

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการ  
ปรับปรุงคุณภาพกระแสกริดและกระแสมอเตอร์

MULTILEVEL H-BRIDGE INVERTER FOR DRIVING THREE-PHASE INDUCTION MOTOR  
WITH QUALITY IMPROVEMENT OF GRID AND MOTOR CURRENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

MULTILEVEL H-BRIDGE INVERTER FOR DRIVING THREE-PHASE INDUCTION MOTOR  
WITH QUALITY IMPROVEMENT OF GRID AND MOTOR CURRENT



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2562

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการ

ปรับปรุงคุณภาพกระแสกริดและกระแสมอเตอร์

MULTILEVEL H-BRIDGE INVERTER FOR DRIVING THREE-PHASE INDUCTION MOTOR

WITH QUALITY IMPROVEMENT OF GRID AND MOTOR CURRENT



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. จงรักษ์ บุญเส็ง

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ศ.ดร. วิจิตร ภิณเรศ** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2562

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

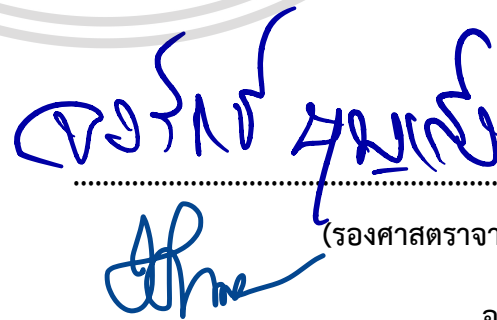
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการปรับปรุง

คุณภาพกระแสกริดและกระแสมอเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นาย พัทฒพล ศิริสิทธิ์วัฒนา
2. นาย ภควัตร ตรังรัตนจิต
3. นาย ภาสกร ต้นศิริ
4. นาย มงคล กาบบัว



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ จงรักษ์ บุญเรือง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร ภิณเรศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการปรับปรุงคุณภาพกระแสกริดและกระแสมอเตอร์

นาย พัทฒพล	ศิริสิทธิ์วัฒนา	
นาย ภควัฒ	ตรังรัตนจิตร	
นาย ภาสกร	ตันศิริ	
นาย มงคล	กาบบัว	
รศ.จรงค์	บุญเส็ง	อาจารย์ที่ปรึกษา
ศ.ดร.วิจิตร	ภิณเรศ	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2563		

## บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำเพื่อศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ ชนิดเอชบริดจ์ เพื่อให้แรงดันขาออกมีลักษณะเข้าใกล้สัญญาณรูปไซน์มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป อินเวอร์เตอร์หลายระดับในโครงการเล่มนี้เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิด 5 ระดับ ใช้เทคนิคการควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์บลิวเอ็มแบบลูกคลื่นไซน์ อาศัยคลื่นพาหะ โดยการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรดิจิทัลในการสร้างสรรค์ชิ้นงาน นอกจากนี้ วงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับดังกล่าว มีการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับกริด โดยการลดฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำในกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ได้ทำการทดสอบวงจรนี้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ผลการทดสอบข้างต้นเป็นไปตามความคาดหมายกล่าวคือวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับนี้ สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้เป็นอย่างดี อีกทั้งสามารถลดค่าความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าในระบบได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# MULTILEVEL H-BRIDGE INVERTER FOR DRIVING THREE-PHASE INDUCTION MOTOR WITH GRID CURRENT QUALITY IMPROVEMENT

Mr. Phipartpon Sirasitwattana

Mr. Pakavat Trangratanajit

Mr. Pasakorn Tansiri

Mr. Mongkol Kabbua

Assoc.Prof. Chongrag Boonseng

Advisor

Prof. Vijit Kinnares

Co-Advisor

Year 2020

## ABSTRACT

This project presents the implementation of H-Bridge multi-level inverter for driving three-phases induction motor with output voltage waveform almost a sinusoidal comparing with regular inverter. The H-Bridge multi-level in this project is a 5-level inverter which controlled by using carrier based sinusoidal PWM signals technique. Microcontroller and a combination of digital circuit have been applied to generated. Besides, this model has a grid current quality improvement by applying multi-pulse rectifier based on phase-shifting transformers to reduce lower order current harmonics which could be transmitted into power supply grid. Finally, this model has been tested for driving of three phase induction motor. The obtained results verify that the purposed model can be used to drive an induction motor as well can reduced the distortion of the current in system satisfactorily.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากศาสตราจารย์วิจิตร  
กิมเรศ และรองศาสตราจารย์จรงค์ บัญเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความกรุณาในการแก้คำปรึกษา  
สนับสนุนในเรื่องอุปกรณ์สำหรับใช้ในปริญญาานิพนธ์ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความ  
เอาใจใส่อย่างดียิ่ง ทางคณะผู้จัดทำได้ตระหนักถึงความทุ่มเทและความตั้งใจของอาจารย์และขอกราบ  
ขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอบคุณว่าที่ร้อยตรี ศักดาวุฒิ บุญคุ้ม อย่างยิ่งที่ได้กรุณาอบรมและสอนการใช้งานโปรแกรม การ  
ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ทั้งยังให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดมา  
รวมถึงอาจารย์และรุ่นพี่ในห้องปฏิบัติการ Power Electronic and Machine Control ที่ให้การ  
สนับสนุนและคอยชี้แนะแนวทาง ในการวางแผน ประสบการณ์ และแนวทางในการพัฒนาโครงการ  
เพื่อให้คณะผู้จัดทำได้ทำการปรับปรุงแก้ไขปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างรอบคอบมากยิ่งขึ้น

ขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อันคณะผู้จัดทำได้เอ่ยชื่อ ที่ได้ชี้แนะอบรมสั่งสอนให้  
ความรู้ทางวิชาการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและครอบครัว ซึ่งให้การช่วยเหลือทางด้าน  
ทุนทรัพย์และให้กำลังใจตลอดมา สำหรับข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้นคณะผู้จัดทำขอน้อมรับผิด  
และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตในงานวิจัย	2
1.4 วิธีการและแผนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริญญาานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ฮาร์มอนิกส์	4
2.1.1 นิยามของฮาร์มอนิกส์	4
2.1.2 ความผิดเพี้ยนที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	5
2.1.3 ผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจากปัญหาฮาร์มอนิกส์	5
2.1.4 มาตรฐานฮาร์มอนิกและการประเมินค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์	6
2.2 วงจรเรียงกระแสหลายพัลส์	7
2.2.1 วงจรเรียงกระแสหกพัลส์ (Six-pulse Rectifier)	8
2.2.2 วงจรเรียงกระแสสิบสองพัลส์	17
2.2.3 วงจรเรียงกระแสยี่สิบสี่พัลส์	24
2.3 วงจรเชื่อมโยงไฟตรง	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and IV cite the document when use.

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1 ตัวเก็บประจุไฟตรงเชื่อมโยง	28
2.4 สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต	28
2.4.1 การสวิตซ์ของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต	28
2.4.2 การสวิตซ์เชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์	29
2.4.3 การสวิตซ์เชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	30
2.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ	31
2.5.1 หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์	34
2.5.2 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	35
2.5.3 เทคนิคการสวิตซ์แบบยกระดัดคลื่นพาห์	38
2.6 การประวิงเวลาสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตขั้น	39
2.7 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	40
2.7.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	41
2.7.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	42
2.7.3 สลิปและความถี่ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโรเตอร์	43
2.7.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	43
2.7.5 กำลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	46
2.7.6 แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	48
2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลC2000	49
2.9 วงจรที่ใช้กำจัดฮาร์โมนิก	51
2.9.1 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	50
2.9.2 วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3 การออกแบบภาควงจรกำลังและภาควงจรควบคุม อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบวงจรเรียงกระแสหลายพัลส์ 56

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.1 การออกแบบวงจรกำลังของวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์	56
3.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์	59
3.2.1 การออกแบบวงจรควบคุม	60
3.2.2 การออกแบบวงจรขับนำ	64
3.3 การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิก	67
<b>บทที่4 การจำลองการทดลองด้วยโปรแกรมMATLAB/Simulink</b>	<b>69</b>
4.1 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่50เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ0.9	75
4.2 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่40เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ0.72	79
4.3 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่30เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ0.54	83
4.4 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่25เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ0.45	88
4.5 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่20เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ0.36	92
4.6 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี Filter	98
4.7 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 45 เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี Filter	100
4.8 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี Filter	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเพื่อใช้ในการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.9 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 30 เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี Filter	104
4.10 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 25 เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี Filter	106
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>108</b>
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง	108
5.2 สรุปผลการทดลอง	108
5.3 ข้อเสนอแนะ	109
5.4 แนวทางการพัฒนา	109
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>110</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>112</b>
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	113
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์	120
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	<b>123</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
2.1 วงจรเรียงกระแสหกพัลส์โดยใช้ไดโอด (Six-pulse Diode Rectifier)	8
2.2 วงจรเรียงกระแสหกพัลส์โดยใช้เอสซีอาร์กับโหลดตัวเก็บประจุ	8
2.3 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหกพัลส์โดยใช้เอสซีอาร์	10
2.4 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของโหลด $V_{L,avg} (L_s=0)$	10
2.5 ลูกคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเอสซีอาร์แต่ละตัว และกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลด	11
2.6 ลูกคลื่นของกระแสไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย	15
2.7 ลูกคลื่นของกระแสไฟฟ้าและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์เมื่อ $I_{a1} = 1 \text{ pu}$ และ $I_{a1} = 0.2 \text{ pu}$	16
2.8 กราฟ %THD	16
2.9 วงจรเรียงกระแส 12 พัลส์กับโหลดตัวเก็บประจุ	17
2.10 ลูกคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสสิบสองพัลส์	18
2.11 ความต่างมุมเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์-เดลต้า	19
2.12 แสดง การเปรียบเทียบสเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ของ $i_{as1}$ และ $i_{as2}$ กับ $I_A$	22
2.13 ลูกคลื่นกระแสไฟฟ้าวงจรเรียงกระแสสิบสองพัลส์กับโหลดตัวเก็บประจุ	23
2.14 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต $V_{L0}$ กระแสไฟฟ้าฝั่งขดลวดทุติยภูมิ กระแสไฟฟ้าฝั่งขดลวดปฐมภูมิ	23
2.15 วงจรเรียงกระแส 24 พัลส์กับโหลดตัวเก็บประจุ	24
2.16 ลูกคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของวงจรเรียงกระแสยี่สิบสี่พัลส์	25
2.17 ลูกคลื่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของโหลดและสเปกตรัม ของฮาร์มอนิกส์	25
2.18 ความสัมพันธ์ของเฟสเซอร์ของฮาร์มอนิกส์ในกระแสไฟฟ้า	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ฝั่งขดลวดปฐมภูมิ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
2.19 กราฟแสดง %THDและค่าตัวประกอบกำลังของวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์	27
2.20 วงจรเชื่อมโยงไฟตรงที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรเรียงกระแส และวงจรอินเวอร์เตอร์	27
2.21 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น	29
2.22 เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากอินเวอร์เตอร์3ระดับ ,อินเวอร์เตอร์5ระดับ และอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ซึ่งมีรูปคลื่นเข้าใกล้รูปไซน์มากขึ้นตามลำดับ	32
2.23 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดไดโอดแคลมป์	32
2.24 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 5ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	33
2.25 วงจรอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์	34
2.26 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์5ระดับชนิดคาสเคด	36
2.27 แร่งต้นเอาต์พุตเฟสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์5ระดับชนิดเอชบริดจ์	37
2.28 อินเวอร์เตอร์5ระดับชนิดเอชบริดจ์สามเฟส	38
2.29 เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณสามเหลี่ยมแบบ n-Phase disposition : IPD สำหรับอินเวอร์เตอร์5 ระดับ	39
2.30 การประวิงเวลาสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตชั้น	40
2.31 โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก	41
2.32 ลักษณะตัวนำของโรเตอร์แบบกรงกระรอก	41
2.33 โครงสร้างของโรเตอร์แบบฟันขดลวด	42
2.34 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส	44
2.35 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์	44
2.36 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์	45
2.37 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.36 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์ 45  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 2.37 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์ 46

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
2.38 ไดอะแกรมการไหลของกำลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	47
2.39 S-Curve ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งที่ทำงานเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	49
2.40 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล.38C2000 ประเภท D (TMS320F28379D)	50
2.41 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์.39F28379D	50
2.42 แสดงค่าและขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันขนาด 6.3-10V	53
2.43 แสดงค่าและขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันขนาด 160-500V	53
2.44 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	54
2.45 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม	54
2.46 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน	55
3.1 แสดงโครงสร้างวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับหนึ่งเฟส	56
3.2 แสดงโครงสร้างของวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์กับโหลดตัวเก็บประจุ	56
3.3 เซลล์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์	57
3.4 เซลล์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดเอชบริดจ์	58
3.5 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์หนึ่งเฟส	59
3.6 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ เหนี่ยวนำสามเฟส	59
3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัญญาณอ้างอิงกับ ความกว้างพัลส์เอาต์พุตสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมสำหรับสร้างสัญญาณพัลส์วิดุมอดูเลตเพื่อให้นำไปใช้ประ 62 ษณด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลีฉิ่งหนิงเขียนด้วยโปรแกรม และคัดลอกอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ควบคุมการสวิทช์ของมอเตอร์กำลังสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับหนึ่งเฟส

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
3.9 การออกแบบวงจรแยกสัญญาณพัลส์วืดมอดูเลต 4 สัญญาณสำหรับ 1 เฟส	63
3.10 การห้วงเวลาของสัญญาณที่ได้จากวงจรประวิงเวลา	64
3.11 การออกแบบวงจรประวิงเวลา(dead time) สำหรับ 1 ชุด	64
3.12 วงจรขับนำของอินเวอร์เตอร์แต่ละกึ่งใช้ในปริญญานินพนธ์ฉบับนี้	65
3.13 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ เหนี่ยวนำสามเฟส	66
3.14 แสดงวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ที่ใช้ในการกรองฮาร์มอนิก อันดับ 3,5 และ 7	67
4.1 การจำลองวงจรควบคุมสัญญาณพัลส์วืดมอดูเลต	69
4.2 สัญญาณพัลส์วืดมอดูเลตสำหรับควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ กำลังกึ่งบนทุกตัวขอ เฟส A	70
4.3 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์หนึ่งเฟส	71
4.4 สัญญาณพัลส์วืดมอดูเลตที่ใช้ในการสวิตช์มอสเฟตกำลังของ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์วงจรที่ 1	71
4.5 สัญญาณพัลส์วืดมอดูเลตที่ใช้ในการสวิตช์มอสเฟตกำลังของ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์วงจรที่ 2	72
4.6 การจำลองวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์5ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อน เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการปรับปรุงคุณภาพกระแสกริดโดยใช้วงจรเรียงกระแส12พัลส์	73
4.7 แรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(50Hz)	75
4.8 ฮาร์มอนิกของแรงดันเฟสด้านขาเข้า(50Hz)	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 4.10 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(50Hz) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี76รนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.11 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(50Hz)	77
4.12 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(50Hz)	77
4.13 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(50Hz)	78
4.14 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(50Hz)	78
4.15 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่50เฮิรตซ์	79
4.16 แรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(45Hz)	79
4.17 ฮาร์มอนิกของแรงดันเฟสด้านขาเข้า(45Hz)	80
4.18 ฮาร์มอนิกของกระแสเฟสด้านขาเข้า(45Hz)	80
4.19 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(45Hz)	81
4.20 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(45Hz)	81
4.21 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(45Hz)	82
4.22 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(45Hz)	82
4.23 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(45Hz)	82
4.24 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่45เฮิรตซ์	83
4.25 แรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(40Hz)	83
4.26 ฮาร์มอนิกของแรงดันเฟสด้านขาเข้า(40Hz)	84
4.27 ฮาร์มอนิกของกระแสเฟสด้านขาเข้า(40Hz)	84
4.28 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(40Hz)	85
4.29 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(40Hz)	85
4.30 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5ระดับ(40Hz)	86
4.31 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(40Hz)	86
4.32 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(40Hz)	87
4.33 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่40เฮิรตซ์	87
4.34 แรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(30Hz)	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ย้ำทั้งที่มีมติเห็นแต่เพียงอย่างเดียว และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.35 ฮาร์มอนิกของแรงดันเฟสด้านขาเข้า(30Hz)	88
4.36 ฮาร์มอนิกของกระแสเฟสด้านขาเข้า(30Hz)	89
4.37 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(30Hz)	89
4.38 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(30Hz)	90
4.39 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(30Hz)	90
4.40 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(30Hz)	91
4.41 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(30Hz)	91
4.42 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่30เฮิรตซ์	91
4.43 แรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(25Hz)	92
4.44 ฮาร์มอนิกของแรงดันเฟสด้านขาเข้า(25Hz)	92
4.45 ฮาร์มอนิกของกระแสเฟสด้านขาเข้า(25Hz)	93
4.46 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(25Hz)	93
4.47 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(25Hz)	94
4.48 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(25Hz)	94
4.49 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(25Hz)	95
4.50 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(25Hz)	95
4.51 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่25เฮิรตซ์	95
4.52 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับแบบมีฟิลเตอร์(50Hz)	98
4.53 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ แบบมีฟิลเตอร์(50Hz)	98
4.54 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.55 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่50เฮิรตซ์	99
4.56 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับแบบมีฟิลเตอร์(45Hz)	100
4.57 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ แบบมีฟิลเตอร์(45Hz)	100
4.58 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ แบบมีฟิลเตอร์(45Hz)	101
4.59 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่45เฮิรตซ์	101
4.60 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับแบบมีฟิลเตอร์(40Hz)	102
4.61 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ แบบมีฟิลเตอร์(40Hz)	102
4.62 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ แบบมีฟิลเตอร์(40Hz)	103
4.63 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่40เฮิรตซ์	103
4.64 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับแบบมีฟิลเตอร์(30Hz)	104
4.65 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ แบบมีฟิลเตอร์(30Hz)	104
4.66 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ แบบมีฟิลเตอร์(30Hz)	105
4.67 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่30เฮิรตซ์	105
4.68 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับแบบมีฟิลเตอร์(25Hz)	106
4.69 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แบบมีฟิลเตอร์(25Hz) ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.70 ฮาร์มอนิกของกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ แบบมีฟิลเตอร์(25Hz)	107
4.71 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่25เฮิรตซ์	107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, arXiv cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความผิดพลาดของกระแสฮาร์โมนิกส์ต่างๆที่รับได้ มาตรฐาน IEEE 519-1992	6
2.2 ค่าความผิดพลาดของแรงดัน มาตรฐาน IEEE 519-1992	7
2.3 การทำงานของสวิตช์แบบไบโพลาร์ที่เงื่อนไขทั้ง 2 เงื่อนไข	30
2.4 การทำงานของสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ที่เงื่อนไขทั้ง 4 เงื่อนไข	31
2.5 โหมดการทำงานของสวิตช์และแรงดันเอาต์พุตของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ ชนิดเอชบริดจ์	35
3.1 ลักษณะของสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลตที่ใช้ควบคุมการสวิตช์มอสเฟต กำลังในเฟส A	66
4.1 การวัดผลการจำลองและสัญลักษณ์ในโปรแกรมMATLAB/Simulink	74
4.2 ผลการจำลองการปรับปรุงคุณภาพกระแสกริดโดยใช้ วงจรถูกอินเวอร์เตอร์ 12 พัลส์	96
4.3 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับ ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อใส่วงจรถูกอินเวอร์เตอร์ชนิด LC	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and you must cite the document when use.

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันงานทางด้านอุตสาหกรรมได้มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังอย่างแพร่หลาย และยังมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นในอนาคต ตัวอย่างเช่น การใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง และการใช้งานเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลทางไฟฟ้า ฯลฯ ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเหล่านี้ล้วนมีผลอันเป็นประโยชน์ในทางที่ดียิ่งอย่างมาก แต่อาจก่อให้เกิดผลเสียทางด้านคุณภาพของระบบไฟฟ้าด้วยเช่นกัน อันเป็นผลมาจากฮาร์มอนิกในกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การใช้งานอินเวอร์เตอร์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถึงแม้จะเป็นโหลดไฟฟ้าสมดุล ไม่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกที่หารด้วยสามลงตัว แต่ผลจากการใช้งานเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับต่ำในกระแสไฟฟ้า ค่าสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือวงจรเรียงกระแสหลายพัลส์ มีผลช่วยลดฮาร์มอนิกในกระแสไฟฟ้ากริด เป็นการเพิ่มคุณภาพของไฟฟ้าในขาเข้า ประกอบกับการเลือกใช้งานอินเวอร์เตอร์หลายระดับแทนการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบเดิมทั่วไป เป็นหนึ่งในวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม หรือขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส กล่าวคือการสร้างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้นมีลักษณะเข้าใกล้สัญญาณรูปไซน์มากยิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป อีกทั้งอินเวอร์เตอร์หลายระดับยังสามารถใช้กับงานกำลังไฟฟ้าและระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงได้ดีขึ้น หากระบบไฟฟ้ามีระยะของสายส่งที่มากอาจทำให้เกิดแรงดันเกินในช่วงหนึ่งทำให้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันเกิดฮาร์มอนิกในอันดับต่ำขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินจึงมีการใช้วงจรกรองกระแสชนิดพาสซีฟเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันเกินในระบบ

ดังนั้นปริญญาโทฉบับนี้จึงได้ศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ ในบทความนี้ได้นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์ ประกอบกับการเลือกใช้อุปกรณ์เรียงกระแสหลายพัลส์เพื่อลดฮาร์มอนิกในกระแสไฟฟ้ากริด และการเลือกใช้อุปกรณ์กรองกระแสชนิดพาสซีฟ ซึ่งปริญญาโทฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบวงจรที่ควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D ซึ่งผลการทดลองจะนำไปเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์หลายระดับ พร้อมทั้งการเพิ่มคุณภาพไฟฟ้าของกริดในอนาคตต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อศึกษาหลักการการทำงานและการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัดแรงดัน การคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์
3. เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้วงจรเรียงกระแสหลายพัลส์สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของกระแสไฟฟ้ากริด
4. เพื่อศึกษาหลักการทำงานและประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D ร่วมกับวงจรดิจิทัลสำหรับสร้างวงจรประวิงเวลาสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลชัน
5. เพื่อศึกษาหลักการทำงานและการประยุกต์ใช้วงจรกรองกระแสชนิดพาสซีฟ

### 1.3 ขอบเขตในงานวิจัย

1. ศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของวงจรเรียงกระแสหลายพัลส์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับและหม้อแปลงเลื่อนมุมเฟส
2. จำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ โดยใช้หม้อแปลงสามเฟส 2 ชุดที่มีมุมเฟสต่างกัน 30 องศา ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และประเมินค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ
3. ศึกษาและจำลองการควบคุมการสวิตช์ด้วยเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณสามเหลี่ยมแบบ In-Phase Disposition ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
4. ศึกษาและจำลองวงจรกรองกระแสชนิดพาสซีฟ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อลดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ
5. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล C2000 เบอร์ TM320F28379D ประมวลผลสัญญาณเพื่อควบคุมการสวิตช์ของสวิตช์กำลัง
6. จำลองและออกแบบการสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

### 1.4 วิธีการและแผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของวงจรเรียงกระแสหลายพัลส์และการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกในกระแสไฟฟ้ากริด
2. ศึกษาหลักการทำงานของวงจรกรองกระแสแบบพาสซีฟ
3. ศึกษาการใช้งานและฝึกอบรมการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D
4. ศึกษาและทดลองสร้างสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลชัน สำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์
5. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เฉพาะในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามนำเนื้อหาไปใช้

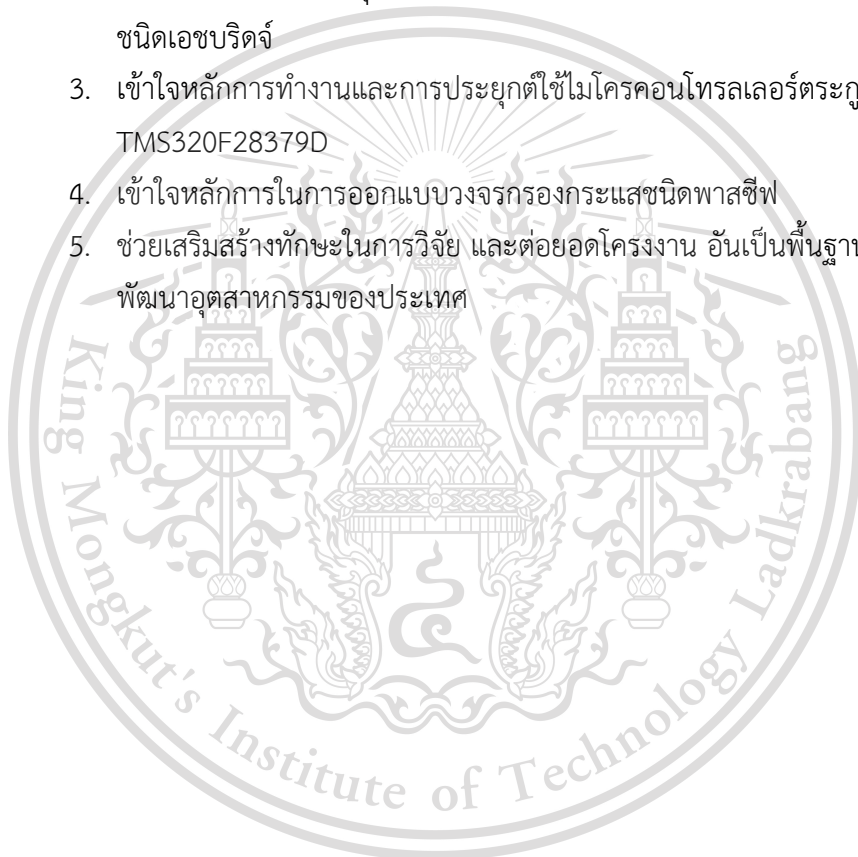
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

8. ศึกษาหลักการทำงานและประยุกต์ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์ ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
9. ศึกษาและจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink
10. วิเคราะห์ผลการทดสอบ
11. จัดทำปริญญานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริญญานิพนธ์

1. เข้าใจถึงหลักการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกสในกระแสไฟฟ้ากริด โดยประยุกต์ใช้วงจรเรียงกระแสหลายพัลส์
2. เข้าใจถึงหลักการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์
3. เข้าใจหลักการทำงานและการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D
4. เข้าใจหลักการในการออกแบบวงจรกรองกระแสชนิดพาสซีฟ
5. ช่วยเสริมสร้างทักษะในการวิจัย และต่อยอดโครงการ อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ฮาร์โมนิกส์

##### 2.1.1 นิยามของฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ คือ สัญญาณรูปคลื่นไซน์ของกระแสหรือแรงดันที่มีจำนวนความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ที่จะมารวมกับความถี่มูลฐานแล้วทำให้เกิดความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ ส่วนใหญ่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ยกตัวอย่าง ถ้าเราใช้ไฟฟ้าความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ก็จะมีฮาร์โมนิกส์เป็น 150, 250, 350, 450, ... เฮิร์ตซ์ ซึ่งจะมีฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวรวมอยู่ในระบบไฟฟ้าที่เราใช้ด้วย

ผลที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์เมื่อนำผลรวมของฮาร์โมนิกส์ทั้งหมดเข้ากับความถี่มูลฐานทั้งขนาดและมุมเฟสแล้วจะทำให้เกิดเป็นสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นปกติ ซึ่งการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์นั้นจะมีหลักการพิจารณาสัญญาณที่เกิดจากโหลดไม่เชิงเส้นโดยใช้ทฤษฎีของฟูเรียร์ในระบบองค์ประกอบและขนาดฮาร์โมนิกส์ดังสมการ

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + b_n \sin \frac{2n\pi t}{T} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$a_0$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $x(t)$

$a_n$  คือ สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ ลำดับที่ 1

$b_n$  คือ สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ ลำดับที่ 2

$n$  คือ เลขจำนวนเต็มทีลำดับใดๆ

$T$  คือ คาบเวลาของสัญญาณ  $x(t)$

จากสมการที่ 2.1 จะสามารถค่าของขนาดและมุมเฟสได้ตามสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.2)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{b_n}{a_n} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ

$A_n$  คือค่าของขนาดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $\phi_n$  คือมุมเฟสของสัญญาณ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.1.2 ความผิดเพี้ยนที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

ค่าความผิดเพี้ยนที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ คือ การที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูป คลื่นไฟฟ้าจากรูปคลื่นไซน์ไปเป็นรูปแบบอื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โดยการรวมตัวกันของ ค่าความถี่มูลฐานและค่าความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่ลำดับฮาร์มอนิกส์ต่างๆเข้าด้วยกัน การที่เราจะทราบว่า สัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นผิดเพี้ยนไปจากเดิมเท่าไร จึงมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (total harmonic distortion; THD) ซึ่งก็คือค่าอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลรวมกำลังสองของค่า ส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์แบบอาร์เอ็มเอส กับค่าความถี่หลักมูลฐานแบบอาร์เอ็มเอส ดังนั้นจะได้สมการของค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม (total harmonic voltage distortion; THD<sub>v</sub>) ดังสมการ

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n(rms)}^2}}{V_{1(rms)}} \times 100 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $V_{n(rms)}^2$  คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันฮาร์มอนิกส์ยกกำลังสอง

$V_{1(rms)}$  คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ความถี่หลักมูลฐาน

ค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (total harmonic current distortion; THD<sub>i</sub>) ดังสมการ

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n(rms)}^2}}{I_{1(rms)}} \times 100 \quad (2.5)$$

เมื่อ  $I_{n(rms)}^2$  คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกส์ยกกำลังสอง

$I_{1(rms)}$  คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสที่ความถี่หลักมูลฐาน

### 2.1.3 ผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจากปัญหาฮาร์มอนิกส์ ผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกส์มีดังนี้

1. ผลของฮาร์มอนิกส์เรโซแนนซ์เกิดขึ้นในกรณีที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบไปตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์ เป็นผลทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้เนื่องจากกระแสหรือแรงดันเกิน
2. ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลอยู่ในสายส่งและระบบจำหน่าย ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียมากจึงทำให้ประสิทธิภาพในการส่งจ่ายลดลงเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ไปทำให้กระแสและความต้านทานของสายส่งสูงขึ้น

3. ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลใน (อันดับที่ 3, 6, 9, ...) เป็นกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เป็นลำดับคู่ในในระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกส์กลุ่มนี้จะไหลไปรวมกันที่สาย นิวทรัลอาจจะทำให้สายนิวทรัลหรือหม้อแปลงเสียหาย

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. ผลของกระแสฮาร์โมนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสารเช่น ระบบโทรศัพท์
5. ผลของฮาร์โมนิกทำกำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (stray flux loss) ของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพในการรับโหลดของหม้อแปลงมีค่าลดลงและทำให้เกิดกำลังการสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy current loss) และกำลังการสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) มีค่าเพิ่มขึ้น
6. ผลของกระแสฮาร์โมนิกทำให้เกิดความร้อนในตัวพิวส์เพิ่มขึ้นทำให้ลักษณะเวลากระแส (time-current characteristic) ของพิวส์เปลี่ยนไป ยกตัวอย่าง ในกรณีที่มีฟอลต์ระดับต่ำเกิดขึ้นพิวส์จะขาดก่อนถึงเวลาที่กำหนดและในกรณีที่พิวส์ขาดโดยที่เราไม่ทราบสาเหตุก็เกิดมาจากฮาร์โมนิกที่เกิดเรโซแนนซ์ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นจนพิวส์ขาดได้

#### 2.1.4 มาตรฐานฮาร์โมนิกและการประเมินค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิก (Harmonic standard & Harmonic distortion evaluation)

การวัดความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกสามารถทำได้หลากหลายวิธี ในส่วนของปริญญา นิพนธ์นี้จะใช้หลักเกณฑ์ที่ใช้ประเมินค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

##### 1. ขีดจำกัดของกระแสผิดเพี้ยน (Current distortion limits)

ขีดจำกัดของกระแสผิดเพี้ยน (Current distortion limits) เป็นขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าได้ โดยมีค่าดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดความผิดเพี้ยนรวม (total demand distortion; TDD) คือ ความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของความถี่กระแสโหลดสูงสุด (ในช่วง 15 หรือ 30 นาที) โดยมีขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกต่างๆที่ได้รับได้ มาตรฐาน IEEE 519-1992 [1]

ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกเป็นเปอร์เซ็นต์ของกระแสสูงสุดของโหลดที่ความถี่มูลฐาน						
ค่าฮาร์โมนิกลำดับต่างๆในแต่ละตัว (ฮาร์โมนิกลำดับเลขคี่)						
$I_{sc} / I_L$	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.5

โดยที่  $I_{sc}$  คือ กระแสลัดวงจรที่จุดต่อรวม (PCC)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

≥1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
-------	------	-----	-----	-----	-----	------

$I_L$  คือ กระแสสูงสุดของโหลดความถี่หลักมูลฐาน

TDD คือ ความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์มีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของความ  
ต้องการกระแสโหลดสูงสุด  $i_L$

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i}}{i_L} \quad (2.6)$$

1.ขีดจำกัดของแรงดันผิดเพี้ยน (Voltage distortion limits) ขีดจำกัดของแรงดันผิดเพี้ยน (Voltage distortion limits) เพื่อให้แน่ใจว่าแรงดันผิดเพี้ยนจะไม่เกินกว่าค่าในตาราง 2.2 ซึ่งค่าขีดจำกัดแรงดันผิดเพี้ยนนี้จะต่ำเพียงพอต่อการทำงาน ของอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและในตารางที่ 2.2 นี้จะเป็นระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) แต่ถ้ามีคาบเวลาน้อยกว่านี้สามารถเพิ่มขีดจำกัดขึ้นไปอีก 50 เปอร์เซ็นต์ได้

ตารางที่ 2.2 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดัน มาตรฐาน IEEE 519-1992 [1]

แรงดันบัสที่จุดเชื่อมต่อ(PCC)	ความผิดเพี้ยนของแรงดันในแต่ละตัว(%)	ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม (THD)
≤69 KV	3.0	5.0
69,001 V – 161 KV	1.5	2.5
≥161,001 V	1.0	1.5
หมายเหตุ: ในระบบแรงสูงสามารถเพิ่มขึ้น 2.0% THD		

## 2.2 วงจรเรียงกระแสหลายพัลส์ (Multi-Pulse Rectifiers)

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ยกตัวอย่างเช่น ไดโอด (Diode), เอสซีอาร์ (SCR) ไทริสเตอร์ (Thyristors), ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ฯลฯ อุปกรณ์สวิตช์เหล่านี้ถูกใช้ในงาน ต่างๆอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มมากขึ้นในอนาคต ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเหล่านี้เป็น ต้นเหตุสำคัญของการเกิดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า โดยในการตัดต่อนวงจรหรือสวิตช์ซิง (Switching) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ ซึ่งอาจถูกส่งและแพร่เข้าไปยังโครงข่ายของระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ (Electrical Grid) อาจส่งผลกระทบต่อระบบ โครงข่ายไฟฟ้าต่อไป เช่น เกิดความสูญเสียในสายของระบบส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า (Transmission wire and Transformer Losses) เกิดความผิดพลาดและผลเสียต่อเครื่องวัดไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์เหล่านั้นยังไปแทรกแซงอุปกรณ์อื่นๆที่ต่อกับระบบไฟฟ้านี้อีกด้วย จึงควรกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพของไฟฟ้า (Power Quality) ในระบบไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

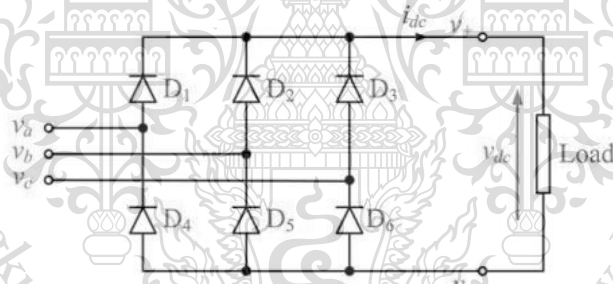
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรเรียงกระแสหกพัลส์ (Six-pulse Rectifier) จากนั้นตามด้วยวงจรเรียงกระแสหลายพัลส์ (Multi-Pulse Rectifiers) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างและการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรเรียงกระแสในระดับพัลส์ต่างๆ

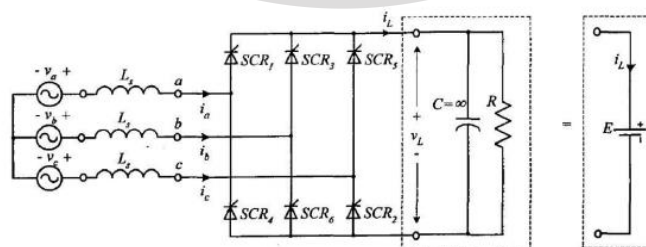
### 2.2.1 วงจรเรียงกระแสหกพัลส์ (Six-pulse Rectifier)

ในวงจรเรียงกระแสหกพัลส์ก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกที่สภาวะคงตัว (Steady State) นั้นไม่ใช่ฮาร์มอนิกที่สามหารลงตัว (Non-Triplen Odd Harmonics) ยกตัวอย่างเช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5,7,11,13 ดังนั้นอันดับของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการ  $h = 6n \pm 1$  เมื่อ  $h$  คือ อันดับของฮาร์มอนิกและ  $n$  คือเลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (1,2,3,...)

ซึ่งจากการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณกระแสไฟฟ้าก่อนเข้าวงจรเรียงกระแสหกพัลส์โดยเทคนิคการวิเคราะห์ Fast Fourier Transform (FFT) ทำให้ทราบว่าขนาด (Amplitude) ของกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่ำจะมีค่าสูงขึ้นประมาณร้อยละ 20 ของกระแสไฟฟ้าที่สาย (Line current) ซึ่งเกินข้อกำหนดที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE Standard 519-1992



รูปที่ 2.1 วงจรเรียงกระแสหกพัลส์โดยใช้ไดโอด (Six-pulse Diode Rectifier) [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.2 วงจรเรียงกระแสหกพัลส์โดยใช้เอสซีอาร์กับโหลดตัวเก็บประจุ [4] ใช้อธิบายขั้นตอนการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 2.2 แสดงวงจรกำลังของวงจรเรียงกระแสหกพัลส์กับโหลดตัวเก็บประจุโดยใช้ เอสซีอาร์ (Six-pulse SCR Rectifier with Capacitive Load) เมื่ออินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุล โดยตัวเก็บประจุ C ที่ต่อขนานกับโหลด R มีหน้าที่ลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Ripple) ทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดนั้นเรียบขึ้น โดยเมื่อตัวเก็บประจุ C มีค่าเป็นอนันต์อาจกล่าวได้ว่าโหลดที่มี C ต่ออยู่นั้นเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (E) ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำในสาย Ls (Line inductance) ช่วยป้องกันการเกิดการลัดวงจรระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage Source) สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของแหล่งจ่ายได้ดังนี้

$$V_a = \sqrt{2v} \sin(\omega t) \quad (2.7)$$

$$V_a = \sqrt{2v} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.8)$$

$$V_a = \sqrt{2v} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.9)$$

ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเป็นตามสมการ

$$V_{ab} = V_a - V_b = \sqrt{2V} \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{2}\right) \quad (2.10)$$

$$V_{bc} = \sqrt{2v} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.11)$$

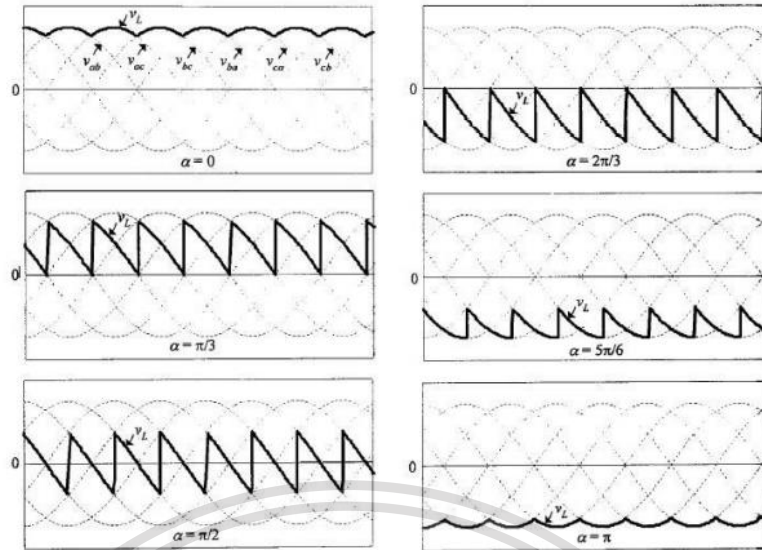
$$V_{ca} = \sqrt{2v} \sin\left(\omega t + \frac{7\pi}{6}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $V_{PH}$  เป็นค่ายังผลของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส  $V_{LL}$  เป็นค่ายังผลของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายและ  $\omega$  คือความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

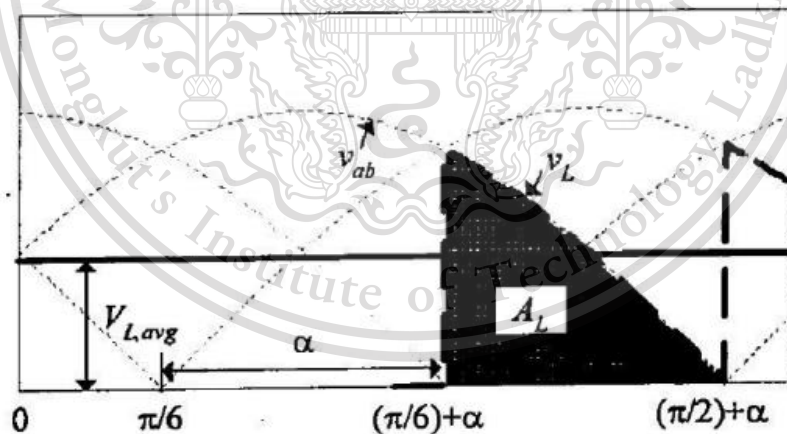
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหกฟาส์โดยใช้เอสซีอาร์[4]

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหกฟาส์โดยใช้เอสซีอาร์ มีความสัมพันธ์กับมุมจุดฉนวน  $\alpha$  (Firing angle or Delay angle) เป็นไปตามรูปที่ 2.3 สังเกตได้ว่ามุมจุดฉนวน  $\alpha$  มากขึ้น มีผลให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตระหว่างสายลดลงทั้งนี้มุมจุดฉนวน  $\alpha$  มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 180 องศา



รูปที่ 2.4 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของโหลด  $V_{L,avg} = (L_s=0)$  [4]

พิจารณารูปที่ 2.4 สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเรียงกระแสหกฟาส์โดยใช้เอสซีอาร์ซึ่งประกอบไปด้วย 6 แรงดันไฟฟ้ากระแสเฟอ้อม (Voltage Ripple) ใน 1 แอกลงจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากสมการดังต่อไปนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

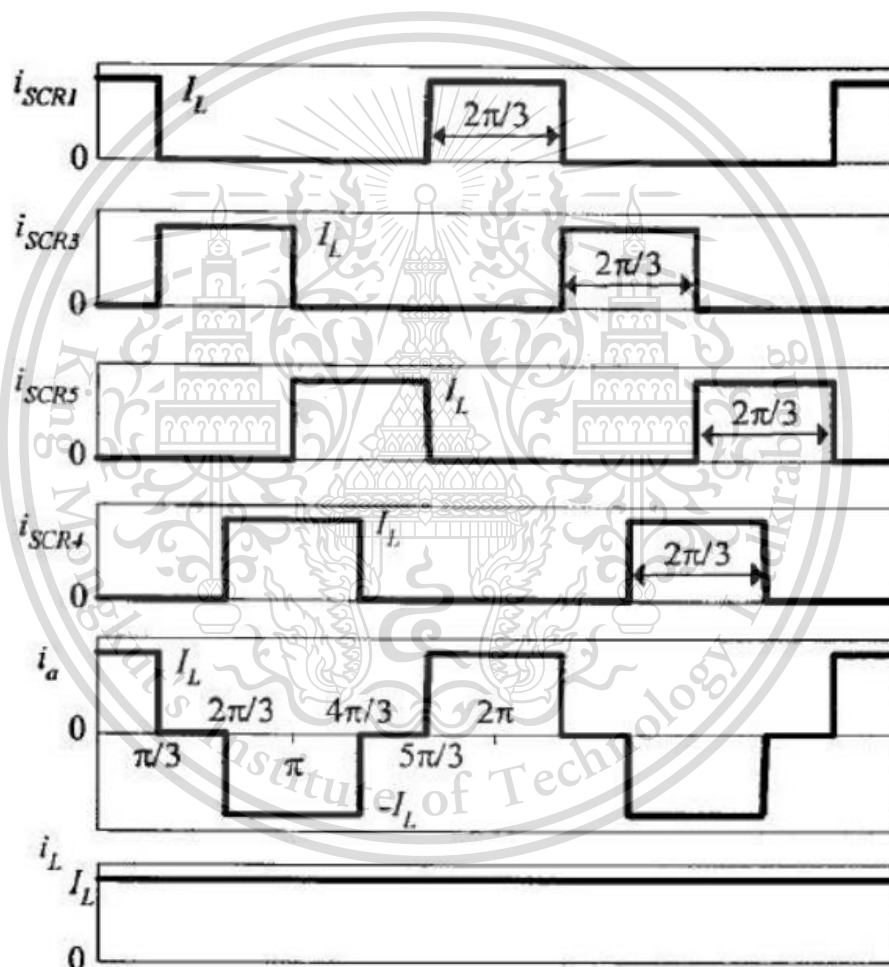
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$V_{L,avg} = \frac{\text{area}A_L}{\pi/3} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sqrt{2}V_{LL} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t) \quad (2.13)$$

$$V_{L,avg} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha = 1.35V_{LL} \cos\alpha \quad (2.14)$$

เมื่อ  $V_{L,avg}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของโหลด



รูปที่ 2.5 ลูกคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเอสซีอาร์แต่ละตัว และกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลด [4]

จากรูปที่ 2.5 แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเอสซีอาร์แต่ละตัวในวงจรเรียง กระแสหลัก

พัลส์ที่มีมุมจุดฉนวน  $\alpha$  มีค่า  $2\pi/3$  เรเดียนในช่วงเวลาขณะนั้นจะมีเอสซีอาร์สองตัวนำกระแสโดย

SCR1, SCR3, SCR5 เชื่อมต่อกับขั้วบวกของวงจร และเอสซีอาร์ที่เหลือ SCR2, SCR4, SCR6

ไม่ว่ากรณีใดของทั้งสี่ ออกของห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมต่อกับขั้วลบของวงจร ดังนั้นกระแสไฟฟ้าระหว่างสายของแต่ละเฟสคือผลรวมของลูกคลื่นในซีก

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บวกกับลูกคลื่นซีกลบกระแสไฟฟ้าในเฟส A เป็นผลมาจากการนำกระแสของ SCR1 และ SCR4 ตามลำดับ  $i_a$  คำนวณได้จาก  $i_{SCR1} - i_{SCR4}$  ทั้งนี้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลด  $i_L$  คือผลรวมของ  $i_{SCR1}$   $i_{SCR3}$  และ  $i_{SCR5}$

กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผ่านโหลดคำนวณได้จาก

$$I_{L,avg} = \frac{V_{L,avg}}{R} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $I_{L,avg}$  คือ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผ่านโหลด โดยค่ากระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสมีค่าเท่ากับ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผ่านโหลด

$$I_{L,RMS} = I_{L,avg} \quad (2.16)$$

กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเป็นไปตามสมการ

$$P_{L,avg} = I_{L,RMS}^2 \times R \quad (2.17)$$

จากรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ายังผลของเฟส A ได้ดังนี้

$$I_{a,RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_a)^2 d(\omega t)} \quad (2.18)$$

$$I_{a,RMS} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_L = 0.816 I_L \quad (2.19)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าวงจรเรียงกระแสหกพัลส์โดยใช้เอสซีอาร์ไม่ใช่ลูกคลื่นไซน์ ซึ่งเป็นผลมาจากฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ของ  $i_a$  จากการวิเคราะห์ฟูเรียร์เป็นไปตามอนุกรมฟูเรียร์ต่อไปนี้

$$i_a(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi}{T/2} \omega t = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดจาก สัมภาษณ์ต่อไปนี้ ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$a_n = \frac{2}{T/2} \int_0^{\pi/3} i_a(\omega t) \cos \frac{n\pi}{T/2} \omega t d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_a(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (2.21)$$

$$a_n = \frac{2I_L}{T/2} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) + \sin\left(\frac{2n\pi}{3}\right) \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.22)$$

พิจารณามุมเฟส  $\phi_1$  ของ  $i_{a1}$  ที่สัมพันธ์กับ  $v_a$  สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์  $a_n$  ได้ดังนี้

$$i_a = 1.1I_L \left[ \cos(\omega t - \phi_1) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t - \phi_1) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t - \phi_1) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t - \phi_1) + \frac{1}{13} \cos 13(\omega t - \phi_1) - \dots \right] \quad (2.23)$$

จากการวิเคราะห์จะพบว่าไม่มีฮาร์โมนิกส์ที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonics) เกิดขึ้นใน  $i_w$  เนื่องจากวงจรเรียงกระแสไฟฟ้านั้นเป็นวงจรระบบสามเฟสสมดุล เขียนสมการข้างต้นใหม่ได้ดังนี้

$$i_a = \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} \sqrt{2} I_{an} \cos n(\omega t - \phi_1) \quad (2.24)$$

กำหนด  $a_n I$  คือ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสของฮาร์โมนิกส์แต่ละองค์ประกอบที่เกิดขึ้นใน  $a I$  สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_{a,RMS} = \sqrt{\sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} I_{an}^2} \quad (2.25)$$

ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (Total Distortion Distortion: THD) ของ  $i_a$  เป็นไปตามสมการ

$$THD_{ia} = \frac{\sqrt{I_{a,RMS}^2 - I_{a1,RMS}^2}}{I_{a1,RMS}} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $a_{RMS} I$  คือ ค่ายังผลของ  $a_1 I$  หรือ องค์ประกอบที่ความถี่หลักมูลของ  $a I$  จากสมการที่ 2.20 โดยขนาดของ  $a_1 I$  เป็นไปตามสมการ

$$I_{a1,RMS} = 1.1I_L$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า (2.27)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น จะห้ามนำไปตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$I_{a1,RMS} = \frac{I_{a1,m}}{\sqrt{2}} = 0.78I_L \quad (2.28)$$

แทนค่าสมการที่ 2.17 และ 2.25 ลงในสมการที่ 2.23

$$THD_{ia} = \frac{\sqrt{I_{a,RMS}^2 - I_{a1,RMS}^2}}{I_{a1,RMS}} = \frac{\sqrt{(0.816I_L)^2 - (0.78I_L)^2}}{0.78I_L} = 0.311 \quad (2.29)$$

ในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor : PF) ของระบบ มีค่าเท่ากับทุกเฟสซึ่งกำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยต่อเฟส (P) สามารถคำนวณได้จากแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส ( $V_a$ ) และกระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่องค์ประกอบมูลฐาน ( $I_{a1}$ ) เป็นไปตามสมการดังนี้

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_a i_a d(\omega t) = V_a I_{a1} \cos \varphi_1 \quad (2.30)$$

เมื่อกำลังไฟฟ้าปรากฏต่อเฟส (S) มีค่าเท่ากับ  $V_a I_a$  สามารถหาค่าตัวประกอบกำลังได้จาก

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_a I_{a1} \cos \varphi_1}{V_a I_a} = \frac{I_{a1} \cos \varphi_1}{I_a} = DF \times DPF \quad (2.31)$$

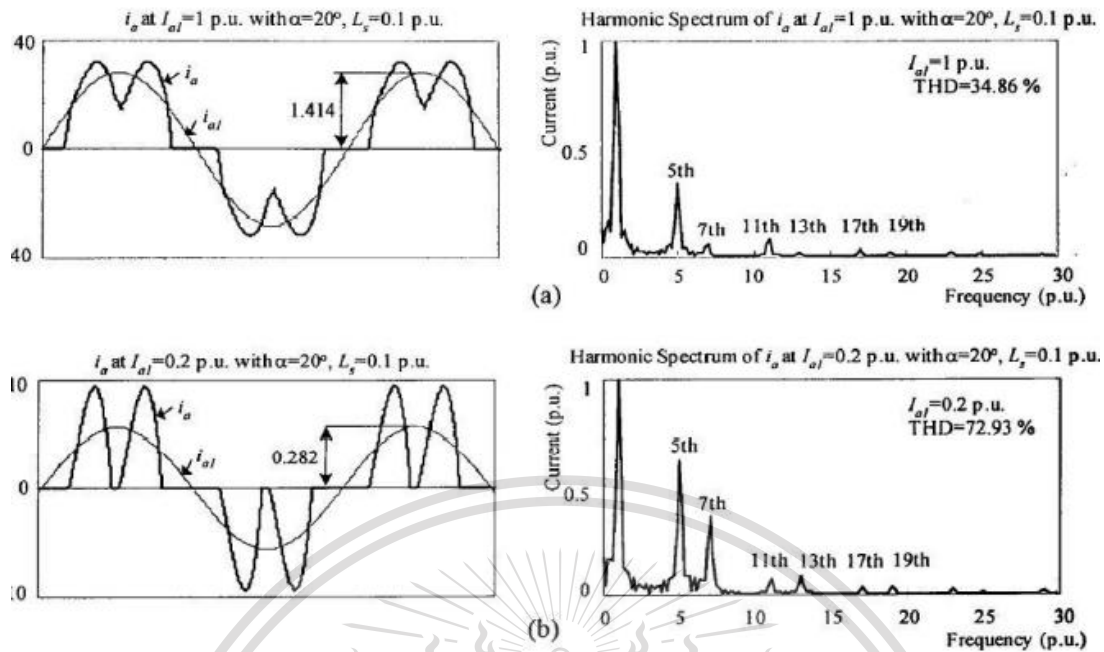
โดย DF คือค่าตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor) มีค่าเท่ากับ  $\frac{I_{a1}}{I_a}$  และ DPF คือค่าตัวประกอบกำลังมูลฐาน (Displacement power factor) มีค่าเท่ากับ  $\frac{\cos \varphi_1}{\cos \alpha}$  ในทางอุดมคติ  $\varphi_1$  มีค่าเท่ากับมุมจุดฉนวน  $\alpha$  มีผลทำให้  $\frac{\cos \varphi_1}{\cos \alpha} = 1$  จึงเขียนสมการที่ 2.28 ใหม่ได้ดังนี้

$$PF = \frac{DPF}{\sqrt{1 + THD^2}} = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 + THD^2}} = 0.955 \cos \alpha \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.6 ลูกคลื่นของกระแสไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย [4]

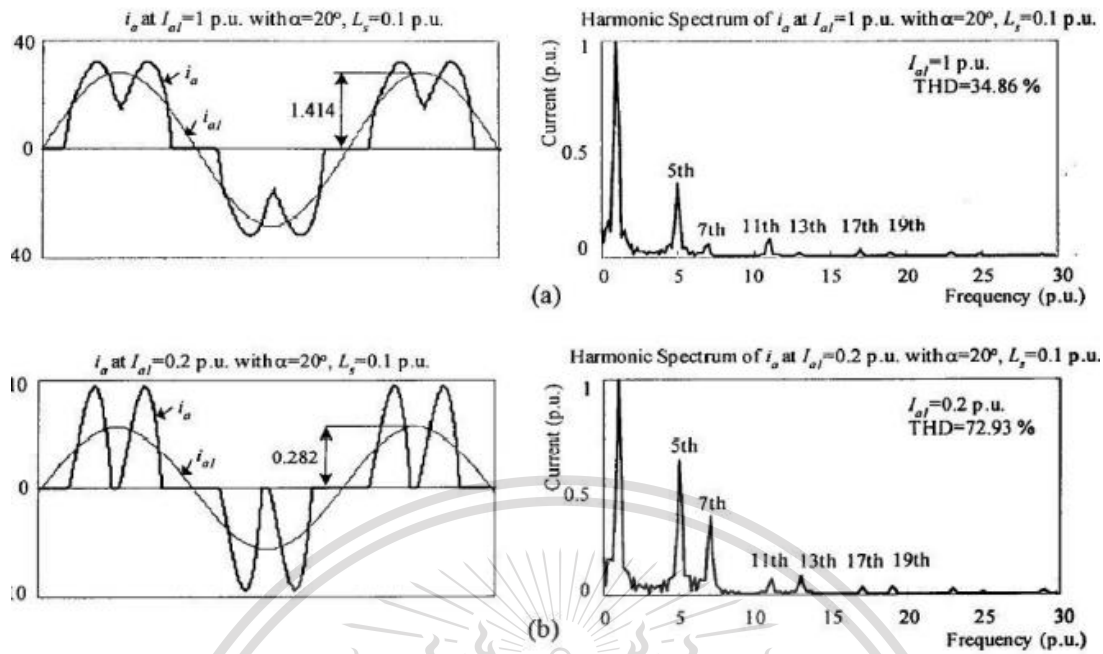
โดยรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.6 เมื่อ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย (Line-to-Line supply voltage,  $v_{LL}$ ) มากกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $E$ ) และสัมพันธ์กับอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้า  $i_a$  เพิ่มขึ้นทีละเล็กละน้อยจนถึงค่าสูงสุด (Peak) เมื่อ  $V_{LL} = E$  หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าจะลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นทั้งในลูก คลื่นซีกบวก และลูกคลื่นซีกลบผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลด ( $i_L$ ) เท่ากับผลรวมของ กระแสไฟฟ้าสามเฟส ในลูกคลื่นซีกบวกซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง  $E$  มีค่าแปรผันเล็กน้อยตามชนิด ของภาระไฟฟ้าโดย  $E$  มีค่าเข้าใกล้ค่าสูงสุดของ  $v_{LL}$  เมื่อภาระไฟฟ้าน้อย ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ผ่าน โหลดอาจไม่ต่อเนื่องเมื่อ ภาระไฟฟ้ามากขึ้น

ในกรณีตัวเหนี่ยวนำในสาย ( $L_s$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ลูกคลื่นของกระแสไฟฟ้า  $i_a$  เรียบขึ้น กล่าวคืออัตราก่อนการขึ้นและตกลงระหว่างลูกคลื่น (Rising and falling rate) จะน้อยลง ขณะเดียวกันขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลด ( $I_{a1}$ ) มากขึ้น ส่งผลทำให้ลูกคลื่นของกระแสไฟฟ้า  $i_a$  เรียบขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงลูกคลื่นของกระแสไฟฟ้าและสเปกตรัมฮาร์โมนิกที่  $I_{a1}$  มี ค่า 1 pu และ 0.2 pu ตามลำดับ เมื่อ  $I_{a1}$  คือ ค่ายังผลขององค์ประกอบมูลฐานของกระแสไฟฟ้า  $i_a$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

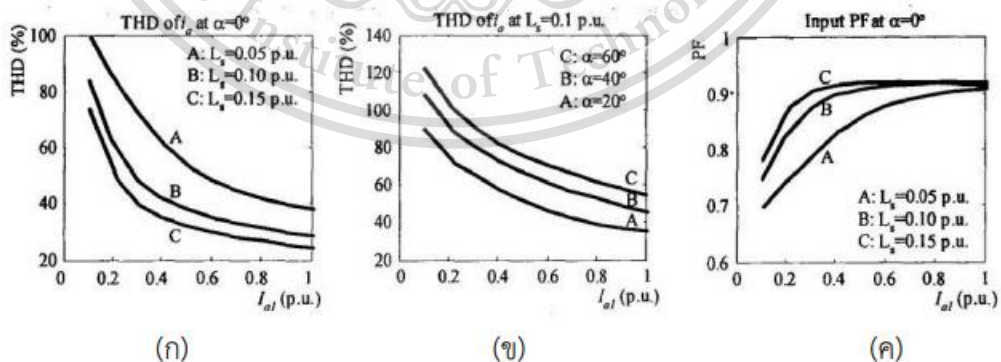
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 ลูกคลื่นของกระแสไฟฟ้าและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์เมื่อ  $I_{a1} = 1$  pu และ  $I_{a1} = 0.2$  pu [4]

ในกรณีกระแสไฟฟ้าน้อยลง มีผลทำให้ร้อยละของค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THD) มากขึ้น ดังรูปที่ 2.8 (ก) และ 2.8 (ข) แสดงกราฟ %THD ภายใต้อัตรา  $L_s$ ,  $I_{a1}$  และมุมจุดฉนวน  $\alpha$  ค่าต่างๆ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงขนาดของ  $L_s$  ส่งผลต่อค่าตัวประกอบกำลังอินพุตโดยภายใต้เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าน้อยลง หาก  $L_s$  มีขนาดเพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.8 (ค)



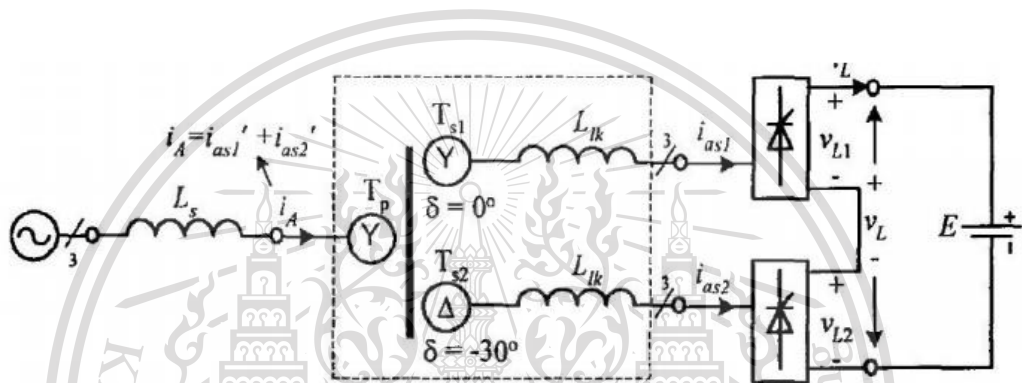
รูปที่ 2.8 (ก) และ 2.8 (ข) แสดงกราฟ %THD ภายใต้อัตรา  $L_s$ ,  $I_{a1}$  และมุมจุดฉนวน  $\alpha$  ค่าต่างๆ 2.8 (ค) ค่าตัวประกอบกำลัง  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.2.2 วงจรเรียงกระแสสิบสองพัลส์ (12-pulse Rectifier)

วงจรเรียงกระแสสิบสองพัลส์สามารถลดค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าวงจรเรียงกระแสหกพัลส์หรือวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีค่า THD เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐาน IEEE Standard 519-1992 การใช้วงจรเรียงกระแสที่มีจำนวนพัลส์มากขึ้นสามารถแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกส์ได้ดีขึ้นแต่การสร้างวงจรเรียงกระแสที่จำนวนพัลส์มากขึ้นจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความต่างเฟสกันหรือหม้อแปลงไฟฟ้าหลายมุมเลื่อนเฟส (Multi Phase-shift Transformer) นำมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสหลายพัลส์ด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกส์หรือลดฮาร์มอนิกส์ที่อันดับต่ำ เพื่อลดค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 วงจรเรียงกระแส 12 พัลส์กับโหลดตัวเก็บประจุ [4]

จากรูปที่ 2.9 แสดงวงจรเรียงกระแสสิบสองพัลส์กับโหลดตัวเก็บประจุ โดยสามารถ แทนโหลดตัวเก็บประจุได้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage source, E) วงจรนี้ประกอบด้วยหม้อแปลงเลื่อนมุมเฟส (One phase-shifting transformer) และวงจรเรียงหกพัลส์ 2 วงจรโดยหม้อแปลงไฟฟ้ามีการพันขดลวดด้านปฐมภูมิแบบสตาร์ (Star-connected) แทนด้วย  $T_p$  ในด้านทุติยภูมิมีการพันขดลวดสองชุดที่มีรูปแบบการ

เชื่อมต่อต่างกัน ชุดแรก ( $T_{s1}$ ) เชื่อมต่อแบบ สตาร์ ชุดที่สอง ( $T_{s2}$ ) เชื่อมต่อแบบเดลต้า (Delta-connected) การเชื่อมต่อต่างกันของขดลวดด้านทุติยภูมิทั้งสองนี้ทำให้มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่างกัน 30 องศา โดยการเชื่อมต่อแบบสตาร์มีเฟสหน้าแบบเดลต้าด้วยมุมเฟส  $\delta$  เท่ากับ 0 และ -30 องศาตามลำดับ กำหนด  $L_s$  คือตัวเหนี่ยวนำ ในสาย (Line reactor)  $L_{lk}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถหาความสัมพันธ์ ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนมุมเฟสได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $\frac{V_{AB}}{I_{AB}} = \frac{V_{AB}}{I_{AB}} = 2$  ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.33)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

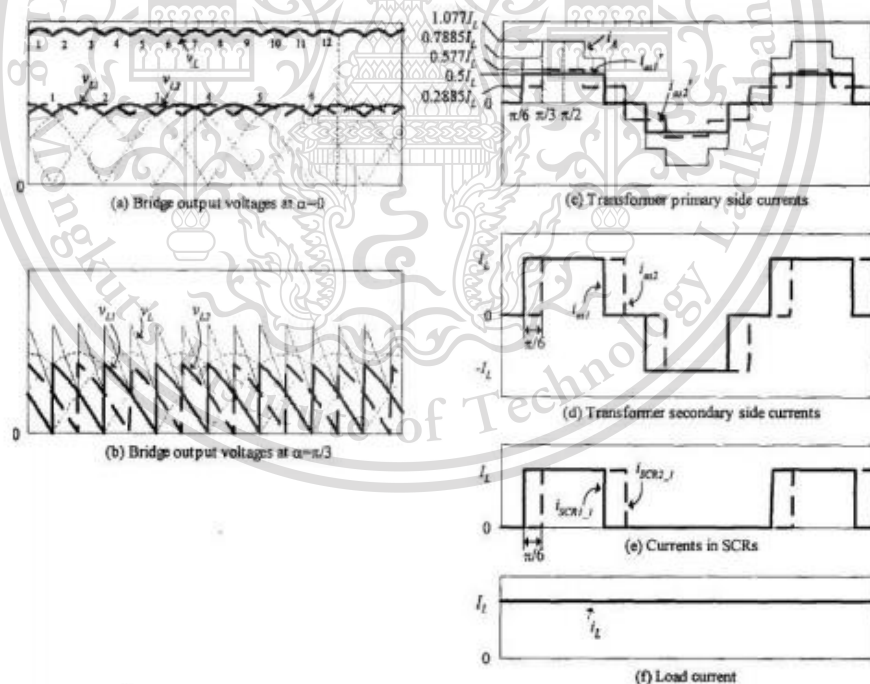
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\frac{N_p}{N_{s1}} = 2 \text{ และ } \frac{N_p}{N_{s2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2.34)$$

$$\delta = \angle V_{a1b1} - \angle V_{AB} = 0^\circ \quad (2.35)$$

$$\delta = \angle V_{a2b2} - \angle V_{AB} = -30^\circ \quad (2.36)$$

เมื่อ  $V_{a1b1}$  และ  $V_{a2b2}$  เป็นค่ายังผลของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ของการผันขดลวดของ  $T_p$ ,  $T_{s1}$  และ  $T_{s2}$  โดยมี  $N_p$ ,  $N_{s1}$  และ  $N_{s2}$  เป็นอัตราส่วนของการผันขดลวด (Turn Ratio) ของขดลวดทั้ง 3 ตามลำดับ กำหนด  $\delta$  เป็นมุมต่างเฟสของ  $V_{a1b1}$  และ  $V_{a2b2}$  เทียบกับ  $V_{ab}$  เนื่องจาก  $T_p$  และ  $T_{s1}$  มีการผันขดลวดเชื่อมต่อแบบสตาร์ทั้งคู่จึงไม่เกิดความต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิ ดังนั้น  $T_{s2}$  มีการเชื่อมต่อแบบเดลต้ามีผลทำให้มุมเฟสของขดลวดด้านปฐมภูมินำหน้าด้านทุติยภูมิอยู่ 30 องศา



รูปที่ 2.10 ลูกคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสสับสองพัลส์[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

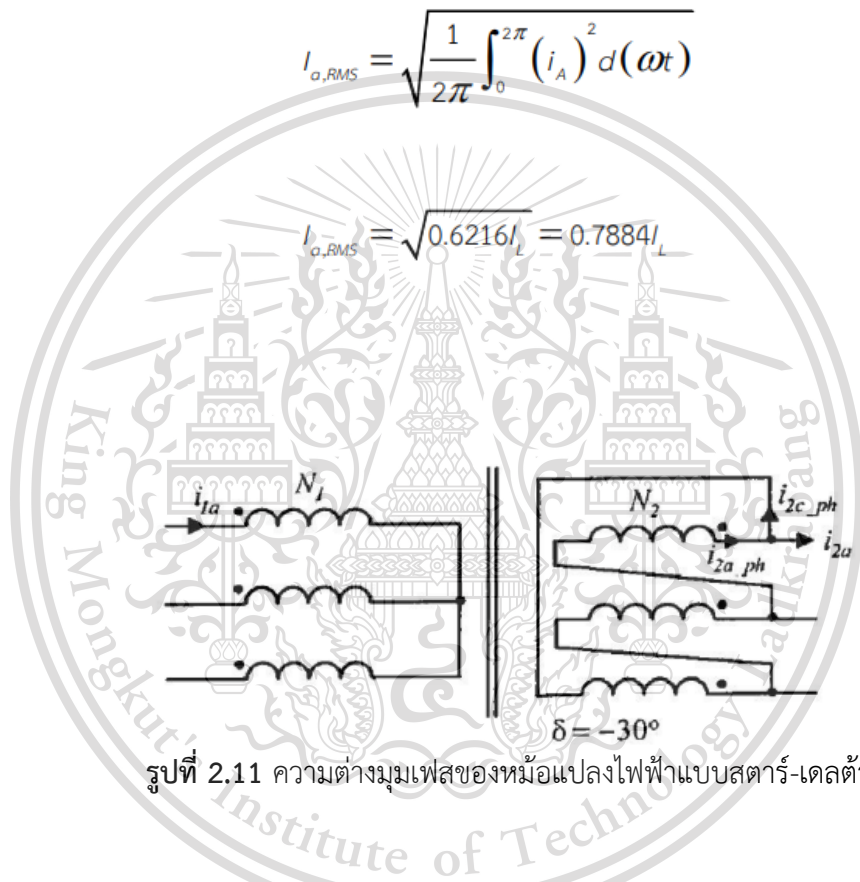
รูปที่ 2.10 แสดงลูกคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสสลับสอง พัลส์โดยใช้เอสซีอาร์ภายใต้เงื่อนไขอุดมคติ กรณีไม่คิดค่าความเหนี่ยวนำในสายและค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล ( $L_s = 0$  และ  $L_k = 0$ ) แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดเป็นไปตามสมการ

$$V_{L1,avg} = V_{L2,avg} = 1.35V_{o1b1} \cos \alpha \quad (2.37)$$

เมื่อ  $V_{L1,avg}$  และ  $V_{L2,avg}$  เป็นค่าเฉลี่ย ของ  $v_{L1}$  และ  $v_{L2}$  ตามลำดับ จากรูปที่ 2.10 ค่ากระแสไฟฟ้ายังผลของ  $i_A$  คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_{a,RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_A)^2 d(\omega t)} \quad (2.38)$$

$$I_{a,RMS} = \sqrt{0.6216} I_L = 0.7884 I_L \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.11 ความต่างมุมเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์-เดลต้า [4]

จากรูปที่ 2.11  $i_{2a\_ph}$  และ  $i_{2c\_ph}$  คือกระแสไฟฟ้าต่อเฟสของฝั่งทุติยภูมิ โดยกระแสไฟฟ้า  $i_{2a} = i_{2a\_ph} = i_{2c\_ph}$  ซึ่งสามารถเขียนอนุกรมฟูเรียร์ของกระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิได้ดังนี้

$$i_{1a} = I \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t) + \dots \right] \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดและสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$i_{1c} = I \left[ \cos(\omega t + 120^\circ) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t + 120^\circ) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t + 120^\circ) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t + 120^\circ) + \dots \right]$$

(2.41)

เมื่อ  $I$  คือ ขนาดขององค์ประกอบมูลฐานของ  $i_{a1}$  โดยอัตราส่วนขดลวดมีค่าเท่ากับ  $1/\sqrt{3}$  ดังนั้นสามารถเขียนอนุกรมฟูเรียร์ของ  $i_{2a,ph}$  และ  $i_{2c,ph}$  ได้ดังนี้

$$i_{2a,ph} = \frac{I}{\sqrt{3}} \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t) + \dots \right]$$

(2.42)

$$i_{2c} = \frac{I}{\sqrt{3}} \left[ \cos(\omega t + 120^\circ) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t + 120^\circ) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t + 120^\circ) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t + 120^\circ) + \dots \right]$$

(2.43)

ดังนั้นอนุกรมฟูเรียร์ของ  $2a$  | คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$i_{2a} = i_{2a,ph} = \frac{I}{\sqrt{3}} \left[ \cos(\omega t - 30^\circ) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t + 30^\circ) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t - 30^\circ) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t - 30^\circ) + \dots \right]$$

(2.44)

สำหรับวงจรเรียงกระแสสับสองพัลส์ ตามรูปที่ 2.10 และสมการที่ 2.20  $i_{as1}$  เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$i_{as1} = 1.1 I_L \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t) + \frac{1}{13} \cos 13(\omega t) - \dots \right]$$

(2.45)

เนื่องจาก  $i_{as2}$  มีเฟสล่าหลัง  $i_{as1}$  อยู่  $30^\circ$  เขียนสมการอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$i_{as2} = 1.1/l_L \left[ \begin{aligned} &\cos(\omega t - 30^\circ) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t + 30^\circ) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t - 30^\circ) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t - 30^\circ) \\ &+ \frac{1}{13} \cos 13(\omega t - 30^\circ) - \dots \end{aligned} \right] \quad (2.46)$$

เมื่ออัตราส่วนการผันขดลวดเท่ากับ 2 อนุกรมฟูเรียร์ของ  $i_{a1}$  และ  $i_{a2}$  ได้ดังนี้

$$i_{as1'} = \frac{1.1/l_L}{2} \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t) + \frac{1}{13} \cos 13(\omega t) - \dots \right] \quad (2.47)$$

$$i_{as2'} = \frac{1.1/l_L}{2} \left[ \begin{aligned} &\cos(\omega t - 30^\circ + 30^\circ) - \frac{1}{5} \cos(5(\omega t + 30^\circ) - 30^\circ) + \frac{1}{7} \cos(7(\omega t - 30^\circ) + 30^\circ) \\ &- \frac{1}{11} \cos(11(\omega t + 30^\circ) - 30^\circ) + \dots \end{aligned} \right] \quad (2.48)$$

ดังนั้นอนุกรมฟูเรียร์ของกระแสไฟฟารวม  $i_A$  เป็นไปตามสมการดังนี้

$$i_A = i_{as1'} + i_{as2'} = 1.1/l_L \left[ \begin{aligned} &\cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t) + \frac{1}{13} \cos 13(\omega t) - \frac{1}{23} \cos 23(\omega t) \\ &+ \frac{1}{25} \cos 25(\omega t) - \dots \end{aligned} \right] \quad (2.49)$$

จะเห็นว่าฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 17, 19 .. มีค่าเป็นศูนย์ฮาร์มอนิกอันดับต่ำที่สุดคืออันดับที่ 11 โดยภายใต้เงื่อนไขอุดมคติสามารถคำนวณค่าความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าทั้งด้านปฐมภูมิและทุติย

ภูมิได้ตามสมการต่อไปนี้

$$THD_{ias1} = THD_{ias2} = \frac{\sqrt{i_a^2 - i_{a1}^2}}{i_{a1}} \times 100 = 31.1\% \quad (2.50)$$

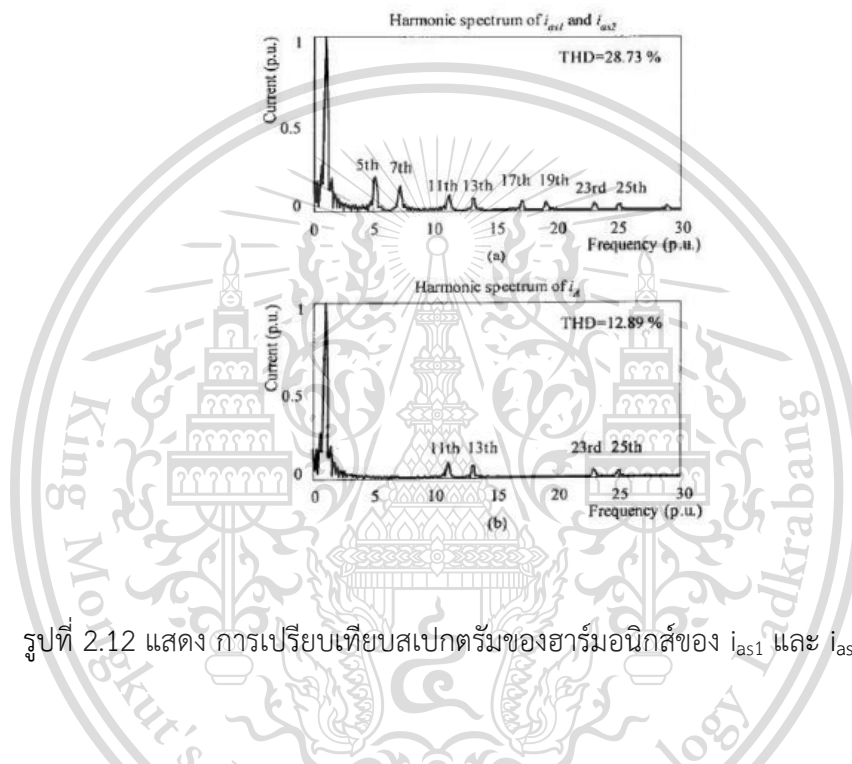
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$THD_{i_A} = \frac{\sqrt{i_A^2 - i_{A1}^2}}{i_{A1}} \times 100 = 15.3\% \quad (2.51)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า  $i_A$  ลดลงจาก  $i_{as1}$  และ  $i_{as2}$  กว่าร้อยละ 50 ซึ่งเป็นผลจากการกำจัดฮาร์มอนิกสในกระแสไฟฟ้า  $i_A$  รูปที่ 2.12 แสดง การเปรียบเทียบสเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ของ  $i_{as1}$  และ  $i_{as2}$  กับ  $i_A$



รูปที่ 2.12 แสดง การเปรียบเทียบสเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ของ  $i_{as1}$  และ  $i_{as2}$  กับ  $i_A$

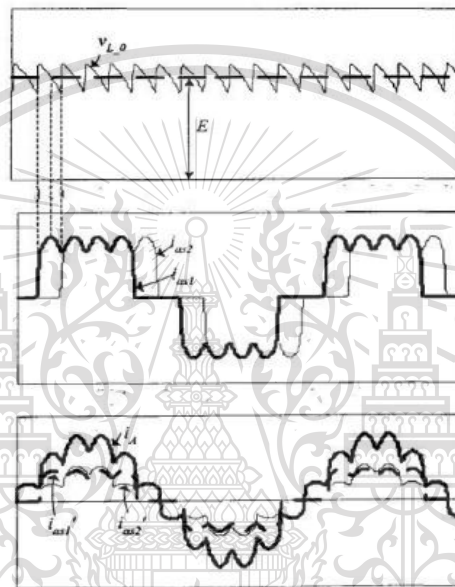
จากวงจรเรียงกระแสสับสองพัลส์กับโพลต์ตัวเก็บประจุที่ถูกเขียนแทนด้วยแหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 2.9 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกระแสตรง  $V_{L0}$  แสดงดังรูปที่ 2.13(ก) ความถี่ของการกระเพื่อม (Ripple Frequency) ใน  $V_{L0}$  เป็น 2 เท่าของวงจรเรียงกระแสหกพัลส์ โดยการส่งผ่านพลังงานเกิดขึ้นทั้งหมด 4 ครั้งในทุกๆครึ่งลูกคลื่นของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจึงมีลักษณะดัง รูปที่ 2.13(ข) โดยกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิกล่าวคือ  $i_{as1}$  และ  $i_{as2}$  คือ กระแสไฟฟ้าของ  $T_{s1}$  และ  $T_{s2}$  ตามลำดับ ขณะเดียวกันกระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิซึ่งแทนด้วย  $i_{as1}$  และ  $i_{as2}$  ผลรวมของกระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิจึงมีค่าเท่ากับ  $i_A = i_{as1} + i_{as2}$  ทั้งนี้ผลของการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับต่ำในกระแสไฟฟ้า อย่างเช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ทำให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิจึงมีลักษณะเข้าใกล้สัญญาณรูปไซน์มากยิ่งขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.13(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

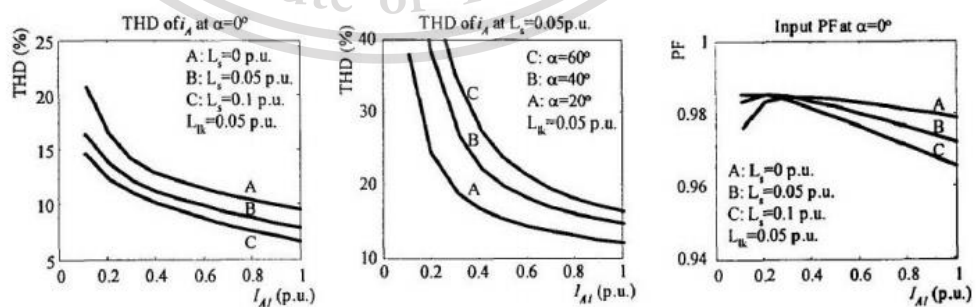
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 2.14(ก) แสดงการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำในสาย s L ที่มีผลกระทบต่อค่าความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าที่มุมจุดฉนวน  $\alpha = 0^\circ$  โดยรูปที่ 2.14(ค) แสดงผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังอินพุตที่ค่าความเหนี่ยวนำในสายต่างๆ และรูปที่ 2.14(ข) แสดงการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าที่มุมจุดฉนวนต่างๆ โดยกำหนดค่าความเหนี่ยวนำในสายและค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลมีค่าเท่ากับ 0.05 pu จะเห็นได้ว่าเมื่อมุมจุดฉนวน  $\alpha$  มีค่าต่ำลงมีผลทำให้ค่าความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าลดลงด้วยเช่นกันในช่วง 41% ถึง 13% ทั้งนี้ขนาดของกระแสไฟฟ้า A1 I ควร มากกว่า 0.22 pu จึงมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลดมีความต่อเนื่อง



รูปที่ 2.13 ลูกคลื่นกระแสไฟฟ้าวงจรเรียงกระแสสลับสองพัลส์กับโหลดตัวเก็บประจุ



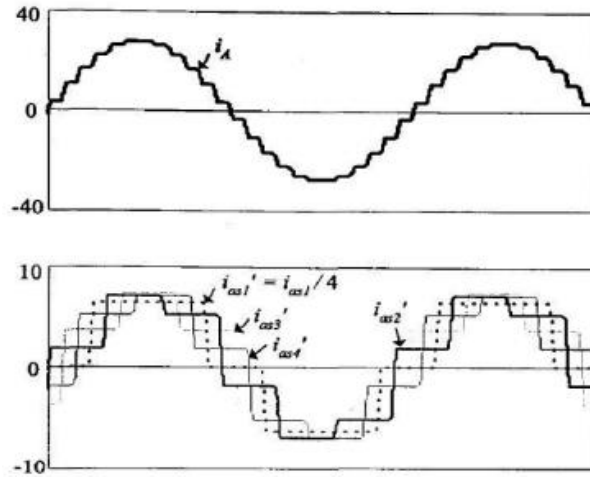
รูปที่ 2.14 (ก) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $v_{L_o}$  (ข) กระแสไฟฟ้าฝั่งขดลวดทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน (ค) กระแสไฟฟ้าฝั่งขดลวดปฐมภูมิ [4] ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

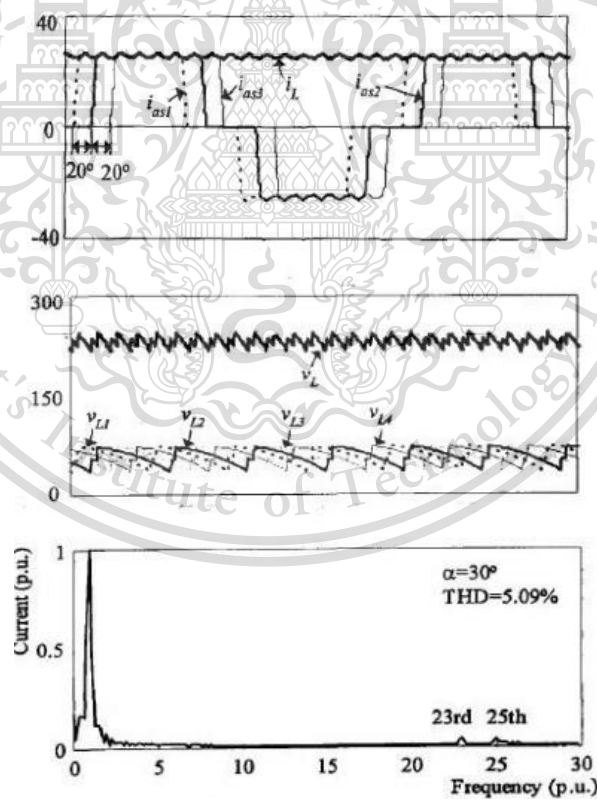
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.





รูปที่ 2.16 ลูกลิ้นกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของวงจรเรียงกระแสยี่สิบสี่พัลส์ (ก), (ข) [4]



รูปที่ 2.17 ลูกลิ้นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของโหลดและสเปกตรัมของฮาร์มอนิก (ก), (ข), (ค) [4]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 2.17(ค) แสดงสเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ จะพบว่าฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำที่สุดในกระแสไฟฟ้า  $i_a$  คือ ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 23 กระแสไฟฟ้า  $i_a$  จึงมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณรูปไซน์อย่างมาก โดยความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (THD) มีค่าเท่ากับ 5.09% แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคร่อม โหลด  $v_L$  แสดงดังรูปที่ 2.17(ข) โดยจะเห็นได้ว่าลูกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าของโหลดมีความถี่ของการกระเพื่อมที่สูงขึ้นและมีขนาดของการกระเพื่อมต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวงจรเรียงกระแสสลิปสองพัลส์

สำหรับการวิเคราะห์การกำจัดฮาร์มอนิกส์ทำได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของเฟสเซอร์ของฮาร์มอนิกส์ในกระแสไฟฟ้าฝั่งขดลวดปฐมภูมิ ดังรูปที่ 2.18



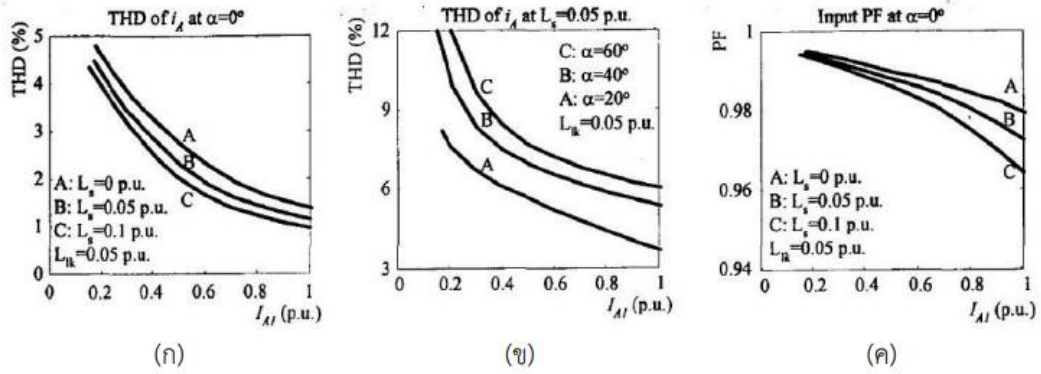
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของเฟสเซอร์ของฮาร์มอนิกส์ในกระแสไฟฟ้าฝั่งขดลวดปฐมภูมิ[4]

จากรูปที่ 2.18 ขนาดเฟสเซอร์ของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับที่เกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้าหลายมุมเฟสแต่ละตัวมีค่าเท่ากันโดยฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5, 7, 11, 13, 17 และ 19 เกิดการหักล้างกัน เนื่องจากมีมุมเฟสต่างกัน 180 องศา ดังนั้นผลรวมของฮาร์มอนิกส์ที่อันดับเดียวกันในกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นศูนย์ความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าจึงลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุมจุดฉนวน  $\alpha = 0^\circ$  ทำให้ %THD อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ IEEE Standard 519-1992 ซึ่งเมื่อภาระไฟฟ้ามากขึ้นค่าตัวประกอบกำลังลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรเรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

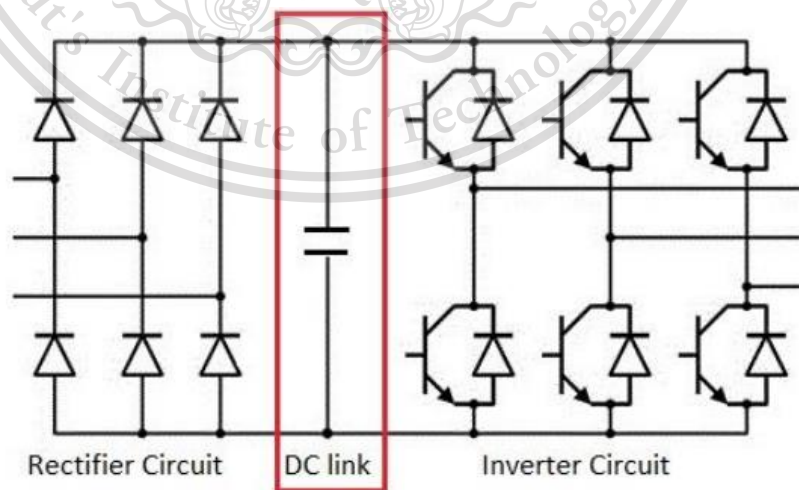


รูปที่ 2.19 กราฟแสดง %THD และค่าตัวประกอบกำลังของวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์[4]

### 2.3 วงจรเชื่อมโยงไฟตรง

วงจรเชื่อมโยงไฟตรงคือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะมีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ที่เรียกว่าตัวเก็บประจุไฟตรงเชื่อมโยง โดยทั้งนี้ชนิดและขนาดของตัวเก็บประจุไฟตรง

เชื่อมโยงขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตว่าเป็นแบบเฟสเดียวหรือ 3 เฟส ตัวเก็บประจุนี้เชื่อมต่อแบบขนานระหว่างตัวนำบวกและตัวนำลบทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อระดับแรงดันลดลงชั่วคราวและทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าสำหรับจ่ายเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ขณะที่เกิดสภาวะการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสที่จ่ายเข้าโครงข่ายอินเวอร์เตอร์อย่างทันทีทันใด



รูปที่ 2.20 วงจรเชื่อมโยงไฟตรงที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.3.1 ตัวเก็บประจุไฟตรงเชื่อมโยง

ขนาดของตัวเก็บประจุไฟตรงเชื่อมโยงที่เหมาะสมสำหรับรักษาระดับแรงดันให้เรียบและลดการกระเพื่อมของสัญญาณไฟตรงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสอย่างทันทีทันใดตัวเก็บประจุไฟตรงนี้จะต้องสามารถจ่ายพลังงานให้กับระบบได้อย่างน้อยชั่วขณะหนึ่ง เพื่อลดการเกิดเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงของไฟตรง ซึ่งเป็นความเสี่ยงที่ทำให้การทำงานของระบบไม่ต่อเนื่องและอาจทำให้เกิดการลัดวงจรของอินเวอร์เตอร์ได้

ขนาดของตัวเก็บประจุไฟตรงสามารถคำนวณได้จากแรงดันไฟฟ้าสูงสุดสำหรับตัวเก็บประจุไฟตรง จากสมการ

$$V_{DC,link} = \sqrt{2} \times V_{max} \quad (2.52)$$

$$C_{DC} = \frac{2V_{max} \times I_{max} \times t_{recovery}}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \quad (2.53)$$

## 2.4 สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต

Pulse Width Modulation (PWM) เป็นเทคนิคที่ทำให้เราสามารถอ่าน/เขียนข้อมูลแบบอนาล็อกด้วยสัญญาณดิจิทัลได้ โดยตัวควบคุมการสร้างสัญญาณดิจิทัล (Digital control) จะสร้างสัญญาณ

คลื่นสี่เหลี่ยมออกมา โดยสัญญาณที่สร้างออกมาจะสลับกันระหว่างเปิดกับปิดโดยการมอดูเลตพื้นฐานที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่เทคนิคไซนูซอยด์พีดับเบิลยูเอ็ม (SPWM) , เทคนิคสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม (SVPWM) , เทคนิคเดลต้าพีดับเบิลยูเอ็ม (DPWM) , เทคนิคฮาร์โมนิกส์อินเจกชันพีดับเบิลยูเอ็ม (HIPWM) ซึ่งด้านเอาต์พุตจะมีสัญญาณแรงดันเป็นแบบ 2 ระดับ และ 3 ระดับ เรียกว่าสัญญาณแบบไบโพลาร์สวิตซ์และสัญญาณแบบยูนิโพลาร์สวิตซ์ ตามลำดับ

### 2.4.1 การสวิตซ์ของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามที่ต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform)

ตัวแปรและความหมายที่สำคัญในการสวิตซ์แบบ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $V_{control}$  สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก  $V_{triangle}$  สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตซ์ ซึ่ง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- $f_1$  ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์
- $f_s$  ความถี่ของการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์
- $m_a$  ดัชนีการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
- $m_f$  อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2.54)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.55)$$

เมื่อ  $\hat{V}_{control}$  คือค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

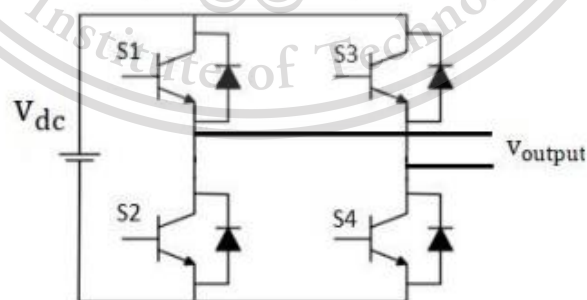
$\hat{V}_{triangle}$  คือค่ายอดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

#### 2.4.2 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์คือการควบคุมให้สวิตช์กึ่งบนกึ่งล่างสับกัน นำกระแส จากรูป 2.4.1 การทำงานของสวิตช์ S1 และ S4 จะถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลาและอีกคู่หนึ่งคือการทำงานของสวิตช์ S2 และ S3 โดยมีเงื่อนไข 2 เงื่อนไขดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 เมื่อ  $V_{control} > V_{triangle}$  สวิตช์ S1 และ S4 จะนำกระแส

เงื่อนไขที่ 2 เมื่อ  $V_{control} < V_{triangle}$  สวิตช์ S2 และ S3 จะนำกระแส



รูปที่ 2.21 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีได้โดยไม่ต้องจ่ายค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### ตารางที่ 2.3 การทำงานของสวิตช์แบบไบโพลาร์ที่เงื่อนไขทั้ง 2 เงื่อนไข

เงื่อนไข	สวิตช์นำกระแส	สวิตช์นำกระแส	แรงดันด้าน output
1	S1	S4	+V <sub>out</sub>
2	S2	S3	-V <sub>out</sub>

การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะพิจารณาจากสมการเส้นตรงของรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม จะได้

$$V_{triangle} = \frac{\hat{V}_{triangle}}{\left(\frac{T_s}{4}\right)}(t) \quad \text{ที่ } 0 < t < T_s/4 \quad (2.56)$$

และแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เท่ากับ

$$V_{out} = \left(1 + \frac{V_{control}}{V_{triangle}} - 1\right) V_{dc} \quad (2.57)$$

$$V_{out} = \left(\frac{V_{control}}{V_{triangle}}\right) V_{dc} \quad (2.58)$$

$$V_{out} = (m_a) V_{dc} \quad (2.59)$$

เมื่อ  $\frac{V_{control}}{V_{triangle}}$  เป็นดัชนีการมอดูเลตสัญญาณ  $m_a$  โดยกำหนดให้ดัชนีการมอดูเลตสัญญาณมีค่าเท่ากับ  $0 < m_a < 1$  ที่จะทำให้แรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วงเชิงเส้น

#### 2.4.3 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพล่า

ในสวิตช์แบบยูนิโพล่าการควบคุมสวิตช์ในกึ่ง A และกึ่ง B จะแยกสัญญาณที่ควบคุมออกจากกัน คือสวิตช์ในกึ่ง A จะถูกควบคุมจากสัญญาณ  $V_{control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ขณะที่สวิตช์ในกึ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณ  $-V_{control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม โดยที่สวิตช์ S1 และ S3 จะมีสถานะตรงข้ามกับสวิตช์ S2 และ S4 เพื่อป้องกันการลัดวงจรที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยมีเงื่อนไข 4 เงื่อนไข ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 เมื่อ  $V_{control} > V_{triangle}$  สวิตช์ S1 จะนำกระแส

เงื่อนไขที่ 2 เมื่อ  $V_{control} < V_{triangle}$  สวิตช์ S2 จะนำกระแส

เงื่อนไขที่ 3 เมื่อ  $-V_{control} > V_{triangle}$  สวิตช์ S3 จะนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามมีการใช้งานเพื่อการศึกษานอกระบบ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลึกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เงื่อนไขที่ 3 เมื่อ  $-V_{\text{control}} < V_{\text{triangle}}$  สวิตช์ S4 จะนำกระแส

สามารถสรุปการทำงานของสวิตช์แบบยูนิโพล่าได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การทำงานของสวิตช์แบบยูนิโพล่าที่เงื่อนไขทั้ง 4 เงื่อนไข

เงื่อนไข	สวิตช์นำกระแส	สวิตช์นำกระแส	แรงดันด้าน output
1	S1	S4	$+V_{\text{out}}$
2	S2	S3	$-V_{\text{out}}$
3	S1	S3	0
4	S2	S4	0

จากตาราง 2.4 การเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสาย ( $V_{\text{out}}$ ) จะเป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าบวกไปยังศูนย์และศูนย์ไปยังบวกในครึ่งคาบ ส่วนอีกครึ่งคาบจะมีแรงดันไฟฟ้าด้านออกเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าค่าลบไปยังศูนย์และศูนย์ไปยังลบส่วนขนาดแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะเท่ากับการสวิตช์แบบไบโพล่า ตามสมการที่ 2.51

## 2.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับที่มีทั้งแรงดันและความถี่สำหรับการใช้งานที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงๆ อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไม่สามารถทนแรงดันสูงได้ จึงต้องมีการประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์หลายเพื่อให้สามารถรับแรงดันได้มากขึ้นเนื่องจากหลักการทางโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเกิดจาก จากการต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง ทั้งยังมีระดับขั้นที่มากขึ้นสามารถลดความถี่ ฮาร์มอนิกส์ลงได้

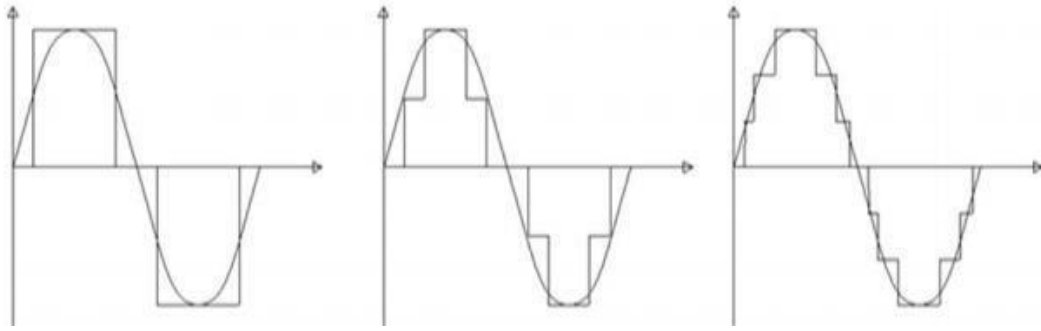
อินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปหรืออินเวอร์เตอร์ 2 ระดับจะได้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันหรือ

กระแสเอาต์พุตที่มีระดับขั้นแตกต่างกัน 2 คือ ค่าบวกและค่าลบของสัญญาณซึ่งมีลักษณะเป็น รูปคลื่นสี่เหลี่ยม ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะทำให้ได้ระดับขั้นของสัญญาณที่แตกต่าง ตามจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ สัญญาณที่ได้จึงไม่ใช่สี่เหลี่ยมแต่จะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

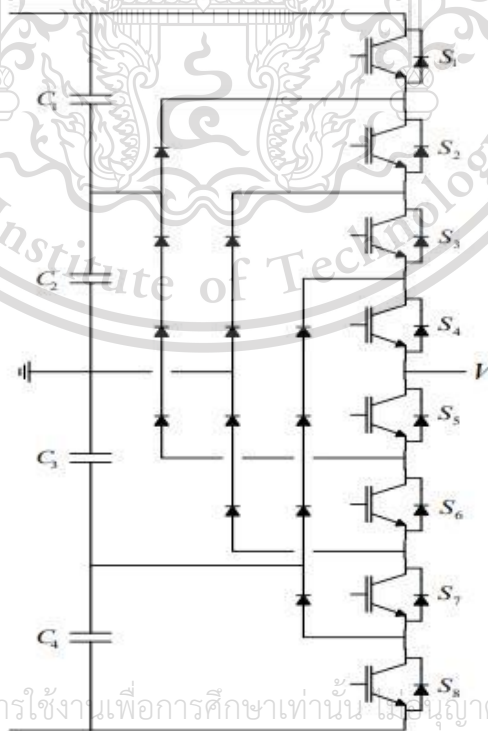
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.22 เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ, อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ และอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ซึ่งมีรูปคลื่นเข้าใกล้รูปไซน์มากขึ้นตามลำดับ[7]

อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบ่งตามโครงสร้างได้ 3 ชนิดได้แก่ Diode Clamped multilevel Inverter มีโครงสร้างใกล้เคียงกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ แต่ต่ออุปกรณ์สวิตซ์กำลังเพิ่มเข้าไปในแต่ละกิ่งเพื่อเพิ่มจำนวนระดับแรงดันเอาต์พุตตัวเก็บประจุในการแบ่งแรงดัน และต่อไดโอดเพิ่มเข้ามาเพื่อเป็นเส้นทางให้กระแสไหลในแต่ละระดับ ถ้าต้องการสร้างอินเวอร์เตอร์  $n$  ระดับ จะต้องมีจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์เป็น  $2(n-1)$ , จำนวนไดโอดเป็น  $(n-1)(n-2)$  และจำนวนตัวเก็บประจุเป็น  $(n-1)$  โดยโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดไดโอดแคลมป์แสดงดังรูปที่ 2.23

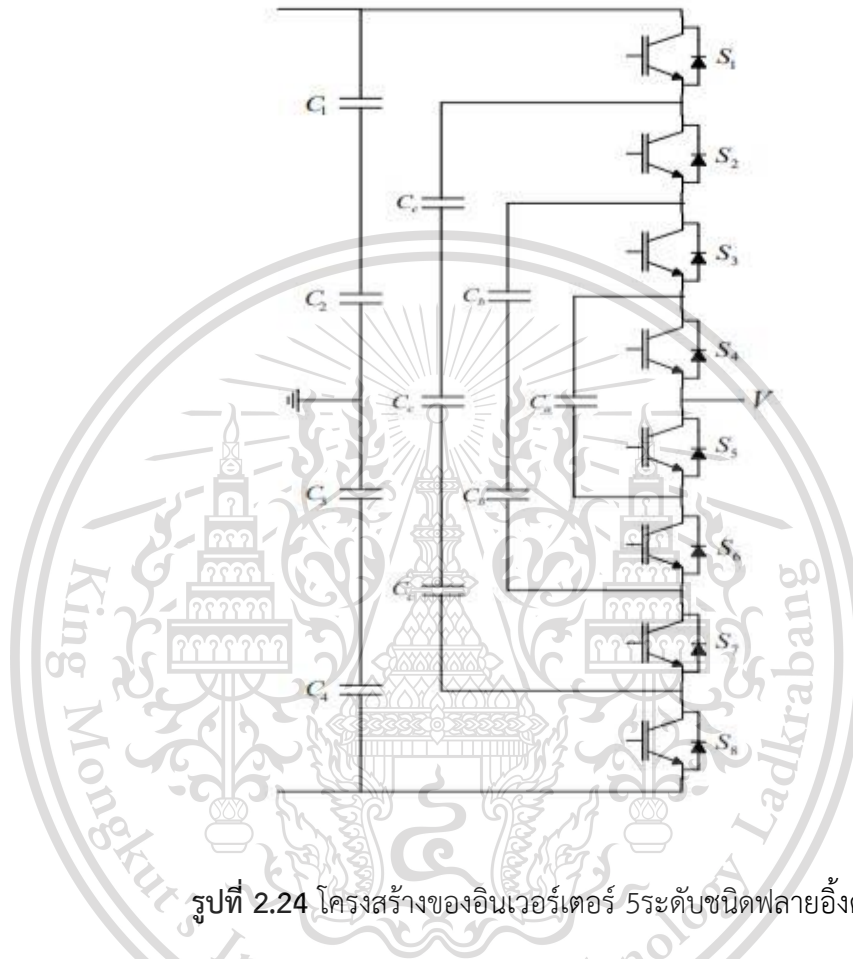


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลอ้างอิงที่มีในการนำไปใช้  
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดไดโอดแคลมป์[9]

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Flying-Capacitor multilevel Inverter มีโครงสร้างใกล้เคียงกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ แต่จะอาศัยตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ระหว่างสวิตช์ของแต่ละระดับแบ่งแรงดันการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์จึงต้องควบคุมไปถึงการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์[9]

Cascade H-Bridge multilevel Inverter มีโครงสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์หนึ่งเฟสหรือเอชบริดจ์ที่นำเอาแรงดันเอาต์พุตมาต่ออนุกรมกันซึ่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้ใช้ อุปกรณ์น้อยกว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์และชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ทำราคาและน้ำหนักน้อยกว่าด้วย

โดยในส่วนของปริญญาพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเฉพาะ Cascade H-Bridge multilevel Inverter ซึ่งต่อไปจะกล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ และการสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่น อาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

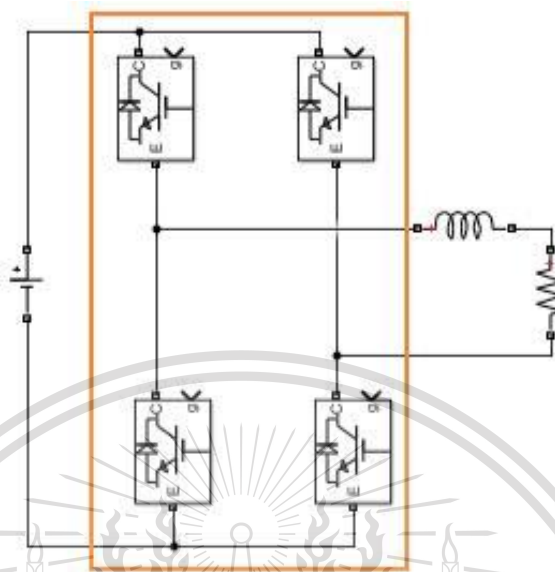
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 2.5.1 หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ โครงสร้างของวงจรที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ประกอบด้วยสวิตช์กำลังทำหน้าที่สับเปลี่ยนทิศทางการไหล

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ไปยังโหลดผ่านเทคนิคการสวิตชิง และฟรีวิลลิงไดโอด4ชุด มีทั้งหมด โดยที่ต่ออนุกรมกัน2ชุด และต่อขนานรวมกัน ดังรูปที่2.25



รูปที่ 2.25 วงจรอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์แบ่งเป็นโหมดการทำงานได้ 4 โหมดหลักๆ โดยที่สวิตซ์ตัวบนและสวิตซ์ตัวล่างจะต้องไม่นำกระแสพร้อมกัน เพื่อป้องกันการ ระหว่างบัสบวกและบัสลบ ดังนี้

- เมื่อสวิตซ์S1และ S4 ทำงานหรือนำกระแสพร้อมกัน แรงดันตกคร่อมที่จุดA และจุด B มีค่าเป็นบวก  $+V$ คือ $V_{AB}$  เนื่องจากกระแสมีทิศทางจากจุด A ไปยังจุด B
- เมื่อสวิตซ์S1และ S3 ทำงานหรือนำกระแสพร้อมกัน แรงดันตกคร่อมที่จุดA และจุด B มีค่าเป็นศูนย์
- เมื่อสวิตซ์S2และ S3 ทำงานหรือนำกระแสพร้อมกัน แรงดันตกคร่อมที่จุดA และจุด B มีค่าเป็นลบ  $-V$ คือ $V_{AB}$  เนื่องจากกระแสมีทิศทางจากจุดBไปยังจุดA
- เมื่อสวิตซ์S3และ S4 ทำงานหรือนำกระแสพร้อมกัน แรงดันตกคร่อมที่จุดA และจุด B มีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.5 โหมดการทำงานของสวิตช์และแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์

S1	S2	S3	S4	แรงดันเอาต์พุต
1	0	0	1	$+V_{AB}$
1	0	1	0	0
0	1	1	0	$-V_{AB}$
0	1	0	1	0

หมายเหตุ 1 แทนการนำกระแสของสวิตช์ และ 0 แทนการหยุดนำกระแส

### 2.5.2 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

พิจารณาระบบหนึ่งเฟส อินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถสร้างได้จากการต่ออนุกรม กันของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็นระดับขั้น ขนาดของแรงดัน เท่ากับผลรวมของแรงดันเอาต์พุตของแต่ละอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์รวมกัน **ชนิด** โดยที่จำนวนระดับ ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.52

$$m = 2s + 1 \quad (2.60)$$

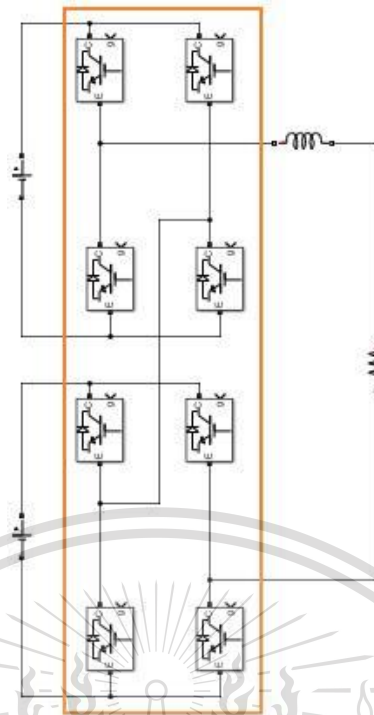
เมื่อ  $m$  คือจำนวนระดับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์

$s$  คือ จำนวนของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือจำนวนของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ย่อยในหนึ่งเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.26 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดคาสเคด

ดังนั้นเมื่อต้องการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ให้ได้รูปคลื่นแรงดันเฟสเอาต์พุต 5 ระดับ จึงต้องใช้จำนวนของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือจำนวนของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ ย่อยในหนึ่งเฟส จำนวน 2 ชุด ดังแสดง

ในรูปที่ 2.26 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์มีข้อเสีย คือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องแยกกราวด์ออกจากกันในแต่ละชุด แต่มีข้อดีคือจำนวน ระดับของแรงดันเฟสเอาต์พุตที่ออกไปมากกว่าจำนวนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงตามสมการที่ 2.61

2.61 ซึ่งสูงกว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆ โดยที่แรงดันเฟสเอาต์พุตที่ได้มาจากความสัมพันธ์ขวนความกว้างพัลส์และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตรงตามสมการที่ 2.61

$$V_{AN} = DV_{dc} \quad (2.61)$$

$V_{AN}$  คือ แรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

D คืออัตราส่วนความกว้างพัลส์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

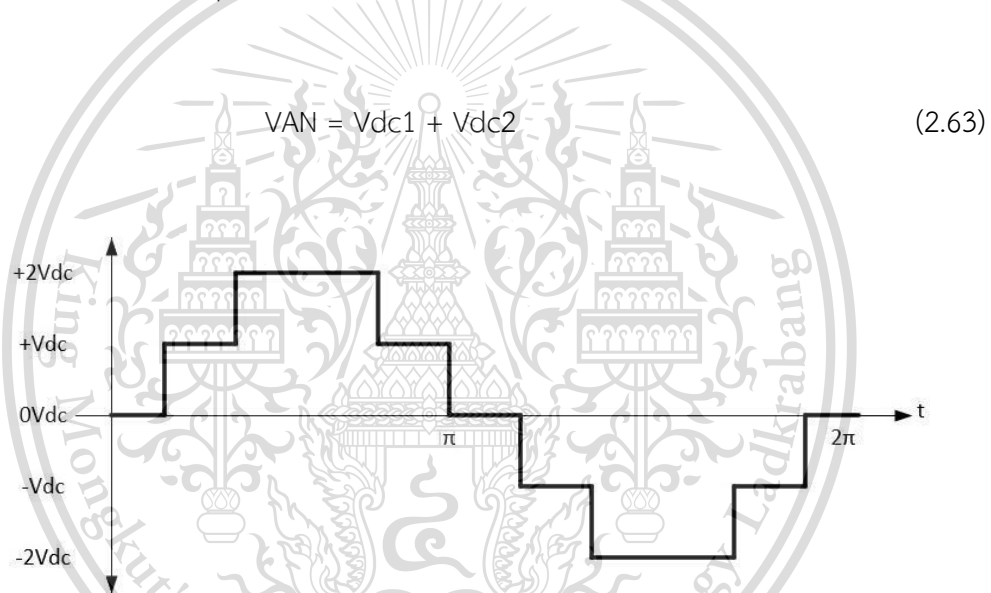
$V_{dc}$  คือระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ได้

จากความสัมพันธ์ของจำนวนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงต่อหนึ่งเฟสและระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์ย่อยหนึ่งเฟส ดังสมการที่ 2.54

$$V_{dc} = sE \quad (2.62)$$

เมื่อ  $E$  คือระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์ย่อยหนึ่งเฟส

และรูปคลื่นแรงดันเฟสเอาต์พุต 5 ระดับ เมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าเท่ากันทั้ง 2 ชุดคือ  $V_{dc}$  แสดงดังรูปที่ 2.27 ซึ่งมีลักษณะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ ค่าแรงดันที่ค่าสูงสุดเป็นผลรวมของแรงดันเอาต์พุตของแต่ละอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ย่อยรวมกันดังสมการที่ 2.55 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่ได้เป็นขั้นๆ 5 คือจำนวน  $+2V_{dc}$ ,  $+V_{dc}$ ,  $0$ ,  $-V_{dc}$  และ  $-2V_{dc}$



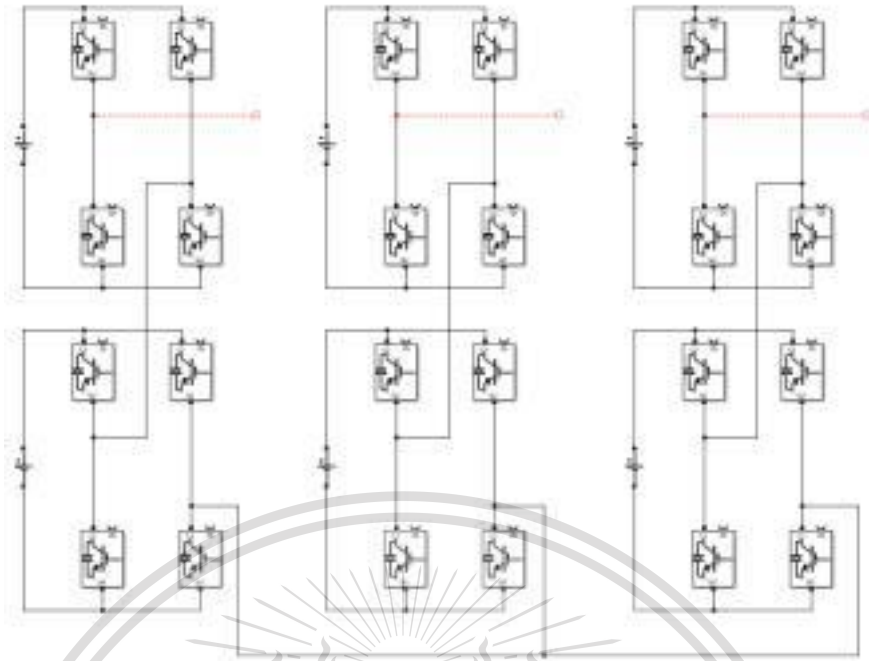
รูปที่ 2.27 แรงดันเอาต์พุตเฟสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์

พิจารณาระบบสามเฟสโครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ได้จากการ นำวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์หนึ่งเฟส ต่อเข้าด้วยกันแบบสตาร์หรือเดลต้าเพื่อ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์สามเฟส ในส่วนของปริภูมยานิพนธ์จะต่ออินเวอร์เตอร์ 5 ระดับหนึ่งเฟสเข้าด้วยกันแบบสตาร์ ได้อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สามเฟส แสดงดังรูปที่ 2.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.28 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สามเฟส

### 2.5.3 เทคนิคการสวิตช์แบบยกระดับคลื่นพาร์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์จะอาศัยหลักการการมอดูเลตสัญญาณพัลส์ โดยใช้สัญญาณสามเหลี่ยม หลายระดับเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์อ้างอิง จำนวนสัญญาณสามเหลี่ยมกับระดับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.56

$$m_c = m - 1 \quad (2.64)$$

$m_c$  คือจำนวนสัญญาณสามเหลี่ยม

$m$  คือ จำนวนระดับเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จำนวนสัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้ในการมอดูเลตจะมีจำนวนเป็นเลขคู่ โดยแบ่งอยู่

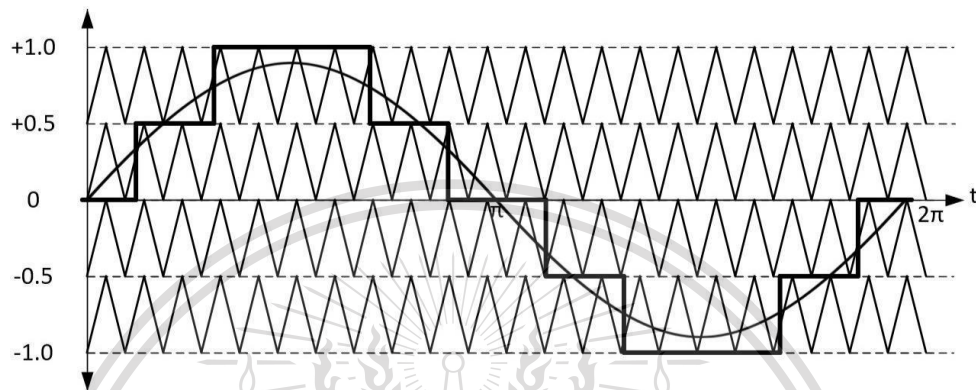
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในช่วงซีกบวกและช่วงซีกลบเท่ากัน และใช้สัญญาณไซน์อ้างอิงเปรียบเทียบในแต่ละช่วงที่อยู่

สัญญาณสามเหลี่ยมควบคุมการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยโครงสร้างและ หลักการของสัญญาณสามเหลี่ยมนี้มี 3 แบบ คือ IPD (In-Phase disposition), POD (Phase-Opposite disposition) และ APOD (Alternative-Phase Opposite disposition) โดยในส่วนของ ปริณญา นินพนธ์นี้ได้เลือกใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณสามเหลี่ยมแบบ IPD ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณสามเหลี่ยมแบบ In-Phase disposition : IPD สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

## 2.6 การประวิงเวลาสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลตชั้น

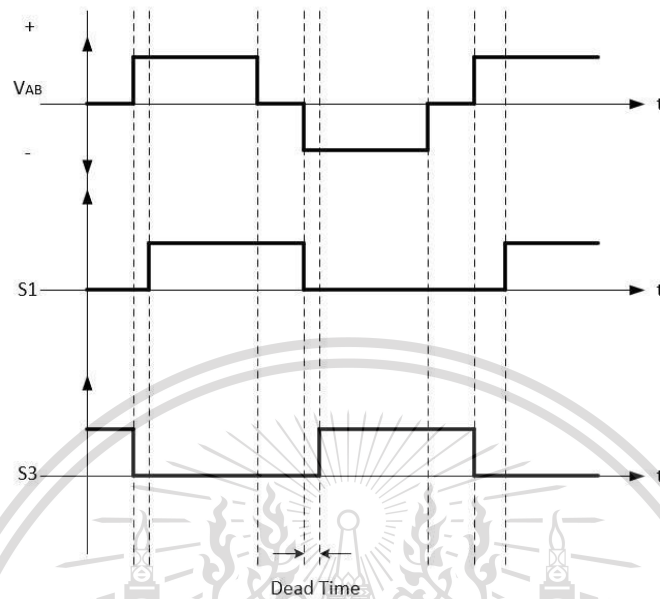
ในการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง เพื่อให้เกิดการสับเปลี่ยนทิศทางไหลของกระแสที่ไหลได้ เป็นการสวิตช์ในอุดมคติ นั่นคือ สวิตช์กำลังจะเปิดหรือปิดทันทีที่มีการควบคุม แต่ในทางปฏิบัติแล้วแม้ว่าอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ (Solid state switching device) จะมีเวลาในการสวิตช์ที่แน่นอน และการใช้งานหลักๆ คือการเปิดหรือปิดวงจร แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่มีตัวเก็บประจุไฟตรงเชื่อมโยงต่อคร่อมอยู่กับอุปกรณ์กำลังสองตัวที่ต่ออนุกรมกัน ถ้าหากอุปกรณ์สวิตช์กำลังทั้งสองตัวทำงานพร้อมกันจะทำให้เกิดการลัดวงจรของตัวเก็บประจุไฟตรงเชื่อมโยง ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการสวิตช์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อุปกรณ์สวิตช์กึ่งบนและกึ่งล่าง โดยการหน่วงเวลาเมื่อทำงานกลับสถานะเพื่อไม่ให้ทำงานพร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การประวิงเวลาสัญญาณพัลส์สวิตมอดูเลตขึ้น

แม้ว่าการหน่วงเวลาจะทำให้อุปกรณ์สวิตช์กำลังกึ่งบนและกึ่งล่างไม่ทำงานพร้อมกันจึงไม่เกิดการลัดวงจรแต่ผลของการหน่วงเวลาจะทำให้ไม่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ชั่วขณะและรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากอินเวอร์เตอร์มีความผิดเพี้ยนไปจากที่ควรจะได้ทำเอาต์พุตที่ได้เกิดริบเปิล (ripple) และเป็นสาเหตุให้แรงบิดของมอเตอร์เกิดริบเปิลด้วย

## 2.7 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ เป็นพลังงานกล โดยจะแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่แบบโรเตอร์กรงกระรอก (squirrel-cage rotor) และแบบโรเตอร์พันขดลวด (wound rotor) ซึ่งทั้ง 2 แบบจะมีส่วนที่แตกต่างกันที่ส่วนที่เคลื่อนที่เท่านั้น และส่วนที่อยู่กับที่จะเหมือนกันทั้ง 2 แบบ

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยหลักการของการเกิดสนามแม่เหล็ก หมุนโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าสามเฟสให้กับมอเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ส่วนสเตเตอร์มีความเร็วซิงโครนัส โดยที่ความเร็วนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า และขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สนามแม่เหล็กนี้จะตัดผ่านตัวนำที่อยู่บนโรเตอร์ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ตัวนำ ซึ่งตัวนำถูกต่อให้ครบวงจรอยู่แล้วจึงเกิดกระแสไหลในตัวนำทำให้เกิดแรงกระทำกับโรเตอร์ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

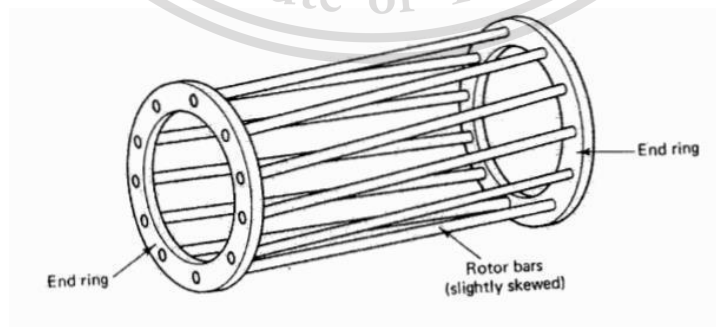
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.7.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำมีโครงสร้างแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ใหญ่ๆ ได้แก่ สเตเตอร์(stator) หรือส่วนที่อยู่กับที่ และโรเตอร์(rotor)หรือส่วนที่หมุน โดย ส่วนของสเตเตอร์ของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเหมือนกับสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซิงโครนัสทุกประการ ของโรเตอร์จะแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยแบ่งเป็น 2 แบบ

1.โรเตอร์แบบกรงกระรอก ประมาณ 90% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้โรเตอร์แบบ กรง กระรอก เพราะโรเตอร์ชนิดนี้ทำได้ง่ายและทนทานที่สุดลักษณะโครงสร้างของโรเตอร์แบบกรง กระรอกจะประกอบไปด้วย แกนโรเตอร์ ขดลวดโรเตอร์ ใบพัดระบายความร้อน และเพลา แกนโรเต ออร์ประกอบด้วยแกนเหล็กที่ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ มีลักษณะกลมอัดซ้อนกันโดยมีเพลาร้อยทะล เพื่อยึดให้แน่นส่วนที่ผิวของโรเตอร์นี้จะมีสล๊อตไปตามทางยาวและในสล๊อตจะมีแท่งตัวนำทองแดง หรือ อะลูมิเนียมฝังอยู่โดยรอบ ที่ส่วนปลายของแท่งตัวนำจะเชื่อมติดกับแหวนโลหะ จะมี คล้ายกรง กระรอกในปัจจุบันตัวนำที่ฝังอยู่ในสล๊อตของโรเตอร์โดยใช้วิธีหล่อตัวนำที่เป็นโลหะผสม หรือ อะลูมิเนียม รวมทั้งหล่อวงแหวนตัวนำที่มีครีบช่วยระบายความร้อนเชื่อมเข้ากับปลายตัว 2 ด้านของโร เตอร์



รูปที่ 2.31 โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก.31[11]



รูปที่ 2.32 ลักษณะตัวนำของโรเตอร์แบบกรงกระรอก.32[11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. โรเตอร์แบบพันขดลวดตัวนำที่ใช้จะพันด้วยขดลวดทองแดงเคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าอย่างดี จำนวน 3 ชุด หรือ 3 เฟสพันอยู่ในสลอต แต่ละเฟสจะวางทำมุมห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า และต้องพันขดลวดให้มีจำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ขดลวดทั้ง 3 ชุดจะต่อกันแบบสตาร์(star) และปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับสลีปรिंग(slipring) 3 วงที่ติดอยู่บนเพลาด้านหนึ่ง ซึ่งจะมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่เพื่อต่อไปยังอุปกรณ์ควบคุมภายนอก ความเร็วของมอเตอร์ทำได้โดยการเพิ่มหรือลดค่าความต้านทานภายนอกที่ต่อผ่านทางสลีปรिंगมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเพื่อให้แรงบิดเริ่มเดินสูงในช่วงแรกเมื่อมอเตอร์หมุนเข้าสู่ความเร็วปกติ สลีปรึงจะถูกลัดวงจรทำให้โรเตอร์ทำงานแบบกรงกระรอก



รูปที่ 2.33 โครงสร้างของโรเตอร์แบบพันขดลวด.33[11]

### 2.7.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส $n_s$

ป้อนกระแสไฟกระแสสลับ 3 เฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 ชุดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ( $n_s$ ) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่ของกระแสไฟ 3 เฟส ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (f) และจำนวนขั้วแม่เหล็กของ มอเตอร์ (P) ดังสมการที่ 2.65

$$n_s = \frac{120}{P} \quad \text{หน่วยรอบต่อวินาที} \quad (2.65)$$

ในขณะที่โรเตอร์หยุดอยู่กับที่ สนามแม่เหล็กหมุนจะเคลื่อนที่ตัดกับตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ตัวนำโรเตอร์และเนื่องจากวงจรที่ตัวนำโรเตอร์ถูก ทำให้ลัดวงจรโดนวงแหวนส่วนหัวและส่วนท้าย จึงทำให้เกิดกระแสไหล ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ แล้วจึงเกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสส่งผลให้มีทิศทางไปทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนถ้าความเร็วโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสจะไม่เกิด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ แรงบิดที่โรเตอร์จะกลายเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงไม่สามารถเท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้

2.7.3 สลิปและความถี่ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส( $n_s$ )กับความเร็วโรเตอร์( $n_r$ ) แสดงได้ว่า  $n_s - n_r$  จะถูกเรียกว่าความเร็วสลิป(slip speed) และ อัตราส่วนระหว่างความเร็วสลิปต่อ ความเร็วซิงโครนัสจะเรียกว่าสลิป

(slip:  $s$ ) แสดงได้ว่า

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.66)$$

ซึ่งจะได้ความเร็วโรเตอร์ คือ

$$n_r = (1 - S)n_s \quad (2.67)$$

ความเร็วโรเตอร์จะเท่ากับ ความเร็วซิงโครนัสได้ ถ้าหากว่าสลิปเป็น 0 หรือในอีก หนึ่ง ความเร็วโรเตอร์จะเท่ากับความเร็วซิงโครนัสก็ต่อเมื่อพิจารณาแบบไม่มีโหลด(noload)ในส่วนของกรณีที่ค่าสลิป เท่ากับ 1 นั้นจะหมายถึงความเร็วของโรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ หรือโรเตอร์ไม่ได้หมุน

ในขณะที่โรเตอร์ยังไม่หมุนหรือหยุดอยู่กับที่ ความถี่ไฟฟ้าของโรเตอร์( $f_r$ )จะมีค่า เท่ากับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์( $f$ )แต่เมื่อโรเตอร์เริ่มต้นหมุนความถี่โรเตอร์จะมี ค่าเท่ากับความเร็วสลิปดังสมการ

$$f_r = sf \quad (2.68)$$

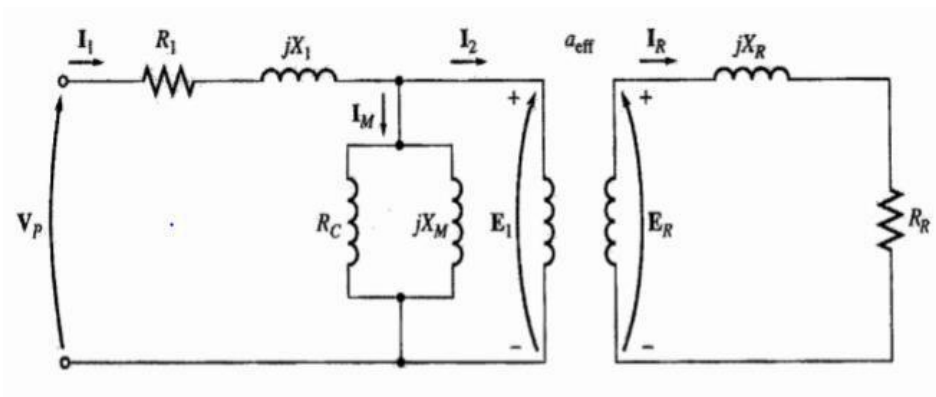
และความถี่ไฟฟ้าของโรเตอร์จะเป็นศูนย์ เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส

#### 2.7.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เมื่อพิจารณาโครงสร้างและหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเห็นว่าหลักการแบบเดียวกับ หม้อแปลงไฟฟ้าคือแรงดันเหนี่ยวนำบนโรเตอร์เกิดจากการเหนี่ยวนำของวงจรสเตเตอร์โดย เปรียบเทียบให้ขดลวดทางด้านปฐมภูมิเป็นขดลวดสเตเตอร์และขดลวดทางด้านทุติยภูมิเป็นขดลวดโรเตอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงใดๆก็ตามที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ก็จะส่งผลกลับไปทีสเตเตอร์อีกด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

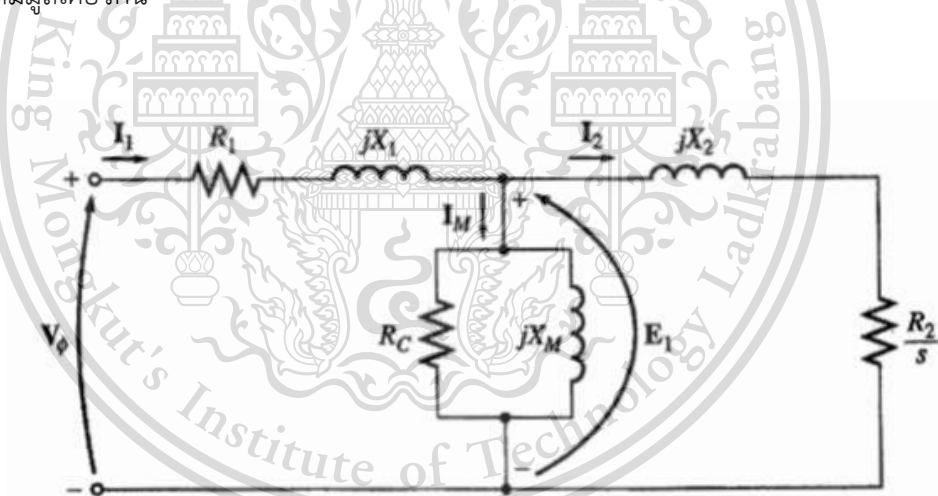
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.34 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส.34[11]

วงจรรูปที่ 2.34 ยังไม่พร้อมที่จะนำไปใช้งานเพราะฝั่งสเตเตอร์กับฝั่งโรเตอร์ยังมี.34 เชื่อมโยงกันผ่านทางฟลักซ์เชื่อมโยงอยู่ในรูปของอัตราส่วนขดลวดประสิทธิภาพ (effective turn ratio:  $a_{eff}$ ) ดังนั้นต้องแปลงให้เป็นวงจรสมมูลที่ใช้งานได้ โดยหลักการย้ายฝั่งโดยผ่านด้วยฟังก์ชัน  $a_{eff}$  ค่าพารามิเตอร์ของฝั่งสเตเตอร์จะไม่มีเปลี่ยนแปลงแต่ฝั่งโรเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยผลคูณปรับ  $a_{eff}$  เพื่อที่จะมาอยู่ในวงจรสมมูลเดียวกัน



รูปที่ 2.35 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์.35[11]

โดยที่  $V$  คือแรงดันที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์

$I_1, I_2$  คือ กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ คือ กระแสสร้างสนามแม่เหล็กนั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง  $R_1, R_2$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

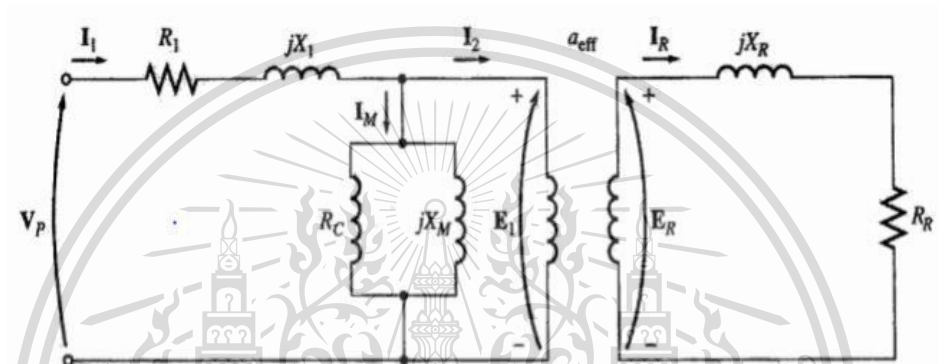
$X_1, X_2$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

$R_C$  คือ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก(ปกติ  $R_C$  จะมีค่าสูงกว่า  $X_M$  มาก ดังนั้นจึงละทิ้ง

ค่า  $R_C$  ได้)

$X_M$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก 2.7.5

ขดลวดทางด้านทุติยภูมิเป็นขดลโรเตอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงใดๆก็ตามที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ก็จะส่งผลกลับไปทีสเตเตอร์อีกด้วย



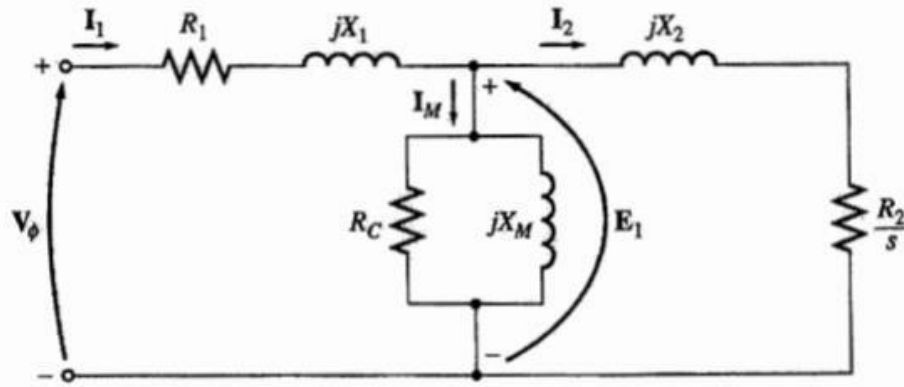
รูปที่ 2.36 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส.34[11]

วงจรรูปที่ 2.36 ยังไม่พร้อมที่จะนำไปใช้งานเพราะฝั่งสเตเตอร์กับฝั่งโรเตอร์ยังมี.34 เชื่อมโยงกันผ่านทางฟลักซ์เชื่อมโยงอยู่ในรูปของอัตราส่วนขดลวดประสิทธิภาพ (effective turn ratio:  $a_{eff}$ ) ดังนั้นต้องแปลงให้เป็นวงจรสมมูลที่ใช้งานได้ โดยหลักการย้ายฝั่งโดยผ่านด้วยฟังก์ชัน  $a_{eff}$  ค่าพารามิเตอร์ของฝั่งสเตเตอร์จะไม่มีเปลี่ยนแปลงแต่ฝั่งโรเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยผลคูณปรับ  $a_{eff}$  เพื่อที่จะมาอยู่ในวงจรสมมูลเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.37 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสที่เทียบมาทางด้าน  
สตอร์.35[11]

โดยที่  $V$  คือแรงดันที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์

$I_1, I_2$  คือ กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

$I_M$  คือ กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

$R_1, R_2$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

$X_1, X_2$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

$R_c$  คือ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก(ปกติ  $R_c$  จะมีค่าสูงกว่า  $X_m$  มากดังนั้น  
จึงละทิ้ง

ค่า  $R_c$  ได้)

$X_M$  คือค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

### 2.7.5 กำลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.35 จะสามารถอธิบายค่ากำลังงานและการสูญเสียต่างๆ

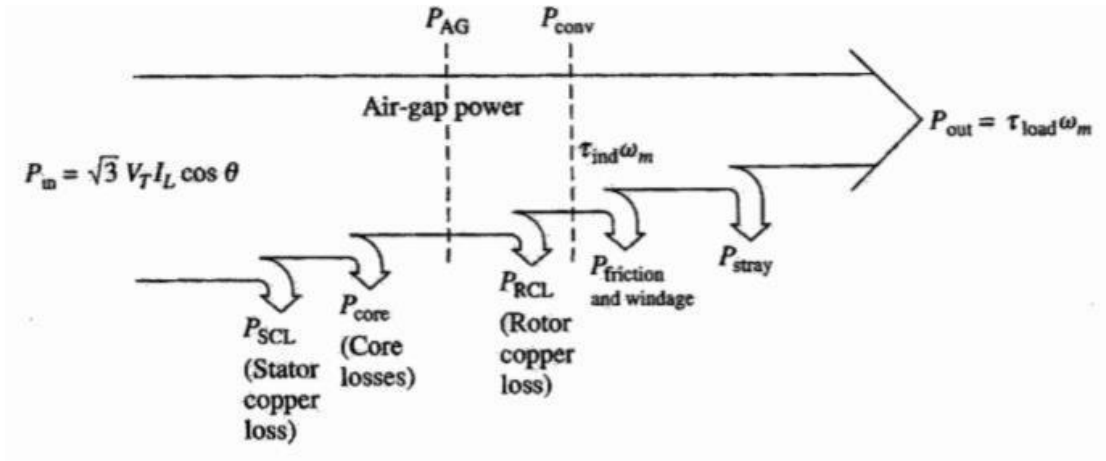
ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ได้ความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าขาเข้าและกำลังงานกลขาออกจะแสดงเป็น  
ไดอะแกรมการไหลของกำลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.36 คือกำลังงานที่ใช้ถ่ายโอนโดย

ผ่านช่องอากาศ และ  $P_{conv}$  คือกำลังงานที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นกำลังงานกลหรือจะเรียกได้  
กำลังงานภายใน(internal power) ส่วน  $P_{F\&W}$ ,  $P_{stary}$  และ  $P_{core}$  ในบางครั้งอาจจะเรียกรวมเป็น ค่า  
การสูญเสียจากการหมุน(rotational losses)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.38 ไดอะแกรมการไหลของกำลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.36[11]

กำลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ(input power - electrical power)

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (2.69)$$

ค่าสูญเสียจากขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์(stator copper loss)

$$P_{SCL1} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.70)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโรเตอร์(rotor input - power across air gap)

$$P_{AG} = \frac{3I_2^2 R_2}{2s} \quad (2.71)$$

ค่าสูญเสียจากขดลวดทองแดงที่โรเตอร์(rotor copper loss)

$$P_{SCL2} = 3I_2^2 R_2 = sP_g \quad (2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากโรเตอร์(rotor output – electromagnetic power)

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{SCL2} = 3I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} \quad (2.73)$$

$$P_{conv} = P_{AG} - sP_{AG} = (1 - S)P_{AG} \quad (2.74)$$

ค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic torque)

$$T = P_{conv} = P_{AG} e_{rr} \quad (2.75)$$

ค่ากำลังทางกลทั้งหมดที่ออกจากมอเตอร์(output power – mechanical power)

$$P_o = P_{conv} - P_r \quad (2.76)$$

เมื่อ  $P_r$  เป็นค่าการสูญเสียจากการหมุน(rotational losses)

ค่าแรงบิดทางกลของมอเตอร์(output torque)

$$T = \frac{P_o}{r_o} \quad (2.77)$$

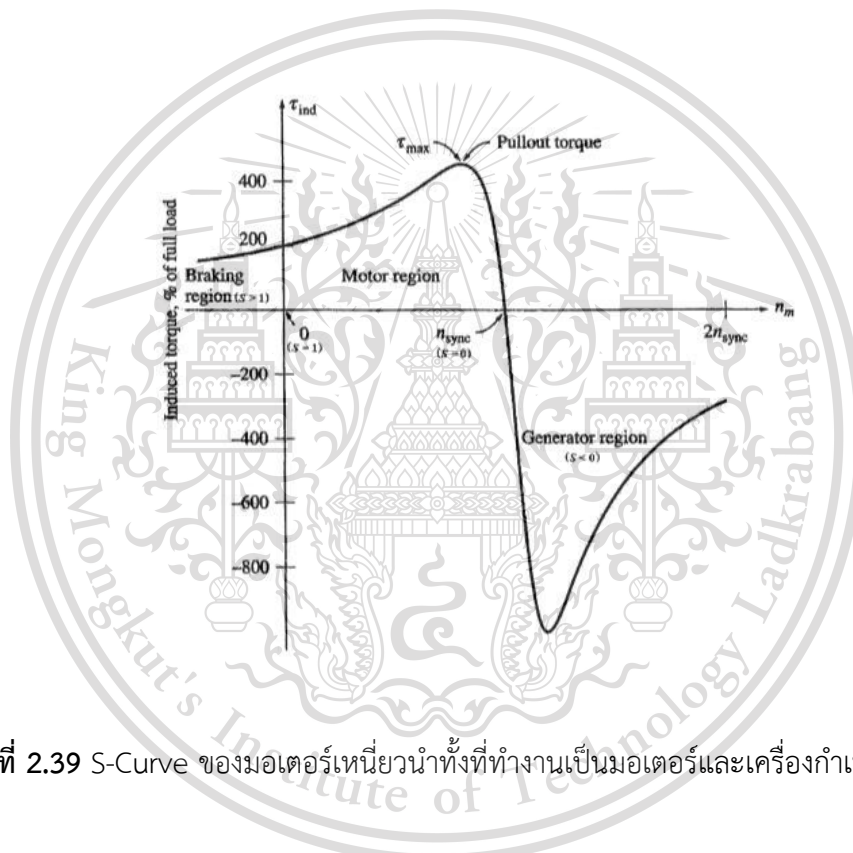
2.7.6 แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานโรเตอร์จะ

หมุนไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สร้างขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ความเร็วของโรเตอร์จะ อยู่ระหว่างศูนย์และความเร็วซิงโครนัสจะทำให้สลิป(s)มีค่าอยู่  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทงหนามมีเหตุดแปลงปัญหา และต้องอ้างอิงถึงเวลาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ระหว่าง 1 และ 0 ซึ่งจะแสดงว่าอยู่ในช่วงการทำงานของมอเตอร์(motor region) สำหรับการ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำงานที่ค่าสลิปมีค่ามากกว่า 1.0 จะ เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของมอเตอร์มีค่าเป็นลบ หรืออีกความหมายก็คือมอเตอร์จะต้องถูกทำใน ทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุนเดิมซึ่งสามารถทำได้โดยการกลับเฟสของแหล่งจ่ายไฟ เพียงคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนกลับทิศทางที่ทันใด ซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้มอเตอร์หยุด หมุนอย่างรวดเร็ว(plugging)ซึ่งจะอยู่ในช่วงของการทำงานเบรก (braking region) เครื่องจักรกล ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เมื่อโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าไป ขับเคลื่อนโดยต้นกำลังทางกล(prime mover) ให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัสทำให้สลิป(s) มีค่าเป็นลบซึ่งจะแสดงอยู่ในช่วงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(generatorregion)



รูปที่ 2.39 S-Curve ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งที่ทำงานเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า[11]

## 2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลC2000

C2000<sup>TM</sup> Microcontroller คือตระกูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการประมวลผล โดยใช้เลขฐานสองเป็นจำนวน 32 หลัก หรือเรียกว่าการประมวลผลแบบ 32 บิต ด้วยหน่วย ประมวลผล 2 แกน ทำงานที่ความเร็ว200 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือDual Core 200 MHz ซึ่งถูกสร้างและ พัฒนาโดยบริษัทTexas Instruments Launch Pad ซึ่งได้รับการผลิตออกมาหลากหลายรุ่นด้วยกัน ได้แก่Type D, Type S ฯลฯ ซึ่งจะทำการระบุสกุล หรือรุ่นต่างๆ ดังกล่าวไว้หลังรหัสสินค้า ยกตัวอย่างเช่น TMS320F28379D โดยการใช้งานอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลC2000 จำเป็นต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด5โวลต์ ผ่านหัวจ่ายUSB 2.0 ซึ่งการตั้งค่าหรือเขียนเขียน โปรแกรมการทำงาน กระทำได้โดยผ่านส่วนเสริมของโปรแกรมMATLAB/Simulink ในรูปแบบของ Block Diagram

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



## 2.9 วงจรที่ใช้กำจัดฮาร์มอนิก

วงจรที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกของกระแสด้านอินพุทเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้า มีอยู่ 2 ชนิด คือวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ และวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์

### 2.9.1 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter)

วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ที่ใช้กรองฮาร์มอนิกได้โดยมีองค์ประกอบเป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ คือ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ที่ออกแบบมาเสมือนเป็นการลัดวงจร (Low Impedance) สำหรับกระแสฮาร์มอนิก แต่เป็นเพียงโหลดชนิดหนึ่งสำหรับกระแสที่มีความถี่มูลฐาน โดยกระแสที่ไหลผ่านวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์แทบไม่มีผลต่อระบบไฟฟ้า พาสซีฟฟิลเตอร์สามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ จูนฟิลเตอร์ และดีจูนฟิลเตอร์

1. จูนฟิลเตอร์ (Tuned Filter) ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ นำมาต่ออนุกรมกันโดยออกแบบมาให้ความถี่ตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองหรือกำจัดออก โดยเลือกค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของตัวเหนี่ยวนำ ( $X_L$ ) และตัวเก็บประจุ ( $X_C$ ) ให้มีค่าเท่ากัน เพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์หักล้างกันเป็นศูนย์ในลักษณะของการลัดวงจร เพื่อควบคุมให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านชุดจูนฟิลเตอร์เท่านั้น ทำให้ระบบไฟฟ้าส่วนอื่นไม่ถูกรบกวน

2. ดีจูนฟิลเตอร์ (Detuned Filter) ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ นำมาต่ออนุกรมกันเช่นเดียวกับจูนฟิลเตอร์ แต่มีวัสดุประสงค์ที่แตกต่างกัน โดยดีจูนฟิลเตอร์จะทำหน้าที่ปรับความถี่เรโซแนนซ์ให้ต่ำกว่าความถี่ฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาสภาวะเรโซแนนซ์ที่อาจเกิดขึ้นได้

ขั้นตอนการคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกมีขั้นตอนทั้งหมดดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกมีค่าเท่าใด

ขั้นที่ 2 กำหนดค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ

$$Q_{com} = kW (\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \quad (2.78)$$

โดยที่  $Q_{com}$  คือ กำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ

$kW$  คือ กำลังงานจริงของระบบของโหลดรวมทั้งหมด

$\theta_1$  คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเดิม

$\theta_2$  คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใหม่

ขั้นที่ 3 วิเคราะห์ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบที่ได้จากการวัดจริงในโรงงาน

หรือการประเมิน และทำการกำหนดจำนวนชุดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ขั้นที่ 4 ทำการแบ่งค่า  $Q_{com}$  ออกเป็นส่วนตามจำนวนชุดของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกที่ได้กำหนดไว้ โดยอาศัยข้อมูลขนาดกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบ และขนาดภาระในระบบไฟฟ้า

ขั้นที่ 5 กำหนดจุดปรับคลื่น (Tuning Point) ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ

ขั้นที่ 6 กำหนดขนาดพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุหลักมูลดังนี้

$$V_{Cr} \geq \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \times V_{Sys} \quad (2.79)$$

โดยที่  $V_{Sys}$  คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่

$n_h$  คือ ค่าจุดปรับคลื่นตัวกรอง

$V_{Cr}$  คือ แรงดันพิกัดตัวเก็บประจุ

ขั้นที่ 7 กำหนดขนาดกำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ ที่ต้องใช้ในตัวกรองแต่ละลำดับ

$$Q_{Cr} \geq \frac{Q_{com}}{\left[ \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \right] \times \left[ \frac{V_{Sys}}{V_{Cr}} \right]^2} \quad (2.80)$$

โดยที่  $Q_{Cr}$  คือ กำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ

ขั้นที่ 8 การหาค่าตัวเก็บประจุ ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทาน ดังสมการต่อไปนี้

$$X_C = \frac{V_{Cr}^2}{Q_{Cr} \times 10^3} \quad (2.81)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f \times X_C} \quad (2.82)$$

$$L = \frac{X_C}{2\pi f \times n_h^2} \quad (2.83)$$

$$R = \frac{X_L}{Q_F} \text{ at } n_h \quad (2.84)$$

โดยที่  $Q_F$  คือ ตัวประกอบคุณภาพตัวกรอง (ค่า C, L และ R เป็นค่าต่อเฟส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## STANDARD RATINGS

DxL (mm); R.C.: (mA rms) at 85°C, 120H

Cap ( $\mu$ F)	WV(V) (Code) Item	6.3 (0J)		10 (1A)		16 (1C)		25 (1E)		35 (1V)		50 (1H)		63 (1J)		100 (2A)	
		DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.
0.1~0.68												5x11	12	5x11	19	5x11	20
1												5x11	18	5x11	24	5x11	26
2.2												5x11	34	5x11	43	5x11	45
3.3												5x11	42	5x11	48	5x11	49
4.7								5x11	42	5x11	43	5x11	48	5x11	61	5x11	64
10						5x11	61	5x11	66	5x11	73	5x11	76	5x11	85	6.3x11	89
22	5x11	78	5x11	82	5x11	90	5x11	97	5x11	116	5x11	121	5x11	126	8x12	151	
33	5x11	97	5x11	101	5x11	109	5x11	114	5x11	139	6.3x11	151	6.3x11	169	10x13	204	
47	5x11	116	5x11	123	5x11	145	5x11	157	6.3x11	169	6.3x11	182	8x12	218	10x16	266	
68	5x11	151	5x11	163	6.3x11	179	6.3x11	196	8x12	206	8x12	249	8x12	278	10x20	315	
100	5x11	168	5x11	218	6.3x11	223	6.3x11	230	8x12	278	8x12	303	8x14	363	10x20	459	
220	6.3x11	290	6.3x11	303	6.3x11	363	8x12	387	10x13	448	10x16	532	10x16	593	13x25	726	
330	6.3x11	363	6.3x11	399	8x12	436	8x14	508	10x16	593	10x20	702	10x20	823	16x26	907	
470	8x12	460	8x12	484	8x12	569	10x16	653	10x16	774	13x21	920	13x21	1065	16x32	1111	
1000	10x13	702	10x13	762	10x16	956	10x20	1150	13x21	1331	13x25	1634	16x26	1755	18x40	1571	
1500	10x16	788	10x20	823	10x20	1101	13x21	1367	13x25	1597	16x32	1925	18x32	2310	22x40	2141	
2200	10x16	1160	10x20	1331	13x21	1634	13x25	1876	16x26	2178	16x36	2541	18x36	2783	26x50	2431	
3300	10x20	1513	13x21	1694	13x25	2057	16x26	2118	16x32	2686	18x35	3037	22x40	3267			
4700	13x21	1815	13x25	2178	16x26	2420	16x32	2614	18x35	3110	22x40	3630	22x50	4114			
6800	13x25	2299	16x26	2481	16x32	2783	18x35	3207	22x40	3884	22x50	4235	25x50	4719			
10000	16x26	2491	16x36	3025	18x35	3485	22x40	4380	22x50	4719	25x50	4840					
15000	16x36	3243	18x35	3775	22x40	4659	22x50	5082	25x50	5203							
22000	18x40	3896	22x40	4489	22x50	5336	25x50	5445									
33000	22x50	4719	22x50	5445	25x50	5808											

รูปที่ 2.42 แสดงค่าและขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันขนาด 6.3-10V

Cap ( $\mu$ F)	WV(V) (Code) Item	160 (2C)		200 (2D)		250 (2E)		350 (2V)		400 (2G)		450 (2W)		500 (2H)	
		DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.
0.47		5x11	15	5x11	17	5x11	19	5x11	19	6.3x11	16	6.3x11	16	6.3x11	16
1		5x11	20	5x11	24	6.3x11	26	8x12	28	8x12	23	8x12	25	8x12	25
2.2		6.3x11	30	6.3x11	35	8x12	36	8x12	37	10x13	35	10x13	36	10x13	32
3.3		8x12	42	8x12	50	8x12	55	10x13	56	10x13	45	10x16	50	10x16	45
4.7		8x12	56	8x12	62	10x13	67	10x16	70	10x16	55	10x20	62	10x20	55
10		10x13	97	10x16	105	10x16	110	10x20	120	13x21	85	13x21	93	13x21	65
22		10x16	157	10x20	165	13x21	195	13x21	210	16x26	160	16x26	172	16x26	135
33		10x20	230	13x21	238	13x21	245	16x26	280	16x32	195	16x36	210	16x36	155
47		13x21	290	13x21	310	13x21	320	16x36	380	16x36	275	18x40	285	18x40	235
100		16x26	520	16x26	550	16x32	570	18x40	600	22x35	500	22x40	520	22x40	450
220		16x36	860	22x30	980	22x30	1070	22x50	1210	25x50	970				
330		18x40	1210	22x35	1280	22x35	1320								
470		22x40	1320	22x50	1360	25x50	1500								
1000		22x50	1720												

\* 13mm may be replaced by 12.5mm upon customer's request.

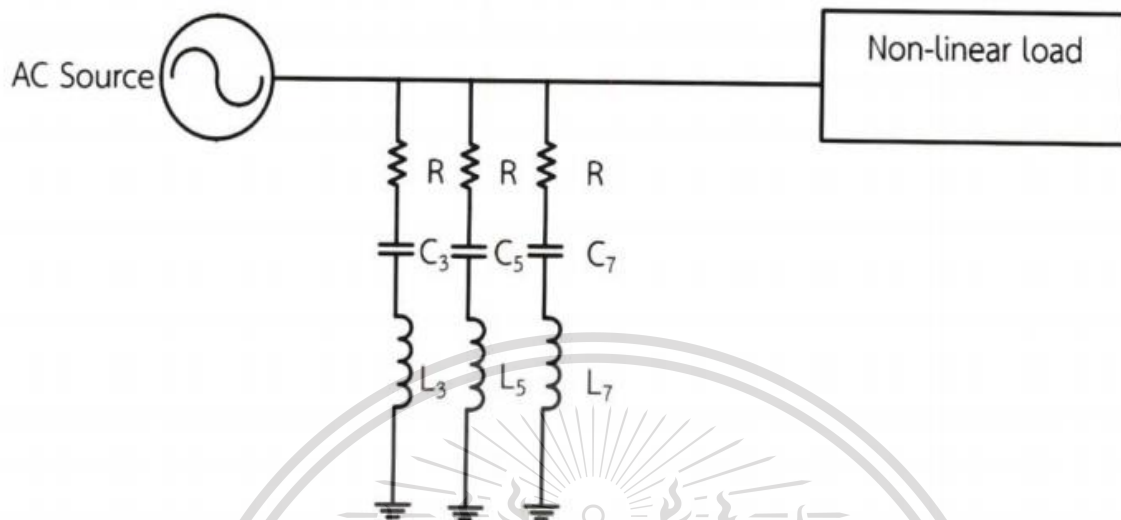
รูปที่ 2.43 แสดงค่าและขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันขนาด 160-500V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

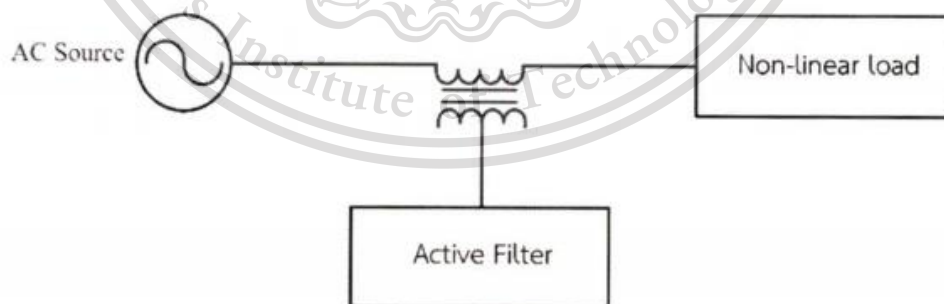
แสดงวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ที่ใช้ในการกรองฮาร์มอนิกอันดับ 3,5 และ 7 ดังรูป



รูปที่ 2.44 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

### 2.9.2 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter)

แอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter) เป็นการใช่วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการสร้างกระแสเข้าไปลดฮาร์มอนิกในระบบ โดยตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบ และฉีดกระแสในลักษณะตรงกันข้ามเพื่อหักล้างฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้



รูปที่ 2.45 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม

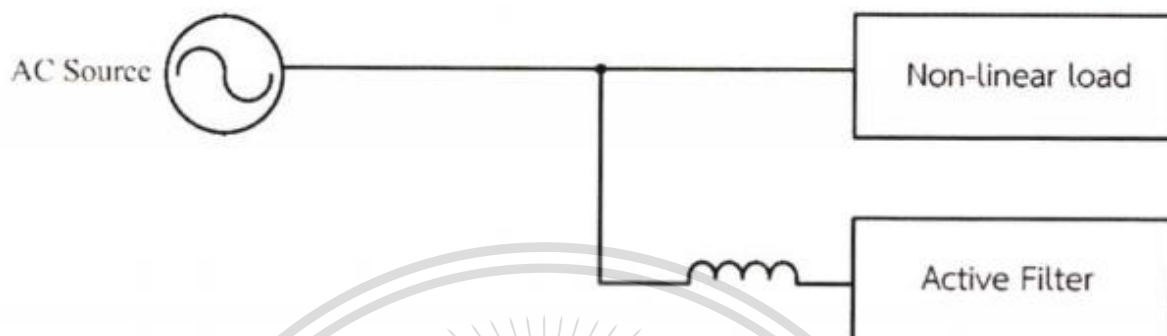
แอคทีฟฟิลเตอร์อนุกรม เป็นแอคทีฟฟิลเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับระบบ ดังรูปที่ 2.43  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยและการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การนำข้อมูลนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์จะถือว่าผิดกฎหมาย

This material แรงดันและควบคุมแรงดันด้านแหล่งจ่าย ข้อเสียเปรียบของแอคทีฟฟิลเตอร์ชนิดนี้ คือ

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตรวจจับได้เพียงแรงดันฮาร์มอนิกและหม้อแปลงจะต้องรับภาระเมื่อเกิดลัดวงจรที่โหลดของระบบ

คือตรวจจับได้เพียงแรงดันฮาร์มอนิกและหม้อแปลงจะต้องรับภาระเมื่อเกิดลัดวงจรที่โหลดของระบบ



รูปที่ 2.46 วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน

แอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน เป็นแอกทีฟฟิลเตอร์ที่ต่อขนานกับระบบ ดังรูปที่ 2.44 แอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนานเป็นที่รู้จักในการเป็นตัวกรองและชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีหลักการในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบและฉีดกระแสชดเชยเข้าไปที่กลางกับกระแสฮาร์มอนิกในระบบ เปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ขนานอยู่กับระบบ หรือเรียกว่า แอกทีฟฟิลเตอร์แบบฉีดกระแสฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

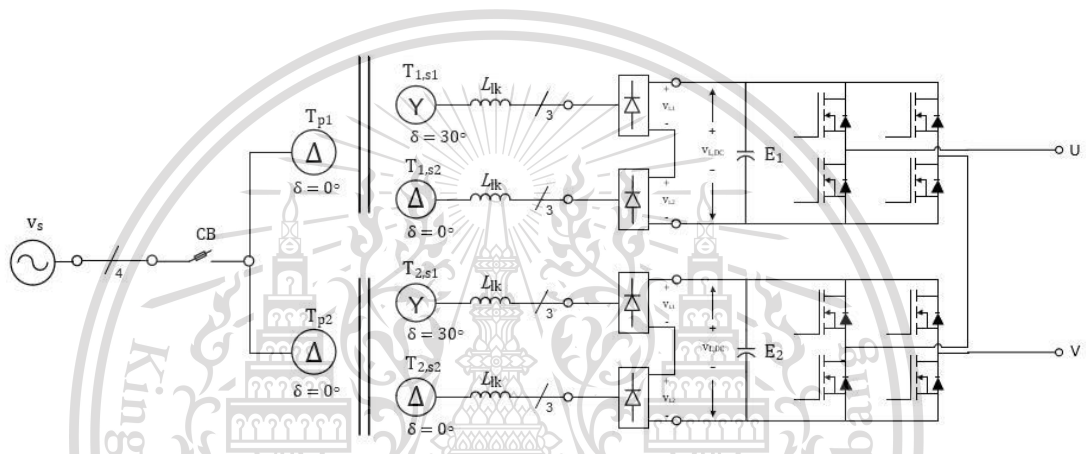
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3

### การออกแบบภาควงจรกำลังและภาควงจรควบคุม

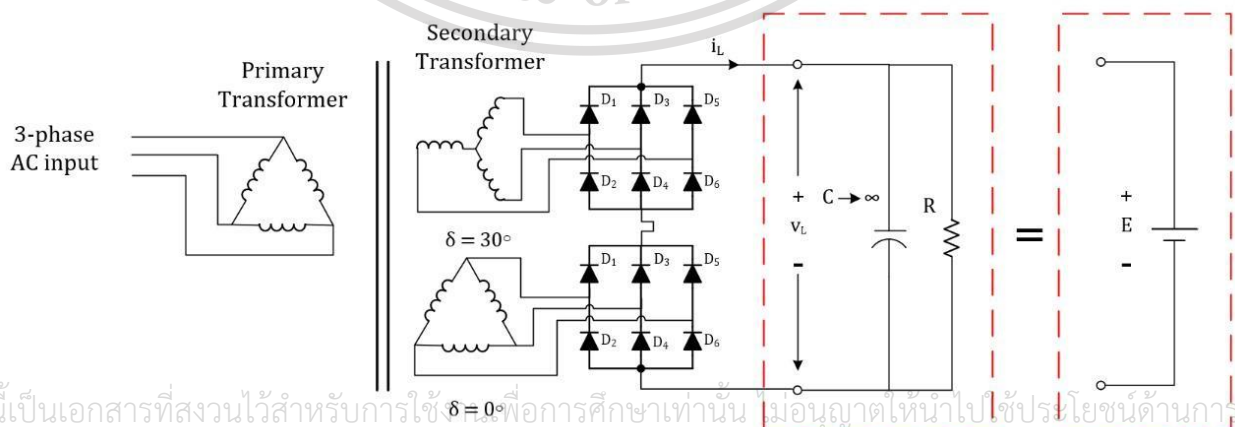
รายละเอียดที่จะกล่าวในบทที่ 3 เป็นส่วนการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นกระแสตรงโดยใช้วงจรเรียงกระแสหลายพัลส์ ที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และหม้อแปลง เลื่อนมุมเฟสเพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรง และมีการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากริด และส่วนของการ ออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

#### 3.1 การออกแบบวงจรเรียงกระแสหลายพัลส์



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับหนึ่งเฟส

##### 3.1.1 การออกแบบวงจรกำลังของวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $\delta = 0^\circ$  เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

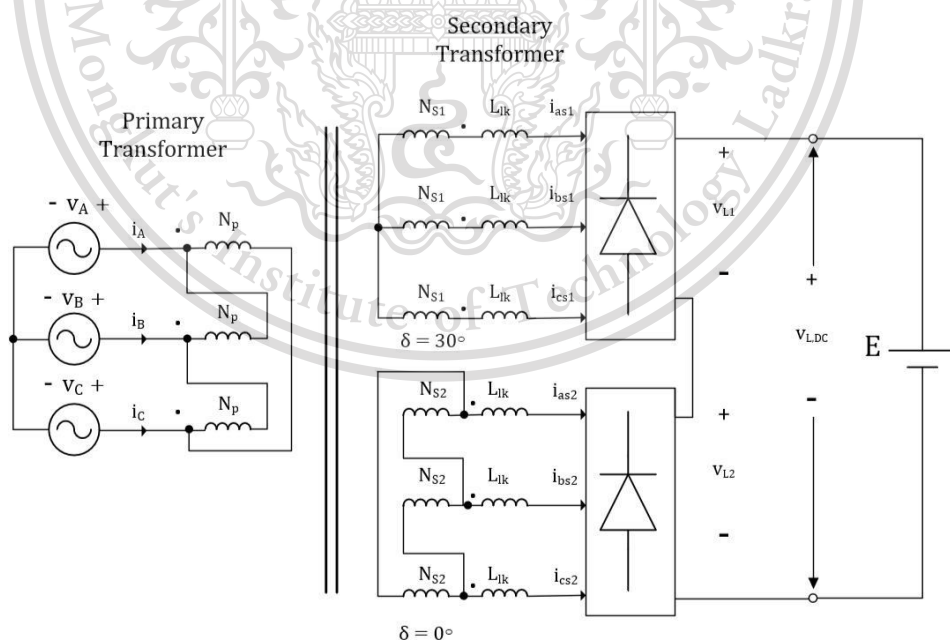
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์กับโหลดตัวเก็บประจุ รั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเฮชบริดจ์ เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1 แรงม้า 380 โวลต์ ซึ่งมีการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากริด โดยประยุกต์ใช้วงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอินเวอร์เตอร์ชนิดเฮชบริดจ์จำนวน 6 ชุด วงจรเรียงกระแส 12 พัลส์แต่ละชุด หรือใน 1 เซลล์ มี โครงสร้างเป็นไปตามรูปที่ 3.2 โดยใน 1 เซลล์ ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่มีขดลวดทุติยภูมิ 2 ชุด ซึ่งมีการเชื่อมต่อแต่ละขดต่างกัน ได้แก่แบบเดลต้า-เดลต้า และแบบเดลต้า-สตาร์ เมื่อการเชื่อมต่อหม้อแปลงด้านขดลวดทุติยภูมิเป็นเช่นนี้จึงเกิดความต่างมุมเฟส ซึ่งมีผลช่วยกำจัดฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำในกระแสไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิ ได้แก่ ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 และ 7 ทำให้ความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ากริดลดลง

โดยในการเลือกหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส เพื่อรองรับการจ่ายโหลดอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเฮชบริดจ์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า แรงดัน 380 โวลต์ มีพิกัดกระแสใช้งาน 2 แอมป์ ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที เลือกใช้หม้อแปลงเลื่อนมุมเฟสขนาด 1 กิโลโวลต์แอมป์ โดยประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อแบบเดลต้า และขดลวดทุติยภูมิที่มีการเชื่อมต่อ 2 แบบได้แก่ สตาร์และเดลต้า (Vector Group : Dy-0 และ Dyn-1) จำนวน 6 ชุด อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิต่อแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเท่ากับ 1:1 และเลือกใช้ตัวเก็บประจุเพื่อคงค่าแรงดันกระแสตรงให้เรียบมากขึ้น ขนาด 10,000 ไมโครฟารัด 250 โวลต์



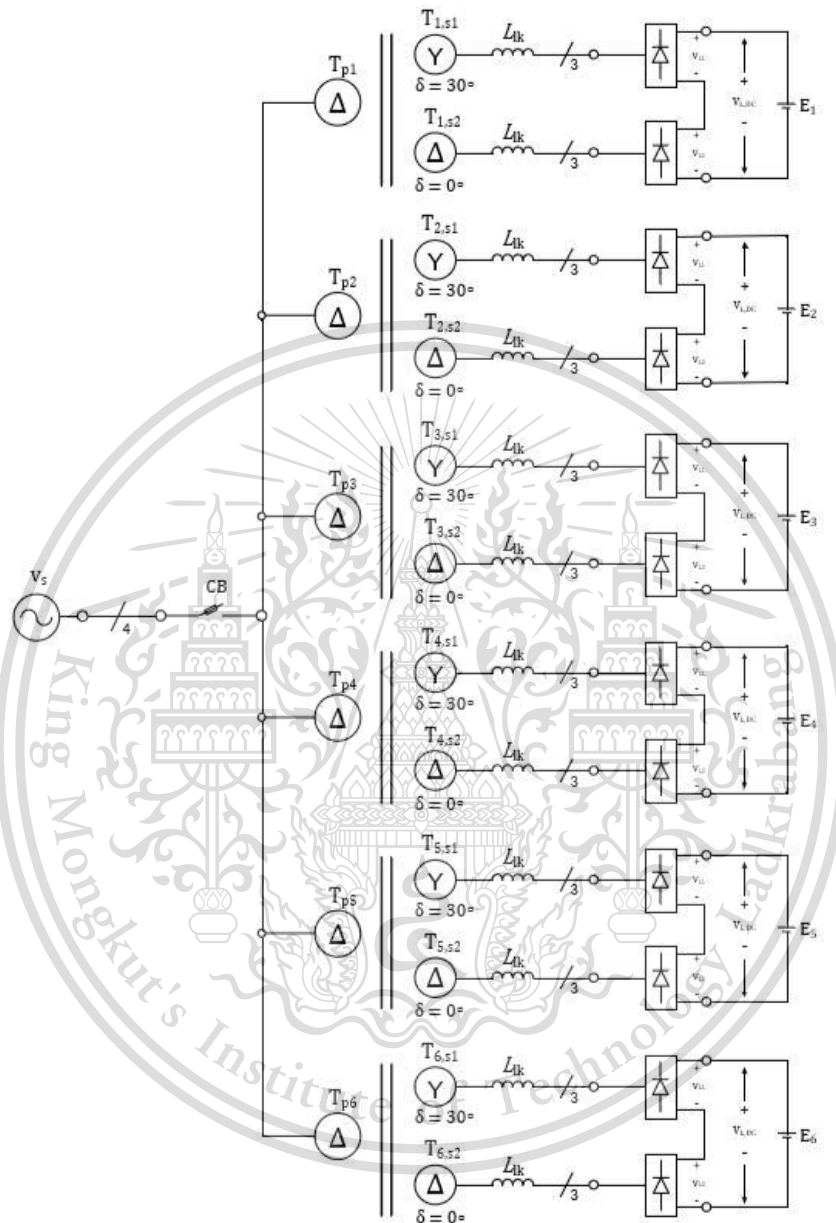
รูปที่ 3.3 เซลล์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์ชนิดเฮชบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยในการจัดทำวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต้องใช้เซลล์ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทั้งหมด 6 ชุด แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เซลล์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์

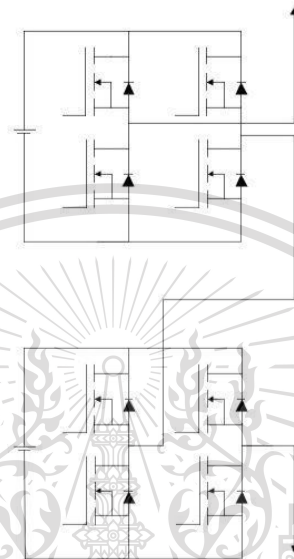
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

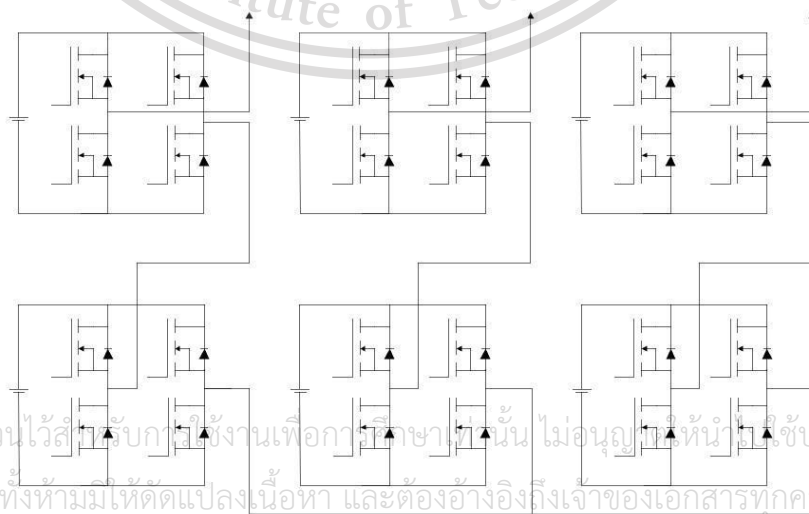
### 3.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์

อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์หนึ่งเฟสมีโครงสร้างวงจรกำลังเป็นแบบฟูลบริดจ์จำนวน 2 ชุดต่อกัน โดยเลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังเป็นไอจีทีบี ซุดละ 4 ตัว ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์และพิกัดกระแสไฟฟ้า 30 แอมป์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์หนึ่งเฟส

อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีโครงสร้างภาควงจรกำลังดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยการนำอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์หนึ่งเฟส 3 ชุดต่อรวมกันในลักษณะสตาร์ ซึ่งขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า 380 โวลต์



รูปที่ 3.6 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

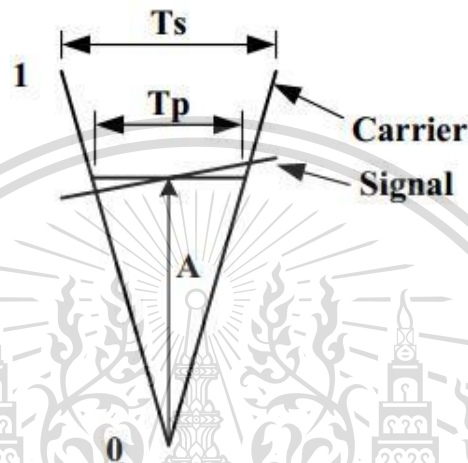
This material is for educational use only, and is not to be used for commercial purposes.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.2.1 การออกแบบวงจรควบคุม

#### 3.2.1.1 การสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

สำหรับการสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตเพื่อควบคุมการสวิตช์ของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ จะต้องใช้สัญญาณสามเหลี่ยมในด้านบวก 2 สัญญาณและสัญญาณสามเหลี่ยมในด้านลบ 2 สัญญาณ



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัญญาณอ้างอิงกับความกว้างพัลส์เอาต์พุตสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

จากรูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัญญาณอ้างอิงกับความกว้างพัลส์เอาต์พุตสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สามารถหาค่าความกว้างของสัญญาณเอาต์พุตได้จากสมการที่ 3.1 โดยที่ความสูงของสัญญาณสามเหลี่ยมขึ้นอยู่กับจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์

$$\frac{T_p}{T_s} = A; 0 \leq A \leq 1 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $T_p$  คือ เวลาในการขับนำสวิตช์

$T_s$  คือ คาบเวลาของสัญญาณสามเหลี่ยม

$A$  คือ ความสูงของระดับกึ่งกลางระหว่างจุดตัด 2 จุดของสัญญาณไซน์อ้างอิงและสัญญาณสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับเทคนิคการมอดูเลตโดยใช้สัญญาณไซน์อ้างอิง หรือเป็นการมอดูเลต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น แบบ SPWM พัลส์วิดมอดูเลต ค่า  $T_p$  หรือเวลาในการขับนำสวิตช์ หาได้จากสมการที่ 3.2 ำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$T_p = m[\sin(\omega t)]T_s \quad (3.2)$$

$$T_p = \left\{ \begin{array}{l} 2 \left( m(\sin(\omega t)) - \frac{1}{2} \right) T_s; \frac{1}{2} \leq m(\sin(\omega t)) \leq 1 \\ 2(m(\sin(\omega t)))T_s; 0 \leq m(\sin(\omega t)) \leq \frac{1}{2} \\ 2 \left( m(\sin(\omega t)) + \frac{1}{2} \right) T_s; -\frac{1}{2} \leq m(\sin(\omega t)) \leq 0 \\ 2(m(\sin(\omega t)) + 1)T_s; -1 \leq m(\sin(\omega t)) \leq -\frac{1}{2} \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

โดยที่อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ความสูงของสัญญาณสามเหลี่ยมเท่ากับ  $\frac{1}{2}$  และเวลาในการขับนำสวิตช์จะต้องคูณ 2 เพื่อให้มีค่าเป็นหนึ่งหน่วย สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขับนำสวิตช์และคาบเวลาของสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นไปตามสมการที่ 3.3

ในการสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D สามารถสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตได้ 12 สัญญาณ ซึ่งเพียงพอต่อการควบคุมการสร้างสวิตช์ของไอจีบีทีสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์หนึ่งเฟสโดยใช้เพียง 8 สัญญาณ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะต้องใช้สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตถึง 24 สัญญาณ จึงแบ่งการควบคุมการสร้างสวิตช์ของไอจีบีทีของกึ่งบนทั้งหมดใช้สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ และนำมาทำวงจรถ่วงเวลาโดยผ่านวงจรถักจิกข้างนอก และกลับสัญญาณเพื่อควบคุมการสร้างสวิตช์ของไอจีบีทีของกึ่งล่าง

### 3.2.1.2 การสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล

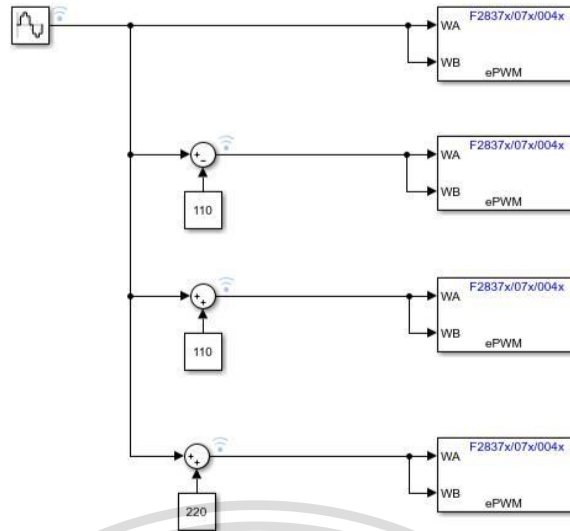
C2000 เบอร์ TMS320F28379D

การสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D เพื่อควบคุมการสร้างสวิตช์ของมอเตอร์กำลังสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับหนึ่งเฟสโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



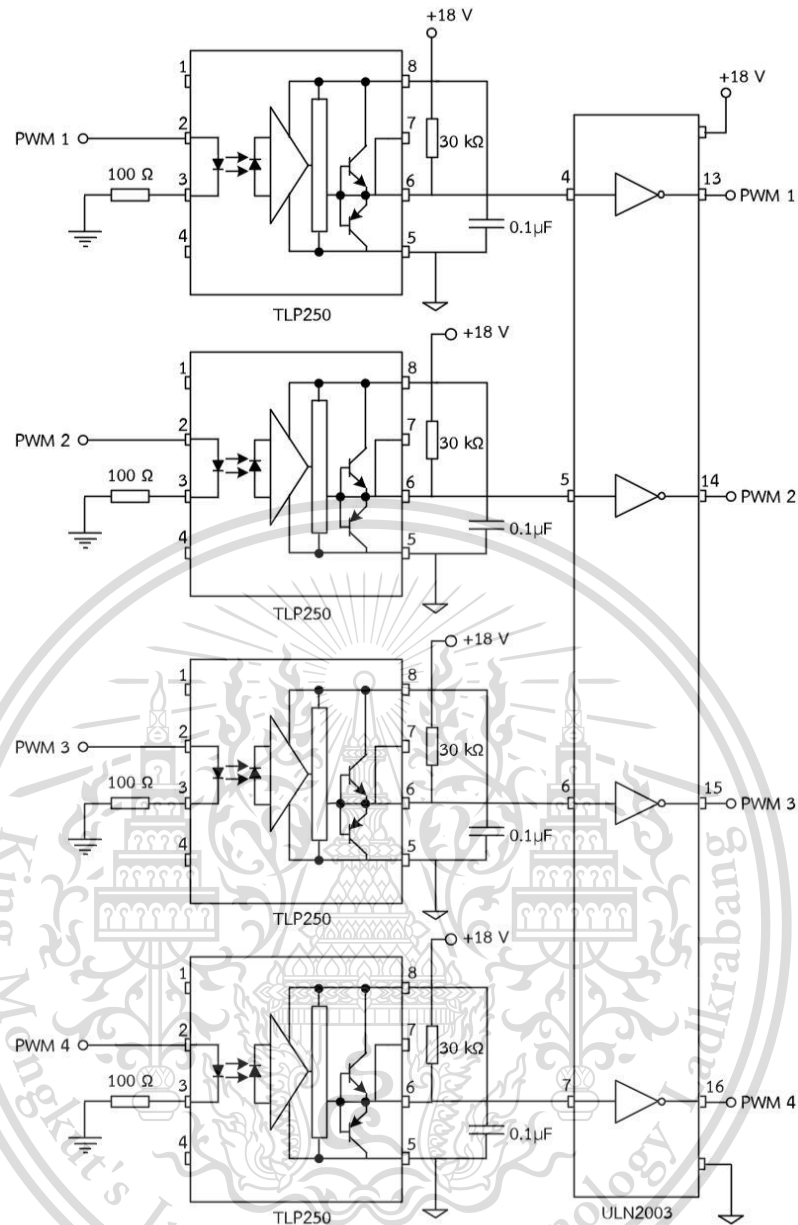
รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมสำหรับสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตเพื่อควบคุมการสวิทช์ของ มอสเฟตกำลังสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับหนึ่งเฟส

สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะต้องใช้สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตถึง 24 สัญญาณ โดยสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตจากไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 ได้ 12 สัญญาณ เฟสละ 4 สัญญาณ นำสัญญาณที่ได้เข้าวงจรแยกสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต เพื่อไม่ให้เกิดกระแสไฟไหลย้อนกลับจนทำให้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดความเสียหาย ใช้ออปโตเบอร์ TLP250 และไอซีเบอร์ ULN2003 ออกแบบได้วงจรดังรูปที่ 3.9 โดยใช้ 1 ชุดต่อหนึ่งเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.9 การออกแบบวงจรแยกสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต 4 สัญญาณสำหรับ 1 เฟส

นำแต่ละสัญญาณที่ได้จากวงจรแยกสัญญาณเข้าวงจรประวิงเวลา (deadtime) เพื่อให้สัญญาณนั้นมีการหน่วงเวลาในการทำงานดังรูปที่ 3.10 โดยใช้ไอซีเบอร์ 74SL04 และ 74SL14 สำหรับ 1 สัญญาณขาเข้า ได้สัญญาณขาออก 2 สัญญาณเพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ในกึ่งบน และกึ่งล่างไม่ทำงานพร้อมกันและให้มีการหน่วงเวลาเป็น 2  $\mu$ s โดยใช้ทั้งหมด 12 ชุด ออกแบบวงจร ประวิงเวลาได้ดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

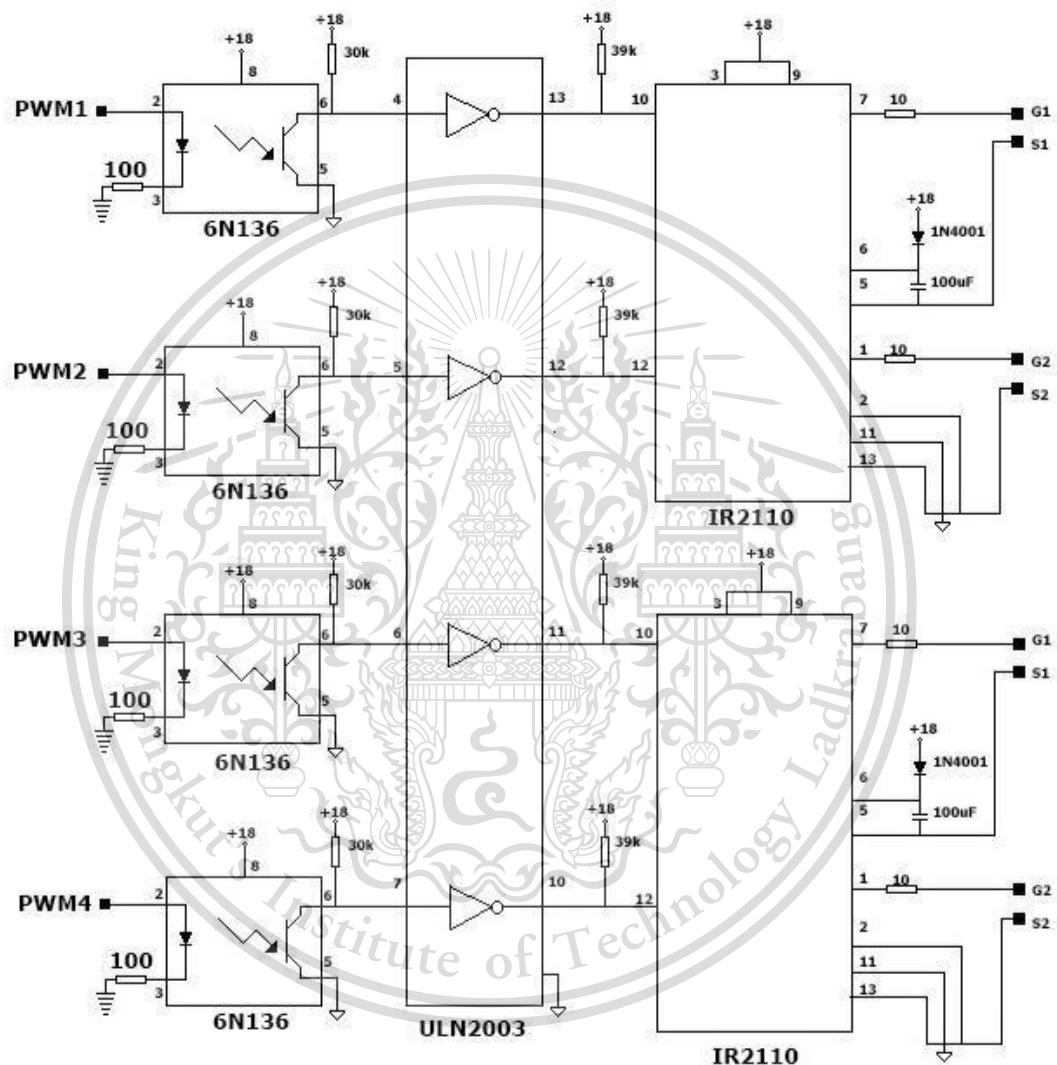
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



จากออปโตไดโอดให้เป็นสัญญาณเดิมอีกครั้ง แล้วนำสัญญาณไปเข้าวงจรขับนำเป็นไอซีเบอร์ IR2110 เนื่องจากสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลตที่ได้ยังไม่

สามารถนำมาขับขาเกตของไอจีบีทีได้เลย จึงต้องผ่านไอซีเบอร์ IR2110 เพื่อที่จะเพิ่มแรงดันให้เพียงพอที่จะขับขาเกตของไอจีบีทีได้ โดยออกแบบวงจรขับ นำได้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งใช้ทั้งหมด 6 ชุด



รูปที่ 3.12 วงจรขับนำของอินเวอร์เตอร์แต่ละกึ่งใช้ในปริยญาณินพนธ์ฉบับนี้

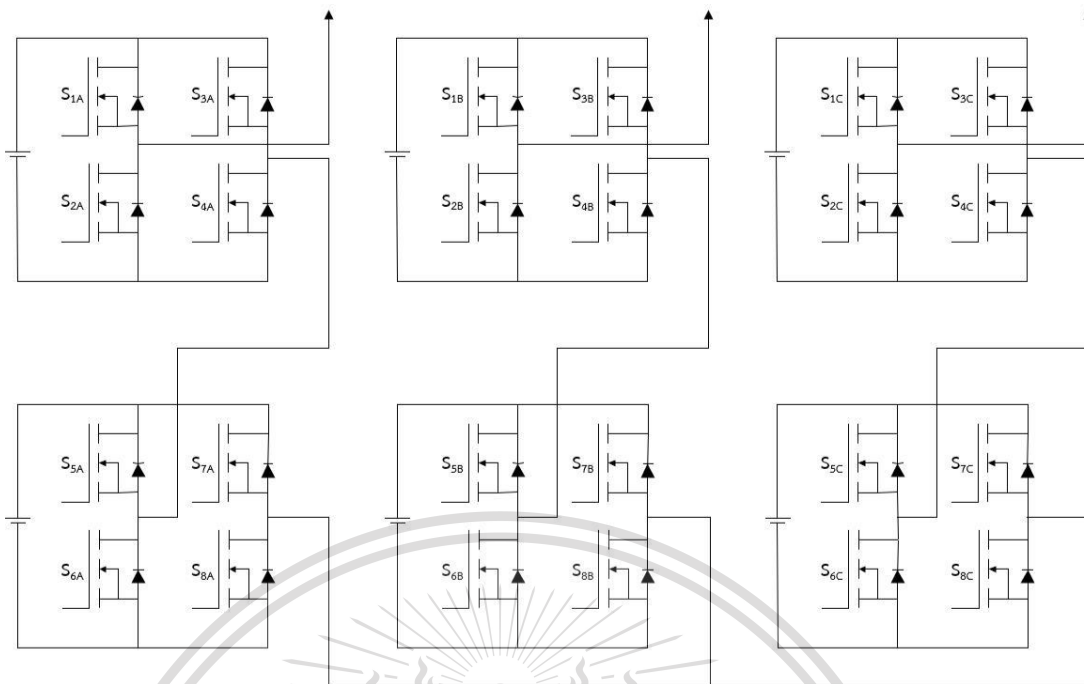
สัญญาณพัลส์วิตมอดูเลตสำหรับควบคุมการสวิตช์อุปกรณ์สวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดเอชบริดจ์ที่ออกแบบให้มีการใช้ไอจีบีทีกำลังทั้งหมด 24 ตัวดังรูปที่ 3.13 โดยลักษณะของสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลตที่ใช้ควบคุมการสวิตช์มอสเฟสกำลังในเฟส A แสดงดังตาราง ที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.13 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ตารางที่ 3.1 ลักษณะของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตที่ใช้ควบคุมการสวิตช์มอสเฟสกำลังในเฟส A

สวิตช์	สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต
S <sub>1A</sub>	
S <sub>2A</sub>	
S <sub>3A</sub>	
S <sub>4A</sub>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

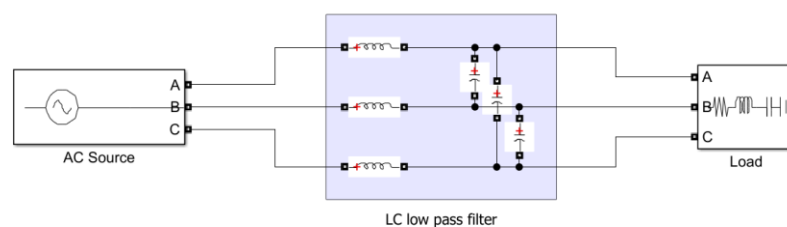
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



### 3.3 การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิก

วงจรกรองฮาร์มอนิกมีโครงสร้างประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ โดยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมของแต่ละเฟสและตัวเก็บประจุต่อแบบเดลต้าของแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ที่ใช้ในการกรองฮาร์มอนิกอันดับ 3,5 และ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สำหรับการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกซึ่งเป็นวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน มีหลักการเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุตามสมการ 3.4

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

โดยที่  $f_c$  คือ ค่าความถี่ตัด  
 $L$  คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำ  
 $C$  คือ ค่าตัวเก็บประจุ

โดยการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกมีข้อสังเกตในการกำหนดค่าของตัวแปรความถี่ที่จะนำมาเลือกค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำโดยอยู่ระหว่างไม่เกินความถี่สวิทซ์ซึ่งแต่ไม่ต่ำกว่าความถี่ตัด ( $f_c < f < f_{sw}$ )

ในวงจรไฟฟ้าของระบบมีค่าความถี่ตัด 5 kHz และมีความถี่สวิทซ์ 10 kHz ซึ่งสังเกตจากวงจรอินเวอร์เตอร์ จึงนำค่าไปคำนวณตามสมการ 3.4 ทำให้สามารถเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำเป็น 320 nH และค่าตัวเก็บประจุเป็น 5000  $\mu$ F



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

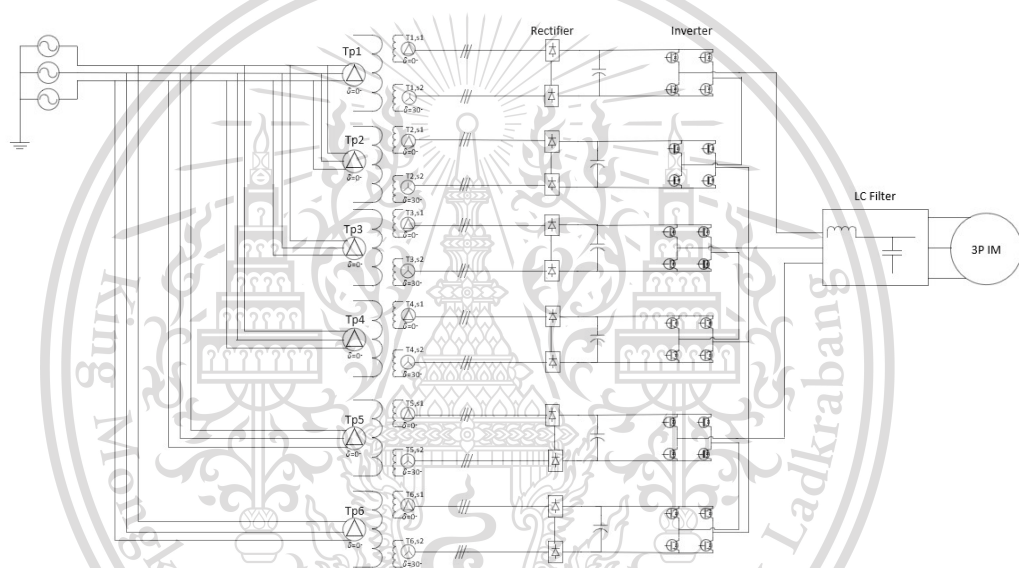
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### การจำลองการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

ทำการสร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งใช้วงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 37 โวลต์ไลน์เมื่อผ่านวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ โดยใช้ตัวเก็บประจุไฟตรงเชื่อมโยง 10,000 ไมโครฟารัด 250 โวลต์ 6 ตัวได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์ จ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า 380 โวลต์ ซึ่งค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 ที่ความเร็ว 50 เฮิรตซ์

โดยในการจำลองมีการสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตที่มีการรับค่าความถี่ขอ สัญญาณไซน์จากภายนอกมาอดกับสัญญาณสามเหลี่ยม ทำให้แรงดันที่ได้เปลี่ยนไปตามความถี่ รับมา นั่นคือ  $V/f$  คงที่ โดยที่วงจรควบคุมสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตแสดงดังรูปที่ 4.1



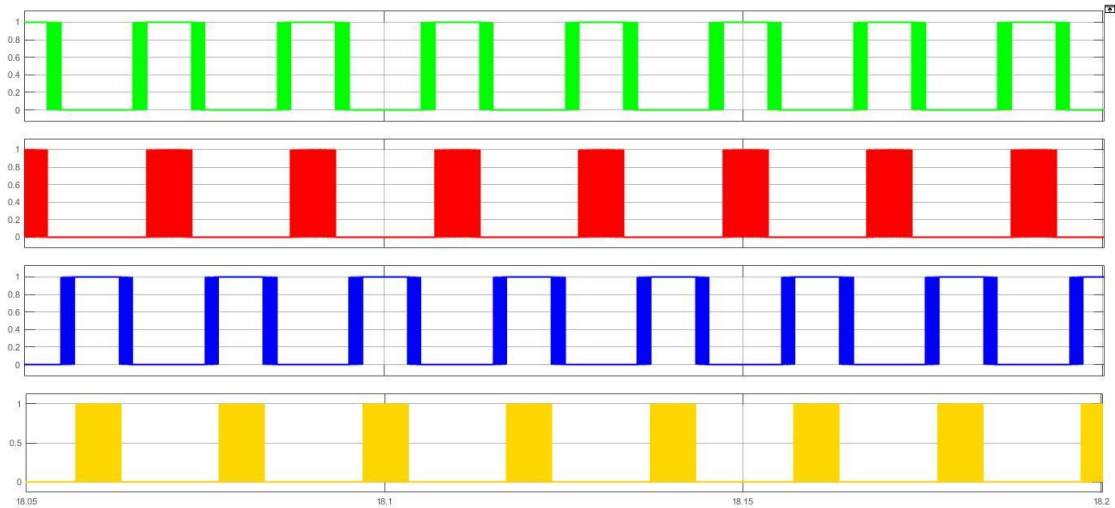
รูปที่ 4.1 การจำลองวงจรควบคุมสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเป็นการใส่ค่าความถี่ที่ต้องการได้ในบล็อกค่าคง (Constant) จากนั้นเข้าบล็อกสร้างสัญญาณไซน์และทำการยกระดับสัญญาณเพื่อนำไปมอดกับสัญญาณสามเหลี่ยมให้ได้สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตสำหรับควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สามเฟส โดยสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตแต่ละสัญญาณที่ได้ เป็นสัญญาณที่ควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลังในกิ่งบนทุกตัวดังรูปที่ 4.3 ทำการวัดสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตสำหรับควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลังกิ่งบนทุกตัวของเฟส A ได้ดังรูปที่ 4.2

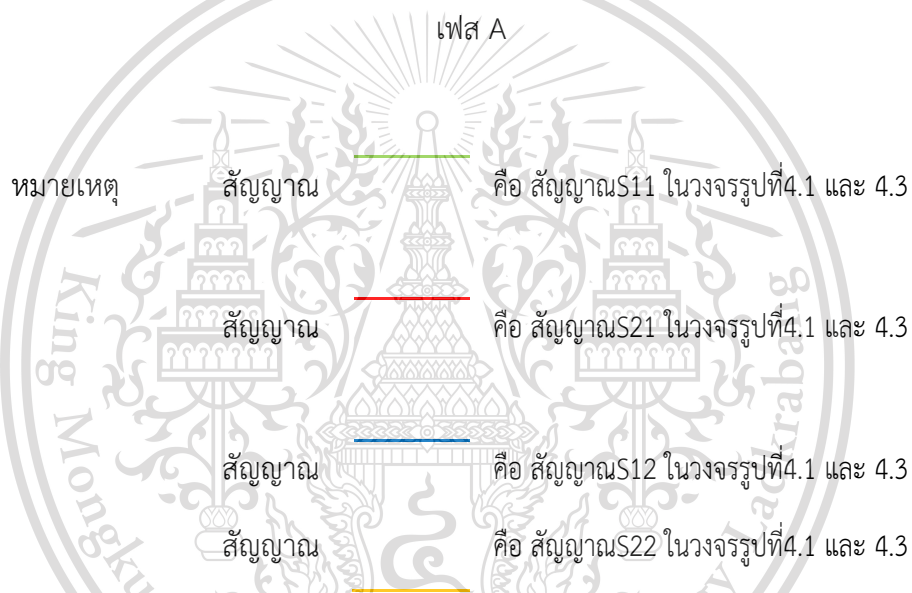
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตสำหรับควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลังกึ่งบนทุกตัวขอ

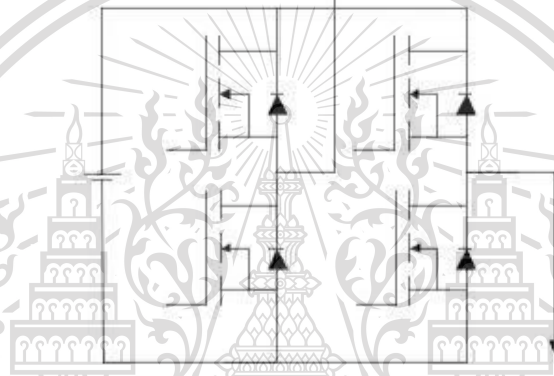
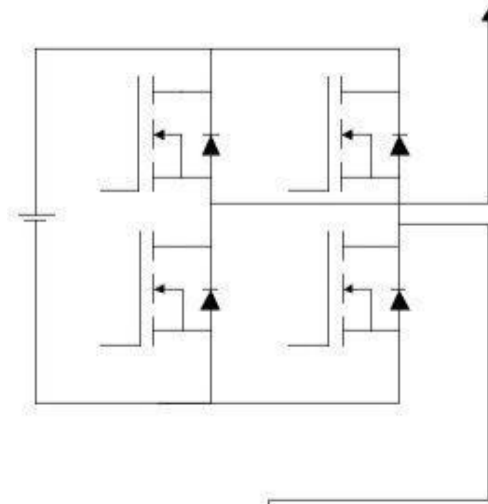


อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์ในแต่ละเฟสจะต้องใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ 2 วงจร ต่ออนุกรมกันทางด้านเอาต์พุต โดยที่สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตที่ใช้ในการสวิตช์ไอจีบีทีกำลังของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์วงจรที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.4 และสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตที่ใช้ในการสวิตช์ไอจีบีทีกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์วงจรที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยตำแหน่งของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตที่สวิตช์มอสเฟตกำลังเป็นไปตามวงจรรูปที่ 4.3

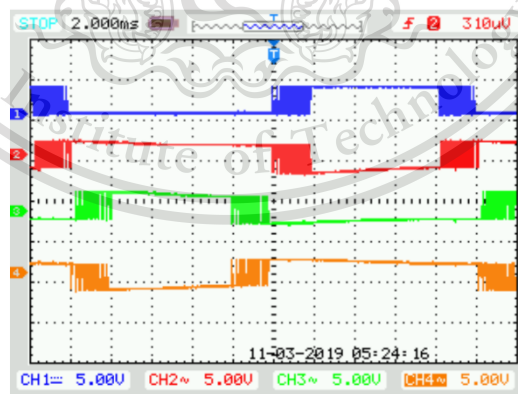
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.3 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์หนึ่งเฟส







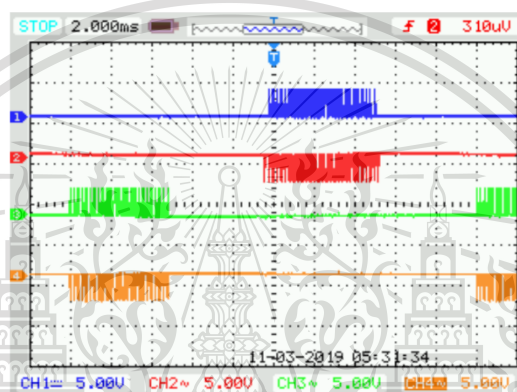
รูปที่ 4.4 สัญญาณพัลส์วิตมอดูเลตที่ใช้ในการสวิตช์มอสเฟตกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์วงจรที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หมายเหตุ	สัญญาณ		ควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง $S_{1A}$
	สัญญาณ		ควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง $S_{2A}$
	สัญญาณ		ควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง $S_{3A}$
	สัญญาณ		ควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง $S_{4A}$



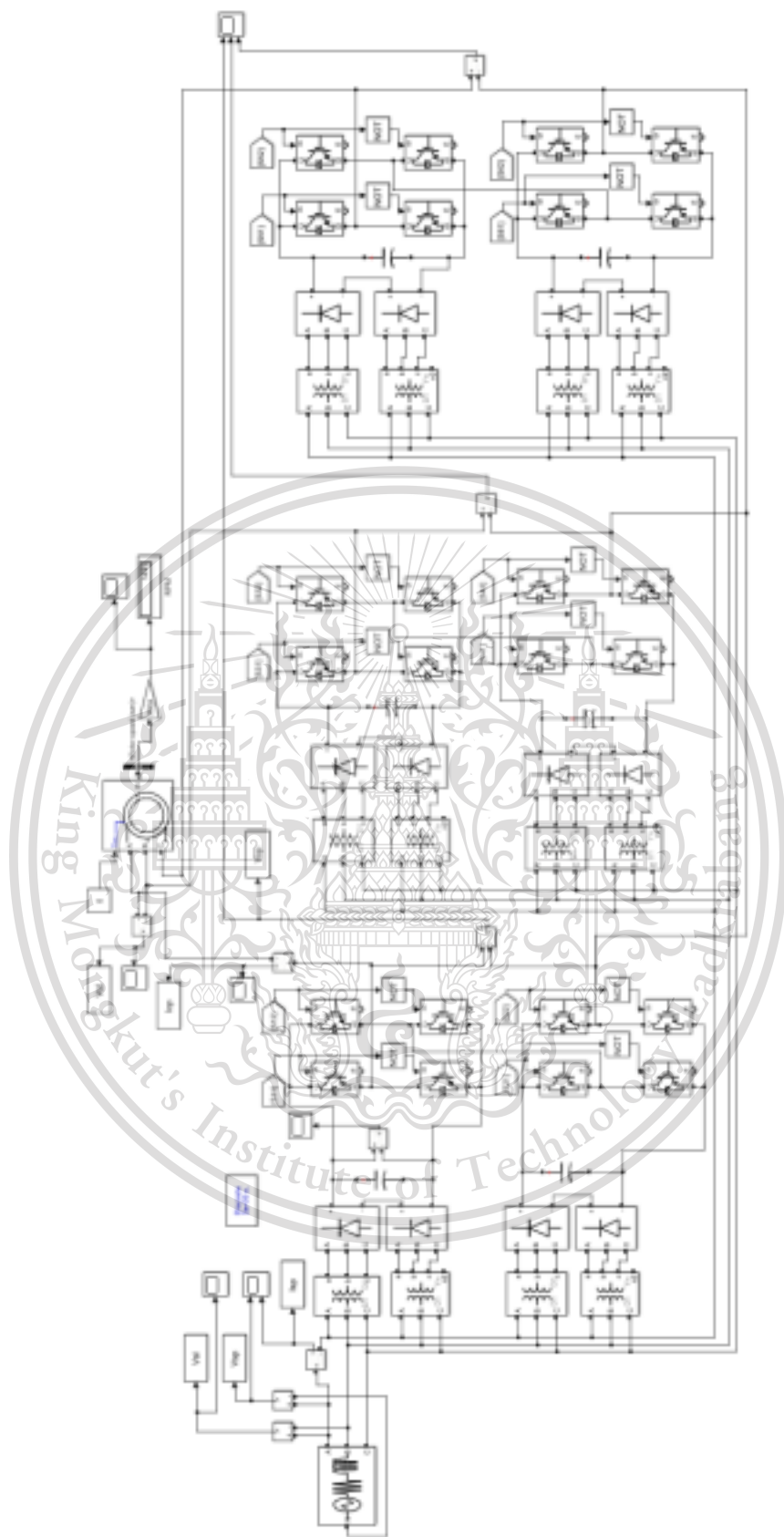
รูปที่ 4.5 สัญญาณพัลส์สวิตช์มอดูเลตที่ใช้ในการสวิตช์มอสเฟตกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิด  
เอชบริดจ์วงจรที่ 2

หมายเหตุ	สัญญาณ		ควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง $S_{5A}$
	สัญญาณ		ควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง $S_{6A}$
	สัญญาณ		ควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง $S_{7A}$
	สัญญาณ		ควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง $S_{8A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.6 การจำลองวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อน เหนี่ยวนาสาม  
เฟสที่มีการปรับปรุงคุณภาพกระแสกริดโดยใช้วงจรเรียงกระแส 12 พัลส์

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูที่4.6 เป็นการจำลองวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์5ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับ ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในส่วนของวงจรเรียงกระแสหรือการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสตรงนั้นได้มีการประยุกต์ใช้หม้อแปลง12พัลส์ที่มีมุมเฟสต่างกัน30องศาเพื่อให้เกิด การหักล้างของฮาร์มอนิกกระแสในอันดับ5และ7 และวงจรอินเวอร์เตอร์5ระดับชนิดเอชบริดจ์ซึ่ง ใช้อุปกรณ์สวิตซ์กำลังที่มีสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต ควบคุมการสวิตซ์จากวงจรรูปที่4.1โดยในการวัด ค่าผลการจำลองแสดงดังตารางที่4.1

ตารางที่4.1 การวัดผลการจำลองและสัญลักษณ์ในโปรแกรมMATLAB/Simulink

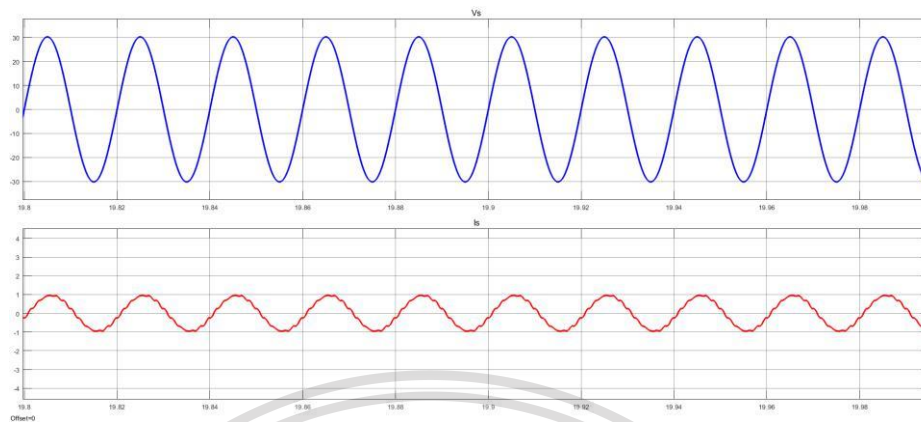
การวัดผลการจำลอง	สัญลักษณ์ในโปรแกรมMATLAB/Simulink
แรงดันเฟสด้านขาเข้า	Vsp
กระแสเฟสด้านขาเข้า	Isp
แรงดันไลน์ด้านขาเข้า	Vsl
แรงดันเฟสด้านขาออก	Vop
กระแสเฟสด้านขาออก	Iop
แรงดันไลน์ด้านขาออก	Vol
ความเร็วรอบของมอเตอร์	RPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

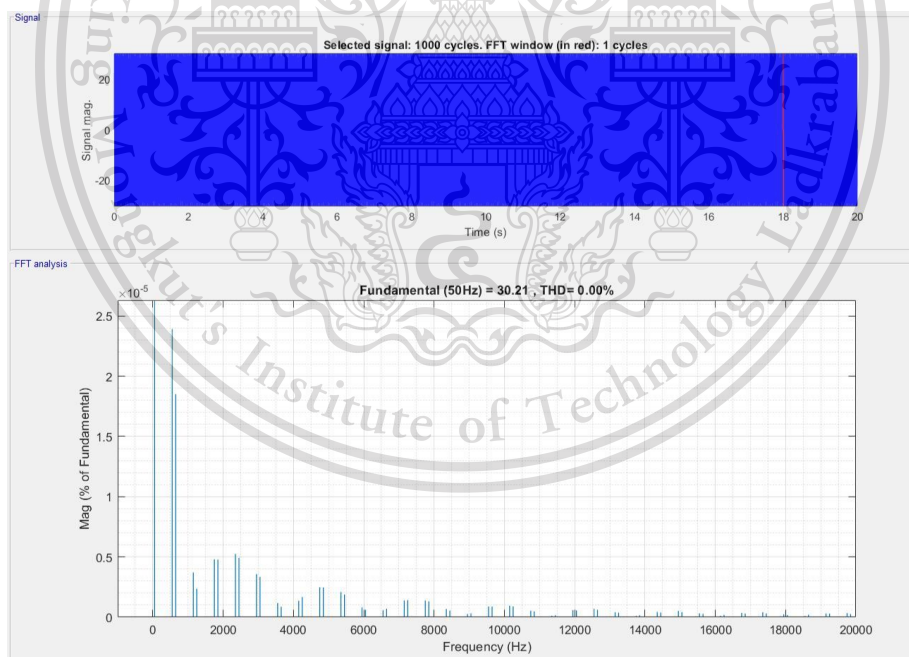
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.1 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่50เฮิร์ตซ์ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ0.9



รูปที่4.7 แรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(50Hz)

นำข้อมูลกราฟแรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้ามาหาFFTเพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมของฮาร์มอนิก ได้ดังรูปที่4.5และ4.6 ตามลำดับ

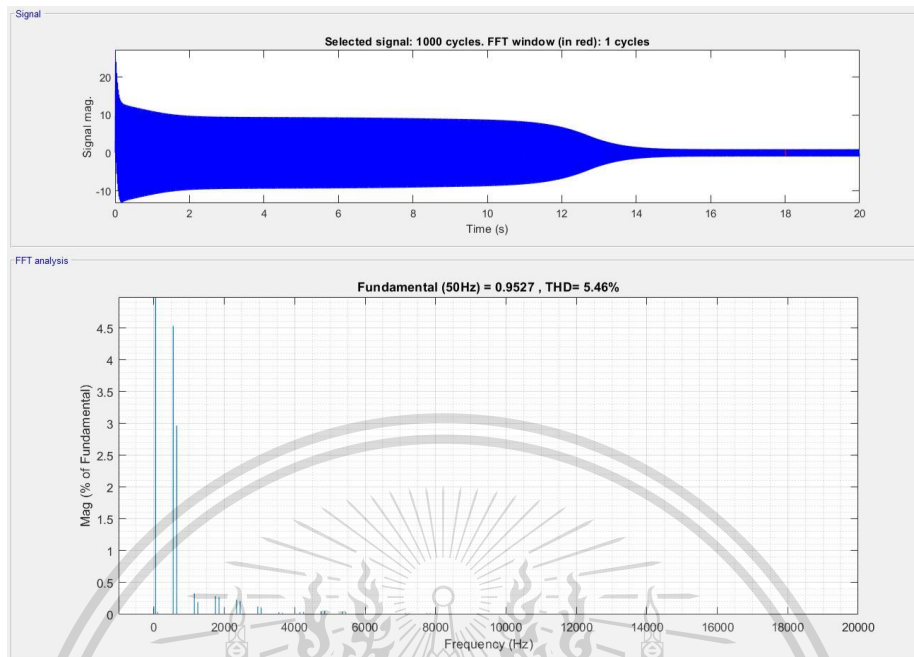


รูปที่4.8 ฮาร์มอนิกของแรงดันเฟสด้านขาเข้า(50Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

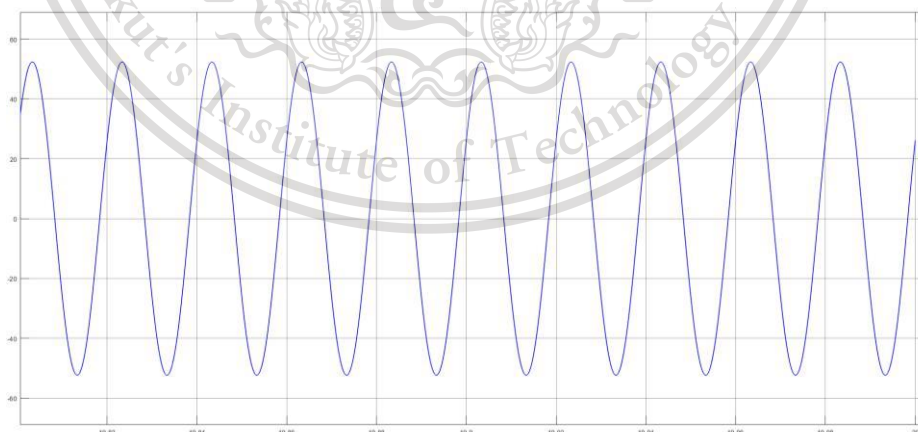
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.9 ฮาร์มอนิกของกระแสเฟสด้านขาเข้า(50Hz)

จากรูปที่4.9กระแสเฟสที่Fundamental(50Hz) เท่ากับ0.9527 แอมป์ และ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส%THD<sub>i</sub> = 5.46 % สเปคตรัมของฮาร์มอนิกเกิดขึ้นที่อันดับ11 และ 13 มากที่สุด

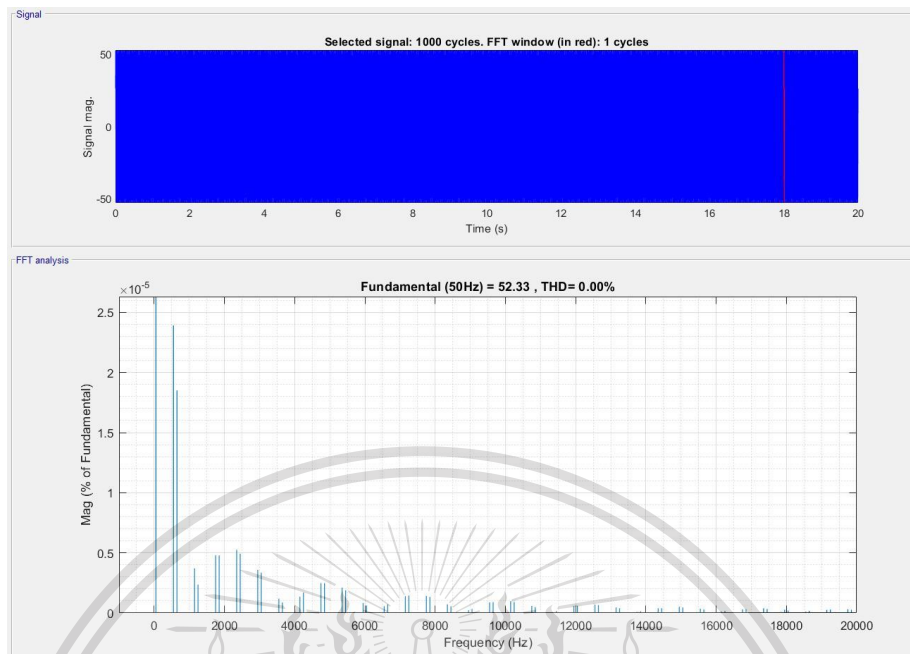


รูปที่4.10 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(50Hz)

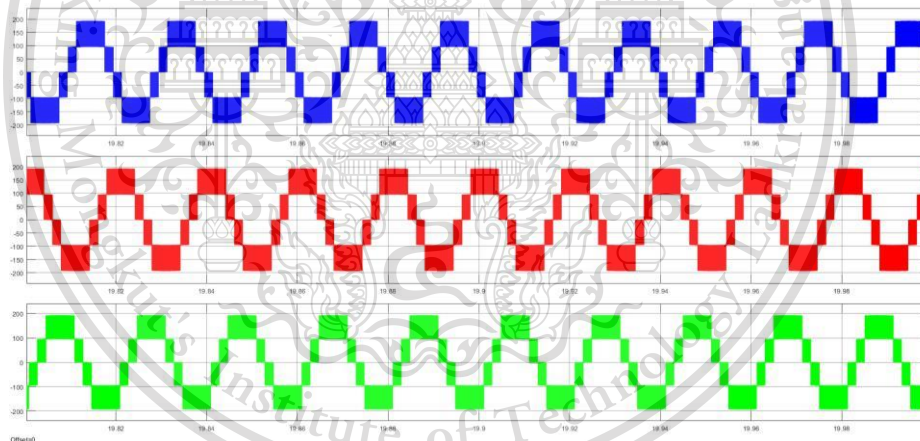
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.11 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(50Hz)

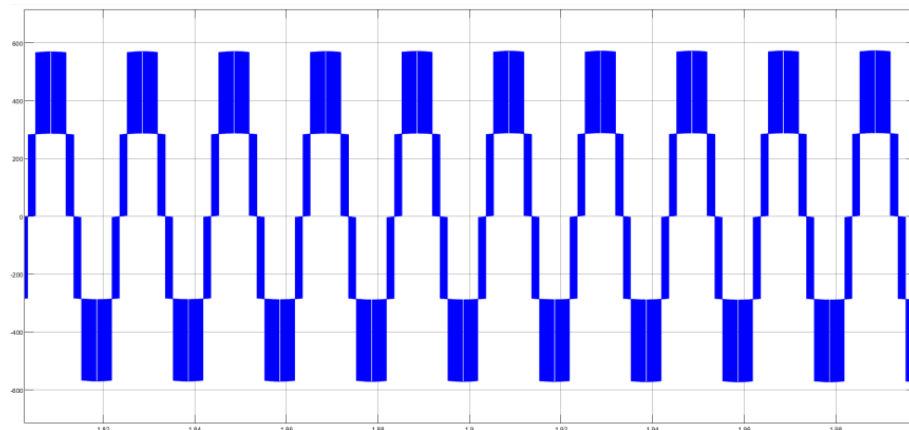


รูปที่ 4.12 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ(50Hz)

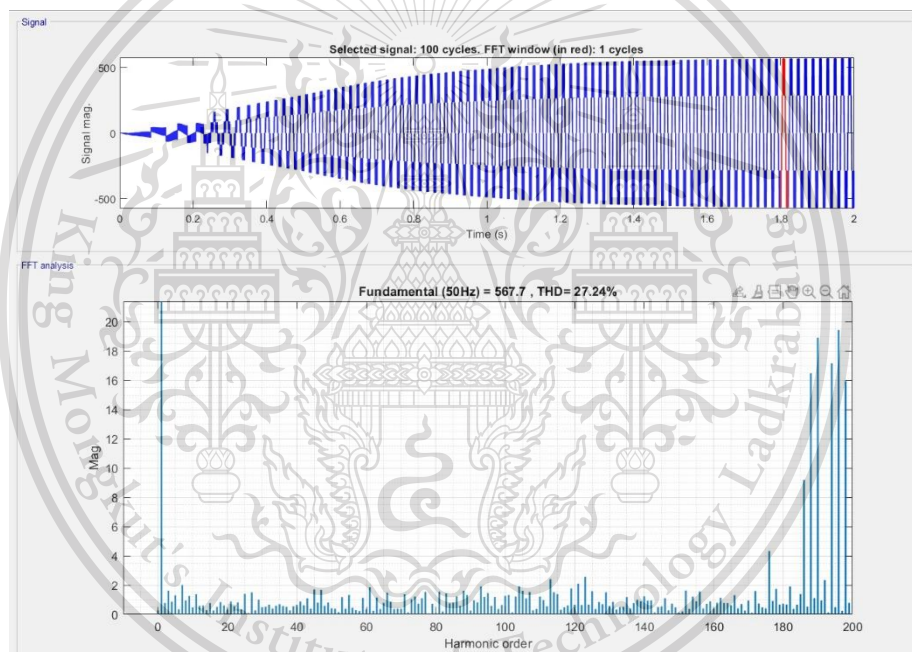
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.13 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ (50Hz)

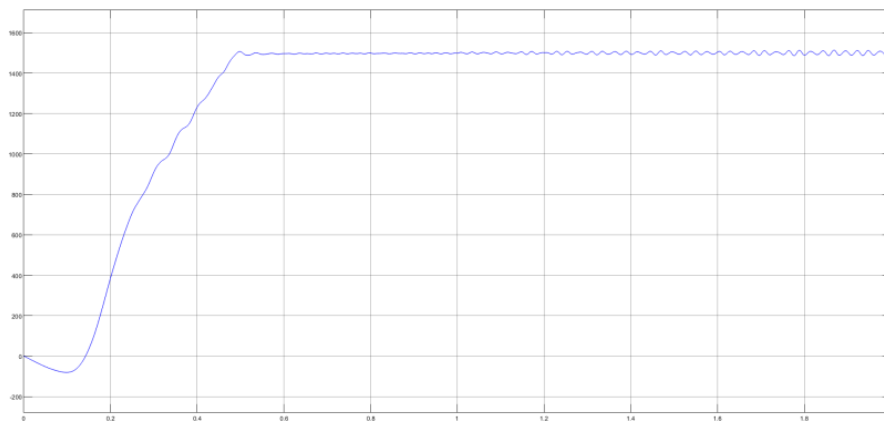


รูปที่ 4.14 ฮาร์โมนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ (50Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

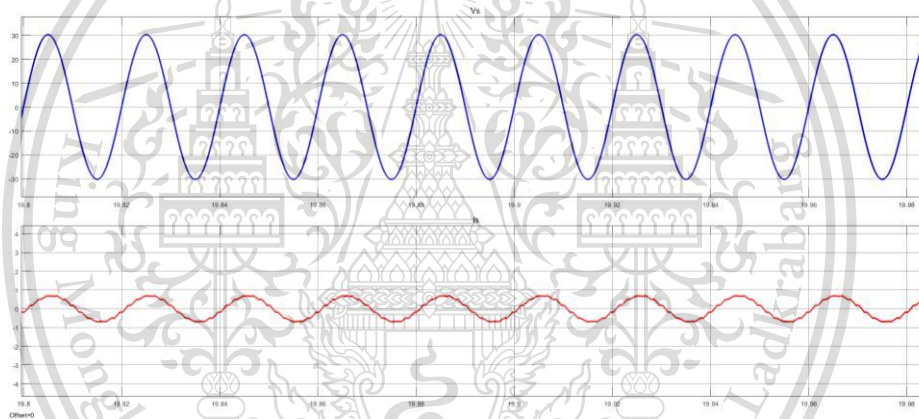
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.15 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่50เฮิรตซ์

#### 4.2 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่45เฮิรตซ์ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ0.72



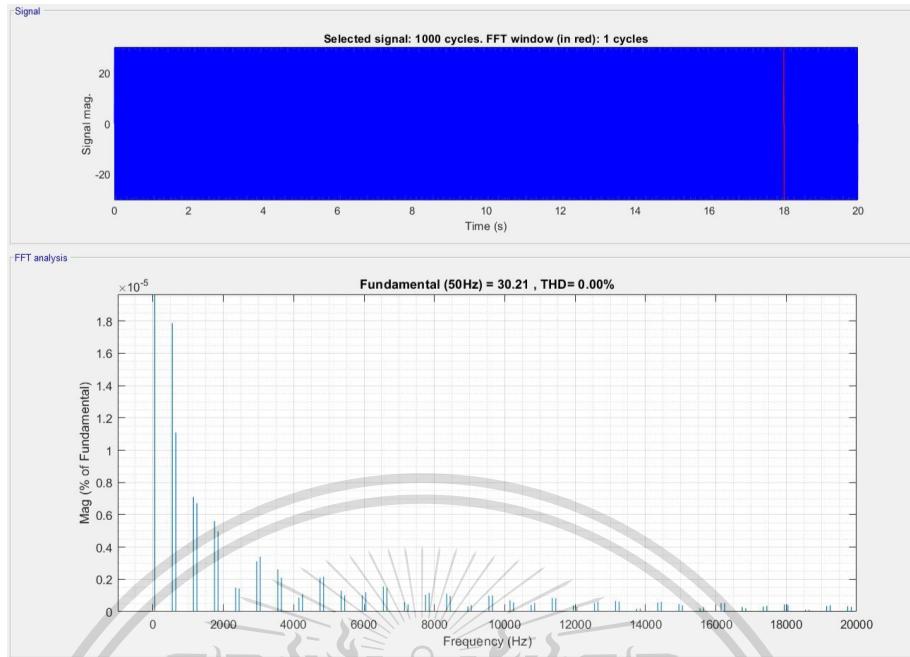
รูปที่4.16 แรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(45Hz)

นำข้อมูลกราฟแรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้ามาหาFFTเพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมของฮาร์มอนิก ได้ดังรูปที่4.17และ 4.18 ตามลำดับ

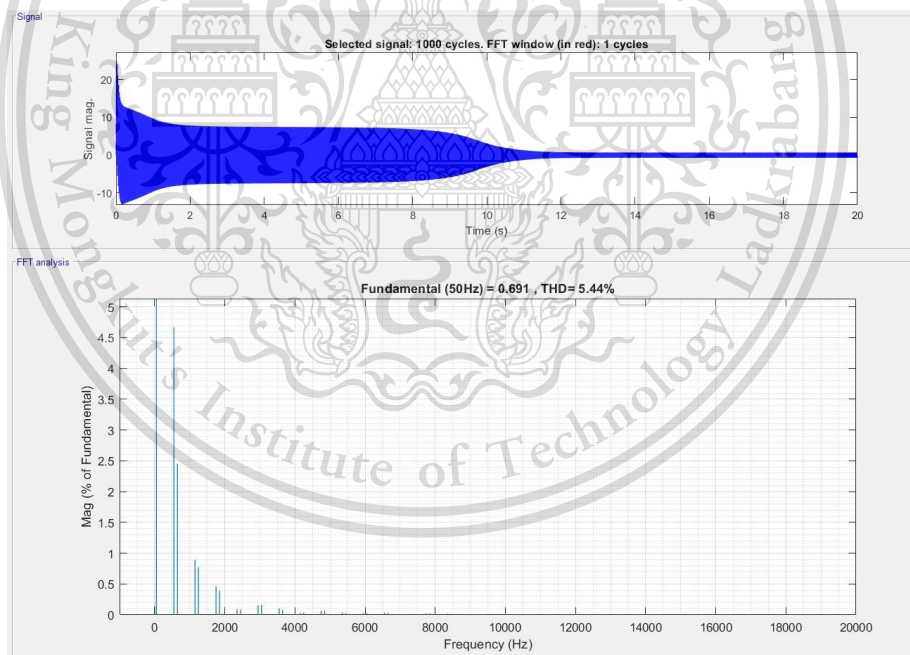
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.17 ฮาร์มอนิกของแรงดันเฟสด้านขาเข้า(45Hz)

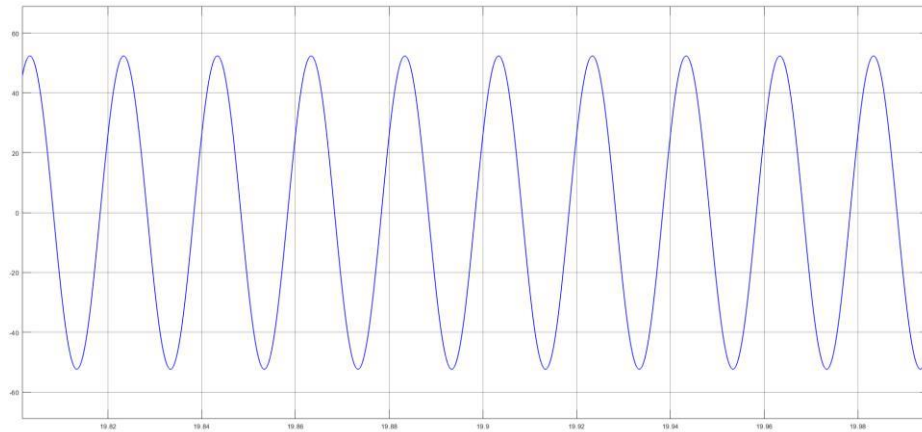


รูปที่4.18 ฮาร์มอนิกของกระแสเฟสด้านขาเข้า(45Hz)

จากรูปที่4.18 กระแสเฟสที่Fundamental(50Hz) เท่ากับ0.691 แอมป์ และ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส%THD<sub>i</sub> = 5.44 %  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.19 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(45Hz)

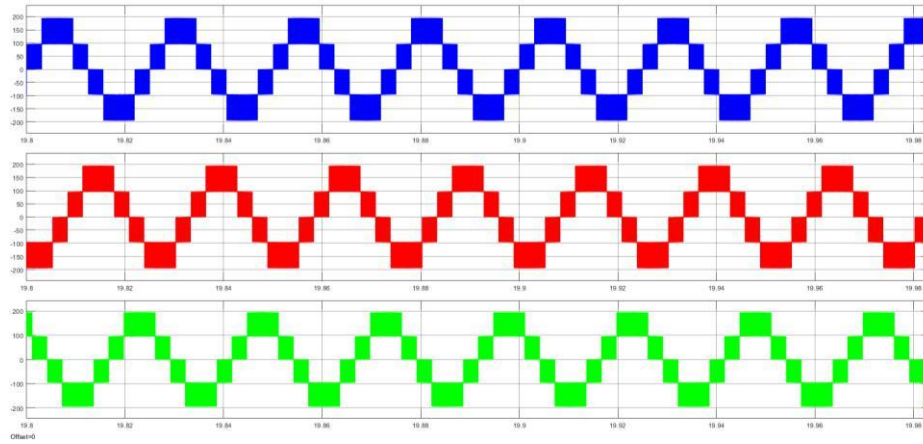


รูปที่4.20 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(45Hz)

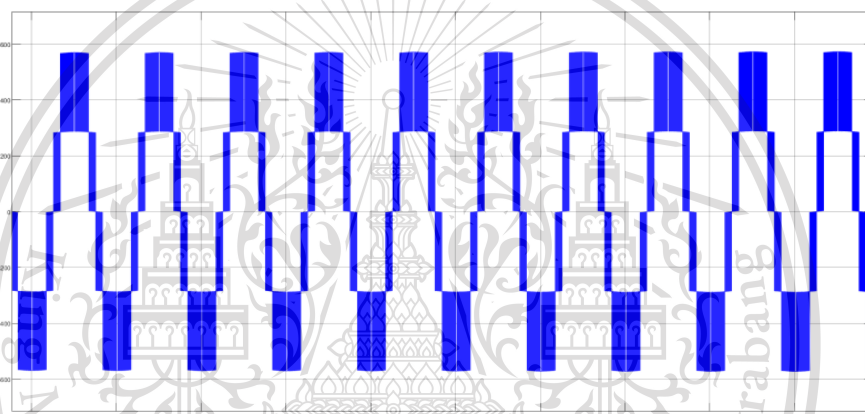
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

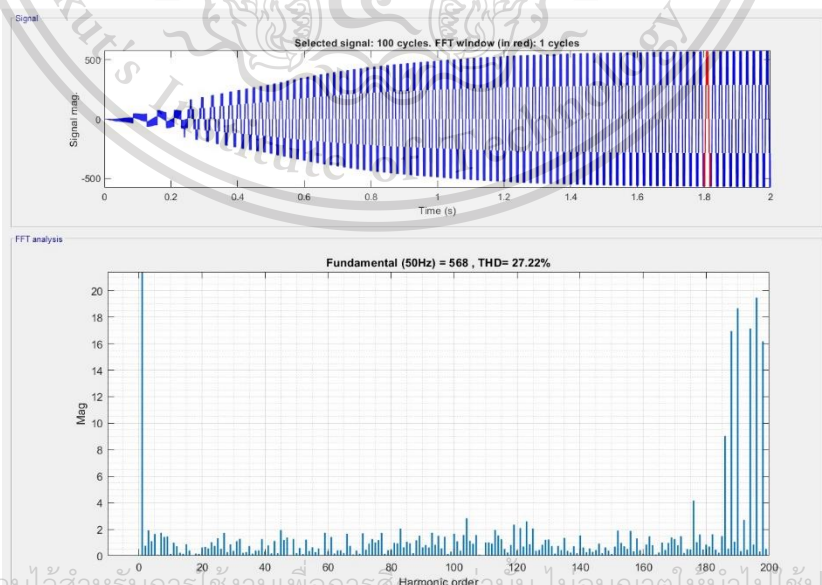
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.21 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(45Hz)



รูปที่4.22 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(45Hz)

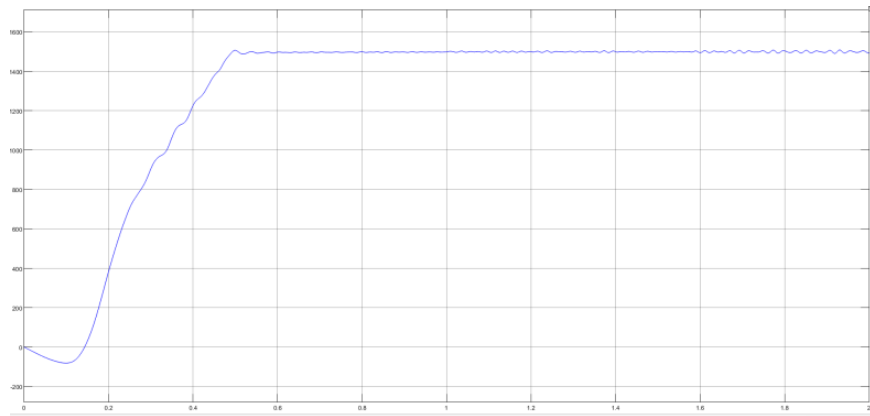


รูปที่4.23 ฮาร์โมนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(45Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดก็ตามที่ก่อให้เกิดความเสียหายของเอกสารที่กล่าวถึงที่มีการนำไปใช้

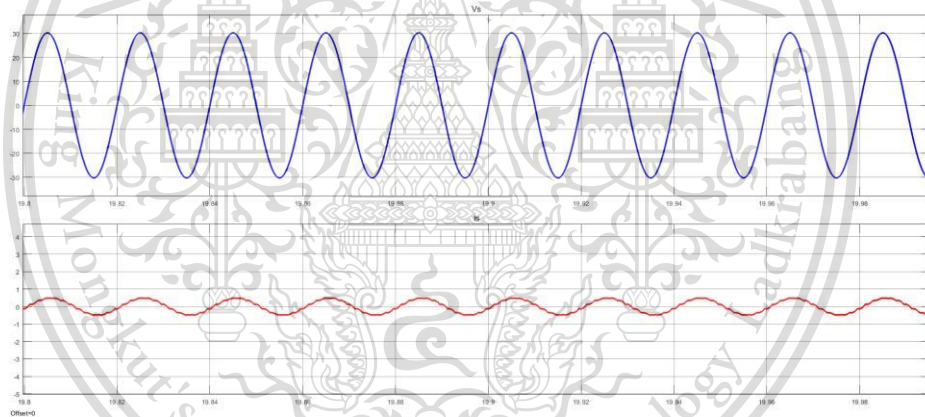
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.24 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่45เฮิร์ตซ์

#### 4.3 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่40เฮิร์ตซ์ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ0.54



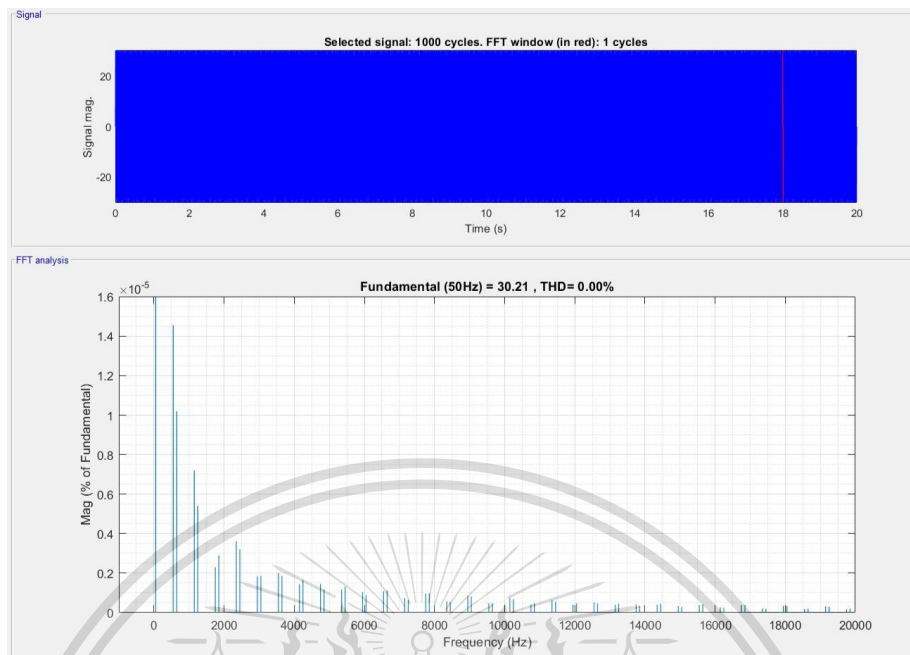
รูปที่4.25 แรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(40Hz)

นำข้อมูลกราฟแรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้ามาหาFFTเพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมของฮาร์มอนิก ได้ดังรูปที่4.26และ 4.27 ตามลำดับ

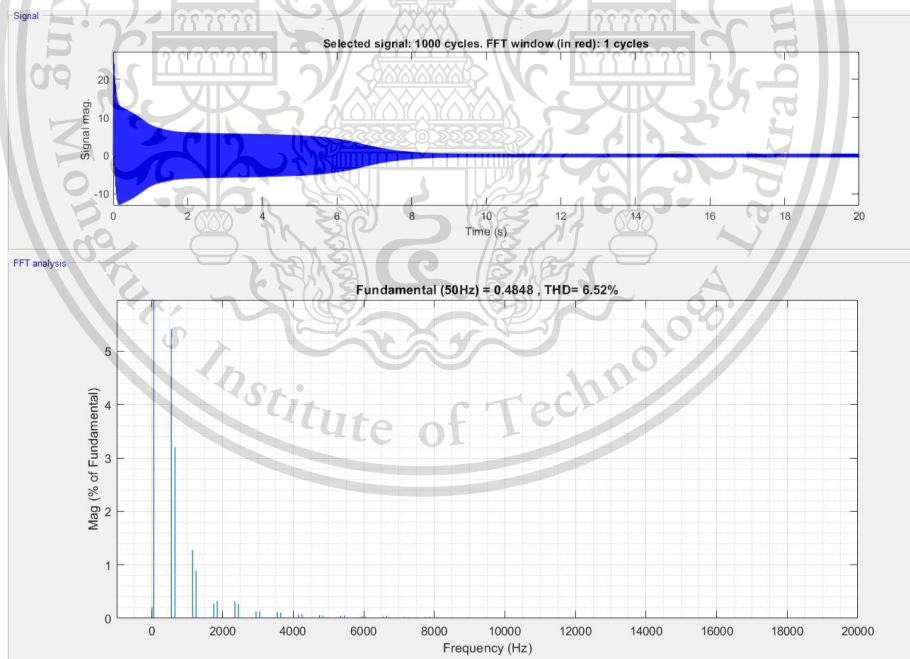
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.26 ฮาร์โมนิกของแรงดันเฟสด้านขาเข้า(40Hz)

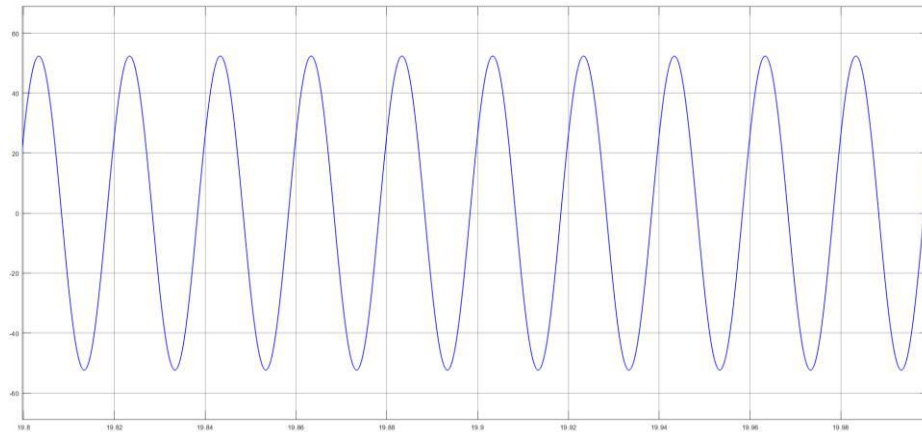


รูปที่ 4.27 ฮาร์โมนิกของกระแสเฟสด้านขาเข้า(40Hz)

จากรูปที่ 4.27 กระแสเฟสที่ Fundamental (40Hz) เท่ากับ 0.4848 แอมป์ และความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกของกระแส %THD<sub>i</sub> = 6.52%  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.28 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(40Hz)

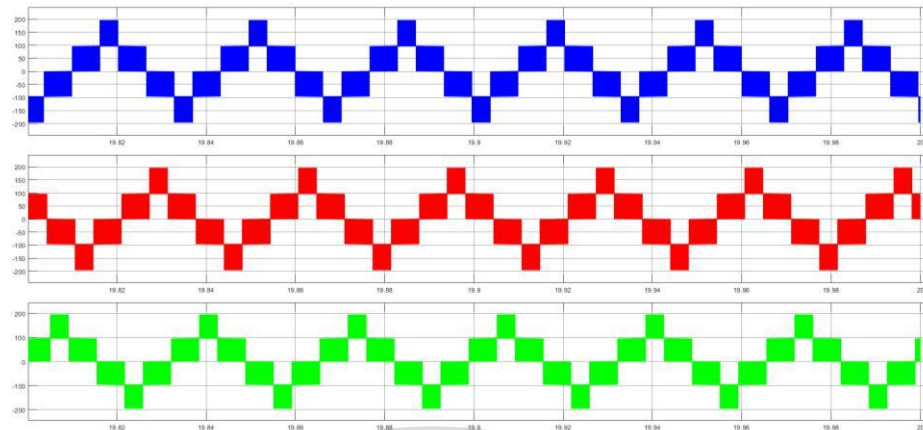


รูปที่ 4.29 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(40Hz)

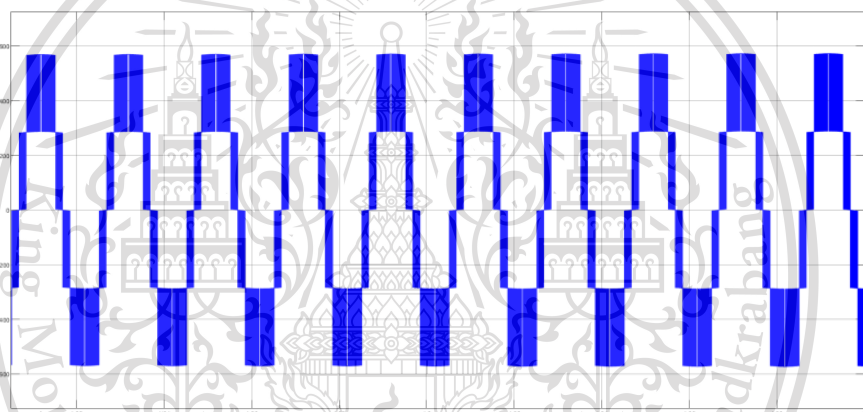
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.30 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5ระดับ(40Hz)

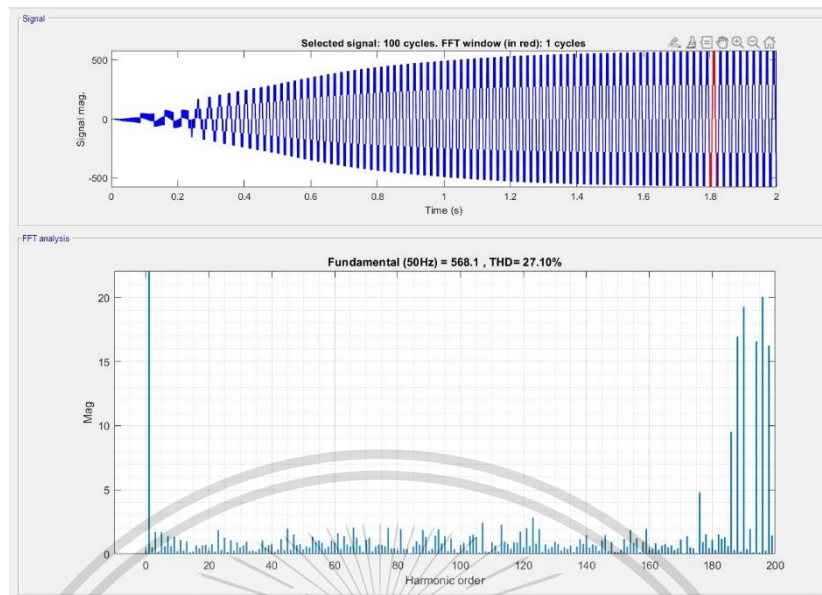


รูปที่ 4.31 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5ระดับ(40Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.32 ฮาร์โมนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(40Hz)



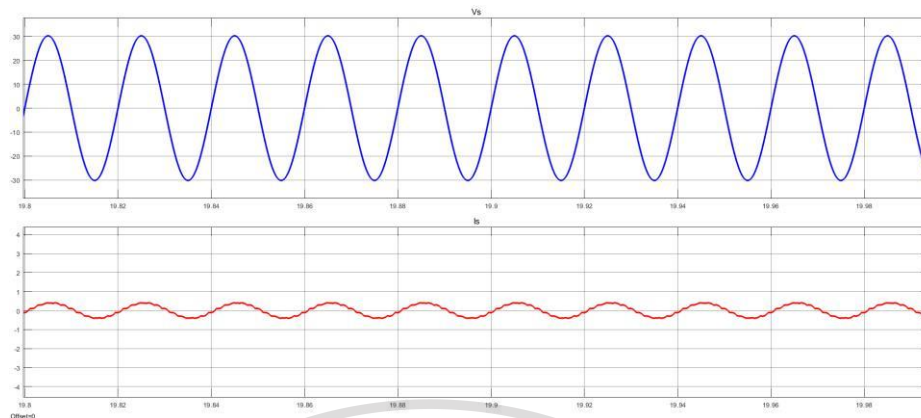
รูปที่4.33 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่40เฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

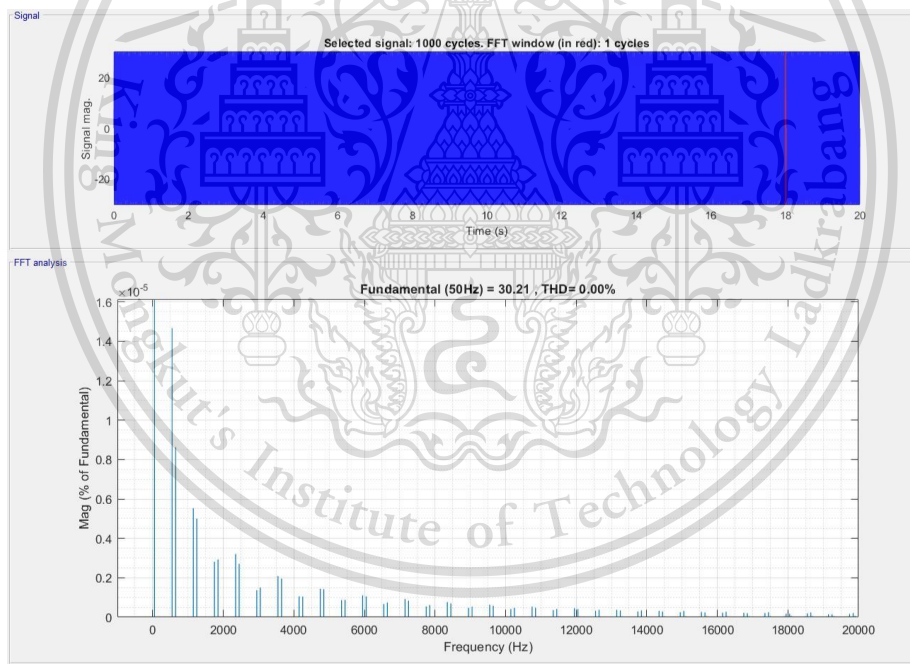
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.4 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่30เฮิร์ตซ์ชันีการมอดูเลตเท่ากับ0.45



รูปที่4.34 แรงแดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(30Hz)

นำข้อมูลกราฟแรงแดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้ามาหาFFTเพื่อวิเคราะห์ สเปกตรัมของฮาร์มอนิก ได้ดังรูปที่4.44และ 4.45 ตามลำดับ

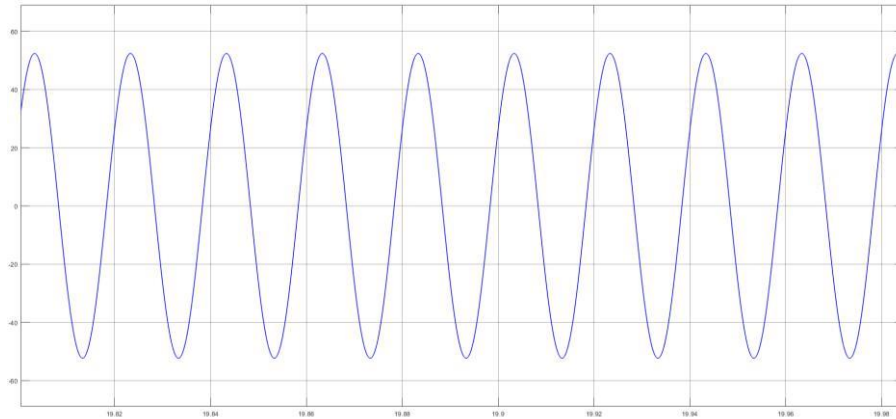


รูปที่4.35 ฮาร์มอนิกของแรงแดันเฟสด้านขาเข้า(30Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

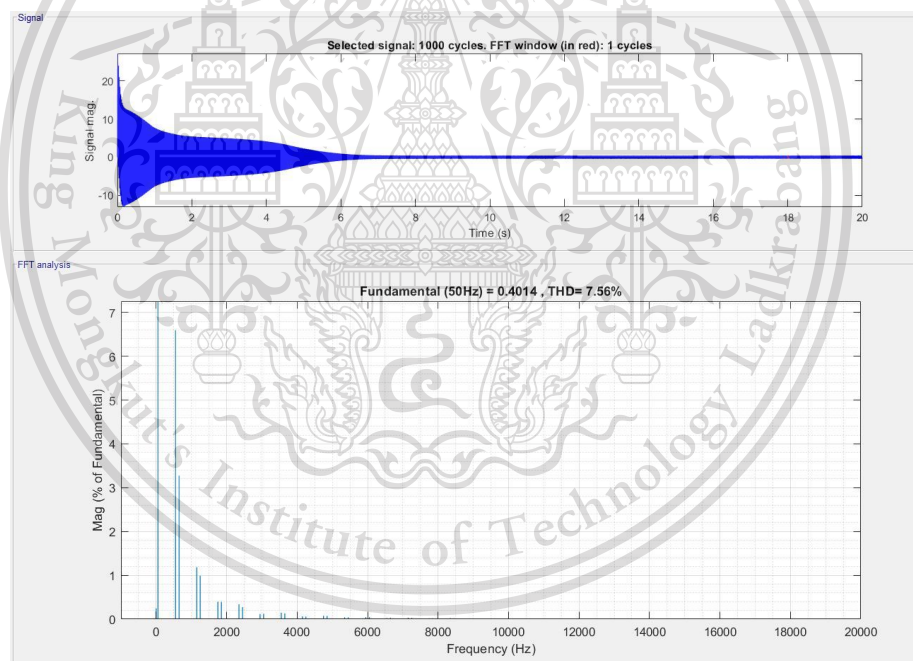
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.36 ฮาร์มอนิกของกระแสเฟสด้านขาเข้า(30Hz)

จากรูปที่4.45 กระแสเฟสที่Fundamental(50Hz) เท่ากับ0.4014 แอมป์ และ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส%THD<sub>i</sub> = 7.56 %

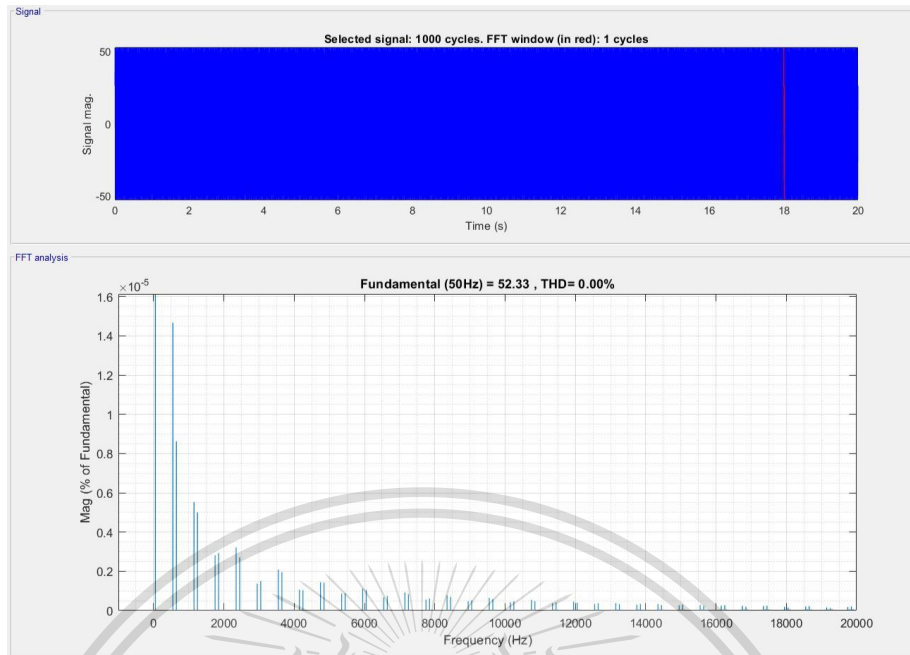


รูปที่4.37 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(30Hz)

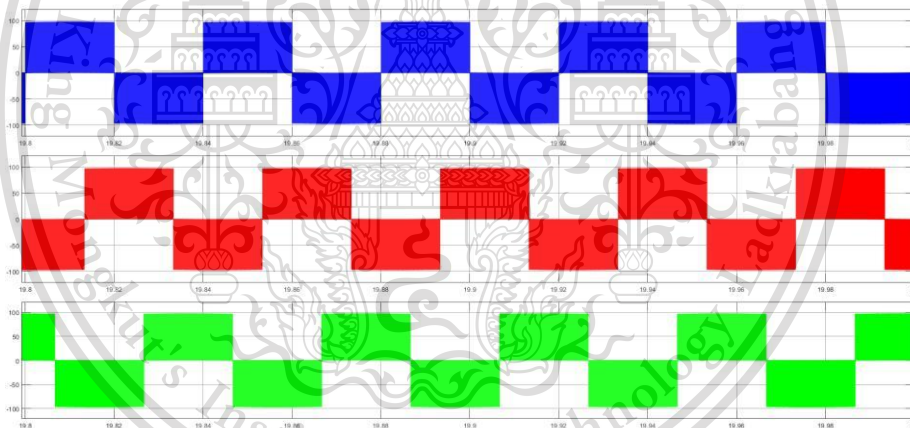
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.38 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(30Hz)

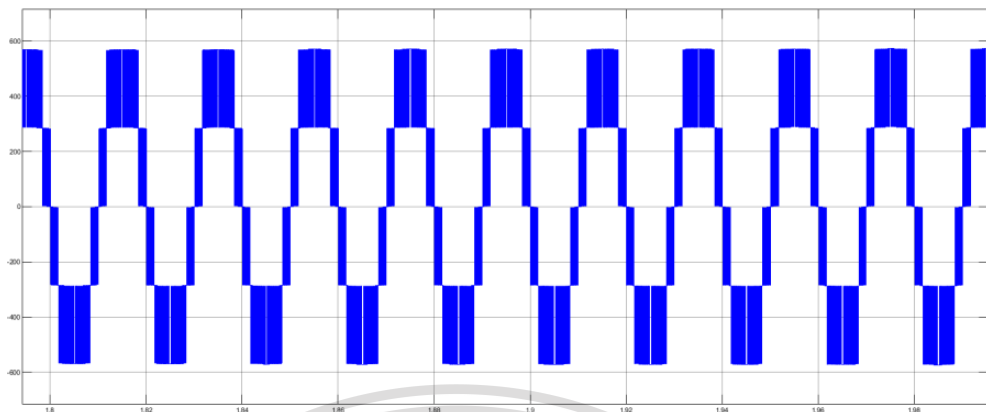


รูปที่ 4.39 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ(30Hz)

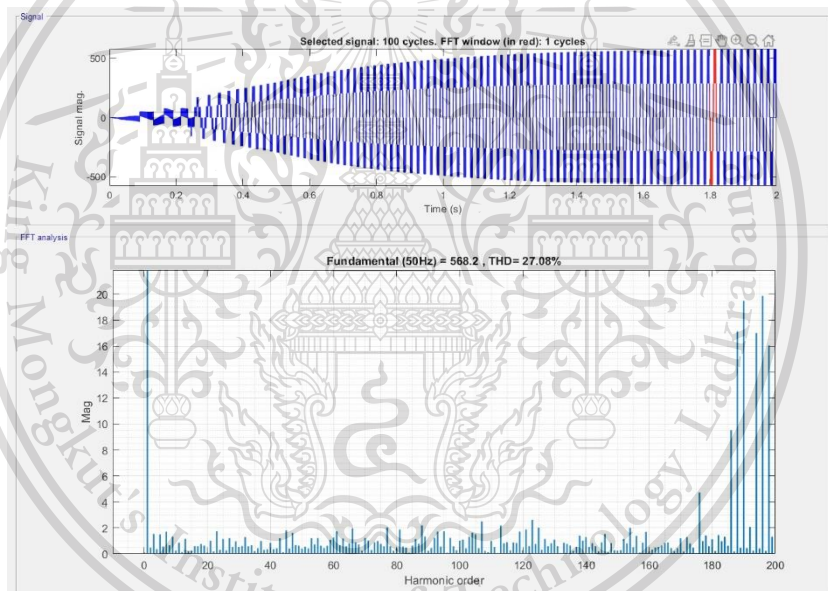
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

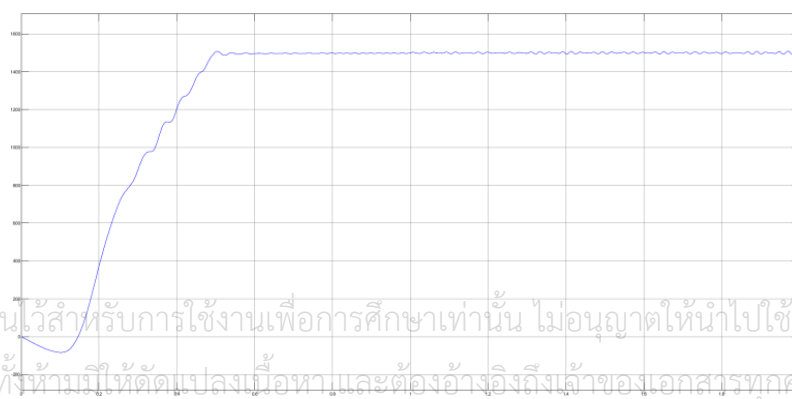
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.40 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(30Hz)



รูปที่4.41 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(30Hz)



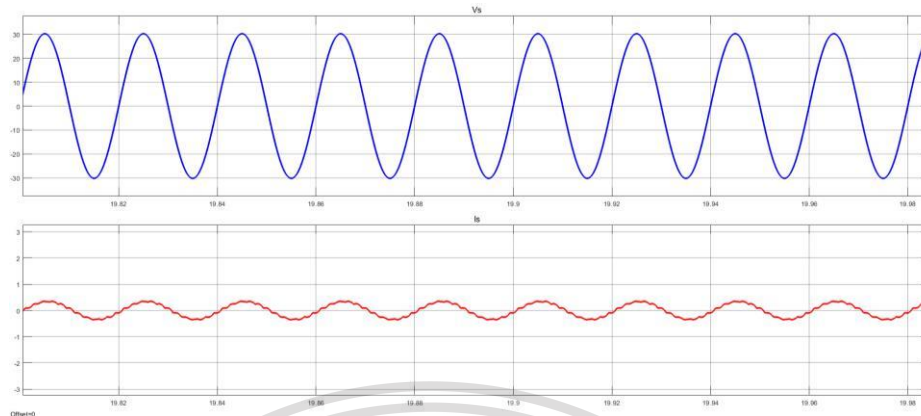
รูปที่4.42 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่30เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

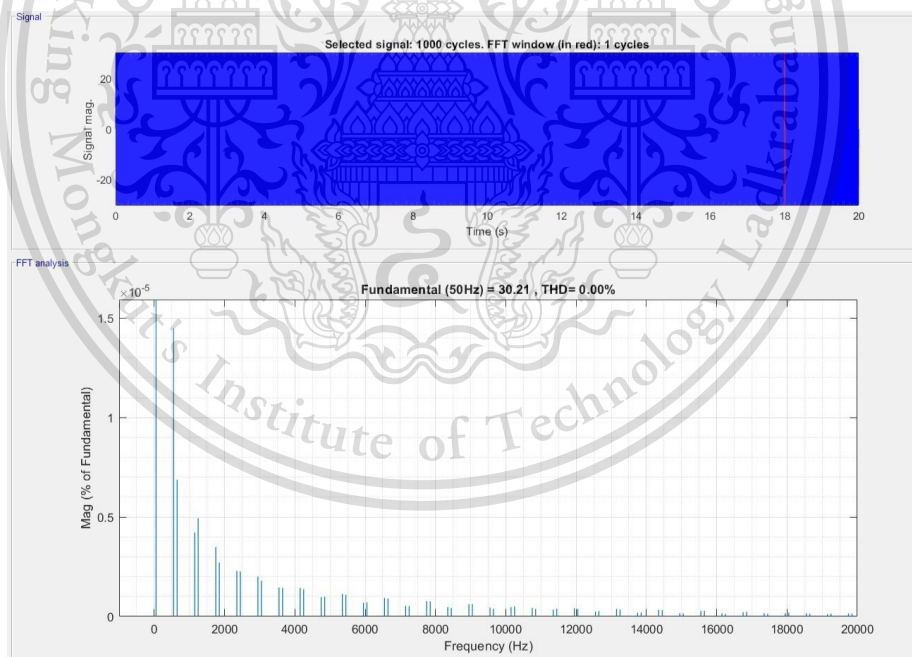
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.5 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์5ระดับที่ความถี่25เฮิร์ตซ์ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ0.36



รูปที่4.43 แรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้า(25Hz)

นำข้อมูลกราฟแรงดันเฟสและกระแสเฟสทางด้านขาเข้ามาหาFFTเพื่อวิเคราะห์ สเปกตรัมของฮาร์มอนิก ได้ดังรูปที่4.44และ 4.45 ตามลำดับ

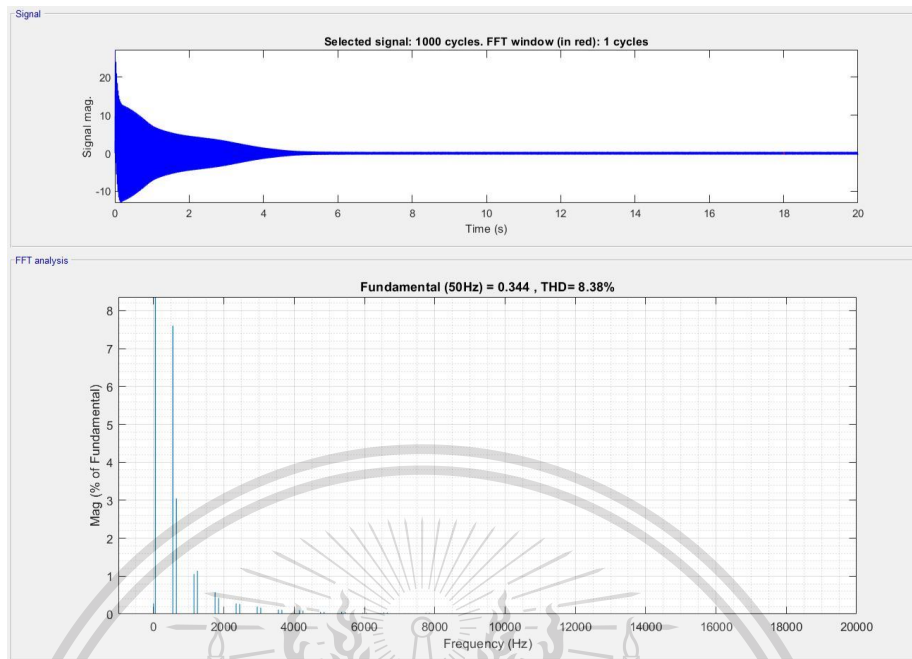


รูปที่4.44 ฮาร์มอนิกของแรงดันเฟสด้านขาเข้า(25Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

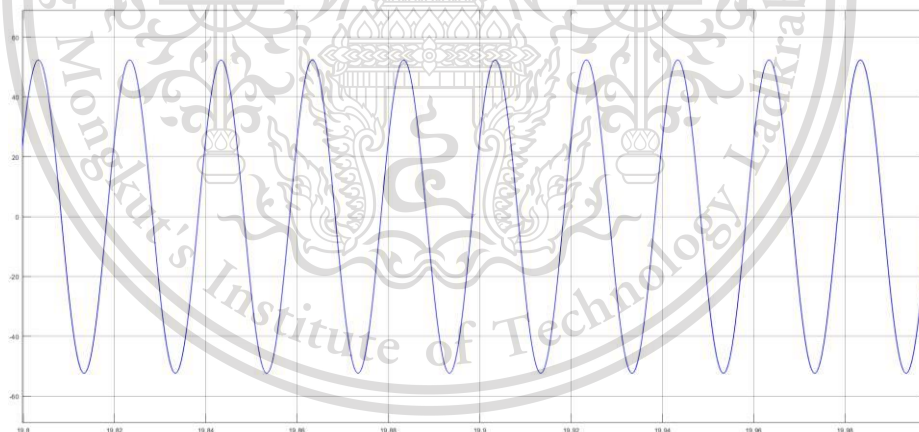
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.45 ฮาร์มอนิกของกระแสเฟสด้านขาเข้า(25Hz)

จากรูปที่4.45 กระแสเฟสที่Fundamental(50Hz) เท่ากับ0.344 แอมป์และความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก

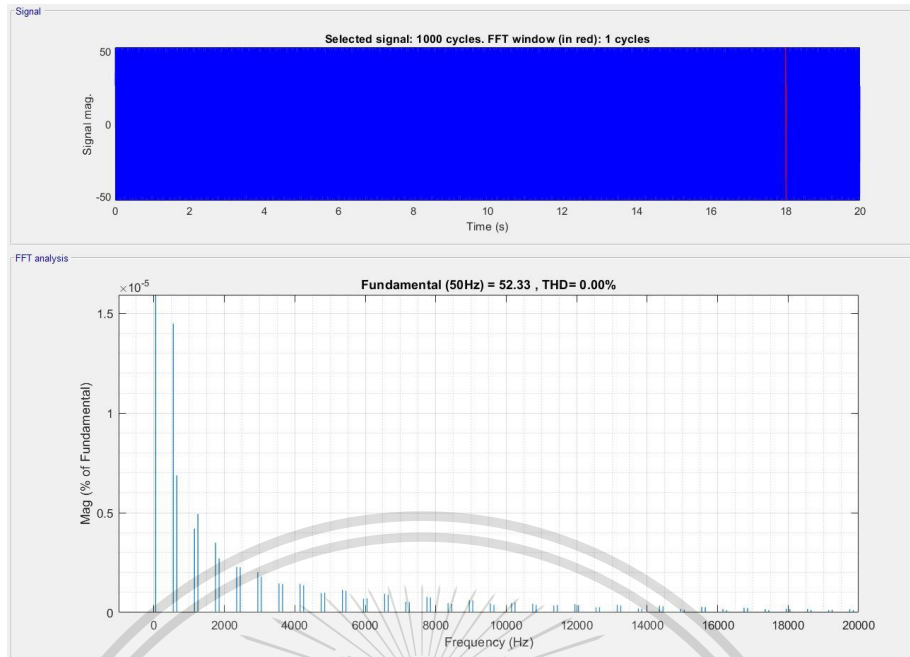


รูปที่4.46 แรงดันไลน์ด้านขาเข้า(25Hz)

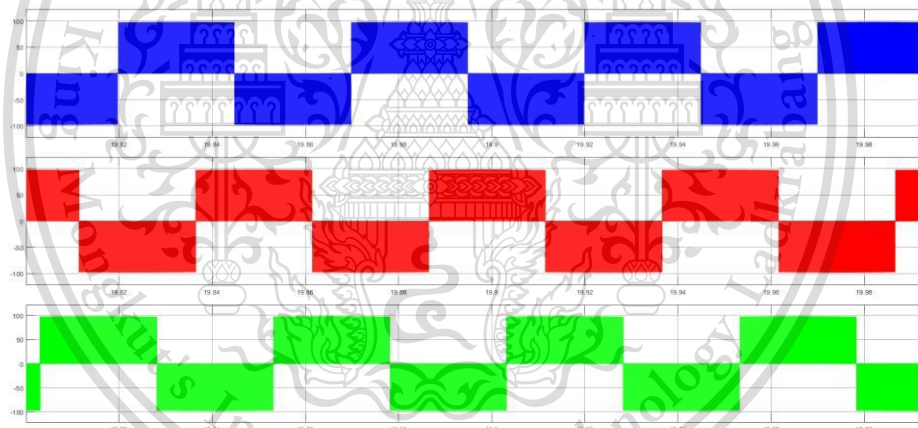
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.47 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาเข้า(25Hz)

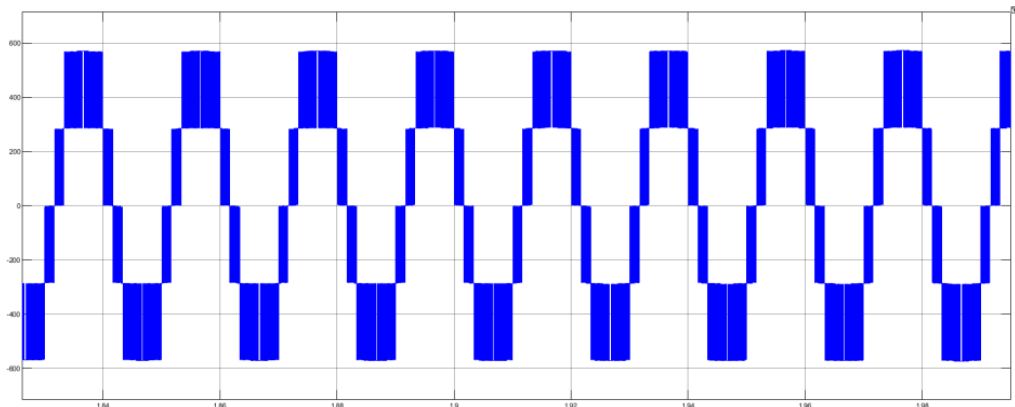


รูปที่4.48 แรงดันเฟสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(25Hz)

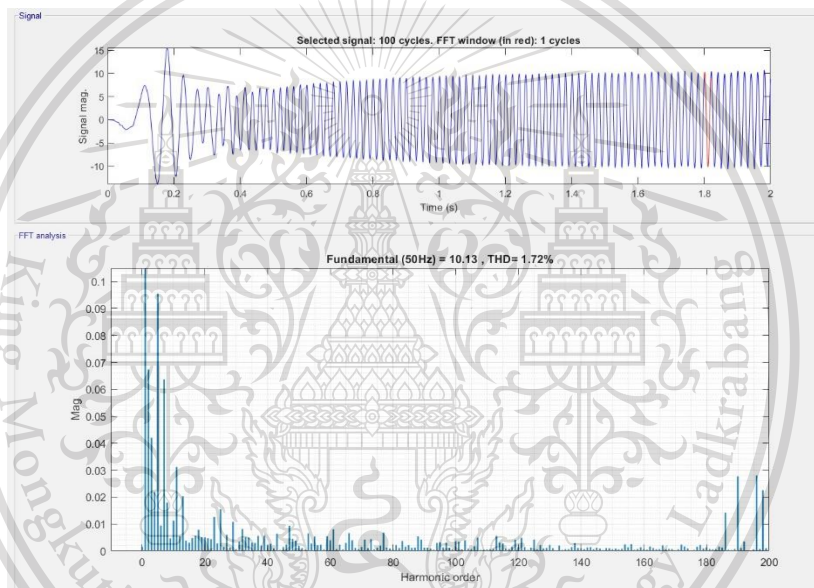
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

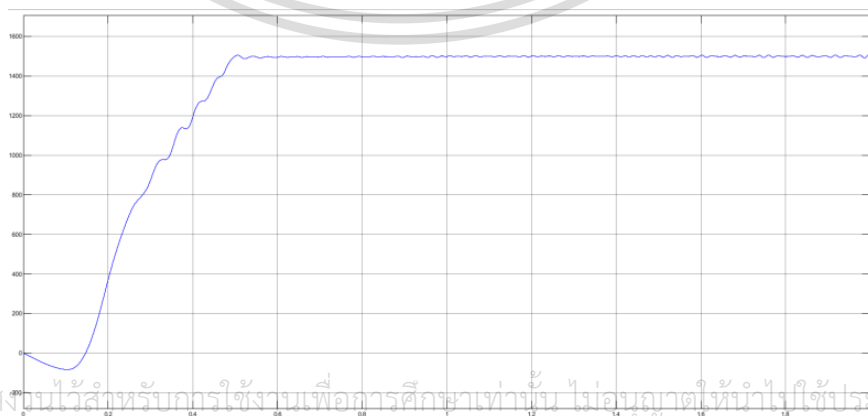
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.49 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(25Hz)



รูปที่4.50 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับ(25Hz)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาใดๆโดยเด็ดขาดของเอกสารนี้ซึ่งมีกรรมสิทธิ์ที่การนำไปใช้

รูปที่4.51 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่25เฮิรตซ์

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากผลการจำลองวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ต่อ5ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการปรับปรุงคุณภาพกระแสกริดโดยใช้วงจรเรียงกระแส12พัลส์ สามารถจำแนกผลการวัดได้2 ส่วนคือ ส่วนของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงคือการ ปรับปรุงคุณภาพกระแสกริดโดยใช้วงจรเรียงกระแส12 พัลส์ วัดแรงดัน กระแสและนำมา วิเคราะห์ข้อมูลหาFFT ได้ ความผิดพลาดทางด้านฮาร์มอนิกดังตารางที่4.2และส่วนของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยหลักการอินเวอร์เตอร์5ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบมีฟิลเตอร์ วัดแรงดัน กระแส และนำมาวิเคราะห์ข้อมูลหาFFTได้ ความผิดพลาดทางด้านฮาร์มอนิกดังตารางที่4.3

ตารางที่4.2 ผลการจำลองการปรับปรุงคุณภาพกระแสกริดโดยใช้วงจรเรียงกระแส12พัลส์

f (Hz)	$V_{peak}$ (V) (line to line)	%THD <sub>v</sub>	$I_{peak}$ (A) (line to line)	%THD <sub>i</sub>
50	567.7	27.24	9.97	4.93
45	568.0	27.22	10.25	3.36
40	568.1	27.10	10.26	2.01
30	568.3	27.08	10.14	2.75
25	568.3	27.12	10.13	1.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**ตารางที่ 4.3** ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อใส่วงจรฟิลเตอร์ชนิด LC

f (Hz)	$V_{\text{peak}}$ (V) (line to line)	%THD <sub>v</sub>	$I_{\text{peak}}$ (A) (line to line)	%THD <sub>i</sub>
50	381.2	45.79	7.05	2.64
45	382.6	44.85	7.04	2.97
40	383.6	45.08	7.03	2.83
30	384.5	45.68	7.11	3.32
25	385.5	44.82	7.19	2.33

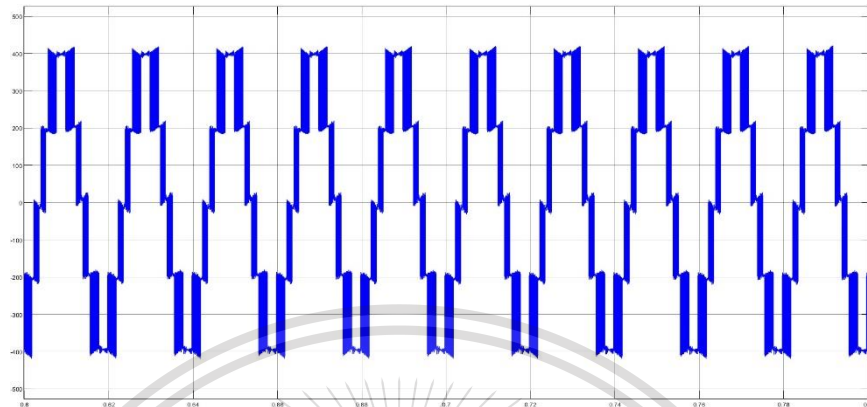
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

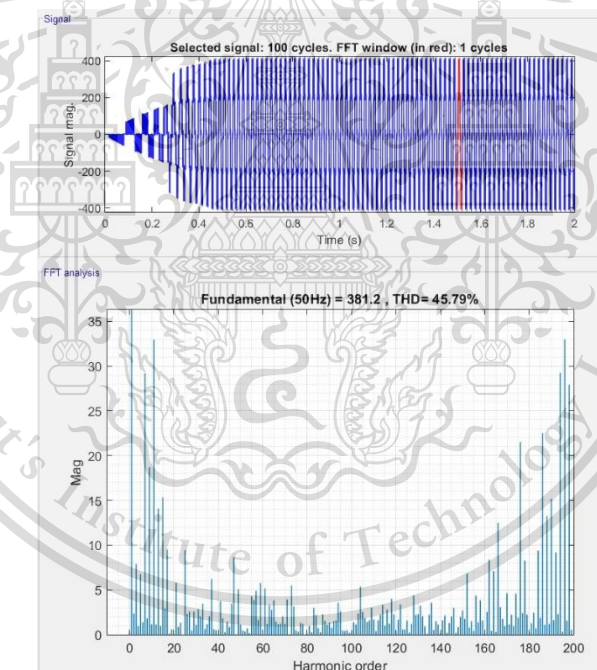
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.6 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี

Filter



รูปที่ 4.52 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (50Hz)

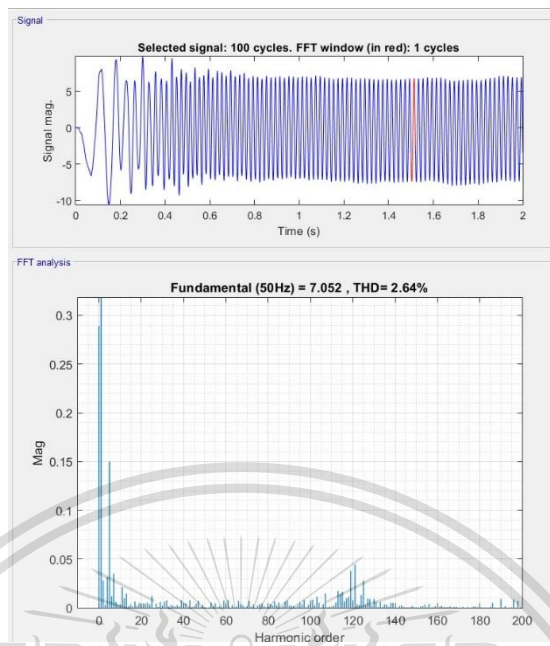


รูปที่ 4.53 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (50Hz)

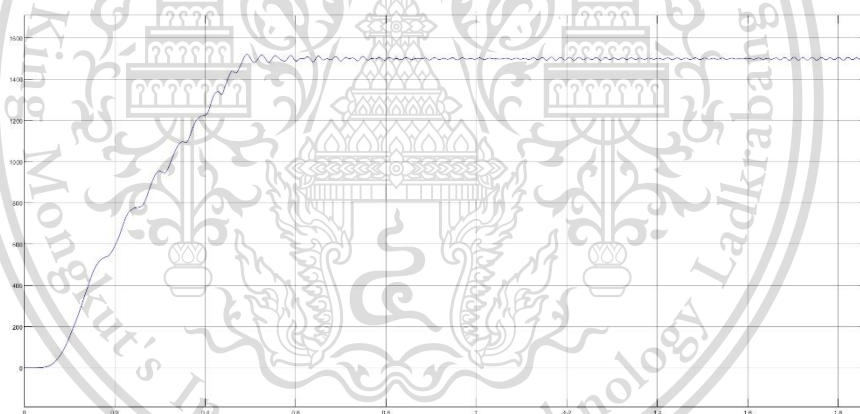
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.54 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับแบบมีฟิลเตอร์(50Hz)



รูปที่4.55 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่50เฮิร์ตซ์

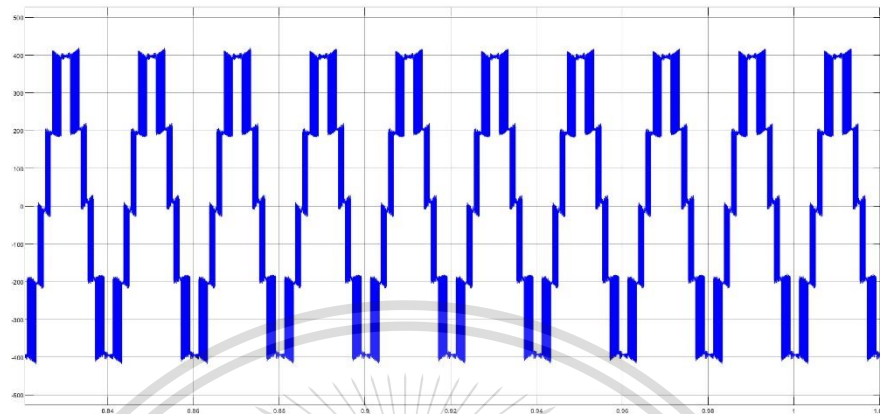
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

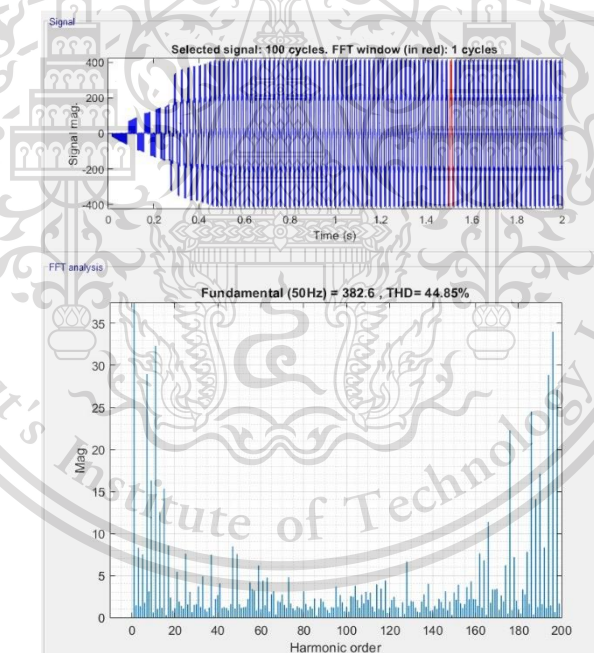
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.7 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 45 เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี

Filter



รูปที่ 4.56 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (45Hz)

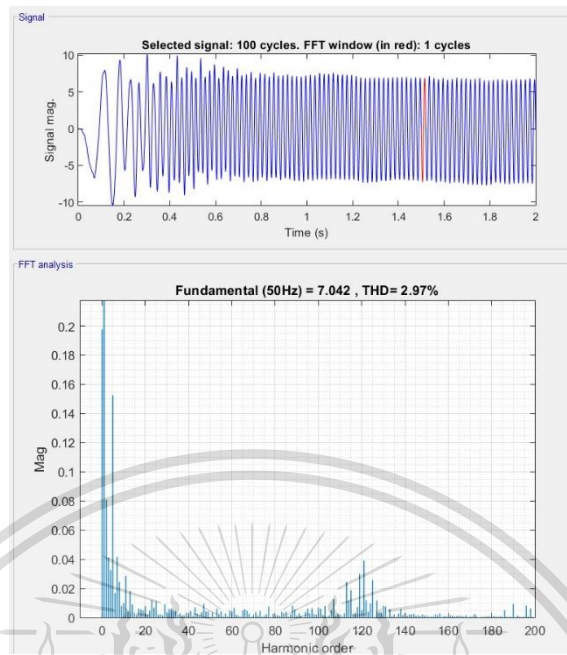


รูปที่ 4.57 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (45Hz)

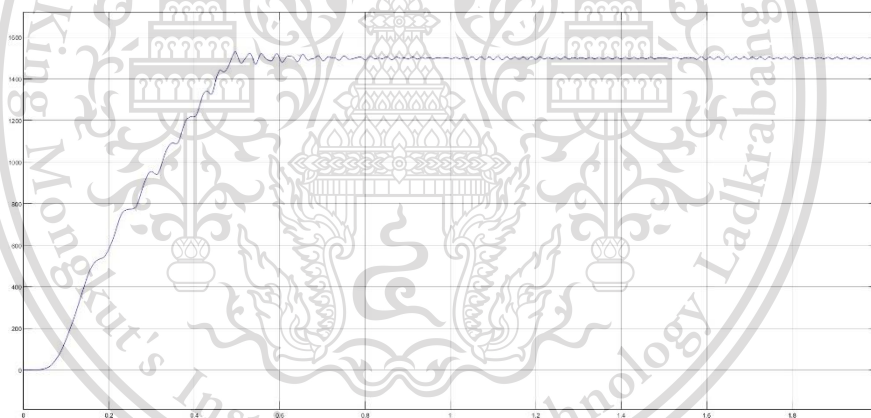
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.58 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (45Hz)



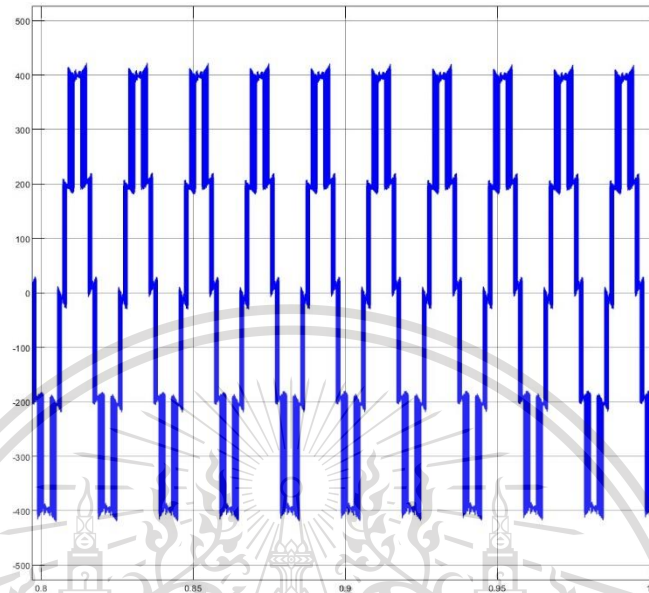
รูปที่ 4.59 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 45 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

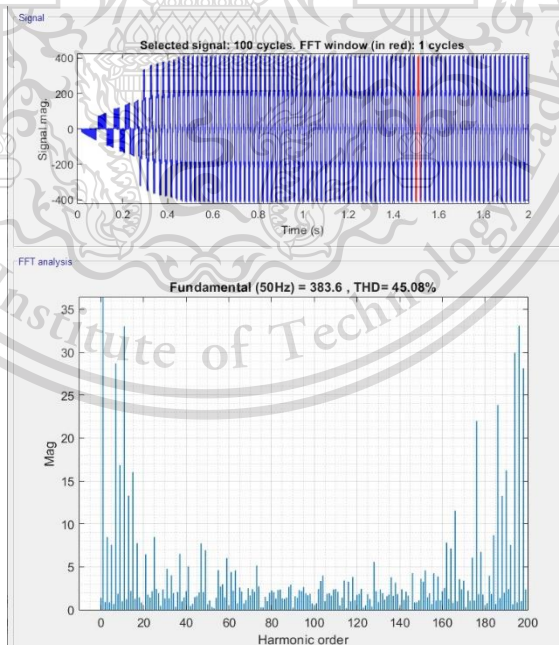
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.8 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี Filter



รูปที่ 4.60 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (40Hz)

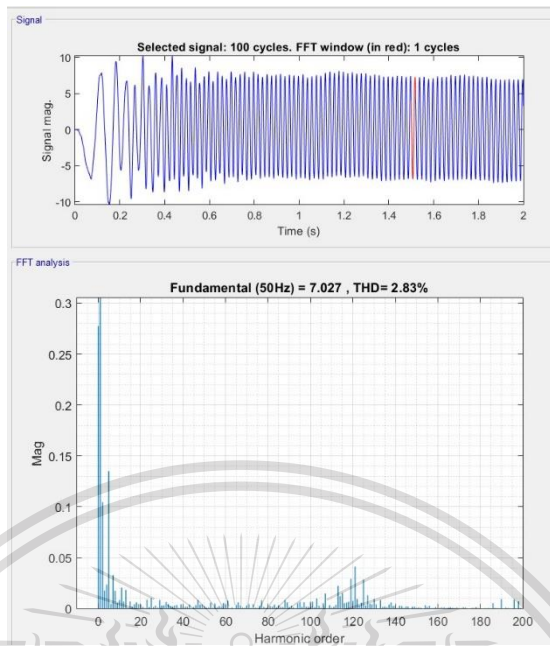


รูปที่ 4.61 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (40Hz)

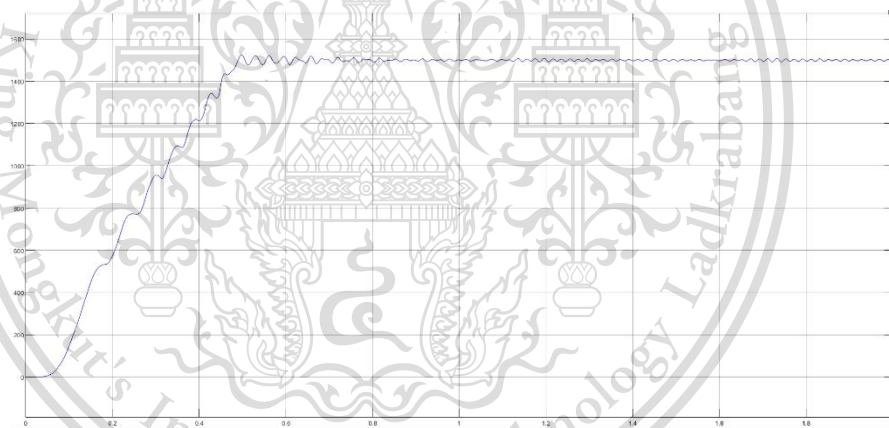
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.62 ฮาร์มอนิกของกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับแบบมีฟิลเตอร์(40Hz)



รูปที่4.63 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่40เฮิรตซ์

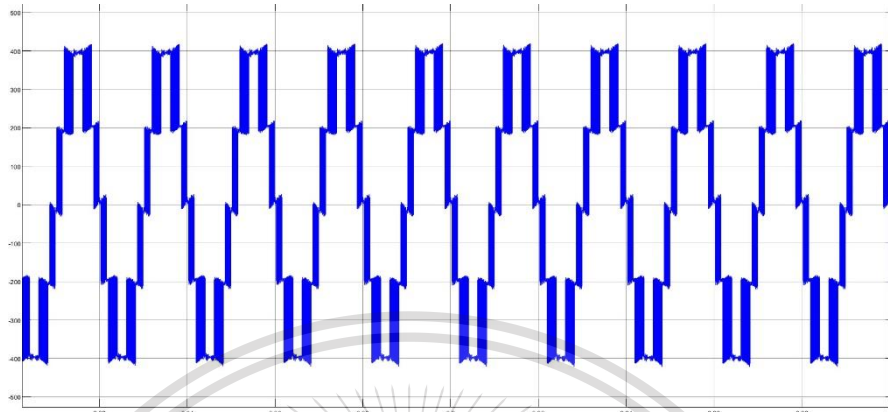
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

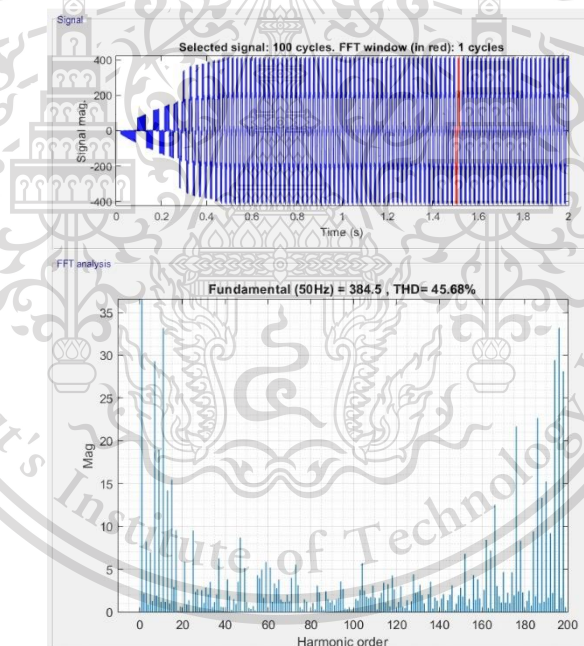
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.9 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 30 เฮิร์ตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี

Filter



รูปที่ 4.64 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (30Hz)

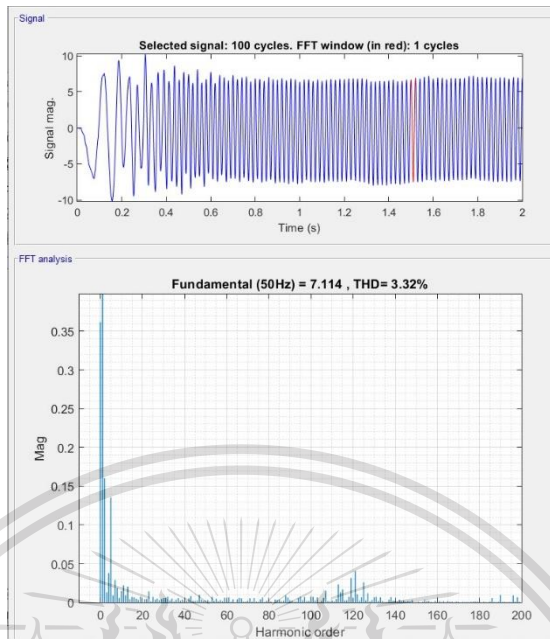


รูปที่ 4.65 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (30Hz)

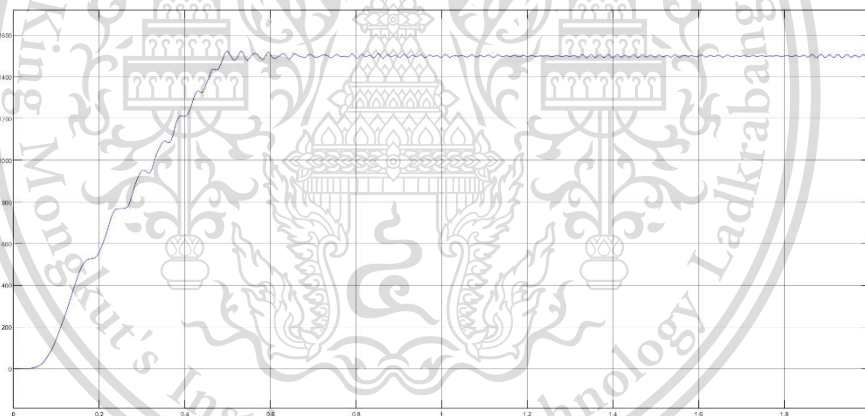
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.66 ฮาร์มอนิกของกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับแบบมีฟิลเตอร์(30Hz)



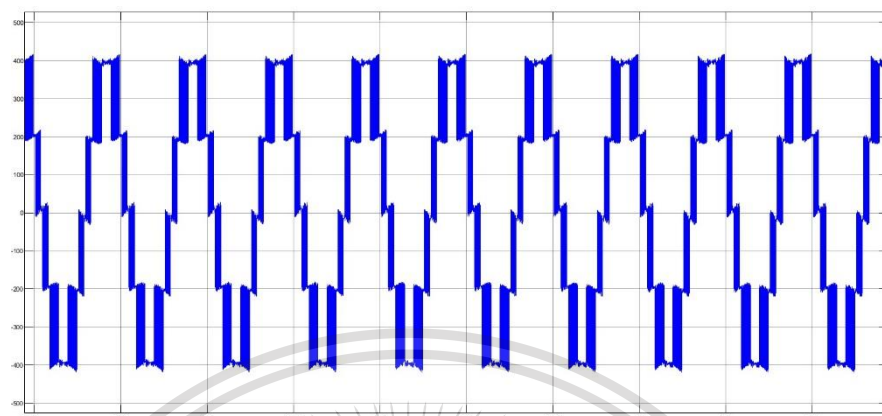
รูปที่4.67 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่30เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

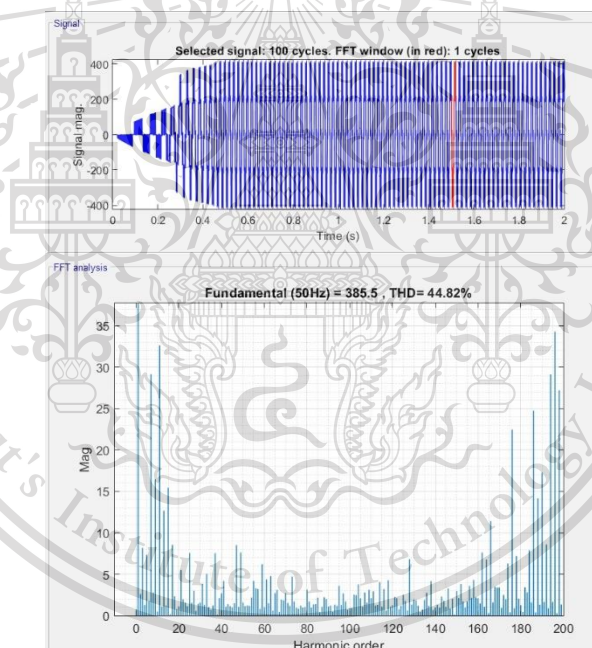
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.10 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับที่ความถี่ 25 เฮิรตซ์ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.9 แบบมี Filter



รูปที่ 4.68 แรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (25Hz)

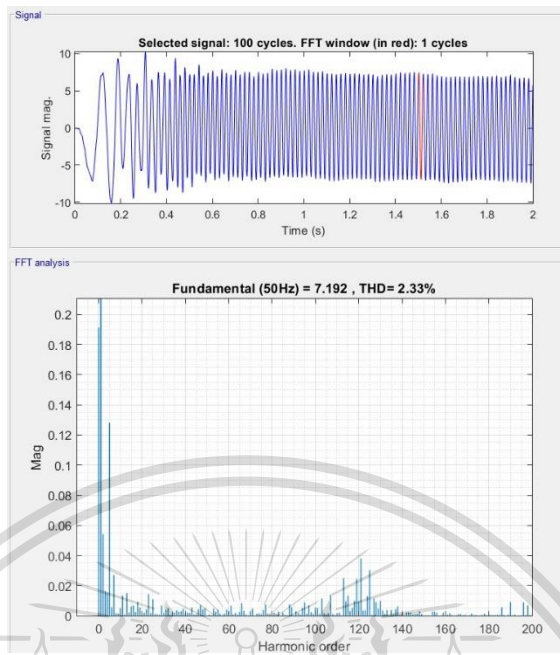


รูปที่ 4.69 ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบมีฟิลเตอร์ (25Hz)

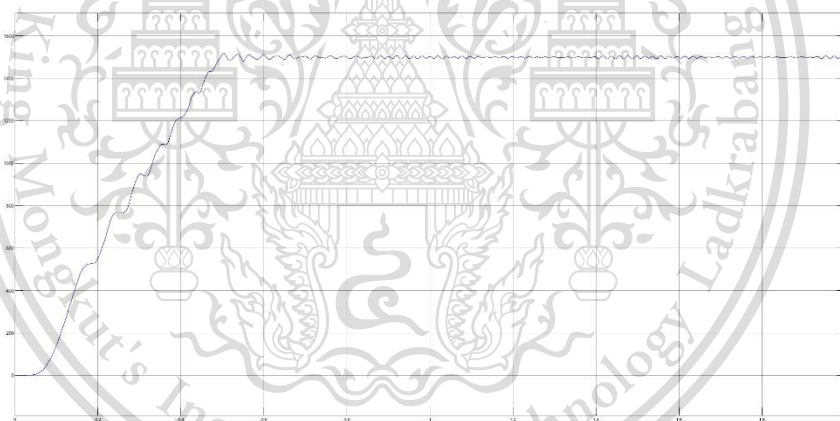
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่4.70 ฮาร์มอนิกของกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์5ระดับแบบมีฟิลเตอร์(25Hz)



รูปที่4.71 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่25เฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวสรุปผลการทดสอบการใช้อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดเอชบริดจ์ เพื่อ ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ประกอบกับวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์ข้างต้นรวมถึงใช้วงจรกรองฮาร์มอนิก และนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุง คุณภาพกระแสไฟฟ้ากริด โดยอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ในปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้ ใช้หลักการต่ออนุกรมอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ เพื่อเพิ่มจำนวนระดับ ส่งผลทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทมีขนาดเพิ่มขึ้น และมีลักษณะรูปสัญญาณเข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้น ในส่วนของวงจรกรองฮาร์มอนิกนั้นใช้การต่อแบบ LC โดยตัวเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุจะต่อกันแบบเดลต้าเพื่อลด voltage spike ที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้เองจึงสามารถลดขนาดพิกัดของ อุปกรณ์สวิตซ์ซิ่งลงมาได้ โดยการใช้วงจรเรียงกระแส 12 พัลส์เป็นแหล่งจ่ายแก่อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละชุด มีส่วนช่วยให้คุณภาพกระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม หรือที่อินพุทของระบบดีขึ้น เมื่อ เปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบปกติ หรือวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์

#### 5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

-พิจารณาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆของวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ พบว่าเป็นไปตามทฤษฎีเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ที่เกิดเป็นฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 11,13,23 และ25 ทั้งนี้ได้มีฮาร์มอนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะป้อนมาด้วย ได้แก่อันดับที่ 5,7,17 และ 23

-พิจารณาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆของวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ ที่เพิ่มวงจรกรองกระแสแบบพาสซีฟ พบว่าสามารถลดค่าฮาร์มอนิกส์ลงได้

-พิจารณาค่าจากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 พบว่าค่า THDi ของแต่ละความถี่มีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มวงจรกรองกระแสแบบพาสซีฟเข้าไปในระบบ แสดงว่าสามารถลดค่าความความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของกระแสที่เกิดขึ้นได้

#### 5.2 สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดเอชบริดจ์ ประกอบกับวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละชุด และวงจรกรองฮาร์มอนิกชนิดความถี่ต่ำผ่าน โดยทำการทดสอบที่ความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิร์ตซ์ จนถึง 50 เฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดค่าทางไฟฟ้าต่างๆแล้วนำมาวิเคราะห์ ค่าที่ได้จากผลการจำลองวงจรด้วยโปรแกรมจำลองทาง คณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink มีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎี ขณะเดียวกันค่าความเพี้ยนรวมของกระแสไฟฟ้าที่กริดลดลงกว่าประมาณ 4 เท่า ซึ่งเป็นผลมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าต่างมุมเฟสที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่ำได้โดยใช้ หลักการการเลื่อนมุมเฟสของฝั่งทุติยภูมิ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหม้อแปลงต่อแบบสตาร์กับ ส่วนประกอบหม้อแปลงแบบเดลต้า ทำให้เกิดความต่างเฟสกัน  $\pm 30$  องศา ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์ในฝั่งปฐมภูมิอันดับเลขคี่ที่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กว่า 7 ถูกหักล้างลดทอนลง รวมถึงใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกชนิดความถี่ต่ำผ่าน เพื่อลดค่าความเพี้ยนไปอีก ดังนั้นสรุปได้ว่าสามารถนำวงจร เรียงกระแส 12 พัลส์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ 2 วงจร และหม้อแปลงไฟฟ้าต่างมุมเฟส เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแก่วงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดเอชบริดจ์ ซึ่งมีการใช้ Microcontroller ตระกูล C2000 ในการควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณ PWM มาใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ร่วมกับวงจรกรองฮาร์มอนิก จะเพิ่มคุณภาพของกระแสไฟฟ้ากริดดีขึ้นอย่าง

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

-เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการทดลองนั้นมีการปิดอาคารในสถาบัน เนื่องจากเกิดการแพร่ระบาดของโควิด-19 ทำให้ไม่สามารถเข้าไปใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ จึงไม่สามารถทำการทดสอบทางปฏิบัติได้

-ในการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ยังเป็นการทดสอบแบบไร้ภาระ ทางกล จึงยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่า เมื่อเพิ่มภาระทางกลให้แก่มอเตอร์ทดสอบมากขึ้นนั้นจะมีผลต่ออินพุต รวมถึงเอาต์พุต และประสิทธิภาพของระบบมากน้อยเพียงใด

-การทดสอบนั้นเป็นเพียงผลทางทฤษฎียังไม่สามารถสรุปได้ว่าสามารถนำไปใช้งานจริงได้หรือไม่

### 5.4 แนวทางการพัฒนา

-นำไปใช้งานกับมอเตอร์ของจริงหลากหลายขนาดมากขึ้น และโหลดหลากหลายประเภท

-สามารถเพิ่มวงจรเรียงกระแสให้มากขึ้นได้ เพื่อคุณภาพกระแสที่ดีขึ้น เช่นเพิ่มจาก 12 พัลส์ เป็น 24 พัลส์

-ปรับปรุงวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เพื่อเพิ่มคุณภาพไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต และสามารถใช้งานที่ระดับแรงดันสูงที่โหลดมากขึ้น

-นำระบบ IoT (The Internet of Things) มาประยุกต์เข้ากับวงจรควบคุมเพื่อง่ายและสะดวกต่อการควบคุมยิ่งขึ้น

-นำทฤษฎีการควบคุมแบบเวกเตอร์ มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ธาณี บุญคุ้ม, ฐิติรัฐ อินทร์จันทร์และ ปริญญา เกื้อสงค์, “การศึกษาและวิเคราะห์เพื่อหาวิธีลดค่าฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและ อิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2556.
- [2] Mei Li, “Multi pulse SCR Rectifiers,” Master of Engineering, Electrical and Computer engineering, Toronto, Ontario, Canada, 2005.
- [3] K. Gamit and K. Chaudhari, “Multi pulse Rectifier using Different phase shifting Transformer and Its THD Comparison for Power Quality Issues” International Research Journal of Engineering and Technology, Vol.3, No.1, 2016, pp. 1025-1033.
- [4] Mei Li, “Multi pulse SCR Rectifiers,” Master of Engineering, Electrical and Computer engineering, Toronto, Ontario, Canada, 2005.
- [5] ศักดาวุฒิ บุญคุ้ม, “การควบคุมกระแสแบบเวกเตอร์สำหรับระบบเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าเฟสด้วยวงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2562.
- [6] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิ์เรษฐ, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, หุ่นส่วน จำกัด วิ.เจ. พรินติ้ง, 2547.
- [7] Anjali Krishna R and L Padma Suresh, “A Brief Review on Multi Level Inverter Topologies,” International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies [ICCPCT], 2016, pp. 2.
- [8] ปุระเชษฐ์ จันทมล, “การวิเคราะห์และออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบไดโอด-แคลมป์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี, 2559.
- [9] Mohammadreza Derakhshanfar, “Analysis of different topologies of multilevel inverters” Master of Science Thesis, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, 2010.
- [10] Seung-Gi Jeong and Min-Ho Park, “The Analysis and Compensation of DeadTime Effects in PWM Inverters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 2, 1991:107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [11] เผด็จ เฒ่าละออ. (2551). เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ, สืบค้นเมื่อ 15 ตุลาคม 2562 จาก. <http://academic.udru.ac.th/~banyat/Asst.Prof.Dr.Padej/ACMachines/Asst.Prof.Dr.Padej-3Phase-Induction-Motor.pdf>
- [12] นายศิวัช ไคร์ครวญ, นายสังจพจน์ ชูคต, นายสุทธิโรจน์ พิทยเสถียร, นางสาวไอรดา จันทร์พรม, “อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่มีการปรับปรุงคุณภาพกระแสกริด” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2562.
- [13] Jaroslaw Gunzinski, Haitham Abu-Rub, Patryk Strankowski “Variable Speed AC Drives With Inverter Output Filters” John Wiley & Son,Ltd



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์สำหรับขับเคลื่อน  
มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการปรับปรุงคุณภาพกระแส  
รีดและกระแสมอเตอร์

Multi-level H-bridge inverter for driving three-  
phase induction motor with quality improvement  
of grid and motor current

นายพิพัฒน์ ศิริสิทธิ์วัฒนา นายภควัตร ตรังรัตน์จิต นายภาสกร  
ตันศิริ นายมงคล กาบบัว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขต  
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: satjapot.ch@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้จัดทำเพื่อศึกษาและ  
วิเคราะห์เกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์  
เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลาย  
ระดับชนิดเอชบริดจ์ เพื่อให้แรงดันขาออกมี  
ลักษณะเข้าใกล้สัญญาณรูปไซน์มากขึ้น เมื่อ  
เปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป อินเวอร์เตอร์  
หลายระดับในรายงานฉบับนี้เป็นอินเวอร์เตอร์  
ชนิด 5 ระดับ ใช้เทคนิคการควบคุมด้วย  
สัญญาณพีดีบีลิวเอ็มแบบลูกคลื่นไซน์อาศัย  
คลื่นพาหะ โดยการประยุกต์ใช้  
ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรถิศจิตอลในการ  
สร้างสรรค์ชิ้นงาน นอกจากนี้วงจรมอเตอร์  
5 ระดับดังกล่าวมีการปรับปรุงคุณภาพ  
กระแสไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับกริด โดยการลดฮาร์มอน  
ิกส์อันดับต่ำในกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นจาก  
อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ได้ทำการทดสอบวงจรนี้  
ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ผลการ

ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้เป็นอย่างดี  
 อีกทั้งสามารถลดค่าความเพี้ยนของ  
กระแสไฟฟ้าในระบบได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ

### 1. บทนำ

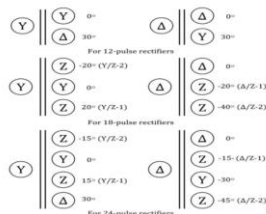
ในปัจจุบันงานทางด้านอุตสาหกรรมได้  
มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์  
กำลังอย่างแพร่หลาย และยังมีแนวโน้มที่เพิ่ม  
สูงขึ้นในอนาคต ตัวอย่างเช่น การใช้อุปกรณ์  
อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการแปลงสัญญาณไฟฟ้า  
กระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง  
และการใช้งานเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า  
กระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้ในการ  
ขับเคลื่อนเครื่องจักรกลทางไฟฟ้า ฯลฯ ซึ่ง  
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเหล่านี้ล้วนมีผลอัน  
เป็นประโยชน์ในทางที่ดียิ่งมาก แต่อาจ  
ก่อให้เกิดผลเสียทางด้านคุณภาพของระบบ  
ไฟฟ้าด้วยเช่นกัน อันเป็นผลมาจากฮาร์มอนิกส์  
ในกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์  
อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีมติให้เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นบทความนี้จึงได้ศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ ในบทความนี้ได้นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์ ประกอบกับการเลือกใช้วงจรเรียงกระแสหลายฟาส์เพื่อลดฮาร์มอนิกสีกในกระแสไฟฟ้ากริด และการเลือกใช้วงจรกรองกระแสชนิดพาสซีฟ ซึ่งปริมาณพันธัณณ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบวงจรที่ควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D ซึ่งผลการทดลองจะนำไปเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์หลายระดับ พร้อมทั้งการเพิ่มคุณภาพไฟฟ้าของกริดในอนาคตต่อไป

**2. วงจรเรียงกระแสหลายฟาส์**

การกำจัดฮาร์มอนิกของกระแสสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนฟาส์ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (ac to dc converter) หรือวงจรเรียงกระแสซึ่งใช้หม้อแปลงเลื่อนมุมเฟสที่มีการเชื่อมต่อทางขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่แตกต่างกัน จำนวนฟาส์ของวงจรเรียงกระแสมากขึ้นตามลักษณะของหม้อแปลงดังรูปที่ 1



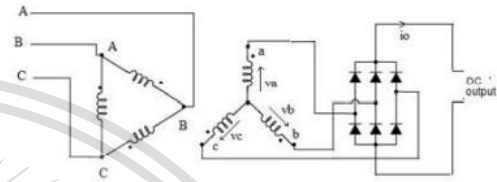
รูปที่ 1 ลักษณะการเชื่อมต่อของหม้อแปลงกับ

วงจรเรียงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

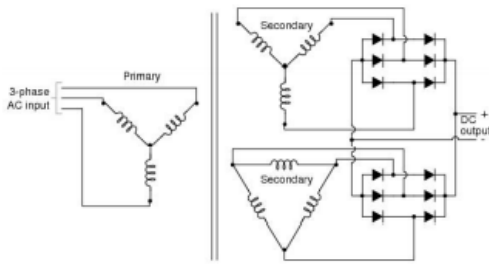
**2.1 โครงสร้างวงจรเรียงกระแสหลายฟาส์**

1. วงจรเรียงกระแสหกฟาส์รู้จักโดยทั่วไปคือวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟส โดยใช้ไดโอดหรือเอสซีอาร์ 6 ตัวในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างวงจรเรียงกระแสหกฟาส์

2. วงจรเรียงกระแสสิบสองฟาส์จะให้แรงดันเอาต์พุตไฟตรงมี จำนวนฟาส์ 12 ฟาส์ ต่อลูกคลื่นทำให้เกิดการกระเพื่อมน้อยลง โครงสร้างของวงจรเรียงกระแสสิบสองฟาส์ประกอบด้วย หม้อแปลงเลื่อนมุมเฟส ที่มีการพันขดลวดด้านปฐมภูมิแบบสตาร์ส่วนในด้านทุติยภูมิมีการพัน ขดลวดสองชุดที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อต่างกัน ชุดแรกเชื่อมต่อแบบสตาร์ ชุดที่สองเชื่อมต่อแบบเดลต้า การเชื่อมต่อที่ต่างกันของขดลวดด้านทุติย ภูมิทั้งสองชุดทำให้มุมเฟสของแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตต่างกัน 30 องศา โดยการเชื่อมต่อแบบสตาร์มีเฟสหน้าแบบเดลต้าด้วยมุมเฟส  $\delta$  เท่ากับ 0 และ -30 องศาตามลำดับ ซึ่ง มีผลช่วยก ำจัดฮาร์มอนิกอันดับต่ำในกระแสไฟฟ้าขดลวดปฐมภูมิได้มากกว่าฮาร์มอนิกอันดับ ที่ 5 และ 7 ทำให้ความเหนี่ยวนของกระแสไฟฟ้ากริดลดลง



รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรเรียงกระแสสิบลูกสองฟาส์ [1]

เมื่อ  $V_{AN}$  คือ แรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์

$D$  คือ อัตราส่วนความกว้างพัลส์

$V_{dc}$  คือ ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์ได้จากสมการที่ 3

$$V_{dc} = sE \quad (3)$$

### 3. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์

#### 3.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์

พิจารณาระบบหนึ่งเฟสอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถสร้างได้ จากการต่ออนุกรมกันของอินเวอร์เตอร์ชนิดเซมิคอนดักเตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็นระดับขั้น ขนาดของแรงดัน เฟสจะเท่ากับผลรวมของแรงดัน เอาต์พุตของแต่ละอินเวอร์เตอร์ชนิดเซมิคอนดักเตอร์รวมกัน โดยที่จำนวนระดับ ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์ สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 1

$$m = 2s + 1 \quad (1)$$

เมื่อ  $m$  คือ จำนวนระดับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดเซมิคอนดักเตอร์

$s$  คือจำนวนแหล่งจ่ายไฟตรงหรือจำนวนของอินเวอร์เตอร์ชนิดเซมิคอนดักเตอร์ย่อยในหนึ่งเฟส

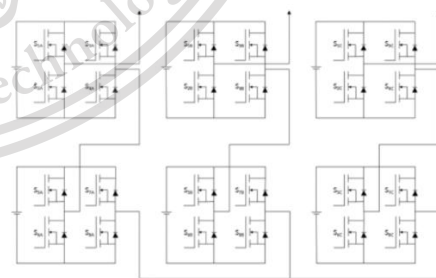
โดยที่แรงดันเฟสเอาต์พุตมาจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความ กว้างพัลส์และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตรงตามสมการที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ศึกษาเท่านั้น  $V_{AN} = DV_{dc}$  ใช้งานเพื่อ (2)

เมื่อ  $E$  คือ ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์ย่อยหนึ่งเฟส

ตั้งมั่นวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์หนึ่งเฟส จึงต้องใช้ จำนวนของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงย่อยในหนึ่งเฟสจำนวน 2 ชุด

เมื่อพิจารณาระบบสามเฟสโครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์ได้จากการนำวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์หนึ่ง เฟส ต่อเข้าด้วยกันแบบสตาร์หรือเดลต้าเพื่อให้ได้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์สามเฟส



รูปที่ 4 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์สามเฟส

#### 3.2 การสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งอาศัยหลักการการมอดูเลตสัญญาณพัลส์โดยใช้

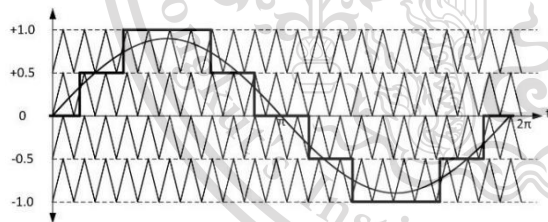
ใช้สัญญาณสามเหลี่ยมหลายระดับเปรียบเทียบกับ สัญญาณไซน์อ้างอิง จำนวนสัญญาณสามเหลี่ยมกับระดับแรงดันเอาต์พุต ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 4

$$m_c = m-1 \quad (4)$$

เมื่อ  $m_c$  คือ จำนวนสัญญาณสามเหลี่ยม  $m$  คือ จำนวนระดับเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

$V_{dc}$  คือ ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

โดยอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับจะต้องใช้สัญญาณสามเหลี่ยมในด้านบวก 2 สัญญาณและสัญญาณสามเหลี่ยมในด้านลบ 2 สัญญาณ และเลือกใช้ เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณสามเหลี่ยมแบบ IPD ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณสามเหลี่ยมแบบ In-Phase disposition

จากโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดเอชบริดจ์สามเฟสจะต้อง ใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังทั้งหมด 24 ตัว จึงต้องสร้างสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลตทั้งหมด 24 สัญญาณเพื่อควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างได้ 12 สัญญาณสำหรับสวิตช์กึ่งบน ผ่านวงจรดิจิทัลที่เป็นวงจรประวิงเวลา (dead time)

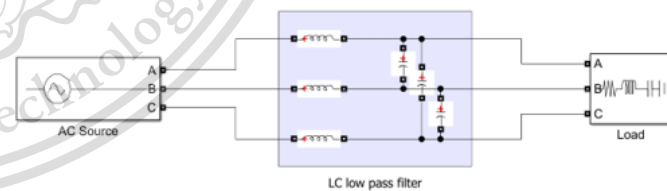
เพื่อหน่วงเวลาในการทำงานและกลับสัญญาณ เพื่อควบคุมการสวิตช์กึ่งล่าง

ตารางที่ 3.1 ลักษณะของสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลตที่ใช้ควบคุมการสวิตช์ กำลังในเฟส A

สวิตช์	สัญญาณพัลส์วิตมอดูเลต
$S_{1A}$	[Waveform for S1A]
$S_{2A}$	[Waveform for S2A]
$S_{3A}$	[Waveform for S3A]
$S_{4A}$	[Waveform for S4A]
$S_{5A}$	[Waveform for S5A]
$S_{6A}$	[Waveform for S6A]
$S_{7A}$	[Waveform for S7A]
$S_{8A}$	[Waveform for S8A]
สัญญาณแรงดันเอาต์พุตเฟส A	[Output voltage waveform for phase A]

#### 4. วงจรกรองฮาร์มอนิก

วงจรกรองฮาร์มอนิกมีโครงสร้างประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ โดยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมของแต่ละเฟสและตัวเก็บประจุต่อแบบเดลต้าของแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ที่ใช้ในการกรองฮาร์มอนิกอันดับ 3,5 และ 7

สำหรับการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกซึ่งเป็นวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน มีหลักการเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บ

ประจุตามสมการ 3.4 นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

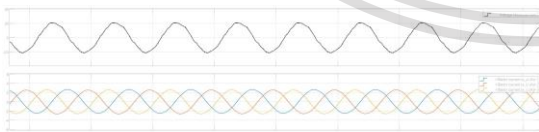
โดยที่  $f_c$  คือ ค่าความถี่ตัด  
 $L$  คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำ  
 $C$  คือ ค่าตัวเก็บประจุ

โดยการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิก มีข้อสังเกตในการกำหนดค่าของตัวแปรความถี่ที่จะนำมาเลือกค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ โดยอยู่ระหว่างไม่เกินความถี่สวิทซ์ซึ่งแต่ไม่ต่ำกว่าความถี่ตัด ( $f_c < f < f_{sw}$ )

ในวงจรไฟฟ้าของระบบมีค่าความถี่ตัด 5 kHz และมีความถี่สวิทซ์ 10 kHz ซึ่งสังเกตจากวงจร อินเวอร์เตอร์ จึงนำค่าไปคำนวณตามสมการ 3.4 ทำให้สามารถเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำเป็น 320 nH และค่าตัวเก็บประจุเป็น 5000  $\mu$ F

### 3.การจำลองและผลการทดลอง

ในการจำลองการสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink สร้างสัญญาณอินพุต และสัญญาณเอาต์พุตขึ้นมาดังใน รูปที่ 7 โดยใช้ค่าแรงดันไฟตรง 37 โวลต์ต่อหนึ่งเซลล์และที่ความถี่ 50 Hz จะมีค่าดัชนีมอดูเลตเท่ากับ 0.9



รูปที่ 7 รูปคลื่นแรงดันเฟสเอาต์พุต(บน) กระแส (ล่าง) (50Hz)

การทดสอบอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดเอชบริดจ์ ได้ทำการทดลอง ในย่านความถี่ 50Hz และมีวงจรกรองฮาร์มอนิกซึ่งเป็นวงจรพาสซีฟ

ฟิลเตอร์แบบกรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำเป็น 320 nH และค่าตัวเก็บประจุเป็น 5000  $\mu$ F

### 5.สรุป

การใช้อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดเอชบริดจ์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ประกอบกับวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์ข้างต้นรวมถึงใช้วงจรกรองฮาร์มอนิก และนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุง คุณภาพกระแสไฟฟ้ากริด โดยอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ในปริญญาโทฉบับนี้ ใช้หลักการต่ออนุกรม อินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ เพื่อเพิ่มจำนวนระดับ ส่งผลทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีขนาด เพิ่มขึ้น และมีลักษณะรูปสัญญาณเข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้น ในส่วนของวงจรกรองฮาร์มอนิกนั้นใช้การต่อแบบ LC โดยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุจะต่อกันแบบเดลต้าเพื่อลด voltage spike ที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้เองจึงสามารถลดขนาดพิกัดของ อุปกรณ์สวิทซ์ซึ่งลงมาได้ โดยการใช้วงจรเรียงกระแส 12 พัลส์เป็นแหล่งจ่ายแก่อินเวอร์เตอร์เอช บริดจ์แต่ละชุด มีส่วนช่วยให้คุณภาพกระแสไฟฟ้าที่จุดต่อรวม หรือที่อินพุตของระบบดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบปกติ หรือวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์

### เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ประวัติผู้เขียนบทความ



นายพิพัฒพล ศิริสิทธิ์  
วัฒนา  
สำเร็จการศึกษา  
มัธยมศึกษาตอนปลาย  
จาก โรงเรียน  
เบญจมราชรังสฤษฎิ์

ปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายมงคล  
กามบัว สำเร็จ  
การศึกษา  
มัธยมศึกษาตอน  
ปลายจาก  
โรงเรียนพิริยาลัย  
จังหวัดแพร่จอม  
เกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง



นายภควัตร ตรังรัตน์  
จิต  
สำเร็จการศึกษา  
มัธยมศึกษาตอนปลาย  
จากโรงเรียนอัครดิษฐ์  
ปริญญาตรี  
วิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง



นายภาสกร ต้นศิริ  
สำเร็จการศึกษา  
มัธยมศึกษาตอน  
ปลายจาก โรงเรียน  
สารสาสน์วิเทศร่ม  
เกล้า  
ปริญญาตรี

วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี พระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

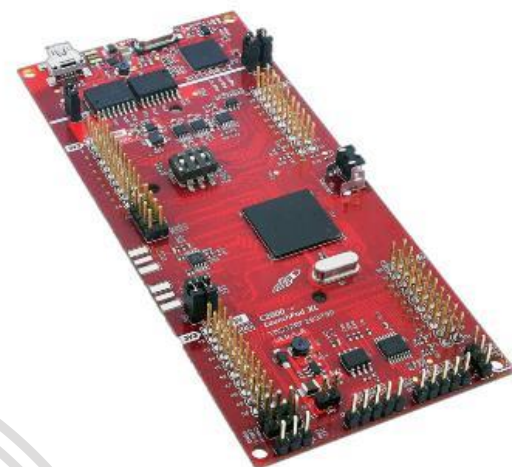
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## อุปกรณ์

## ภาพประกอบ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000™

**Trademarks**

C2000, LaunchPad, Delfino, Code Composer Studio are trademarks of Texas Instruments. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and/or other countries. All other trademarks are the property of their respective owners.

**1 Introduction**

Users can download an unrestricted copy of the latest version of Code Composer Studio™ IDE to write, download, and debug applications on the LAUNCHXL-F28379D board. The debugger is unobtrusive, allowing the user to run an application at full speed with hardware breakpoints and available single step execution while consuming no extra hardware resources.

As shown in [Figure 1](#), the LAUNCHXL-F28379D LaunchPad features include:

- USB debugging and programming interface via a high-speed galvanically isolated XDS100v2 debug probe featuring a USB/UART connection
- Superset TMS320F28379D device
- Two user LEDs
- Device reset pushbutton
- Easily accessible device pins for debugging purposes or as sockets for adding customized extension boards
- Dual 5 V quadrature encoder interfaces
- CAN Interface with integrated transceiver
- Boot selection switches
- Differential Amplifier to provide buffered signals to ADCD for 16-bit mode
- Optional SMA connection points P/N:SMA-J-P-H-ST-EM1
- Four Sigma Delta demodulator inputs brought to the BP headers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

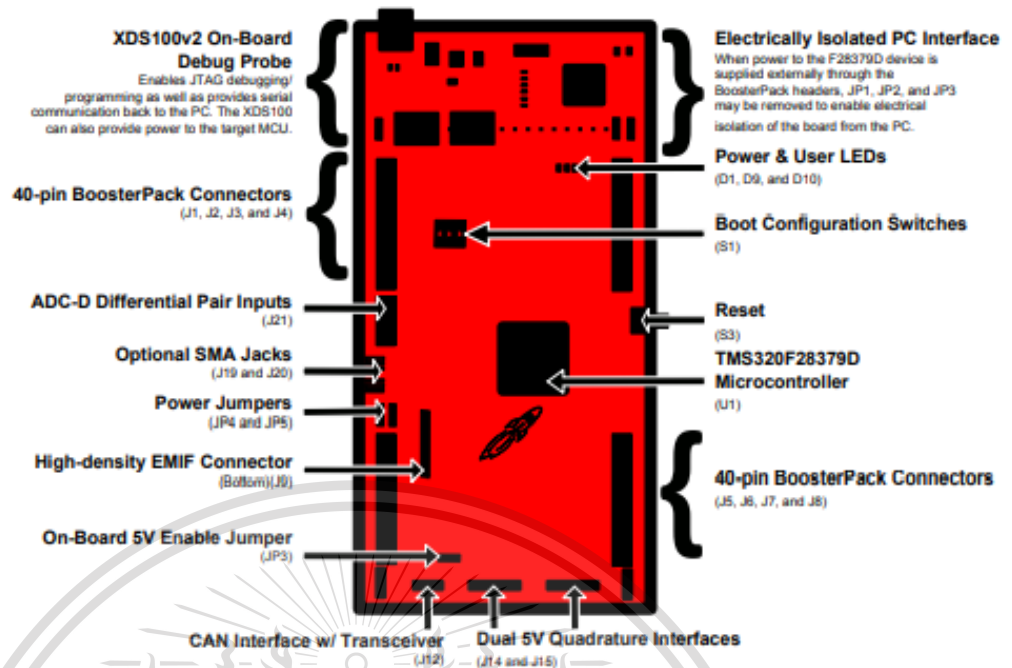


Figure 1. LAUNCHXL-F28379D Board Overview

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ประวัติผู้เขียน



นาย พิพัฒพล คิริสิทธิ์วัฒนา เกิดวันที่ 26 มกราคม 2542  
 ที่อยู่ 808/8 ถ.หลวงแพ่ง แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กทม. 10520  
 โทรศัพท์ 094-6766662  
 Email phipartpon.sss@gmail.com  
 2557-2560 โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์

2560-2563 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายภควัทร ตรังรัตนจิต เกิดวันที่ 28 ตุลาคม 2541  
 ที่อยู่ 594 ต.ศรีพนมมาศ อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์ 53130  
 โทรศัพท์ : 0987500317  
 Email : [60010753@kmitl.ac.th](mailto:60010753@kmitl.ac.th)  
 2557-2560 โรงเรียนอุตรดิตถ์

2560-2563 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายภาสกร ต้นศิริ เกิดวันที่ 25 พฤศจิกายน 2541  
 ที่อยู่ 309/58 ถ.รัตนไพศาล อ.บางพลี ต.บางพลีใหญ่ 10540  
 โทรศัพท์ : 0985831140  
 Email : [60010787@kmitl.ac.th](mailto:60010787@kmitl.ac.th)  
 2557-2560 โรงเรียนสารสาสน์วิเทศร่มเกล้า

2560-2563 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายมงคล กาบบัว เกิดวันที่ 7 พฤษภาคม 2541  
 ที่อยู่ 76/2 ม.6 ต.เวียงทอง อ.สูงเม่น จ.แพร่ 54000  
 โทรศัพท์ : 0855236178  
 Email : [mongkolkabbua@gmail.com](mailto:mongkolkabbua@gmail.com)

2557-2560 โรงเรียนพิริยาลัยจังหวัดแพร่ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2560-2563 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.