเวอร์เตอร์แบบคาสเคด [7]

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบคาสเคด (Cascaded Multicell Inverter) จะแตกต่างจากอินเวอร์เตอร์แบบไดโอดแคลมป์และแบบคาปาซีเตอร์แคลมป์ นั่นคือมีการใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ซึ่งจะนับเป็นหนึ่งโมดูล และใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแยกกันในแต่ละโมดูล ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบคาสเคดคือใช้จำนวนส่วนประกอบน้อยต่อระดับแรงดันต่างๆ สามารถทำการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์ (Soft-Switching) ได้และสามารถสมมูลแรงดันได้ง่าย ข้อด้อยคือต้องใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแยกกันสำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าจริงและไม่มีคอมมอนดีซีบัส (Common DC-bus)



รูป 2.10 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบคาสเคดที่สร้างแรงดัน 5 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ลำดับการทำงานของสวิตช์ในวงจรสแคอินเวอร์เตอร์แรงดัน 5 ระดับ

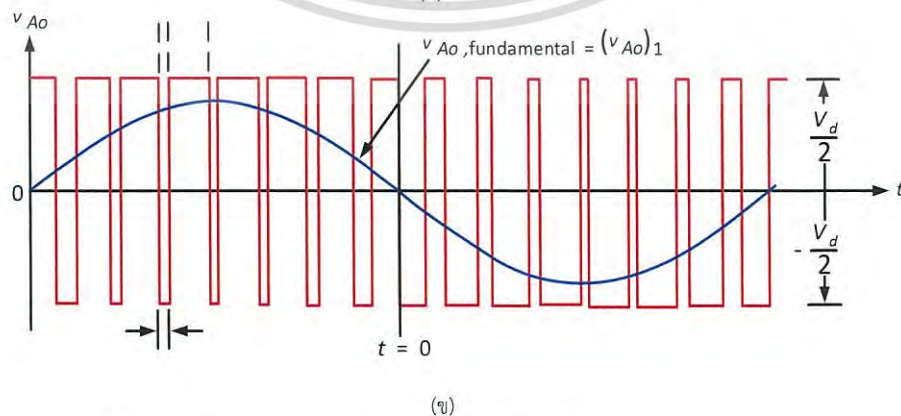
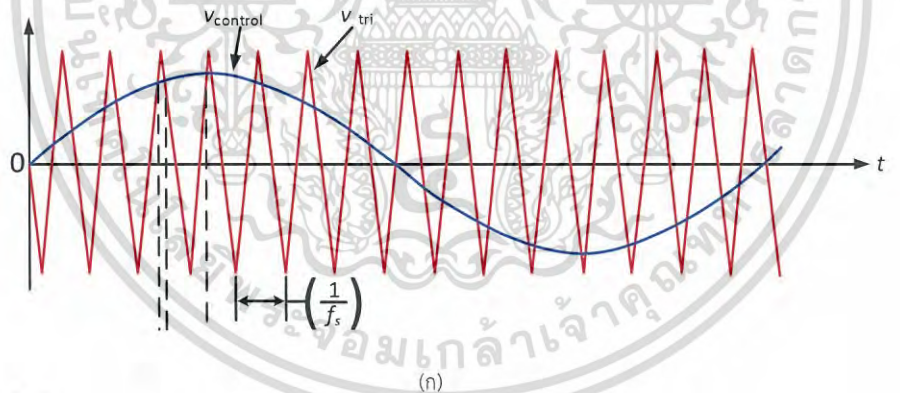
Output Voltage	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
$V_{dc}/2$	1	0	0	1	1	0	0	1
$V_{dc}/4$	1	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	1	1
$-V_{dc}/2$	0	1	1	0	0	1	1	0
$-V_{dc}/4$	0	1	1	0	0	0	0	0

2.4 เทคนิคการมอดูเลต [8]

การมอดูเลต (Modulation) เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณของข้อมูลที่เราเรียกว่าสัญญาณอ้างอิง กับสัญญาณอีกสัญญาณหนึ่งที่เราเรียกว่าสัญญาณพาหะ ซึ่งสัญญาณนี้จะมีค่าที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณนั้นๆ เพื่อให้ข้อมูลที่ส่งเข้าไปในช่องสัญญาณเดินทางได้ไกลมากขึ้น

2.4.1 เทคนิคการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ [5]

การมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม โดยสัญญาณอ้างอิงจะมีขนาดและความถี่ตามสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ สัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยมจะมีความถี่สูงกว่าความถี่ของสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 2.11 การมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปเชิงพาณิชย์ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.11 เป็นการมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์ระดับ โดยรูปที่ 2.11 (ก) เป็นรูปที่มีคลื่นไซน์ซึ่งเป็นสัญญาณอ้างอิงและมีรูปคลื่นสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณพาหะ รูปที่ 2.11 (ข) เป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณในรูปที่ 2.11 (ก) เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิง (V_{ref}) ที่ใช้ในการมอดูเลตและมีความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์เป็น f_1 ซึ่งเป็นความถี่เอาต์พุตของ แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากอินเวอร์เตอร์จะไม่เป็นรูปไซน์ที่สมบูรณ์ เนื่องจากมีผลของความถี่ฮาร์โมนิก f_1 ซึ่งอัตราส่วนขนาดการมอดูเลต (Amplitude modulation ratio : m_a) หาได้จาก

$$m_a = \frac{V_{ref}}{V_{tri}} \quad (2.3)$$

เมื่อ V_{ref} คือ ขนาดสูงสุดของแรงดันสัญญาณอ้างอิงที่ใช้ในการมอดูเลต
 V_{tri} คือ ขนาดสูงสุดของแรงดันสัญญาณพาหะที่ใช้ในการมอดูเลต
 m_a คือ อัตราการมอดูเลต

2.4.1.1 การสวิตซ์แรงดันแบบไบโพลาร์

จากรูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ แบ่งสวิตช์เป็นสองกลุ่ม คือ สวิตช์คู่ S_1 กับ S_4 และสวิตช์คู่ S_2 กับ S_3 แล้วให้สวิตช์ทั้งสองกลุ่มทำงานสลับกันในแต่ละช่วงเวลา เมื่อสัญญาณอ้างอิงมีขนาดมากกว่าสัญญาณพาหะ สวิตช์คู่ S_1 กับ S_4 จะนำกระแส เมื่อสัญญาณอ้างอิงมีขนาดน้อยกว่าสัญญาณพาหะ สวิตช์คู่ S_2 กับ S_3 จะนำกระแส ความถี่ของพัลส์ที่ได้จะเท่ากับความถี่ของสัญญาณพาหะ ดังแสดงรูปที่ 2.11 เมื่อ สวิตช์คู่ S_1 กับ S_4 นำกระแสทำให้ได้แรงดัน

$$V_{Ao} = \frac{1}{2} V_{dc} \quad (2.4)$$

เมื่อ สวิตซ์ในกิ่ง B นำกระแสทำให้ได้แรงดัน

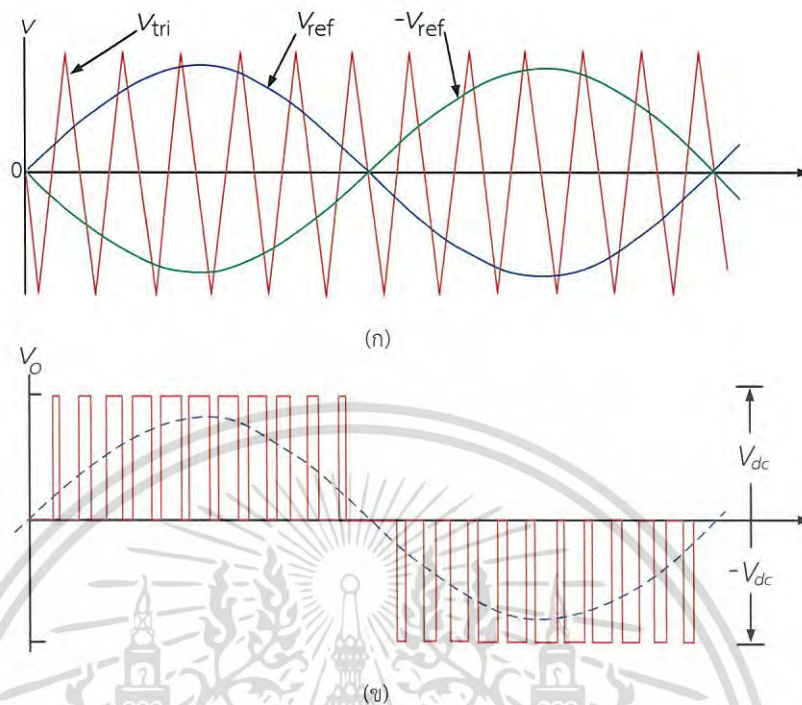
$$V_{Bo} = -\frac{1}{2} V_{dc} \quad (2.5)$$

ดังนั้น จะได้ว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะหาได้จาก

$$V_o = V_{Ao} - V_{Bo} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.2 การสวิตช์แรงดันแบบยูนิโพลาร์



รูปที่ 2.12 การมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ

โดยการสวิตช์แรงดันแบบยูนิโพลาร์

(ก) สัญญาณอ้างอิงอินเวอร์สของสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณพาหะ (ข) รูปคลื่นอิมพัลส์

จากรูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ การสวิตช์แรงดันแบบยูนิโพลาร์จะแยกการควบคุมสวิตช์ในกึ่ง A และ B โดยสวิตช์ในกึ่ง A จะควบคุมด้วยสัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลตสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณพาหะ สวิตช์ในกึ่ง B จะควบคุมด้วยสัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลตของอินเวอร์ส (Inverse) สัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณพาหะ ข้อดีของการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์คือความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์ ทำให้ง่ายต่อการกรองความถี่ โดยลำดับการนำกระแสของแต่ละสวิตช์เป็นดังนี้

S_1 นำกระแสเมื่อ สัญญาณอ้างอิงมากกว่าสัญญาณพาหะทำให้ได้แรงดัน

$$V_{AN} = V_{dc} \quad (2.7)$$

S_3 นำกระแสเมื่อ สัญญาณอ้างอิงน้อยกว่าสัญญาณพาหะทำให้ได้แรงดัน

$$V_{AN} = 0 \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_2 นำกระแสเมื่อ อินเวอร์สของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าสัญญาณพาหะทำให้ได้แรงดัน

$$V_{BN} = V_{dc} \quad (2.9)$$

S_4 นำกระแสเมื่อ อินเวอร์สของสัญญาณอ้างอิงน้อยกว่าสัญญาณพาหะทำให้ได้แรงดัน

$$V_{BN} = 0 \quad (2.10)$$

ดังนั้น จะได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะหาได้จาก

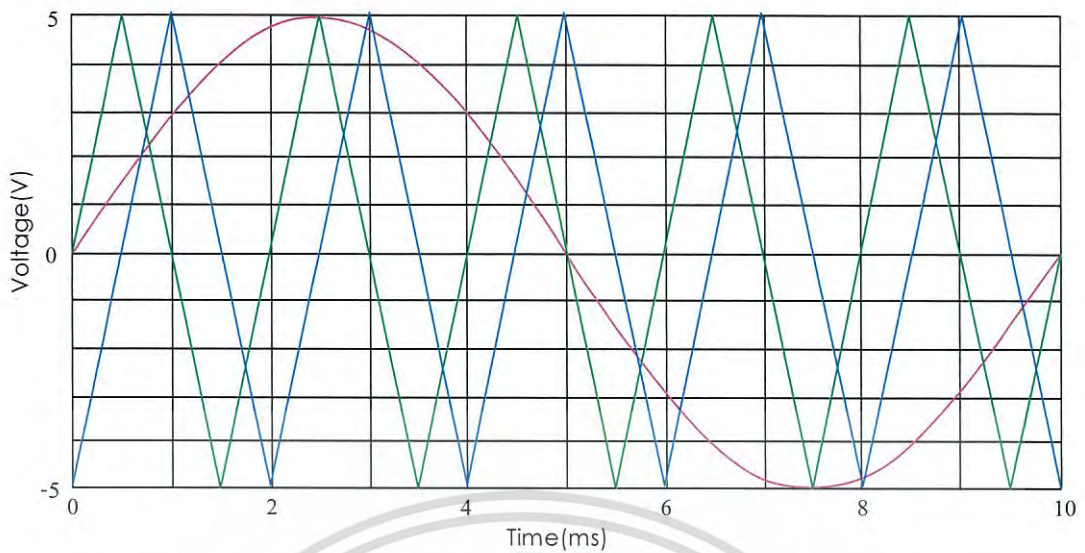
$$V_o = V_{AN} - V_{BN} \quad (2.11)$$

2.4.2 เทคนิคการมอดูเลตหลายระดับ [7]

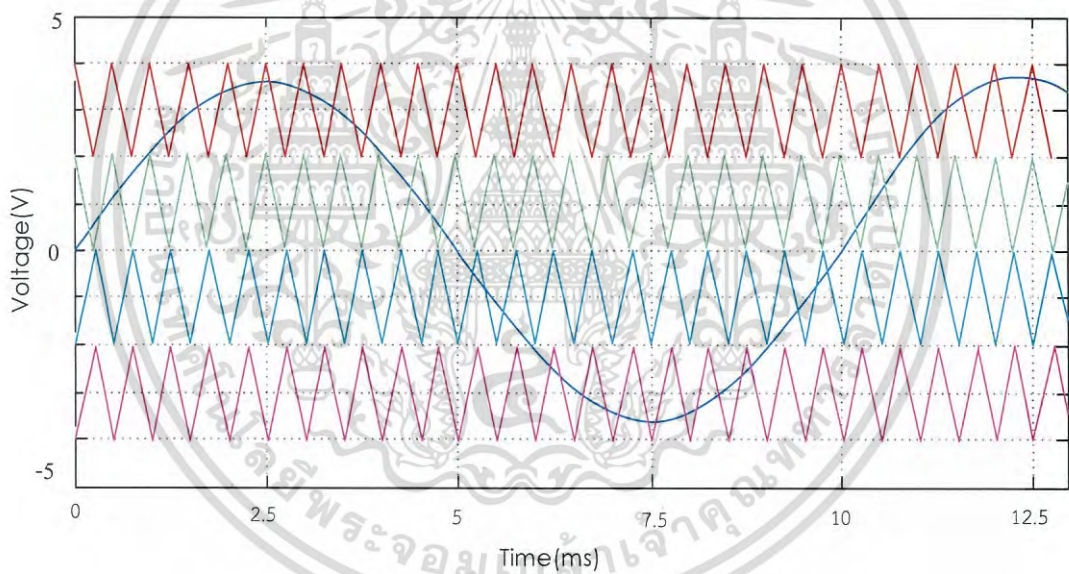
การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีสองวิธีพื้นฐานคือ การมอดูเลตด้วยความถี่สวิตช์มูลฐานและการมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยความถี่สวิตช์สูง รูปคลื่นเอาต์พุตที่ได้จากทั้งสองวิธีจะมีลักษณะเป็นขั้นบันได ซึ่งในปริยฐานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยความถี่สวิตช์สูง

วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะใช้สัญญาณพาหะที่มีความถี่สวิตช์สูงมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณเอาต์พุตรูปไซน์ โดยการใช้สัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ที่มีความถี่ตามแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ และใช้สัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยมจำนวน $m-1$ สัญญาณ โดยที่ m คือจำนวนชั้นแรงดันที่ต้องการ

เพื่อลดความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกในสัญญาณเอาต์พุตจึงมีการนำเทคนิคต่างๆ มาใช้ ซึ่งมักจะเป็นวิธีในการเปลี่ยนหรือกระจายสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม โดยทั่วไปแล้วเทคนิคที่ใช้เพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตในการมอดูเลตความกว้างพัลส์มีอยู่ 2 แบบคือ เทคนิคการเลื่อนเฟส (Phase Shifted Carrier PWM: PSCPWM) คือการใช้สัญญาณพาหะที่มีความถี่และขนาดเท่ากันแต่มีมุมเฟสต่างกัน ทำการมอดูเลตกับสัญญาณอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 2.14 และเทคนิคเฟสดีสทอร์ชัน (Phase Distortion PWM: PDPWM) คือการใช้สัญญาณพาหะที่มีความถี่ ขนาด และเฟสเดียวกันทำการมอดูเลตกับสัญญาณอ้างอิงที่คนละระดับแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยเทคนิคแบบ PDPWM จะให้ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตน้อยกว่าเทคนิคแบบ PSCPWM ภายใต้ภาวะปกติ [9]



รูปที่ 2.13 เทคนิคการเลื่อนเฟส (Phase Shifted Carrier PWM: PSCPWM)
โดยมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์และสัญญาณพาหะ 2 สัญญาณที่มีเฟสต่างกัน



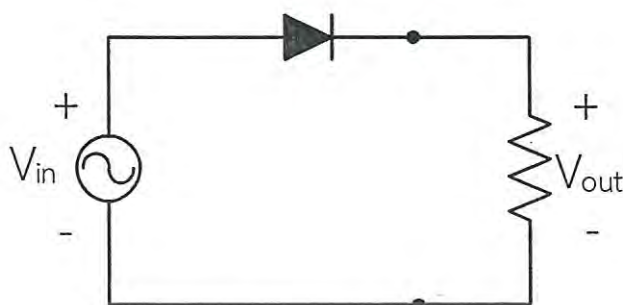
รูปที่ 2.14 เทคนิคเฟสผิดรูป (Phase Distortion PWM: PDPWM)
โดยมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์และสัญญาณพาหะ 4 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตที่ระดับสัญญาณต่างกัน

2.5 วงจรเรียงกระแส [5]

วงจรเรียงกระแสเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์รูปแบบหนึ่งที่แปลงกำลังไฟฟ้าจากกระแสสลับไปเป็นกระแสตรง โดยการทำให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวกัน ซึ่งมีไดโอด (Diode) เป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางกระแสของกระแส วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งลูกคลื่น (Half Wave Rectifier Circuit) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่น (Full Wave Rectifier Circuit) และวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งลูกคลื่น



รูปที่ 2.15 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งลูกคลื่น

จากรูปที่ 2.15 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งลูกคลื่นประกอบด้วยไดโอดหนึ่งตัว เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วแอโนดทำให้เกิดการนำกระแส จึงเกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุต โดยค่าของแรงดันเอาต์พุตหาได้จาก

$$V_{out} = 0.707V_{in} \quad (2.12)$$

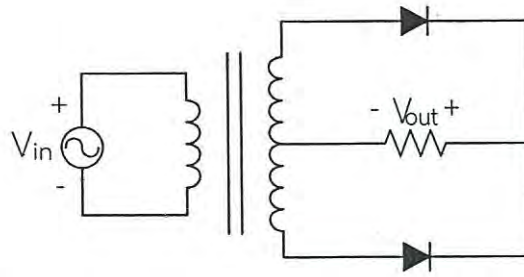
เมื่อ V_{in} คือ แรงดันสูงสุดของอินพุตกระแสสลับ
 V_{out} คือ แรงดันสูงสุดของเอาต์พุตกระแสสลับ

2.5.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่น

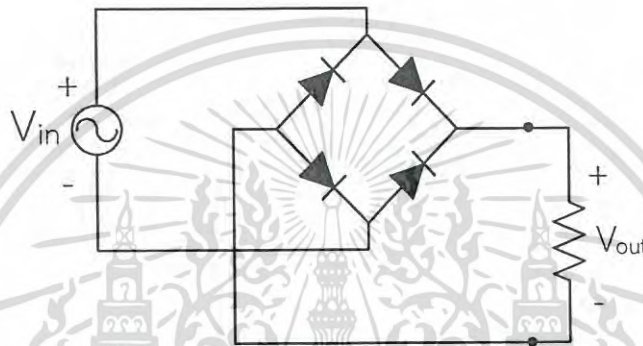
การต่อวงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่นสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีที่หนึ่ง ทำโดยต่อไดโอดสองตัวเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแทปตรงกลาง (Center-tap transformer) และวิธีที่สองใช้วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ ซึ่งหลักการคือให้ไดโอดมีการนำกระแสสลับกันตลอดเวลา ข้อดีของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่นคือ แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีการกระเพื่อมน้อยกว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งลูกคลื่น และแรงดันเอาต์พุตที่ได้หาได้จากสมการที่

$$V_{out} = 1.414V_{in} \quad (2.13)$$

เมื่อ V_{in} คือ แรงดันสูงสุดของอินพุตกระแสสลับ
 V_{out} คือ แรงดันสูงสุดของเอาต์พุตกระแสสลับ



รูปที่ 2.16 วงจรเรียงกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแทปตรงกลาง



รูปที่ 2.17 วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์

2.6 อุปกรณ์สวิตชิง [10, 11]

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการไหลของกระแสและแรงดัน เพื่อแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของโหลด โดยมีอุปกรณ์สวิตชิง (Switching device) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์กึ่งตัวนำ (Semiconductor device) ที่รวมเข้าด้วยกัน โดยอุปกรณ์สวิตชิงจะมีสถานะการทำงานสองสถานะ คือ การนำกระแสไฟฟ้า (on) และไม่นำกระแสไฟฟ้า (off) โดยสามารถใช้กระแสหรือแรงดันเพื่อควบคุมสถานะทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์กึ่งตัวนำที่นำมาใช้งาน ลักษณะของสวิตช์ถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ของฟังก์ชันภายใน โดยอุปกรณ์กึ่งตัวนำที่จะกล่าวถึงในปริิถยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ ไดโอด (Diode) และ ไอจีบีที (IGBT : The Insulated Gate Bipolar Transistor)

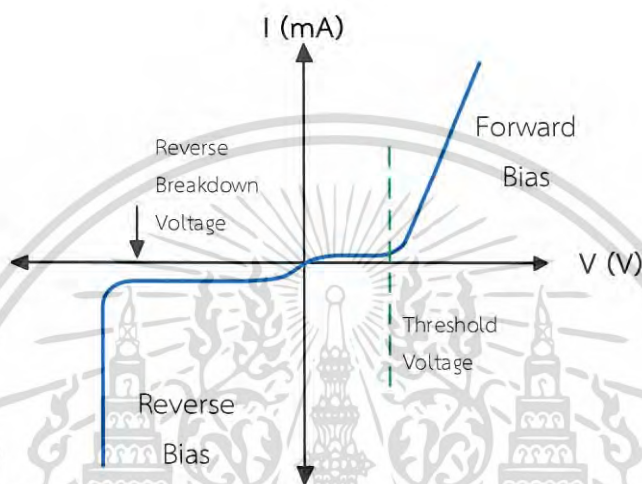
2.6.1 ไดโอด (Diode)



รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์ของไดโอด

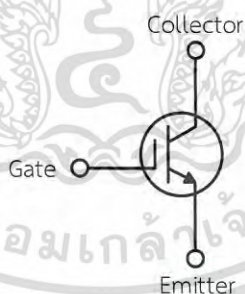
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอดเป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติในการควบคุมการไหลของกระแสให้ไปทิศทางเดียว โดยมีแรงดันเป็นตัวควบคุมสถานะการทำงาน โครงสร้างของไดโอดประกอบด้วยโครงสร้างสองชั้น คือ สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นและแบบพี การนำกระแสจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันที่ขั้วแอโนดมากกว่าขั้วแคโทด แต่จะไม่นำกระแสเมื่อจ่ายแรงดันเข้าที่ขั้วแคโทด ยกเว้นแรงดันที่จ่ายเข้าด้านแคโทดนั้นสูงเกินกว่าระดับแรงดันที่ไดโอดจะทนได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ย้อนกลับ (Reverse Breakdown Voltage) และอาจทำให้ไดโอดเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงคุณลักษณะของไดโอด

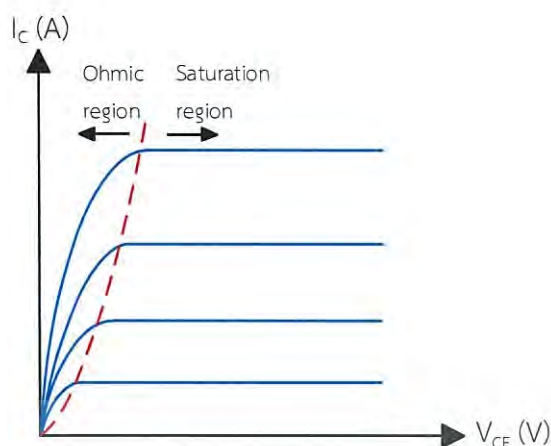
2.6.2 ไอจีบีที (IGBT) [10, 11]



รูปที่ 2.20 สัญลักษณ์ของไอจีบีที

ไอจีบีที (IGBT : The Insulated Gate Bipolar Transistor) เป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่มีสามขาและใช้เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและสามารถใช้งานที่ความถี่สวิตซ์สูงได้ โดยไอจีบีทีได้รวมข้อดีของมอสเฟต (MOSFETs) และบีเจที (BJTs) ทำให้สามารถนำกระแสได้สูงโดยแรงดันตกคร่อมต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

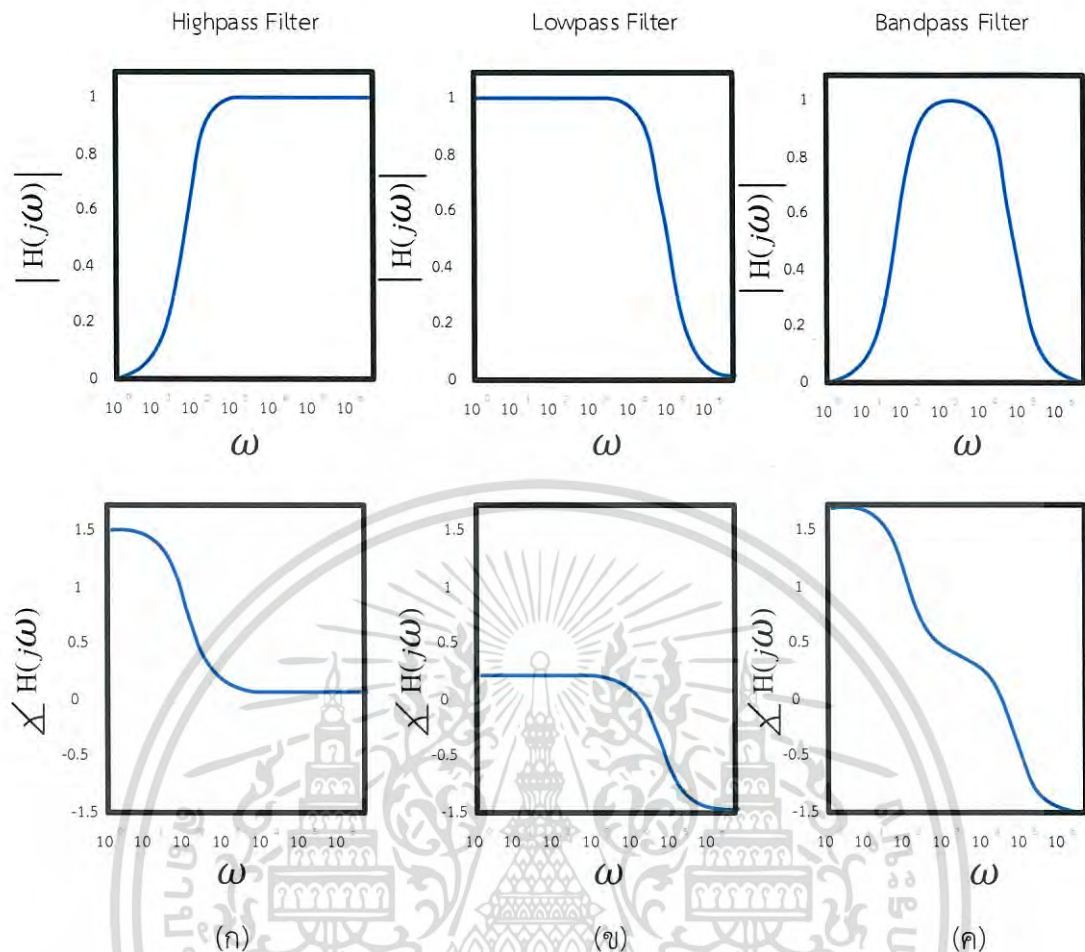


รูปที่ 2.21 กราฟแสดงคุณลักษณะของไอจีบีที

โครงสร้างของไอจีบีทีประกอบด้วยโครงสร้างสี่ชั้นของสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นและแบบพีสลับกัน แต่ข้อเท็จจริงที่ควรคำนึงถึงคือ การเปิด-ปิดวงจรนั้น อาศัยโครงสร้างของมอสเฟตทำหน้าที่จ่ายกระแสจุดชนวนให้แก่ทรานซิสเตอร์ โดยขาที่ใช้นำกระแสไฟฟ้าหลักเรียกว่า ขาคอลเลคเตอร์ (C : Collector) หรือขาเดรน (D : Drain) กับขาคีมิตเตอร์ (E : Emitter) หรือขาสอร์ส (Source) ขาที่ใช้ควบคุมการเปิด-ปิดตัวอุปกรณ์เรียกว่า เกต (G : Gate) ไอจีบีทีจะนำกระแสอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับการจุดชนวนจากมอสเฟต ด้วยเหตุนี้ทำให้ไอจีบีทีเป็นที่นิยมในงานควบคุมกำลังไฟฟ้านาฬิกาและขนาดใหญ่ เช่น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ (Switching Power Supply) หรือใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เป็นต้น

2.7 ตัวกรองความถี่ [12]

ตัวกรองความถี่ประกอบด้วยแถบความถี่ผ่าน (Bandpass) และแถบยับยั้งความถี่ (Bandstop) แถบความถี่ผ่านคือช่วงความถี่ที่ตัวกรองยอมให้สัญญาณผ่านไปโดยไม่มีผลกระทบ แถบยับยั้งความถี่ คือช่วงความถี่ที่ตัวกรองจะลดทอนสัญญาณทำให้ส่งผ่านสัญญาณได้น้อยมาก ตัวกรองความถี่มีสี่ประเภท ได้แก่ ตัวกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter) ซึ่งจะยอมให้สัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่ต่ำผ่านไปและกรองสัญญาณที่อยู่ช่วงความถี่สูง ตัวกรองแบบความถี่สูงผ่าน (High-pass Filter) ซึ่งจะยอมให้สัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่สูงผ่านไปและกรองสัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ตัวกรองแบบแถบความถี่ผ่าน (Bandpass Filter) จะยอมให้แถบความถี่ผ่านใน ช่วงกลางของความถี่ผ่านไปแล้วกรองสัญญาณความถี่สูงและความถี่ต่ำออก และตัวกรองแบบหยุดแถบความถี่ผ่าน (Bandstop Filter) จะยอมให้ทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูงผ่านแล้วกรองความถี่ที่อยู่ช่วงกลางออกไป



รูปที่ 2.22 ความถี่ตอบสนองของตัวกรองแบบต่างๆ

(ก) ตัวกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (ข) ตัวกรองแบบความถี่สูงผ่าน (ค) ตัวกรองแบบแถบความถี่ผ่าน

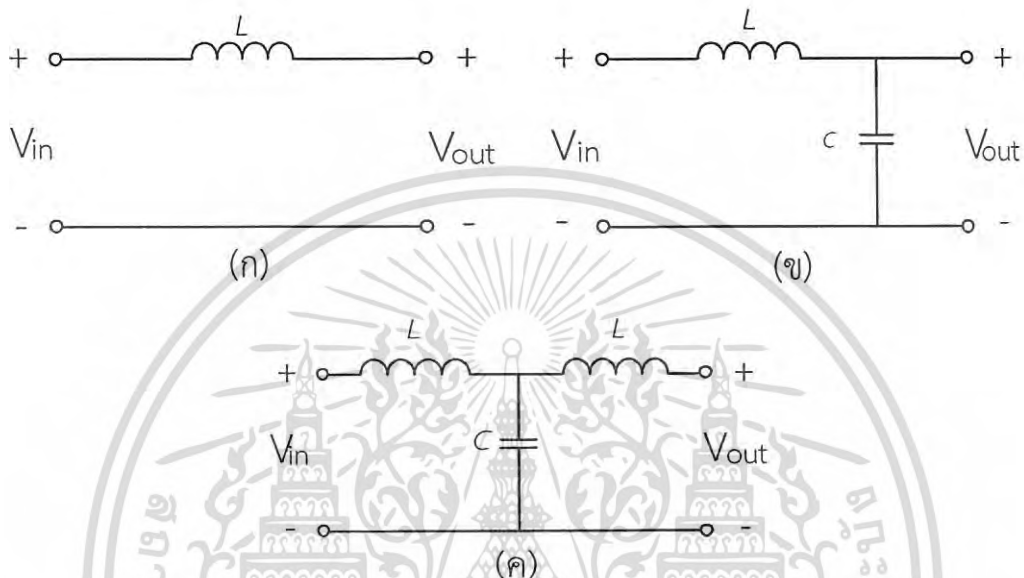
นอกจากนี้ตัวกรองความถี่ยังแบ่งตามอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบวงจรได้เป็นสองประเภท คือ ตัวกรองพาสซีฟ (Passive Filter) ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ สำหรับตัวกรองแอกทีฟ (Active Filter) ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์แอกทีฟ เช่น ทรานซิสเตอร์หรือออปแอมป์ ที่นำไปต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน รูปที่ 2.22 แสดงความถี่ตอบสนองของตัวกรองแบบต่างๆ โดยรูปด้านบนเป็นขนาดของความถี่และรูปด้านล่างเป็นมุมเฟสของความถี่

2.7.1 ตัวกรองพาสซีฟ [12]

ตัวกรองพาสซีฟประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ปรับความถี่เรโซแนนท์ไว้ที่ความถี่เดียวหรือให้ผ่านแถบความถี่ได้ ในระบบไฟฟ้าตัวกรองพาสซีฟนำมาใช้งานเพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกและลดความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดในระบบไฟฟ้า

2.7.2 ตัวกรองพาสซีฟสำหรับอินเวอร์เตอร์ [13]

ตัวกรองสำหรับอินเวอร์เตอร์โดยส่วนใหญ่มี 3 วิธีได้แก่ ตัวกรองลำดับหนึ่ง (First-Order ; L-filter) ตัวกรองลำดับสอง (Second-Order ; LC-filter) และตัวกรองลำดับสาม (Third-Order ; LCL-filter) โดยวิธีที่เหมาะสมที่สุด[13] ในการใช้งานสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสคือ ตัวกรองลำดับสอง



รูปที่ 2.23 วงจรกรองความถี่ (ก) ลำดับหนึ่ง (ข) ลำดับสอง (ค) ลำดับสาม

วงจรตัวกรองลำดับหนึ่ง (First-Order ; L-filter) การใช้ตัวกรองนี้ควรใช้ที่ความถี่อินเวอร์เตอร์มีค่าสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดทอนฮาร์มอนิก

วงจรตัวกรองลำดับสอง (Second-Order ; LC-filter) ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำที่นำมาต่ออนุกรมเพื่อลดองค์ประกอบของความถี่สวิตซ์ และมีตัวเก็บประจุเพื่อเพิ่มสมรรถภาพในการใช้งานช่วงความถี่สูง โดยความถี่ตัดคำนวณได้จาก

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.14)$$

- เมื่อ F_0 คือ ความถี่ตัด (Hz)
 L คือ ตัวเหนี่ยวนำ (H)
 C คือ ตัวเก็บประจุ (F)

วงจรตัวกรองลำดับสาม (Third-Order ; LCL-filter) มีประสิทธิภาพการลดทอนฮาร์มอนิกดีกว่าวงจรตัวกรองลำดับหนึ่งและลำดับสอง และยังลดระดับความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกที่ความถี่สวิตซ์ต่ำและการสะสมพลังงานที่น้อย โดยความถี่ตัดคำนวณได้จาก

$$F_0 = \frac{1\sqrt{L_1 + L_2}}{2L_1L_2C} \quad (2.15)$$

เมื่อ F_0 คือ ความถี่ตัด (Hz)
 L_1, L_2 คือ ตัวเหนี่ยวนำ (H)
 C คือ ตัวเก็บประจุ (F)

2.8 วงจรสแน็บเบอร์ [14]

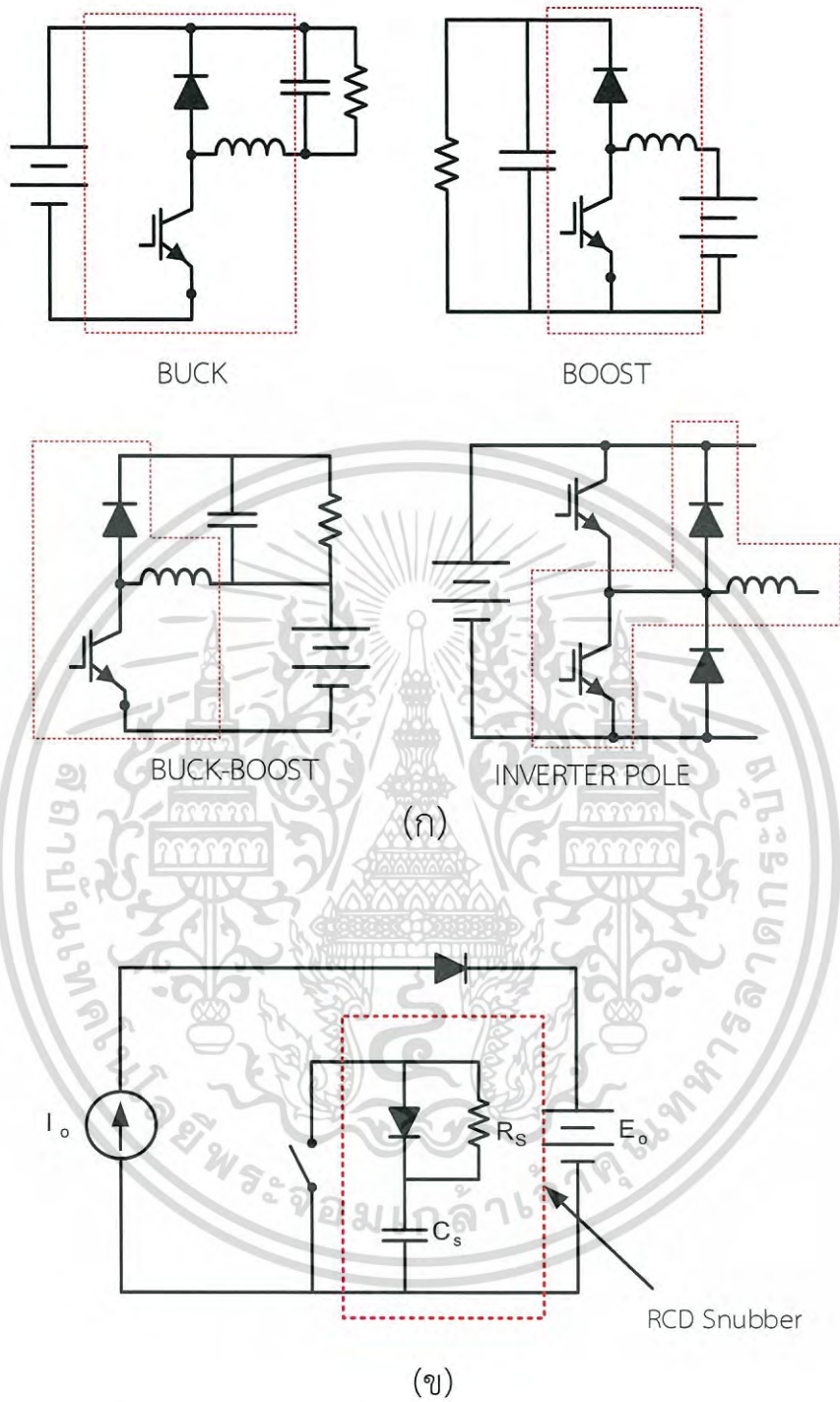
วงจรสแน็บเบอร์ (Snubber Circuit) เป็นวงจรที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์กึ่งตัวนำเพื่อป้องกันและปรับปรุงประสิทธิภาพ ความสามารถของวงจรสแน็บเบอร์ เช่น ลดแรงดันเกินชั่วขณะที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังตัวต้านทานหรือโหลดที่ใช้งานและลดกำลังสูญเสียที่เกิดจากการสวิตซ์ วงจรสแน็บเบอร์มีหลายประเภทแต่วงจรสแน็บเบอร์ที่นิยมใช้มีสองแบบ คือ แบบตัวต้านทานตัวเก็บประจุ (Resistor-Capacitor : RC) สำหรับแดมป์ปิงเน็ตเวิร์ค (Damping Network) และแบบตัวต้านทานตัวเก็บประจุไดโอด (Resistor-Capacitor-Diode : RCD) สำหรับสแน็บเบอร์เปิด-ปิด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

วงจรสแน็บเบอร์แบบ RC จะวางคร่อมกับสวิตซ์ เพื่อลดแรงดันเกินชั่วขณะของแรงดันไฟฟ้าขณะมีการเปิด-ปิดหรือค่าแดมป์ เทคนิคการออกแบบในกรณีทั่วไปคือกำหนดค่าที่เหมาะสมของส่วนประกอบในวงจร RC ซึ่งวงจรดังกล่าวประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและไดโอด จากรูป 2.24 (ก) จะสังเกตได้ว่าวงจรสแน็บเบอร์ RC สามารถใช้ได้กับวงจรไฟฟ้าหลายรูปแบบ ทำให้มีการใช้งานวงจรสแน็บเบอร์ RC อย่างแพร่หลายเพราะง่ายต่อการออกแบบสแน็บเบอร์ทั่วไป

วงจรสแน็บเบอร์แบบ RCD ประกอบด้วยตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ และไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ข) ซึ่งมีข้อดีมากกว่าวงจรสแน็บเบอร์แบบ RC คือ นอกจากจะลดแรงดันสูงสุดได้แล้วยังสามารถลดกำลังสูญเสียของวงจรทั้งหมด รวมทั้งกำลังสูญเสียจากทั้งการสวิตซ์และสแน็บเบอร์ตัวเก็บประจุชั้นที่คร่อมสวิตซ์เป็นส่วนที่ใช้ประโยชน์ของสแน็บเบอร์

ในปัจจุบันมีความนิยมใช้งานไอจีบีทีแทนมอสเฟตในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลังมากขึ้น เนื่องจากมีกำลังสูญเสียต่ำ ขนาดเล็ก และสามารถใช้งานที่ความถี่สวิตซ์สูงได้ การสวิตซ์ขณะที่มีกระแสสูงในระยะเวลาสั้นๆ ทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วขณะสูงกว่าที่ไอจีบีทีรับได้ โดยเฉพาะเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันมีค่าใกล้เคียงกับพิกัดแรงดันของไอจีบีที จึงมีการออกแบบสแน็บเบอร์เพื่อลดแรงดันเหนี่ยวนำของวงจรกระแสตรง (DC loop)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 วงจรสับเบอร์ (ก) RC Snubber circuit (ข) RCD Snubber circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

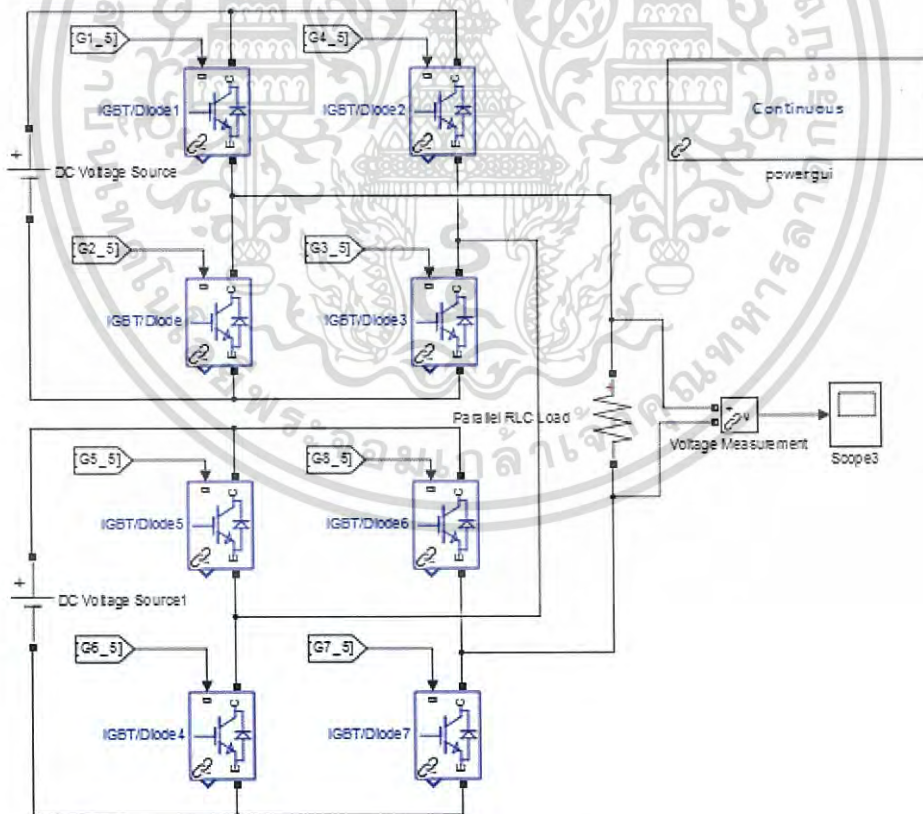
บทที่ 3

การออกแบบ และประกอบสร้าง

สำหรับบทนี้ได้นำเสนอถึงการออกแบบและประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ ซึ่งได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการออกแบบและจำลองผลการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบเฟสดีสทอร์ชัน (Phase disposition pulse width modulation, PSPWM) ในการสร้างสัญญาณขับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ที่ใช้ ทำให้สามารถนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบสัญญาณที่เหมาะสมกับวงจรที่ทำการออกแบบ จากนั้นจึงทำการประกอบสร้างวงจรแปลงความถี่คอนเวอร์เตอร์ ที่มีลักษณะตรงตามความต้องการ

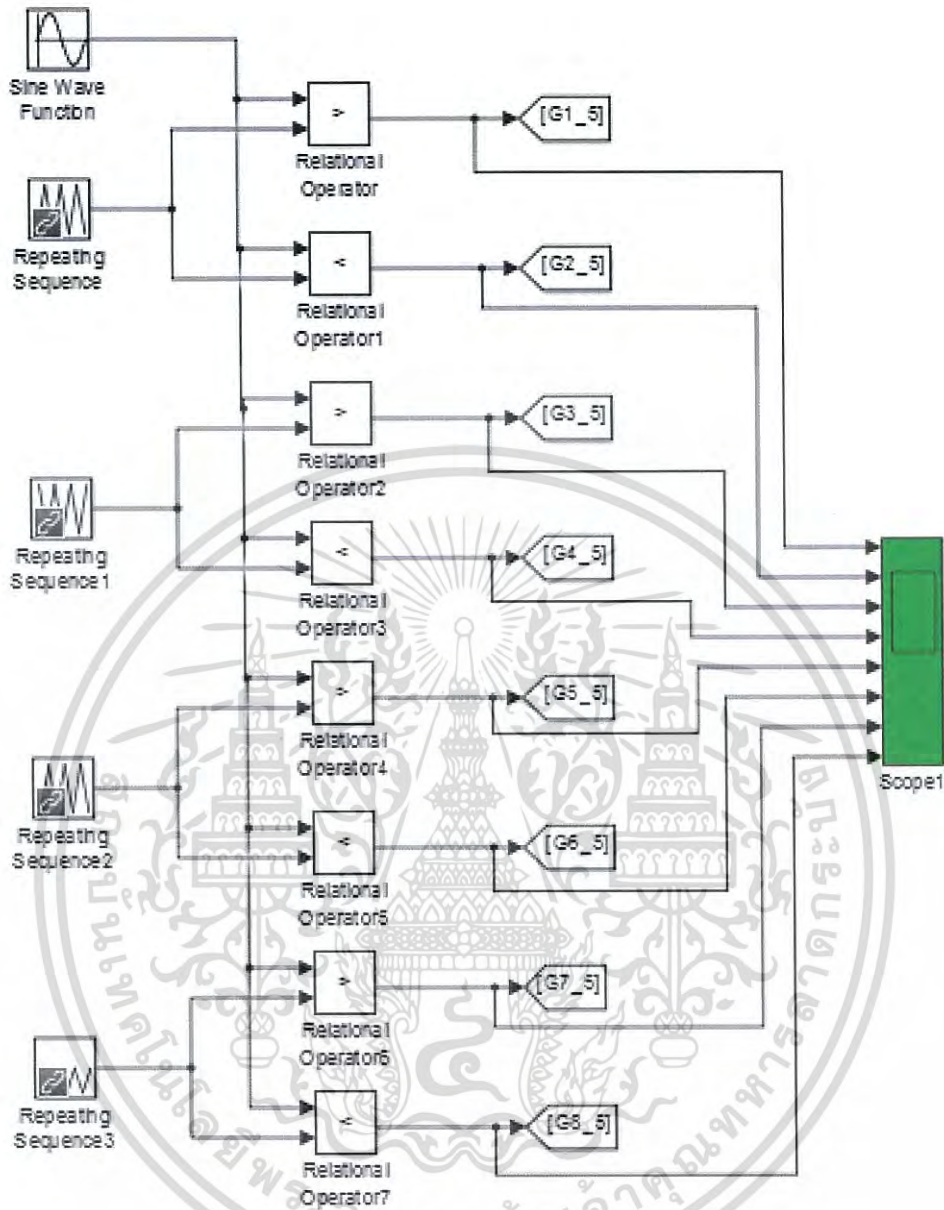
3.1 การออกแบบและจำลองผลของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ ในบทนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ และวงจรสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PSPWM ดังรูป 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรสัญญาณควบคุม แบบ PSPWM

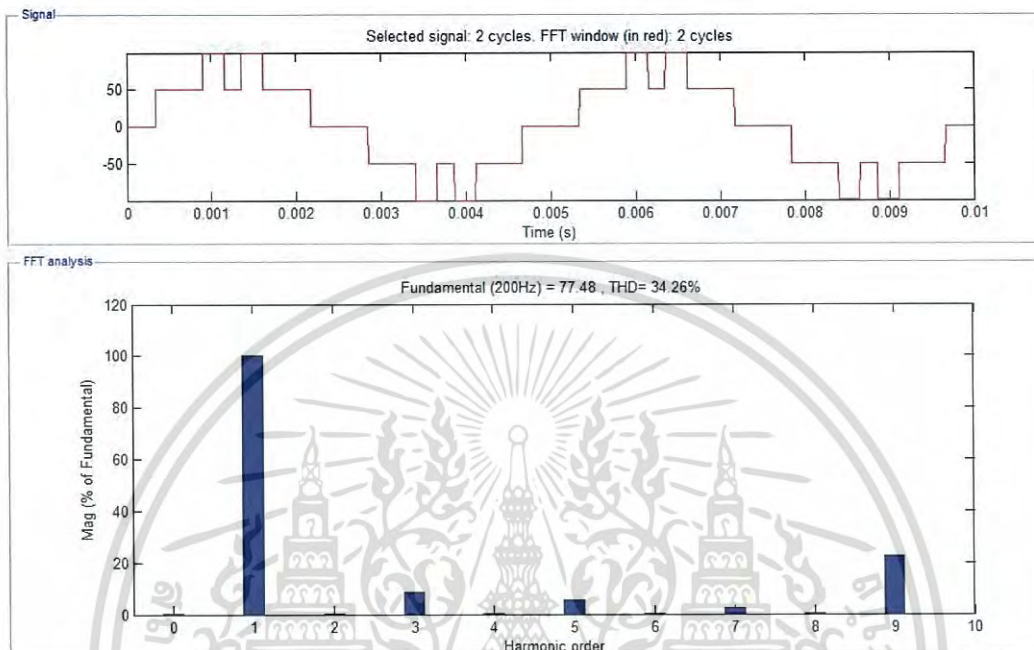
3.1.1 จำลองผลการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดทราสแคต 5 ระดับ โดยต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 1,000 W

ในการจำลองผลได้กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงรูปไซน์มีความถี่ 200 Hz และต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 1,000 W แล้วทำการควบคุมสัญญาณเอาท์พุท โดยทำการปรับค่าดัชนีมอดูเลต (Modulation Index : m_a) หรือค่าความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ (Carrier Wave) ของสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจร ซึ่งในการจำลองผลได้ทำการปรับค่าดัชนีมอดูเลตเป็น 0.8, 1 และ 1.2 และปรับความถี่คลื่นสัญญาณพาหะเป็น 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 16 kHz และ 20 kHz ตามลำดับ

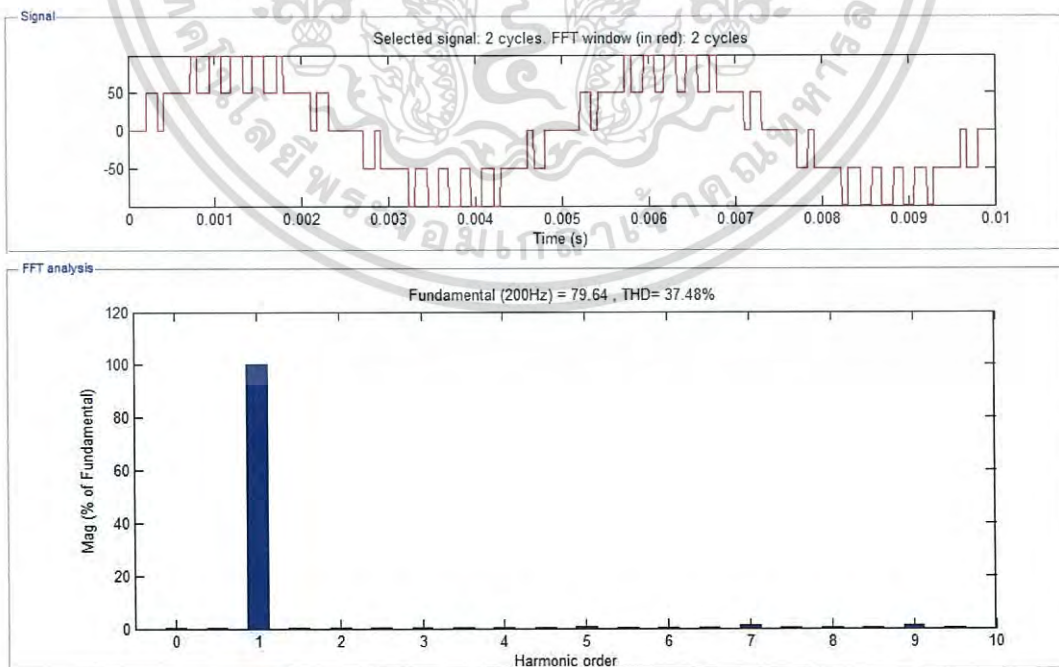
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1 กราฟแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ ที่ดัชนีมอดูเลต 0.8, 1 และ 1.2

1.) ดัชนีมอดูเลต 0.8

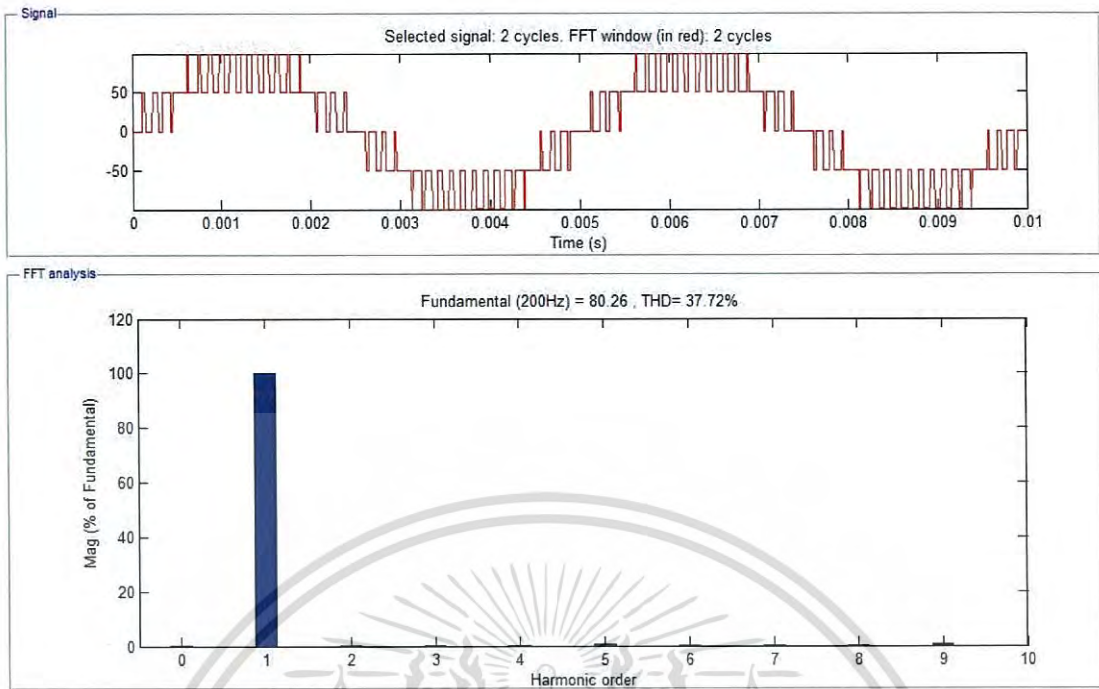


รูปที่ 3.3 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz

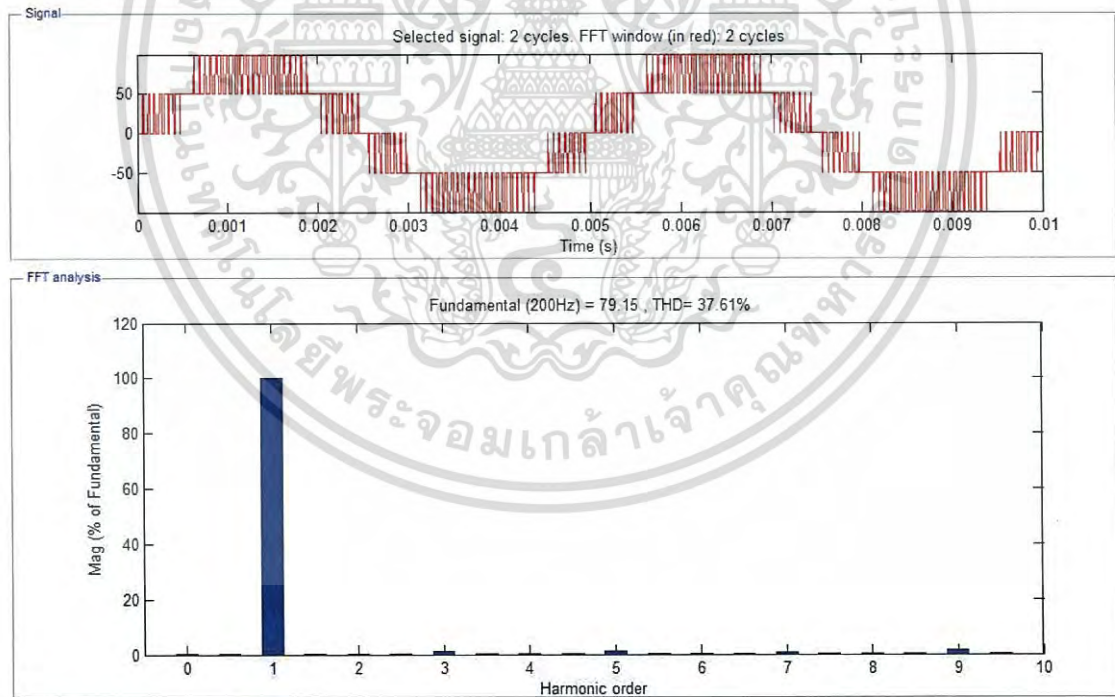


รูปที่ 3.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 4 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

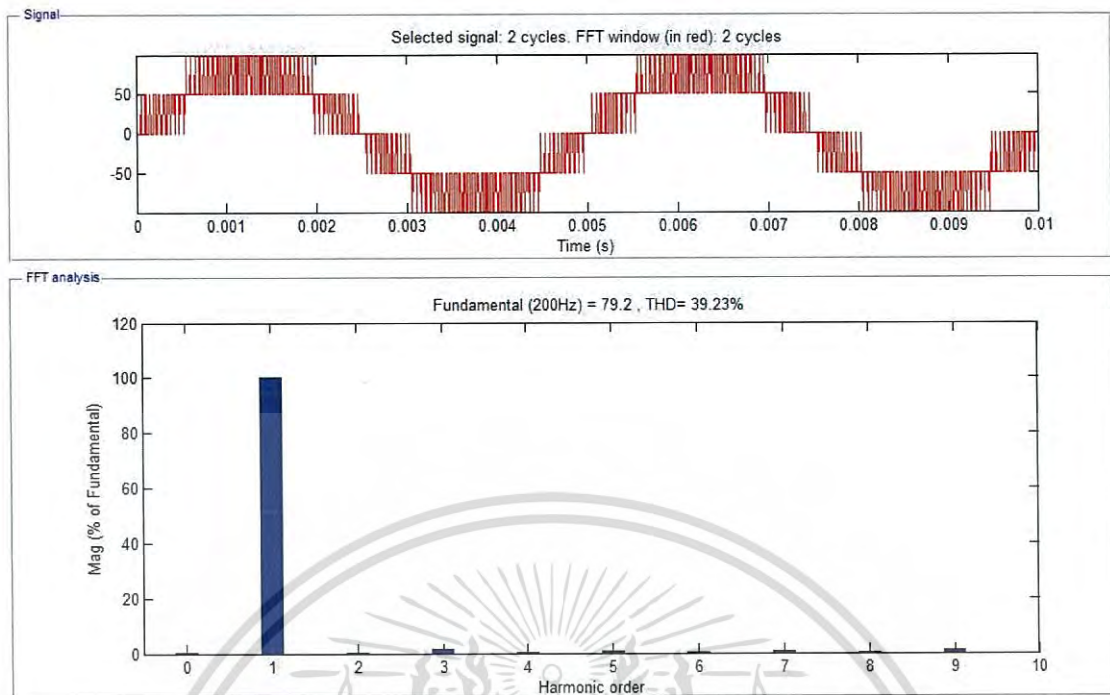


รูปที่ 3.5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 8 kHz



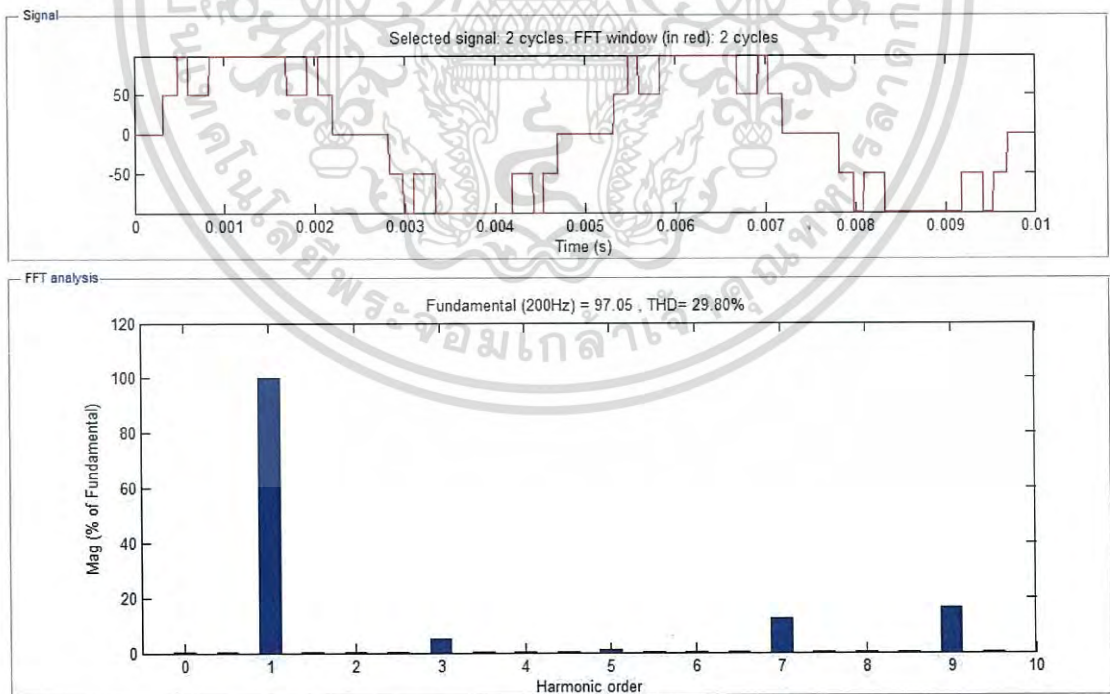
รูปที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 16 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



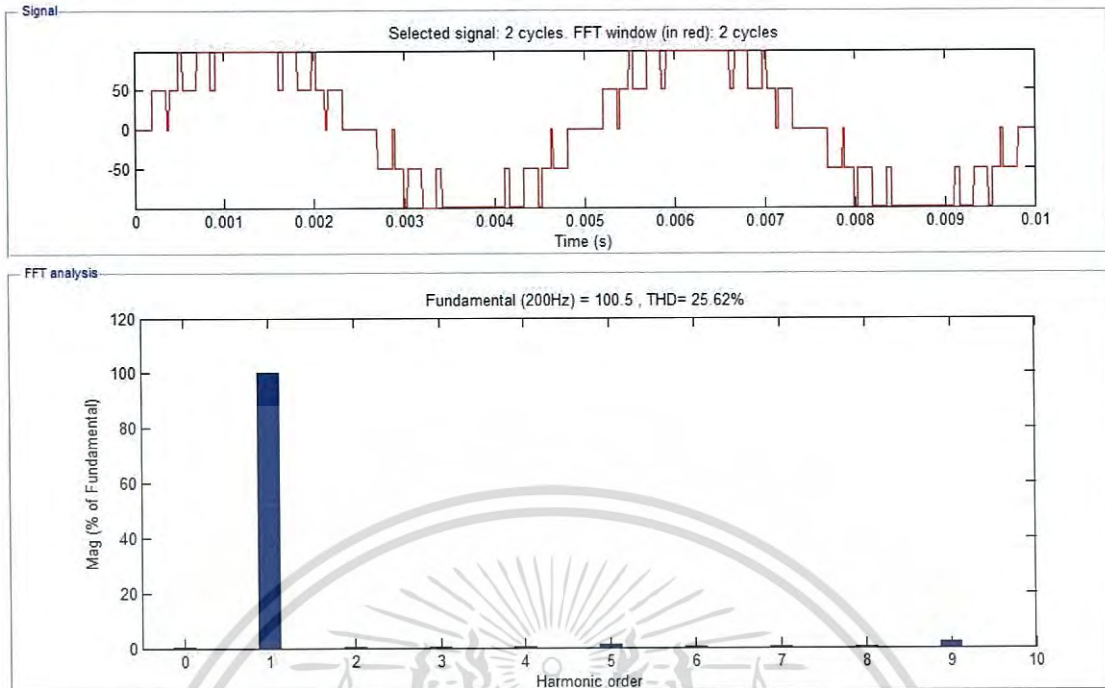
รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
 ดัชนีมอดูเลต 0.8 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 20 kHz

2.) ดัชนีมอดูเลต 1

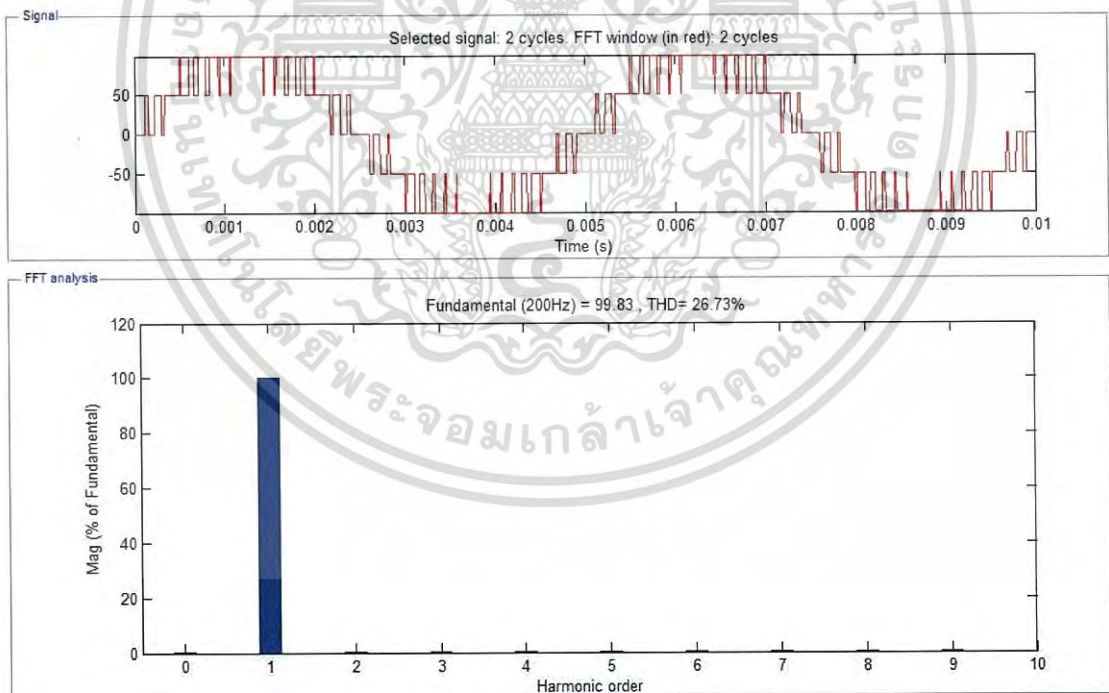


รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
 ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

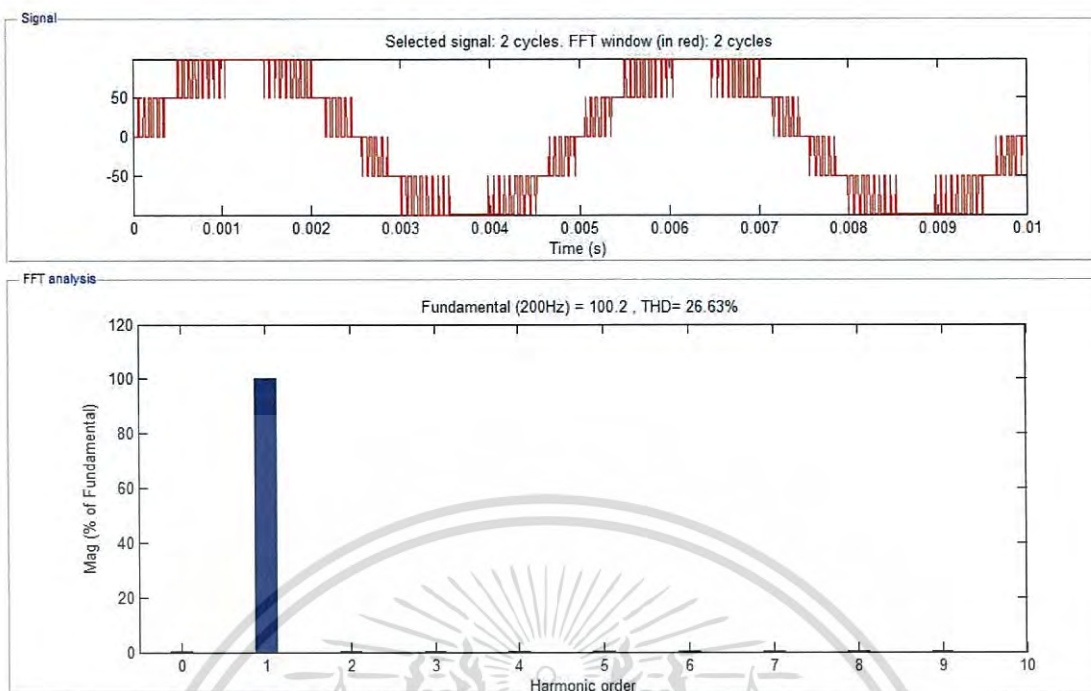


รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 4 kHz

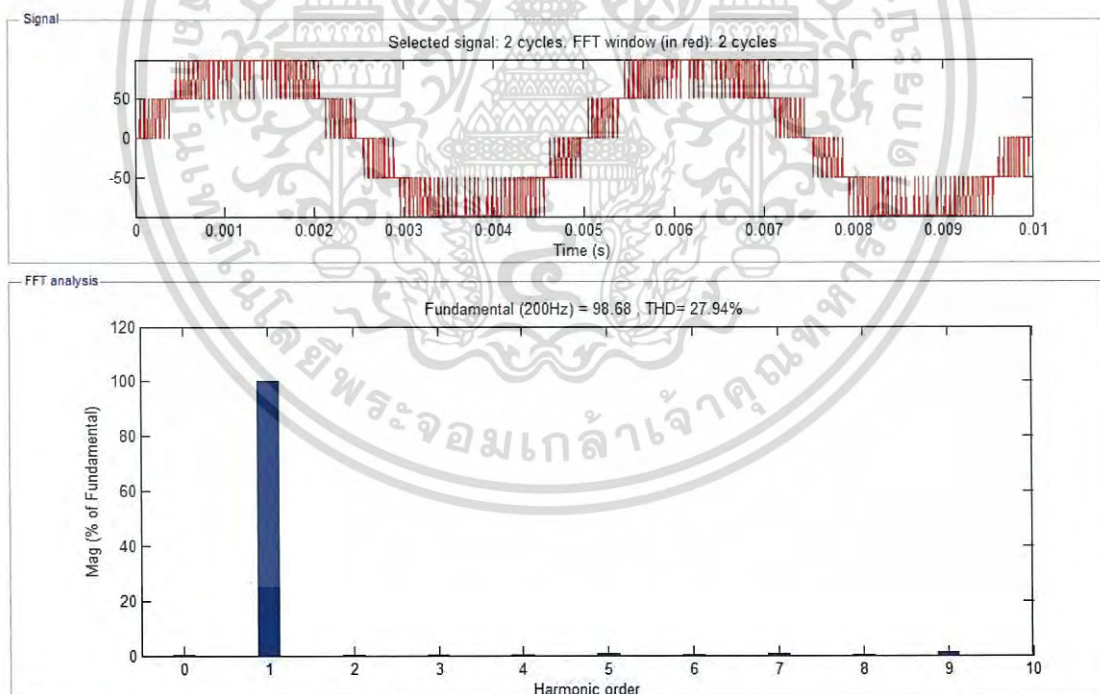


รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 8 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



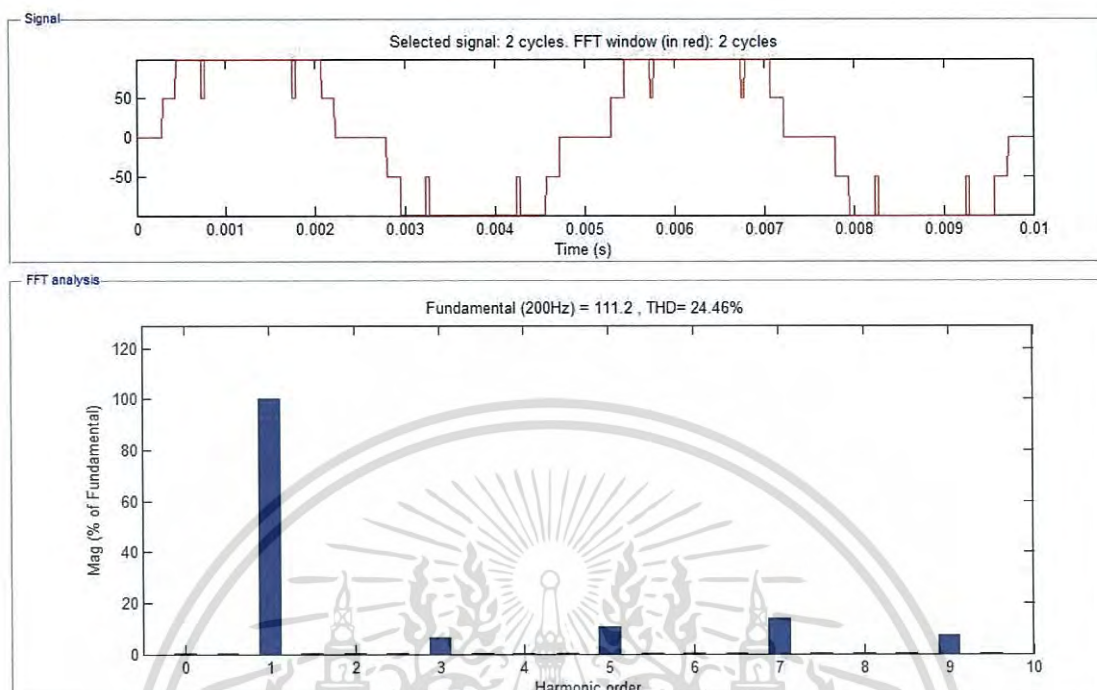
รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
 ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 16 kHz



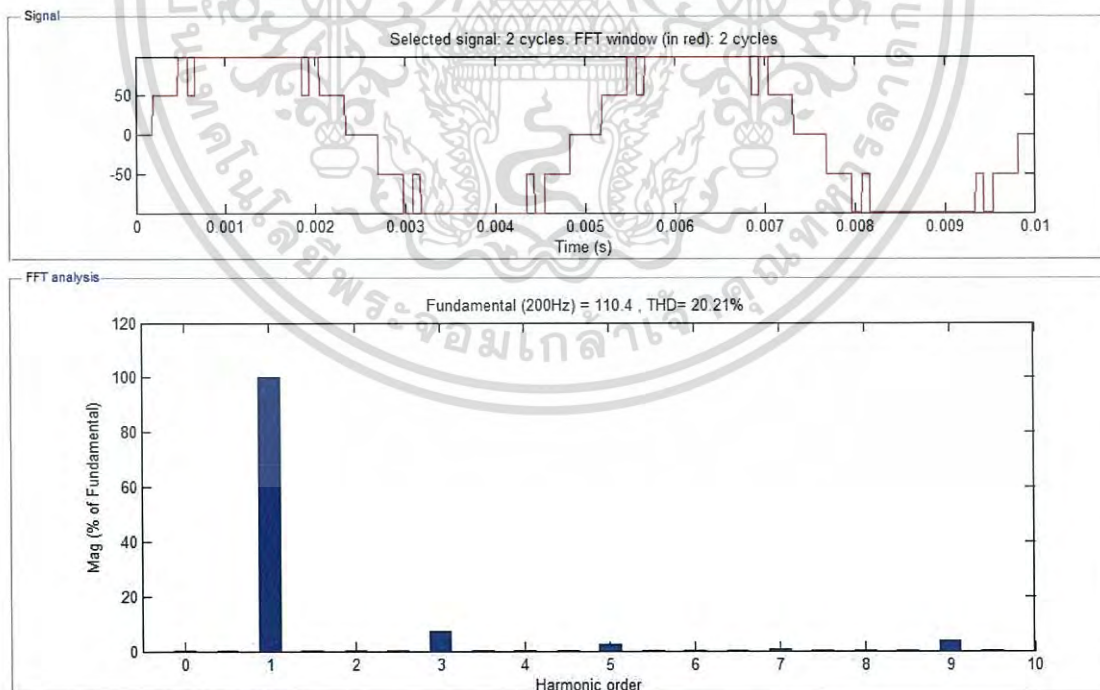
รูปที่ 3.12 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
 ดัชนีมอดูเลต 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 20 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

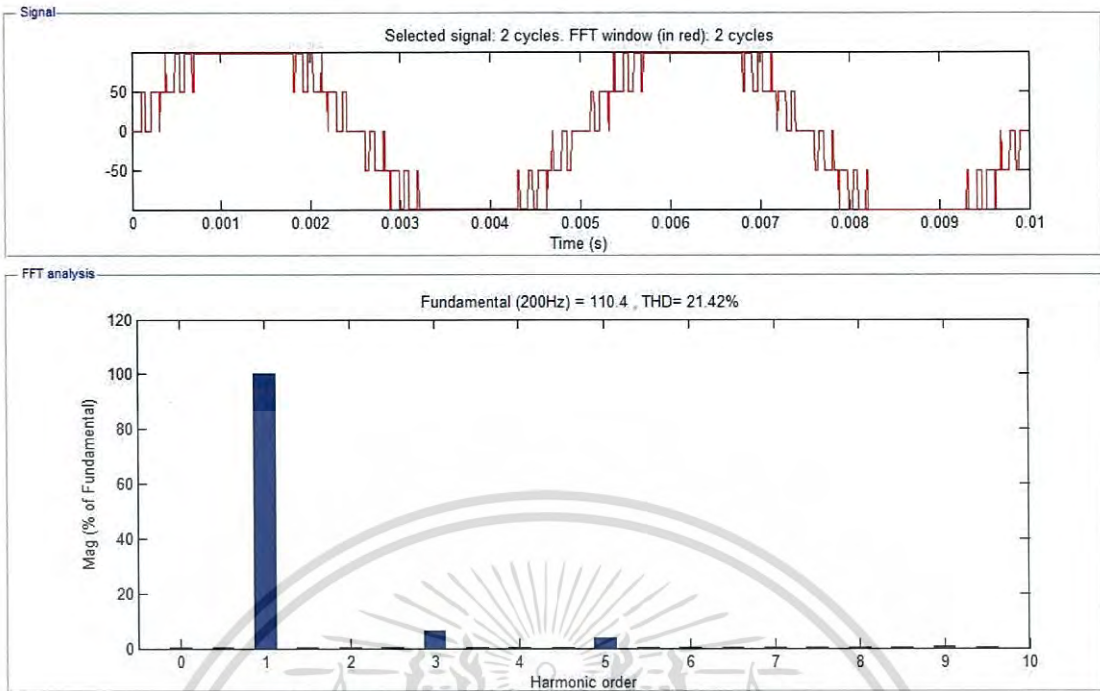
3.) ดัชนีมอดูเลต 1.2



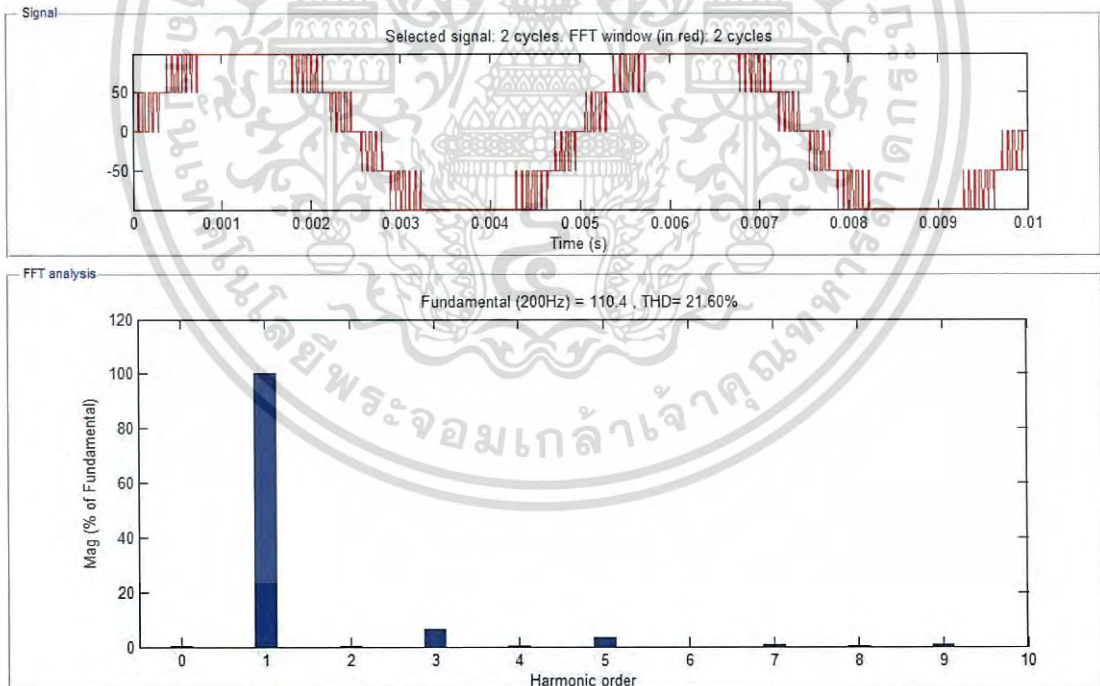
รูปที่ 3.13 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 4 kHz

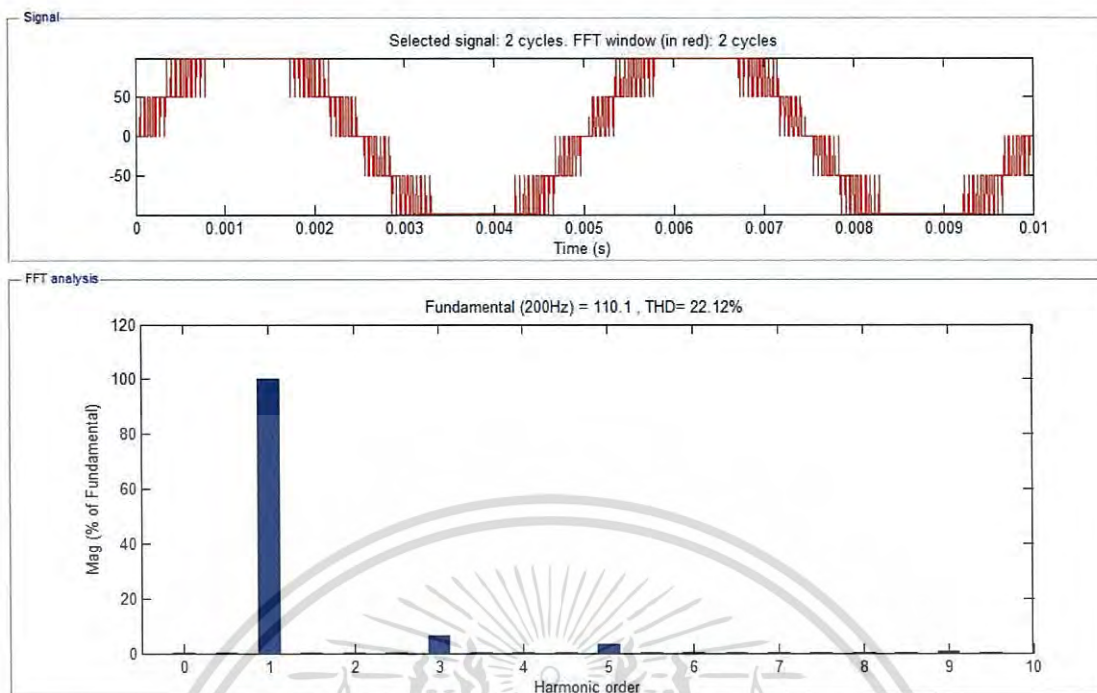


รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 8 kHz



รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 16 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก
ดัชนีมอดูเลต 1.2 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 20 kHz

3.1.1.2 สรุปผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ
โดยต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 1,000 W

ตารางที่ 3.1 สรุปผลการจำลอง เมื่อปรับค่าดัชนีมอดูเลตและความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ

m_a	F_{carrier} (Hz)	Fundamental (Hz)	%THD
0.8	2k	77.48	34.26
	4k	79.64	37.48
	8k	80.26	37.72
	16k	79.15	37.61
	20k	79.20	39.23
1	2k	97.05	29.80
	4k	100.50	25.62
	8k	99.83	26.73
	16k	100.20	26.63
	20k	98.68	27.94
1.2	2k	111.20	24.46
	4k	110.40	20.21
	8k	110.40	21.42
	16k	110.40	21.60
	20k	110.10	22.12

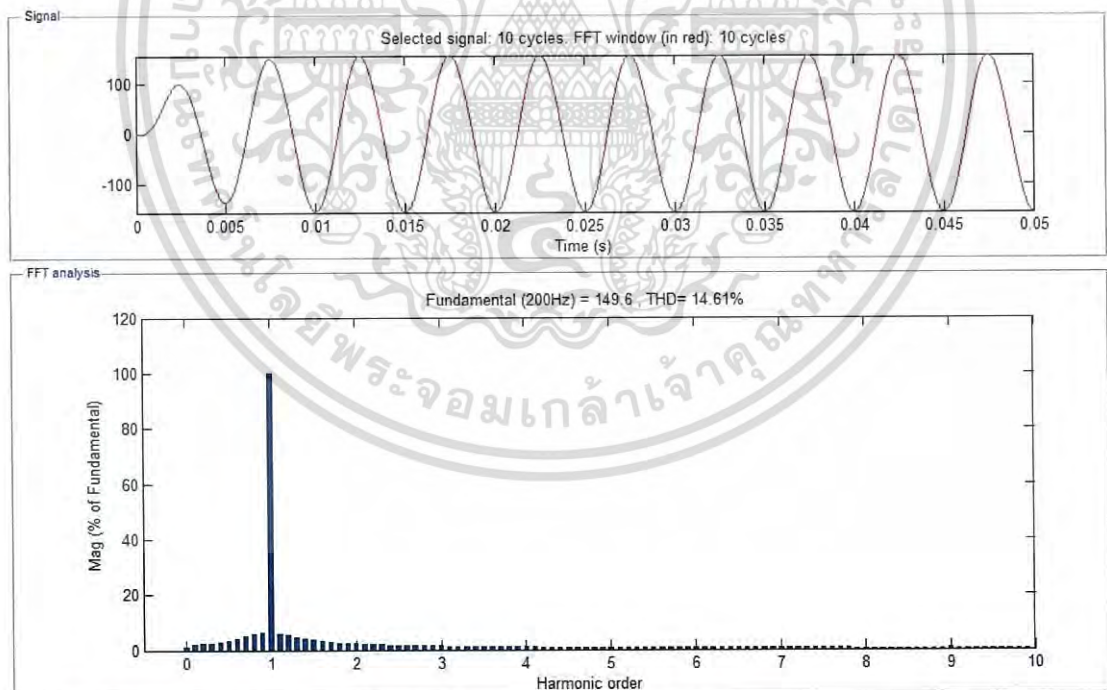
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าการปรับค่าดัชนีมอดูเลต และความถี่คลื่นสัญญาณพาหะนั้นมีผลต่อรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม โดยเมื่อดัชนีมอดูเลตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมมีค่าลดลง ในทางกลับกัน เมื่อเพิ่มความถี่คลื่นสัญญาณพาหะแล้วค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมจะมีค่าลดลงจนถึงจุดหนึ่งก่อนที่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปทดสอบหม้อแปลงจึงควรเป็นสัญญาณควบคุมที่มีค่ามอดูเลตสูง และมีความถี่คลื่นสัญญาณพาหะใกล้เคียง 4 kHz อย่างไรก็ตามสัญญาณควบคุมไม่ควรมอดูเลตสูงเกินไปเพราะจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียจากการสวิตช์สูงเช่นกัน

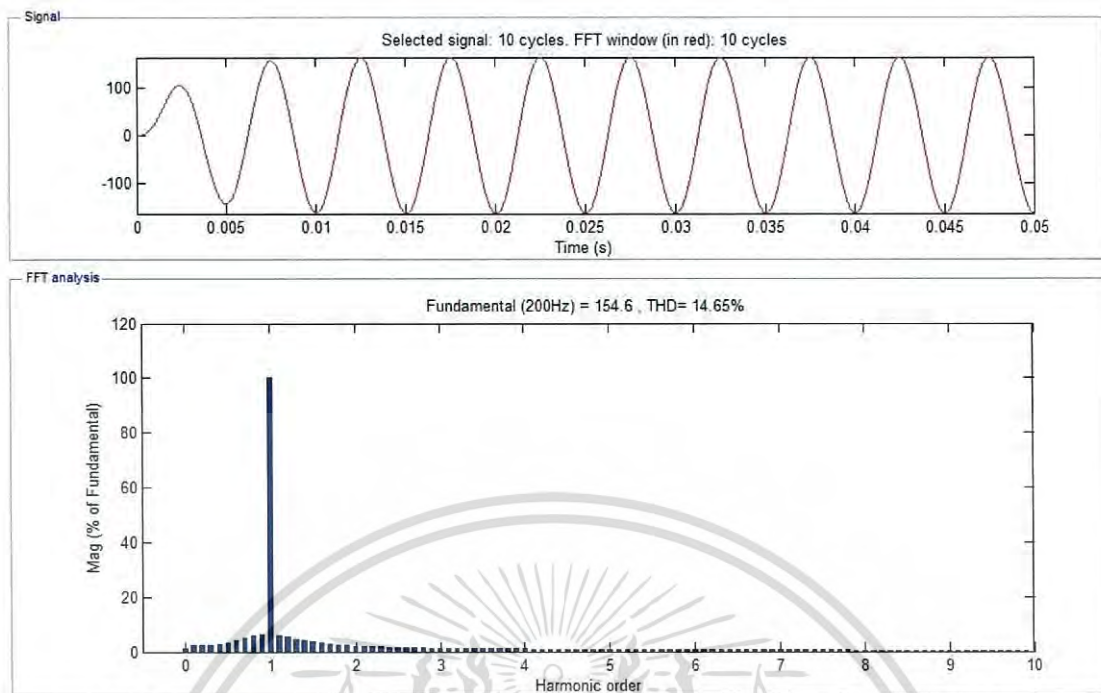
3.1.2 จำลองผลการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ โดยต่อวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter Circuit, LPF)

จากผลการจำลองเมื่อต่อโหลดขนาด 1,000 W แล้วพบว่า ที่ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz เกิดฮาร์มอนิกในลำดับที่ 7 ดังนั้นจึงได้ออกแบบวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่านเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เป็นต้นไป ซึ่งในการจำลองนี้ได้ใช้วงจรกรองความถี่ที่มีค่าเหนี่ยวนำ 13.2 mH และตัวเก็บประจุขนาด 8.8 μF

3.1.2.1 กราฟแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ เมื่อต่อวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก เมื่อต่อวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน ดัชนีมอดูเลต 1 และความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz



รูปที่ 3.19 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก เมื่อต่อวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน ดัชนีมอดูเลต 1 และความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 4 kHz

3.1.2.2 สรุปผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 5 ระดับ โดยต่อวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน

ตารางที่ 3.2 สรุปผลการจำลอง เมื่อต่อวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน

m_a	F_{carrier} (Hz)	Fundamental (Hz)	%THDv
1	2k	149.60	14.61
	4k	154.60	14.65

จากตาราง 3.2 จะพบว่า ความถี่สัญญาณพาหะที่เปลี่ยนไปนั้น มีผลต่อค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันน้อยมาก ดังนั้นในการนำไปใช้จริงจึงควรเลือกใช้ที่ความถี่สัญญาณพาหะต่ำ เพื่อที่จะลดการเกิดกำลังสูญเสียจากการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตซ์

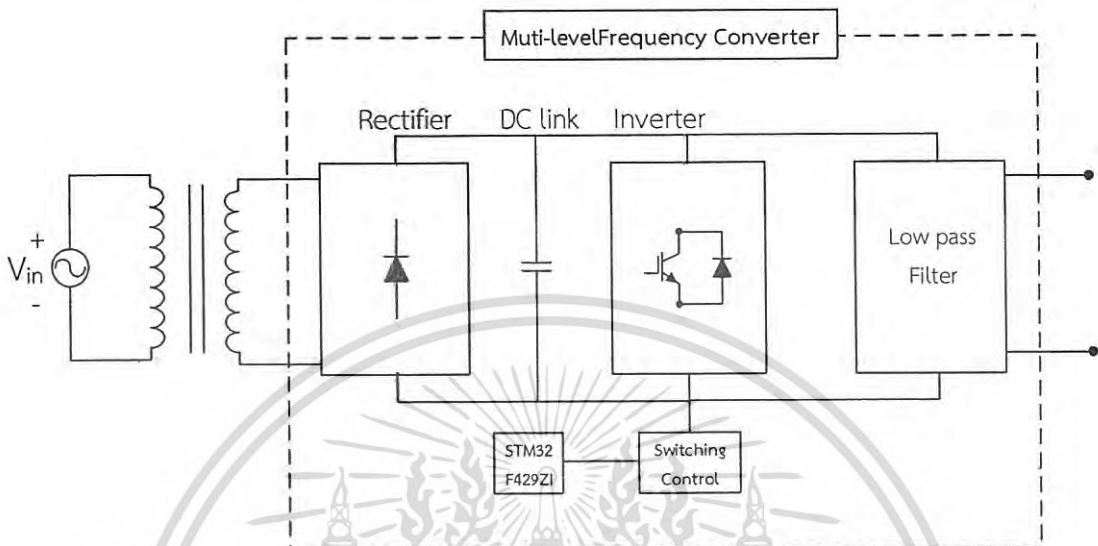
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่

คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้ได้ออกแบบสำหรับทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยมีเป้าหมายเพื่อทดสอบหม้อแปลงแรงดันที่มีพิกัดแรงดันไม่เกิน 110V/220 kV ซึ่งที่พิกัดนี้ ตามมาตรฐานการทดสอบ ได้กำหนดให้ทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านแรงสูงมีค่าเป็น 50 kV ดังนั้น จากอัตราการแปลงแรงดันต้องจ่ายแรงดันให้หม้อแปลงด้านแรงต่ำเท่ากับ 250 V คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้จึงถูกออกแบบให้สามารถจ่ายแรงดันได้สูงสุด 330 V เพื่อไม่ให้คอนเวอร์เตอร์ใช้งานเกินร้อยละ 80 ของพิกัดและกำหนดความถี่ของแรงดันทดสอบให้มากกว่าสองเท่าของความถี่ใช้งาน ในที่นี้เราจึงได้กำหนดพิกัดความถี่ของคอนเวอร์เตอร์เป็น 200 Hz

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 องค์ประกอบวงจรในคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่

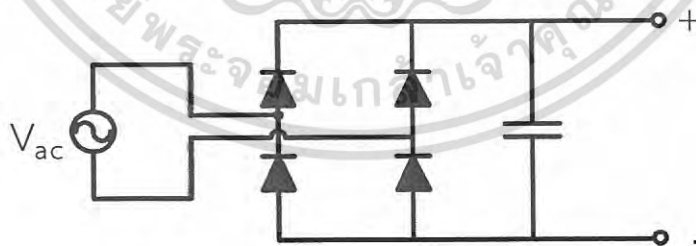
คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ประกอบไปด้วยวงจรสี่ส่วน คือ วงจรเรียงกระแส วงจรสวิตซ์กำลัง วงจรควบคุมการสวิตซ์ และวงจรกรองความถี่ การต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 องค์ประกอบของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่

3.2.1.1 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่สร้างแรงดันกระแสตรงป้อนให้กับอุปกรณ์สวิตซ์ ซึ่งเพื่อการสวิตซ์ของอุปกรณ์สวิตซ์ให้ทำงานตามลำดับการทำงาน ในวงจรเรียงกระแสจะประกอบไปด้วยบริดจ์ไดโอดที่รับแรงดันกระแสสลับจากหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้แล้วแปลงเป็นแรงดันกระแสตรง แล้วต่อบริดจ์ไดโอดเข้ากับตัวเก็บประจุเพื่อลดแรงดันรีปเปล เพื่อทำให้แรงดันกระแสตรงที่ออกมาเรียบมากขึ้น วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส

3.2.1.2 วงจรสวิตซ์กำลัง

วงจรสวิตซ์กำลัง ทำหน้าที่ในการสับให้แรงดันกระแสตรงที่จ่ายมาจากวงจรเรียงกระแส ผ่านอุปกรณ์สวิตซ์แต่ละตัว สร้างสัญญาณแรงดันเอาท์พุทที่มีลักษณะเป็นแรงดันกระแสสลับออกมา หรือก็คือวงจรอินเวอร์เตอร์ที่แปลงแรงดันกระแสตรงเป็นกระแสสลับนั่นเอง วงจรสวิตซ์กำลังนี้ ออกแบบโดยใช้หลักการของมัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบแคสเคดมีลติเซลล์อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ โดยผลงานวิจัยที่นำมาอ้างอิงบ่งชี้ว่า วงจรแคสเคดมีลติเซลล์อินเวอร์เตอร์ มีความผิดพลาด

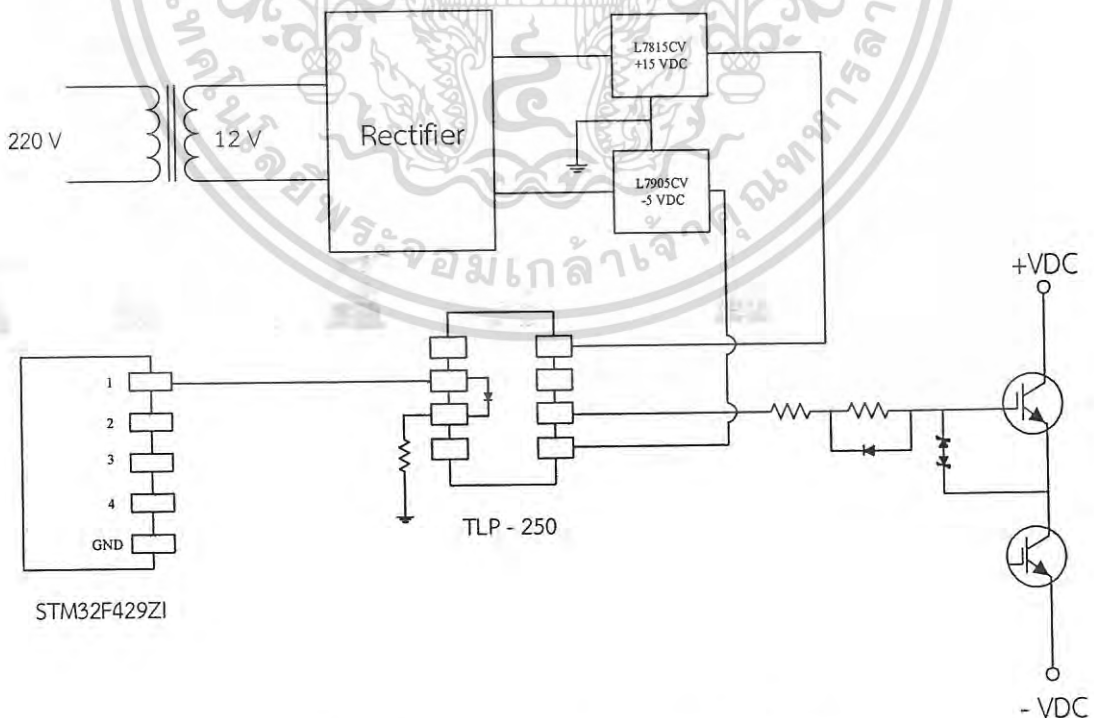
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์โมนิกกรมต่ำกว่าวงจรแบบอื่น โดยแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10 ซึ่งวงจรคาสเคสมีลติเซิลส์อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรฟูลบริดจ์ 2 วงจร ต่อคาสเคดกัน แต่ละวงจรประกอบไปด้วยอุปกรณ์ สวิตชิง 4 ตัว จากฟังก์ชันของวงจรเรียงกระแส อุปกรณ์สวิตชิงต้องสามารถทนแรงดันไบอัสตรงได้ มากกว่า 450 V จึงเลือกอุปกรณ์สวิตชิงเป็นไอจีบีที เบอร์ HGTG30N60C3D ซึ่งทนแรงดันไบอัสตรง ได้ 600 V จำนวน 8 ตัว โดยแต่ละตัวติดตั้งตัวระบายความร้อนขนาด กว้าง×ยาว×สูง เพื่อให้สามารถ ระบายความร้อนจากการสวิตช์ความถี่สูงได้เพียงพอ

นอกจากวงจรสวิตชิงพื้นฐานแล้ว ยังมีวงจรอีกสามส่วน คือ วงจรป้องกันแรงดัน เบรกคาวนของไอจีบีที โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดเพื่อป้องกันแรงดันเบรกคาวนย้อนกลับขาเกต วงจรตัว ต้านทานเกต เพื่อหน่วงเวลาไม่ให้อุปกรณ์สวิตชิงที่เป็นคู่อินเวอร์สทำงานพร้อมกัน และวงจร อาร์-ซี สนับเบอร์ สำหรับลดแรงดันโอเวอร์ชูทขณะสวิตชิง และลดเวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพของแรงดัน หลังจากการสวิตชิง

3.2.1.3 วงจรควบคุมการสวิตชิง

วงจรควบคุมการสวิตชิง ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของอุปกรณ์สร้างสัญญาณ ควบคุม สำหรับควบคุมลำดับการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิงในวงจรสวิตชิงกำลังให้เป็นไปตามที่ระบุ ไว้ในตารางที่ 2.1 เพื่อสร้างแรงดันเอาท์พุทให้เป็นไปตามที่ต้องการ สำหรับอุปกรณ์สร้างสัญญาณ ควบคุมนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F429ZI เป็นตัวประมวลผล โดยคำสั่งการควบคุม สัญญาณถูกเขียนขึ้นและป้อนลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB R2014a อีกส่วน หนึ่ง คือ วงจรสร้างแรงดันขับเคลื่อน เป็นวงจรที่ใช้สร้างแรงดันกระแสตรงเพื่อขับขาเกตของอุปกรณ์ สวิตชิงให้ทำงาน ลักษณะการต่อวงจรของวงจรควบคุมการสวิตชิงแสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 วงจรสมมูลของวงจรควบคุมการสวิตชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของวงจรสร้างแรงดันขับเคลื่อน พิกัดแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะถูกกำหนดจากอุปกรณ์สวิตซ์ที่เลือกใช้ คือ ไอจีบีที เบอร์ HG7G30N60C3D ซึ่งมีพิกัดแรงดันขับเคลื่อนอยู่ที่ ± 20 V ดังนั้นจึงเลือกให้วงจรสร้างแรงดันขับเคลื่อน สร้างแรงดันเอาต์พุตที่พิกัดด้านบวก +15 V และด้านลบ -5 V โดยที่วงจรสร้างแรงดันขับเคลื่อนจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

(1) หม้อแปลงลดระดับแรงดันกระแสสลับ โดยเลือกใช้ที่พิกัดแรงดัน 220/12 V

(2) วงจรเรียงกระแส สำหรับใช้สร้างแรงดันกระแสตรงขับเคลื่อน ซึ่งมีสองค่าแรงดัน คือ +15 V และ -5 V โดยมีอุปกรณ์ควบคุมแรงดันคงที่ เบอร์ L7815CV สำหรับควบคุมแรงดันให้อยู่ที่ +15 V และเบอร์ L7905CV สำหรับควบคุมแรงดันให้อยู่ที่ -5 V

(3) วงจรรับสัญญาณควบคุม โดยใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณด้วยแสง เบอร์ TLP-250 รับสัญญาณควบคุมที่มีแรงดัน 5 V จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ทางฝั่งอินพุตของอุปกรณ์ ส่งเป็นสัญญาณแสงไปทางด้านเอาต์พุตของอุปกรณ์ ให้แรงดันกระแสตรง +15 V และ -5 V ที่รับมาจากวงจรเรียงกระแสกำเนิดเป็นพัลส์ตามการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วไปขับเคลื่อนที่ไอจีบีที ซึ่งวงจรถังกล่าวนี้ ยังช่วยแยกวงจรสวิตซ์กำลังออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อไม่ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรสวิตซ์กำลังสามารถลัดวงจรถึงกันได้ ซึ่งชุดวงจรสร้างสัญญาณแรงดัน 1 ชุด จะสร้างแรงดันขับเคลื่อนให้ไอจีบีที 1 ตัว เพื่อให้ไอจีบีทีแต่ละตัวสามารถทำงานได้อย่างอิสระต่อกัน

3.2.1.4 ตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน

ตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน มีหน้าที่กรองความถี่ที่สูงกว่าความถี่มูลฐานออกไปจากสัญญาณแรงดันเอาต์พุต เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์มากที่สุด ตามมาตรฐานการทดสอบ ได้กำหนดแรงดันทดสอบให้มีความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมไม่เกิน ร้อยละ 2 ของขนาดแรงดันที่ความถี่มูลฐาน ในการออกแบบตัวกรองความถี่สำหรับคอนเวอร์เตอร์นี้ ใช้ผลการจำลองจากโปรแกรม MATLAB ประกอบกับผลการทดลองสัญญาณ โดยใช้อุปกรณ์วิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า Fluke 43 เพื่อวิเคราะห์หาความถี่สวิตซ์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ว่าที่ความถี่สวิตซ์ใด ทำให้เกิดลำดับฮาร์มอนิกใกล้เคียงกับความถี่มูลฐานมากที่สุด และอยู่ที่ลำดับเท่าไร เพื่อใช้ในการออกแบบตัวกรองความถี่ให้สามารถกรองฮาร์มอนิกได้ครอบคลุมทุกความถี่สวิตซ์ที่ใช้ในการทดลอง

จากการวิเคราะห์พบว่า ที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งเท่ากับ 2 kHz ทำให้เกิดลำดับฮาร์มอนิกใกล้เคียงกับความถี่มูลฐานมากที่สุด โดยอยู่ที่ความถี่ 7 เท่าของความถี่มูลฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.4 kHz ดังนั้น ในการออกแบบตัวกรองความถี่นี้จะคำนวณที่ความถี่ตัดเท่ากับ 600 Hz โดยกำหนดค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 13.2 mH สามารถหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในตัวกรองได้จาก

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

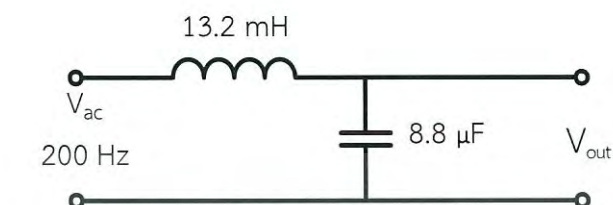
$$C > \frac{1}{(2\pi f^2)L} \quad (3.2)$$

$$C > \frac{1}{(2\pi \times 600^2) \times 13.2 \times 10^{-3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C > 5.33 \times 10^{-6}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด $8.8 \mu\text{F}$ และนำไปต่อเป็นตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่านตามวงจรในรูปที่ 3.23

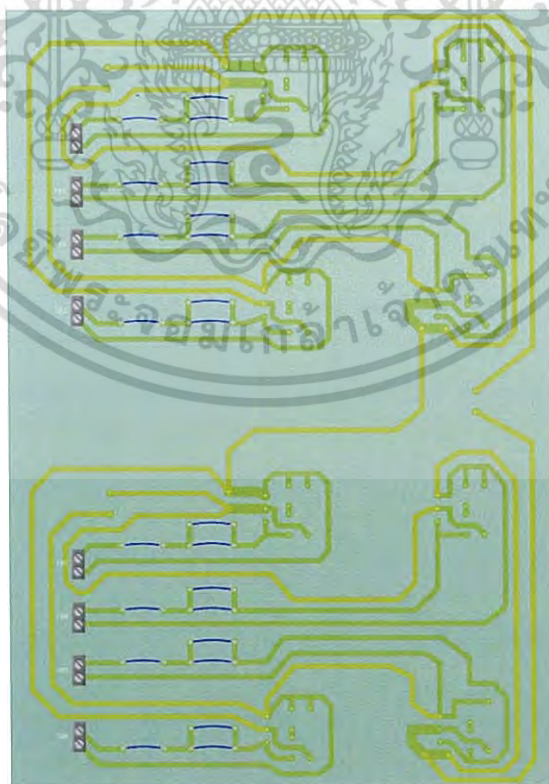


รูปที่ 3.23 วงจรสมมูลของวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน

3.2.2 ขั้นตอนการออกแบบและประกอบสร้าง

1) เลือกอุปกรณ์ในวงจรสวิตซ์กำลัง และวงจรสร้างแรงดันขับเกต วัดขนาดของอุปกรณ์ ระยะห่างระหว่างขาของอุปกรณ์ เพื่อนำไปออกแบบพิมพ์วงจรให้สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับแผ่นพิมพ์วงจรได้อย่างเหมาะสม

2) ออกแบบพิมพ์วงจรของวงจรสวิตซ์กำลัง และวงจรสร้างแรงดันขับเกต ด้วยโปรแกรม Circuit Wizard โดยคำนึงถึง ขนาดของวงจร ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ และความสามารถในการนำกระแสของตัวนำ ซึ่งจะได้ออกแบบพิมพ์วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.24

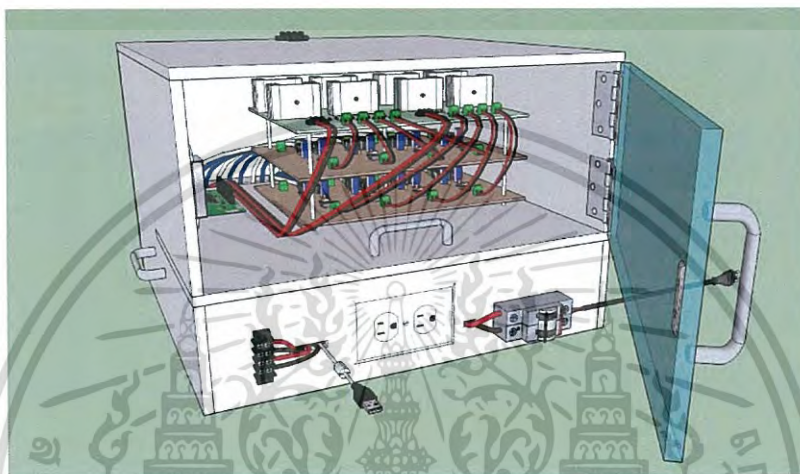


รูปที่ 3.24 แบบพิมพ์วงจรสวิตซ์กำลัง ด้วยโปรแกรม Circuit Wizard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

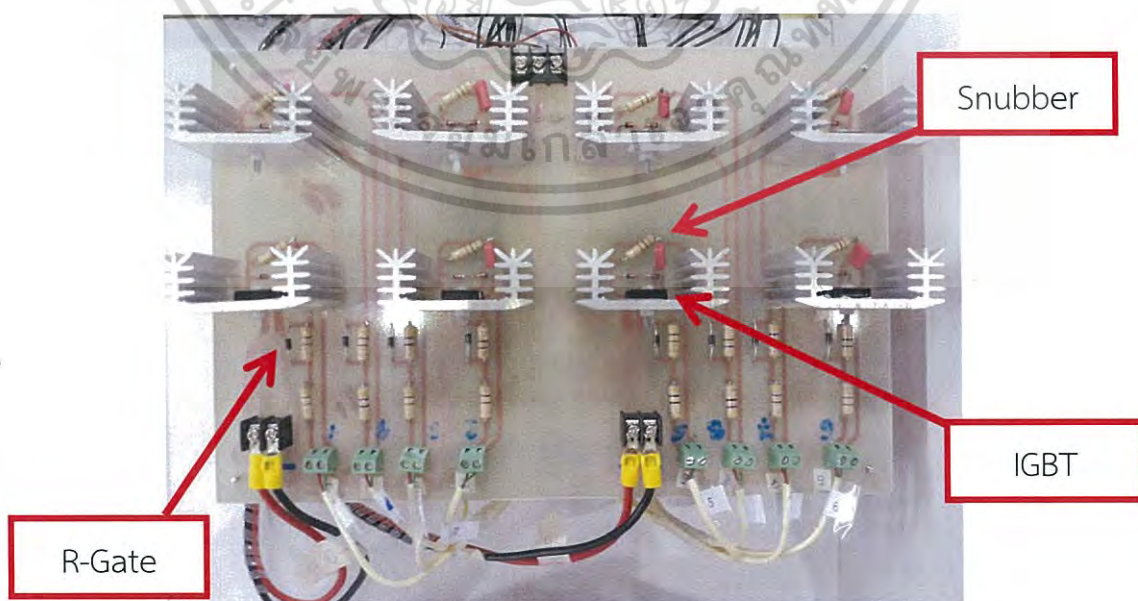
แบบพิมพ์วงจรสร้างแรงดันขับเคลื่อนจะมีด้วยกันสองชุด ชุดหนึ่งมีวงจรสร้างแรงดันขับเคลื่อน 4 วงจรที่เหมือนกันทุกประการ ส่วนแบบพิมพ์วงจรสวิตซ์กำลังมี 1 ชุด ประกอบไปด้วยวงจรฟูแลบริดจ์ 2 วงจร โดยที่แบบพิมพ์แต่ละชุด ออกแบบให้มีขนาดใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 17 x 27 cm

3) สร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SketchUp เพื่อให้สามารถจำกัดขนาดของอุปกรณ์ และจัดวางวงจรให้เหมาะสม โดยคำนึงถึงความสะดวกในการแก้ไขวงจร ความสะดวกในการเคลื่อนย้าย น้ำหนักของวงจร ความแข็งแรง และความสวยงาม แบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม SketchUp แสดงดังรูปที่ 3.25



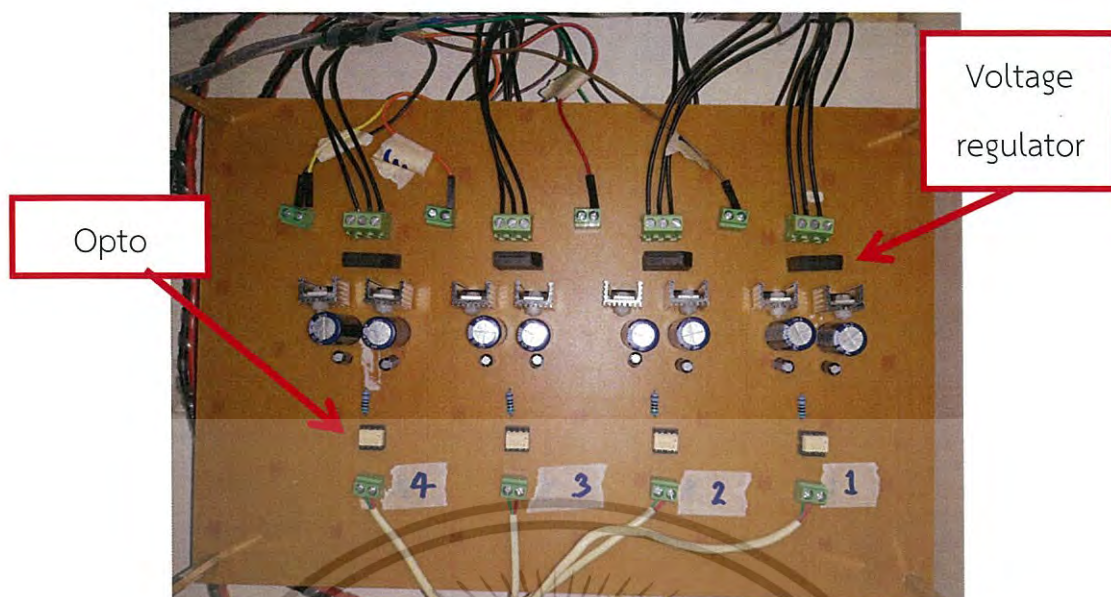
รูปที่ 3.25 แบบจำลองสามมิติของคอนเวอร์เตอร์แรงดันด้วยโปรแกรม SketchUp

4) พิมพ์แบบวงจรแต่ละชุดลงบนแผ่นตัวนำทองแดง ขนาด 21 x 30 cm (A4) จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์ และบัดกรีเชื่อมต่อกับวงจรตามทีออกแบบไว้ จะได้แผ่นวงจรสวิตซ์กำลังและแผ่นวงจรสร้างแรงดันขับเคลื่อนออกมาดังแสดงในรูปที่ 3.26 และ 3.27 ตามลำดับ



รูปที่ 3.26 แผ่นวงจรสวิตซ์กำลังในคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

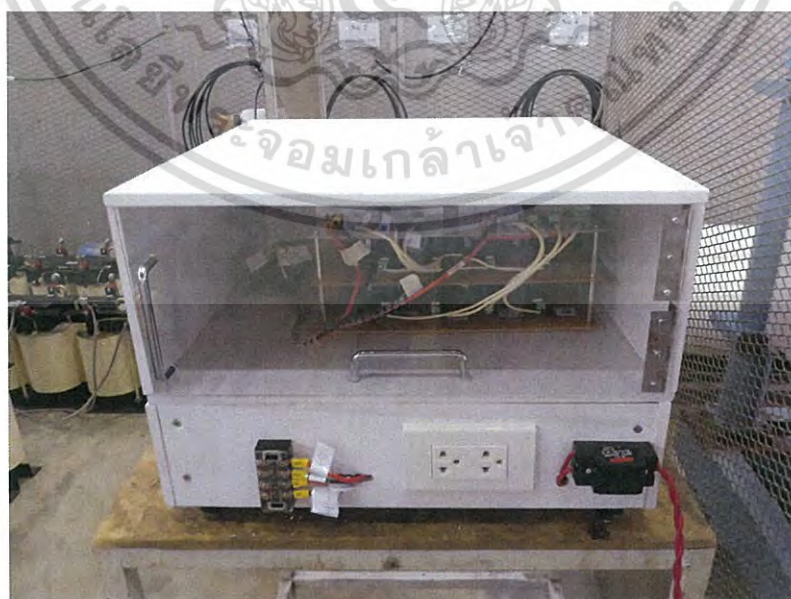


รูปที่ 3.27 แผงวงจรควบคุมการสวิตซ์ในคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่

5) เชื่อมต่อวงจรระหว่างแผงวงจรตามที่ย่อแบบไว้ แล้วทดสอบการทำงานของอุปกรณ์

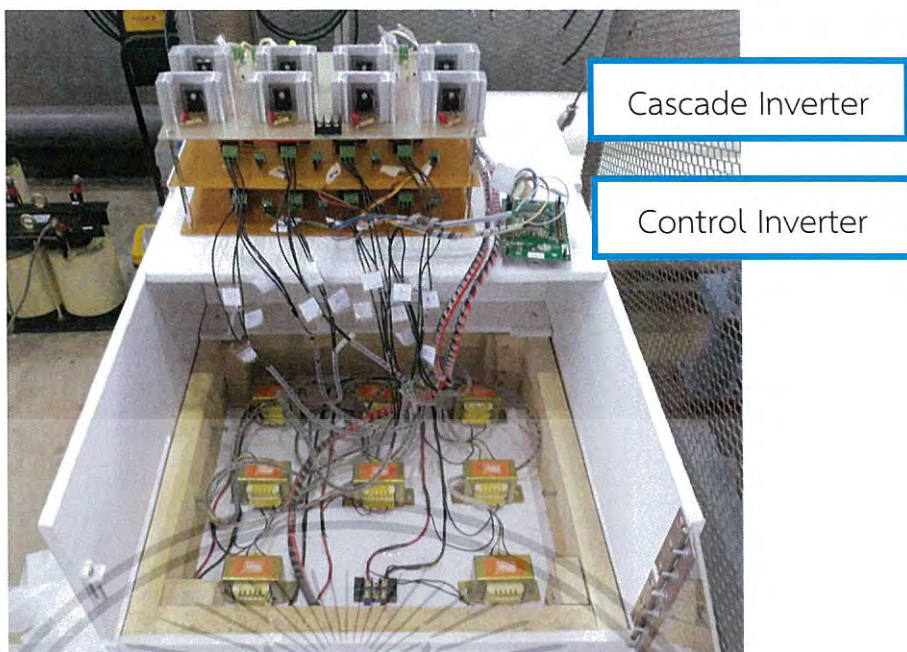
6) เมื่อทดสอบแล้วสามารถทำงานได้ตามที่ย่อแบบไว้ จากนั้นจึงประกอบโครงสร้างในลักษณะกล่องเพื่อติดตั้งวงจรทั้งหมดไว้ภายในตามที่ได้ย่อแบบไว้ ดังรูปที่ 3.25 ซึ่งกำหนดขนาดของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่อยู่ที่ 47x47x35 cm วัสดุที่นำมาใช้ประกอบเป็นกล่องคือ พลาสติก ซึ่งมีความแข็งแรง และมีน้ำหนักเบา

7) เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ และวงจรทั้งหมดลงในกล่องตามที่ย่อแบบไว้แล้ว จะได้คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.28 และ รูปที่ 3.29



รูปที่ 3.28 ภาพภายนอกของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 ภาพภายในของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

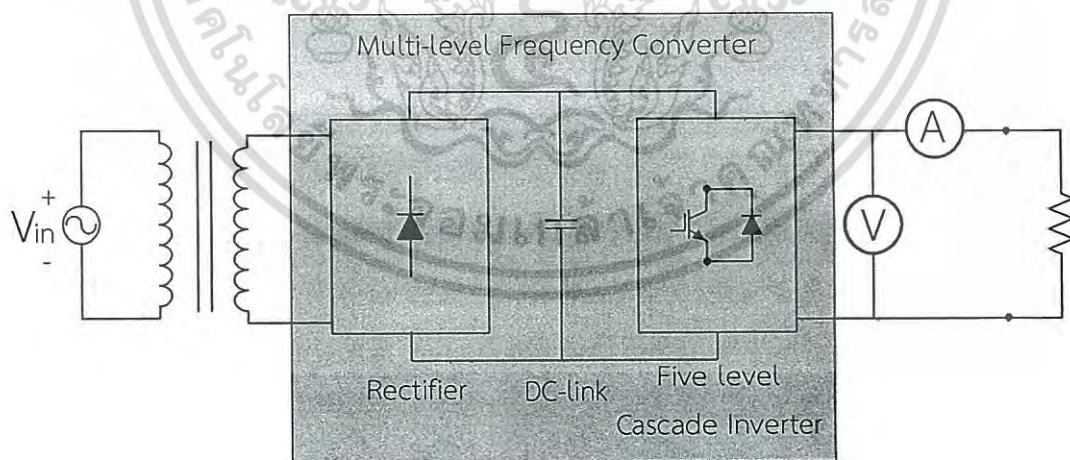
การทดสอบเครื่องต้นแบบ

ในบทนี้ กล่าวถึงการทดสอบการใช้งานคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ 200 Hz ที่ประกอบสร้างขึ้น โดยแบ่งเป็นสองการทดสอบ ซึ่งการทดสอบแรกเป็นการทดลองสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์โดยทำการต่อโหลดตัวต้านทาน 1,000 W มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบการใช้งานและศึกษารูปคลื่นที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ว่าสามารถทำงานตรงตามที่ยกแบบไว้หรือไม่

การทดสอบที่สอง เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงทดสอบ ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของโครงการชิ้นนี้

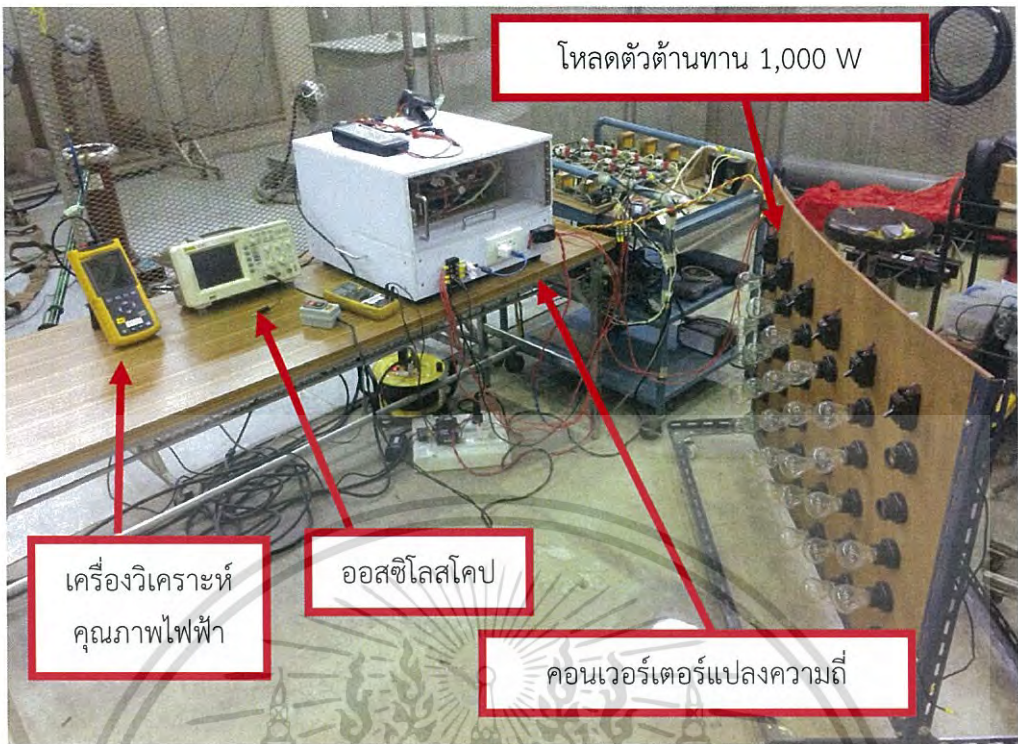
4.1 การทดสอบสัญญาณโดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน

การทดสอบทั้งหมดมี 15 สภาวะ จากการเปลี่ยนค่า 2 ตัวแปร คือ ค่าดัชนีมอดูเลตและความถี่สัญญาณพาหะ โดยใช้ดัชนีมอดูเลต 0.8, 1.0 และ 1.2 และความถี่สัญญาณพาหะ 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 16 kHz และ 20 kHz ซึ่งแต่ละสภาวะทำการจ่ายแรงดันให้คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ จนกระทั่งแรงดันกระแสตรงที่ตกคร่อม DC-link แต่ละชุดมีค่าเป็น 50 V จากนั้นทำการวัดค่ากระแสเอาต์พุต แรงดันเอาต์พุต และความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม แล้วบันทึกค่า



รูปที่ 4.1 วงจรสำหรับการทดสอบสัญญาณโดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การทดสอบสัญญาณโดยมีโหมลดเป็นตัวต้านทาน

ตารางที่ 4.1 แรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่

	<table border="0"> <tr> <td>$m_a = 0.8$</td> <td>$f_{tri} = 2 \text{ kHz}$</td> </tr> <tr> <td>$V_{dc,base}$</td> <td>$= 51.94 \text{ V}$</td> </tr> <tr> <td>$V_{dc,peak}$</td> <td>$= 55.46 \text{ V}$</td> </tr> <tr> <td>$V_{out,rms}$</td> <td>$= 57.5 \text{ V}$</td> </tr> <tr> <td>$I_{out,rms}$</td> <td>$= 1.90 \text{ A}$</td> </tr> <tr> <td>$\%THD_v$</td> <td>$= 33.4$</td> </tr> <tr> <td>$\%THD_i$</td> <td>$= 32.0$</td> </tr> </table>	$m_a = 0.8$	$f_{tri} = 2 \text{ kHz}$	$V_{dc,base}$	$= 51.94 \text{ V}$	$V_{dc,peak}$	$= 55.46 \text{ V}$	$V_{out,rms}$	$= 57.5 \text{ V}$	$I_{out,rms}$	$= 1.90 \text{ A}$	$\%THD_v$	$= 33.4$	$\%THD_i$	$= 32.0$
$m_a = 0.8$	$f_{tri} = 2 \text{ kHz}$														
$V_{dc,base}$	$= 51.94 \text{ V}$														
$V_{dc,peak}$	$= 55.46 \text{ V}$														
$V_{out,rms}$	$= 57.5 \text{ V}$														
$I_{out,rms}$	$= 1.90 \text{ A}$														
$\%THD_v$	$= 33.4$														
$\%THD_i$	$= 32.0$														
	<table border="0"> <tr> <td>$m_a = 0.8$</td> <td>$f_{tri} = 4 \text{ kHz}$</td> </tr> <tr> <td>$V_{dc,base}$</td> <td>$= 51.90 \text{ V}$</td> </tr> <tr> <td>$V_{dc,peak}$</td> <td>$= 54.98 \text{ V}$</td> </tr> <tr> <td>$V_{out,rms}$</td> <td>$= 58.40 \text{ V}$</td> </tr> <tr> <td>$I_{out,rms}$</td> <td>$= 1.91 \text{ A}$</td> </tr> <tr> <td>$\%THD_v$</td> <td>$= 32.5$</td> </tr> <tr> <td>$\%THD_i$</td> <td>$= 29.8$</td> </tr> </table>	$m_a = 0.8$	$f_{tri} = 4 \text{ kHz}$	$V_{dc,base}$	$= 51.90 \text{ V}$	$V_{dc,peak}$	$= 54.98 \text{ V}$	$V_{out,rms}$	$= 58.40 \text{ V}$	$I_{out,rms}$	$= 1.91 \text{ A}$	$\%THD_v$	$= 32.5$	$\%THD_i$	$= 29.8$
$m_a = 0.8$	$f_{tri} = 4 \text{ kHz}$														
$V_{dc,base}$	$= 51.90 \text{ V}$														
$V_{dc,peak}$	$= 54.98 \text{ V}$														
$V_{out,rms}$	$= 58.40 \text{ V}$														
$I_{out,rms}$	$= 1.91 \text{ A}$														
$\%THD_v$	$= 32.5$														
$\%THD_i$	$= 29.8$														

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	$m_a = 0.8$ $f_{tri} = 8 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 51.40 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 54.40 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 56.90 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 1.66 \text{ A}$ $\%THD_v = 25.4$ $\%THD_i = 22.2$
	$m_a = 0.8$ $f_{tri} = 16 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 51.90 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 54.90 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 55.30 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 1.75 \text{ A}$ $\%THD_v = 3.6$ $\%THD_i = 12.4$
	$m_a = 0.8$ $f_{tri} = 20 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 52.25 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 55.90 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 55.60 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 1.80 \text{ A}$ $\%THD_v = 4.3$ $\%THD_i = 6.4$
	$m_a = 1$ $f_{tri} = 2 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 52.94 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 54.90 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 72.2 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 2.10 \text{ A}$ $\%THD_v = 27.8$ $\%THD_i = 26.0$

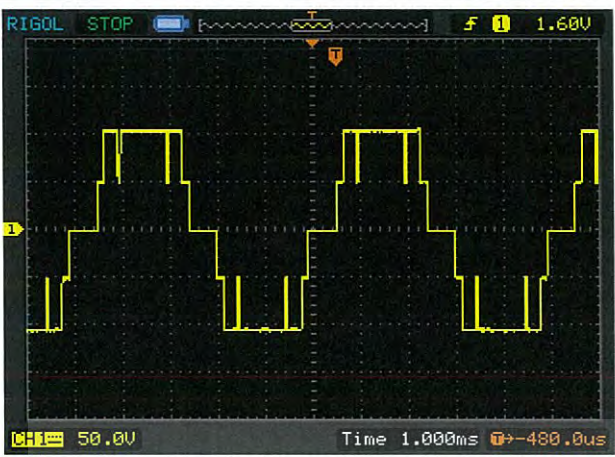
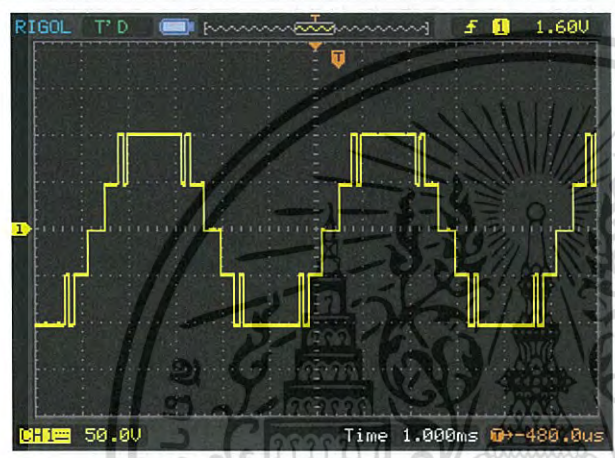
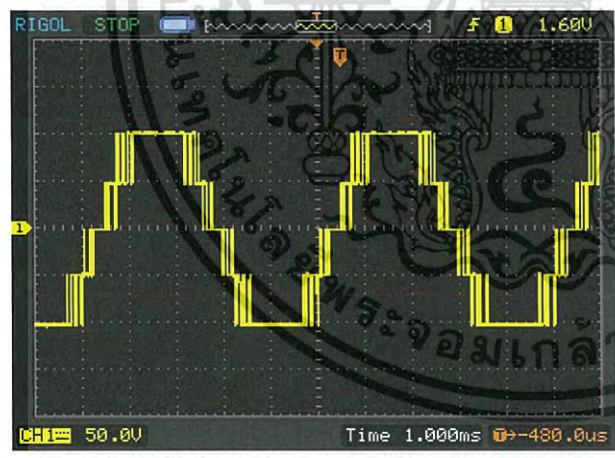
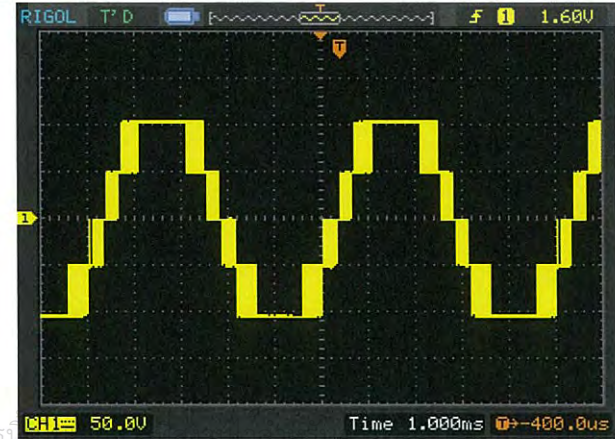
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	$m_a = 1$ $f_{tri} = 4 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 51.92 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 53.84 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 71.60 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 2.10 \text{ A}$ $\%THD_v = 20.3$ $\%THD_i = 19.1$
	$m_a = 1$ $f_{tri} = 8 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 52.34 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 54.24 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 70.0 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 2.09 \text{ A}$ $\%THD_v = 16.3$ $\%THD_i = 15.0$
	$m_a = 1$ $f_{tri} = 16 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 51.40 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 53.56 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 69.4 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 1.99 \text{ A}$ $\%THD_v = 2.4$ $\%THD_i = 3.0$
	$m_a = 1$ $f_{tri} = 20 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 52.67 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 54.65 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 70.7 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 2.01 \text{ A}$ $\%THD_v = 3.3$ $\%THD_i = 4.0$

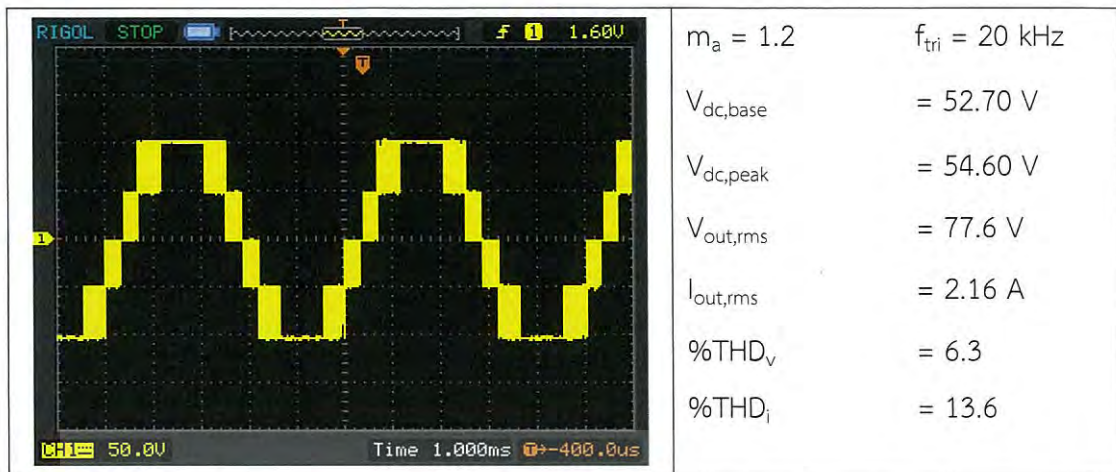
เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	$m_a = 1.2$ $f_{tri} = 2 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 53.67 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 54.54 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 80.2 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 2.23 \text{ A}$ $\%THD_v = 22$ $\%THD_i = 22.3$
	$m_a = 1.2$ $f_{tri} = 4 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 51.66 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 53.30 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 79.5 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 2.19 \text{ A}$ $\%THD_v = 17.1$ $\%THD_i = 20.1$
	$m_a = 1.2$ $f_{tri} = 8 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 52.01 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 53.57 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 78.8 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 2.17 \text{ A}$ $\%THD_v = 17.1$ $\%THD_i = 20.1$
	$m_a = 1.2$ $f_{tri} = 16 \text{ kHz}$ $V_{dc,base} = 53.15 \text{ V}$ $V_{dc,peak} = 54.68 \text{ V}$ $V_{out,rms} = 78.8 \text{ V}$ $I_{out,rms} = 2.19 \text{ A}$ $\%THD_v = 6.9$ $\%THD_i = 13.8$

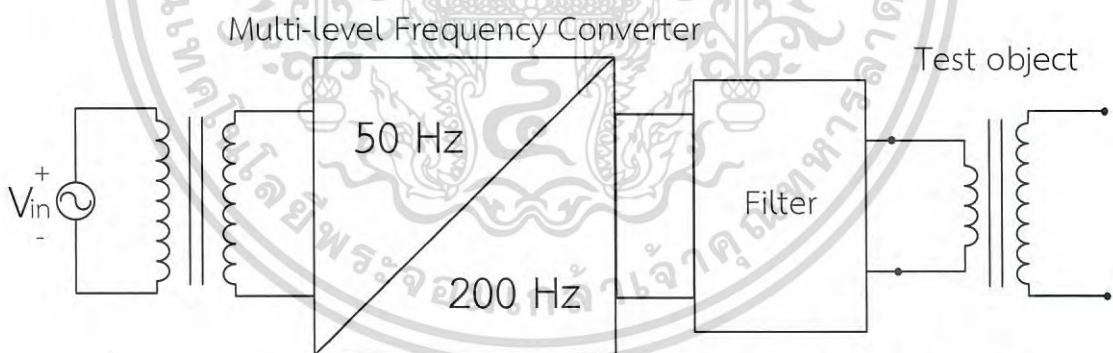
เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



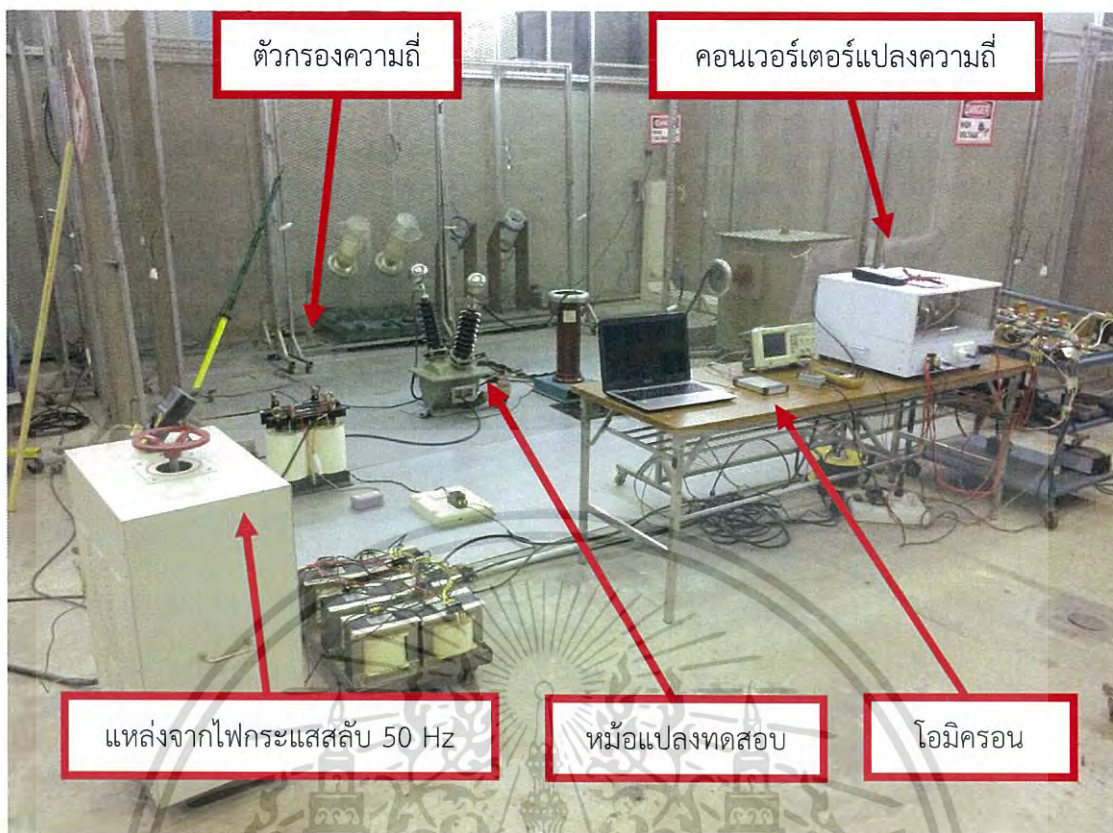
4.2 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลง

ในการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงแบ่งเป็นสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และขั้นตอนที่สองเป็นการนำสัญญาณที่ได้จากขั้นตอนแรกไปทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 50 VA และมีพิกัดแรงดัน 110V/22kV



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


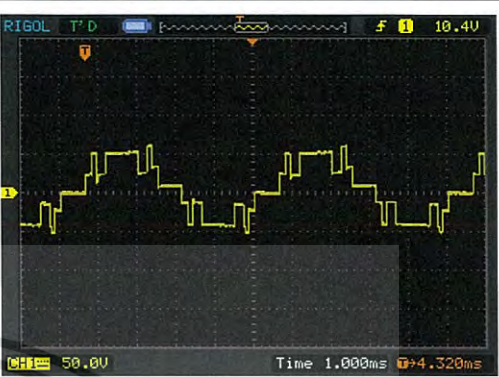

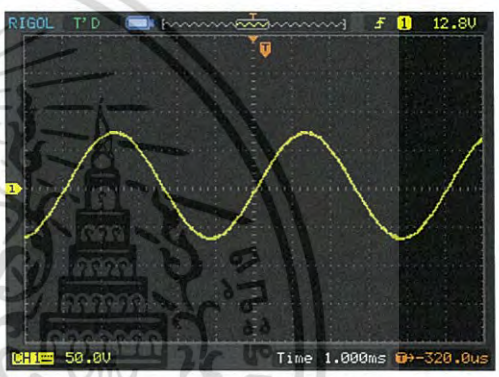
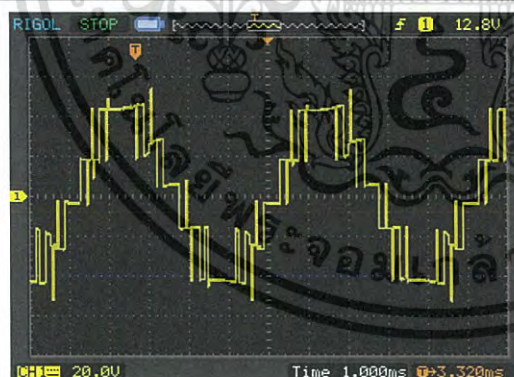
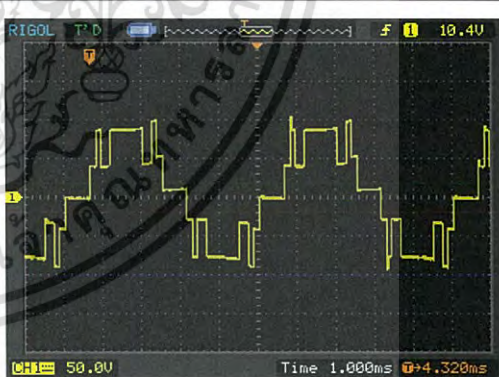
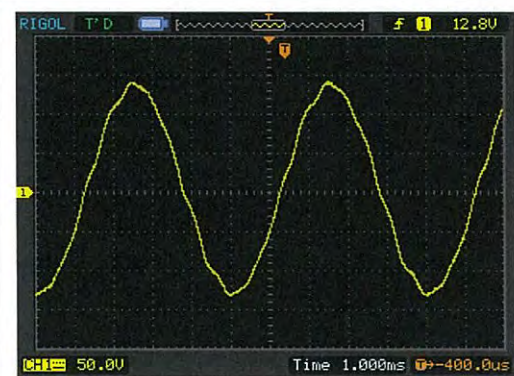
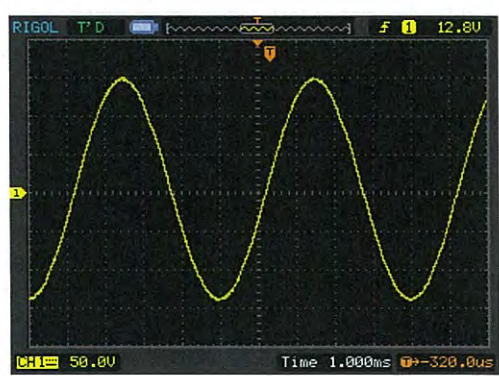


รูปที่ 4.4 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลง

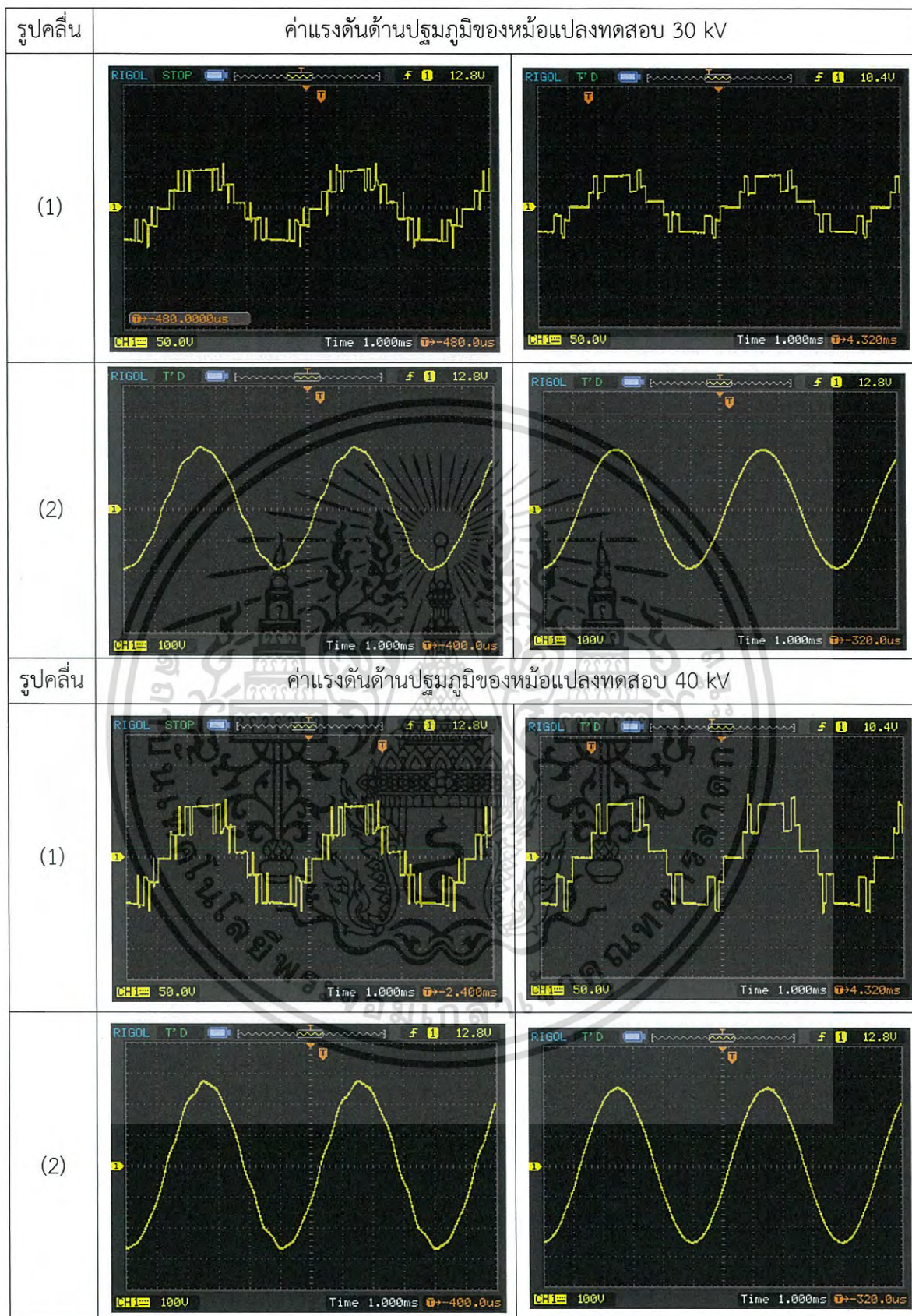
4.2.1 การเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์

จุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันหลังจากผ่านตัวกรองความถี่ โดยมีค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1 ความถี่สัญญาณพาหะเท่ากับ 2 kHz และ 4 kHz ที่แรงดันทดสอบต่างๆ วิธีการทดสอบคือป้อนสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วเพิ่มระดับแรงดันอินพุตจนกระทั่งวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงได้ 10 kV, 20 kV, 30 kV และ 40 kV ด้วยเครื่องโอมิครอน เอ็มพีดี 600 (OMICRON MPD 600) และทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทก่อนผ่านตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน, รูปคลื่นแรงดันเมื่อผ่านตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน, รูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ และค่าความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดัน

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตก่อนและหลังผ่านตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน

รูปคลื่น	ความถี่สวิตซ์ 2 kHz	ความถี่สวิตซ์ 4 kHz
	ค่าแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ 10 kV	
(1)		
(2)		
รูปคลื่น	ค่าแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ 20 kV	
(1)		
(2)		

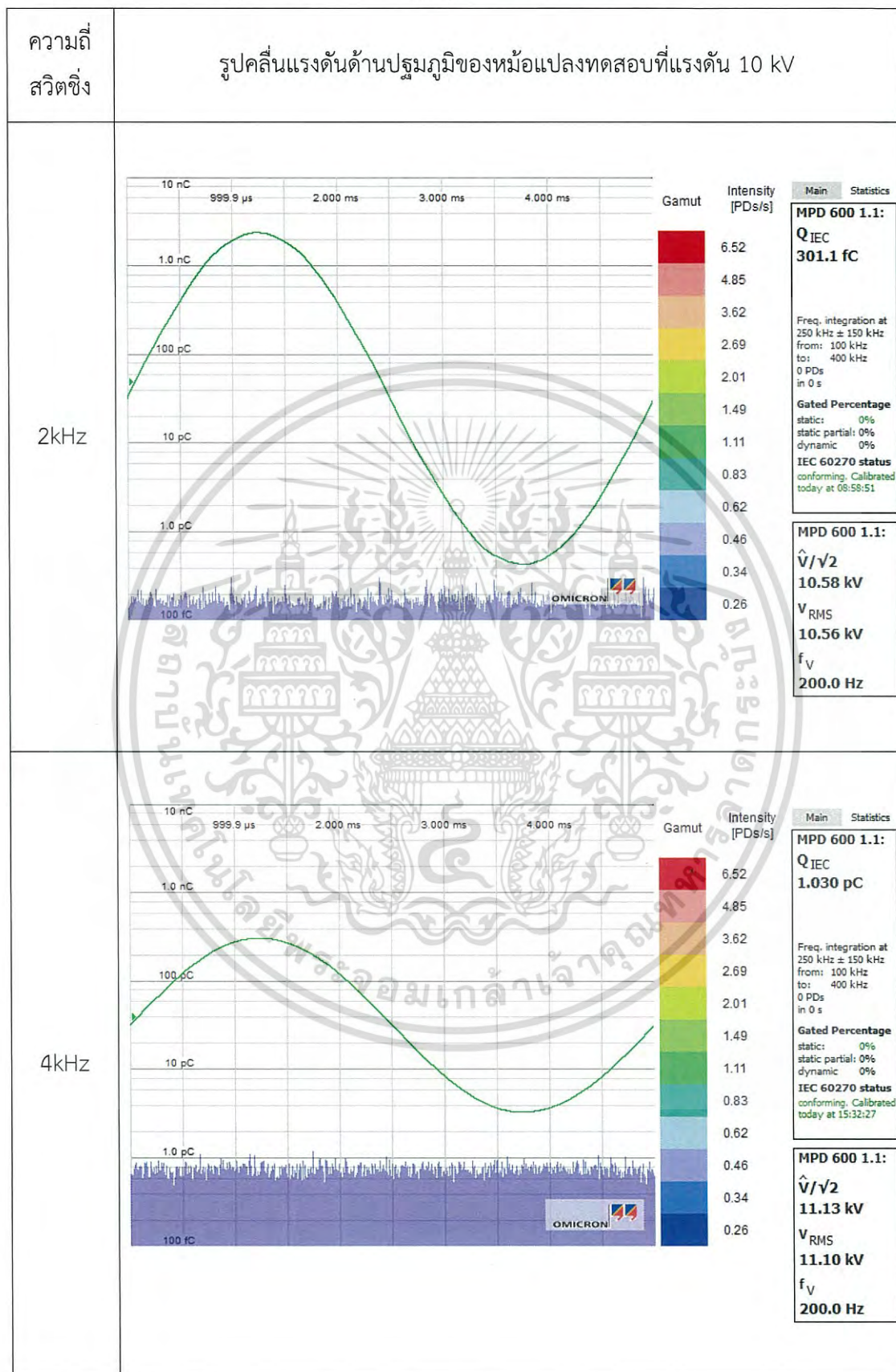
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



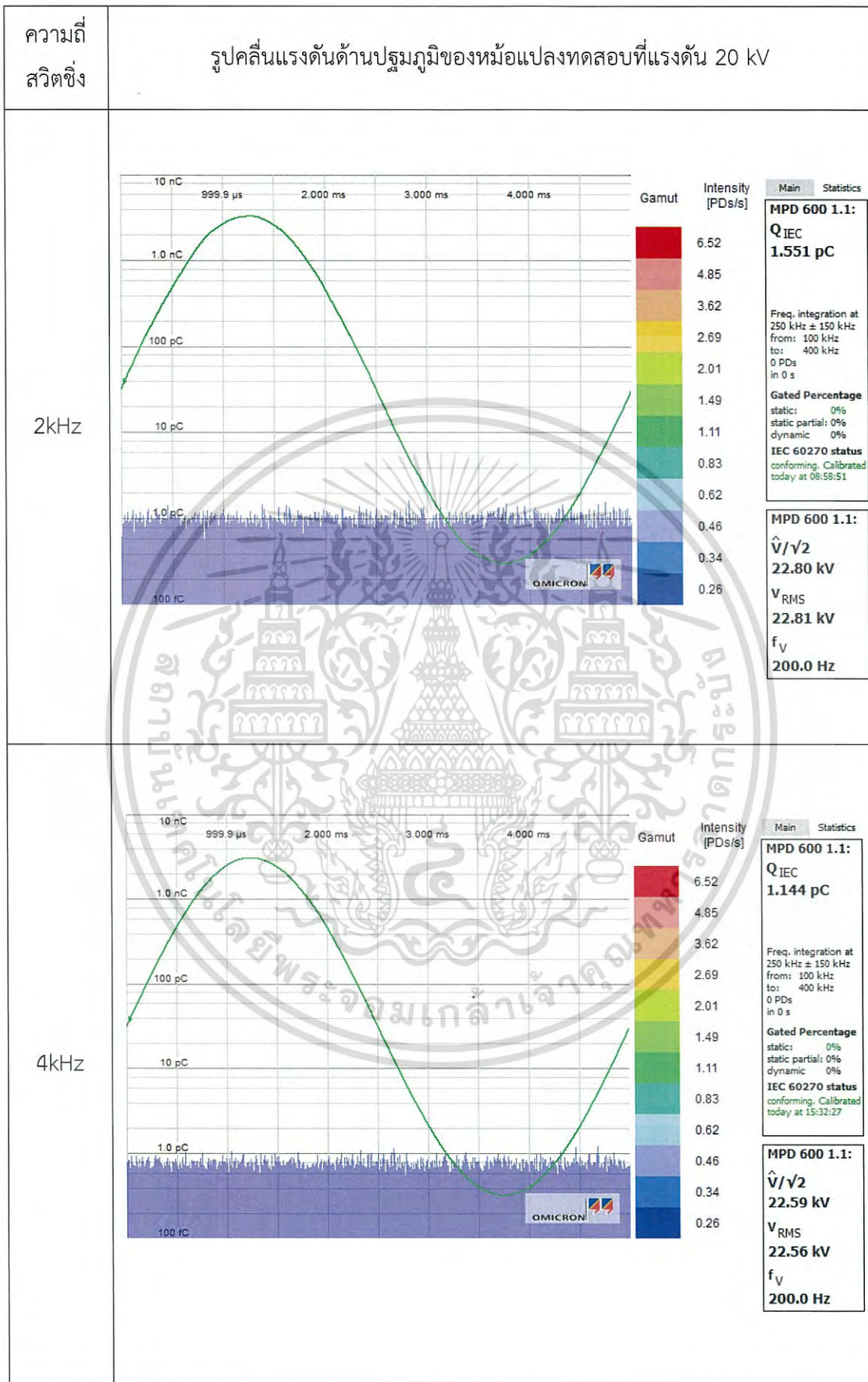
หมายเหตุ รูปคลื่น (1) รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตก่อนผ่านตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน
รูปคลื่น (2) รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตเมื่อผ่านตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

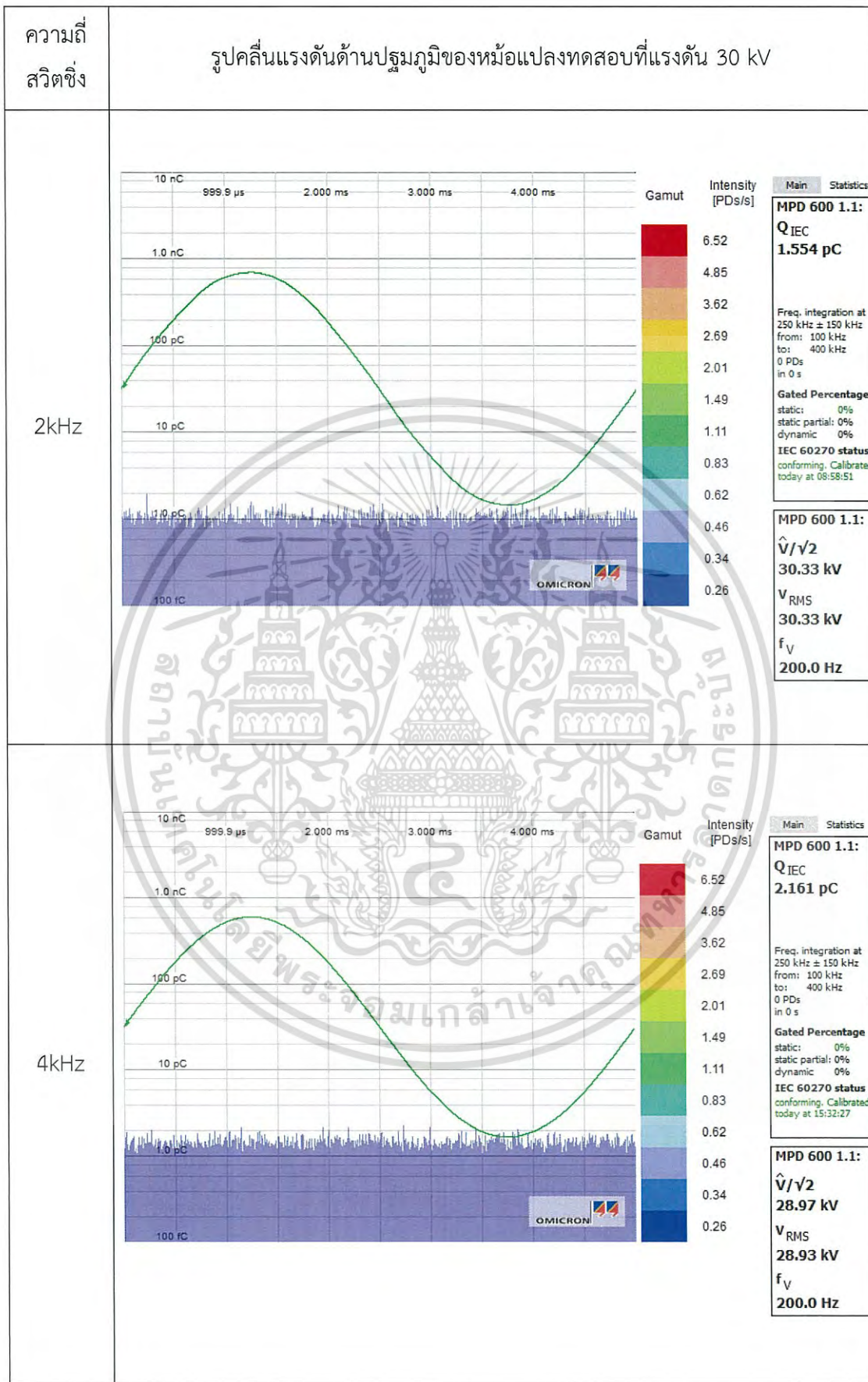
ตารางที่ 4.3 บันทึกรูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบที่แรงดัน 10 kV



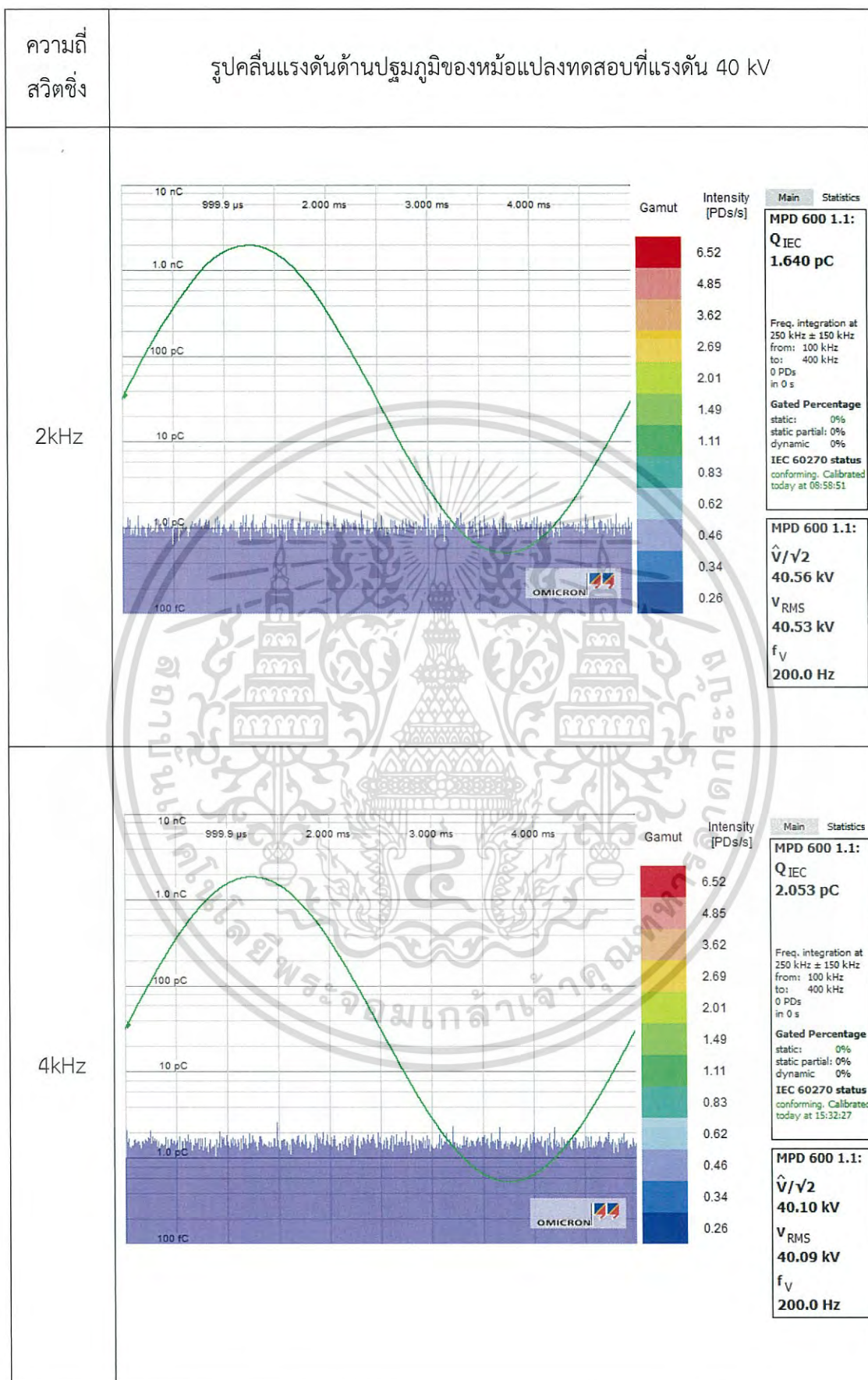
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 บันทึกค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดัน (%THD_v)

แรงดันด้าน ปฐมภูมิของ หม้อแปลงทดสอบ (kV)	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดัน (%THD _v)			
	ความถี่สวิตซ์ 2 kHz		ความถี่สวิตซ์ 4 kHz	
	หลังวงจรกรอง	หลังหม้อแปลง ทดสอบ	หลังวงจรกรอง	หลังหม้อแปลง ทดสอบ
10	3.2	-	3.4	-
20	3.0	1	3.2	1.2
30	2.9	0.8	3.0	0.8
40	2.8	0.6	2.9	0.6

สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์พบว่าสัญญาณควบคุมทั้งสอง มีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกที่วัดได้เมื่อผ่านตัวกรองความถี่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการทดสอบการเหนี่ยวนำในหม้อแปลงจึงเลือกใช้สัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ที่มีค่าดัชนีการมอดูเลตเป็น 1 และความถี่สัญญาณพาหะเป็น 2 kHz

4.2.2 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลง

ในการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงมีข้อกำหนดเกี่ยวกับแรงดันที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Work Practice SP0508) ในการทดสอบนี้ จะเลือกใช้สัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์ที่มีค่าดัชนีการมอดูเลตเป็น 1 และมีความถี่สัญญาณพาหะเป็น 2 kHz แล้วทำการทดสอบโดยเพิ่มระดับแรงดันอินพุตจนกระทั่งเครื่องโอมิครอนวัดค่าแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบได้ 50 kV และทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์, รูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดัน

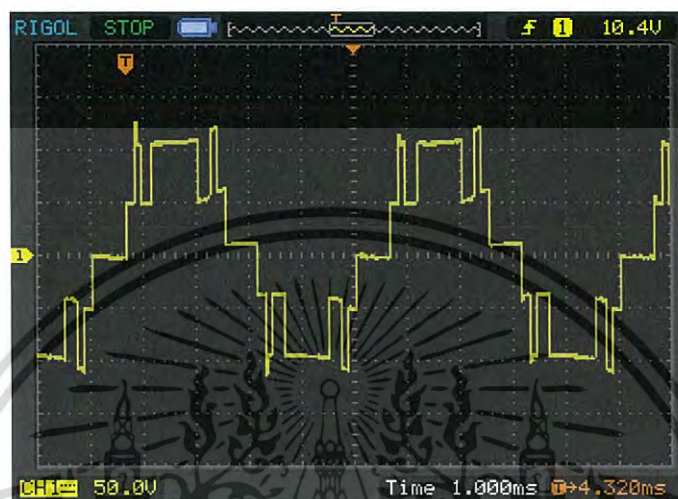
ตารางที่ 4.5 แรงดันมาตรฐานสำหรับทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

U _{rated}	U _{test}	
	100%	80%
24 kV	50 kV	40 kV

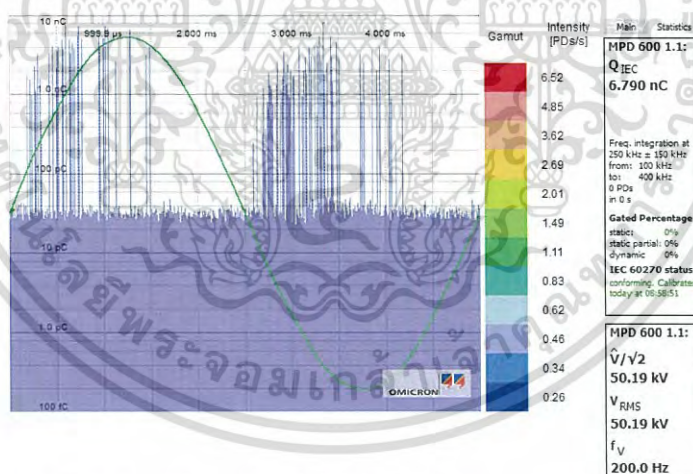
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ

บันทึกรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ และรูปคลื่นแรงดันเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ เมื่อแรงดันเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิเป็น 50 kV ตามที่มาตรฐานกำหนด จะได้ผลลัพธ์ ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ

สรุปผลการทดสอบ

คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้สามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตที่นำไปทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงได้ โดยแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำกว่าร้อยละ 2 ของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้ สามารถใช้ทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงได้ตามที่มาตรฐานกำหนด โดยพบว่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมสำหรับวงจร เป็นสัญญาณที่มีดัชนีมอดูเลตเท่ากับ 1 และความถี่สัญญาณพาหะเท่า 2 kHz ซึ่งสัญญาณนี้เมื่อนำไปต่อตัวกรองความถี่ที่ได้ออกแบบไว้ พบว่าสามารถสร้างสัญญาณแรงดันที่มีความถี่ 200 Hz พิกัดแรงดันได้ตามที่ออกแบบและมีค่าความผิดพลาดรวมต่ำกว่าร้อยละ 2 ของแรงดันที่ความถี่มูลฐานตามที่มาตรฐานกำหนด นอกจากนี้ สัญญาณควบคุมดังกล่าวมีค่าความถี่สัญญาณพาหะที่ให้สัญญาณใกล้เคียงรูปไซน์และมีค่าความถี่สวิตซ์ต่ำที่สุด ทำให้กำลังสูญเสียจากการสวิตซ์ของอุปกรณ์สวิตซ์มีค่าต่ำ รวมถึงการที่สัญญาณควบคุมมีค่าดัชนีมอดูเลตเท่ากับ 1 ก็จะทำให้สามารถกรองฮาร์มอนิกได้ง่ายและได้กำลังไฟฟ้าเท่าเดิม

5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข

1. คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบนี้ไม่มีระบบป้องกัน เมื่อทำการขึ้นระดับแรงดันไปจนถึงระดับหนึ่ง หม้อแปลงไฟฟ้าอาจเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นได้ ซึ่งส่งผลเสียต่อหม้อแปลงและอุปกรณ์ทดสอบ ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงควรติดตั้งอุปกรณ์ตัดต่อวงจรภายนอกของคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ รวมถึงป้องกันกระแสไหลย้อนกลับ
2. คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบนี้ไม่มีระบบระบายความร้อน ดังนั้น เมื่อทำการขึ้นแรงดันสูง จะส่งผลให้กระแสมีค่าสูงขึ้น เป็นเหตุให้อุณหภูมิของอุปกรณ์สวิตซ์สูง และทำให้คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่มีอายุการใช้งานลดลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] มาตรฐานหม้อแปลงไฟฟ้า. (ออนไลน์).
แหล่งที่มา : www.coe.or.th. 3 กันยายน 2560
- [2] แคทรียา สุวรรณศรี, “การพัฒนาและสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูง 50 kV,” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2554.
- [3] Insulation Dielectric Test of Transformer. (ออนไลน์)
แหล่งที่มา : www.electrical4u.com. 3 กันยายน 2560
- [4] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “เทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [5] N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robins, *Power Electronics Converter, Application and Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [6] วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 13, กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินต์ติ้ง, 2555
- [7] Andreas Nordvall, “Multilevel Inverter Topology Survey,” Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, 2011.
- [8] ธนภัทร ลิ่มเล็ก, ธัญชัย จงประสพทรัพย์ และ ธนัท โฆษิตเรืองชัย, “หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับโซลาร์ฟาร์ม,” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [9] Xiaojie Shi and et al, “A Comparison of Phase Disposition and Phase Shift PWM Strategies for Modular Multilevel Converters,” Center for Ultra-wide-area Resilient Electric Energy Transmission Networks (CURENT), Department of Electrical Engineering and Computer Science, The University of Tennessee, 2013
- [10] วณิชชา ศรีภูวง, อิทินพ พันธุ์เยี่ยม และศุภกฤต คำแปง, “การประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนในหม้อแปลง,” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [11] *Power Electronics - Switching Devices* (ออนไลน์)
แหล่งที่มา: www.tutorialspoint.com . 6 กันยายน 2560
- [12] Michael J. Roberts, *Signals and Systems Analysis Using Transform Methods and MATLAB*, Second Edition, New York: Ragothaman Srinivasan, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [13] Khaled H. Ahmed, Stephen J. Finney and Barry W. Williams, “Passive Filter Design for Three-Phase Inverter Interfacing in Distributed Generation,” Department of Electronic & Electrical, Strathclyde University, 2007.
- [14] Rudy Severns, Design of Circuits for Power Circuits, Application Note written for Cornell Dubilier Electronics, Inc. (ออนไลน์)
แหล่งที่มา : www.cde.com/tech/design.pdf . 5 กันยายน 2560



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่สำหรับการทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำในหม้อแปลง

Frequency Converter for Induced Voltage Test on Transformer

ภูริศ ศรีสุวรรณ วรกร แจ่มจำรัส สาวินี คงเหลม และ สุคารัตน์ ศรีสุกใส

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย 1 คลองกรุง 1 กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 925 E-mail: prasopchok_ho@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ที่คิด 200 Hz สำหรับการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยคอนเวอร์เตอร์นี้ใช้โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ชนิดคลาสเคด แบบ 5 ระดับ และมีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์สร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบเฟสดีสทอร์ชันสำหรับวงจรสวิตซ์กำลัง ใช้โปรแกรม MATLAB จำลองสัญญาณควบคุมเพื่อทำการวิเคราะห์ลำดับฮาร์โมนิก จากการจำลองผลพบว่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมมีค่าดัชนีมอดูเลตเท่ากับ 1 และความถี่คลื่นสัญญาณพาหะเท่ากับ 2 kHz จากนั้น นำคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้ไปทำการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่มีพิกัดกำลัง 50 VA และพิกัดแรงดัน 110V/22kV ซึ่งผลการทดสอบที่ได้คือ คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้สามารถทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ตามมาตรฐานที่กำหนด คำสำคัญ การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า, มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์, เทคนิคการมอดูเลต, การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Abstract

This paper presents a design and construction of multilevel frequency converter with frequency of 200 Hz for induced voltage test on high-voltage transformers. The Converter based on the cascade multi-cell inverter technique with 5 voltage levels and use microcontroller to generate control signal for the converter. The control signal is made by Phase Distortion Pulse Width Modulation technique and use MATLAB program to analyze harmonic. In simulation. From the results, the control signal with modulation index of 1 and frequency of 2 kHz is the most appropriate signal. This frequency converter was applied in induced voltage test of high-voltage transformers with frequency of 200 Hz. The transformer rating are 50 kVA and 110V/22kV. The converter has promising ability for testing high-voltage transformers according to the standard requirement.

Key word Transformer test, Cascade multi-cell inverter, Modulation technique, Induced voltage test

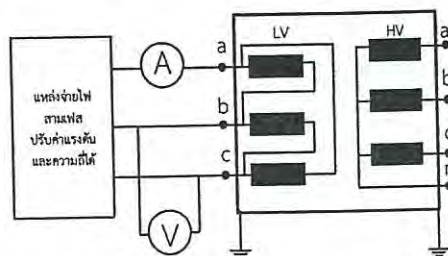
1. บทนำ

การใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายนั้น หม้อแปลงไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบจากความเครียดสนามไฟฟ้า และแรงดันเกินเนื่องจากการตัดวงจรหรือการเกิดฟ้าผ่า ดังนั้น จึงต้องมีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 60076-3 การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำ (Induced AC voltage test) เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า ปัญหาของการทดสอบนี้คือ จะต้องเพิ่มแรงดันที่ประมาณสองเท่าของค่าพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งส่งผลให้แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการอิ่มตัวและไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันทดสอบได้ตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการเพิ่มความถี่ของแรงดันที่ทดสอบเพื่อให้สามารถเพิ่มแรงดันทดสอบให้มีค่าสูงขึ้นได้ แต่เนื่องจากการใช้แหล่งจ่ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีราคาสูง เนื่องจากต้องมีการออกแบบโดยเฉพาะ รวมทั้งมีน้ำหนักมาก ใช้พื้นที่มากและต้องมีการดูแลรักษาเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้เพื่อสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ปรับความถี่ได้หลายระดับ ซึ่งจะมีข้อดีคือราคาถูก น้ำหนักเบา และใช้พื้นที่น้อย

2. วัตถุประสงค์ที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [1]

หลักการทดสอบ หากแรงดันทดสอบ (U_p) ที่ใช้ในการทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสองเท่าหรือมากกว่าแรงดันพิกัดของแรงดันด้านแรงสูง อาจส่งผลให้เกิดการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กจนไม่สามารถทำการปรับระดับแรงดันให้สูงขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 1 วงจรทดสอบความคงทนของฉนวน

ต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบจะเริ่มด้วยการจ่ายไฟเข้าที่ด้านแรงดันต่ำจากแหล่งจ่ายไฟสามเฟสที่สามารถปรับค่าแรงดันและความถี่ได้ โดยเริ่มปรับค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าหนึ่งในสามของแรงดันไฟฟ้าทดสอบสูงสุด และจะเพิ่มระดับแรงดันขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าที่ต้องการทดสอบ

การทดสอบจะประสบความสำเร็จหากไม่มีการเบรกความถี่ขึ้นที่แรงดันทดสอบสูงสุดระหว่างการทดสอบ โดยระยะเวลาในการทดสอบนั้น จะต้องคำนวณตามสมการที่ 2.1

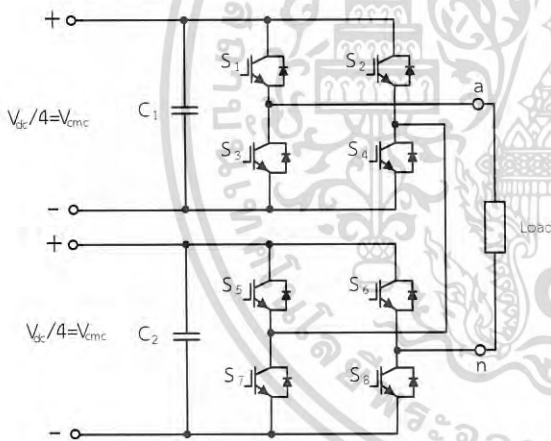
$$t = \frac{120 f_r}{f_p} \tag{2.1}$$

เมื่อ t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

f_r คือ ความถี่พิกัดของหม้อแปลงทดสอบ

f_p คือ ความถี่พิกัดของแหล่งจ่ายไฟสำหรับการทดสอบ

2.2 อินเวอร์เตอร์แบบกาสเตด [2]



รูปที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกาสเตด 5 ระดับ

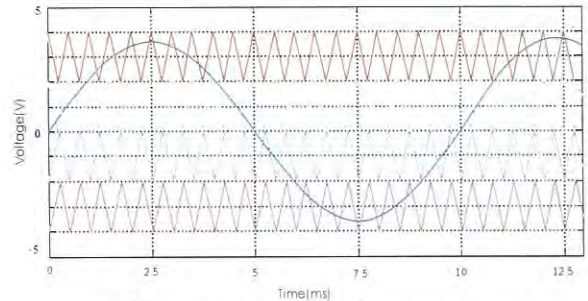
โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบกาสเตดซึ่งแสดงในรูปที่ 2 ข้อดีของโครงสร้างแบบกาสเตดคือใช้จำนวนส่วนประกอบน้อยต่อระดับแรงดันต่างๆ สามารถทำการสวิตช์แบบซอฟต์แวร์ได้และสามารถสมดุลแรงดันได้ง่าย ข้อด้อยคือต้องใส่แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแยกกันสำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าจริงและไม่มีคอมมอนดีซีบัส

2.3 เทคนิคการมอดูเลตหลายระดับ [2]

เทคนิคที่ใช้เพื่อลดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของสัญญาณเอาต์พุตโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์มีอยู่ 2 แบบคือ เทคนิคการเลื่อนเฟส (Phase Shifted Carrier PWM: PSCPWM) และเทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสดีสทอร์ชัน (Phase Distortion PWM: PDPWM) โดยเทคนิคแบบ PDPWM จะให้ความสำคัญผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตน้อยกว่าเทคนิคแบบ PSCPWM ภายใต้ภาวะปกติ [3]



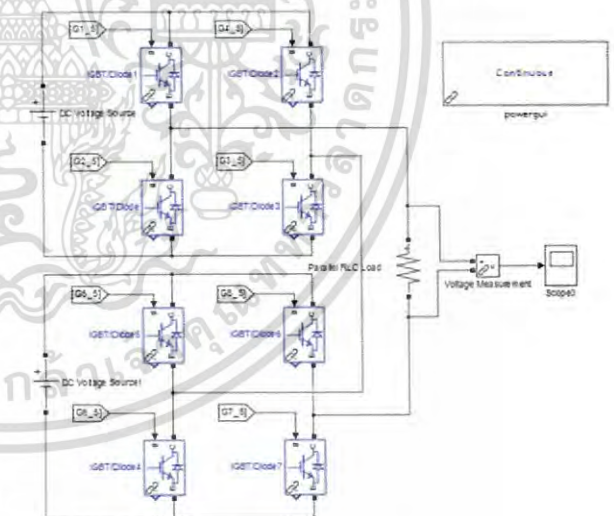
รูปที่ 3 เทคนิคเฟสดีสทอร์ชัน ที่แรงดัน 5 ระดับ

3. การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 การจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB

การจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดกาสเตด 5 ระดับ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองผล ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดกาสเตด 5 ระดับ และวงจรสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PSPWM ดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

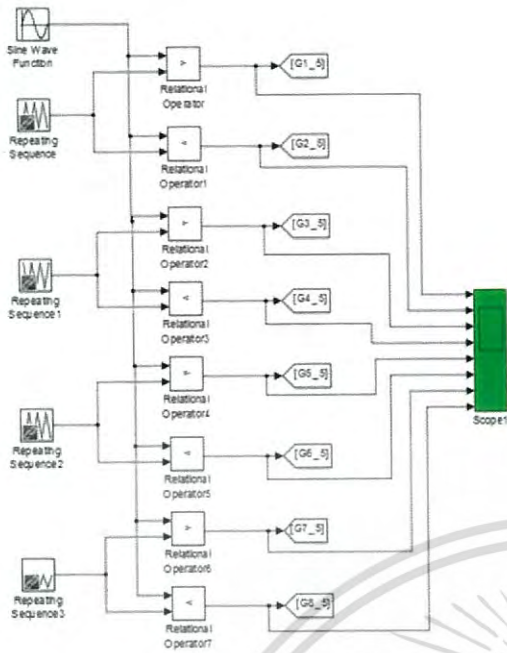
3.1.1 วงจรสัญญาณควบคุม แบบ PSPWM



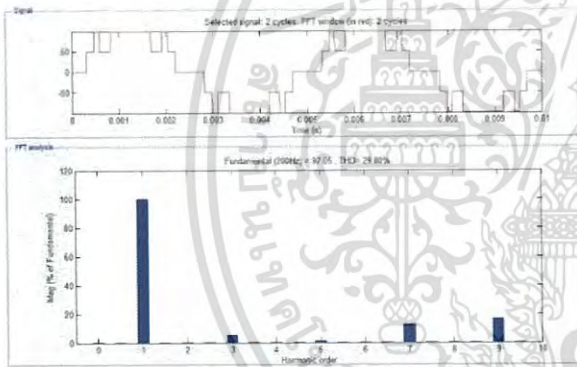
รูปที่ 4 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดกาสเตด 5 ระดับ

ตารางที่ 2 ผลการจำลอง การวิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเมื่อค่อคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบเข้ากับวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่าน

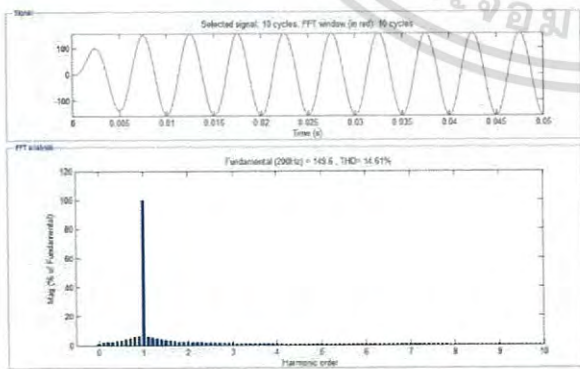
m_a	$f_{carrier}$ (Hz)	Fundamental (Hz)	%THDv
1	2k	149.60	14.61
	4k	154.60	14.65



รูปที่ 5 วงจรสัญญาณควบคุม แบบ PSPWM



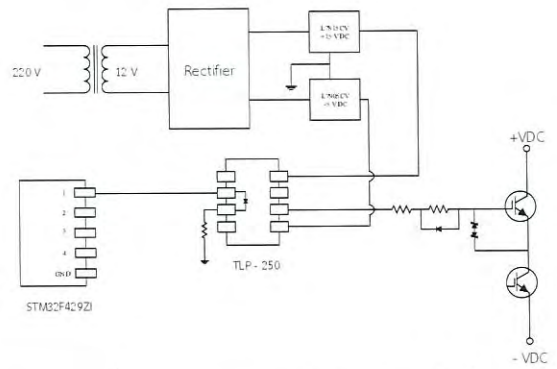
รูปที่ 6 ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก คำนวณออกเลข 1 ความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz



รูปที่ 7 ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและฮาร์มอนิก เมื่อต้องจรรถองแบบความถี่ต่ำผ่าน คำนวณออกเลข 1 และความถี่คลื่นสัญญาณพาหะ 2 kHz

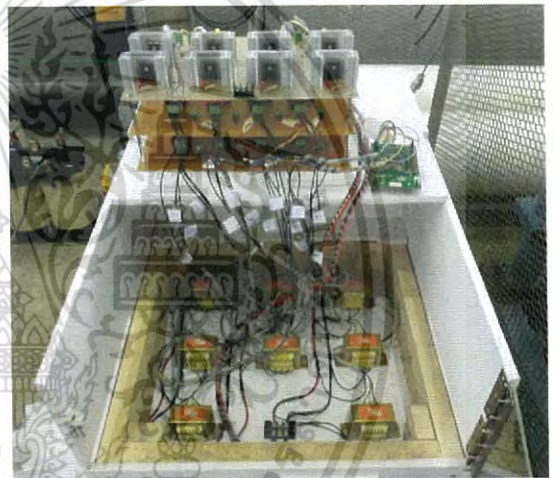
3.2 การออกแบบและประกอบสร้าง

3.2.1 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่



รูปที่ 8 วงจรสมมูลของวงจรควบคุมการสวิตช์

3.2.2 การประกอบสร้าง



รูปที่ 9 คอนเวอร์เตอร์ดีนแบบ

4.การทดสอบความทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำใน หม้อแปลงไฟฟ้า



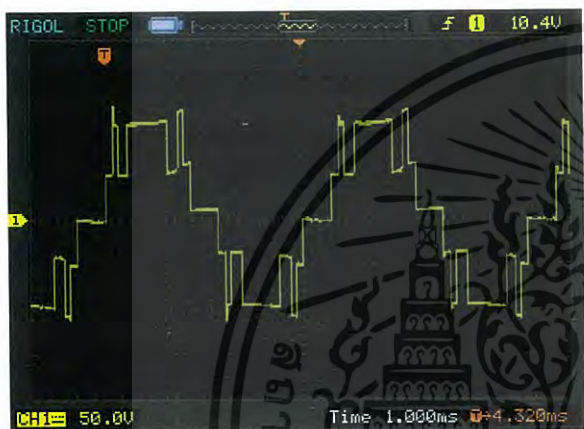
รูปที่ 10 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

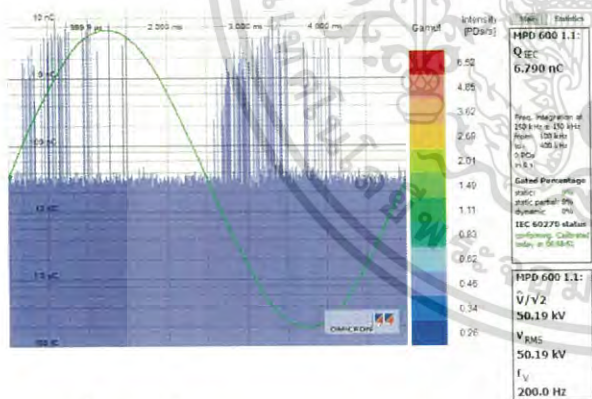
ตารางที่ 3 แรงดันมาตรฐานสำหรับทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

U _{rated}	U _{test}	
	100%	80%
24 kV	50 kV	40 kV

คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้สามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตที่นำไปทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงได้ โดยแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกต่ำกว่าร้อยละ 2 ของความถี่มูลฐาน



รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 12 รูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ

5.สรุปผลการทดสอบ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่สำหรับการทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60076-3 โดยใช้อินเวอร์เตอร์ที่เป็นโครงสร้างแบบคาสเคด 5 ระดับ มีไอจีบีเป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งในวงจรกำลัง ซึ่งถูกควบคุมลำดับการทำงานโดยสัญญาณ PWM เพื่อใช้ขับขาคาให้ได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุต 5 ระดับ โดยใช้เทคนิคการ

มอดูเลตแบบเฟสดิสทอร์ชัน ทำการทดสอบเพื่อหาสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยใช้การจำลองในโปรแกรม MATLAB ทดสอบการเหนี่ยวนำในหม้อแปลงเครื่องมื่อัดแรงดันพิกัดกำลังไฟฟ้า 50 VA พิกัดแรงดัน 22kV /110 V ผลการทดสอบการเหนี่ยวนำในหม้อแปลงพบว่าคอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่นี้สามารถขึ้นระดับแรงดันที่เหมาะสมตามมาตรฐานการทดสอบได้

6.กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ สำเร็จล่วงไปได้ด้วยการช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรวิติ ยุทธโกวิท ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำโครงการด้วยดีมาโดยตลอด นอกจากนี้ยังได้สนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการอีกด้วย

ขอขอบคุณ คุณปณชวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขปัญหามิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะ คุณทองเพียร พรมบุตรและ คุณกัทริน กิจเจริญ ที่ได้คำปรึกษาในด้านการศึกษา การควบคุมการทดสอบและให้คำแนะนำในการจัดทำปัญหามิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ช่วยกันดูแลห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

ท้ายนี้ คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และเป็นกำลังใจในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, "เทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [2] Andreas Nordvall, "Multilevel Inverter Topology Survey," Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, 2011.
- [3] Xiaojie Shi and et al, "A Comparison of Phase Disposition and Phase Shift PWM Strategies for Modular Multilevel Converters," Center for Ultra-wide-area Resilient Electric Energy Transmission Networks (CURENT), Department of Electrical Engineering and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



L7800 series

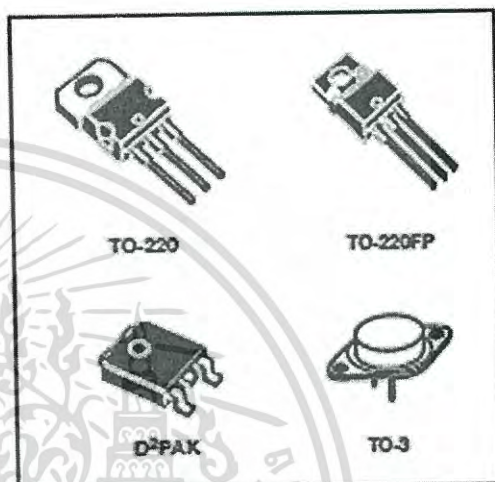
Positive voltage regulators

Feature summary

- Output current to 1.5A
- Output voltages of 5; 5.2; 6; 8; 8.5; 9; 10; 12; 15; 18; 24V
- Thermal overload protection
- Short circuit protection
- Output transition SOA protection

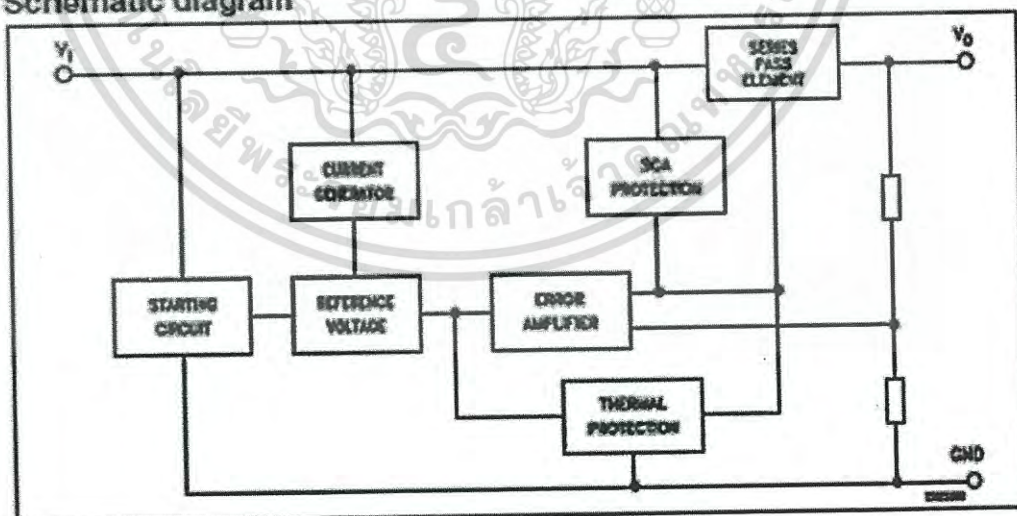
Description

The L7800 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220, TO-220FP, TO-3 and D²PAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed



primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltage and currents.

Schematic diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical characteristics

L7900 series

Table 7. Electrical characteristics of L7915 (refer to the test circuits, $T_J = -55$ to 150°C , $V_I = 23\text{V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $C_1 = 0.33\ \mu\text{F}$, $C_O = 0.1\ \mu\text{F}$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	14.4	15	15.6	V
V_O	Output voltage	$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 18.5$ to 30V	14.25	15	15.75	V
$\Delta V_O^{(1)}$	Line regulation	$V_I = 17.5$ to 30V , $T_J = 25^\circ\text{C}$			150	mV
		$V_I = 20$ to 28V , $T_J = 25^\circ\text{C}$			75	
$\Delta V_O^{(1)}$	Load regulation	$I_O = 5\text{ mA to } 1.5\text{A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$			150	mV
		$I_O = 250$ to 750mA , $T_J = 25^\circ\text{C}$			75	
I_d	Quiescent current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			6	mA
ΔI_d	Quiescent current change	$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$			0.5	mA
		$V_I = 18.5$ to 30V			0.8	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output voltage drift	$I_O = 5\text{mA}$		1.8		mV/ $^\circ\text{C}$
nV	Output noise voltage	$B = 10\text{Hz to } 100\text{kHz}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$			40	$\mu\text{V}/V_O$
SVR	Supply voltage rejection	$V_I = 18.5$ to 28.5V , $f = 120\text{Hz}$	60			dB
V_{SD}	Dropout voltage	$I_O = 1\text{A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$		2	2.5	V
R_O	Output resistance	$f = 1\text{kHz}$		19		m Ω
I_{sc}	Short circuit current	$V_I = 35\text{V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.75	1.2	A
I_{scp}	Short circuit peak current	$T_J = 25^\circ\text{C}$	1.3	2.2	3.3	A

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



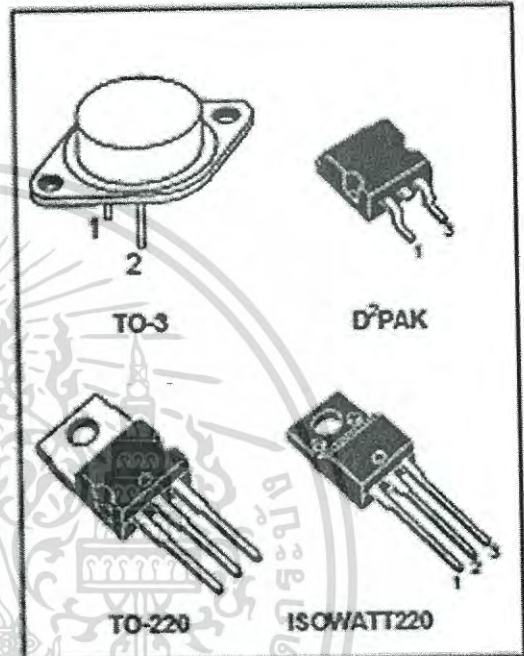
L7900 SERIES

NEGATIVE VOLTAGE REGULATORS

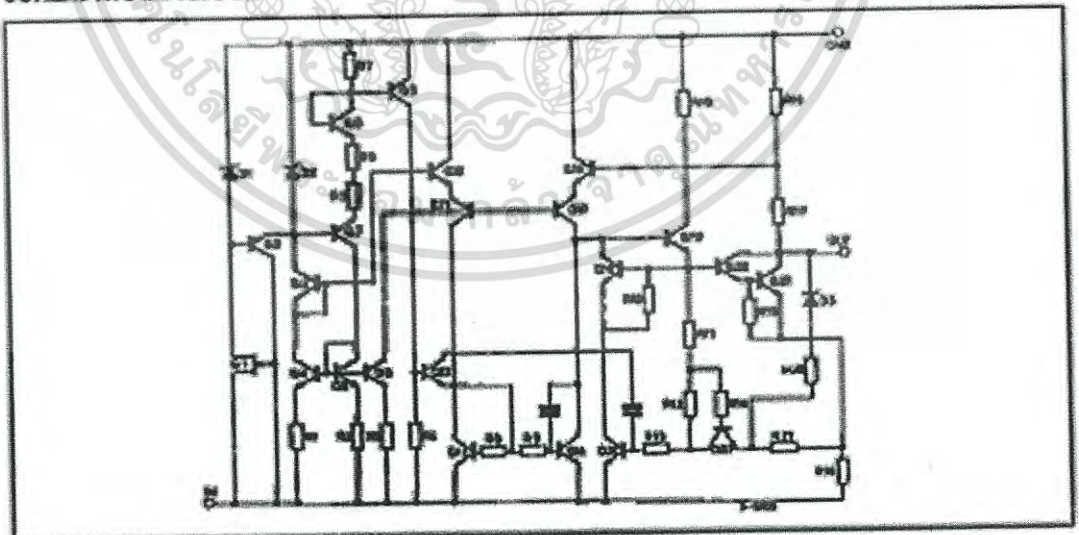
- OUTPUT CURRENT UP TO 1.5 A
- OUTPUT VOLTAGES OF -5; -5.2; -6; -8; -9;
-12; -15; -18; -20; -22; -24V
- THERMAL OVERLOAD PROTECTION
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OUTPUT TRANSITION SOA PROTECTION

DESCRIPTION

The L7900 series of three-terminal negative regulators is available in TO-220, ISOWATT220 TO-3 and D²PAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation; furthermore, having the same voltage option as the L7800 positive standard series, they are particularly suited for split power supplies. In addition, the -5.2V is also available for ECL system. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1.5A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



SCHEMATIC DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L7900

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS FOR L7905C (refer to the test circuits, $T_j = 0$ to 150°C ,
 $V_i = -10\text{V}$, $I_o = 500\text{mA}$, $C_i = 2.2\ \mu\text{F}$, $C_o = 1\ \mu\text{F}$ unless otherwise specified)**

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_o	Output Voltage	$T_j = 25^\circ\text{C}$	-4.8	-5	-5.2	V
V_o	Output Voltage	$I_o = 5\text{mA to } 1\text{A}$ $P_o < 15\text{W}$ $V_i = 8\text{ to } 20\text{V}$	-4.75	-5	-5.25	V
ΔV_o^*	Line Regulation	$V_i = -7\text{ to } -25\text{V}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ $V_i = -8\text{ to } -12\text{V}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$			100 50	mV mV
ΔV_o^*	Load Regulation	$I_o = 5\text{ to } 1500\text{mA}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ $I_o = 250\text{ to } 750\text{mA}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$			100 50	mV mV
I_o	Quiescent Current	$T_j = 25^\circ\text{C}$			3	mA
ΔI_o	Quiescent Current Change	$I_o = 5\text{ to } 1000\text{mA}$			0.5	mA
ΔI_o	Quiescent Current Change	$V_i = -8\text{ to } -25\text{V}$			1.3	mA
$\frac{\Delta V_o}{\Delta T}$	Output Voltage Drift	$I_o = 5\text{mA}$		-0.4		mV $^\circ\text{C}$
e_n	Output Noise Voltage	$B = 10\text{Hz to } 100\text{kHz}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$		100		μV
SVR	Supply Voltage Rejection	$\Delta V_i = 10\text{V}$ $f = 120\text{Hz}$	54	60		dB
V_d	Dropout Voltage	$I_o = 1\text{A}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ $\Delta V_o = 100\text{mV}$		1.4		V
I_{sc}	Short Circuit Current			2.1		A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_j = 25^\circ\text{C}$		2.5		A

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS FOR L7952C (refer to the test circuits, $T_j = 0$ to 150°C ,
 $V_i = -10\text{V}$, $I_o = 500\text{mA}$, $C_i = 2.2\ \mu\text{F}$, $C_o = 1\ \mu\text{F}$ unless otherwise specified)**

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_o	Output Voltage	$T_j = 25^\circ\text{C}$	-5.0	-5.2	-5.4	V
V_o	Output Voltage	$I_o = 5\text{mA to } 1\text{A}$ $P_o < 15\text{W}$ $V_i = -9\text{ to } -21\text{V}$	-4.95	-5.2	-5.45	V
ΔV_o^*	Line Regulation	$V_i = -8\text{ to } -25\text{V}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ $V_i = -9\text{ to } -12\text{V}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$			105 52	mV mV
ΔV_o^*	Load Regulation	$I_o = 5\text{ to } 1500\text{mA}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ $I_o = 250\text{ to } 750\text{mA}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$			105 52	mV mV
I_o	Quiescent Current	$T_j = 25^\circ\text{C}$			3	mA
ΔI_o	Quiescent Current Change	$I_o = 5\text{ to } 1000\text{mA}$			0.5	mA
ΔI_o	Quiescent Current Change	$V_i = -9\text{ to } -25\text{V}$			1.3	mA
$\frac{\Delta V_o}{\Delta T}$	Output Voltage Drift	$I_o = 5\text{mA}$		-0.5		mV $^\circ\text{C}$
e_n	Output Noise Voltage	$B = 10\text{Hz to } 100\text{kHz}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$		125		μV
SVR	Supply Voltage Rejection	$\Delta V_i = 10\text{V}$ $f = 120\text{Hz}$	54	60		dB
V_d	Dropout Voltage	$I_o = 1\text{A}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ $\Delta V_o = 100\text{mV}$		1.4		V
I_{sc}	Short Circuit Current			2		A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_j = 25^\circ\text{C}$		2.5		A

* Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_o due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



STM32F427xx STM32F429xx

ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 225DMIPS, up to 2MB Flash/256+4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 20 comm. interfaces, camera & LCD-TFT

Datasheet - production data

Features

- Core: ARM® 32-bit Cortex®-M4 CPU with FPU, Adaptive real-time accelerator (ART Accelerator™) allowing 0-wait state execution from Flash memory, frequency up to 180 MHz, MPU, 225 DMIPS/1.25 DMIPS/MHz (Cortex-M4), and DSP instructions
 - Memories
 - Up to 2 MB of Flash memory organized into two banks allowing read-write-write
 - Up to 256+4 KB of SRAM including 64-KB of CCM (core coupled memory) data RAM
 - Flexible external memory controller with up to 32-bit data bus: SRAM, PSRAM, SDRAM/LPDDR, SDRAM, Compact Flash/NOR/NAND memories
 - LCD parallel Interface, 8060/6800 modes
 - LCD-TFT controller up to XGA resolution with dedicated Chrom-ART Accelerator™ for enhanced graphic content creation (DMA2D)
 - Clock, reset and supply management
 - 1.7 V to 3.6 V application supply and I/Os
 - POR, PDR, PVD and BOR
 - 4-to-25 MHz crystal oscillator
 - Internal 16 MHz factory-trimmed RC (1% accuracy)
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
 - Internal 32 kHz RC with calibration
 - Low power
 - Sleep, Stop and Standby modes
 - V_{BAT} supply for RTC, 20x32 bit backup registers + optional 4 KB backup SRAM
 - 3x12-bit, 2.4 MSPS ADC; up to 24 channels and 7.2 MSPS in triple interleaved mode
 - 2x12-bit D/A converters
 - General-purpose DMA: 16-stream DMA controller with FIFOs and burst support
 - Up to 17 timers: up to twelve 16-bit and two 32-bit timers up to 180 MHz, each with up to 4 IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input
 - Debug mode
 - SWD & JTAG interfaces
 - Cortex-M4 Trace Macrocell™
- LQFP100 (14 x 14 mm)
LQFP144 (20 x 20 mm)
LQFP176 (24 x 24 mm)
LQFP208 (28 x 28 mm)

UFDGA176 (10 x 10 mm)
UFDGA180 (7 x 7 mm)
TFDGA216 (13 x 13 mm)

WLCSP143
- Up to 168 I/O ports with interrupt capability
 - Up to 164 fast I/Os up to 90 MHz
 - Up to 166 5 V-tolerant I/Os
 - Up to 21 communication interfaces
 - Up to 3 x I²C interfaces (SMBus/PMBus)
 - Up to 4 USARTs/4 UARTs (11.25 Mbit/s, ISO7816 interface, LIN, IrDA, modem control)
 - Up to 6 SPIs (45 Mbit/s), 2 with mixed full-duplex I²S for audio class accuracy via internal audio PLL or external clock
 - 1 x SAI (serial audio interface)
 - 2 x CAN (2.0B Active) and SDIO interface
 - Advanced connectivity
 - USB 2.0 full-speed device/host/OTG controller with on-chip PHY
 - USB 2.0 high-speed/full-speed device/host/OTG controller with dedicated DMA, on-chip full-speed PHY and ULPI
 - 10/100 Ethernet MAC with dedicated DMA; supports IEEE 1588v2 hardware, MII/RMII
 - 8- to 14-bit parallel camera interface up to 54 Mbytes/s
 - True random number generator
 - CRC calculation unit
 - RTC: subsecond accuracy, hardware calendar
 - 96-bit unique ID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Infrared & Photo-IC

TLP250

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

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

This unit is 8-lead DIP package.

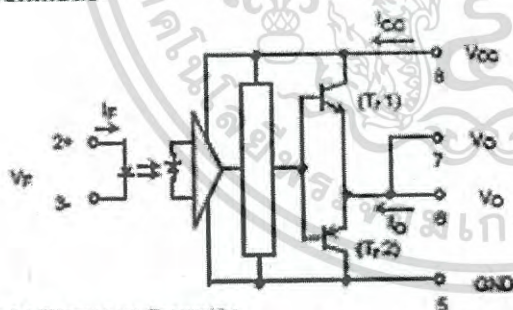
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_p = 5 \text{ mA (max.)}$
- Supply current (I_{CC}): 11 mA (max.)
- Supply voltage (V_{CC}): $10 \sim 35 \text{ V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5 \text{ A (max.)}$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5 \mu\text{s (max.)}$
- Isolation voltage: $2500 \text{ V}_{\text{rms (min.)}}$
- UL recognized: UL1577, file No. E67340
- Option (D4) type
 VDE approved: DIN VDE0884/06.92 certificate No. 76323
 Maximum operating insulation voltage: 650 V PK
 Highest permissible over voltage: 4000 V PK

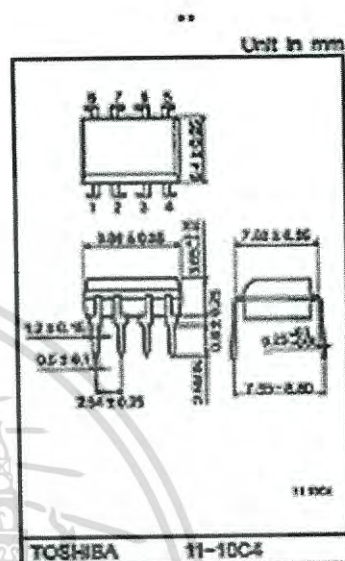
(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)".

- Creepage distance: 6.4 mm (min.)
- Clearance: 6.4 mm (min.)

Schematic

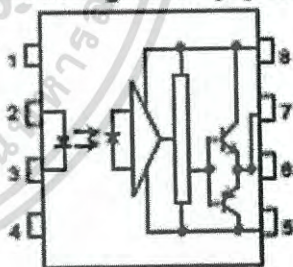


A $0.1 \mu\text{F}$ type capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).



Weight: 0.54 g

Pin Configuration (top view)



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

Truth Table

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Characteristic	Symbol	Test Cir-cuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit		
Input forward voltage	V _F	—	I _F = 10 mA, T _a = 25°C	—	1.8	1.8	V		
Temperature coefficient of forward voltage	ΔV _F /ΔT _a	—	I _F = 10 mA	—	-2.0	—	mV/°C		
Input reverse current	I _R	—	V _R = 5V, T _a = 25°C	—	—	10	μA		
Input capacitance	C _I	—	V = 0, f = 1MHz, T _a = 25°C	—	45	250	pF		
Output current	"H" level	I _{OH}	3	V _{CC1} = 30V (*)	I _F = 10 mA V _{S-G} = 4V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I _{OL}	2		I _F = 0 V _{S-G} = 2.5V	0.5	2		
Output voltage	"H" level	V _{OH}	4	V _{CC1} = +15V, V _{CC2} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA	11	12.8	—	V	
	"L" level	V _{OL}	5	V _{CC1} = +15V, V _{CC2} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V	—	-14.2	-12.5		
Supply current	"H" level	I _{CC1}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA T _a = 25°C	—	7	—	mA	
				V _{CC} = 30V, I _F = 10mA	—	—	11		
	"L" level	I _{CC2}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 0mA T _a = 25°C	—	7.5	—		
				V _{CC} = 30V, I _F = 0mA	—	—	11		
Threshold input current	"Output L→H"	I _{FTH}	—	V _{CC1} = +15V, V _{CC2} = -15V R _L = 200Ω, V _O > 0V	—	12	5	mA	
Threshold input voltage	"Output H→L"	I _{FHL}	—	V _{CC1} = +15V, V _{CC2} = -15V R _L = 200Ω, V _O < 0V	0.8	—	—	V	
Supply voltage	V _{CC}	—	—	10	—	35	V		
Capacitance (input-output)	C _O	—	V _S = 0, f = 1MHz T _a = 25°C	—	1.0	2.0	pF		
Resistance(input-output)	R _O	—	V _S = 500V, T _a = 25°C R.H.S 50%	1×10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴	—	Ω		

* All typical values are at T_a = 25°C (*)1: Duration of I_O time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นาย กฤษิต ศรีสุวรรณ

เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม 2539 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า
ปริญญาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ฝึกงานที่ บริษัท เอ็นซิส จำกัด



นาย วรกร แจ่มจรัส

เกิดเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม 2538 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ
มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 4
ปริญญาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ฝึกงานที่ บริษัท เทอร์โมเทอร์เซอร์ จำกัด



นางสาว สาวินี คงแหลม

เกิดเมื่อวันที่ 13 ธันวาคม 2538 ที่จังหวัดขอนแก่น
มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนขอนแก่นวิทยายน
ปริญญาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ฝึกงานที่ บริษัท เอ็ม.อี.ซี.ที. จำกัด



นางสาว สุตาร์ตน ศรีสุกใส

เกิดเมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2539 ที่จังหวัดสมุทรปราการ
มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนประภามนตรี 2
ปริญญาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ฝึกงาน บริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้