

วงจรแปลงผันกำลังสำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน
ของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง

POWER CONVERTER FOR PARTIAL DISCHARGE TESTING OF
POTENTIAL TRANSFORMERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-020-089

วงจรแปลงผันกำลังสำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน
ของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง

POWER CONVERTER FOR PARTIAL DISCHARGE TESTING OF
POTENTIAL TRANSFORMERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POWER CONVERTER FOR PARTIAL DISCHARGE TESTING OF
POTENTIAL TRANSFORMERS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN-M-020-089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรแปลงผันกำลังสำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง
นักศึกษา	นายภัทรินทร์ กิจเจริญ
รหัสประจำตัว	59601179
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.พีรชฎิ ยูทธโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้ในการแปลงความถี่ไฟฟ้าสำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงโดยมีพิกัดกำลัง 20 kVA 400 V และจะต้องสามารถสร้างแรงดันที่มีความถี่มากกว่าสองเท่าของความถี่กำลังเพื่อป้องกันการเกิดการอ้อมตัวของแกนเหล็กที่ระดับแรงดันทดสอบ การพัฒนาตัวแปลงความถี่นี้เพื่อใช้แทนชุดมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งถูกใช้ในปัจจุบันสำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน จึงมีความเหมาะสมที่จะทำการออกแบบประกอบสร้างตัวแปลงความถี่ขึ้น อย่างไรก็ตามการตัดต่อวงจรของสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์จะสร้างสัญญาณรบกวนระดับสูงในระบบการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ดังนั้นการออกแบบประกอบสร้างตัวแปลงความถี่นี้จะใช้หลักการของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมาประยุกต์ใช้ โดยมีการออกแบบสัญญาณควบคุมสำหรับสร้างรูปคลื่นแรงดันเพื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบหารูปคลื่นที่สามารถทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงได้ตามมาตรฐาน IEC 61869 และ IEC 60270 ทั้งหมด 5 รูปคลื่น ได้แก่ แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แรงดันชนิดหลายระดับแรงดันแบบกำหนดมุมตัดเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ 3 และกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ 5 แรงดันชนิดหลายระดับแรงดันแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่มีอัตราการผลิตด้านความถี่ 10 เท่า และ 20 เท่า พบว่าทุกรูปคลื่นแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด คือ มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไม่เกิน 5% และระดับสัญญาณรบกวนในการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนมีค่าน้อยกว่า 2.5 pC สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกแรงดันชนิดหลายระดับแรงดันแบบกำหนดมุมตัดเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เพื่อทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของการสวิตซ์ด้วยความถี่มูลฐาน ทำให้มีความสูญเสียจากการสวิตซ์ต่ำ และรูปคลื่นแรงดันนี้ยังมีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่ต่ำ มีค่าสัญญาณรบกวนในระบบการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเป็นไปตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	POWER CONVERTER FOR PARTIAL DISCHARGE TESTING OF POTENTIAL TRANSFORMERS
Student	Mr.Phattarin Kitcharoen
Student ID.	59601179
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Anantawat Kunakorn
Co-thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Peerawut Yutthagowith

ABSTRACT

This thesis presents design and construction of a power converter with rating of 20 kVA 400 V for partial discharge tests on potential transformers. The frequency of testing is set to be higher than two times of the power frequency due to avoiding saturation effect of the iron core at the testing voltages. The development of the frequency converters to replace a motor-generator set which is recently used in partial discharge detection measurement. However, power electronics switching always generate high-level noise signal affecting the unaccepted background noise in PD measurement. Therefore, the concept of the frequency converter in this thesis is based on multilevel inverters that provide a sinusoidal voltage output with low background noise in PD measurement (below 2.5 pC). Five switching method including square wave, 3rd harmonic elimination method, 5th harmonic elimination method, pulse width modulation ($m_f = 10$) and pulse width modulation ($m_f = 20$) are used in switching power electronic devices in the 5-level inverter. Experimental results show that all the output waveforms are according to IEC 61869 and IEC 60270 standard. The output waveform of the 5th harmonics elimination method is the most proper in the PD measuring system for testing potential transformers because of low switching losses, low total harmonics distortion, and lower background noise.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อนันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ดูแลและเอาใจใส่อย่างดีตลอดมา ตลอดจนการให้ข้อเสนอแนะ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ โขริเวชกุล และรองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคุณบุญยวีร์ ฉายศิริ และคุณทองเพียร พรหมบุตร ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ด้วยดีตลอด ตลอดจนช่วยทำการทดสอบ การตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้เบิกใช้เครื่องมือตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกๆ ท่านที่ให้คำแนะนำ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ภัทริน กิจเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดันสูง.....	6
2.1.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดัน.....	7
2.1.2 การทดสอบหม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดันตามมาตรฐาน.....	8
2.2 การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	9
2.2.1 การเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	10
2.2.2 ผลกระทบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	10
2.2.3 วงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270.....	10
2.2.4 สัญญาณรบกวนในระบบการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	13
2.2.5 การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดัน.....	14
2.3 วงจรเรียงกระแส.....	15
2.3.1 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น.....	15
2.3.2 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด.....	19
2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์.....	21
2.4.1 อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์.....	21
2.4.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	22
2.4.3 การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม.....	25
2.4.4 เทคนิคการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	26
2.5 วงจรกรองความถี่.....	27
บทที่ 3 การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้าง.....	29
3.1 เงื่อนไขการออกแบบ.....	29
3.2 ส่วนประกอบของตัวแปลงความถี่.....	30
3.3 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแส.....	31
3.4 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์.....	32
3.5 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรควบคุม.....	33
3.6 วงจรขับเคลื่อน.....	43
3.7 วงจรกรองความถี่.....	44
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล.....	47
4.1 บทนำ.....	47
4.2 การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซอาร์ชบางส่วนโดยใช้ตัวแปลงความถี่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน.....	47
4.3 การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซอาร์ชบางส่วนหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน.....	65
4.4 สรุปผลการทดสอบ.....	67
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลกาทดสอบ.....	70
5.2 พิกัดของตัวแปลงความถี่.....	71
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	71
เอกสารอ้างอิง.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก โปรแกรมการคำนวณสำหรับการกำจัดฮาร์โมนิกส์.....	75
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	79
ประวัติส่วนตัว.....	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าแรงดันที่ป้อนและระดับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ยอมรับได้ของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง.....	15
2.2 สถานการณ์ทำงานของสวิตช์และแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์.....	21
4.1 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควบคุมที่ 1.....	51
4.2 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควบคุมที่ 2.....	55
4.3 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควบคุมที่ 3.....	58
4.4 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควบคุมที่ 4.....	61
4.5 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควบคุมที่ 5.....	65
4.6 สรุปผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ตัวแปลง ความถี่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	67
4.7 สรุปผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ตัวแปลง ความถี่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	68
4.8 สรุปผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ตัวแปลง ความถี่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน..... 6
2.2	โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า..... 7
2.3	รูปแบบการเกิดดิซชาร์จบางส่วน..... 10
2.4	วงจรการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270..... 11
2.5	การแสดงผลการเกิดดิซชาร์จบางส่วน..... 12
2.6	ตัวอย่างรูปแบบการเกิดดิซชาร์จบางส่วน..... 12
2.7	ตัวอย่างสัญญาณรบกวนในระบบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วน..... 13
2.8	วงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงตามมาตรฐาน..... 14
2.9	วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น..... 16
2.10	รูปคลื่นแรงดันของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น..... 16
2.11	วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด..... 18
2.12	รูปคลื่นแรงดันของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด..... 18
2.13	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด..... 19
2.14	รูปคลื่นแรงดันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด..... 20
2.15	วงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์..... 21
2.16	รูปคลื่นแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์..... 22
2.17	วงจรวงจรคาสเคดเอชบริดจ์..... 23
2.18	รูปคลื่นแรงดันของวงจรวงจรคาสเคดเอชบริดจ์ 5 ระดับ..... 23
2.19	การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีคป์เบิลยูเอ็ม..... 25
2.20	เทคนิคการสวิตชิงแบบเฟสดีสทอร์ชันพีคป์เบิลยูเอ็ม..... 27
2.21	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน..... 27
2.22	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่ (อุดมคติ)..... 28
2.23	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่ (ปฏิบัติ)..... 28
3.1	แผนผังส่วนประกอบของคอนเวอร์เตอร์ปรับความถี่..... 30
3.2	แผนผังวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง..... 31
3.3	วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง..... 31
3.4	แผนผังวงจรอินเวอร์เตอร์..... 32
3.5	วงจรอินเวอร์เตอร์..... 32
3.6	ชุด STM32F429I DISCOVERY..... 33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 1.....	34
3.8 แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 1.....	34
3.9 ฮาร์โมนิกส์แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 1.....	34
3.10 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 2.....	36
3.11 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 2 (ส่วนขยาย).....	36
3.12 แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 2.....	37
3.13 ฮาร์โมนิกส์แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 2.....	37
3.14 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 3.....	38
3.15 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 3 (ส่วนขยาย).....	38
3.16 แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 3.....	39
3.17 ฮาร์โมนิกส์แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 3.....	39
3.18 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 4.....	40
3.19 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 4 (ส่วนขยาย).....	40
3.20 แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 4.....	41
3.21 ฮาร์โมนิกส์แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 4.....	41
3.22 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 5.....	42
3.23 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 5 (ส่วนขยาย).....	42
3.24 แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 5.....	42
3.25 ฮาร์โมนิกส์แรงดันขาออกของตัวแปลงความถี่จากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 5.....	43
3.26 แผนผังวงจรขั้วเกิด.....	43
3.27 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	44
3.28 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรอง.....	44
3.27 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต่อร่วมกับหม้อแปลงทดสอบและตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว.....	45
3.28 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	46
4.1 วงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270.....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 วงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในห้องปฏิบัติการ.....	47
4.3 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	48
4.4 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดัน ทดสอบ 10 kV.....	49
4.5 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณ แบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	49
4.6 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	49
4.7 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดัน ทดสอบ 20 kV.....	50
4.8 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณ แบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	50
4.9 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	50
4.10 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดัน ทดสอบ 40 kV.....	51
4.11 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณ แบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	51
4.12 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	52
4.13 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดัน ทดสอบ 10 kV.....	52
4.14 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณ แบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	52
4.15 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	53
4.16 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดัน ทดสอบ 20 kV.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	53
4.18 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	54
4.19 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	54
4.20 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	54
4.21 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	55
4.22 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	55
4.23 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	56
4.24 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	56
4.25 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	56
4.26 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	57
4.27 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	57
4.28 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	57
4.29 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	58
4.30 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	58
4.31 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	59
4.33 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	59
4.34 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	60
4.35 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	60
4.36 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	60
4.37 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	61
4.38 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	61
4.39 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	62
4.40 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	62
4.41 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV.....	62
4.42 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	63
4.43 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	63
4.44 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV.....	63
4.45 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของตัวแปลงความถี่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	64
4.46 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV.....	64
4.48 การติดตั้งวงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง.....	65
4.49 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงที่ระดับแรงดัน 40 kV.....	66
4.50 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงที่ระดับแรงดัน 26.4 kV.....	66



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงไม่สามารถทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดแรงดันทั่วไปได้โดยตรง เนื่องจากเครื่องมือวัดแรงดันทั่วไปนั้นจะมีข้อจำกัดในเรื่องของพิกัดแรงดันที่สามารถวัดได้ และเหตุผลในเรื่องของความปลอดภัย ซึ่งระบบไฟฟ้าแรงดันสูงมีข้อกำหนดเรื่องของระยะความปลอดภัยของผู้ใช้งาน สำหรับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงถูกนำมาติดตั้งเพื่อวัดแรงดันสูงเพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้งานที่ทำการซื้อไฟฟ้าในระบบแรงสูง โดยการวัดแรงดันนี้จะทำการต่อขั้วแรงดันสูงของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง และจะได้แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำลงให้อยู่ในระดับที่สามารถใช้งานร่วมกับเครื่องมือวัดแรงดันต่ำได้ ซึ่งอัตราส่วนของการลดทอนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานของการไฟฟ้ากำหนด ในปัจจุบันหลังการผลิตหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงนั้น มาตรฐานได้กำหนดให้มีการทดสอบเพื่อเป็นการยืนยันคุณภาพของหม้อแปลงก่อนนำไปติดตั้งใช้งาน โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 61869:2007 [1] ซึ่งกำหนดให้มีการทดสอบที่สำคัญหลายประการเพื่อทดสอบความคงทนของฉนวน เช่น การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เป็นต้น สำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงนั้นจะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดันประมาณสองเท่าของระดับแรงดันที่ใช้งานในระบบ ซึ่งที่ระดับแรงดันทดสอบนี้อาจก่อให้เกิดการอิมพัลส์ของแกนเหล็กที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของหม้อแปลง การอิมพัลส์ของแกนเหล็กมีสาเหตุมาจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลวนในแกนเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นแรงดันจนกระทั่งความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็กถึงค่าจำกัดที่แกนเหล็กสามารถรับได้ เป็นเหตุให้ไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันต่อไปได้ แต่จะทำให้กระแสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแทนและทำให้เกิดความผิพื่นของรูปคลื่นแรงดันตามมาอีกด้วย ดังนั้นมาตรฐานจึงได้มีการกำหนดให้ทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงด้วยแรงดันทดสอบที่มีค่าความถี่ของแรงดันมากกว่าสองเท่าของความถี่กำลัง เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงผลของการเกิดการอิมพัลส์ของแกนเหล็กได้ โดยทั่วไปแล้วผู้ผลิตหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงจะมีการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยการใช้ชุดมอเตอร์ที่ต่อพ่วงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างแรงดันที่มีความถี่ 200 Hz แต่ด้วยโครงสร้างของชุดมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้งานนี้จะไม่สามารถปรับความถี่ได้ อีกทั้งยังมีน้ำหนักมากและมีราคาสูง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของแนวคิดของการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลัง (Power converter) ที่ใช้สำหรับแปลงความถี่โดยการใช้หลักการของอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลัง ซึ่งจะสามารถทำการสร้างแรงดันสำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแทนชุดมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้โดยสามารถปรับความถี่ได้ รวมไปถึงมีน้ำหนักเบา และราคาที่ถูกกว่าชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความมุ่งหมายในการส่งเสริมงานวิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบ ตลอดจนการออกแบบ ประกอบสร้าง และพัฒนาวงจรแปลงผันกำลัง (Power converter) ที่ใช้ในการแปลงความถี่เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันในการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่มาตรฐานกำหนด มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายได้ง่าย มีต้นทุนการประกอบสร้างที่ต่ำ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงนั้น โดยทั่วไปทั้งในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และในภาคอุตสาหกรรมนั้น จะมีการใช้ชุดเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงดันที่มีความถี่ที่ 200 Hz เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันในการทดสอบ ซึ่งชุดเครื่องกำเนิดแรงดันนี้จะต้องมีการออกแบบพิเศษเพื่อสร้างแรงดันที่มีความถี่ 200 Hz โดยไม่สามารถปรับความถี่ได้ จึงทำให้มีราคาที่สูง อีกทั้งชุดเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้านี้ยังมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก เคลื่อนที่ไต่ยาก และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนอีกด้วย จึงมีการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้สำหรับแปลงความถี่โดยใช้หลักการอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน ซึ่งจะต้องสามารถป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงทดสอบแล้วสามารถสร้างแรงดันทดสอบได้ตามข้อกำหนดมาตรฐาน โดยมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายได้ง่าย มีต้นทุนการประกอบสร้างที่ต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวคิดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการออกแบบประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้สำหรับแปลงความถี่โดยอาศัยหลักการของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ซึ่งสามารถสร้างแรงดันที่มีความถี่เพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันที่มีความถี่เพี้ยนของฮาร์มอนิกส์ได้ดีกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับที่เป็นแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้ในการแปลงความถี่สำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันในการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันให้สามารถทำการทดสอบได้เป็นไปตามมาตรฐาน โดยสามารถปรับแรงดันได้ มีความกะทัดรัด น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายได้ง่าย มีต้นทุนการประกอบสร้างที่ต่ำ

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาหลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลัง
- 3) ศึกษาหลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- 4) จำลองแบบวงจรไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB
- 5) ออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลัง
- 6) พัฒนาสัญญาณควบคุมให้มีความเหมาะสมต่อการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงตามมาตรฐาน
- 7) ทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงตามมาตรฐาน
- 8) นำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับที่มาตรฐานกำหนด
- 9) สรุปผล ข้อเสนอแนะ
- 10) จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลัง

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงโดยมีวงจรแปลงผันกำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดันในการทดสอบ

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ.2551 มีการนำเสนอเรื่อง “Induced Voltage Test of Distribution Transformers Using Static Frequency Inverters” [2] ใน “2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition” เขียนโดย H. Mohseni, A. Shaygani Akmal, J. Jadidian, E. Hashemi, E. Agheb, A. Naieny, A.Ghorbandaeipour and K. Niayesh พบว่าการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายโดยการใช้วงจรแปลงผันกำลังที่ใช้สำหรับแปลงความถี่เป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ระดับแรงดันสูงจะต้องใช้ความถี่ที่มากกว่าสองเท่า ซึ่งการทดสอบแบบดั้งเดิมนั้นจะใช้ชุดมอเตอร์และเครื่องกำเนิดแรงดันซึ่งมีราคาสูง ต้องมีการบำรุงรักษา และถูกจำกัดระดับความถี่ที่ระดับเดียว ซึ่งผลการทดสอบนี้สามารถสร้างแรงดันทดสอบที่มีค่าความผิดพลาดเพียงฮาร์มอนิกส์ได้ต่ำกว่า 2%

ในปี พ.ศ.2554 มีการนำเสนอเรื่อง “Comparison of solid-state frequency converter and rotary frequency converter in 400 Hz power system” [3] ใน “2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)” เขียนโดย Lei Shi, Chaolong Shan, Xusheng Wu and Nan Zhao พบว่าการใช้วงจรแปลงผันกำลังที่ใช้สำหรับแปลงความถี่ชนิดอิเล็กทรอนิกส์กำลังดีกว่าการใช้ตัวแปลงความถี่ชนิดเครื่องจักรกลหมุนในเรื่องของประสิทธิภาพ ราคา และเสียงดังรบกวนจากการใช้งาน

ในปี พ.ศ.2558 มีการนำเสนอเรื่อง “PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter” [4] ใน “9th International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures and International Student Session” เขียนโดย B. Leelachariyakul, P. Yutthagowith, and S. Potivejkul พบว่าวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้สำหรับแปลงความถี่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันได้โดยต้องมีการใช้งานร่วมกับวงจรกรองความถี่ที่มีความเหมาะสม ผลการทดสอบยังพบว่ามีความถี่สัญญาณรบกวนในระบบสูงแต่อยู่ในระดับที่มาตรฐาน IEC 60270:2000 ยอมรับได้

ในปี พ.ศ.2558 มีการนำเสนอเรื่อง “Power Electronic Control Device for High Voltage Test Transformers” [5] เขียนโดย Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch and Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau พบว่าสามารถทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้โดยการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ควบคุมด้วยสัญญาณแบบพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งผลการทดสอบสามารถลดระดับสัญญาณรบกวน และค่าความผิดพลาดของรูปคลื่นแรงดันเป็นไปตามมาตรฐาน โดยแรงดันที่สร้างขึ้นมีความถี่ที่ 16.7 Hz 50 Hz และ 60 Hz

ในปี พ.ศ.2559 มีการนำเสนอเรื่อง “การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน”[6] ใน “The 39th Electrical Engineering Conference (EECON-39)” เขียนโดย ภัทริน กิจเจริญ อานันท์วัฒน์ คุณากร วรศิลป์ ลี้มเจริญ กิตติพิศ จริญญารัตน์ ปุณยวีร์ ฉายศิริ และ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท พบว่าการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสามารถทำได้โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่าย ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน แต่จำเป็นจะต้องมีการต่อวงจรรองความถี่เพื่อลดระดับสัญญาณรบกวนที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการตรวจจัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังที่ใช้ในการแปลงความถี่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน โดยมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน มาตรฐานการทดสอบ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังดังต่อไปนี้

2.1 หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง

โดยทั่วไปในการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงของระบบจำหน่ายไฟฟ้า หรือภายในสถานีไฟฟ้าต่างๆ จะไม่สามารถนำเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าไปวัดระดับแรงดันไฟฟ้าได้โดยตรง เนื่องจากเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้านั้นมีข้อจำกัดของระดับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ดังนั้นมีการใช้หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงสำหรับลดระดับแรงดันสูงให้มีแรงดันที่ต่ำลงและสามารถใช้งานร่วมกับเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ อีกทั้งเพื่อเป็นการป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูงที่จะเกิดขึ้นกับผู้ใช้งานเครื่องมือวัดแรงดัน โดยหลังจากที่ทำการวัดระดับแรงดันสูงด้วยการใช้หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงร่วมกับเครื่องมือวัดแรงดันต่ำแล้วจะทำให้สามารถทราบค่าระดับแรงดันสูงได้ด้วยการคำนวณจากอัตราส่วนการลดทอนของระดับแรงดัน สำหรับหลักการทำงานของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงนั้นมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทอื่นๆ [7]

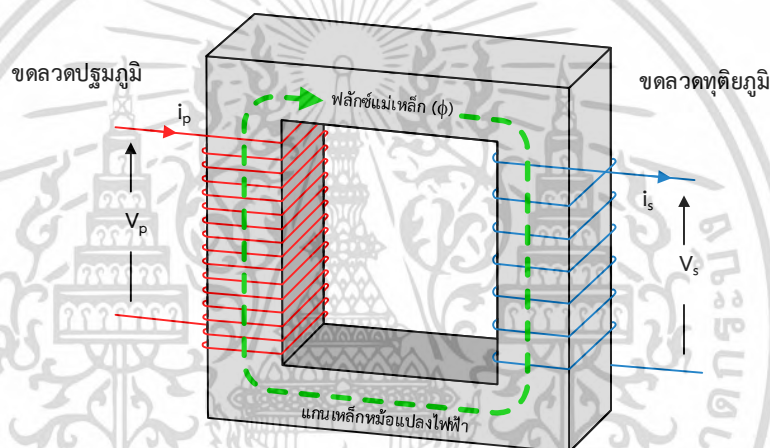


รูปที่ 2.1 หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันมีส่วนประกอบหลักได้แก่ ขดลวด แกนเหล็ก และฉนวน สำหรับขดลวดภายในหม้อแปลงมีจำนวน 2 ขด คือ ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยขดลวดทั้งสองขดที่ถูกพันอยู่รอบแกนเหล็กนี้จะส่วนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ กล่าวคือ เมื่อขดด้านปฐมภูมิได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กภายในแกนเหล็กโดยที่ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กนี้ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิ ความถี่ และจำนวนรอบของการพัน เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตามทางของแกนเหล็กผ่านขดลวดทุติยภูมิแล้วจึงเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันที่มีระดับแรงดันขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ ขนาดของฟลักซ์เกี่ยวคล้อง (Mutual flux) และความถี่ อัตราส่วนของแรงดันที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของการพันขดลวดในแต่ละขด[8]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.2 กำหนดให้ขดลวดปฐมภูมิซึ่งมีจำนวนรอบ N_1 ได้รับแรงดัน V_1 จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยที่ขดลวดด้านทุติยภูมิมีจำนวนรอบ N_2 ซึ่งเปิดวงจรอยู่ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดปฐมภูมิ คือกระแสกระตุ้น (Exciting current) ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) ขึ้นที่แกนเหล็กและทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิตามสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$e_1 = N_1(t) \frac{d\phi}{dt} = N_1 \phi_{\max} \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

$$e_2 = N_2(t) \frac{d\phi}{dt} = N_2 \phi_{\max} \cos(\omega t) \quad (2.2)$$

เมื่อ e_1 คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิ

e_2 คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อกำหนดให้ค่าของแรงดันเหนี่ยวนำอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square; rms) จะได้ว่า

$$E_1 = \frac{2}{\sqrt{2}} N_1 f \phi_{\max} = 4.44 N_1 f \phi_{\max} \quad (2.3)$$

$$E_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} N_2 f \phi_{\max} = 4.44 N_2 f \phi_{\max} \quad (2.4)$$

เมื่อ E_1 คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิ
 E_2 คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดทุติยภูมิ

จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันเหนี่ยวนำเป็นอัตราส่วนของแรงดัน (Voltage ratio; a) เป็นไปตามสมการที่ 2.5

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.5)$$

ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือฉนวนไฟฟ้าภายในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันส่วนมากจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นฉนวนแข็งและฉนวนเหลว โดยฉนวนแข็งภายในหม้อแปลงจะเป็นจำพวกกระดาษอัดแรงทำหน้าที่เป็นฉนวนภายในหม้อแปลงและรับแรงทางกลให้กับหม้อแปลง ในส่วนของฉนวนเหลวนั้นเป็นฉนวนที่มีหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าภายในหม้อแปลงและระบายความร้อน ฉนวนเหลว

จากข้อมูลข้างต้นหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่ถูกผลิตขึ้นจะต้องผ่านการทดสอบต่างๆ ตามเงื่อนไขของมาตรฐาน เพื่อยืนยันคุณภาพต่อการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความถูกต้องเหมาะสม

2.1.2 การทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันตามมาตรฐาน

ตามมาตรฐาน IEC 61869 [1] ที่กล่าวถึงเรื่องการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันได้กำหนดถึงหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่ผลิตใหม่และนำไปใช้งานในความถี่ 15 Hz ถึง 100 Hz โดยในการทดสอบตามมาตรฐานได้มีการแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- 1) การทดสอบประจำ (Routine test)
- 2) การทดสอบแบบเฉพาะ (Type test)
- 3) การทดสอบพิเศษ (Special test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปในการออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน หม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดันจะต้องผ่านการทดสอบประจำ ซึ่งมาตรฐานได้มีการกำหนดหัวข้อการทดสอบที่สำคัญอันได้แก่

- 1) การตรวจสอบขั้วของหม้อแปลงเครื่องม้อัด
- 2) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันของฉนวนที่ความถี่กำลังที่ขดลวดปฐมภูมิ
- 3) การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 4) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันของฉนวนที่ความถี่กำลังที่ขดลวดทุติยภูมิ
- 5) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันของฉนวนที่ความถี่กำลังระหว่างขดลวด
- 6) การทดสอบวัดค่าความคลาดเคลื่อน

สำหรับการทดสอบแบบเฉพาะ และการทดสอบแบบเฉพาะนั้นจะเป็นข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตและผู้ซื้อที่จะตกลงให้มีการทดสอบเพิ่มตามรูปแบบใด สำหรับการทดสอบแบบเฉพาะจะมีการทดสอบในหัวข้อที่สำคัญได้แก่

- 1) การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ
- 2) การทดสอบความคงทนต่อการลัดวงจร
- 3) การทดสอบอิมพัลส์ฟ้าผ่า
- 4) การทดสอบอิมพัลส์สวิตชิง
- 5) การทดสอบสภาวะเปียก
- 6) การทดสอบวัดค่าความคลาดเคลื่อน
- 7) การทดสอบการรบกวนของคลื่นวิทยุ

และสำหรับการทดสอบแบบพิเศษนั้นมาตรฐานได้มีการกำหนดให้มีการทดสอบในหัวข้อที่สำคัญได้แก่

- 1) การทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่ขดลวดปฐมภูมิ
- 2) การทดสอบวัดค่าความเก็บประจุและ $\tan\delta$
- 3) การทดสอบทางกล
- 4) การทดสอบการส่งผ่านแรงดันเกิน

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดัน จึงขอกล่าวรายละเอียดในเฉพาะส่วนของการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งเป็นการทดสอบแบบประจำที่หม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดันที่ผลิตขึ้นจะต้องทำการทดสอบ

2.2 การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

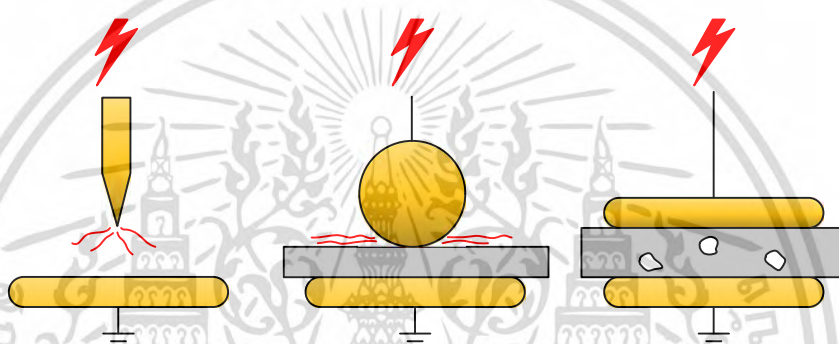
การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเป็นทดสอบความผิดปกติของฉนวนแบบไม่ทำลาย ซึ่งอาจจะเป็นการตรวจสอบสภาพความฉนวนก่อนการใช้งานให้ได้ตามมาตรฐาน หรืออาจเป็นการทดสอบเพื่อประเมินการเสียหายสภาพความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง[9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เป็นการเกิดการเบรกดาวนีย์โดยไม่สมบูรณ์ ไม่เกิดการเปลี่ยนสภาพของฉนวนไปเป็นตัวนำตลอดระยะทางระหว่างอิเล็กโทรดที่มีแรงดันตกคร่อม[10] แต่จะเป็นส่วนที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อฉนวน และเป็นตัวสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นการรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์[11] เพื่อเป็นการยืนยันความเป็ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยการเกิดดิสชาร์จบางส่วนสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ประเภทคือ

- 1) การเกิดดิสชาร์จแบบโคโรนา (Corona discharge)
- 2) การเกิดดิสชาร์จแบบตามผิว (Surface discharge)
- 3) การเกิดดิสชาร์จแบบภายใน (Internal discharge)



ก) การดิสชาร์จโคโรนา ข) การดิสชาร์จตามผิว ค) การดิสชาร์จภายในฉนวน

รูปที่ 2.3 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

2.2.2 ผลกระทบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะมีการถ่ายเทพลังงานให้กับฉนวนในรูปของการชน ซึ่งก่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณนั้นๆ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้ฉนวนเกิดความเสียหายในบริเวณนั้นและแผ่กว้างมากขึ้น ทำให้ฉนวนมีอายุการใช้งานสั้นลงและสุดท้ายอาจนำไปสู่การเบรกดาวนีย์ในที่สุด

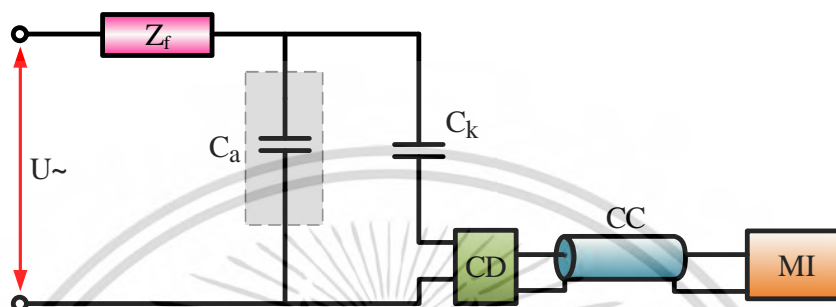
เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจำเป็นจะต้องมีการออกแบบฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีคุณภาพและมีความเหมาะสม สำหรับการออกแบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะต้องทำให้ฉนวนมีความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตมากกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอุปกรณ์ที่ระดับแรงดันใช้งาน

2.2.3 วงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270

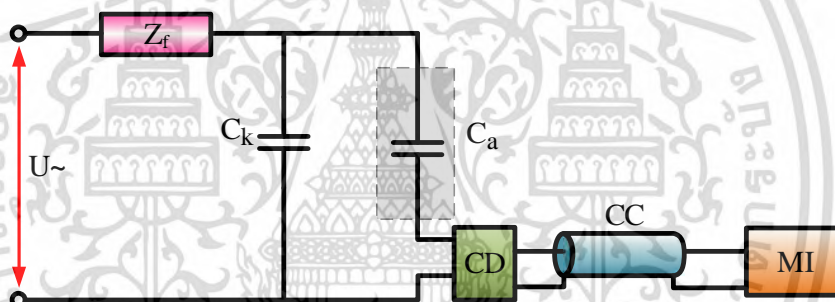
วงจรระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 [10] เป็นการวัดการดิสชาร์จบางส่วนทางไฟฟ้าซึ่งสามารถบอกความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ วงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 มีรูปแบบการต่อวงจรอยู่ 2 รูปแบบดัง

รูปที่ 2.4 สำหรับวงจรทดสอบที่มีการต่อแบบ ก) และ ข) มีความแตกต่างกันที่การต่ออุปกรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบเกี่ยว โดยในการต่อวงจรแบบ ก) เป็นรูปแบบที่มีการใช้งานกันในทางปฏิบัติ เนื่องจากมีความปลอดภัยเมื่อเกิดการเบรกดาวน์ของวัตถุทดสอบ ซึ่งการเบรกดาวน์จะไม่เกิดขึ้นที่ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) เพราะสามารถทราบแรงดันสูงสุดที่ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวสามารถทนได้ แต่การต่อวงจรแบบ ก) จะมีความไวในการวัดน้อยกว่าแบบ ข) เพราะมีการต่อแบบอนุกรมของอุปกรณ์คาบเกี่ยวกับวัตถุทดสอบ[h]



ก) CD ต่ออนุกรมกับ C_k



ข) CD ต่ออนุกรมกับ C_t

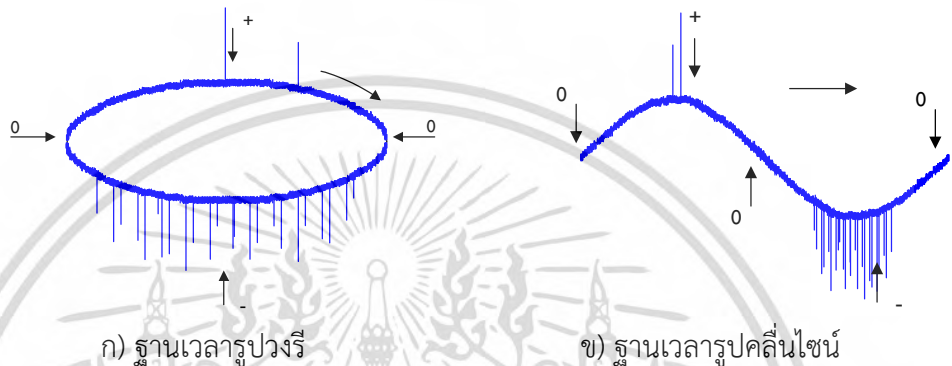
รูปที่ 2.4 วงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270

U	คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูง	C_t	คือ ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
F	คือ ตัวกรองความถี่	C_k	คือ ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยว
Z_{mi}	คือ อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ	CD	คือ อุปกรณ์คาบเกี่ยว
CC	คือ เคเบิลวัด		

วงจรสำหรับวัดดิสชาร์จบางส่วนประกอบด้วยตัวจ่ายแรงดันทดสอบ (U_0) คือหม้อแปลงทดสอบป้อนแรงดันให้กับวัตถุทดสอบ และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) ผ่านตัวกรองความถี่สูง (F) สำหรับตัวกรองความถี่สูงจะประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์มีค่าสูงที่ความถี่สูง ซึ่งจะทำหน้าที่กันไม่ให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากตัวจ่ายเข้าไปรบกวนวงจรทดสอบ แต่ยอมให้แรงดันทดสอบที่มีความถี่ต่ำผ่านได้ ขณะเดียวกันสัญญาณที่เกิดจากการดิสชาร์จบางส่วนจากการทดสอบจะไม่สามารถผ่านไปที่ตัวจ่ายแรงดันทดสอบได้เช่นกัน ในส่วนของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) จะทำหน้าที่ลัดวงจรสำหรับสัญญาณความถี่สูงที่เกิดขึ้นจากกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และบังคับให้กระแสพัลส์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

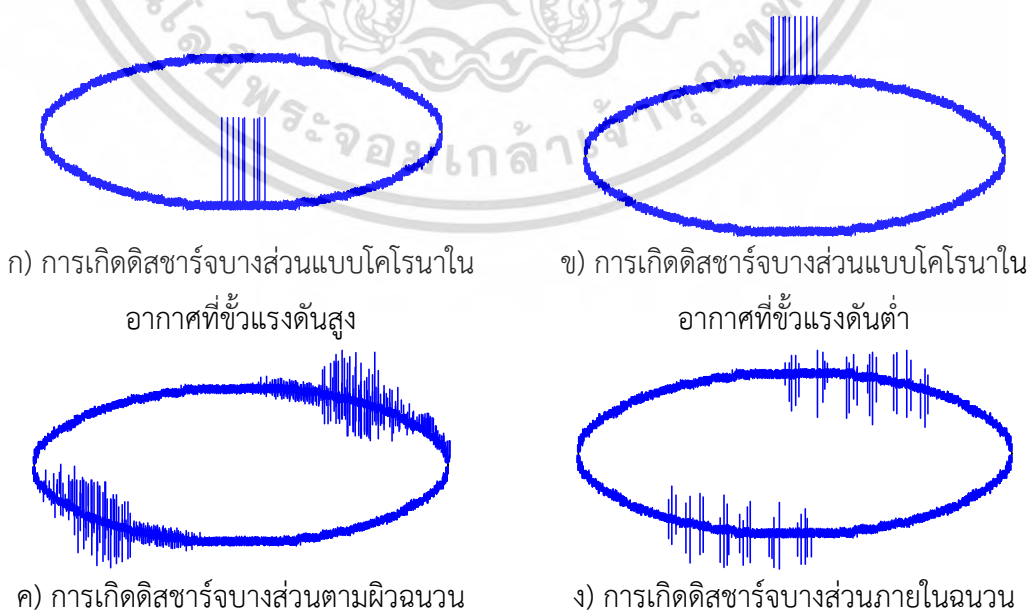
ไหลผ่านอุปกรณ์อุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device; CD) หรืออิมพีแดนซ์วัด (Measuring impedance) และผ่านสายสัญญาณไปยังอุปกรณ์แสดงผลการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Measuring instrument; MI) ซึ่งแสดงผลค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเป็นประจุ (pC หรือ nC) [11]

ประจุที่วัดได้นี้เป็นประจุปรากฏ (Apparent charge) ซึ่งเป็นอัตราส่วนกับประจุจริง (Real charge) ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยอุปกรณ์แสดงผลอาจแสดงผลเป็นค่าตัวเลข หรือรูปคลื่นกระแสพัลส์เทียบกับแรงดันที่ป้อนในลักษณะรูปคลื่นไซน์ (Sine waveform) หรือรูปวงรี (Ellipse form) ที่เป็นตัวแทนของมุมของรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน ตามรูปที่ 2.5 [9]



รูปที่ 2.5 การแสดงผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนของแต่ละรูปแบบนั้นจะให้ผลการทดสอบที่แสดงในรูปพัลส์ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะสามารถจำแนกประเภทของการเกิดดิสชาร์จที่เกิดขึ้นได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6 แต่ในทางปฏิบัติบางครั้งรูปแบบพัลส์ที่เกิดขึ้นอาจมาในรูปแบบที่ผสมกันเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหลายรูปแบบที่สามารถตรวจวัดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ความชำนาญและใช้วิธีทางสถิติในการจำแนก[11]

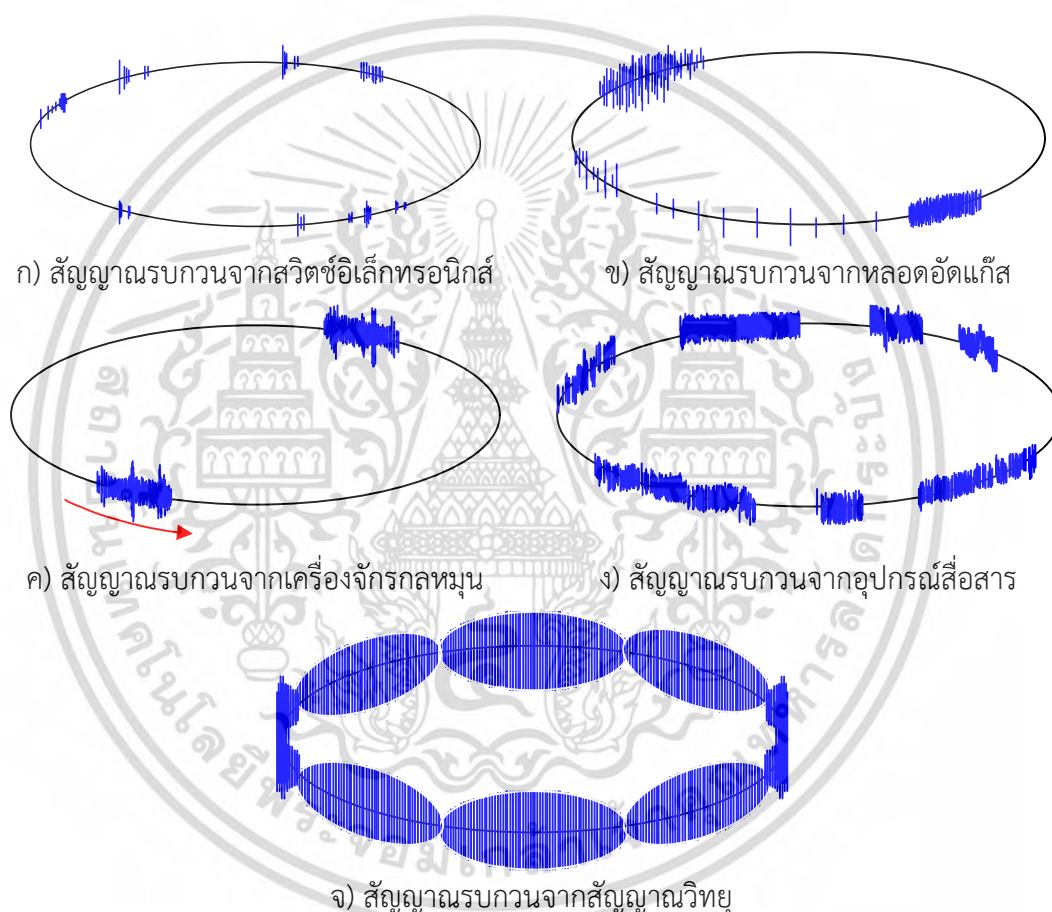


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 สัญญาณรบกวนในระบบการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วน อาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ในบางครั้งอาจมีค่าสูงเกินกว่าที่มาตรฐานยอมรับได้ ซึ่งจะต้องทำการหาสาเหตุและแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นเสียก่อน ดังนั้นผู้ทำการทดสอบจะต้องสามารถจำแนกพัลส์ที่เกิดขึ้นได้ว่าเป็นรูปแบบของการเกิดดิซาร์จบางส่วนหรือเป็นรูปแบบของสัญญาณรบกวน ในบางครั้งสัญญาณรบกวนอาจมีแหล่งกำเนิดมาจากแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งจะถูกส่งผ่านตัวนำและเข้าไปยังระบบตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วน[12] ตัวอย่างรูปแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนดังรูปที่ 2.7 [11]



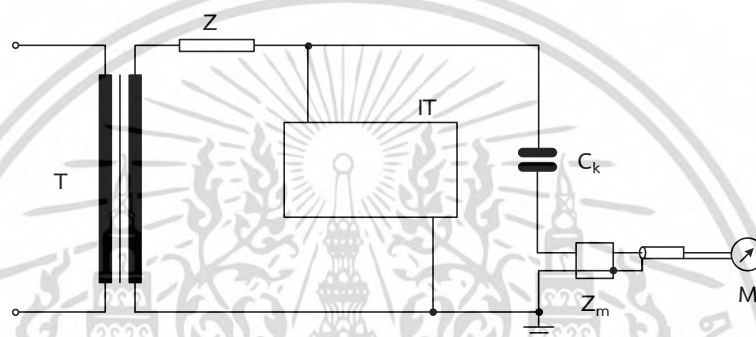
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนในระบบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามเพื่อให้การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ผลการทดสอบที่มีประสิทธิภาพ วัดได้อย่างถูกต้องและมีความละเอียดเพียงพอ มาตรฐาน[10] ได้กำหนดให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต้องไม่เกิน 50% ของค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ต้องการวัด และเพื่อให้การทดสอบเป็นที่ยอมรับจะต้องทำการบันทึกค่าของระดับสัญญาณรบกวนในการทดสอบนั้นๆ

2.2.5 การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันตามมาตรฐาน IEC 61869 [1] จะใช้วงจรการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60270 [10] ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงตามมาตรฐาน

สำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน จะต้องทำการป้อนแรงดันแรงดันทดสอบเข้าที่ขั้วด้านหนึ่งของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่อย่างน้อยสองเท่าของความถี่กำลัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแกนเหล็กที่เป็นส่วนประกอบภายในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันเกิดการอิ่มตัว ซึ่งค่าระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบและค่าระดับการเกิดดิสชาร์จที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานเป็นไปตามตารางที่ 2.1 สำหรับการทดสอบนี้จะต้องทำการป้อนแรงดันเพื่อจำลองการเกิดแรงดันเกินก่อน (Pre-stress voltage) ที่ระดับ 80% ของค่าแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของระบบที่หม้อแปลงใช้งาน (U_m) จากนั้นลดระดับแรงดันลงไปที่ระดับแรงดันทดสอบตามตารางที่ 2.1 และต้องทำการบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน 30 วินาที

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงดันที่ป้อนและระดับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ยอมรับได้ของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง

Type of earthing of the neutral system	Instrument Transformer type	PD test voltage (r.m.s) kV	Maximum permissible PD level (pC)	
			Type of insulation	
			Immersed in liquid or gas	solid
Earthed neutral system (earth fault factor $\leq 1,4$)	CT and earthed VT	U_m $1,2 U_m/\sqrt{3}$	10 5	50 20
	Unearthed VT	$1,2 U_m$	5	20
Isolated or non-effectively earthed neutral system (earth fault factor $>1,4$)	CT and earthed VT	$1,2 U_m$	10	50
		$1,2 U_m/\sqrt{3}$	5	20
	Unearthed VT	$1,2 U_m$	5	20

NOTE 1 If the neutral system is not defined, the values given for isolated or non-effectively earthed neutral systems are valid.

NOTE 2 The maximum permissible PD level is also valid for frequencies different from rated frequency.

NOTE 3 CT for current transformer and VT for voltage transformer.

ซึ่งการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันนั้นจำเป็นต้องทดสอบด้วยแรงดันที่มีความถี่มากกว่าความถี่กำลัง โดยทั่วไปการสร้างแรงดันที่มีความถี่มากกว่าความถี่กำลังจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันจากระบบเครื่องกำเนิดแรงดันที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ (Motor-generator) ซึ่งเครื่องกำเนิดแรงดันนี้จะต้องออกแบบเฉพาะ ทำให้มีราคาสูง และในปัจจุบันเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronic) มีการพัฒนาเป็นอย่างมากจึงเป็นแนวคิดของการออกแบบประกอบสร้างคอนเวอร์เตอร์ปรับความถี่ โดยมีส่วนประกอบหลักไปด้วยวงจรสองวงจรคือวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์

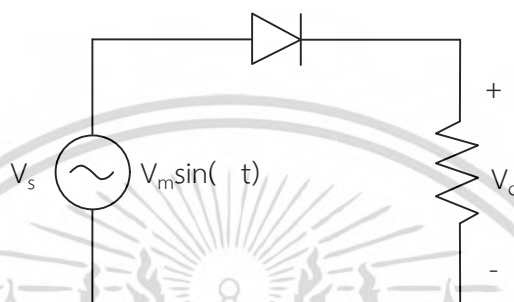
2.3 วงจรเรียงกระแส [13]

วงจรเรียงกระแสเป็นวงจรสำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรเรียงกระแสมีทั้งแบบที่เป็นครึ่งคลื่นและเต็มคลื่น รวมไปถึงมีทั้งที่เป็นเฟสเดียวและแบบสามเฟส อาศัยหลักการควบคุมโดยไดโอด ซึ่งการใช้งานของวงจรแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของโหลด

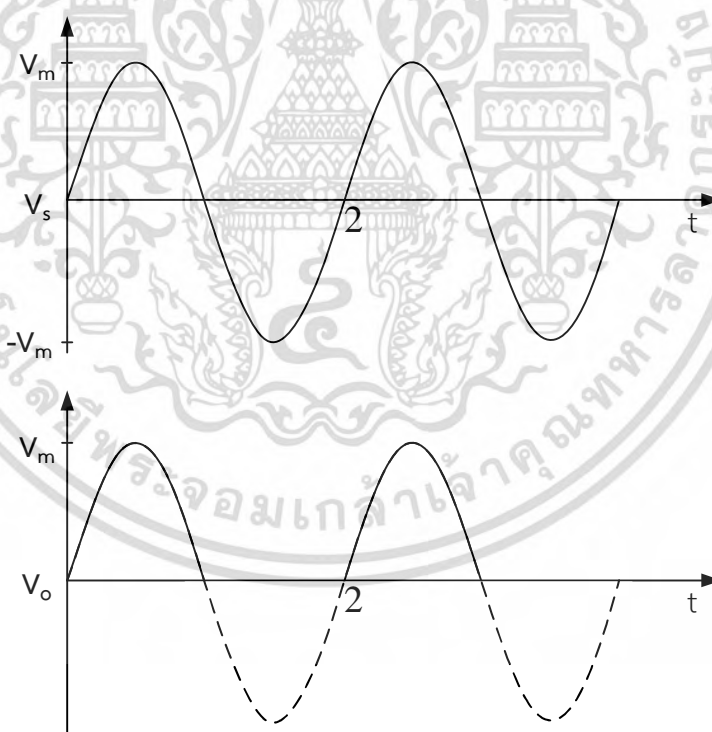
2.3.1 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น

วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่นจะมีการต่อวงจรผ่านไดโอดเพื่อทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ยอมให้กระแสไหลผ่านทางเดียว รูปแบบการทำงานของวงจรในกรณีที่มีความต้านทานเป็นโหลดจะมีลักษณะในครึ่งรูปคลื่นบวกของแรงดันกระแสสลับที่ถูกป้อนให้กับวงจร ไดโอดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำหน้าที่ไบอัสไปหน้าหรือยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้ได้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าเป็นแรงดันบวก ในขณะที่ครึ่งรูปคลื่นด้านลบของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับที่ถูกป้อนให้กับวงจร ไดโอดจะทำหน้าที่ไบอัสย้อนกลับหยุดนำกระแสทำให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่นจะมีข้อเสียในเรื่องของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยด้านเข้าจะไม่เป็นศูนย์และจะส่งผลกระทบต่อกรอิมตัวของแกนเหล็กภายในหม้อแปลง วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่นมีลักษณะดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น



รูปที่ 2.10 รูปคลื่นแรงดันของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกตามสมการที่ 2.6 และค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ 2.7

$$V_{o,avg} = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} [V_m \sin(\omega t)] d(\omega t) \quad (2.6)$$

$$V_{o,avg} = \frac{V_m}{2}$$

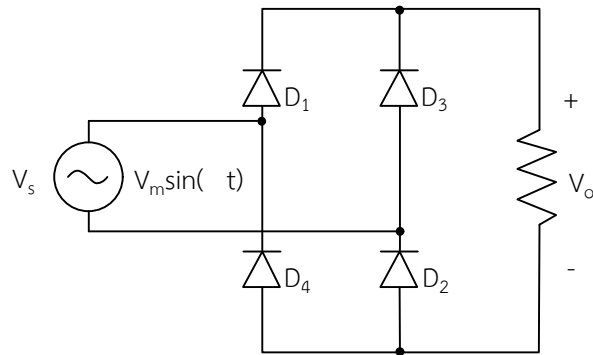
และ

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \int_0^{\pi} [V_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} \quad (2.7)$$

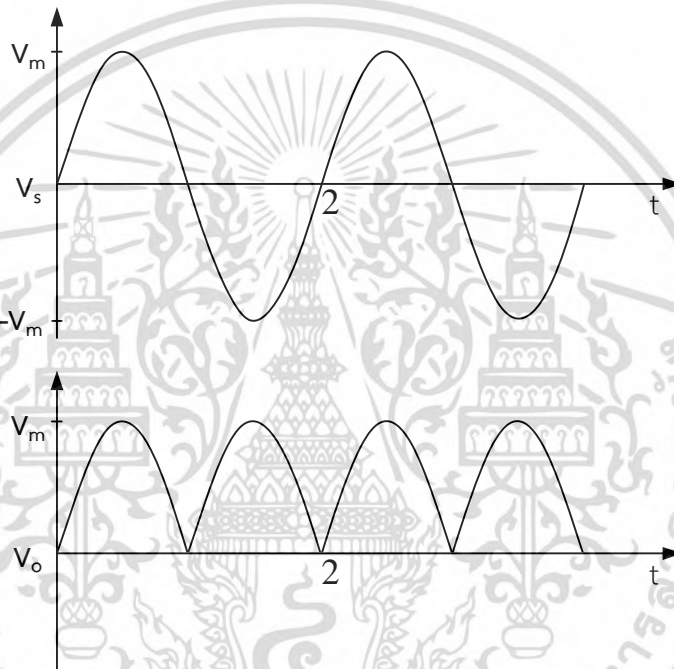
$$V_{o,rms} = \frac{V_m}{2}$$

2.3.2 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นมีอยู่หลายชนิด แต่จะขอกล่าวเฉพาะชนิดบริดจ์ไดโอดเท่านั้น ซึ่งการทำงานมีลักษณะคล้ายกับวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น แต่จะมีการทำงานของไดโอดในลักษณะที่เป็นคู่ กล่าวคือเมื่อรูปคลื่นบวกของแรงดันกระแสสลับที่ถูกป้อนให้กับวงจร ไดโอด D_1 และ D_2 จะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้ได้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าเป็นแรงดันบวก และในขณะที่ครึ่งรูปคลื่นด้านลบของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับที่ถูกป้อนให้กับวงจร ไดโอด D_3 และ D_4 จะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้ได้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าเป็นแรงดันบวกเช่นกัน สำหรับวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นจะมีข้อดีในเรื่องของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยด้านเข้าจะเป็นศูนย์ และค่าตัวประกอบระลอกคลื่น (ripple factor) ต่ำกว่าวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบครึ่งคลื่น วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดมีลักษณะดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด



รูปที่ 2.12 รูปคลื่นแรงดันของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

ได้สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกตามสมการที่ 2.8 และค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ 2.9

$$V_{o,avg} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} [V_m \sin(\omega t)] d(\omega t) \quad (2.8)$$

$$V_{o,avg} = \frac{2V_m}{\pi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

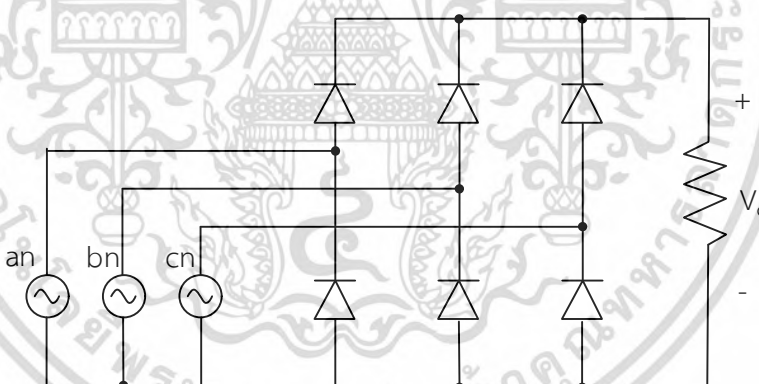
และ

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\omega} \int_0^{\omega} [V_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} \quad (2.9)$$

$$V_{o,rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

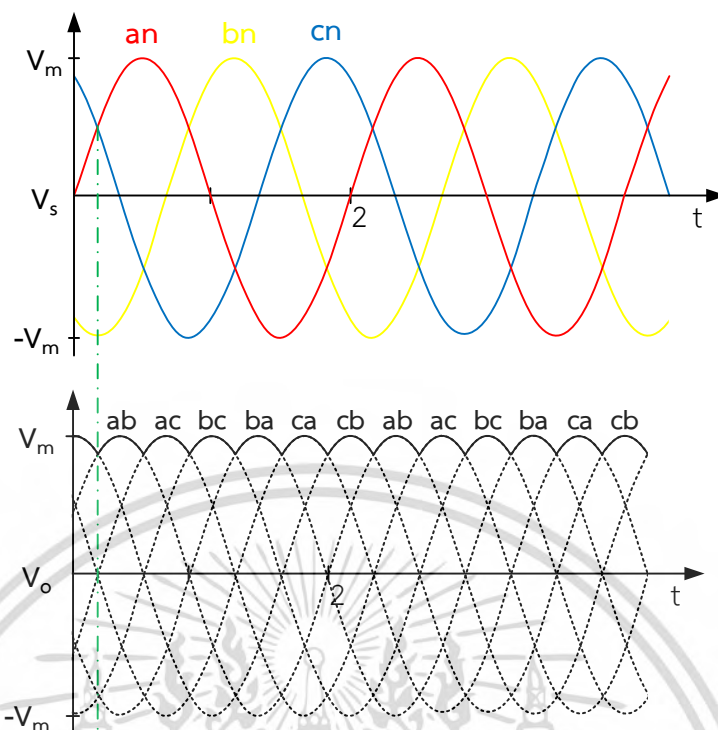
2.3.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอดจะมีการทำงานโดยอาศัยไดโอดจำนวน 6 ตัว และเมื่อสมมติให้แหล่งจ่ายเป็นแรงดันสมดุลสามเฟสจะมีไดโอดที่ทำงานพร้อมกับสองตัวโดยสลับกันไปตามแรงดันระหว่างเฟส (line-to-line) สูงสุดของแหล่งจ่ายซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมโหลด ซึ่งมีแรงดันระหว่างเฟสอยู่ทั้ง 6 รูปแบบในหนึ่งคาบเวลา และช่วงเวลาสูงสุดของแรงดันระหว่างเฟสมีระยะห่างกันอยู่ 60° (อาจเรียกว่า “วงจรเรียงกระแสแบบหกพัลส์”) วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอดมีลักษณะดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 รูปคลื่นแรงดันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด

ได้สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกตามสมการที่ 2.10 และค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ 2.11

$$V_{o,avg} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} [V_{m,L-L} \sin(\omega t)] d(\omega t) \quad (2.10)$$

$$V_{o,avg} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi}$$

และ

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} [V_{m,L-L} \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} \quad (2.11)$$

$$V_{o,rms} = 1.6554V_m$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรสำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยอาศัยการทำงานของอุปกรณ์สวิทซ์ซิ่งอิเล็กทรอนิกส์ โดยแรงดันที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์นี้มาผ่านวงจรกรองความถี่สูง จะทำให้ได้แรงดันที่เป็นรูปคลื่นไซน์

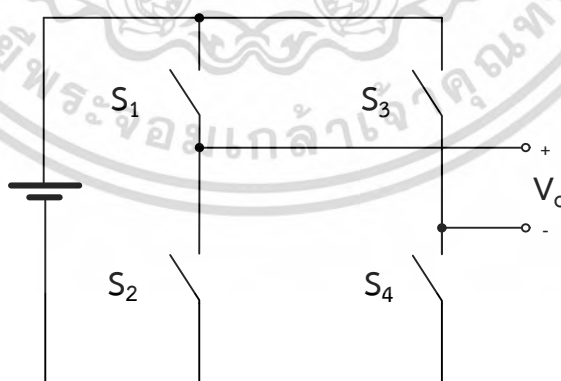
2.4.1 อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ [14]

วงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ ในรูปที่ 2.15 เป็นวงจรพื้นฐานสำหรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกสร้างจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยการควบคุมการปิดและเปิดสวิทซ์ซิ่งในลำดับที่เหมาะสม แรงดันไฟฟ้าที่ได้สามารถมีค่าเป็น $+V_{dc}$ $-V_{dc}$ หรือศูนย์ ขึ้นกับการสวิทซ์ซิ่งอย่างไร ซึ่งแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ที่การเปลี่ยนสถานะของสวิทซ์ซิ่งแสดงดังตารางที่ 2.2

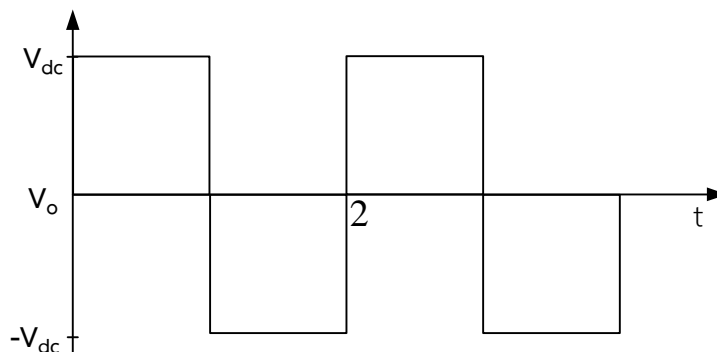
ตารางที่ 2.2 สถานะการทำงานของสวิทซ์ซิ่งและแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์

สวิทซ์ซิ่งปิดวงจร	แรงดันด้านออก V_o
S_1 และ S_4	$+V_{dc}$
S_2 และ S_3	$-V_{dc}$
S_1 และ S_3	0
S_2 และ S_4	0

รูปที่ 2.12 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์และรูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรซึ่งเป็นลักษณะของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.15 วงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์



รูปที่ 2.16 รูปคลื่นแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์

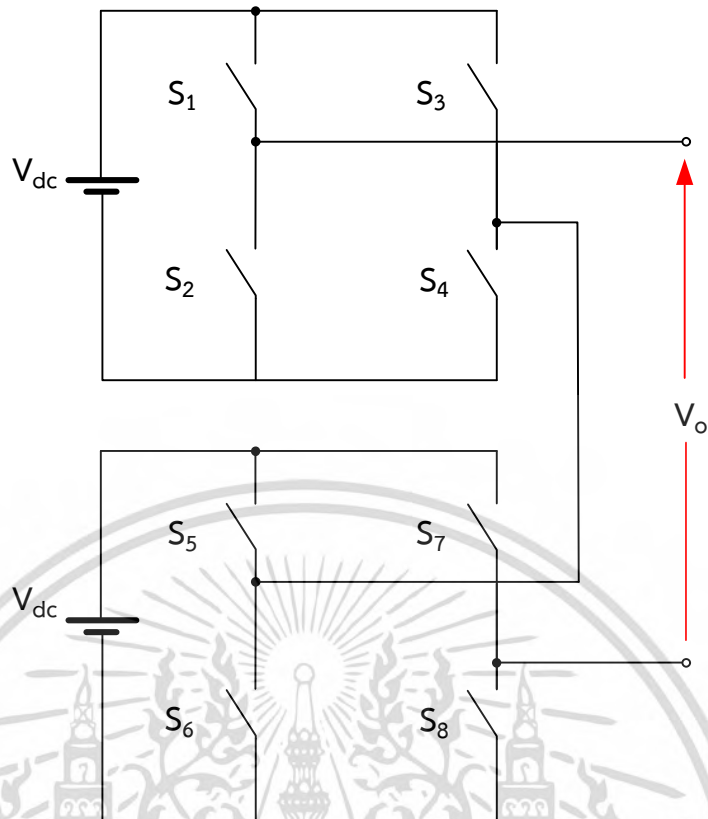
2.4.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับการสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีแนวคิดที่สำคัญคือการสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าความถี่มอดูเลชันที่ต่ำ สามารถลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดัน dV/dt อีกทั้งยังสามารถใช้ความถี่สวิตช์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐาน หรือสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มได้ ซึ่งการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ที่น้อย จะช่วยให้ลดผลการสูญเสียจากการสวิตช์ได้และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์อีกด้วย แต่คอนเวอร์เตอร์หลายระดับนี้ก็มีข้อเสียในเรื่องของการใช้อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งที่มากกว่าแบบอื่น ซึ่งอาจทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น[15] วงจรที่ใช้สำหรับการสร้างคอนเวอร์เตอร์หลายระดับได้แก่

- 1) วงจรคาสเคดเอชบริดจ์ (Cascaded H-bridge)
- 2) วงจรไดโอดแคลมป์ (Diode clamp)
- 3) ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor)

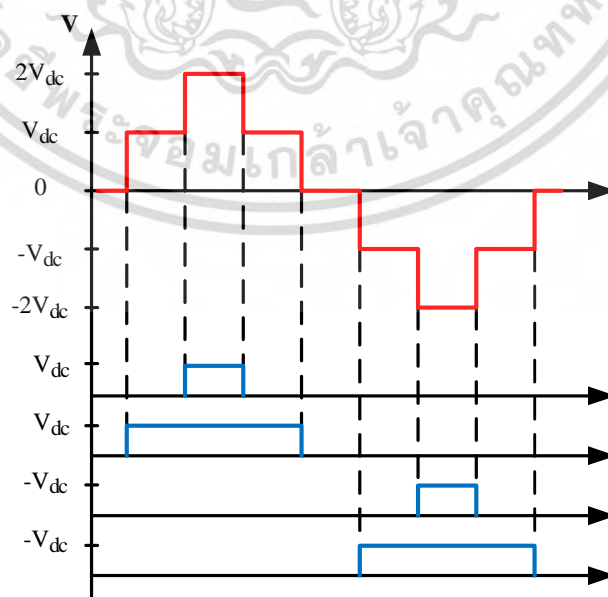
สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังโดยใช้หลักการของวงจรคาสเคดเอชบริดจ์ ดังนั้นจะลงรายละเอียดเฉพาะในส่วนของวงจรคาสเคดเอชบริดจ์เท่านั้น

วงจรคาสเคดเอชบริดจ์อาศัยหลักการของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ โดยการนำวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น จำนวนระดับของแรงดันด้านออกของวงจรมีค่าเป็น $2n+1$ เมื่อ n คือจำนวนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง[16] วงจรคาสเคดเอชบริดจ์มีลักษณะดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรวงจรคาสเคดเอชบริดจ์

จากวงจรตามรูปที่ 2.17 เป็นวงจรคาสเคดเอชบริดจ์ที่มีการต่ออนุกรมของวงจรฟลูบริดจ์สองชุด ซึ่งมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสองชุด ทำให้สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ 5 ระดับแรงดันได้แก่ $+2V_{dc}$ $+V_{dc}$ 0 $-V_{dc}$ $-2V_{dc}$ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 รูปคลื่นแรงดันของวงจรวงจรคาสเคดเอชบริดจ์ 5 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแรงดันด้านออกของวงจรคาสเคดเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่าย 2 แหล่งจ่าย ซึ่งมีสมการฟังก์ชันรูปคลื่นดังสมการที่ 2.12 โดยอาศัยหลักการของอนุกรมฟูเรียร์ ซึ่งฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะฮาร์มอนิกที่เป็นอันดับเลขคี่เท่านั้น[14] จะได้ว่า

$$V_o = \frac{4V_{dc}}{h_1} \sum_{h=1}^{\infty} [\cos(h_1) + \cos(h_2)] \quad (2.12)$$

เมื่อ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรวมของแต่ละแหล่งจ่าย
 i คือ มุมที่สวิตชิง
 h คือ ลำดับฮาร์มอนิก

ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index; M) เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดขององค์ประกอบความถี่มูลฐานแรงดันด้านออกกับขนาดขององค์ประกอบความถี่มูลฐานของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 แหล่งจ่ายมีค่าเป็น h_1)

$$h_1 = \frac{4V_{dc}}{h_1} [\cos(h_1) + \cos(h_2)] \quad (2.13)$$

$$M = \frac{h_1}{2(4V_{dc} / \dots)} \quad (2.14)$$

$$M = \frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \quad (2.15)$$

และหากต้องการกำจัดฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันด้านออก สามารถทำได้โดยการเลือกมุมจุดขนวน θ_1 และ θ_2 ที่เหมาะสมด้วยการคำนวณตามสมการที่ 2.16 และ 2.17 ซึ่งจะต้องใช้วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการแก้สมการ เช่น วิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\cos \theta_1 + \cos \theta_2 = 2M \quad (2.16)$$

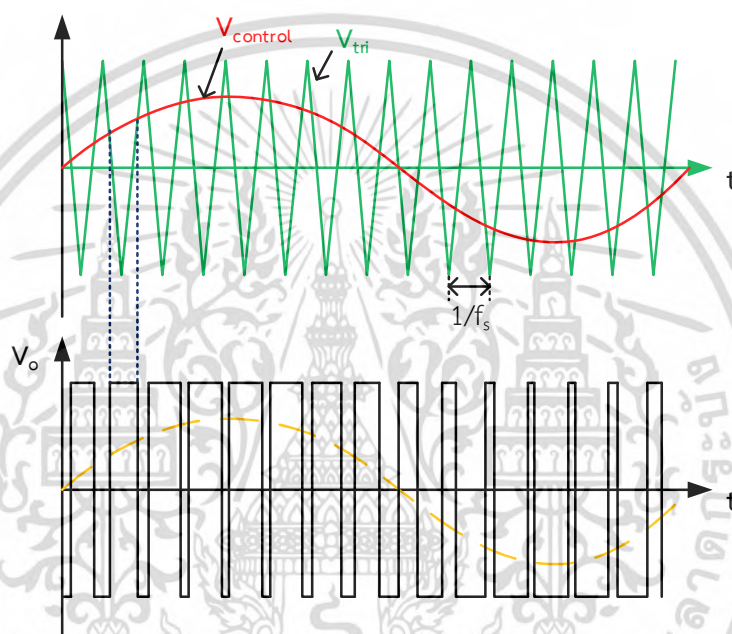
และ

$$\cos(h_1) + \cos(h_2) = 0 \quad (2.17)$$

2.4.3 การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse-Width-Modulated) เป็นเทคนิคการควบคุมการสวิตซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อลดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน ซึ่งการควบคุมการสวิตซ์ด้วยวิธีนี้จะช่วยให้สามารถกรองฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ได้ง่ายขึ้น แต่จะมีการสูญเสียจากการสวิตซ์[14] และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูง (dV/dt)

การสร้างแรงดันด้วยเทคนิคนี้สามารถควบคุมขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยการปรับค่าสัญญาณควบคุมรูปไซน์ ซึ่งหลักการนี้จะต้องนำสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมมาทำการมอดูเลตกันดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

การควบคุมที่สำคัญคือการปรับค่าอัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด และอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมค่าค่าระดับสัญญาณควบคุมรูปไซน์และความถี่ของการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีสมการดังนี้[13]

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2.18)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

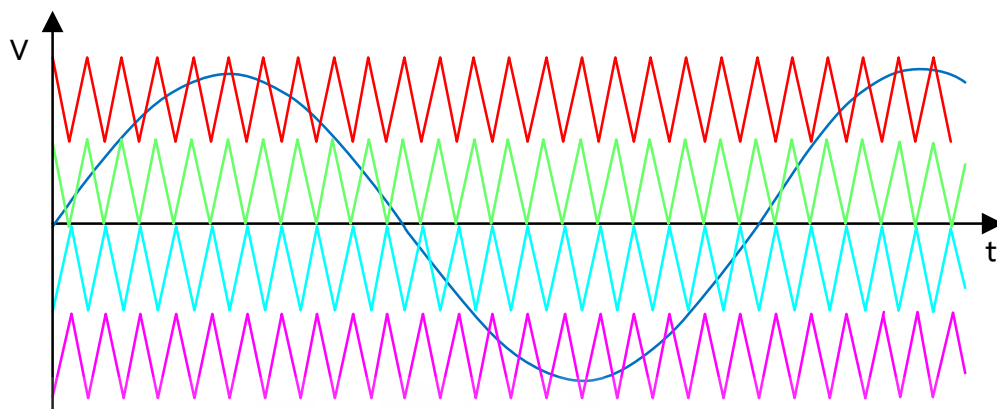
เมื่อ	m_a	คือ	อัตราการผลิตด้านแอมพลิจูด
	m_f	คือ	อัตราการผลิตด้านความถี่
	\hat{V}_{control}	คือ	ค่ายอดสัญญาณควบคุมรูปไซน์
	\hat{V}_{tri}	คือ	ค่ายอดสัญญาณสามเหลี่ยม
	f_s	คือ	ความถี่ของการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์
	f_1	คือ	ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์

อัตราการผลิตด้านแอมพลิจูดนั้นสามารถเป็นการปรับค่าแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ได้ซึ่งการปรับ m_a ให้มีค่ามากกว่า 1 จะสามารถทำให้แรงดันที่ความถี่มูลฐานด้านออกจากอินเวอร์เตอร์นั้นมีค่าแรงดันที่มากกว่าแหล่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าหากปรับ m_a มีค่าสูงสุดที่ทำได้ก็จะสามารถทำให้ได้แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แต่จะมีข้อเสียคือเมื่อ m_a มีค่ามากกว่า 1 และจะทำให้ฮาร์มอนิกส์อันดับต้นๆ เกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันและการออกแบบวงจรกรองจะทำได้ยาก ส่วนความถี่ของการสวิตซ์นั้นจะเป็นความถี่เดียวกับความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม[13] ซึ่งการที่สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมมีความถี่สูงจะทำให้เกิดการสวิตซ์ที่สูง และจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียจากการสวิตซ์และอินเวอร์เตอร์จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง

2.4.4 เทคนิคการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็มกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ [17]

การสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็มกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับเป็นการสวิตซ์ด้วยความถี่สวิตซ์ที่สูงโดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมรูปไซน์และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมคล้ายกับการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็มของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ซึ่งเทคนิคการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็มกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีหลายวิธี สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบเฉพาะวิธีเฟสดีสตอร์ชันพีดับเบิลยูเอ็ม (Phase Distortion PWM: PDPWM) ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ และมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ที่ต่ำ

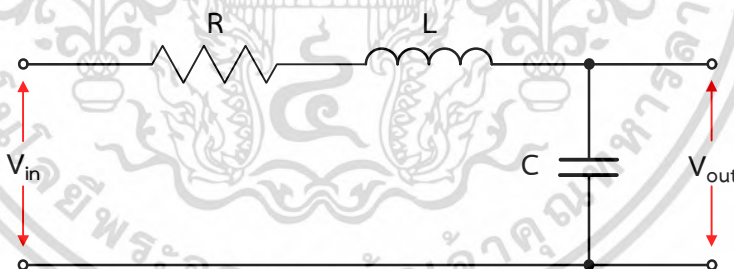
ในการควบคุมการสวิตซ์แบบเฟสดีสตอร์ชันพีดับเบิลยูเอ็ม คือการใช้สัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ ขนาด และเฟสเดียวกันทำการมอดูเลตกับสัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต่างระดับแรงดันกัน โดยเทคนิคแบบ PDPWM การควบคุมการสวิตซ์แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 เทคนิคการสวิตซ์แบบเฟสดีสตอร์ชันที่ดับเบิลยูเอ็ม

2.5 วงจรกรองความถี่

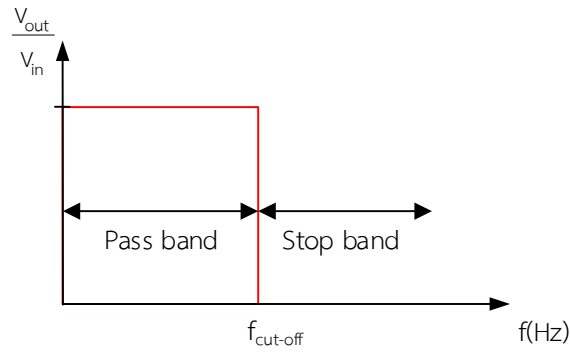
วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่สามารถช่วยลดปัญหาของการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และยังสามารถช่วยกรองฮาร์มอนิกส์ที่อยู่ในระบบไฟฟ้าได้โดยการกรองความถี่ [18] สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการใช้งานแรงดันไฟฟ้าสำหรับการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่มีความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช่วงจรกรองแรงดันความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ชนิด L-C ซึ่งเป็นวงจรที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่สูงออกไป โดยจะเหลือแต่แรงดันที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่คัตออฟของวงจรกรอง



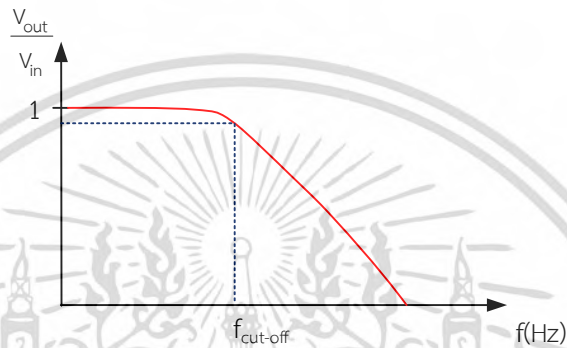
รูปที่ 2.21 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ช่วงของความถี่ใช้งานของวงจรกรองนั้นจะนิยมแสดงอยู่ในรูปของผลตอบสนองต่อความถี่ โดยจะมีช่วงของย่านที่ยอมให้ความถี่ผ่าน (Pass band) กับย่านที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่าน (Stop band) โดยในทางทฤษฎีแรงดันที่มีความถี่อยู่ในช่วงของย่านที่ยอมให้ความถี่ผ่านจะได้แรงดันเมื่อผ่านวงจรกรองแล้วมีขนาดที่เท่าเดิม ส่วนแรงดันที่มีความถี่ไม่อยู่ในช่วงของย่านที่ยอมให้ความถี่ผ่านแรงดันที่ผ่านวงจรกรองจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติแรงดันที่มีความถี่อยู่ในช่วงของย่านที่ยอมให้ความถี่ผ่านจะได้แรงดันเมื่อผ่านวงจรกรองแล้วมีขนาดที่มากขึ้น เท่าเดิม หรืออาจน้อยกว่าเล็กน้อย ส่วนแรงดันที่ไม่มีค่าอยู่ในช่วงของย่านที่ยอมให้ความถี่ผ่านแรงดันที่ผ่านวงจรกรองจะถูกลดทอนลง และที่ความถี่สูงขึ้นไปก็จะถูกลดทอนมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.22 และ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่ (อุดมคติ)



รูปที่ 2.23 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่ (ปฏิบัติ)

การหาความถี่คัตออฟของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด L-C สามารถหาได้จากสมการที่

2.20

$$f_{\text{cut-off}} = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \quad (2.20)$$

โดยวงจรกรองนี้มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{LCS^2 + RCS + 1} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้าง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลัง (Power converter) ที่ใช้ในการแปลงความถี่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันในการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน วงจรแปลงผันกำลังที่ประกอบสร้างประกอบไปด้วย ชุดวงจรเรียงกระแส ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ ชุดวงจรควบคุม และส่วนของวงจรรองความถี่ ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกนำมาประกอบกันเพื่อเป็นวงจรแปลงผันกำลังเพื่อใช้สำหรับป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงเพื่อการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง

3.1 เงื่อนไขการออกแบบ

การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้ในการแปลงความถี่นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันในการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลง โดยวงจรแปลงผันกำลังที่ออกแบบจะต้องสามารถทำการทดสอบได้ตามมาตรฐานการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (IEC 60270) และมาตรฐานการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (IEC 61869) ดังนั้นการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังมีเงื่อนไขดังนี้

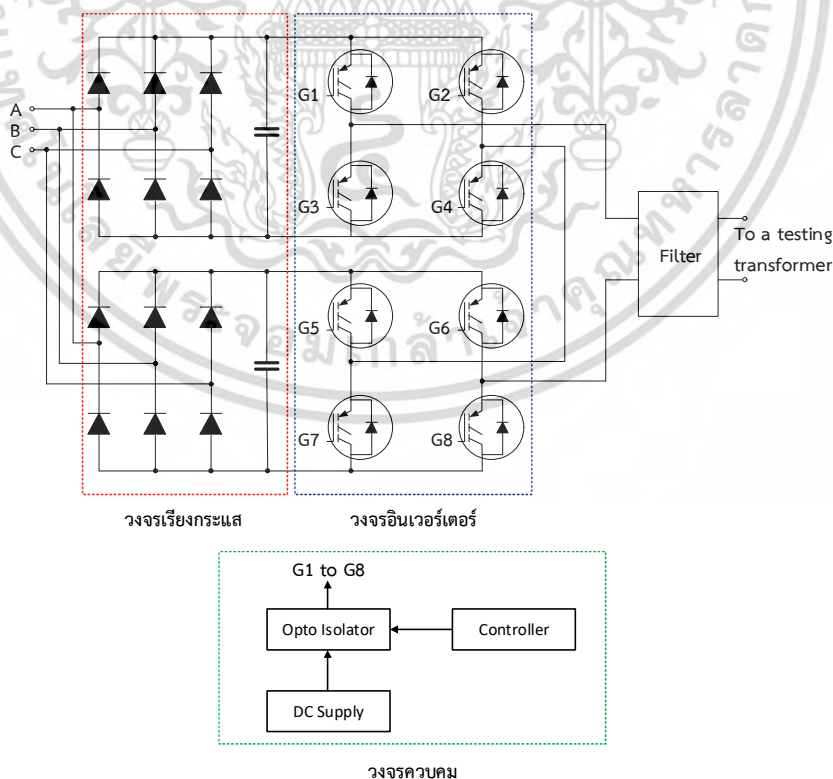
- 1) วงจรแปลงผันกำลังที่ประกอบสร้างขึ้นจะต้องสามารถป้อนแรงดันให้กับวงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนผ่านหม้อแปลงทดสอบเพื่อเพิ่มระดับแรงดันให้ได้ระดับแรงดันทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนด
- 2) วงจรแปลงผันกำลังที่ประกอบสร้างขึ้นจะต้องสามารถป้อนแรงดันที่มีความถี่ได้ไม่น้อยกว่า 150 Hz เพื่อป้องกันการอิ่มตัวของแกนเหล็กเมื่อทำการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดที่ระดับแรงดันทดสอบ
- 3) แรงดันทดสอบที่ใช้ในการทดสอบจะต้องมีลักษณะรูปคลื่นที่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไม่เกิน 5% ตามที่มาตรฐานกำหนด
- 4) ระดับสัญญาณรบกวนในระบบของการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะต้องมีค่าไม่เกิน 2.5 pC ซึ่งเป็นค่าตามที่มาตรฐานกำหนด (ระดับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดตามที่มาตรฐานยอมรับได้มีค่าไม่เกิน 5 pC)

3.2 ส่วนประกอบของวงจรแปลงผันกำลัง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้สำหรับแปลงความถี่โดยมีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 4 ส่วน ได้แก่

- 1) ชุดวงจรเรียงกระแส
- 2) ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์
- 3) ชุดวงจรควบคุม
- 4) ชุดวงจรกรองความถี่

ชุดวงจรแปลงผันกำลังนี้จะได้รับแรงดันต้นไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสซึ่งมีระดับแรงดันที่ 380 V ที่ความถี่ 50 Hz โดยมีการต่อผ่านหม้อแปลงปรับแรงดันเพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับชุดวงจรแปลงผันกำลัง จากนั้นจะผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่เพื่อลดระดับบรลอคคลื่นแรงดัน ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีอุปกรณ์การสวิตชิ่งเป็นไอจีบีทีที่สามารถส่งจ่ายกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ ที่ถูกควบคุมการสวิตชิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยวงจรควบคุม และจากนั้นแรงดันที่เป็นแรงดันกระแสสลับนั้นจะถูกกรองผ่านวงจรกรองเพื่อทำการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากวงจรแปลงความถี่ให้มีแรงดันที่มีความใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ก่อนที่จะต่อวงจรแปลงผันกำลังนี้เข้ากับหม้อแปลงทดสอบและระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเพื่อทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่อไป

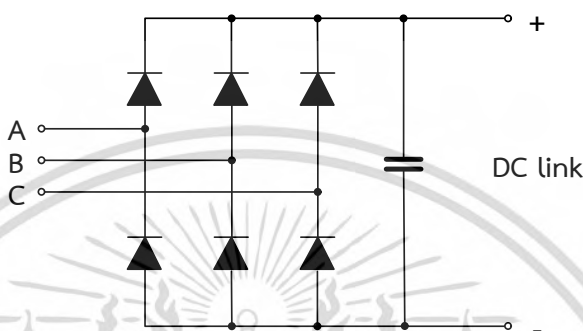


รูปที่ 3.1 แผนผังส่วนประกอบของวงจรแปลงผันกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสนี้จะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีระดับแรงดันที่ด้านแรงดันออกของหม้อแปลงปรับแรงดัน 3 เฟสตั้งแต่ 0-380 V_{AC} ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันตั้งแต่ 0-311 V_{DC} โดยวงจรเรียงกระแสที่ใช้นั้นจะเป็นวงจรเรียงกระแส 3 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอดซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด สำหรับชุดวงจรเรียงกระแส นั้นจะใช้เป็น SanRex DF75BA80



รูปที่ 3.2 แผนผังวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง

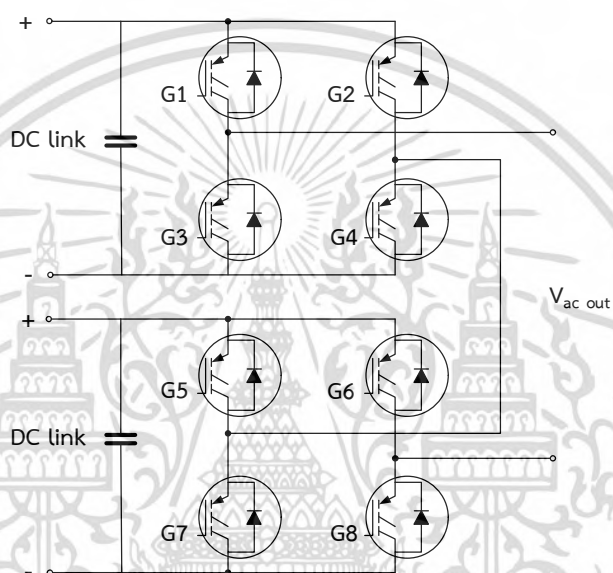


รูปที่ 3.3 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง

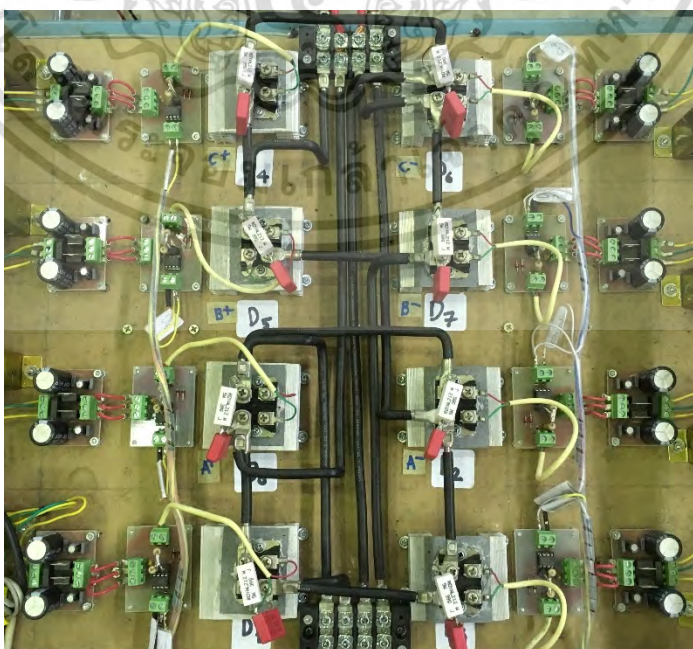
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์นี้จะนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสมาทำการแปลงแรงดันให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสามารถปรับความถี่ได้จากวงจรควบคุม สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้จะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด (Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter) ซึ่งมีทั้งหมด 5 ระดับแรงดัน คือ $+2V_{DC}$ $+V_{DC}$ 0 $-V_{DC}$ และ $-2V_{DC}$ ซึ่งจะทำให้ได้รูปคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงไซน์มากขึ้น สำหรับการประกอบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์นี้จะใช้ไอจีบีที IXYS IXXN110N65B4H1



รูปที่ 3.4 แผนผังวงจรอินเวอร์เตอร์

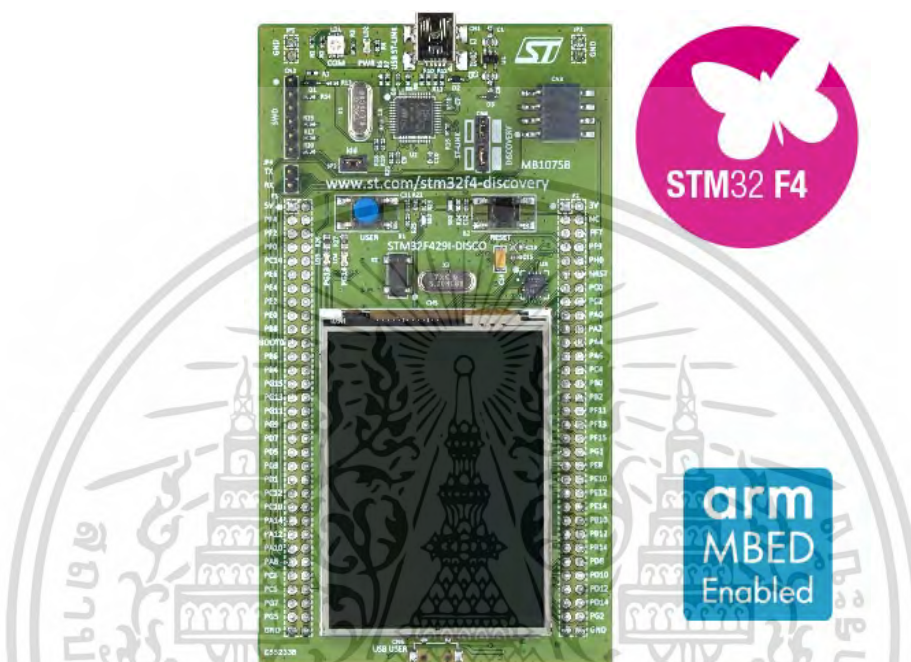


รูปที่ 3.5 วงจรอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรควบคุม

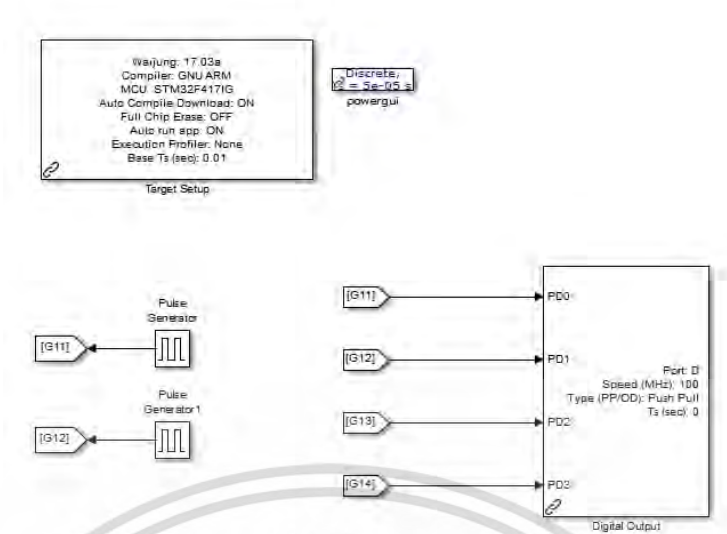
วงจรควบคุมชนิดสัญญาณดิจิทัลจะใช้ตัว STM32F429I DISCOVERY เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตชิงไอจีบีทีที่ใช้การสร้างวงจรสัญญาณควบคุมในโปรแกรม MATLAB Simulink แล้วทำการ Compiler ด้วยฟังก์ชัน Wajjung ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณควบคุมที่มีแรงดัน 5 V ออกมาตามขาเอาต์พุตที่กำหนด



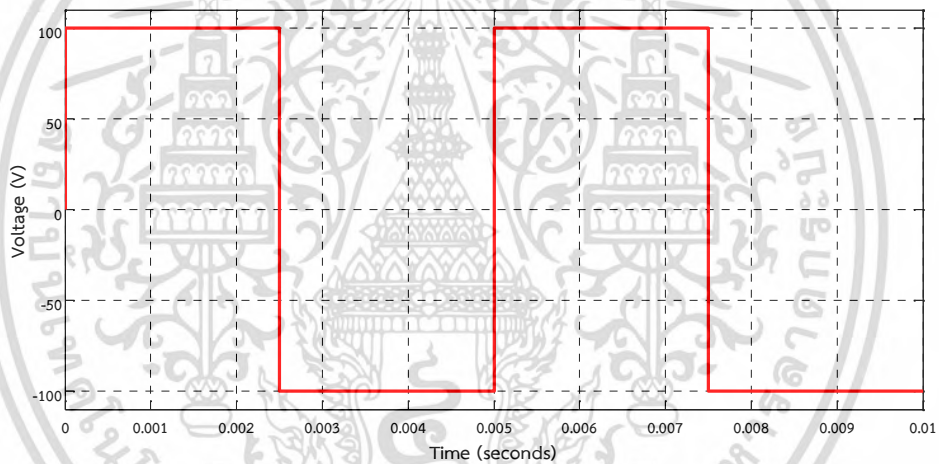
รูปที่ 3.6 ชุด STM32F429I DISCOVERY

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการทดสอบสัญญาณควบคุมชนิดสัญญาณดิจิทัลทั้งหมด 4 ชนิดสัญญาณ เพื่อศึกษาหาผลของการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังให้มีความถูกต้อง เหมาะสม สำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในขั้นตอนการสร้างสัญญาณจะใช้โปรแกรม MATLAB Simulink สำหรับสร้างโมเดลให้ได้สัญญาณตามที่ต้องการ ซึ่งสัญญาณทั้ง 5 ชนิด ได้แก่

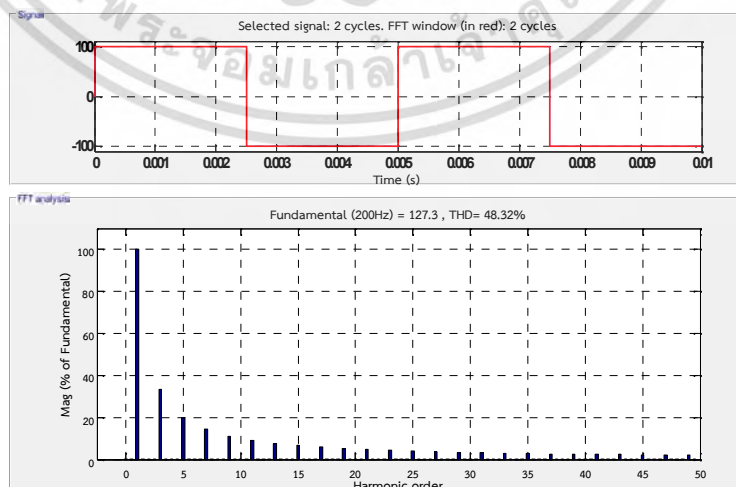
- 1) สัญญาณควบคุมแบบที่ 1 : สัญญาณที่มีลักษณะรูปคลื่นสี่เหลี่ยมถูกสร้างด้วยวิธีการสร้างพัลส์รูปคลื่นสี่เหลี่ยมแล้วทำการส่งออกเอาต์พุตโดยตรง ซึ่งวิธีนี้จะใช้ไอจีบีทีทั้งหมดเพียงแค่ 4 ตัวเท่านั้น วงจรสำหรับการสร้างสัญญาณเป็นดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 1



รูปที่ 3.8 แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 1



รูปที่ 3.9 ฮาร์โมนิกส์แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) สัญญาณควบคุมแบบที่ 2 : สัญญาณที่มีการกำหนดมุมเพื่อกำจัดผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นของวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกต้องมีการกำหนดมุมที่จะทำการสวิตซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการอนุกรมฟูเรียร์ สำหรับในสัญญาณควบคุมแบบที่ 2 นี้จะเป็นการกำจัดฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 โดยวงจรแปลงผันกำลัง 5 ระดับแรงดันคิดได้จากสมการต่อไปนี้

$$f(t) = \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_{h=1}^{\infty} [\cos(h_1) + \cos(h_2)] \quad (3.1)$$

เมื่อ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรวมของแต่ละแหล่งจ่าย
 i คือ มุมที่สวิตซ์
 h คือ ลำดับฮาร์มอนิกส์

จากสมการข้างต้นเมื่อต้องการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่อันดับต่างๆ ซึ่งมีการกล่าวถึงในบทที่ 2 แล้วนั้นสามารถหาค่าคำตอบของมุมสมการได้จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 เมื่อกำหนดให้ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index; M) มีค่าเป็น 0.8

$$\cos \theta_1 + \cos \theta_2 = 1.6 \quad (3.2)$$

$$\cos(h_1) + \cos(h_2) = 0 \quad (3.3)$$

เมื่อต้องการกำจัดฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 สามารถคำนวณหามุมจุดชนวนได้ตามสมการที่ 3.4 และ 3.5

$$\cos \theta_1 + \cos \theta_2 = 1.6 \quad (3.4)$$

$$\cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) = 0 \quad (3.5)$$

สำหรับการหาค่าตอบสมการข้างต้นนี้จำเป็นต้องใช้วิธีการแก้สมการเชิงตัวเลขด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันดังแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งได้คำตอบเป็น

$$\theta_1 = 5.08^\circ$$

$$\theta_2 = 54.92^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

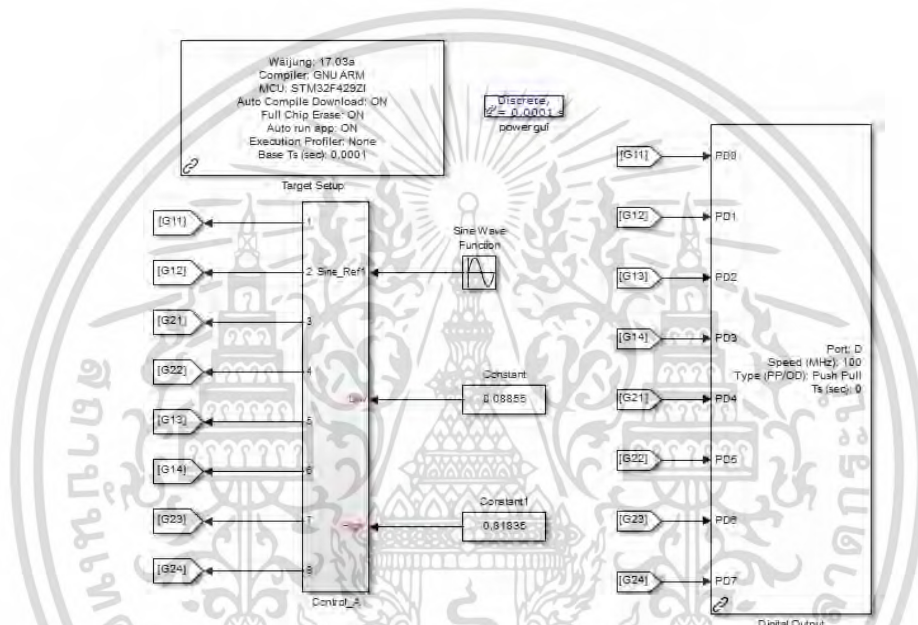
รูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 2 เป็นการกำหนดมุมการสวิตช์ซึ่งได้มีการสร้างด้วยหลักการการมอดูเลชันของสัญญาณรูปคลื่นไซน์กับสัญญาณเส้นตรงที่มีค่าคงที่ที่ทำให้เกิดการสวิตช์ที่มุม 5.08° และ 54.92° ดังการคำนวณต่อไปนี้

$$C_1 = \sin(5.08)$$

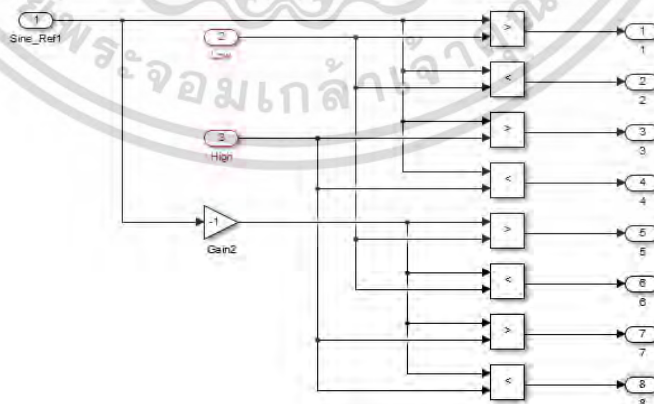
$$C_1 = 0.09$$

$$C_2 = \sin(54.92)$$

$$C_2 = 0.82$$

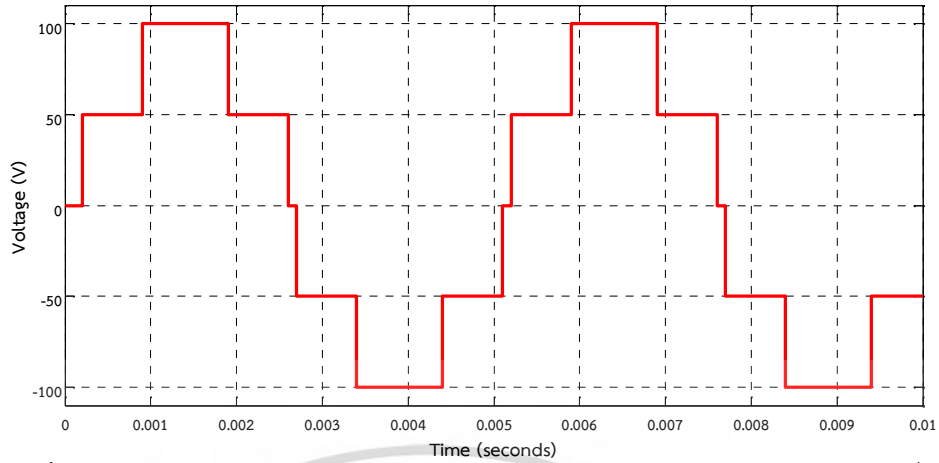


รูปที่ 3.10 ไตอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 2

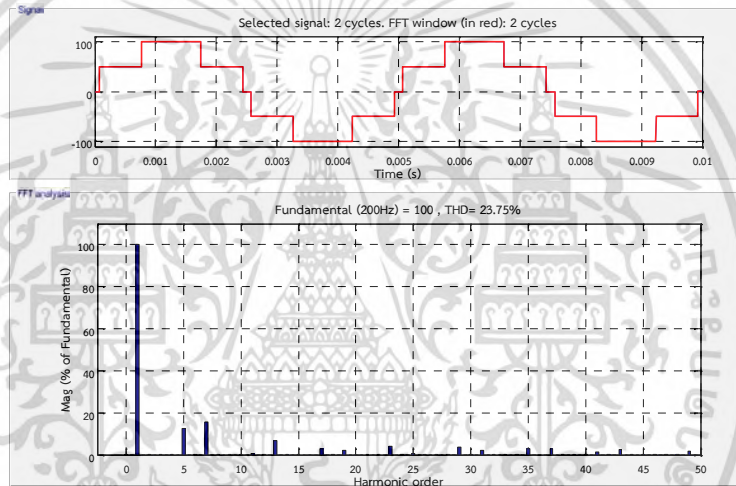


รูปที่ 3.11 ไตอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 2 (ส่วนขยาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 2



รูปที่ 3.13 ฮาร์โมนิกส์แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 2

- 3) สัญญาณควบคุมแบบที่ 3 : สัญญาณควบคุมแบบที่ 3 จะใช้หลักการเดียวกับสัญญาณควบคุมแบบที่ 2 แต่จะเป็นการสร้างสัญญาณควบคุมที่กำจัดฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 โดยทำการคำนวณหามุมการสวิตซ์ดังต่อไปนี้

$$\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) = 1.6 \quad (3.6)$$

$$\cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) = 0 \quad (3.7)$$

การหาค่าตอบสมการข้างต้นนี้จำเป็นต้องใช้วิธีการแก้สมการเชิงตัวเลขด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันเช่นเดียวกันดังแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งได้คำตอบเป็น

$$\alpha_1 = 16.33^\circ$$

$$\alpha_2 = 52.33^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

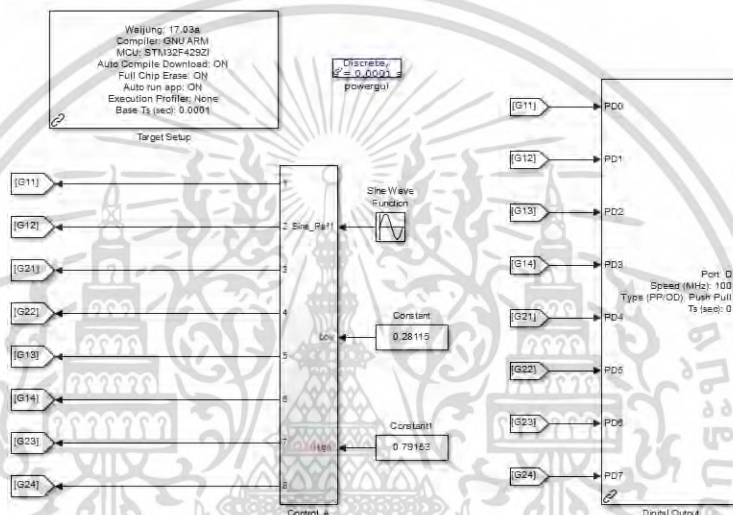
รูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 3 เป็นการกำหนดมุมการสวิตซึ่ง ได้มีการสร้างด้วยหลักการการมอดูเลชันของสัญญาณรูปคลื่นไซน์กับสัญญาณเส้นตรงที่มีค่าคงที่ที่ทำให้เกิดการสวิตซึ่งที่มุม 16.33° และ 52.33° ดังการคำนวณต่อไปนี้

$$C_1 = \sin(16.33)$$

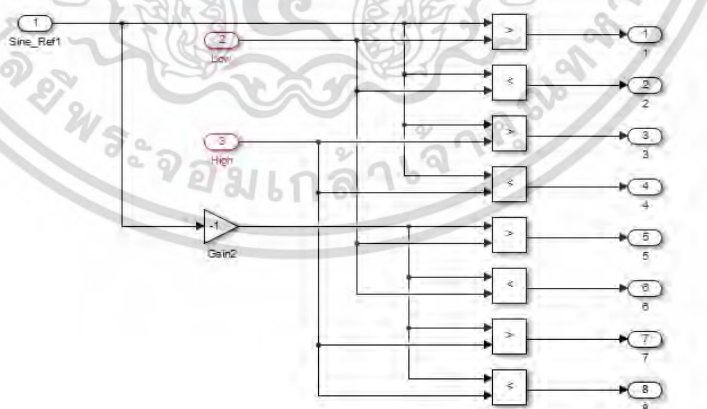
$$C_1 = 0.28$$

$$C_2 = \sin(52.33)$$

$$C_2 = 0.79$$

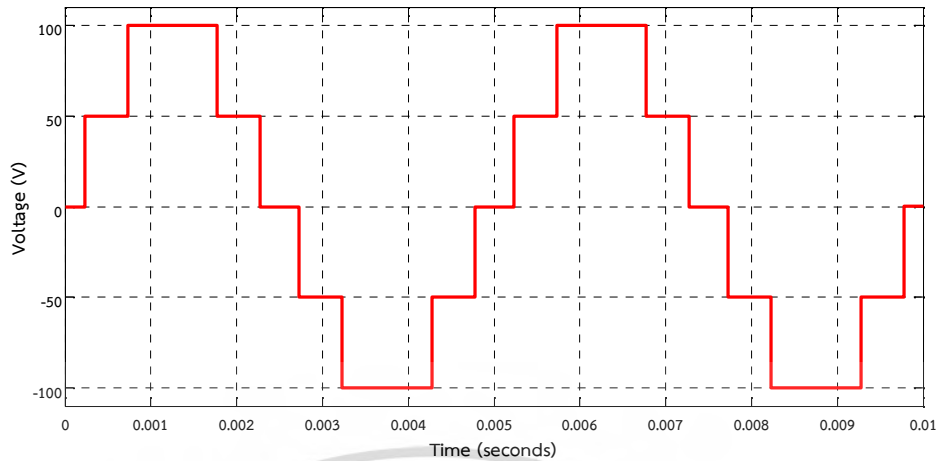


รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 3

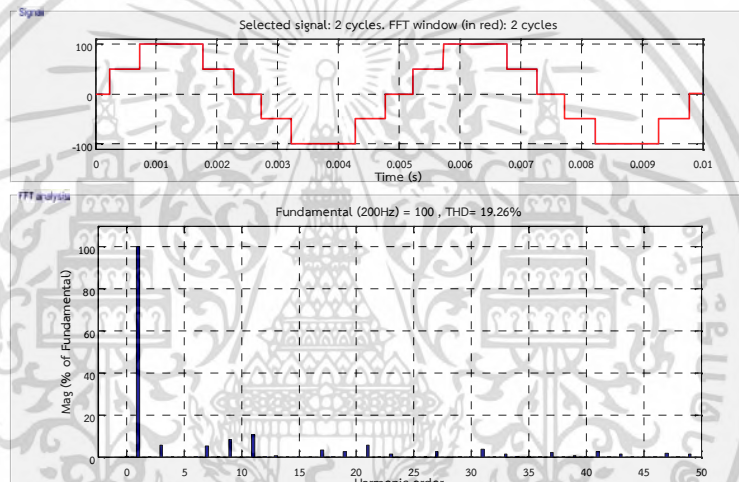


รูปที่ 3.15 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 3 (ส่วนขยาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 3



รูปที่ 3.17 ฮาร์มอนิกส์แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 3

- 4) สัญญาณควบคุมแบบที่ 4 : สัญญาณที่มีการใช้หลักการพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งมีการมอดูเลชันของสัญญาณระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับ 200 Hz กับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 2 kHz ซึ่งหลักการข้างต้นสามารถสร้างสัญญาณได้ด้วยโมเดลดังรูปที่ 3.18 และในการมอดูเลชันนี้กำหนดให้อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูดและมีค่าอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ดังสมการที่ 3.8

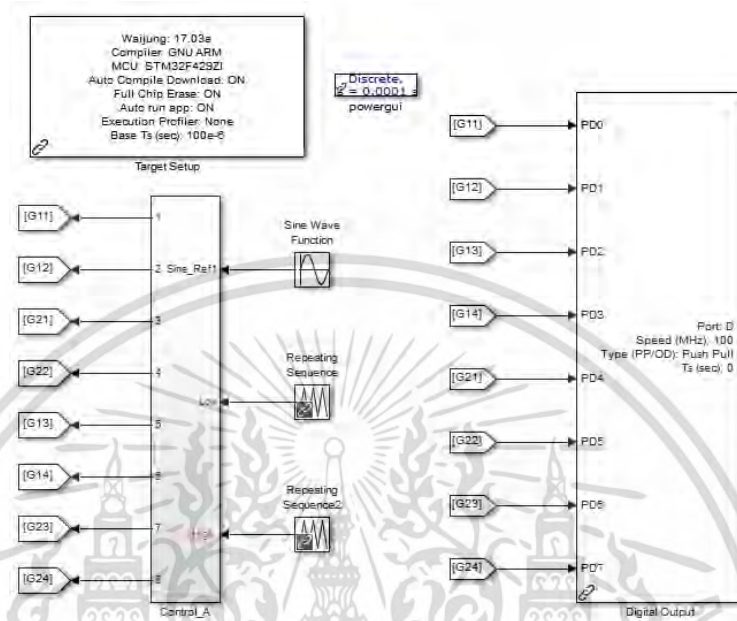
$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (3.8)$$

$$m_f = \frac{2k}{200}$$

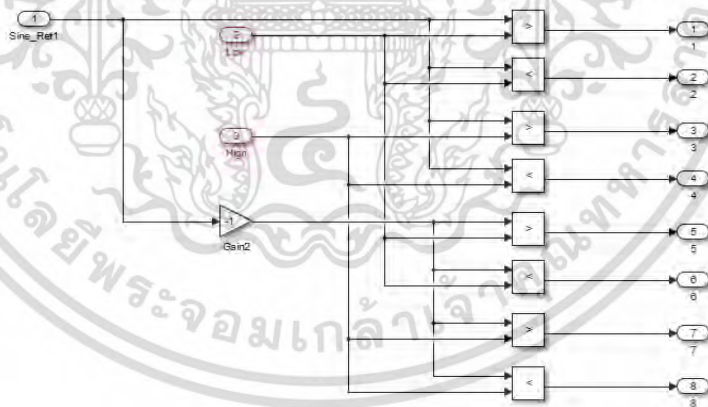
$$m_f = 10$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ m_f คือ อัตราการมอดูเลตด้านความถี่
 f_s คือ ความถี่ของการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์
 f_1 คือ ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์

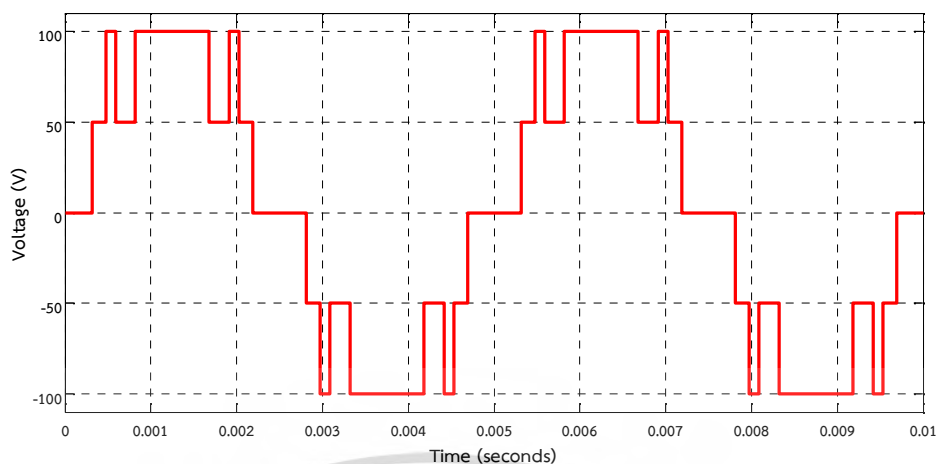


รูปที่ 3.18 โค้ดโปรแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 4

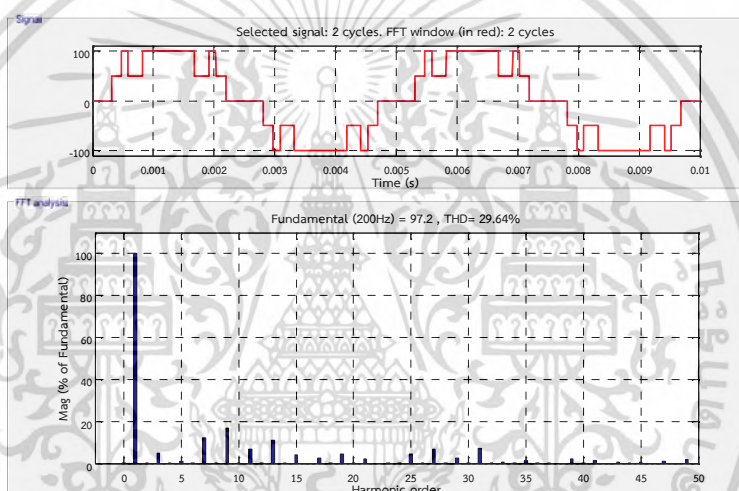


รูปที่ 3.19 โค้ดโปรแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 4 (ส่วนขยาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 4

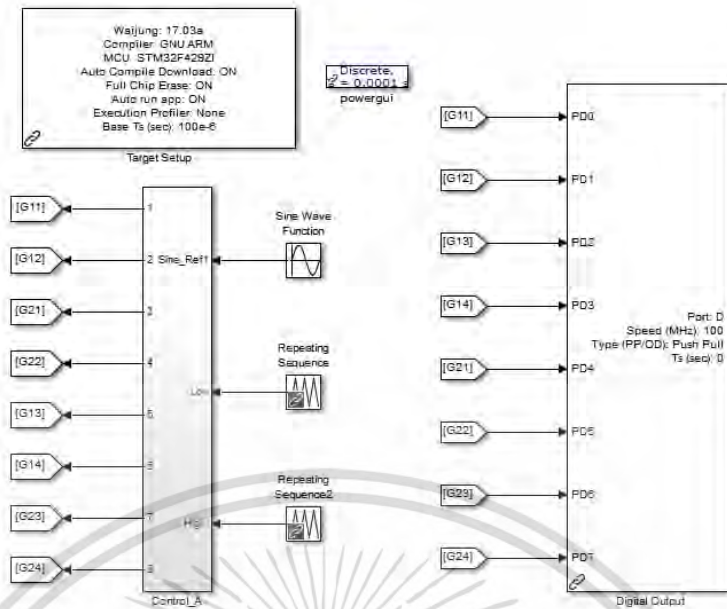


รูปที่ 3.21 ฮาร์มอนิกส์แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 4

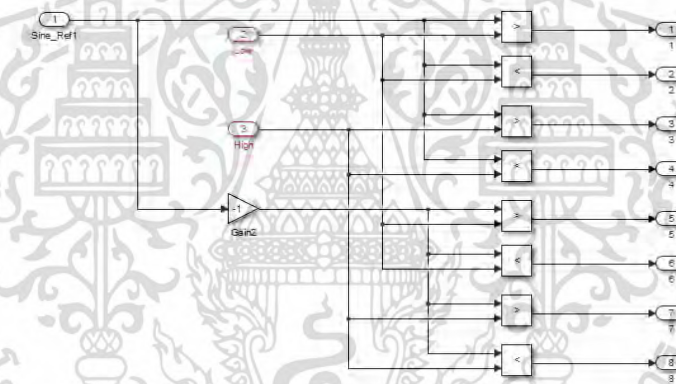
- 5) สัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 5 : สัญญาณที่มีการใช้หลักการพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งมีการมอดูเลชันของสัญญาณระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับ 200 Hz กับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 4 kHz ซึ่งหลักการข้างต้นสามารถสร้างสัญญาณได้ด้วยโมเดลดังรูปที่ 3.22 และในการมอดูเลชันนี้กำหนดให้อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูดและมีค่าอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ดังสมการที่ 3.8 จะได้

$$m_f = \frac{4k}{200}$$

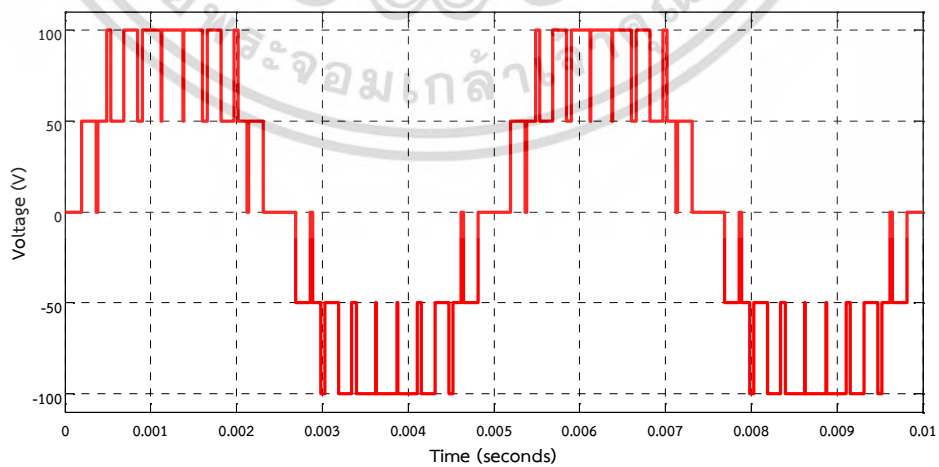
$$m_f = 20$$



รูปที่ 3.22 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 5

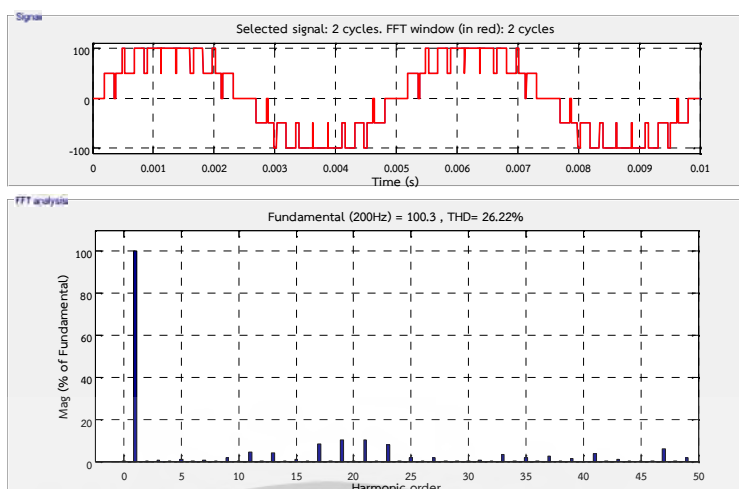


รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 5 (ส่วนขยาย)



รูปที่ 3.24 แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 5

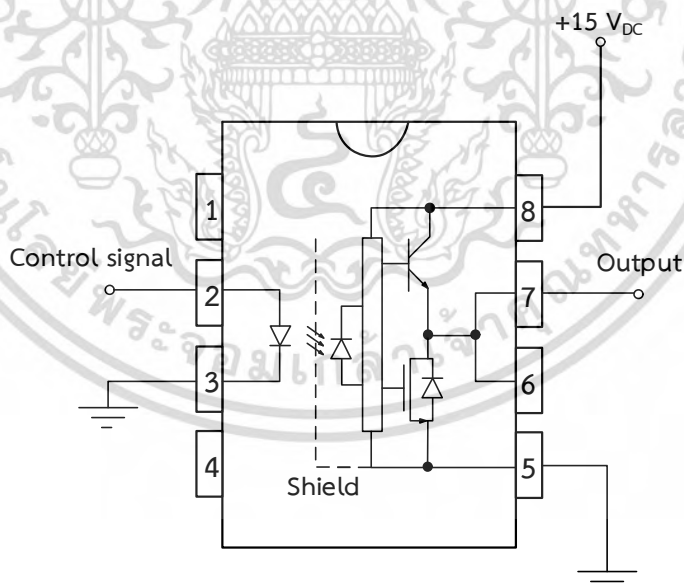
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 ฮาร์โมนิกส์แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังจากสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบที่ 5

3.6 วงจรขับเคลื่อน

วงจรขับเคลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันกำลังจะใช้หลักการแยกกราวด์วงจรขับเคลื่อนของไอจีบีทีของแต่ละตัวโดยใช้ไอซีเบอร์ HCPL-3120 โดยหลักการทำงานของไอซีชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อทางแสงด้วยการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสงส่งไปยังตัวรับสัญญาณแสง จากนั้นตัวรับสัญญาณแสงจะเปลี่ยนสัญญาณแสงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรไฟฟ้าสองวงจรโดยเด็ดขาด

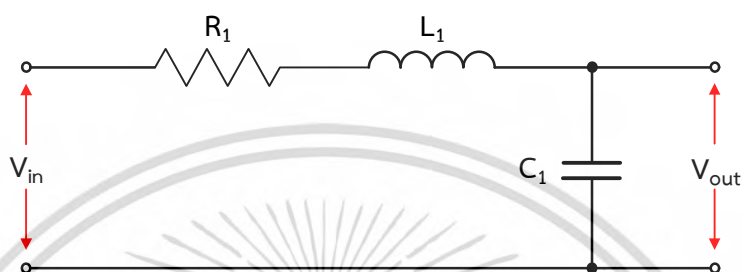


รูปที่ 3.26 แผนผังวงจรขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 วงจรกรองความถี่

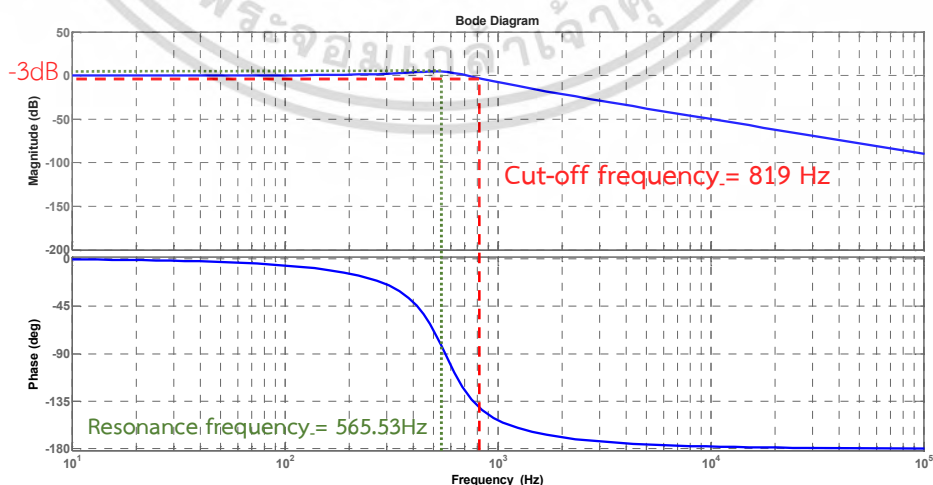
ในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันจากวงจรแปลงผันกำลังนั้นจำเป็นต้องมีวงจรกรองความถี่เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไซน์ และลดสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้นในระบบการตรวจจัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง สำหรับวงจรกรองความถี่สำหรับวงจรแปลงผันกำลังมีการออกแบบให้สามารถตัดความถี่ที่ความถี่ประมาณ 1 kHz โดยการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด L-C แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ 3.9 กำหนดให้ค่าความต้านทาน (R) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความเก็บประจุ (C) มีค่าเป็น 9.6 4.4 mH และ 18 μ F ตามลำดับจะได้ผลตอบสนองความถี่ดังรูปที่ 3.26 สามารถลดระดับฮาร์มอนิกส์และระดับสัญญาณรบกวนที่มีความถี่มากกว่า 819 Hz โดยคิดจากอัตราส่วนแรงดันเข้าด้านเข้าต่อแรงดันด้านออกที่ระดับ -3 dB และมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ 565.53 Hz ดังสมการที่ 3.10

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{LCS^2 + RCS + 1} \quad (3.9)$$



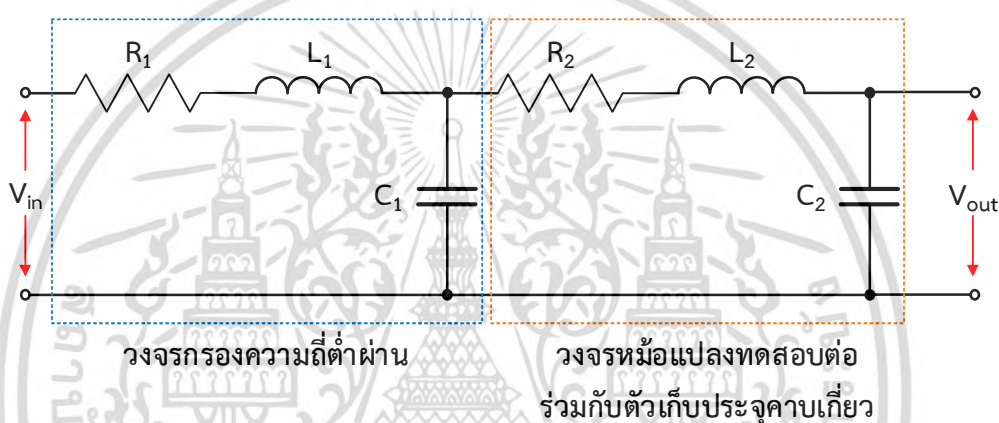
รูปที่ 3.28 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{\text{resonance}} = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \quad (3.10)$$

$$f_{\text{resonance}} = 565.53 \text{ Hz}$$

เมื่อทำการต่อวงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสซาร์จบางส่วนโดยมีวงจรแปลงผันกำลังเป็นแหล่งจ่ายผ่านวงจรกรองแล้วพบว่าผลจากการต่อวงจรของหม้อแปลงทดสอบ และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_1) จะมีพฤติกรรมเหมือนวงจรกรองชนิด L-C มีวงจรดังรูปที่ 3.29

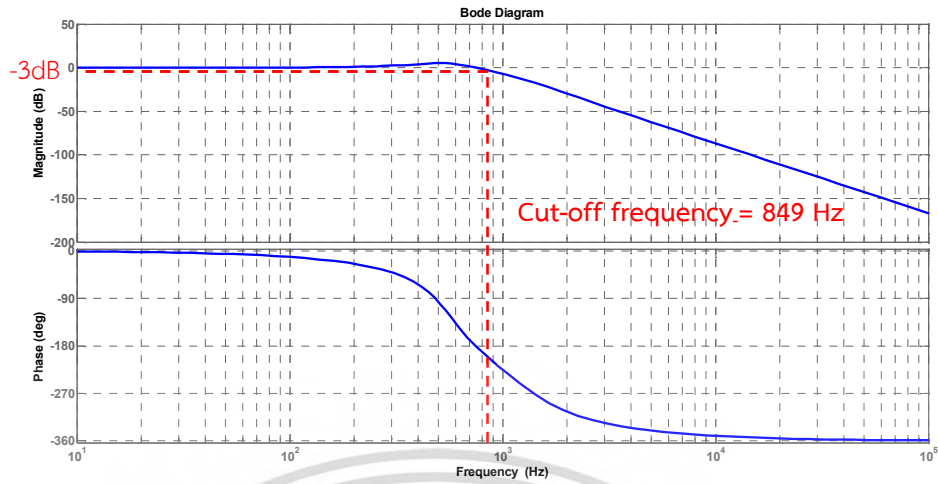


รูปที่ 3.27 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต่อร่วมกับหม้อแปลงทดสอบและตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

จากวงจรในรูปที่ 3.27 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ 3.11 โดยในส่วนของวงจรกรองความถี่มีค่าความต้านทาน (R_1) ค่าความเหนี่ยวนำ (L_1) และค่าความเก็บประจุ (C_1) เป็น 9.6 4.4 mH และ 18 μ F ตามลำดับ สำหรับส่วนของวงจรหม้อแปลงทดสอบกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวมีค่าความต้านทาน (R_2) ค่าความเหนี่ยวนำ (L_2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_2) มีค่าเป็น 5.38 0.67 mH และ 26.58 μ F ตามลำดับ ซึ่งจะได้ผลตอบสนองความถี่ดังรูปที่ 3.28 สามารถลดระดับฮาร์มอนิกส์และระดับสัญญาณรบกวนที่มีความถี่มากกว่า 849 Hz โดยคิดจากอัตราส่วนแรงดันเข้าด้านเข้าต่อแรงดันด้านออกที่ระดับ

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{L_1 L_2 C_1 C_2 S^4 + (R_2 L_1 + R_1 L_2) C_1 C_2 S^3 + (R_1 R_2 C_1 C_2 + L_1 C_1 + L_2 C_2) S^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2) S + 1} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

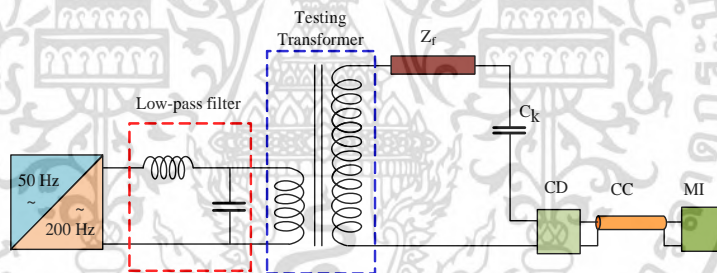
4.1 บทนำ

การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงโดยใช้วงจรแปลงผันกำลัง (Power converter) ที่ใช้ในการแปลงความถี่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันนี้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60270 และ IEC 61869 ซึ่งกำหนดให้การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันทดสอบมีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไม่เกิน 5% และมีค่าสัญญาณรบกวนในระบบทดสอบไม่เกิน 2.5 pC

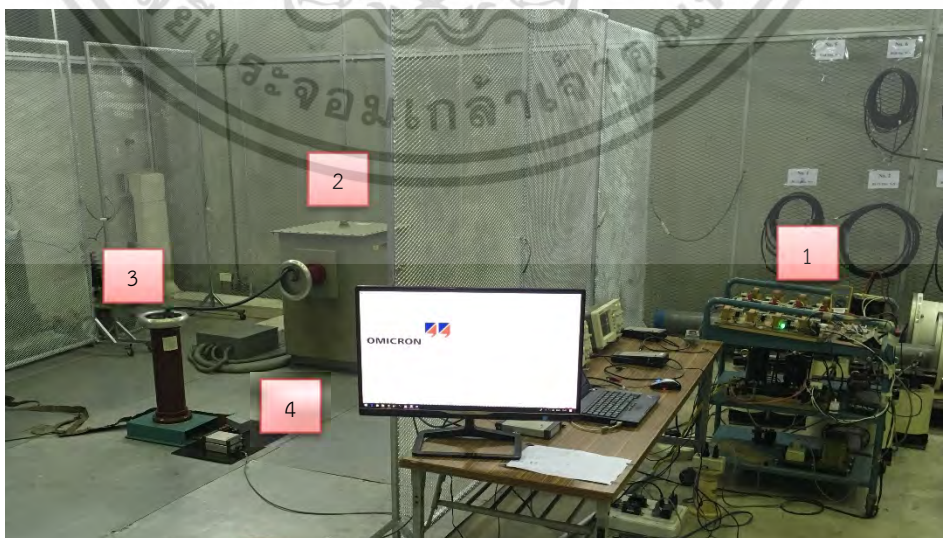
สำหรับการทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4.2 การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

ในการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะทำตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270



รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในห้องปฏิบัติการ

- 1) ชุดวงจรแปลงผันกำลัง
- 2) หม้อแปลงทดสอบ
- 3) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว
- 4) อุปกรณ์คาบเกี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมเห็นจำเป็นต้องนำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้น โดยมีการใช้สัญญาณควบคุมเพื่อสร้างแรงดันในรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการสร้างแรงดันที่มีความเหมาะสมต่อการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสำหรับรูปแบบของแรงดันที่ทำการทดสอบมีทั้งหมด 5 กรณีได้แก่

- 1) รูปคลื่นสี่เหลี่ยม
- 2) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันที่ถูกกำหนดฮาร์มอนิกอันดับ 3
- 3) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันที่ถูกกำหนดฮาร์มอนิกอันดับ 5
- 4) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันแบบ PWM ที่อัตราการมอดูเลตความถี่ 10 เท่า
- 5) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันแบบ PWM ที่อัตราการมอดูเลตความถี่ 20 เท่า

การทดสอบในแต่ละกรณีจะทำการทดสอบโดยป้อนแรงดันให้ได้แรงดันทดสอบทางด้านแรงดันสูงที่ระดับแรงดัน 10 kV 20 kV และ 40 kV แล้วทำการบันทึกค่าแรงดัน กระแสของแหล่งจ่าย และค่าแรงดัน ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันทดสอบสำหรับใช้ในการวิเคราะห์หารูปแบบแรงดันที่เหมาะสมในลำดับต่อไป

กรณีที่ 1 ทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนโดยมีวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมแบบที่ 1 เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 10 kV

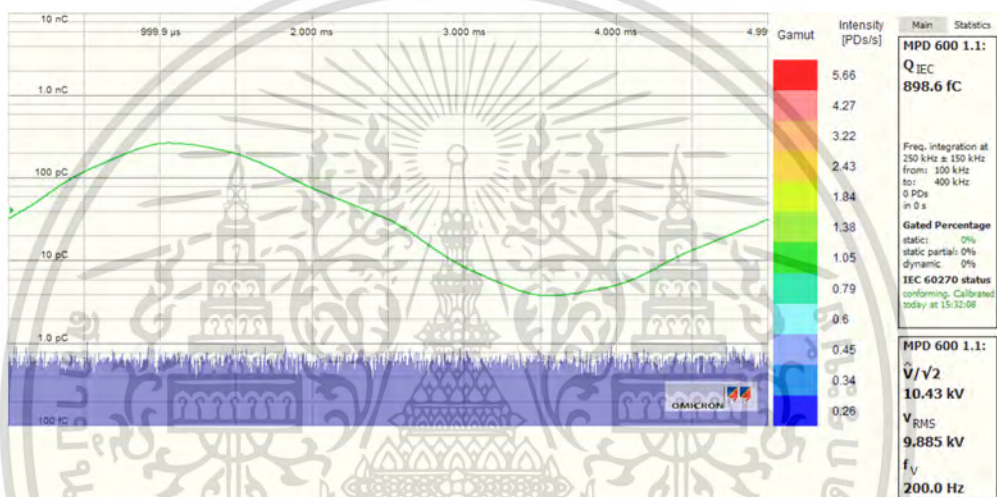


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

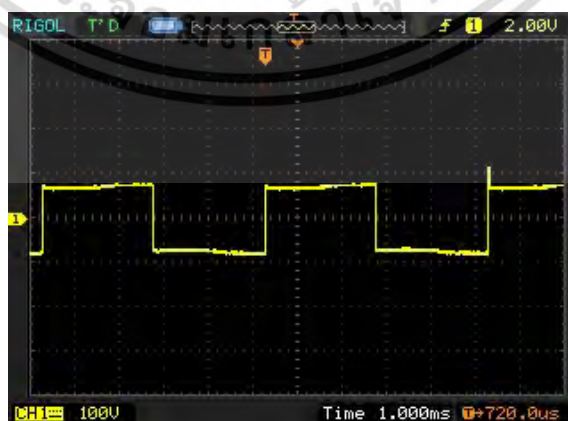


รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV



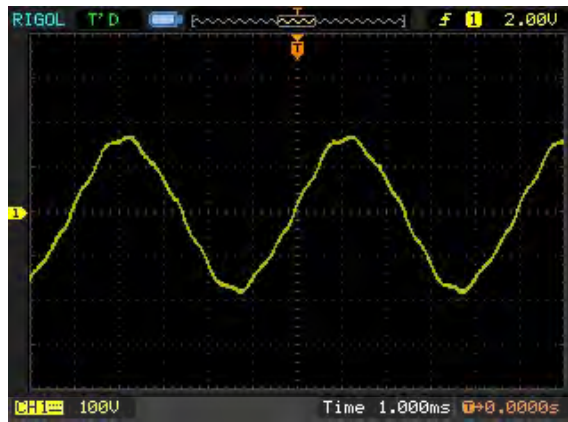
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 20 kV

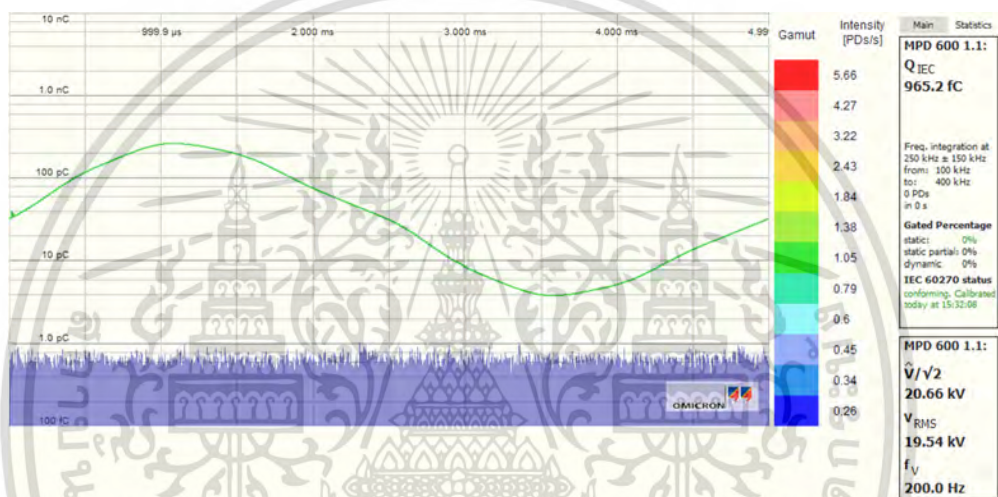


รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

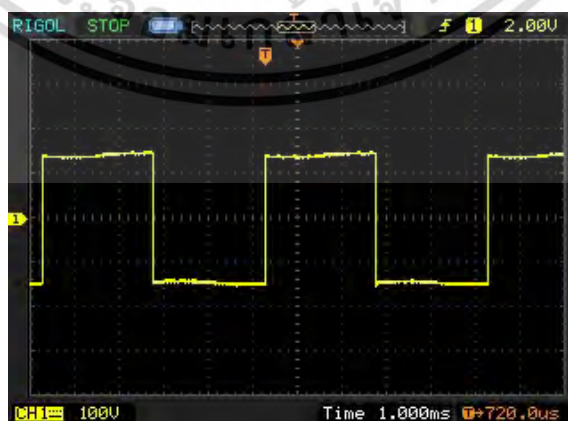


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV



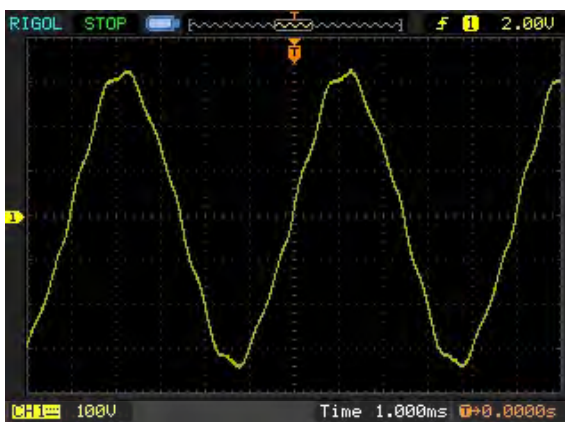
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV

- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 40 kV

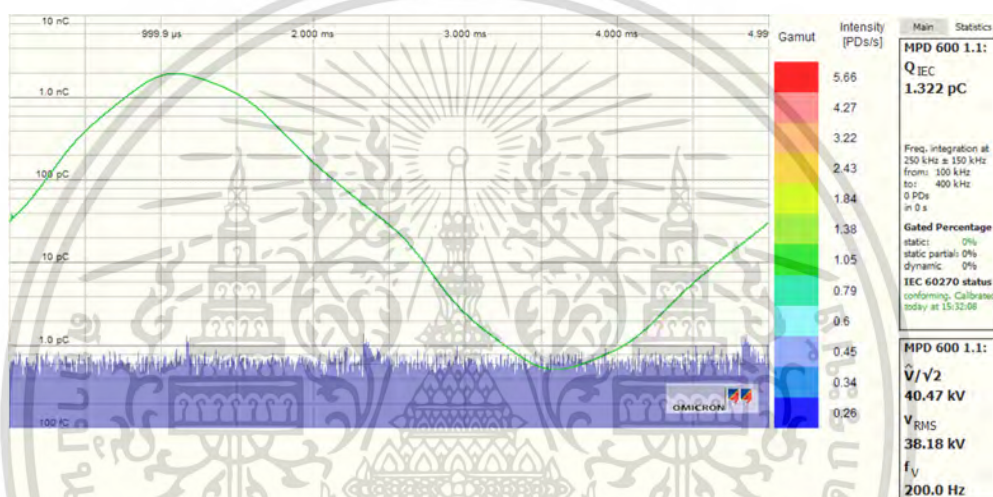


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 1 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควบคุมที่ 1

V_{dc1} (V)	V_{dc2} (V)	I_{dc1} (A)	I_{dc2} (A)	$V_{out, filter}$		$V_{testing}$			
				V_{rms} (V)	%TH D	V_{peak} $\sqrt{2}$ (kV)	V_{rms} (kV)	%THD	Q_{IEC}
37.73	-	2.88	-	60.30	4.1	10.43	9.885	3.2	898.6 fC
74.80	-	5.80	-	118.10	4.1	20.66	19.54	3.2	965.2 fC
145.70	-	11.19	-	241.80	4.0	40.48	40.94	3.2	1.322 pC

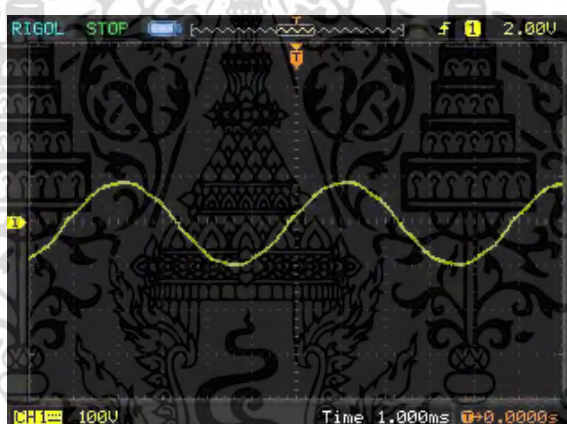
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2 ทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยมีวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมแบบที่ 1 เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

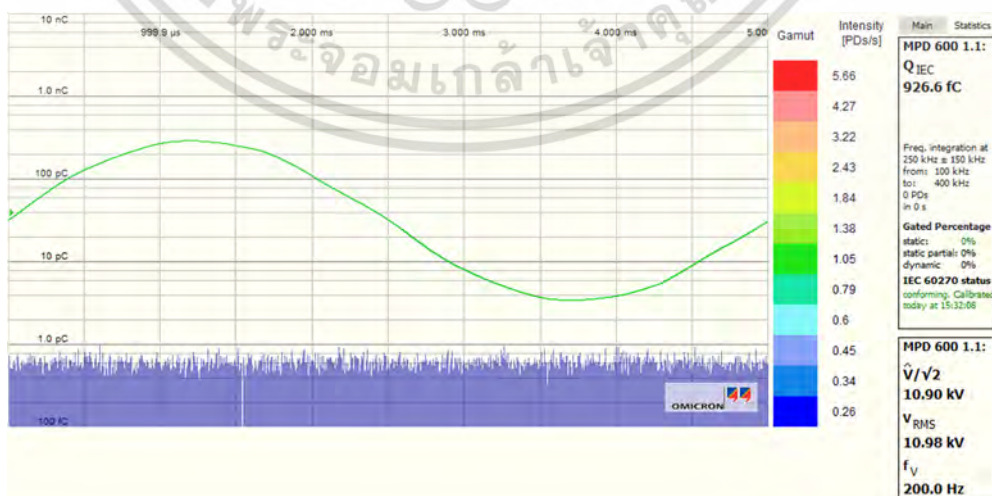
- ที่ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 10 kV



รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

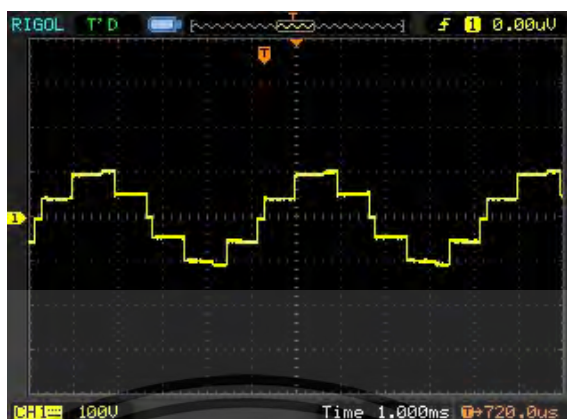


รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2

ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

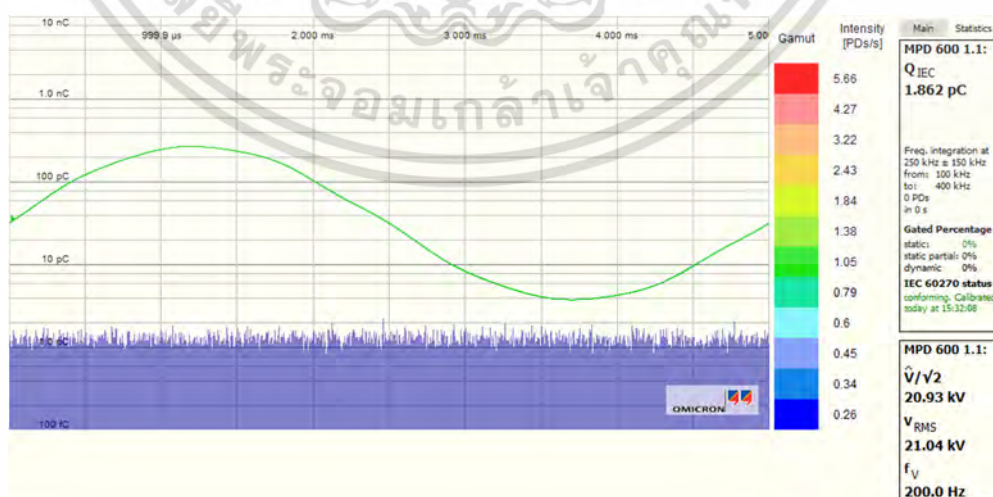
- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 20 kV



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV



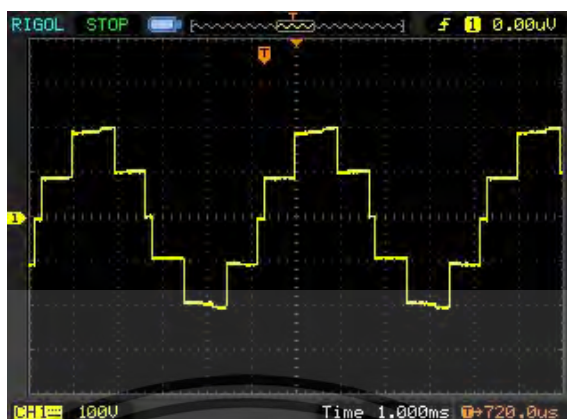
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

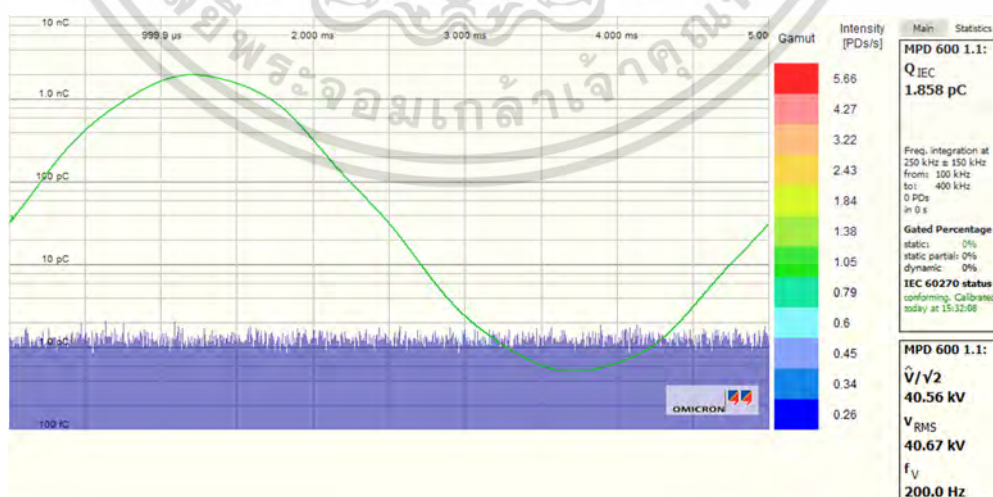
- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 40 kV



รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 2 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควบคุมที่ 2

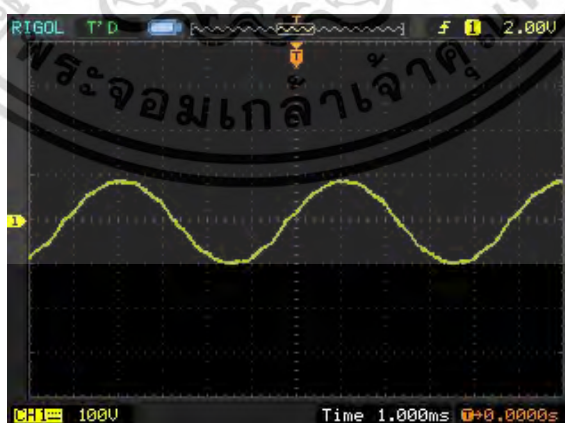
V_{dc1} (V)	V_{dc2} (V)	I_{dc1} (A)	I_{dc2} (A)	$V_{out, filter}$		$V_{testing}$			
				V_{rms} (V)	%THD	$\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$ (kV)	V_{rms} (kV)	%THD	Q_{IEC}
28.58	26.89	0.54	1.03	65.0	2.1	10.90	10.98	1.5	926.6 fC
53.71	51.20	0.93	1.73	124.0	2.1	20.93	21.04	1.5	1.862 pC
102.80	98.60	1.66	3.01	240.3	2.0	40.56	40.67	1.4	1.858 pC

กรณีที่ 3 ทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยมีวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมแบบที่ 3 เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

- ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

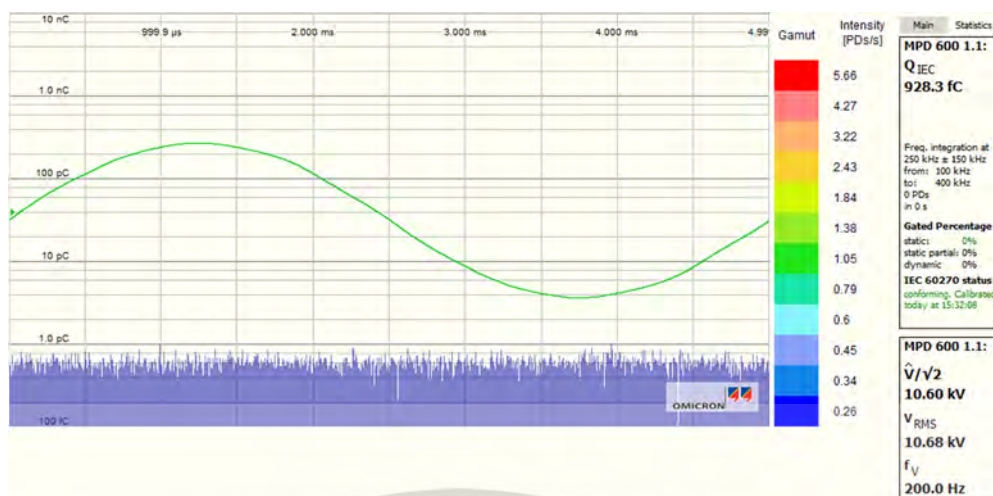


รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV



รูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

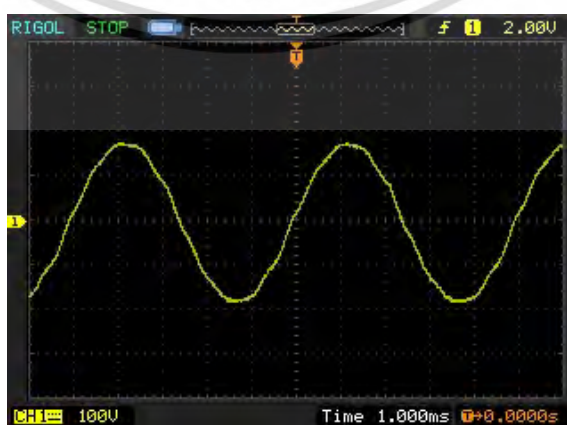


รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

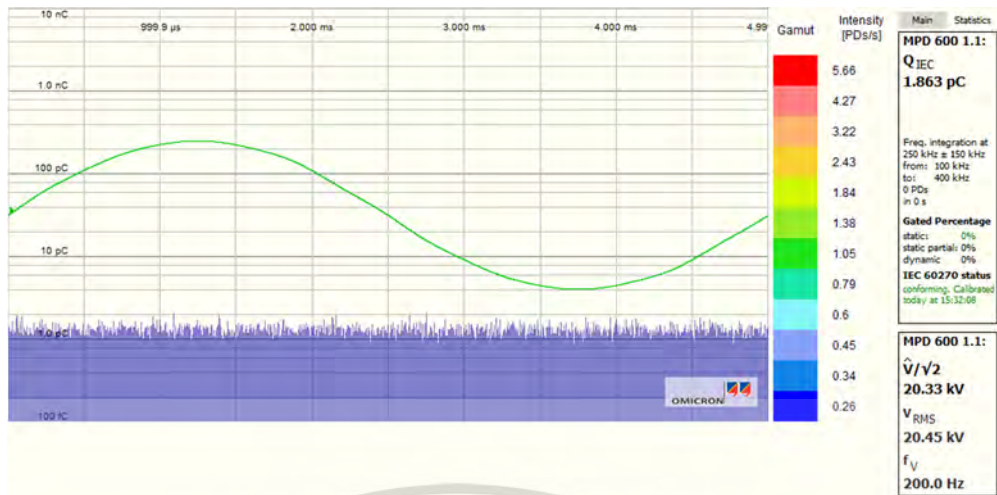
- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 20 kV



รูปที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงพื่นกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV

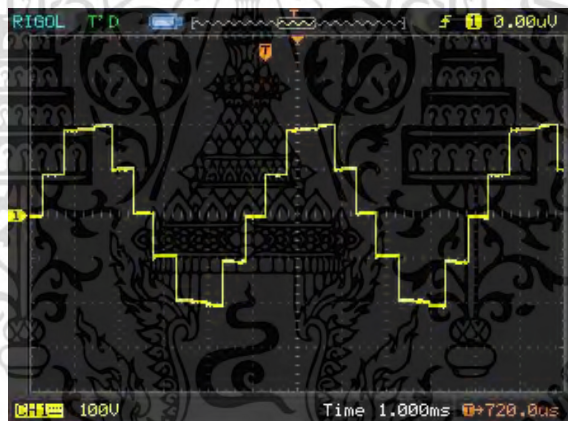


รูปที่ 4.25 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

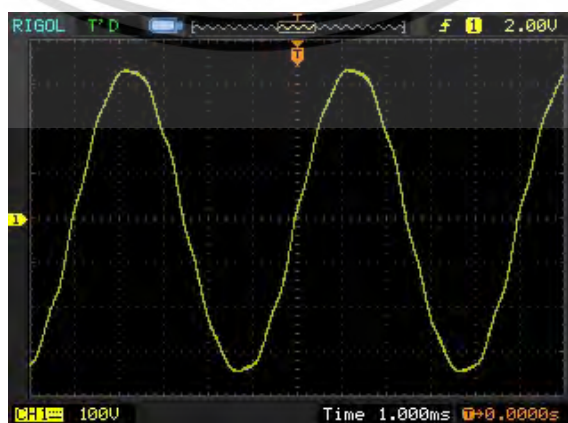


รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV

- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 40 kV



รูปที่ 4.27 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงพื่นกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV



รูปที่ 4.28 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 3 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควบคุมที่ 3

V_{dc1} (V)	V_{dc2} (V)	I_{dc1} (A)	I_{dc2} (A)	$V_{out, filter}$		$V_{testing}$			
				V_{rms} (V)	%THD	$\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$ (kV)	V_{rms} (kV)	%THD	Q_{IEC}
26.49	25.13	1.26	0.91	61.6	2.5	10.60	10.68	1.5	928.3 fC
51.48	49.39	1.66	1.59	120.9	2.6	20.33	20.45	1.4	1.863 pC
101.90	98.40	2.44	2.87	241.4	2.5	40.64	40.92	1.0	1.868 pC

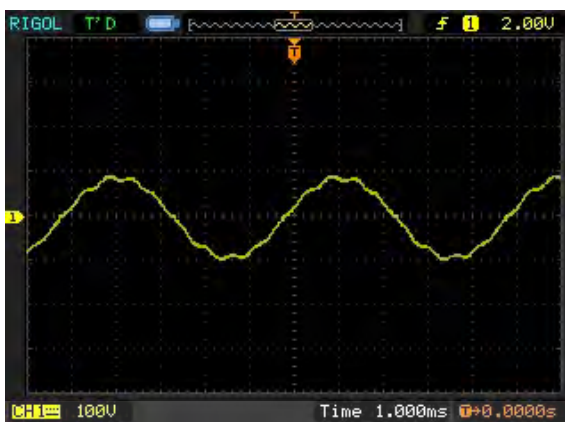
กรณีที่ 4 ทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยมีวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมแบบที่ 4 เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 10 kV

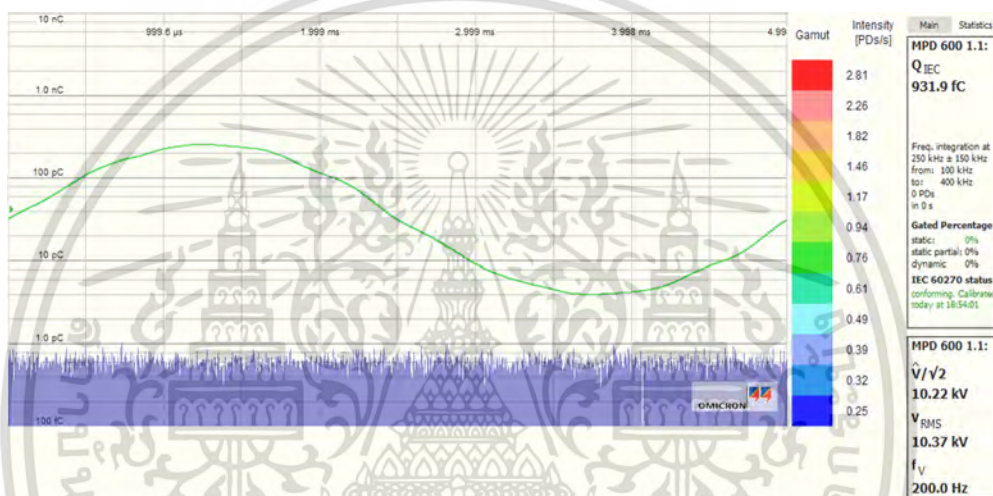


รูปที่ 4.30 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV



รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 20 kV

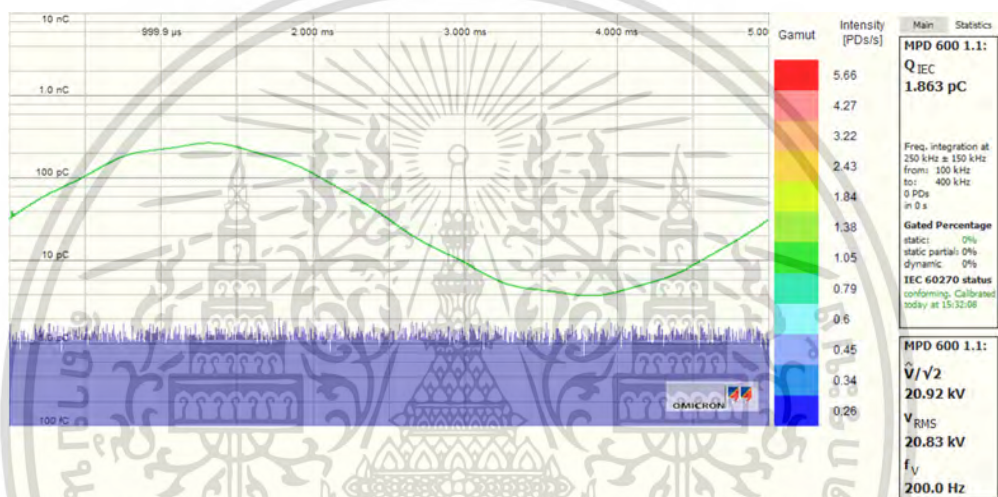


รูปที่ 4.33 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงพื่นกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

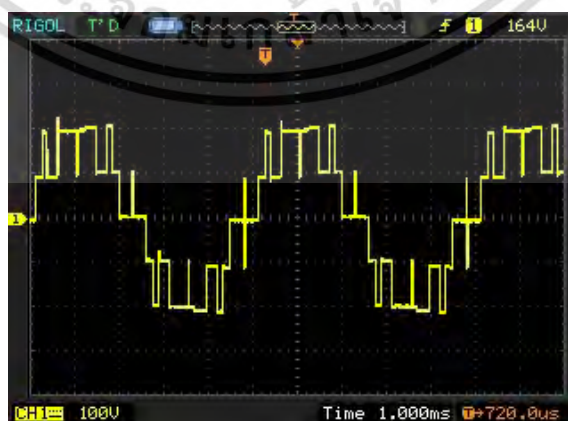


รูปที่ 4.34 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV



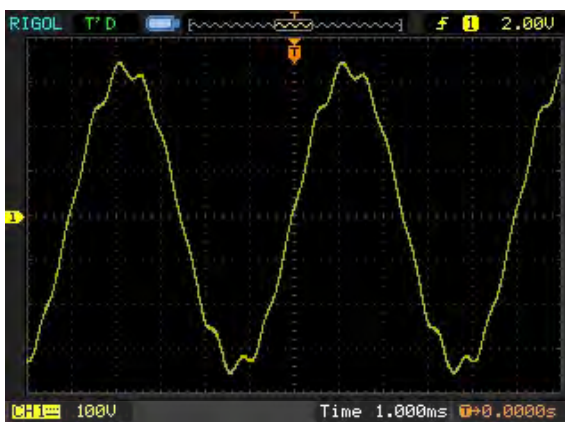
รูปที่ 4.35 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV

- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 40 kV

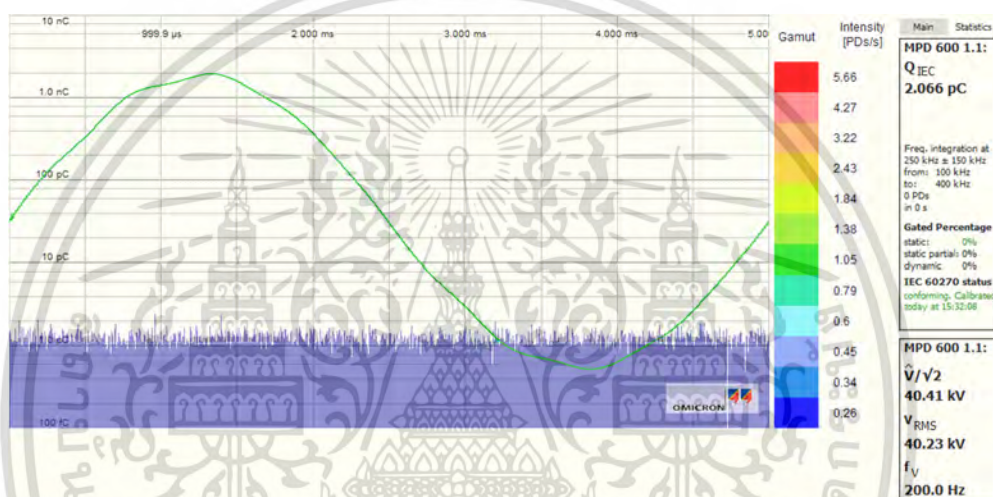


รูปที่ 4.36 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV



รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 4 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควบคุมที่ 4

V_{dc1} (V)	V_{dc2} (V)	I_{dc1} (A)	I_{dc2} (A)	$V_{out, filter}$		$V_{testing}$			
				V_{rms} (V)	%THD	$\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$ (kV)	V_{rms} (kV)	%THD	Q_{IEC}
28.69	27.97	0.64	0.95	64.4	4.9	10.98	10.92	1.6	931.9 fC
54.06	53.04	1.02	1.57	123.4	5.0	20.92	20.83	1.6	1.863 pC
103.30	101.60	1.84	2.74	237.6	5.0	40.41	40.23	1.8	2.066 pC

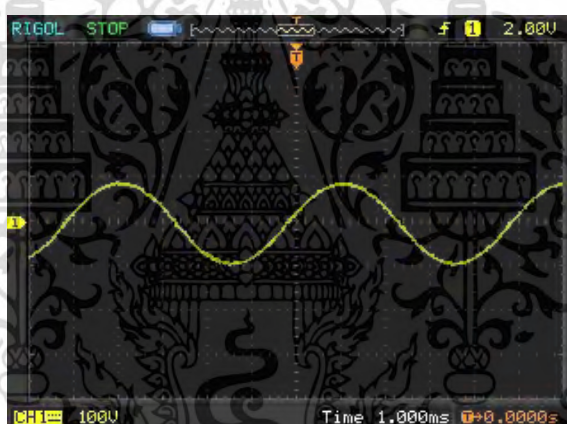
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 5 ทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยมีวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมแบบที่ 5 เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

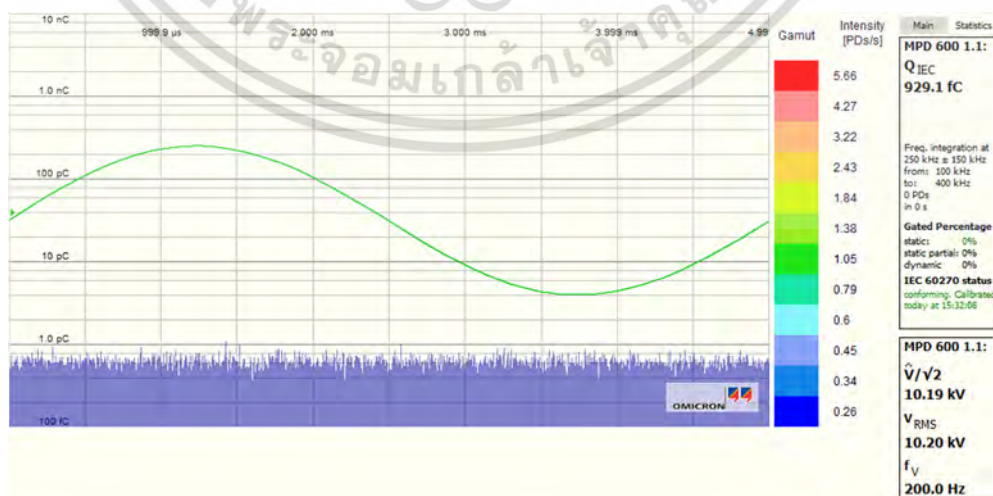
- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 10 kV



รูปที่ 4.39 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV



รูปที่ 4.40 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV



รูปที่ 4.41 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5

ที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

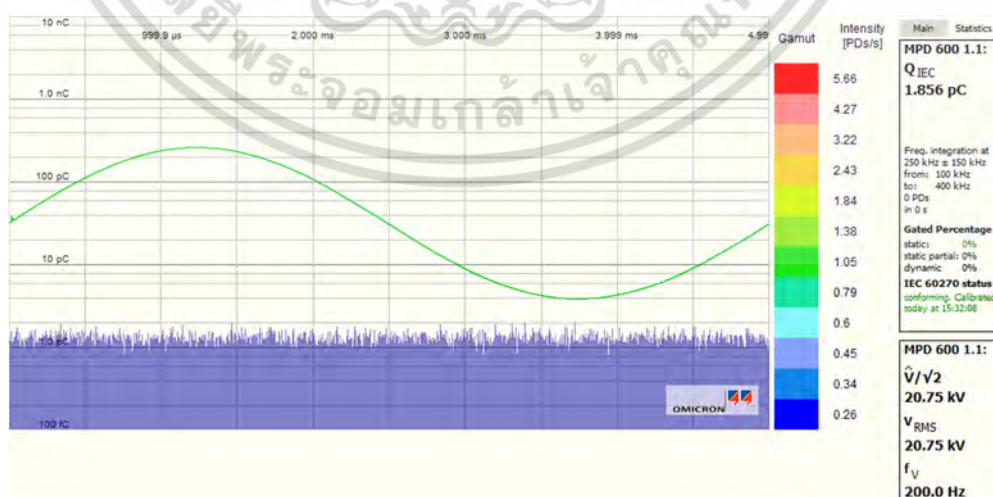
- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 20 kV



รูปที่ 4.42 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV



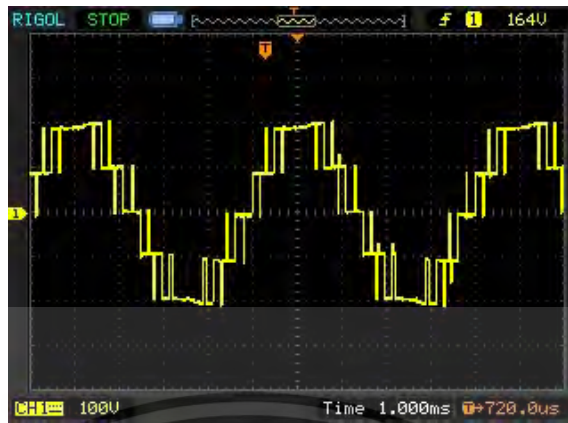
รูปที่ 4.43 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV



รูปที่ 4.44 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

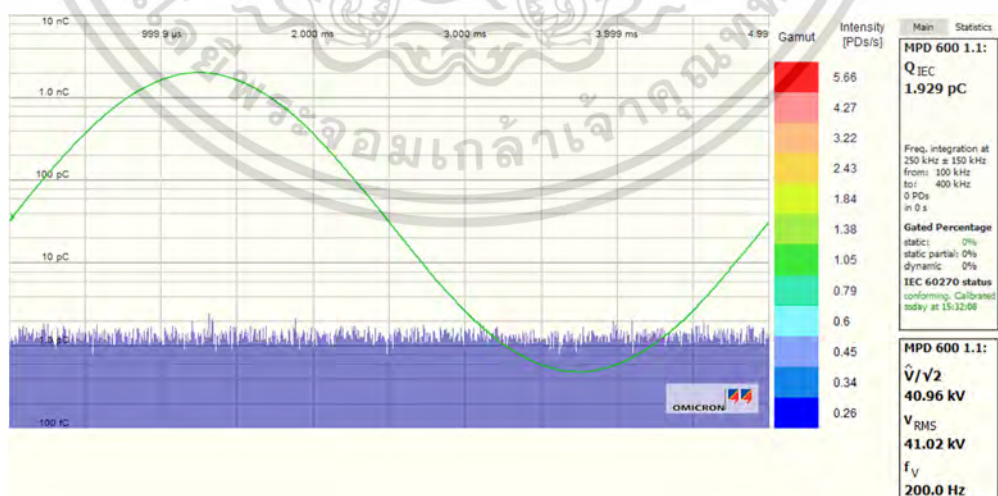
- ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 40 kV



รูปที่ 4.45 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงพื่นกำลังควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV



รูปที่ 4.46 รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรกรองควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV



รูปที่ 4.47 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนควบคุมด้วยสัญญาณแบบที่ 5 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV

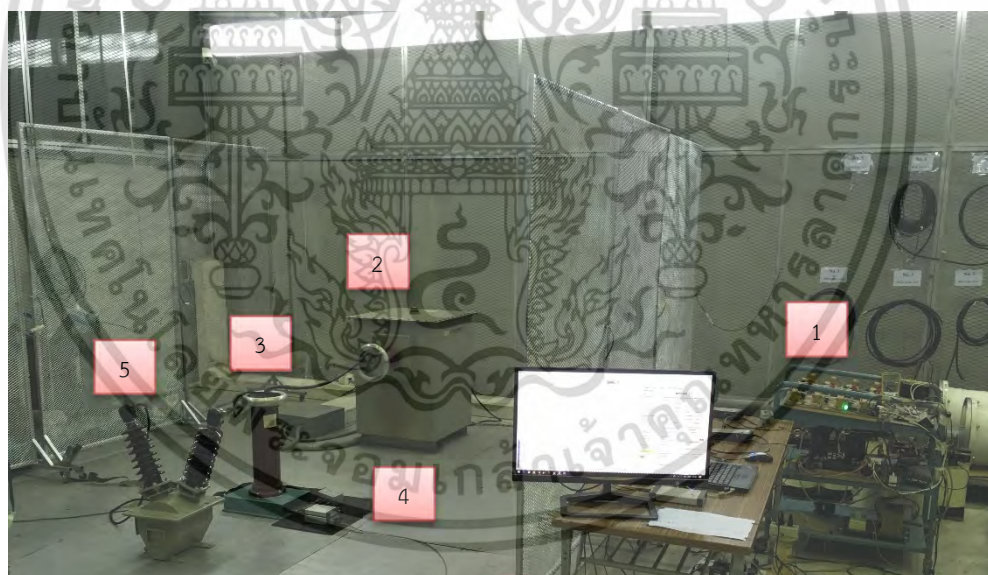
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณควมคุมที่ 5

V_{dc1} (V)	V_{dc2} (V)	I_{dc1} (A)	I_{dc2} (A)	$V_{out, filter}$		$V_{testing}$			
				V_{rms} (V)	%THD	$\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$ (kV)	V_{rms} (kV)	%THD	Q_{IEC}
24.85	24.52	0.64	0.92	60.0	0.6	10.19	10.20	0.5	929.1 fC
51.25	50.38	1.06	1.59	122.8	0.6	20.75	20.75	0.5	1.856 pC
101.00	99.30	1.95	2.93	242.3	0.6	40.96	41.02	0.5	1.929 pC

4.3 การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2 พบว่าการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนโดยมีวงจรแปลงผันกำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน โดยรูปคลื่นแรงดันที่ใช้เป็นรูปคลื่นแรงดัน 5 ระดับแรงดันที่ถูกกำจัดฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 เนื่องจากการทดสอบรูปคลื่นพบว่า มีจุดเด่นคือ มีรูปคลื่นที่เป็นไปตามมาตรฐาน ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกต่ำ และมีการสวิตซ์ที่ต่อคาบเวลาของแรงดันที่น้อยซึ่งจะมีผลต่อการมีความสูญเสียจากการสวิตซ์ที่ต่ำด้วย โดยการทดสอบมีการติดตั้งวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 การติดตั้งวงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง

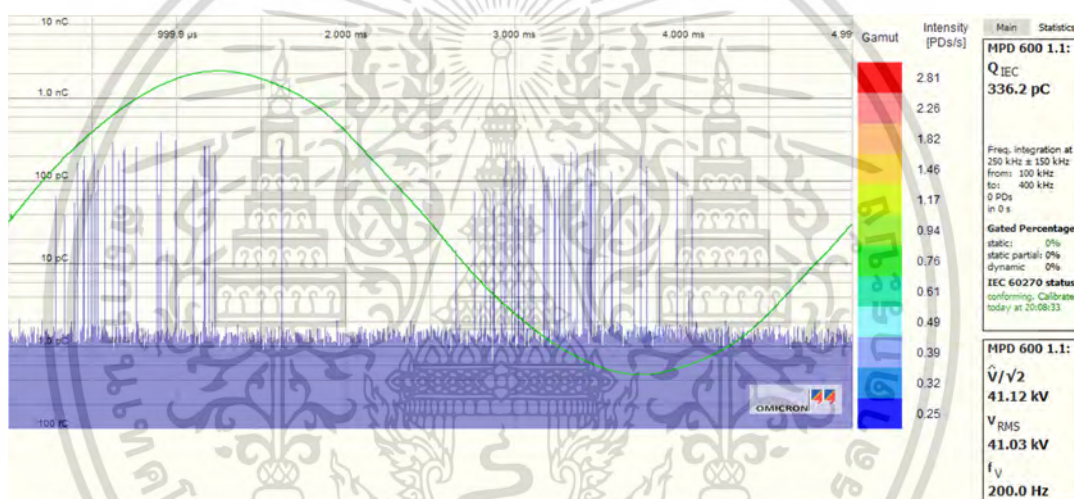
- 1) ชุดวงจรแปลงผันกำลัง
- 2) หม้อแปลงทดสอบ
- 3) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว
- 4) อุปกรณ์คาบเกี่ยว
- 5) หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับขั้นตอนการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดันสูงตามมาตรฐาน IEC 61869 คือ

- 1) ทำการต่อวัตถุทดสอบเข้ากับวงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยต่อขั้วแรงดันสูงด้านหนึ่งเข้ากับหม้อแปลงทดสอบ และขั้วที่เหลือต่อเข้ากับจุดต่อสายดิน
- 2) ทำการป้อนแรงดันเพื่อจำลองการเกิดแรงดันเกินก่อน (Pre-stress voltage) ที่ระดับ 80% ของค่าแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของระบบที่หม้อแปลงใช้งาน (U_m) นั่นคือป้อนแรงดันที่ระดับแรงดัน 40 kV
- 3) ลดระดับแรงดันลงที่ 1.2 เท่าของระดับแรงดันใช้งาน คือที่ระดับแรงดัน 26.4 kV เป็นเวลา 30 วินาที

ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดันสูงเป็นดังรูปที่ 4.49 และ 4.50



รูปที่ 4.49 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดันสูงที่ระดับแรงดัน 40 kV



รูปที่ 4.50 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดันสูงที่ระดับแรงดัน 26.4 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดันนั้นสามารถสรุปเปรียบเทียบผลตามแต่ละระดับได้ดังตารางที่ 4.6 ถึง 4.8 โดยที่รูปแบบของแรงดันที่ทำการทดสอบมีทั้งหมด 5 กรณีได้แก่

- 1) รูปคลื่นสี่เหลี่ยม
- 2) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันที่ถูกจำกัดฮาร์มอนิกส์อันดับ 3
- 3) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันที่ถูกจำกัดฮาร์มอนิกส์อันดับ 5
- 4) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันแบบ PWM ที่อัตราการมอดูเลตความถี่ 10 เท่า
- 5) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันแบบ PWM ที่อัตราการมอดูเลตความถี่ 20 เท่า

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบ 10 kV

	รูปแบบแรงดันกรณีที่				
	1	2	3	4	5
$\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$ (kV)	10.43	10.90	10.60	10.98	10.19
V_{rms} (kV)	9.88	10.98	10.68	10.92	10.20
%THD	3.2	1.5	1.5	1.6	0.5
Q_{IEC}	898.6 fC	926.6 fC	928.3 fC	931.9 fC	929.1 fC
V_{dc1} (V)	37.73	26.09	25.73	27.10	24.85
V_{dc2} (V)	-	24.74	24.72	26.10	24.52
I_{dc1} (A)	2.88	0.54	0.59	0.55	0.64
I_{dc2} (A)	-	0.92	0.83	0.82	0.92
P_1 (W)	108.66	14.09	15.18	14.91	15.9
P_2 (W)	-	22.76	20.52	21.40	22.56
P_{total} (W)	108.66	36.85	35.7	36.31	38.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบ 20 kV

	รูปแบบแรงดันกรณีที่				
	1	2	3	4	5
$\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$ (kV)	20.66	20.93	20.33	20.92	20.75
V_{rms} (kV)	19.54	21.04	20.45	20.83	20.75
%THD	3.2	1.5	1.4	1.6	0.5
Q_{IEC}	965.2 fC	1.862 pC	1.863 pC	1.863 pC	1.856 pC
V_{dc1} (V)	74.80	50.40	50.13	54.11	51.25
V_{dc2} (V)	-	48.23	48.39	52.25	50.38
I_{dc1} (A)	5.80	0.91	1.00	0.98	1.06
I_{dc2} (A)	-	1.65	1.46	1.43	1.59
P_1 (W)	433.84	45.86	50.13	53.03	54.33
P_2 (W)	-	79.58	70.65	74.72	80.10
P_{total} (W)	433.84	125.44	120.78	127.75	134.43

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV

	รูปแบบแรงดันกรณีที่				
	1	2	3	4	5
$\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$ (kV)	40.48	40.56	40.64	40.41	40.96
V_{rms} (kV)	40.94	40.67	40.92	40.23	41.02
%THD	3.2	1.4	1.0	1.8	0.5
Q_{IEC}	1.322 pC	1.858 pC	1.868 pC	2.066 pC	1.929 pC
V_{dc1} (V)	145.70	99.50	98.00	103.60	101.00
V_{dc2} (V)	-	95.90	95.30	101.00	99.30
I_{dc1} (A)	11.19	1.68	1.84	1.72	1.95
I_{dc2} (A)	-	2.91	2.82	2.84	2.93
P_1 (W)	1630.38	167.16	180.32	178.19	196.95
P_2 (W)	-	279.07	268.75	286.84	290.95
P_{total} (W)	1630.38	446.23	449.07	465.03	487.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางสรุปผลพบว่าการใช้วงจรแปลงผันกำลังสำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนสามารถใช้แรงดันทั้ง 5 รูปแบบในการทดสอบได้ตามมาตรฐาน กล่าวคือสามารถป้อนแรงดันผ่านหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงเพื่อให้ได้แรงดันทดสอบที่ต้องการได้ มีค่าความถี่ตามที่ต้องการ มีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ต่ำ และมีสัญญาณรบกวนในระบบการทดสอบไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานกำหนด แต่ในรูปคลื่นแรงดันทั้ง 5 ชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกรูปคลื่น 5 ระดับแรงดันที่ถูกต้องฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 สำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันเนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของการสวิตชิงด้วยความถี่มูลฐาน ซึ่งส่งผลในเรื่องของการมีความสูญเสียจากการสวิตชิงต่ำ และรูปคลื่นแรงดันนี้ยังมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ที่ต่ำอีกด้วย

ส่วนของการทดสอบการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันโดยการใช้วงจรแปลงผันกำลังสำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสามารถทำการทดสอบได้ตามมาตรฐาน IEC 61869 และ IEC 60270



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลกาทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้ในการแปลงความถี่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง โดยเน้นการออกแบบที่ใช้หลักการของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมาประยุกต์ใช้เพื่อลดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ที่จะเกิดขึ้น และมีการออกแบบสัญญาณควบคุมเพื่อสร้างรูปคลื่นแรงดันเพื่อทำการทดสอบนี้ โดยรูปคลื่นที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันได้แก่

- 1) รูปคลื่นสี่เหลี่ยม
- 2) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันที่ถูกจำกัดฮาร์มอนิกส์อันดับ 3
- 3) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันที่ถูกจำกัดฮาร์มอนิกส์อันดับ 5
- 4) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันแบบ PWM ที่อัตราการมอดูเลตความถี่ 10 เท่า
- 5) รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันแบบ PWM ที่อัตราการมอดูเลตความถี่ 20 เท่า

ซึ่งจากผลการทดสอบใช้วงจรแปลงผันกำลังสำหรับป้อนแรงดันผ่านหม้อแปลงทดสอบให้กับวงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จพบว่าแรงดันทั้ง 5 รูปแบบที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด และเป็นไปตามเงื่อนไขของการออกแบบประกอบสร้าง คือ

- 1) รูปคลื่นแรงดันทุกรูปคลื่นที่ทำการทดสอบ เมื่อป้อนให้กับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงพบว่าสามารถปรับระดับแรงดันถึงค่าระดับแรงดันทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงตามที่มาตรฐาน IEC 61869 กำหนดได้
- 2) รูปคลื่นแรงดันทุกรูปคลื่นที่ทำการทดสอบสามารถสร้างความถี่ที่มีความถี่มากกว่าสองเท่าของความถี่ใช้งานได้ที่ความถี่ 200 Hz
- 3) รูปคลื่นแรงดันทุกรูปคลื่นที่ทำการทดสอบ เมื่อป้อนให้กับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงพบว่าที่ด้านแรงดันสูงมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ไม่เกิน 5% เป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60270 กำหนด
- 4) รูปคลื่นแรงดันทุกรูปคลื่นที่ทำการทดสอบในระบบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนมีค่าสัญญาณรบกวนไม่เกิน 2.5 pC ซึ่งเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด
- 5) วงจรแปลงผันกำลังที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้นสามารถนำมาใช้สำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงได้ตามมาตรฐาน

สำหรับส่วนของการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงได้ใช้รูปคลื่น 5 ระดับแรงดันที่ถูกจำกัดฮาร์โมนิกอันดับ 5 สำหรับการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันเนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของการสวิตชิงด้วยความถี่มูลฐาน ทำให้มีความสูญเสียจากการสวิตชิงต่ำ และรูปคลื่นแรงดันนี้ยังมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ที่ต่ำ มีค่าสัญญาณรบกวนในระบบการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนเป็นไปตามมาตรฐาน โดยสรุปแล้ววงจรแปลงผันกำลังที่ออกแบบและประกอบสร้างนี้สามารถใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันในการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูงได้ตามมาตรฐานสากล

5.2 พิกัดของวงจรแปลงผันกำลัง

วงจรแปลงผันกำลังที่ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นมีพิกัดดังนี้

- พิกัดกำลัง 20 kVA
- พิกัดแรงดัน 400 V
- ความถี่ 200 Hz

5.3 ข้อเสนอแนะ

1) วงจรการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดันนี้ยังไม่มีระบบการป้องกันแบบตัดวงจรอัตโนมัติเมื่อเกิดกัลต์วงจร หรือการเบรกควานในวงจรการทดสอบ ซึ่งจะต้องทำการออกแบบและติดตั้งเพื่อความปลอดภัย

2) การใช้งานตัวสร้างสัญญาณควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังมีความไวไม่สูงมาก ดังนั้นหากต้องการสร้างสัญญาณที่มีความถี่สูงอาจไม่สามารถทำได้ หรืออาจต้องจัดหาไมโครคอนโทรลเลอร์รูปแบบอื่นทดแทน

3) การสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ตัวอุปกรณ์ขึ้น ดังนั้นจะต้องมีการออกแบบระบบการระบายความร้อนให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 61869-1, Edition 1.0 – 2007-10, **Instrument transformers – Part 1: General requirements**
- [2] H. Mohseni, A. Shaygani Akmal, J. Jadidian, E. Hashemi, E. Agheb, A. Naieny, A.Ghorbandaeipour, K. Niayesh, member, IEEE. 2008. “Induced Voltage Test of Distribution Transformers Using Static Frequency Inverters.” **2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition.**
- [3] Lei Shi, Chaolong Shan, Xusheng Wu and Nan Zhao. 2011. “Comparison of solid-state frequency converter and rotary frequency converter in 400Hz power system.” **2011 International Conference on Electrical Machines and Systems.**
- [4] B. Leelachariyakul, P. Yutthagowith, and S. Potivejkul. 2015. “PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter.” **9th International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures and International Student Session.**
- [5] Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch and Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau. 2015. “**Power Electronic Control Device for High Voltage Test Transformers.**”
- [6] กัทริน กิจเจริญ อานันท์วัฒน์ คุณากร วรศิลป์ ลิ้มเจริญ กิตติพิศ จริญญารัตน์ ปุณยวีร์ ฉายศิริ และ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท. 2559. “การทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน สำหรับหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน.” **The 39th Electrical Engineering Conference.**
- [7] ณรงค์ ขอนตะวัน. **เครื่องวัดไฟฟ้า.** กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์เอราวัณการพิมพ์ , ม.ป.ป.
- [8] Stephen D. Umans. 2014. “**Fitzgerald & Kingsley’s Electrical Machinery.**” 7th Edition. McGraw-Hill.
- [9] ดร.สำรวย สังข์สะอาด. 2549. “**วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.**” พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] IEC 60270, **High-voltage test techniques – Partial discharge measurement.**
- [11] ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท. 2561. “**วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.**” พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มินเซอริวิส ซัพพลาย, 2561.
- [12] Wolfgang Hauschild and Eberhadr Lemke. 2014. “**High-Voltage Test and Measuring Techniques.**” Springer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] รศ.ดร.วีรเชษฐ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2549. “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics.” พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: วี.เจ.พรีนติ้ง.
- [14] Daniel W. Hart. “Power Electronics.” McGraw-Hill.
- [15] Muhammad H. Rashid. 2011. “Power Electronics Handbook.” Third Edition. USA: Elsevier.
- [16] Mohammadreza Derakhshanfar. 2010. “Analysis of different topologies of multilevel inverter.” Master of Science Thesis. Sweden: Chalmers University of Technology.
- [17] Andreas Nordvall. 2011. “Multilevel Inverter Topology Survey.” Master of Science Thesis in Electric Power Engineering. Department of Energy and Environment. Chalmers University of Technology.
- [18] ประชา คำภักดี. 2549. “การวิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้วยวงจรกรองต้านออกของอินเวอร์เตอร์สำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

โปรแกรมการคำนวณมุมสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแรงดันด้านออกของวงจรคาสเคดเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่าย 2 แหล่งจ่าย สามารถหาสมการฟังก์ชันรูปคลื่นโดยอาศัยหลักการของอนุกรมฟูเรียร์ จะได้ว่า

$$V_o = \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_{h=1}^{\infty} [\cos(h_1) + \cos(h_2)] \quad (ก.1)$$

เมื่อ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรวมของแต่ละแหล่งจ่าย
 i คือ มุมที่สวิตชิง
 h คือ ลำดับฮาร์โมนิกส์

ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index; M) เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดขององค์ประกอบความถี่มูลฐานแรงดันด้านออกกับขนาดขององค์ประกอบความถี่มูลฐานของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 แหล่งจ่ายมีค่าเป็น h_1)

$$h_1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} [\cos(h_1) + \cos(h_2)] \quad (ก.2)$$

$$M = \frac{h_1}{2(4V_{dc}/\pi)} \quad (ก.3)$$

$$M = \frac{\cos h_1 + \cos h_2}{2} \quad (ก.4)$$

และหากต้องการกำจัดฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันด้านออก สามารถทำได้โดยการเลือกมุมจุดขนวน h_1 และ h_2 ที่เหมาะสมด้วยการคำนวณตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน จากสมการ

$$\cos h_1 + \cos h_2 = 2M \quad (ก.5)$$

และ

$$\cos(h_1) + \cos(h_2) = 0 \quad (ก.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดให้กำลังฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index; M) มีค่าเป็น 0.8

%ให้ x1 แทนมุมที่ 1 และ x2 แทนมุมที่ 2

%กำหนดตัวแปรเริ่มต้น

x1=15;

x2=50;

%กำหนดจำนวนรอบการคำนวณ

for(i=1:10)

i

%แปลงมุมจากดีกรีเป็นเรเดียน

x1=x1*pi()/180;

x2=x2*pi()/180;

Xold=[x1;x2];

%สร้างเมตริกซ์ระบบสมการ

F=[cos(x1)+cos(x2);cos(3*x1)+cos(3*x2)];

%เมตริกซ์อนุพันธ์ F

dF=[-(sin(x1)) -(sin(x2));-(3*sin(5*x1)) -(3*sin(5*x2))];

%หาค่าตอบสมการ

T=[1.6;0];

ddF=(inv(dF))*(T-F);

Xnew=Xold+ddF;

Xnew=Xnew*180/pi();

x1=Xnew(1,1)

x2=Xnew(2,1)

i=i+1;

end

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดให้กำลังฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index; M) มีค่าเป็น 0.8

%ให้ x1 แทนมุมที่ 1 และ x2 แทนมุมที่ 2

%กำหนดตัวแปรเริ่มต้น

x1=10;

x2=45;

%กำหนดจำนวนรอบการคำนวณ

for(i=1:10)

i

%แปลงมุมจากดีกรีเป็นเรเดียน

x1=x1*pi()/180;

x2=x2*pi()/180;

Xold=[x1;x2];

%สร้างเมตริกซ์ระบบสมการ

F=[cos(x1)+cos(x2);cos(5*x1)+cos(5*x2)];

%เมตริกซ์อนุพันธ์ F

dF=[-(sin(x1)) -(sin(x2));-(5*sin(5*x1)) -(5*sin(5*x2))];

%หาค่าตอบสมการ

T=[1.6;0];

ddF=(inv(dF))*(T-F);

Xnew=Xold+ddF;

Xnew=Xnew*180/pi();

x1=Xnew(1,1)

x2=Xnew(2,1)

i=i+1;

end

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

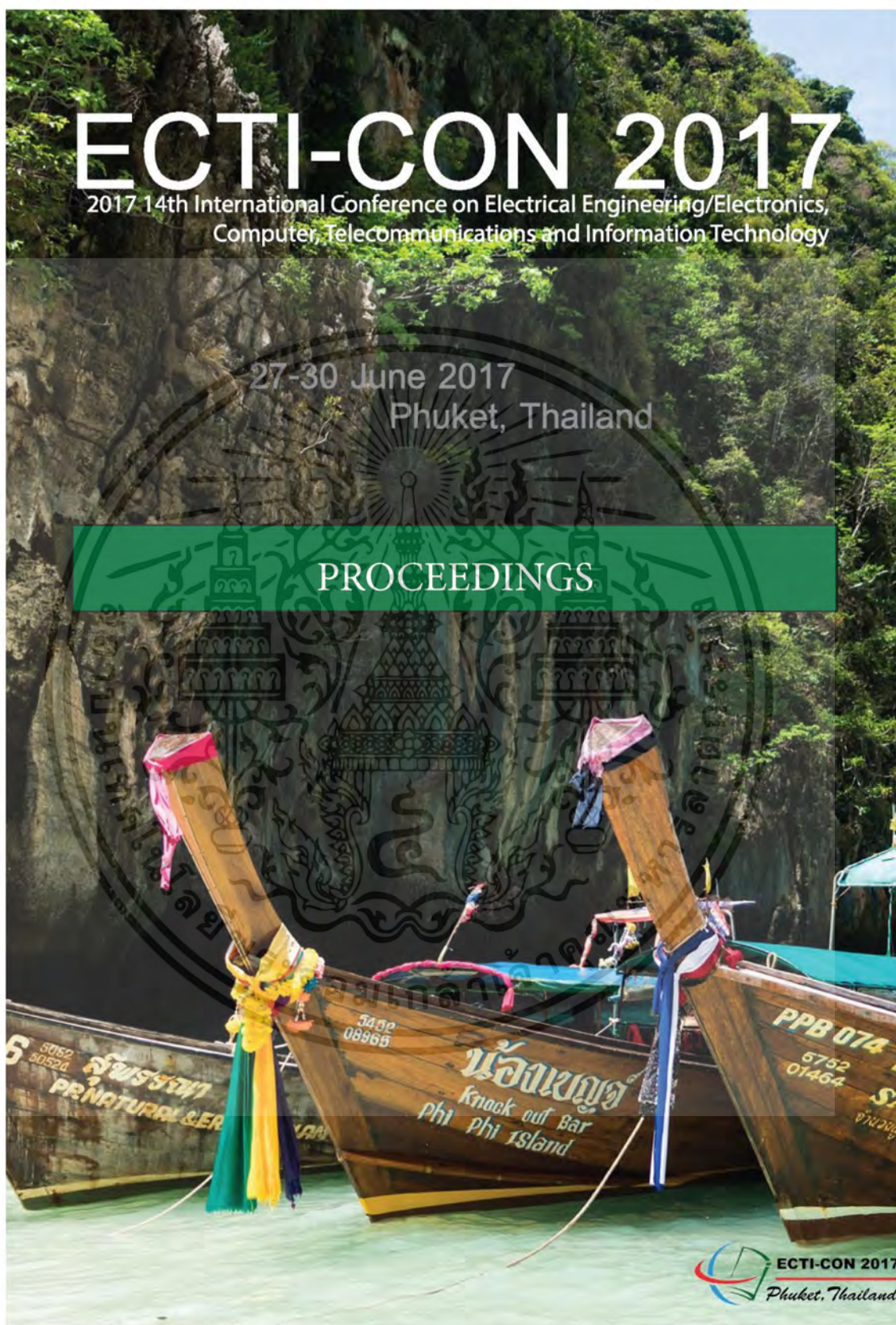


ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Phattarin Kitcharoen, Anantawat Kunakorn, Peerawut Yutthagowith and Worrakan Limcharoen, “Multilevel Frequency Converters and Noise Reduction for Partial Discharge Tests,” 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2017), PP.526-529, Phuket, Thailand, June 27-30, 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Multilevel Frequency Converters and Noise Reduction for Pratial Discharge Tests

Phattarin Kitcharoen

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

Peerawat Yutthagowith

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

Anantawat Kunakorn

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

Worrakan Limcharoen

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

Abstract— This paper presents the usage of multilevel frequency converters for partial discharge tests and an approach for noise reduction. The comparison of the background noise generated by square wave (2-level) and 5-level frequency converters with the frequency of 200 Hz is presented. The testing frequency of 200 Hz is necessary for partial discharge test of transformers because of avoiding saturation effect of the iron core. Therefore, the frequency converter must be generated the voltage with the frequency of more than two time of the power frequency. The comparison of background noise and output voltage waveform generated by the developed converters is presented. Both frequency converters with the noise reduction technique (applied a low pass filter) have very low background noise, and the generated voltages are closed to pure sinusoidal waveform when the frequency converters supply to PD test circuit.

Keywords—5-level inverter, background noise, noise reduction, square wave

I. INTRODUCTION

High voltage test on transformers is required to confirm their insulation performance. The standard [1] requires many test items, especially AC voltage withstand, partial discharge (PD) detection, and so on. The testing voltage over two times of rated voltage is required in those tests to prevent the iron core saturation. Therefore, the power supply must generate the voltage with the frequency of over 2 times of the power frequency and with sufficient power generation.

Due to the large progressive development of power electronics technology, i.e. increasing rated voltage, increasing rated power of switching device, and phase-fired control technique of switching devices, it leads to the source based on power electronic more powerful. There are various types of voltage sources, such as variable voltage source and variable frequency voltage source [2]. The frequency converter is interested to employ in the PD test circuit.

Frequency converter based on power electronic modules can be developed in several methods. In this paper, the frequency converters based on cascaded H-bridge multilevel approach were developed and tested to check the performance in PD test. The developed converters compose of a square wave

(2-level) and 5-level waveform generators. The voltage waveform and background noise generated by the developed converters are compared. For noise reduction, the low pass filter was applied in the test circuit. It is found that the developed converters with the low pass filter can generate the voltage with low noise level being less than 2 pC. With this background noise level, the developed converters can be used in the PD test according to the standard requirement.

II. FREQUENCY CONVERTER

In this research, the general frequency converter has two main circuits composing of a rectifier and an inverter. The rectifier converts 50 Hz or 60 Hz AC input voltage to output DC voltage. Then, the inverter switches the DC voltage with the controlled time and converts the DC voltage to AC voltage with the preferred frequency (200 Hz to 400 Hz). This AC voltage is used to apply to the load [3]. In the part of inverter, the multilevel cascaded H-bridges inverter was selected to convert DC to AC voltages, because the multilevel topologies are the best alternative to implement low-frequency based inverters with low output voltage distortion [4].

A single-phase structure of an m -level cascaded inverter is illustrated in Figure 1. Each separate dc source (SDCS) is connected to a single-phase full-bridge or H-bridge inverter. Each inverter level can generate three different voltage outputs, $+V_{dc}$, 0, and $-V_{dc}$ for converting the DC source voltage to the AC output voltage by different combinations of the four switches: S_1 , S_2 , S_3 , and S_4 . To obtain $+V_{dc}$, switches of S_1 and S_4 are turned on, whereas to obtain $-V_{dc}$ switches of S_2 and S_3 are turned on. By turning on either S_1 and S_2 or S_3 and S_4 , the output voltage will be zero. The AC output voltages of each of the different full-bridge inverter levels are connected in series, therefore the synthesized voltage waveform is the sum of the inverter output voltages [5]. In general, N series connected full-bridges can generate $2N+1$ switching level per phase leg. The number of output phase voltage levels, m , in a cascade inverter is defined by $m = 2s + 1$ [6].

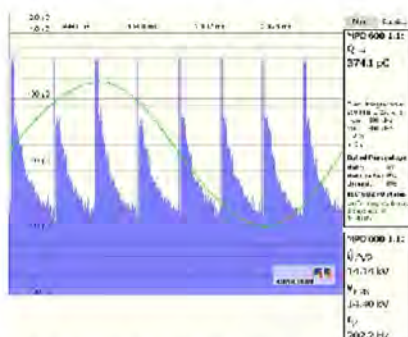


Figure 5. Background noise from the 5-level frequency converter.

B. PD detection circuit with isolate transformer

In this case, the isolating transformer with series inductance of 6.22 mH was connected at low voltage side of the testing transformer. The results of the background noise are presented in Figures 6 and 7.

After installed the isolate transformer, the square wave frequency converter background noise was reduced 157.8 pC and the 5-level frequency converter was reduced to 82.71 pC. However, the background noise is still so high and it is not acceptable in the PD test.

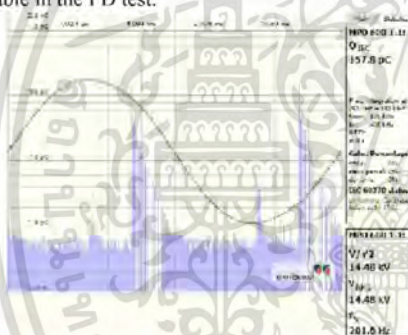


Figure 6. Background noise from square wave frequency converter with isolate transformer.

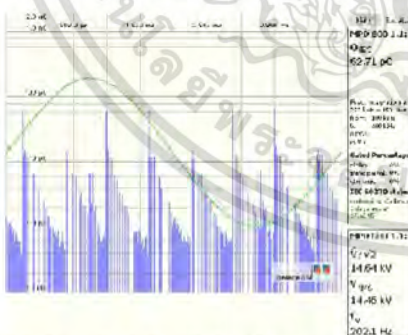


Figure 7. Background noise from the 5-level frequency converter with the isolating transformer.

C. PD detection circuit with capacitor filter

In this case, only the capacitor of 4.4 μF was connected in parallel on the low voltage side of the testing transformer. The results of the background noise are presented in Figures 8 and 9.

After installed the capacitor, the square wave frequency converter background noise was reduced 62.72 pC and the 5-level frequency converter was reduced to 24.73 pC. However, the background noise is still so high and it is not acceptable in the PD test.

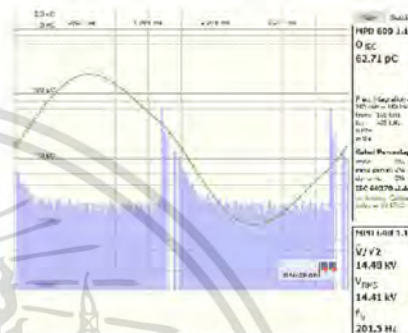


Figure 8. Background noise from the square wave frequency converter with capacitor connection.

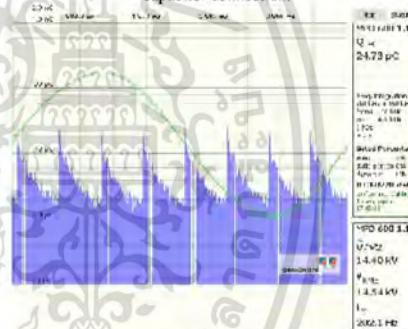


Figure 9. Background noise from the 5-level frequency converter with capacitor connection.

D. PD detection circuit with the low-pass filter

For noise reduction in the PD test with the developed converters, it is necessary to install a low pass filter. In this case, the isolating transformer and the capacitor of 4.4 μF were connected on the low voltage side of the testing transformer. The connection of the isolating transformer and the capacitor acts as the low pass filter. It is noted that the leakage inductance of the isolating transformer is about 6 mH, so the cut of frequency of the filter is about 1 kHz and unwanted noise signals are attenuated. The results of the background noise signals are presented in Figures 10 and 11.

After installed the filter, the background noise of the square wave frequency converter was reduced 1.562 pC and of the 5-level frequency converter was reduced to 0.716 pC. These

background noise levels are low enough for the PD test in any kinds of high voltage equipment.

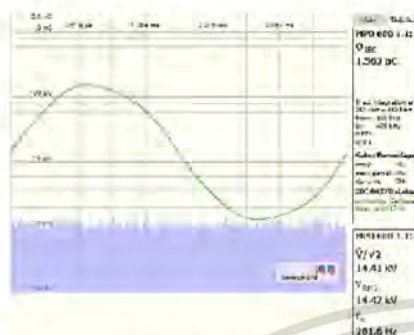


Figure 10. Background noise from the square wave frequency converter with the low-pass filter.

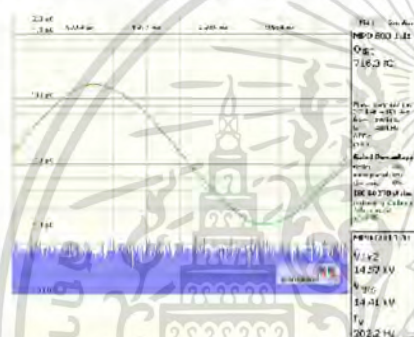


Figure 11. Background noise from the 5-level frequency converter with the low-pass filter.

It is noticed on the voltage waveform measured at the high voltage side of the testing transformer are acceptable in all cases. However, the 5-level converter provides the better sinusoidal waveform and the lower background noise signal than the other developed converter.

VI. CONCLUSIONS

From the test result, the constructed frequency converter sources with the low pass filter can provide very background noise and can be used in partial discharge test according to the IEC standard. The 5-level converter provides more pure sinusoidal waveform and lower background noise than the other. The developed frequency converters with the filter can be used for PD tests on high voltage equipment according to the standard requirement.

REFERENCES

- [1] "High Voltage Test Techniques: Partial Discharge Measurement," IEC Standard 60270: 2000
- [2] B. Leelachariyakul, P. Yuthagowith, and S. Potivejkul, "PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter," in ISFT, 2015.
- [3] Lei Shi, Chaolong Shan, Xusheng Wu, Nan Zhao, "Comparison of solid-state frequency converter and rotary frequency converter in 400Hz power system," in ICEMS, 2011.
- [4] T. Suneel, "Multi-Level Inverters: A Review Report," International Journal of New Technologies in Science and Engineering Vol. 1, Issue. 1, Jan. 2014
- [5] Power Electronics Handbook, 3rd ed., Muhammad H. Rashid, 2011
- [6] D.Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, "Pulse Width Modulation for Power Converters," in principles and practice., A John Wiley & Sons, INC., Publication, 2003.
- [7] Wolfgang Hauschild and Eberhard Lemke, "High-Voltage Test and Measuring Techniques," 2014.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายภัทรินทร์ กิจเจริญ

วัน เดือน ปีเกิด 18 สิงหาคม 2536

ที่อยู่ 39/527 หมู่บ้านเพชรเกษม4 ถนนทวีวัฒนา

แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

ประวัติการศึกษา พ.ศ.2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย

โรงเรียนราชวินิตบางแคปานขำ

พ.ศ.2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้