

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

SOLID STATE TRANSFORMERS FOR HIGH-VOLTAGE TESTING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-D-018-089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOLID STATE TRANSFORMERS FOR HIGH-VOLTAGE TESTING

BANYAT LEELACHARIYAKUL

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

2023

KMITL-2023-EN-D-018-089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง
นักศึกษา	นายบัญญัติ ลีลาจริยกุล
รหัสประจำตัว	59601312
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.พีรุณี ยุทธโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิควิธีการสร้าง การควบคุม และใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างแรงดันสูงกระแสสลับเพื่อการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 50 Hz ถึง 400 Hz โดยใช้วงจรแปลงผันความถี่กำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) แบบแรกคือ แบบปรับปรุงความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation) และแบบที่สองคือ แบบเรโซแนนซ์ (Resonance) โดยระบบทดสอบที่พัฒนาขึ้นใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าต่อกับวงจรกรองและ/หรือวงจรปรับแต่งเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (LC circuit) เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงทดสอบแรงสูง พิกัดกำลังปรากฏ 40 กิโลวัตต์แอมป์ พิกัดแรงดัน 75 กิโลวัตต์ ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นแบบเฟสเดียวมีลักษณะวงจรแบบ H-bridge โดยใช้ IGBTs รหัส IXXN110N65B4H1 ทำงานร่วมกับวงจรป้องกันไฟกระชากแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC snubber circuit) ที่เหมาะสม เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟส ควบคุมมุนนำกระแส IGBTs ด้วยสัญญาณปรับปรุงความกว้างพัลส์ (PWM) หรือรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ซึ่งสร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส STM32F407VG ในกรณีของระบบแบบเรโซแนนซ์การปรับค่าการเกิดเรโซแนนซ์ของวงจรทดสอบไฟฟ้าแรงสูงกระทำด้วยการปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap) ซึ่งสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ระหว่าง 3 mH ถึง 300 mH ร่วมกับตัวเก็บประจุค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยหาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับแต่งเรโซแนนซ์อย่างแม่นยำด้วยวิธีพโรนีย์แบบปรับปรุง (Improved Prony method) ซึ่งถูกเสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของระบบและหลักการที่พัฒนาขึ้น ระบบดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้แก่ หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) และสายเคเบิลกำลัง (Power cable) ตามมาตรฐาน IEC โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง พบว่าระบบทดสอบแบบเรโซแนนซ์มีประสิทธิภาพดีกว่าระบบทดสอบแบบปรับปรุงความกว้างพัลส์ในแง่ของคุณภาพแรงดันสูงที่สร้างได้และระดับสัญญาณรบกวนในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยสามารถสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์

ความถี่ 50 Hz (สำหรับทดสอบสายเคเบิลกำลัง) และ 200 Hz (สำหรับทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน) มีค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (Voltage total harmonic distortion, THD_v) ต่ำกว่า 0.5 % ค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage, DV) ต่ำกว่า 1 % และค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) น้อยกว่า 1 pC จากผลการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงพบว่า หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์และหลักการข้างต้นนี้สร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ปรับค่าได้ปรับความถี่ได้ โดดเด่นกว่าการสร้างต้นสูงทดสอบแบบดั้งเดิมเป็นอย่างยิ่ง ทั้งในแง่คุณภาพของสัญญาณแรงดันสูงทดสอบ และสัญญาณรบกวนพื้นหลังในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั่วไป อีกทั้งได้เปรียบกว่าการสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีเทคนิคควบคุมมุนำกระแสในอุปกรณ์สวิชชิงแบบอื่นๆ จากเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงมีความเป็นไปได้อย่างยิ่งในการใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง



Thesis	Solid State Transformers for High-voltage Testing
Student	Mr. Banyat Leelachariyakul
Student ID.	59601312
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Peerawut Yutthagowith

ABSTRACT

This doctoral thesis presents techniques for development control, and implementation of solid state transformers for AC high-voltage testing with the adjustable frequency from 50 Hz to 400 Hz. Two developed testing systems are based on power frequency converters with different techniques, i.e. 1) pulse width modulation and 2) resonance. Each developed system utilizes a power frequency converter and RC filter and/or resonant tuning circuit to feed the electrical power to a HV testing transformer with voltage rating of 75 kV_{rms} and the apparent power of 40 kVA. The developed converters are single phase types and in a form of H-bridge configuration. IGBTs (IXXN110N65B4H1) are employed as electronic switches controlled by pulse width modulation or square wave signal which is generated a microcontroller (STM32F407VG). In a case of the resonant converter, the resonant condition is tuned by inductance adjustment which is performed by adjustment of the air gap of the adjustable inductor. The inductance can be varied from 3 to 300 mH. The proper inductance for the resonant condition is determined by an Improved Prony method which is proposed in this thesis.

For confirmation of the validity of the developed approach and system, the developed systems were utilized in the HV and PD tests of a voltage transformer (VT) and a power cable according to IEC standards. It is found that the resonant system has higher performances than the PWM one in terms of the generated voltage quality and interference in the PD tests. In the cases of the frequency of 50 Hz (For the power cable test) and the frequency of 200 Hz (For the VT test), the output voltage waveform that is almost entirely sinusoidal (THD_v < 0.5% and DV < 1%) and has a background noise level of under 1 pC. According to the experimental results, the developed system

and the design approach is superior to the conventional one for the HV and PD tests of HV equipment in actual practice.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยในโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.ระดับปริญญาเอก) สัญญาเลขที่ PHD60I0023 ภายใต้การดำเนินงานของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยรองศาสตราจารย์ ดร.พีรฤดี ยุทธโกวิท เป็นหัวหน้าโครงการ ภาคเอกชน บริษัท ละครหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด หรือ บริษัท เทสลา เพาเวอร์ จำกัด ในเวลาต่อมา โดยคุณศักดา มณีโรจน์ กรรมการผู้จัดการ และผู้จัดทำ เป็นนักศึกษาผู้ช่วยวิจัยในโครงการ ในโอกาสนี้ ขอขอบคุณผู้ร่วมสนับสนุนทุนวิจัยทุกฝ่ายด้วยความซาบซึ้งจริงใจ

งานวิจัยนี้ ประสบผลสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสะดวกจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พีรฤดี ยุทธโกวิท ผู้มีความมุ่งมั่นทุ่มเท ด้านการสอน การวิจัยศึกษาค้นคว้า พัฒนางานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงอย่างต่อเนื่อง ถ่ายทอดประสบการณ์เป็นต้นแบบของผู้ใฝ่รู้ ใฝ่เรียนอย่างแท้จริง ใช้เหตุผลในการเอาชนะต่ออุปสรรคโดยไม่ย่อท้อ ตักเตือน ให้แก่มุมมอง หลากหลายด้านในยามที่ท้อแท้ ประคับประคองสนับสนุนการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ทั้งหมดเหล่านี้จะเป็นต้นฉบับแบบแผนที่ดีให้ดำเนินต่อไป

ขอขอบคุณอาจารย์ รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล รศ.ดร.อนันต์วัฒน์ คุณากร รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนมา ด้วยความปรารถนาดี ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาบรรลุเป้าหมาย

ขอขอบคุณ ดร.บุญยวีร์ ฉายศิริ ดร.ปิยะพล ถือทอง ดร.บุษยพล เพาพาน ดร.นวคุณ ไตรรัตน์ภักษ์ และคุณวัชรา พงศ์สถิต มิตรสหายร่วมประสบการณ์ชีวิตผู้มีน้ำใจมิตรต่อกัน พี่เพื่อน น้องร่วมสังคมวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทั้งที่รู้และไม่รู้ ทั้งที่เห็นและไม่เห็น บุคลากรผู้ส่งสมความรู้ ประสบการณ์ผ่านกาลเวลา และถ่ายทอดเป็นแนวทางแบบอย่างที่ดีสืบต่อกันมาเพื่อประโยชน์ในงานไฟฟ้าแรงสูงรวมถึงงานวิจัยนี้ด้วย นอกจากนี้ขอขอบคุณกำลังใจจากเพื่อนสนิททุกท่าน และความช่วยเหลือสนับสนุนเอื้อเฟื้อเกื้อกูลด้วยดีเสมอมา เป็นผลให้ประสบความสำเร็จครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ที่ซึ่งเห็นความสำคัญของการศึกษาพร้อมเสียสละส่วนตนเพื่อการศึกษาอย่างเต็มที่ เป็นแรงผลักดันสำคัญ ในการดำเนินชีวิตครองตนในครรลองครองธรรมเพื่อความเจริญก้าวหน้ายิ่งขึ้นไป คุณงามความดี อันใดที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้ ขออุทิศเป็นกุศลบุญแก่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ผู้จัดทำสำนึกระลึกถึง คุณงามความดีที่ได้รับมาและกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

บัญญัติ ลีลาจริยกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	4
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน.....	7
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	9
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	14
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 วงจรแปลงผันความถี่กำลังไฟฟ้า (Power frequency converter)[16]	18
2.1.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบ 3 เฟส (Three-phase full-wave bridge rectifier circuit).....	19
2.1.2 วงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H-bridge (H-bridge inverter).....	20
2.1.3 วงจรป้องกันแรงดันไฟกระชากแบบ RC (RC snubber)	21
2.1.4 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมมุมนำกระแส (Control circuit).....	21
2.2 วงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์แบบ RLC	22
2.3 สัญญาณควบคุมมุมนำกระแส	24
2.3.1 ควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave).....	25
2.3.2 สัญญาณควบคุมรูปแบบปรับปรุ้งความกว้างพัลส์ Unipolar PWM[15].....	26
2.4 วิธีพรนีปรับปรุ้ง (Improved Prony method)[17].....	27
2.5 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD)[20].....	28
2.5.1 ประเภทของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	29
2.5.2 วงจรสมมูลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3 การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ..	33
บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบการทดสอบ	38
3.1 การวิเคราะห์วงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง 45	
3.1.1 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน	46
3.1.2 การวิเคราะห์วงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์	48
3.1.3 ตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ.....	51
3.1.4 วิเคราะห์สัญญาณควบคุมมุนำกระแส	53
3.2 การหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์อย่าง แม่นยำด้วยวิธีโพรมีปรับปรุง	56
3.3 การวิเคราะห์ผลการหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบตรวจจับ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ด้วยวิธีการโพรมีปรับปรุง	61
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	67
4.1 การทดสอบสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์.....	69
4.1.1 ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมด้วย สัญญาณรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ที่สภาวะทางวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ (Resonance)	70
4.1.2 ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมด้วย เทคนิคปรับปรุงความกว้างพัลส์ Unipolar PWM[15]	73
4.2 การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมีอวัตต์แรงดัน.....	76
4.3 การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลกำลัง.....	81
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....	83
5.1 สรุปผลงานวิจัย	83
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	89
เอกสารอ้างอิง	91
ภาคผนวก.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	147

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เจ็อนไขการทำงานของวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge	20
3.1 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้.....	63
4.1 ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์	80



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	ผังการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ แบบดั้งเดิม	4
1.2	ผังการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ รูปแบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้	5
1.3	วงจรสมมูลอนุกรมของ RLC ที่จะใช้วิเคราะห์หาสถานะเรโซแนนซ์	6
2.1	วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบ 3 เฟส	19
2.2	วงจรสมมูลของวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge	20
2.3	อุปกรณ์สวิตชิง IGBTs รหัส IXNN110N65B4H1 ที่เลือกใช้[16]	21
2.4	วงจรป้องกันแรงดันไฟกระชากแบบ RC	21
2.5	วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมมุมนำกระแส และวงจรขับเคลื่อน (Control circuit)	22
2.6	แนวคิดและหลักการของการเกิดเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้า	22
2.7	วงจรไฟฟ้าอนุกรมของ RLC ที่สภาวะเรโซแนนซ์	23
2.8	สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส 4 สัญญาณ	26
2.9	การปรับปรุงความกว้างพัลส์ ระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์และรูปคลื่นสามเหลี่ยม[15]	27
2.10	การเกิดโคโรนาดิสชาร์จ	30
2.11	การเกิดดิสชาร์จตามผิว	31
2.12	การเกิดดิสชาร์จภายใน	31
2.13	การเกิดกระแสพัลส์ในการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	32
2.14	แรงดันที่ตกคร่อมฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงและกระแสพัลส์ของ การเกิดดิสชาร์จบางส่วน	33
2.15	รูปคลื่นกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	33
2.16	วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่อิมพีแดนซ์วัด Z_m ต่ออนุกรมกับ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k)	34
2.17	วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่อิมพีแดนซ์วัด Z_m ต่ออนุกรมกับ วัตถุทดสอบ (C_o)	34
2.18	วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบวงจรบริดจ์สมดุลระหว่างจุดอ้างอิง (C_{a2}, Z_{m2}) ขนานกับจุดทดสอบ (C_{a1}, Z_{m1})	34
2.19	วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มีการแยกขั้วสัญญาณ	35
2.20	การป้อนแรงดันสูงทดสอบสำหรับหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน	36
2.21	การป้อนแรงดันสูงทดสอบสำหรับสายเคเบิลกำลัง	37
3.1	วงจรหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงปรับความถี่ได้	39
3.2	วงจรภายในเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้ DC-link เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	
ผังการต่อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคนิคควบคุมแบบ Unipolar PWM ในระบบตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง.....	45
3.4	
ผังการต่อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคนิคควบคุมแบบ เรโซแนนซ์ ในระบบตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง.....	46
3.5	
วงจรสมมูลภายในอุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device; CD)	47
3.6	
อิมพีแดนซ์ถ่ายโอนในวัฏจักรความถี่ของอิมพีแดนซ์ตัว 48	
3.7	
วงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบที่ถ่ายโอนอิมพีแดนซ์มายังภาคแรงสูง	49
3.8	
วงจรสมมูลแบบง่ายของระบบทดสอบในรูปแบบวงจรอนุกรมของ RLC.....	49
3.9	
ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ ที่พัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะ.....	53
3.10	
ผลการจำลองป้อนสัญญาณ Unipolar PWM ขณะไม่ติดตั้งวงจรรองความถี่เพิ่มเติม (Without additional filter circuit)[15]	55
3.11	
ผลการจำลองป้อนสัญญาณ Unipolar PWM และป้อนพัลส์ดิซชาร์จบางส่วน (PD pulse) ขณะติดตั้งวงจรรองความถี่เพิ่มเติม (With additional filter circuit)[15].....	55
3.12	
แรงดันสูงทดสอบ 5 kV ควบคุมวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (H-bridge inverter) ด้วยสัญญาณจัตุรัส.....	57
3.13	
ผลรวมรูปคลื่นที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลการปรับเทียบรูปคลื่น	58
3.14	
ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าทางเวลาของวงจรทดสอบด้วยรูปคลื่นจัตุรัสในช่วงเวลาที่สนใจ เปรียบเทียบผลระหว่างที่ได้จากการคำนวณกับการทดสอบจริง	61
3.15	
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันจากฟังก์ชันถ่ายโอนกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ	62
3.16	
ขนาดแอมพลิจูดสูงสุดของฟังก์ชันถ่ายโอนในวัฏจักรความถี่ ที่การตั้งค่าวงจรรอง และปรับแต่งเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ในวงจรสร้างแรงดันสูงทดสอบ	63
3.17	
ตัวประกอบลดทอนแรงดันที่ช่องสัญญาณวัดการเกิดดิซชาร์จบางส่วนของวงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบ	65
3.18	
แรงดันป้อนเข้ารูปคลื่นจัตุรัสและแรงดันจ่ายออกรูปคลื่นไซน์ ของหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง ที่สภาวะเรโซแนนซ์ของวงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบ (ถูกถ่ายโอนทุกองค์ประกอบมายังภาคแรงสูง)	65
3.19	
ผลตอบสนองของแรงดันที่ช่องสัญญาณวัดดิซชาร์จบางส่วน (PD port) ด้วยการป้อนประจุดิซชาร์จขนาด 1 pC จากเครื่องมือปรับเทียบกระแสพัลส์และสัญญาณรบกวน ในวงจรเรโซแนนซ์ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม ที่ระดับแรงดันสูง 100 kV.....	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 พื้นที่ทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง	68
4.2 ระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) 0.803 pC ขณะไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้า.....	68
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้จริงในส่วนวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าและวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์..	69
4.4 อุปกรณ์ที่ใช้จริงในส่วนวงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน.....	70
4.5 CH1 สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) CH2 สัญญาณจ่ายออกจากวงจร แปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H – bridge โดยไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (without C _{add}) ในวงจรกรอง และปรับแต่งเรโซแนนซ์	71
4.6 แรงดันสูงทดสอบที่สภาวะเรโซแนนซ์ในวงจรทดสอบ โดยไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (without C _{add}) และใช้ตัวกรองแถบกว้างความถี่ผ่านดิจิทัล	71
4.7 CH1 สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) CH2 สัญญาณจ่ายออกจากวงจร แปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H – bridge โดยติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (with C _{add}) ในวงจรกรอง และปรับแต่งเรโซแนนซ์	72
4.8 แรงดันสูงทดสอบที่สภาวะเรโซแนนซ์ในวงจรทดสอบ โดยติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม 1 uF (with C _{add} = 1 uF) และใช้ตัวกรองแถบกว้างความถี่ผ่านดิจิทัล	73
4.9 แรงดันสูงทดสอบควบคุมด้วยเทคนิค Unipolar PWM โดยไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (without C _{add}) ที่ระดับแรงดันสูง 14 kV สัญญาณรบกวนพื้นหลัง 162.4 pC[15].....	74
4.10 แรงดันสูงทดสอบควบคุมด้วยเทคนิค Unipolar PWM โดยติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (with C _{add}) 1 uF ที่ระดับแรงดันสูง 40 kV สัญญาณรบกวนพื้นหลัง 18.08 pC[15].....	74
4.11 แรงดันสูงทดสอบควบคุมด้วยเทคนิค Unipolar PWM โดยติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (with C _{add}) 16 uF ที่ระดับแรงดันสูง 40 kV สัญญาณรบกวนพื้นหลัง 2.055 pC[15]	75
4.12 การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันพิกัด 24 kV ..	77
4.13 ผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน ที่ระดับแรงดัน 28.8 kV ที่สภาวะเรโซแนนซ์ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส.....	78
4.14 ผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน ที่ระดับแรงดัน 28.8 kV ด้วยวงจรกรองความถี่ที่เหมาะสม สัญญาณควบคุม รูปแบบ Unipolar PWM[15].....	79
4.15 ผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลกำลัง ที่ระดับแรงดัน 20.8 kV ที่สภาวะเรโซแนนซ์ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส.....	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตมาสู่ผู้ใช้ไฟ ประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้ามากมาย เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ลูกถ้วยฉนวน (Insulator) อุปกรณ์จำกัดแรงดันเกิน (Arrester) อุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Circuit Breaker) สายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ดีจะต้องสร้างความมั่นคงและเสถียรภาพแก่ระบบไฟฟ้าโดยรวม ในประเทศไทยมีการวางโครงข่ายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังผู้ใช้ด้วยระบบไฟฟ้าแรงดันสูง ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านพื้นที่ห่างไกลยากต่อการบำรุงรักษามาสู่พื้นที่ชุมชนเมืองหรือพื้นที่ที่มีความหนาแน่นสูง ด้วยเหตุนี้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำมาใช้จำเป็นต้องมีความเข้ากันได้ (Compatibility) เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย เพื่อสนองความต้องการใช้ไฟฟ้า ดังนั้นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์และความปลอดภัยแก่สิ่งแวดล้อมรอบๆ สายส่ง ผู้ใช้ไฟ และผู้ปฏิบัติงานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์เป็นต้นว่า การออกแบบดี การเลือกวัสดุที่ดี การผลิตดี การทดสอบก่อนนำไปใช้ดี การขนส่งและติดตั้งดี ออกแบบระบบและติดตั้งอุปกรณ์ได้เหมาะสม การตรวจสอบบำรุงรักษาดี ปัจจัยเหล่านี้ประกอบกันจะทำให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความมั่นคงและเสถียรภาพสูง ดังนั้นในการควบคุมปัจจัยการผลิตถือเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรยึดถือปฏิบัติเป็นประจำอีกนัยหนึ่งคือ การเพิ่มมูลค่าเพิ่มให้แก่ผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในประเทศไทยเติบโตขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ด้วยความต้องการใช้พลังงานโดยรวมของประเทศ ความก้าวหน้าทางการศึกษา ความพร้อมของบุคลากรในประเทศ วัสดุดิบตลอดจนแรงงานในภาคอุตสาหกรรม เพื่อความยั่งยืนของอุตสาหกรรมนี้ การควบคุมมาตรฐานผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการควบคุมต้นทุนในการผลิต ทางหนึ่งที่จะทำได้ทันทีและให้ผลลัพธ์ควบคู่กันไป คือการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยการทดสอบผลิตภัณฑ์ทุกชิ้น (Routine Test) ก่อนส่งจำหน่าย การทดสอบเฉพาะแบบ (Type Test) การทดสอบพิเศษ (Special Test) เป็นต้น ในการทดสอบเหล่านี้จำเป็นต้องทำภายใต้มาตรฐานสากลเพื่อเป็นที่ยอมรับร่วมกัน และเปิดโอกาสช่องทางในการส่งจำหน่ายสู่ประเทศเพื่อนบ้าน เช่นการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60076 [1] การทดสอบลูกถ้วยฉนวนตามมาตรฐาน ANSI C29.1 [2] การทดสอบกับดักแรงดันเกินตามมาตรฐาน IEC 60099-4 [3] การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 [4] เป็นต้น

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในภาคอุตสาหกรรมถือเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการผลิตของผู้ประกอบการที่จะต้องกระทำให้ได้ตามมาตรฐาน IEC 60060 [5] เริ่มต้นจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่ทดสอบในโรงงาน (Testing Area) เครื่องมือสร้างแรงดันสูงทดสอบ (High-voltage Generator) ระบบวัดและเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้อง (Instrument and Measurement) ระบบการจัดการข้อมูลผลการทดสอบ (Data Logger) รวมทั้งขั้นตอนการปฏิบัติงานทดสอบ (Procedure) ถือเป็นต้นทุนในระดับสูงมากสำหรับผู้ประกอบการขนาดกลาง ขนาดเล็กในประเทศไทยหากต้องลงทุนซื้อเครื่องมือจากผู้ผลิตที่มีชื่อเสียงในต่างประเทศ การใช้งานวิจัยองค์ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านไฟฟ้าแรงสูงจึงเข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งในการพัฒนาห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง (High-voltage Testing Room) ในภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้ประโยชน์จะเกิดขึ้นกับการควบคุมต้นทุนการผลิต รวมถึงการเพิ่มมูลค่าเพิ่มแก่ผลิตภัณฑ์ และเพิ่มโอกาสทางการแข่งขันในต่างประเทศด้วย

ทราบกันดีว่า การทดสอบไฟฟ้าแรงสูงมักจะประกอบด้วยเครื่องมือทดสอบขนาดใหญ่ มีน้ำหนักมาก และราคาสูง เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีอุปสรรคในการจัดเตรียมพื้นที่ และฐานรากสำหรับติดตั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงทดสอบของโรงงานหรือไม่ยืดหยุ่นต่อการขนส่งไปทดสอบภาคสนาม (On-site Test) นอกจากขนาดและน้ำหนักจะเป็นปัจจัยแล้ว พิกัดแรงดัน พิกัดกำลังของแหล่งจ่ายไฟฟ้ายังมีผลต่อราคาต่อหน่วยอย่างยิ่ง กล่าวคือยิ่งพิกัดสูงขึ้นจะมีราคาสูงขึ้นเป็นฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลเพิ่ม ด้านเครื่องมือวัดภาคแรงสูงที่ดี ได้แก่ ตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ร่วมกับเครื่องมือวัดภาคแรงต่ำ เช่น ดิจิตอลอสซิลโลสโคป ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า (Current Meter) เครื่องมือวัดความถี่ไฟฟ้า (Frequency Meter) จะต้องมีความถูกต้องในการวัด (Accuracy) มีความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty) มีการตอบสนองย่านการวัด (Bandwidth) ที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานการทดสอบซึ่งเป็นที่น่าพอใจด้วย ทั้งนี้เมื่อใช้งานนานไปยังจำเป็นต้องทำการปรับเทียบ (Calibration) ตรงตามเวลาที่กำหนด นำมาซึ่งรายจ่ายของผู้ประกอบการทั้งสิ้น

การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics Technology) มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทั้งทางด้านพิกัดแรงดัน พิกัดกำลัง และเทคนิคการออกแบบและควบคุมอุปกรณ์สวิตชิง (Switching Devices) เช่น Power Diodes, MOSFETs, IGBTs เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างหลากหลายเช่น ด้านการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า (Motor Drive) ด้านการแปลงผันไฟฟ้า (Converter) ตลอดจนการควบคุมเสถียรภาพ (Stability Control) ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) และสำรองไฟฟ้า (Uninterrupting Power Supply) ให้แก่อุปกรณ์คอมพิวเตอร์และการสื่อสารผ่านโครงข่ายแบบสายและไร้สาย (wired and Wireless Communication) ส่วนนี้อาจหมายรวมถึงการป้องกันอันตรายจากแรงดันเกิน (overvoltage) ในระบบเนื่องจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า (Lightning Strike) ลงเสอากาศ ในขณะที่การพัฒนาด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังรุ่นหน้าอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงขึ้นตามมาด้วย เป็นเหตุให้ราคาต่ำลงสวนทางกับประสิทธิภาพอย่างสิ้นเชิง ด้วยความได้เปรียบเชิงพาณิชย์ทำให้ทีมวิจัยเล็งเห็นโอกาสที่มีความเป็นไปได้ จึงมีความมุ่งมั่นตั้งใจจะนำอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีประสิทธิภาพสูงและมีคุณสมบัติเหมาะสมมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เพื่อลดต้นทุน ลดการนำเข้าเครื่องมือทดสอบจากต่างประเทศ ใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าเช่น เวลา แรงงาน เชื้อเพลิง ทรัพยากรบุคคลให้แก่ภาคอุตสาหกรรมการผลิต อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอีกนัยหนึ่งของสิ่งเหล่านี้คือการดูแลต้นทุนการผลิตให้ต่ำลงนั่นเอง

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงประเภทหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย (Distribution Transformer) อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60076 [1] ทั้งการทดสอบประจำ (Routine Test) การทดสอบเฉพาะ (Type Test) การทดสอบพิเศษ (Special Test) ส่วนหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage Transformer; VT) มีใช้อยู่ในโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) การไฟฟ้านครหลวง (MEA) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) อ้างอิงการทดสอบเพิ่มเติมตามมาตรฐาน IEC 61869-3 [6] การทดสอบต่างๆ ตามมาตรฐานข้างต้นและการนำไปใช้งานจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Source or Voltage Source) และเครื่องมือวัดและบันทึกผลการวัด (Instrument and Data Logger) จากประสบการณ์ของทีมีวิจัยมักจะประสบปัญหาในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยข้อจำกัดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเสมอเช่น จะต้องมีชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz และ 200 Hz สำหรับทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่หลักมูล (Withstand Test) และความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ (Induce Voltage Test) ตามลำดับ เพื่อทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และอาจมีการทดสอบเพิ่มเติมในหัวข้อการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่ปราศจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระบบสร้างสัญญาณแรงดันสูงทดสอบ (Accepted Background Noise) หากทำการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องมือวัดแรงดัน (VT) ซึ่งต้องมีการเพิ่มแรงดันสูงทดสอบถึงระดับแรงดันกระตุ้นเริ่มต้น (Pre-Stress) ก่อนลดระดับแรงดันลงมาสู่ระดับแรงดันบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD recorded level) ในการทดสอบตามมาตรฐานนี้ จะต้องใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่าความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) อย่างน้อย 2 เท่า สำหรับการเพิ่มระดับแรงดันเกินกว่าปกติของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันนั้นๆ เช่น 100 Hz 150 Hz 200 Hz เป็นต้น จากตัวอย่างข้างต้นจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอย่างน้อย 4 ชุดด้วยกัน ถือว่าเป็นอุปสรรคอย่างยิ่งในการทำการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาเทคนิควิธีการสร้าง การควบคุม และใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สร้างแรงดันสูงกระแสสลับสำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง สามารถปรับความถี่ไฟฟ้าได้ โดยใช้วงจรแปลงผันความถี่กำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) เฟสเดียวแบบ H-bridge ร่วมกับวงจรป้องกันไฟกระชาก (Snubber) ต่อกับวงจรกรอง (Filter circuit) จ่าย

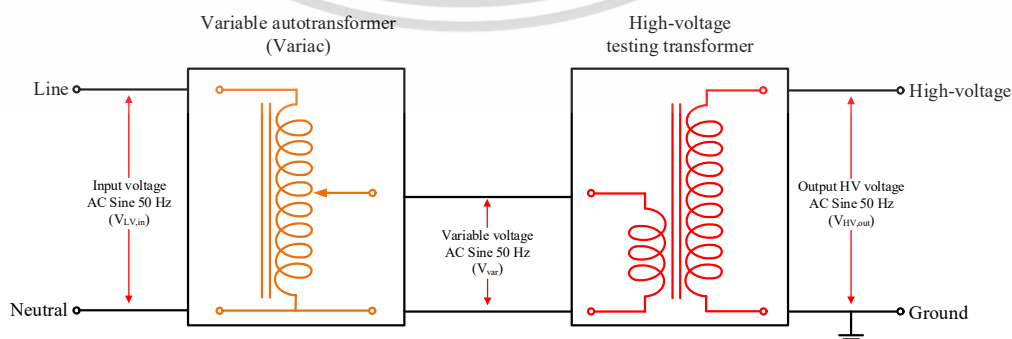
กำลังไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงทดสอบแรงสูง พิกัดกำลังปรากฏ 40 kVA พิกัดแรงดัน 75 kV โดยควบคุม มุมนำกระแสของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Switching devices) ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานของการศึกษาเทคนิควิธีการสร้าง การควบคุม และใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง คือ หากควบคุมวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำด้านจ่าย ออกจากวงจรแปลงผันความถี่กำลังไฟฟ้าร่วมกับวงจรปรับแต่งเรโซแนนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap variable inductor) โดยหาค่าความ เหนี่ยวนำไฟฟ้าอย่างแม่นยำด้วยวิธีพรีนีย์แบบปรับปรุง (Improved Prony method) จะได้ สัญญาณไฟฟ้าที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการ จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบแรงสูงย่อมต้องได้ แรงดันสูงทดสอบที่มีคุณภาพเหมาะสมกับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง และไม่ก่อให้เกิดปัญหาสัญญาณ รบกวนพื้นหลังจากการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอ ในการทดสอบตรวจจับการเกิด ดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

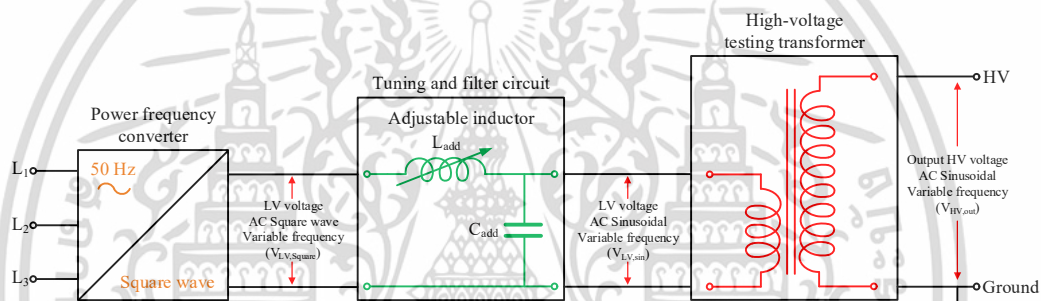
วงจรสร้างแรงดันสูงสำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไป ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า แรงดันต่ำ (Low-Voltage sources) ความถี่ 50 Hz ปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ (Variable autotransformers; Variac) จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบแรงสูง (High-voltage testing transformers) ดังรูปที่ 1.1 พบว่ามักประสบกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้าของแหล่งจ่าย ไฟฟ้าแรงดันต่ำและคุณสมบัติการอิมิตตัวของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เสมอ ทำให้ สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์มีการผิดเพี้ยนไปเกินกว่าที่มาตรฐานยอมรับและมีสัญญาณรบกวน พื้นหลังจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าในการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงทั้งภายในและภายนอกห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงนับเป็นอุปสรรคที่ยากต่อการควบคุมและแก้ไขอย่างยิ่ง



รูปที่ 1.1 ผังการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ แบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

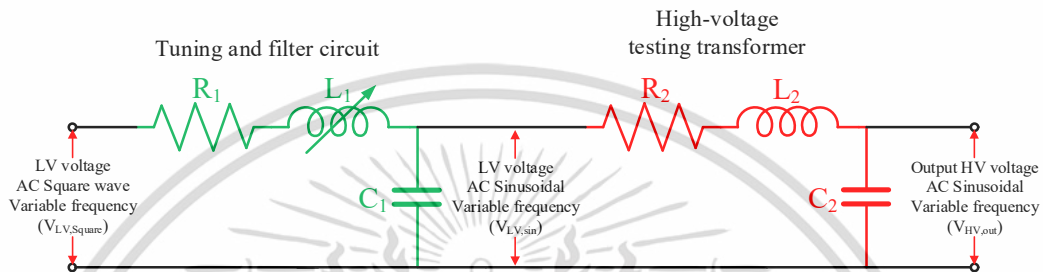
หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงมีความน่าสนใจอย่างยิ่งที่จะถูกนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทดแทนแบบดั้งเดิม ด้วยการนำมาประกอบสร้างในลักษณะวงจรเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ H bridge converter แบบ 1 เฟส โดยมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เป็นแหล่งพลังงาน ดังรูปที่ 1.2 และจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง ย่อมต้องทำหน้าที่สร้างแรงดันสูงสำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงได้ไม่ต่างจากวิธีการดั้งเดิม หากมีการจัดองค์ประกอบวงจรทดสอบได้อย่างเหมาะสมและควบคุมมุนำกระแสของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Switching device) ได้ ย่อมต้องสร้างแรงดันสูงทดสอบที่สามารถปรับความถี่ได้อย่างไรก็ดีเป็นที่ทราบกันดีว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามักจะสร้างปัญหาที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกแก่ระบบไฟฟ้าได้ในปริมาณสูงเช่นกัน อีกทั้งยังมีปัญหาเกี่ยวกับการผิย่นรวมของรูปคลื่นกระแส และแรงดัน ที่จะต้องพิจารณาาร่วมกันด้วย



รูปที่ 1.2 ผังการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ รูปแบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

วงจรสมมูลของวงจรสร้างแรงดันสูงประกอบด้วยองค์ประกอบของวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าสองชั้นต่อกันดังรูปที่ 1.3 พบว่าจากทฤษฎีวงจรไฟฟ้า หากสามารถปรับค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรสมมูลตัวใดตัวหนึ่งได้ย่อมสามารถจัดสถานะของวงจรสมมูลให้อยู่ในสถานะของวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุ (RLC Resonance circuits) ได้ ที่สถานะเรโซแนนซ์ในวงจรตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ จะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ค่าหนึ่งซึ่งเมื่อพิจารณาวงจรของเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า 1 เฟส แบบ H – bridge (H -bridge inverter) พบว่า สัญญาณจ่ายออกจะมีความสัมพันธ์กับสัญญาณควบคุมมุนำกระแสของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรเสมอ (Switching devices) เทคนิควิธีการควบคุมมุนำกระแสโดยทั่วไปมักอยู่ในรูปแบบการควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์ (Pulse) หรือ พัลส์แบบปรับปรุ้ง (Pulse width modulation; PWM) ดังนั้น สัญญาณจ่ายออกจากวงจรแปลงผันความถี่กำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) จำเป็นต้องมีวงจรกรองที่เหมาะสมควบคู่กันเสมอ จึงจะได้สัญญาณแรงดันจ่ายออกรูปคลื่นไซน์ความถี่ที่ต้องการ ในส่วนนี้พบว่าสามารถสร้างแรงดันจ่ายออกจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่สามารถควบคุมความถี่ของสัญญาณได้ ดังที่กล่าวมาแล้วว่าเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าจะต้องมีวงจรกรองที่

เหมาะสมกันเสมอ ดังนั้นหากสร้างวงจรกรองที่สามารถปรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ได้เหมาะสมสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณจ่ายออกจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ย่อมจะต้องได้เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่มีคุณลักษณะตามต้องการได้ ที่ความถี่ต่างๆ กัน เมื่อป้อนสัญญาณที่สร้างจากเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้านี้ ให้กับขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ย่อมต้องได้แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่สอดคล้องกันได้



รูปที่ 1.3 วงจรสมมูลอนุกรมของ RLC ที่จะใช้วิเคราะห์หาสถานะเรโซแนนซ์

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นนี้ จึงมีความเป็นไปได้อย่างยิ่ง ที่จะนำเอาความโดดเด่นของแต่ละส่วนขององค์ประกอบในการสร้างแรงดันสูงทดสอบกระแสลึบริบคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้ โดยการค้นคว้า เทคนิควิธีการทางวงจรไฟฟ้า เทคนิควิธีการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า เทคนิควิธีการหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อค้นคว้าวิจัย จัดหาสถานะที่เหมาะสมในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยการสร้างแรงดันสูงจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตาม การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่แตกต่างกับยอมส่งผลต่อการจัดสถานะวงจรทางไฟฟ้า การควบคุม และเทคนิควิธีการหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบ

จากประสบการณ์ของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และนักศึกษา ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ผ่านมานั้น พบว่า การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง มีการใช้สัญญาณแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่สูงกว่าความถี่หลักมูลของระบบไฟฟ้า เพื่อการกระตุ้นเริ่มต้น (pre-stress) อ่านค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ที่ระดับแรงดันสูงกว่าพิกัดของอุปกรณ์ เพื่อหลีกเลี่ยงการอิมพัลส์ของแกนเหล็กในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของแกนเหล็ก และการทดสอบมีความไวสูง (Sensitivity) มากต่อการเปลี่ยนแปลงในวงจรทดสอบ การเปลี่ยนแปลงในวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า รวมถึงการถูกรบกวนทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศเป็นผลให้เกิดเป็นสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในปริมาณสูง จนบางครั้งไม่สามารถทำการทดสอบต่อไปได้ ขึ้นอยู่กับค่าการยอมรับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบ ด้วยเหตุนี้จึงเลือกการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในการประเมินคุณภาพของ

สัญญาณแรงดันสูงทดสอบที่สร้างได้จากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ และสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบนี้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์

ดังที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น สรุปได้ว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำแนวคิดเชิงประยุกต์ใช้เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า (converter) หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบแรงสูง (High – voltage testing Transformer) ทำงานร่วมกัน ด้วยการควบคุมมุมนำกระแสของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Switching devices) ที่สร้างได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ร่วมกับวงจรขับเคลื่อน (Gate driver circuit) สร้างแรงดันกระแสสลับปรับความถี่ได้ จัดสถานะทางวงจรตามทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์แบบตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ (RLC Resonance circuit) โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ ด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap variable inductor) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งในวงจรกรองและ/หรือปรับแต่งค่าการเรโซแนนซ์ และค้นคว้าวิจัยหาค่าเรโซแนนซ์ปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีพอน์ (Prony method) เรียกใหม่ทั้งหมดรวมกันว่า หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ใช้สำหรับสร้างแรงดันสูงทดสอบกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้ สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง โดยประเมินประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการนำไปสร้างแรงดันสูงทดสอบในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง จะค้นคว้าวิจัยเทคนิควิธีการสร้าง การควบคุม และใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformers; VT) และสายเคเบิลกำลัง (Power cable) ตามมาตรฐาน IEC ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยพิจารณาผลการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในแง่คุณภาพของแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ 200 Hz และ 50 Hz ตามลำดับ ด้วยค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) ค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) และค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise)

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

เริ่มต้นด้วยการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบกับค้นคว้างานวิจัย ทำการรวบรวมข้อมูลความรู้เพื่อปรับปรุง ค้นคว้า หาเทคนิควิธีการทางทฤษฎี และวิธีการควบคุมสมัยใหม่ ในการออกแบบและควบคุมหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้ได้แรงดันสูงทดสอบที่เหมาะสมกับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในหัวข้อการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยจะทำการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน และสายเคเบิลกำลัง ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เพื่อยืนยันผลการออกแบบและควบคุมหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้นำเสนอใช้ในการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงในวิทยานิพนธ์นี้ โดยจะพิจารณาจากผลการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน ทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับความถี่ 200 Hz และสายเคเบิลกำลัง ทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับความถี่ 50 Hz ในแง่คุณภาพของแรงดันสูงทดสอบด้วยค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) ค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) และพิจารณาประสิทธิภาพของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยค่าระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ขณะทดสอบโดยปราศจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ที่รับการทดสอบดังกล่าว

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เรียบเรียงเนื้อหาสาระตามลำดับความสำคัญเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และประโยชน์ที่ได้คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่ ทฤษฎีวงจรแปลงผันความถี่กำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) ซึ่งทำหน้าที่แปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz ทั่วไป ด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงส่งพลังงานให้แก่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเฟสเดียวรูปแบบ H-bridge (H – bridge inverter) ควบคุมมุมนำกระแสของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Switching device) ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรขับเกท (Gate driver) พร้อมด้วยวงจรป้องกันไฟกระชากแบบตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ (RC snubber) ที่เหมาะสม ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าผ่านวงจรรองและ/หรือปรับแต่งแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ ด้วยเทคนิควิธีการทางวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์อนุกรมของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ (Series RLC Resonance circuits) จ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับปรับความถี่ได้ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบแรงสูง (High – voltage testing transformer) เพื่อสร้างแรงดันสูงทดสอบกระแสสลับในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge detection) ซึ่งกล่าวถึงทฤษฎีการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ประเภทการเกิดดิสชาร์จบางส่วน วงจรทดสอบตามมาตรฐานและวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันและสายเคเบิลกำลัง ทั้งนี้ในแต่ละการทดสอบจะมีค่าการปรับแต่งเรโซแนนซ์ที่แตกต่างกันจึงจะกล่าวถึงการหาค่าปรับแต่งวงจรเรโซแนนซ์ด้วยทฤษฎีวิธีพอนี่ (Prony method) พอสังเขปในบทนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ด้วยเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ประกอบสร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ด้วยเทคนิควิธีการทางวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์จากองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรทดสอบซึ่งประกอบด้วยส่วนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าพร้อมด้วยวงจรปรับแต่งเรโซแนนซ์ ด้วยตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ วงจรสมมูลหม้อแปลงทดสอบและวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ทั้งนี้จะใช้

วิธีการเทคนิคหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าอย่างแม่นยำด้วยวิธีการของโพรนี้ปรับปรุง (Improved Prony Method) นำเสนอในบทนี้ร่วมกับการสร้างสัญญาณควบคุมมมุนำกระแสไฟฟ้าป้อนให้กับ IGBTs ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการควบคุมมมุนำกระแสไฟฟ้าของ IGBTs แบบ PWM ที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยมาก่อนนี้ ซึ่งนำมาแสดงไว้ในบทที่ 2 อีกครั้ง

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบ โดยใช้เทคนิคทางวงจรไฟฟ้าแบบเรโซแนนซ์ ปรับค่าการปรับแต่งเรโซแนนซ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยการปรับช่องว่างอากาศ วิธีการควบคุมการสร้างแรงดันสูงจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงที่ได้นำเสนอขึ้นใหม่ในวิทยานิพนธ์นี้ มาใช้ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน และสายเคเบิลกำลัง ตามมาตรฐาน IEC61869-3 [6], IEC60502-2 [7] เปรียบเทียบผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันสูงกระแสสลับที่สร้างจากเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าควบคุมแบบ PWM พิจารณาคุณลักษณะแรงดันสูงทดสอบกระแสสลับในแง่ของคุณภาพแรงดันที่สร้างได้และระดับสัญญาณรบกวนในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน คุณภาพแรงดันพิจารณาค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD,) และค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV)

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยประกอบด้วย การสรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์ ดังนี้

ในปี 2015 บทความวิชาการเรื่อง “PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter” [8] เขียนโดย B. Leelachariyakul, P. Yutthagowith, and S. Potivejkul ได้นำเสนอระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันด้วยเครื่องแปลงความถี่ปรับค่าได้ พบว่า แรงดันสูงทดสอบที่ได้จากเครื่องแปลงความถี่ในบทความนี้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับ แต่ประสบกับปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนพื้นหลัง จึงมีการออกแบบและประกอบสร้างตัวกรองความถี่ด้านแรงดันต่ำ ที่มีความถี่ตัด 700 Hz เพื่อกรองสัญญาณรบกวนพื้นหลังปริมาณสูงจากเครื่องแปลงความถี่ปรับค่าได้ ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน ผลการทดสอบร่วมกับวงจรกรองความถี่ดังกล่าวพบว่า ตัวกรองความถี่ที่พัฒนาขึ้นในบทความวิชาการนี้สามารถกรองสัญญาณรบกวนได้จนสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในระดับประมาณ 3 pC เพียงพอต่อการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน ที่ยอมรับระดับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ 5 pC

ในปี 2017 บทความวิชาการเรื่อง “Multilevel Frequency Converters and Noise Reduction for Partial Discharge Tests” [9] เขียนโดย Phattarin Kitcharoen, Anantawat Kunakorn, Peerawut Yutthagowith และ Worrakan Limcharoen ได้นำเสนอ เครื่องแปลงผันความถี่แบบหลายระดับและการลดสัญญาณรบกวนในการทดสอบตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน โดยนำเสนอเครื่องแปลงผันความถี่รูปคลื่นจัตุรัสแบบ 2 ระดับ และ เครื่องแปลงผันความถี่รูปคลื่นจัตุรัสแบบ 5 ระดับ ในการสร้างแรงดันสูงทดสอบ ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 3 รูปแบบได้แก่ รูปแบบตัวเหนี่ยวนำ (L filter) ต่ออนุกรมกับวงจรทดสอบ รูปแบบตัวเก็บประจุ (C filter) ต่อขนานกับวงจรทดสอบ และ รูปแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุ (LC filter) ในการกรองสัญญาณรบกวนจากเครื่องแปลงผันความถี่ทั้งสองแบบ พบว่าเครื่องแปลงผันความถี่ไฟฟ้าทั้งสองแบบร่วมกับวงจรกรองทั้งสามแบบ แต่ละวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถสร้างแรงดันสูงทดสอบที่มีค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดันต่ำกว่า 5 % เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน แต่มีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านรูปแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุ (LC filter) แบบเดียวกันนั้นซึ่งมีความถี่ตัด 1 kHz ร่วมกับวงจรแปลงผันความถี่ทั้งสองแบบ ที่มีค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังต่ำกว่า 2 pC เป็นที่ยอมรับในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

ในปี 2018 บทความวิชาการเรื่อง “Development of A Partial Discharge Testing System for Potential Transformers” [10] เขียนโดย T. Prombud, P. Kitcharoen, and P. Yutthagowith ได้นำเสนอ ระบบการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน โดยใช้เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้เทคนิคควบคุมมุนำกระแสของ H bridge IGBTs สามแบบได้แก่ รูปคลื่นจัตุรัส (square wave) รูปคลื่นกึ่งจัตุรัส (quasi-square wave) ที่มุนำกระแส 30 210 องศา และมุนำกระแส 150 330 องศา และรูปคลื่นปรับปรุงความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation; PWM) ที่มีความถี่สวิตช์ (switch frequency; f_s) 2 kHz ทดสอบระบบสร้างแรงดันสูงกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่ระดับแรงดัน 20 kV เปรียบเทียบระหว่างไม่มีวงจรกรองและมียังวงจรกรอง พบว่า เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้เทคนิค PWM ควบคุมมุนำกระแสของ H bridge IGBTs ร่วมกับวงจรกรองเท่านั้น ที่สร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ 200 Hz มีค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน 3 % เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน ส่วนค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Q_{IEC}) ของทุกการสร้างแรงดันสูงมีค่าต่ำกว่า 5 pC เมื่อนำระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้ไปทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน พบว่าที่ระดับบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน 14.4 kV แรงดันสูงทดสอบมีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานยอมรับ และมีสัญญาณรบกวนพื้นหลังต่ำกว่า 2.5 pC เพียงพอในการทดสอบนี้

ในปี 2018 บทความวิชาการเรื่อง “A Partial Discharge Testing System Based on A 5-Level Converter with Different Control Signals” [11] เขียนโดย N. Yomkaew, N. Marukat, and P. Yutthagowith ได้นำเสนอ ระบบทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยเครื่องแปลงผันแบบ 5 ระดับควบคุมด้วยสัญญาณที่แตกต่างกัน 3 แบบได้แก่ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส 5 ระดับ (5-level square wave) สัญญาณควบคุมรูปคลื่นกึ่งจัตุรัส 5 ระดับ (5-level quasi-square wave) และสัญญาณควบคุมรูปคลื่นปรับปรุงความกว้างพัลส์ไซน์ 5 ระดับ (5-level sinusoidal pulse width modulation; SPWM) ที่ดัชนีการปรับปรุง (m_a) เท่ากับ 1.0 และความถี่คลื่นพาห์ (carrier frequency) 1.2 kHz ทำงานร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุ (LC low pass filter) ที่มีความถี่ตัด 1 kHz ทดสอบระบบสร้างแรงดันสูงกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่ระดับแรงดัน 40 kV เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณควบคุมทั้งสามแบบ พบว่าทุกชนิดสัญญาณควบคุมเครื่องแปลงผันแบบ 5 ระดับร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนี้ สร้างแรงดันสูงทดสอบที่มีค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 5 % ตามที่มาตรฐานยอมรับ ค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Q_{IEC}) ต่ำกว่า 2.5 pC จากนั้น นำเครื่องแปลงผันแบบ 5 ระดับที่ใช้สัญญาณควบคุมแบบ SPWM ที่มีข้อโดดเด่นด้านคุณภาพของแรงดันสูงทดสอบ ที่มีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 2 % และค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังต่ำกว่า 2.5 pC ไปทำการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมี้อัดแรงดัน พบว่าที่ระดับแรงดันบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน 30 kV คุณภาพของแรงดันสูงทดสอบและสัญญาณรบกวนพื้นหลังขณะทดสอบ อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานยอมรับ ในบทความนี้ยังแนะนำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับความถี่ของคลื่นพาห์ (Carrier frequency) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสร้างแรงดันสูงอีกด้วย

ในปี 2018 บทความวิชาการเรื่อง “Development of A Low-Pass Filter for Partial Discharge Testing System with the Power Frequency Converter” [12] เขียนโดย T. Prombud, P. Kitcharoen, and P. Yutthagowith ได้นำเสนอ การพัฒนาวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับระบบทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่นำเสนออยู่ในรูปแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุ (LC low pass filter) ที่มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า 4.4 mH คงที่ ศึกษาเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้า 1 μ F และ 16 μ F พิจารณาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรกรองและวงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบและตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว จะได้ความถี่ตัดของระบบสร้างแรงดันสูงกระแสสลับนี้ 800 Hz และ 2650 Hz ตามลำดับ ใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนี้ ร่วมกับเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ unipolar carrier-based PWM ที่มีดัชนีการปรับปรุง (m_a) 1.0 ความถี่สวิตช์ (switch frequency; f_s) 10 kHz ทดสอบระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบที่ระดับแรงดันสูง 30 และ 40 kV ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านทั้งสองแบบพบว่า แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ 200 Hz มีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่า

ความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 2 % ค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่ความถี่ตัดของระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบ 800 Hz มีค่าต่ำกว่า 2.5 pC แต่ค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่ความถี่ตัดของระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบ 2650 Hz มีค่าเกินกว่า 2.5 pC นำระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ศึกษาในบทความนี้ซึ่งทำให้ระบบสร้างแรงดันสูงมีความถี่ตัด 800 Hz ไปทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมีตัววัดแรงดันพบว่าที่ระดับแรงดันกระตุ้นเริ่มต้น (pre-stress) 40 kV แรงดันสูงทดสอบมีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 1 % และค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังต่ำกว่า 2.5 pC ดังนั้น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ทำให้ระบบมีความถี่ตัด 800 Hz มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ในปี 2018 บทความวิชาการเรื่อง “Development of A Resonant Frequency Converter for Partial Discharge Tests on Potential Transformers” [13] เขียนโดย P. Yutthagowith, T. Prombud, and B. Leelachariyakul ได้นำเสนอ การพัฒนาเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าเรโซแนนซ์สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน โดยออกแบบวงจรกรองความถี่หรือวงจรปรับแต่งความถี่ เลือกใช้วงจรปรับแต่งความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุ ที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 17 mH และค่าความจุไฟฟ้า 50 μ F โดยมีค่าความต้านทานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 4 Ω คำนวณความถี่เรโซแนนซ์ได้ 172 Hz สร้างแรงดันสูงร่วมกับเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมมุมนำกระแสด้วยสัญญาณรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ปรับความถี่ระหว่าง 100 ถึง 250 Hz ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัดประจุกระแสตรงที่ระดับแรงดัน 20 V_{dc} และหม้อแปลงทดสอบพิกัด 460 V/70 kV และ 40 kVA ทดสอบระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบในสภาวะไร้อโหลด พบว่า ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดสามารถสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์มีค่าสูงสุดที่ระดับแรงดัน 18.72 kV ที่ความถี่ของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส 170 Hz แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ที่ได้มีความสอดคล้องกับการออกแบบ มีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 2 % และค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังต่ำกว่า 2 pC จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมแบบ unipolar PWM กับสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (square wave) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ทั้งสองรูปแบบการควบคุมมุมนำกระแสจะใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเดียวกันที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ 1 mH และตัวเก็บประจุ 22 μ F ทำให้มีความถี่ตัดของวงจรกรองประมาณ 1 kHz พบว่า ที่ระดับแรงดันทดสอบ 14.88 kV สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัสความถี่ 160 Hz คือความถี่เรโซแนนซ์ใหม่ที่ต่างไปจากการออกแบบ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่เพิ่มเติมเข้าไปในระบบทดสอบ โดยมีแรงดันอัดประจุกระแสตรงเพียง 18 V แรงดันสูงทดสอบมีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 2 % และค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังประมาณ 2.3 pC ที่ระดับแรงดันสูงทดสอบ 14.41 kV

พบว่าเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ unipolar PWM มีแรงดันอัดประจุกระแสตรง 102 V แรงดันสูงทดสอบมีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 3 % และค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังประมาณ 2.0 pC

ในปี 2019 บทความวิชาการเรื่อง “The Development of An Adjustable Low-pass Filter for A Partial Discharge Detection System under Testing with The Power Frequency Converter” [14] เขียนโดย Banyat Leelachariyakul และ Peerawut Yutthagowith ได้นำเสนอการพัฒนาวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนร่วมกับเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิดตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุ โดยปรับค่าความถี่ตัดของวงจรกรองได้โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ ปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ระหว่าง 8.96 ถึง 18.82 mH ร่วมกับตัวเก็บประจุค่าคงที่ค่าหนึ่ง ทำให้ได้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าความถี่ตัดของระบบได้ ระหว่าง 135 ถึง 290 Hz ทำการทดสอบระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ 50 Hz ร่วมกับ เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ unipolar PWM มีค่าดัชนีปรับปรุ้ง (m_a) 0.8 ความถี่คลื่นพาห์ (carrier frequency) 5 kHz พบว่า ที่ระดับแรงดันสูง 40 kV วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าความถี่ตัดได้ สามารถกรองสัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สวิชชิงได้ ทำให้ระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ที่แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ 50 Hz มีค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 1 % มีค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ต่ำกว่า 2 pC

ในปี 2020 วารสารวิชาการเรื่อง “Development of High-voltage Testing System Based on Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers” [15] เขียนโดย Tongpian Prombud and Peerawut Yutthagowith ได้นำเสนอการพัฒนาาระบบทดสอบไฟฟ้าแรงสูงด้วยเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและวงจรกรองถูกนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำให้กับหม้อแปลงทดสอบเพื่อสร้างแรงดันสูงทดสอบ และใช้ระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบนี้ในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน ในวารสารวิชาการนี้ได้ทำการวิเคราะห์และพัฒนางจรกรองที่ทำให้ระบบทดสอบนี้เป็นไปตามข้อกำหนด โดยพิจารณาค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต้องต่ำกว่า 5 % ค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังจะต้องต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของค่าการเกิดดิสชาร์จที่ยอมรับในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง คุณลักษณะของระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะถูกวิเคราะห์และจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ที่ระดับแรงดัน 40 kV ค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 2 % และค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังจะต้องต่ำกว่า 2.5 pC นอกจากนี้จะนำเอาความถี่สวิชชิง (f_s) และดัชนีการปรับปรุ้ง (m_a) มาพิจารณาด้วย พบว่า ความถี่สวิชชิง 1 – 20 kHz ที่ดัชนีการปรับปรุ้ง 0.8 และ 1.0 ไม่ส่งผลต่อค่า

สัญญาณรบกวนพื้นหลังและความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน ทั้งนี้ ความถี่สวิตซ์ 1- 4 kHz และ ดัชนีการปรับปรุง 1.0 ให้ผลดีที่สุดในแง่ของความต้องการพลังงานแก่ระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบ

1.8 ประโยชน์ที่ได้คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวคิดต้นแบบการสร้าง การควบคุม และใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงที่มีประสิทธิภาพสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐาน IEC 60060 [5] เหมาะสมกับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันสูงกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้ ได้แก่ การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน IEC 60076 [1] รวมถึงการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันตามมาตรฐาน IEC 61869-3 [6] นอกจากการทดสอบพื้นฐานด้วยรูปคลื่นแรงดันสูงกระแสสลับตามมาตรฐานแล้ว และปัจจุบันปัญหาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยมีมากขึ้นพบมากในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ฉนวนเหลวเช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน และฉนวนแข็งเช่น สายเคเบิลกำลัง ส่งผลต่อเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างยิ่ง จึงมีความสำคัญจำเป็นในอนาคตที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจำพวกนี้จะต้องผ่านการทดสอบตรวจจัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเพิ่มเติม แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจึงมีความสำคัญยิ่งในการทดสอบตรวจจัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 [4] วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีความเป็นไปได้อย่างยิ่งที่จะนำเอาประสิทธิภาพความได้เปรียบทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังประกอบกับเทคนิควงจรไฟฟ้า และเทคโนโลยีด้านการควบคุมวงจรมัยใหม่ มาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ครอบคลุมทุกรายการทดสอบในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด แทนที่การสร้างแรงดันสูงแบบดั้งเดิมทั้งในภาคการศึกษาวิจัย ภาคอุตสาหกรรมผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และผู้ควบคุมดูแลบำรุงรักษาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงได้แก่ การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเป็นต้นแบบแนวคิดสำหรับนักศึกษา นักวิจัยและพัฒนาผู้สนใจทั่วไป เพื่อต่อยอดองค์ความรู้ ความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยี และพัฒนาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยสร้างแรงดันสูงกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ และระดับแรงดันสูงแตกต่างกันไปตามลักษณะของการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงแต่ละประเภท โดยทั่วไปการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมีจุดประสงค์ในการตรวจสอบคุณภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงก่อนนำไปติดตั้งใช้งาน เช่น ลูกถ้วยฉนวน (Insulator) หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power transformer) หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) สายเคเบิลกำลัง (Power cable) เป็นต้น คุณภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจำแนกได้เป็น 2 ประเด็นหลักคือ คุณภาพด้านการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตามการออกแบบ และคุณภาพของการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตามแต่ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นนี้ มุ่งเน้นที่จะพัฒนาเพื่อการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้านคุณภาพการฉนวนไฟฟ้า คุณลักษณะที่สำคัญจำเป็นอย่างยิ่งในขั้นตอนการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ด้วยแรงดันสูงทดสอบคือ การเพิ่มลระดับแรงดันสูงทดสอบตามความต้องการของการทดสอบนั้นๆ ตามแต่รูปแบบการทดสอบ และประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าจำพวกหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของแกนเหล็กในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าต่างระดับแรงดันโดยการคาบเกี่ยวด้วยวงจรแม่เหล็กไฟฟ้านั้น มีการทดสอบบางรายการที่จำเป็นต้องเพิ่มระดับแรงดันสูงทดสอบเกินกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าระบบของอุปกรณ์นั้น หากทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับความถี่หลักมูล (Fundamental frequency) จะทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก เกิดการบิดเบี้ยวไปของรูปคลื่นแรงดันสูงทดสอบ และไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันสูงทดสอบได้ตามที่มาตรฐานกำหนด เกิดความสูญเสียในแกนเหล็กอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดและอันตรายเป็นอย่างสูงได้ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการใช้แรงดันสูงทดสอบระดับสูงกว่าแรงดันพิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้า สามารถทำได้โดยใช้แรงดันสูงทดสอบที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยมาตรฐาน IEC60060 กำหนดให้ทดสอบด้วยแรงดันสูงทดสอบที่มีความถี่สูงขึ้นไปเป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่ระบบคือ ระบบไฟฟ้าความถี่ 50 Hz จะใช้แรงดันสูงทดสอบที่ 100 150 200 250 300 350 หรือ 400 Hz ทดสอบได้ ดังนั้นคุณลักษณะที่สำคัญจำเป็นอีกอย่างหนึ่งคือปรับเปลี่ยนความถี่ได้

ที่ผ่านมา การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงนั้นนิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ (Variable transformer; variac) สำหรับเพิ่มลระดับแรงดันสูงทดสอบ มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลงออโต้ (Autotransformer) มีลักษณะขดลวดร่วมกันระหว่างขดลวด

ปฏิกิริยาและขดลวดทุติยภูมิ พันรอบแกนเหล็กเดี่ยว ปรับแรงดันด้านทุติยภูมิด้วยการแท็บ (Tab) ที่ลวดแต่ละรอบ ทำให้การปรับแรงดันจ่ายออกมีค่าสัมพันธ์กับการออกแบบค่าแรงดันต่อรอบ (volt/turn) ของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ เป็นผลให้แรงดันสูงทดสอบมีขั้นตอนการปรับแรงดันไม่ละเอียด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหม้อแปลงแรงดันสูงทดสอบ (Testing transformer) ด้วย ขณะที่หน้าสัมผัสลวดตัวนำจ่ายออกมีการเคลื่อนที่ปรับแรงดันจะทำให้เกิดการสปาร์ค (Spark) เล็กๆ ส่งผลให้เกิดเป็นสัญญาณรบกวนต่อการทดสอบบางรายการด้วย เช่น การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD) ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) สูง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า (Power transformer) ที่มีพิกัดกำลังสูง หรือสายเคเบิลกำลัง (Power cable) ที่ทำการทดสอบตลอดความยาวสาย มักประสบกับปัญหาการผิผิวของรูปคลื่นแรงดันในส่วนหม้อแปลงปรับค่าได้ เนื่องจากคุณสมบัติของแกนเหล็กและพิกัดของหม้อแปลงทำให้แรงดันสูงทดสอบมีรูปคลื่นผิผิวรวมเกินกว่าที่มาตรฐานยอมรับ

ความถี่ของแรงดันสูงทดสอบ จำเป็นต้องใช้ชุดมอเตอร์เจเนอเรเตอร์ (Motor-generator set) เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในการสร้างแรงดันจ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความถี่จำเพาะค่าหนึ่งเท่านั้นตามที่ได้รับการออกแบบจากผู้ผลิต เช่น 200 Hz ด้วยการเดินมอเตอร์ขับเคลื่อนที่พิกัด หากต้องการปรับเปลี่ยนความถี่ด้วยการปรับรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนใช้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ (AC drive) จะพบว่าพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าลดลงจากที่ระบุไว้ (Name plate) เฉพาะส่วนนี้สรุปว่าเมื่อปรับความถี่ได้ตามต้องการแต่ต้องสูญเสียพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไป เมื่อนำเอามอเตอร์เจเนอเรเตอร์ชุดนี้ไปทดสอบต่อวงจรจะพบอีกว่าวงจรทดสอบทั้งหมดคือภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีพิกัดต่ำลงพิจารณาต่อไปจะคาดการณ์ได้ว่าจะต้องเกิดการผิผิวของรูปคลื่นแรงดันสูงทดสอบอีกด้วย โดยไม่พิจารณาถึงการต่อวงจรทดสอบแบบเฟสเดียว หรือสามเฟส นอกจากนี้ปัญหาทางด้านเทคนิคแล้ว ยังมีปัญหาเรื่องขนาด น้ำหนัก สถานที่ติดตั้ง เป็นผลให้มูลค่าการลงทุนระบบทดสอบสูงมาก และระบบที่ติดตั้งในห้องปฏิบัติการมีความซับซ้อน ยุ่งยากต่อการปฏิบัติงานของผู้ทำการทดสอบ และต้องใช้เวลาใช้การจัดการทดสอบ ปรับเปลี่ยนวงจรทดสอบระหว่างการทดสอบเป็นอย่างมาก

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronics) ซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วจากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีวัสดุสารกึ่งตัว (Semi-conductor) จึงทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีประสิทธิภาพสูงขึ้นทั้งพิกัดกระแส และพิกัดแรงดัน รวมถึงเทคนิควิธีการในการประกอบวงจรและการควบคุม จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าคล้ายกับการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอย่างโดดเด่นในแง่ของพิกัดกำลัง และมีความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความแตกต่างกัน เช่น ระดับแรงดันต่างกัน ความถี่ต่างกัน ทั้งยังควบคุมปริมาณ และทิศทางของการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยการควบคุมที่เหมาะสม

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำพวกโซลิดสเตต (Solid state) จะทำงานใน 2 ลักษณะ ได้แก่ สวิตช์ (Switch) และ ตัวขยายสัญญาณ (Op-amp) โดยมีข้อแตกต่างกันที่การควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ ตัวขยายสัญญาณจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวขยายสัญญาณในปริมาณที่ขึ้นอยู่กับสัญญาณควบคุมโดยทั่วไปจะใช้สัญญาณควบคุมกระแสไบแอส (Bias current) ในการควบคุมตัวขยายสัญญาณ ส่วนสวิตช์จะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลเมื่อมีสัญญาณควบคุมสั่งให้ปิดวงจร (Close circuit) แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตช์จะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณควบคุม สวิตช์ในอุดมคติจะปราศจากความต้านทานขณะปิดวงจร และแรงดันตกคร่อมสวิตช์ เท่ากับ 0 แต่ในทางปฏิบัติจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่ตัวสวิตช์เมื่อมีกระแสสูงไหลผ่านจำเป็นต้องระบายความร้อนนี้ออกไป อุปกรณ์สวิตซ์ิ่ง (Switching device) ที่มีความไวสูงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าทำให้ต้องมีแหล่งกำเนิดสัญญาณควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูงทั้งด้านความเร็วแม่นยำ และมีกำลังขับเพียงพอต่ออุปกรณ์สวิตซ์ิ่งที่เลือกใช้ ตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจคือไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดสำเร็จรูปทำหน้าที่เสมือนคอมพิวเตอร์ที่มีพอร์ทเชื่อมต่อภายนอกในระบบดิจิทัล สามารถโปรแกรมคำสั่งสำหรับสร้างสัญญาณจ่ายออกไปควบคุมสวิตซ์ิ่งแต่ละตัวได้อย่างอิสระ และควบคุมได้ในจำนวนมากในเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม องค์กรที่คิดจะต้องทำงานร่วมกับวงจรขับรูปแบบอนาล็อกที่ตอบสนองทางเวลาได้สัมพันธ์กันกับความต้องการของสวิตซ์ิ่งที่เลือกใช้

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไป จะต้องใช้แรงดันสูงเช่นเดียวกับระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันที่อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ ถูกนำไปติดตั้งใช้งานในการทดสอบนั้นคือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ออกแบบและผลิตขึ้นจะต้องได้รับการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพของการประสานสัมพันธ์ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นเอง เพื่อให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถรองรับและทำงานได้ที่สภาวะไม่ปกติในระบบไฟฟ้าเช่น การเกิดแรงดันเกินภายในระบบไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติจำพวกฟ้าผ่า การเกิดแรงดันเนื่องจากการสวิตซ์ิ่งในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง จะสังเกตได้ว่าการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงหลากหลายชนิดจำเป็นต้องใช้แรงดันสูงทดสอบที่มีระดับแรงดันสูงแตกต่างกันเป็นจำนวนมาก ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของขดลวดและแกนเหล็กจะประสบปัญหาเมื่อต้องทดสอบด้วยแรงดันสูงที่มีระดับแรงดันเกินกว่าแรงดันระบบของอุปกรณ์นั้นจึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนความถี่ให้สามารถทดสอบได้ที่แรงดันสูงกว่าปกติ เพราะคุณลักษณะของแกนเหล็กที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า นอกจากระดับแรงดันสูงทดสอบที่แตกต่างกันแล้ว ความถี่ของรูปคลื่นแรงดันสูงทดสอบก็มีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นองค์ประกอบที่เป็นส่วนสำคัญในทุกๆ การทดสอบนั้นคือ องค์ประกอบที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้ จากที่กล่าวมาแล้วว่าในการสร้างแรงดันสูงทดสอบที่ผ่านมา พบว่า หนึ่งชุดสร้างแรงดันสูงทดสอบสามารถใช้สร้างแรงดันสูงได้เพียงอย่างเดียว ทำให้เกิดความยุ่งยากเป็นอย่างยิ่งในการทดสอบ วิทยานิพนธ์นี้จึงมีความมุ่งหมายที่จะนำเสนอการสร้างแรงดันสูงทดสอบที่ยืดหยุ่นขึ้น จึงมีแนวคิดจะนำเอาเครื่องแปลงผันความถี่กำลังไฟฟ้า(Power

frequency converter) มาประยุกต์ใช้การสร้างแรงดันสูงทดสอบ จึงเรียกชื่อใหม่เป็น “หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์” เพื่อออกแบบ ค้นคว้าเทคนิควิธีการ วิเคราะห์ผล และทำการทดสอบสร้างแรงดันสูงในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งจะได้นำเสนอรายละเอียดในวิทยานิพนธ์นี้

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ มีหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า 3 เฟสแรงดันต่ำที่มีใช้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มาผ่านกระบวนการจัดการทางวงจรไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงดันสูงกระแสสลับ ปรับความถี่ได้ จ่ายแรงดันต่ำให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบแรงสูงเพื่อสร้างแรงดันสูงกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ โดยวิเคราะห์วงจรทดสอบในรูปแบบวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์แบบตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ (RLC Resonance circuit) โดยหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าด้วยวิธีการโพธิ์ปรับปรุง

2.1 วงจรแปลงผันความถี่กำลังไฟฟ้า (Power frequency converter)[16]

เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีหน้าที่หลักในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง หรือจากระบบหนึ่งไปยังระบบหนึ่งที่มีความแตกต่างกัน ด้วยหลักการแปลงรูปพลังงานไฟฟ้าผ่านวงจรไฟฟ้าย่อยในเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยมีวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเป็นส่วนเชื่อมสองระบบที่แตกต่างกัน เข้าด้วยกัน ดังนั้นวงจรภายในของเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าจึงมีองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนที่ทำหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับแปลงรูปเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง และส่วนที่ทำหน้าที่แปลงรูปพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronic) ในการกำหนดรูปแบบของการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า

จากจุดมุ่งหมายในงานวิจัยนี้ เพื่อนำเสนอหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง จึงนำเอาเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบทั่วไป มาศึกษา ค้นคว้าหาเทคนิควิธีการควบคุมทางวงจรไฟฟ้า เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงตามความต้องการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จึงจะนำเสนอวงจรภายในเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า รูปแบบที่สอดคล้องกับงานวิจัยเพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้น และได้รายละเอียดเพียงพอ

เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบที่สนใจจะนำมาศึกษา พัฒนา ปรับปรุงสำหรับสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้ จะใช้วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบ 3 เฟส ทำหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยทั่วไป แปลงรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ความถี่ 50 Hz เป็น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าค่าคงที่ทำหน้าที่เก็บพลังงานและป้องกันการเกิดระลอกคลื่น (Ripple) จากนั้นจะแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมได้ด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเฟสเดียวรูปแบบ H – bridge (H – bridge inverter) โดยใช้อุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Switching device) ชนิด IGBTs (Insulated gate bipolar transistors) ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

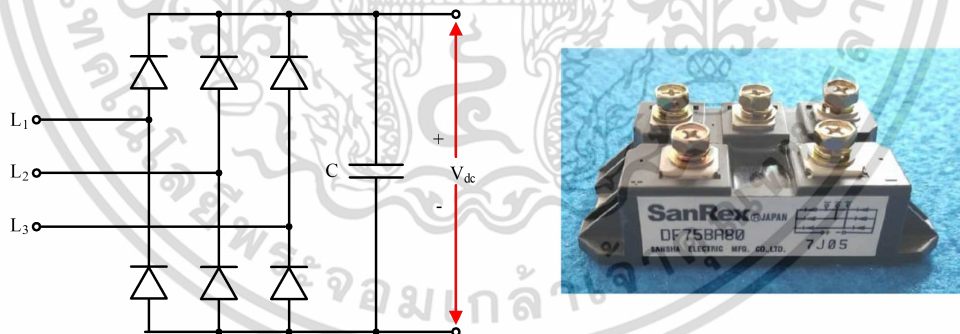
รหัส STM32F407VG สร้างสัญญาณควบคุมด้วยชุดคำสั่งสำเร็จรูป (Software) ตามความต้องการควบคุมมุมนำกระแสผ่านขาเกทของ IGBTs ด้วยวงจรถับ (IGBTs gate Driver) ที่มีการแยกโดดกัน (Isolated) ทางไฟฟ้าด้วยแสง (Opto coupler) เพื่อป้องกันวงจรถควบคุมจากวงจรกำลัง และมีวงจรถับป้องกันไฟกระชาก (Snubber circuit) ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ เมื่อมีการทำงานตัดต่อวงจรของ IGBTs

จะเห็นได้ว่า วงจรภายในเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย 2 วงจรหลัก ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ารูปแบบสัญญาณที่ต้องการ ส่วนอื่นๆ จะเป็นเพียงวงจรถับที่สำคัยสำหรับการทำงานของวงจรหลักเท่านั้น จะได้นำเสนอรายละเอียดของวงจรภายในเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

2.1.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบ 3 เฟส (Three-phase full-wave bridge rectifier circuit)

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบ 3 เฟส ทำหน้าที่รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 50 Hz จากระบบไฟฟ้าสามเฟสทั่วไปแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เก็บพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงในตัวเก็บประจุ โดยมีวงจรถับรูปที่ 2.1(ก) และคำนวณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายออก (V_{dc}) ตามอุดมคติ ได้ดังสมการ (2.1)

$$V_{dc} = V_{av} = \frac{3\sqrt{3}V_{peak}}{\pi} \quad (2.1)$$



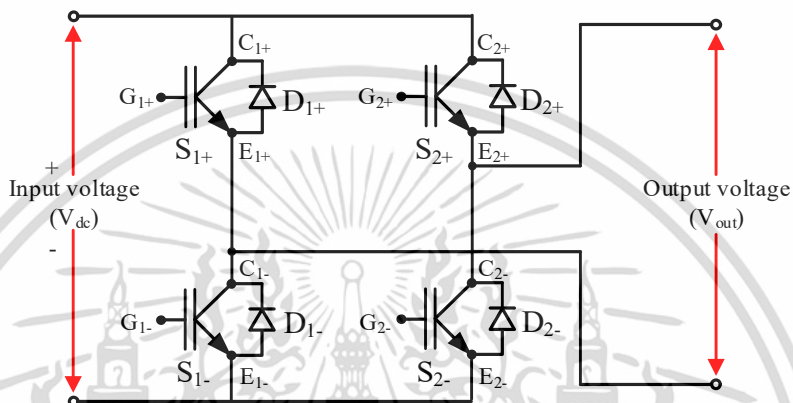
(ก) วงจรถับของโมดูลเรียงกระแสเต็มคลื่น (ข) โมดูลเรียงกระแส Sanrex รหัส DF75BA80 [16]

รูปที่ 2.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบ 3 เฟส

โมดูลเรียงกระแส Sanrex รหัส DF75BA80 ดังรูปที่ 2.1(ข) มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าทนต่อแรงดันโบนอสย้อนกลับ 800 V_p และนำกระแสไฟฟ้าได้สูง 75 A_{dc}

2.1.2 วงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H-bridge (H-bridge inverter)

วงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H- bridge ทำหน้าที่รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าจ่ายออกรูปแบบตามที่ต้องการ ด้วยการควบคุมมุมนำกระแสผ่านขาเกต (G) ของอุปกรณ์สวิชชิง IGBTs แยกอิสระต่อกันจำนวน 4 ตัว ทำงานร่วมกันในลักษณะวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว มีวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.2 และมีเงื่อนไขการทำงานดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge

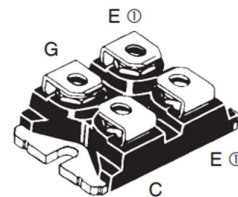
ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge

สถานะการทำงาน	สถานะของ IGBTs		การนำกระแสของ IGBTs และ ไดโอดป้องกัน		V _{out}
	ON	OFF	I _{out} > 0	I _{out} < 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

อุปกรณ์สวิชชิง IGBTs ที่เลือกใช้รหัส IXN110N65B4H1 ดังรูปที่ 2.3 มีคุณลักษณะของแรงดัน 650 V รองรับการไหลของกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง 110 A ต้องการแรงดันไฟฟ้าขั้วขาเกต 15 V รองรับการที่ความถี่สวิชชิง 10 – 30 kHz มีความไวในการตัดต่อวงจรมากกว่า 50 ns ที่สภาวะที่เหมาะสม



(ก) IGBTs รหัส IXXN110N65B4H1

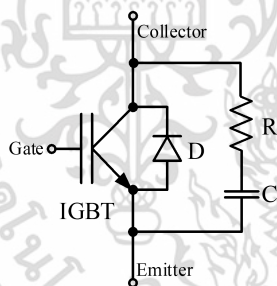


(ข) แผนผังขั้วต่อไฟฟ้าของ IGBTs

รูปที่ 2.3 อุปกรณ์สวิชชิง IGBTs รหัส IXXN110N65B4H1 ที่เลือกใช้[16]

2.1.3 วงจรป้องกันแรงดันไฟกระชากแบบ RC (RC snubber)

วงจรป้องกันแรงดันไฟกระชากแบบ RC ทำหน้าที่ ลดการเกิดส่วนพุ่งเกินแรงดัน (Peak overshoot) เนื่องจากการนำกระแสและหยุดนำกระแสของ IGBTs ด้วยสัญญาณควบคุมที่มีการเปลี่ยนสถานะทันทีทันใดในลักษณะคล้ายสัญญาณรูปขั้น (Step waveform) เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันย้อนกลับเกินกว่าที่ IGBTs รับได้ ป้องกันการเกิดการลัดวงจรระหว่างกิ่งของวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งได้รับการออกแบบ และทดสอบใช้งานในงานวิจัยที่ผ่านมา [16] ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ วงจรป้องกันแรงดันไฟกระชากแบบ RC ประกอบด้วยตัวต้านทาน 39 Ω และตัวเก็บประจุ 75 nF ทำงานร่วมกับไดโอดป้องกันภายใน IGBTs รหัส IXXN110N65B4H1 ดังรูปที่ 2.4



(ก) วงจรสมมูลของวงจร RC snubber

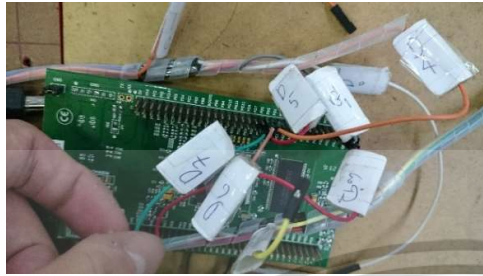
(ข) RC snubber มีค่า 39 Ω และ 75 nF

รูปที่ 2.4 วงจรป้องกันแรงดันไฟกระชากแบบ RC

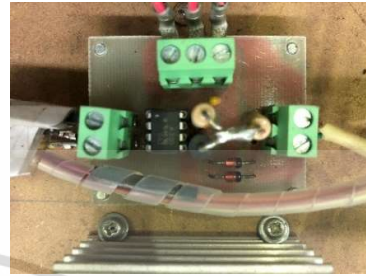
2.1.4 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมมุนำกระแส (Control circuit)

วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมมุนำกระแส ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ รหัส STM32F407VG ทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมดิจิทัล โดยการเขียนชุดคำสั่งสำเร็จรูป (Software) จ่ายสัญญาณควบคุมผ่านวงจรขับเกต (Gate driver) ซึ่งนับเป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเปลี่ยนสัญญาณควบคุมดิจิทัลให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของการขับขาเกตของ IGBTs อย่างอิสระรวมทั้งแยกโดด (Isolated) ด้วยแสง (Opto coupler) ระหว่างวงจรกำลังซึ่งมีระดับแรงดันใช้งานที่สูงกว่าวงจรควบคุม เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่าง

ทดสอบ ตลอดจนความแม่นยำในการควบคุมมุมนำกระแสของ IGBTs ไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรถับเกท ดังรูปที่ 2.5 ได้รับการออกแบบและยืนยันผลการทำงานในงานวิจัย [16] ที่ผ่านมาแล้ว



(ก) ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VG

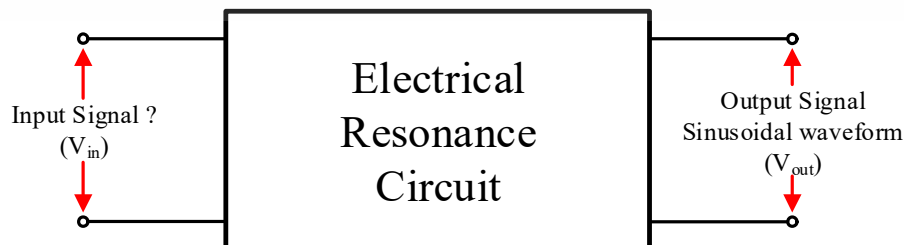


(ข) วงจรถับเกท (IGBTs gate driver)

รูปที่ 2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมมุมนำกระแส และวงจรถับเกท (Control circuit)

2.2 วงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์แบบ RLC

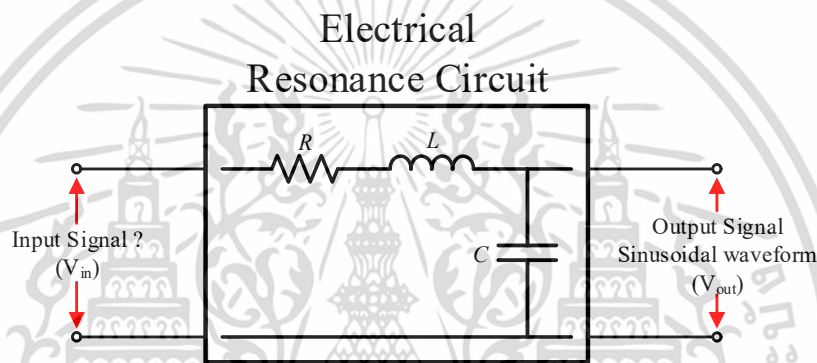
จากแนวคิด ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อพัฒนาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงโดยเฉพาะการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ตรงกับความถี่ที่ต้องการทดสอบในแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง พิจารณาคุณภาพแรงดันสูงโดยค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD,) นั่นคือยังมีค่าต่ำ แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์จะเข้าใกล้อุดมคติ (almost purely sinusoidal waveform) ซึ่งวงจรไฟฟ้าที่มีความน่าสนใจ และเป็นไปได้อย่างยิ่งที่จะทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบแรงสูง (HV testing transformer) มีความใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์คือ วงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ ในวงจรไฟฟ้าค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่มีผลทำให้เกิดสภาวะทางวงจรไฟฟ้าแบบเรโซแนนซ์ (Resonance circuit) ได้แก่ ค่าความต้านทาน (Resistance) ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) และค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ในวงจรทดสอบนั่นเอง กล่าวอีกนัยหนึ่งว่า หากสามารถปรับแต่งและควบคุมค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าทั้งสามให้เหมาะสมกันตามเงื่อนไขการวิเคราะห์ทางวงจรไฟฟ้าอนุกรมของ RLC ตามทฤษฎี จะทำวงจรไฟฟ้าอนุกรมเกิดการเรโซแนนซ์ (Resonance) ได้ผลลัพธ์จากการป้อนสัญญาณไฟฟ้าผ่านวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์คือ สัญญาณไฟฟ้าจ่ายออกรูปคลื่นไซน์ตามทฤษฎี อธิบายแนวคิดได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แนวคิดและหลักการของการเกิดเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบทั่วไปของวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ที่สนใจอยู่ในรูปแบบวงจรอนุกรมของ RLC ดังรูปที่ 2.7 และจะใช้รูปแบบทั่วไปของวงจรอนุกรมของ RLC ที่สภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance) ในการวิเคราะห์ทางวงจรทางไฟฟ้าและพิจารณาวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสตอร์ชันบางส่วนร่วมกัน ดังนั้นการเกิดเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและตัวเก็บประจุไฟฟ้า (LC Circuit) คือ สภาวะที่มีการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้ากลับไปกลับมาระหว่างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในรูปสนามแม่เหล็กและตัวเก็บประจุไฟฟ้าในรูปสนามไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอทางเวลา การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นในรูปแบบเช่นเดียวกับการแกว่งของลูกตุ้มในทางกลอธิบายได้ด้วยรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal waveform) ที่มีคาบการแกว่งคงที่



รูปที่ 2.7 วงจรไฟฟ้าอนุกรมของ RLC ที่สภาวะเรโซแนนซ์

เงื่อนไขทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ตามอุดมคติ คือ อิมพีแดนซ์ในวงจรไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุดเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งอธิบายได้ด้วยค่ารีแอกแตนซ์ของความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductive reactance; X_L) และค่ารีแอกแตนซ์ของความจุไฟฟ้า (Capacitive reactance; X_C) จะต้องมีค่าเท่ากันดังสมการ (2.1) แต่ค่ารีแอกแตนซ์มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ เขียนเงื่อนไขความสัมพันธ์ใหม่ ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$X_L = X_C \quad (2.1)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (2.2)$$

เมื่อ $\omega = 2\pi f$ ดังนั้นปัจจัยทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ทางวงจรไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่ (Frequency; f) ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance frequency; f_0) คำนวณได้ดังสมการ (2.3)

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพของการเกิดเรโซแนนซ์อธิบายได้ด้วยค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) ซึ่งอาจมีค่าไม่สิ้นสุด (infinite Q) ตามอุดมคติเพราะไม่คำนึงถึงค่าความสูญเสียในวงจร แต่ในความเป็นจริงทางวงจรไฟฟ้าจะต้องมีค่าความต้านทานไฟฟ้าในวงจรเสมอ จึงอธิบายวงจรเรโซแนนซ์ได้ด้วยวงจรไฟฟ้า RLC ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) คำนวณได้จากสมการ (2.4)

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.4)$$

จากเงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์ในวงจรไฟฟ้าอนุกรม RLC ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ประกอบด้วย ความถี่ (Frequency; f) และค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) และค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) นั้นหมายความว่าหากควบคุมและกำหนดค่าองค์ประกอบทางวงจรไฟฟ้า RLC ของวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนให้อยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance) ทางวงจรที่ความถี่ที่กำหนด ได้ตรงกับความถี่ของสัญญาณป้อนเข้าระบบทดสอบจะสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นไซน์ป้อนเข้าขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบแรงสูงเพื่อสร้างแรงดันสูงทดสอบสำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้

2.3 สัญญาณควบคุมมุมนำกระแส

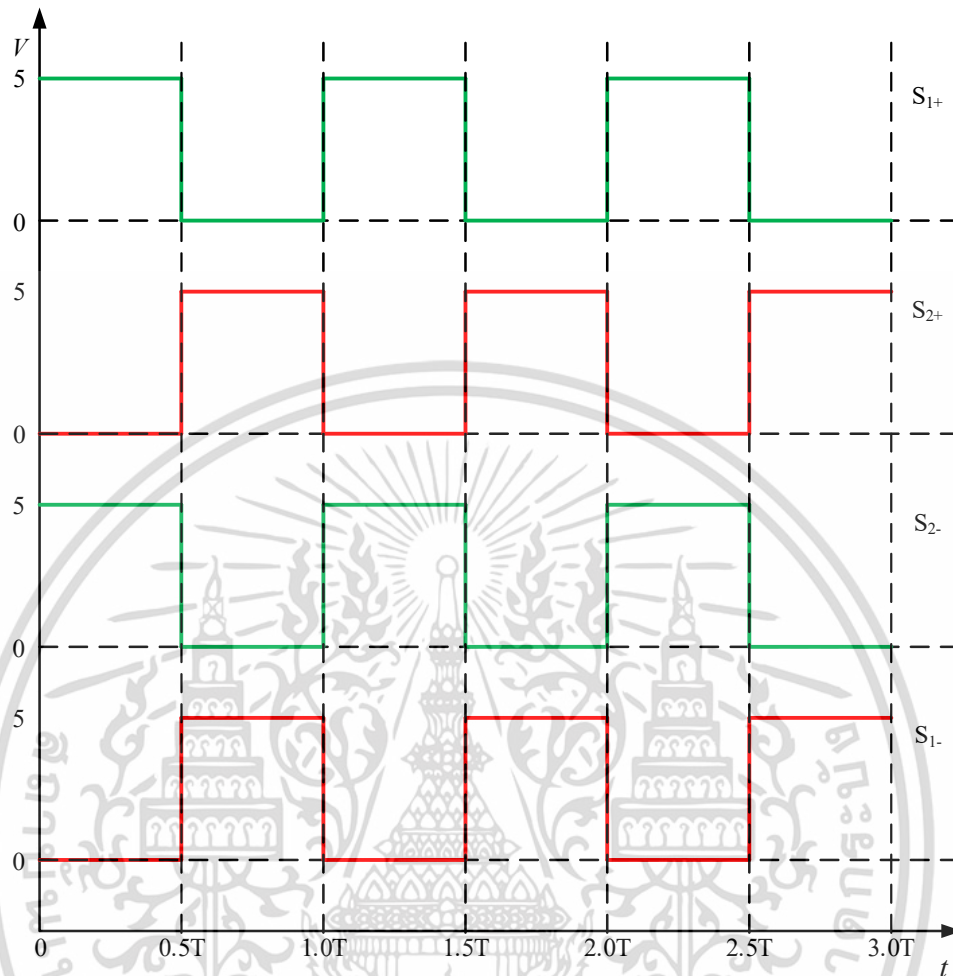
เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) สามารถกำหนดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันจ่ายออกได้ โดยควบคุมมุมนำกระแสของอุปกรณ์สวิตซิ่ง (Switching device) IGBTs ในวงจรย่อยแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ H – bridge (IGBTs H – bridge inverter) โดยสร้างสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VG ชิปขาเกทของ IGBTs ผ่านวงจรขับ (IGBTs Gate driver) ดังนั้น รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจ่ายออกจากเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกับสัญญาณควบคุมที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และสัญญาณจ่ายออกจากวงจรย่อยแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Inverter) จะเป็นสัญญาณป้อนเข้าระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge detection system) ที่สภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance) นั้นเอง

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ที่สภาวะทางวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ ดังนั้นสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมและเป็นไปได้สูงสุด ให้ประสิทธิภาพการเกิดเรโซแนนซ์ของสัญญาณไฟฟ้าใกล้เคียงอุดมคติ และสอดคล้องกับการทำงานในลักษณะเปิดและปิดวงจรของอุปกรณ์สวิตซิ่ง IGBTs ในวงจรย่อยแปลงผันกำลังไฟฟ้าวางแบบ H- bridge (H – bridge inverter) คือ สัญญาณควบคุมรูปคลื่น

จัตุรัส (Square wave) เพื่อเปรียบเทียบผลการสร้างแรงดันสูงรูปคลื่นไซน์สำหรับการทดสอบ ตรวจจับดิซซาร์จบางส่วนในงานวิจัย [8] – [16] ซึ่งควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมแบบปรับปรุงความ กว้างพัลส์ (PWM) มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave)

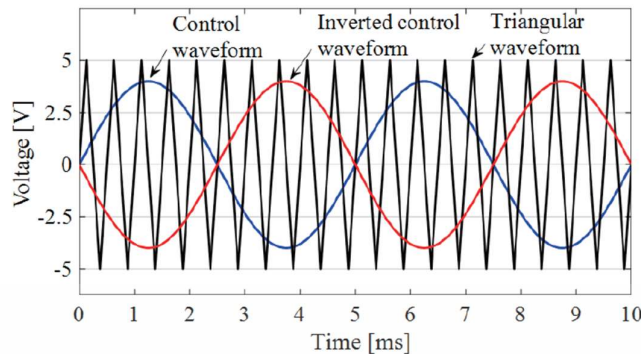
สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ที่ใช้ในการควบคุมมุนำกระแสของ IGBTs ถูกสร้างขึ้นโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VG แยกอิสระต่อกันเป็น 4 ช่องสัญญาณจ่ายออก (Output port) แต่ละช่องสัญญาณควบคุม IGBTs เพียงหนึ่งตัวร่วมกับวงจรขับขาเกต (IGBT gate driver) การควบคุมลักษณะนี้ จะทำให้การสัญญาณควบคุมมีความถูกต้องแม่นยำทางเวลาอย่างมาก เพราะภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มีการทำงานรูปแบบดิจิทัลที่มีความถี่นาฬิกาของไมโคร โพรเซสเซอร์เป็นตัวอ้างอิงทางเวลา สัญญาณรูปคลื่นจัตุรัสที่ได้จะมีคุณลักษณะใกล้เคียงสัญญาณพัลส์ ดิจิตอลตามอุดมคติ ที่ระดับแรงดัน 0 V และ 5 V เสมือนลอจิก 0 และ 1 สอดคล้องกับการทำงาน แบบเปิด และปิดวงจรของ IGBTs ทำให้ลดโอกาสการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์สวิชชิงได้ดี สัญญาณควบคุม IGBTs ในกิ่งเดียวกันของวงจรจะทำงานตรงกันข้ามตามการป้อนโปรแกรมให้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส 4 สัญญาณ

2.3.2 สัญญาณควบคุมรูปแบบปรับความกว้างพัลส์ Unipolar PWM[15]

สัญญาณควบคุมรูปแบบปรับความกว้างพัลส์ Unipolar สร้างได้จากการปรับความกว้าง (Modulation) ระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Control waveform) กับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular waveform) โดยมีค่าอัตราปรับความกว้างพัลส์ (Modulation index; m_a) และความถี่สวิตซิ่ง (Switching frequency; f_s) ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม เป็นตัวกำหนดรูปแบบของสัญญาณควบคุมมมนำกระแส 4 สัญญาณแยกอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 2.9 โดยในงานวิจัย [15] ได้ทำการศึกษาที่ $m_a = 0.8$ และ 1.0 ที่ความถี่สวิตซิ่ง $1 - 20$ kHz และพบว่า ที่ $m_a = 1.0$ ความถี่สวิตซิ่ง 2.0 และ 3.2 kHz ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ



รูปที่ 2.9 การปรับปรุงความกว้างพัลส์ ระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์และรูปคลื่นสามเหลี่ยม[15]

2.4 วิธีโพรณีปรับปรุง (Improved Prony method)[17]

วิธีโพรณี คือ วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่แยกองค์ประกอบของรูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้า ออกเป็นองค์ประกอบย่อยในรูปแบบฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลที่มีเลขชี้กำลังเป็นจำนวนจริงหรือจำนวนเชิงซ้อน (multiple real or complex exponential functions) ซึ่งพบปัญหาเมื่อนำไปใช้กับสัญญาณไฟฟ้าที่มีสัญญาณรบกวนในระดับสูง ที่ผ่านงานวิจัย [18] นำวิธีการโพรณีปรับปรุง ใช้เพื่อการทำฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลที่มีเลขชี้กำลังเป็นจำนวนจริงหรือจำนวนเชิงซ้อนซึ่งมีสององค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน [19] ประสิทธิภาพของวิธีการโพรณีปรับปรุงในแง่ความถูกต้องแม่นยำและเวลาในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางคณิตศาสตร์เทียบได้กับทฤษฎีวิธีการที่มาตรฐานแนะนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำวิธีการหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์อย่างแม่นยำด้วยวิธีโพรณีปรับปรุง ซึ่งประกอบด้วยค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใน (L_{add}) ค่าความต้านทานภายใน (R_{add}) และค่าความจุไฟฟ้า (C_{add}) ของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้พัฒนาเทคนิควิธีการควบคุมแบบวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมของ RLC มาใช้หาฟังก์ชันของรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่ได้บันทึกจากการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อความถูกต้องแม่นยำในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าให้แก่วงจรรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ที่เหมาะสม กับความต้องการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีความแตกต่างกันทางไฟฟ้า เพื่อความเข้าใจในการนำวิธีการโพรณีปรับปรุงมาใช้อย่างเข้าใจ จึงพิจารณาทฤษฎีวิธีการโพรณีปรับปรุง ดังนี้

พิจารณารูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่สนใจพบว่า รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า ($y(t)$) อยู่ในฟังก์ชันที่ต่อเนื่องทางเวลารูปแบบเอ็กโปเนนเชียลสององค์ประกอบ ($f(t)$) ดังสมการที่ (2.5) อินทิเกรตฟังก์ชัน ($f(t)$) จาก 0 ถึง t ได้เป็นฟังก์ชัน ($g(t)$) ในรูปแบบเอ็กโปเนนเชียลสององค์ประกอบและค่าคงที่ ดังสมการ (2.6) เมื่อ A_1 A_2 และ A_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ในสมการ ซึ่งเขียนใหม่ในรูปแบบฟังก์ชันที่ไม่

ต่อเนื่องทางเวลา ดังสมการที่ (2.7) ซึ่งจะสังเกตได้ว่า α_1 และ α_2 เป็นไปได้ทั้งจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อน

$$y(t) \approx f(t) = ae^{\alpha_1 t} + be^{\alpha_2 t} \quad (2.5)$$

$$\int_{\tau=0}^{\tau=t} f(t) d\tau = g(t) = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} + A_3 \quad (2.6)$$

$$g(n\Delta t) = A_1 e^{\alpha_1 n\Delta t} + A_2 e^{\alpha_2 n\Delta t} = A_1 (e^{\alpha_1 \Delta t})^n + A_2 (e^{\alpha_2 \Delta t})^n + A_3 \quad (2.7)$$

เมื่อ กำหนดให้องค์ประกอบเอ็กโปเนนเชียล ($e^{\alpha_i \Delta t}$) ลำดับที่ i^{th} เท่ากับ γ_i หนึ่งในวิธีการในการแก้สมการผลต่างเอกพันธ์ (Homogeneous difference equation) ดังสมการที่ (2.7) คือการแก้สมการอนุกรม n ลำดับ ดังสมการที่ (2.8)

$$f[n+2] - (\gamma_1 + \gamma_2)f[n+1] + (\gamma_1\gamma_2)f[n] = C \quad (2.8)$$

เนื่องจาก มีจำนวนจุดข้อมูลจำนวนมากกว่าจำนวนค่าสัมประสิทธิ์สำหรับหาค่า $\gamma_1 + \gamma_2$ และ $\gamma_1\gamma_2$ ในสมการ (2.8) จึงสามารถใช้วิธีการถอดยกกำลังสองต่ำสุดแบบเชิงเส้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์นี้ได้ ส่วนค่า γ_1 และ γ_2 สามารถคำนวณได้จากผลเฉลย ๑ ของสมการช่วยดังสมการ (2.9) ได้

$$z^2 - (\gamma_1 + \gamma_2)z + (\gamma_1\gamma_2) = 0 \quad (2.9)$$

อย่างไรก็ดี หากทราบ γ_1 γ_2 จะสามารถหาค่าองค์ประกอบเอ็กโปเนนเชียลในสมการ (2.6) ได้โดยง่าย และใช้วิธีการถอดยกกำลังสองต่ำสุดในการหาค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ (2.6) จากข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่บันทึกได้จากการทดสอบ

2.5 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge; PD)[20]

ดิสชาร์จบางส่วน คือ ดิสชาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดิสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด จึงเรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของอิเล็กโทรดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้าน ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่ โดยดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่ต่อเนื่องกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่

อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น การเกิดดิสชาร์จบางส่วนสามารถเกิดได้ทั้งสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสนามไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นซ้ำทุกๆ วัฏจักร (Cycle) ของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงยอด [21]-[23]

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเนื้อฉนวนนั้น เกิดจากการบกพร่องต่างๆ หรือเกิดการชำรุดในเนื้อฉนวน โดยความบกพร่องหรือชำรุดดังกล่าวอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุดังต่อไปนี้

- การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากการผลิต ฉนวนไฟฟ้าชนิดวัสดุแข็ง ถูกออกแบบให้กระจายความเครียดทางไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอระหว่างตัวนำ แต่ในทางปฏิบัติ การผลิตจำนวนมากอาจมีบางชิ้นเกิดความบกพร่องที่ทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่างเล็ก ๆ ในเนื้อของวัสดุ
- การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากการติดตั้ง เมื่อมีการประกอบหรือติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าในพื้นที่ทำงาน อาจผิดพลาดทำความเสียหายแก่ฉนวน ทำให้ความเป็นฉนวนลดลง หรือมีความเครียดทางไฟฟ้าที่ฉนวนเพิ่มขึ้น
- การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากอายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพ โดยทั่วไปวัสดุฉนวนไฟฟ้าจะเสื่อมสภาพตามกาลเวลา พันธะทางเคมีของฉนวนภายในถูกทำลาย กระบวนการนี้จะทำให้ฉนวนอ่อนแอลง มีความทนทานต่อความเค้นทางไฟฟ้าลดลง แม้ในสภาพเงื่อนไขการทำงานปกติ
- การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากการได้รับความเครียดสูงเกินไป การลัดวงจร หรือโดนฟ้าผ่า เป็นการเพิ่มความเครียดทางไฟฟ้าให้ฉนวนจากกระแสหรือแรงดันเกิน ถึงแม้จะเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ แต่ก็สามารถทำความเสียหายถาวรแก่ฉนวนได้
- การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากเสียหายขณะทำการติดตั้งอุปกรณ์ อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลายอาจเกิดความเสียหายทางกายภาพในขณะที่ใช้งานได้จากปัจจัยภายนอก เช่น สายเคเบิลใต้ดินอาจเสียหายจากผู้รับเหมา หน่วยงานอื่นที่ทำการขุดถนน หรือรถบรรทุกที่หนักเกินไปบนถนน

2.5.1 ประเภทของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

โดยทั่วไปแล้วการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายนอก (External Partial Discharge) และประเภทที่สองคือการเกิดดิสชาร์จภายใน (Internal Discharge)

การเกิดดิสชาร์จในบริเวณอากาศโดยทั่วไปจะถูกจัดอยู่ในประเภท การดิสชาร์จบางส่วนภายนอก (External Partial Discharge) หรือมักจะถูกเรียกว่า “โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge)” ซึ่งการเกิดโคโรนาดิสชาร์จเกิดขึ้นได้ในฉนวนก๊าซและฉนวนเหลว และเกิดขึ้นบริเวณตัวนำไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นปลายแหลมหรือมีขอบคมซึ่งบริเวณดังกล่าวจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงมาก จึงทำให้ฉนวนบริเวณโดยรอบของขอบคมหรือปลายแหลมเกิดการ

เสียสภาพบางส่วน ดังนั้นสามารถจำลองการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรน่าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ทรอปปลายแหลม ซึ่งโคโรนาดิสชาร์จสามารถแบ่งการพิจารณาได้ 2 รูปแบบคือ โคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูง และโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงต่ำหรือกราวด์ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ทรอป โดยแบบจำลองและวงจรสมมูลของโคโรนาดิสชาร์จแสดงดังรูปที่ 2.10

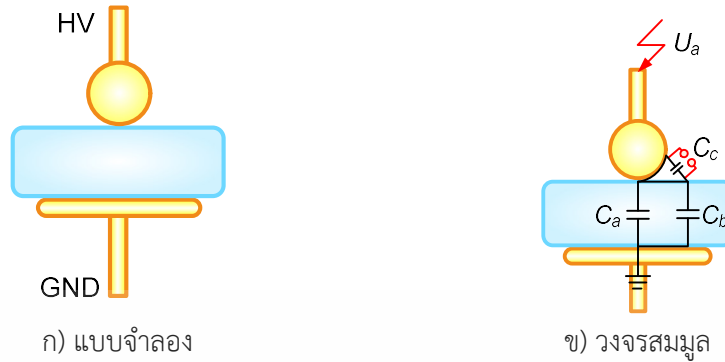


ก) แบบจำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูง

ข) วงจรสมมูล

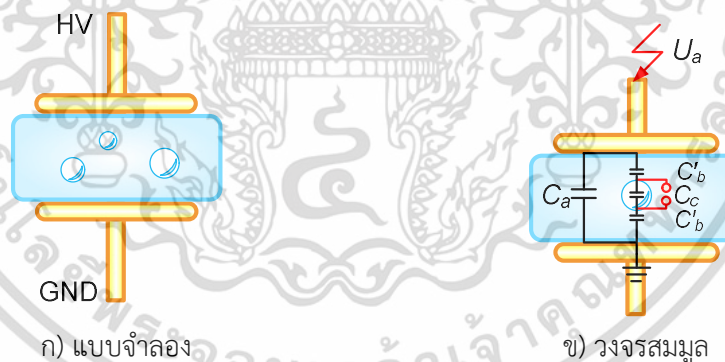
รูปที่ 2.10 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จ

อย่างไรก็ตามการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายนอก (External Discharge) อาจเกิดในอากาศโดยรอบที่แพร่กระจายไปตามพื้นผิวของฉนวนที่เป็นของแข็ง หรืออาจเป็นฉนวนเหลวกับฉนวนแข็ง ซึ่งส่งผลต่อฉนวนเช่นเพราะอาจสร้างกระบวนการเสื่อมสภาพต่อฉนวนได้ เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นกับฉนวนที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity; ϵ_r) ที่ต่ำกว่า หรือความเครียดไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ฉนวน มักถูกเรียกว่า “ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge)” ซึ่งการดิสชาร์จตามผิวมักจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวฉนวนบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเดียวกันหรือขนานกับผิวฉนวน การดิสชาร์จตามผิวสามารถเกิดขึ้นได้กับปลายสายเคเบิลหรือปลอกฉนวนนำสาย เป็นต้น สนามไฟฟ้าที่แผ่ขยายออกจากบริเวณพื้นผิวเป็นผลมาจากการดิสชาร์จที่ซึ่งองค์ประกอบพื้นผิวแรกเริ่มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จ การดิสชาร์จตามผิวเกิดได้ทั้งในอากาศในฉนวนน้ำมันและในก๊าซ และเมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤตอาจเกิดการดิสชาร์จตามแนวรอยต่อของฉนวนที่ต่างชนิดกันได้ โดยแบบจำลองดิสชาร์จตามผิวแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเกิดดิสชาร์จตามผิว

การเกิดดิสชาร์จภายใน (Internal Discharge) อาจเกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งและฉนวนเหลว เนื่องจากมีโพรงอากาศอยู่ภายในเนื้อฉนวนหรือสิ่งแปลกปลอมที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity; ϵ_r) ต่ำกว่าเนื้อฉนวนหลักคล้ายกับดิสชาร์จภายนอก เจ็อบนอยู่ในเนื้อฉนวนเนื่องจากสิ่งแปลกปลอมมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำและมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่นในเนื้อฉนวนจึงนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ ขนาดของแรงดันที่การดิสชาร์จเริ่มเกิดได้ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและความคงทนต่อการเบรกดาวน์ของโพรงอากาศในเนื้อฉนวนโดยแบบจำลองดิสชาร์จภายในแสดงดังรูปที่ 2.12



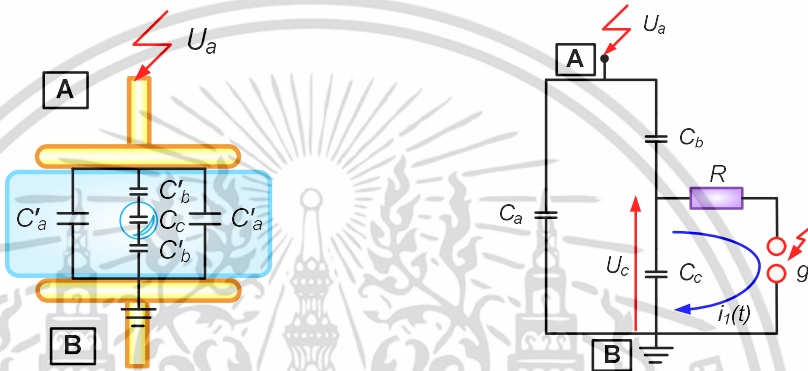
รูปที่ 2.12 การเกิดดิสชาร์จภายใน

2.5.2 วงจรสมมูลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

โดยเหตุที่ดิสชาร์จบางส่วนภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้นเพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดิสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็ดิสชาร์จบางส่วนชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ วงจรสมมูลดังรูปที่ 2.14 ใช้เพื่อวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนภายในของวงจรสมมูลจากรูปที่ 2.13 (ข)

จากรูปที่ 2.13 (ก) แสดงวัสดุฉนวนมีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอเล็กโทรด A-B โพรงก๊าซสามารถเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซ หรือ C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C'_b ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้ จะรวมกันได้ เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของ C_c จะให้ค่าเป็น C'_a และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 2.14 (ข) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่า กับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มากๆ [21]-[23]

$$C_t \approx C_a \gg C_c > C_b$$

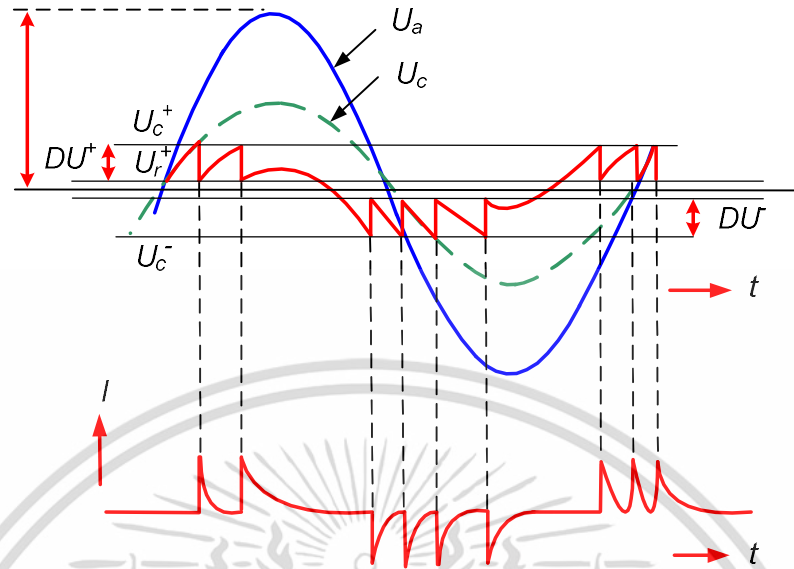


ก) แบบจำลององค์ประกอบต่างๆ ในโพรงอากาศ

ข) วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

รูปที่ 2.13 การเกิดกระแสพัลส์ในการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

จากวงจรสมมูลของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เมื่อเกิดดิสชาร์จในฉนวนส่วนย่อยซึ่งแทนด้วยตัวเก็บประจุ (C_c) จะเกิดกระแสพัลส์ ($i_1(t)$) ไหลวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และเมื่อพิจารณาแรงดันที่ป้อน (U_a) ให้กับฉนวนเป็นแรงดันกระแสสลับ แรงดันคร่อมฉนวนย่อย (U_c) จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.14 และกระแสพัลส์ที่มีหน้าคลื่นชันจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 แรงดันที่ตกคร่อมฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงและกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

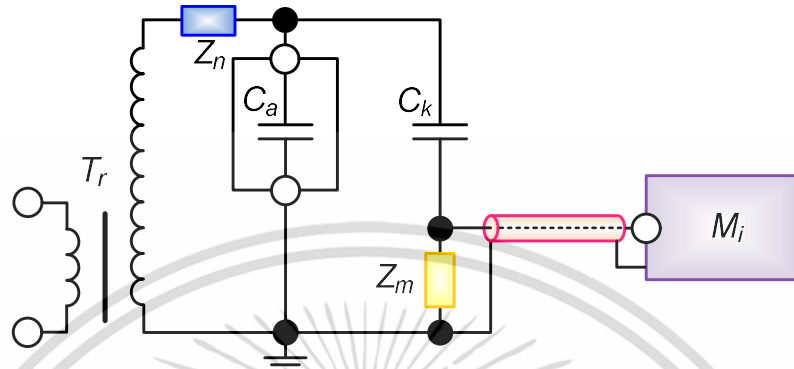


รูปที่ 2.15 รูปคลื่นกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

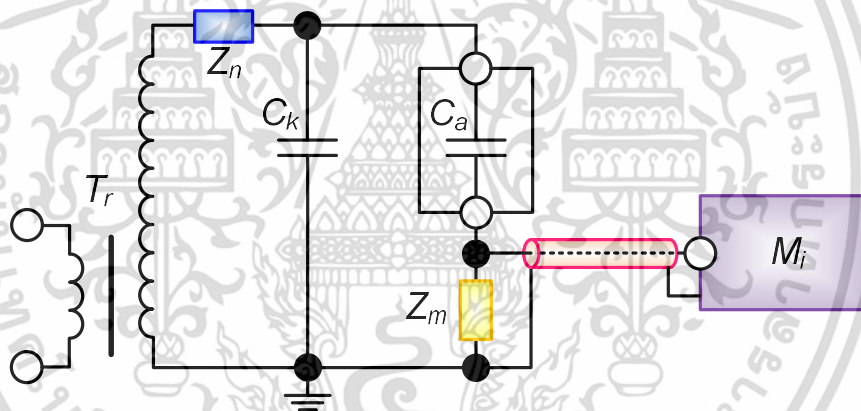
2.5.3 การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากล หรือที่เรียกว่ามาตรฐาน IEC 60270 แสดงดังรูปที่ 2.16 ถึง 2.29 นั้นจะใช้อิมพีแดนซ์เพื่อการวัด (Z_m) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (CD) ทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) เพื่อใช้ในการตรวจจับค่าประจุ ในขณะที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวนของวัตถุทดสอบ (C_o) อย่างไรก็ตามวิธีการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนี้จะไม่สามารถวัดค่าประจุจากการ

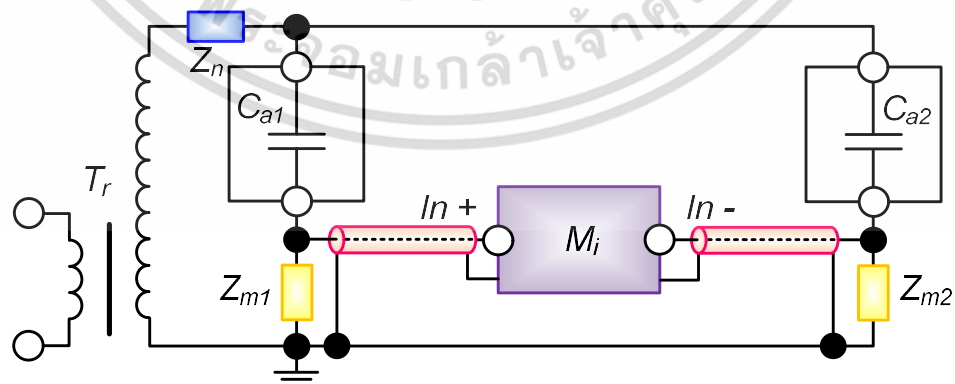
ดิสชาร์จภายในเนื้อฉนวนจริงได้ ดังนั้นจึงทำการวัดค่าประจุที่ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวป้อนประจุให้กับอุปกรณ์ทดสอบแทน (Appearance Charge) [24]



รูปที่ 2.16 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่อิมพีแดนซ์วัด Z_m ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k)

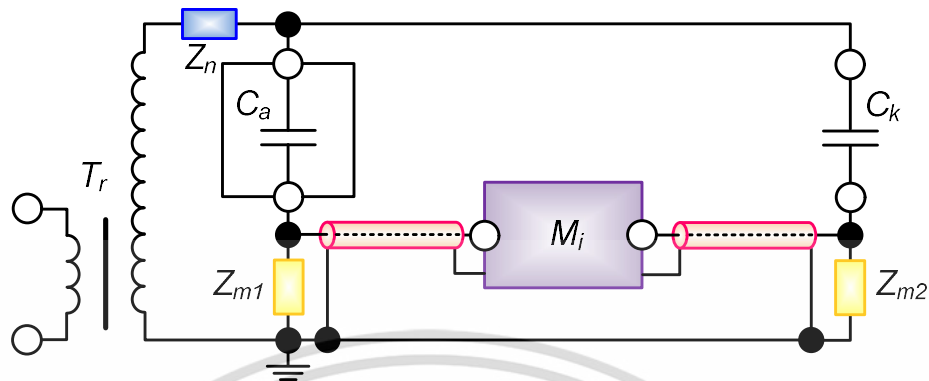


รูปที่ 2.17 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่อิมพีแดนซ์วัด Z_m ต่ออนุกรมกับตัวทดสอบ (C_a)



รูปที่ 2.18 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบวงจรบริดจ์สมดุลระหว่างจุดอ้างอิง (C_{a2} , Z_{m2}) ขนานกับจุดทดสอบ (C_{a1} , Z_{m1})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มีการแยกชั่วสัญญาณ โดยที่ T_r คือ หม้อแปลงทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

Z_n คือ อุปกรณ์กรองสัญญาณรบกวนในวงจร (Filter)

C_a คือ วัตถุทดสอบ (Test object)

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

Z_m คือ อิมพีแดนซ์เพื่อการวัด (Measuring Impedance) เป็นส่วนหนึ่งของ CD (Coupling Device)

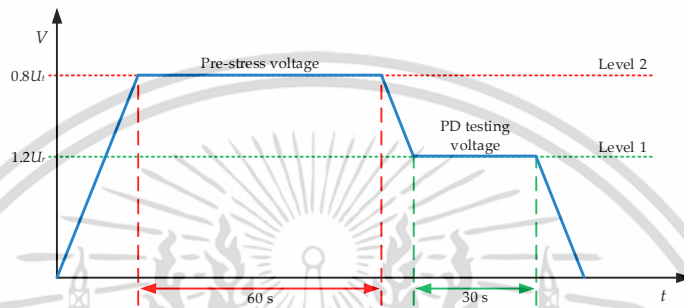
M_i คือ เครื่องมือสำหรับวัดสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วน (Measuring Instrument)

จากรูปที่ 2.16 ถึง 2.19 แสดงวงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล ซึ่งแบ่งวงจรการทดสอบออกเป็น 3 วงจร โดยในรูปที่ 2.16 เป็นวงจรทดสอบที่อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว ส่วนในรูปที่ 2.17 เป็นวงจรทดสอบที่อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ออนุกรมกับวัตถุทดสอบ ซึ่งวงจรในรูปที่ 2.17 จะมีความไวในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้รวดเร็วกว่าวงจรในรูปที่ 2.16 เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและเครื่องมือวัดอยู่ใกล้กับอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ แต่จะมีความเสี่ยงที่เครื่องมือวัดมีโอกาสเกิดความเสียหายถ้าเกิดการเบรกดาวนของอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ ส่วนในรูปที่ 2.18 และ 2.19 เป็นวงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ได้เปรียบในด้านการลดระดับสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ แต่ทั้งสองวงจรมีความซับซ้อนในการติดตั้งวงจรทดสอบ

2.5.3.1 การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) กำหนดให้มีการป้อนแรงดันสูงทดสอบเกินกว่าระดับแรงดันพิกัดของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันนั้นเพื่อทำการกระตุ้นเริ่มต้น (pre - stress) ที่ระดับแรงดัน 80 % ของแรงดันทดสอบความคงทนอยู่ได้ (Withstand voltage; U_t) หรือ $0.8U_t$ เป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นให้ลด

ระดับแรงดันลงมาจากที่ระดับแรงดันสูงทดสอบบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ 120 % ของแรงดันพิกัดของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (U_r) หรือ $1.2U_r$ (PD tesing voltage) คงที่ไว้ 30 วินาที จึงบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่เข้ารับการทดสอบนี้ ดังรูปที่ 2.20 ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องทดสอบด้วยแรงดันสูงทดสอบที่ความถี่สูงกว่าความถี่ระบบที่ถูกออกแบบใช้งาน



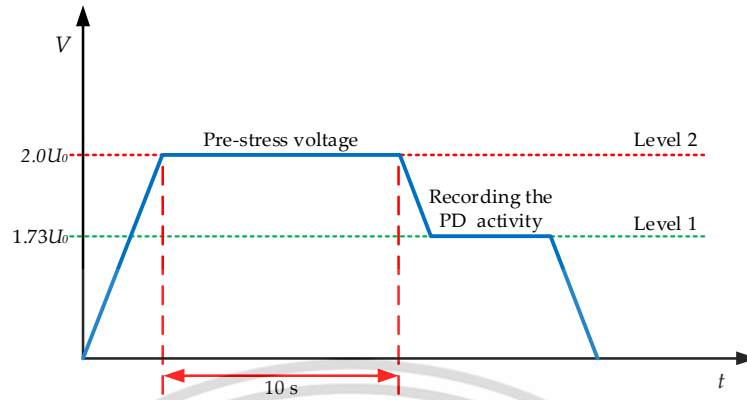
รูปที่ 2.20 การป้อนแรงดันสูงทดสอบสำหรับหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

งานวิจัยนี้ จะใช้หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันพิกัด 24 kV ในการทดสอบระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จซึ่งสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz จากหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยมีการป้อนแรงดันสูงที่ระดับกระตุ้นเริ่มต้น $0.8U_r$ เท่ากับ 40.0 kV จากนั้นลดระดับแรงดันลงมาถึง $1.2U_r$ เท่ากับ 28.8 kV และบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) โดยพิจารณาคุณภาพแรงดันสูงทดสอบ และระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง เป็นสำคัญ

2.5.3.2 การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลกำลัง

การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลกำลัง (Power cable) มีรูปแบบการป้อนแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 50 Hz ดังรูปที่ 2.21 มาตรฐานกำหนดให้ทำการกระตุ้นเริ่มต้น (pre - stress) ที่ระดับแรงดัน $2U_0$ คงที่ระดับแรงดันไว้ 10 วินาที จากนั้นลดระดับแรงดันลงมาถึงระดับ $1.73U_0$ แล้วบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ของสายเคเบิลกำลังที่เข้ารับการทดสอบ

สายเคเบิลรหัส CV12/20(24) kV จะนำมาทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเพื่อทดสอบระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ดังจะทำการเพิ่มแรงดันสูงทดสอบเพื่อกระตุ้นเริ่มต้นที่ระดับ $2U_0$ เท่ากับ 24 kV ($U_0 = 24$ kV) คงที่เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นลดระดับแรงดันลงมาถึงระดับ $1.73U_0$ เท่ากับ 20.8 kV แล้วบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ของสายเคเบิล CV12/20(24) kV โดยพิจารณาคุณภาพแรงดันสูงทดสอบ และระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง เป็นสำคัญ



รูปที่ 2.21 การป้อนแรงดันสูงทดสอบสำหรับสายเคเบิลกำลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

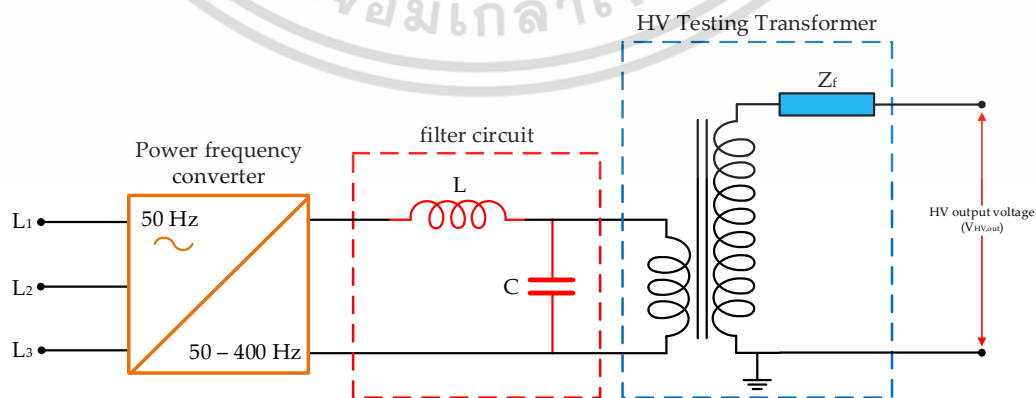
การวิเคราะห์และออกแบบการทดสอบ

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ถูกออกแบบและผลิตขึ้นนั้นมีจำความสำคัญจำเป็นอย่างยิ่งก่อนนำอุปกรณ์ไปติดตั้งใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า มักกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [5] แบ่งประเภทการทดสอบเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การทดสอบประจำ (Routine test) การทำสอบจำเพาะ (Type test) และการทดสอบพิเศษ (Special test) โดยจะทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติไฟฟ้าแรงสูงที่ได้รับการยอมรับ องค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญในการปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงประกอบด้วย พื้นที่ทดสอบ (Testing area) เครื่องมือเครื่องใช้ทดสอบ (Testing equipment) และผู้ปฏิบัติการทดสอบ (Staff) โดยมีผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านไฟฟ้าแรงสูง (Expert engineer) เป็นผู้ควบคุมดูแลการปฏิบัติการ

การทดสอบไฟฟ้าแรงสูงแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การทดสอบแบบทำลาย และการทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งมีความแตกต่างกันที่หลังทำการทดสอบอุปกรณ์นั้นแล้วเกิดความเสียหายถาวรหรือเป็นเพียงการทดสอบเพื่อบันทึกคุณลักษณะจำเพาะของอุปกรณ์ตามเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้น ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจะต้องมีเครื่องมือเครื่องใช้ที่จำเป็นได้แก่ ระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบ (High voltage generation system) ที่รองรับการทดสอบได้ตามความต้องการ ระบบระบบวัดและเครื่องมือวัด (Instrument and measurement) ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) ทุกองค์ประกอบที่กล่าวมาต้องเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดเช่น การทดสอบด้วยแรงดันสูงทดสอบกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ 50 Hz ระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบจะต้องสร้างแรงดันสูงทดสอบได้ตามที่มาตรฐาน IEC 60060 [5] กำหนดเรื่องคุณลักษณะของรูปคลื่นแรงดันสูงทดสอบนั้น หรือการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะต้องอ้างอิงเงื่อนไขพื้นฐานการปฏิบัติการจากมาตรฐาน IEC 60270 [4] เช่น เครื่องมือเครื่องใช้ในการทดสอบจะต้องไม่ก่อให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือเกิดในปริมาณที่ยอมรับได้เช่น หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง (Testing transformer) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor) เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบจะต้องมีผลตอบสนองทางความถี่ครอบคลุมย่านการวัดดิสชาร์จบางส่วน หรือแม้แต่การจัดสภาวะในการทดสอบให้ตรงกับวงจรทดสอบที่มาตรฐานแนะนำไว้ ที่สำคัญอย่างยิ่งอีกประการหนึ่งคือระบบการต่อลงดิน (Grounding system) วงจรทดสอบในพื้นที่ทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จอาจต้องออกแบบติดตั้งแยกจากระบบบรากสายดินของอาคารปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงอื่นๆ นอกจากนี้หากมีข้อกำหนดอื่นใดเฉพาะตามแต่ละประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบจะต้องตรวจสอบอ้างอิงจากมาตรฐานเฉพาะอุปกรณ์นั้นๆ ร่วมด้วย เช่น IEC 60076 [1]

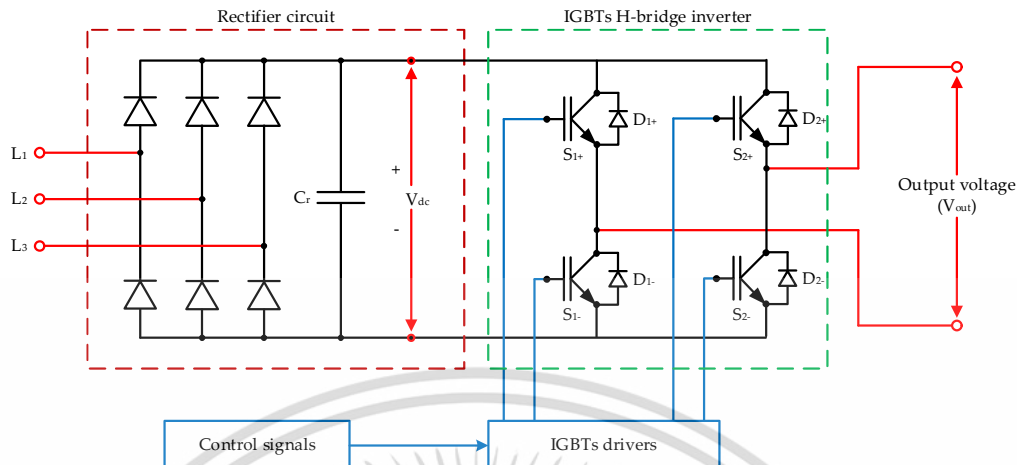
สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง IEC 61869-3 [6] สำหรับหม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดัน และ IEC 60502-2 [7] สำหรับสายเคเบิลกำลัง

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไป ในงานวิจัยที่ผ่านมา [8]-[16] มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนได้แก่ ส่วนสร้างแรงดันต่ำด้วยวงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) และหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง (HV testing transformer) ดังรูปที่ 3.1 ทำงานร่วมกันในการสร้างแรงดันสูงทดสอบกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้ โดยมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟส ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเก็บพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงไว้ในตัวเก็บประจุ (C) ซึ่งมีหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้แก่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเฟสเดียวรูปแบบ H – bridge โดยมีอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (switching device) ชนิด IGBTs (IGBTs H- bridge inverter) เป็นตัวควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรกำลัง และมีสัญญาณควบคุมมุมนำกระแสของ IGBTs จากไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรขับเกต (IGBTs gate driver) งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบสำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงไว้แล้วดังรายละเอียดในบทที่ 1 แต่ยังคงประสบกับปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีค่ายอมรับการเกิดดิสชาร์จในระดับที่ต่ำมากเช่น หม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดัน (Voltage transformer) และสายเคเบิลกำลัง (Power cable) แม้มีการนำเสนอทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการออกแบบวงจรรองความถี่ผ่านร่วมกับเทคนิควิธีการควบคุมแบบปรับรูปร่างพัลส์ (Pulse width modulation; PWM) ในลักษณะต่างๆ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าหลายชั้น (multi-level inverter) ถึงแม้จะให้ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ได้เป็นที่น่าพอใจ แต่ระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนมีระดับสูงใกล้เคียงกับระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่ยอมรับได้สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดัน และสายเคเบิลกำลัง จึงอาจมีความไม่น่าเชื่อถือในการทดสอบเมื่อองค์ประกอบในวงจรทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงเกินขอบเขต หรืออาจถูกรบกวนได้ง่ายจากสภาวะแวดล้อมการทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเหตุปัจจัยภายนอก



รูปที่ 3.1 วงจรหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงปรับความถี่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรภายในเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้ DC-link เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องดังรายละเอียดในบทที่ 1 พบว่า ในการนำเสนอผลการวิจัยที่ผ่านมา [6]-[16] ได้นำเสนอให้เป็นที่ประจักษ์แล้วว่า หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์บนพื้นฐานของเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) ร่วมกับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง (HV testing transformer) ดังรูปที่ 3.1 จำเป็นต้องมีวงจรกรองที่เหมาะสมทำงานร่วมด้วยเสมอ เนื่องจากมีสถานะสัญญาณรบกวนความถี่สูง ในระดับที่สูงสำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ลักษณะของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับลักษณะพัลส์การเกิดดิสชาร์จ (PD pulse) อย่างมีนัยสำคัญดังรายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อดิสชาร์จบางส่วน และงานวิจัย [15], [25] อย่างที่ทราบกันดีว่าระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างยิ่งดังนั้น การออกแบบระบบรบกวนสายดิน การต่อลงดิน และการป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้รับการออกแบบติดตั้งไว้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากประสบการณ์ของนักศึกษาผู้วิจัยและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์พบว่าระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในห้องปฏิบัติการนี้มีค่าต่ำกว่า 1 pC เมื่อมีการเชื่อมต่อวงจรทดสอบกับระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม และมีค่าต่ำกว่า 0.5 pC เมื่อติดตั้งวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยไม่เชื่อมต่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสแบบดั้งเดิม จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น ใช้เทคนิควิธีการควบคุมมุมนำกระแสของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรชนิด IGBTs ในลักษณะรูปแบบปรับปรุ้งความกว้างพัลส์ (PWM) ระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal wave) กับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular wave) ที่อัตราปรับปรุ้งความกว้างพัลส์ (Modulation index; m_a) 0.8 และ 1.0 ที่ความถี่สวิตซิ่ง (Switching frequency; f_s) ระหว่าง 1 – 20 kHz พบว่ามีนัยสำคัญต่อคุณภาพของสัญญาณแรงดันสูงทดสอบที่ได้ มีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) เป็นที่ยอมรับที่ระดับต่ำกว่า 5 % แต่ประสบกับปัญหา

สัญญาณรบกวนพื้นหลังในระดับ 100 pC ที่ระดับแรงดันสูงทดสอบเพียง 10 kV จึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรกรองความถี่เพื่อลดระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง มีการนำเสนอวงจรกรองในงานวิจัย [8]-[10], [12], [14], [15] ที่เงื่อนไขต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปเป็นรูปแบบวงจรกรองที่สามารถลดระดับสัญญาณรบกวนให้ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ระดับ 2.5 pC คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านรูปแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุ (LC filter) โดยมีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมแตกต่างกันตามแต่ละกรณีซึ่งส่งผลต่อค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังต่ำกว่า 2.0 pC ที่ระดับแรงดันสูงทดสอบ 40 kV (ค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้) ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์บนพื้นฐานของเทคนิคการควบคุมวงจรถ่ายแปลง ผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge (H – bridge inverter) แบบปรับปรุ้ความกว้างพัลส์ (PWM) พบว่า เมื่อความถี่สวิตซิง (Switching frequency; f_s) สูงขึ้นจะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ (C_c) ในส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC – link) มีค่าสูงขึ้นด้วยที่ระดับแรงดันสูงทดสอบเดียวกัน จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ได้สูงเพียงพอกับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ หากเลือกคุณลักษณะการปรับปรุ้ความกว้างพัลส์ไม่เหมาะสม และอาจทำให้อุปกรณ์สวิตซิง (IGBTs) ในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (inverter) เกินขอบเขตการทำงานได้ งานวิจัย [15] จึงสรุปและนำเสนอค่าการปรับปรุ้ความกว้างพัลส์ (PWM) ที่เหมาะสมคือ อัตราปรับปรุ้ความกว้างพัลส์ (Modulation index; m_a) 1.0 ที่ความถี่สวิตซิง (Switching frequency; f_s) 2 kHz ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal wave) กับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular wave) พร้อมด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) รูปแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุ (LC filter) ที่มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า 50 mH และค่าความจุไฟฟ้า 16 μ F ทำให้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนี้มีค่าความถี่ตัด (cutoff frequency) ประมาณ 900 Hz ในงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการการทำงาน ของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรที่ควบคุมด้วยเทคนิควิธีการปรับปรุ้ความกว้างพัลส์ (PWM) ได้นำเสนอผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบกระแสลับไว้ได้อย่างสอดคล้องกันอย่างน้อยหนึ่งข้อสำคัญ คือ ในประเด็นคุณภาพสัญญาณแรงดันสูงทดสอบสามารถปรับปรุ้ให้ได้คุณภาพตามความต้องการได้เป็นอย่างดีด้วยการควบคุมปัจจัยการปรับปรุ้ความกว้างพัลส์ (Modulation) ทั้งอัตราปรับปรุ้ความกว้างพัลส์ (Modulation index; m_a) และความถี่สวิตซิง (Switching frequency; f_s) ของรูปคลื่นไซน์และรูปคลื่นสามเหลี่ยม แต่สำหรับสัญญาณรบกวนพื้นหลังในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั้นไม่ว่าจะออกแบบวงจรกรองให้มีความถี่ตัดต่ำเพียงใดก็ไม่สามารถลดขนาดของสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ต่ำกว่า 2.0 pC ได้เลย ทั้งนี้ในการออกแบบเลือกค่าความถี่ตัดในวงจรกรองต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อนสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 - 400 Hz ด้วยเสมอ

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้ทบทวนวรรณกรรมมาแล้วนั้น มีปัจจัยหนึ่งที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกันคือ สัญญาณควบคุมมุนำกระแสของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรชนิด IGBTs ในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge (IGBTs H - bridge inverter) อยู่บนพื้นฐานของการปรับปรุงความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation; PWM) และนำมาควบคุมการตัดต่อวงจรของ IGBTs จากลักษณะของสัญญาณควบคุมแบบ PWM จะสังเกตเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับสัญญาณรูปขั้น (Step waveform) ซึ่งมีขอบขาขึ้น (Rise time) ขอบขาลง (Fall time) ของสัญญาณที่ไวมากหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า มีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดใกล้เคียงอุดมคติ ผนวกกับสัญญาณควบคุมนี้สร้างจากการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีพื้นฐานการทำงานแบบดิจิทัล (digital circuit) โดยการควบคุมของไมโครโพรเซสเซอร์ที่มีความถี่นาฬิกา (Clock speed) สูงมากเป็นหลายร้อยเมกะเฮิรต์ ดังนั้นขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณ PWM จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัญญาณนาฬิกาของไมโครโพรเซสเซอร์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ด้วยซึ่งในที่นี้จะมีความไวของขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณควบคุมแบบ PWM ประมาณ 3 ns อย่งไรก็ดี ในการขับขาเกทของ IGBTs จำเป็นต้องมีวงจรถับขาเกท (IGBTs gate driver) เพื่อให้สัญญาณควบคุม IGBTs ตรงกับกับคุณลักษณะของขาเกทของ IGBTs รหัส IXXN110N65B4H1 ด้วย ในวงจรถับขาเกท และคุณลักษณะจำเพาะของ IGBTs ที่เลือกใช้ บางส่วนอยู่บนพื้นฐานของวงจรถอนล๊อค ตัวต้านทานไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Passive device) ซึ่งจะมีขีดจำกัดอยู่ที่ค่าคงที่ทางเวลาของวงจร RLC จะมีค่าอยู่ในหลักไมโครวินาที (us) ประกอบกับความสามารถทางเวลาในการเปิดปิดวงจรของ IGBTs หลังจากได้รับคำสั่งจากสัญญาณควบคุมแบบ PWM ด้วยเหตุผลทั้งหมดนี้จึงเกิดเป็นส่วนพุ่งเกิน (Peak overshoot) ในระดับสูง และเกิดตลอดช่วงเวลาที่มีการเปิดปิดวงจรที่ความถี่สูงซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่สวิชชิง (Switching frequency; f_s) โดยทั่วไปในการออกแบบวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (inverter) สำหรับการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจะคำนึงถึงค่าความสูญเสียทางพลังงานในรูปความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Switching device) และการเกิดการลัดวงจรในกิ่งเดียวของวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าเท่านั้น การแก้ปัญหาในส่วนนี้สามารถใช้การออกแบบวงจรป้องกันไฟกระชาก (Snubber circuit) เพื่อจำกัดขนาดของส่วนพุ่งเกินที่เกิดขึ้นจากการทำงานของ IGBTs ที่ความถี่สูงได้ โดยในงานวิจัย [16] ได้นำเสนอวงจรถับขาเกทไฟกระชาก (Snubber circuit) ที่เหมาะสมสำหรับ IGBTs รหัส IXXN110N65B4H1 ไว้ก่อนหน้าแล้ว วงจรถับขาเกทไฟกระชากที่ได้นำเสนอไว้ในรูปแบบตัวต้านทานไฟฟ้าตัวเก็บประจุไฟฟ้า (RC Snubber) ที่มีค่าความต้านทาน 39 Ω และค่าความจุไฟฟ้า 75 nF และมีไดโอดป้องกันไฟกระชาก (Diode snubber) ภายในตัว IGBTs ที่เลือกใช้ร่วมทำหน้าที่จำกัดขนาดของส่วนพุ่งเกินที่เกิดขึ้นไว้เหมาะสมแล้ว อย่งไรก็ดีส่วนพุ่งเกิน (Peak overshoot) ก็ยังคงมีอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge (IGBTs H – bridge inverter)

จากคุณลักษณะของพัลส์การเกิดดิซชาร์จ (PD pulse) ตามทฤษฎีในบทที่ 2 และส่วนพุ่งเกิน (Peak overshoot) ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของ IGBTs ด้วยสัญญาณควบคุมแบบ PWM มีลักษณะคล้ายคลึงกันมากในลักษณะของรูปคลื่นไซน์หน่วงการแกว่ง (Damped Sine Wave) และมีความสัมพันธ์ทางเวลากันคือเกิดในช่วงเวลานาโนวินาที (ns) ทำให้เกิดเป็นข้อสังเกตว่าในงานวิจัยที่ผ่านมาไม่สามารถลดค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังได้ต่ำกว่า 2.0 pC ด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในหลายรูปแบบ จึงตั้งเป็นสมมติฐานหนึ่งว่า สัญญาณควบคุมแบบ PWM เป็นตัวการหนึ่งที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วน ดังนั้น หากเลือกใช้สัญญาณควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันน้อยครั้งลง และมีความแตกต่างของระดับแรงดันไม่มากนัก จะทำให้สัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนลดลงด้วยอย่างเป็นเหตุเป็นผล จากข้อสมมติฐานนี้สัญญาณควบคุมที่มีความเป็นไปได้อย่างสูงสุดคือ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave)

จากข้อสมมติฐานเรื่องสัญญาณควบคุม IGBTs ส่งผลต่อระดับของสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วน และสรุปว่าสัญญาณควบคุมที่มีความเป็นไปได้อย่างสูงสุดในการลดสัญญาณรบกวนคือ สัญญาณควบคุมแบบจัตุรัส (Square wave) ต่อมาจะต้องพิจารณา รูปคลื่นแรงดันจ่ายออก (Output voltage) จากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (inverter) อย่างที่ทราบกันดีว่าแรงดันไฟฟ้าจ่ายออกจากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกับสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตชิ่งนั้น จึงต้องหาวิธีที่จะทำให้แรงดันไฟฟ้าจ่ายออกรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave output voltage) จากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (inverter) ควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) มีรูปคลื่นตรงตามความต้องการใช้แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์

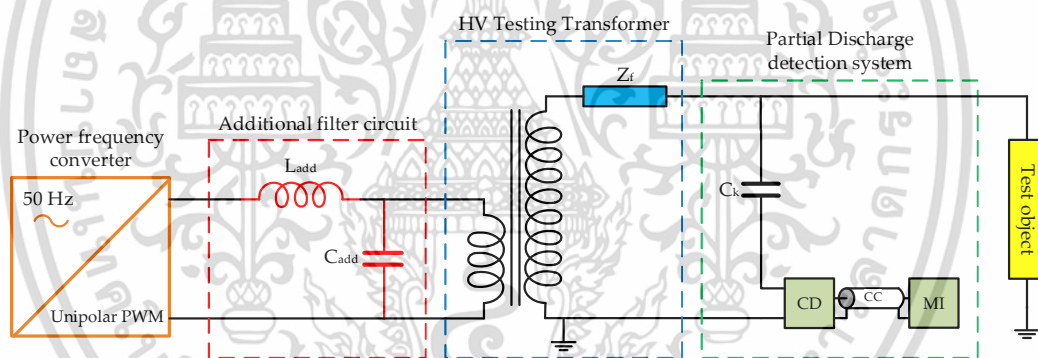
จากพื้นฐานการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับของ RLC ด้วยการพิจารณาคคุณลักษณะทางความถี่ของวงจรไฟฟ้าพบว่า จะมีค่าความถี่หนึ่งของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับป้อนเข้าวงจรไฟฟ้า RLC ทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductive reactance; X_L) และรีแอกแตนซ์ของความจุไฟฟ้า (Capacitive reactance; X_C) มีค่าเท่ากัน ทำให้เกิดการหักล้างกันระหว่างอิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductive impedance; Z_L) และอิมพีแดนซ์ของความจุไฟฟ้า (Capacitive impedance; Z_C) เป็นศูนย์ อิมพีแดนซ์ (Z) ของวงจรไฟฟ้า RLC จึงมีค่าคงเหลือเพียงค่าความต้านทานของตัวต้านทานไฟฟ้า (R) เท่านั้น ($Z = R$) ความหมายทางกายภาพคือ การกักเก็บพลังงานจะถูกถ่ายเทกลับไปกลับมาระหว่างรูปแบบสนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุไฟฟ้าและรูปแบบสนามแม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยไม่มีการถ่ายเทแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกอีก แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดการไหลผ่านวงจรนี้ด้วยความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานไฟฟ้าในวงจรเท่านั้น อิมพีแดนซ์ของวงจรไฟฟ้า RLC ที่สภาวะนี้จะมีค่าต่ำที่สุด เรียกสภาวะทางวงจรนี้ว่า สภาวะเรโซแนนซ์ในวงจรไฟฟ้า RLC และ ค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับป้อนเข้านี้เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์

จากแนวความคิดของวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ RLC และสัญญาณควบคุมมมูนำกระแส IGBTs รูปแบบสัญญาณจัตุรัส (Square wave) จะพบว่ามีความสอดคล้องกันในแง่ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าจ่ายออกจากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (IGBTs H – bridge inverter) กลับไปกลับมาตามรูปแบบของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส คล้ายเงา (Projection) ของการเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นหากเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าจ่ายออกจากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องทางเวลา และสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงแล้วนั้น จะทำให้สามารถสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal wave) ที่ความถี่ตรงกับความต้องการในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในหัวข้อตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ เมื่อสามารถควบคุมและกำหนดค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนให้อยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ทางวงจรไฟฟ้า RLC และกำหนดความถี่ของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ตรงตามความต้องการแรงดันสูงทดสอบ ที่ความถี่เรโซแนนซ์เดียวกันได้ จะทำให้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยมีค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ในระดับที่ต่ำมาก เพียงพอต่อการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีค่าการยอมรับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD acceptable level) ในระดับต่ำมากได้ เช่น หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) และ สายเคเบิลกำลัง (Power cable)

จากการทบทวนวรรณกรรม วิเคราะห์ทางวงจรไฟฟ้า พิจารณาคุณลักษณะการควบคุมมมูนำกระแสของ IGBTs ที่เลือกใช้ จึงสรุปเป็นทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ จะใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap adjustable inductor) แทนที่ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าค่าคงที่ในวงจรกรองความถี่ (Filter circuit) ทำหน้าที่ปรับแต่งวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนให้อยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ทางวงจรไฟฟ้า RLC และกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (inverter) เรียกชื่อวงจรนี้ใหม่เป็น วงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ (Tuning and filter circuit) ทั้งนี้จะยังคงรูปแบบวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์บนพื้นฐานของวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุไฟฟ้า (LC filter) จากนั้นจะป้อนสัญญาณควบคุมมมูนำกระแส IGBTs ในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H – bridge (IGBTs H – bridge inverter) ด้วยสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ความถี่ตรงกับสัญญาณแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ เพื่อยืนยันทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยจะนำเสนอผลการออกแบบและการวิเคราะห์ผลการออกแบบที่แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ความถี่ 200 Hz เป็นสำคัญ

3.1 การวิเคราะห์วงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

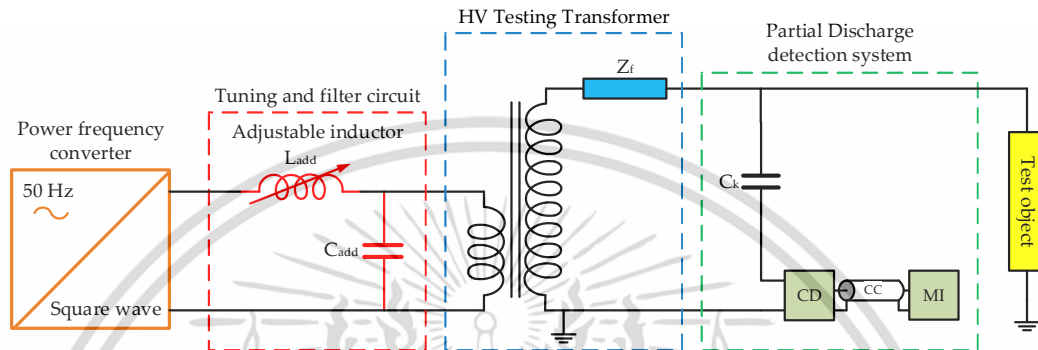
วงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีจุดมุ่งหมายจะนำเสนอหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) ควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมแบบ Unipolar PWM ร่วมกับวงจรกรองความถี่ (Filter circuit) ที่เหมาะสม ซึ่งพัฒนาขึ้นในงานวิจัยที่ผ่านมา [15] มาใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้ จ่ายแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง (HV testing transformer) พิกัดกำลังไฟฟ้า 40 kVA พิกัดแรงดัน 75 kV/460 V จ่ายแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ให้กับระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge detection system) ตามมาตรฐาน IEC60270 [4] ซึ่งประกอบด้วยเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor; C_k) ที่มีค่าความจุไฟฟ้า 1 nF ต่ออนุกรมกับชุดวัดภาคแรงต่ำได้แก่ อุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device; CD) อ่านค่าการวัดสัญญาณผ่านสายเคเบิล (Connecting cable; CC) และเครื่องมือวัดภาคแรงต่ำ (Measurement and instrument; MI) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผังการต่อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคนิคควบคุมแบบ Unipolar PWM ในระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นที่จะนำเอาแนวคิดของวงจรไฟฟ้าอนุกรมของ RLC ที่สภาวะเรโซแนนซ์ (Series RLC resonance circuit) โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap adjustable inductor) ร่วมกับตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้าค่าคงที่ (Fixed capacitor) ปรับแต่งการเกิดเรโซแนนซ์และกรองสัญญาณรบกวนในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์เป็นแหล่งจ่ายแรงดันสูงทดสอบ ดังรูปที่ 3.4 สร้างแรงดันสูงทดสอบกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้ โดยพิจารณาคุณลักษณะทางความถี่ในวงจรสมมูลรวมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น ร่วมกับเทคนิควิธีการควบคุมมุนำกระแสของ IGBTs ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟารูปแบบ H-bridge (IGBTs H-bridge inverter) ด้วยสัญญาณควบคุม

รูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ทั้งนี้จะต้องพิจารณาคุณลักษณะทางความถี่ให้สอดคล้องกับคุณลักษณะทางความถี่ของวงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามที่มาตราฐาน IEC60270 [4] ยอมรับ และระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมีค่าต่ำเพียงพอสำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบ



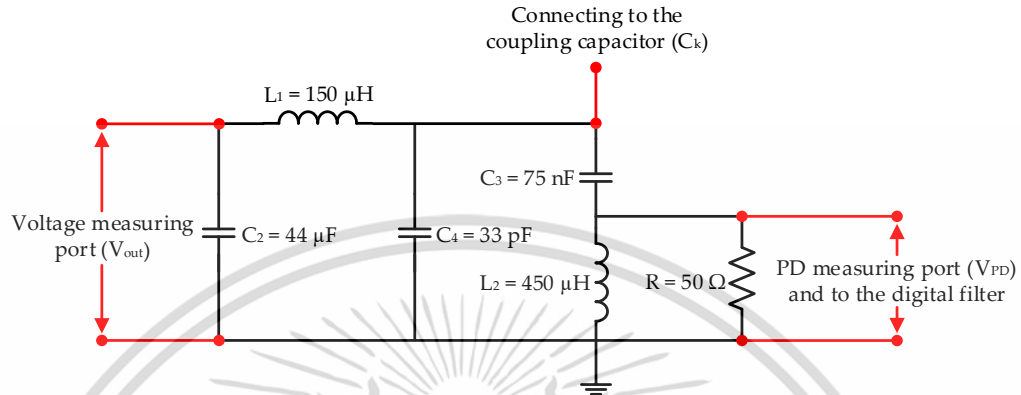
รูปที่ 3.4 ผังการต่อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคนิคควบคุมแบบ เรโซแนนซ์ ในระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

3.1.1 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน

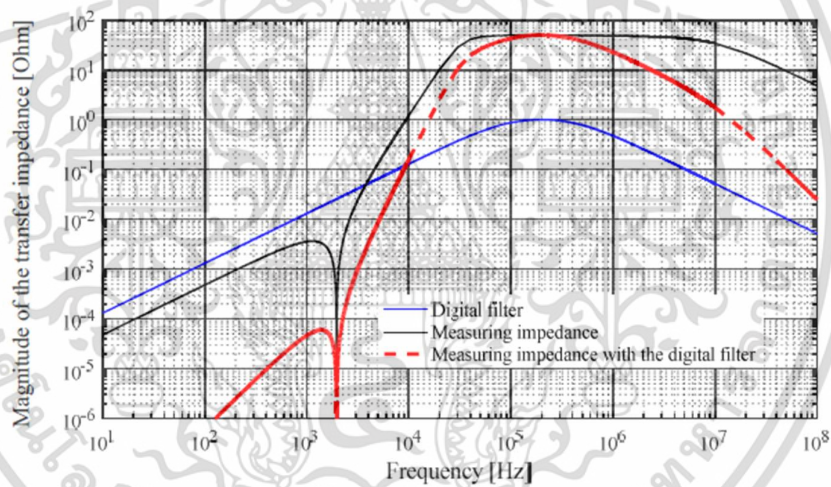
วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 [4] ภาคแรงสูง ประกอบด้วยตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor; C_k) ต่ออนุกรมกับอุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device; CD) ซึ่งมีหน้าที่สำคัญได้แก่ วัดค่าแรงดันสูงทดสอบกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ตกคร่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) ในลักษณะเช่นเดียวกับตัวแบ่งแรงดัน (Voltage divider) โดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบส่งค่าการวัดผ่านช่องสัญญาณ (V_{out}) ไปยังเครื่องมือวัดภาคแรงต่ำ และวัดค่ากระแสดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบส่งค่าการวัดผ่านช่องสัญญาณ (V_{pd}) ไปยังเครื่องมือวัดภาคแรงต่ำ แสดงผลการวัดด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ Omicron MPD600.1 ภายในอุปกรณ์คาบเกี่ยวประกอบด้วยอิมพีแดนซ์วัด (Measuring impedance) ต่างๆ แสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.5 พิจารณาอิมพีแดนซ์วัดร่วมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor; C_k) ที่มีค่าความจุไฟฟ้า 1 nF พบว่ามีคุณลักษณะทางความถี่ของวงจรเป็นแบบช่วงความถี่ผ่าน (band-pass) โดยมีคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน (transfer impedance) ที่มีความถี่ตัดด้านต่ำ (low cutoff frequency) 30 kHz ถึงความถี่ตัดด้านสูง (High cutoff frequency) 20 MHz ดังรูปที่ 3.6 เส้นสีดำ อย่างไรก็ตามช่วงแถบกว้างความถี่ผ่านดังกล่าวอาจส่งผลให้สัญญาณรบกวนภายในวงจรไฟฟ้ารบกวนการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ มาตรฐาน [4] จึงแนะนำให้ใช้การกรองความถี่ที่เหมาะสมร่วมด้วย จึงเลือกใช้การกรองแบบดิฟเฟอเรนเชียลในซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ Omicron MPD600.1 ที่มีช่วงแถบกว้างความถี่ผ่านในช่วง 100 – 400 kHz คุณลักษณะอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายโอน (transfer impedance) ดังรูปที่ 3.6 เส้นสีฟ้า ทำให้คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน (transfer impedance) รวมของอุปกรณ์คัปเปิล (Coupling device; CD) ร่วมกับการกรองแบบดิจิทัลในซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ Omicron MPD600.1 เป็นดังรูปที่ 3.6 เส้นสีแดง

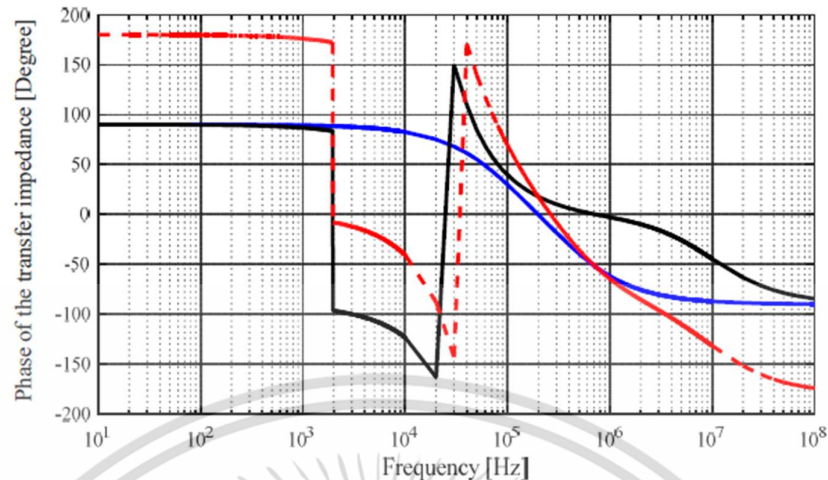


รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลภายในอุปกรณ์คัปเปิล (Coupling device; CD)



(ก) ขนาดแอมพลิจูดสูงสุดของอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



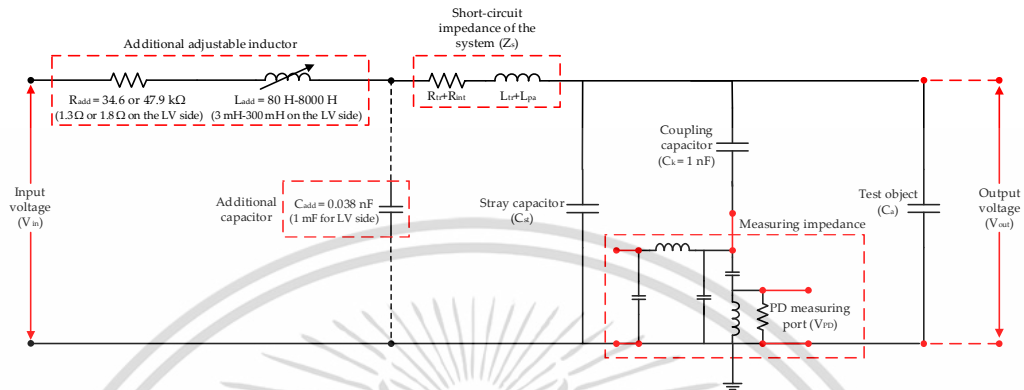
(ข) มุมเฟสของอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน

รูปที่ 3.6 อิมพีแดนซ์ถ่ายโอนในวัฏจักรความถี่ของอิมพีแดนซ์วัด

3.1.2 การวิเคราะห์วงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์

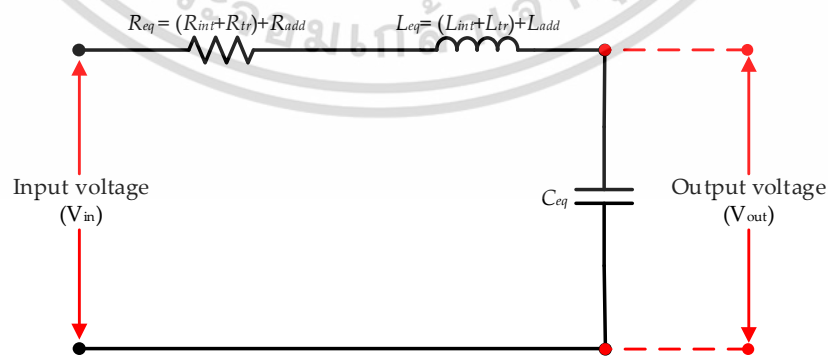
จากระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะนำมาศึกษา เทคนิควิธีการควบคุม และการจัดองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรให้อยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance) ตามรูปแบบของวงจรไฟฟ้าอนุกรม RLC ที่สภาวะเรโซแนนซ์ โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap adjustable inductor) ในการปรับแต่งเรโซแนนซ์ในวงจรสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ จึงจำเป็นต้องนำองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ (Tuning and filter circuit) รูปแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุ (LC circuit) วงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบ (HV testing transformer) และวงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD detection circuit) มาพิจารณาและวิเคราะห์ทางวงจรไฟฟ้าร่วมกัน โดยทำการถ่ายโอนอิมพีแดนซ์ทั้งหมดจากภาคแรงต่ำไปยังภาคแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบ เขียนใหม่เป็นวงจรสมมูลรวมของระบบที่นำมาพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.7 ทั้งนี้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ (Adjustable inductor) และตัวเก็บประจุค่าคงที่ค่าหนึ่ง (Fixed capacitor) ที่เลือกใช้จะต้องมีค่าเหมาะสมทำให้เกิดการเกิดเรโซแนนซ์ทางวงจรไฟฟ้าครอบคลุมทุกค่าความถี่ของแรงดันสูงทดสอบที่ต้องการใช้ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาช่วงความถี่ของแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz เป็นสำคัญ เพื่อพิจารณาและวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน อย่างไรก็ตามก็ต้องคำนึงถึงค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝง (Parasitic inductance) และค่าความจุไฟฟ้ารั่วไหล (Stray capacitance) ในวงจรทดสอบด้วย นอกจากนี้ยังมีค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าบางค่าที่ไม่สามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้องแม่นยำด้วยเครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์แบบดั้งเดิม จึงไม่ได้นำมาแสดงไว้ในวงจรสมมูลรวมและกำหนดค่าอย่างแม่นยำในการ

วิเคราะห์ทางวงจรและจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ จึงจำเป็นต้องปรับค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรสมมูลรวมสำหรับการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ให้สอดคล้องกับผลการทดสอบโดยคำนึงถึงความถูกต้องเป็นสำคัญ



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบที่ถ่ายโอนอิมพีแดนซ์มายังภาคแรงสูง

จากรูปที่ 3.7 พิจารณาวงจรสมมูลรวมซึ่งถูกถ่ายโอนอิมพีแดนซ์มายังภาคแรงสูงทุกค่าแล้ว จะมีลักษณะทางวงจรเหมือนวงจรอนุกรมของ RLC ดังรูปที่ 3.8 เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางวงจรไฟฟ้าแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบ RLC จะได้ว่า ค่าความต้านทานสมมูลของวงจร (R_{eq}) คือผลรวมของค่าความต้านทานภายในของระบบ (R_{int}) ค่าความต้านทานรวมอนุกรม (R_{tr}) ของหม้อแปลงทดสอบแรงสูง และค่าความต้านทานภายใน (R_{add}) ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ในวงจรรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสมมูล (L_{eq}) คือผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใน (L_{int}) ของระบบ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ารวมอนุกรม (L_{tr}) ของหม้อแปลงทดสอบแรงสูง และค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใน (L_{add}) ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ในวงจรรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล (C_{eq}) คือผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทดสอบ รวมถึงผลจากค่าความจุไฟฟ้ารั่วไหล (Stray capacitance) ของระบบทดสอบด้วย



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลแบบง่ายของระบบทดสอบในรูปแบบวงจรอนุกรมของ RLC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.8 การเกิดเรโซแนนซ์ในวงจรอนุกรมของ RLC ทางทฤษฎี จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรสมมูลเป็นไปตามสมการ (3.1) ดังนั้นหากทราบค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใน (L_{int}) และค่าความเหนี่ยวนำไฟฟารวมอนุกรม (L_{tr}) ของหม้อแปลงทดสอบแรงสูง ที่ถูกต้องแม่นยำ จะคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ต้องการใช้ในการสร้างแรงดันสูงทดสอบที่ความถี่ที่ต้องการได้จากสมการ (3.1) และ (3.2) อัตราขยายแรงดันสูงทดสอบที่สภาวะเรโซแนนซ์ในวงจรทดสอบจะกำหนดได้ด้วยค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor; Q) ของวงจรเรโซแนนซ์แบบ RLC ดังสมการ (3.3)

$$L_{eq} = \frac{1}{\omega^2 C_{eq}} \quad (3.1)$$

$$L_{eq} = (L_{int} + L_{tr}) + L_{add} \quad (3.2)$$

$$Q = \frac{\sqrt{L_{eq}/C_{eq}}}{R_{eq}} \quad (3.3)$$

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ ในวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ มีทางเลือกในการปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้หลายวิธีเช่น การปรับรอบของขดลวดที่ใช้ในตัวเหนี่ยวนำโดยการปรับแท็บ (Tab) หรือสร้างขดลวดหลัก (Main coil) ให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าตามที่ต้องการ และมีขดลวดช่วย (Auxiliary coil) เพื่อการปรับเพิ่ม ปรับลดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า หรือเป็นการปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบหยาบ แบบละเอียด ในลักษณะเสริมกันหรือหักล้างกันของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) ในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในลักษณะนี้เหมาะสมกับวงจรที่ต้องการค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่แน่นอน ไม่แปรผันตามค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าอื่นในวงจรหลักเช่น ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝง (Parasitic inductance) ในการจัดองค์ประกอบของวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน นอกจากนี้สมการ (3.3) แสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสมมูล (L_{eq}) ของวงจร และค่าความต้านทานสมมูล (R_{eq}) ของวงจร ดังนั้นหากต้องการกำหนดให้ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) มีค่าคงที่ตามที่ต้องการ หากต้องควบคุมให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูล (R_{eq}) มีค่าคงที่ ก็จำเป็นต้องควบคุมให้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้มีค่าความต้านทานภายใน (R_{add}) มีค่าคงที่ด้วย ดังสมการ (3.4) วิธีการปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าในลักษณะนี้จึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาออกแบบตัวต้านทานปรับค่าได้ในวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์แบบ RLC

$$R_{eq} = (R_{int} + R_{tr}) + R_{add} \quad (3.4)$$

การปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์แบบ RLC อีกรูปแบบหนึ่งที่มีความน่าสนใจอย่างยิ่งคือ การปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยช่องว่างอากาศ เพราะสามารถออกแบบและควบคุมความต้านภายใน (R_{odd}) ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ โดยการออกแบบขดลวดให้มีความยาวลวดคงที่ได้ ทั้งขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของลวดที่นำมาใช้ด้วยเมื่อคุณภาพของลวดคงที่ และต้องมีความสัมพันธ์เหมาะสมกับพิกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power; S) ด้วย จากค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.7 เงื่อนไขการเข้าสภาวะเรโซแนนซ์ในวงจรแบบ RLC ความต้องการอัตราขยายของแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ที่ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 3 ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 50 ถึง 200 Hz สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน และสายเคเบิลกำลัง และการประมาณค่าความจุไฟฟ้าสมมูล (C_{eq}) ในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน มีค่าไม่เกิน 2 nF จึงสรุปผลการวิเคราะห์วงจรทดสอบได้ว่าจะต้องออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ ที่มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ในช่วง 3 – 300 mH

3.1.3 ตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ

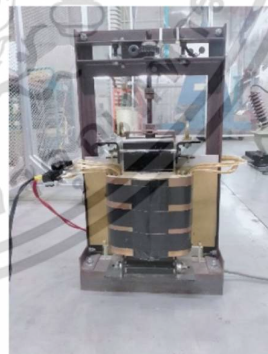
จากการวิเคราะห์ระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ที่สร้างจากเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้างดรูปที่ 3.4 พบว่า เงื่อนไขสภาวะเรโซแนนซ์ทางวงจรไฟฟ้ารูปแบบ RLC อนุกรม จะเกิดขึ้นได้นั้น จะต้องนำเอาวงจรกรองความถี่ผ่าน (Additional filter circuit) แบบดั้งเดิมจากงานวิจัยที่ได้ทบทวนวรรณกรรมไว้ วงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบ (HV testing transformer) และวงจรสมมูลของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน มาพิจารณาร่วมกันในรูปแบบวงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบ ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งถ่ายโอนอิมพีแดนซ์ทุกค่าทางด้านแรงต่ำไปยังด้านแรงสูงแล้ว พบว่าจะอยู่ในรูปแบบสมมูลอย่างง่าย ดังรูปที่ 3.8 พิจารณาองค์ประกอบทางไฟฟ้าในส่วนวงจรกรองความถี่แบบดั้งเดิม (Additional filter circuit) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ละเอียดในย่านการปรับที่กว้างมีความยืดหยุ่นสูง และสะดวกที่สุดขณะทำการทดสอบ คือ องค์ประกอบของความเหนี่ยวนำไฟฟ้าซึ่งได้จากตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในวงจรกรองความถี่ ดังนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ทางวงจรไฟฟ้าในช่วงความถี่ 50 – 200 Hz ตรงกับความต้องแรงดันสูงทดสอบปรับความถี่ได้ และจะให้ความสำคัญที่ความถี่ 200 Hz เป็นสำคัญ สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) ได้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ทำให้วงจรสมมูลรวมระบบทดสอบรูปที่ 3.7 และวงจรสมมูลอย่างง่ายรูปที่ 3.8 อยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ทางวงจรไฟฟ้า RLC อนุกรมมีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 – 300 mH จึงประกอบสร้างเป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap adjustable inductor) ดังรูปที่ 3.9 โดยมีกลไกการปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าผ่านการปรับระยะห่างช่องว่างอากาศด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อความสะดวกและปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ ถูกออกแบบให้มีความสมมาตรกันทาง วงจรไฟฟ้าโดยแบ่งขดลวด (Coils) ออกเป็นสองขดสวมลงแกนเหล็กแผ่นซ้อนอัดกัน (Core) ขดขด ลวดเต็มขดถูกออกแบบให้มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสูงสุดตามที่ต้องการคือ 300 mH และแท็บ ขดลวดออกมาเป็นช่วงค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าย่อยจำนวน 4 ช่วงการปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า เสมือนเป็นทางเลือกในการใช้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสำหรับปรับแต่งเรโซแนนซ์ในวงจรทดสอบ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีค่าคุณลักษณะจำเพาะทางไฟฟ้าแตกต่างกัน จากนั้นจะทำการปรับระยะห่าง ช่องว่างอากาศในการปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอย่างละเอียด (Fine tune) ในการปรับแต่งเรโซแนนซ์ในวงจรทดสอบอีกครั้งขณะจ่ายแรงดันสูงทดสอบเริ่มต้น เมื่อเกิดการเรโซแนนซ์สูงสุดในวงจร ทดสอบเริ่มต้นแต่ละครั้งแล้ว จึงจะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC-link) ในเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) จนได้ระดับแรงดันสูง ทดสอบเป้าหมายตามที่ต้องการ พิจารณาคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ และค่า สัญญาณรบกวนพื้นหลัง ด้วยซอฟต์แวร์สำเร็จรูป MPD 600.1 สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิด ดิสชาร์จบางส่วน ดังรูปที่ 3.4 ทั้งขณะไม่มีการติดตั้งวัตถุทดสอบ (Without test object) และติดตั้ง วัตถุทดสอบ (With test object)

จากการทดสอบพบว่า ความต้องการปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าในช่วง 3 – 300 mH และ นำมาออกแบบประกอบสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ ให้ผลการทดสอบเป็นที่ น่าพอใจ ตอบโจทย์ความต้องการใช้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสำหรับปรับแต่งเรโซแนนซ์ในวงจร ทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้เป็นอย่างดี และปรับแต่งหาสภาวะเรโซแนนซ์ได้อย่าง ละเอียดและแม่นยำด้วยผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจะนำเสนอผลการทดสอบโดยละเอียดในบทที่ 4



(ก) ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้
ด้วยขดลวด



(ข) ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้
ด้วยช่องว่างอากาศ



(ค) กลไกมอเตอร์ปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า



(ง) ระยะช่องว่างอากาศ

สำหรับปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า

รูปที่ 3.9 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ ที่พัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะ

3.1.4 การวิเคราะห์สัญญาณควบคุมมุมนำกระแส

จากรูปที่ 3.8 วงจรสมมูลแบบง่ายของระบบทดสอบในรูปแบบวงจรอนุกรมของ RLC และการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วน ด้วยการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏชัดเจนและไม่ปรากฏเด่นชัดในวงจรทดสอบ พบว่าประกอบด้วยค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าทั้งสามค่าองค์ประกอบได้แก่ ค่าความต้านทานไฟฟ้า ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งมีผลตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้าที่แตกต่างกันในวัฏจักรความถี่ ทำให้วงจรทดสอบมีผลตอบสนองทางความถี่รวมทุกองค์ประกอบทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางความถี่ทั้งขนาดของแอมพลิจูดสูงสุดและมุมเฟสของอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน อย่างไรก็ตาม สัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้า (Input signal) และสัญญาณไฟฟ้าจ่ายออก (Output signal) จะต้องพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมกับแนวคิดของการใช้หลักการของวงจรเรโซแนนซ์แบบ RLC และเป้าหมายของการสร้างแรงดันสูงทดสอบสำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วย

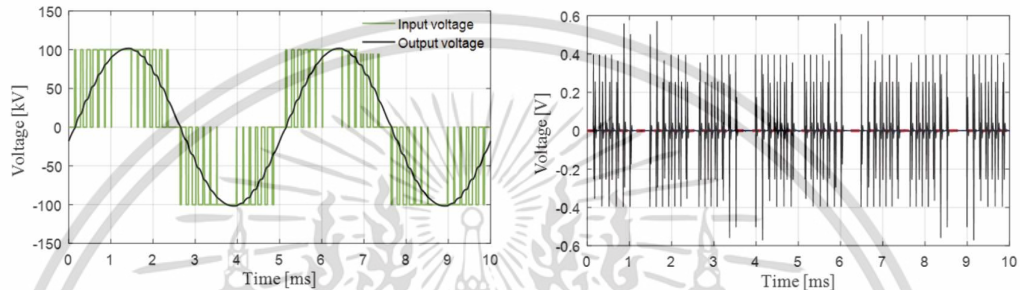
จากทฤษฎีวงจรเรโซแนนซ์แบบ RLC ในบทที่ 2 พบว่า สภาวะเงื่อนไขของการเกิดเรโซแนนซ์ในวงจรเรโซแนนซ์แบบ RLC ประการแรกก็คือ สัญญาณป้อนเข้าวงจรอนุกรมแบบ RLC จะต้องเป็นสัญญาณแบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Signal) ที่มีค่าความถี่ของสัญญาณสัมพันธ์กับความถี่การใช้แรงดันสูงทดสอบในระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้แก่ หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน และสายเคเบิลกำลัง ตามมาตรฐานการทดสอบพบว่ามีการใช้แรงดันสูงทดสอบกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ในช่วง 50 – 400 Hz จึงสรุปได้ว่าสัญญาณไฟฟ้าจ่ายออกคือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้

เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) มีหน้าที่หลักในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้า

ภายในเครื่องแปลงผันพลังงานไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์จะมีส่วนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวเชื่อมวงจร (DC-Link) ดังนั้นรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้าจ่ายออกจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H - bridge (IGBTs H – bridge inverter) ดังรูปที่ 3.2 สามารถควบคุมได้จากแหล่งกำเนิดสัญญาณควบคุม (Control signal generator) ผ่านวงจรขับ IGBTs (IGBTs driver) เพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานสูงสุดรูปแบบสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Signal) จึงมีความสำคัญ อย่างที่ทราบกันว่า ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ค่าพลังงานไฟฟ้า (P) เกิดจากผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน (V) กับกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่เวลาใดใด ด้วยเหตุนี้ ที่สภาวะเรโซแนนซ์ของวงจร RLC แบบอนุกรมสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) จะทำให้การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าผ่านความต้านทานสมมูลรวม (R_{eq}) ของวงจรดังรูปที่ 3.8 มีค่าสูงสุดในคาบเวลาเดียวกัน เสมือนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจาก ค่าประสิทธิผลรากที่สองเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้า (V_{rms}) เท่ากับ ค่ายอดของรูปคลื่นจัตุรัส (V_{pk}) เท่ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) ในส่วน DC-link ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้างดรูปที่ 3.2 และค่าประสิทธิผลรากที่สองเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (I_{rms}) ของรูปคลื่นจัตุรัส มีค่าคงที่ในคาบเวลาเดียวกัน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ พื้นที่ใต้กราฟของรูปคลื่นจัตุรัสมีค่าสูงสุด เมื่อเทียบกับรูปคลื่นอื่นที่มีความต่อเนื่องทางเวลาเช่นเดียวกัน เช่น รูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal waveform) รูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular waveform) หากพิจารณาในประเด็นองค์ประกอบของรูปคลื่นจัตุรัสจะพบว่า ประกอบด้วยผลรวมรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล (Fundamental frequency) กับรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าในลำดับเลขคี่ของความถี่หลักมูลเป็นจำนวนมาก โดยมีขนาดแอมพลิจูดของรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูลสูงสุด จากเหตุผลประกอบการเลือกใช้รูปคลื่นสัญญาณจัตุรัส (Square wave) ควบคุมมอดูเลชันกระแส IGBTs รูปแบบ H – bridge สำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าจ่ายออกจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้างดรูปที่ 3.2 อาจมีปัญหาต่อเนื่อง เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากผลของอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลา (dV/dt) ที่เวลาขาขึ้น (Rise time) และที่เวลาขาลง (Fall time) ของแรงดันจ่ายออกจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามีค่าสูง อาจก่อให้เกิดแรงดันพุ่งเกิน (Overshoot, spike) เนื่องจากความเร็วในการเปิดปิดวงจรของ IGBTs รหัส IXN110N65B4H1 มีขีดจำกัด ปัญหานี้อาจถูกจำกัดได้ด้วยวงจรป้องกันไฟกระชากแบบ RC (RC snubber) โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์ถ่ายโอนในวัฏจักรความถี่ของวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และยังคงใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ เพื่อหาสภาวะโซแนนซ์ในวงจรทดสอบได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [15] นำเสนอหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์บนพื้นฐานของเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) ที่ใช้เทคนิคควบคุมแบบ Unipolar PWM ดังรูปที่ 3.3 พบว่า ผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.10(ก) ให้ผลที่ชัดเจนว่า สัญญาณแรงดันจ่ายออกจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Inverter) รูปแบบ Unipolar PWM ส่งผลต่อสัญญาณจ่ายออกจากช่องวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (V_{pd}) ของอุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device; CD) ดังรูปที่

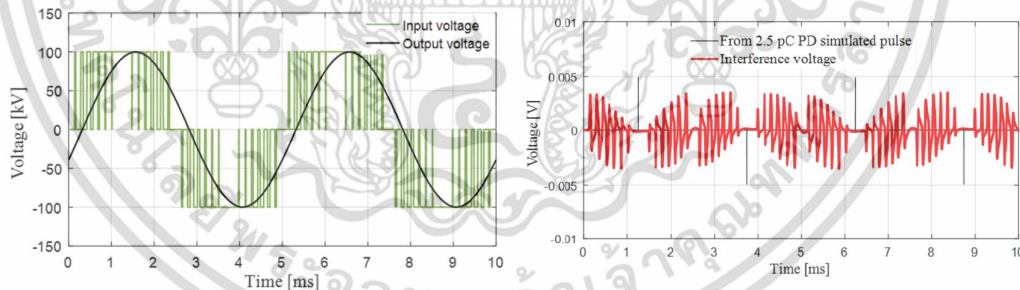
3.10(ข) ขณะไม่มีวงจรกรองความถี่เพิ่มเติม (without the additional filter) จากนี้งานวิจัยเดียวกันนี้ได้นำเสนอผลการจำลองป้อนพัลส์ดีซิสซาร์จบางส่วน (PD pulse) ขนาด 2.5 pC จากอุปกรณ์ปรับเทียบ (PD Calibrator) พบว่า สัญญาณรบกวนที่ช่องวัดสัญญาณดีซิสซาร์จบางส่วน (V_{PD}) มีขนาดใกล้เคียงกับพัลส์ดีซิสซาร์จบางส่วน (PD pulse) ขนาด 2.5 pC ที่ป้อนเข้าระบบ ผลการจำลองดังรูปที่ 11 ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ในระบบตรวจจัดการเกิดดีซิสซาร์จบางส่วนซึ่งนำเสนอผลการทดสอบไว้ในบทที่ 4



(ก) ผลการจำลองป้อนสัญญาณ Unipolar PWM เป็นสัญญาณป้อนเข้า และวัดสัญญาณจ่ายออกจากวงจร Inverter

(ข) ผลการจำลองวัดสัญญาณไฟฟ้าจ่ายออกจากช่องสัญญาณ (V_{PD}) ของอุปกรณ์คัปเปิล (Coupling device)

รูปที่ 3.10 ผลการจำลองป้อนสัญญาณ Unipolar PWM ขณะไม่ติดตั้งวงจรกรองความถี่เพิ่มเติม (Without additional filter circuit)[15]



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.11 ผลการจำลองป้อนสัญญาณ Unipolar PWM และป้อนป้อนพัลส์ดีซิสซาร์จบางส่วน (PD pulse) ขณะติดตั้งวงจรกรองความถี่เพิ่มเติม (With additional filter circuit)[15]

จากที่ได้นำเสนอผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ในงานวิจัย [15] เพื่อความเข้าใจยิ่งขึ้น ดังนั้นเพื่อลดปัญหาการรบกวนเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สวิชซึ่งความไวสูง ความถี่สูง และเหมาะสมกับการจัดสถานะทางวงจรไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบวงจรเรโซแนนซ์ สัญญาณควบคุมม้วนนำกระแสของ IGBTs ที่คาดว่าจะมีประสิทธิผลสูงสุด ที่สภาวะเรโซแนนซ์ทางวงจร และไม่ก่อให้เกิด

ปัญหาการรบกวนช่องสัญญาณวัดดิซาร์จบางส่วน (V_{pd}) จนอาจส่งผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับดิซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ที่มีค่าการยอมรับการเกิดดิซาร์จบางส่วนในระดับที่ต่ำมากดังเช่น หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน และสายเคเบิลกำลัง คือสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ที่ความถี่สอดคล้องกับสัญญาณแรงดันสูงทดสอบที่ต้องการและสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ทางวงจรไฟฟ้าของวงจรรวมการทดสอบตรวจจับดิซาร์จบางส่วน และจะนำเสนอผลการจำลองป้อนสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ในหัวข้อถัดไป

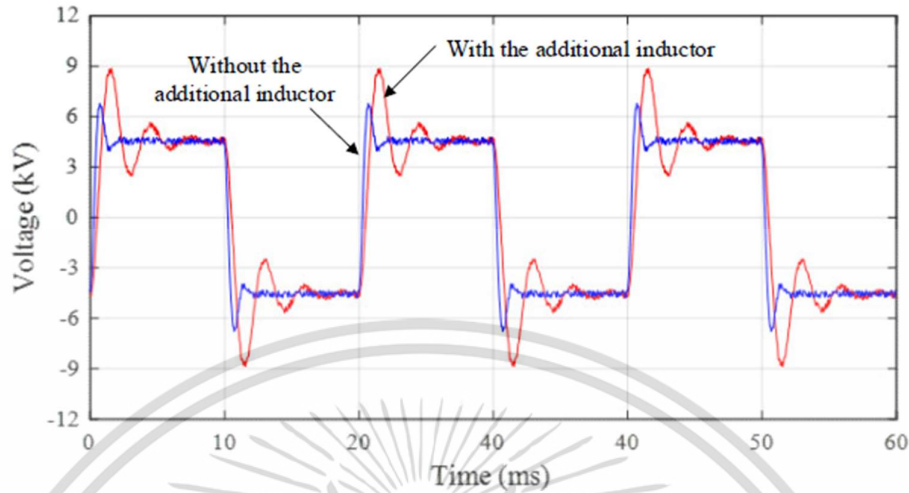
3.2 การหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์

อย่างแม่นยำด้วยวิธีโพนิปรับปรุง

จากการวิเคราะห์วงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในหัวข้อ 3.1 พบว่าในการออกแบบวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ ด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ ด้วยช่องว่างอากาศมีความซับซ้อนและยากมากที่จะออกแบบให้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใน (L_{odd}) ค่าความต้านทานภายใน (R_{odd}) ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ และค่าความจุไฟฟ้า (C_{odd}) ของตัวเก็บประจุ ในวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ ตรงตามเงื่อนไขในการวิเคราะห์ทางวงจรไฟฟ้าสมมูลของวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนดังรูปที่ 3.7 รวมถึงค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรทดสอบที่ต้องนำมาวิเคราะห์ร่วมกันในวงจรสมมูลของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วน แต่ไม่สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำด้วยเครื่องมือวัดแบบดั้งเดิมโดยตรงในทางปฏิบัติ ในงานวิจัย [13], [14] หรือมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการจัดวงจรทดสอบเช่น ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝงในวงจรทดสอบ (parasitic inductance) และค่าความจุไฟฟ้ารั่วไหล (stray capacitance) จึงมีการปรับค่าทางไฟฟ้าในการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ผลการจำลองมีความสอดคล้องการทดสอบตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

จะต้องมีการบันทึกข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าจากการทดสอบเพื่อหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าอย่างแม่นยำในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้น จะทำการทดสอบขั้นต้น (pre-test) ด้วยวงจรทดสอบตรวจจับดิซาร์จบางส่วนโดยมีหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Potential transformer) ระบบ 24 kV เป็นวัตถุทดสอบ (Test object) ดังรูปที่ 3.4 จากนั้นป้อนแรงดันสูงทดสอบความถี่ 50 Hz ที่ระดับแรงดัน 5 kV ทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดันสูงทดสอบในลักษณะข้อมูลคู่อันดับ ดังรูปที่ 3.12 โดยทำการทดสอบใน 2 ลักษณะได้แก่

- ทำการทดสอบโดยปราศจากตัวเหนี่ยวนำเพิ่มเติมในส่วนของวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์
- ทำการทดสอบโดยติดตั้งตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพิ่มเติมที่มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L_{odd}) 5 mH และความต้านทานภายใน (R_{odd}) 1.3 Ω



รูปที่ 3.12 แรงดันสูงทดสอบ 5 kV ควบคุมวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (H-bridge inverter) ด้วยสัญญาณจัตุรัส

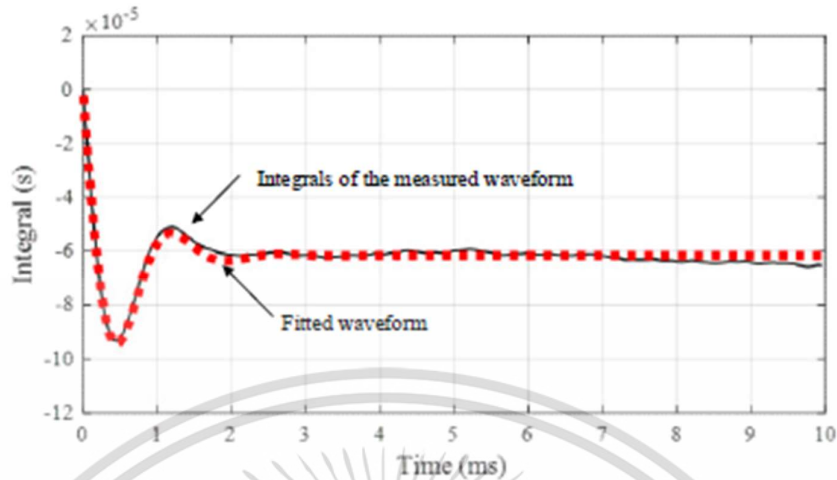
พิจารณาวงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 พบว่ามีคุณลักษณะวงจร RLC อันดับสอง ผลตอบสนองของสัญญาณไฟฟ้าจ่ายออกจากหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงสามารถคำนวณได้จากรูปแบบสมการอนุพันธ์ลำดับสอง ดังสมการ (3.5) และเขียนใหม่เป็นผลเฉลยรูปแบบเอ็กโปเนนเชียล ดังสมการ (3.6) และผลเฉลยของสมการ (3.5) และ (3.6) แสดงได้ชัดเจนขึ้นในรูปแบบฟังก์ชันห่วงการแกว่งของรูปคลื่นไซน์หรือฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลเชิงซ้อนสองตัวแปร ดังสมการ (3.7)

$$\frac{d^2V_{out}(t)}{dt^2} + \left(\frac{R_{eq}}{L_{eq}}\right)\frac{dV_{out}(t)}{dt} + \left(\frac{1}{L_{eq}C_{eq}}\right)V_{out}(t) = C \quad (3.5)$$

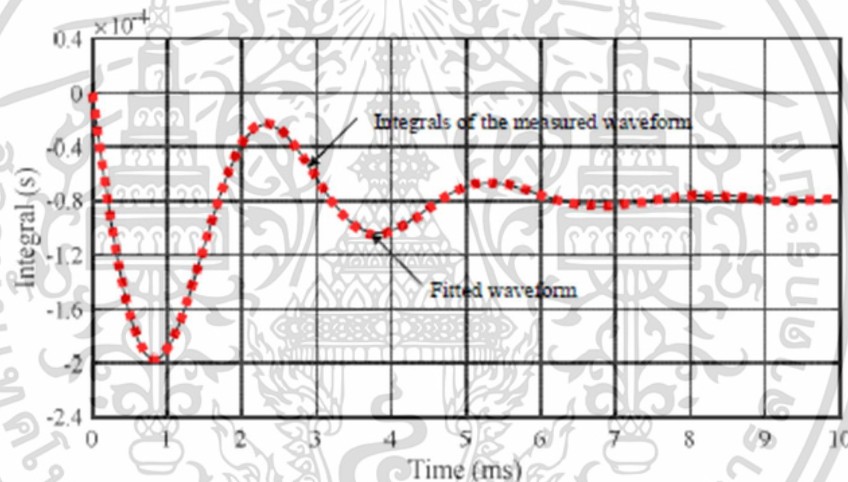
$$\frac{d^2V_{out}(t)}{dt^2} + (\alpha_1 + \alpha_2)\frac{dV_{out}(t)}{dt} + (\alpha_1\alpha_2)V_{out}(t) = C \quad (3.6)$$

$$V_{out}(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) + B = A_1e^{\alpha_1 t} + A_2e^{\alpha_2 t} + A_3 \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กรณีไม่ติดตั้งตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพิ่มเติม



(ข) กรณีติดตั้งตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพิ่มเติม

รูปที่ 3.13 ผลรวมรูปคลื่นที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลการปรับเทียบรูปคลื่น

เพราะฉะนั้น วิธีการโพรนิปรับปรุงจึงสามารถนำมาใช้หาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของจรทดสอบจากรูปคลื่นจากสัญญาณไฟฟ้าจ่ายออกจากหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงหรือแรงดันตกคร่อม วัตถุประสงค์ของการทดสอบขั้นต้นของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันด้วยสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้ารูปคลื่นจัตุรัส ดังรูปที่ 3.12 นำรูปคลื่นที่บันทึกได้จากการทดสอบทั้งสองกรณีอินทิเกรตในช่วงเวลาที่สนใจหรือช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันป้อนเข้าสูงสุดเทียบเวลาของรูปคลื่นจัตุรัสที่ได้จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) โดย ปราศจากองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 3.13 จากนั้นหาค่าองค์ประกอบในวงจรทดสอบและองค์ประกอบอีกโบนเนนเซียลด้วยวิธีโพรนิปรับปรุง ทั้งสองกรณีการทดสอบได้จากสมการ (3.8) - (3.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_s}{L_s} = \alpha_1^{(1)} + \alpha_2^{(1)} \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{L_s C_{eq}} = \alpha_1^{(1)} \alpha_2^{(1)} \quad (3.9)$$

$$\frac{R_s + R_{add}}{L_s + L_{add}} = \alpha_1^{(2)} + \alpha_2^{(2)} \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{(L_s + L_{add}) C_{eq}} = \alpha_1^{(2)} \alpha_2^{(2)} \quad (3.11)$$

เมื่อ $\alpha_i^{(j)}$ คือ ตัวชี้กำลังลำดับที่ i^{th} ของการทดสอบที่ j^{th}

R_s คือ ผลรวมของค่าความต้านทานภายในของระบบ (R_{int}) กับค่าความต้านทานรวมอนุกรม (R_T) ของหม้อแปลงทดสอบแรงสูง

L_s คือ ผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใน (L_{int}) ของระบบ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ารวมอนุกรม (L_T) ของหม้อแปลงทดสอบแรงสูง

องค์ประกอบเอ็กโปเนนเชียลสามารถคำนวณได้จากวิธีการโพรมีปรับปรุง และการวัดค่าความต้านทานภายใน (R_{add}) ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายใน (L_{add}) ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จากสมการ (3.8) – (3.11) ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L_s) ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_s) และ ค่าความจุไฟฟ้าสมมูลรวมของระบบ (C_{eq}) คำนวณได้จากสมการ (3.12) – (3.14)

$$L_s = \frac{L_{add}}{\left(\frac{\alpha_1^{(2)} \alpha_2^{(2)}}{\alpha_1^{(1)} \alpha_2^{(1)}} - 1 \right)} \quad (3.12)$$

$$R_s = \left(\alpha_1^{(1)} + \alpha_2^{(1)} \right) L_s \quad (3.13)$$

$$C_{eq} = \frac{1}{L_s \left(\alpha_1^{(1)} \alpha_2^{(1)} \right)} \quad (3.14)$$

จากการนำวิธีการโพรมีปรับปรุงมาและรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบทั้งสองกรณี มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าองค์ประกอบของสมการผลตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบผลเฉลยเอ็ก

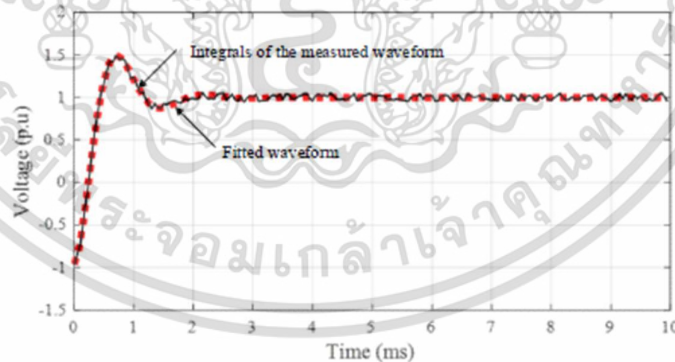
โปเนนเชียล สมการ (3.7) ของวงจรอนุกรมอย่างง่ายของ RLC ดังรูปที่ 3.9 ได้ค่าองค์ประกอบของสมการดังนี้

- $\alpha_1^{(1)}$ เท่ากับ $1.8952 \times 10^3 + j4.2783 \times 10^3$
- $\alpha_2^{(1)}$ เท่ากับ $1.8952 \times 10^3 - j4.2783 \times 10^3$
- $\alpha_1^{(2)}$ เท่ากับ $5.1858 \times 10^2 + j2.1045 \times 10^3$
- $\alpha_2^{(2)}$ เท่ากับ $5.1858 \times 10^2 - j2.1045 \times 10^3$

จากค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรที่ทราบค่า และการถ่ายโอนอิมพีแดนซ์มายังภาคแรงสูงทั้งหมด สามารถหาค่า L_s , R_s และ C_{eq} จากสมการ (3.12) – (3.14) ได้ค่าดังนี้

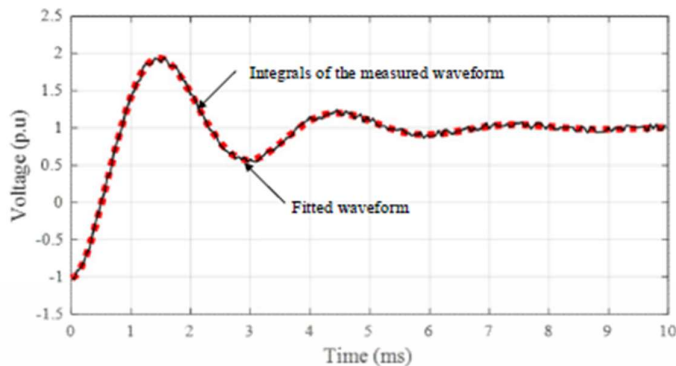
- L_s เท่ากับ 36.310 H
- R_s เท่ากับ 137.63 k Ω
- C_{eq} เท่ากับ 1.27 nF

นำค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่แม่นยำของวงจรทดสอบ ที่คำนวณได้จากวิธีการโพรมีปรับปรุง หาผลตอบสนองทางเวลาของวงจรทดสอบด้วยรูปคลื่นจตุรัสในช่วงเวลาที่สนใจ เปรียบเทียบผลกับการผลตอบสนองของวงจรที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 3.14



(ก) กรณีไม่ติดตั้งตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กรณีติดตั้งตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพิ่มเติม

รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าทางเวลาของวงจรทดสอบด้วยรูปคลื่นจัตุรัสในช่วงเวลาที่สนใจ เปรียบเทียบผลระหว่างที่ได้จากการคำนวณกับการทดสอบจริง

3.3 การวิเคราะห์ผลการหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ด้วยวิธีการโพรนิปรับปรุง

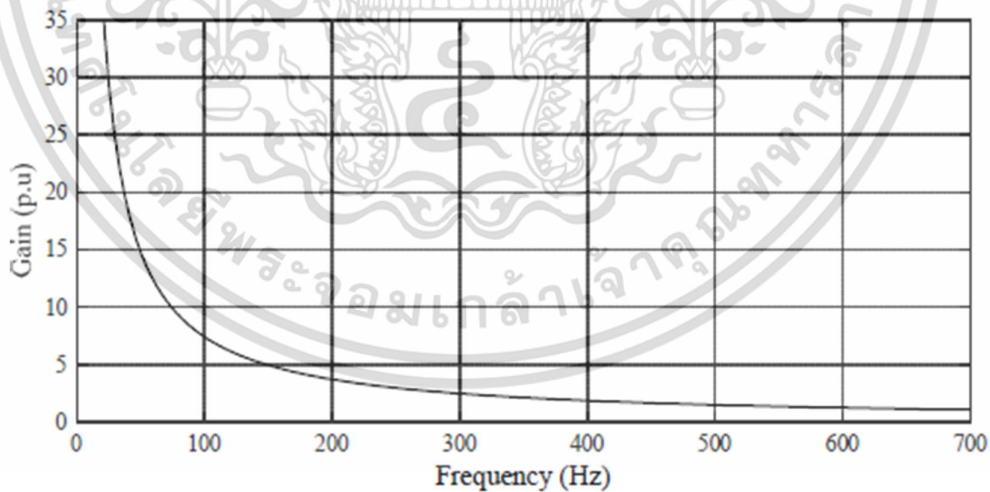
ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ ในวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ที่ได้ นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ มีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง (Power electronic switching) ในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันสูงทดสอบสำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้เทคนิควิธีการควบคุมวงจรแบบเรโซแนนซ์ของวงจรอนุกรมของ RLC เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [8]-[10], [12], [14], [15] ซึ่งนำเสนอเกี่ยวกับวงจรกรองความถี่เพื่อแก้ปัญหาเดียวกัน ทั้งนี้พบว่าในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันไป และไม่ทราบค่า จึงนำเสนอวิธีการหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าอย่างแม่นยำด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของโพรนิแบบปรับปรุง ซึ่งได้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบเป็นที่น่าพอใจ เมื่อเทียบกับข้อมูลดิบที่ใช้ในการหาค่าด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ได้อย่างแม่นยำแล้ว ทั้งนี้เพื่อยืนยันคุณลักษณะของวงจรทดสอบภายใต้เงื่อนไขและคำแนะนำของมาตรฐานการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน [4] และตรวจสอบคุณสมบัติการสร้างแรงดันสูงทดสอบตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ จึงนำเสนอผลการวิเคราะห์ทางวงจรไฟฟ้าของวงจรทดสอบด้วยค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าอย่างแม่นยำที่คำนวณได้จากวิธีการโพรนิปรับปรุง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีเป้าหมายในการพัฒนาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการควบคุมแบบเรโซแนนซ์ จึงต้องทำการออกแบบวงจรกรองและปรับแต่งโซแนนซ์ใหม่ โดยเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ ตลอดจนค้นหาเทคนิควิธีการทำให้เกิดเรโซแนนซ์ในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ด้วยสัญญาณควบคุมจัตุรัสในการควบคุมมุนำกระแสในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบเอชบริดจ์มี IGBTs (H- bridge IGBTs inverter) ทำ

หน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Switching) ร่วมกับวงจรป้องกันไฟกระชากแบบตัวต้านทานตัวเก็บประจุ (RC snubber) เพิ่มระดับแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง (HV testing transformer) สร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้ เพื่อการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่หลากหลายและอาจใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับการทดสอบอื่นๆ ที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูงและมีความอ่อนไหว (sensitivity) ต่อสัญญาณรบกวนในระบบไฟฟ้ากำลัง อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้

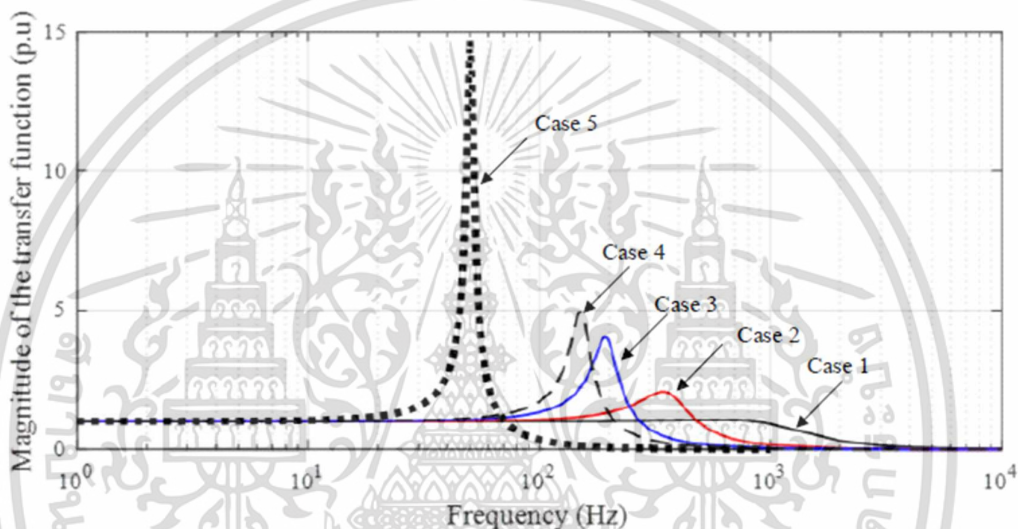
ขั้นตอนที่หนึ่ง ในการวิเคราะห์ทางวงจรไฟฟ้าที่ผ่านมา ระบุให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 50 – 200 Hz และใช้ค่าขอบเขตบน และขอบเขตล่างนี้ในการคำนวณตามสมการ (3.2) และ (3.3) สามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับตั้งให้แก่ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ตั้งสมการ (3.15) ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพิ่มเติม (L_{add}) สามารถปรับค่าได้ระหว่าง 3 - 300 mH ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้ ออกแบบและผลิตสำเร็จไว้แล้ว ปรับความเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ในช่วง 3 – 300 mH และทราบค่า ความต้านทานไฟฟ้าลัดวงจร (R_s) ของหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง และความต้านทานไฟฟ้าภายใน (R_{add}) ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ ของอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าจ่ายออกและป้อนเข้าของอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน อัตราขยายแรงดันคำนวณได้จากสมการ (3.3) และเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการได้ดังรูปที่ 3.15

$$L_{add} = \frac{1}{\omega^2 C_{eq}} - (L_{int} + L_{tr}) \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันจากฟังก์ชันถ่ายโอนกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ

จากกราฟพบว่า ที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่าจะมีอัตราขยายแรงดันสูงกว่า คือ ที่ความถี่ 50 150 และ 200 Hz มีค่าอัตราขยายแรงดัน 15 5 และ 3.5 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่ความถี่ 50 Hz จะนำไปใช้ทดสอบสายเคเบิลกำลัง และที่ความถี่ 150 – 200 Hz เหมาะสมกับการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันโดยทั่วไป รูปที่ 3.16 แสดงขนาดแอมพลิจูดสูงสุดของฟังก์ชันถ่ายโอนในวัฏจักรความถี่ ที่การตั้งค่าการปรับแต่งเรโซแนนซ์ความถี่ต่างๆ ของวงจรสร้างแรงดันสูงทดสอบ ด้วยการปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าดังรายละเอียดในตารางที่ 3.1 อัตราขยายแรงดันดังรูปที่ 3.15 และ 3.16



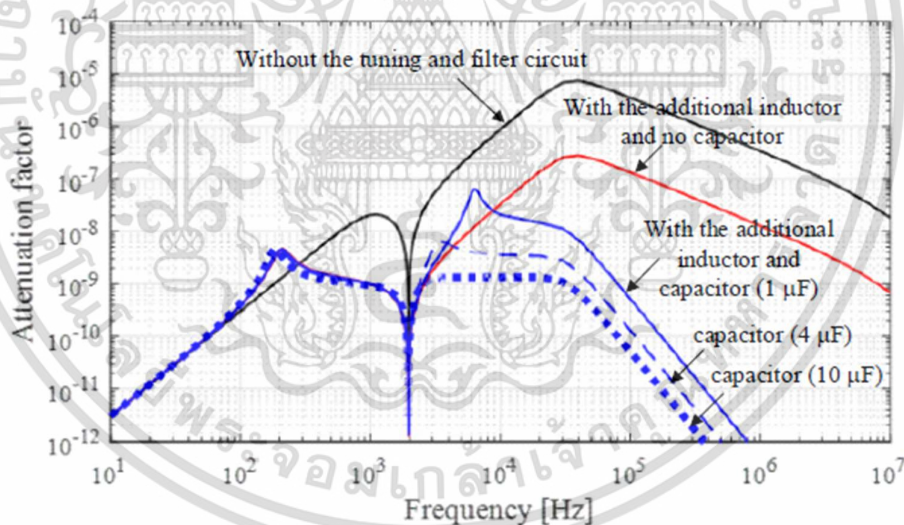
รูปที่ 3.16 ขนาดแอมพลิจูดสูงสุดของฟังก์ชันถ่ายโอนในวัฏจักรความถี่ ที่การตั้งค่าวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ในวงจรสร้างแรงดันสูงทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้

Case	ถ่ายโอนมายังภาคแรงต่ำ		ถ่ายโอนมายังภาคแรงสูง	
	R_{add} (Ω)	L_{add} (mH)	R_{add} (k Ω)	L_{add} (H)
1	0	0	0	0
2	1.3	5	34.56	132.92
3	1.3	17.2	34.56	457.23
4	1.8	31.5	47.85	837.37
5	1.8	300	47.85	7974.95

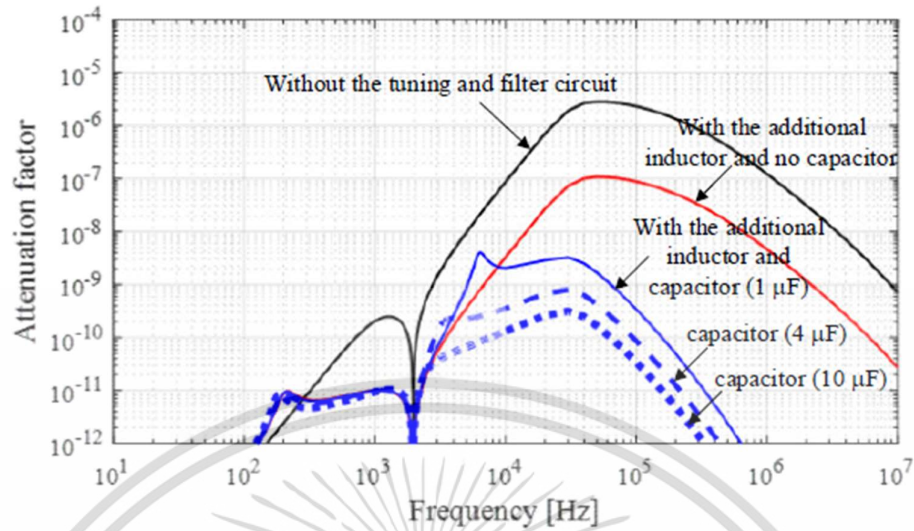
ขั้นตอนที่สอง ในการวิเคราะห์ทางวงจรไฟฟ้าที่ผ่านมา [8]-[17] พบว่าการเลือกค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มเติม (C_{add}) ซึ่งจำเป็นต้องติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มเติม ในส่วนวงจรกรองและปรับแต่งเร

โซแนนส์สำหรับกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์สวิชชิงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจนส่งผลต่อสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในระดับสูงเกินกว่ามาตรฐาน [6], [7] ยอมรับ เพราะฉะนั้น จะทำการวิเคราะห์ทางวงจรไฟฟ้าของวงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบด้วยค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าซึ่งถ่ายโอนมายังภาคแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงทั้งหมดในวงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบ ดังรูปที่ 3.7 ที่ความถี่เรโซแนนส์ 200 Hz พิจารณาสัญญาณจ่ายออกจากช่องสัญญาณวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD measuring port; V_{PD}) ของอุปกรณ์คัปเปิล (Coupling device) ซึ่งมีอิมพีแดนซ์วัด (Measuring impedance) ดังรูปที่ 3.5 เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า (Input voltage, V_{in}) รูปคลื่นจตุรัส ได้ผลตัวประกอบของอัตราลดทอนแรงดันในวัฏจักรความถี่ ทั้งการทดสอบที่ใช้และไม่ใช้ตัวกรองแถบกว้างความถี่ผ่านดิจิตอลตามมาตรฐาน [4] แนะนำ ซึ่งมีความถี่ตัดด้านต่ำ 100 kHz และความถี่ตัดด้านสูง 400 kHz ดังรูปที่ 3.17(ก) และ 3.17(ข) ตามลำดับ พบว่าความจุไฟฟ้าเพิ่มเติม (C_{add}) 1 μF ในวงจรกรองความถี่และปรับเรโซแนนส์ ทำให้วงจรทดสอบมีค่าตัวประกอบลดทอนแรงดันที่ช่องสัญญาณวัดดิสชาร์จบางส่วนต่ำกว่า 10^{-8} ซึ่งเพียงพอต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน



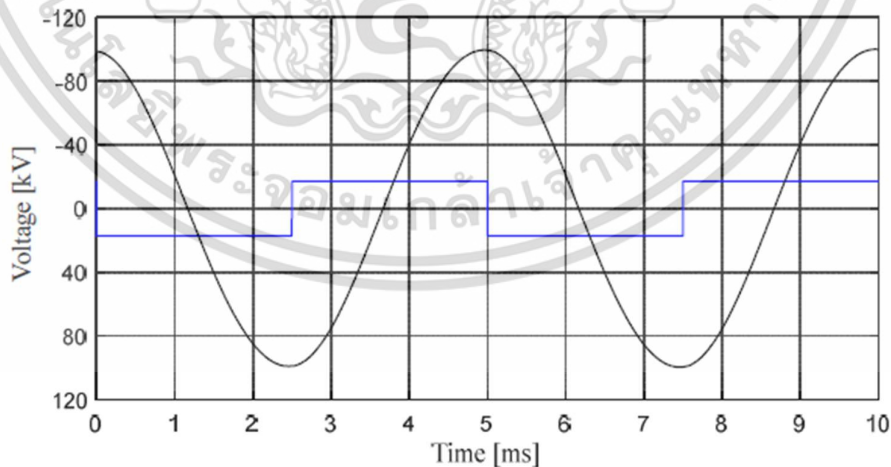
(ก) กรณีไม่ใช้ตัวกรองแถบกว้างความถี่ผ่านดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



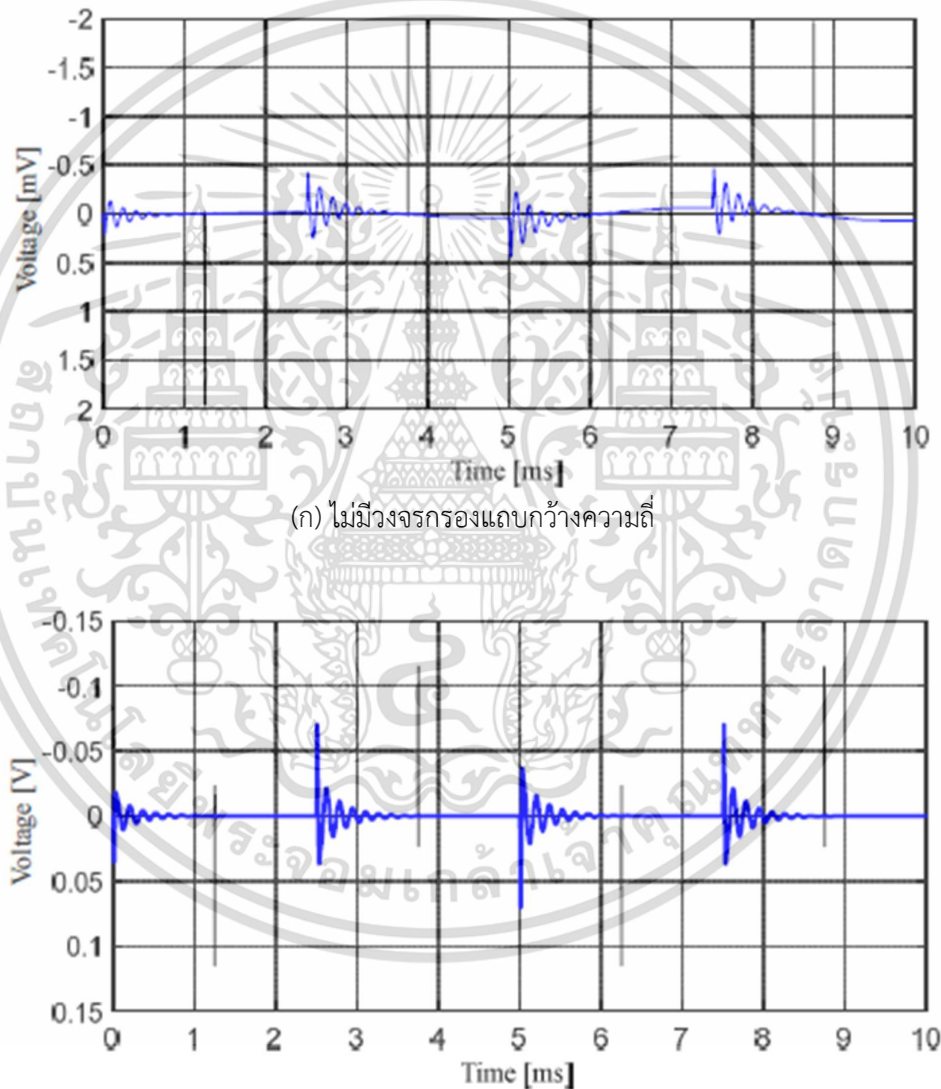
(ข) กรณีใช้ตัวกรองแถบกว้างความถี่ผ่านดิจิทัล
รูปที่ 3.17 ตัวประกอบลดทอนแรงดันที่ช่องสัญญาณวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
ของวงจรสมมูลรวม ของระบบทดสอบ

เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์หามิติแดนซ์ทางวงจรไฟฟ้าด้วยค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ระบุชัดเจนในวัฏจักรเวลาจึงทำการจำลองการตอบสนองต่อแรงดันป้อนเข้ารูปคลื่นจัตุรัสของวงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบดังรูปที่ 3.7 ที่ระดับแรงดัน 19.6 kV ซึ่งถ่ายโอนมายังภาคแรงสูง และแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ความถี่ 200 Hz ที่ระดับแรงดันสูงจ่ายออก 100 kV ที่ได้จากวงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ที่สภาวะเรโซแนนซ์ความถี่ 200 Hz ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แรงดันป้อนเข้ารูปคลื่นจัตุรัสและแรงดันจ่ายออกรูปคลื่นไซน์ ของหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง ที่สภาวะเรโซแนนซ์ของวงจรสมมูลรวมของระบบทดสอบ (ถูกถ่ายโอนทุกองค์ประกอบมายังภาคแรงสูง)

เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์หิมพิแดนซ์ทางวงจรไฟฟ้าด้วยค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ระบุอย่างย่อในวัฏจักรเวลา จึงทำทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยป้อนประจุดิสชาร์จบางส่วนขนาด 1 pC เปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจำลองสร้างแรงดันสูง 100 kV_p หรือ 70 kV_{rms} พบว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการจำลองสร้างแรงดันสูงมีขนาดต่ำกว่าประจุดิสชาร์จบางส่วน 1 pC ที่ป้อนจากเครื่องมือปรับเทียบประจุดิสชาร์จบางส่วน (PD calibrated) ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ผลตอบสนองของแรงดันที่ช่องสัญญาณวัดดิสชาร์จบางส่วน (PD port) ด้วยการป้อนประจุดิสชาร์จขนาด 1 pC จากเครื่องมือปรับเทียบกระแสพัลส์และสัญญาณรบกวนในวงจรเรโซแนนซ์ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม ที่ระดับแรงดันสูง 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

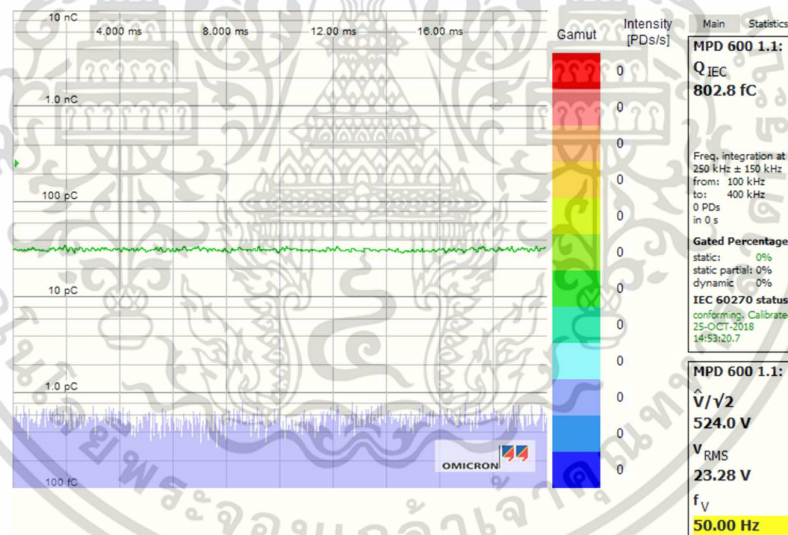
จากการวิเคราะห์วงจรทดสอบไฟฟ้าแรงสูงและการออกแบบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคนิควิธีการควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ที่สภาวะทางวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ (Resonance circuit) สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงมาแล้วนั้น จะนำผลการออกแบบระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมาทำการสร้างแรงดันสูงทดสอบจริง ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เปรียบเทียบผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์กับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคนิควิธีการควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมแบบปรับรูปร่างกว้างพัลส์ (Unipolar pulse width modulation; Unipolar PWM) ร่วมกับวงจรรองความถี่เพิ่มเติมที่เหมาะสม (Additional filter circuit) จากนั้นจะนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นนี้ทำการทดสอบสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์เพื่อใช้ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง 2 ประเภท คือหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) และสายเคเบิลกำลัง (Power cable) โดยพิจารณาคุณภาพของสัญญาณแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ด้วยค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD.) ขณะเดียวกันจะพิจารณาผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยพิจารณาจากค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) และค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังก่อนและขณะทำการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ถูกใช้เป็นสถานที่ทำการทดสอบตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ได้รับการออกแบบระบบกราวด์ดินและการต่อลงดินที่มีประสิทธิภาพสูง และมีการป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กภายนอก โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่สำหรับการทดสอบตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ดังรูปที่ 4.1 เมื่อติดตั้งระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน Omicron MPD600.1 แสดงผลด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ จะได้ค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise; BG) ขณะไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้า มีค่า 0.803 pC ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 พื้นที่ทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

- (1) คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง (HV testing transformer)
- (2) คือ ตัวเก็บประจุคัปเปิล (Coupling capacitor) 1 nF



รูปที่ 4.2 ระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) 0.803 pC
ขณะไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้า

มาตรฐาน IEC60060 [5] กำหนดคุณลักษณะของแรงดันสูงทดสอบให้มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ (almost purely sinusoidal waveform) โดยยอมรับค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) และค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) ไม่เกิน 5 % สำหรับค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นอยู่กับค่าการยอมรับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Acceptable PD) ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

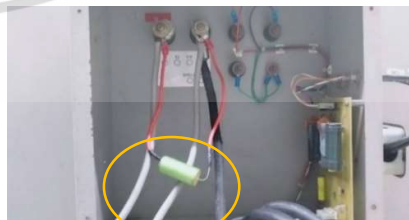
ที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) กล่าวคือ ค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังควรมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าการยอมรับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้น ค่าการยอมรับการเกิดดิสชาร์จ (Acceptable PD) บางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันตามมาตรฐาน IEC 61869-3 [6] และสายเคเบิลกำลังตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [7] ยอมรับที่ระดับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ไม่เกิน 5 pC ระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต้องมีความไว (Sensitivity) ในการตรวจจับกระแสพัลส์ดิสชาร์จ (PD pulse) ต่ำสุดเป็น 2 เท่าของระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ดังนั้นระบบทดสอบต้องมีค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ไม่เกิน 2.5 pC จึงใช้เป็นเกณฑ์ประเมินประสิทธิภาพของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนร่วมกับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ และประเมินคุณภาพแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ที่สร้างจากระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมมุนำกระแส IGBTs ในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H – bridge ด้วยสัญญาณรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ที่สภาวะวงจรถดสอบแบบวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ (Resonance circuit) ด้วยค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ไม่เกิน 5 % โดยนำเสนอผลการทดสอบสร้างแรงดันสูงรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบกับงานวิจัย [15] ซึ่งใช้เทคนิคการควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมแบบปรับรูปร่างพัลส์ Unipolar PWM ร่วมกับวงจรกรองความถี่เพิ่มเติมที่เหมาะสม (Additional filter circuit)

4.1 การทดสอบสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น สำหรับสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ปรับความถี่ได้ สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จะถูกนำมาทดสอบใช้งานจริง ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยจะทำการสร้างแรงดันสูงทดสอบสำหรับการทดสอบตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน แผนผังวงจรการทดสอบรายละเอียดในวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.4 จะนำเสนออีกครั้งด้วยการติดตั้งจริงวงจรทดสอบในพื้นที่ทดสอบจริง ดังรูปที่ 4.1 มีรายละเอียดอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานจริงเพิ่มเติมสำหรับส่วนสร้างแรงดันสูงทดสอบดังรูปที่ 4.3 และ อุปกรณ์สำคัญจำเป็นในส่วนวงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนดังรูปที่ 4.4



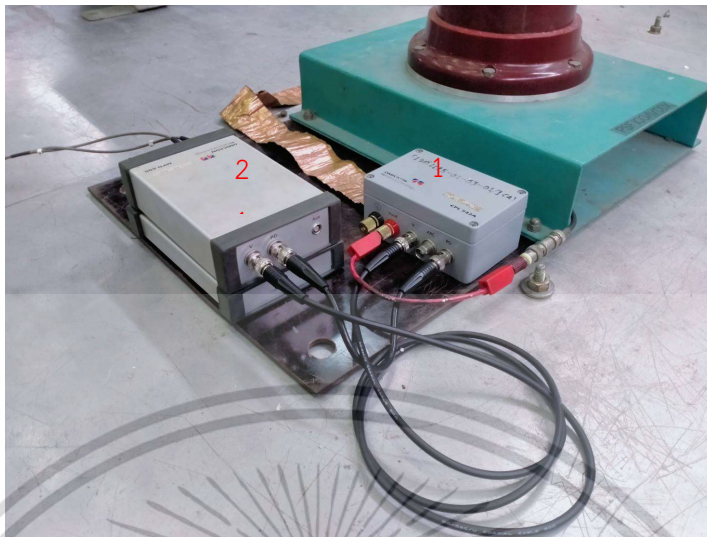
(ก) วงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า
รูปแบบ H - bridge



(ข) ตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (C_{add}) 1 μ F
ในวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์

รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้จริงในส่วนวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าและวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์

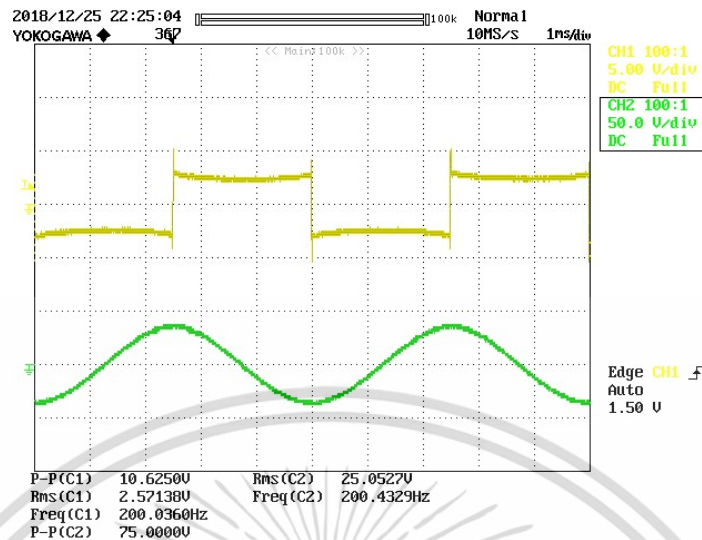
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



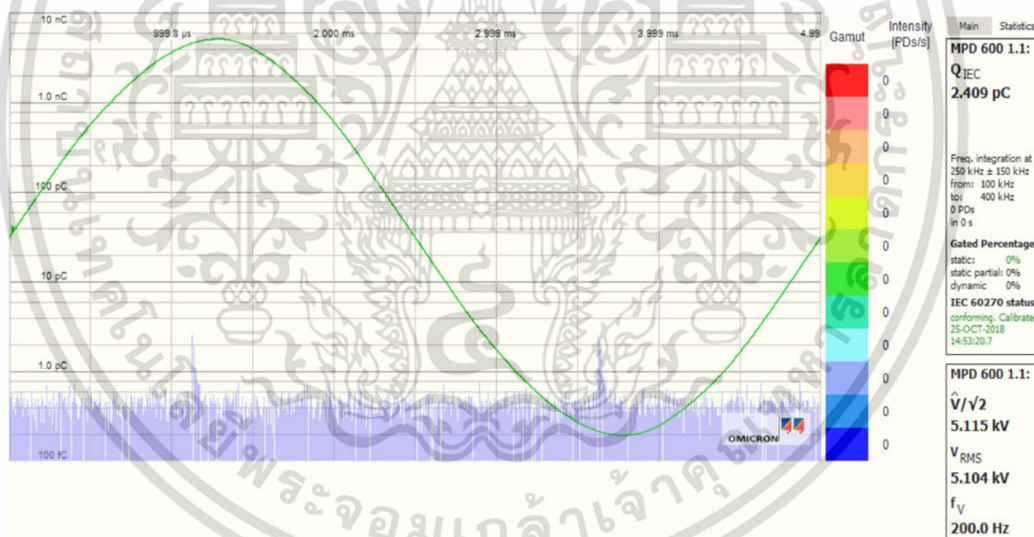
รูปที่ 4.4 อุปกรณ์ที่ใช้จริงในส่วนวงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (1) อุปกรณ์คาบเกี่ยว (CD) หรือ อิมพีแดนซ์วัด (Measuring impedance) (2) ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง ส่งสัญญาณไปยังซอฟต์แวร์ MPD 600.1

4.1.1 ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมด้วยสัญญาณ รูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ที่สภาวะทางวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ (Resonance)

ทำการทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์โดยการสร้างแรงดันสูงทดสอบ ด้วยเทคนิคการควบคุมมมุนำกระแสของ IGBTs ในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge (IGBTs H – bridge inverter) ด้วยสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ความถี่ 200 Hz ดังรูปที่ 4.5 และ 4.7 ปรับแต่งวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่สภาวะวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ ด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ โดยไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าค่าคงที่ และใช้ตัวกรองแถบกว้างความถี่ผ่านดิจิตอล ซึ่งทำให้ระบบทดสอบตัวจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนมีคุณลักษณะของตัวประกอบลดทอนแรงดันที่ช่องสัญญาณวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (V_{pd}) ดังรูปที่ 3.15(ข) เส้นสีแดง บันทึกผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz ขณะไม่มีวัตถุทดสอบ (Without test object) ด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ Omicron MPD600.1 ได้ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบ ดังรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันสูงทดสอบขึ้นเพียง 5 kV จะเกิดลักษณะสัญญาณรบกวนพื้นหลัง 2.409 pC ที่มุมเฟสประมาณ 90 และ 270 ของรูปคลื่นแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ความถี่ 200 Hz ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองป้อนสัญญาณแรงดันรูปคลื่นจัตุรัสแก่วงจรสมมูลรวม ดังรูปที่ 3.16 สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นอยู่ที่ขอบขาขึ้น (Rise time) และขอบขาลง (Fall time) แรงดันสูงทดสอบมีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) 0.65 % และมีค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน 0.35 %



รูปที่ 4.5 CH1 สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) CH2 สัญญาณจ่ายออกจากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H – bridge โดยไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (without C_{add}) ในวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์

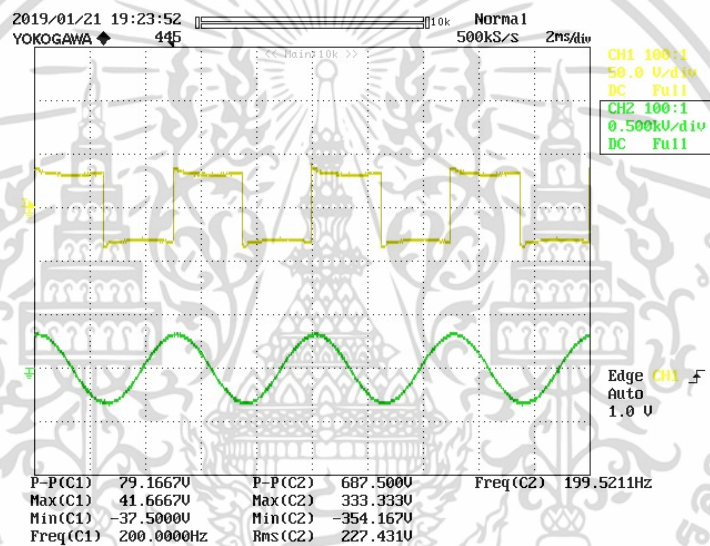


รูปที่ 4.6 แรงดันสูงทดสอบที่สภาวะเรโซแนนซ์ในวงจรทดสอบ โดยไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (without C_{add}) และใช้ตัวกรองแถบกว้างความถี่ผ่านดิจิทัล

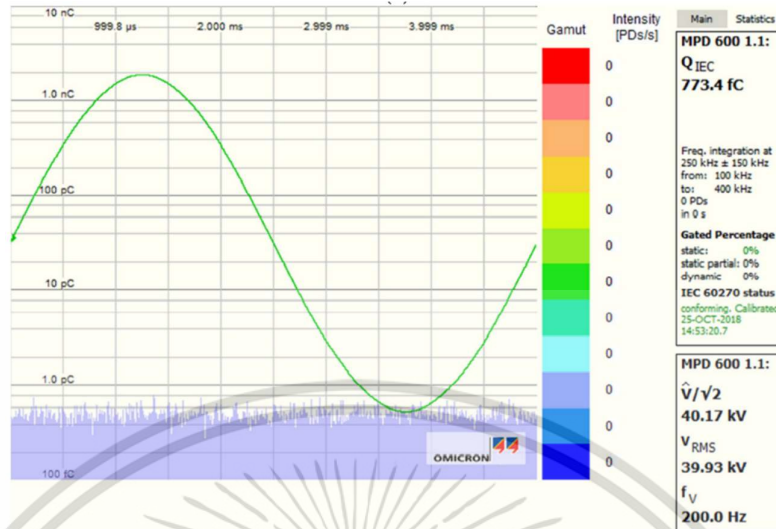
ทำการทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์โดยการสร้างแรงดันสูงทดสอบ ด้วยเทคนิคการควบคุมมมุนำกระแสของ IGBTs ในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟารูปแบบ H – bridge (IGBTs H – bridge inverter) ด้วยสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ความถี่ 200 Hz ปรับแต่งวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่สภาวะเรโซแนนซ์ ด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ โดยติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าค่าคงที่มีค่าความจุไฟฟ้า 1 μ F และใช้ตัวกรองแถบกว้างความถี่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิจิตอล ซึ่งทำให้ระบบทดสอบตัวจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนมีคุณลักษณะของตัวประกอบลดทอนแรงดันที่ช่องสัญญาณวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (V_{pd}) ดังรูปที่ 3.15(ข) เส้นสีฟ้า แสดงผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบขณะไม่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) ด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ Omicron MPD600.1 ได้ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบ ดังรูปที่ 4.8 พบว่า สร้างแรงดันสูงทดสอบได้ถึงระดับ 40 kV (ระดับแรงดันสูงสุดที่ต้องการใช้ในการทดสอบ) โดยไม่ปรากฏสัญญาณรบกวนเนื่องจากการเปลี่ยนระดับแรงดันจ่ายออกรูปคลื่นจัตุรัสจากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge (H – bridge inverter) ทำให้ระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนมีค่าระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง 0.773 pC แรงดันสูงทดสอบมีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) 0.61 % และมีค่าความผิดพลาดรวมของรูปคลื่นแรงดัน 0.35 %



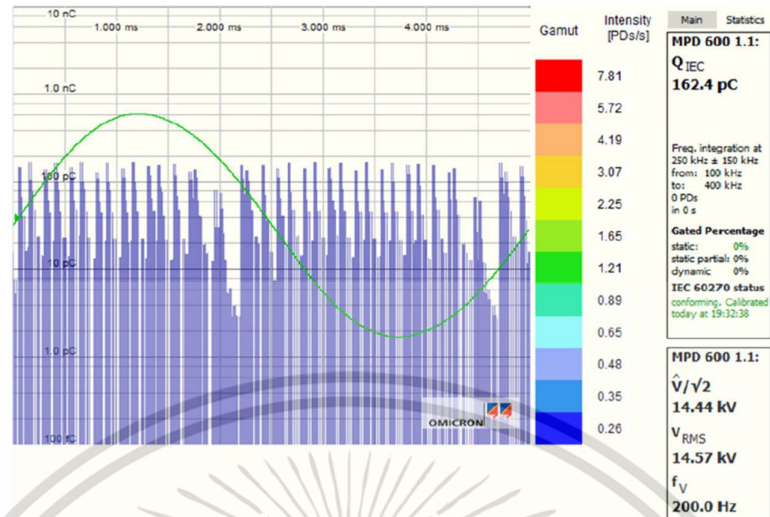
รูปที่ 4.7 CH1 สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) CH2 สัญญาณจ่ายออกจากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H – bridge โดยติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (C_{add}) ในวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์



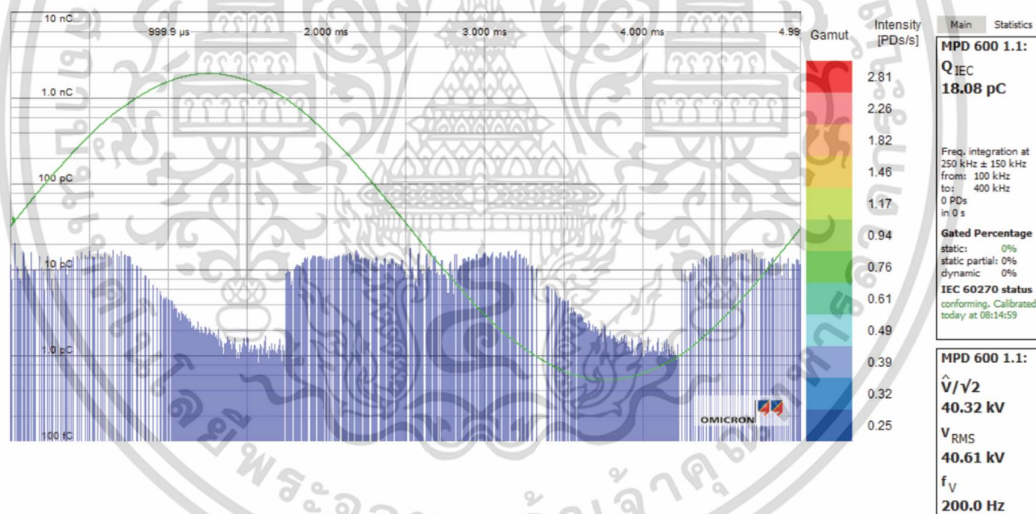
รูปที่ 4.8 แรงดันสูงทดสอบที่สภาวะเรโซแนนซ์ในวงจรทดสอบ โดยติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม 1 μF (with $C_{\text{add}} = 1 \mu\text{F}$) และใช้ตัวกรองแถบกว้างความถี่ผ่านดิจิทัล

4.1.2 ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมด้วยเทคนิค ปรับปรุงความกว้างพัลส์ Unipolar PWM[15]

เพื่อการเปรียบเทียบเทคนิคการควบคุมมุนำกระแสของ IGBTs ในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge (IGBTs H – bridge inverter) และรูปแบบวงจรรองความถี่จากงานวิจัย [S&M] ขอนำเสนอผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz โดยไม่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) ควบคุมหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสัญญาณควบคุมรูปแบบปรับปรุงความกว้างพัลส์ (Unipolar pulse width modulation; Unipolar PWM) ระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal wave) และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular wave) ที่อัตราปรับปรุงความกว้างพัลส์ (Modulation index; m_a) เท่ากับ 1.0 และความถี่สวิตชิ่ง (Switching frequency; f_s) 3.2 kHz มีวงจรรองความถี่ผ่านรูปแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุไฟฟ้า (LC filter) มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าคงที่ 13.3 H ด้านแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบ (HV testing transformer) (50 mH ด้านแรงต่ำ) ปรับค่าความจุไฟฟ้า 1 และ 16 μF ได้ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ความถี่ 200 Hz แสดงผลด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ MPD 600.1 ดังรูปที่ 4.9 – 4.11 ตามลำดับ

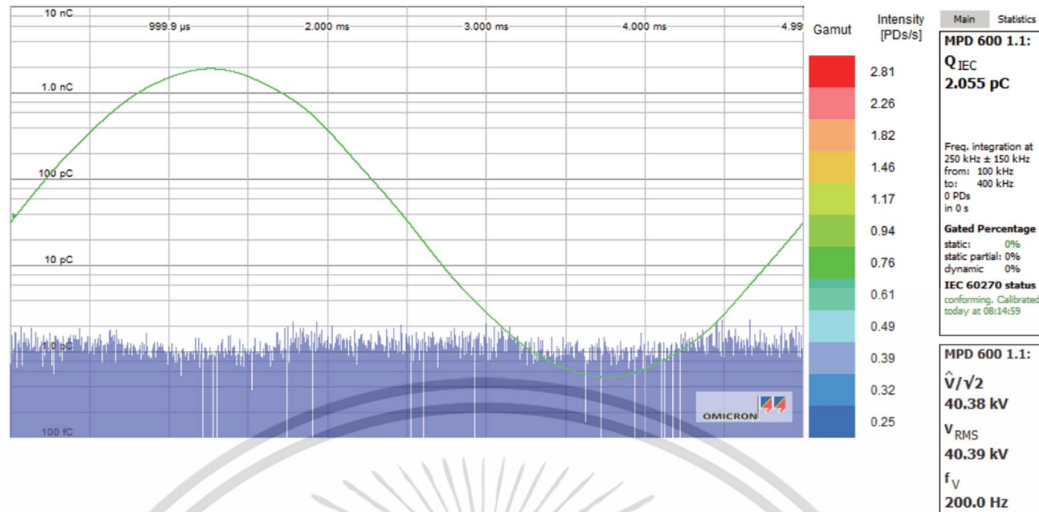


รูปที่ 4.9 แรงดันสูงทดสอบควบคุมด้วยเทคนิค Unipolar PWM โดยไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (without C_{add}) ที่ระดับแรงดันสูง 14 kV สัญญาณรบกวนพื้นหลัง 162.4 pC[15]



รูปที่ 4.10 แรงดันสูงทดสอบควบคุมด้วยเทคนิค Unipolar PWM โดยติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (with C_{add}) 1 μ F ที่ระดับแรงดันสูง 40 kV สัญญาณรบกวนพื้นหลัง 18.08 pC[15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แรงดันสูงทดสอบควบคุมด้วยเทคนิค Unipolar PWM โดยติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (with C_{add}) 16 μ F ที่ระดับแรงดันสูง 40 kV สัญญาณรบกวนพื้นหลัง 2.055 pC[15]

จากผลการทดสอบสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz ด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมด้วยเทคนิค Unipolar PWM พบว่า ตัวเก็บประจุเพิ่มเติม (C_{add}) ที่ติดตั้งในส่วนวงจรกรองความถี่ (Additional filter) สามารถลดสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้จนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (ต่ำกว่า 2.5 pC) ได้สำหรับการทดสอบหม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดันที่มีค่ายอมรับการเกิดดิสชาร์จที่ระดับ 5 pC ด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มเติม (C_{add}) ที่มีค่าความจุไฟฟ้า 16 μ F

ผลการทดสอบสร้างแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ที่ควบคุมด้วยเทคนิค Unipolar PWM จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้เห็นได้ชัดเจนว่า เทคนิคควบคุมมุนำกระแสของ IGBTs มีผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวนพื้นหลังเป็นอย่างมาก จะต้องเลือกใช้และออกแบบวงจรกรองที่เหมาะสมสำหรับกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยที่น่าเสนอนี้ [15] ได้เสนอรูปแบบวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุไฟฟ้า (LC filter) ได้นำเสนอผลการทดสอบสร้างแรงดันสูงสำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและลดสัญญาณรบกวนในการทดสอบได้ในระดับที่ยอมรับได้ สำหรับการทดสอบตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดัน (Voltage transformer)

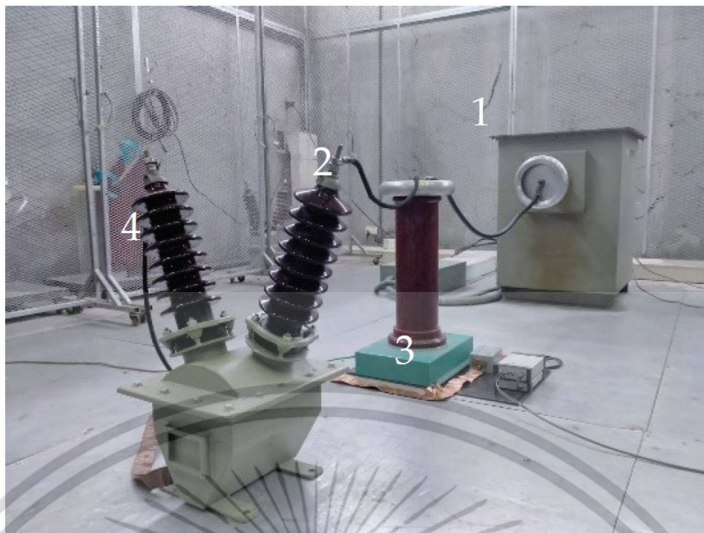
เมื่อทำการทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานการควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ที่สภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance) ในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ด้วยการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz ได้ผลการทดสอบสร้างแรงดันสูงทดสอบดังหัวข้อ 4.1.1 พบว่าแรงดันสูงทดสอบมีคุณภาพเพียงพอสำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยมีค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV)

และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 5 % และสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน มีค่าต่ำกว่า 1 pC ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ที่ระดับ 2.5 pC และต่ำใกล้เคียงกับค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังขณะไม่มีการทดสอบจ่ายแรงดันสูงทดสอบ ทั้งนี้เป็นไปตามข้อสมมติฐานของการควบคุมวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge (H – bridge inverter) ด้วยสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัสความถี่ 200 Hz ร่วมกับวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ (Tuning and filter circuit) รูปแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศตัวเก็บประจุไฟฟ้า (L_{adj}, C_{add} circuit) ซึ่งปรับตั้งค่าความจุไฟฟ้า 17.2 mH และค่าความจุไฟฟ้าค่าคงที่เพิ่มเติม 1 uF ดังรูปที่ 4.8 ที่ระดับแรงดันสูงที่ต้องการทดสอบสูงสุด 40 kV สัญญาณรบกวนพื้นหลัง 0.773 pC

เปรียบเทียบผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ 200 Hz ที่สร้างจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมด้วยเทคนิค Unipolar PWM ในงานวิจัย [15] ที่อัตราการปรับปรุ้ความกว้างพัลส์ (Modulation index; m_a) เท่ากับ 1.0 และความถี่สวิตซ์ซิ่ง (Switching frequency; f_s) 3.2 kHz ร่วมกับวงจรกรองความถี่ผ่านรูปแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุ (LC filter) ที่มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า 50 mH ค่าความจุไฟฟ้า 16 uF ที่ระดับแรงดันสูงที่ต้องการทดสอบสูงสุด 40 kV ดังรูปที่ 4.11 ได้ผลการทดสอบสร้างแรงดันสูงทดสอบ ที่มีค่ามีความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 5 % และสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน มีค่า 2.055 pC

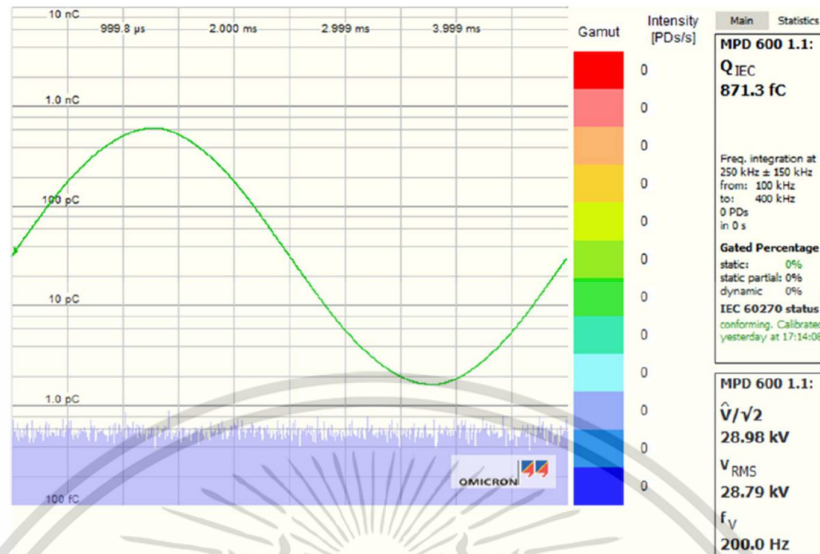
4.2 การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน

จากหัวข้อ 4.1 ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ความถี่ 200 Hz ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.8 ที่สภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance) ในวงจรทดสอบ ควบคุมด้วยสัญญาณรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) และรูปที่ 4.11 ควบคุมด้วยสัญญาณปรับปรุ้ความกว้างพัลส์ Unipolar PWM ร่วมกับวงจรกรองความถี่ผ่านที่เหมาะสม นำระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์มาทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจำพวกหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งมีรายละเอียดการป้อนแรงดันสูงทดสอบดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 2 แล้ว



รูปที่ 4.12 การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันพิกัด 24 KV (1) คือหม้อแปลงทดสอบ (Testing transformer) (2) คือหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันชั่วคราวแรงสูง (3) คือตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) (4) คือค้ำหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันชั่วคราวลงดิน

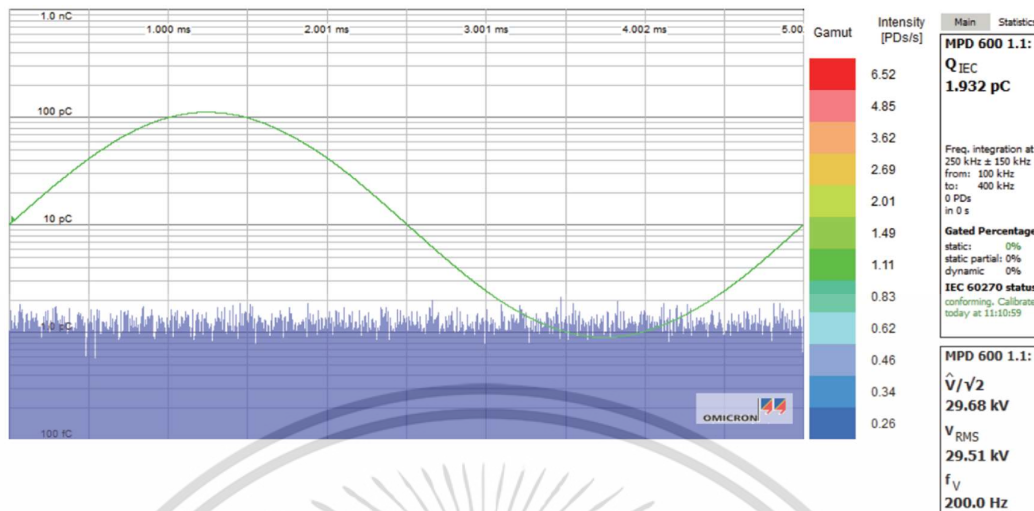
ได้ผลการทดสอบตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) ชนิดขดลวดจุ่มในน้ำมันหม้อแปลง (Oil immerse) พิกัดระบบไฟฟ้า 24 KV ของการไฟฟ้านครหลวง ที่ระดับแรงดันบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD recorded level) 28.8 kv มีค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) ที่เข้ารับการทดสอบ 0.871 pC ดังรูปที่ 4.13 ด้วยเทคนิคการควบคุมหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ด้วยรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ความถี่ 200 Hz ที่สภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance) ในวงจรทดสอบ ปรับแต่งสภาวะเรโซแนนซ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ร่วมกับตัวเก็บประจุค่าคงที่สำหรับร่องสัญญาณรบกวน คุณภาพของแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz ขณะทำการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) มีค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) ต่ำกว่า 1.0 % และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 0.5 %



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่ระดับแรงดัน 28.8 kV ที่สภาวะเรโซแนนซ์ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส

ผลการทดสอบตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) ด้วยแรงดันสูงทดสอบที่สร้างจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมด้วยสัญญาณปรับปรุงความกว้างพัลส์ Unipolar PWM ร่วมกับวงจรกรองที่เหมาะสมรูปแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุไฟฟ้า [15] ได้ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ความถี่ 200 Hz ที่ระดับแรงดันบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD recorded level) 28.8 kV มีค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) ที่เข้ารับการทดสอบ 1.932 pC คุณภาพของแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz ขณะทำการทดสอบหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) เป็นไปตามข้อกำหนดค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) ต่ำกว่า 1 % และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) 1 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดันที่ระดับแรงดัน 28.8 kV ด้วยวงจรกรองความถี่ที่เหมาะสม สัญญาณควบคุมรูปแบบ Unipolar PWM[15]

จากผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดัน (Voltage transformer) ด้วยแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz ที่สร้างจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมด้วยเทคนิค และวิธีการทางวงจรไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 2 ประเภท ที่พัฒนาต่อยอดขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ และงานวิจัยที่ได้ทบทวนวรรณกรรมไว้ ดังนี้

- งานวิจัยนี้ ควบคุมวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge (H – bridge inverter) ด้วยสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ที่สภาวะวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์ (Resonance) ปรับปรับแต่งเรโซแนนซ์และกรองความถี่ ด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศร่วมกับตัวเก็บประจุค่าคงที่ (L_{adj} C tuning and filter circuit)
- งานวิจัย [15] ควบคุมวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H – bridge (H – bridge inverter) ด้วยสัญญาณควบคุมรูปแบบปรับปรุงความกว้างพัลส์ Unipolar PWM ร่วมกับวงจรกรองที่เหมาะสมรูปแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุไฟฟ้า (LC filter)

นำเสนอผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz ดังรูปที่ 4.8 และ 4.11 ที่ระดับแรงดันสูงทดสอบสูงสุดที่ต้องการใช้ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดัน 40 kV (pre stress) และผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องม้อัดแรงดัน (Voltage transformer) พิกัด 24 kV ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ที่ระดับแรงดันบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD recorded level) 28.8 kV สรุปผลได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบด้วยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์	ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 200 Hz ที่ระดับแรงดัน 40 kV			ผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันที่ระดับแรงดัน 28.8 kV		
	DV	THD _v	BG	DV	THD _v	PD recorded
- งานวิจัยนี้ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส วงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์	<1%	<0.5%	<1 pC	<1%	<0.5%	<1 pC
- งานวิจัย [15] สัญญาณควบคุม Unipolar PWM วงจรกรองความถี่ที่เหมาะสม	<1%	<1%	<2 pC	<1%	<1%	<2 pC

จากตารางที่ 4.1 ค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) ขณะไม่มีวัตถุทดสอบ (Without test object) จะเรียกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนี้ว่า สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise; BG) และจะเรียกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) ขณะมีวัตถุทดสอบ (With test object) ว่า บันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จ (PD recorded) หากบันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD recorded) ขณะทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (With test object) ได้ไม่แตกต่างจากค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนขณะไม่มีวัตถุทดสอบ (Without test object) หมายความว่า อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนไม่ปรากฏการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Free PD) แม้จะปรากฏการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบหากไม่เกินกว่าค่าการเกิดดิสชาร์จที่ยอมรับได้ (PD acceptable) ในอุปกรณ์ประเภทนั้นๆ ย่อมถือว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบนี้ผ่านการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) มีค่าการเกิดดิสชาร์จที่ยอมรับได้ (PD acceptable) ไม่เกิน 5 pC ดังนั้นหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันพิกัด 24 kV ที่เข้ารับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยระบบทดสอบที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีผลการทดสอบ

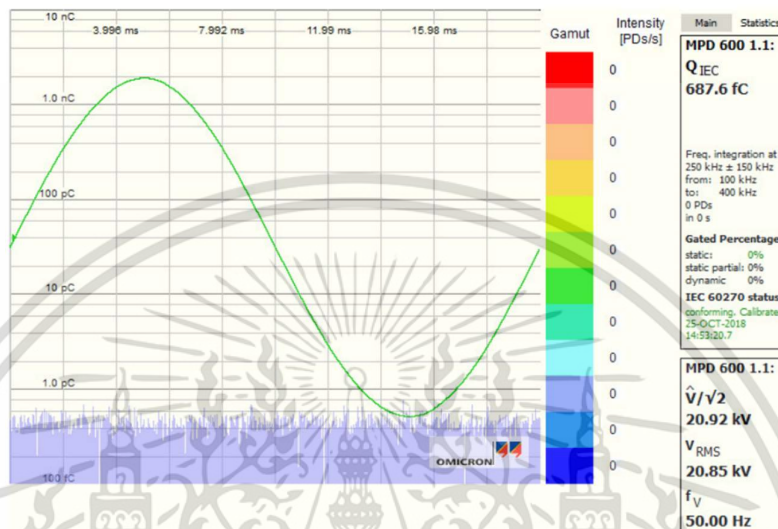
ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ไม่ปรากฏการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดัน หม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดันนี้จึงผ่านการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

นอกจากนี้ ผลการทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาเทคนิควิธีการควบคุมสำหรับสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้นี้ และการจัดองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรทดสอบรวมให้อยู่ในสถานะเรโซแนนซ์ทางวงจร ให้ผลการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ที่มีความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) และค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 5 % ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่ยอมรับได้ มีค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) ต่ำใกล้เคียงกับงานวิจัย [15] ที่ผ่านมาคือน้อยกว่า 1 % และมีค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่างานวิจัย [15] (น้อยกว่า 1 %) ที่ผ่านมา คือมีค่าต่ำกว่า 0.5 % นอกจากนี้ประเด็นคุณภาพของแรงดันสูงทดสอบที่มีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่พบว่าระดับสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานที่ความถี่สูงซึ่งความถี่สูงในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบ H - bridge (H - bridge inverter) ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลโดยตรงอย่างมาก และเป็นปัญหาอย่างต่อเนื่องในงานวิจัยที่ได้ทบทวนวรรณกรรมไว้ในบทที่ 1 งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวความคิดในการลดขนาด และปริมาณของการเกิดสัญญาณรบกวนพื้นหลังในระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงไว้แล้ว ด้วยวิธีการควบคุมด้วยรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ร่วมกับการจัดสถานะทางวงจรทดสอบที่สถานะเรโซแนนซ์ ทำให้สัญญาณรบกวนพื้นหลังลดลงจากงานวิจัยที่ผ่านมามีนัยสำคัญคือจาก <2.0 pC เป็น <1.0 pC ซึ่งคิดเป็นลดลงครึ่งหนึ่ง นั้นแสดงว่า สมมติฐาน แนวคิด ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยและได้นำเสนอไว้ในบทที่ 1 ได้ผลเป็นอย่างดีดังผลการทดสอบที่นำเสนอไว้

4.3 การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลกำลัง

จากการออกแบบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้ สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เป็นตัววัดประสิทธิภาพของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่พัฒนาและนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ผลการทดสอบใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์มีความสามารถครอบคลุมการสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกัน จึงเลือกใช้การทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลกำลัง (Power cable) CV12/20(24)kV ตามมาตรฐาน IEC60502-2 [7] ซึ่งมีค่ายอมรับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD acceptable) 5 pC เท่ากับค่าการยอมรับการเกิดดิสชาร์จในหม้อแปลงเครื่องมื่อวัดแรงดัน (Voltage transformer) ระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบสายเคเบิลกำลัง (Power cable) จึงมีคุณลักษณะเช่นเดียวกัน แต่จะใช้แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 50 Hz สำหรับทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลกำลัง (Power cable) ได้ผลการทดสอบด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

MPD600.1 ดังรูปที่ 4.15 มีค่าความแตกต่างของรูปคลื่นแรงดัน (Different in voltage; DV) 0.56 % ค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_V) 0.32 % และค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD activity) 0.688 pC



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลกำลัง ที่ระดับแรงดัน 20.8 kV ที่สภาวะเรโซแนนซ์ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์เรื่อง หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง (Solid State Transformers for High-voltage Testing) นำเสนอการศึกษาเทคนิควิธีสร้าง การควบคุม และใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น เป็นระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบสำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยเฉพาะการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวงจรทดสอบตามที่มาตรฐาน IEC 60270 [4] กำหนดไว้เป็นแนวทางในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จที่เชื่อถือได้ตรงตามคุณลักษณะของพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ ในระบบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้ารายละเอียดดังบทที่ 2 โดยมีวงจรทดสอบภาคแรงสูงประกอบด้วย ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor) อุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device) วัดสัญญาณแรงดันทดสอบและพัลส์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนผ่านชุดวัดภาคแรงดันต่ำ (Measuring Instrument) ส่งผ่านผลการวัดด้วยระบบใยแก้วนำแสงแสดงผลด้วยชุดคำสั่งสำเร็จรูป (Software) ในคอมพิวเตอร์ โดยมีวัตถุทดสอบ (Test object) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้แก่ หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) และสายเคเบิลกำลัง (Power cable) ยกเว้นระดับแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ด้วยหม้อแปลงทดสอบ (Testing transformer) ซึ่งไม่เป็นแหล่งกำเนิดพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนในระดับสูงจนค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ของระบบทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ ทั้งนี้พื้นที่ติดตั้งระบบทดสอบภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจะต้องมีระบบกราวด์สายดิน (Grounding system) ที่มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอสำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีค่ายอมรับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระดับที่ต่ำมากเช่น หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน และสายเคเบิลกำลัง ที่ระดับแรงดันสูงใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution system) ในประเทศไทย

ในการศึกษาเทคนิควิธีสร้าง การควบคุม และใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น พิจารณาด้านพื้นฐานของวงจรสมมูลภายในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประกอบด้วยวงจรย่อยต่อวงจรกันในลักษณะอนุกรมเรียงต่อกันเป็นลำดับดังนี้

- วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบ 3 เฟส (Three-phase full-wave bridge rectifier circuit) โดยใช้โมดูลไอโอดิโตรีงกระแส รหัส DF75BA80
- วงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H-bridge (H-bridge inverter) โดยมีอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Switching device) ชนิด IGBT (Insulated gate bipolar transistor) รหัส IXXN110N65B4H1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ (Tuning and filter circuit) ชนิดตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductor) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้า 1 μF ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศที่พัฒนาขึ้น ปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ระหว่าง 3 – 300 mH โดยกลไกมอเตอร์ไฟฟ้า

การทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรชนิด IGBT ในวงจรย่อยแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H-bridge ที่ความถี่สูง และความไวสูงของสัญญาณควบคุมแบบ PWM (Pulse width modulation) และรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเช่นเดียวกับการตอบสนองรูปขั้น (Step response) ของ IGBT ที่เลือกใช้ พบว่าสัญญาณควบคุมทั้งสองแบบมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดตามอุดมคติ แต่ในทางปฏิบัติอุปกรณ์ตัดต่อวงจรชนิด IGBT จะมีค่าการตอบสนองความไวในการตัดต่อวงจรน้อยกว่าสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส STM32f407VG และขยายกำลังขับขาเกตของ IGBT ผ่านวงจรขับเกต IGBTs (IGBT Gate drivers) ทั้งสี่ตัวอย่างอิสระ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันไฟกระชากชนิดไดโอด (Flyback Diode) ภายใน IGBT รหัส IXNN110N65B4H1 มีประสิทธิภาพไม่เพียงพอต่อการจำกัดการเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) ในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H-bridge (IGBTs H-bridge inverter) ขนาดของส่วนพุ่งเกิน (Peak Overshoot) นี้เองเป็นสาเหตุหนึ่งของสัญญาณรบกวนพื้นหลังในวงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ลักษณะของส่วนพุ่งเกินที่เกิดขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับกระแสพัลส์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามทฤษฎีซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยทั่วไปของการออกแบบวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (Inverter) จะใช้วงจรป้องกันแรงดันไฟกระชาก (Snubber circuit) เพื่อหน่วงทางเวลาและกักเก็บพลังงานส่วนเกินนี้ ทำให้ส่วนพุ่งเกินนี้มีขนาดต่ำลงจนไม่ส่งผลให้เกิดการลัดวงจร อย่างไรก็ตามในการออกแบบวงจรป้องกันแรงดันไฟกระชากในงานวิจัยที่ผ่านมา [16] พบว่าไม่เพียงพอต่อการลดสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มีค่าการยอมรับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระดับต่ำ และจำเป็นต้องออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) [8]-[16] ใช้งานร่วมด้วยเสมอ จากงานวิจัยข้างต้นได้นำเสนอวงจรป้องกันแรงดันไฟกระชากที่เหมาะสมเป็นแบบตัวต้านทานตัวเก็บประจุ (RC snubber) ที่มีค่าความต้านทาน 39 Ω และค่าความจุไฟฟ้า 75 nF จากการวิเคราะห์ผลการวิจัย [8]-[16] พบว่า เทคนิควิธีการควบคุมมุนำกระแสของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรชนิด IGBT แบบต่างๆ ให้ผลดีในประเด็นรูปคลื่นสัญญาณแรงดันสูงทดสอบมีความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำเพียงพอสำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง งานวิจัยที่กล่าวมาใช้เทคนิควิธีการควบคุมมุนำกระแสบนพื้นฐานของสัญญาณ PWM (pulse width modulation) ซึ่งมีขอบขาขึ้น (Rise time) และขอบขาลง (Fall time) ของสัญญาณรูปขั้นเป็นจำนวนมากจึงเป็นข้อสังเกตว่าไม่สามารถลดสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เนื่องจากเทคนิควิธีการควบคุมมุนำกระแสของ IGBT เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในวงจรทดสอบตรวจจับการ

เกิดดิสชาร์จบางส่วน ดังนั้น สัญญาณควบคุมมมนำกระแสของ IGBTs ที่เป็นไปได้มากที่สุดและจะไม่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนความถี่สูงในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง คือ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave)

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น รับพลังงานไฟฟ้าสามเฟสผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟส (Three-phase full-wave bridge rectifier circuit) แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยมีตัวเก็บประจุเก็บพลังงาน (DC-link) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าเฟสเดียวแบบ H - bridge (H - bridge inverter) ซึ่งถูกควบคุมมมนำกระแสของอุปกรณ์ตัดต่อชนิด IGBTs แยกอิสระต่อกันด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ผ่านวงจรขับเกต (Gate driver circuits) ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณจ่ายออกจากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าด้วยวงจรกรองที่เหมาะสม จ่ายแรงดันต่ำรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้ ให้กับหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงที่ปลอดภัยการดิสชาร์จบางส่วน ป้อนแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์แกว่งจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน [60270] ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

พิจารณาวงจรร้อยของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น ร่วมกับรูปแบบสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัสซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนพื้นหลังต่ำกว่างานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เมื่อเป้าหมายของแรงดันสูงทดสอบคือ แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้ จะต้องจัดองค์ประกอบทางวงจรไฟฟ้าในส่วนวงจรกรอง (Filter circuit) หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง (HV testing transformer) และวงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD detection circuit) ให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ทางวงจรไฟฟ้าที่ความถี่เดียวกันกับความถี่ของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส ทั้งนี้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบจะมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าเป็นแบบความจุไฟฟ้าเนื่องด้วยคุณลักษณะทางกายภาพของการประสานสัมพันธ์ฉนวนไฟฟ้า เมื่อพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ร่วมกัน จึงมีความเหมาะสมที่จะออกแบบวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ ดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 3 เพื่อวัตถุประสงค์ในการกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H - bridge และปรับแต่งวงจรสร้างแรงดันสูงทดสอบสำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนให้เกิดการเรโซแนนซ์สูงสุดทางวงจรไฟฟ้าที่ความถี่เดียวกับสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส อย่างไรก็ตาม งานวิจัย [8]-[16] ที่ผ่านมานำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบวงจรกรองความถี่ในหลากหลายรูปแบบการใช้งานพบว่าวงจรกรองที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนคือ วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุ (LC filter) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ของวิทยานิพนธ์นี้

อุปสรรคที่มักประสบในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จากประสบการณ์ของอาจารย์ที่ปรึกษาและนักศึกษาผู้วิจัยพบว่ามมีองค์ประกอบทางไฟฟ้าแฝง ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า แฝงอยู่ใน

การจัดรูปแบบองค์ประกอบในการทดสอบเสมอ และเป็นปัจจัยส่งผลให้การทดสอบมีความคลาดเคลื่อนผิดเพี้ยนไปจากที่มาตรฐานการทดสอบต่างๆ กำหนดไว้เป็นเงื่อนไขในการทดสอบเพื่อความแม่นยำและเชื่อถือได้ของผลการทดสอบ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทางไฟฟ้าที่มักก่อให้เกิดปัญหาความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันสูงทดสอบในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบ นอกจากรูปคลื่นไซน์ความถี่ที่ต้องการใช้ในการทดสอบแล้วนั้นสัญญาณไฟฟ้าความถี่อื่นๆ มักปรากฏเป็นสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งมีย่านการวัดแบบแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) ในช่วงกว้าง ยิ่งไปกว่านั้นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและส่งผลต่อการทดสอบนี้ไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า จึงมีความจำเป็นต้องใช้การคำนวณเพื่อประเมินขนาดค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้านี้ทางทฤษฎี เพื่อกำหนดค่าการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบในส่วนวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ ดังรายละเอียดในบทที่ 3 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแฝงที่ไม่ทราบค่านี้ประกอบด้วย 2 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแฝง ได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic inductance) ซึ่งมีความสัมพันธ์ซับซ้อนขึ้นอยู่กับการจัดวงจร (Loop) ของวงจรทดสอบภาคแรงดันสูง หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่เข้ารับการทดสอบที่มีส่วนประกอบในลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า เช่นการทดสอบสายเคเบิลกำลังที่มีความยาวสายมาก หรือการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าจำพวกหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งขด ค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic capacitance) เนื่องด้วยในพื้นที่การทดสอบไฟฟ้าแรงสูงภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงถูกออกแบบระบบกราวด์สายดินรวมถึงการต่อลงดิน (Grounding system) ที่มีประสิทธิภาพสูงมาก พร้อมด้วยระบบป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก (Electromagnetic shielding) ประกอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบมีขนาดค่อนข้างสูงใหญ่ สายป้อนแรงดันสูงทดสอบจึงจะมีระยะปลอดภัยจากพื้นลานทดสอบเสมอ ระยะห่างปลอดภัยของสายป้อนแรงสูงนี้เอง จะก่อให้เกิดค่าความจุไฟฟ้ารั่ว (Stray capacitance) เกิดขึ้นในวงจรทดสอบภาคแรงสูงจนส่งผลกระทบต่อทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ด้วยเหตุที่กล่าวมาเกี่ยวกับค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแฝงที่ไม่สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้ด้วยเครื่องมือวัด และคำนวณได้ไม่แม่นยำตามทฤษฎี ในทางปฏิบัติจึงต้องมีการทดลองทำการทดสอบซ้ำๆ เพื่อประเมินค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแฝงในวงจรทดสอบภาคแรงสูงสำหรับการออกแบบวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ จากการวิจัยในวิทยานิพนธ์พบว่า ในการทดลองทำการทดสอบซ้ำๆ ไม่มีความเหมาะสมและสะดวกในทางปฏิบัติการ และอาจส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่เข้ารับการทดสอบได้ นอกจากนี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) จะไม่สามารถระบุค่าการออกแบบวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ที่แม่นยำแน่นอนได้

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) ตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนด้วยวงจรตามมาตรฐาน IEC 60270 [4] แนะนำไว้ นั้น วงจรทดสอบจะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor) อุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device) หรืออิมพีแดนซ์การวัด

(Measuring impedance) โดยหลักการวัดประจุดิซาร์จบางส่วน เมื่อโพลิตทางไฟฟ้าเป็นแบบความจุไฟฟ้า ดังเช่นอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ค่าความจุไฟฟ้าที่แนะนำของอุปกรณ์ที่เข้ารับการทดสอบจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวมากๆ หรือมีค่าความจุไฟฟ้าไม่เกินกว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวในวงจรทดสอบนี้ จึงจะสามารถวัดประจุดิซาร์จบางส่วนได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ดังรายละเอียดในบทที่ 3 ด้วยเหตุนี้การประเมินประมาณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแฝง ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าแน่นอนจึงมีขอบเขตที่ชัดเจนขึ้นและนำไปใช้ในการประเมินค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแฝง เพื่อการออกแบบวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ที่แม่นยำขึ้นด้วยแนวคิดวิธีการทางคณิตศาสตร์ของพรอนี (Prony method) ตามแบบแนวคิดในงานวิจัย [18] ซึ่งได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการพรอนีปรับปรุงสำหรับการเมินหาค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอรูปแบบวิธีการของพรอนีปรับปรุง สำหรับรูปคลื่นจัตุรัสจ่ายออกจากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบ H – bridge (H – bridge inverter) สำหรับการวิเคราะห์วงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนในรูปแบบวงจรสมมูล RLC อนุกรม

จากทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์แบบ RLC และการวิเคราะห์วงจรทดสอบตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยการสร้างแรงดันสูงทดสอบจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นพบว่า ด้วยค่าองค์ทางไฟฟ้าที่มีความแปรปรวนเปลี่ยนแปลงตามอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) ควบคุมได้ยากจากการจัดสภาพวงจรทดสอบ ประเมินค่าได้ยากมากตามทฤษฎี และวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่แม่นยำไม่ได้ด้วยเครื่องมือวัด รวมถึงสภาวะเรโซแนนซ์ในวงจรสมมูลแบบ RLC อนุกรม มีขอบเขตที่แคบมาก ตัวแปรที่เลือกใช้ในการปรับแต่งเรโซแนนซ์และกรองความถี่ผ่าน จะต้องมีความสามารถในช่วงการปรับที่กว้างพอและมีความละเอียดในการปรับแต่งความถี่เรโซแนนซ์ที่เพียงพอในช่วงแคบ และไม่มีเปลี่ยนแปลงต่อการตอบสนองทางความถี่ในวงจรไฟฟ้า ดังนั้น ตัวเหี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ มีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ในการออกแบบวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์แบบตัวเหี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุ ตามที่มิงงานวิจัย [8]-[16] ได้นำเสนอไว้แล้วเกี่ยวกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบตัวเหี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Low pass LC Filter)

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่พัฒนาขึ้นและนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนสร้างแรงดันสูงทดสอบ และส่วนวงจรทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในแต่ละส่วนจะประกอบด้วยส่วนย่อยต่างๆ ตามที่ได้นำเสนอรายละเอียดไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อเป็นการนำเสนอผลการทดสอบใช้งานจริงในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ตามความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานการศึกษาและขอบเขตการวิจัย ดังแสดงไว้ในบทที่ 1 จึงนำเสนอผลการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นนี้ ซึ่งใช้เทคนิคการด้วยคัมมุนากระแสของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรชนิด IGBTs ในวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบ H- bridge (H – bridge inverter) ด้วยสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) อย่างอิสระ โดยสร้างสัญญาณควบคุม

จากไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส STM32F407 ผ่านวงจรถับเกต (Gate driver) ร่วมกับเทคนิควิธีการทางวงจรไฟฟ้าเรโซแนนซ์แบบ RLC อนุกรม (Series resonance circuit) ด้วยการออกแบบวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์ (Tuning and filter circuit) ที่เหมาะสมแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเก็บประจุ (LC circuit) โดยออกแบบและใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap adjustable inductor) ปรับแต่งทางวงจรไฟฟ้าให้วงจรทดสอบอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์สอดคล้องสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นจัตุรัส และตรงกับความถี่ความต้องการแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้ในช่วง 50 – 400 Hz หม้อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวนี้ถูกใช้ในส่วนสร้างแรงดันสูงทดสอบร่วมกับหม้อแปลงทดสอบพิกัด 40 kVA 75 kV 460 V ใช้สัญญาณแรงดันสูงทดสอบที่สร้างได้ ทำการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจำนวน 2 ประเภท ได้แก่ หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันเฟสเดียวระบบ 24 kV ทดสอบด้วยแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ความถี่ 200 Hz และสายเคเบิลกำลังพิกัด CV12/20(24)kV ทดสอบด้วยแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิจารณาผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนใน 3 ประเด็นคือ ค่าความแตกต่างของแรงดัน (Difference voltage; DV) ค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (Total harmonic distortion; THD_v) และสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ทั้งนี้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) ได้รับการยืนยันความปราศจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD Free) จากผู้ผลิตมาก่อนแล้ว ขั้นตอนการป้อนแรงดันสูงอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 61869-3 [6] และ IEC 60502-2 [7] ในการทดสอบนี้ระบบกราวด์ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงมีความเชื่อถือได้เป็นอย่างดี นำเสนอผลการทดสอบดังรายละเอียดในบทที่ 4

จากผลการทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ สร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้ ทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงพบว่า แรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ มีคุณภาพสัญญาณที่ดีมาจากการปรับแต่งองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบให้อยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ โดยมีค่าความแตกต่างของแรงดัน (DV) ต่ำกว่า 1 % ค่าความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดัน (THD_v) ต่ำกว่า 0.5% และผลการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนพบว่า สัญญาณรบกวนพื้นหลังของระบบทดสอบมีค่าต่ำกว่า 1 pC ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนพื้นหลังของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงก่อนการป้อนแรงดันสูงทดสอบ นอกจากนี้ในการปรับแต่งองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรถดสอบที่สภาวะเรโซแนนซ์ทำให้เกิดอัตราขยายแรงดันสูงทดสอบที่มากกว่าอัตราส่วนแรงดัน (Voltage ratio) ของหม้อแปลงทดสอบ (Testing transformer) เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงป้อนเข้าวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบ H – Bridge (IGBTs H – bridge inverter) ซึ่งกำหนดได้ในขั้นตอนการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเพื่อการออกแบบวงจรกรองและปรับแต่งเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุ (LC tuning and filter circuit) โดยกำหนดค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor; Q) ของวงจรมวล RLC อนุกรม

สองชั้น เป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าอัดประจุกระแสตรง (DC link) มีค่าต่ำลงมากอีกด้วย เนื่องจากสามารถปรับแต่งค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในวงจรทดสอบเพื่อหาสภาวะเรโซแนนซ์สูงสุดในแต่ละการทดสอบได้ ด้วยการใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap adjustable inductor) และวิธีการหาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าปรับแต่งเรโซแนนซ์อย่างแม่นยำด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ของโพรนี่ปรับปรุง (Improved prony method) ที่ได้นำเสนอไว้

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบสร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้ ที่มีประสิทธิภาพสูงมาก และมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีความไวต่อสัญญาณรบกวนจากหลายแหล่งกำเนิด ดังเช่นการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เข้ารับการทดสอบ (Test object) ที่มีค่าการยอมรับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD acceptable level) ต่ำมากเช่น หม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltage transformer) และสายเคเบิลกำลัง (Power cable)

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากผลการวิจัยที่นำเสนอพบว่า เทคนิควิธีการสร้าง การควบคุม และใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สร้างแรงดันสูงทดสอบรูปคลื่นไซน์ปรับความถี่ได้ สำหรับการทดสอบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง สามารถนำเอาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังสมัยใหม่มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้เป็นอย่างดี โดยค้นพบเทคนิควิธีการควบคุมที่แตกต่างไปจากการใช้งานเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power frequency converter) ในด้านการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเทคนิควิธีการควบคุมที่เหมาะสมสามารถลดปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวนจากวงจรแปลงผกผันกำลังไฟฟ้า (inverter) ได้จริง และการนำเอาจุดเด่นของวงจรไฟฟ้าแบบเรโซแนนซ์มาใช้ประโยชน์สามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ จึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่งที่จะนำเอาเทคนิควิธีการเช่นนี้พัฒนาร่วมกับเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความจุสูงสมัยใหม่ (energy storage) มาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทดแทนการรับพลังไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้า เพื่อตัดปัญหาทางด้านการผิวนของรูปคลื่นแรงดัน สัญญาณรบกวนจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า และการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ไปใช้แบบเคลื่อนย้ายได้ (Portable device) สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนอกห้องปฏิบัติการ (On site testing) อย่างไรก็ตามหม้อแปลงทดสอบ (Testing transformer) ก็ยังเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนย้ายไปทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนอกห้องปฏิบัติการ จึงควรพัฒนารูปแบบการยกกระดบแรงดันสูงที่เหมาะสมต่อไป ทั้งนี้ในงานวิจัยยังคงต้องปรับหาสภาวะเรโซแนนซ์ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบผู้ปฏิบัติงานควบคุม (manual) หากสามารถนำเอาวิธีการโพรนี่ปรับปรุงเขียนเป็นชุดคำสั่งสำเร็จรูป (Software) ป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อคำนวณค่าการปรับแต่งเรโซแนนซ์ล่วงหน้า (Pre

calculation and setting) จากค่าองค์ประกอบในวงจรทดสอบที่ทราบค่าแน่นอน และปรับหาค่าการเกิดเรโซแนนซ์สูงสุดแบบอัตโนมัติอย่างแม่นยำอีกครั้งด้วยการปรับค่าย้อนกลับ (Feedback control) จะทำให้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์แบบยิ่งขึ้นทั้งการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงและนอกสถานที่ โดยปราศจากปัญหาการถูกรบกวนทางไฟฟ้าโดยตรงและถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทางอ้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60076-1. “Power transformers. Part 1: General,” International Electrotechnical Commission (IEC), 2011.
- [2] ANSI C29.1. “Electrical Power Insulators. Test Methods,” American National Standards Institute (ANSI), 2012.
- [3] IEC 60099-4. “Surge arresters. Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for A.C. systems,” International Electrotechnical Commission (IEC), 2014
- [4] IEC 60270. “High-Voltage Test Techniques. Partial Discharge Measurement,” International Electrotechnical Commission (IEC), 2015
- [5] IEC 60060-1. “High-Voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements,” International Electrotechnical Commission (IEC), Edition 3.0, 2010
- [6] IEC 61869-3. “Instrument Transformer. Part 3: Additional Requirements for Inductive Voltage Transformers,” International Electrotechnical Commission (IEC), 2011
- [7] IEC 60502-2. “Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltage from 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) Up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV),” International Electrotechnical Commission (IEC), 2014
- [8] B. Leelachariyakul, P. Yutthagowith, and S. Potivejkul. “PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter,” 9th 2015 International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures (ISET), Chonburi, Thailand, 26–27 Nov. 2015.
- [9] Phattarin Kitcharoen, Anantawat Kunakorn, Peerawut Yutthagowith, and Worrakan Limcharoen. “Multilevel Frequency Converters and Noise Reduction for Partial Discharge Tests,” 2017 International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand, 27–30 Jun. 2017.

- [10] T. Prombud, P. Kitcharoen, and P. Yutthagowith. "Development of A Partial Discharge Testing System for Potential Transformers," 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon, France, 20–22 Feb. 2018.
- [11] N. Yomkaew, N. Marukatat, and P. Yutthagowith. "A Partial Discharge Testing System Based on A 5-Level Converter with Different Control Signals," 2018 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Auckland, New Zealand, 27–30 Nov. 2018.
- [12] T. Prombud, P. Kitcharoen, and P. Yutthagowith. "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.
- [13] Yutthagowith, T. Prombud, and B. Leelachariyakul. "Development of A Resonant Frequency Converter for Partial Discharge Tests on Potential Transformers," 2018 International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, Slovenia, 13–16 May. 2018.
- [14] Banyat Leelachariyakul, and Peerawut Yutthagowith. "The Development of An Adjustable Low-pass Filter for A Partial Discharge Detection System under Testing with The Power Frequency Converter," 2019 International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 3–6 Sep. 2019.
- [15] Tongpian Prombud, and Peerawut Yutthagowith. "Development of High-voltage Testing System Based on Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers," *Sensors and Materials*, vol. 32, no. 2, 2020, pp. 573-585
- [16] ทองเพ็ญ พรหมบุตร. 2564. "การพัฒนาาระบบทดสอบแรงดันสูงโดยใช้เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดัน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [17] Banyat Leelachariyakul, and Peerawut Yutthagowith, "Accurate Circuit Parameter Determination of a Resonant Power Frequency Converter for High-Voltage and Partial Discharge Tests," *Energies*, Vol. 15, Issue. 15, no. 5497, 2022.

- [18] P. Yutthagowith, and N. Pattanadech. “Improved Least-Square Prony Analysis Technique for Parameter Evaluation of Lightning Impulse Voltage and Current,” IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, Vol. 31 no. 1, 2016, pp. 271-277
- [19] IEC 61083-2. “Instruments and Software Used for Measurement in High-Voltage and High Current Tests. Part 2: Requirements for Software for Tests with Impulse Voltages and Currents,” International Electrotechnical Commission (IEC), Edition 2.0, 2013.
- [20] บุญยพล เพาพาน. 2563. “การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับวัดดิซชาร์จบางส่วนและกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [21] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, หน้า 7-6 ถึง 7-7, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 3, มีนาคม 2549.
- [22] Kuffel, E., Zaengl, W.S., and Kuffel, J. High Voltage Engineering: Fundamentals, pp. 412-430, Newnes, Butterworth-Heinemann, 2nd Edition, Inc. 2000.
- [23] พีรุฒิ ยุทธโกวิท. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, หน้า 7-10 ถึง 7-16, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, กุมภาพันธ์ 2561.
- [24] Lemke, E., et. al. CIGRE WG D1.33: GUIDE FOR PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT IN COMPLIANCE TO IEC 60270, CIGRE publication, Inc. 2008.
- [25] Banyat Leelachariyakul, and Peerawut Yutthagowith, “Resonant Power Frequency Converter and Application in High-Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer,” Energies, Vol. 14, Issue. 7, no. 2014, 2021.

ภาคผนวก
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Banyat Leelachariyakul, Busayapol Paophan, Punyavee Chaisiri, and Peerawut Yutthagowith. “The Performance of A High Frequency Current Transducer for Partial Discharge Measurement under Testing with A Power Frequency Converter,” 2018 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Auckland, New Zealand, 27–30 Nov. 2018.
- [2] Banyat Leelachariyakul, and Peerawut Yutthagowith. “The Development of An Adjustable Low-pass Filter for A Partial Discharge Detection System under Testing with The Power Frequency Converter,” 2019 International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 3–6 Sep. 2019.
- [3] Banyat Leelachariyakul, and Peerawut Yutthagowith, “Resonant Power Frequency Converter and Application in High-Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer,” Energies, Vol. 14, Issue. 7, no. 2014, 2021.
- [4] Banyat Leelachariyakul, and Peerawut Yutthagowith, “Accurate Circuit Parameter Determination of a Resonant Power Frequency Converter for High-Voltage and Partial Discharge Tests,” Energies, Vol. 15, Issue. 15, no. 5497, 2022.



The poster features a background image of a city skyline at night with the Sky Tower. Overlaid on this are images of wind turbines and a smaller inset image of a wind turbine. A large, faint watermark of a university seal is visible in the center.

AUPEC 2018
Auckland, New Zealand
Transition to a Low-Carbon Energy Future

AUPEC 2018 CONFERENCE
Transition to a Low-Carbon Energy Future

AUPEC Programme
27-30 NOVEMBER 2018
AUCKLAND, NEW ZEALAND

THE UNIVERSITY OF
AUCKLAND
H W Z C A I A H O

ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
AND COMPUTER ENGINEERING

ACPE

◆ **IEEE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Performance of A High Frequency Current Transducer for Partial Discharge Measurement under Testing with A Power Frequency Converter

Banyat Leelachariyakul

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

Punyavee Chaisiri

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

Busayapol Paophan

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

Peerawat Yutthagowith

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

Abstract— In this paper, the performance of a high-frequency current transducer (HFCT) for partial discharge measurement under testing with a power frequency converter is presented. The performances of the HFCT in comparison with the conventional partial discharge detection system (Omicron MPD600) were investigated terms of the ability to classify partial discharges and the background noises in the system from PD test cells in case of corona discharge, internal discharge and surface discharge. It's found that the presented system provides the better performances (in terms of the background noise) than conventional PD detection system and it can also be used to distinguish type of partial discharges. In addition, the presented system has been used for the real partial test on the PD test cells successfully. The HFCT for PD detection is an attractive choice in the PD tests of high-voltage equipment.

Index Terms—high-voltage tests; partial discharge; Background noise; variable frequency converter; High frequency current transducer

I. INTRODUCTION

Partial discharge (PD) is a natural phenomenon that occurs within the insulating material under the electric potential. The localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors. PD may not occur next to the conductor. Generally, 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 detected by the circuit as recommended in IEC 60270[1]. The high partial discharge level on the high-voltage equipment often leads to complete insulation breakdown. Therefore, the partial discharge level is a crucial parameter used in evaluation of insulation performance and life time of high-voltage equipment.

Therefore, the partial discharge tests in high-voltage equipment are very important. For newly-manufactured

electrical equipment, partial discharge tests may not be standardized to be routine tests on some devices. Due to the test procedure and improve the test results. This may be due to the fact that the test equipment is very costly. Some electrical test standards are defined as a type test or special test. At the stage of product design, partial discharge tests may be carried out on an electrical equipment prototype. However, there are certain types of high voltage equipment standards that require the tests to detect the partial discharge as a routine test depending on the purpose and use of high-voltage equipment such as power transformer, potential transformers, underground cable, high-voltage cable terminator etc. With the advantage of some non-destructive testing, the results of the tests can be used to analyze the design flaws and produce electrical equipment including the lifetime of electrical equipment which will be predict indirectly through the insulation test of electrical equipment.

We know that the partial discharge detection test is a non-destructive testing, so at the test procedure, there must be no flashover or breakdown. With the test circuit characteristics according to IEC60270, the test object is directly connected to the coupling capacitor and coupling device. If the breakdown occurs, the low-voltage measurement and instrument will be damaged immediately. There are a several of research articles [2] that have attempted to introduce some of the measuring devices, sensor or new technique used to measure PD signal separately from the main circuit such as UHF Method or using the high frequency current transducer (HFCT) for PD signal measurements.

At the same time, there was a research [3] on the variable frequency converter with a suitable frequency filter used to be a voltage source in the partial discharge detection system to solve the problem of power rating, size, cost and complexity, for example, the partial discharge test consisting of a voltage regulator, non PD testing transformer for PD test with 50 Hz AC voltage or the motor-generator set, non PD testing transformer for testing with AC voltage above the fundamental frequency. It is quite hard to perform both tests

Authors would like to acknowledge the Thailand Research Fund RRI Code : PHD6010023.

with the same voltage source, because of the frequency of AC sinusoidal voltage is different. Generally, this tests are conducted at more than twice the frequency of the power frequency in electrical equipment that is magnetic coupling and assigned PD test at the voltage level higher than rating voltage of the device such as potential transformer.

The variable frequency converter with the appropriate filter has been used in PD tests. It can generate a sinusoidal AC voltage signal corresponding to the PD test requirements. However, 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[4]. If variable frequency converter is applied in PD test for high voltage equipment of which acceptable PD level is very low, such as potential transformers (PTs) [5],[6]. The acceptable background noise for the PD test of PTs shall be lower than 2.5 pC. So, in [7], the background noise in the PD test with the PWM converter was reduced to the acceptable level which conforms to the standard requirement. However, a suitable low-pass filter and additional measures for the pure sinusoidal generated waveform are still required.

The aim of this article is to join the advantage of variable frequency converter [3], [7] which has problem about background noise and the advantage of high frequency current transducer (HFCT) which can protect the measuring device from breakdown and flashover. The performances of the combination system are investigated in terms of the output voltage from the HV testing transformer and background noise level in the partial discharge test on PD test cell in a case of corona discharge, internal discharge and surface discharge, in comparison with the commercial PD detection system (Omicron MPD600). The 200 Hz AC voltage will be applied in high voltage laboratory which has good condition of grounding system and the acceptable background noise level.

II. PARTIAL DISCHARGE TESTING SYSTEM

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 PWM variable frequency converter is used as a high voltage source. The 200 Hz AC voltage is supplied into circuit of partial discharge test in this article. The circuit consists of full wave rectifier connected to an H-bridge IGBT inverter with a low-pass filter consisting of an inductor (L), and a capacitor (C) as shown in fig. 1. The circuit can generate an acceptable 200 Hz sinusoidal signal[3]. The voltage difference and THDv are lower than 2% and the background noise is lower than 1 pC at the initial test voltage

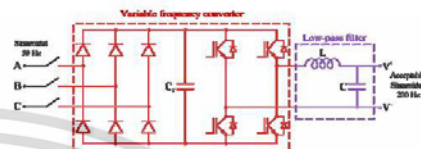


Figure 1. A variable frequency converter and low-pass filter in experiment

The partial discharge detection system according to IEC 60270 [1] as shown in Fig. 2 is composed of a coupling capacitor (C_c) connected in series with a coupling device (CD) or a measuring impedance and a measuring instrument (MI). The coupling device and the coupling capacitor, it acts as a frequency filter circuit. The frequency range 100 kHz to 400 kHz. To filter the pd signal into pulse voltage and then forwarded to the PD measuring instrument (MI) via the connecting cable (CC). And C_t stand for the test object under test before the test, the calibration of the PD detection system with the known charge is required in the real PD test.

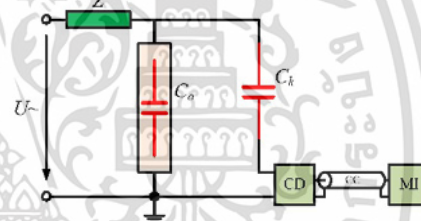


Figure 2. The partial discharge detection system according to IEC 60270.

The high frequency current transducer is used to test the performance of partial discharge detection system with a variable frequency source as a voltage source. The high frequency current transducer[2] used in the test must have capabilities to detect corona discharge, surface discharge and internal discharge. It is made of copper wire entwining in the same way as a Rogowski coil around the special ferrite magnetic core which is able to respond to high frequency PD pulse signal. This HFCT as shows in Fig. 3. must be compatible with the appropriate low voltage measurement instrument. The bandwidth of HFCT is 100 kHz – 20 MHz which is sufficient to detect the partial discharge signal of all three partial discharge type mentioned above and the gain of HFCT is 6V/A. The calibration of the PD detection system with the known charge is required in the real PD test.

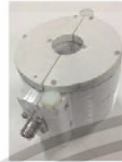


Figure 3. High frequency current transducer in experiment

III. EXPERIMENTS

In this section, we will test with the test circuit as shown in Fig. 5. We will present the background noise test results of partial discharge detection system. The 200 Hz sinusoidal voltage generated by variable frequency converter with low pass filter is confirmed. Supply voltage to step up testing transformer to generate high voltage for PD test and record the background noise of the system. The supplied voltage range is 5-30 kV. Recorded background noise is shown in Table I and Figure 4. The 200 Hz sinusoidal voltage waveform and background noise value at 5 and 30 kV are shown in figures 6 and 7 respectively.

Next, Partial discharge tests were performed with the test cells for the corona discharge internal discharge and surface discharge to record the results of partial discharge activities at PD inception voltage (PDIV) of each case. Figures 8 to 11 show the test results, in case of corona discharge (high-voltage side), corona discharge (low-voltage side), internal discharge and surface discharge respectively, in the upper of each figure is conventional PD detection system and in the lower is the combination of conventional PD detection and high frequency current transducer system.

TABLE I. THE BACKGROUND NOISE

Recorded voltage [kV]	Coupling device [pC]	HFCT [pC]
5	0.5102	0.7774
10	1.253	0.7765
15	1.544	0.8015
20	1.856	0.8355
25	2.865	0.8042
30	3.479	0.8676

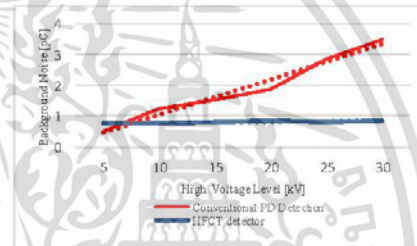


Figure 4. The relationship between the test voltage and the background noise value.

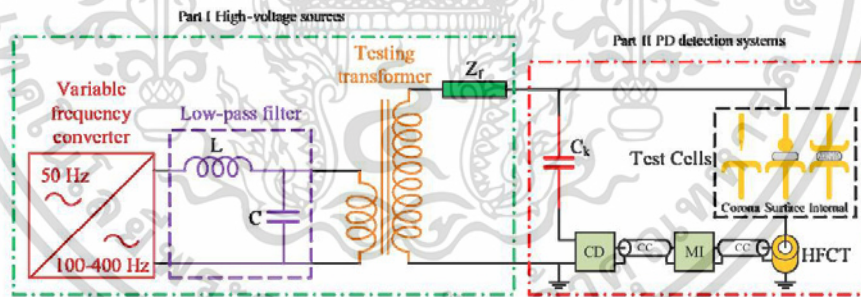


Figure 5. The circuit of partial discharge detection system in experiments.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

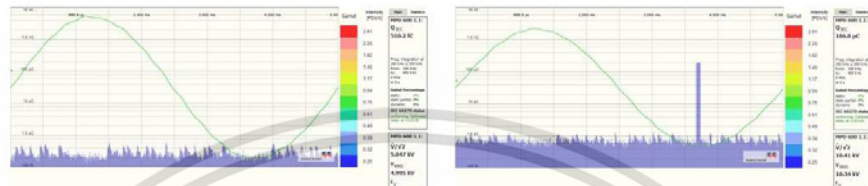


Figure 6. High-voltage waveform and background noise at voltage of 5 kV.

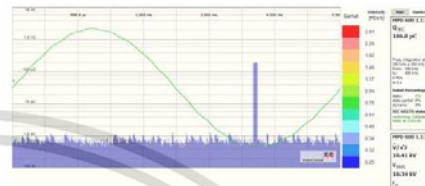


Figure 8. The test results in case of corona discharge (high-voltage side) at voltage of 10.4 kV.

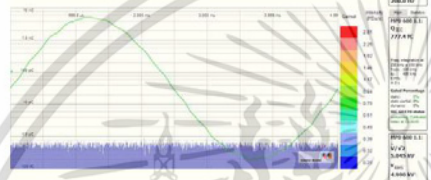


Figure 7. High-voltage waveform and background noise at voltage of 30 kV.

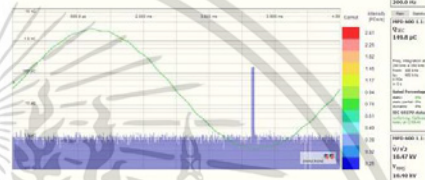
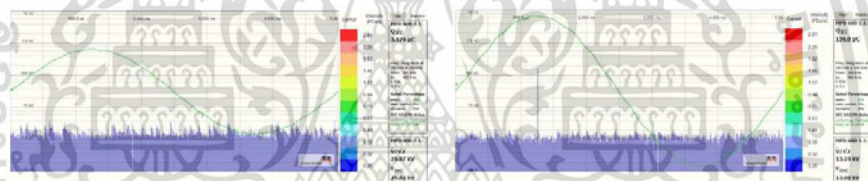


Figure 9. The test results in case of corona discharge (low-voltage side) at voltage of 13.1 kV.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

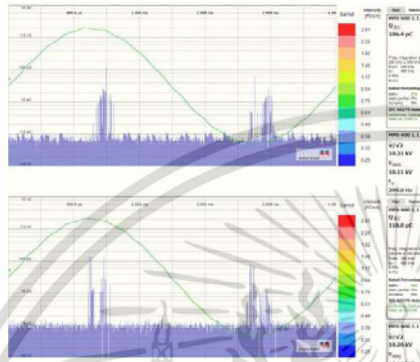


Figure 10. The test results in case of internal discharge at voltage of 10.2 kV.

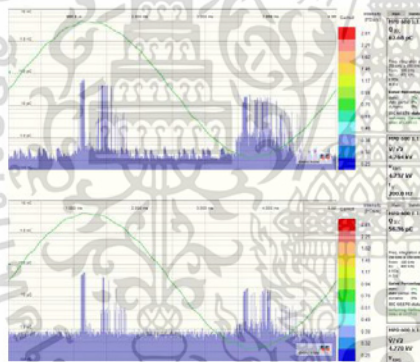


Figure 11. The test results in case of surface discharge at voltage of 4.7 kV.

From experimental results, it is found that the HFCT is able to detect the PD almost the same as the commercial and conventional PD detection system, and also provides the better performance than the conventional system in term of the noise immunity or the lower background noise level.

TABLE II. THE TEST RESULTS OF PD TEST

Type of partial discharges	Q _{me}		Differential [%]
	Conventional [pC]	HFCT [pC]	
A. Corona discharge (high-voltage side) at voltage of 10.4 kV	186.8	149.8	- 24.67
B. Corona discharge (low-voltage side) at voltage of 13.2 kV	189.7	156.0	- 18.35
C. Internal discharge at voltage of 10.2 kV	106.4	118.8	+ 11.65
D. Surface discharge at voltage of 4.7 kV	62.68	56.36	- 10.08

IV. CONCLUSION

From the experimental results, the partial discharge detection system with a variable frequency converter used as a voltage source and a high frequency current transducer used as a PD detector with appropriate low-voltage measurement and instrument can detect the partial discharge which is generated by the PD test cells almost the same as the commercial and conventional PD detection system (Omicron MPD600). In addition, the presented system has the promising performance in term of noise immunity. The undesired noise signal from the voltage source has not much effect to the presented PD detection system. Therefore, the developed system can be used to classify the partial discharge type effectively.

REFERENCES

- [1] "High Voltage Test Technique: Partial Discharge Measurement," IEC Standard 60270: 2000.
- [2] W. Chonpathomphikulsood, B. Paophan, A. Kunakorn, P. Yuthagowith and M. Leelachindrarerk, "Analysis of Rogowski Coils for Partial Discharge Measurement," in ISEIM, 2017.
- [3] Phattann Kitcharoen, Anantawat Kunakorn, Peerawut Yuthagowith, and Sinwat Potvejkul, "Analysis of Frequency Converters for PD Test," in ISEIM, 2017.
- [4] A. Thiedel, F. Martin 2.1 HighVolt Frautechnik Dresden GmbH "Power Frequency Inverters for High Voltage Tests" HighVolt Colloquium, 2007.
- [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] B. Leelachanyakul, P. Yuthagowith, and S. Potvejkul, "PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter," in ISET, 2015.

2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)

Proceedings

3 -6 September 2019
Bucharest, Romania



IEEE Catalog Number: CFP19569-ART (Xplore)

IEEE Catalog Number: CFP19569-USB (USB)

ISBN: 978-1-7281-3349-2 (Xplore)

ISBN: 978-1-7281-3348-5 (USB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Development of An Adjustable Low-pass Filter for A Partial Discharge Detection System under Testing with The Power Frequency Converter

Banyat Leelachariyakul

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

Peerawut Yutthagowith

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

Abstract— In this paper presents the partial discharge detection system based on the power frequency converter as a low-voltage source and an adjustable low-pass filter which is constructed from variable inductor and fixed capacitor. The inductance is able to vary in the range of 8.69 mH to 18.82 mH. This adjustable low-pass filter circuit in partial discharge detection system is able to filter the undesired harmonic voltage and also reduce background noise. It is compatible with partial discharge detection system for high voltage equipment. The background noise of the commercial partial discharge detection system and the total harmonic distortion (THD) of the testing voltage are improved. The results show that this low-pass filter that had been designed and constructed is capable for filtering the noise from a power frequency converter in the PD test and the undesired harmonic voltage sufficiently. The quality of the testing high voltage is good and sufficient for testing equipment such as potential transformers. Thus, application of this particular adjustable low-pass filter with variable cut-off frequency to the power frequency converter is a promising approach for generation of an AC sinusoidal voltage for the partial discharge detection system.

Index Terms— high-voltage tests; partial discharge; background noise; power frequency converter; total harmonic distortion; variable inductor; adjustable low-pass filter.

I. INTRODUCTION

Partial discharge (PD) is a natural phenomenon that occurs within the insulating material under the electric potential. The localized electrical discharge only partially bridges the insulation between conductors, but not completely or electrically connected to the next electrical conductor. Generally, the PD can be classified into two types of discharge, an external discharge and an internal discharge. The external discharge is referred to the PD which occurs in as a result from the ambient air while the causes of the internal discharge are the imperfections in the compressed gas, the insulation liquid and the solid dielectrics. PD phenomena in the high voltage equipment can be examined with various techniques. For example, PD charges can be detected by the circuit as recommended in [1]. The high partial discharge level on the high-voltage equipment often leads to complete insulation breakdown. Therefore, the partial discharge level is a crucial parameter

used to evaluate the insulation performance and life time of high-voltage equipment.

Thus, the partial discharge tests in high-voltage equipment are certainly critical. For the recently manufactured electrical equipment, the partial discharge tests may not be standardized to be routine tests on some devices. The electrical engineering experts are required to perform the testing for the products and improve the test results. According to the fact that the test equipment is rather costly, some electrical test standards are defined as type test or specials test. At the stage of any product design, partial discharge tests could be conducted with the new design of an electrical equipment prototype. Yet, certain types of the high voltage equipment standards require the partial discharge detection test as a routine test depending upon the purpose and use of high-voltage equipment such as power transformer, potential transformers, underground cable, high-voltage cable terminator, etc. With the advantages of some non-destructive testing, the results of the tests could be used to analyze the flaws during the design and production including the lifetime of electrical equipment which will be predicted indirectly through the insulation test of the electrical equipment, one of the options for the non-destructive test is the partial discharge test.

The power frequency converter with the appropriate filter has been used in the PD tests. It can generate a sinusoidal AC voltage signal corresponding to the PD test requirements. However, the power frequency converter in the past is known to produce the high level of noise signal due to the switching operation which leads to the very high background noise level in the PD test [2]. If the power frequency converter is applied in PD test for high voltage equipment of which the acceptable PD level is very low, such as potential transformers (PTs) [3], [4]. Acceptable background noise for the PD test of PTs shall be lower than 2.5 pC. Therefore, in [5], [6] the background noise in the PD test with the PWM converter was reduced to the acceptable level which conforms to the standard requirement. However, a suitable low-pass filter and additional measures for the pure sinusoidal generated waveform are still required.

The aim of this paper is to presents an adjustable low-pass filter which is constructed from the variable inductor along with the fixed capacitor for partial discharge detection

Authors would like to acknowledge the Thailand Research Fund RRI Code : PHD6010023.

978-1-7281-3349-2/19/\$31.00 ©2019 IEEE

Authorized licensed use limited to: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on July 26, 2022 at 18:48:06 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

system based upon the power frequency converter which has to confront with the background noise problem due to the H-bridge IGBT's network with unipolar PWM technique. The iron core variable inductor is used to adjust cut-off frequency of a low-pass filter by tuning the air gap. The performances of PD detection system are investigated in terms of the total harmonic distortion (THD,) of the high-voltages and the background noises in the partial discharge testing with the commercial PD detection system (Omicron MPD600). The 50 Hz AC voltage has been applied in high-voltage laboratory with the acceptable voltage distortion and background noise level.

II. HIGH-VOLTAGE SOURCE

High-voltage source could be separated into three parts. The first part is a power-frequency converter, the second one is the developed adjustable low-pass filter and the last one is the high-voltage testing transformer. The details of these parts are given as follows.

A. Power Frequency Converter

The power frequency converter has been used as a low-voltage source, the AC voltage has been supplied into an isolating transformer and adjustable low-pass filter of partial discharge test in this article. The power frequency converter circuit consists of a full wave rectifier connected to the H-bridge IGBT inverter with a storage capacitor (C) for the DC constant voltage part. For the output side of the converter, it contains an isolating transformer with the rated of 3 kVA 240/240V and a capacitor (C₁) connected as a primary filter of the frequency converter as shown in Fig. 1. The control circuits of H-bridge IGBTs inverter is used with the unipolar PWM techniques which is the modulation between the 50-Hz sinusoidal waveform and the 5 kHz triangular waveform with the modulation index (M_a) of 0.8. The unipolar PWM signal is programmed to a microcontroller board (STM32P407VG), isolating gate driver with optoelectronic circuit (TLP250). Additionally, the snubber circuit is necessary for the functioning of H-bridge IGBTs at the high voltage level.

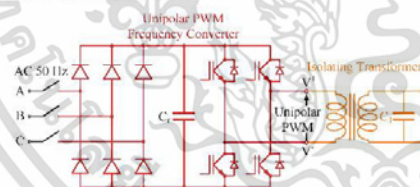


Fig. 1. A unipolar PWM frequency converter and isolating transformer in experiment.

B. The developed adjustable low-pass filter

According to [3], [4], the selected frequency of the AC high-voltage that have been used to detect the PD signal in the high-voltage equipment is vary from 50 to 200 Hz

depends on the equipment under test (EUT). The developed adjustable low-pass filter is in the form of basic RLC low-pass filter as shown in Fig. 2, with the inductor (L) of which the inductance is able to be varied in the range of 8.69-18.82 mH by tuning the air gap as shown in Fig. 3. It is functioning correspondingly with the capacitance 16 μ F fixed capacitor to filter any undesirable signals that could affect the background noise of the partial discharge detection in high-voltage equipment test circuit. An equivalent circuit of the acknowledged adjustable low-pass filter circuit as presented in Fig. 2 and has a transfer impedance as from Eq. (1), and the cut-off frequency can be define by Eq. (2).

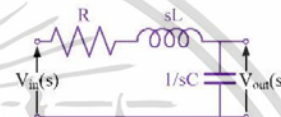


Fig. 2. RLC Low-pass filter

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \quad (1)$$

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



Fig. 3. A variable inductor in experiments

Therefore, the variable inductor is used in low pass filter circuit. The cut-off frequency of the low-pass filter circuit is able to adjust in the range of 135-290 Hz. The frequency response of the developed adjustable low-pass filter circuit is presented in the Fig. 6, the red dot line represents the frequency response of the cut-off frequency at 135 Hz and the solid blue line represents the frequency response of the cut-off frequency at 290 Hz.

C. High-voltage Testing Transformer

The high-voltage testing transformer with rated of 40 kVA 75kV/460V was employed in this test and functioning to raise the voltage output level from low-pass filter circuit to meet the certain level of the partial discharge tests. Notably, a testing transformer for this particular test must not generate the noise (free of PD).

III. PARTIAL DISCHARGE DETECTION SYSTEM

The partial discharge test circuit according to [1] as shown in Fig. 4 contains of a coupling capacitor (C_k) connected in series with a coupling device (CD) and a measuring impedance or a measuring instrument (MI). The coupling device and the coupling capacitor act as a frequency filter circuit for PD detection. The frequency range is 100 kHz to 400 kHz. To filter the PD signal into pulse voltage and then forwarded to the PD measuring instrument (MI) via the connecting cable (CC). C_k stands for the test object under test. Before the test, the calibration of the PD detection system with the known charge is required in the real PD test.

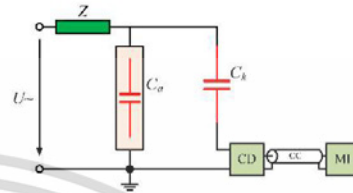


Fig. 4. The partial discharge detection system according to IEC 60270.

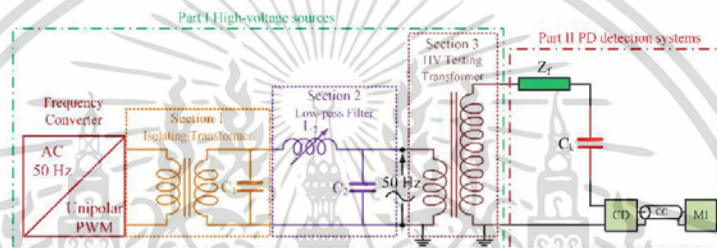


Fig. 5. The circuit of partial discharge detection system in experiments.

IV. ANALYTIC OF PD DETECTION SYSTEM IN EXPERIMENTS

From Fig. 5, the partial discharge testing system in this paper contains the unipolar PWM power frequency converter which has a noise problem and connected to isolating transformer. It has the high-voltage testing transformer to raise the AC voltage level. The developed adjustable low-pass filter is filtering the low-voltage side of the high-voltage testing transformer to filter the noise from the power frequency converter, all three components is illustrated in equivalent circuit of high voltage source as shown in Fig. 6. With the transfer impedance as defines by Eq. (3). The frequency response in each section is presented in Fig. 7. green dot-dash line represents frequency response of section 1, black dash line represents frequency response of section 3, blue solid line represents frequency response of section 2 at cut-off frequency of 290 Hz, and red dot line represents frequency response of section 2 at cut-off frequency of 135 Hz.

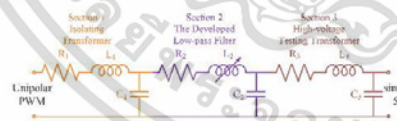


Fig. 6. The equivalent circuit of high voltage source

$$H_{HVS}(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s) \quad (3)$$

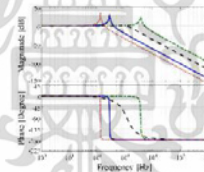


Fig. 7. The frequency response of high-voltage source in each section

Considering Sections III and IV with the analytical results of the frequency response of high-voltage source illustrated in Fig. 8, the variable cut-off frequency range of 135-290 Hz depends on the cut-off frequency that has been designed with the variable inductor. With the adjustable filter, the PD detection system has the background noise level and the total harmonic distortion (THD,) results in the acceptable values.

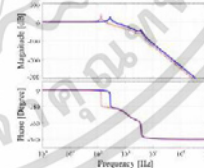


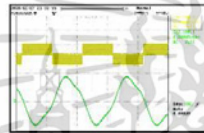
Fig. 8. The frequency response of high-voltage source in experiments

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

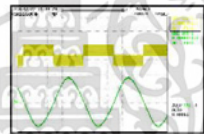
V. EXPERIMENTS

In this section, the partial discharge test circuit as shown in Fig. 5 was tested, and the background noise in tests and the THD_v values of partial discharge detection system were recorded. The 50 Hz AC sinusoidal voltage with the developed adjustable low-pass filter had been generated by power frequency converter. The output voltage from the filter was supplied to high-voltage testing transformer to generate high voltage for partial discharge test. The high voltage was raised up to 40 kV, the recorded background noise and the THD_v value are shown in Table I. and Fig. 9 to 12 respectively.

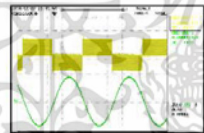
High voltage [kV]	THD _v [%]	Background noise [pC]
40	>10	2.062
40	=5	1.929
40	<1	1.863



a) The THD_v value > 10%



b) The THD_v value = 5%



c) The THD_v value < 1%

Fig. 9. The unipolar PWM input voltage signals and the sinusoidal output voltage signals

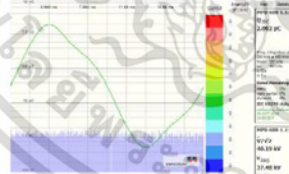


Fig. 10. The background noise level and the THD_v value > 10% at voltage of 40 kV.

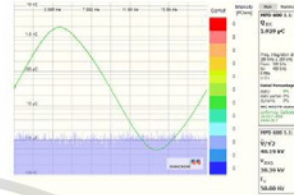


Fig. 11. The background noise level and the THD_v value of 5% at voltage of 40 kV.

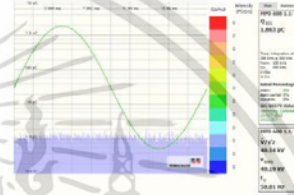


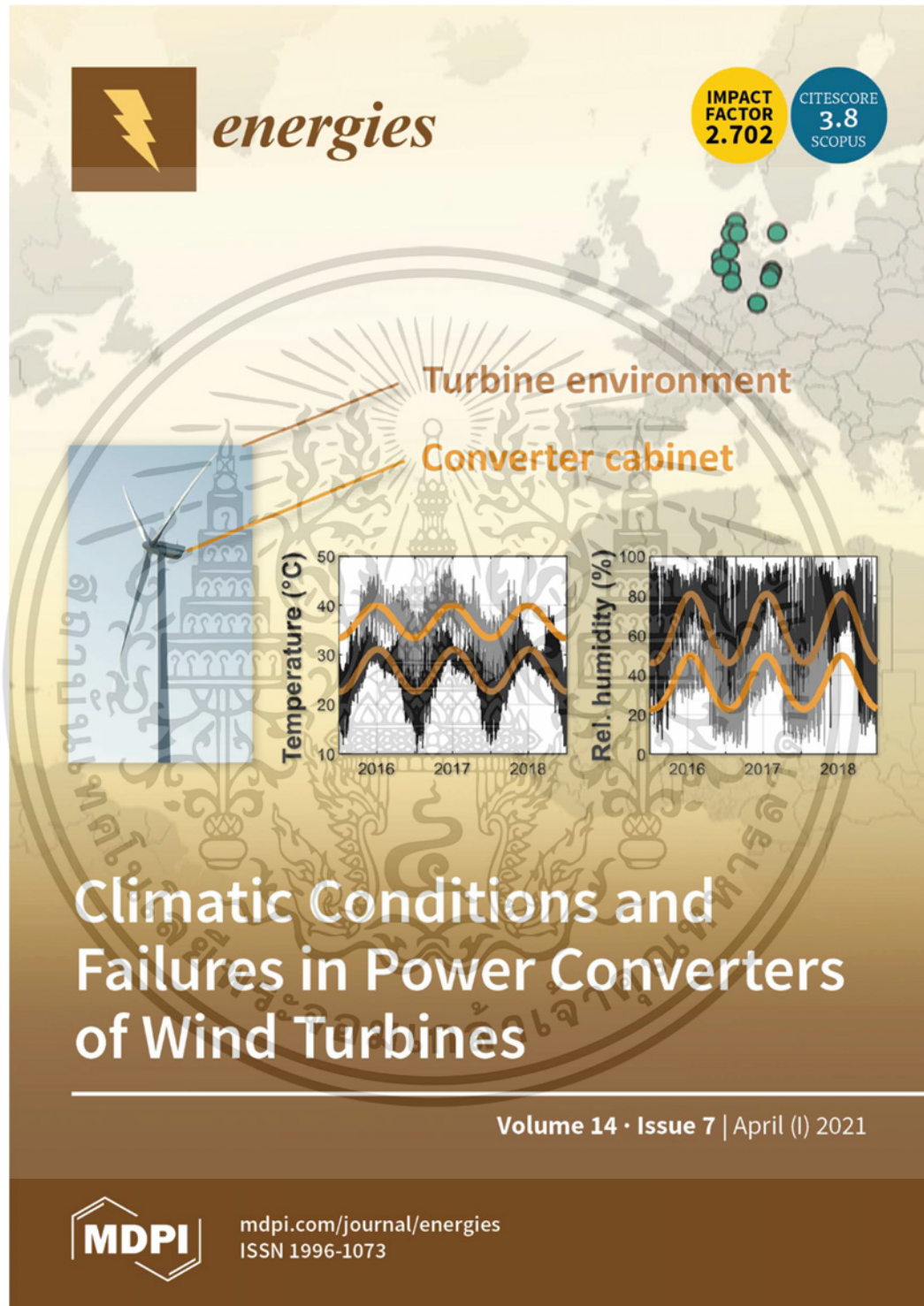
Fig. 12. The background noise level and the THD_v < 1% at voltage of 40 kV.

VI. CONCLUSION

From the experimental results, it is found that the developed adjustable low-pass filter is capable of solving the background noise problem from the power frequency converter in the PD testing circuit. The background noise in the PD testing with a potential transformer is less than 2 pC for the whole testing high-voltage. Also, the THD_v of the testing high voltage is less than 1%. From this achievement, the presented adjustable low-pass filter circuit is an attractive approach for increasing the quality of the testing voltage generated by the commercial power frequency converter in the partial discharge testing for testing high-voltage equipment such as power transformers and potential transformers.

REFERENCES

- [1] "High Voltage Test Techniques: Partial Discharge Measurement," IEC Standard 60270: 2000
- [2] A. Thiedel, F. Martin, I. HighVolt Prüftechnik Dresden GmbH "Power Frequency Inverters for High Voltage Tests" HighVolt Colloquium, 2007.
- [3] "Instrument Transformer-Part 1: General requirements," IEC Standard 61869-1: 2007.
- [4] "Instrument Transformer-Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers," IEC Standard 61869-3: 2011.
- [5] B. Leelachanyakul, P. Yuthagowith, and S. Potivejikul, "PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter," in ISET, 2015.
- [6] T. Prombud, and P. Yuthagowith, "Development of A Low-Pass Filter for Partial Discharge Testing System with the Power Frequency Converter" in AUPEC, 2018.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



an Open Access Journal by MDPI



Resonant Power Frequency Converter and Application in High-Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer

Banyat Leelachariyakul; Peerawut Yutthagowith

Energies 2021, Volume 14, Issue 7, 2014



an Open Access Journal by MDPI



CERTIFICATE OF PUBLICATION

Certificate of publication for the article titled:

Resonant Power Frequency Converter and Application in High Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer

Authored by:

Banyat Leelachariyakul; Peerawut Yutthagowith

Published in:

Energies 2021, Volume 14, Issue 7, 2014



Basel, April 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Article

Resonant Power Frequency Converter and Application in High-Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer

Banyat Leelachariyakul and Peerawut Yutthagowith *

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, School of Engineering, 1 Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; klbanyat@gmail.com

* Correspondence: peerawut.yu@kmitl.ac.th; Tel.: +66-(0)2-329-8330

Abstract: This paper presents application of a resonant power frequency converter for high-voltage (HV) and partial discharge (PD) test of a voltage transformer. The rating voltage, power, and frequency of the system are 70 kV_{rms}, 40 kVA, and 200 Hz, respectively. The testing system utilized the converter feeding to an HV testing transformer connected to a conventional partial discharge detection system. The converter system comprising a rectifier and insulated-gate bipolar (IGBT) switches with the H-bridge configuration was applied as a low-voltage source instead of a conventional motor-generator test set which requires large space and high cost. The requirements of the test according to the standards are quality of the test voltage and the background noise level. The required voltage must have the different voltage (DV) and total harmonic distortion (THD_v) in the acceptable values of less than 5%. The DV is defined as the difference of the root mean square and peak voltages in percent. The required background noise level must be lower than 2.5 pC. Simulations and experiments were performed for verification of the developed system performance in comparison with those of the previously developed system based on the pulse width modulation converter. It is found that the developed system can provide the testing voltage with the DV and the THD_v of lower than 1% and the background noise level of lower than 1 pC. Considering this achievement of promising performance, the developed system is an attractive choice for the HV and PD testing of voltage transformers in real practice.

Keywords: background noise; high-voltage and partial discharge test; resonant power frequency converter; switching interference; voltage transformer



Citation: Leelachariyakul, B.; Yutthagowith, P. Resonant Power Frequency Converter and Application in High-Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer. *Energies* **2021**, *14*, 2014. <https://doi.org/10.3390/en14072014>

Academic Editor: Dan Doru Micu

Received: 18 February 2021

Accepted: 22 March 2021

Published: 5 April 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The main problem of the high-voltage (HV) and partial discharge (PD) test of voltage transformers is the applied voltage, which is higher than the transformer rating voltage. If such a voltage level with the rating frequency (50 Hz or 60 Hz) is applied to the test, it will lead to core saturation, high current consumption, and applied testing voltage distortion. For avoiding such conditions, the international standard defines the quality of the testing voltage with the different voltage (the root mean square value and peak value divided by square root of two) and total harmonic distortion, which are not higher than 5%. Under the test conditions, the applied voltage in such tests is not higher than two times the rating voltage of the transformer, so the applied voltage should have a frequency higher than two times that of the rating frequency. For safety reasons, the frequency used in the test is from 100 to 400 Hz. It is found that the frequency of 200 Hz is sufficient in all tests of the voltage transformers. Therefore, the 200 Hz frequency was utilized in all considered simulations and experiments. In the past, the motor and generator test set was applied in the test. However, the test set is quite costly, and it requires a large space for installation.

The high-voltage (HV) test is a crucial issue for the verification of the performance of the 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 measurement.

According to IEC 60270:2015, [1] partial discharges (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 with 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 the PD, named corona discharge, can occur in areas with 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 an HV testing transformer at the low-voltage side. The HV from the transformer is applied to a test object. Due to the nonlinear characteristic of the electrical and electronic equipment, the disturbance is generated in the electrical system, and it sometimes causes power quality problems, i.e., the voltage distortion and the background noise level. According to IEC 60060-1, [3] the testing voltage should be an almost purely sinusoidal waveform of which the total harmonic distortion voltage (THD_v), defined by Equation (1), and different voltage (DV ; peak voltage 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 voltage transformer (VT) and PD pattern during the HV and PD test. It is found that the DV and THD_v are higher than 5%. Additionally, the background noise level is higher than 2.5 pC (the acceptable background noise for the HV and PD test of the voltage transformers) [4,5]. To avoid the voltage distortion, and the unacceptable background noise level and to satisfy the standard requirements, an additional measure such as a voltage filter is necessary to be applied to the system.

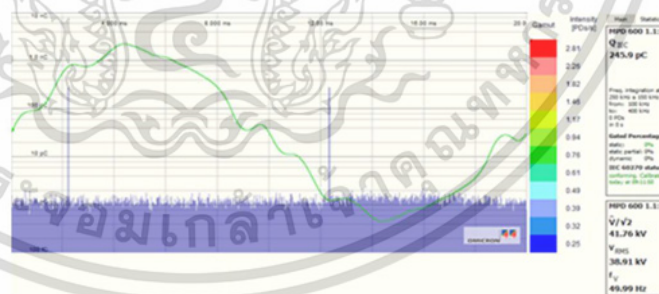


Figure 1. Test voltage waveform and the partial discharge (PD) pattern during the high-voltage (HV) test.

For the HV test of voltage transformers (VTs) and to confirm the insulation performance of the test object, it is necessary to raise the voltage to be higher than the rating voltage. If the applied testing voltage with the rated frequency is used in the test, the core

saturation of the voltage transformer can occur and the applied voltage may be distorted. For a better understanding, an example case should be considered. For the partial discharge test of a VT with the rating voltage (U_r) of 24 kV, the pre-stress voltage condition with a withstand voltage (U_t) of 80% is applied to the VT, 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 Figure 2. Therefore, saturation of the iron core of VT is avoided by applying voltage with a frequency higher than the rated frequency of the VT. If the voltage with a power frequency of 50 Hz is applied to the HV side of the VT, the saturation effect of the VT will influence the distortion of the applied voltage waveform, as shown in Figure 1, and the DV and THD_v will be higher than 5%. Aside from the nonlinear voltage, the core saturation can cause thermal runaway and explosion of PT. 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 VTs with the rating frequencies of 50 and 60 Hz.

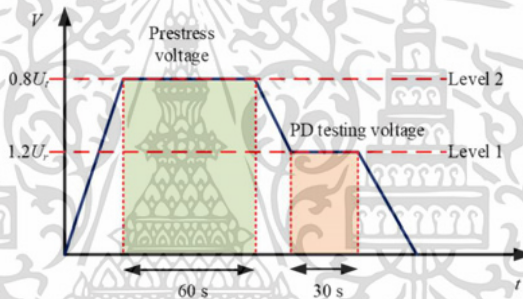


Figure 2. Procedure of voltage application for the PD test of voltage transformers (VTs).

Nowadays, power electronics technology has been applied in many practical fields, such as home appliances, automotives and traction, 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 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 VTs insulated with oil, the acceptable PD level is only 5 pC [4,5]. Consequently, the testing 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 voltage and obtaining a voltage waveform close to a pure sinusoidal wave. However, the filter cannot eliminate the interference in the PD measurement completely, leading the background noise in the PD test to be higher than the acceptable level.

Recently, there are attempts for development of the HV and PD test of voltage transformer. In [6–9], the power frequency converter based on the pulse width modulation (PWM) techniques was developed as the low-voltage source applied to the HV testing transformer for the HV and PD test. In [10,11], the analysis of effect of the additional filter for the reduction in the background noise in the HV and PD test was presented. In [12], the analysis of the PWM converter with the additional filter was presented, and the best switching frequency in terms of the quality of the generated voltage and background noise level were investigated. However, it is found that the developed system in [12] required the additional filter with quite large capacitance and high power consumption.

For overcoming such problems, the HV and PD testing system based on a resonant power frequency converter is proposed in this paper. Simulations were utilized for the design of the system, and experiments were performed to verify the validity of the developed system. The system performances in terms of the testing voltage quality and background noise level were investigated and analyzed in comparison with those of the previous developed system based on the pulse width modulation converter. It is found that the developed system performances are much superior to those of the previous system. The different voltage and total harmonic distortion of the testing voltage are less than 1%, and the background noise level is less than 1 pC at the rating voltage. From this achievement in terms of the system performances, the developed system is an attractive choice for the HV and PD testing of voltage transformers in the real practice.

2. Development of HV Testing System for PD Tests

The developed system with the equivalent circuit shown in Figure 3 is composed of a power frequency converter, an additional inductor, an additional capacitor, an HV testing transformer, and a partial discharge detection system. Z_t , C_k , CD, CC, and MI stand for the internal impedance of the testing transformer, the coupling capacitor, the coupling device or the measuring impedance, the measuring cable, and the measuring instrument, respectively.

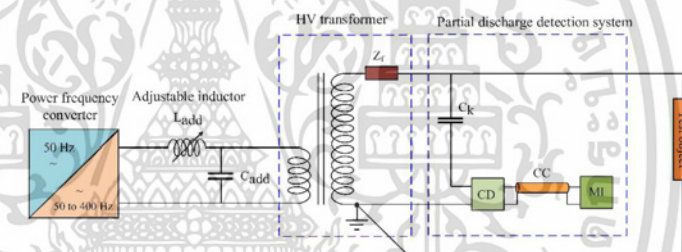


Figure 3. Partial discharge testing system.

2.1. Power Frequency Converter

The power frequency converter based on the H-bridge configuration, as shown in Figure 4, was developed. The converter is composed of a rectifier and H-bridge insulated-gate bipolar transistors (IGBTs), which can be controlled to generate either a square wave or pulse width modulation (PWM) waveforms.

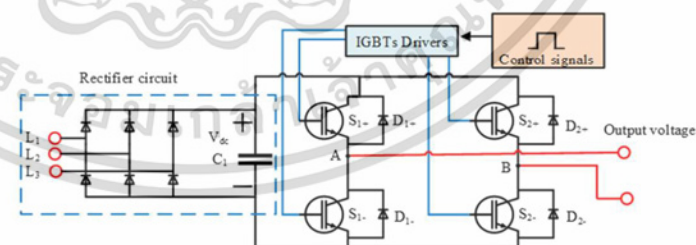


Figure 4. High-voltage source power converter generator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The unipolar PWM technique [13–15] is based on operation of four control switches (S1, S2, S3, and S4) and four diodes (D1, D2, D3, and D4) 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.

Table 1. Switch states in full-bridge single-phase voltage source inverter unipolar pulse width modulation (PWM).

State	Switch Conduction Status		Conduction Status of IGBT and Diode		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

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

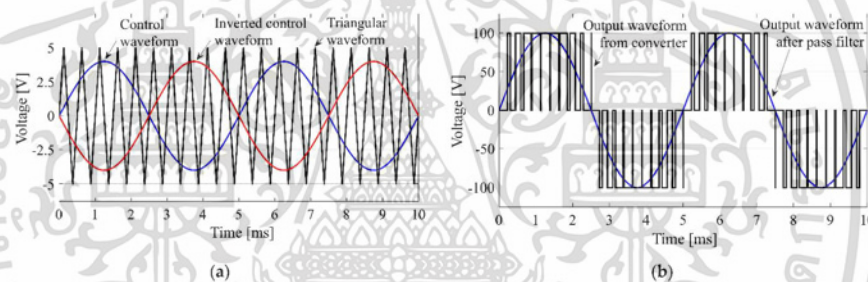


Figure 5. Generated PWM waveform from the PWM converter. (a) Pulse width modulation in the unipolar converter. (b) Output waveform of the power converter.

For generation of the PWM waveform, the triangular waveform is set to be from 1.2 to 20 kHz. However, from the study in [12], it was found that the best performance of the PWM converter occurred at the switching frequency of 3.2 kHz. For generation of the square wave used in the proposed resonant circuit, the frequency of the triangular waveform is set to be the same as that of the control waveform.

2.2. Partial Discharge Detection System

The developed partial discharge detection system is composed of a coupling capacitor (C_k) connected in series with the measuring impedance (coupling device). 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 Figure 6. The transfer impedance characteristic with the low and high cut-off frequencies of 30 kHz and 20 MHz, as shown in Figure 7. For avoiding the undesired noise signal in the HV testing environment, the standard [1] recommends using the band pass filter for a quasi-integration of the charge determination, and the acceptable range of cut-off frequencies of the filter are also provided [1]. In this paper, the digital band pass filter with the cut-off frequencies of 100 kHz and 400 kHz is utilized according to the standard requirement. The transfer function of the filter and the transfer impedance with the considered filter are also presented in Figure 7.

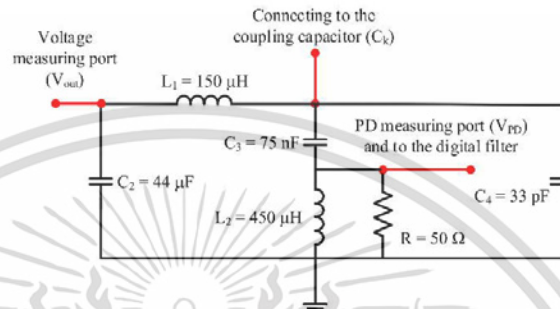


Figure 6. Equivalent circuit of the measuring impedance or the coupling device (CD).

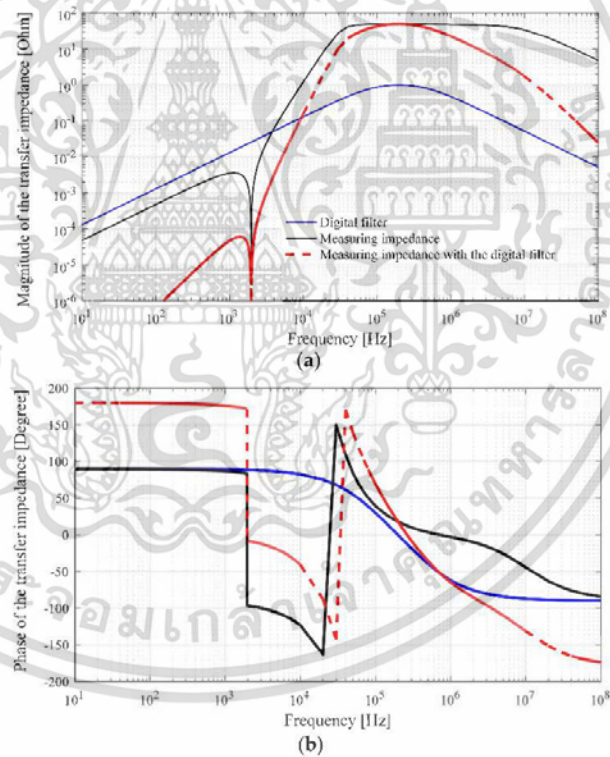


Figure 7. Transfer impedance of the measuring impedance in the frequency domain. (a) Magnitude (b) Phase in degree.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The equivalent circuit of the PD detection system with the HV testing transformer is shown in Figure 8. The crucial circuit parameters of the testing system are expressed in Table 2. The transfer function of the output voltage (V_{out}/V_{in}) can be calculated as shown in Figure 9 which shows that this transfer function has the characteristic of a low-pass filter. As shown in Figure 9, the cut-off frequency is about 1.2 kHz. It is noted that the total impedance of the HV testing transformer with the rating voltage of 460 V/75 kV and the rating power of 40 kVA is transferred to the HV side of the transformer. The circuit parameters are expressed in Figure 8, and the voltage transformer under test [16] or the test object can be represented well with a high impedance, which has an effect on the test circuit. When the 1 pC calibrator pulse current is injected into the system in the calibration process, the peak voltage response at the PD port and filtered peak voltage by the digital band pass filter are about 2.0 mV and 0.115 mV, respectively. The results of the response voltages are shown in Figure 10.

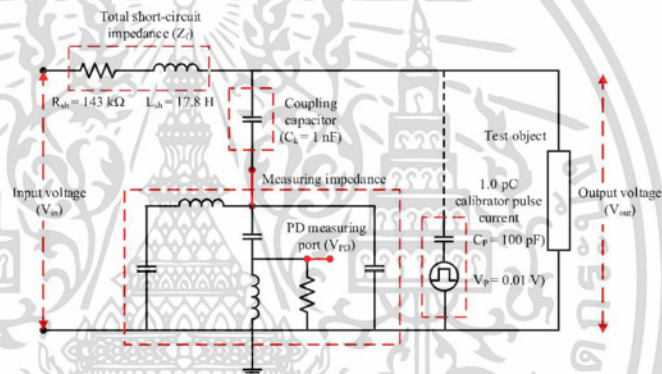


Figure 8. Simplified equivalent circuit of the HV and PD tests.

Table 2. Circuit parameters of the testing system.

Circuit Parameters	Transfer to the LV Side	Transfer to the HV Side
Testing transformer series resistance (R_{sh})	5.38 Ω	143 k Ω
Testing transformer series inductance (L_{sh})	0.67 mH	17.8 H
Coupling capacitance (C_k)	26.8 μ F	1 nF

For a better understanding of the problem of using the PWM frequency converter in the HV and PD test, 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 an additional filter as shown in Figure 8. The voltage across the test object has small oscillation, as shown in Figure 11, and its THD_v is 0.93%. The PWM voltage also affects the voltage at the PD measuring port. The peak voltages at the PD port and the filtered one are of 570 mV and 370 mV, respectively. As shown in Figure 12, the interference voltages are much higher than the peak voltage response of a 1 pC calibrator pulse. It can be seen that the band pass filter is not very effective for mitigation of the interference signal from the switching voltage. Therefore, the mean value for mitigating the interference from the PWM frequency converter is required for the PD test in real practice. In this paper, the additional inductor and capacitor are proposed to connect at the LV side of the HV testing transformer for

obtaining the resonant condition. The analysis of the additional circuit components will be presented in the next Section 2.3.

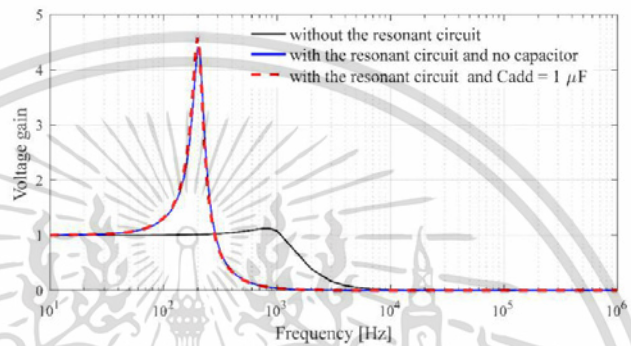


Figure 9. The calculated and normalized transfer function of the testing voltage with and without additional resonant circuit.

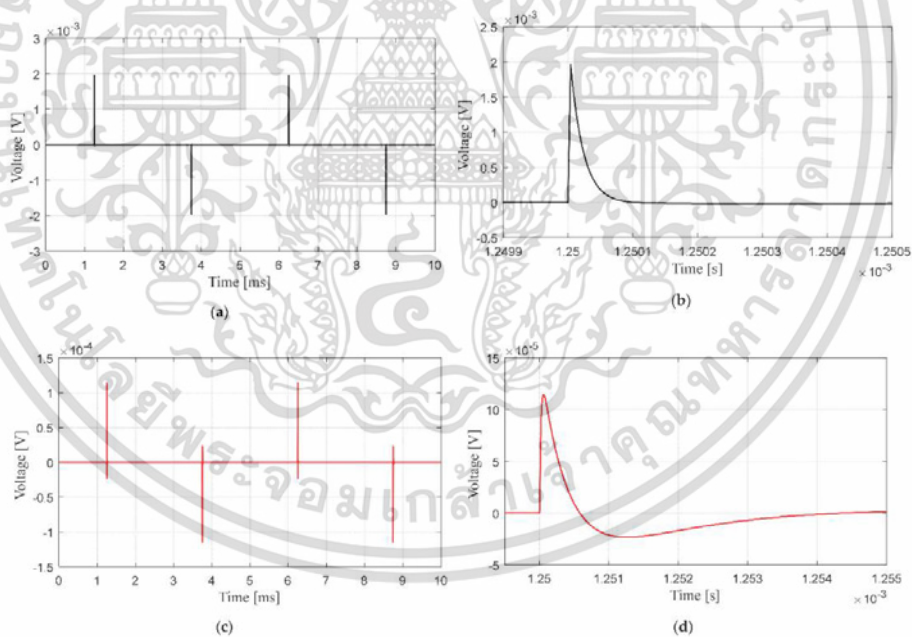


Figure 10. Voltage response of 1 pC calibrator pulse current (a) at the PD port with long span time, (b) at the PD port with short span time, (c) filtered by the band pass filter with long span time, (d) filtered by the band pass filter with short span time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

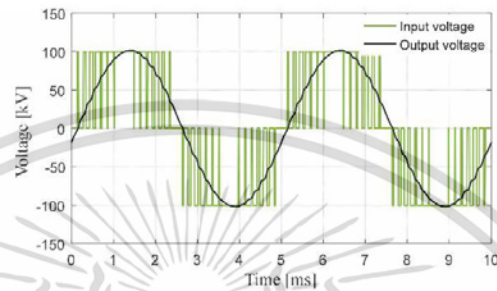


Figure 11. Input and output voltage waveforms.

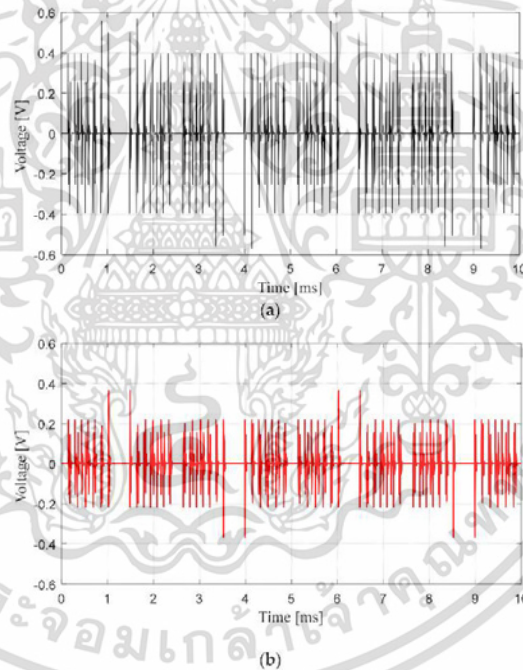


Figure 12. Voltage response at the PD port in the case of applied PWM voltage at 100 kV_p. (a) At the PD port (b) filtered by the band pass filter.

2.3. Additional Circuit for Circuit Resonance

To reduce the noise level, the additional filter is required as in the previous studies [6–12]. In this paper, an additional adjustable inductor and capacitor are proposed to add in the low-voltage side of the testing transformer for obtaining the resonant condition of the test circuit as shown in Figure 3. The inductance was adjusted to obtain the resonant

condition at the frequency of 200 Hz. With the circuit parameters of the testing system, the series resonant condition is occurred by Equation (2), where L_t is total inductance and C_t is total capacitance. In the considered system, the total capacitance can be approximated as the coupling capacitance (C_k). The required additional inductance (L_{add}) can be calculated by Equations (2) and (3), and the result is about 23 mH.

$$L_t = \frac{1}{\omega^2 C_t} \quad (2)$$

$$L_t = L_{add} + L_{sh} \quad (3)$$

The voltage gain at the resonant condition is equivalent to the quality factor (Q) as expressed in Equation (4), where R_t is total series resistance composed of internal resistance (R_{int}) of the additional inductor and series resistance of the testing transformer (R_{sh}).

$$Q = \frac{\sqrt{L_t/C_t}}{R_t} \quad (4)$$

In this paper, the required Q was set to be not less than 4 which is sufficient for obtaining the almost pure sinusoidal output voltage. It is noted that the quality factor of 4 will be confirmed to be sufficient by the simulation result in the Section 3. For the designed inductor, the internal resistance is necessary to be controlled for obtaining the desired Q . The maximum internal resistance (R_{int}) can be calculated by Equation (5), and the result is 2.0 Ω .

$$R_t = R_{int} + R_{sh} \quad (5)$$

From the calculation above, the adjustable inductor was designed by a manufacturer. The inductance of the developed adjustable inductor can be varied from 10 to 40 mH, and the internal resistance is 1.3 Ω .

The equivalent circuit of the HV and PD testing system is expressed in Figure 13. All circuit parameters in Figure 13 were transferred to the HV side of the testing transformer. It is noticed on the equivalent circuit in Figure 8 that the inductor will not affect the PD measurement if the PD occurs on the HV side. The transfer function in the form of the attenuation factor (V_{PD}/V_{in}) can be determined as the results in Figure 14a and the attenuation factor with the band pass filter recommended by the standard are expressed in Figure 14b. The input square wave voltage generated by the converter of 17.1 kV (corresponding to 100 kV output voltage) and the output voltage are expressed in Figure 15. The black line stands for the input voltage of the HV testing transformer (transferred to the HV side of the testing transformer), and the red line stands for the output voltage of the testing transformer or the voltage across the test object. It is noticed that the output voltage waveform is almost pure sine due to the occurrence of resonant condition at the frequency of 200 Hz. It is also confirmed that the quality factor of 4 is sufficient to obtain the waveform as the standard requirement.

In the results shown in Figures 16 and 17. The black line is denoted for the voltage response of 1 pC calibrator pulse current, and the red line stands for the interference signal at the output voltage of 100 kV. Without the additional capacitor (C_{add}), the interference from the square wave as the input voltage of the testing transformer is still high. Additionally, the band pass filter recommended by the standard is not particularly effective for mitigation of the attenuation of the interference signal, as shown in Figure 16. With connection of the additional capacitor (C_{add}), the interference is attenuated to be lower than the voltage response of the 1 pC calibrator pulse current. Additionally, the band pass filter recommended by the standard is quite effective for mitigation of attenuation of interference signal as it is shown in Figure 17. In Figure 17b, the maximum interference signal is 0.07 mV, which is equivalent to background noise level of 0.6 pC (0.115 mV is equivalent to the PD level of 1 pC).

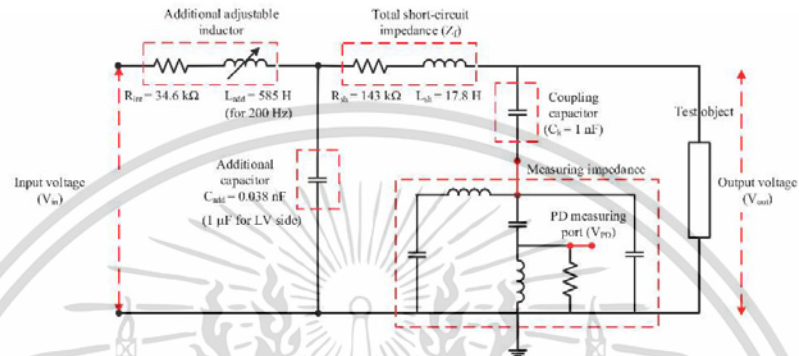
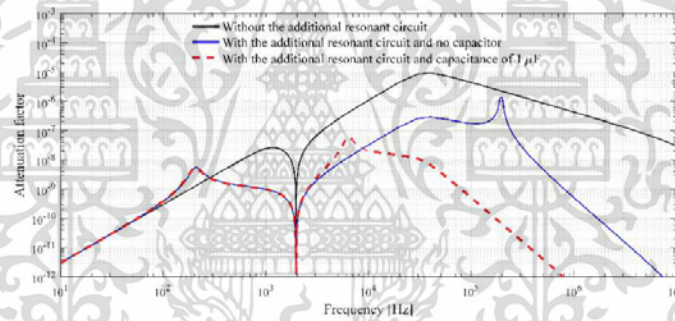
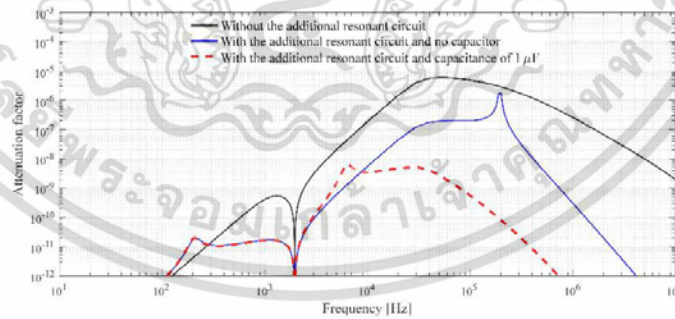


Figure 13. Equivalent circuit of the PD testing system with the resonant circuit.



(a)



(b)

Figure 14. Attenuation factor of the HV and PD testing system. (a) At the PD port without the band pass filter recommended by the standard; (b) at PD port with the band pass filter recommended by the standard.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

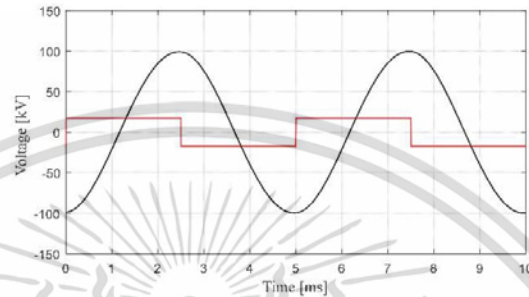


Figure 15. The input and output voltages of the testing transformer (transferred to the HV side).

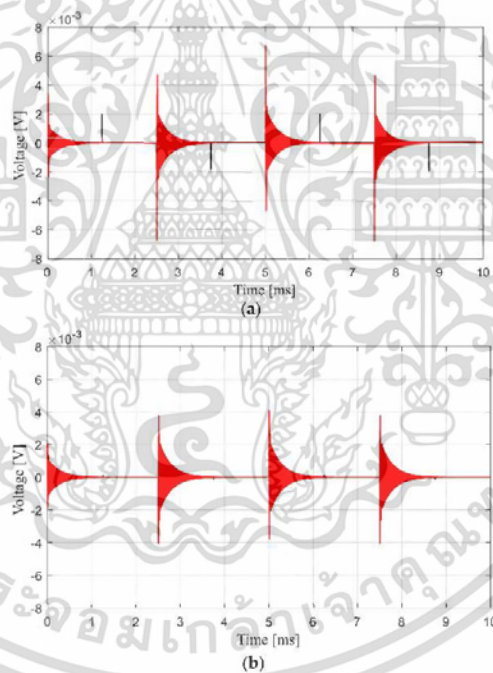


Figure 16. Comparison of the voltage responses from 1 pC calibrator pulse current and the interference signal of the resonant circuit in the case of the output voltage of 100 kV and without the additional capacitor. (a) At the PD port without the band pass filter recommended by the standard; (b) at PD port with the band pass filter recommended by the standard.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

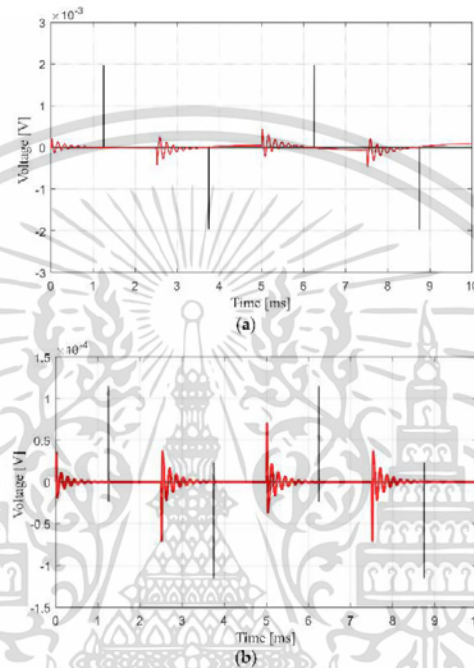


Figure 17. Comparison of the voltage responses from 1 pC calibrator pulse current and the interference signal of the resonant circuit in the case of the output voltage of 100 kV and with the additional capacitor connection. (a) At the PD port without the band pass filter recommended by the standard; (b) at PD port with the band pass filter recommended by the standard.

3. Experiments

Some experiments were carried out to investigate the performance of the developed system in the partial discharge tests. The experimental setup is shown in Figure 18. The circuit parameters were set to be the same as in Figure 13. The performances of the developed system were investigated in terms of the different voltage, total harmonic distortion of the output voltage, and the background noise.

To avoid interference signal from electromagnetic coupling in the HV laboratory, the commercial EO/OE converters (Omicron) [17] 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 without the application of the developed inverter is about 0.8 pC. The experiments are separated into two topics as follows.

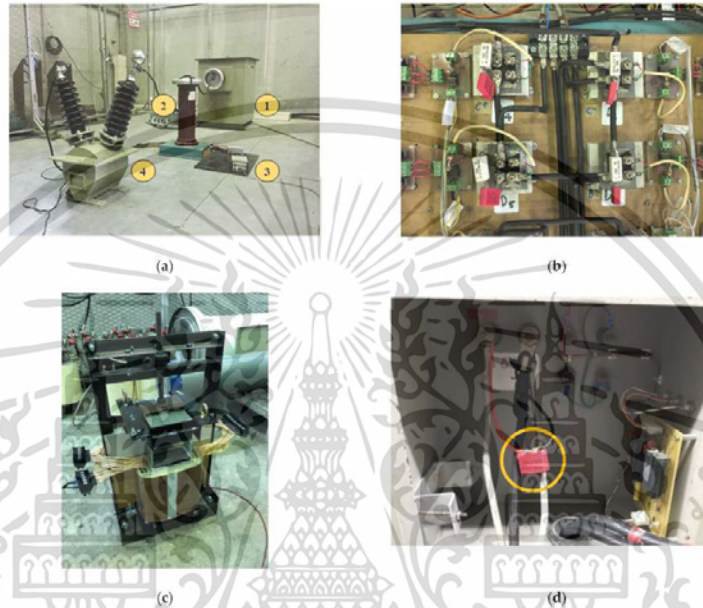


Figure 18. Experimental setup of the PD test with the VT. (a) Equipment in the HV testing room: (1) HV testing transformer (2) Coupling capacitor (3) Coupling device for PD detection (4) VT under test. (b) The developed converter, (c) adjustable inductor and (d) the additional capacitor connected at the input of the HV testing transformer.

3.1. Experiments without Test Object

The experiments in this part are performed to examine the performance of the developed system in comparison with the previous developed system (the PWM converter with the switching frequency of 3.2 kHz) [12]. There is no test object connected to the test system. As shown in Figure 19a, the PWM system without an additional filter provides very high interference. However, when the additional filter was connected to the system, at the pre-stress voltage of 40 kV_{rms}, the background noise was reduced significantly to be about 2.0 pC, as shown in Figure 19b. The DC input voltage supplied to the converter was about 370 V. The different voltage and THD_v are 0.66% and 0.80%, respectively.

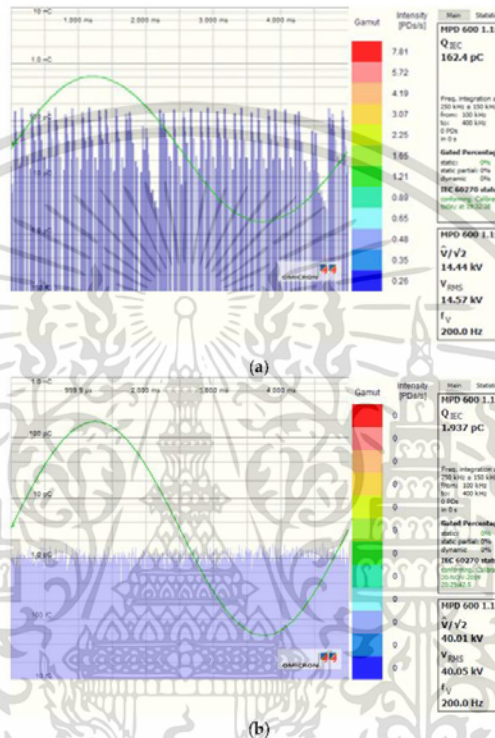


Figure 19. Experimental test results of the testing voltage of $40\text{ kV}_{\text{rms}}$: (a) Without the additional filter; (b) with the additional filter.

When the developed resonant system was considered, in the case of no connection of the additional capacitor, the acceptable background noise (2.5 pC) was reached at the output voltage of about 5 kV , as shown in Figure 20a. This agreed with the simulation result in Figure 16b. The interference signal of 4 mV is equivalent to the background noise level of 34.78 pC ($4/0.115$). With the same proportion of the simulation result, the background noise level should be 2.48 pC ($34.78 \times 5/70$). In the case of connection of the additional capacitor, the background noise level at the output voltage is still the same as that of no application of the converter to the system, as shown in Figure 20b. At the output voltage of $40\text{ kV}_{\text{rms}}$, the DC input voltage supplied to the converter was about 83 V , which corresponds to the voltage gain of 4.5 —this agreed with the simulation results. The different voltage and THD_V are 0.61% and 0.35% , respectively.

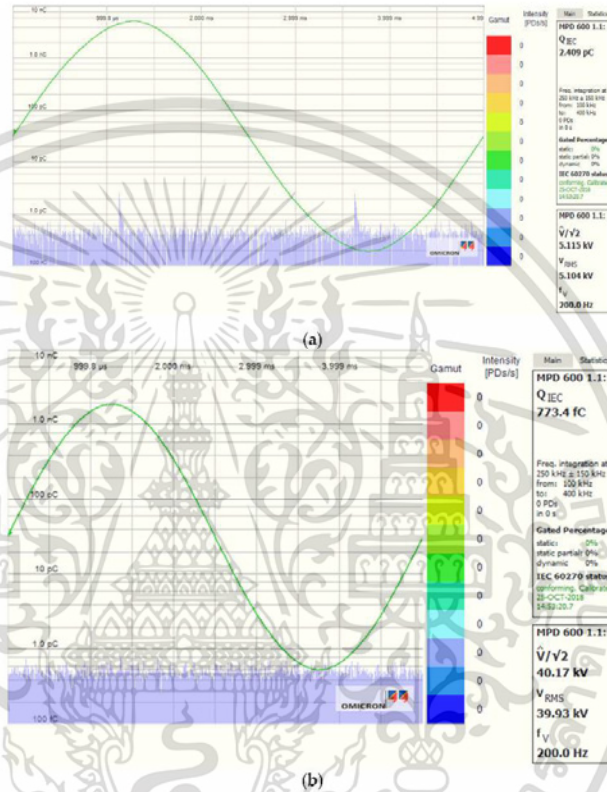


Figure 20. Experimental test results at the testing voltage of $40 \text{ kV}_{\text{rms}}$. (a) Without the additional capacitor; (b) with the additional capacitor.

3.2. Experiment with a Test Object

For confirming validity of the developed system, two voltage transformers (test object 1 and 2) were tested. The frequency of the input voltage varied from 50 to 400 Hz for examining the voltage gain. The experimental results in comparison with the simulation result without test object are expressed in Figure 21. It is found that the test object does not affect much the voltage gain. The voltage gain at the resonant frequency is still higher than in all considered cases.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

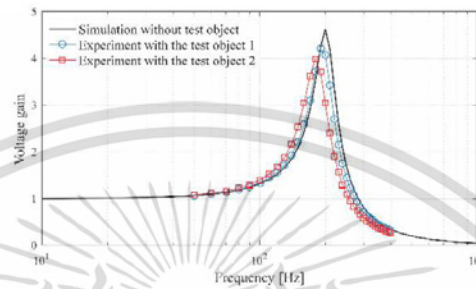


Figure 21. Comparison of the simulation and experimental voltage gains.

The other experiment was performed to confirm the performance of the developed system in the PD test with a VT. The voltage was raised up to $40\text{ kV}_{\text{rms}}$ for the prestress condition and decreased to $30\text{ kV}_{\text{rms}}$ for recording PD activity. The standard PD pulse with a charge of 5 pC is used for calibration in the PD test. The experimental results at the testing voltage of about $30\text{ kV}_{\text{rms}}$ are shown in Figure 22. The different voltage (peak voltage/ $\sqrt{2} = 28.98\text{ kV}$ and RMS voltage 28.79 kV) was 0.65% , the THD_V was 0.35% , and the background noise was less than 1 pC .

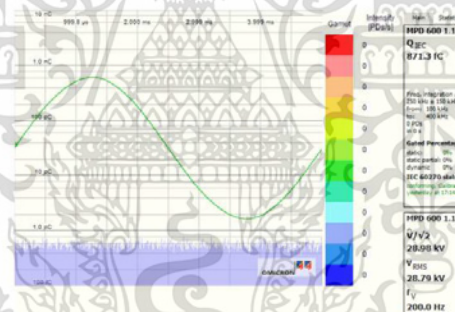


Figure 22. Experimental results with VT connected to the developed system.

4. Conclusions

The developed partial discharge testing system based on the resonant frequency converter has been presented. The performance of the developed high-voltage and partial discharge test in terms of the different voltage (DV), THD_V , and background noise in the high-voltage and partial discharge test has been investigated in comparison with those of the previously developed system based on the PWM technique. According to the simulation and experimental results, the DV was less than 1% , THD_V was less than 0.5% , and background noise was less than 1 pC . In addition, the developed system was successfully used for the real PD test on a voltage transformer with the rating voltage of 24 kV . The developed system is an attractive choice for PD tests because of its high performance and low cost compared with the motor-generator system and can be developed into a mobile system for partial discharge tests in on-site inspections. However, the limitation of the proposed system is that the proposed system is effective for the small load test object. The additional filter is still required for the test with the large load test object.

Author Contributions: Conceptualization, B.L. and P.Y.; methodology, B.L. and P.Y.; validation, B.L.; formal analysis, P.Y.; investigation, P.Y. and B.L.; writing—original draft preparation, B.L. and P.Y.; writing—review and editing, P.Y. and B.L.; supervision, P.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.


Funding: This work was financially supported by Research and Researchers for Industries (RRI), the Thailand Research Fund (TRF) No. PHD6010023.

Acknowledgments: This work was financially supported by Research and Researchers for Industries (RRI), the Thailand Research Fund (TRF) No. PHD6010023. The authors also would like to thank Sakda MANEEROT of LAMCOOL TRANSFORMERS Co., Ltd. and TESLA POWER Co., Ltd. for his technical advices.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

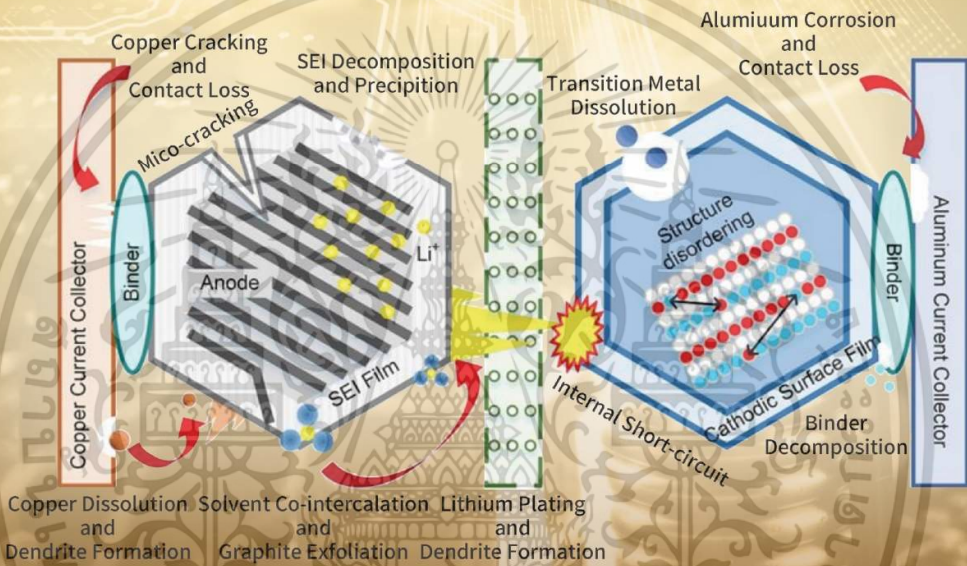
- IEC 60270. *High-Voltage Test Techniques: Partial Discharge Measurement*; International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2015.
- IEEE Standard 4TM-2013. *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques*; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2013.
- IEC 60060-1. *High-Voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements*, 3rd ed.; International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2010.
- IEC 61869-1. *Instrument Transformer-Part 1: General Requirements*; International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2007.
- IEC 61869-3. *Instrument Transformer-Part 3: Additional Requirements for Inductive Voltage Transformers*; International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2011.
- Leelachariyakul, B.; Yutthagowith, P.; Potivejkul, S. PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter. In Proceedings of the International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures (ISET), Chonburi, Thailand, 26–27 November 2015.
- Kitcharoen, P.; Kunakom, A.; Yutthagowith, P.; Lincharoen, W. Multilevel frequency converters and noise reduction for partial discharge tests. In Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand, 27–30 June 2017.
- Prombud, T.; Kitcharoen, P.; Yutthagowith, P. Development of a partial discharge testing system for potential transformers. In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon, France, 20–22 February 2018.
- Yomkaew, N.; Marukatat, N.; Yutthagowith, P. A Partial Discharge Testing System Based on A 5-Level Converter with Different Control Signals. In Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Auckland, New Zealand, 27–30 November 2018.
- Prombud, T.; Kitcharoen, P.; Yutthagowith, P. Development of a Low-Pass Filter for Partial Discharge Testing System with the Power Frequency Converter. In Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Auckland, New Zealand, 27–30 November 2018.
- Leelachariyakul, B.; Yutthagowith, P. The Development of an Adjustable Low-pass Filter for a Partial Discharge Detection System under Testing with the Power Frequency Converter. In Proceedings of the International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 3–6 September 2019.
- Prombud, T.; Yutthagowith, P. Development of High-voltage Testing System Based on Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers. *Sens. Mater.* **2020**, *32*, 573–585. [[CrossRef](#)]
- Holmes, D.G.; Lipo, T.A. Pulse Width Modulation for Power Converters. In *Principles and Practice*; John Wiley & Sons INC.: Hoboken, NJ, USA, 2003.
- Rashid, M.H. *Power Electronics Handbook*, 3rd ed.; Butterworth-Heinemann: Waltham, MA, USA, 2011.
- ThiedeI, A.; Martin, F. *Power Frequency Inverters for High Voltage Tests*; High-Volt Prüftechnik Dresden GmbH, High-Volt Colloquium: Dresden, Germany, 2007.
- Hauschild, W.; Lemke, E. *High-Voltage Test and Measuring Techniques*; Springer: Cham, Switzerland, 2014.
- User Manual for the Device MPD600, Brochure, Downloaded in January 2019. Available online: <https://www.omicronenergy.com/en/products/mpd-600/documents/> (accessed on 16 January 2019).



energies


IMPACT FACTOR
3.252

CITESCORE
5.0



Li-Ion Battery Anode State of Charge Estimation and Degradation Monitoring

Volume 15 · Issue 15 | August (I) 2022



mdpi.com/journal/energies
ISSN 1996-1073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



an Open Access Journal by MDPI



Accurate Circuit Parameter Determination of a Resonant Power Frequency Converter for High-Voltage and Partial Discharge Tests

Banyat Leelachariyakul; Peerawut Yutthagowith

Energies 2022, Volume 15, Issue 15, 5497



an Open Access Journal by MDPI



CERTIFICATE OF PUBLICATION

Certificate of publication for the article titled:
Accurate Circuit Parameter Determination of a Resonant Power Frequency Converter for High-Voltage and Partial Discharge Tests

Authored by:
Banyat Leelachariyakul; Peerawut Yutthagowith

Published in:
Energies 2022, Volume 15, Issue 15, 5497



Basel, July 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Article

Accurate Circuit Parameter Determination of a Resonant Power Frequency Converter for High-Voltage and Partial Discharge Tests

Banyat Leelachariyakul and Peerawat Yutthagowith *

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1 Chalalongkrong Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; klbanyat@gmail.com

* Correspondence: peerawat.yu@kmitl.ac.th; Tel.: +66-(0)2-329-8330

Abstract: For high-voltage (HV) and partial discharge (PD) tests on high-voltage equipment, a resonant power frequency converter has recently been developed. A single-phase power frequency converter with a resonant tuning and filter circuit and an HV testing transformer comprise the developed system. A difficulty in the tuning and filter circuit design is the unknown testing system circuit parameters, including unknown parasitic inductance, capacitance, and internal resistance. In this paper, a system with a voltage rating of 75 kV_{rms}, apparent power of 40 kVA, and an operating frequency from 50 Hz to 200 Hz is considered for determination of the equivalent circuit parameters. From the determined circuit parameters, the appropriate resonant tuning and filter circuit was designed effectively. The transfer functions of the input and output testing voltages, along with the transfer impedance of the input voltage and signal voltage of the PD measuring port, were analyzed. The system design was verified by experiments with a voltage transformer. The gain of the transfer impedance was about 15 and 4 at the testing frequencies of 50 Hz and 200 Hz, respectively. With the proper design, it is possible to generate an output voltage waveform that is almost entirely sinusoidal and has a background noise level of under 1 pC. According to the experimental results, the system design of the resonant converter and the method for determining the equivalent circuit are very helpful for the HV and PD tests of voltage transformers in actual practice.

Keywords: equivalent circuit determination; high-voltage and partial discharge tests; resonant power frequency converter; voltage transformer; power cable



Citation: Leelachariyakul, B.; Yutthagowith, P. Accurate Circuit Parameter Determination of a Resonant Power Frequency Converter for High-Voltage and Partial Discharge Tests. *Energies* **2022**, *15*, 5497. <https://doi.org/10.3390/en15155497>

Academic Editor: Eleonora Riva Sanseverino

Received: 30 June 2022

Accepted: 20 July 2022

Published: 29 July 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

It is well known that one of the main problems in the HV and PD tests of high-voltage equipment is the applied testing voltage, which is higher than the transformer rating voltage [1,2]. If such a voltage level with a rating frequency of 50 or 60 Hz is utilized in the tests for some iron-core devices, such as transformers and reactors, core saturation of the devices under test will occur, resulting in the distortion of the applied testing voltage. Furthermore, testing with such voltages also consumes a high current. To avoid the aforementioned conditions, the international standard defines the quality of the testing voltage by the different voltage (the root-mean-square value and peak value divided by the square root of two) and total harmonic distortion, which are not higher than 5%. Under the test conditions, the applied voltage in such tests is no more than two times the rating voltage of the transformer, so the applied voltage should have a frequency higher than two times the rating frequency. For safety purposes, the frequency used in the test should be in the range of 100 Hz to 400 Hz. Generally, it is found that the frequency of 200 Hz is sufficient in all tests of iron-core devices. Therefore, the frequency range from 50 Hz to 200 Hz was utilized in all considered simulations and experiments. In the past, the motor and generator test set was applied in the test; however, the test set has a high cost, and requires a large space for installation.

The high-voltage (HV) test is essential for confirming the HV equipment's performance during design and construction procedures. Such tests comprise partial discharge measurement, power loss measurement, dielectric loss measurement, and insulation voltage withstand tests.

The PD measurement is the most crucial test for assessing the performance and lifetime of insulation. Partial discharges (PDs) are regional electrical discharges that only partially bridge the insulation between electrodes. They result from localized electrical stresses in the insulation or on its surface. Such discharges often manifest as pulses with a duration shorter than 1 μ s. There are three main categories for PDs: Corona discharges, the first type of PD, can happen in places with sharp edges and intense electric field stress. The second type is caused by voids and bubbles in the interior insulation material. If there is sufficient electrical field stress and these faults have lower insulation levels than the main insulation material, a PD can arise. The final type of PD, known as surface discharge, takes place at the boundary of two materials.

The simplest technique [1] to produce HV for HV testing is using an HV testing transformer connected with a voltage regulator. The power supply of the regulator can be a generator or a low-voltage grid.

However, the nonlinear characteristics of iron-core and switching devices lead occasionally to issues with power quality, such as voltage distortion and interferences affecting the background noise in PD and HV tests. IEC 60060-1 [2] specifies that the testing voltage must have a nearly pure sinusoidal waveform, where the difference in voltage (DV; peak voltage divided by $\sqrt{2}$ and RMS voltage) and the total harmonic distortion voltage (THD_v), given by Equation (1), must not be greater than 5%.

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

where V_{p1} and V_{pi} denote the peak voltages of the fundamental frequency and of the i th harmonic frequency, respectively.

For better understanding, a test case should be considered. A testing voltage of about 40 kV (much higher than the rating voltage of 24 kV) was applied to an iron-core device, and the PD characteristic is shown in Figure 1. It was found that the testing voltage deviated from the sinusoidal waveform due to the core saturation. The DV and THD_v were higher than 5%. In addition, the background noise level was higher than 2.5 pC (i.e., the acceptable background noise for the HV and PD tests of the power cable and the voltage transformers) [3–5]. To avoid the voltage distortion and the background noise level, and to satisfy the standard requirements, an additional measure—such as a voltage filter—must be applied to the system.

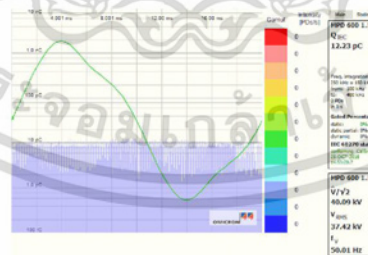


Figure 1. The test voltage waveform and PD characteristic in the HV and PD tests.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

To confirm the insulation performance of the HV equipment in HV tests, the testing voltage must be increased to a level greater than the rating voltage. The power frequency (50 Hz or 60 Hz) of the testing voltage can be used in the HV test for capacitance loads such as insulators, bushings, cables, etc. For example, in the HV and PD testing of a power cable [4] ($U_0 = 12$ kV) for the pre-stress condition, a voltage of $2U_0$ (24 kV) is applied to the cable, and then the testing voltage is reduced to the level of $1.73U_0$ (20.8 kV) to record the PD activity. Figure 2a shows the procedure of applying voltage in the PD test for the cable.

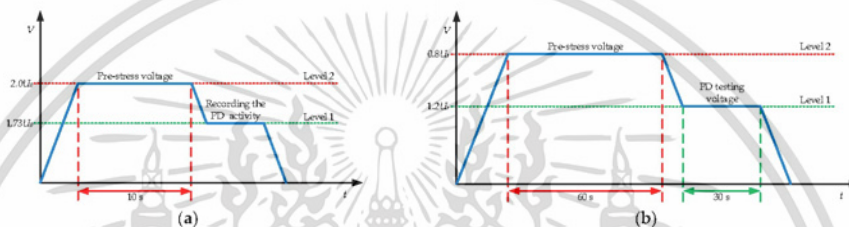


Figure 2. Application of voltage for the PD test: procedure (a) for the power cables, and (b) for the voltage transformers.

However, in the case of iron-core test objects such as voltage transformers (VTs), reactors, etc., to prevent the core saturation and distortion of the applied voltage, the applied testing voltage must have a frequency that is higher than the power frequency. In the HV and partial discharge test [5] of a VT (with a rating voltage (U_r) of 24 kV), 80% of the withstand voltage ($U_i = 50$ kV) is applied to the VT for the pre-stress condition, and then the testing voltage is reduced to $1.2U_i$ (28.8 kV) to record the PD activity. Figure 2b shows the procedure of applying voltage in the PD test. Since the testing voltage in the PD test is higher than the rating voltage, the saturation of the iron core can occur. Therefore, to avoid such saturation, a voltage with a frequency is higher than the rated frequency of the VT is employed in the test. The saturation effect of the VT influences the applied voltage distortion, as shown in Figure 1, leading to DV and THD_v of more than 5% if a voltage with a power frequency of 50 Hz is applied to the HV side of the VT. Aside from the nonlinear voltage, the core saturation can cause thermal runaway and the explosion of the PT. In order to prevent the core saturation effect, a test voltage of twice the rating voltage must have at least twice the rating frequency to prevent the magnetic flux in the iron core from exceeding the rating magnetic flux. For most iron-core devices with ratings of 50 and 60 Hz frequencies, a frequency of 200 Hz is an appropriate candidate.

Power electronics technology is now widely used in practical industries, such as home appliances, traction and transportation vehicles, renewable energy sources, and HV transmission and distribution systems. The power electronics converter is also a powerful and reliable tool for AC/DC, DC/AC, and AC/AC power conversion for HV generation in testing. Nonetheless, the interference signal caused by the fast switching of power electronic devices is the main issue with the implementation of the power converter in the PD test. Such an interference signal causes the background noise in the PD detection system to be far greater than is acceptable. For instance, the allowable PD level in VTs insulated with oil and power cables is just 5 pC [4,5]. Moreover, the acceptable background noise in the testing system for the PD tests [3] should be less than 50% of the allowable PD level (2.5 pC). However, most commercial power converters with an extra filter can remove undesirable harmonic voltage and produce a voltage waveform that is close to a pure sinusoidal wave, but the background noise in the PD test is still higher than the acceptable level in the HV and PD tests.

Lately, there have been attempts to develop the HV and PD tests of HV equipment. In [6–9], a power frequency converter based on pulse-width modulation (PWM) techniques

was developed as a low-voltage source for the HV testing transformer for the HV and PD tests. It was found that the commercial and self-developed frequency converters with a voltage filter can generate an almost-pure sinusoidal voltage waveform, but the PWM switching generates a high noise level, which is higher than the acceptable level (2.5 pC) of the PD test. Therefore, an additional filter or voltage filter must be redesigned with consideration of the noise generated by the converter switching. In [10,11], the analysis of the effect of the additional filter to reduce the background noise in the HV and PD tests was presented. In [12], the analysis of a PWM converter with an additional filter was presented, and the best switching frequency in terms of the quality of the generated voltage and background noise level was investigated. The achievement of the developed system in terms of the generated voltage quality and background noise was determined. The voltage generated had a nearly pure sinusoidal waveform, the DV and THD_v were less than 5%, and the background noise level was less than 2.5 pC. Nevertheless, it was found that the developed system in [12] required an additional filter with fairly large capacitance and high power consumption. In [13], a system based on a resonant power converter was introduced for HV and PD tests on voltage transformers. Instead of the PWM voltage waveform, a square wave was utilized as the input voltage of the HV testing transformer. The developed system provided promising performance in terms of the output voltage waveform quality and low background noise level. The DV, THD_v, and background noise levels were lower than 2%, 3%, and 1.5 pC, respectively. The tuning and filter circuit must be implemented with the system for the achievement of the required resonant frequency. To design the proper tuning and filter circuit, the circuit parameters of the system, along with the parasitic and stray inductance and capacitance, are required. However, some parameters cannot be measured accurately in real practice. In the design process of [14], the parameters in the simulation were adjusted to obtain results that were consistent with the experimental ones. It would be advantageous for the system design if the circuit parameters could be determined accurately.

In this paper, using the preliminary experimental results, an improved Prony method [15] was applied to determine the crucial equivalent circuit parameters of the testing system. The trial-and-error approach for the determination of the unknown circuit parameters in the previous approach was not necessary. Using the proposed method, the unknown circuit parameters were determined precisely, and the appropriate resonant tuning and filter circuit was designed effectively. The transfer functions of the input and output testing voltages, along with the transfer impedance of the input voltage and signal voltage of the PD measuring port, were analyzed. The system design was verified by experiments of the HV and PD tests on a voltage transformer and a power cable. The gain of the transfer impedance was over 3 at the frequency of 200 Hz for testing the VT, and over 10 at the frequency of 50 Hz for testing the cable. The output voltage waveform was almost a pure sinusoidal function, and a background noise level of below 1 pC was achieved as per the design and the standard requirements [1–5]. The validity of the proposed method was confirmed by the experimental results, and the system design of the resonant converter and the approach for the equivalent circuit determination are very useful for the HV and PD tests of voltage transformers in real practice. This paper is organized into four parts: The first section is an introduction, and the second is a review of the developed system for HV and PD testing systems. In the third section, the determination of the circuit parameters of the testing system is presented. Then, the determined parameters are used for the selection of the circuit parameters to obtain the desired output testing voltage and background noise level in the HV and PD tests on the HV apparatuses. Finally, conclusions are presented in the last section.

2. HV and PD Testing System Based on the Resonant Power Frequency Converter

In Figure 3, the developed system represented by the equivalent circuit is composed of a power frequency converter, an additional inductor, an additional capacitor, an HV testing transformer, and a partial discharge detection system. The terms Z_i , C_k , CD, CC,

and MI refer to the internal impedances of a testing transformer, a coupling capacitor, a coupling device (the measuring impedance), a coaxial measuring cable, and a measuring instrument, respectively.

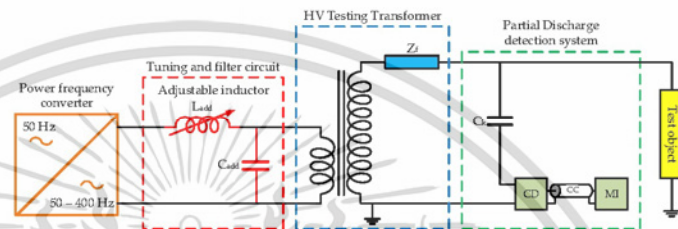


Figure 3. Partial discharge testing system.

2.1. Partial Discharge Measuring System

In the developed PD measuring system, the coupling capacitor (C_k) is connected in series with the measuring impedance, of which the equivalent circuit is depicted in Figure 4. The measuring impedance was designed with a band-pass characteristic, and the capacitance C_k was chosen to be 1 nF. Figure 5 expresses the transfer impedance characteristic with low and high cutoff frequencies of 30 kHz and 20 MHz, respectively. For avoiding the undesired noise signal in HV testing environments, the standard [3] recommends using the band-pass filter for a quasi-integration of the charge determination, and the acceptable range of cutoff frequencies of the filter is also provided [3]. In this paper, a digital band-pass filter with cutoff frequencies of 100 kHz and 400 kHz is utilized as the standard requirement. The transfer function of the filter and the transfer impedance with the considered filter are also presented in Figure 5.

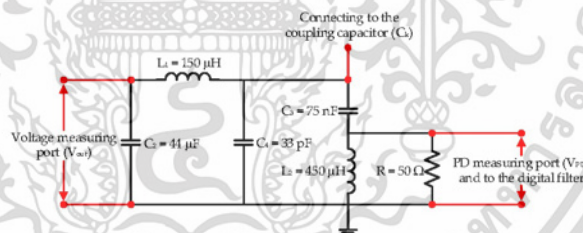


Figure 4. Equivalent circuit of the designed measuring impedance.

2.2. Resonant Power Frequency Converter

In this paper, the power frequency converter previously developed in [6–14] with the H-bridge configuration, as depicted in Figure 6, was utilized in experiments for validation of the proposed method. The simple H-bridge converter with an RC snubber circuit was designed as per the recommendations in [16]. The resistance and capacitance of the snubber circuit were 39 Ω and 75 nF, respectively. The insulated-gate bipolar transistor (IGBT) type of IXNN110N65B4H1—of which the specifications [17] are $V_{CBES} = 650$ V, $I_{C110} = 110$ A, $V_{CE(sat)} \leq 2.1$ V, and $t_{fi(typ)} = 85$ ns—was selected for the H-bridge converter. From the voltage specification, the maximum input voltage of the converter is 1300 V, which is sufficient for the applied DC voltage from the rectifier ($V_p = 537$ V). The IGBTs in the converter can be programmed to produce either square-wave or pulse-width modulation (PWM) waveforms.

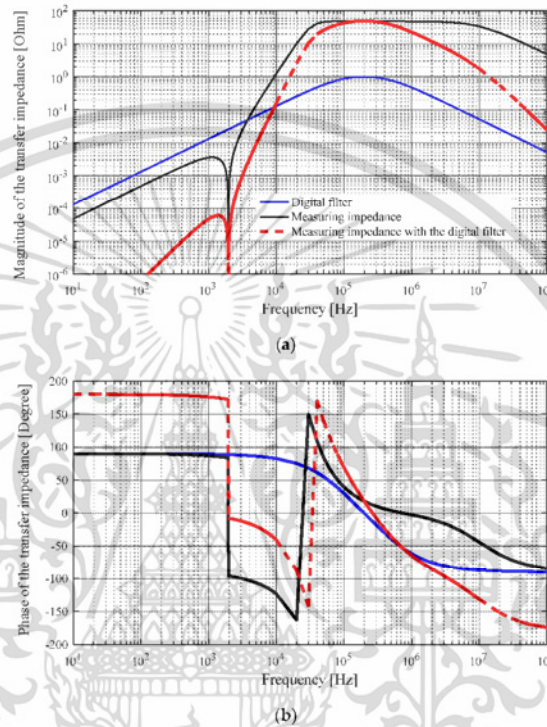


Figure 5. Transfer impedance in the frequency domain of the measuring impedance: (a) magnitude; (b) phase angle (degree).

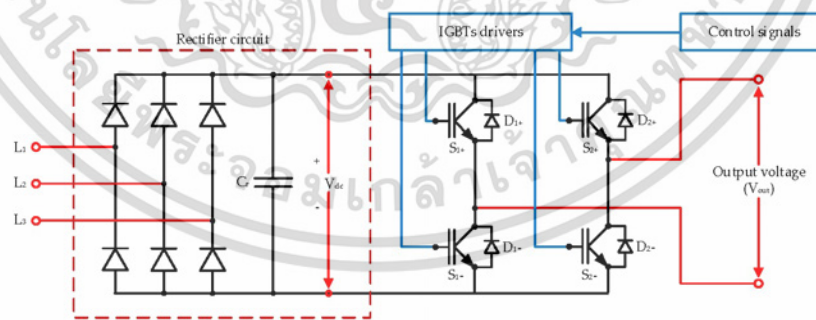


Figure 6. Low-voltage source power converter generator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Based on the unipolar PWM approach [16,18,19], the operation uses four control switches (S_{1+} , S_{1-} , S_{2+} , and S_{2-}) and four diodes (D_{1+} , D_{1-} , D_{2+} , and D_{2-}), as indicated in Table 1. One of the following three voltage levels ($+V_{dc}$, $-V_{dc}$, or 0) is represented in the AC output voltage waveform.

Table 1. Switch conditions in the full-bridge single-phase inverter.

State	Switch Conduction Status		Conduction Status of IGBT and Diode		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

The reference voltage signal, the controlled signal, and the output voltage waveform for the unipolar PWM approach are shown in Figure 7.

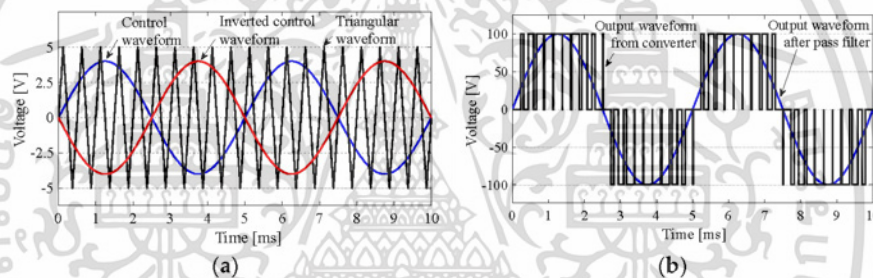


Figure 7. Controlled signals and output voltage waveform of the PWM converter: (a) controlled signals; (b) output voltage waveform.

For generation of the PWM waveform, the triangular waveform frequency is set to be between 1.2 kHz and 20 kHz. However, it was found in [12] that the best performance of the PWM converter occurs at a switching frequency of 3.2 kHz. In the proposed resonant circuit, the frequency of the triangular waveform is set to be the same as that of the control waveform.

In the case of the resonant converter, the resonant condition is required, and the square wave is the best choice of the generation from the converter, because the component of the square waveform at the fundamental frequency is higher than that of the PWM one. The tuning and filter circuit in Figure 3 must be implemented with the testing system, of which the equivalent circuit is expressed in Figure 8. All impedances can be transferred to the low-voltage (LV) or HV side for simplicity in the circuit analysis. For this paper, all impedances were transferred to the HV side. The adjustable inductance and the additional capacitance were selected to determine the resonant condition at the desired testing frequency. To design the proper tuning and filter circuit, the circuit parameters of the system, along with the parasitic and stray inductance and capacitance, are required. Nonetheless, some of these parameters cannot be measured accurately using a conventional impedance meter, because the equivalent circuit of the testing system cannot be represented by the simple configurations from which the meter can extract the circuit components. In the design process [13,14], the parameters in the simulation were adjusted to obtain results that were consistent with the experimental ones. It would be advantageous in the system design if the circuit parameters could be determined accurately.

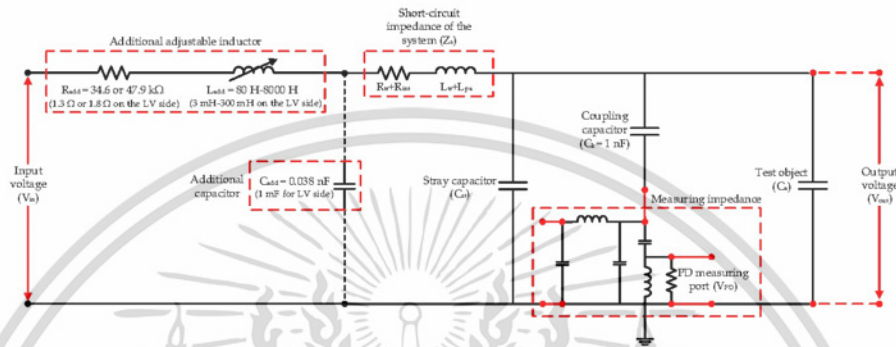


Figure 8. Equivalent circuit of the resonant testing system.

From the equivalent circuit in Figure 8, the circuit can be approximated as a series resonant circuit, as expressed in Figure 9, where the equivalent resistance (R_{eq}) is the summation of the internal resistance (R_{int}) of the system, the total series resistance (R_{tr}) of the HV testing transformer, and the internal resistance (R_{add}) of the adjustable inductance. The equivalent inductance (L_{eq}) is the summation of the internal inductance (L_{int}) of the system, the total series inductance (L_{tr}) of the HV testing transformer, and the internal inductance (L_{add}) of the adjustable inductance. The equivalent capacitance (C_{eq}) is the total capacitance, including the effect of the stray capacitance of the system. The series resonant condition is described by Equation (2). If L_{int} and L_{tr} are known, the required additional inductance (L_{add}) for the required testing frequency can be calculated by Equations (2) and (3). The voltage gain at the resonant condition is equivalent to the quality factor (Q) as expressed in Equation (4).

$$L_{eq} = \frac{1}{\omega^2 C_{eq}} \quad (2)$$

$$L_{eq} = (L_{int} + L_{tr}) + L_{add} \quad (3)$$

$$Q = \frac{\sqrt{L_{eq} / C_{eq}}}{R_{eq}} \quad (4)$$

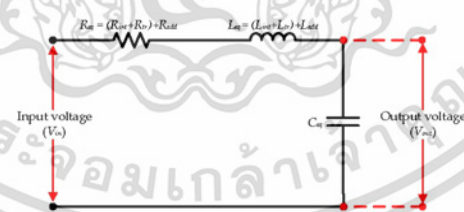


Figure 9. The simplified circuit of the resonant testing system.

In this paper, the required Q was set to be no less than 3, which is adequate to obtain the almost-pure sinusoidal output voltage. It should be noted that a quality factor of over 3 is confirmed to be sufficient by the simulation results in the next section. In the designed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

inductor, the internal resistance must be controlled to obtain the desired Q . The maximum internal resistance (R_{int}) can be calculated by Equation (5) if R_{int} and R_{tr} are known.

$$R_{eq} = (R_{int} + R_{tr}) + R_{add} \quad (5)$$

From the equations above, with the conditions of the approximate Q_{eq} of below 2 nF and the resonant frequency from 50 Hz to 200 Hz, the required adjustable inductance should be varied from 12 mH to 300 mH. This requirement was declared to the manufacturer for the design and construction of the adjustable inductors. Two variable inductors with inductance ranging from 3 mH to 30 mH and from 30 mH to 300 mH, respectively, were constructed for use in the experiments to confirm the validity of the proposed method.

3. Circuit Parameter Determination of the HV and PD Testing System

As mentioned in Section 2.2, the equivalent circuit parameters of the testing circuit must be known for the proper selection of L_{add} , R_{add} , and C_{add} in the tuning and filter circuit. To design the proper tuning and filter circuit, the circuit parameters of the system, along with the parasitic and stray inductance and capacitance, are required. However, some parameters cannot be measured precisely in practical ways. In the design process [13,14], the parameters in the simulation were adjusted to obtain results that were consistent with the experimental ones. It would be an advantage in the system design if the circuit parameters could be determined exactly. Therefore, in this paper, an improved Prony method [15] was applied to determine the system circuit parameters from the preliminary experimental results. After that, the determined parameters were used in the design and selection of L_{add} , R_{add} , and C_{add} .

3.1. Improved Prony Method

The Prony method decomposes the waveform in terms of multiple real or complex exponential functions. However, the method is very sensitive to noise. To overcome this problem, the improved Prony method was developed. In the improved method, the integration of the considered waveform is employed for the accurate determination of the exponent terms of the considered waveform. In [15], the improved Prony method was proposed to determine the base curve of the full lightning impulse voltage and current waveforms, in the form of two real or complex exponential functions. From the results of the test cases provided by the standard [20], the performance of the method in terms of accuracy and computational time in the waveform parameter determination has been confirmed to be comparable with the standard recommended method. The derivation of the method is repeated here for better understanding.

For clarifying and considering the waveform ($y(t)$), which is fitted well with two exponential functions ($f(t)$) as given in Equation (6), the definite integration of the waveform from 0 to t can be fitted well with two exponential functions and a constant term, as expressed in Equation (7), where A_1 , A_2 , and A_3 are constant coefficients. This can be expressed in the discrete-time domain as shown in Equation (8), where the i th exponential term ($e^{a_i \Delta t}$) is equal to r_i . It should be noted that a_1 and a_2 can be real or complex numbers.

$$y(t) \approx f(t) = ae^{a_1 t} + be^{a_2 t} \quad (6)$$

$$\int_{\tau=0}^{\tau=t} f(\tau) d\tau = g(t) = A_1 e^{a_1 t} + A_2 e^{a_2 t} + A_3 \quad (7)$$

$$g(n\Delta t) = A_1 e^{a_1 n\Delta t} + A_2 e^{a_2 n\Delta t} = A_1 (e^{a_1 \Delta t})^n + A_2 (e^{a_2 \Delta t})^n + A_3 \quad (8)$$

One of the solutions to the homogeneous difference equation in Equation (9) is the sequence in Equation (8), where C is a constant.

$$f[n+2] - (r_1 + r_2)f[n+1] + (r_1 r_2)f[n] = C \quad (9)$$

Because there are many more data points than there are unknown coefficients for $r_1 + r_2$ and $r_1 r_2$ in Equation (9), a linear least squares regression can be used to compute these coefficients. The parameters of r_1 and r_2 can be calculated from the solution (z) of the auxiliary equation provided in Equation (10).

$$z^2 - (r_1 + r_2)z + (r_1 r_2) = 0 \quad (10)$$

It is simple to calculate the exponential terms in Equation (7) once the r_1 and r_2 parameters are known. Additionally, linear least squares regression can be employed to calculate the coefficients in Equation (7) from the considered waveform.

3.2. Application of the Improved Prony Method for the Circuit Parameter Determination

For the application of the improved Prony method for the circuit parameter determination, the square waveforms with low frequency and amplitude were utilized in the testing system with variable additional inductance. The output waveforms from the HV side of the HV testing transformer were recorded. In the first case, there was no additional inductance, and in the second case, the inductor with inductance of 5 mH and internal resistance of 1.3Ω was connected at the input port of the system. It should be noted that the internal resistance of the adjustable inductor is almost constant, because the inductance is adjusted by adjusting the air gap of the iron core of the inductor. Considering the equivalent circuit in Figures 8 and 9, the circuit is a second-order RLC circuit. The response of the signal at the HV side of the HV testing transformer can be calculated in the form of a second-order differential, as presented in Equation (11), and it can be rewritten in another form with the exponent terms of the solution in Equation (12). The solutions of Equations (11) and (12) can be represented well as a damped sinusoidal function or a two-complex exponential function, as shown in Equation (13).

$$\frac{d^2 V_{out}(t)}{dt^2} + \left(\frac{R_{eq}}{L_{eq}}\right) \frac{dV_{out}(t)}{dt} + \left(\frac{1}{L_{eq} C_{eq}}\right) V_{out}(t) = C \quad (11)$$

$$\frac{d^2 V_{out}(t)}{dt^2} + (\alpha_1 + \alpha_2) \frac{dV_{out}(t)}{dt} + (\alpha_1 \alpha_2) V_{out}(t) = C \quad (12)$$

$$V_{out}(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t + \phi) + B = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} + A_3 \quad (13)$$

Therefore, the improved Prony method can be employed to determine the waveform parameters. Figure 10 shows the response voltages when the square-wave voltages were taken as the input voltages of the system. As shown in Figure 11, the integral waveforms of the measured waveform in a period associated with a frequency of 50 Hz when removing the DC component were selected for the determination of the circuit parameters using the improved Prony method.

In the first and second cases, the circuit parameters and the exponent terms in Equations (14)–(17) have relations as expressed in Equations (14) and (15), where $\alpha_i^{(j)}$ is the i th exponent term of the j th case, R_s is a summation of R_{int} and R_{tr} , and L_s is a summation of L_{int} and L_{tr} .

$$\frac{R_s}{L_s} = \alpha_1^{(1)} + \alpha_2^{(1)} \quad (14)$$

$$\frac{1}{L_s C_{eq}} = \alpha_1^{(1)} \alpha_2^{(1)} \quad (15)$$

$$\frac{R_s + R_{add}}{L_s + L_{add}} = \alpha_1^{(2)} + \alpha_2^{(2)} \quad (16)$$

$$\frac{1}{(L_s + L_{add}) C_{eq}} = \alpha_1^{(2)} \alpha_2^{(2)} \quad (17)$$

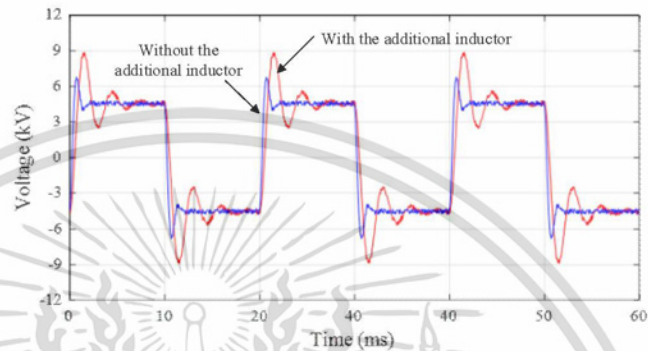


Figure 10. The measured output voltage waveforms and application of the square voltages at the input port of the testing system.

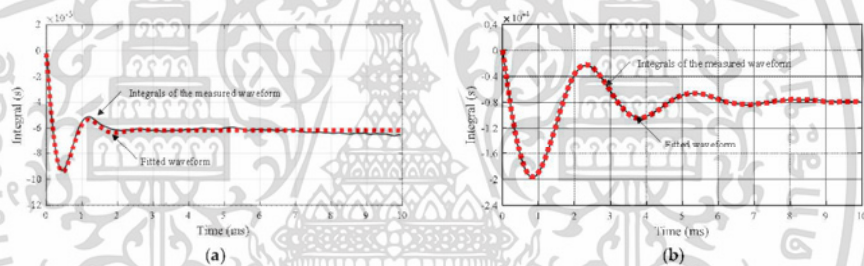


Figure 11. The integral waveforms of the measured waveforms in comparison with the fitted waveforms in a period (a) without the additional inductance, and (b) with the additional inductance.

The exponent terms can be calculated by the improved Prony method, and R_{add} and L_{add} can be readily measured. From Equations (14) to (17), L_s , R_s , and C_{eq} can be calculated by Equations (18)–(20).

$$L_s = \frac{L_{add}}{\left(\frac{\alpha_1^{(2)} \alpha_2^{(2)}}{\alpha_1^{(1)} \alpha_2^{(1)}} - 1\right)} \quad (18)$$

$$R_s = \left(\alpha_1^{(1)} + \alpha_2^{(1)}\right) L_s \quad (19)$$

$$C_{eq} = \frac{1}{L_s \left(\alpha_1^{(1)} \alpha_2^{(1)}\right)} \quad (20)$$

With the application of the improved Prony method to the waveforms in Figure 9, the exponents can be calculated, and $\alpha_1^{(1)}$, $\alpha_2^{(1)}$, $\alpha_1^{(2)}$, and $\alpha_2^{(2)}$ are $1.8952 \times 10^3 + j4.2783 \times 10^3$, $1.8952 \times 10^3 - j4.2783 \times 10^3$, $5.1858 \times 10^2 + j2.1045 \times 10^3$, and $5.1858 \times 10^2 - j2.1045 \times 10^3$, respectively. With the known circuit parameters (i.e., R_{add} of 34.56 k Ω and L_{add} of either 0 or 132.92 H on the HV side), and by transferring all impedance to the HV side, it can be determined by Equations (18)–(20), and L_s , R_s , and C_{eq} are 36.310 H, 137.63 k Ω , and 1.257 nF, respectively. The fitting curve using the determined parameters was in good agreement with the measured waveforms, as also shown in Figure 12.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

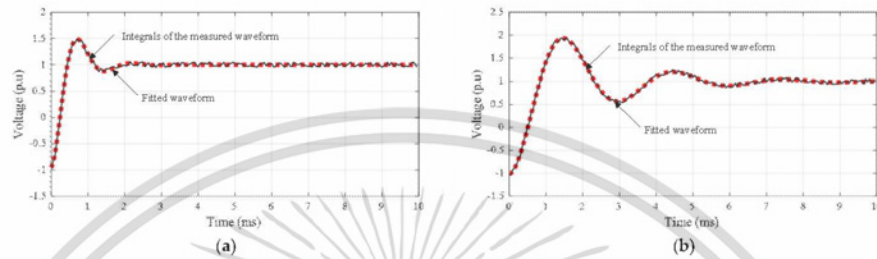


Figure 12. The measured waveforms in comparison with the fitted waveforms in a period (a) without the additional inductance, and (b) with the additional inductance.

3.3. Proper Selection of the Circuit Parameters of the Tuning and Filter Circuit

The objectives of the tuning and filter circuit are for tuning the additional inductance to obtain the required resonant frequency for the HV test, as well as for filtering the noise signal generated by power electronic switching. With the accurate circuit parameters of the HV and PD testing system, the proper selection of the circuit parameters of the tuning and filter circuit can be selected effectively.

For the first objective, the required testing frequency is from 50 Hz to 200 Hz. Using Equations (2) and (3), L_{add} can be calculated by Equation (21). With the required testing frequency, L_{add} should be adjustable from 360 H to 8000 H on the HV side (13.52 mH to 300 mH on the LV side). The inductance range (3 mH to 300 mH on the LV side) is consistent with the preliminary selection in Section 2.2. With the known R_s and R_{add} of the gain of the transfer function of the input and output voltage, the gain can be calculated by Equation (4) and plotted with the required frequency, as shown in Figure 13.

$$L_{add} = \frac{1}{\omega^2 C_{eq}} - (L_{int} + L_{tr}) \quad (21)$$

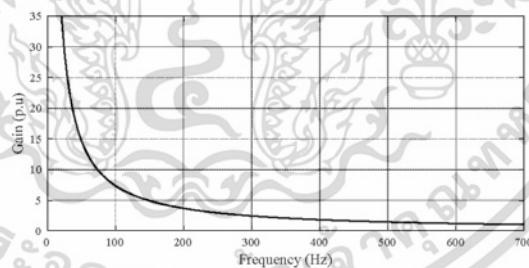


Figure 13. The transfer function gain versus the required frequency.

The lower the required frequency, the higher the gain. At frequencies of 50 Hz, 150 Hz, and 200 Hz, the gain is about 15, 5, and 3.5, respectively. It should be noted that the testing frequency of 50 Hz is utilized in the testing of power cables, and the proper testing frequency is in the range of 150 Hz to 200 Hz, as utilized in most VT testing cases. In Figure 14, the normalized transfer functions (V_{out}/V_{in}) in the frequency domain with different additional inductances, as shown in Table 2, are presented. The gains in Figures 13 and 14 are in good agreement.

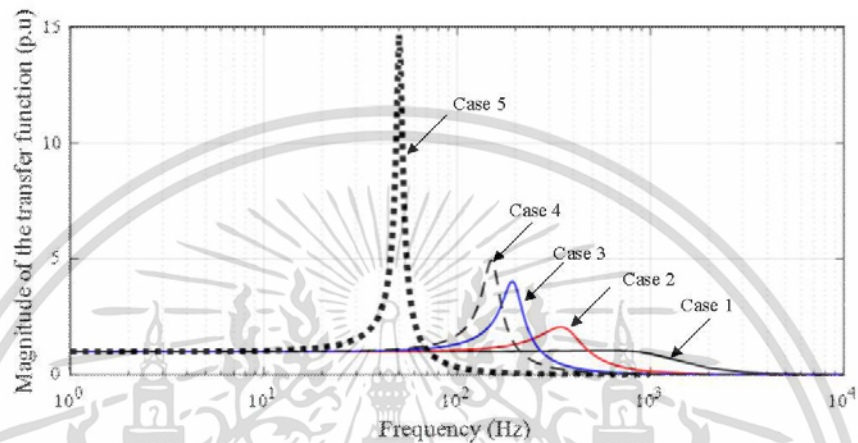


Figure 14. The transfer function magnitudes in the frequency domain in cases of different circuit parameters of the tuning and filter circuit.

Table 2. The additional inductances and resistances.

Case	Transfer to the LV Side		Transfer to the HV Side	
	R_{add}	L_{add}	R_{add}	L_{add}
1	0 Ω	0 mH	0 k Ω	0 H
2	1.3 Ω	5.0 mH	34.56 k Ω	132.92 H
3	1.3 Ω	17.2 mH	34.56 k Ω	457.23 H
4	1.8 Ω	31.5 mH	47.85 k Ω	837.37 H
5	1.8 Ω	300 mH	47.85 k Ω	7974.95 H

For the second objective, the additional capacitor is connected to the system for filtering the noise signal, which interferes with the PD detection. Considering the equivalent circuit in Figure 8, the parameters associated with the resonant frequency of 200 Hz and all circuit parameters in Figure 15 are transferred to the HV side of the testing transformer, the transfer function in the form of the attenuation factor (V_{PD}/V_{in}) can be determined as per the results in Figure 15a, and the attenuation factor with the band-pass filtering recommended by the standard are expressed in Figure 15b. The filter according to the standard requirement [3] in this paper is a band-pass type with lower and higher cutoff frequencies of 100 kHz and 400 kHz, respectively. It was found that the additional capacitance (C_{add}) of 1 μ F associated with the maximum attenuation factor of below 10^{-8} is sufficient for attenuation of the interference signal in the PD measurement. This is also confirmed by the results in the time domain. Figure 16 shows the input square wave of 19.6 kV transferred to the HV side (the red line), and the output voltage of 100 kV (the black line). Figure 17 shows the comparison of the PD calibrated signal of 1.0 pC (the black lines) and the interference signal of the output peak voltage of 100 kV, or about 70 kV_{rms} (the blue lines). It can be seen that the interference signal level is lower than that of the calibrated signal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

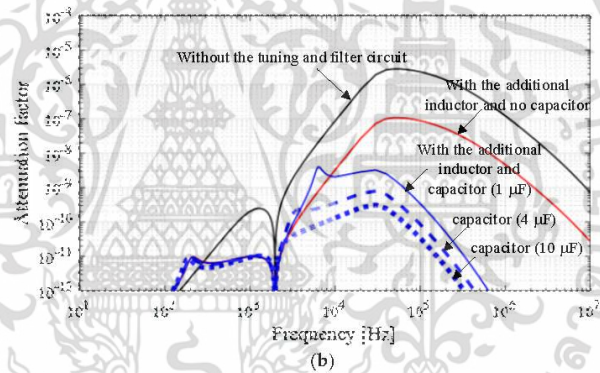
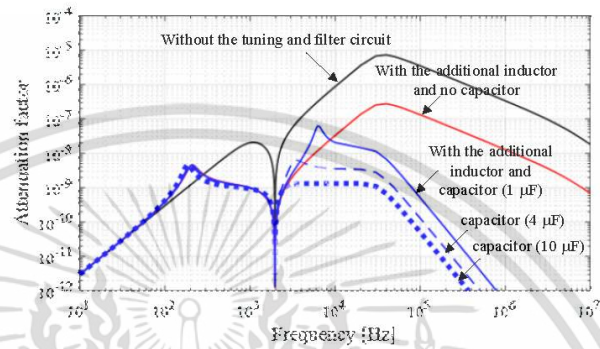


Figure 15. Attenuation factor at the PD port of the testing system: (a) without the band-pass filter; (b) with the band-pass filter recommended by the standard.

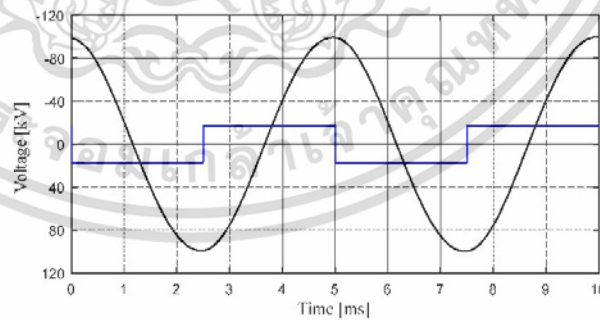


Figure 16. The input and output voltages of the testing transformer (all transferred to the HV side).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

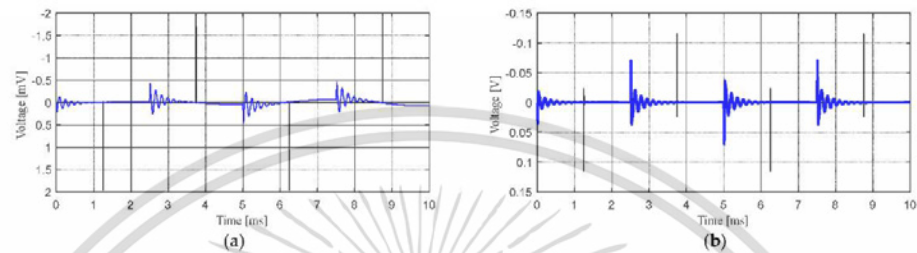


Figure 17. The voltage responses at the PD port caused by a 1 pC calibrator pulse current and the interference signal of the resonant circuit when the additional capacitor is connected and the output voltage is 100 kV: (a) without the band-pass filter; (b) with the band-pass filter recommended by the standard.

4. Experiments

As shown in the experimental setup in Figure 18, some tests were carried out to see how well the designed system performed in the HV and PD tests in terms of the output voltage quality and background noise. The testing system is composed of a test object (i.e., a VT or a power cable), an HV testing transformer, a PD detection system, an additional capacitor, an adjustable inductor, and the developed converter. The performance of the developed system was investigated in terms of the different voltage, the total harmonic distortion of the output voltage, and the background noise level.

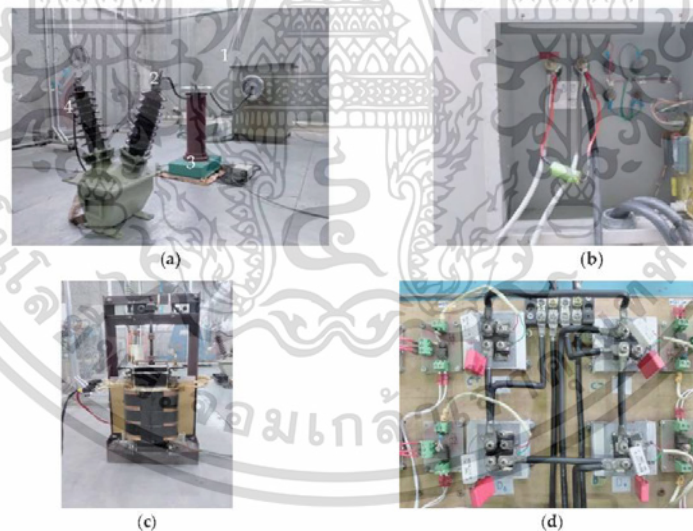


Figure 18. Experimental setup of the HV and PD tests with a test object: (a) Equipment in the actual HV laboratory composed of (1) HV testing transformer, (2) coupling capacitor, (3) measuring impedance, and (4) VT under test. (b) Additional capacitor. (c) Adjustable inductor. (d) Developed converter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A commercial EO/OE converter (Omicron) [21] with fiber-optic cables was used with the developed system to transmit the measured PD signal and prevent interference signals from electromagnetic coupling in the HV testing area of the HV laboratory, which was shielded from external electromagnetic fields by metallic fences and ground plane. In the calibration process of the PD test, a standard PD current with a charge of 5 pC was employed. Without the operation of the converter, the background noise was approximately 0.8 pC.

For presenting the problem of interference generated by the typical power frequency converter with the pulse-width modulation topology, the PWM converter was applied to the testing system. As shown in Figure 19, and at a testing voltage of about 14.4 kV, the noise level of 162.4 pC was very high—much higher than the acceptable level of 2.5 pC.

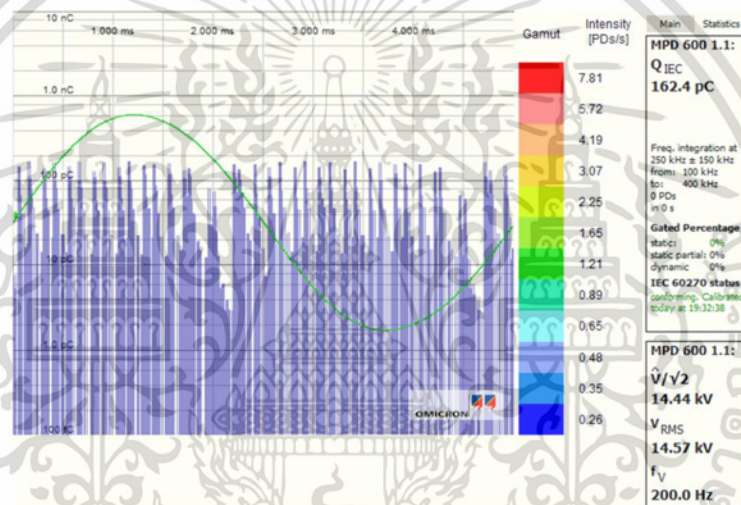


Figure 19. Experimental test results when the PWM converter was applied to the system.

To represent the performance of the developed system using the selected parameters, a resonant converter with additional inductance of 17.2 mH (LV side) was set to obtain the resonant frequency of 200 Hz. The experiments without a test object were performed to investigate the voltage quality and background noise level. The standard PD pulse with a charge of 5 pC was used for calibration in the PD test. When the additional and adjustable inductor was connected to the LV side of the HV transformer but there was no additional capacitor connected to the system, at only the testing voltage of about 5 kV, the background noise reached the acceptable level (2.5 pC), as shown in Figure 20a. When the additional capacitor was connected to the system, the background noise level was reduced significantly. At the pre-stress testing voltage of 40 kV_{rms}, the noise level was only 0.77 pC, as shown in Figure 20b. At the output voltage of 40 kV_{rms}, the DC input voltage supplied to the converter was about 83 V, corresponding to a voltage gain of 4.5. This is consistent with the simulation results. The different voltage and THD_v were 0.61% and 0.35%, respectively.

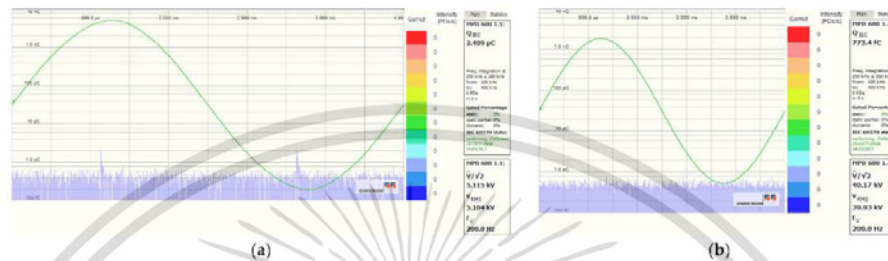


Figure 20. Experimental test results (a) without the additional capacitor, and (b) with the additional capacitor, at a testing voltage of $40\text{ kV}_{\text{rms}}$.

In the second experiment, a voltage transformer was tested. The frequency of the input voltage was 200 Hz for examining the voltage gain ($V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$), the quality of the testing waveform, and the background noise level. The voltage was raised to $40\text{ kV}_{\text{rms}}$ for the pre-stress condition, and decreased to $28.8\text{ kV}_{\text{rms}}$ for recording PD activity. In the calibration process for the PD test, the standard PD pulse of a 5 pC charge was employed. The experimental testing voltage of about $30\text{ kV}_{\text{rms}}$ is shown in Figure 21. The voltage gains at $30\text{ kV}_{\text{rms}}$ and $40\text{ kV}_{\text{rms}}$ were almost the same value of 3.8, which is consistent with the simulation results in Figures 13 and 14. The difference voltage (peak voltage/ $\sqrt{2} = 28.98\text{ kV}$ and RMS voltage 28.79 kV) was 0.65% , the THD_v was 0.35% , and the background noise was 0.871 pC .

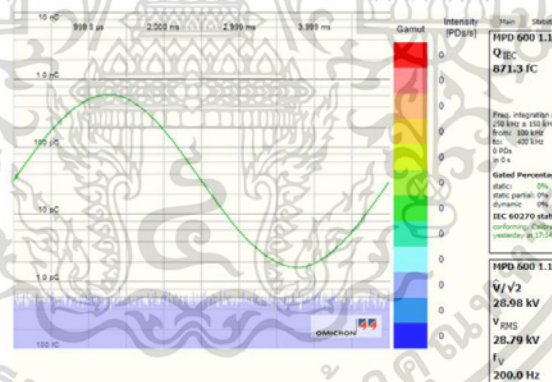


Figure 21. Testing voltage and background noise in a case of the VT connected to the system.

In the final experiment, a power cable was tested. The frequency of the input voltage was 50 Hz for examining the voltage gain ($V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$), the quality of the testing waveform, and the background noise level. The voltage was raised to $24\text{ kV}_{\text{rms}}$ for the pre-stress condition, and decreased to $20.8\text{ kV}_{\text{rms}}$ for recording PD activity. A 5 pC PD pulse was also employed in the calibration process. The experimental testing voltage of about $21\text{ kV}_{\text{rms}}$ is shown in Figure 22. The voltage gains at $21\text{ kV}_{\text{rms}}$ and $24\text{ kV}_{\text{rms}}$ were almost the same value of 12.8, which is fairly consistent with the simulation results in Figures 13 and 14. The difference voltage (peak voltage/ $\sqrt{2} = 20.92\text{ kV}$ and RMS voltage 20.85 kV) was 0.56% , the THD_v was 0.32% , and the background noise was 0.688 pC .

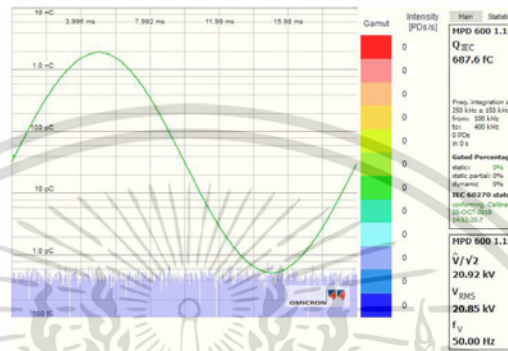


Figure 22. Testing voltage and background noise in a case of the power cable connected to the system.

5. Conclusions

An effective approach for the circuit parameter determination of the HV and PD testing system for testing voltage transformers was developed. The testing system is composed of a single-phase power frequency converter with a resonant tuning and filter circuit and an HV testing transformer. The unknown testing system circuit parameters—including unknown parasitic inductance, capacitance, and internal resistance—were determined accurately. From the determined circuit parameters, the appropriate resonant tuning and filter circuit was designed effectively. The transfer functions of the input and output testing voltages, along with the transfer impedance of the input voltage and signal voltage of the PD measuring port, were analyzed. The system design was verified by experiments with tests on a voltage transformer and a power cable. From the simulation and experimental results, an output voltage waveform of almost-pure sinusoidal function was achieved. The difference voltage, THD_v, and background noise were less than 1%, 0.5%, and 1.0 pC, respectively. The gain of the transfer impedance was about 4 for the voltage transformer test at a frequency of 200 Hz, and about 15 for the cable test at a frequency of 50 Hz, and a background noise level of below 1 pC was achieved with the design. From the experimental results, the system design of the resonant converter and the approach for the equivalent circuit determination are very useful for the HV and PD tests of voltage transformers in real practice.

Author Contributions: Conceptualization, B.L. and P.Y.; methodology, B.L. and P.Y.; validation, B.L.; formal analysis, P.Y.; investigation, P.Y. and B.L.; writing—original draft preparation, B.L. and P.Y.; writing—review and editing, P.Y. and B.L.; supervision, P.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was financially supported by Research and Researchers for Industries (RRI), the Thailand Research Fund (TRF) No. PHD60I0023.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors would also like to thank Sakda Maneerot of LAMOOL TRANSFORMERS Co., Ltd. and TESLA POWER Co., Ltd. for his technical advice and financial support.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. *IEEE Standard 4TM-2013*; IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2013.
2. *IEC 60060-1*; High-Voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements, 3rd ed. International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2010.
3. *IEC 60270*; High-Voltage Test Techniques. Partial Discharge Measurement. International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2015.
4. *IEC 60502-2*; Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltage from 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) Upto 30 kV ($U_m = 36$ kV)s. International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2014.
5. *IEC 61869-3*; Instrument Transformer-Part 3: Additional Requirements for Inductive Voltage Transformers. International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2011.
6. Leelachariyakul, B.; Yutthagowith, P.; Potivejkul, S. PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter. In Proceedings of the International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures (ISET), Chonburi, Thailand, 26–27 November 2015.
7. Kitcharoen, P.; Kunakorn, A.; Yutthagowith, P.; Limcharoen, W. Multilevel Frequency Converters and Noise Reduction for Partial Discharge Tests. In Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand, 27–30 June 2017.
8. Prombud, T.; Kitcharoen, P.; Yutthagowith, P. Development of a Partial Discharge Testing System for Potential Transformers. In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon, France, 20–22 February 2018.
9. Yomkaew, N.; Marukatat, N.; Yutthagowith, P. A Partial Discharge Testing System Based on A 5-Level Converter with Different Control Signals. In Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Auckland, New Zealand, 27–30 November 2018.
10. Prombud, T.; Kitcharoen, P.; Yutthagowith, P. Development of A Low-Pass Filter for Partial Discharge Testing System with the Power Frequency Converter. In Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Auckland, New Zealand, 27–30 November 2018.
11. Leelachariyakul, B.; Yutthagowith, P. The Development of An Adjustable Low-pass Filter for A Partial Discharge Detection System under Testing with The Power Frequency Converter. In Proceedings of the International Universities Power Engineering Conference (IUPEC), Bucharest, Romania, 3–6 September 2019.
12. Prombud, T.; Yutthagowith, P. Development of High-voltage Testing System Based on Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers. *Sens. Mater.* **2020**, *32*, 573–585. [[CrossRef](#)]
13. Yutthagowith, P.; Prombud, T.; Leelachariyakul, B. Development of a Resonant Frequency Converter for Partial Discharge Tests on Potential Transformers. In Proceedings of the International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, Slovenia, 13–16 May 2018.
14. Leelachariyakul, B.; Yutthagowith, P. Resonant Power Frequency Converter and Application in High-Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer. *Energies* **2021**, *14*, 2014. [[CrossRef](#)]
15. Yutthagowith, P.; Patanadech, N. Improved Least-Square Prony Analysis Technique for Parameter Evaluation of Lightning Impulse Voltage and Current. *IEEE Trans. Power Deliv.* **2015**, *31*, 271–277. [[CrossRef](#)]
16. Rashid, M.H. *Power Electronics Handbook*, 3rd ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2011.
17. Extreme Light Punch through IGBT for 10–30 kHz Switching. Brochure. Available online: <http://www.szapl.com/manage/images/20141014101635624.pdf> (accessed on 6 January 2021).
18. Holmes, D.G.; Lipo, T.A. Pulse Width Modulation for Power Converters. In *Principles and Practice*; John Wiley & Sons Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2003.
19. Thiede, A.; Martin, R. *Power Frequency Inverters for High Voltage Tests*; High-Volt Prüftechnik Dresden GmbH: Dresden, Germany, 2007.
20. *IEC 61083-2*; Instruments and Software Used for Measurement in High-Voltage and High Current Tests—Part 2: Requirements for Software for Tests with Impulse Voltages and Currents, 2nd ed. International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2013.
21. User Manual for the Device MPD600. Brochure. Available online: <https://www.omicronenergy.com/en/products/mpd-600/documents/> (accessed on 24 January 2019).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายบัญญัติ ลีลาจริยกุล
วัน เดือน ปีเกิด	23 กุมภาพันธ์ 2529 ที่ จ.พัทลุง
ที่อยู่	7 ถ.ดิษฐานินทร์ ต.คูหาสวรรค์ อ.เมืองพัทลุง จ.พัทลุง 93000 โทร 08 6036 6502 อีเมล klbanyat@gmail.com
ประวัติการศึกษา	2548 สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษา สาขาวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ โรงเรียนพัทลุง จังหวัดพัทลุง 2552 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง 2) การสร้างแรงดันสูงทดสอบ 3) ระบบวัดกระแสและแรงดันสูง 4) การทดสอบไฟฟ้าแรงสูง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2551	ฝึกงานภาคฤดูร้อน ฝ่ายบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าขนอม บริษัท ผลิตไฟฟ้าขนอม จำกัด (EGCO Group) อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช
พ.ศ.2551-2552	นักวิจัยร่วม การศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน ปริมาณนิพนธ์ ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
พ.ศ.2552	ฝึกงานภาคฤดูร้อน ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ณ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี
พ.ศ.2552	วิศวกรทดสอบ แผนกทดสอบหม้อแปลง ฝ่ายประกันคุณภาพ บริษัท พูจี ทัสโก้ จำกัด นิคมอุตสาหกรรมบางปู อ.เมือง จ.สมุทรปราการ
พ.ศ.2553-2557	นักวิจัยร่วมเรื่อง การพัฒนางจรอินทิเกรเตอร์แบบเฉื่อยงานและแบบไว งานเพื่อใช้ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี วิทยานิพนธ์ ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พ.ศ.2558-2559 ผู้ช่วยนักวิจัย โครงการปรับปรุงและพัฒนาห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้านครหลวง เขตสามเสน กรุงเทพมหานคร
- พ.ศ.2558 ผู้ช่วยนักวิจัยร่วม การศึกษามาตรฐานการออกแบบและติดตั้งระบบ ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำและข้อกำหนดวิธีความปลอดภัย ทางไฟฟ้าในการปฏิบัติงาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- พ.ศ.2559-2560 อาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ หลักสูตรใหม่ พ.ศ.2559
- พ.ศ.2560-2566 นักศึกษาผู้ช่วยวิจัย โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.ปริญญาเอก) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Banyat Leelachariyakul, Patcharin Moonmirat, Anantawat Kunakorn and Peerawut yutthagowith, "A Rogowski coil with an active integrator for measurement of long duration impulse currents," 7th 2013 International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures (ISET), Samui, Thailand, 27–28 Nov. 2013.
- [2] P. Yutthagowith and B. Leelachariyakul, "A Rogowski coil with an active integrator for measurement of long duration impulse currents," 2014 International Conference on Lightning Protection, pp. 1761-1765, Oct. 2014.
- [3] B. Leelachariyakul, P. Yutthagowith , and S. Potivejkul. "PD Detection Test of a Voltage Transformer using a Variable Frequency Converter," 9th 2015 International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures (ISET), Chonburi, Thailand, 26–27 Nov. 2015.
- [4] Yutthagowith, T. Prombud, and B. Leelachariyakul. "Development of A Resonant Frequency Converter for Partial Discharge Tests on Potential Transformers," 2018 International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, Slovenia, 13–16 May. 2018.
- [5] Banyat Leelachariyakul, Busayapol Paophan, Punyavee Chaisiri, and Peerawut Yutthagowith. "The Performance of A High Frequency Current Transducer for Partial Discharge Measurement under Testing with A Power Frequency Converter," 2018 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Auckland, New Zealand, 27–30 Nov. 2018.

- [6] Banyat Leelachariyakul, and Peerawut Yutthagowith. “The Development of An Adjustable Low-pass Filter for A Partial Discharge Detection System under Testing with The Power Frequency Converter,” 2019 International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 3–6 Sep. 2019.
- [7] Banyat Leelachariyakul, and Peerawut Yutthagowith, “Resonant Power Frequency Converter and Application in High-Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer,” *Energies*, Vol. 14, Issue. 7, no. 2014, 2021.
- [8] Banyat Leelachariyakul, and Peerawut Yutthagowith, “Accurate Circuit Parameter Determination of a Resonant Power Frequency Converter for High-Voltage and Partial Discharge Tests,” *Energies*, Vol. 15, Issue. 15, no. 5497, 2022.

