

การพัฒนาระบบทดสอบแรงดันสูงโดยใช้เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่
ไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของ
หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE TESTING SYSTEM BASED ON A
POWER FREQUENCY CONVERTER USED IN PARTIAL DISCHARGE TESTS OF
POTENTIAL TRANSFORMERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-D-018-025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE TESTING SYSTEM BASED ON A
POWER FREQUENCY CONVERTER USED IN PARTIAL DISCHARGE TESTS OF
POTENTIAL TRANSFORMERS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021

KMITL-2021-EN-D-018-025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดเพี้ยนโดยรวมของสัญญาณแรงดันด้านออกของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ และการใช้พลังงาน พบว่าการวิเคราะห์คุณลักษณะและประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอจากผลการทดลองแบบจำลอง ให้ผลทดสอบที่ดี โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างแรงดันขาออกที่มีคุณภาพสูงตามข้อกำหนด มาตรฐานที่แรงดันทดสอบ $40 \text{ kV}_{\text{rms}}$ มีค่า THD_v น้อยกว่า 2% และสัญญาณรบกวนพื้นหลังมีค่าน้อยกว่า 2.5 pC นอกจากนี้ ยังศึกษาถึงความถี่ในการสวิตซ์ที่เหมาะสม และอัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด (m_a) ผลทดสอบพบว่าการปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ตั้งแต่ 1 kHz ถึง 20 kHz ที่อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด (m_a) 0.8 และ 1.0 ไม่มีผลต่อระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง และ THD_v โดยความถี่ในการสวิตซ์ซึ่งตั้งแต่ 1 kHz ถึง 4 kHz ที่อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด (m_a) 1.0 เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด เนื่องจากมีการใช้พลังงานขาเข้าต่ำสุด นอกจากนี้ ระบบที่พัฒนาได้ถูกนำไปใช้ในการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องม้อวัดแรงดันจริงด้วย ซึ่งให้ประสิทธิภาพผลที่ดี ดังนั้นระบบทดสอบที่นำเสนอจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับใช้ในระบบแรงดันสูง และการทดสอบการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Development of A High-Voltage Testing System Based on A Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers
Student	Mr. Tongpian Prombud
Student ID.	62601210
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Peerawut Yutthagowith

ABSTRACT

This thesis presents development of a high-voltage (HV) testing system based on a power frequency converter in HV and partial discharge tests of potential transformer. The converter with the proper filter is utilized as a low-voltage source connected with a HV transformer in the HV and partial discharge tests. The converter is composed of a 3-phase rectifier, a power converter based on pulse width modulation with a unipolar switching technique. The vital problem in the HV and partial discharge tests is that the converter with the high rate of rise and fall of voltage switching always generates the high noise level affecting the background noise in the partial discharge test. In some partial discharge tests, the noise level is higher than the acceptable level of the PD test requirement in HV equipment such as potential transformers, distribution transformer, and so on. It is advantageous, if the efficient partial discharge testing system based on a power frequency converter will be developed for such test. In this thesis, the proper filter was analyzed and developed to meet the requirements as follows; the applied HV difference (Root mean square voltage and peak voltage/ $\sqrt{2}$) to the test object and its total harmonic distortion should be less than 5%, and also the background noise level in the partial discharge tests should be less than a half of the acceptable PD level of such HV equipment specified by the relevant standards. In the case of the oil-type potential transformer, the acceptable PD level is only 5 pC, so it is quite hard to find the low-cost commercial frequency converter for fulfilling this requirement. For confirming the developed system, the performances of the developed converter have been investigated in terms

of the background noise in the partial discharge test, the total harmonic distortion of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ III ำงอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

output voltage from the high voltage testing transformer side, and the input power consumption. The characteristics of the proposed and developed system are analyzed, and experimental results agree well with the simulation ones. The developed system can generate output voltage having high quality according to the standard requirement. At the test voltage of $40 \text{ kV}_{\text{rms}}$, the THD_v is less than 2%, and the background noise is less than 2.5 pC. Moreover, the proper switching frequency and amplitude modulation index (m_a) were investigated. It is found that the switching frequency from 1 kHz to 20 kHz and modulation indices of 0.8 and 1 do not influence to the background noise level and the THD_v , and the switching frequency of from 1 kHz to 4 kHz and the amplitude modulation index (m_a) of 1 are the best conditions due to the lowest input power consumption. In addition, the developed system has been tested in the partial test of a real potential transformer successfully. With the promising performances, the developed system is an attractive choice to use in HV and partial discharge tests.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การพัฒนาระบบทดสอบแรงดันสูงโดยใช้เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมี้อัดแรงดัน ประสบผลสำเร็จจุล่งได้ด้วยความรู้จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ ตลอดจนการทำงานวิจัย นอกจากนี้ต้องขอนี้ต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนสถานที่และ อุปกรณ์เครื่องมือวัดเครื่องมือทดสอบที่ใช้สำหรับการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร และผู้มีพระคุณที่มีได้กล่าวถึงที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และแสดงความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ รวมทั้งกำลังใจจากเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือทำให้โครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมารดา คุณจำเนียร อินทร์เจ็ก อันเป็นที่เคารพรักรยิ่งของผู้จัดทำ ซึ่งได้เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนผู้จัดทำเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาในทุกๆ ด้านเสมอมา ผู้จัดทำระลึกในพระคุณและกราบขอบพระคุณ ณ ที่นี้

ทองเพียร พรมบุตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และพ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	5
1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 บทนำ.....	10
2.2 การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง.....	11
2.3 การตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	12
2.4 วงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	15
2.5 การเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	18
2.6 การทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน.....	23
2.7 ทฤษฎีคอนเวอร์เตอร์.....	26
2.7.1 ชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-link).....	27
2.7.2 เทคนิคการควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width modulation : PWM).....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้าง.....	32
3.1 หลักการในการออกแบบ.....	32
3.2 ส่วนประกอบของวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	33
3.3 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแส.....	35
3.4 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	36
3.5 การออกแบบและประกอบสร้างชุดวงจรควบคุม.....	38
3.6 วงจรขับเคลื่อนควบคุมคอนเวอร์เตอร์.....	41
3.7 วงจรรองความถี่.....	45
3.7.1 การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ด้วยโปรแกรม EMTP กรณีไม่ต่อวงจรรองความถี่.....	45
3.7.2 การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ด้วยโปรแกรม EMTP กรณีต่อวงจรรองความถี่.....	49
บทที่ 4 การทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	53
4.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง.....	53
4.1.1 ทดลองประสิทธิภาพพวงจรรอง.....	53
4.1.2 ทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตชิง (f_s) และอัตราการมอดูเลต (m_o).....	54
4.2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพพวงจรรอง.....	56
4.3 ผลการทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตชิง (f_s) และอัตราการมอดูเลต (m_o).....	59
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการออกแบบ.....	70
5.2 สรุปการทดลอง.....	70
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	109

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าแรงดันทดสอบความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า (Withstanding voltage test).....	26
2.2 ค่าแรงดันที่ป้อนและระดับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ยอมรับได้ของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน.....	26
2.3 เงื่อนไขการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส สวิตซ์ 4 ตัว และแรงดันไฟฟ้าด้านออกของการควบคุม คอนเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar).....	29
4.1 ผลสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตชิง (f_s) 1- 20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV.....	60
4.2 ผลสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตชิง (f_s) 1- 20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV.....	60
4.3 ผล THD _v โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตชิง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV.....	61
4.4 ผล THD _v โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตชิง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV.....	62
4.5 ผล DC-link โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตชิง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV.....	63
4.6 ผล DC-link โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตชิง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV.....	63
4.7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตชิง (f_s) 1-20 kHz ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ระดับแรงดัน 40 kV.....	68
4.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตชิง (f_s) 1-20 kHz ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ระดับแรงดัน 30 kV.....	69
5.1 ผลทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีความถี่สวิตชิง (f_s) 2 kHz ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0.....	71

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 รูปคลื่นแรงดันทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ ขณะไม่มีโหลด ที่ความถี่ 50 Hz.....	2
1.2 รูปคลื่นแรงดันทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ ขณะมีโหลด ที่ความถี่ 50 Hz.....	2
1.3 รูปเครื่องกำเนิดแรงดันทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนปัจจุบัน.....	3
1.4 รูปเครื่องกำเนิดแรงดันทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่จัดสร้าง.....	4
1.5 โครงสร้างระบบทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	4
1.6 ขั้นตอนการวิจัย.....	8
2.1 การเกิดกระแสพัลส์ในการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	13
2.2 แรงดันตกคร่อมฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	14
2.3 รูปคลื่นกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	14
2.4 วงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่แนะนำใน IEC60270.....	15
2.5 วงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยกระแสพัลส์.....	16
2.6 วงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....	17
2.7 ตัวอย่างการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	18
2.8 รูปแบบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	19
2.9 วงจรสมมูลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	19
2.10 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนแต่ละรูปแบบ.....	19
2.11 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนโคโรนาในอากาศ ของประจุกว และประจุลบ.....	20
2.12 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว ของประจุกว และประจุลบ.....	20
2.13 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน XLPE ของประจุกว และประจุลบ.....	21
2.14 แบบจำลองวงจรสำหรับใช้วิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากรูปคลื่นประจุ.....	21
2.15 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนโคโรนาในอากาศ ก) ขณะเริ่มเกิด และ ข) เมื่อเพิ่มระดับแรงดันเพิ่มขึ้น.....	22
2.16 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวบนฉนวนแข็ง ก) ขณะเริ่มเกิด และ ข) เมื่อเพิ่มระดับแรงดัน เพิ่มขึ้น.....	22
2.17 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน XLPE ก) ขณะเริ่มเกิด และ ข) เมื่อเพิ่มระดับแรงดันเพิ่มขึ้น.....	23
2.18 หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่พิกัดแรงดัน 24 kV.....	24
2.19 วงจรการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัด.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 ลำดับการป้อนแรงดันเพื่อทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัด.....	25
2.21 สวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์.....	27
2.22 แรงดันระลอกคลื่นของวงจรเรียงกระแสแบบ ก) 3 เฟส และ ข) 1 เฟส.....	28
2.23 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าเทคนิคแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar).....	29
2.24 การต่อเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full bridge).....	29
2.25 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์.....	30
3.1 โครงสร้างชุดทดสอบเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น.....	34
3.2 โครงสร้างระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	34
3.3 ระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เชื่อมต่อกับสายสัญญาณใยแก้วนำแสง Omicron รุ่น MPD 600.....	34
3.4 แหล่งจ่ายไฟให้วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส.....	35
3.5 ไดอะแกรมวงจรเรียงกระแสตรงแบบ 3 เฟสสำหรับจ่ายให้วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	35
3.6 ไดโอดเรียงกระแสตรงแบบ 3 เฟส.....	36
3.7 ชุดวงจรเรียงกระแสตรงแบบ 3 เฟส ที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	36
3.8 แผนผังวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์.....	37
3.9 วงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์.....	37
3.10 ชุดตัวบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F429I DISCOVERY.....	38
3.11 ไดอะแกรมการต่อ ไอจีบีที (IGBT) เพื่อทดสอบการสวิตช์แบบเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM).....	39
3.12 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM).....	39
3.13 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณการมอดูเลต ควบคุมดิจิทัลแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM).....	40
3.14 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไซน์ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz ความถี่สวิตช์ (f_s) 2.0 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (THD_v) 52%.....	40
3.15 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไซน์ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ความถี่สวิตช์ (f_s) 2.0 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (THD_v) 49.36 %.....	41
3.16 ชุดวงจรขับเคลื่อนควบคุมคอนเวอร์เตอร์.....	42
3.17 ชุดวงจรเร็คทูลิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก 15 / 0 / -15 V.....	42
3.18 ไอซีออปโตคัปเปิลเลอร์ (Opto coupler) เบอร์ HCPL-3120.....	43
3.19 วงจรขับเคลื่อนแบบแยกกราวด์ควบคุมสวิตช์ไอจีบีที (IGBT).....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X ึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 เวลาเดดไทม์ (Dead time) ที่สวิตช์ไอจีบีที (IGBT).....	44
3.21 สวิตช์ไอจีบีที (IGBT) ที่ต่อกับวงจรสแน็บเบอร์เพื่อป้องกันไอจีบีทีจากแรงดันและกระแสเกิน.....	44
3.22 สวิตช์ไอจีบีที (IGBT) และวงจรตำแหน่งขาอินพุตเกต (G) ขาเอาต์พุต (Output) คี้อคอลเลกเตอร์ (C) และอิมิตเตอร์ (E).....	45
3.23 ระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่อร่วมกับวงจรกรอง.....	45
3.24 วงจรสมมูลของอิมพีแดนซ์ระบบวัด (CD).....	46
3.25 ฟังก์ชันถ่ายโอนของอิมพีแดนซ์ระบบวัด (CD) ในโดเมนความถี่.....	46
3.26 วงจรสมมูลของระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีไม่ต่อวงจรกรอง.....	47
3.27 ฟังก์ชันถ่ายโอนของแรงดันด้านออกกรณีไม่ต่อและต่อวงจรกรอง.....	47
3.28 สัญญาณแรงดันด้านออกที่ตำแหน่งวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยการจำลองป้อนกระแสพัลส์ขนาด 2.5 pC.....	48
3.29 รูปสัญญาณแรงดันด้านเข้า และด้านออกกรณีไม่ต่อวงจรกรอง.....	49
3.30 สัญญาณแรงดันด้านออกที่ตำแหน่งวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยการจำลองป้อนแรงดันพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ขนาด 100 kV เข้าในระบบ.....	49
3.31 วงจรสมมูลของระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีต่อวงจรกรอง.....	50
3.32 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้านออกกรณีไม่ต่อ และต่อวงจรกรอง.....	51
3.33 สัญญาณแรงดันด้านออกที่ตำแหน่งวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยการจำลองป้อนแรงดัน 100 kV พีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) เข้าในระบบที่ต่อวงจรกรอง.....	51
3.34 รูปสัญญาณแรงดันด้านเข้าและด้านออกโดยการจำลองป้อนแรงดัน 100 kV พีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) เข้าในระบบที่ต่อวงจรกรอง.....	52
4.1 ระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่อร่วมกับวงจรกรอง.....	54
4.2 วงจรสมมูลของระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีต่อวงจรกรอง.....	54
4.3 โครงสร้างเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้น.....	55
4.4 โครงสร้างระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเมื่อต่อกับระบบ.....	55
4.5 ผลที่ได้จากเครื่องตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (M_i) ขณะทำการทดลอง.....	56
4.6 ผลสัญญาณรบกวนกรณีไม่มีวงจรกรอง อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 3.2 kHz ระดับแรงดัน 14 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ **XI** อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ผลสัญญาณรบกวนกรณีมีวงจรรองคาปาซิเตอร์ 1 μF อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 3.2 kHz ระดับแรงดัน 40 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz.....	57
4.8 ผลสัญญาณรบกวนกรณีมีวงจรรองคาปาซิเตอร์ 16 μF อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 3.2 kHz ระดับแรงดัน 40 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz.....	58
4.9 ผลสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV.....	60
4.10 ผลสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV.....	60
4.11 ผล THD _v โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV.....	61
4.12 ผล THD _v โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV.....	62
4.13 ผล DC-link โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV.....	63
4.14 ผล DC-link โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV.....	63
4.15 ผลสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz.....	64
4.16 ผลสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 20 kHz.....	65
4.17 ผลสัญญาณด้านออก อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 40 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz.....	65
4.18 ผลสัญญาณด้านออก อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz.....	65
4.19 ผลสัญญาณด้านออก อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 40 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz.....	66
4.20 ผลสัญญาณด้านออก อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz.....	66
4.21 ผลสัญญาณด้านออก อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ผลทดสอบแรงดัน 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz ความถี่สวิตชิง (f_s) 2 kHz และอัตราการมอดูเลต (m_a) 1.0.....	71
5.2 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกของเพาเวอร์คอนเวอเตอร์แรงดันทดสอบ 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz ความถี่สวิตชิง (f_s) 2 kHz อัตราการมอดูเลต (m_a) 1.0.....	71
5.3 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกของเพาเวอร์คอนเวอเตอร์ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz ความถี่สวิตชิง (f_s) 2 kHz อัตราการมอดูเลต (m_a) 1.0.....	72
5.4 รูปคลื่นด้านออกของเพาเวอร์คอนเวอเตอร์ ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ความถี่สวิตชิง (f_s) 2 kHz และอัตราการมอดูเลต (m_a) 1.0.....	72
5.5 ผลทดสอบโหลดจริงหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันพิกัด 24 kV ด้วยเพาเวอร์คอนเวอเตอร์ที่จัดสร้าง.....	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การทดสอบคุณภาพของฉนวนมีวัตถุประสงค์เพื่อ เลือกวัสดุที่เหมาะสมมีความทนทานต่อแรงดันสูง เพื่อนำวัสดุชนิดนั้นมาทำฉนวน และยังเป็นการจัดระดับคุณภาพของความเป็นฉนวนของวัสดุอีกด้วย กระบวนการทดสอบนั้นจะมีหลายวิธี และวิธีทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) เป็นหนึ่งในวิธีการสำหรับทดสอบคุณภาพของฉนวน ซึ่งมีหลักการและเครื่องทดสอบโดยทั่วไปอธิบายได้ดังนี้คือ ส่วนแรกคือเครื่องสร้างแรงดันสูงเพื่อใช้สำหรับทดสอบโดยอาจจะใช้หม้อแปลงแรงดันแบบปรับระดับแรงดันได้ต่อกับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงทดสอบเพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้ถึงระดับที่ต้องการทดสอบ ส่วนที่สองคือ ชุดเครื่องมือวัด และอุปกรณ์การวัดผลการทดสอบ โดยมีเครื่องวัดจะต่ออยู่กับที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง ทั้งนี้ขั้นตอนการทดสอบจะทำการขึ้นแรงดันทดสอบให้สูงถึงระดับแรงดันทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ

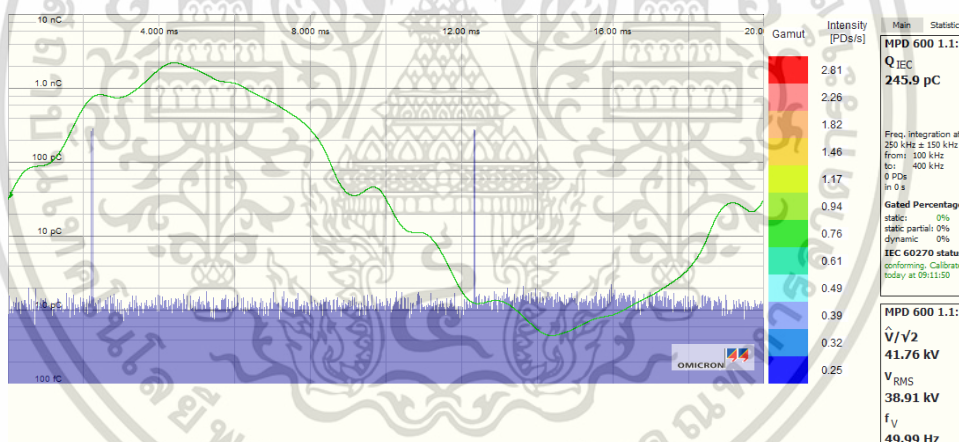
ในปัจจุบันนี้คุณภาพของไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่จ่ายมาให้ผู้ใช้ไฟยังคงมีคุณภาพที่ดี แต่ในอนาคตแนวโน้มคุณภาพทางไฟฟ้าอาจมีแนวโน้มลดลงสืบเนื่องจากการมีสัญญาณรบกวน หรือขยะทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น อันมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟ อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะมีโหลดชนิดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และยังเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในบางครั้งไม่สามารถทำได้เนื่องจากคุณภาพของไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนโดยรวมของสัญญาณ (Total harmonics distortion : THD) เกินค่ามาตรฐาน ส่งผลทำให้ค่าความถูกต้องและค่าความแม่นยำในการทดสอบลดลง การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ตามมาตรฐาน IEC60270 [1] กำหนดไว้ว่าในการทดสอบไฟฟ้าแรงดันสูง ค่ามาตรฐานของคุณภาพไฟฟ้า ในการทดสอบที่ความถี่หลักมูล ต้องมีค่าความผิดเพี้ยนโดยรวมของสัญญาณ ไม่เกิน 5% และอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันสูงสุดต่อค่าประสิทธิผล (Root mean square : RMS) ต้องมีค่าอยู่ภายในช่วง $\pm 5\%$ ในกรณีที่เกิดมีฮาร์โมนิก (Harmonic) ในระบบไฟฟ้าจะทำให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนโดยรวมของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปเกินค่ามาตรฐาน โดยจะแปรผันตามโหลดที่ใช้งาน ณ ช่วงเวลานั้น และหากต้องการทำการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในห้องปฏิบัติการแล้วนั้น จะไม่สามารถทำการทดสอบได้ แต่ก็ยังสามารถแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นได้โดยการใช้มอเตอร์ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับเครื่องทดสอบโดยตรง แต่ก็มีราคาค่อนข้างสูง ยกตัวอย่างเช่น เครื่องกำเนิดสำหรับทดสอบ ขนาดพิกัด 30 kVA มีราคาประมาณสามล้านบาท ซึ่งถือว่ามีความราคาค่อนข้างสูง และอีกปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการวัดคือการอิมิตตัวของแกนเหล็กในอุปกรณ์ทดสอบ กรณีทดสอบหม้อแปลง เครื่องมือวัดแรงดัน หรือ หม้อแปลงแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 รูปคลื่นแรงดันทดสอบการตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่ได้จากหม้อแปลงปรับค่าได้ขณะไม่มีโหลดและในรูปที่ 1.2 รูปคลื่นแรงดันทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ขณะมีโหลดที่ความถี่ 50 Hz แสดงผลอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันสูงสุดหารากที่สองของสองต่อค่าประสิทธิผลมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ 6.82 % ซึ่งค่ามาตรฐานระบุให้มีค่าอยู่ในช่วง $\pm 5 \%$



รูปที่ 1.1 รูปคลื่นแรงดันทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ขณะไม่มีโหลด ที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 1.2 รูปคลื่นแรงดันทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ขณะมีโหลด ที่ความถี่ 50 Hz

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแบ่งเป็นหัวข้อหลักดังนี้

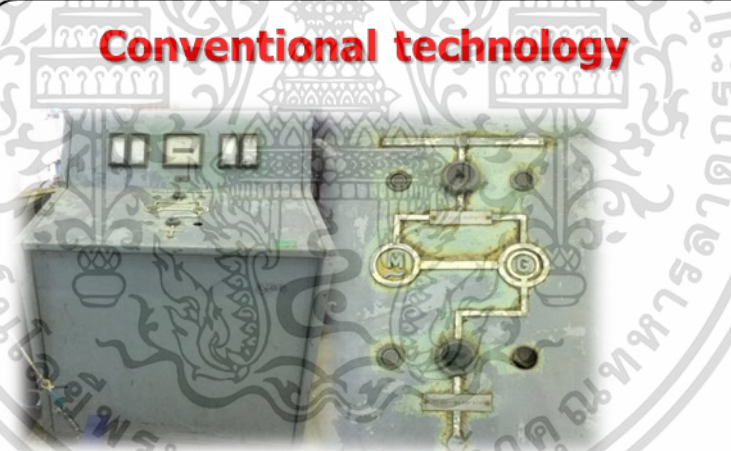
1) เนื่องจากปัญหาคุณภาพทางไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเกินค่ามาตรฐานดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และมาตรฐานได้กำหนดไว้ว่าความผิดพลาดโดยรวมของสัญญาณ ต้องมีค่าไม่เกิน 5% แล้วนั้น ผู้วิจัยจึงได้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาโดยศึกษาปัญหาดังกล่าว

2) ออกแบบสร้างชุดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าด้วยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับทดสอบตรวจวัดการเกิดดิซชาร์จบางส่วน โดยทำงานร่วมกับอุปกรณ์ทดสอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดทางไฟฟ้าแรงสูง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Potential transformer) เป็นหลักโดยเครื่องทดสอบที่จัดสร้างนี้สามารถปรับเปลี่ยนค่าความถี่หลักมูลทางไฟฟ้าได้เพื่อประโยชน์ของการทดสอบในการลดผลของการอ้อมตัวในแกนเหล็ก

3) ทำการทดสอบโดยการสร้างเครื่องทดสอบที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่หลักมูลได้ตั้งแต่ที่ความถี่ 50 Hz จนถึงความถี่ 400 Hz สำหรับการศึกษาการออกแบบก่อนการสร้างจริงนั้นได้ใช้โปรแกรมแมตแล็บ (Matlab) และอีเอ็มทีพี (EMTP) เพื่อช่วยในการออกแบบระบบ วิเคราะห์ความถูกต้องของวงจร และวิเคราะห์คุณภาพของไฟฟ้าที่ได้ก่อนทำการสร้างเครื่องทดสอบจริง อีกทั้งยังได้ศึกษาวงจรกรองความถี่ (Filter circuit) โดยใช้โปรแกรมอีเอ็มทีพี (EMTP) ช่วยในการจำลอง ซึ่งทั้งหมดนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้คือ 1.1) ศึกษามาตรฐานและหลักการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงที่เกี่ยวข้องในการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge : PD) เพื่อใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ 1.2) ศึกษาหลักการ และเทคนิควิธีการออกแบบสร้าง วงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (Power converter) เพื่อวิเคราะห์ และสร้างเครื่องทดสอบที่มีคุณภาพทางไฟฟ้าผ่านตามมาตรฐาน IEC 60270 [1] โดยที่มีสัญญาณรบกวนต่ำผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และสามารถปรับเปลี่ยนความถี่หลักมูลได้

Conventional technology



Price :100,000 \$
Configured to Your Needs

100-Load Testing
For substation and busbar testing, these units provide three separate and independent channels and multiple outputs. Special applications are available.

90 to 400 Hz Induced Voltage Testing
These units are used to simulate the induction of voltage in order to test the capability to withstand high voltages. They usually require low distortion and low partial discharge to permit detection of faults in the tested transformer.

Special Applications and Multiple Sets
For a more compact or stationary installation, the converter is combined with a generator on the same base.

Kato also supplies specially designed testing of other equipment at frequencies from 25-120 Hz, single or multiple phase (depending upon rating).

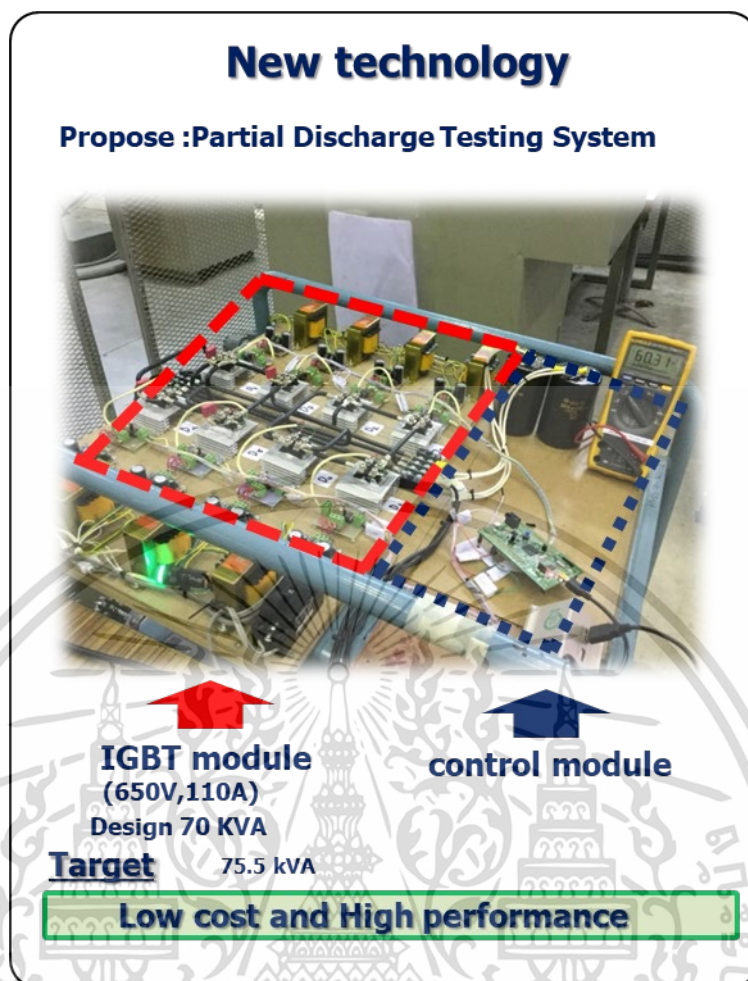
Generator
(50 Hz = 1500 rpm)

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

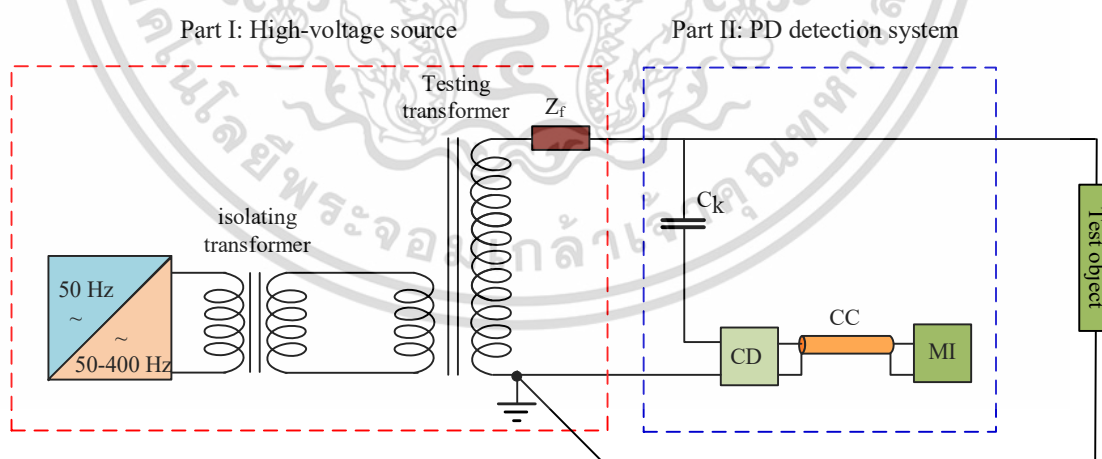
$f_e =$ Frequency (Hz)
 $n_m =$ speed (rpm)

รูปที่ 1.3 รูปเครื่องกำเนิดแรงดันทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 รูปเครื่องกำเนิดแรงดันทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่จัดสร้าง



รูปที่1.5 โครงสร้างระบบทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีการพัฒนาอย่างมาก อีกทั้งยังมีราคาถูกลงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือแบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 1.3 นับว่าเป็นข้อได้เปรียบในการนำมาศึกษาและประยุกต์ใช้เพื่องานทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูง เพื่อใช้ทดสอบความคงทนของฉนวน หรือการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ด้วยความสามารถของการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนความถี่หลักมูลของแรงดันไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยจากเดิม 50 Hz ปรับเปลี่ยนเป็น 50 - 400 Hz แต่ความถี่ 200 Hz เพียงพอต่อการทดสอบ ซึ่งผลของคุณภาพทางไฟฟ้าของความถี่หลักมูลที่เปลี่ยนไปนั้นได้ผลการทดสอบที่แม่นยำ และเที่ยงตรงมากขึ้น สืบเนื่องจากอุปกรณ์ที่ต้องทำการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่การทดสอบแรงสูงของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Potential transformer) ซึ่งหากทำการทดสอบที่ความถี่หลักมูล 50 Hz แล้วนั้นในกรณีที่จ่ายแรงดันโดยใช้ แหล่งจ่ายแรงดันแบบจากหม้อแปลงปรับค่าได้แล้วนั้นจะส่งผลทำให้เกิดการอิมพัลส์ของแกนเหล็ก ส่งผลให้รูปคลื่นแรงดันที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นสัญญาณไซน์ (Sine waveform) รวมทั้งยังมีผลของการใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นของผู้ใช้ไฟที่ตั้งที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ทั้งสองตัวแปรนี้ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำ และความเที่ยงตรงของการวัด ส่งผลทำให้ไม่สามารถใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานปกติเพื่อทำการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามที่มาตรฐาน IEC 60270 [1] ระบุไว้ว่า THD ต้องมีค่าไม่เกิน 5% และอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันสูงสุดต่อค่า RMS ต้องมีค่าภายในช่วง $\sqrt{2} \pm 5\%$

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มีการออกแบบและวิเคราะห์แหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยใช้เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายในการทดสอบความคงทนของฉนวน ในที่นี้จะหมายถึงการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั่นเอง เพื่อจุดประสงค์ของการสร้างแหล่งจ่ายเพื่อใช้ในการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ภายใต้เงื่อนไขที่มีค่าความผิดเพี้ยน และสัญญาณรบกวนต่ำตามมาตรฐานกำหนด ดังแสดงโครงสร้างระบบทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในรูปที่ 1.5

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีและแนวคิดได้มาจากการประยุกต์ใช้หลักการเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์แบบที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบฟูลบริดจ์ (Full bridge) ที่มีประสิทธิภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้ามากกว่าเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ฮาฟบริดจ์ (Half bridge) และเทคนิควิธีการควบคุมแบบ พัลส์เบร็ดยูเอม (Pulse width modulation : PWM) ที่มีประสิทธิภาพในด้านของคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออก มีความใกล้เคียงไซน์ (Sine waveform) และการควบคุมแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) มีฮาร์โมนิก (Harmonic) เกิดขึ้นที่ความถี่ 2 เท่าของความถี่สวิตชิ่งซึ่งส่งผลให้วงจรองมีขนาดเล็ก ราคาถูก และความสูญเสียในระบบการทดสอบต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งขอบเขตวิทยานิพนธ์เป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. ออกแบบสร้างแหล่งจ่ายสำหรับทดสอบความคงทนของฉนวน
2. จำลอง วิเคราะห์เทคนิควิธีการสวิตซ์โดยใช้โปรแกรมแมตแล็บ และวงจรกรองโดยโปรแกรม EMTP
3. เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบจริงจากเครื่องทดสอบที่จัดสร้างโดยการสวิตซ์ซึ่งที่ความถี่ต่าง ๆ
4. เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยปรับเปลี่ยนอัตราการมอดูเลตเทคนิคที่ใช้ควบคุมการสวิตซ์ของไอจีบีที (Insulated gate bipolar transistor : IGBT)

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในการศึกษา และออกแบบเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์แบบที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบฟูลบริดจ์เพื่อให้ได้ผลการทดลอง และข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นเพียงพอสำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบชุดแหล่งจ่ายสำหรับทดสอบความคงทนของความเป็นฉนวนที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต จึงได้แบ่งเป็นขั้นตอนหลักดังแผนภูมิในรูปที่ 1.6 โดยเนื้อหาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1.1 บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ความมุ่งหมายของงานวิจัย วัตถุประสงค์ สมมติฐานที่ใช้ ขอบเขตการทดลอง และขั้นตอนของการศึกษา

1.2 บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย หลักการที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน วงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน การเกิดดิสชาร์จบางส่วน การทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน ชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-link) และเทคนิคการควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width modulation : PWM)

1.3 บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ และจัดสร้างชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์แบบที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบฟูลบริดจ์เพื่อให้ได้ผลของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเบื้องต้นสำหรับการออกแบบชุดทดสอบต้นแบบ การจำลองหาค่าต่าง ๆ ทางไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมแมตแล็บ เพื่อช่วยจำลอง และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของคุณภาพทางไฟฟ้าที่ได้จากเทคนิคการควบคุมการสวิตซ์ซึ่งในกรณีต่าง ๆ รวมทั้งใช้โปรแกรม EMTP เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกรองสัญญาณรบกวน

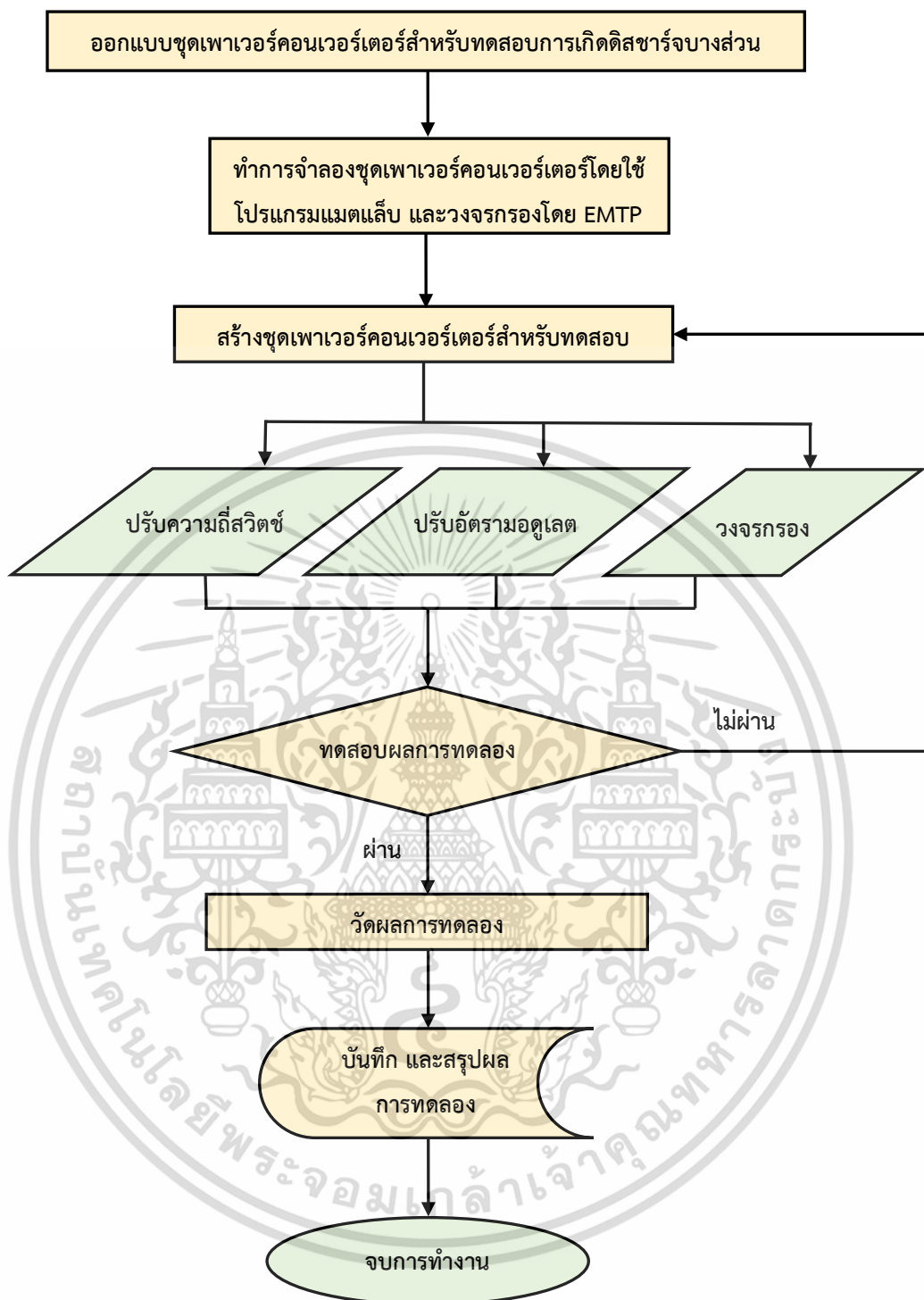
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการทดสอบชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์สำหรับการทดสอบความคงทนของฉนวนรวมถึงอุปกรณ์ และส่วนประกอบที่ใช้ทำการทดลอง การเปรียบเทียบกรณีความถี่สวิตชิงและอัตราการมอดูเลตที่ส่งผลต่อการคุณภาพของแรงดันไฟฟ้า และสัญญาณรบกวนของระบบที่ส่งผลต่อการทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

1.5 บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปการดำเนินงานทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นในส่วนการออกแบบชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้โปรแกรม การจัดสร้างชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ ขั้นตอนในการทดลอง ผลการทดลอง แนวทางในการพัฒนา และข้อเสนอแนะเพื่อนำไปสู่การพัฒนาเพื่อใช้ในงานจริงต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่1.6 ขั้นตอนการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยใช้เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือ ได้แหล่งจ่ายในการทดสอบความคงทนของฉนวน ในที่นี้จะหมายถึงการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อใช้ในการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงภายใต้เงื่อนไขที่มีค่าความผิดเพี้ยน และสัญญาณรบกวนต่ำตามมาตรฐานกำหนด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

มาตรฐานแรกในการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge : PD) ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1940 โดยสมาคมผู้ผลิตไฟฟ้าแห่งชาติ (National electrical manufacturers association : NEMA) เป็นองค์การผู้ผลิตของสหรัฐฯ ที่อ้างอิงถึงหลักการในการวัดสัญญาณรบกวนวิทยุ โดยสมาคมผู้ผลิตไฟฟ้าแห่งชาติได้ออกเอกสารหมายเลข 107 หลักการวัดแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (Radio Influence voltage : RIV) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ปรับปรุงเพิ่มเติมในปี ค.ศ. 1964 ในส่วนแรกคือ ผลการทดสอบโดยใช้หลักการวัดแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุที่ได้ประกาศใช้นั้น นอกจากโคโรนาดิสชาร์จจะทำให้เกิดการติดไฟบน อิเล็กโทรดแรงดันสูงที่สถานะอากาศโดยรอบ ๆ แล้วนั้น ยังสามารถทำให้เกิดการดิสชาร์จบนของแข็ง และของเหลวซึ่งจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวกับค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบนั้น ๆ อีกด้วย ดังนั้นหลักการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยการวัดการรบกวนของคลื่นวิทยุจึงได้ถูกนำไปใช้ในยุโรปอีกด้วย โดยคณะกรรมการพิเศษระหว่างประเทศเกี่ยวกับการรบกวนทางสัญญาณวิทยุ (International special committee on radio interference : CISPR) [1]

ในการทดสอบทางไฟฟ้าแรงดันสูงนั้นความแม่นยำและความเที่ยงตรงของการวัดเป็นสิ่งที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ความแม่นยำและความเที่ยงตรงของการวัดนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และส่วนหนึ่งคือคุณภาพของไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้านั้น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ โดยทั่วไปแล้วระบบไฟฟ้าที่ส่งจ่ายไฟฟ้ามาจากผู้ผลิตในที่นี้คือการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย จะถูกจ่ายขยะทางไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าฮาร์โมนิก (Harmonic) กลับเข้าไปในระบบส่งจ่ายโดยผู้ใช้ไฟ ที่ใช้โหลดประเภทแบบไม่เป็นเชิงเส้น และหากเรานำไฟฟ้าที่มีขยะทางไฟฟ้าไปเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงเพื่อทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแล้วนั้น ก็อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวัด อีกทั้งในกรณีทำการทดสอบที่ความถี่ต่ำ ในที่นี้ประเทศไทยคือ 50 Hz ก็อาจส่งผลให้เกิดผลกระทบของการอิมิตัวของเหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า สืบเนื่องจากการทดสอบจะทำการจ่ายแรงดันสูงให้กับอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ เพื่อตรวจหาความบกพร่องของฉนวน โดยแรงดันที่จ่ายนั้นจะมีระดับของแรงดันสูงกว่าแรงดันใช้งานปกติ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาวิเคราะห์หาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดที่ใช้สำหรับการทดสอบ โดยศึกษาและจัดสร้างเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ ชนิดอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน ทั้งนี้ได้นำเทคนิควิธีการควบคุมการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width modulation : PWM) มาทำการวิเคราะห์ รวมทั้งวิเคราะห์ระบบวงจรกรองเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน อีกด้วย

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการประยุกต์ใช้เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (Power converter) แบบอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 1 เฟส เพื่อวิเคราะห์ และสร้างเครื่องทดสอบความคงทนของ ฉนวน ด้วยการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยมีเป้าหมายให้มีแหล่งจ่ายที่มีคุณภาพทางไฟฟ้าที่ดี และมีสัญญาณรบกวนต่ำภายใต้มาตรฐาน IEC60270 [1, 2] โดยในขั้นตอนแรกนั้น จะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ความถี่ 50 Hz ที่สามารถปรับขนาดของระดับแรงดันไฟฟ้าได้โดยการ ใช้หม้อแปลงปรับค่าได้ชนิด 3 เฟส และทำการเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสตรงชนิด 3 เฟส เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้สำหรับทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้กับอินเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟส ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ โดยในที่นี้จะใช้ความถี่ทดสอบที่ 200 Hz ในส่วนของด้านภาคจ่ายไฟนั้นจะทำการเชื่อมต่อกับชุดวงจรกรองเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าให้ดีขึ้น และหลังจากนั้นจะทำการเชื่อมต่อเข้ากับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงที่ด้านปฐมภูมิเพื่อทำการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นตามระดับของการทดสอบ ที่ขึ้นอยู่กับมาตรฐานการทดสอบของอุปกรณ์ที่ต้องการทำการทดสอบนั้น ๆ ในส่วนของเทคนิควิธีการควบคุมการสวิตช์ของไอจีบีที (IGBT) ที่นำมาใช้ควบคุมในชุดทดสอบนี้จะทำการจำลองวงจร และวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมแมตแล็บก่อนนำมาทำจัดสร้างเพื่อทำการทดสอบจริง ในส่วนวงจรกรองจะทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม EMTD เพื่อหาผลตอบสนองของวงจรกรอง

2.2 การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น สามารถแบ่งการทดสอบได้เป็น 2 แบบหลักคือ

1. การทดสอบแบบทำลาย
2. การทดสอบแบบไม่ทำลาย

อย่างไรก็ตามในที่นี้จะสนใจเฉพาะการทดสอบแบบไม่ทำลายเท่านั้น สืบเนื่องจากการทดสอบที่ไม่ส่งผลทำให้ฉนวนสูญเสียความเป็นฉนวนอย่างถาวร และวัสดุ หรืออุปกรณ์ทดสอบยังสามารถนำกลับไปใช้งานได้ อีก ทั้งยังสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพ และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น ๆ การทดสอบแบบไม่ทำลายอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1.1) การทดสอบความทนทาน (Endurance test) เป็นการทดสอบอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ได้แก่ การกำลังสูญเสีย ระดับแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด การวัดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ระดับพิกัดกำลังใช้งาน หรือการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

1.2) การทดสอบความคงทนอยู่ได้ของแรงดันกระแสสลับ (Withstand voltage test) เป็นการทดสอบความคงทนของวัสดุ หรืออุปกรณ์ต่อแรงดันเกิน แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบที่ 1 ทดสอบความคงทนอยู่ได้ที่ความถี่ต่ำ เวลา 1 นาที

2. แบบที่ 2 ทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ BIL หรือ BSL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

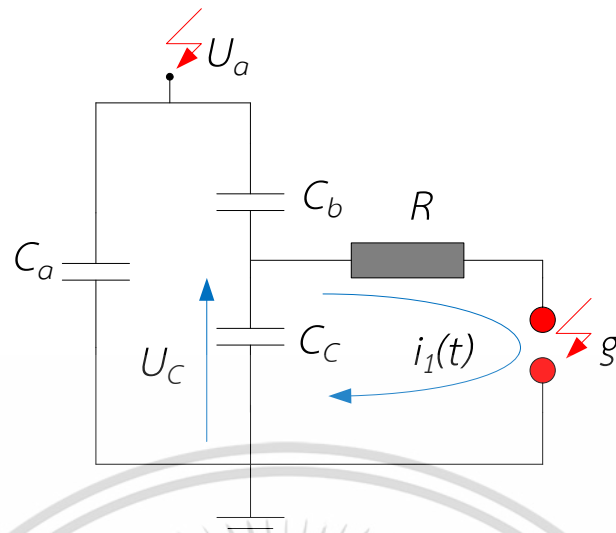
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

โดยทั่วไปกระแสพัลส์จากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นเสียง คลื่นแสง และทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเป็นที่มาของการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แม้ว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเป็นการเกิดเบรกดาวน์แบบไม่สมบูรณ์ แต่ก็ เป็นสาเหตุของการเกิดการสูญเสียพลังงาน และเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนอย่างต่อเนื่อง หากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนลุกลามมากขึ้น ก็จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์แบบสมบูรณ์ทำให้ฉนวนเสียหายอย่างถาวรในที่สุด ดังนั้นการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจึงเป็นหัวข้อสำคัญ และจำเป็นในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนที่สำคัญที่สุดรายการหนึ่ง ดังนั้นการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนอาจทำได้หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ดังนี้คือ

1. ตรวจจับกระแสพัลส์
2. ตรวจจับทางแสงที่แผ่ออกมา
3. ตรวจจับทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา
4. ตรวจจับทางองค์ประกอบเคมีที่เปลี่ยนแปลงไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสนใจเฉพาะการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากกระแสพัลส์เท่านั้น เพราะเป็นวิธีที่นิยมทำกันในห้องปฏิบัติการ และมีมาตรฐานรองรับนั้นคือ IEC600270 [1, 2] เพราะให้ผลการตรวจวัดที่อาศัยการวัดกระแสพัลส์ที่เกิดจากผลของการดิสชาร์จโดยตรง จึงทำให้มีความถูกต้องในการตรวจจับดีกว่ากระบวนการอื่น การเกิดดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงสามารถแสดงได้ด้วยวงจรมูลค่าดังแสดงดังรูปที่ 2.1 เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนช่องว่างของเนื้อฉนวนจะแทนด้วยตัวเก็บประจุ (C) จะเกิดกระแสพัลส์ไหลวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ทำการทดสอบ



U_a = แรงดันทดสอบที่จ่ายให้ระบบ

U_c = แรงดันที่แหล่งกำเนิดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

$i_1(t)$ = กระแสพัลส์ไหลวน

C_a = ค่าความจุเสมือนของวัสดุทดสอบ

C_b = ค่าความจุแฝงของวัสดุทดสอบที่อนุกรมแหล่งกำเนิดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

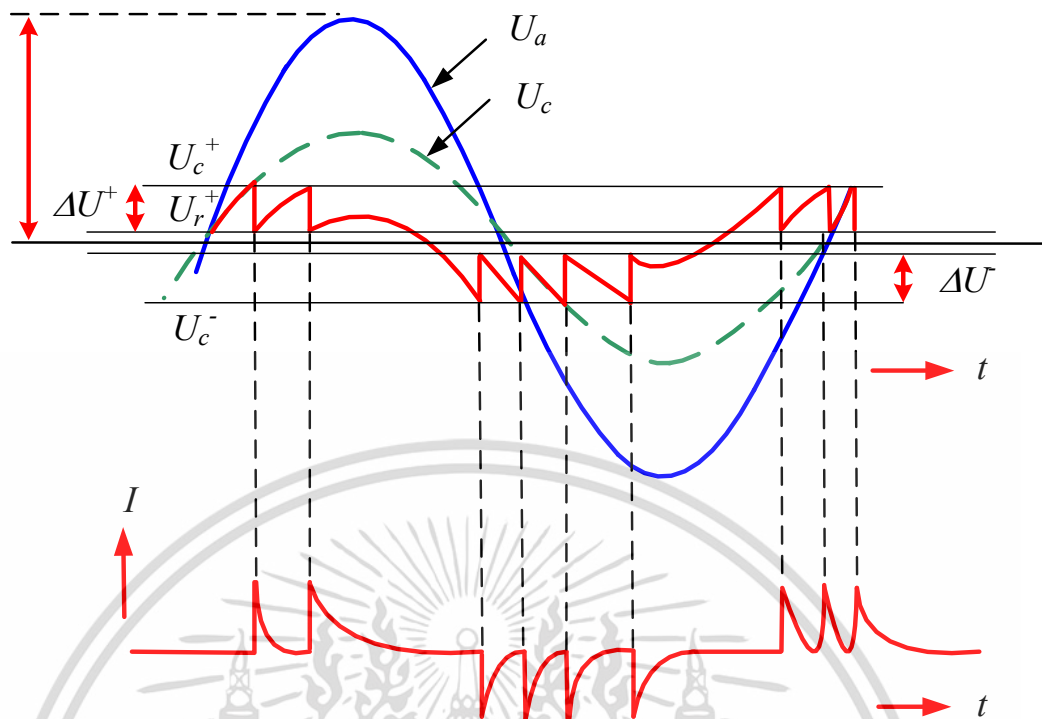
C_c = ค่าความจุภายในของวัสดุทดสอบที่แหล่งกำเนิดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

R = ความต้านทานภายใน

S_g = ช่องว่างสปาร์ค

รูปที่ 2.1 การเกิดกระแสพัลส์ในการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

โดยเมื่อพิจารณาแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และมีแรงดันตกคร่อมฉนวนย่อยในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.2 จะทำให้เกิดกระแสพัลส์ที่เกิดจากการเก็บประจุ และคายประจุทำให้เกิดการไหลของกระแสดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge current) ที่มีหน้าคลื่นชั้นแสดงดังรูปที่ 2.3 จะไหลวนในฉนวนไฟฟ้าซึ่งเป็นอาจส่งผลให้ฉนวนเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ



รูปที่ 2.2 แรงดันตกคร่อมฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน [3]

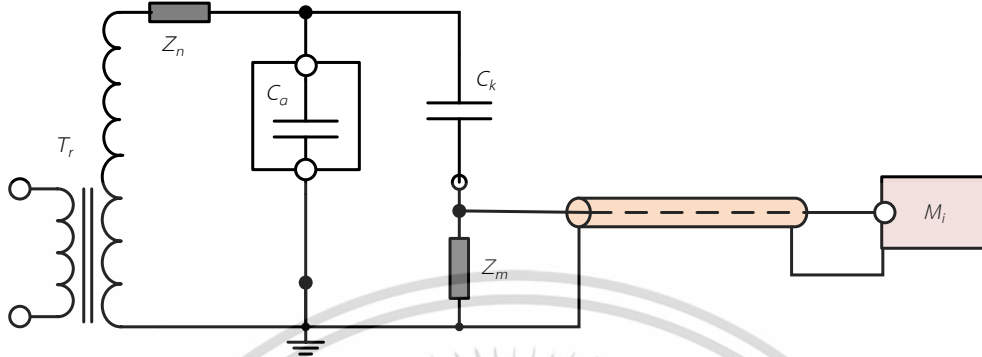


รูปที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน [3]

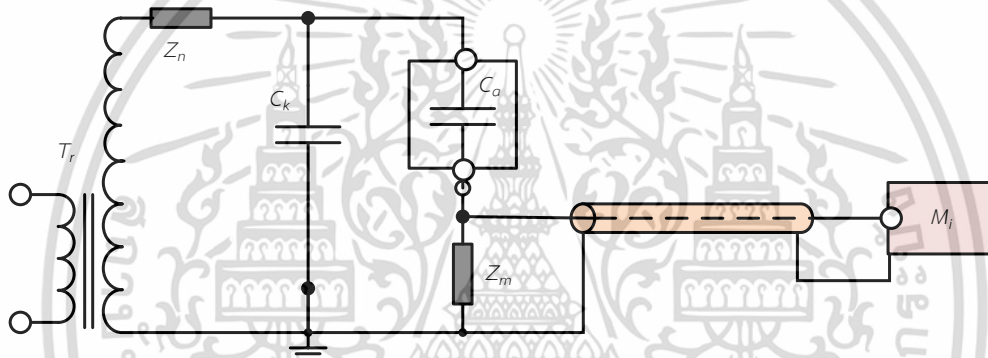
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

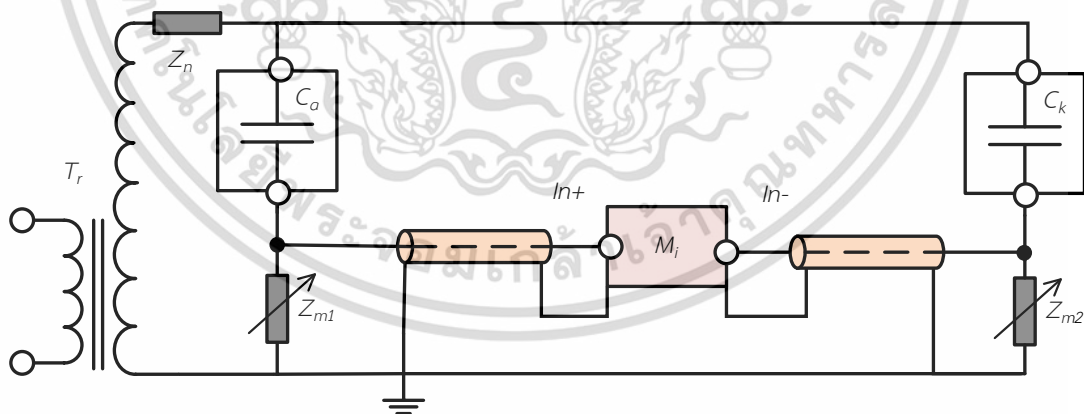
วงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั้น จะมีรูปแบบการต่อวงจรอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.4



ก) แบบอิมพีแดนซ์ชุดวัด (Z_m) ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k)



ข) แบบอิมพีแดนซ์ชุดวัด (Z_m) ต่ออนุกรมกับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ (C_a)



ค) แบบการต่อสมดุลบริดจ์ใช้อิมพีแดนซ์ชุดวัด (C_k, Z_{m2}) ต่อขนานกับอุปกรณ์กึ่งที่ทำการทดสอบ (C_a, Z_{m1})

T_r = หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง

Z_n = ชุดกรองสัญญาณรบกวน

C_a = ค่าความจุเสมือนของอุปกรณ์ทดสอบ

C_k = ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

Z_m = อิมพีแดนซ์ชุดวัดของอุปกรณ์เชื่อมต่อ

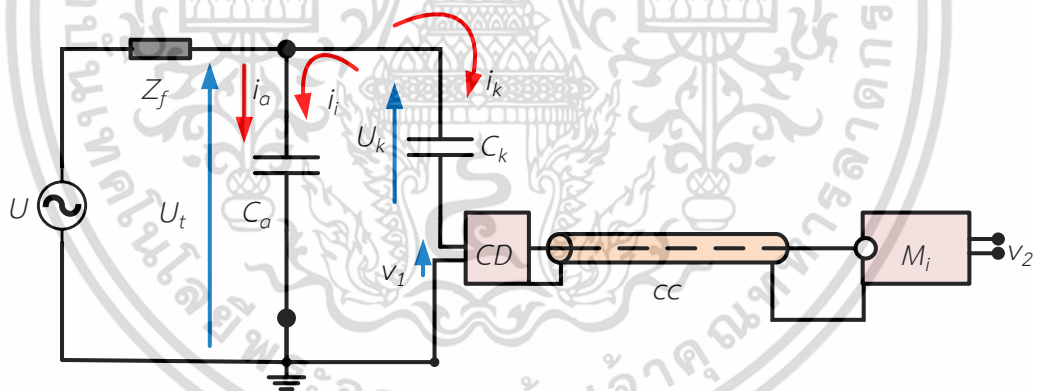
M_i = เครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 วงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่แนะนำใน IEC60270 [1]

สำหรับวงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่แนะนำโดย IEC60270 [1, 2] นั้นแต่ ละแบบจะมีข้อได้เปรียบที่แตกต่างกันคือ แสดงดังรูปที่ 2.4 ค) แบบการต่อสมดุลบริดจ์ใช้อิมพีแดนซ์ ชุดวัด (C_k, Z_{m2}) ต่อขนานกับอุปกรณ์กึ่งที่ทำการทดสอบ (C_o, Z_{m1}) โดยอิมพีแดนซ์ Z_{m1} และ Z_{m2} จะ สามารถปรับค่าได้ข้อดีของการต่อแบบสมดุลบริดจ์ คือ สามารถกำจัดสัญญาณสนามแม่เหล็กรบกวน ไม่ให้เข้าไปที่อุปกรณ์ชุดตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน รูปที่ 2.4 ข) แบบอิมพีแดนซ์ชุดวัด (Z_m) ต่ออนุกรมกับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ (C_o) จะมีข้อควรระวังคือกรณีหากเกิดความเสียหายจากการ เบรกดาว์นของวัสดุทดสอบอย่างรุนแรงอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออิมพีแดนซ์ชุดวัดของ อุปกรณ์เชื่อมต่อเครื่องมือวัด ดังนั้นในการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกต่อวงจรทดสอบที่ แสดงดังรูปที่ 2.4 ก) แบบอิมพีแดนซ์ชุดวัด (Z_m) ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) เพราะมี ความปลอดภัยในการวัดมากกว่า และเหมาะสมสำหรับการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากกระแสพัลส์ที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถ แสดงวงจรการตรวจจับกระแสพัลส์ หรือคายประจุที่คายจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแสดงดังรูปที่ 2.5 และวงจรการทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 2.6



U = แรงดันทดสอบ

CD = อุปกรณ์เชื่อมต่อ

Z_f = อนุกรมอิมพีแดนซ์ใช้เพื่อเป็นวงจรกรอง

CC = สายเชื่อมต่อสัญญาณ

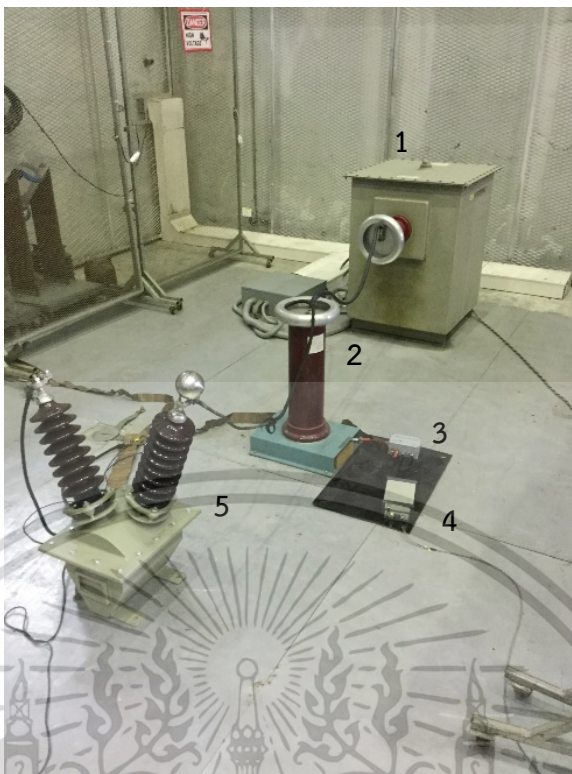
C_o = อุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ

M_i = เครื่องมือวัด

C_k = ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

รูปที่ 2.5 วงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยกระแสพัลส์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

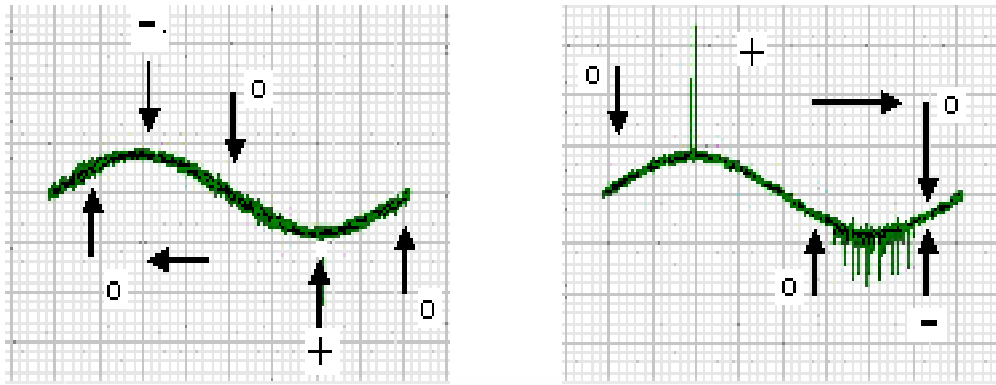


- 1) หม้อแปลงทดสอบขนาดพิกัด 75 kV, 40 kVA, PD < 2pC
- 2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor: C_k of 100 kV)
- 3) อุปกรณ์เชื่อมต่อ (Coupling device: CD)
- 4) อุปกรณ์เชื่อมต่อใยแก้วนำแสงเครื่องมือวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (MI)
- 5) อุปกรณ์ที่ทำการทดสอบวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

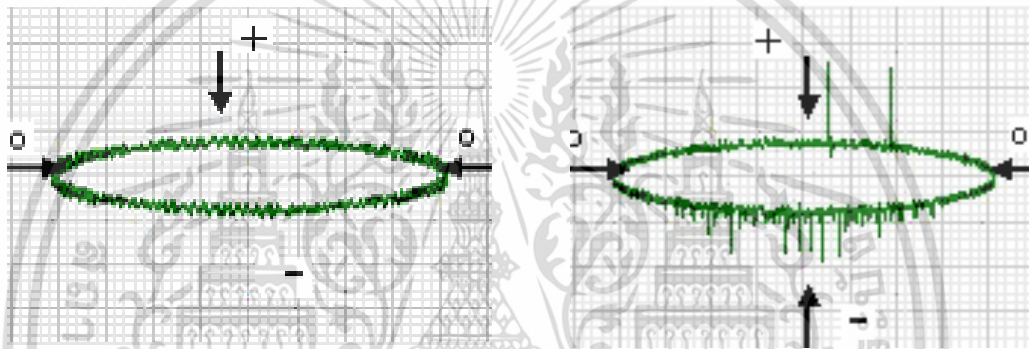
รูปที่ 2.6 วงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จากวงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling capacitor : C_k) จะทำหน้าที่ลัดวงจรสำหรับสัญญาณความถี่สูงที่เกิดขึ้นจากกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และบังคับให้กระแสพัลส์ไหลผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Coupling device : CD) หรืออิมพีแดนซ์วัด (Measuring instrument : MI) ซึ่งแสดงค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเป็นประจุ (pC หรือ nC) ซึ่งประจุที่วัดได้นี้เป็นประจุปรากฏ (Apparent charge) ซึ่งเป็นอัตราส่วนกับประจุจริง (Real charge) ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยอุปกรณ์แสดงผลเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนผ่านใยแก้วนำแสงเพื่อแสดงผลเป็นค่าตัวเลข หรือรูปคลื่นกระแสพัลส์เทียบกับแรงดันที่ป้อนในลักษณะรูปคลื่นไซน์ (Sine waveform) หรือรูปวงรี (Ellipse form) ที่เป็นตัวแทนของมุมของรูปคลื่นแรงดันที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนฐานรูปคลื่นแรงดันไซน์ ขณะไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วน
ข) ผลการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนฐานรูปคลื่นแรงดันไซน์ ขณะเกิดดิสชาร์จบางส่วน



ค) ผลการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนฐานรูปคลื่นแรงดันวงรี ขณะไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วน
ง) ผลการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนฐานรูปคลื่นแรงดันวงรี ขณะเกิดดิสชาร์จบางส่วน

รูปที่ 2.7 ตัวอย่างผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วน [3]

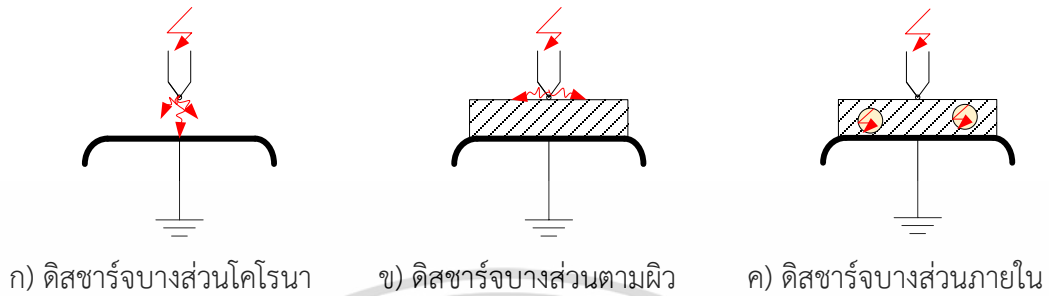
2.5 การเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนหมายถึง การดิสชาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ จึงไม่ทำให้เกิดการสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนตลอดระยะเวลาทาง ระหว่างอิเล็กโทรดที่มีแรงดันตกคร่อมอยู่ที่ทันใด อย่างไรก็ตาม การเกิดดิสชาร์จบางส่วนส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสีย ที่ส่งผลให้ฉนวนเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อีกทั้งยังสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากผลกระทบดังกล่าวจึงจำเป็นต้องตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเป็นการยืนยันว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะมีอายุการใช้งานภายในเวลาอันควรที่จะเป็น โดยการเกิดดิสชาร์จบางส่วนอาจแบ่งจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักคือ

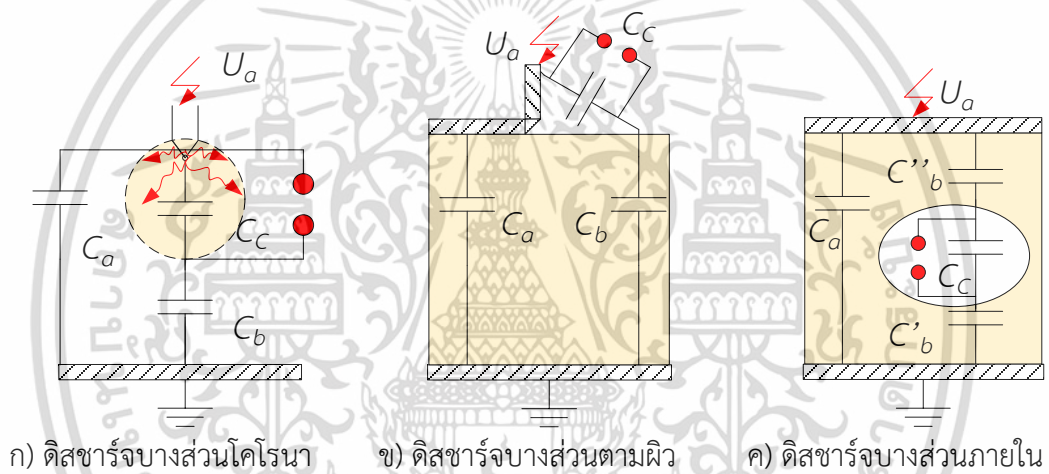
1. ดิสชาร์จบางส่วนโคโรนา (Corona discharge)
2. ดิสชาร์จบางส่วนตามผิว (Surface discharge)
3. ดิสชาร์จบางส่วนภายใน (Internal discharge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงดังรูปที่ 2.8 แสดงรูปแบบของการเกิดดิซชาร์จบางส่วน และแสดงดังรูปที่ 2.9 จะแสดงวงจรสมมุทธ์ของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนทั้ง 3 รูปแบบ เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์วงจรการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในรูปแบบต่าง ๆ



รูปที่ 2.8 รูปแบบของการเกิดดิซชาร์จบางส่วน



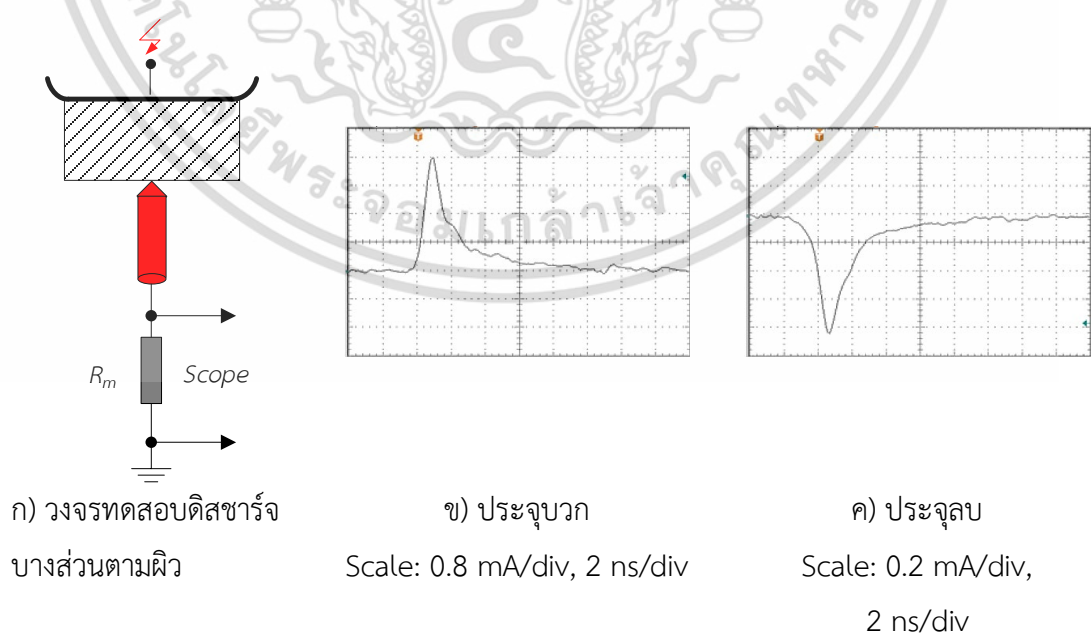
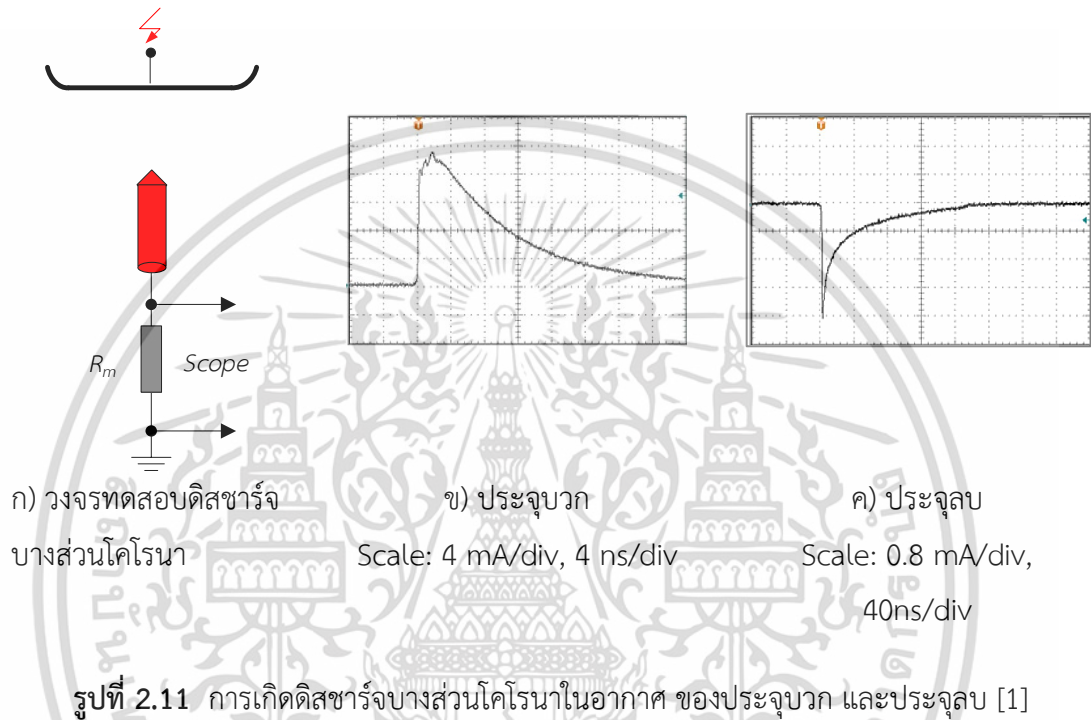
รูปที่ 2.9 วงจรสมมุทธ์ของการเกิดดิซชาร์จบางส่วน



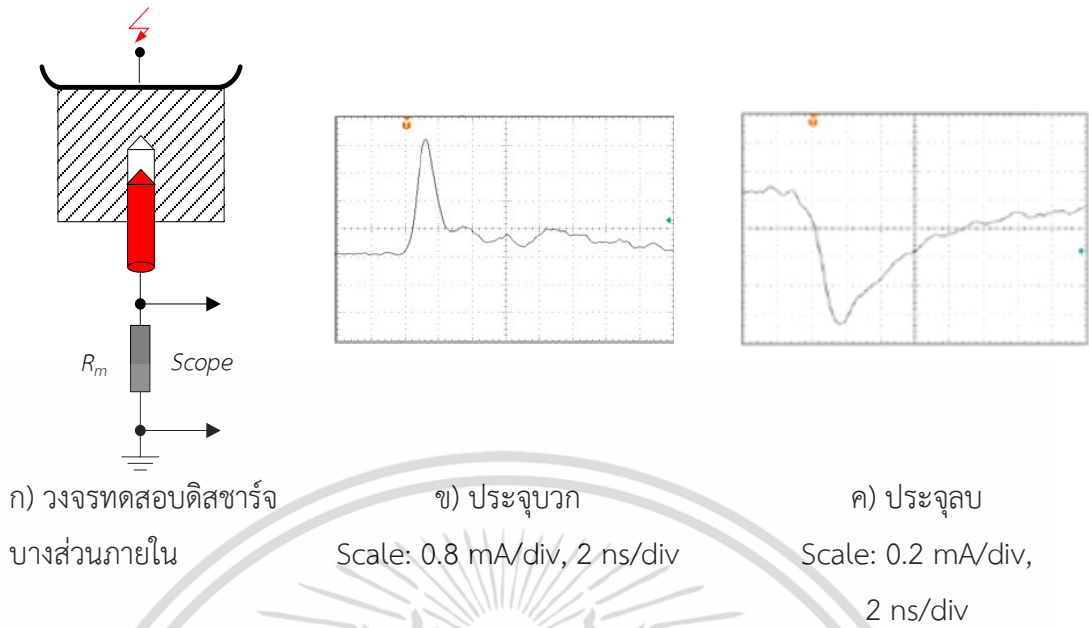
รูปที่ 2.10 การเกิดดิซชาร์จบางส่วนแต่ละรูปแบบ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ในการทำฉนวนไฟฟ้านั้น จะมีด้วยกัน 3 สถานะโดยสามารถแบ่งได้ ดังนี้คือ 1) แก๊ส 2) ของเหลว และ 3) ของแข็ง เมื่อนำมาทำการทดสอบคุณภาพของความเป็นฉนวนจนเกิดการดิสชาร์จแล้วนั้น จะสามารถแสดงรูปคลื่นผลทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.10 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนแต่ละรูปแบบ ก) สตรีมเมอร์ดิสชาร์จในอากาศ ข) ลีตเตอร์ดิสชาร์จในน้ำมัน และ ค) ทริอิงทางไฟฟ้าในพอลิเมอร์อะคริลิก (Electrical treeing in PMMA)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

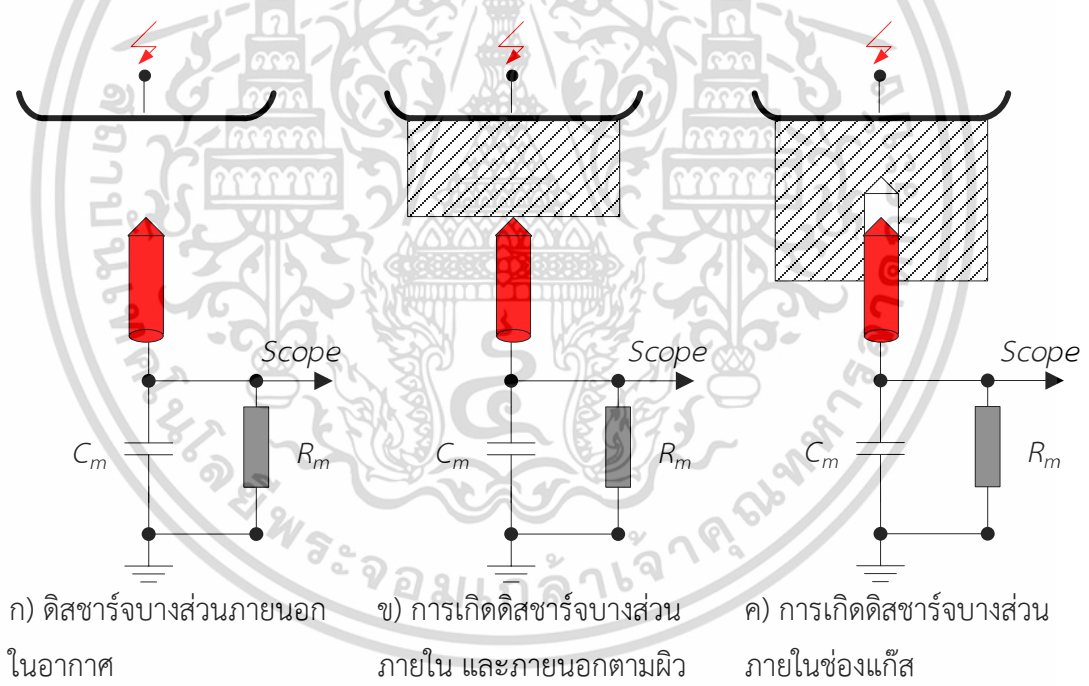


ก) วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนภายใน

ข) ประจุบวก
Scale: 0.8 mA/div, 2 ns/div

ค) ประจุลบ
Scale: 0.2 mA/div, 2 ns/div

รูปที่ 2.13 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน XLPE ของประจุบวก และประจุลบ [1]



ก) ดิสชาร์จบางส่วนภายนอกในอากาศ

ข) การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน และภายนอกตามผิว

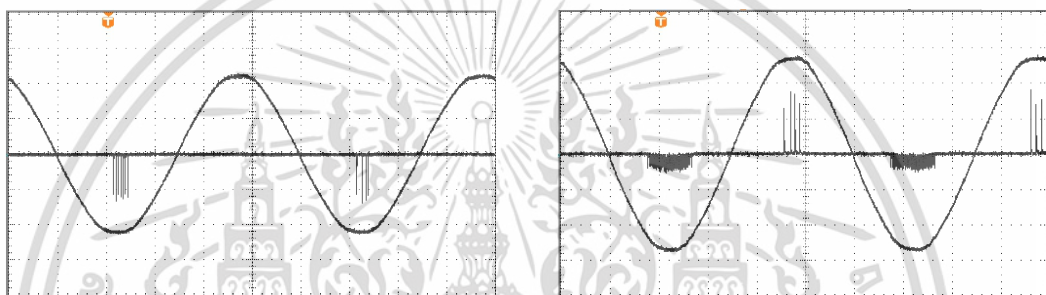
ค) การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในช่องแก๊ส

รูปที่ 2.14 แบบจำลองวงจรสำหรับใช้วิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากรูปคลื่นประจุ

ฉนวนไฟฟ้าที่เป็นแก๊ส (Gas insulation) จะมีคุณสมบัติทนทานต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูง และนิยมนำมาใช้งานเนื่องจากมีราคาไม่แพง ยกตัวอย่างเช่น อากาศซึ่งใช้ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนอากาศ (Air Insulated substation : AIS) และ ซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (Sulfur hexafluoride : SF6) ซึ่งใช้ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas insulated substation : GIS) พิจารณารูปที่ 2.15 การทดสอบจะทำการป้อนแรงดันสูงที่ขั้วอิเล็กโทรด แก๊สที่อยู่โดยรอบอาจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการแตกตัวเป็นไอออน หรือมีสถานะเป็นตัวนำไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.15 ก) การเกิดดิสชาร์จบางส่วน โครโนนาในอากาศขณะเริ่มเกิด และแสดงดังรูปที่ 2.15 ข) เมื่อเพิ่มระดับแรงดันเพิ่มขึ้น

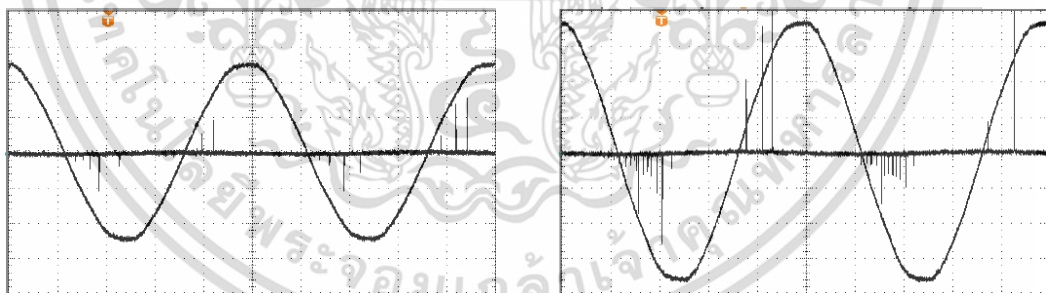
ฉนวนไฟฟ้าที่เป็นของแข็ง (Solid insulation) จะทำหน้าที่แบ่งแยกส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกันไม่ให้สัมผัสกัน บางส่วนยังทำหน้าที่รับแรงทางกลอันเกิดจากโครงสร้าง และน้ำหนักอีกด้วย เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้า โดยฉนวนแข็งอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวเนื่องจากเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินค่าการออกแบบ แสดงดังรูปที่ 2.16 ก) การเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวบนฉนวนแข็งขณะเริ่มเกิด และ 2.16 ข) เมื่อเพิ่มระดับแรงดันเพิ่มขึ้น หรืออาจเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื่องจากความไม่บริสุทธิ์ ของเนื้อฉนวน เช่น มีโพรงอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.17 ก) การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในฉนวน XLPE ขณะเริ่มเกิด และแสดงดังรูปที่ 2.17 ข) เมื่อเพิ่มระดับแรงดันเพิ่มขึ้น



ก) ประจุ 50 pC/div, 4 ms/div

ข) ประจุ 200 pC/div, 4 ms/div

รูปที่ 2.15 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนโครโนนาในอากาศ ก) ขณะเริ่มเกิด และ ข) เมื่อเพิ่มระดับแรงดันเพิ่มขึ้น [1]

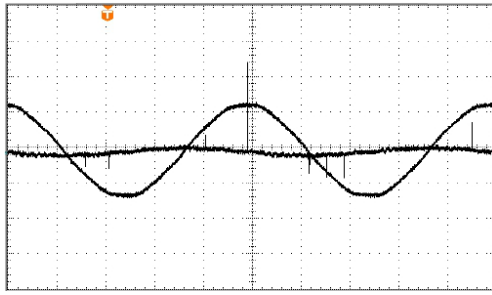


ก) ประจุ 100 pC/div, 4 ms/div

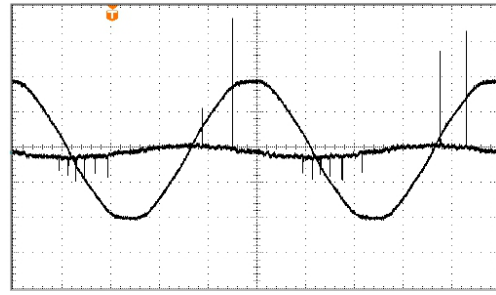
ข) ประจุ 100 pC/div, 4 ms/div

รูปที่ 2.16 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวบนฉนวนแข็ง ก) ขณะเริ่มเกิด และ ข) เมื่อเพิ่มระดับแรงดันเพิ่มขึ้น [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ประจุ 20 pC/div, 4 ms/div



ข) ประจุ 20 pC/div, 4 ms/div

รูปที่ 2.17 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในฉนวน XLPE ก) ขณะเริ่มเกิด และ ข) เมื่อเพิ่มระดับแรงดันเพิ่มขึ้น [1]

2.6 การทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมื่อัดแรงดัน

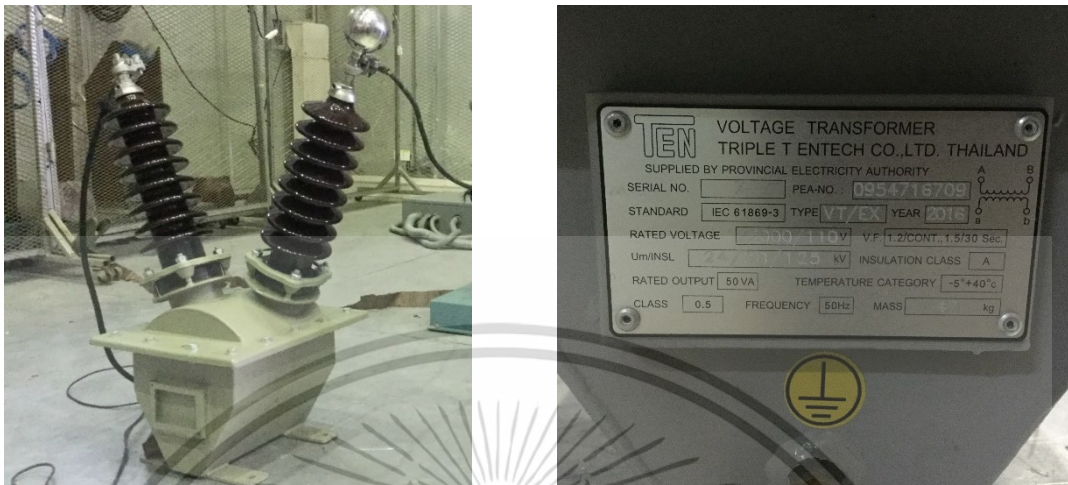
ในระบบไฟฟ้านั้นโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์สามส่วนหลักคือ ตัวนำไฟฟ้า สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า และท้ายสุดคือ ฉนวนไฟฟ้า ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นส่วนสำคัญหลักในการทดสอบหากเป็นตัวนำคือการทดสอบให้กระแสไหลผ่าน หรือหากเป็นฉนวนคือการทดสอบการทนแรงดันสูงได้ของความเป็นฉนวน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสนใจในส่วนของความคงทนของฉนวน

ในปัจจุบันนี้ค่าความคงทนวัสดุที่นำมาทำเป็นของฉนวนสามารถคำนวณได้โดยประมาณการด้วยโปรแกรมคำนวณ จากความเข้าใจในเรื่องคุณสมบัติ และพฤติกรรมของวัสดุฉนวน และความเสียหายทางกลจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยสามารถคำนวณค่าสูงสุดของความเครียดสนามไฟฟ้าที่วัสดุสามารถทนทานได้แบบประมาณการ อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนของฉนวนเหลว หรือการไม่บริสุทธิ์ของฉนวนส่งผลให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนด้วย [4, 7, 8, 9]

การทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมื่อัดกระแส นั้นสามารถทำได้โดยการป้อนแรงดันสูงกระแสลับที่ความถี่พลังงานได้ตามปกติ ซึ่งเหมือนกับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป แต่กรณีของการทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมื่อัดแรงดันนั้นจะไม่สามารถใช้ความถี่พลังงานทั่วไปได้ ควรใช้ความถี่มากกว่าความถี่หลักมูลเพื่อลดผลกระทบในเรื่องการอิมตัวของแกนเหล็กหม้อแปลงที่อาจเป็นสาเหตุทำให้รูปคลื่นแรงดันไซน์ผิดเพี้ยนไปจากเดิม สำหรับการทดสอบนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนแรงดันสูงกระแสลับที่ชั่วแรงดันสูง และชั่วแรงดันอื่นที่เหลือน้อยต่อลงกราวด์ โดยปกติแล้วหน้าที่ของหม้อแปลงเครื่องมื่อัดแรงดันจะเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้สำหรับตรวจวัดพลังงาน และเป็นส่วนสำคัญสำหรับระบบป้องกันที่ติดตั้งเพื่อใช้วัดพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือวัดแรงดันจากหม้อแปลงขณะทำงาน ดังนั้นหม้อแปลงเครื่องมื่อัดจึงเป็นส่วนสำคัญที่วิศวกรไฟฟ้ากำลังต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษนั้นหมายความว่าขั้นตอนการผลิตต้องได้รับการทดสอบตามมาตรฐานเพื่อให้เกิดความเที่ยงตรง แม่นยำ มีความน่าเชื่อถือ และเมื่อนำไปใช้งานจะไม่เกิดความเสียหายขณะใช้งานโดยปกติ และหม้อแปลงเครื่องมื่อัดแรงดันแสดงดังรูปที่ 2.18 จะมีอายุการใช้งานยาวนานถ้าผ่านการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ดังนั้นการทดสอบจึงเป็นส่วนสำคัญในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

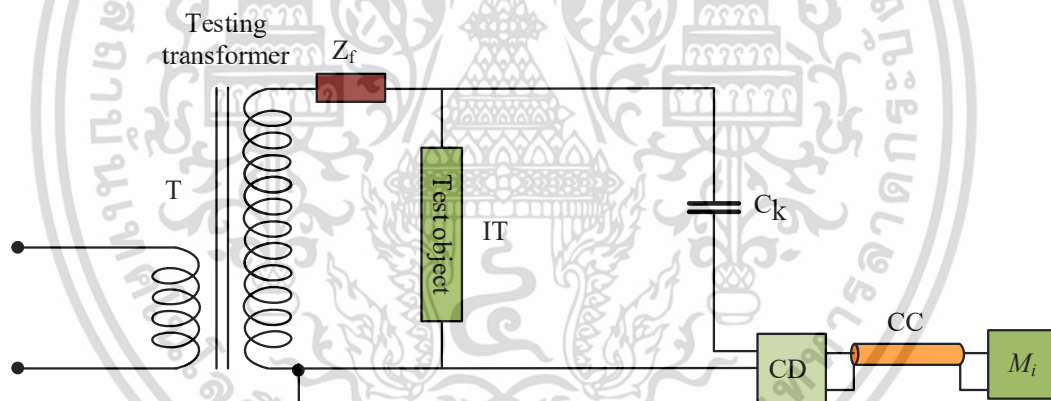
ทดสอบตามมาตรฐานหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน โดยการทดสอบความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าสูง โดยแสดงการต่อวงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.19



ก) หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

ข) ป้ายพิกัดหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

รูปที่ 2.18 หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่พิกัดแรงดัน 24 kV



T = หม้อแปลงทดสอบแรงสูง

IT = หม้อแปลงเครื่องมือวัด

C_k = ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

CD = อิมพีแดนซ์วัดแรงดันการเกิดดิซชาร์จบางส่วน

CC = สายนำสัญญาณ

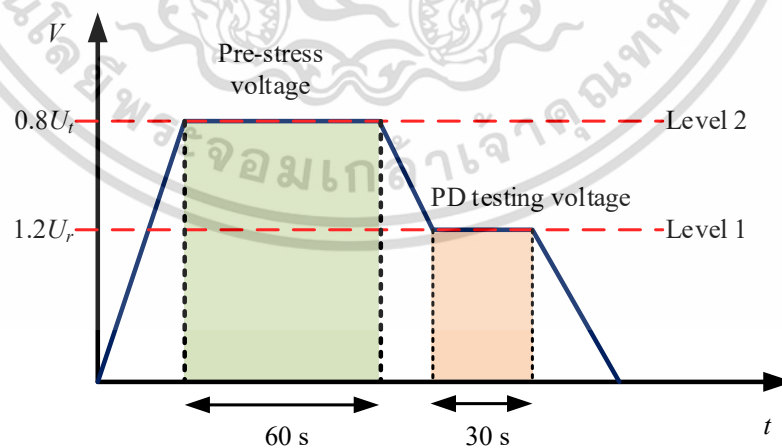
M_i = อุปกรณ์แสดงผลการวัด [10]

รูปที่ 2.19 วงจรการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันจะต้องทำการป้อนแรงดันทดสอบเพื่อจำลองการเกินแรงดันเกินก่อน (Pre-stress voltage) ที่ระดับ 80% ของแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของระบบที่หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันใช้งาน (U_m) แสดงดังตารางที่ 2.1 จากนั้นลดระดับแรงดันลงไปที่ค่าแรงดันทดสอบที่ 120% ของพิกัดหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (U_r) โดยค่าความถี่ของแรงดันที่ป้อนจะต้องมีค่าสูงกว่าความถี่ใช้งานปกติ เพื่อที่จะไม่ให้แกนเหล็กของหม้อแปลงเกิดการอิ่มตัว โดยมาตรฐาน IEC60270 [1, 2, 3, 4] แนะนำว่าโดยทั่วไปนั้นการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ความถี่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือส่วนประกอบในระบบไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะสามารถทดสอบได้ถึง 400 Hz และค่าระดับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ยอมรับได้ต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามตารางที่ 2.2 โดยค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของระดับสัญญาณรบกวนที่เกิดขณะทำการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่แบ่งชนิดของหม้อแปลงเครื่องมือวัดตามประเภทของฉนวน กำหนดค่าที่ยอมรับได้มีค่าต่ำสุดในตารางมาตรฐานคือ 5 pC และในการทดสอบไฟฟ้าแรงดันสูงค่าคุณภาพไฟฟ้าในการทดสอบที่กรณีความถี่หลักมูล ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total harmonic distortion : THD) ต้องมีค่าไม่เกิน 5% และอัตราส่วนระหว่าง ค่าแรงดันสูงสุด (Peak voltage : V_{peak}) ต่อค่าค่าประสิทธิผล (Root mean square : RMS) ต้องมีค่าภายในช่วง $\sqrt{2} \pm 5\%$ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และลำดับการขึ้นแรงดันในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.16

$$THD = \frac{1}{V_{1peak}} \sqrt{\sum_{n=2}^{50} V_{n, peak}^2} \quad (2.1)$$



U_r = แรงดันพิกัด (Rating voltage: 24 kV) $1.2U_r$ = 28.8 kV

U_t = 80% of the withstand voltage

รูปที่ 2.20 ลำดับการป้อนแรงดันเพื่อทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงดันทดสอบความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า (Withstanding voltage test)

แรงดันพิกัด (U_{rated})	แรงดันทดสอบ (U_{test})	
	100%	80%
3.6 kV	10 kV	8 kV
7.2 kV	20 kV	16 kV
12 kV	28 kV	22.4 kV
24 kV	50 kV	40 kV
36 kV	70 kV	56 kV
72.5 kV	140 kV	112 kV

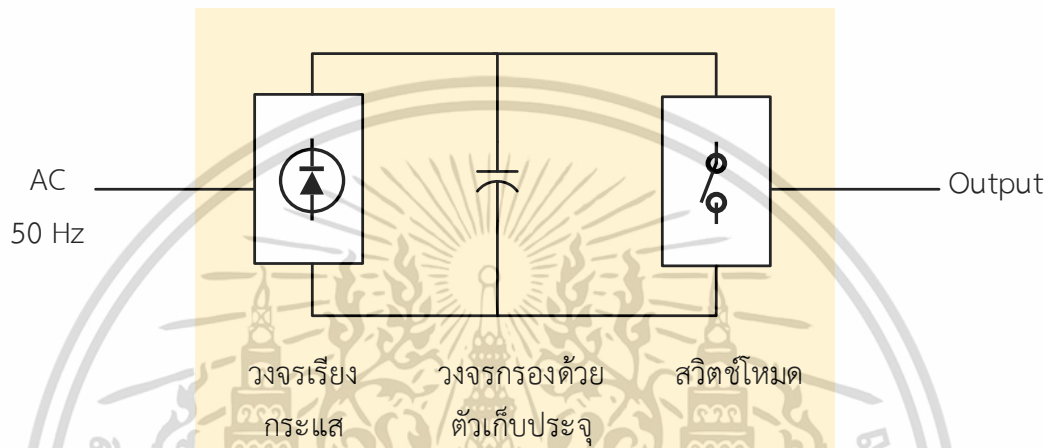
ตารางที่ 2.2 ค่าแรงดันที่ป้องกันและระดับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ยอมรับได้ของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

ประเภทการต่อกราวด์ของสายนิวตรอน	ชนิดของหม้อแปลงเครื่องมือวัด	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของระดับ PD (pC)	
		ชนิดของฉนวน	
		ฉนวนในฉนวนเหลวหรือก๊าซ	ฉนวนแข็ง
Earthed neutral system (earth fault factor ≤ 1.4)	CT and earthed	10	50
	VT	5	20
	Unearthed VT	5	20
Isolated or non-effectively earthed neutral system (earth fault factor ≥ 1.4)	CT and earthed	10	50
	VT	5	20
	Unearthed VT	5	20

2.7 ทฤษฎีคอนเวอร์เตอร์

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้น มีจุดประสงค์เพื่อต้องการให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกควบคุมได้ทั้งขนาดของระดับแรงดัน และความถี่ [5, 6, 11, 12] แสดงดังรูปที่ 2.21 คอนเวอร์เตอร์จะทำการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จากกระแสสลับของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ความถี่ 50 Hz และผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นชนิดไดโอด และส่งต่อไปยังคอนเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ด้านออกที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ตามการควบคุม ชุดคอนเวอร์เตอร์จะมีหลัก ๆ อยู่ 2 ชนิดคือ 1) แหล่งจ่ายแรงดัน และ 2) แหล่งจ่ายกระแส ในแบบแหล่งจ่ายแรงดันนั้นจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก ส่วนแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายกระแสจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง โดยจะมีเทคนิควิธีการควบคุมแตกต่างกันออกไป ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสนใจในส่วนของแบบแหล่งจ่ายแรงดัน โดยจะมีเทคนิควิธีการควบคุมอยู่ 2 วิธี คือ แบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม (PWM) และแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งในแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมีข้อดีคือการควบคุมไม่ซับซ้อน แต่ก็มีข้อเสียคือ ฮาร์มอนิก (Harmonic) ลำดับต่ำ ๆ จะมีค่าสูง [6] ดังนั้นการควบคุมแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม (PWM) จึงถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพราะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเนื่องจากเกิดฮาร์มอนิก (Harmonic) ลำดับต่ำ ๆ มีค่าต่ำ

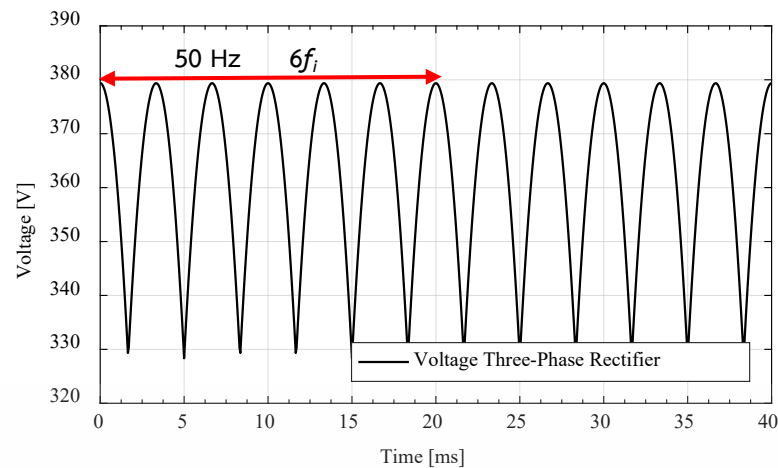


รูปที่ 2.21 สวิตซ์โหมตคอนเวอร์เตอร์

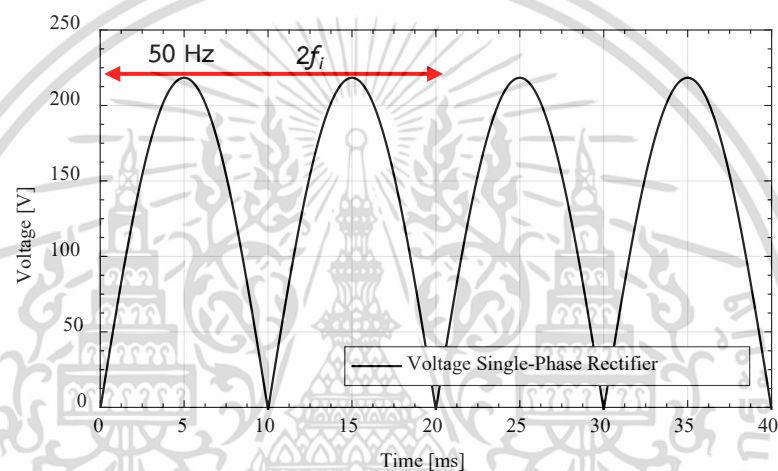
2.7.1 ชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-link)

ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการนำหม้อแปลง 3 เฟส แบบปรับค่าได้นำต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบ 3 เฟส เพื่อทำการเปลี่ยนพลังงานจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากจากคุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส ที่มีข้อได้เปรียบในส่วนของแรงดันระลอกคลื่น (Ripple voltage) จะมีค่าเป็น 6 เท่าของความถี่หลักมูล ($6f$) แสดงดังรูปที่ 2.22 ก) แต่ในส่วนของวงจรเรียงกระแสแบบ 1 เฟส จะมีแรงดันระลอกคลื่นเพียง 2 เท่าของความถี่ ($2f$) แสดงดังรูปที่ 2.22 ข) ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส เพราะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีความเรียบ ประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานต่อเนื่องมากกว่าวงจรเรียงกระแสแบบ 1 เฟส และมีสัญญาณรบกวนต่ำเมื่อนำไปใช้ทำแหล่งจ่ายสำหรับการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส



ข) วงจรเรียงกระแสแบบ 1 เฟส

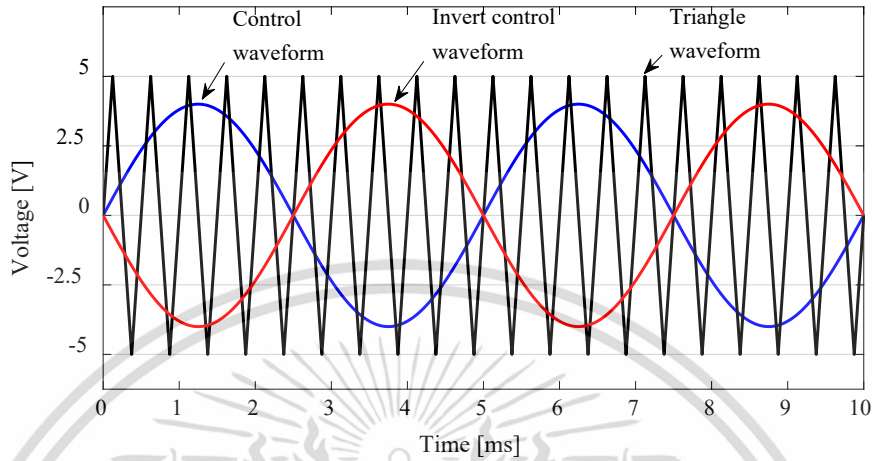
รูปที่ 2.22 แรงดันระลอกคลื่นของวงจรเรียงกระแสแบบ ก) 3 เฟส และ ข) 1 เฟส

2.7.2 เทคนิคการควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width modulation : PWM)

เทคนิคในการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบฟูลบริดจ์ (Full bridge) นั้นจะใช้เทคนิควิธีแบบพื้นฐานอยู่สองวิธีการ คือ แบบไบโพลาร์ (Bipolar) และแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) ซึ่งมีคุณสมบัติและการสวิตซ์ที่แตกต่างกัน แต่ว่าจุดเด่นของเทคนิคการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) คือ การเกิดความถี่ด้านออกมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตซ์ ซึ่งทำให้สามารถลดขนาดวงจรกรองให้มีขนาดเล็ก ราคาต่ำ และลดความสูญเสียได้ ในส่วนของการควบคุมสวิตซ์แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) นั้น จะทำการแยกสัญญาณควบคุมในกึ่ง A และกึ่ง B ออกจากกัน โดยในกึ่ง A จะถูกควบคุมจากสัญญาณไซน์บวก (Control waveform) เทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangle waveform : V_{tri}) ในขณะที่กึ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณไซน์ลบ (Invert control waveform) เทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangle waveform) ดังแสดงการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) แสดงดังรูปที่ 2.23 และในรูปที่ 2.24 แสดงการต่อเพาเวอร์คอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

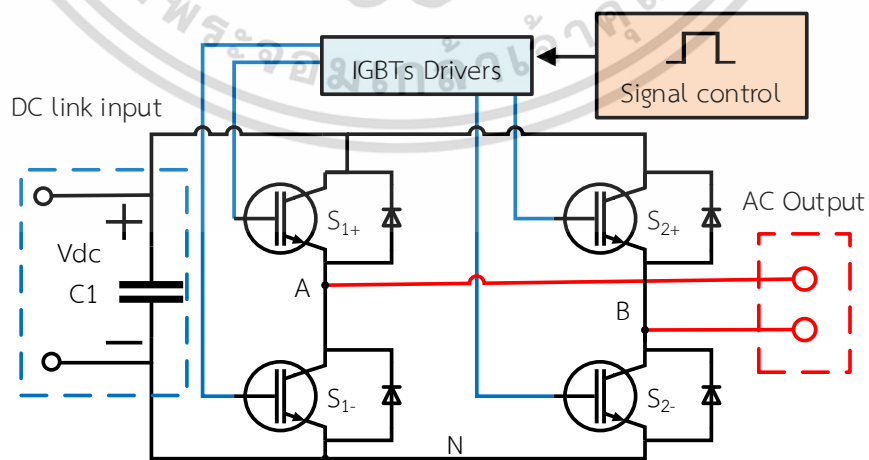
เวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full-bridge converter) และในส่วนของเงื่อนไขการสวิตช์ซิง เพื่อควบคุมไอจีบีที (IGBT) แสดงดังตารางที่ 2.3 ในส่วนของรูปคลื่นแรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์กรณีก่อน และหลังวงจรกรองแสดงดังรูปที่ 2.25 จะอธิบายการควบคุมอย่างละเอียดในส่วนต่อไป



รูปที่ 2.23 การสวิตช์ซิงแรงดันไฟฟ้าเทคนิคแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar)

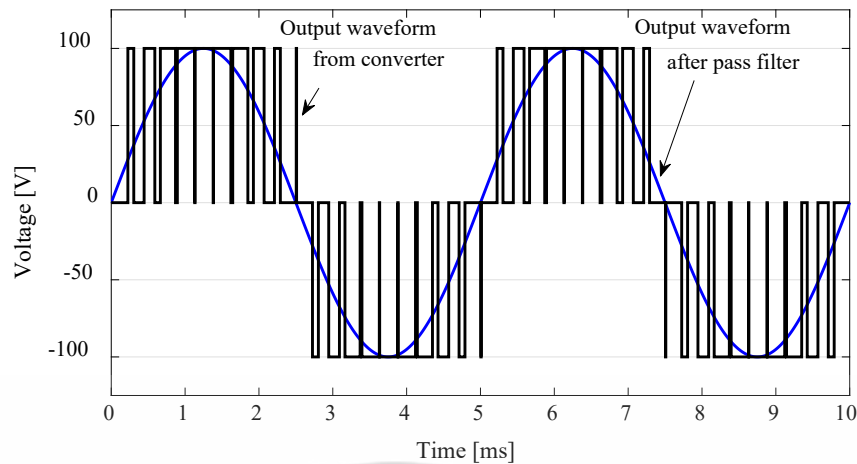
ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขการสวิตช์ซิงแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส สวิตช์ 4 ตัว และแรงดันไฟฟ้าด้านออกของการควบคุมคอนเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar)

สถานะ	สวิตช์นำกระแส		ไดโอดนำกระแส		V_o
	ON	OFF	$I_o > 0$	$I_o < 0$	
1	S_{1+}, S_{2-}	S_{1-}, S_{2+}	S_{1+}, S_{2-}	D_{1+}, D_{2-}	V_{dc}
2	S_{1+}, S_{2+}	S_{1-}, S_{2-}	S_{1+}, D_{2+}	D_{1+}, S_{2+}	0
3	S_{1-}, S_{2+}	S_{1+}, S_{2-}	D_{1-}, D_{2+}	S_{1-}, S_{2+}	$-V_{dc}$
4	S_{1-}, S_{2-}	S_{1+}, S_{2+}	D_{1-}, S_{2-}	S_{1-}, D_{2-}	0



รูปที่ 2.24 การต่อเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full bridge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์

การสวิตชิงแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม (PWM) ในวงจรคอนเวอร์เตอร์จะต้องทำการสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกรูปไซน์ (Sinusoidal control signal) ที่สามารถทำการปรับขนาดและความถี่ได้ตามต้องการ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ตามความถี่ที่เราต้องการนั้นมาทำการเปรียบเทียบสัญญาณกับรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangular waveform) แสดงดังรูปที่ 2.25 ความถี่ของความถี่สวิตชิง (f_s) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมโดยมีค่าน้อย และความหมายที่สำคัญของการควบคุมสวิตชิงแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม (PWM) ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้คือ

$V_{control}$	= สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการสร้างควมถี่ด้านออก
V_{tri}	= สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตชิง
f_1	= ความถี่หลักมูล
f_s	= ความถี่ของการสวิตชิง
m_a	= อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
m_f	= อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

ค่า m_a และ m_f จะสามารถหาค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (2.2)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.3)$$

โดย

$V_{control}$	= ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์
V_{tri}	= ค่ายอดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ $0 \leq m_o \leq 1$ นั้นจะเป็นช่วงที่มีการมอดูเลตเป็นแบบเชิงเส้น หมายความว่า องค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านออก (Fundamental frequency component of output voltage) โดยจะมีลักษณะแปรผันเชิงเส้นกับค่า m_o และในกรณีที่ m_o เป็นช่วงของการควบคุมแบบโอเวอร์มอดูเลต ที่จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิก (Harmonic) สูงกว่าช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น

สำหรับเงื่อนไขของการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar voltage switching) ก็คือ สวิตช์ในกึ่ง A และ B จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกันแสดงดังรูปที่ 2.20 คือ สวิตช์ในกึ่ง A จะถูกควบคุมจากสัญญาณ $V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (v_{tri}) ขณะที่สวิตช์ในกึ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณ $-V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (v_{tri}) จากการสวิตช์จะมีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อ $V_{control} > v_{tri}$: สวิตช์ S_{1+} จะนำกระแส	$V_{AN} = V_{dc}$
เมื่อ $V_{control} < v_{tri}$: สวิตช์ S_{1-} จะนำกระแส	$V_{AN} = 0$
เมื่อ $-(V_{control}) > v_{tri}$: สวิตช์ S_{2+} จะนำกระแส	$V_{BN} = V_{dc}$
เมื่อ $-(V_{control}) < v_{tri}$: สวิตช์ S_{2-} จะนำกระแส	$V_{BN} = 0$

จากตารางที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของแรงดันด้านออก หรือแรงดันระหว่างสาย A และ B ที่เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอยู่ระหว่างบวกไปศูนย์ หรือจากศูนย์ไปยังลบ ดังนั้นจึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากการสวิตช์สูงเหมือนการควบคุมแบบ ไบโพลาร์ (Bipolar) ที่จะเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอยู่ระหว่างบวกไปยังลบ

โดยจุดเด่นของการควบคุมแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) ที่สำคัญ คือ การเกิดความถี่ฮาร์โมนิก (Harmonic) ด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของของความถี่สวิตช์ ตัวอย่างเช่น กรณีใช้ความถี่สวิตช์ควบคุมที่ 10 kHz ค่าแรงดันด้านออกจะประกอบไปด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ที่มีความถี่หลักมูล และความถี่ฮาร์โมนิก (Harmonic) ที่ 2 เท่า โดยผลของการที่มีความถี่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าก็จะมีข้อดีตรงที่ ระบบวงจรกรองเพื่อใช้สำหรับกำจัดฮาร์โมนิก (Harmonic) สามารถออกแบบให้มีขนาดเล็ก มีความสูญเสียในระบบการทดสอบต่ำ และราคาที่ถูกลงอีกด้วย

บทที่ 3

การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้าง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทดสอบและการประกอบสร้างวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ ชนิดอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่นำเทคนิควิธีการควบคุมการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width modulation : PWM) มาวิเคราะห์ รวมทั้งวิเคราะห์ระบบวงจรรองเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่หลักมูล (f_1) ได้ตามการควบคุม และมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total harmonic distortion : THD) ต้องมีค่าไม่เกิน 5% โดยผ่านตามมาตรฐาน IEC 60270 [1] วงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ ที่ประกอบสร้างจะประกอบไปด้วยชุดวงจรเรียงกระแส ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ ชุดวงจรควบคุม และวงจรรองความถี่ โดยส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกนำมาประกอบกันเพื่อเป็นวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อใช้สำหรับป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงเพื่อการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันในลำดับต่อไป

3.1 หลักการในการออกแบบ

การออกแบบวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่หลักมูล (f_1) ได้นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง เพื่อในการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน โดยวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบจะต้องสามารถทำการทดสอบได้ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของ IEC 60270 [1] และมาตรฐานการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน IEC 61869 [4] ดังนั้นการออกแบบและประกอบสร้างวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ จะมีเงื่อนไขดังนี้

1. วงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ประกอบสร้างขึ้นจะต้องสามารถจ่ายแรงดันให้หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงเพื่อเพิ่มระดับแรงดันให้ได้รับระดับแรงดันทดสอบตามที่มาตรฐานการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกำหนด

2. วงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ประกอบสร้างขึ้นจะต้องสามารถปรับเปลี่ยนความถี่หลักมูล (f_1) ได้ในที่นี่จะสนใจที่ความถี่ 200 Hz เพื่อป้องกันการอิมพัลส์ของแกนเหล็กเมื่อทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบตามที่มาตรฐานการทดสอบกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ ที่ประกอบสร้างขึ้นจะต้องสามารถสร้างแรงดันทดสอบที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะรูปคลื่นที่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไม่เกิน 5% ตามที่มาตรฐาน IEC 60270 [1] กำหนด

4. ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise) ในระบบของการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะต้องมีค่าไม่เกิน 2.5 pC ซึ่งค่ามาตรฐานกำหนดระดับการเกิดสัญญาณรบกวนต้องมีค่าไม่เกิน 5 pC

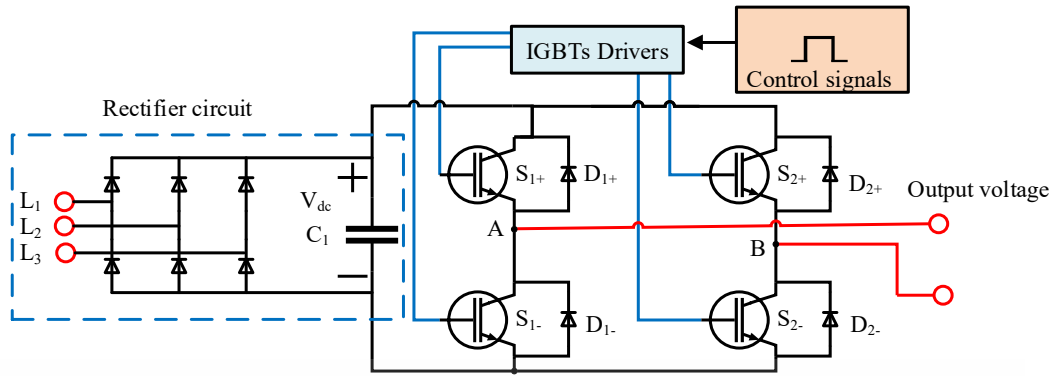
3.2 ส่วนประกอบของวงจรคอนเวอร์เตอร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบและประกอบสร้างวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับแปลงความถี่โดยมีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 4 ส่วน ได้แก่

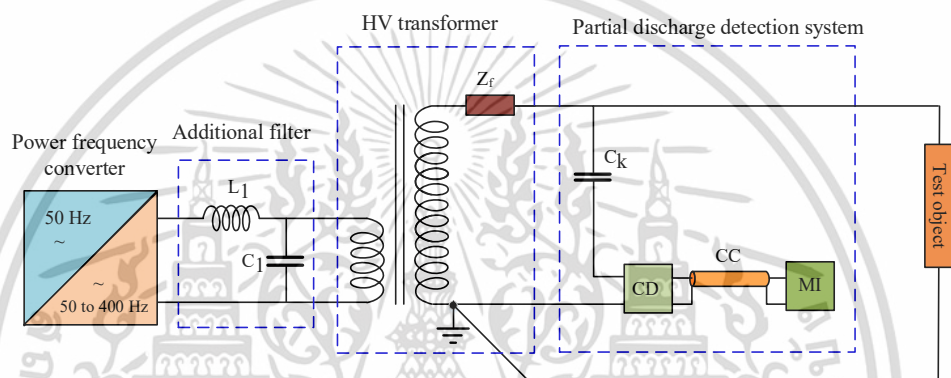
1. ชุดวงจรเรียงกระแส 3 เฟส
2. ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์
3. ชุดวงจรควบคุม
4. ชุดวงจรรองความถี่

ชุดวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์นี้จะรับแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งมีระดับแรงดันที่ 380 V ความถี่ 50 Hz โดยมีการเชื่อมต่อผ่านหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ 3 เฟส พิกัด 0-420 V, 30 A และหม้อแปลงไอโซเลทแรงดันไฟฟีกัด 110V / 110V เพื่อควบคุมระดับแรงดันที่จ่ายให้กับชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ จากนั้นจะผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสจะมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่เพื่อลดระดับระลอกคลื่นของแรงดันให้มีความเรียบมากขึ้น ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่วงจรคอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งต่อกันอยู่แบบเฮสบริดจ์ (H-bridge converter) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ไอจีบีที (IGBT) เพราะสามารถส่งจ่ายกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ และโครงสร้างแข็งแรงทนทาน การปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่หลักมูล (f_1) ต่าง ๆ ที่ถูกควบคุมโดยการสวิตซ์ซึ่งของชุดสร้างสัญญาณควบคุมแบบดิจิทัล คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F429I และจากนั้นแรงดันด้านออกที่เป็นแรงดันกระแสสลับจะต่อผ่านวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่านเพื่อทำการกำจัดฮาร์โมนิกส์และสัญญาณรบกวน (Background noise) ที่เกิดขึ้นจากผลของการสวิตซ์ซึ่งของวงจรคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันไซน์มีความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมไม่เกิน 5% ก่อนที่จะต่อวงจรเข้ากับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงเพื่อทำการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นตามมาตรฐานการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1 ในส่วนของระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบด้วยสายสัญญาณแบบใยแก้วนำแสงที่มีข้อดีคือสามารถลดสัญญาณรบกวนที่มาทางอากาศแสดงดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

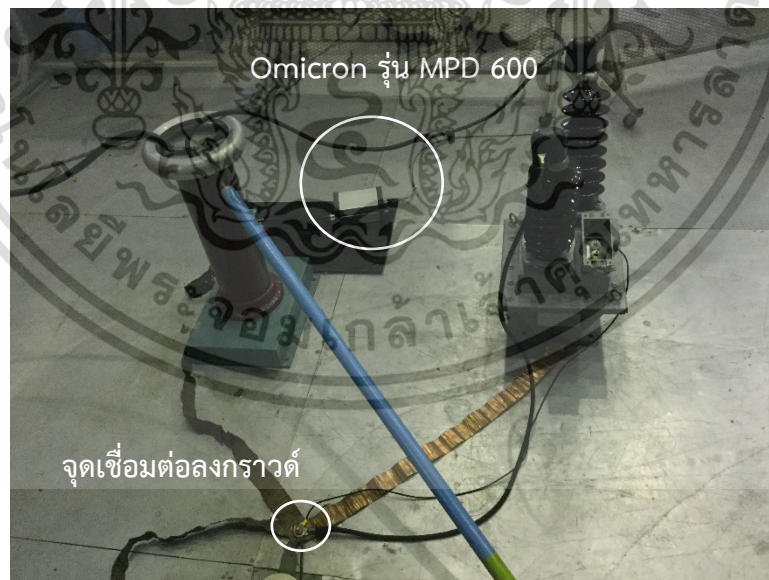
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างชุดทดสอบเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 3.2 โครงสร้างระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 3.3 ระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เชื่อมต่อผ่านสายสัญญาณโยแก้วนำแสง Omicron รุ่น MPD 600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

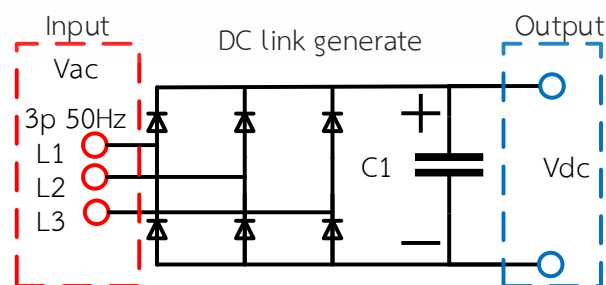
3.3 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสนี้จะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยรับพลังงานไฟฟ้ามาจากหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ 3 เฟส ตั้งแต่ 0-380 V_{AC} และต่อกับหม้อแปลงไอโซเลทแรงดันไฟ พิกัด 220V / 115V แสดงดังรูปที่ 3.4 ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันตั้งแต่ 0-311 V_{DC} โดยวงจรเรียงกระแสที่ใช้นั้นจะเป็นวงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส เต็มคลื่นดังแสดงโดยแอมพลิจูดแสดงดังรูปที่ 3.5 วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส มีประสิทธิภาพในด้านการลดแรงดันกระเพื่อมของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดีกว่าเมื่อเทียบกับวงจรเรียงกระแสแบบ 1 เฟส ในส่วนของชุดวงจรเรียงกระแสจะใช้นั้นจะใช้เป็นรุ่น Sanrex : DF75BA80 แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยชุดวงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส ที่สร้างขึ้นจะมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่เพื่อลดระดับระลอกคลื่นแสดงดังรูปที่ 3.7



- 1) หม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ 3 เฟส พิกัด 0-420 V, 30 A
- 2) หม้อแปลงไอโซเลทแรงดันไฟ พิกัด 220V / 115V

รูปที่ 3.4 แหล่งจ่ายไฟให้วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส

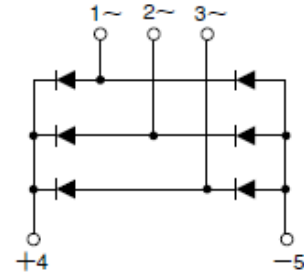


รูปที่ 3.5 ไดโอดแอมพลิจูดแสดงดังรูปที่ 3.5 สำหรับจ่ายให้วงจรคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

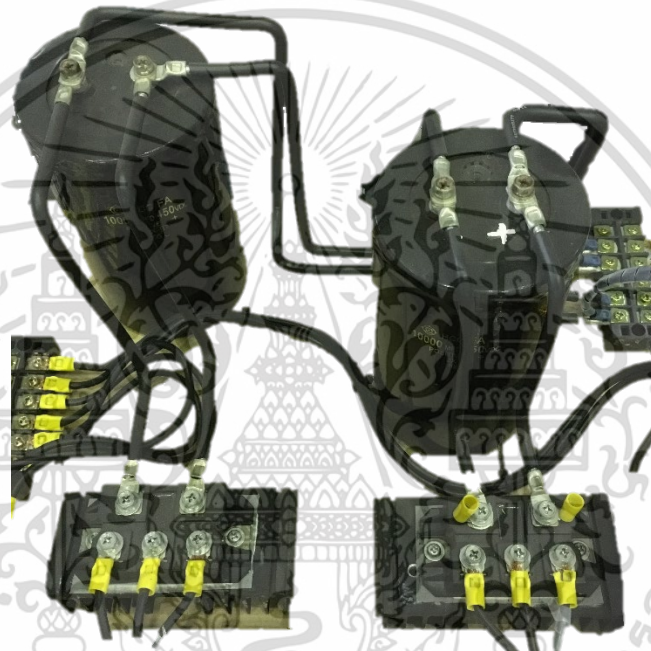


ก) วงจรเรียงกระแส Sanrex รุ่น DF75BA80



ข) วงจรสมมูลย่อบุหลามายเลขข้อต่อ

รูปที่ 3.6 ไดโอดเรียงกระแสตรงแบบ 3 เฟส



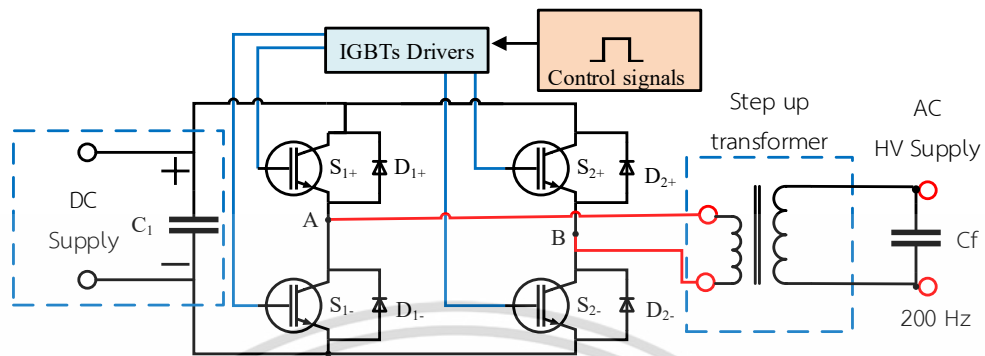
รูปที่ 3.7 ชุดวงจรเรียงกระแสตรงแบบ 3 เฟส ที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้วงจรคอนเวอร์เตอร์

3.4 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์

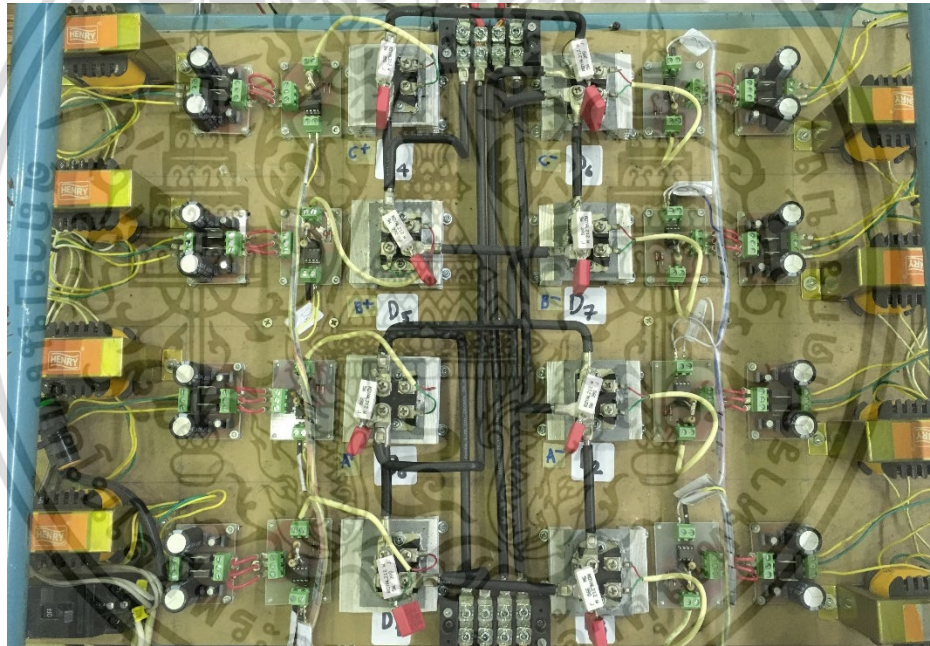
วงจรคอนเวอร์เตอร์นี้จะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสตรงแบบ 3 เฟส แล้วมาทำการแปลงแรงดันให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์ โดยสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้จากวงจรชุดควบคุมการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าด้วยเทคนิคพีดีบีเปลยเอ็ม (PWM) แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar voltage switching) โดยการใช้ไอจีบีที (IGBT) ต่อกันแบบเฮสบริดจ์ (H-bridge converter) ซึ่งรูปคลื่นแรงดันที่ได้จะมีทั้งหมด 3 ระดับแรงดัน คือ $+V_{DC}$ 0 และ $-V_{DC}$ ซึ่งจะทำให้ได้รูปคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงไซน์ (Sine waveform) มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิควิธีไบโพลาร์ (Bipolar voltage switching) ที่จะมีเพียงแค่ 2 ระดับแรงดัน คือ $+V_{DC}$ และ $-V_{DC}$ สำหรับการประกอบสร้างวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (Power converter) นี้จะใช้ไอจีบีที (IGBT) IXYS-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IXXN110N65B4H1 ซึ่งเป็นรุ่นที่มีไดโอดแคลมป์ (Diode clamps) ในตัวแสดงดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แผนผังวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์

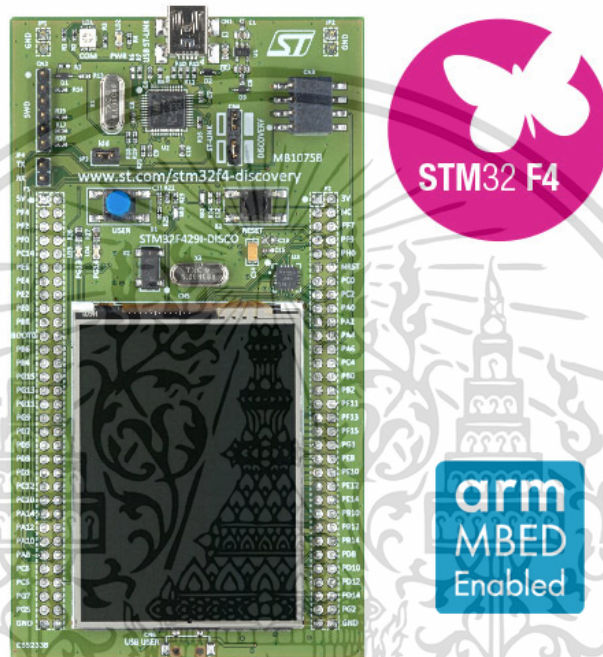


รูปที่ 3.9 วงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบและประกอบสร้างชุดวงจรควบคุม

วงจรถวลคุมชนิดสัญญาณดิจิตอลจะใช้ตัวบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ STM32F429I DISCOVERY แสดงดังรูปที่ 3.10 เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตซ์ไอจีบีที (IGBT) โดยสร้างวงจรถวลคุมด้วยโปรแกรม Matlab simulink แล้ว Compiler ด้วยฟังก์ชัน Waijung ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณควบคุมที่มีระดับแรงดัน 5 V ออกมาตามพอร์ทด้านขวาออกที่กำหนดแสดงดังรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12



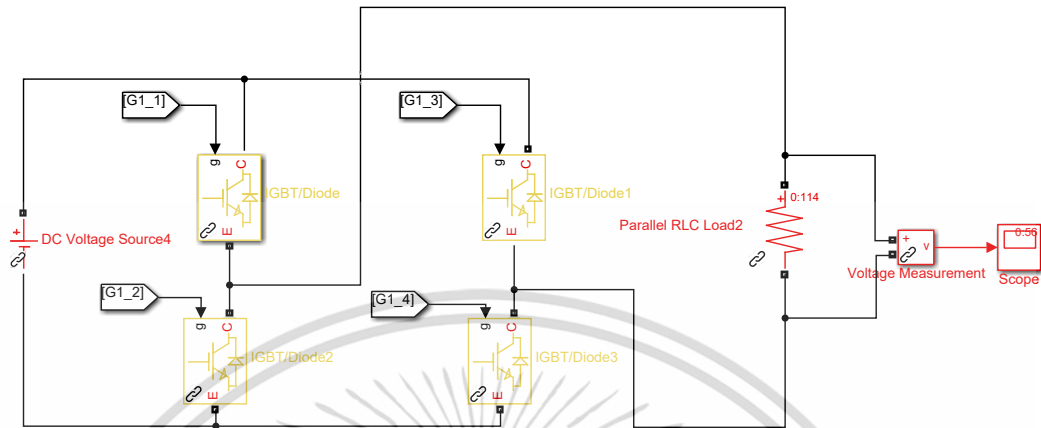
รูปที่ 3.10 ชุดตัวบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ STM32F429I DISCOVERY

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทดสอบสัญญาณควบคุมชนิดสัญญาณดิจิตอลทั้งหมดเป็นแบบเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) เทคนิคการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar voltage switching) โดยปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ (f_s) และอัตราการมอดูเลต ที่ m_o 0.8 และ 1.0 ตามลำดับความถี่สวิตซ์ (f_s) ตั้งแต่ 1 kHz จนถึง 20 kHz เพื่อศึกษาผลของความถี่สวิตซ์ (f_s) และอัตราการมอดูเลตของวงจรถวลคุมเวอร์คอนเวอร์เตอร์ ว่ามีประสิทธิภาพเป็นเช่นไร และส่งผลต่อสัญญาณรบกวนขณะทำการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิซฮาร์โมนิกบางส่วนหรือไม่ ในขั้นตอนการสร้างสัญญาณจะใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ในการสร้างโมเดลทดสอบเพื่อให้ได้สัญญาณตามที่ต้องการ

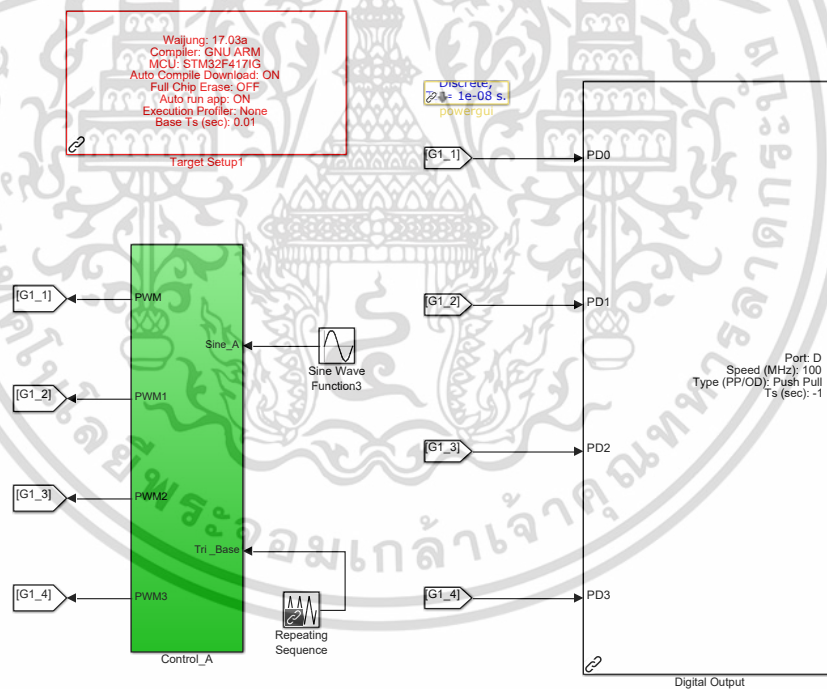
ในส่วนของการสร้างสัญญาณควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) เทคนิคการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar voltage switching) จะใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณโดยการนำสัญญาณไซน์บวกและสัญญาณไซน์ลบมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม หลังจากนั้น จะทำการใช้ตัว Compiler ด้วยฟังก์ชัน Waijung เพื่อบ่อนโปรแกรมควบคุมลงในบอร์ด

ไมโครคอนโทรเลอร์ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 3.13 และยังใช้โปรแกรม MATLAB Simulink วิเคราะห์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อวิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไซน์ เบื้องต้นที่ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz และ 200 Hz แสดงดังรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15

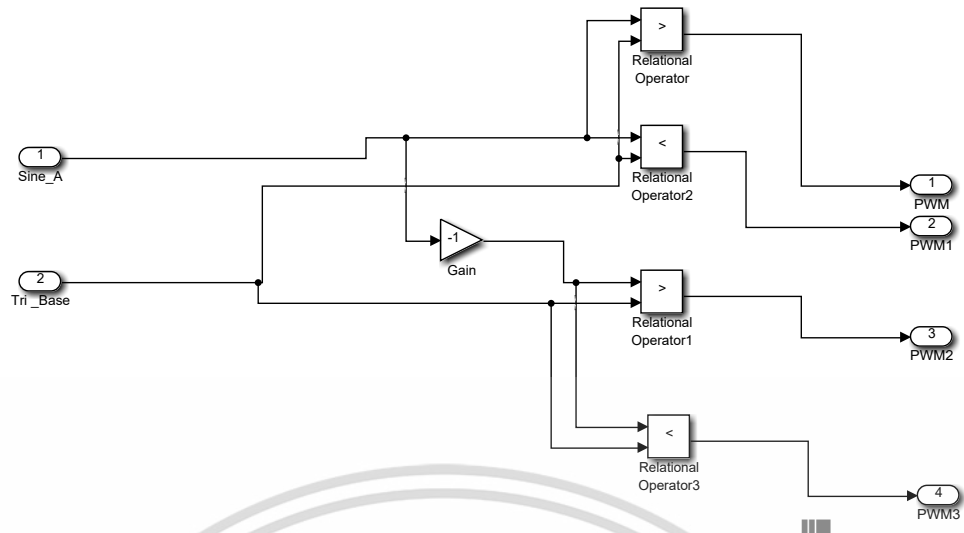


รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมการต่อ ไอจีบีที (IGBT) เพื่อทดสอบการสวิตช์แบบเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)

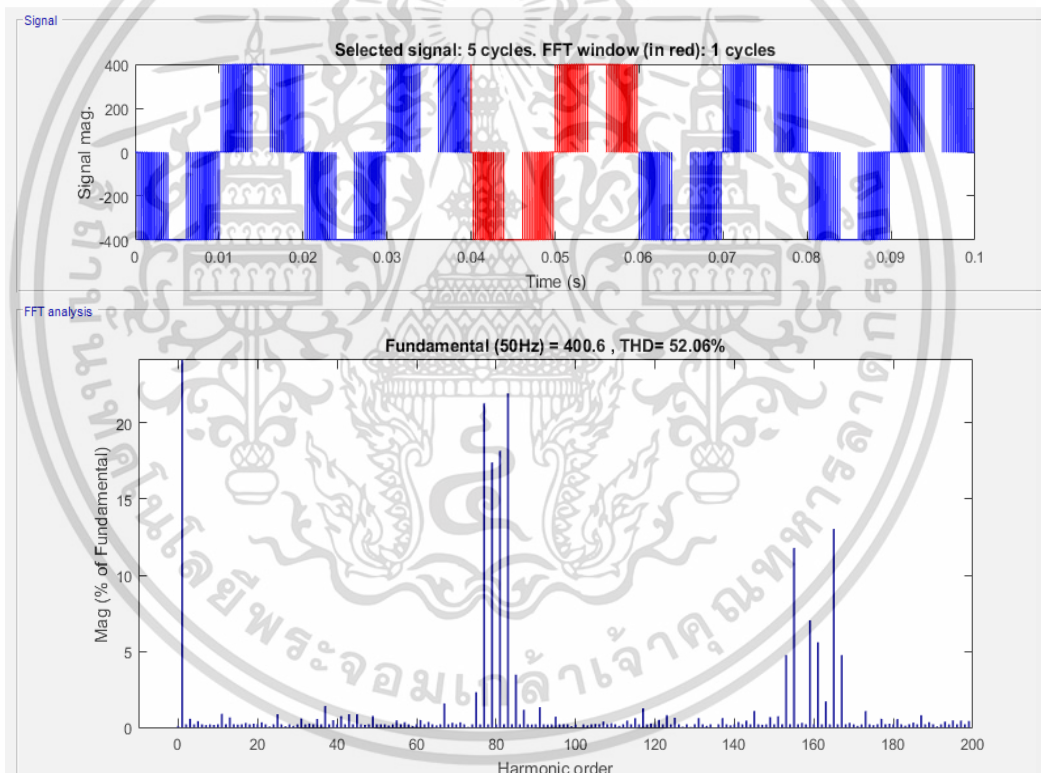


รูปที่ 3.12 ไดอะแกรมสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

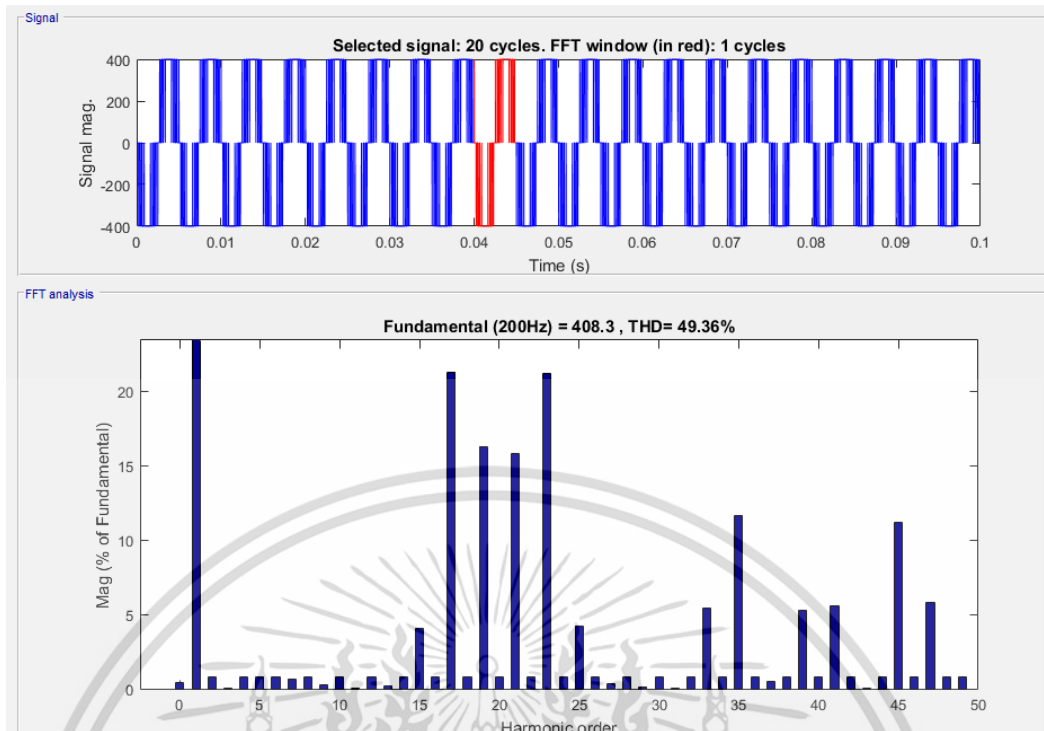


รูปที่ 3.13 ไตอะแกรมสร้างสัญญาณการมอดูเลตควบคุมดิจิทัลแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)



รูปที่ 3.14 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไซน์ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz ความถี่สวิตซ์ (f_s) 2.0 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (THD,) 52%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

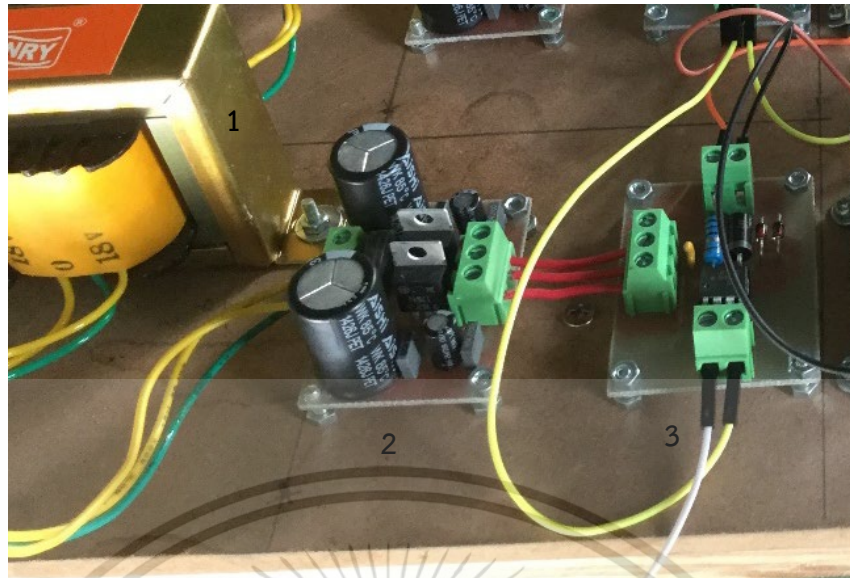


รูปที่ 3.15 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไซน์ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ความถี่สวิตซ์ (f_s) 2.0 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (THD,) 49.36 %

3.6 วงจรขับเคลื่อนควบคุมคอนเวอร์เตอร์

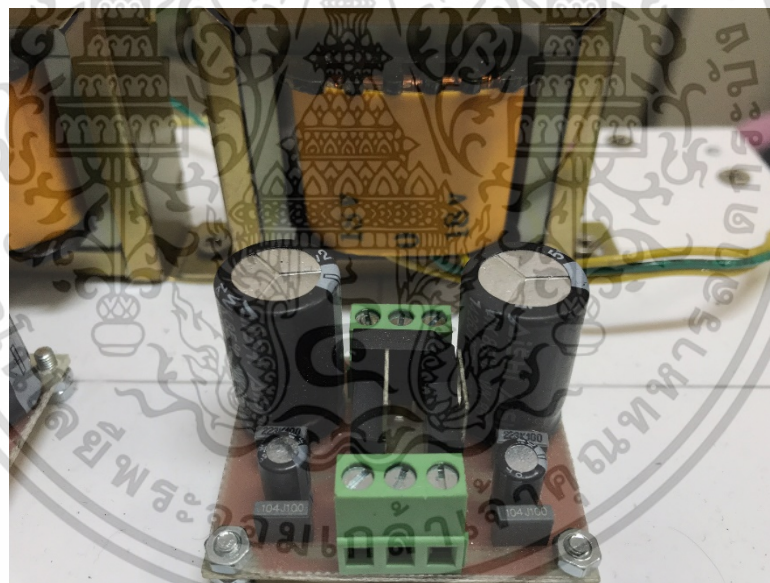
วงจรขับเคลื่อนสำหรับควบคุมคอนเวอร์เตอร์ จะใช้เทคนิควิธีการแยกกราวด์วงจรขับเคลื่อนของสวิตซ์ ไอจีบีที (Isolate gate bipolar transistor : IGBT) เพื่อแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างภาคคอนโทรล และภาคกำลังโดยใช้ไอซีออปโตคัปเปิลเลอร์ (Opto coupler) เบอร์ HCPL-3120 โดยหลักการทำงานของไอซีชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อทางแสงด้วยการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสงส่งไปยังตัวรับสัญญาณแสง จากนั้นตัวรับสัญญาณแสงจะเปลี่ยนสัญญาณแสงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรไฟฟ้าสองวงจรเพื่อความปลอดภัยของระบบ โดยเทคนิควิธีการขับเคลื่อนไอจีบีที (IGBT) จะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 15 / 0 / -15 V_{dc} ข้อดีของการใช้แรงดันลบในการขับเคลื่อนไอจีบีที (IGBT) คือสามารถบังคับให้ไอจีบีที (IGBT) หยุดนำกระแสได้อย่างสมบูรณ์ และยังใช้เทคนิควิธีการขับเคลื่อนไอจีบีที (IGBT) แบบควบคุมสวิตซ์นำกระแสช้า (Slow turn on) และหยุดนำกระแสไว (Fast turn off) แสดงดังรูปที่ 3.16-3.19 วงจรขับเคลื่อนไอจีบีที (IGBT) ที่ออกแบบและสร้างมีช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ที่สวิตซ์ไอจีบีที 1.92 μ s แสดงดังรูปที่ 3.20 วงจรสับเบอร์สำหรับลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตซ์ ป้องกันไอจีบีที (IGBT) จากแรงดัน และกระแสเกิน (Voltage and current stress) แบบความต้านทาน และคาปาซิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.21 สวิตซ์ไอจีบีที รุ่น IXN110N65B4H1 และวงจรตำแหน่งขา แสดงดังรูปที่ 3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



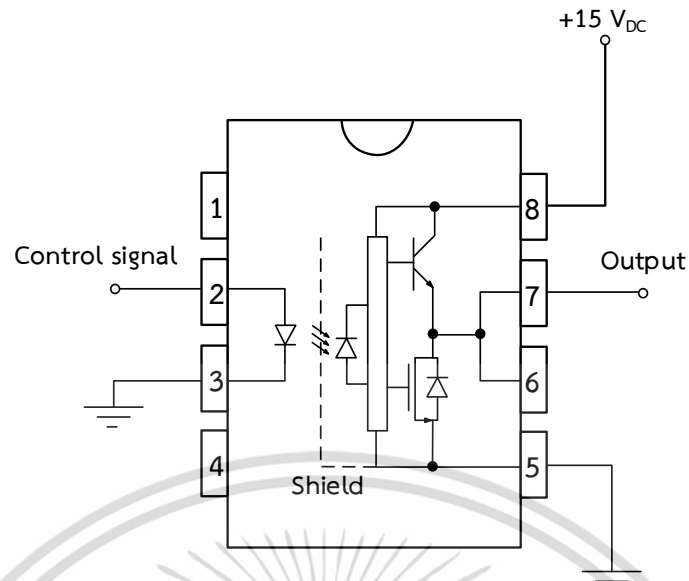
- 1) หม้อแปลงแรงดัน 18 / 0 / -18 V 2) วงจรเร็คทูลิเตอร์ 15 / 0 / -15 V
 3) วงจรขับเกตแบบแยกกราวด์ควบคุมสวิตซ์ไอจีบีที (IGBT)

รูปที่ 3.16 ชุดวงจรขับเกตควบคุมคอนเวอร์เตอร์

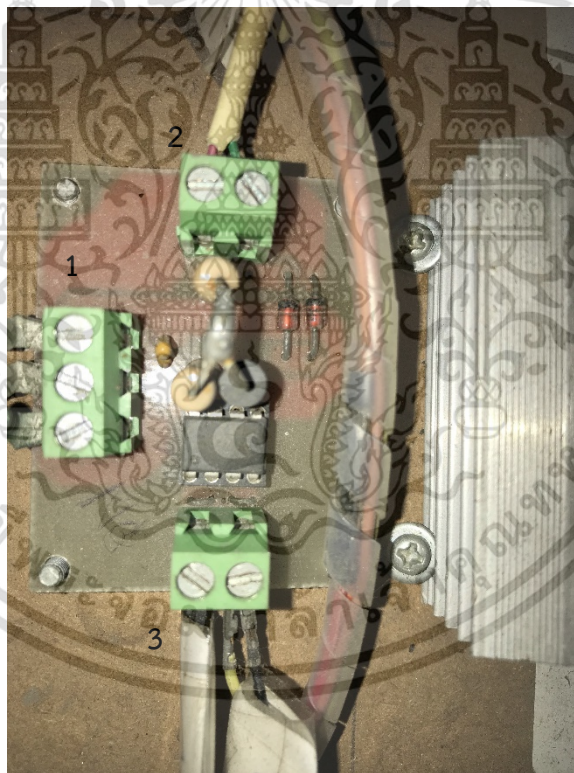


รูปที่ 3.17 ชุดวงจรเร็คทูลิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก 15 / 0 / -15 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



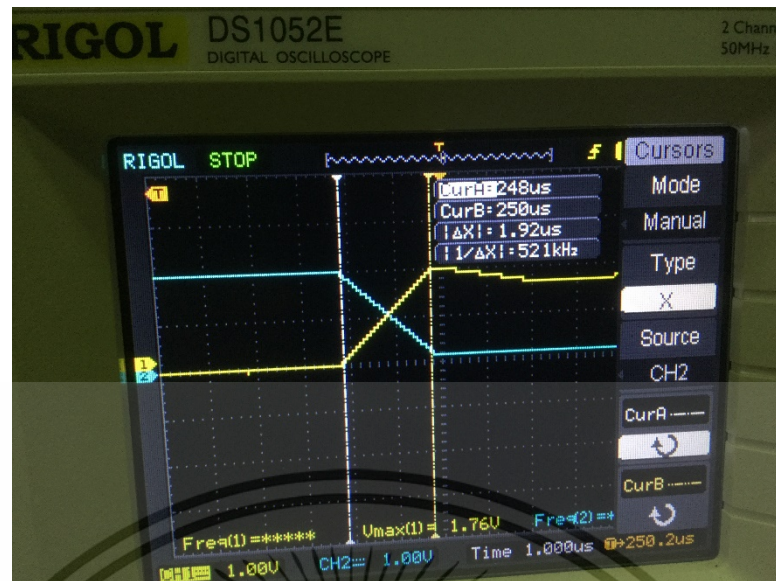
รูปที่ 3.18 ไอซีออปโตคัปเปิลอร์ (Opto coupler) เบอร์ HCPL-3120



- 1) ด้านรับไฟเข้าไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) ด้านส่งสัญญาณควบคุมสวิตซ์ไอจีบีที
- 3) ด้านรับสัญญาณเข้าจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

รูปที่ 3.19 วงจรขับเกดแบบแยกกราวด์ควบคุมสวิตซ์ไอจีบีที (IGBT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



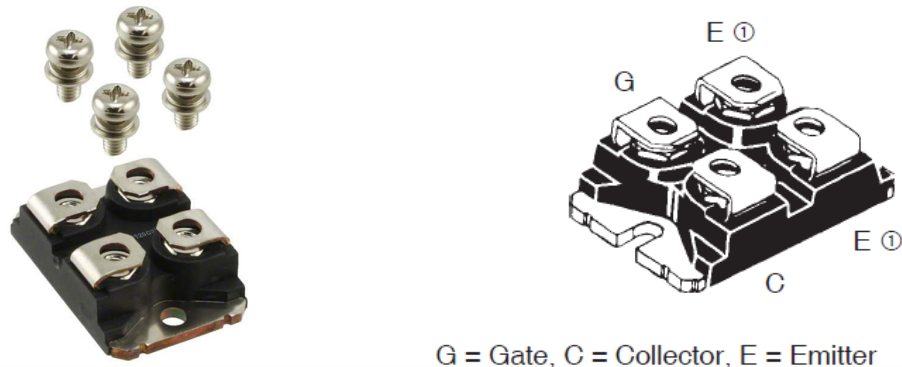
รูปที่ 3.20 เวลาเดดไทม์ (Dead time) ที่สวิตช์ไอจีบีที (IGBT)



- 1) สวิตช์ไอจีบีที (IGBT) รุ่น IXNN110N65B4H1
- 2) ความต้านทาน
- 3) ตัวเก็บประจุโพลีโพรไพลีน (Polypropylene capacitor)

รูปที่ 3.21 สวิตช์ไอจีบีที (IGBT) ที่ต่อกับวงจรสแน็บเบอร์เพื่อป้องกันไอจีบีทีจากแรงดันและกระแสเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



G = Gate, C = Collector, E = Emitter

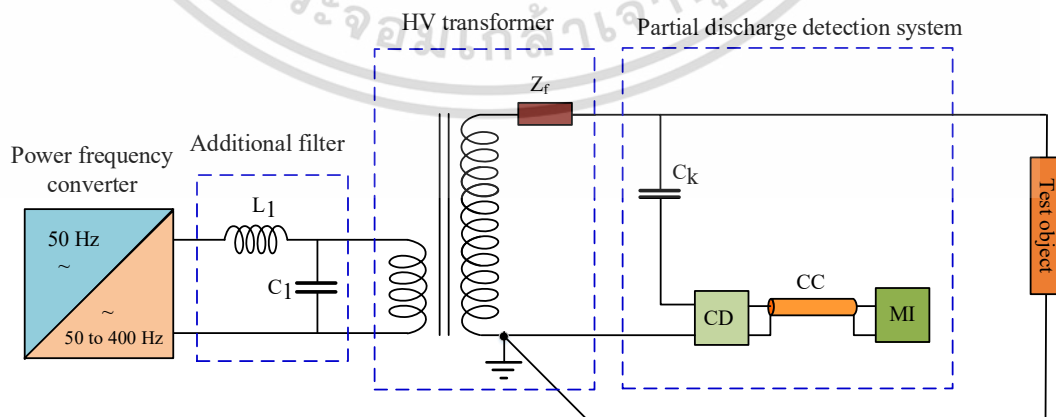
รูปที่ 3.22 สวิตช์ไอจีบีที (IGBT) และวงจรตำแหน่งเกต (G) คอลเลกเตอร์ (C) และอิมิตเตอร์ (E)

3.7 วงจรกรองความถี่

ในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันจากวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์นั้นจำเป็นต้องมีวงจรกรองความถี่เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไซน์และเพื่อลดระดับสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้นในระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์

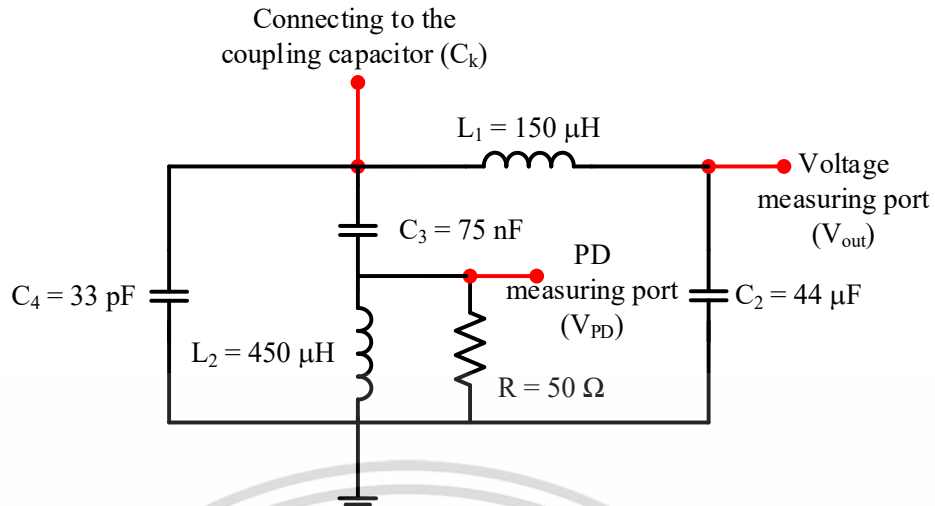
3.7.1 การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ด้วยโปรแกรม EMTP กรณีไม่ต้องวงจรกรองความถี่

ระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่จัดสร้างขึ้นมีการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 3.23 โดยจะต่อตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) ในการทดลอง คือ 1 nF และต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ (CD) ที่ใช้สำหรับวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน ที่มีการออกแบบค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามวงจรสมมุทธ์แสดงดังรูปที่ 3.24 คุณสมบัติของช่วงความถี่ด้านออกมีฟังก์ชันถ่ายโอนของอิมพีแดนซ์ระบบวัดและตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวในโดเมนความถี่ด้านต่ำและสูงอยู่ในช่วงแบนด์วิธ (Bandwidth) ความถี่ตัด (Cutoff frequency) ที่ช่วงความถี่ 30 kHz ถึง 20 MHz แสดงดังรูปที่ 3.25

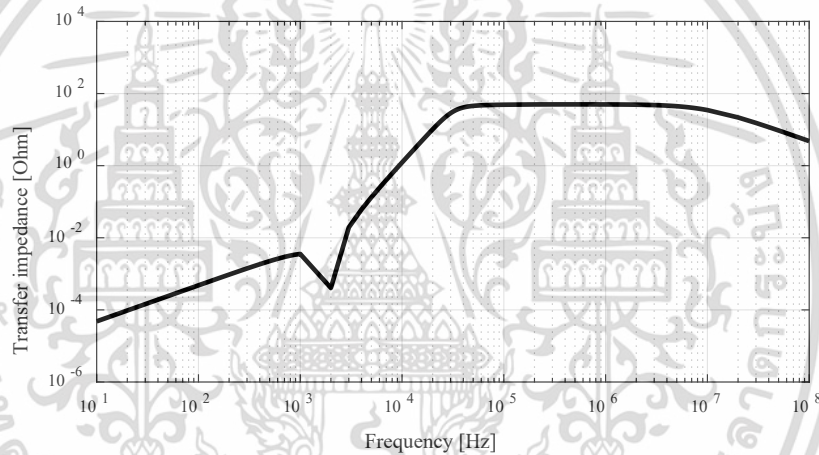


รูปที่ 3.23 ระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่อร่วมกับวงจรกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



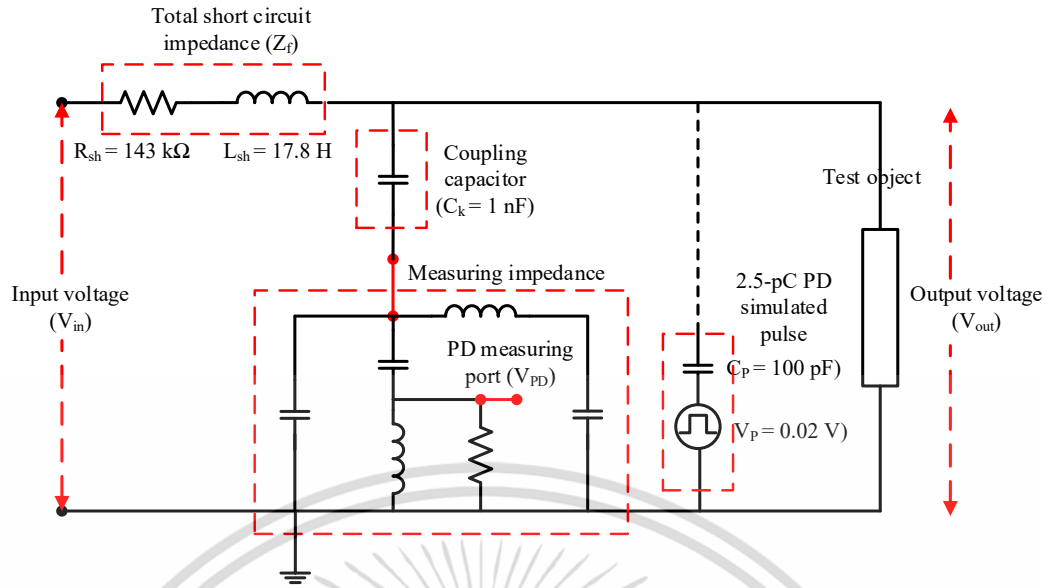
รูปที่ 3.24 วงจรสมมูลของอิมพีแดนซ์ระบบวัด (CD)



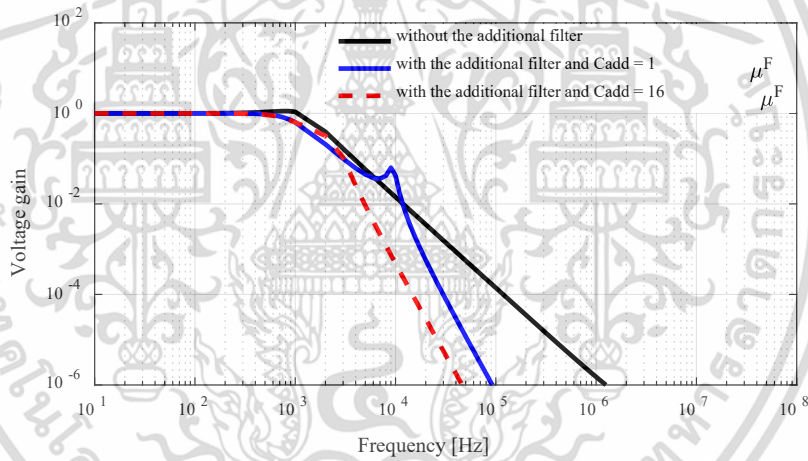
รูปที่ 3.25 ฟังก์ชันถ่ายโอนของอิมพีแดนซ์ระบบวัด (CD) ในโดเมนความถี่

วงจรสมมูลของระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะประกอบไปด้วยหม้อแปลงแรงดันสูงทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.26 และฟังก์ชันถ่ายโอนของแรงดันด้านออก (V_{out}/V_{in}) สามารถคำนวณและแสดงดังรูปที่ 3.27 ฟังก์ชันถ่ายโอนจะแสดงถึงคุณลักษณะของวงจรรองรับแบบความถี่ต่ำผ่าน ที่มีค่าความถี่คutoff ประมาณ 1200 Hz ในระบบจะมีอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงแรงดันสูงทดสอบที่พิกัด 460 V / 75 kV ขนาดพิกัด 40 kVA และเมื่อย้ายค่าอิมพีแดนซ์ไปอยู่ในส่วนด้านแรงสูง ซึ่งมีค่าตัวแปรแสดงดังรูปที่ 3.15 สังเกตได้ว่าหม้อแปลงแรงดันสูงทดสอบนั้นถือว่ามีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงมากซึ่งจะไม่มีผลต่อวงจรทดสอบ ดังนั้นเมื่อจำลองปล่อยกระแสพัลส์ขนาด 2.5 pC เข้าไปในระบบสัญญาณแรงดันด้านออกที่วัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แสดงค่าแรงดันเท่ากับ 5 mV แสดงดังรูปที่ 3.28 ซึ่งหมายความว่าถ้าต้องการให้กระแสพัลส์ 2.5 pC ตรวจวัดได้ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise) แรงดันต้องต่ำกว่า 5 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

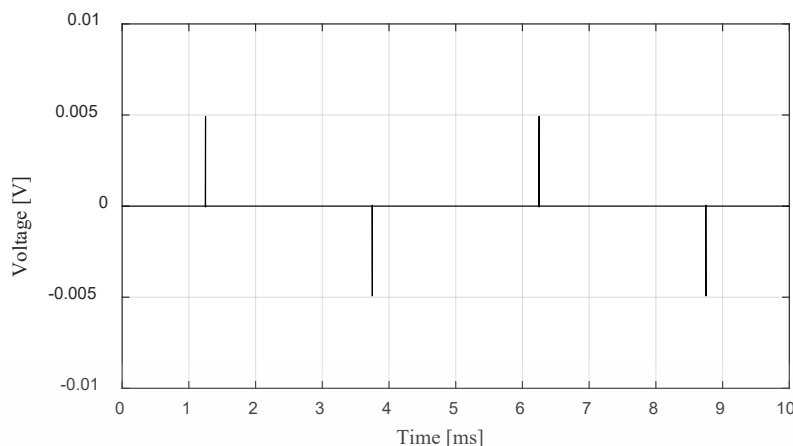


รูปที่ 3.26 วงจรสมมูลของระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีไม่ต่อวงจรกรอง



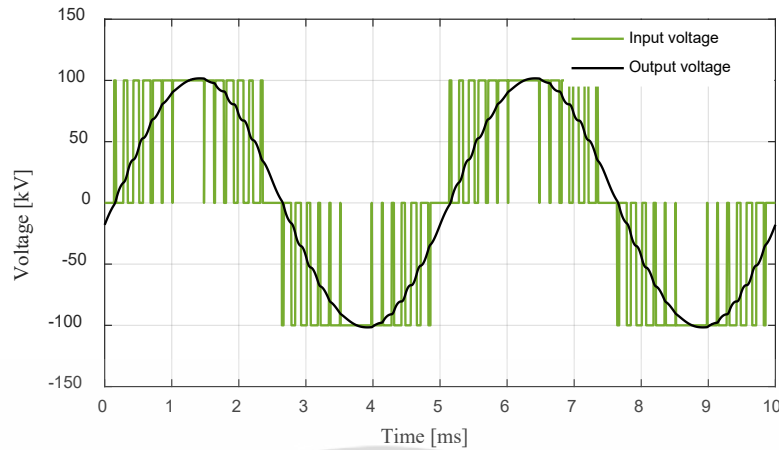
รูปที่ 3.27 พังก์ชั้นถ่ายโอนของแรงดันด้านออกกรณีไม่ต่อและต่อวงจรกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

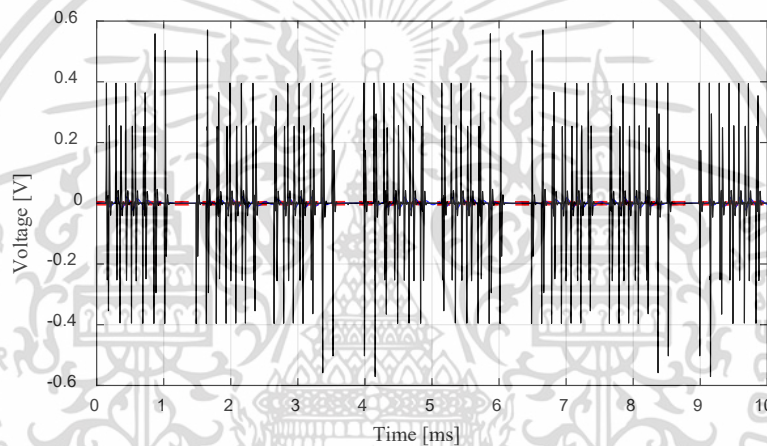


รูปที่ 3.28 สัญญาณแรงดันด้านนอกที่ตำแหน่งวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยการจำลองป้อนกระแสพัลส์ขนาด 2.5 pC

เพื่อให้เข้าใจมากขึ้นถึงที่มา และปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสวิตชิงของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคควบคุมแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม (PWM) จึงได้ทดสอบโดยการป้อนสัญญาณแรงดันพีดีบีเบิลยูเอ็ม (PWM) ขนาด 100 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ซึ่งควบคุมการสวิตชิงที่ความถี่ (f_s) 3.2 kHz โดยไม่ต่อ วงจรกรอง และป้อนเข้าในระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แสดงให้เห็นว่าในส่วนของแรงดันด้านนอกสัญญาณแรงดันมีการเกิดการกระเพื่อมเล็กน้อยแสดงดังรูปที่ 3.29 ถึงแม้ว่าค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (THD_V) มีค่าต่ำเพียง 0.93 % แต่แรงดันพีดีบีเบิลยูเอ็ม (PWM) ส่งผลต่อแรงดันทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD) ที่ด้านนอก โดยค่าแรงดันสูงสุดที่วัดได้มีค่า 570 mV แสดงดังรูปที่ 3.30 ซึ่งแรงดันมีค่าสูงมากกว่าแรงดันที่ได้จากการจำลองกระแสพัลส์ขนาด 2.5 pC ที่มีแรงดันเพียงแค่ 5 mV ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Background noise) ในระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ด้วยเหตุผลนี้การทำให้มีค่าสัญญาณรบกวนต่ำกว่า 5 mV จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้สามารถนำมาใช้ทดสอบจริงได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เพิ่มการวิเคราะห์ผลในส่วนของวงจรกรองความถี่ ซึ่งจะเสนอรายละเอียดในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.29 รูปสัญญาณแรงดันด้านเข้า และด้านออกกรณีไม่ต่อวงจรกรอง



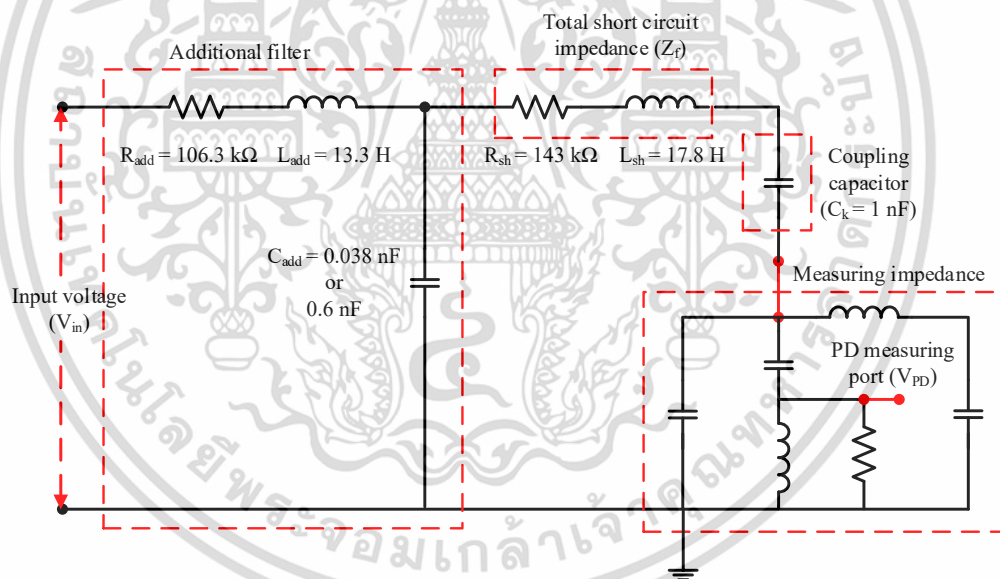
รูปที่ 3.30 สัญญาณแรงดันด้านออกที่ตำแหน่งวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยการจำลองป้อนแรงดันพีดีบีเลียม (PWM) ขนาด 100 kV เข้าในระบบ

3.7.2 การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ด้วยโปรแกรม EMTD กรณีต่อวงจรกรองความถี่

เพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสวิทชิงของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์นั้นทำได้โดยการเพิ่มวงจรกรองเข้าไปในระบบ เพื่อที่จะกรองฮาร์มอนิกที่ไม่ต้องการออกไปจากระบบ ทั้งนี้มีเป้าหมายให้คุณภาพของสัญญาณแรงดันด้านออกเหลือเฉพาะสัญญาณความถี่หลักมูล (f_1) ของระบบ และกำจัดสัญญาณรบกวน (Background noise) ด้านออกที่ตำแหน่งตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการทดสอบวงจรกรองที่ประกอบด้วยความต้านทาน (R_{odd}) ความเหนี่ยวนำ (L_{odd}) และค่าความจุไฟฟ้า (C_{odd}) โดยต่อเข้ากับหม้อแปลงทดสอบที่ด้านแรงต่ำ (LV) ค่าตัวแปรด้านแรงต่ำจะถูกย้ายไปอยู่ในด้านแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงซึ่งวงจรสมมูลย์แสดงดังรูปที่ 3.31

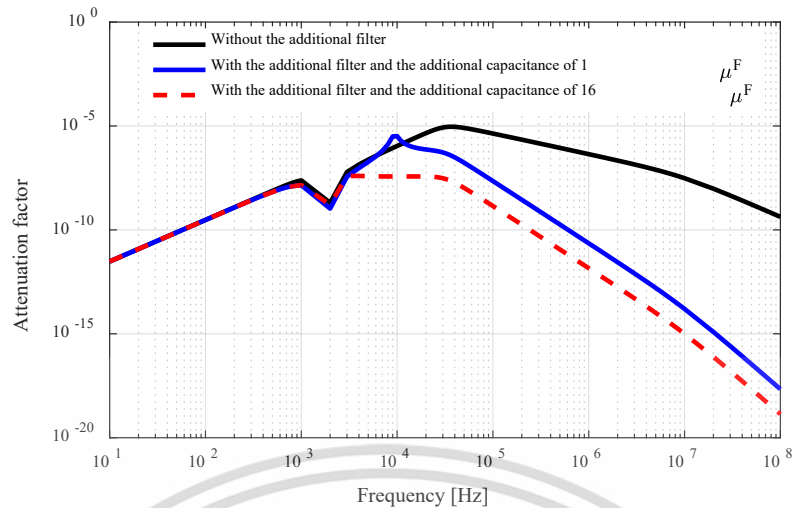
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของคุณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (V_{PD} / V_{in}) สามารถคำนวณ และแสดงผลคำนวณดังรูปที่ 3.32 จากผลทดสอบดังรูปที่ 3.27 และ 3.32 แสดงผลของการต่อวงจรกรองความถี่ โดยใช้คาปาซิเตอร์ (Capacitor : C) $1 \mu F$ และ $16 \mu F$ ต่อที่ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง และเมื่อย้ายค่ามาอยู่ที่ด้านแรงดันสูงโดยคำนวณได้จากอัตราส่วนหม้อแปลงแรงดันสูงทดสอบ (Ratio of the transformers : a) $75 \text{ kV} / 460$ คำนวณได้ 163 ดังนั้น การย้ายค่าตัวแปรจากด้านแรงต่ำมาด้านแรงสูงจะหาได้จาก Cหาร a^2 โดยมีก็จะมีค่าเท่ากับ 0.038 nF และ 0.6 nF ตามลำดับ จากผลทดสอบแสดงประสิทธิภาพการกรองกรณี่ใช้คาปาซิเตอร์ $1 \mu F$ มีประสิทธิภาพการกรองไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบกับกรณี่ที่ไม่มีวงจรกรอง ส่วนในกรณี่ใช้คาปาซิเตอร์ $16 \mu F$ ผลทดสอบแสดงค่าความถี่ตัดผ่านอยู่ที่ประมาณ 900 Hz ทำให้มีประสิทธิภาพการกรองที่ดีกว่า และค่าสูงสุดของคุณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนอยู่ที่ 3.72×10^{-8} ดังนั้นแรงดันที่ตำแหน่งตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน สัญญาณแรงดันด้านออกเมื่อจำลองป้อนแรงดัน 100 kV พัลส์เบิรยูเอ็ม (PWM) เข้าในระบบที่ต่อกับวงจรกรองความถี่กรณี่คาปาซิเตอร์ $16 \mu F$ มีค่าแรงดันลดทอนต่ำลงมากกว่า 5 mV ซึ่งต่ำกว่าแรงดันที่ได้จากการทดสอบจำลองกระแสพัลส์ขนาด 2.5 pC



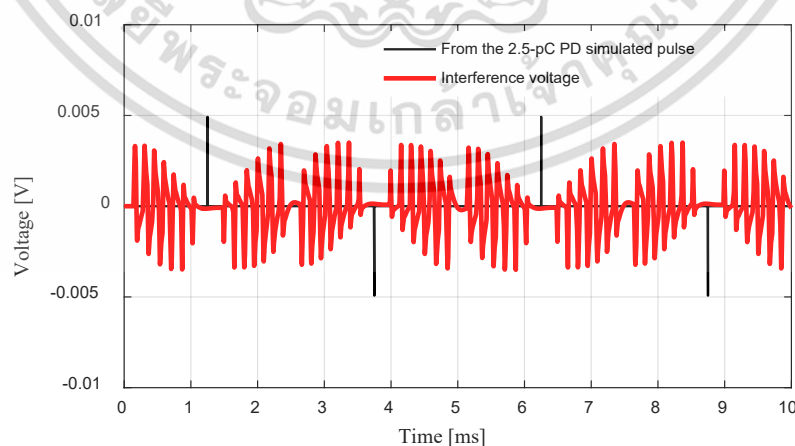
รูปที่ 3.31 วงจรสมมูลของระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณี่ต่อวงจรกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณี่ใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



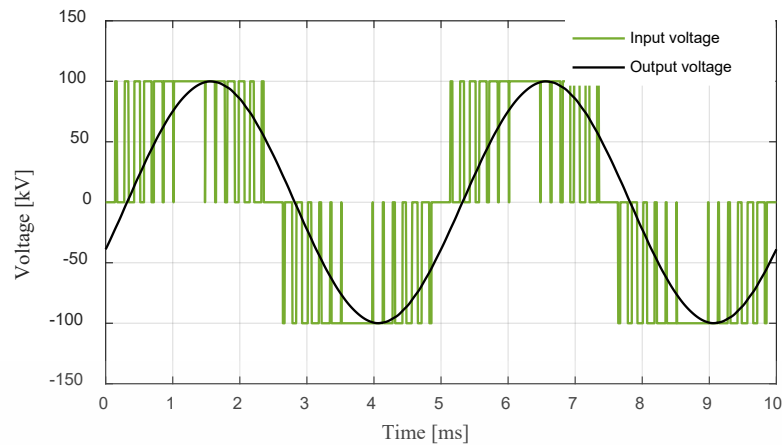
รูปที่ 3.32 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้านออกกรณีไม่ต่อ และต่อวงจรรอง

เพื่อเป็นการยืนยันผลทดสอบจึงทำการจำลองต่อวงจรรองเข้าไปในระบบเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองในแกนเวลา โดยการป้อนแรงดัน 100 kV พัลส์เบิเลียเอ็ม (PWM) เข้าในระบบที่ต่อร่วมกับวงจรรองความถี่ และปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ (f_s) ตั้งแต่ 1 kHz จนถึง 20 kHz อัตราการมอดูเลตที่ m_o 0.8 และ 1.0 ตามลำดับเข้าไปในระบบ พบว่าสัญญาณรบกวนในระบบมีขนาดต่ำกว่า 5 mV และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันรวมด้านออกมีค่าน้อยกว่า 0.2% แสดงดังรูปที่ 3.33 และ 3.34 แสดงตัวอย่างของแรงดันด้านออก และสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในกรณีที่จำลองความถี่สวิตซ์ (f_s) 3.2 kHz และอัตราการมอดูเลตที่ m_o 1.0 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนนั้นมีค่าต่ำกว่าสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เมื่อจำลองกระแสพัลส์ขนาด 2.5 pC ขณะป้อนแรงดันทดสอบ 100 kV พัลส์เบิเลียเอ็ม (PWM) 70.7 kV_{rms}



รูปที่ 3.33 สัญญาณแรงดันด้านออกที่ตำแหน่งวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยการจำลองป้อนแรงดัน 100 kV พัลส์เบิเลียเอ็ม (PWM) เข้าในระบบที่ต่อวงจรรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 รูปสัญญาณแรงดันด้านเข้าและด้านออกโดยการจำลองป้อนแรงดัน 100 kV พีดีบีเบิลยูเอม (PWM) เข้าในระบบที่ต่อวงจรกรอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากวัตถุประสงค์การศึกษาที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 ได้นำไปสู่การออกแบบและสร้างแบบจำลอง ทดสอบในบทที่ 3 ซึ่งในบทนี้จะเป็นการแสดงผลของการทดลองได้ในบทนี้ โดยแบ่งหัวข้อการทดลอง และการวิเคราะห์ผลออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ คือ

1. ทดลองประสิทธิภาพวงจรกรอง
2. ทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ (f_s) และอัตราการมอดูเลต (m_o)

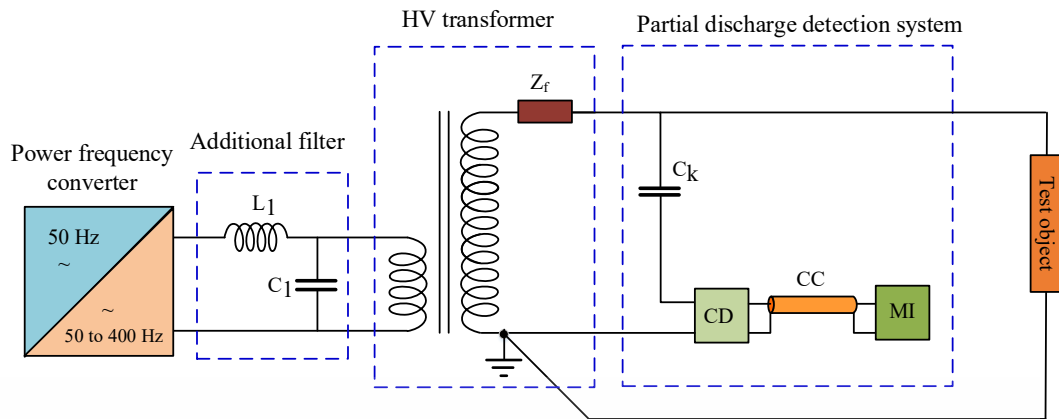
4.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้น โดยทำการวิเคราะห์อยู่ 2 ส่วน คือ

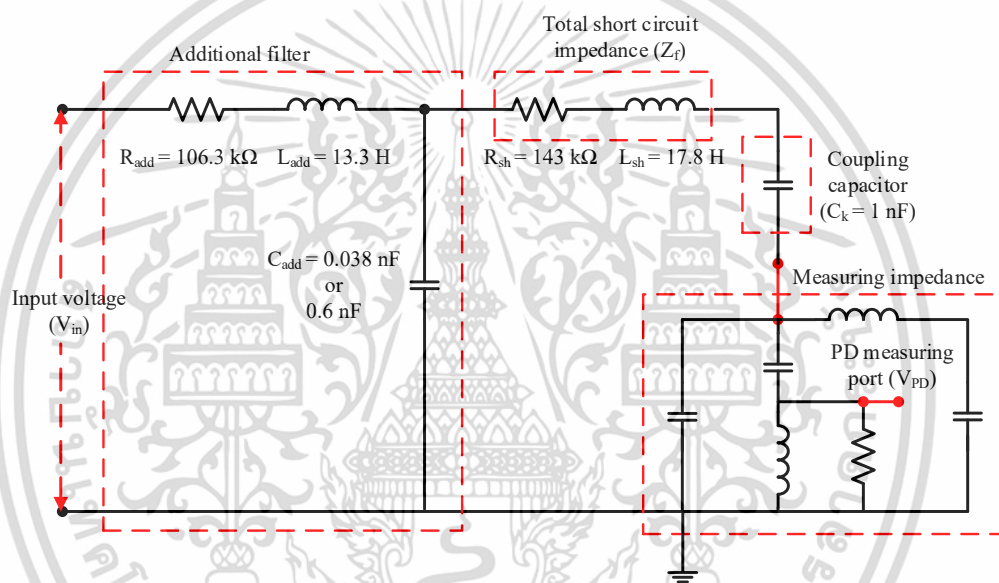
4.1.1 ทดลองประสิทธิภาพวงจรกรอง

โดยการนำคุณสมบัติของตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) รวมกันเป็นวงจรกรอง (RLC) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) แสดงดังรูปที่ 4.1 จากในบทที่ 3 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการคำนวณเพื่อย้ายข้างจากด้านแรงต่ำไปด้านแรงสูงจะมีค่าความต้านทาน (R_{odd}) 106.3 k Ω ค่าความเหนี่ยวนำ (L_{odd}) 13.3 H ค่าตัวเก็บประจุ (C_{odd}) มี 2 ค่า คือ 0.038 nF และ 0.6 nF โดยค่าตัวเก็บประจุเดิมทั้ง 2 ค่านั้นก่อนย้ายมาด้านแรงสูง คือ 1 μ F และ 16 μ F ตามลำดับโดยแสดงดังรูปที่ 4.2 ดังนั้น ในการทดลองจะทำการทดลองและวิเคราะห์ผลอยู่ 2 กรณี คือ ไม่มีวงจรกรองและมีวงจรกรองโดยใช้ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 1 μ F และ 16 μ F ตามลำดับที่กำหนดเงื่อนไขทดสอบให้มีอัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 มีความถี่สวิตซ์ (f_s) 3.2 kHz ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz เพื่อวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวน (Background noise) ในระบบของการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกิน 2.5 pC โดยค่ามาตรฐานกำหนดระดับการเกิดสัญญาณรบกวนต้องมีค่าไม่เกิน 5 pC [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่อร่วมกับวงจรกรอง



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลของระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีต่อวงจรกรอง

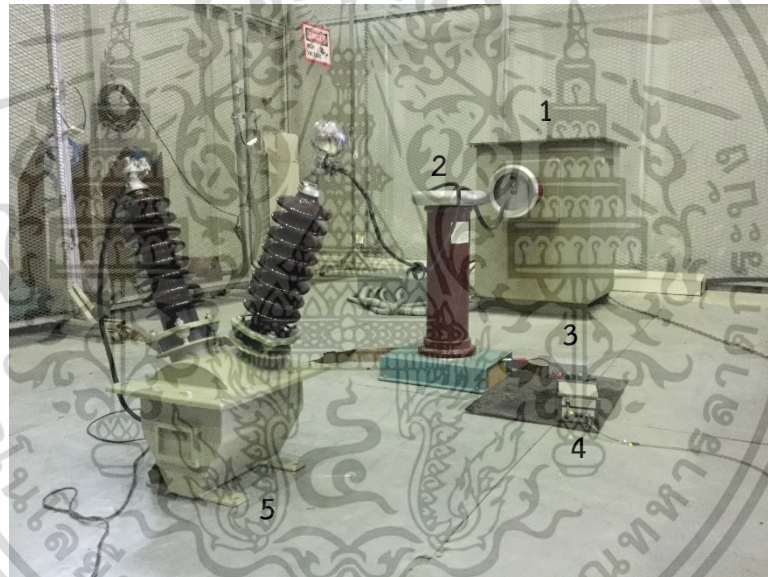
4.1.2 ทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ (f_s) และอัตราการมอดูเลต (m_o)

การทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ (f_s) จะเลือกค่าการทดลองตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงและมีค่าอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ (m_f) เป็นจำนวนเต็มเพื่อวิเคราะห์หาความถี่สวิตซ์ (f_s) ที่เหมาะสมสำหรับเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้น ค่าความถี่สวิตซ์ (f_s) ที่ทำการทดลองมี 8 ค่าดังนี้ 1.2 2 3.2 4 5 10 15 และ 20 kHz ตามลำดับ โดยกำหนดเงื่อนไขทดสอบให้มีอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ตามลำดับโดยใช้ความถี่สวิตซ์ (f_s) ดังที่กล่าวมาข้างต้น วงจรกรองที่ใช้ติดตั้งในการทดลองจะเลือกใช้วงจรกรองที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่ได้จากผลการทดลองวิเคราะห์ส่วนที่ 1 โครงสร้างเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.3 โครงสร้างระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเมื่อต่อกับระบบแสดงดังรูปที่ 4.4 และ ผลที่ได้จากเครื่องตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (M_f) ขณะทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



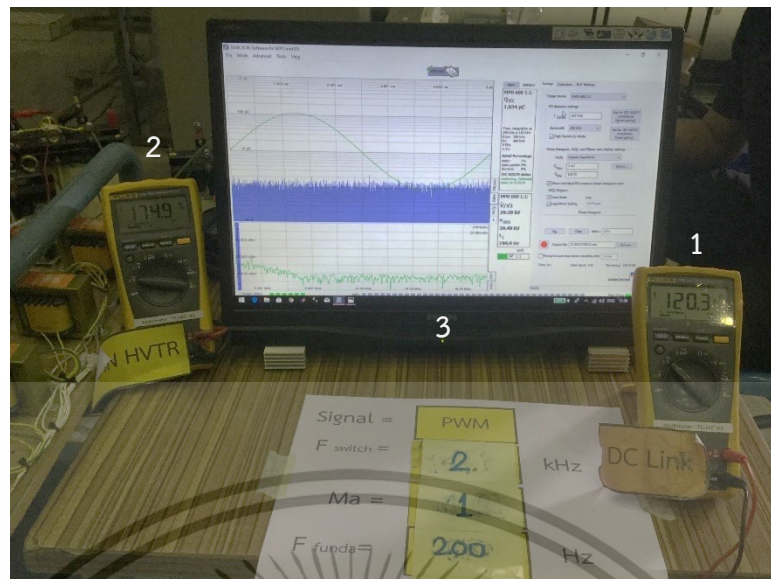
รูปที่ 4.3 โครงสร้างเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้น



- 1) หม้อแปลงทดสอบขนาดพิกัด 75 kV 40 kVA PD < 2 pC
(High voltage test transformers : HV)
- 2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor : C_k of 100 kV)
- 3) อุปกรณ์เชื่อมต่อ (Coupling device : CD)
- 4) อุปกรณ์เชื่อมต่อใยแก้วนำแสงเครื่องมือวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (M_p)
- 5) หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (IT)

รูปที่ 4.4 โครงสร้างระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเมื่อต่อกับระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



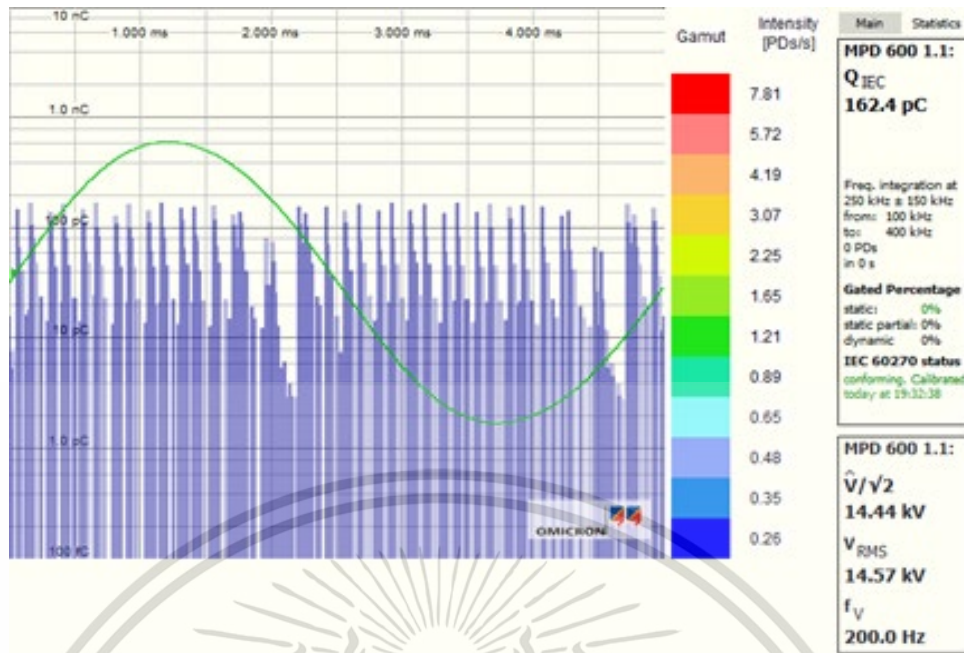
- 1) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-link)
- 2) แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง (AC-input)
- 3) ส่วนแสดงผลที่ได้จากเครื่องทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (M_i)

รูปที่ 4.5 ผลที่ได้จากเครื่องตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (M_i) ขณะทำการทดลอง

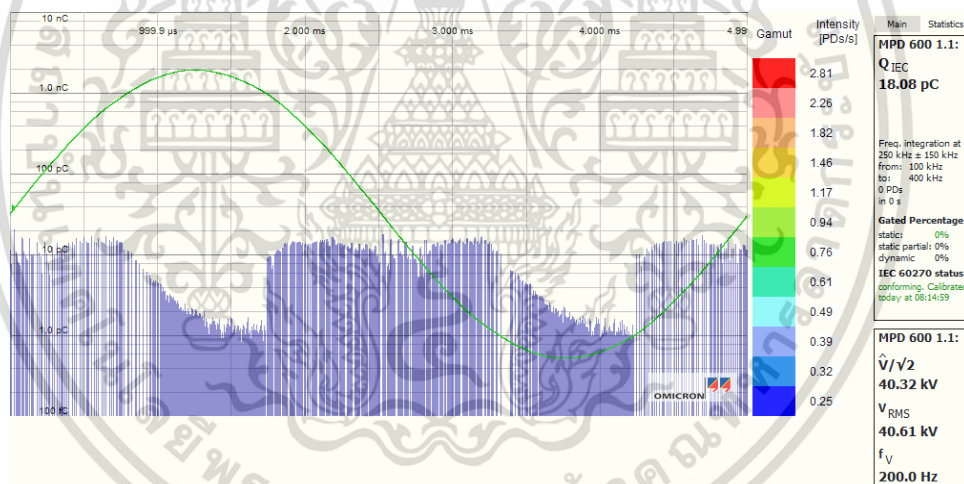
4.2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพพวงจรรอง

การทดลองหาประสิทธิภาพพวงจรรองเพื่อวิเคราะห์หาพวงจรรองที่เหมาะสมโดยการป้อนแรงดันที่ได้จากชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้น ซึ่งใช้ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 3.2 kHz และ อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 เมื่อป้อนแรงดันเข้าที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบแล้วนั้น ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ไม่ได้ต่อพวงจรรองสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ในการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั้น กรณีที่ขึ้นระดับแรงดันทดสอบเพียง 14 kV ซึ่งยังไม่ถึงระดับแรงดันทดสอบ มีสัญญาณรบกวนพื้นหลังอยู่ที่ 162 pC ซึ่งมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ว่าระดับการเกิดสัญญาณรบกวนต้องมีค่าไม่เกิน 5 pC [1] ดังแสดงดังรูปที่ 4.6 แต่เมื่อต่อพวงจรรองเข้ากับระบบแล้วนั้นส่งผลให้สัญญาณรบกวนพื้นหลังลดลงอย่างมากซึ่งมีแนวโน้มตามผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP ในบทที่ 3 ทั้งนี้ในกรณีระบบกรองใช้คาปาซิเตอร์มีค่า $1 \mu\text{F}$ และ $16 \mu\text{F}$ สัญญาณรบกวนพื้นหลังมีแนวโน้มลดลง โดยที่แรงดันทดสอบ $40 \text{ kV}_{\text{rms}}$ (70 kV_p) ระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังลดลงเหลือเพียง 18 pC และ 2 pC ตามลำดับ โดยแสดงผลทดสอบรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ดังนั้น จึงสามารถยืนยันได้ว่าพวงจรรองที่ใช้คาปาซิเตอร์ $16 \mu\text{F}$ มีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำไปใช้การทดลองที่ 2 คือ การทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซิ่ง (f_s) และอัตราการมอดูเลต (m_o)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

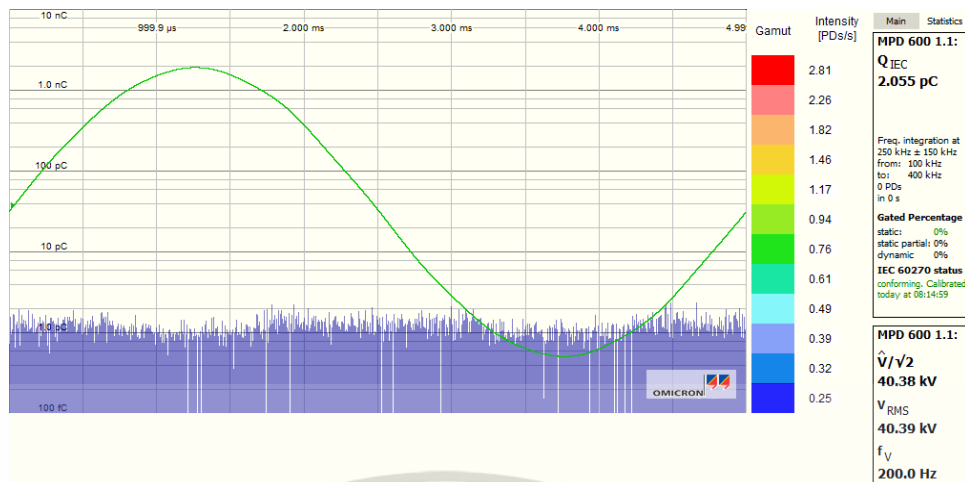


รูปที่ 4.6 ผลสัญญาณรบกวนกรณีไม่มีวงจรกรอง อัตราการมอดูเลต (m_a) 1.0 ความถี่สวิตซ์ (f_s) 3.2 kHz ระดับแรงดัน 14 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz



รูปที่ 4.7 ผลสัญญาณรบกวนกรณีมีวงจรกรองคาปาซิเตอร์ $1 \mu\text{F}$ อัตราการมอดูเลต (m_a) 1.0 ความถี่สวิตซ์ (f_s) 3.2 kHz ระดับแรงดัน 40 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลสัญญาณรบกวนกรณีมีวงจรรองคาปาซิเตอร์ $16 \mu\text{F}$ อัตราการมอดูเลต (m_a) 1.0 ความถี่สวิตซ์ (f_s) 3.2 kHz ระดับแรงดัน 40 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz

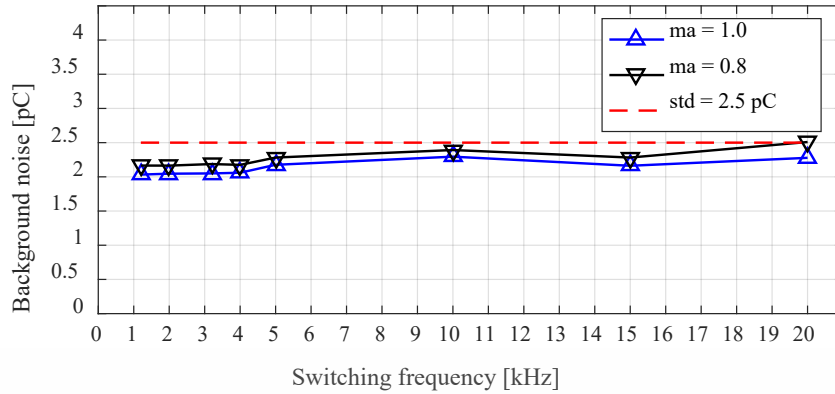
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ (f_s) และอัตราการมอดูเลต (m_o)

ในการทดลองเบื้องต้นจะทำการทดสอบโดยไม่ต่อกับโหลดทดสอบ ที่ซึ่งในที่นี้คือหม้อแปลง เครื่องมือวัดแรงดัน หลังจากได้ผลทดสอบค่าความถี่สวิตซ์และอัตราการมอดูเลตที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุดจึงจะนำไปทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลกับโหลดทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันจริง จากผลการทดลองหาประสิทธิภาพวงจรกรองก่อนหน้านี้ได้ระบบกรองมีค่า คาปาซิเตอร์ $16 \mu\text{F}$ มีประสิทธิภาพดีที่สุดซึ่งการทดลองต่อไปจะใช้ระบบกรองชุดนี้ทั้งหมดในการทดสอบ ทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซ์และอัตราการมอดูเลตจะทดสอบโดยความถี่สวิตซ์เปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ 1-20 kHz ซึ่งมีทั้งหมด 8 ค่าดังนี้ 1.2 2 3.2 4 5 10 15 และ 20 kHz ตามลำดับ โดยมีอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ตามลำดับเพื่อวิเคราะห์ผลในส่วนของระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก (Total harmonic voltage distortion : THD_v) และ ค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (DC-link)

ขั้นตอนการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเริ่มจากการขึ้นแรงดันทดสอบที่ระดับ 80 % ของแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ (Withstand voltage) 40 kV เพื่อจำลองการเกิดแรงดันเกินก่อน (Pre-stress voltage) หลังจากนั้นทำการลดระดับแรงดันลงไปที่ค่าแรงดันทดสอบที่ 120% ของพิกัดหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (U_r) โดยในการทดลองนี้จะทำการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันขนาดพิกัด 24 kV ดังนั้น แรงดันทดสอบ คือ 28.8 kV แต่เพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นระดับแรงดันจะใช้แรงดันทดสอบที่ 30 kV หลังจากนั้นจึงวัดเก็บผลระดับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามลำดับ

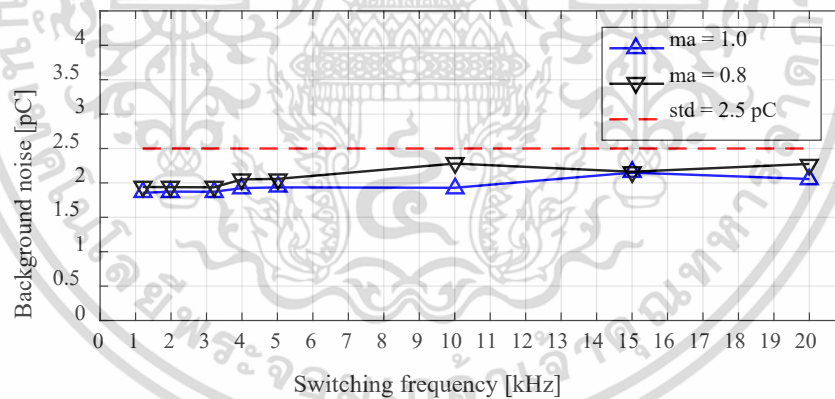
โดยแสดงดังรูปที่ 4.9-4.14 ผลการทดลองการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ที่ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ที่ความถี่สวิตซ์ (f_s) ปรับเปลี่ยนเพิ่มขึ้นส่งผลอย่างไรต่อระดับสัญญาณรบกวน (Background noise) ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก (Total harmonic voltage distortion : THD_v) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (DC-link) โดยจะอธิบายในส่วนถัดไป



รูปที่ 4.9 ผลสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV

ตารางที่ 4.1 ผลสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV

ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise) pC									
ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) kHz	1.2	2	3.2	4	5	10	15	20	
อัตราการมอดูเลต (m_o)	1.0	2.03	2.05	2.05	2.06	2.18	2.30	2.16	2.28
	0.8	2.17	2.16	2.19	2.18	2.28	2.39	2.28	2.51



รูปที่ 4.10 ผลสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV

ตารางที่ 4.2 ผลสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV

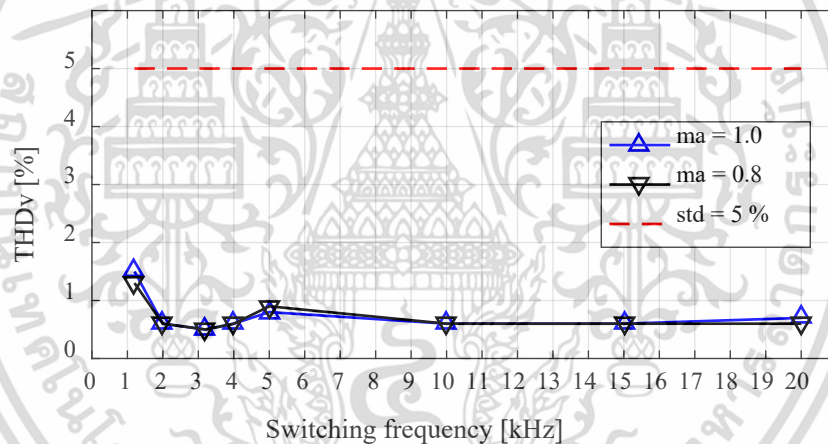
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise) pC									
ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) kHz	1.2	2	3.2	4	5	10	15	20	
อัตราการมอดูเลต (m_o)	1.0	1.86	1.87	1.87	1.92	1.94	1.93	2.15	2.06
	0.8	1.94	1.94	1.94	2.05	2.06	2.28	2.16	2.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9-4.10 และตารางที่ 4.1-4.2 แสดงผลการทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซิ่งตั้งแต่ 1-20 kHz โดยมีทั้งหมด 8 ค่า ดังนี้คือ 1.2 2 3.2 4 5 10 15 และ 20 kHz ตามลำดับ โดยมีอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 จากผลทดสอบสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

เมื่อความถี่สวิตซิ่ง (f_s) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ผลของสัญญาณรบกวน (Background noise) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามซึ่งหมายความว่าสัญญาณรบกวนแปรผันตามความถี่สวิตซิ่ง โดยค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซิ่ง (f_s) ยังคงอยู่ภายใต้ค่าการออกแบบของระบบทดสอบตรวจวัดการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่ได้ออกแบบไว้ให้มีค่าไม่เกิน 2.5 pC โดยทั้งกรณีทดสอบจำลองการเกิดแรงดันเกิน (Pre-stress voltage) ที่ 40 kV และระดับแรงดันทดสอบที่ 30 kV

จากผลการทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการมอดูเลต แสดงให้เห็นว่าที่ อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ผลของสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำกว่ากรณี m_o 0.8 เนื่องจากกรณี m_o 1.0 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) จะมีการสวิตซิ่งที่น้อยกว่ากรณี m_o 0.8 ซึ่งมีความสัมพันธ์แนวโน้มเช่นเดียวกันกับผลทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซิ่ง (f_s)

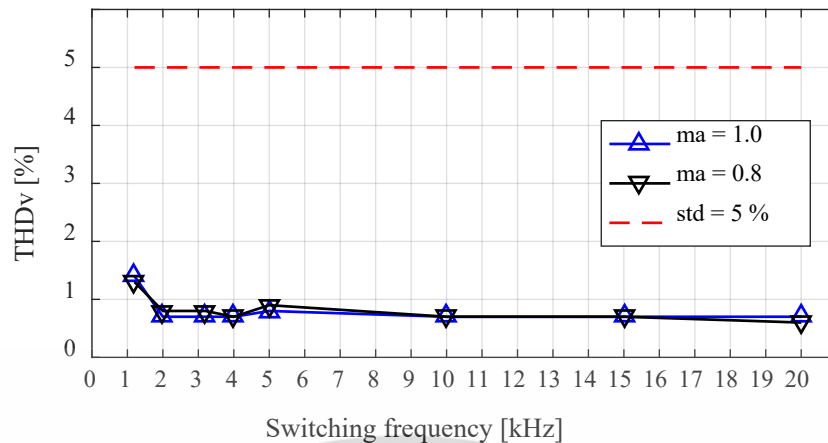


รูปที่ 4.11 ผล THD_v โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV

ตารางที่ 4.3 ผล THD_v โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV

ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Total harmonic voltage distortion : THD _v) %									
ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) kHz	1.2	2	3.2	4	5	10	15	20	
อัตราการมอดูเลต (m_o)	1.0	1.50	0.60	0.50	0.60	0.80	0.60	0.60	0.70
	0.8	1.30	0.60	0.50	0.60	0.90	0.60	0.60	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผล THD_v โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_a) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV

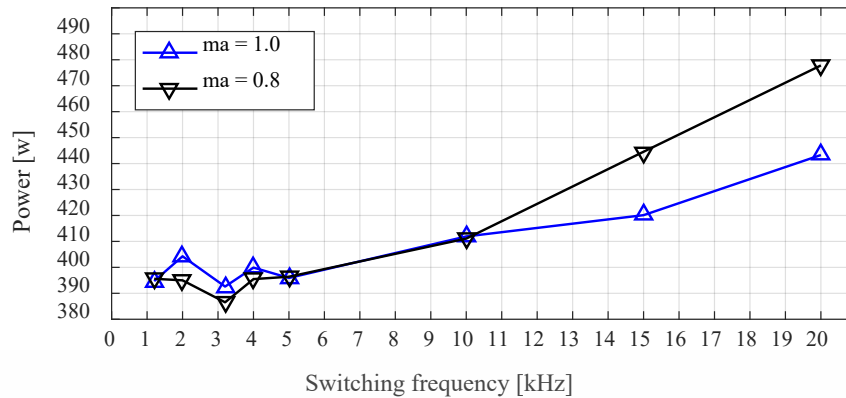
ตารางที่ 4.4 ผล THD_v โดยเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_a) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV

ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Total harmonic voltage distortion : THD _v) %									
ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) kHz		1.2	2	3.2	4	5	10	15	20
อัตราการมอดูเลต (m_a)	1.0	1.40	0.70	0.70	0.70	0.80	0.70	0.70	0.70
	0.8	1.30	0.80	0.80	0.70	0.90	0.70	0.70	0.60

จากรูปที่ 4.11-4.12 และตารางที่ 4.3-4.4 แสดงผลการทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซิ่งตั้งแต่ 1-20 kHz โดยมีทั้งหมด 8 ค่า ดังนี้คือ 1.2 2 3.2 4 5 10 15 และ 20 kHz ตามลำดับ โดยมีอัตราการมอดูเลต (m_a) 0.8 และ 1.0 จากผลทดสอบสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

เมื่อความถี่สวิตซิ่ง (f_s) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ผลของค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Total harmonic voltage distortion : THD_v) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งหมายความว่าค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกแปรผกผันกับความถี่สวิตซิ่ง ซึ่งเป็นจุดเด่นของการควบคุมสวิตซิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar voltage switching) คือการเกิดความถี่ฮาร์มอนิกด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตซิ่ง (f_s) ทำให้วงจรสามารถกำจัดฮาร์มอนิกด้านออกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งกรณีทดสอบจำลองการเกิดแรงดันเกิน (Pre-stress voltage) ที่ 40 kV และระดับแรงดันทดสอบที่ 30 kV

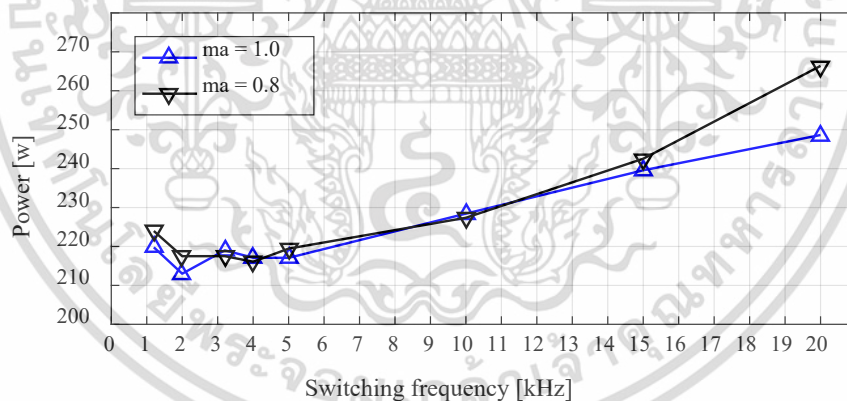
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผล DC-link โดยเปรียบเทียบอัตราการผลิต (m_a) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV

ตารางที่ 4.5 ผล DC-link โดยเปรียบเทียบอัตราการผลิต (m_a) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 40 kV

กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (DC-link) W									
ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) kHz		1.2	2	3.2	4	5	10	15	20
อัตราการผลิต (m_a)	1.0	395	404	393	400	396	412	420	443
	0.8	396	395	387	395	396	411	445	478



รูปที่ 4.14 ผล DC-link โดยเปรียบเทียบอัตราการผลิต (m_a) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV

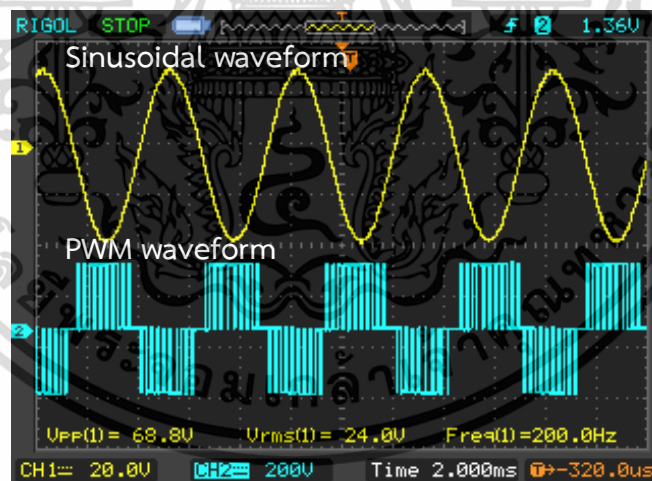
ตารางที่ 4.6 ผล DC-link โดยเปรียบเทียบอัตราการผลิต (m_a) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ระดับแรงดัน 30 kV

กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (DC-link) W									
ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) kHz		1.2	2	3.2	4	5	10	15	20
อัตราการผลิต (m_a)	1.0	220	213	219	217	217	228	240	249
	0.8	224	218	218	216	219	227	243	266

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

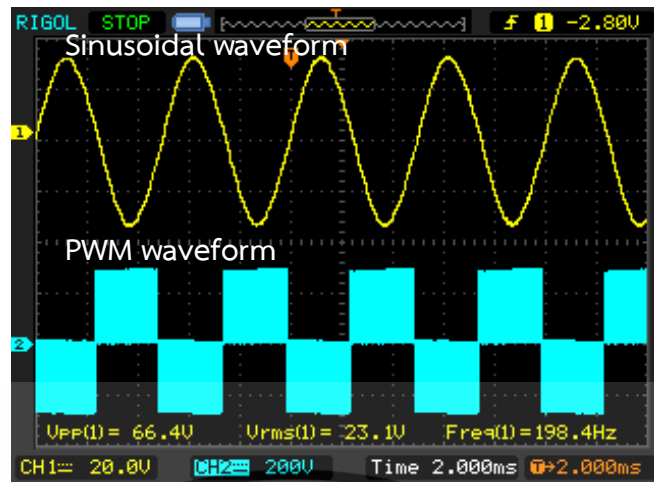
จากรูปที่ 4.13-4.14 และตารางที่ 4.5-4.6 แสดงผลการทดลองปรับเปลี่ยนความถี่สวิตช์ตั้งแต่ 1-20 kHz มีทั้งหมด 8 ค่า ดังนี้ คือ 1.2 2 3.2 4 5 10 15 และ 20 kHz ตามลำดับ โดยมีอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 จากผลทดสอบสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

เมื่อความถี่สวิตช์ (f_s) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (DC-link) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามซึ่งหมายความว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนแปรผันตามความถี่สวิตช์ โดยมีความสัมพันธ์กับอัตราการมอดูเลตดังนี้ คือ กรณี m_o 0.8 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนจะมากกว่ากรณี m_o 1.0 เนื่องจากที่กรณี m_o 1.0 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) จะมีการสวิตช์ (f_s) น้อยกว่ากรณี m_o 0.8 เนื่องจากพื้นที่ของรูปคลื่นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ขณะเปลี่ยนสถานะแรงดันระหว่างศูนย์ไปบวกหรือศูนย์ไปลบจะถูกสวิตช์ทิ้งไปแปรผันตามความถี่สวิตช์ (f_s) โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งกรณีระดับแรงดัน 40 kV และระดับแรงดันทดสอบที่ 30 kV เรียกว่าความสูญเสียจากสวิตช์ (Switching loss) ที่เกิดจากการสวิตช์ เปิด ปิด (Switch on-off) ยิ่งความถี่สวิตช์ (f_s) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นความสูญเสียก็มีแนวโน้มแปรผันตามคือความสูญเสียจากสวิตช์เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงผลสัญญาณรูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM waveform) ที่สร้างจากชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์และรูปคลื่นแรงดันไซน์ (Sinusoidal waveform) ที่ผ่านวงจรกรองและป้อนให้หม้อแปลงแรงดันสูงทดสอบ

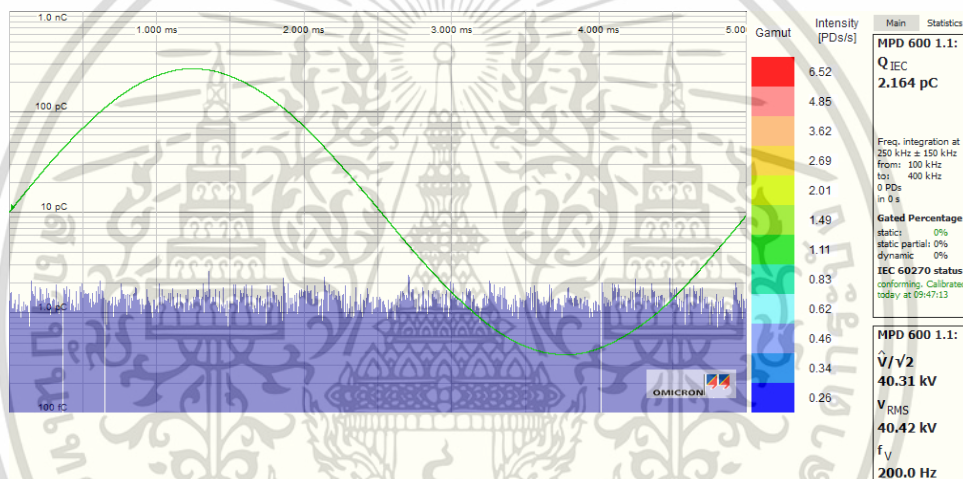


รูปที่ 4.15 ผลสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 ความถี่สวิตช์ (f_s) 2 kHz

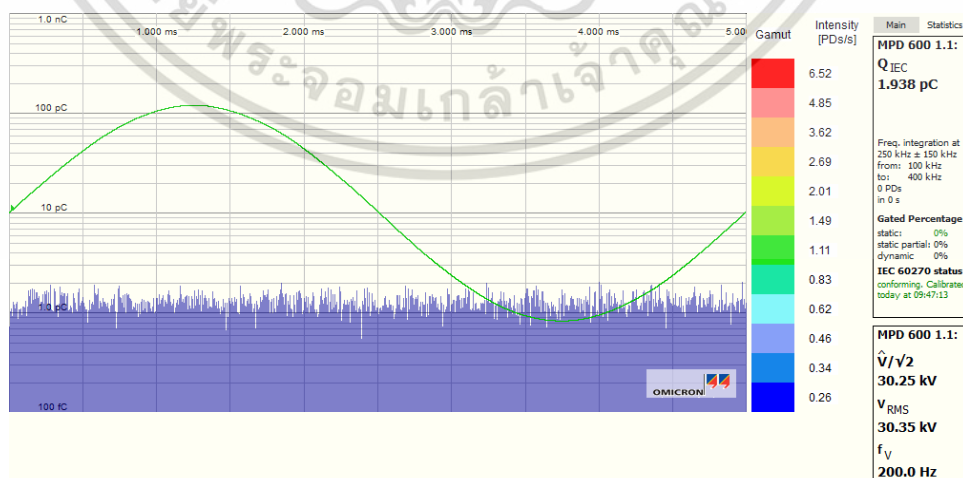
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) อัตราการมอดูเลต (m_a) 0.8 ความถี่สวิตชิง (f_s) 20 kHz



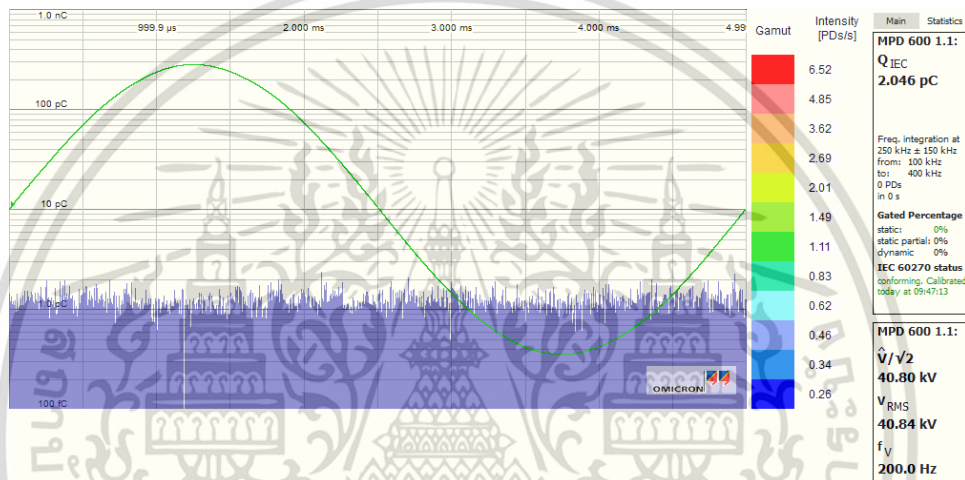
รูปที่ 4.17 ผลสัญญาณด้านออก อัตราการมอดูเลต (m_a) 0.8 ความถี่สวิตชิง (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 40 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz



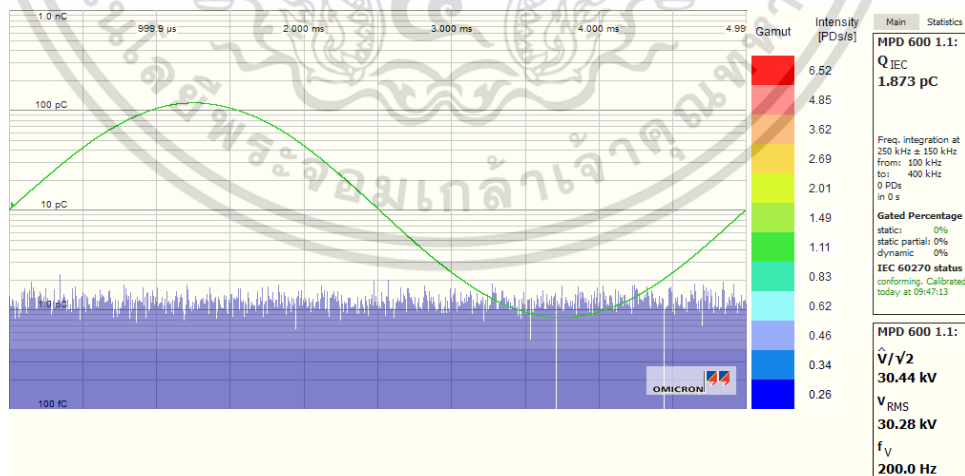
รูปที่ 4.18 ผลสัญญาณด้านออก อัตราการมอดูเลต (m_a) 0.8 ความถี่สวิตชิง (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลทดสอบรูปที่ 4.9-4.14 แสดงผลการทดลองค่าความถี่สวิตซ์ (f_s) 2 kHz โดยมีอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ได้ผลทดสอบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในด้านของสัญญาณรบกวนต่ำ (Background noise) ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกต่ำ (Total harmonic voltage distortion : THDv) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ต่ำ (DC-link) โดยแสดงผลการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 กรณีค่าความถี่สวิตซ์ (f_s) 2 kHz มีอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV และ 30 kV ตามลำดับ และกรณีค่าความถี่สวิตซ์ (f_s) 2 kHz โดยมีอัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ที่ระดับแรงดันทดสอบ 40 kV และ 30 kV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20

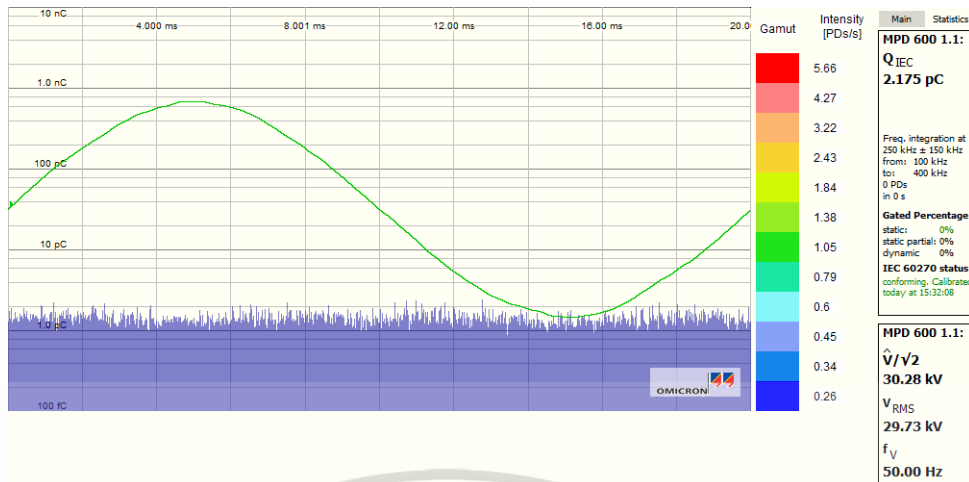


รูปที่ 4.19 ผลสัญญาณด้านออกที่อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ความถี่สวิตซ์ (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 40 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz



รูปที่ 4.20 ผลสัญญาณด้านออกที่อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ความถี่สวิตซ์ (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ผลสัญญาณด้านออกที่อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ความถี่สวิตซ์ (f_s) 2 kHz ระดับแรงดัน 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz

จากผลทดสอบรูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตซ์ (f_s) 2 kHz โดยมีอัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ที่ระดับแรงดัน 30 kV แสดงให้เห็นว่าชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำการสร้างขึ้นสามารถสร้างแรงดันสูงสำหรับการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz ได้ผลทดสอบที่มีประสิทธิภาพดีในด้านของค่าสัญญาณรบกวนต่ำ (Background noise) โดยมีค่า 2.175 pC ซึ่งไม่เกิน 2.5 pC

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 ความถี่สวิตซ์ (f_s) 1-20 kHz ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ระดับแรงดัน 40 kV และ 30 kV ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำการสร้างขึ้น เมื่อวิเคราะห์ในส่วนของการใช้พลังงาน (DC-link) ที่อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 มีระดับแรงดัน (V_{DC}) สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี (m_o) 1.0 โดยมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกันในกรณีทดสอบที่ระดับแรงดัน 40 kV และ 30 kV และเมื่อวิเคราะห์ในส่วนของระดับกระแส (I_{DC}) ที่อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 มีระดับกระแส (I_{DC}) น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 โดยมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกันในกรณีทดสอบที่ระดับแรงดัน 40 kV และ 30 kV และเมื่อวิเคราะห์ในส่วนของแรงดันกระแสสลับความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ที่สร้างจากชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้ความถี่สวิตซ์ (f_s) 1-20 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0 เมื่อผ่านวงจรกรองแล้วนั้น ระดับแรงดัน (V_{AC}) ค่าเฉลี่ยแรงดันที่ป้อนให้หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงพิกัด คือ 460V / 70 kV ขนาด 40 kVA ในกรณีทดสอบที่ระดับแรงดัน (Pre-Stress voltage) 40 kV คือ 239 V และที่กรณีทดสอบที่ระดับแรงดัน (Test voltage) 30 kV คือ 180 V ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการผลิต (m_o) 0.8 และ 1.0

ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ระดับแรงดัน 40 kV

f_s (kHz)	m_o	Pre-stress voltage 0.8 (U_{test}) = 40kV				
		V_{DC} (V)	V_{AC} (V)	THD _v (%)	I_{DC} (A)	Q_{iec} (pC)
1.2	1	195.40	238.50	1.50	2.02	2.033
	0.8	242.70	238.00	1.30	1.63	2.165
2	1	195.30	242.20	0.60	2.07	2.046
	0.8	250.00	240.30	0.60	1.58	2.164
3.2	1	193.40	239.30	0.50	2.03	2.050
	0.8	251.00	239.20	0.50	1.54	2.187
4	1	197.00	240.20	0.60	2.03	2.060
	0.8	250.30	239.10	0.60	1.58	2.175
5	1	202.00	239.70	0.80	1.96	2.176
	0.8	257.40	237.30	0.90	1.54	2.282
10	1	194.30	241.50	0.60	2.12	2.295
	0.8	275.90	231.60	0.60	1.49	2.392
15	1	194.50	236.40	0.60	2.16	2.162
	0.8	240.30	241.00	0.60	1.85	2.282
20	1	191.90	241.30	0.70	2.31	2.278
	0.8	277.80	235.60	0.60	1.72	2.509

หมายเหตุ : V_{DC} คือ แรงดันที่จ่ายให้ชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์
 V_{AC} คือ แรงดันที่จ่ายให้หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง
 THD_v คือ ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก
 I_{DC} คือ กระแสที่จ่ายให้ชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์
 Q_{iec} คือ สัญญาณรบกวนพื้นหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการผลิต (m_o) 0.8 และ 1.0

ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 1-20 kHz ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ระดับแรงดัน 30 kV

f_s (kHz)	m_o	Test voltage 1.2(U_{rate}) = 30kV				
		V_{DC} (V)	V_{AC} (V)	THD _v (%)	I_{DC} (A)	Q_{iec} (pC)
1.2	1	147.50	180.20	1.40	1.49	1.855
	0.8	185.10	181.60	1.30	1.21	1.941
2	1	144.90	179.90	0.70	1.47	1.873
	0.8	187.50	180.20	0.80	1.16	1.938
3.2	1	146.00	180.50	0.70	1.50	1.871
	0.8	190.80	180.10	0.80	1.14	1.936
4	1	147.70	179.60	0.70	1.47	1.924
	0.8	187.90	179.10	0.70	1.15	2.051
5	1	151.80	180.10	0.80	1.43	1.935
	0.8	194.20	179.10	0.90	1.13	2.058
10	1	145.50	180.70	0.70	1.57	1.929
	0.8	208.60	175.20	0.70	1.09	2.281
15	1	148.80	182.80	0.70	1.61	2.150
	0.8	181.00	181.60	0.70	1.34	2.162
20	1	145.40	182.70	0.70	1.71	2.056
	0.8	206.50	175.10	0.60	1.29	2.276

หมายเหตุ : V_{DC} คือ แรงดันที่จ่ายให้ชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์
 V_{AC} คือ แรงดันที่จ่ายให้หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง
 THD_v คือ ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก
 I_{DC} คือ กระแสที่จ่ายให้ชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์
 Q_{iec} คือ สัญญาณรบกวนพื้นหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการออกแบบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบการประยุกต์ใช้เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (Power converter) แบบอินเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อวิเคราะห์และสร้างเครื่องทดสอบคุณภาพของฉนวน หรือเครื่องทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยขั้นตอนแรกทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาความถี่สวิตซิ่ง (f_s) และอัตราการมอดูเลต (m_o) ที่เหมาะสม และสร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F429I DISCOVERY ส่วนโปรแกรม EMTP ใช้วิเคราะห์เพื่อหาจรรยาบรรณความถี่ต่ำผ่านที่เหมาะสม ซึ่งกรณีใช้คาปาซิเตอร์ $16 \mu\text{F}$ ผลทดสอบแสดงค่าความถี่ตัดผ่านอยู่ที่ประมาณ 900 Hz ทำให้มีประสิทธิภาพการกรองที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีใช้คาปาซิเตอร์ $1 \mu\text{F}$ โดยผลทดสอบที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมนำมาใช้ในการจัดสร้างชุดทดสอบจริงที่มีประสิทธิภาพผ่านตามาตรฐานการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนคือ IEC 60270 [1] และมาตรฐานการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันคือ IEC 61869 [4]

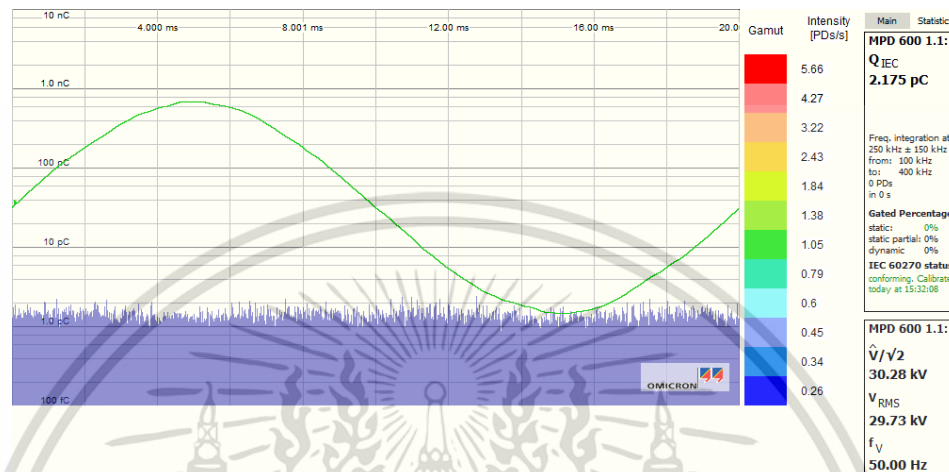
5.2 สรุปการทดลอง

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องทดสอบคุณภาพของฉนวน ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานในการศึกษาดังกล่าวเพื่อทดลองว่ามีความเป็นไปได้หรือไม่ที่จะนำเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์มาใช้ในการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้คือ ชุดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับทดสอบตรวจวัดเกิดดิสชาร์จบางส่วน คือชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ภายใต้พื้นฐานเทคนิคการควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width modulation : PWM) เทคนิคการสวิตซิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar voltage switching) ทำงานร่วมกับระบบกรองความถี่ต่ำผ่าน สามารถสร้างความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz โดยได้ผลทดสอบความถี่สวิตซิ่ง (f_s) ที่เหมาะสมคือ 2 kHz ที่ m_o 1.0 เพราะมีประสิทธิภาพของค่าความแตกต่างของแรงดัน (Different voltage : DV) น้อยกว่า 5% THD_v น้อยกว่า 5% และสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise : BG) มีค่าต่ำกว่า 5 pC โดยมาตรฐานกำหนดไว้ว่าในการทดสอบตรวจวัดเกิดดิสชาร์จบางส่วนสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่ยอมรับได้จะต้องมีค่าต่ำกว่า 5 pC [1]

ทั้งนี้ผลทดสอบเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้นเพื่อใช้ทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Potential transformer : PT) จะทำการทดสอบโดยใช้ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz เพื่อป้องกันการอิ่มตัวของแกนเหล็กนั้น จากผลการทดลองปรับเปลี่ยน

ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงซึ่งมีทั้งหมดมี 8 ค่า คือ 1.2 2 3.2 4 5 10 15 และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20 kHz ตามลำดับ ผลทดสอบที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมมากที่สุดคือ กรณีควบคุมความถี่สวิตซิ่ง (f_s) เท่ากับ 2 kHz และ ที่อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 โดยแสดงค่าปริมาณการใช้พลังงาน (DC-link) ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก (Total harmonic voltage distortion : THD_v) และระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise : BG) แสดงดังตารางที่ 5.1



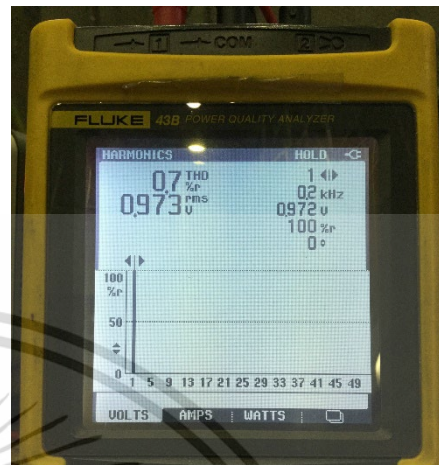
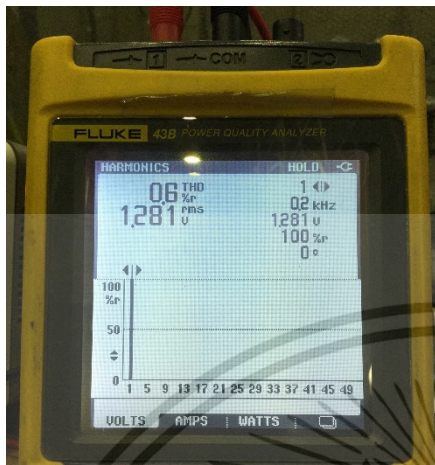
รูปที่ 5.1 ผลทดสอบแรงดัน 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz และ อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0



รูปที่ 5.2 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์แรงดันทดสอบ 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.1

ผลทดสอบเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้นเพื่อทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ที่แรงดันทดสอบ 30 kV ความถี่หลักมูล (f_1) 50 Hz ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ให้ผลทดสอบดังนี้คือ ค่าความแตกต่างของแรงดัน (Different voltage : DV) เท่ากับ 1.81 % ระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise : BG) ที่เครื่องสามารถทำได้คือ 2.175 pC โดยมีสัญญาณรบกวนต่ำตามค่าการออกแบบที่ต้องการให้ต่ำกว่า 2.5 pC ซึ่งผ่านมาตรฐาน IEC60270 [1] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

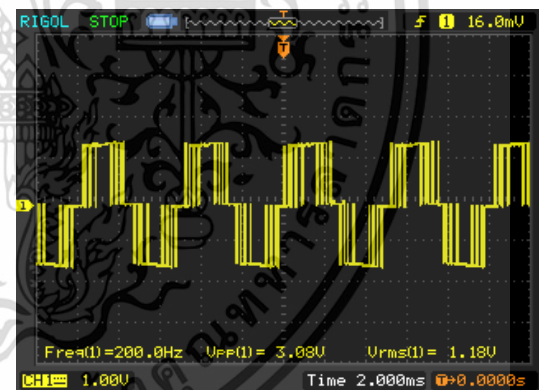
ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Total harmonic voltage distortion : THD_v) มีค่า 1.1 % ดังแสดงในรูปที่ 5.2



ก) ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก
ที่แรงดันทดสอบ 40 kV

ข) ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก
ที่แรงดันทดสอบ 30 kV

รูปที่ 5.3 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0



ก) รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)
แรงดันทดสอบ 40 kV

ข) รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)
แรงดันทดสอบ 30 kV

รูปที่ 5.4 รูปคลื่นด้านออกของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz และอัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0

เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้นเพื่อทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน พิกัดแรงดัน 24 kV ค่าแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ (Withstanding test voltage) ที่แรงดัน 50 kV ดังนั้นจะต้องทำการป้อนแรงดันทดสอบเพื่อจำลองการเกิดแรงดันเกินก่อน (Pre-stress voltage) ที่ระดับ 80% ของแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับคือ 40 kV หลังจากนั้นจึงทำการลดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

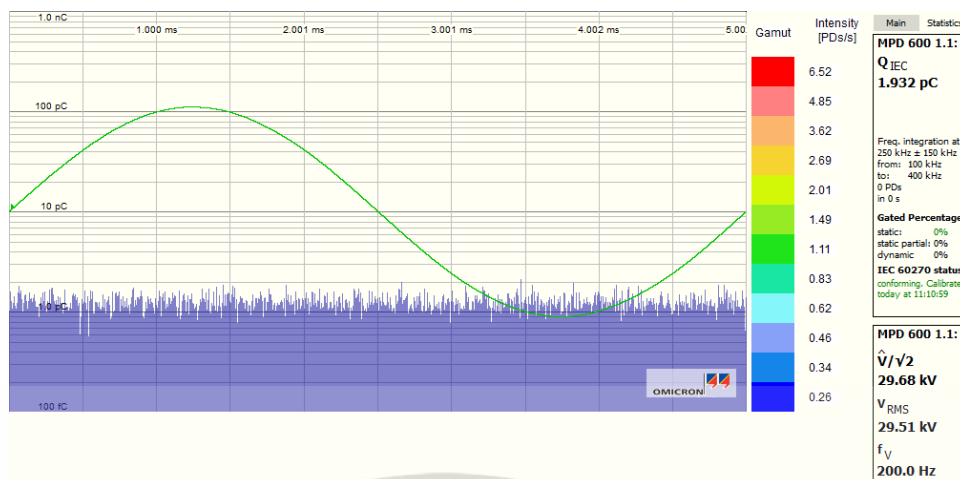
ระดับแรงดันลงไปที่ค่าแรงดันทดสอบที่ 120% ของพิกัดหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (U) ที่แรงดันทดสอบ 28.8 kV ในการทดลองจะใช้ค่า 30 kV เพื่อให้ง่ายต่อการปรับระดับแรงดัน ผลทดสอบเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้นที่ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 โดยแสดงรูปคลื่นด้านนอกของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ก ที่แรงดันทดสอบ 40 kV และที่แรงดันทดสอบ 30 kV ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ข อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ให้ผลทดสอบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดดังนี้คือ ค่าระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise : BG) ที่ระดับแรงดัน 40 kV เครื่องสามารถทำได้คือ 2.046 pC และที่ระดับแรงดัน 30 kV ค่าระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise : BG) มีค่าเท่ากับ 1.873 pC โดยมีสัญญาณรบกวนต่ำตามค่าการออกแบบที่ต้องการคือต่ำกว่า 2.5 pC ซึ่งผ่านมาตรฐาน IEC60270 [1] อีกทั้งยังมีค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก (Total harmonic voltage distortion : THD_v) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ก ที่แรงดันทดสอบ 40 kV มีค่า THD_v เท่ากับ 0.6% และที่แรงดันทดสอบ 30 kV มีค่า THD_v มีค่าเท่ากับ 0.7% ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ข ซึ่งผลทดสอบ THD_v ที่ได้ทั้งในกรณีแรงดันทดสอบ 40 kV และ 30 kV มีค่าน้อยกว่า 1 % ดังแสดงสรุปผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 และ 0.8 ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลทดสอบตรวจวัดการเกิดดิซซาร์จบางส่วนกรณีความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz อัตราการมอดูเลต (m_o) 0.8 และ 1.0

Voltage application	m_o	DV (%)	$V_m/\sqrt{2}$ (kV)	V_{rms} (kV)	P_{dc} link (W)	THD _v (%)	Q_{IEC} (pC)
40 kV	1.0	0.097	40.80	40.84	404.3	0.60	2.046
	0.8	0.272	40.31	40.42	395.0	0.60	2.164
30 kV	1.0	0.528	30.44	30.28	213.0	0.70	1.873
	0.8	0.329	30.25	30.35	217.5	0.80	1.938

ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบจึงทำการทดสอบกับโหลดทดสอบจริงในที่นี้คือหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน ด้วยเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้นโดยใช้ความถี่หลักมูล (f_1) 200 Hz ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 2 kHz อัตราการมอดูเลต (m_o) 1.0 ผลทดสอบประสิทธิภาพของความแตกต่างของแรงดันน้อยกว่า 1% ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก (Total harmonic voltage distortion : THD_v) มีค่าน้อยกว่า 1% ค่าระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise : BG) 1.932 pC มีค่าน้อยกว่า 2.5 pC แสดงดังรูปที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ผลทดสอบโพลดจริงหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันพิกัด 24 kV ด้วยเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้าง

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

โดยปัจจุบันนี้เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้นได้ถูกนำมาใช้งานจริงเป็นเครื่องทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่พิกัด 24 kV ดังนั้นเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้นจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการนำไปใช้ทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ต้องการประสิทธิภาพสูงและราคาต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องทดสอบที่เป็นระบบมอเตอร์ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้างขึ้นยังสามารถนำไปใช้ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ที่ไม่สามารถทดสอบด้วยความถี่พลังงานปกติที่ 50 เฮิร์ตซ์ ได้เนื่องจากแกนเหล็กอิ่มตัวอันเป็นสาเหตุให้รูปคลื่นแรงดันกระแสสลับผิดเพี้ยนไป โดยในอนาคตการพัฒนาต่อไปของชุดเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปติดตั้งในรถที่สามารถเคลื่อนที่ได้เพื่อทำการทดสอบตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนให้กับหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่สถานที่ทำงานจริงในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] High-Voltage Test Techniques: Partial Discharge Measurement, IEC Standard 60270: 2000.
- [2] IEEE STD98158 4-2013. IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques.
- [3] พีรฤดี ยุทธโกวิท, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์งานเทคโนโลยีทางการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กุมภาพันธ์ 2561.
- [4] High-Voltage Test Techniques – Part 1 General definitions and test requirements: International Standard IEC60060-1, 3rd ed. (Geneva, Switzerland, 2010).
- [5] D. G. Holmes and T. A. Lipo: Pulse Width Modulation for Power Converters, in Principles and Practice (John Wiley & Sons, Inc., Jersey, 2003).
- [6] M. H. Rashid: Power Electronics Handbook (Butterworth- Heinemann, Massachusetts, 2011) 3rd ed.
- [7] Instrument Transformer-Part 1: General requirements, IEC Standard 61869-1: 2007.
- [8] Instrument Transformer-Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers, IEC Standard 61869-3: 2011.
- [9] W. Hauschild and E. Lemke: High-Voltage Test and Measuring Techniques (Springer, Heidelberg, 2014).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] User manual for the device MPD600: <https://www.omicronenergy.com> (accessed Jan. 2019).
- [11] A. Thiede¹, and F. Martin: High-Volt Prüftechnik Dresden GmbH, Power Frequency Inverters for High Voltage Tests, High-Volt Colloquium, 2007.
- [12] B. Leelachariyakul, P. Yutthagowith, and S. Potivejkul: PD Detection Test of a Voltage Transformer Using a Variable Frequency Converter (ISET, 2015).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Prombud T., Kitcharoen P., and Yutthagowith P. “Development of A Unipolar PWM Frequency Converter for Partial Discharge Testing of Potential Transformers,” **2017 The 11st International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures**, Kyoto, Japan, 9-10 Dec. 2017, pp. 31-34.
- [2] Prombud T., Kitcharoen P., and Yutthagowith P. “Development of A Partial Discharge Testing System for Potential Transformers,” **2018 The 19th International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, Lyon, France, 20-22 Feb. 2018, pp. 1685-1689.
- [3] Prombud T., Kitcharoen P., and Yutthagowith P. “Development of A Low-Pass Filter for Partial Discharge Testing System with the Power Frequency Converter,” **2018 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**, Auckland, New Zealand, 27-30 Nov. 2018.
- [4] Prombud T., and Yutthagowith P. “Development of High-voltage Testing System Based on Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 773-785, 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISET / ISS 2017 – KYOTO
The 11th International Symposium on
EMC and Transients in Infrastructures

The 13th International Student Session

9 – 10 December 2017
 Kyoto, Japan



Organized by
 Doshisha University, Kyoto, Japan
In Cooperation with
 University of Bologna, Bologna, Italy
 Seoul National University, Seoul, Korea
 Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of A Unipolar PWM Frequency Converter for Partial Discharge Testing of Potential Transformers

T. Prombud, P. Kitcharoen, and P. Yuthagowith

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

Bangkok, Thailand

peerawut.yu@kmitl.ac.th

56601020@kmitl.ac.th

Abstract—In this paper, the development of a partial discharge testing system for potential transformers (PTs) based on a uni-polar pulse width modulation (PWM) frequency converter is presented. The system is composed of a low-voltage and 200-Hz power frequency converter connected with a high-voltage transformer, a low pass filter, and a conventional partial discharge detection system. The performances of the converter is investigated in terms of the DC charging voltage, the voltage difference (peak voltage/square root of 2 and rms voltage), total harmonic distortion of the output high voltages (THD_v), and background noises in the partial discharge test. It is found that the developed frequency converter provides the promising performances in terms of the voltage difference, THD_v, and background noise. The voltage difference and THD_v are lower than 5%, and the background noise is less than 2.5 pC. In addition, the developed system has been used for the real partial test on a potential transformer in the distribution system successfully.

Keywords—high-voltage tests; partial discharge; potential transformer; power quality; PWM frequency converter

I. INTRODUCTION

Partial discharge (PD) is a localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors. PD may not occur next to the conductor. Generally, PD is a consequence of local stress concentration in the insulation or on the insulation surface. PD can be classified as an external discharge and an internal discharge. The external discharge is referred to PD which occurs in ambient air while the internal discharge is due to the imperfections in insulating liquids, in compressed gas and in solid dielectrics. PD phenomena in the high voltage equipment can be examined with various techniques for example PD charge can be measured as recommended in IEC 60270[1].

In the industrial potential transformer (PT) production, partial discharge (PD) test is a routine test that all PT in the line production must be passed. In the PD test, high voltage (HV) is applied to the high-voltage winding of the PT under test. This HV level is always higher than the rated voltage of the PT. For example, a PT with the rating voltage of 12 kV shall be tested at 22.4 kV for prestress voltage condition, and at 14.4 kV for recording PD activity. Therefore, saturation on the PT is

Authors would like to acknowledge the Thailand Research Fund and Meidensha Corporation for the financial support of this research work.

avoided by applying the voltage with the frequency which is higher the rated frequency of the PT. Normally, the frequency of 200 Hz is suitable for all PTs with the rating frequencies of 50 Hz and 60 Hz. In the past, motor generator set was employed in the PD test. However, now the motor generator set is quite hard to find in the real industrial market and is made by order. It leads the price of the motor generator set is quite high. For example, the price of a 30-kVA and 200-Hz motor generator set is around 100,000 USD.

Now a day power electronics device and control topology have a lot of innovation progress [2]. Therefore, it is very useful, if we apply the power electronic frequency converter to use in HV test. However, the problem for using the frequency converter in the PD test is that the generated testing voltage shall be pure sinusoidal waveform with the requirements, i.e.

(1) the difference between peak voltage divided by $\sqrt{2}$ and rms voltage shall be less than 5%, (2) the total harmonic distortion of voltage defined by eq. (1) shall be below 5%;

$$THD = \frac{1}{V_{1,peak}} \sum_{n=2}^{50} V_{n,peak}^2 \quad (1)$$

where, $V_{1,peak}$ is peak voltage of the fundamental frequency voltage, and $V_{n,peak}$ is peak voltage of the n^{th} harmonic frequency voltage.

Also, the converter also produce the high level of noise signal due to switching operation. It leads the very high background noise level in the PD test. In [3], [4], the frequency converter was applied for transformer test. It found that the background noise is around 50 pC. With this background noise condition, the background noise is acceptable for testing power transformer, since the acceptable background noise is higher than a few hundred picocoulomb. However, it is still to high in the PD test of potential transformers. The acceptable background noise for the PD test of PTs shall be lower than 2.5 pC, because the acceptable PD level for the PT in some specific type is only 5 pC [5], [6]. Therefore, some measures for the pure sinusoidal generated waveform and noise reduction are required.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In this paper, a developed power frequency converter is proposed to employ in high-voltage and partial discharge tests. The H-bridge inverter was constructed for the PD test. The additional low pass filter was applied to reduce the generated waveform distortion and background noise in the PD test. The performances of the developed converter are investigated. From the experimental results, the unipolar PWM converter provides the promising performances in terms of DC charging voltage, the voltage difference (peak voltage/square root of 2 and rms voltage), total harmonic distortion of the generated voltage, and background noise level in the partial discharge test.

II. PARTIAL DISCHARGE TESTING SYSTEM FOR PTS

The partial discharge testing system is separated into two parts. The first part is high voltage source, and the second one is the partial discharge detection system in accordance with IEC 60270 standard as shown in Fig. 1. The detail of those parts are given as follows.

A. High-voltage source

In the PD test of a potential transformer, low-voltage power supply being normally from a low-voltage grid, a motor generator set, or power converter is connected with a voltage regulator and then connected to a high-voltage testing transformer. Also, a low-pass filter is possibly connected to the system to control the voltage distortion and background noise in the PD test.

For the problems in the partial discharge tests in the real situation, the total harmonic distortion of the high voltage from the HV transformer supplied from the low-voltage grid is quite hard to control to be lower than 5%, and the noise signal from the grid often hard to control to be the acceptable level of the partial discharge test. Therefore, the grounding system in the

high-voltage testing room shall be designed and constructed in an appropriate way, and the additional low-pass filter is necessary connected to the system. From those reasons, the efficient frequency converter is an attractive choice in the PD tests.

B. Partial discharge detection system

The partial discharge detection system according to IEC 60270 [1] as shown in Fig. 1 is composed of a coupling capacitor (C_k) connected in series with a coupling device (CD) or a measuring impedance and a measuring instrument (MI). The measuring impedance (CD) is the main part which converts the input PD current pulses into pulse voltage. The voltage signal is routed via a measuring cable (CC) to the PD measuring instrument (MI). Additionally the coupling device is composed with supplementary elements for signal filtering in order to eliminate disturbing harmonics caused by the AC test voltage supply. Moreover, a fast over-voltage protection unit is required for suppressing over-voltages which may result from unexpected breakdowns of the test object. To ensure an optimum PD signal transmission, the coupling device should be located physically as close as possible to the coupling capacitor C_k and, for safety reasons, always inside the high voltage test area. The series connection of the coupling capacitor C_k with the measuring impedance is acted as a high-pass filter circuit. Normally, the frequency range used in the conventional PD tests is from 100 kHz to 400 kHz. The PD current having high frequency component will go to the part of the coupling capacitor, because the blocking impedance (Z_f) will be very high in a case of high frequency range. The calibration of the PD detection system with the known charge is required in the real PD test [7].

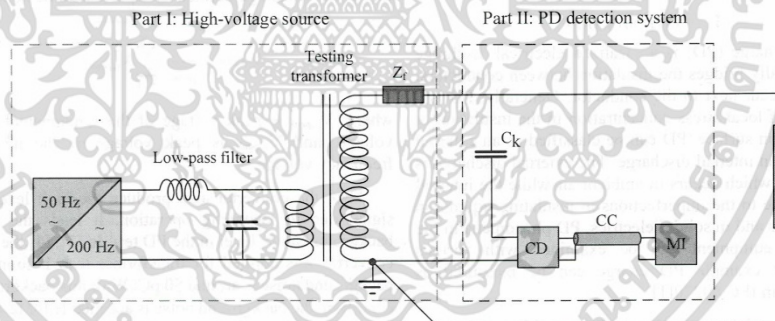


Fig. 1. The circuit of partial discharge test.

III. POWER FREQUENCY CONVERTERS

As mentioned on the limitation of the low voltage supply in Section II, a power frequency converter for the PD tested was developed. As shown in Fig. 2, the converter starts from using full bridge rectifier for converting the AC voltage with the frequency of 50 Hz from the low voltage grid to DC

voltage. Then, the DC voltage is converted to AC voltage with the required frequency of 200 Hz [8]. In this part, insulated-gate bipolar transistors (IGBTs) are connected in H-bridge configuration. The control signals generated by a digital to analog circuit are employed to control the IGBTs' switching to obtain the required output voltages. The switching frequency was set to be 2 kHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

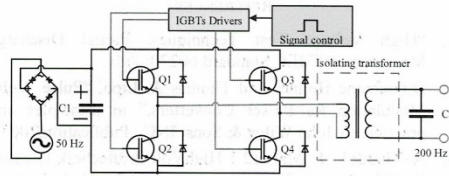


Fig. 2. High voltage source power converter generator.

IV. EXPERIMENTS

In this section, some experiments were carried out to investigate the performance of the developed system in the partial discharge tests. The developed inverters were connected to the HV testing transformer which was connected to the PD detection system in cases of no load and with a PT. The transformer ratings are 460 V/70 kV and 40 kVA. The effect of a low pass filter was also investigated. The filter was constructed from an isolating transformer with leakage impedance of which inductance is 1 mH, and it was connected with the capacitor (Cf) of which capacitance is 22 μF. The isolating transformer is a step-up transformer with the ratio of 1:2. The calculated cut off frequency is about 1 kHz.

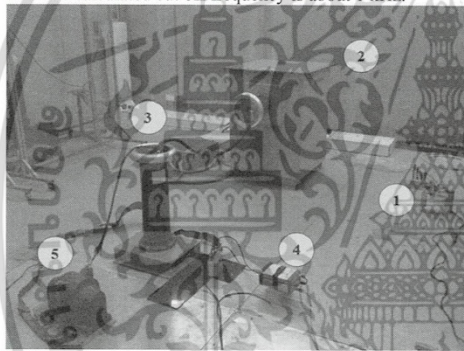


Fig. 3. Experimental set up of the partial discharge test with the PT.

- (1) Isolating transformer, (2) HV testing transformer, (3) Coupling capacitor, (4) Coupling device for PD detection, and (5) PT under test.

The DC charging voltage, the voltage difference (peak voltage/square root of 2 and rms voltage), THD_v, and background noise in the PD tests were examined and measured by the commercial PD detection system (Omicron). Fig. 3 shows experimental set up for the PD test. In the PD test, the standard PD current with the charge of 10 pC was utilized in the calibration process. The background noise without application of the developed inverter is less than 0.5 pC.

A. No load without the filter

The developed power converter was employed to generate voltage of about 20 kV. In this case the low pass filter was not connected to the system. There was no test object connected to

the system. The experimental results are shown in Fig. 4 and Table I.

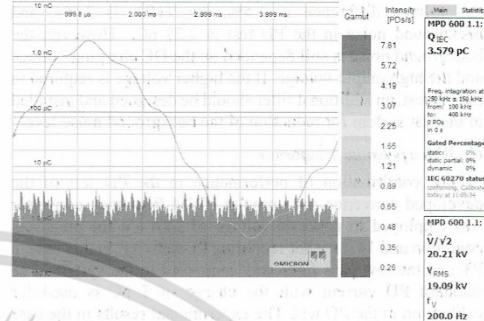


Fig. 4. Experimental results in the case of the unipolar PWM application.

In the case of the unipolar PWM application, the voltage difference was less than 5%, the THD_v was greater than 5%, and the background noise was greater than 2.5 pC. It is notice that the background noise in the PD test is depended on the DC charging voltage, and the inverter without the filter cannot be employed in the PD test.

B. No load with the filter

The develop power converter was employed to generate the same voltage level of about 20 kV. In this case the low pass filter was connected to the system. There was no test object connected to the system. The experimental results are shown in Fig. 5 and Table I.

TABLE I. EXPERIMENT TEST RESULT OF PARTIAL DISCHARGE TESTS

Filter application	$V_m/\sqrt{2}$ (kV)	V_{rms} (kV)	Dc link (V)	THD _v	Q _{IEC}
Non	20.21	19.09	74.7	7.5	3.579
Apply	20.23	19.95	73	3.0	2.281

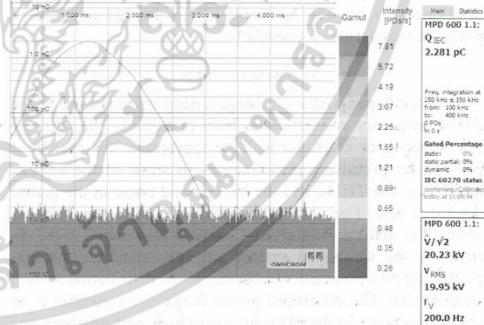


Fig. 5. Experimental results in the case of the unipolar PWM application.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From the experimental results, only the unipolar PWM converter with the filter is able to be used in the PD test, since the voltage difference is 1.4%, the THD_v is 3.0%, and background noise in the PD test is 2.28 pC. However, the background noise is still depended on the DC charging voltage and the high output voltage. If the higher voltage is required in the PD test, an additional filter should be designed and installed in the test system for reduction of the background noise level.

C. With a potential transformer

For confirmation of performance in the PD test of the developed converter, the unipolar PWM frequency converter was employed to generate voltage of 22.4 kV for pre-stress condition and 14.4 kV for recording PD activity. In this case, a PT and the low pass filter was connected to the system. The standard PD current with the charge of 5 pC is used for calibration in the PD test. The experimental results in the case of the applied voltage of 14.4 kV are shown in Fig. 6.



Fig. 6. Experimental results in the case of the PT connected with the test system and unipolar PWM application.

The voltage difference was less than 1%, the THD_v was 2.8%, and the background noise was 2.1 pC. It is confirmed that the developed system can be employed in the PD test with a potential transformer successfully.

V. CONCLUSIONS


The developed partial discharge testing system based on the PWM frequency converter has been presented. The unipolar PWM frequency converter with the appropriate low pass filter provide the promising performances in terms of the voltage difference, the THD_v, and the background noise in the partial discharge test. The voltage difference is 1.4%, the THD_v is about 3%, and the background noise is less than 2.5 pC. In addition, the developed system has been used for the real partial test on a potential transformer in the distribution system successfully. The developed power frequency converter is an attractive choice in the PD tests due to high performances and low cost when it is compared with the moter generator system.

REFERENCES

- [1] "High Voltage Test Techniques: Partial Discharge Measurement," IEC Standard 60270: 2000
- [2] D.Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, "Pulse Width Modulation for Power Converters," in principles and practice., A John Wiley & Sons, INC., Publication,2003.
- [3] A. Thiede1 , F. Martin2 1 HighVolt Prüftechnik Dresden GmbH "Power Frequency Inverters for High Voltage Tests" HighVolt Colloquium, 2007.
- [4] B. Leelachariyakul, P. Yutthagowith, and S. Potivejkul, "PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter," in ISSET, 2015.
- [5] "Instrument Transformer-Part 1: General requirements," IEC Standard 61869-1: 2007.
- [6] "Instrument Transformer-Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers," IEC Standard 61869-3: 2011.
- [7] Wolfgang Hauschild and Eberhard Lemke, "High-Voltage Test and measuring Techniques,"2014.

Power Electronics Handbook, 3rd ed., Muhammad H. Rashid, 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



INTERNATIONAL
CONFERENCE
ON INDUSTRIAL
TECHNOLOGY

ICIT
2018

February 20-22
Lyon, France

PARTICIPANT
GUIDELINES

<http://www.icit2018.org> contact@icit2018.org

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of A Partial Discharge Testing System for Potential Transformers

T. Prombud, P. Kitcharoen, and P. Yutthagowith

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
peerawut.yu@kmitl.ac.th
56601020@kmitl.ac.th

Abstract—In this paper, the development of a partial discharge testing system for potential transformers (PTs) is presented. The system is composed of a low-voltage and 200-Hz power frequency converter connected with a low pass filter, a high-voltage transformer, and a conventional partial discharge detection system. The performances of the converter with three generated waveform, i.e. square wave, quasi-square wave, and unipolar pulse width modulation (PWM) are compared in terms of the DC charging voltage, the voltage difference (peak voltage/square root of 2 and rms voltage), total harmonic distortion of the output high voltage (THD), and background noises in the partial discharge test. It is found that the unipolar PWM frequency converter provides the best performances in terms of the voltage difference, THD, and background noise. The voltage difference and THD, are lower than 5%, and the background noise is less than 2.5 pC. In addition, the developed system has been used for the real partial test on a potential transformer in the distribution system successfully.

Keywords—frequency converter; high-voltage tests; partial discharge; potential transformer; power quality

I. INTRODUCTION

Partial discharge (PD) is a localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors. Generally, PD is a consequence of local stress concentration in the insulation or on the insulation surface. PD can be classified as an external discharge and an internal discharge. The external discharge is referred to PD which occurs in ambient air while the internal discharge is due to the imperfections in insulating liquids, in compressed gas, and in solid dielectrics. PD phenomena in the high voltage equipment can be examined with various techniques. For example PD charge can be measured as the recommendation in IEC 60270[1].

In the industrial production of potential transformers (PTs), partial discharge (PD) detection is a routine test that all PTs in the line production must be tested and passed. In the PD test, high voltage (HV) is applied to the high-voltage winding of the PT under test. This HV level is always higher than the rated voltage of the PT. For example, a PT with the rating voltage of 12 kV shall be tested at 22.4 kV for prestress voltage condition, and at 14.4 kV for recording PD activity. Therefore, core saturation on the PT is avoided by applying

the voltage with the frequency which is higher the rating frequency of the PT. Normally, the frequency of 200 Hz is suitable for all PTs with the rating frequencies of 50 Hz and 60 Hz. In the past, motor generator set was employed in the PD test. However, now the motor generator set is quite hard to find in the real industrial market and is made by order. It leads the price of the motor generator set is quite high. For example, the price of a 30-kVA and 200-Hz motor generator set is around 100,000 USD.

Now a day power electronics device and control topology have largely innovation progress [2]. Therefore, it is very useful, if we apply the power electronic frequency converter to use in HV test. However, the problem for using the frequency converter in the PD test is that the generated testing voltage shall be pure sinusoidal waveform with the requirements, i.e.

(1) the difference between peak voltage divided by $\sqrt{2}$ and rms voltage shall be less than 5%, and (2) the total harmonic distortion of the output voltage defined by eq. (1) shall be below 5%.

$$THD = \frac{1}{V_{1,peak}} \sqrt{\sum_{i=2}^{50} V_{i,peak}^2} \quad (1)$$

where, $V_{1,peak}$ is peak voltage of the fundamental frequency voltage, and $V_{n,peak}$ is peak voltage of the n^{th} harmonic frequency voltage.

Also, the converter also produces the high level of noise signal due to switching operation. It leads the very high background noise level in the PD test. In [3], [4], the frequency converter was applied for transformer test. It found that the background noise is around 50 pC. With this background noise condition, the background noise is acceptable for testing power transformer, since the acceptable background noise is higher than a few hundred picocoulomb. However, it is still to high in the PD test of potential transformers. The acceptable background noise for the PD test of PTs shall be lower than 2.5 pC, because the acceptable PD level for the PTs in some specific types is only 5 pC [5], [6]. Therefore, some measures for the pure sinusoidal generated waveform and noise reduction are required.

In this paper, a developed power frequency converter is proposed to employ in high-voltage and partial discharge tests. The H-bridge inverter was constructed for the PD test. The additional low pass filter was applied to reduce the generated waveform distortion and background noise in the PD test. Three topologies of the generated waveforms are investigated the performances in terms of the DC charging voltage, the voltage difference (peak voltage/square root of 2 and rms voltage), total harmonic distortion of the output high voltage, and background noise level in the partial discharge test. The first generated waveform is square wave, the second one is quasi-square wave, and the last one is unipolar pulse width modulation (PWM) with the modulation frequency of 2 kHz. From the experimental results, the unipolar PWM topology [7] provide the best performances in terms of the voltage difference, the total harmonic distortion, and background noise level in the PD test.

II. PARTIAL DISCHARGE TESTING SYSTEM FOR PTs

The partial discharge testing system is separated into two parts. The first part is high voltage source, and the second one is the partial discharge detection system in accordance with IEC 60270 standard as shown in Fig. 1. The details of those parts are given as follows.

A. High-voltage source

In the PD test of a potential transformer, low-voltage power supply being normally from a low-voltage grid, a motor generator set, or power converter is connected with a voltage regulator and then connected to a high-voltage testing transformer. Also, a low-pass filter is possibly connected to the system to control the voltage distortion and background noise in the PD test.

For the problems in the partial discharge tests in the real situation, the total harmonic distortion of the high voltage from

the HV transformer supplied from the low-voltage grid is quite hard to control to be lower than 5%, and the noise signal from the grid often hard to control to be the acceptable level of the partial discharge test. Therefore, the grounding system in the high-voltage testing room shall be designed and constructed in an appropriate way, and the additional low-pass filter is necessary connected to the system. From those reasons, the efficient frequency converter is an attractive choice in the PD tests.

B. Partial discharge detection system

The partial discharge detection system according to IEC 60270 [1] as shown in Fig. 1 is composed of a coupling capacitor (C_k) connected in series with a coupling device (CD) or a measuring impedance and a measuring instrument (MI). The measuring impedance (CD) is the main part which converts the input PD current pulses into pulse voltage. The voltage signal is routed via a measuring cable (CC) to the PD measuring instrument (MI). In addition, the coupling device is composed with supplementary elements for signal filtering in order to eliminate disturbing harmonics caused by the AC test voltage supply. Moreover, a fast over-voltage protection unit is required for suppressing over-voltages which may result from unexpected breakdowns of the test object. To ensure an optimum PD signal transmission, the coupling device should be located physically as close as possible to the coupling capacitor (C_k) and, for safety reasons, always inside the high voltage test area. The series connection of the coupling capacitor (C_k) with the measuring impedance is acted as a high-pass filter circuit. Normally, the frequency range used in the conventional PD tests is from 100 kHz to 400 kHz. The PD current having high frequency component will go to the part of the coupling capacitor, because the blocking impedance (Z_f) will be very large value in a case of high frequency range. The calibration of the PD detection system with the known charge is required in the real PD test.

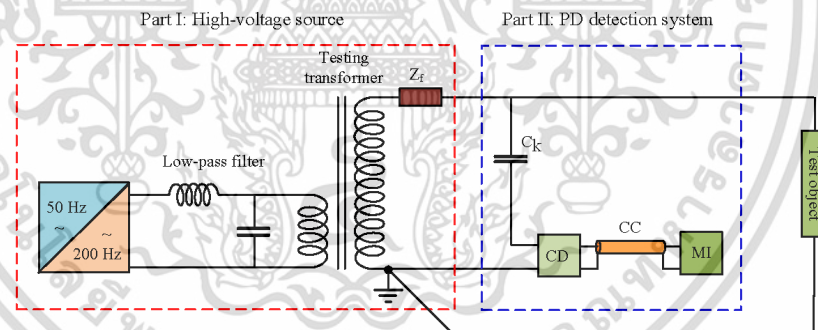


Fig. 1. The circuit of partial discharge test.

III. POWER FREQUENCY CONVERTERS

As mentioned on the limitation of the low voltage supply in Section II, a power frequency converter for the PD tested was developed. As shown in Fig. 2, the converter starts from using full bridge rectifier for converting the AC voltage with the frequency of 50 Hz from the low voltage grid to DC voltage. Then, the DC voltage is converted to AC voltage with the required frequency of 200 Hz. In this part, insulated-gate bipolar transistors (IGBTs) are connected in H-bridge configuration. The control signals generated by a digital to analog circuit are employed to control the IGBTs' switching to obtain the required output voltages. As shown in Fig. 3, three considered voltage waveforms, i.e. a square wave, a quasi-square wave, and a PWM are investigated the performances in terms of the DC charging voltage, the voltage difference, the total harmonic distortion of the output voltage (THD_v) from the HV testing transformer [8], and background noise in the PD tests. In the quasi-square wave topology, the starting and stopping phases of the generated voltage were set to be 30 degree and 150 degree respectively. In the PWM topology, the switching frequency was set to be 2 kHz.

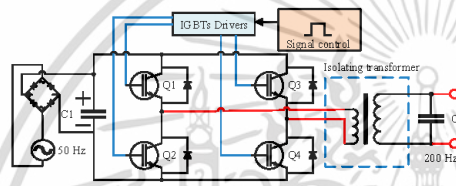


Fig. 2. Low voltage power converter connected to the HV testing transformer.

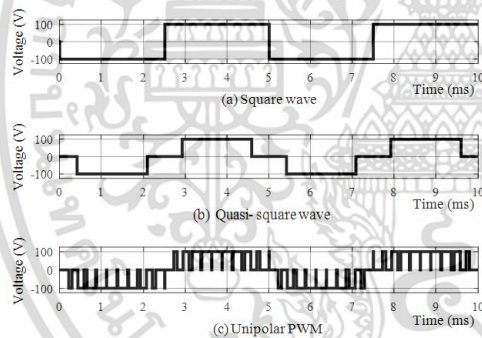


Fig. 3. Three generated waveforms from the developed converter.

IV. EXPERIMENTS

In this section, some experiments were carried out to investigate the performance of the developed system in the partial discharge tests. The developed converters was connected the HV testing transformer which was connected to the PD detection system in cases of no load and connection

with a PT. The HV testing transformer ratings are 460 V/70 kV and 40 kVA. The effect of a low pass filter was also investigated. The filter was constructed from an isolating transformer with leakage impedance of which inductance is about 1 mH, and it was connected with the capacitor (C_f) of which capacitance is 22 μ F. The isolating transformer is a step-up transformer with the ratio of 1:2. The calculated cut off frequency is about 1 kHz.

The DC charging voltage, the voltage difference (peak voltage/square root of 2 and rms voltage), THD_v, and background noise in the PD tests of three generated waveforms (square wave, quasi-square wave, and unipolar PWM) were examined and measured by the commercial PD detection system (Omicron MPD 600). Fig. 4 shows experimental set up for the PD test. In the PD test, the standard PD current with the charge of 10 pC was utilized in the calibration process. The background noise without application of the developed converter was less than 0.5 pC.

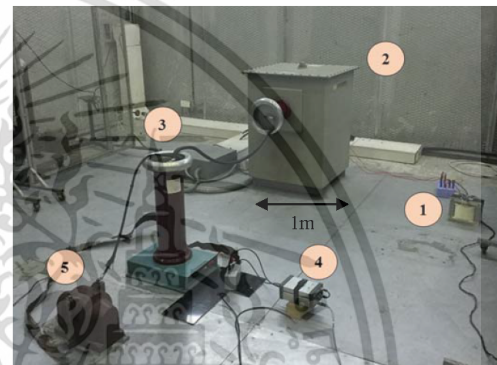


Fig. 4. Experimental set up of the partial discharge test with the PT.

(1) Isolating transformer, (2) HV testing transformer, (3) Coupling capacitor, (4) Coupling device for PD detection, and (5) PT under test.

A. No load without the filter

The power converter with the three generated waveforms was employed to generate voltage of about 20 kV. In this case the low pass filter was not connected to the system. There was no test object connected to the system. The experimental results are shown in Figs. 5 to 7 and Table I. It is noted that the time scales of the output high voltages in Figs. 5 to 11 are the same.

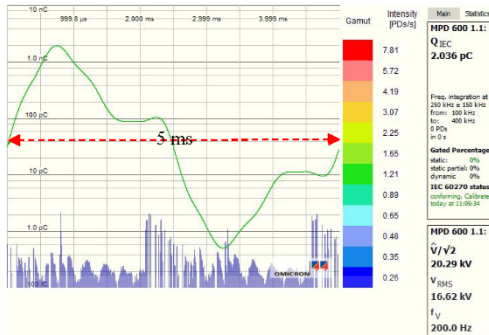


Fig. 5. Experimental results in the case of the square wave application.

the case of the quasi-square wave application, the voltage difference was less than 5%, the THD_v was greater than 5%, and the background noise was greater than 2.5 pC. In the case of the unipolar PWM application, the voltage difference was less than 5%, the THD_v was greater than 5%, and the background noise was greater than 2.5 pC. It is notice that the background noise in the PD test is depended on the DC charging voltage, and the converter without the filter cannot be employed in the PD test.

B. No load with the filter

The power converter with three generated waveforms was employed to generate the same voltage level of about 20 kV. In this case the low pass filter was connected to the system. There was no test object connected to the system. The experimental results are shown in Figs. 8 to 10 and Table I.

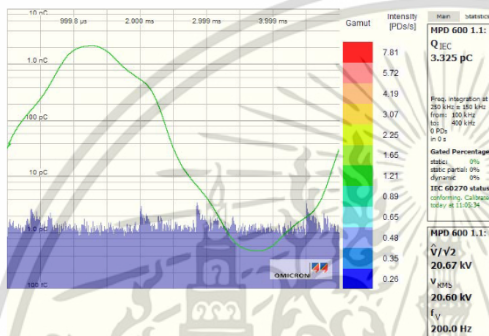


Fig. 6. Experimental results in the case of the quasi-square wave application.

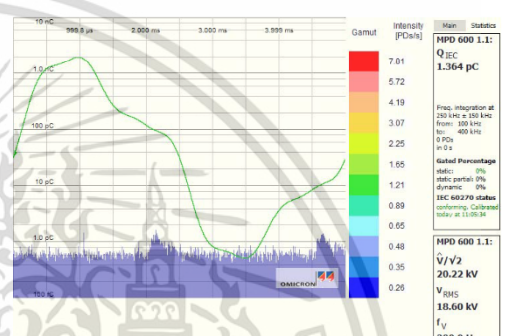


Fig. 8. Experimental results in a case of the square wave application.

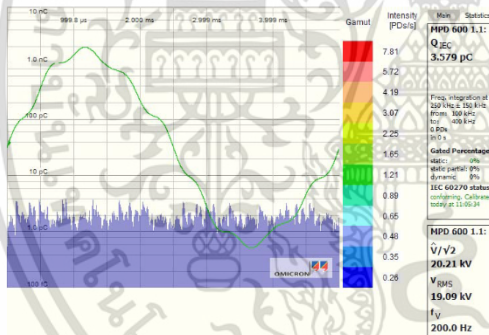


Fig. 7. Experimental results in the case of the unipolar PWM application.

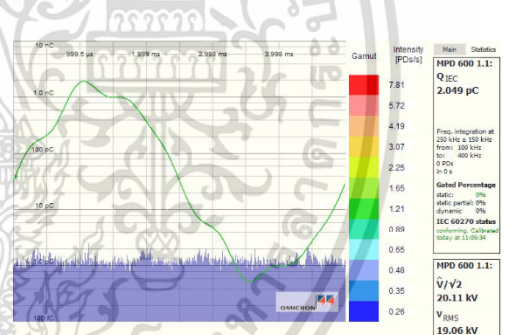


Fig. 9. Experimental results in the case of the quasi-square wave application.

From the experimental results in this case, the voltage waveforms were quite deviated from the pure sinusoidal waveform. In the case of the square wave application, the voltage difference (peak voltage/square root of 2 and rms voltage) was greater than 5%, the THD_v was much greater than 5%, and the background noise was less than 2.5 pC. In

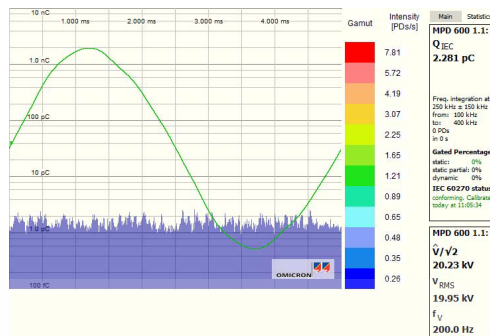


Fig. 10. Experimental results in the case of the unipolar PWM application.

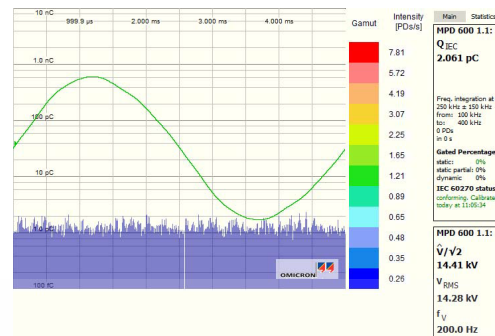


Fig. 11. Experimental results in the case of the PT connected with the test system and unipolar PWM application.

TABLE I. EXPERIMENT TEST RESULT OF PARTIAL DISCHARGE TESTS

Control topology	Experiment test result of partial discharge					
	filter	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$ (kV)	V_{rms} (kV)	Dc link (V)	THD _v	Q _{IEC}
Square wave	Non	20.29	16.62	45.70	34.4	2.036
	Apply	20.22	18.60	49.25	23.7	1.364
Quasi-square wave	Non	20.67	20.6	69.5	6.2	3.325
	Apply	20.11	19.06	60.24	7.7	2.049
Unipolar PWM	Non	20.21	19.09	74.7	7.5	3.579
	Apply	20.23	19.95	73	3.0	2.281

From the experimental results, only the unipolar PWM converter with the filter is able to be used in the PD test, since the voltage difference was 1.4%, the THD_v was 3.0%, and background noise in the PD test was 2.28 pC. However, the background noise is still depended on the DC charging voltage and the high output voltage. If the higher voltage is required in the PD test, an additional filter should be redesigned and installed in the test system for reduction of the background noise level.

C. With a potential transformer

For confirmation of performance in the PD test of the developed converter, the unipolar PWM frequency converter was employed to generate voltage of 22.4 kV for pre-stress condition and 14.4 kV for recording PD activity. In this case, a PT and the low pass filter was connected to the system. The standard PD current with the charge of 5 pC was used for calibration in the PD test. The experimental results in the case of the applied voltage of 14.4 kV are shown in Fig. 11. The voltage difference was less than 1%, the THD_v was 2.8%, and the background noise was 2.1 pC. It is confirmed that the developed system can be employed in the PD test with a potential transformer successfully.

V. CONCLUSION

The developed partial discharge testing system has been presented. The unipolar PWM frequency converter with the appropriate low pass filter provides the best performances in terms of the voltage difference, the THD_v, and the background noise in the partial discharge test. The voltage difference was 1.4%, the THD_v was about 3%, and the background noise was less than 2.5 pC. In addition, the developed system has been used for the real partial test on a potential transformer in the distribution system successfully. The developed power frequency converter is an attractive choice in the PD tests due to high performances and low cost when it is compared with the motor generator system.

ACKNOWLEDGEMENT

Authors would like to acknowledge the Thailand Research Fund and Meidensha Corporation for the financial support of this research work.

REFERENCES

- [1] "High Voltage Test Techniques: Partial Discharge Measurement," IEC Standard 60270: 2000
- [2] D.Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, "Pulse Width Modulation for Power Converters," in principles and practice., A John Wiley & Sons, INC., Publication,2003.
- [3] A. Thiedel , F. Martin2 1 HighVolt Prüftechnik Dresden GmbH "Power Frequency Inverters for High Voltage Tests" HighVolt Colloquium, 2007.
- [4] B. Leelachariyakul, P. Yuthagowith, and S. Potivejkul, "PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter," in ISET, 2015.
- [5] "Instrument Transformer-Part 1: General requirements," IEC Standard 61869-1: 2007.
- [6] "Instrument Transformer-Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers," IEC Standard 61869-3: 2011.
- [7] Power Electronics Handbook, 3rd ed., Muhammad H. Rashid, 2011
- [8] Wolfgang Hauschild and Eberhard Lemke, "High-Voltage Test and measuringTechniques,"2014.



ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
AND COMPUTER ENGINEERING



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of A Low-Pass Filter for Partial Discharge Testing System with the Power Frequency Converter

T. Prombud, P. Kitcharoen, and P. Yutthagowith

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
tongpian.p@gmail.com
peerawut.yu@kmitl.ac.th

Abstract—The development of a low-pass filter for partial discharge test system that based on a power frequency converter is presented in this paper. The PD testing system is composed a 200-Hz power frequency converter and the designed filter connected with a high-voltage test transformer and a conventional partial discharge detection system. It is found that the power frequency converter acting as the low-voltage source always provides the high noise level with effecting to the background noise occur in the partial discharge test. Sometimes noise level is higher than the acceptable level of the PD tests in some high-voltage equipment such as potential transformers, distribution transformer, and so on. In this paper, the performances of the filters with different designs are studied and compared the result in terms of the output voltage difference (RMS voltage and peak voltage/ $\sqrt{2}$), total harmonic distortion of the output high voltages value (THD_v), and value of background noises as occur in the partial discharge test. The low-voltage source based on uni-polar pulse width modulation (PWM) topology was employed in the PD testing system. From the experimental results, the designed filter shows the promising performances with low levels of the background noise, THD_v, and voltage difference. The experimental results show that the background noise is lower than 2.0 pC, the voltage difference and THD_v are less than 5%. In addition, the designed filter has been tested in the partial test of a real potential transformer successfully.

Keywords— frequency converter; high-voltage tests; low-pass filter; partial discharge; potential transformer

I. INTRODUCTION

The most important of high voltage test is purpose for safety requirements by verify and proof the design and production of high voltage device, which include potential transformer (PTs). In the example dielectric voltage-withstand test, dielectric strength test, isolation test and another one partial discharge is the one part that importance too, which can explain about partial discharge by consequence. First, partial discharge can occur between two parts of sharp edges as applied high voltage and ground in pattern of gaseous which known in name of corona discharge. Second, internal of insulation material bubble or voids may occur which cause of partial discharge as known in name cavity discharge general occur with solid material. Finally occur between boundaries of two material with difference type as known in name surface discharge. Refer according to the IEC

standard number 60270:2000. The partial discharges were defined as localized electrical discharges that only partially bridge of the insulation between conductors and which can or cannot occur adjacent to a conductor. Partial discharges are in general a consequence of the local electrical stress concentrations on the surface of the insulation or inside of the insulation.

For confirming the quality of potential transformer (PT) manufacturing include process inspection partial discharge test in the work instruction process for confirming the PT will break down because of partial discharge. According to the limitation iron core of PT saturation which normally operates by frequencies rating 50 Hz or 60 Hz. So, the test frequency will test with rating frequency 200 Hz with suitable for all PT. According to this experimental test result refer to PT spec 22 kV. So rating voltage was tested with 40 kV for the prestressed condition after that reduce the voltage to 30 kV. In general, the motor-generator will apply for a test in this activity, But now a day the power electronic technology has many improvements in term of efficiency increase, reliable[2] with suitable for development in the field of high voltage test. So this paper had developed a power converter used for High volt test.

Even though, the power converter were developed from power electronic which generate harmonic effect from high switching frequency activity from switches IGBTs which can feed the harmonic in to the partial discharge test system, if system without appropriate filter the accuracy of test cannot be achieved target because of high level of background noise. For this reason if we applied the high switching frequency power converter for the PD test system the generated testing voltage system shall be had optimize filter system which can prevent harmonic feed to system, So the test system can generated without harmonic over standard and pure sinusoidal waveform refer the requirements, i.e. [1] the difference between RMS voltage and peak voltage divide by $\sqrt{2}$ by shall be values lower than 5%. [2] the total harmonic distortion of voltage defined by eq. (1) shall be lower than 5%.

$$\text{THD} = \frac{1}{V_{1,peak}} \sqrt{\sum_{n=2}^{50} V_{n,peak}^2} \quad (1)$$

Authors would like to acknowledge the Thailand Research Fund and Meidensha Corporation for the financial support of this research work.

Where, the $V_{1,peak}$ that mean peak voltage of the fundamental frequency voltage, and the $V_{n,peak}$ that mean peak voltage of the n^{th} harmonic frequency of voltage.

According to the switching behaviour of power converter generate high of noise with effect to increase number of background noise in partial discharge test, even though the ground system of laboratory design in good condition[3], [4] In general the transformer test with applied power converter for test that background noise value that around 50 pC. But for PD test background noise shall be lower than 5 pC and some specific PT value background noise must lower than 2.5 pC[5], [6]. So, the noise reduction that must consider and investigate the purpose for generating pure sinusoidal as can apply for PD test.

The low-pass filter was developed and analyzed by applied with power frequency converter as developed for use in PD test. The switching topology use by uni-polar PWM technique [7]with connects to full bridge IGBT. Switching frequency was 10 kHz and modulation indexes (ma) equal 1 with have high efficiency in term of low of level total harmonic distortion, low of level background noise and voltage difference.

II. PARTIAL DISCHARGE TESTING SYSTEM FOR PTS

The system of partial discharge was separate in two part. First, the term of the high voltage source and in the second term of the detection system of partial discharge with measure the PD activity for the connection circuit connected by referring IEC standard number 60270 with show in the Fig.2 every detail show explain below.

A. The High-voltage test supply

In the general PT was test partial discharge by applied voltage as generating from generator or voltage from low voltage grid with connect to high-voltage test transformer [8].

According to the voltage supply that from low voltage grid with cannot control the total harmonic from every household lower than 5% with feeding harmonic to the system. So, from this problem the power converter was interesting one for develop and apply in PD test. However because of the power converter that switching activity generate harmonic in the system too. So, the low pass filter must apply for reduce the number of THD and background noise.

B. The Partial discharge measurement system

The partial discharge measurement system refers to IEC standard number 60270 [1] shows that in the Fig. 2 is components with a coupling capacitor (C_k) next to connect with a series circuit with a coupling device (CD) and a measuring instrument (MI). The measuring impedance (CD) is the important component of measurement which converts the signal of input response of partial discharge current pulses transfer to the pulse of voltage. The voltage signal is transferred by a measuring fiber optic cable (CC) with that part connected to the PD measuring instrument (MI). In additionally the safety during operation test shall be considered about protection for operator and protection of device in the system.

The system must disconnect the circuit test separate from the voltage source immediately whenever short circuit occurs breakdown or over limitation of voltage level. The coupling capacitor (C_k) shall be installed location close to the coupling device purpose for optimum and high efficiency in term of signal quality transfer to the PD measurement system and finally, every equipment must setup install within the metal case for protecting operator refer to the law of Michael Faraday which operates the outside of the case. In the part of PD measurement that conventional PD activity occur between frequency range 100 kHz to 400 kHz So, when every PD signal occur impedance (Z_f) will resist and block the PD signal after that the signal will pass to the PD measurement by coupling capacitor (C_k).

C. Low-pass Filter

To generate a voltage source of the power converter, it is necessary to have a frequency filter for eliminate the harmonic that is causing the sine waveform distortion. Reduce the noise that occurred by switches. Frequency converters for power circuits are designed to cut-off frequencies were approximately 1 kHz using low-pass filter L-C, as present in Fig 1.

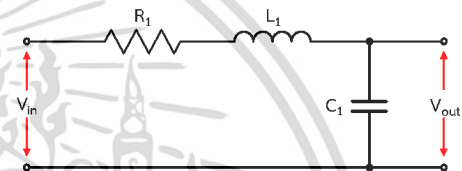


Fig. 1. Low-Pass filter circuit.

The frequency cut-off (f_c) can find by referring the eq. (3). When the filter circuit is connected to a partial discharging test circuit, the converter circuit is fed through a filter circuit. And the capacitor overlap (C_k) acting behaves like the L-C filter with a show in the circuit diagram as Fig. 3. With explaining to the transfer function of the low-pass filter as present in the Fig. 1. The resistance (R_1), the (L_1), and the capacitance (C_1) as can show in eq. (2).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(L_1 C_1)S^2 + (R_1 C_1)S + 1} \quad (2)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3)$$

From the Fig. 3. Show that circuit diagram in the transfer function format at the part of high-voltage side which the testing transformer as transferred equivalent circuit value to the low-voltage side of testing transformer which can be show in transfer functions format in the eq. (2). In the part of frequency domain, the resistance (R_1) that value that 9.6 Ω , the inductance (L_1) value that 4.4 mH for the capacitance (C_1) varied test by two value of capacitance one test by value 1 μ F, and second test by value 16 μ F respectively.

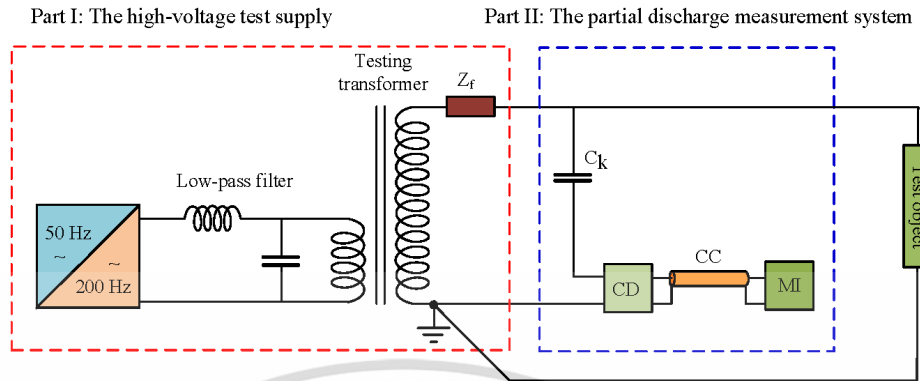


Fig. 2. The circuit of partial discharge test.

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

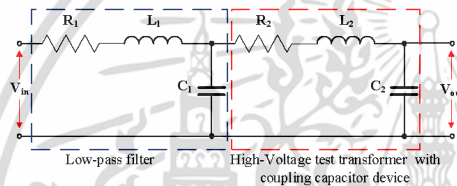


Fig. 3. Low-pass filter circuit connected with impedance circuit of high side which transfer to low side of testing the transformer.

The circuit components on the high voltage side of the testing transformer can transfer impedance to the low side of the testing transformer with have value by following the resistance (R_2), the inductance (L_2), the coupling capacitance (C_2) is 5.38 Ω 0.67 mH and 26.58 μF , respectively. The frequency response is present that in Figure 4. It can reduce harmonic and noise levels when frequency that value more than 2650 Hz in the case of test the capacitance (C_1) value amount 1 μF and It can reduce number of harmonic and reduce number of noise levels when frequency that value more than 800 Hz in the case of test the capacitance (C_1) value amount 16 μF consequent. Which were present in transfer functions format as show in the eq. (4). and The Bode diagram was compared cut-off frequency between capacitance (C) 1 μF and 16 μF as shows that in the Fig. 4.

III. POWER FREQUENCY CONVERTERS

As explain in previous about the limitation of the low voltage source from grid low-voltage distribution about total harmonic distortion as cannot control from distribution in Section II, a power frequency converter as develop for the partial discharge tested was developed. As present in the Fig. 5, the converter can explain sequent of system by starts with the part of AC to DC

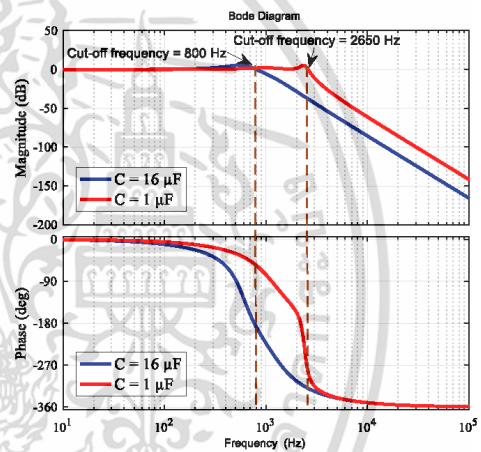


Fig. 4. The Bode plot diagram were compare cut-off frequency between C 1 μF at f 800Hz and 1 μF at f 2650 Hz.

by using full bridge diodes rectifier 3-phase which converting voltage from the AC voltage at fundamental frequency 50 Hz from the low voltage line grid transmission which bridge diodes rectifier 3-phase transfer energy to DC voltage. Next, the part of DC voltage is converted energy to AC voltage with the design frequency of 200 Hz. In this part, insulated-gate bi-polar transistors (IGBTs) are connected in H-bridge configuration. The control signals generated by a micro controller digital STM32F409 to gate drivers are employed to control the IGBTs' switching to the required output voltages. This research propose

uni-polar carrier-based PWM modulation technique which comparison between control signal waveform sine, invert sine, and triangle. The H-bridge topology which have output signal high efficiency more than bi-polar and half-bridge topology in case of comparison in term of harmonic and power output efficiency consequent. The modulation index (m_a) in this research propose equal 1 and switch frequency (f_s) 10 kHz with the most harmonic and side harmonic will occur equal $2f_s$ than mean 20 kHz.

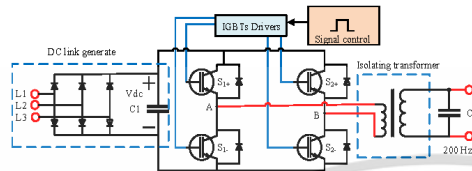


Fig. 5. High voltage source of power converter generator.

IV. EXPERIMENTS

In this section, some experiments were carried out to investigate the performance of the developed system in the partial discharge tests. The developed inverters were connected to the HV testing transformer which was connected to the PD detection system under condition of no load and with a PT. The transformer ratings were 460 V/70 kV and 40 kVA. The effect of a low-pass filter was also investigated. The filter was constructed from an isolating transformer with leakage impedance of which inductance it was connected with the capacitor (C_1) which capacitance where test at $1 \mu\text{F}$ and $16 \mu\text{F}$ for investigate. The DC charging voltage, the voltage difference (RMS voltage and peak voltage/ $\sqrt{2}$), THD_v, and background noise in the PD tests were examined and measured by the commercial PD detection system (Omicron). Fig. 6 shows experimental set up for the PD test. In the PD test, the standard PD current with the charge of 10 pC was utilized in the calibration process. The background noise without application of the developed inverter is less than 0.5 pC .



Fig. 6. Experimental test set up of the partial discharge test with the PT.

- (1) HV testing the transformer, (2) Coupling capacitor,
- (3) Coupling device measurement for PD detection, and (4) PT under test.

A. Without load condition applied the filter capacitor $1 \mu\text{F}$

The power converter with the PWM topology generated waveforms were employed to generate level of voltage about 40 kV. In this case the low-pass filter was applied capacitor $1 \mu\text{F}$ connected to the system. There was no test object connected to the system. The experimental results are present in Figs. 7 to 8 and Table I.

From the experimental results present that in this case, the voltage waveforms were approximately to the pure sinusoidal waveform, the voltage difference (peak voltage/ $\sqrt{2}$ and RMS voltage) was less than 5%, the THD_v was less than 5%, and the background noise was greater than 2.5 pC . In the case of the uni-polar PWM application for condition applied filter capacitor $1 \mu\text{F}$ by cut-off frequency 2650 Hz. It is notice that the background noise in this level cannot be employed in the PD test.

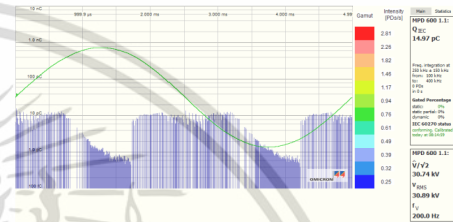


Fig. 7. Experimental test results in the case of capacitor filter $1 \mu\text{F}$ at 30 kV application.

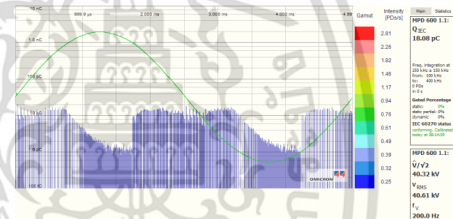


Fig. 8. Experimental test results in the case of capacitor filter $1 \mu\text{F}$ at 40 kV application.

B. Without load condition applied the filter capacitor $16 \mu\text{F}$

The power converter with design by PWM topology generated waveforms were employed to generate voltage of about 40 kV. In this case the low-pass filter was applied capacitor $16 \mu\text{F}$ to the system. There was no test object connected to the system. The experimental results are present in Figs. 9 to 10 and Table I. From the experimental results present that in this case, the voltage waveforms were approximately to the pure sinusoidal waveform, the voltage difference (peak voltage/ $\sqrt{2}$ and RMS voltage) was less than 5%, the THD_v was less than 5%, and the background noise was less than 2.5 pC . In the case of the uni-polar PWM application with applied filter capacitor $16 \mu\text{F}$ by cut-off frequency 800 Hz. It is notice that the background noise in this level can be employed in the PD test.

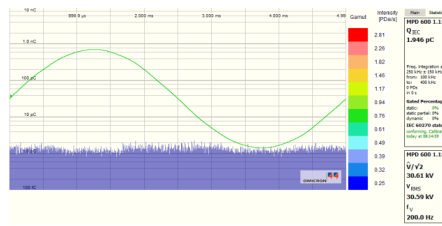


Fig. 9. Experimental test results in the case of capacitor filter 16 μF at 30 kV application.

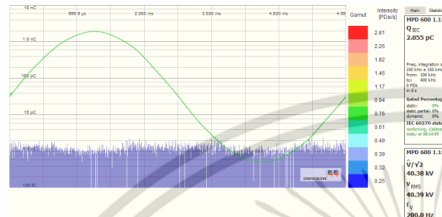


Fig. 10. Experimental test results in the case of capacitor filter 16 μF at 40 kV application.

TABLE I. THE EXPERIMENT TEST RESULT OF PARTIAL DISCHARGE.

Capacitor	The experiment test result of partial discharge					
	f_c (Hz)	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$ (kV)	V_{RMS} (kV)	Dc link (V)	THD _v (%)	Q _{IEC} (pC)
1 μF	2650	30.74	30.89	145.5	2.2	14.97
	2650	40.32	40.61	191.0	2.2	18.08
16 μF	800	30.61	30.59	120.0	1.6	1.946
	800	40.38	40.39	158.0	1.6	2.055

From the experimental results show that, at prestress voltage condition 40 kV the uni-polar PWM converter topology with design value of filter as cut-off frequency at 800 Hz is able to be used in the PD test, since the voltage difference is 0.25%, THD_v is 1.6%, and the background noise in PD test is 2.055 pC.

C. With a condition take load by test with potential transformer

For final confirmation the performance of the PD test as developed power frequency converter, as use uni-polar PWM topology was employed to generate voltage test with level 40 kV for pre-stress condition and decrease to level 30 kV for recording PD activity. This condition, The PT and the low-pass filter as cut-off frequency 800 Hz were applied connected to the system. The standard calibrator PD current with the set value of charges to 5 pC is used for calibration in the PD test. The experimental results show that in the case of condition applied voltage level 40 kV was present in Fig. 11. The voltage difference value was less than 1%, the THD_v value was 0.6%, and the background noise value was 2.5 pC. It was confirmed that the developed system as produce can be employed in the PD test of a potential transformer successfully.

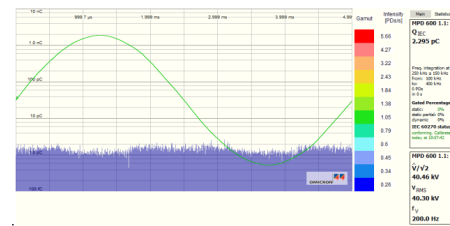


Fig. 11. Experimental test results in the case of the PT connected with the test system and uni-polar PWM application.

V. CONCLUSION

The proper filter for partial discharge testing system with the power frequency converter has been presented and developed. In a case of the fundamental testing frequency of 200 Hz and the modulation frequency of 10 kHz, the appropriate cut-off frequency of 800 Hz of the low-pass filter provided the good performances in terms of the voltage difference, the THD_v, and the background noise in the partial discharge test. The voltage difference is 0.39%, the THD_v is about 0.6%, and the background noise is less than 2.5 pC. In addition, the developed system has been used for the real partial test of a potential transformer in the distribution system successfully. The developed power frequency converter with the presented filter is an attractive choice of the PD tests due to high performances and low cost when it is compared with the conventional motor-generator system.

REFERENCES

- [1] "High Voltage Test Techniques: Partial Discharge Measurement," IEC Standard 60270: 2000
- [2] D.Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, "Pulse Width Modulation for Power Converters," in principles and practice., A John Wiley & Sons, INC., Publication, 2003.
- [3] A. Thiedel, F. Martin, "High Volt Prüftechnik Dresden GmbH "Power Frequency Inverters for High Voltage Tests" High Volt Colloquium, 2007.
- [4] B. Leelachariyakul, P. Yuthagowith, and S. Potivejkul, "PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter," in ISET, 2015.
- [5] "Instrument Transformer-Part 1: General requirements," IEC Standard 61869-1: 2007.
- [6] "Instrument Transformer-Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers," IEC Standard 61869-3: 2011.
- [7] Power Electronics Handbook, 3rd ed., Muhammad H. Rashid, 2011
- [8] Wolfgang Hauschild and Eberhard Lemke, "High-Voltage Test and measuring Techniques," 2014.

Volume 32 Number 2(1) 2020

ISSN (print) 0914-4935
ISSN (online) 2435-0869
CODEN: SENMER

Sensors and Materials

Sensors and Materials

International Journal on Sensor Technology

EDITOR-IN-CHIEF

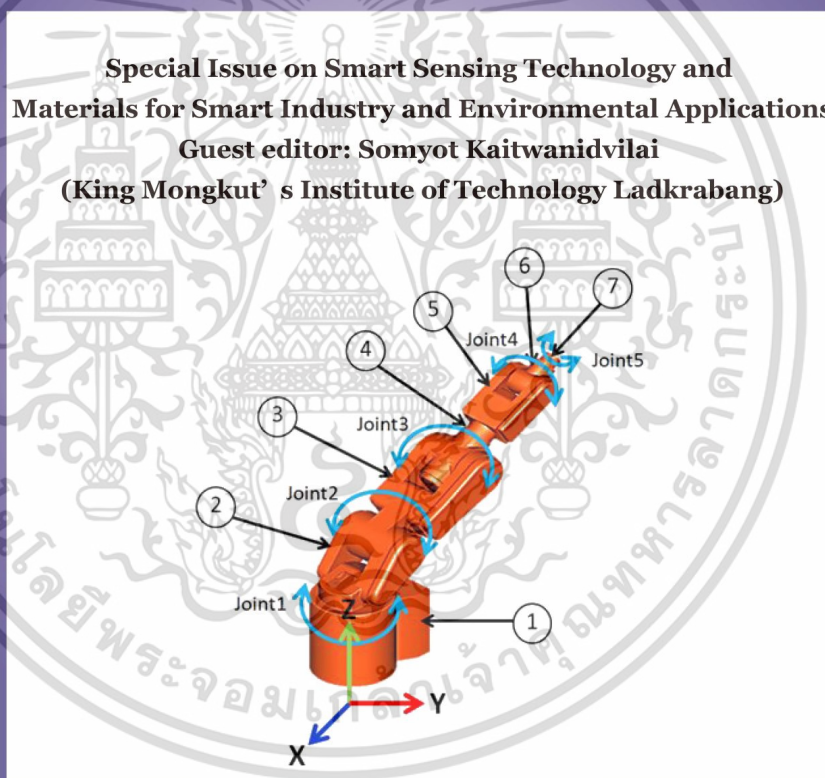
M. Ishida

EDITORS

J. Wilde K. Mitsubayashi S. Roy

ASSOCIATE EDITORS

K. Maenaka J. Ohta

**Special Issue on Smart Sensing Technology and
Materials for Smart Industry and Environmental Applications****Guest editor: Somyot Kaitwanidvilai
(King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang)**

Vol. 32 No. 2(1) (2020) 455-598

MYU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of High-voltage Testing System Based on Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers

Tongpian Prombud and Peerawut Yutthagowith*

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
1 Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

(Received June 30, 2019; accepted December 26, 2019)

Keywords: low-pass filter, high-voltage tests, partial discharge, potential transformer, PWM frequency converter

We present the development of a high-voltage (HV) testing system based on a power frequency converter in HV and partial discharge (PD) tests of a potential transformer (PT). The converter with the proper filter is utilized as a low-voltage source connected with a HV transformer in the HV and PD tests. The converter is composed of a three-phase rectifier and a power converter based on pulse width modulation (PWM) with a unipolar switching technique. The vital problem in the HV and PD tests is that a converter with a high rate of rise and fall of voltage switching always generates a high noise level that affects the background noise in the PD test. In some PD tests, the noise level is higher than the acceptable level of the PD test requirement in HV equipment such as PTs and distribution transformers. It will be advantageous if an efficient PD testing system based on a power frequency converter can be developed for such tests. In this paper, the proper filter was analyzed and developed to meet the following requirements: the applied HV difference (root mean square voltage and peak voltage/ $\sqrt{2}$) to the test object and its total harmonic distortion should be less than 5%, and the background noise level in the PD tests should be less than half the acceptable PD level of such HV equipment specified by the relevant standards. In the case of the oil-type PT, the acceptable PD level is only 5 pC, so it is difficult to find a low-cost commercial frequency converter that satisfies this requirement. To verify the developed system, the performance characteristics of the developed converter have been investigated in terms of the background noise in the PD test, the total harmonic distortion of output voltage from the HV testing transformer side, and the input power consumption. The characteristics of the proposed and developed system are analyzed, and experimental results agree well with the simulation ones. The developed system can generate an output voltage of high quality that satisfies the standard requirement. At the test voltage of 40 kV_{rms}, the total harmonic distortion voltage (THD_v) is less than 2% and the background noise is less than 2.5 pC. Moreover, the proper switching frequency and amplitude modulation index (m_a) are investigated, and it is found that the switching frequency from 1 to 20 kHz and m_a of 0.8 and 1 do not affect the background noise level or the THD_v , and the switching frequency from 1 to 4 kHz and m_a of 1 are the best conditions since the input power

*Corresponding author: e-mail: peerawutyu@kmitl.ac.th
<https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2531>

ISSN 0914-4935 © MYU K.K.
<https://myukk.org/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

consumption is the lowest. In addition, the developed system has been tested in the partial test of a real PT and found to be feasible. With its promising performance, the developed system is an attractive choice for use in HV and PD tests.

1. Introduction

The most important high-voltage (HV) test is the verification of the performance of HV equipment in design and construction processes. Examples of such tests are insulation voltage withstand test, power loss measurement, dielectric loss measurement, and partial discharge (PD) measurement.

According to IEC 60270:2000,⁽¹⁾ PDs are defined as localized electrical discharges that only partially bridge the insulation between conductors, and they are caused by local electrical stress concentrations in the insulation or on the surface of the insulation. Generally, such discharges appear as pulses having durations of less than 1 μ s. PD measurement is the most important test used in the evaluation of insulation performance and life. The PDs are classified into three main types. The first type of PD, named corona discharge, can occur in areas having sharp edges and high electric field stress. The second type originates from defects of the internal insulation material, such as bubbles and voids. If these defects have lower insulation levels than the main insulation material, under sufficient electrical field stress, PD can occur. The last PD type, called surface discharge, occurs at the boundary between two materials.

As the simplest way to generate HV for HV testing,⁽²⁾ a voltage regulator connected with a power source from a low-voltage grid or a generator is applied to a HV testing transformer at the low-voltage side. The HV from the transformer is applied to a test object. Because of the nonlinear characteristic of the equipment for the power electronics application, disturbance is generated in the electrical system, and it sometimes causes power quality problems. According to IEC 60060-1,⁽³⁾ the testing voltage should be an almost purely sinusoidal waveform of which THD_v , defined by Eq. (1), and different voltage (DV ; peak voltages divided by $\sqrt{2}$ and RMS voltage) should be less than 5%.

$$THD_v = \frac{1}{V_{p1}} \sqrt{\sum_{i=2}^{50} V_{pi}^2} \quad (1)$$

Here, V_{p1} is the peak voltage of the fundamental frequency and V_{pi} is the peak voltage of the i th harmonic frequency. Figure 1 shows the test voltage applied to the potential transformer (PT) and PD pattern during the HV test. It is found that the DV and THD_v are higher than 5%. To avoid voltage distortion and satisfy the standard requirement, a voltage filter is also applied to the system.

For the HV test of PTs and to confirm the insulation performance of the test object, it is necessary to raise the voltage to higher than the rating voltage. If the applied testing voltage with the rated frequency is used in the test, the core saturation of the PT can occur and the applied voltage may be distorted. For a better understanding, an example case should be

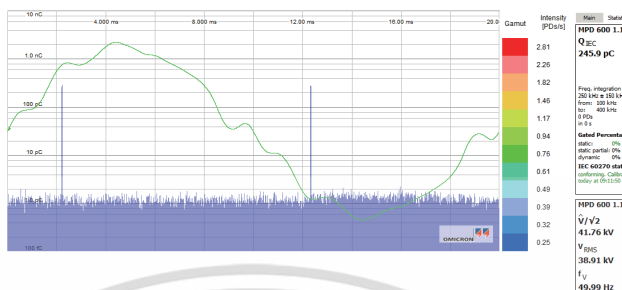


Fig. 1. (Color online) Test voltage waveform and the PD pattern during the HV test.

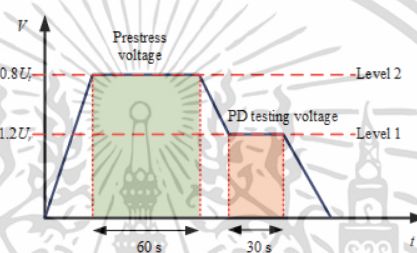


Fig. 2. (Color online) Procedure of voltage application for the PD test of PTs.

considered. For the PD test of a PT with the rating voltage (U_r) of 24 kV, the prestress voltage condition with a withstand voltage (U_1) of 80% is applied to the PT, and then the testing voltage is decreased to the level of $1.2U_r$ (28.8 kV) to record the PD activity. The procedure of applying voltage in the PD test is shown in Fig. 2. Therefore, the saturation of the iron core of PT is avoided by applying voltage with a frequency higher than the rated frequency of the PT. If the voltage with a power frequency of 50 Hz is applied to the HV side of the PT, the saturation effect of the PT affects the distortion of the applied voltage waveform, as shown in Fig. 1. The DV and THD_v are higher than 5%. Therefore, to avoid the core saturation effect, a test voltage with a frequency higher than twice the power frequency is necessary in the test; the frequency of 200 Hz is a good candidate for all PTs with the rating frequencies of 50 and 60 Hz.

Nowadays, power electronics technology has been applied in many practical fields, such as home appliances, automotives and transaction, renewable energy, and HV transmission and distribution systems. In HV generation for testing, the power electronics converter is a powerful and efficient tool for AC/DC, DC/AC, and AC/AC power conversion. However, the crucial problem of the application of the power converter in the PD test is the interference signal originating from the fast switching of power electronic devices. It causes the PD detection system to have background noise much higher than the acceptable level. For example, in the PD tests of PTs insulated with oil, the acceptable PD level is only 5 pC. Consequently, the testing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

system including the PD detection system should have a background noise level below 50% of the acceptable PD level (2.5 pC). Most commercial power converters have an additional filter for eliminating undesired harmonic voltages and obtaining voltage waveforms close to a pure sinusoidal wave. However, the filter cannot eliminate the interference in the PD measurement completely, leading to the background noise in the PD test being higher than the acceptable level.

In this study, the PD testing system composed of a power frequency converter, an additional filter, an HV transformer, and a PD detection system was analyzed, designed, developed, and tested to confirm the validity of the PD test of PTs.

2. Development of HV Testing System for PD Tests

The developed system with the equivalent circuit shown in Fig. 3 is composed of a power frequency converter, an additional filter, an HV testing transformer, and a PD detection system.

2.1 Power frequency converter

The power frequency converter based on the H-bridge configuration, as shown in Fig. 4, was developed. The converter is composed of a rectifier and H-bridge insulated-gate bipolar transistors (IGBTs) controlled by a unipolar pulse width modulation (PWM) technique.

The unipolar PWM technique^(4, 7) is based on the operation of four control switches, S1, S2, S3, and S4, as shown in Table 1. The AC output voltage waveform can instantaneously take one of the following three voltage levels: $+V_{dc}$, $-V_{dc}$, or 0.

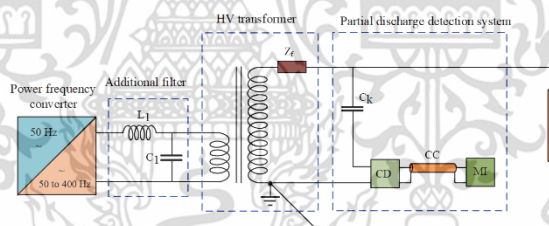


Fig. 3. (Color online) PD testing system.

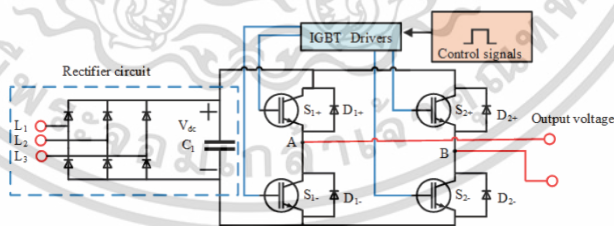


Fig. 4. (Color online) HV source power converter generator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The controlled and AC reference voltage waveforms are shown in Fig. 5(a), and the output signal is shown in Fig. 5(b).

2.2 PD detection system

The developed PD detection system is composed of a coupling capacitor (C_k) connected in series with the measuring impedance [coupling device (CD)]. The capacitance C_k was selected to be 1 nF, and the measuring impedance was designed to have the band-pass characteristic with the equivalent circuit shown in Fig. 6 and the transfer impedance characteristic with the low and high cutoff frequencies of 30 kHz and 20 MHz, as shown in Fig. 7.

Table 1
Switch states in full-bridge single-phase voltage source inverter unipolar PWM.

State	Switch conduction status		Conduction status of IGBT and diode		V_0
	ON	OFF	$I_0 > 0$	$I_0 < 0$	
1	S_{1+}, S_{2-}	S_{1-}, S_{2+}	S_{1-}, S_{2-}	D_{1+}, D_{2-}	V_{dc}
2	S_{1+}, S_{2-}	S_{1-}, S_{2-}	S_{1+}, D_{2+}	D_{1+}, S_{2+}	0
3	S_{1-}, S_{2-}	S_{1+}, S_{2-}	D_{1-}, D_{2+}	S_{1-}, S_{2-}	$-V_{dc}$
4	S_{1-}, S_{2-}	S_{1+}, S_{2+}	D_{1-}, S_{2-}	S_{1-}, D_{2-}	0

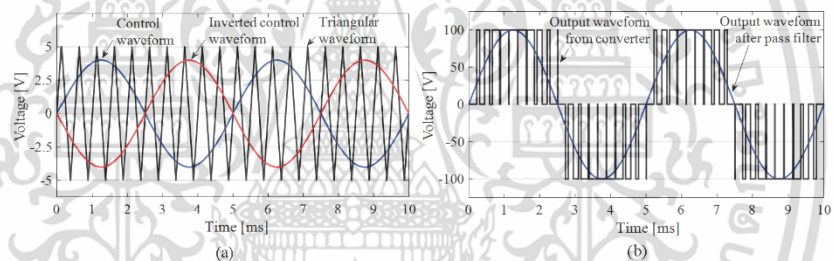


Fig. 5. (Color online) Generated PWM waveform from the PWM converter. (a) PWM in the unipolar converter. (b) Output waveform of the power converter.

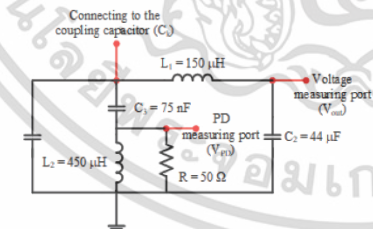


Fig. 6. (Color online) Equivalent circuit of the measured impedance or the CD.

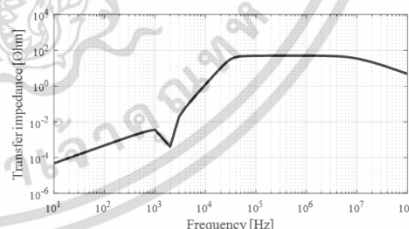


Fig. 7. Transfer impedance of the measured impedance in the frequency domain.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The equivalent circuit of the PD detection system with the HV testing transformer is shown in Fig. 8. The transfer function of the output voltage (V_{out}/V_{in}) can be calculated as shown in Fig. 9, which shows that this transfer function has the characteristic of a low-pass filter. The cutoff frequency is about 1200 Hz. It is noted that the total impedance of the HV testing transformer with the rating of 460 V/75 kV and 40 kVA is transferred to the HV side of the transformer. The circuit parameters are described in Fig. 8 and the PT under test^(8,9) or the test object can be represented well with high impedance, which has no effect in the test circuit. When the simulated pulse of 2.5 pC is injected to the system, the peak voltage detected at the PD measuring port is 5 mV, as shown in Fig. 10.

For a better understanding of the problem of cooperation with the PWM frequency converter, we should consider the case in which the 200 Hz PWM voltage of 100 kV with the switching frequency of 3.2 kHz is supplied to the system without the additional filter as shown in Fig. 8. The voltage across the test object has small oscillation, as shown in Fig. 11, and its *THD*, is 0.93%. The PWM voltage also affects the voltage at the PD measuring port, which shows a peak voltage of 570 mV, as shown in Fig. 12, which is much higher than that (5 mV) obtained with a 2.5 pC simulated pulse. Therefore, the means of mitigating the interference from the PWM frequency converter is required for the PD test in real practice. In this paper, the additional filter is proposed to connect at the LV side of the HV testing transformer.⁽¹⁰⁾ The analysis of the additional filter will be presented in the next subsection.

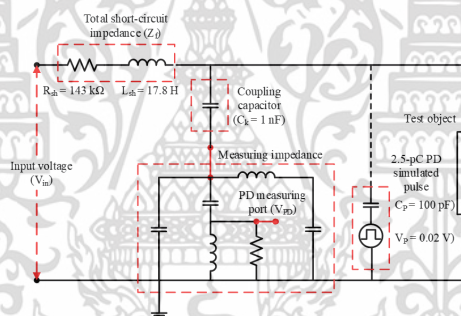


Fig. 8. (Color online) Equivalent circuit of the PD testing system without the additional filter.

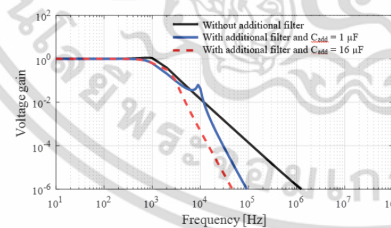


Fig. 9. (Color online) Transfer function of the output voltage without and with the additional filter.

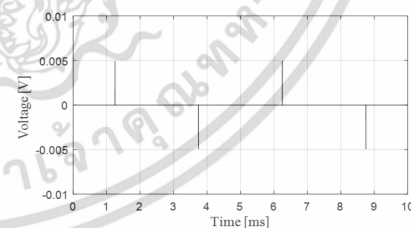


Fig. 10. Voltage at the PD measuring port in the case of 2.5 pC simulated pulse injection to the system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

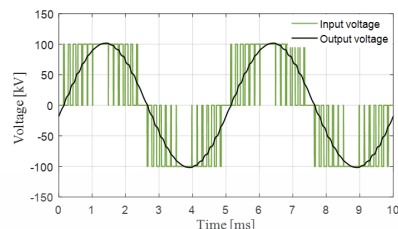


Fig. 11. (Color online) Input and output voltage waveforms.

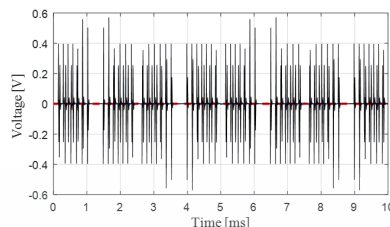


Fig. 12. (Color online) Voltage at the PD measuring port in the case of 100 kV PWM voltage supplied to the system.

2.3 Additional filter

To reduce the noise signal generated by converter switching, an additional filter is required. The purposes of the filter are to remove undesired harmonic output voltages without attenuating the fundamental frequency voltage and to eliminate undesired interferences at the PD output port. In this work, the additional filter is composed of a resistor (R_{add}), an inductor (L_{add}), and a capacitor (C_{add}). It is connected to the LV side of the testing transformer. In this study, this additional simple filter was selected for noise reduction. The performance of this filter is sufficient for reducing the background noise to the level suitable for the PD testing of all HV equipment. The equivalent circuit and the circuit parameters transferred to the HV side of the testing transformer are shown in Fig. 13. Note that the connected capacitances of 1 and 16 μF on the LV side are equivalent to those of 0.038 and 0.6 nF on the HV side.

The attenuation factor (V_{PD}/V_{in}) was calculated, and the result is shown in Fig. 14. It is noted from Figs. 9 and 14 that the additional filter with the additional capacitance of 16 μF (0.6 nF on the HV side) has promising characteristics. The cutoff frequency of the output voltage is around 900 Hz, which is not greatly changed from that without the additional filter, and the maximum attenuation factor is 3.72×10^{-8} . Therefore, the voltage at the PD measuring port with the application of 100 kV PWM input voltage is attenuated to be lower than 5 mV, which is lower than the voltage from the 2.5 pC PD simulated pulse.

To confirm the validity of the additional filter, simulations in the time domain were carried out. The 100 kV PWM input voltages with various switching frequencies from 1 to 20 kHz and the modulation indexes of 0.8 and 1.0 were applied to the system. It was found that all interference voltages are lower than 5 mV, and all output voltages have THD_v of less than 0.2%. Figures 15 and 16 show examples of the output voltage and the interference at the PD measuring port in the case of the switching frequency of 3.2 kHz and the modulation index of 1.0. It is implied that the background noise of the system in PD measurement is lower than 2.5 pC when a voltage of 100 kV (70.7 kV_{rms}) is applied to the test object.

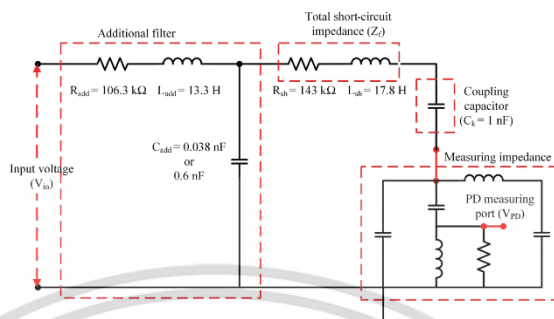


Fig. 13. (Color online) Equivalent circuit of the PD testing system with the additional filter.

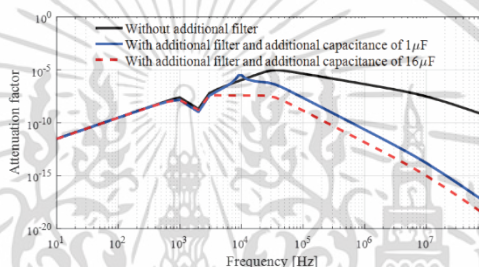


Fig. 14. (Color online) Attenuation factor with and without the additional filter.

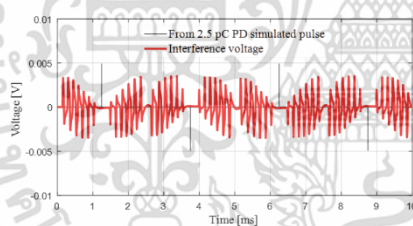


Fig. 15. (Color online) Voltage at the PD measuring port with a PWM voltage of 100 kV supplied to the system.

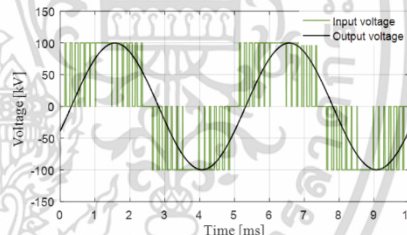


Fig. 16. (Color online) Input and output voltages with a PWM voltage of 100 kV supplied to the system and the addition filter connected.

3. Experiments

Some experiments were carried out to investigate the performance of the developed system in the PD tests. The experimental setup is shown in Fig. 17. The circuit parameters were set to be almost the same as in Fig. 13. The effects of the switching frequency and m_a were investigated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

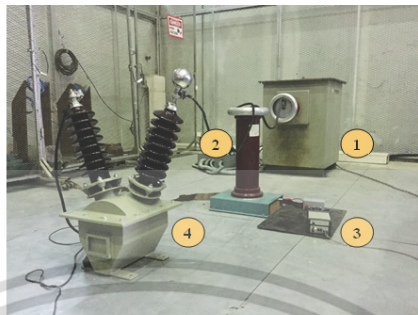


Fig. 17. (Color online) Experimental setup of the PD test with the PT. (1) HV testing transformer. (2) Coupling capacitor. (3) CD for PD detection. (4) PT under test.

The DV , THD_v , and background noise in the PD tests were examined and measured using the developed system. To avoid the interference signal from electromagnetic coupling in the HV laboratory, commercial EO/OE converters (Omicron)⁽¹¹⁾ with fiber optic cables were applied with the developed system. In the real PD test, the standard PD current with the charge of 5 pC was utilized in the calibration process. The background noise obtained without the application of the developed inverter is less than 0.5 pC.

3.1 Effect of additional capacitor (C_{add})

We should consider the test case in which the PWM voltage with the switching frequency of 3.2 kHz and m_a of 1.0 was applied to the LV side of the testing transformer. Without the additional filter, the background in the PD measurement at the testing voltage of only about 14 kV is 162 pC, which is very high, as shown in Fig. 18. When the additional filter was connected to the system, the background noise was greatly reduced, as observed from the simulation results. In the case of the additional capacitor (C_{add}) with 1 and 16 μF , the background noise levels at the testing voltage of 40 kV_{rms} (70 kV_p) were reduced to be 18 and 2 pC, respectively. Some test results are shown in Figs. 19(a) and 19(b). It is confirmed that the appropriate capacitance is 16 μF .

3.2 Experiment without test object

In this part, the additional filter with the additional capacitance of 16 μF was connected to the system, and there was no test object connected to the system during the experiment. The effects of switching frequency (1 to 20 kHz) and m_a (0.8 and 1.0) are investigated in terms of the background noise level, THD_v , and input power consumption. In the experiment, the voltage was raised to 40 kV_{rms} to imitate the prestress condition of the 24 kV PT, then the voltage was

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

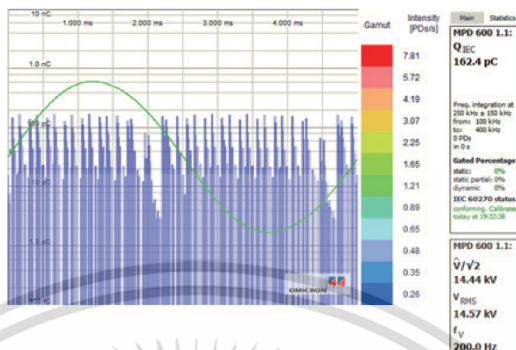


Fig. 18. (Color online) Experimental test results without the additional filter.

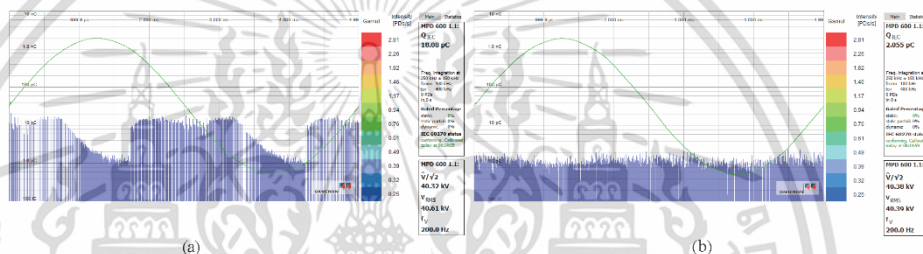


Fig. 19. (Color online) Experimental test results with the additional capacitances of (a) 1 and (b) 16 μ F and testing voltage of 40 kV.

reduced to 30 kV_{rms} to record the PD level. The experimental results are shown in Figs. 20–22. Also, some voltage waveforms and PD levels are shown in Figs. 23(a) and 23(b). It is found that the modulation index of 0.8 or 1.0 and the switching frequency do not greatly affect the PD level and THD_v. All PD levels (less than 2.5 pC) and THD_v values (less than 5%) are at acceptable levels. However, the input power consumption increases as the switching frequency increases. Therefore, from the experimental results, the appropriate switching frequency should be around 1 to 4 kHz.

3.3 Experiment with PT

To confirm the performance of the developed system in the PD test with a PT, the selected switching frequency of 2 kHz and m_a of 1.0 were employed to generate a voltage of 40 kV_{rms} for the prestress condition and a voltage of 30 kV_{rms} for recording the PD activity. In this case, a PT and the additional filter were connected to the system. The standard PD pulse with a charge of 5 pC was used for calibration in the PD test. The experimental results at the testing voltage of about 30 kV_{rms} are shown in Fig. 24.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

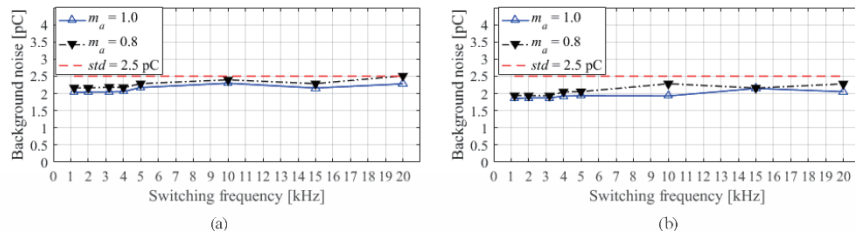


Fig. 20. (Color online) Background noise with switching frequency from 1 to 20 kHz, m_a of 0.8 and 1.0, and testing voltages of (a) 40 and (b) 30 kV_{rms} .

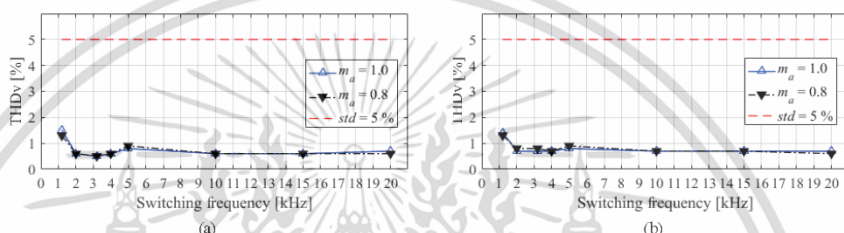


Fig. 21. (Color online) $THDv$ with switching frequency from 1 to 20 kHz, m_a of 0.8 and 1.0, and testing voltages of (a) 40 and (b) 30 kV_{rms} .

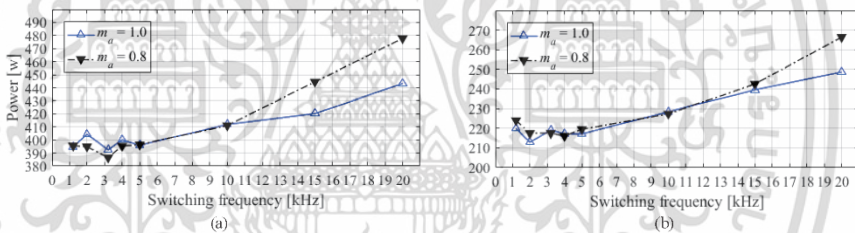


Fig. 22. (Color online) Input power consumption with switching frequency from 1 to 20 kHz, m_a of 0.8 and 1.0, and testing voltages of (a) 40 and (b) 30 kV_{rms} .

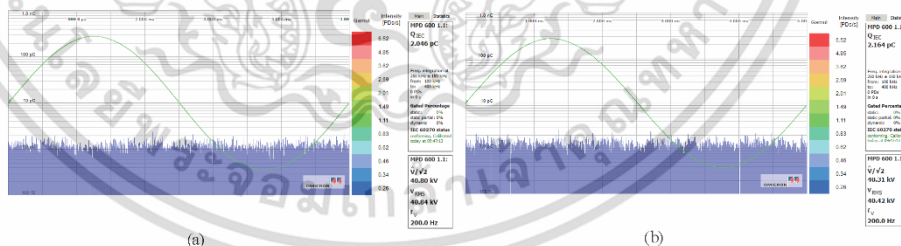


Fig. 23. (Color online) Output voltage waveform and PD level with switching frequency of 2 kHz, fundamental frequency of 200 Hz, m_a of (a) 1.0 and (b) 0.8, and testing voltage of 40 kV_{rms} .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7 B. Leelachariyakul, P. Yutthagowith, and S. Potivejkul: PD Detection Test of a Voltage Transformer Using a Variable Frequency Converter (ISET, 2015).
- 8 Instrument Transformer-Part 1: General requirements, IEC Standard 61869-1: 2007.
- 9 Instrument Transformer-Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers, IEC Standard 61869-3: 2011.
- 10 W. Hauschild and E. Lenke: High-Voltage Test and Measuring Techniques (Springer, Heidelberg, 2014).
- 11 User manual for the device MPD600: <https://www.omicronenergy.com> (accessed Jan. 2019).

About the Authors



Tongpian Prombud received his B.Eng. and M.Eng. degrees from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, in 2006 and 2012, respectively. From 2012 to the present, he has been with King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang as a Ph.D. student in the Department of Electrical Engineering. His research interests are in high-voltage engineering applications and sensors. (tongpian.p@gmail.com)



Peerawut Yutthagowith received his B.Eng. and M.Eng. degrees from Chulalongkorn University, Thailand, in 1998 and 2001, respectively and his Ph.D. degrees from Doshisha University, Japan, in 2010. From 2007 to the present, he has been with King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His research interests are in high-voltage engineering applications and sensors. (peerawut.yu@kmitl.ac.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล	นายทองเพียร พรหมบุตร
วัน เดือน ปีเกิด	22 มิถุนายน พ.ศ.2523
ที่อยู่	64/238 ถ.สุขสวัสดิ์ ซ.วัดใหญ่ ต.ในคลองบางปลากด อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ 10290 โทร.094-665-3987
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง 2.) การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์บางส่วน 3.) ระบบวัดแรงดัน และระบบวัดกระแส 4.) ระบบป้องกันฟ้าผ่า
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2561-2562	เป็นผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการพัฒนาระบบทดสอบไฟฟ้าแรงสูง สำหรับสายเคเบิลแรงดันสูงและสายไฟแรงสูงหุ้มฉนวน (Space Aerial Cable) ของบริษัท สายไฟฟ้าวินายน์เคเบิล จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Prombud T., Kitcharoen P., and Yutthagowith P. “Development of A Unipolar PWM Frequency Converter for Partial Discharge Testing of Potential Transformers,” **2017 The 11st International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures**, Kyoto, Japan, 9-10 Dec. 2017, pp. 31-34.
- [2] Prombud T., Kitcharoen P., and Yutthagowith P. “Development of A Partial Discharge Testing System for Potential Transformers,” **2018 The 19th International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, Lyon, France, 20-22 Feb. 2018, pp. 1685-1689.
- [3] Yutthagowith P., Prombud T., and Leelachariyakul B. “Development of A Resonant Frequency Converter for Partial Discharge Tests on Potential Transformers,” **2018 The 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**, Ljubljana, Slovenia, 13-16 May. 2018.
- [4] Prombud T., Kitcharoen P., and Yutthagowith P. “Development of A Low-Pass Filter for Partial Discharge Testing System with the Power Frequency Converter,” **2018 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**, Auckland, New Zealand, 27-30 Nov. 2018.
- [5] Prombud T., Kitcharoen P., and Yutthagowith P. “The Analysis of Low-Pass Filter Behaviour for A Partial Discharge Detection System,” **2019 The Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH 2019)**, Bangkok, Thailand, 4-5 Mar. 2019.
- [6] Prombud T., and Yutthagowith P. “Development of High-voltage Testing System Based on Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 773-785, 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้