

การสร้างแบบจำลองของฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการหา
กราฟที่เหมาะสมแบบพหุเอ็กซ์โพเนนเชียลของกระแสดีโพลารีเซชัน

DETERMINATION OF DIELECTRIC MODELS OF HIGH-VOLTAGE (HV)
EQUIPMENT USING MULTI-EXPONENTIAL FITTING ON DEPOLARIZATION
CURRENT



เจษฎา รักษา
JEDSADA RAXSA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2024-EN-M-027-217

การสร้างแบบจำลองของฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการหา
กราฟที่เหมาะสมแบบพหุเอ็กซ์โพเนนเชียลของกระแสดีโพลารีเซชัน

DETERMINATION OF DIELECTRIC MODELS OF HIGH-VOLTAGE (HV)
EQUIPMENT USING MULTI-EXPONENTIAL FITTING ON DEPOLARIZATION
CURRENT



เจษฎา รักษา
JEDSADA RAXSA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2024-EN-M-027-217

DETERMINATION OF DIELECTRIC MODELS OF HIGH-VOLTAGE (HV)
EQUIPMENT USING MULTI-EXPONENTIAL FITTING ON DEPOLARIZATION
CURRENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
(MULTI-DISCIPLINARY PROGRAM)
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024

KMITL-2024-EN-M-027-217

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นของทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองของฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบพหุเอ็กซ์โพเนนเชียลของกระแสตีโพลาริเซชัน
นักศึกษา	นายเจษฎา รักษา
รหัสประจำตัว	65016021
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
พ.ศ.	พ.ศ. 2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองของฉนวนไฟฟ้าหรือไดอิเล็กทริก (Dielectric) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงบนพื้นฐานทฤษฎีแบบจำลองของเดอบายน์ (The extended Debye model) ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบพหุเอ็กซ์โพเนนเชียล (Multi-exponential fittings) ของกระแสตีโพลาริเซชันจากการทดสอบการวัดกระแสตีโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน (Polarization and depolarization current measurement ; PDC measurement) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบสำหรับการวัดผลการตอบสนองของฉนวนไฟฟ้าในวัฏจักรเวลา (Time domain dielectric response) โดยกระแสตีโพลาริเซชันเป็นตัวแสดงถึงผลรวมของกระแสผ่อนคลาย (Relaxation current) จากการดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเนื่องจากกระบวนการผ่อนคลาย (Relaxation process) กระแสผ่อนคลายดังกล่าวแสดงถึงลักษณะการตอบสนองของไดอิเล็กทริกซึ่งสามารถนำมาหาคำนวณหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกและแปลผลลัพธ์ไปสู่ค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกในวัฏจักรความถี่ (Frequency domain) เพื่อบ่งบอกถึงสถานะของฉนวนไฟฟ้าในวัฏจักรความถี่ได้ การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่เวลาการตอบสนองเฉพาะแบบที่แตกต่างกันด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยเริ่มต้นจะกำหนดค่าคงที่เวลาการตอบสนองเริ่มต้น (Predetermination of time constants) แล้วทำการหาค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential coefficients) ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression analysis) ที่มีเงื่อนไขของวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least square method) ด้วยวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดเชิงเส้นแบบพื้นฐาน (Ordinary linear least square ; OLLS) และ วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเปอร์เซ็นต์ (Percentage linear least square ; PLLS) เพื่อหาคำนวณหากระแสตีโพลาริเซชันที่อยู่ในรูปฟังก์ชันพหุเอ็กซ์โพเนนเชียลจากองค์ประกอบดังกล่าว โดยนำสองวิธีดังกล่าวมาทดสอบกับข้อมูลการทดสอบการวัดกระแสตีโพลาริเซชันและตีโพลาริเซชันกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี สามารถแบ่งประเภทได้เป็น 4 อุปกรณ์ ได้แก่ ปลอกฉนวน ตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง สายเคเบิลแรงดันสูง เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง และ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง องค์ประกอบที่หาได้จากวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดเชิงเส้นแบบพื้นฐานและซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ (Commercial software) ของเครื่องมือทดสอบสำหรับการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันชื่อรหัสเครื่อง PDC—ANALYSER—1MOD ได้แสดงผลพัลส์ค่ากระแสดีโพลาริเซชันที่ใกล้เคียงกับค่ากระแสจากการวัดในช่วงที่ค่ากระแสมีค่าสูงและช่วงเวลาเริ่มต้นของการวัดเท่านั้น องค์ประกอบที่หาได้จากวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดเชิงเส้นแบบร้อยละได้แสดงผลพัลส์ค่ากระแสดีโพลาริเซชันที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับค่ากระแสจากการวัดในภาพรวมมากกว่าวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดเชิงเส้นแบบพื้นฐานและซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงกระแสที่มีค่าต่ำและในช่วงท้ายของเวลาการวัดมีค่าที่ต่ำกว่า จากผลลัพธ์ค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดโอิเล็กตริกด้วยวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดเชิงเส้นแบบร้อยละที่มีความแม่นยำทำให้สามารถนำไปคำนวณหาผลลัพธ์ของแบบจำลองไดโอิเล็กตริกและตัวประกอบความสูญเสียไดโอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนไฟฟ้าในวัฏจักรความถี่ที่มีความแม่นยำและมีเสถียรภาพซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์สภาพฉนวนที่มีความแม่นยำ และสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคุณภาพ (Condition based maintenance) หรือ การบำรุงรักษาเพื่อความเชื่อถือได้ (Reliability centered maintenance) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Determination of dielectric models of high-voltage (HV) equipment using multi-exponential fitting on depolarization current
Student	Mr.Jedsada Raxsa
Student ID.	65016021
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering (Multi-disciplinary program)
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Peerawut Yutthagewith

Abstract

This thesis presents the determination of dielectric models of high-voltage (HV) equipment, based on the extended Debye model (EDM). Multi-exponential function is applied to fit a depolarization current collected from polarization and depolarization current (PDC) measurements. This method serves as an effective tool for measuring the dielectric response in the time domain. The depolarization current can be represented well with the summation of the relaxation current resulting from electrical discharge within the insulation due to the relaxation process. This relaxation current presents the dielectric characteristics, which can be used to determine the parameters of the dielectric model and interpret the dielectric loss factor in the frequency domain which can indicate the insulation conditions. The process for determining the parameters of the dielectric model begins with the predetermination of the time constants. Linear regression analysis using the least squares method is then employed to fit the depolarization current in the form of multi-exponential functions, and the coefficients of the function are determined. In this thesis, both the ordinary linear least squares (OLLS) method and the percentage linear least squares (PLLS) method were utilized to determine the parameters of the fitting model. The verification of the two proposed methods is conducted using data from the PDC measurement tests of high-voltage equipment in 16 cases, which are divided into 4 types of equipment : HV bushing, HV power cable, HV rotating machine, and HV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ III ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

transformer. The model parameters obtained from the OLLS method and the commercial software of the PDC—ANALYSER—1MOD instrument provide fitted current results that agree very well with the measured current only in the high current and beginning range. Application of the PLLS method, the model's parameters provided more accurate results than those from the OLLS method and the commercial software for the entire waveform including in the low current and late time range. Accurately fitted currents provide precise and stable determination of the dielectric model and dielectric loss factors in the frequency domain, facilitating accurate analysis of insulation condition. This data enables efficient planning of both condition-based maintenance (CBM) and reliability centered maintenance (RCM) for HV electrical equipment.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ IV ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาจากหลายท่าน ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาชี้แนะ ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์แก่การวิจัยและเรื่องทักษะต่างๆรวมถึงช่วยเหลือในการแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด ตลอดจนเป็นผู้จัดหาทุนการศึกษาตลอดปี การศึกษาในระดับมหาบัณฑิตให้แก่ผู้จัดทำ ผู้จัดทำรู้สึกทราบบ้างซึ่งในความเมตตาอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง รวมถึงอาจารย์คนอื่นๆที่ได้กล่าวถึงที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาต่างๆให้แก่ผู้จัดทำตลอดปีการศึกษา

ขอขอบคุณ ดร.บุญยวีร์ ฉายศิริ คุณณัฐพล มฤคทัต และ คุณสรารุณี ประมวลสิงห์ ที่คอยให้ความรู้และคำแนะนำการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมถึงแสดงความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ ดร.สุภารัตน์ พุ่มย้อย คุณนครศักดิ์ แสงศรี คุณอดิเทพ พวงดอกไม้ และเจ้าหน้าที่ประจำห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยจัดเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยให้แก่ผู้จัดทำมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บริษัท ไอดี แอสเซต จำกัด (ID ASSET co., ltd.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ทั้งสถานที่ การจัดเตรียมความพร้อมเพื่อเข้าโรงงานและสถานประกอบการ และ กำลังคน ตลอดเวลาของงานวิจัย และ ขอขอบคุณ คุณ ดร.เพทาย นิรมสนอง และพี่ๆพนักงานของบริษัทที่สละเวลาและให้คำปรึกษาแนะนำชี้แนะของการใช้งานอุปกรณ์ทดสอบรวมถึงการปฏิบัติงานภาคสนามด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณ คุณธนาทร ไหมเอี่ยม คุณพงศธร เต็มเตชาตพงศ์ คุณวิชญ์พงศ์ ศรีนางแย้ม และ รวมถึงบุคคลอื่นๆที่ผู้จัดทำได้กล่าวถึงที่คอยให้การสนับสนุนในทุกๆด้านตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลอื่นๆในครอบครัว ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านทุนการศึกษา ให้กำลังใจ และ การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาและครอบครัว ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เกษภา รักษา

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ V ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูปภาพ	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	5
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
1.7.1 ยุคแรกเริ่มของการศึกษาการตอบสนองไดโพลาร์ทริก	5
1.7.2 ยุคการพัฒนาเครื่องมือวัดกระแสโพลาร์โรเซชันและดีโพลาร์โรเซชัน	8
1.7.3 ยุคการวิจัยฉนวนไฟฟ้าด้วยการวัดกระแสโพลาร์โรเซชันและดีโพลาร์โรเซชัน	10
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองไดโพลาร์ทริก	12
2.1 วัสดุไดโพลาร์ทริก	12
2.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไดโพลาร์ทริก	15
2.1.1.1 ความต้านทาน	15
2.1.1.2 เพอร์มิตติวิตี	15
2.1.1.3 ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดโพลาร์ทริก	17
2.1.1.3.1 ความสูญเสียเนื่องจากสภาพความนำไฟฟ้า	20
2.1.1.3.2 ความสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์โพลาร์โรเซชัน	21
2.1.1.3.3 ความสูญเสียเนื่องจากไอออนเซชันหรือดิสชาร์จบางส่วน ...	21
2.2 กลไกโพลาร์โรเซชัน	22
2.2.1 อิเล็กทรอนิกส์โพลาร์โรเซชันหรือออปติคอลโพลาร์โรเซชัน	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ VI ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2 อะตอมมิคโพลาริเซชันหรือไอออนิกโพลาริเซชัน	24
2.2.3 ออเรนเทชันโพลาริเซชันหรือไดโพลาร์โพลาริเซชัน	24
2.2.4 ฮอปปีงโพลาริเซชัน	26
2.2.5 อินเตอร์เฟรียลโพลาริเซชันหรือสเปซชาร์จโพลาริเซชัน	27
2.3 การตอบสนองไดอิเล็กทริก	28
2.3.1 การตอบสนองของไดอิเล็กทริกในวัฏจักรเวลา	29
2.3.2 การตอบสนองของไดอิเล็กทริกในวัฏจักรความถี่	37
2.4 แบบจำลองไดอิเล็กทริก	39
2.5 วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาแบบจำลองไดอิเล็กทริก	42
2.5.1 การหาค่าที่เหมาะสม	43
2.5.2 การวิเคราะห์การถดถอย	43
2.5.2.1 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น	44
2.5.2.1.1 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นอย่างง่าย	44
2.5.2.1.1.1 การประมาณค่าองค์ประกอบของสมการถดถอย อย่างง่าย	45
2.5.2.1.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ	49
2.5.2.1.2.1 การประมาณค่าองค์ประกอบของสมการถดถอย แบบเชิงเส้นพหุคูณ	50
บทที่ 3 การหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก	52
3.1 การเก็บข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและ กระแสดีโพลาริเซชัน	52
3.1.1 วงจรการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	54
3.1.2 เทคนิคการวัดของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD	55
3.1.3 การหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของ เครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD	57
3.2 การหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์	62
3.2.1 การหาค่าองค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น แบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อVIIทั้งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การหาค่าประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น แบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์	67
3.3 การหาตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกจากองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็ก- ทริก	72
บทที่ 4 การทดสอบการหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกและตัวประกอบความสูญเสีย ไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง	75
4.1 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาร์ไรเซชัน และ ตัวประกอบ ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี	77
4.1.1 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาร์ไรเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 1	78
4.1.2 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาร์ไรเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 2	82
4.1.3 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาร์ไรเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 3	86
4.1.4 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาร์ไรเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 4	90
4.1.5 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาร์ไรเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 5	93
4.1.6 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาร์ไรเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 6	97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.7 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 7	100
4.1.8 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 8	104
4.1.9 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 9	108
4.1.10 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 10	112
4.1.11 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 11	116
4.1.12 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 12	120
4.1.13 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 13	124
4.1.14 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 14	128
4.1.15 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 15	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อIXอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.16 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาร์โรเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 16	136
4.2 การอภิปรายผลลัพธ์องค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาร์โรเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกจากกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี	141
4.2.1 กรณีศึกษาที่ 1 – 2 : ปลอกฉนวนตัวนำไฟฟ้าแรงสูง	141
4.2.2 กรณีศึกษาที่ 3 – 6 : สายเคเบิลแรงดันสูง	141
4.2.3 กรณีศึกษาที่ 7 – 12 : เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง	144
4.2.4 กรณีศึกษาที่ 13 – 16 : หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง	144
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	146
5.1 สรุปผลการทดสอบ	146
5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย	148
เอกสารอ้างอิง	150
ภาคผนวก	155
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	156
บทความที่ 1 Determination of Dielectric Models Based on Effective Multi- Exponential Fittings	157
บทความที่ 2 Study of High voltage AC Generation using A Series Resonant Circuit	182
บทความที่ 3 Fringing Flux Factors Used for Design of HV Reactor	190
บทความที่ 4 Designing HV Reactor With Multiple Air Gap Structure Based On Fringing Flux Factor	199
ภาคผนวก ข คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD และ แหล่งจ่าย แรงดันเสริม PDC—PHANTOM—1000XE	209
คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD	210
คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ทดสอบ PDC—PHANTOM—1000XE	219
ประวัติผู้เขียน	222

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ X ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบและพิกัดของอุปกรณ์	76
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 1	78
ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 1	78
ตารางที่ 4.4 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 1	80
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2	82
ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 2	82
ตารางที่ 4.7 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 2	84
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 3	86
ตารางที่ 4.9 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 3	86
ตารางที่ 4.10 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 3	88
ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4	90
ตารางที่ 4.12 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 4	90
ตารางที่ 4.13 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 4	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ XI กังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 5	93
ตารางที่ 4.15 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 5	93
ตารางที่ 4.16 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 5	95
ตารางที่ 4.17 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6	97
ตารางที่ 4.18 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 6	97
ตารางที่ 4.19 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 6	99
ตารางที่ 4.20 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 7	100
ตารางที่ 4.21 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 7	100
ตารางที่ 4.22 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 7	102
ตารางที่ 4.23 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8	104
ตารางที่ 4.24 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 8	104
ตารางที่ 4.25 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 8	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อXIIถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.26 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9	108
ตารางที่ 4.27 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 9	108
ตารางที่ 4.28 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 9	110
ตารางที่ 4.29 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10	112
ตารางที่ 4.30 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 10	112
ตารางที่ 4.31 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 10	114
ตารางที่ 4.32 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11	116
ตารางที่ 4.33 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 11	116
ตารางที่ 4.34 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 11	118
ตารางที่ 4.35 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 12	120
ตารางที่ 4.36 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 12	120
ตารางที่ 4.37 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 12	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ XIII อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.38 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 13	124
ตารางที่ 4.39 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 13	124
ตารางที่ 4.40 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 13	127
ตารางที่ 4.41 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 14	128
ตารางที่ 4.42 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 14	128
ตารางที่ 4.43 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 14	131
ตารางที่ 4.44 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 15	132
ตารางที่ 4.45 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 15	132
ตารางที่ 4.46 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 15	135
ตารางที่ 4.47 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 16	136
ตารางที่ 4.48 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 16	136
ตารางที่ 4.49 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสตีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ที่ 16	138

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ XIV อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.50 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์ของกระแสไฟฟ้าไรเซชันจากกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบทั้ง 16 กรณี	139
ตารางที่ 4.51 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไรเซชันจากกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบทั้ง 16 กรณี	140



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อXVจึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมทั่วไปภายในวัสดุไดอิเล็กทริก	12
รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชันในวัสดุไดอิเล็กทริก	13
รูปที่ 2.3 การเรียงตัวของกลุ่มอิเล็กตรอนในวัสดุไดอิเล็กทริก	14
รูปที่ 2.4 การเกิดโพลาไรซ์ของโมเลกุลแบบมีไดโพลถาวร ก) ไดโพลถาวรในสภาวะเป็นกลาง ทางไฟฟ้า และ ข) ไดโพลถาวรภายใต้สนามไฟฟ้า	14
รูปที่ 2.5 ความต้านทานและกระแสรั่วไหลในฉนวนไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 MHz อุณหภูมิ 20 องศา ความดันบรรยากาศ 1 บาร์	16
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของฉนวนไฟฟ้าในทางปฏิบัติ ก) วงจรสมมูลแบบขนาน และ ข) วงจรสมมูลแบบอนุกรม	17
รูปที่ 2.8 เฟเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า ก) ฉนวนในอุดมคติ และ ข) ฉนวนในทางปฏิบัติ	18
รูปที่ 2.9 คุณลักษณะของตัวประกอบกำลังสูญเสียในวัฏจักรความถี่	20
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลแสดงประเภทของตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก 3 รูปแบบของฉนวนไฟฟ้า	20
รูปที่ 2.11 การเรียงตัวของไดโพลในโมเลกุลฉนวนไฟฟ้าภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า กระแสสลับ ก) โมเลกุลในเนื้อฉนวนที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า ข) การ เคลื่อนตัวของประจุภายในโมเลกุลภายใต้สนามไฟฟ้า และ ค) การสิ้นสุดการ จัดเรียงโมเลกุลภายในฉนวนไฟฟ้า	21
รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโพรงอากาศ	22
รูปที่ 2.13 ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริกต่างๆ	22
รูปที่ 2.14 กลไกโพลาไรเซชันแบบอิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริก ที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า	23
รูปที่ 2.15 กลไกโพลาไรเซชันแบบอะตอมมิกโพลาไรเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริก ที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า	24
รูปที่ 2.16 กลไกโพลาไรเซชันแบบออเรนเทชันโพลาไรเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริก ที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ XVI จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.17 กลไกโพลาริเซชันแบบออเรนเทชันโพลาริเซชันภายในวัสดุไดอิเล็กทริก ก) การเรียงตัวของโมเลกุลไดโพลถาวรที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) การเรียงตัวของโมเลกุลไดโพลถาวรภายใต้สนามไฟฟ้า	25
รูปที่ 2.18 กลไกโพลาริเซชันแบบฮอปปีงโพลาริเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า	26
รูปที่ 2.19 กลไกโพลาริเซชันแบบอินเตอร์เฟเชียลโพลาริเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า	27
รูปที่ 2.20 ระยะเวลาการเกิดกลไกโพลาริเซชันทั้ง 5 ประเภท	28
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของค่าเปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนและการเกิดกลไกโพลาริเซชัน	28
รูปที่ 2.22 การตอบสนองไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้าแบบขึ้น	31
รูปที่ 2.23 การเกิดกระแสโพลาริเซชันจากสามเทอมองค์ประกอบ	34
รูปที่ 2.24 กระแสโพลาริเซชันและองค์ประกอบ	34
รูปที่ 2.25 รูปคลื่นแรงดันทดสอบแบบขึ้น กระแสโพลาริเซชัน และ กระแสดีโพลาริเซชัน	35
รูปที่ 2.26 วงจรสมมูลการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	36
รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลแบบจำลองวัสดุไดอิเล็กทริก	39
รูปที่ 2.28 การแสดงกระแสฟลักซ์ที่มีค่าคงที่เวลาการตอบสนองแตกต่างกันและกระแสดีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 45 MVA	41
รูปที่ 2.29 กราฟที่เหมาะสมแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	43
รูปที่ 2.30 การแสดงค่าความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีกำลังสองของความคลาดเคลื่อน	46
รูปที่ 3.1 เครื่องมือสำหรับการเก็บข้อมูลภาคสนาม ก) เครื่องมือวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน รหัสเครื่อง PDC—ANALYSER—1MOD และ ข) อุปกรณ์แหล่งจ่ายเพิ่มเติม รหัสเครื่อง PDC—Phantom—1000XE	53
รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ก) วงจรทดสอบการวัดฉนวนกับกราวด์ และ ข) วงจรทดสอบการวัดฉนวนระหว่างเฟส	54
รูปที่ 3.3 การทำงานการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD	55
รูปที่ 3.4 การจำลองวงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัด XVII จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของออปแอมป์ภายในของวงจรแอมป์มิเตอร์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD	57
รูปที่ 3.6 องค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก	58
รูปที่ 3.7 ข้อมูลของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่บันทึกในเครื่องมือ ทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD	59
รูปที่ 3.8 การหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของ เครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD	59
รูปที่ 3.9 การเก็บข้อมูลการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันภาค สนามของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆด้วยเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD ก) สายเคเบิลแรงดันสูง ข) มอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง ค) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง ง) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง	61
รูปที่ 3.10 ค่าคงที่เวลาการตอบสนองจากการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์เครื่องมือ ทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD	63
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการแสดงการเลือกช่วงค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่ครอบคลุมกับเวลาการ บันทึกกระแสดีโพลาริเซชัน ก) การเลือกช่วงของค่าคงที่เวลาการตอบสนอง และ ข) ลำดับการสร้างค่าคงที่เวลาการตอบสนองให้ครอบคลุมกับเวลาบันทึกกระแสดี โพลาริเซชัน	64
รูปที่ 3.12 ลำดับการหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลของกระแสดีโพลาริเซชัน ก) การหา สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีกำลังสอง ที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานรอบที่หนึ่ง ข) ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบที่หนึ่ง ค) การหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบที่สอง และ ง) ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์ โพเนนเชียลรอบสุดท้าย	65
รูปที่ 3.13 ผลลัพธ์กราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุด แบบพื้นฐานเทียบกับกระแสดีโพลาริเซชันจากการวัด	66

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.14 ตัวอย่างขั้นตอนการหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลของข้อมูลกระแสตีโพลาริเซชัน จากวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ ก) การสร้างค่าคงที่เวลาการตอบสนองให้ครอบคลุมกับเวลาบันทึกกระแสตีโพลาริเซชันและข้อมูลอื่นๆ ข) การถ่วงน้ำหนักข้อมูลกระแสตีโพลาริเซชันและคำนวณผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล ค) ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบที่หนึ่ง ง) การหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบที่สอง และ จ) ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบสุดท้าย	70
รูปที่ 3.15 ผลลัพธ์กราฟที่เหมาะสมของกระแสตีโพลาริเซชันด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์เทียบกับกระแสตีโพลาริเซชันจากการวัด	70
รูปที่ 3.16 แผนภาพแสดงการหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลของกระแสตีโพลาริเซชันด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานและแบบเปอร์เซ็นต์	71
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการหาค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริก ก) ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD ข) วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน ค) วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ และ ง) การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกจากทั้งสามวิธี	74
รูปที่ 4.1 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสตีโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 1 ภาคสนาม	79
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 1	80
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 1	81
รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสตีโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2 ภาคสนาม	83
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2	84
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ XIX อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 3 ภาคสนาม	87
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 3	88
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 3	89
รูปที่ 4.10 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4 ภาคสนาม	91
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4	91
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4	92
รูปที่ 4.13 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 5 ภาคสนาม	94
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 5	95
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 5	96
รูปที่ 4.16 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6 ภาคสนาม	98
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสตีโพลาริเซชันด้วยวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6	98
รูปที่ 4.18 การแสดงผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6 ด้วยวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์	99
รูปที่ 4.19 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 7 ภาคสนาม	101
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 7	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ XX จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 7	103
รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8 ภาคสนาม	105
รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8	106
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8	107
รูปที่ 4.25 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9 ภาคสนาม	109
รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9	110
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9	111
รูปที่ 4.28 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10 ภาคสนาม	113
รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10	114
รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10	115
รูปที่ 4.31 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11 ภาคสนาม	117
รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11	118
รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11	119
รูปที่ 4.34 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 12 ภาคสนาม	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ XXI จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบผลลัพธ์กระแสไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 12	122
รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 12	123
รูปที่ 4.37 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 13 ภาคสนาม	126
รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 13	126
รูปที่ 4.39 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 13	127
รูปที่ 4.40 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 14 ภาคสนาม	130
รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 14	130
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 14	131
รูปที่ 4.43 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 15 ภาคสนาม	134
รูปที่ 4.44 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 15	134
รูปที่ 4.45 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 15	135
รูปที่ 4.46 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 16 ภาคสนาม	137
รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณี ศึกษาที่ 16	138
รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 16	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลง XXII อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.49 ตัวอย่างของการหาผลลัพธ์ในกรณีศึกษาที่ 6 ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบและวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน ก) กระแสโพลาริเซชัน และ ข) ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริก	139
---	-----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาเรื่องคุณภาพของวัสดุฉนวนไฟฟ้า (Insulation material) มีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง วัสดุฉนวนเหล่านี้ปฏิบัติงานอยู่ภายใต้สภาวะการใช้งานภายใต้ปัจจัยความเครียดต่างๆ เช่น ความเครียดจากสนามไฟฟ้า (Electrical stress) จากจุดบกพร่องของฉนวน ความเครียดจากอุณหภูมิ (Thermal stress) จากการเดินเครื่องใช้งาน ความเครียดทางกล (Mechanical stress) จากการสั่นภายในอุปกรณ์เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กอิมตัว และความเครียดจากสภาวะแวดล้อม (Ambient stress) จากสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นละออง น้ำ หรือความชื้น ย่อมทำให้เกิดความเสื่อมสภาพของระบบการฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือต่อการใช้งาน โดยวัสดุฉนวนไฟฟ้าแต่ละชนิดจะมีลักษณะการตอบสนองทางฉนวน (Dielectric response) ที่แตกต่างกันออกไป การตอบสนองของวัสดุฉนวนต่อความเครียดของวัสดุ นั้นเป็นกระบวนการทางสถิติ (Stochastic process) ที่มีตัวแปรตาม (Dependent variables) แตกต่างกันได้แก่ สภาพของฉนวนไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงทางกล และ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาและการค้นพบวัสดุฉนวนชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่าฉนวนแบบดั้งเดิมที่ได้ใช้กันมา เพื่อทำให้เกิดความรู้และความเข้าใจลักษณะฉนวนที่พัฒนาขึ้น นักวิจัยและวิศวกรได้ใช้การตอบสนองของฉนวนเป็นเครื่องมือสำหรับการประเมินคุณลักษณะและสภาพของฉนวน วิธีการที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน (Insulation resistance test) การทดสอบหาค่าดัชนีการมีขั้ว (Polarization index test) การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge test) และ การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Withstand voltage test) เป็นต้น ซึ่งวิธีการที่ได้กล่าวมานั้นใช้แรงดันสูงในการทดสอบซึ่งอาจจะทำให้ฉนวนมีโอกาสเกิดความเสียหายในการได้รับความเสียหายหรือเสื่อมสภาพมากขึ้นจากการทดสอบ ดังนั้นการทดสอบเพื่อประเมินคุณภาพของฉนวนไฟฟ้าโดยไม่ทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายเพิ่มเติมจึงเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการซ่อมบำรุงรักษา ซึ่งมีวิธีการประเมินคุณภาพฉนวนวิธีการหนึ่งที่ได้รับการยอมรับและมีการวิจัยอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ คือ วิธีการทดสอบด้วยการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization current measurement ; PDC measurement) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบหนึ่งที่นิยมในการวัดผลตอบสนองของฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนค่อนข้างดีและเป็นการทดสอบวัดด้วยแรงดันต่ำจึงไม่ส่งผลทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายหรือเสื่อมสภาพเพิ่มเติมจากแรงดันทดสอบหรือเรียกว่าการทดสอบไดอิเล็กทริกแบบไม่ทำลาย (Non-destructive dielectric testing method) และจากผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซชันและกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันยังสามารถแปลผลไปสู่ค่าอัตราส่วนความจุไฟฟ้า (Capacitance ratio) และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor ; $\tan \delta$) ของวัสดุฉนวน อนุความถี่อื่นๆ ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินการนำไฟฟ้าและความชื้นของวัสดุฉนวน รวมทั้งสามารถใช้ในการวิเคราะห์และวินิจฉัยสภาพของวัสดุฉนวนได้อีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าววิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกวิธีการวัดกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันและกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันในการเก็บข้อมูลเพื่อพัฒนาและสร้างแบบจำลองฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบไดอิเล็กทริก (Dielectric parameters) ที่วัดได้กับกระบวนการตอบสนองไดอิเล็กทริกพื้นฐานของวัสดุฉนวนนั้นมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ทำให้นักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่ยังคงพัฒนาวิธีการทดสอบเพื่อประเมินสถานะของวัสดุฉนวนไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะการแปลผลผลลัพธ์ของการทดสอบให้มีความแม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณากระบวนการวัดกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันและกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุฉนวนจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างที่เกิดจากกระบวนการคลายตัว (Relaxation process) ของโครงสร้างวัสดุฉนวนภายในจากการเสื่อมสภาพ (Aging) และ ความชื้น (Moisture) กระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันเป็นตัวแทนของผลรวมกระแสที่ดิสชาร์จ (Discharge current) ที่มีค่าคงที่เวลาการตอบสนอง (Time constant) ที่แตกต่างกันจากกระบวนการคลายตัวดังกล่าว ผลลัพธ์การตอบสนองจากกระบวนการคลายตัวหรือกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันของวิธีการทดสอบดังกล่าวจึงมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการพัฒนา การประยุกต์ใช้ความรู้การตอบสนองของไดอิเล็กทริกพื้นฐานสำหรับการแปลความถึงผลลัพธ์ของสถานะฉนวนไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าสำหรับอธิบายถึงการตอบสนองไดอิเล็กทริกต้องอาศัยความรู้ที่สมบูรณ์ครบถ้วนและมีความแม่นยำเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการตอบสนองไดอิเล็กทริกพื้นฐานและค่าองค์ประกอบไดอิเล็กทริกที่วัดได้จึงจะทำให้การจำลองกระบวนการตอบสนองไดอิเล็กทริกนั้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่แน่นอนและช่วยในการแปลความผลลัพธ์ของการทดสอบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยการใช้ทฤษฎีพื้นฐานของการตอบสนองไดอิเล็กทริกพื้นฐานด้วยวิธีการวัดกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันและกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชัน แล้วนำผลลัพธ์กระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันที่เป็นตัวแทนกระบวนการคลายตัวของโครงสร้างภายในของวัสดุฉนวนมาพัฒนาและสร้างแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าโดยอ้างอิงจากทฤษฎีแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าในวัสดุฉนวนของเดอไบน์ (The extended Debye's model) ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานของการหาค่าที่เหมาะสม (Curve fitting) จนได้กราฟที่เหมาะสมของทั้งข้อมูลของกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันแล้วทำการคำนวณองค์ประกอบทางไฟฟ้าของแบบจำลองฉนวนด้วยการวิเคราะห์แบบการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression analysis) จากค่าองค์ประกอบของแบบจำลองทำให้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนความจุไฟฟ้าและตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกทางวัสดุฉนวน อนุความถี่อื่นๆ ได้ จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นอย่างแม่นยำและมีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพนี้ จะทำให้สามารถวิเคราะห์สภาพฉนวนที่มีความแม่นยำและสามารถนำข้อมูลนี้ไปวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคุณภาพ (Condition based maintenance) หรือ การบำรุงรักษาเพื่อความเชื่อถือได้ (Reliability centered maintenance) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถลดปัญหาการเกิดไฟดับจากความผิดปกติ (Fault) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอย่างมีนัยสำคัญ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์ฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันแล้วนำผลลัพธ์กระแสดีโพลาริเซชันมาพัฒนาและสร้างแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานของการหากราฟที่เหมาะสมจนได้กราฟที่เหมาะสมของทั้งข้อมูลของกระแสดีโพลาริเซชันแล้วทำการคำนวณองค์ประกอบทางไฟฟ้าของแบบจำลองฉนวนแล้วแปลผลขององค์ประกอบทางไฟฟ้าของแบบจำลองฉนวนเป็นค่าตัวประกอบความเสี่ยงไดอิเล็กทริกทางวัสดุฉนวนที่ความถี่ต่างๆ โดยมีความมุ่งหมายดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีและปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

1.2.2 เพื่อเป็นการนำเสนอการประยุกต์วิธีทางคณิตศาสตร์สำหรับการแปลผลลัพธ์เพื่อพัฒนา และ สร้างแบบจำลองฉนวน

1.2.3 เพื่อสร้างแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำ

1.2.4 สามารถนำแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าที่พัฒนาไปใช้ในการวิเคราะห์สภาพฉนวนไฟฟ้า

1.2.5 สามารถใช้ผลลัพธ์เป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาอย่างเป็นระบบ

1.2.6 เพื่อสร้างและพัฒนาองค์ความรู้ทางการตรวจสอบวิเคราะห์ฉนวนไฟฟ้า

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

แบบจำลองฉนวนไฟฟ้าที่พัฒนาและสร้างขึ้นจากผลลัพธ์ของวิเคราะห์การตอบสนองไดอิเล็กทริกของวัสดุฉนวนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันนั้นมีการตั้งสมมุติฐานเบื้องต้นได้ดังนี้

1.3.1 ขนาดแรงดันทดสอบในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมีผลต่อการตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

1.3.2 วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสามารถแสดงถึงการตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้

1.3.3 สามารถนำข้อมูลผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันสามารถนำมาแปลผลเพื่อพัฒนา และ สร้างแบบจำลองของฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ มอนูญาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 ข้อมูลกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์จากพื้นฐานของการหาค่าที่เหมาะสมมีความถูกต้องและแม่นยำ

1.3.5 องค์ประกอบของแบบจำลองจนวนจากข้อมูลกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปคำนวณหาค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกทางวัสดุจนวนที่ความถี่ต่างๆได้

1.3.6 ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกทางวัสดุจนวนที่คำนวณจากองค์ประกอบของแบบจำลองจนวนที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ประเมินถึงสภาพของจนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์จนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยการใช้ทฤษฎีพื้นฐานของการตอบสนองไดอิเล็กทริกพื้นฐานด้วยวิธีการวัดกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันและตีโพลาริเซชัน แล้วนำผลลัพธ์กระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันจากการวัดที่เป็นตัวแทนกระบวนการคลายตัวของโครงสร้างในภายในของวัสดุจนวนมาพัฒนาและสร้างแบบจำลองจนวนไฟฟ้าโดยอ้างอิงจากทฤษฎีแบบจำลองของเดอไบน์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานของการหาค่าที่เหมาะสม โดยสมการที่ใช้คือพหุเอกซ์โพเนนเชียลแบบหน่วง (Decay multi-exponential) โดยวิธีการที่เหมาะสมดังกล่าว จะทำการแบ่งข้อมูลของกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันออกเป็นหลายส่วนและทำการหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละส่วนโดยทำการหาค่าที่เหมาะสมจากส่วนที่เวลาค่าสูงก่อนและทำการหาค่าที่เหมาะสมในส่วนที่สั้นลงจนได้กราฟที่เหมาะสมของทั้งข้อมูลของกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชัน จากนั้นทำการคำนวณหาองค์ประกอบทางไฟฟ้าของแบบจำลองจนวนจากค่าองค์ประกอบของกราฟที่เหมาะสมของทั้งข้อมูลของกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันที่หาได้ จากค่าองค์ประกอบของแบบจำลองทำให้สามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกทางวัสดุจนวนที่ความถี่ต่างๆเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์สภาพของจนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองจนวนจากข้อมูลกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันจากการทดสอบด้วยวิธีการวัดกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันและตีโพลาริเซชันซึ่งอ้างอิงทฤษฎีพื้นฐานของการตอบสนองไดอิเล็กทริกพื้นฐานด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานของการหาค่าที่เหมาะสมของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี อุปกรณ์ที่ทดสอบสามารถแบ่งประเภทได้เป็น ปลอกจนวนตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง (HV bushing) สายเคเบิลแรงดันสูง (HV cable) เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง (HV rotating machine) และ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (HV Transformer) โดยที่อุปกรณ์ทดสอบดังกล่าวได้ติดตั้งและใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งทำให้มีความจำเป็นต่อการประเมินสภาพของจนวนไฟฟ้า แบบจำลองจนวนที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการวิเคราะห์จนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การศึกษาค้นคว้าวิจัยการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการวางแผนลำดับขั้นตอนอย่างรอบคอบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของแบบจำลองฉนวนที่มีค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่มีความแม่นยำและสามารถนำมาคำนวณหาตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกทางวัสดุฉนวนที่ความถี่ต่างๆเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์สภาพของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

1.6.1 ศึกษาบทความวิจัยเพื่อหาวิธีการสร้างแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าจากการทดสอบผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยอ้างอิงจากทฤษฎีแบบจำลองของเดอไบร์

1.6.2 เก็บข้อมูลจริงของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงและหน่วยงานจริงได้แก่ โรงไฟฟ้า หรือสถานีไฟฟ้า

1.6.3 พัฒนาแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าที่คิดค้นจากการหากราฟที่เหมาะสมด้วยแบบฟังก์ชันพหุเอ็กซ์โพเนนเชียลและแปลผลจากองค์ประกอบของแบบจำลองฉนวนเพื่อหาตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor) ของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

1.6.4 ทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดสอบด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

1.6.5 หาตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจากข้อมูลค่าองค์ประกอบของแบบจำลองที่พัฒนาของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ

1.6.6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

1.6.7 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.7.1 ยุคแรกเริ่มของการศึกษาการตอบสนองไดอิเล็กทริก

ปี ค.ศ. 1929 Peter Debye [1] นักเคมีกายภาพผู้มีส่วนสำคัญในการทำความเข้าใจโครงสร้างโมเลกุลและปฏิกิริยาระหว่างกัน ได้นำเสนอถึงทฤษฎีในเรื่องของคุณสมบัติและพฤติกรรมของโมเลกุลเชิงขั้ว (Polar molecule) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีการกระจายตัวของประจุไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดโมเมนต์ไดโพล (Dipole moment) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลเชิงขั้วกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนถือเป็นส่วนสำคัญในเรื่องของวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมไฟฟ้า โมเลกุลเชิงขั้วในวัสดุฉนวนมีการกระจายประจุไฟฟ้าหรือการดิสชาร์จที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้เกิดโมเมนต์ไดโพล คุณสมบัติเฉพาะของโมเลกุลเชิงขั้ว (Polar molecule characteristic) มีบทบาทสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติที่ใช้เป็นฉนวนในการศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องโมเลกุลเชิงขั้วเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุฉนวนได้แก่ ไม่ว่าจะเป็นโมเมนต์ไดโพล ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติไดอิเล็กทริกหรือฉนวน (Dielectric properties) กลไกโพลาไรเซชัน (Polarization mechanism) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความถี่ (Temperature and frequency dependence) ความสูญเสียและประสิทธิภาพ (Loss and efficiency) และ การออกแบบและการเพิ่มประสิทธิภาพวัสดุ (Material design and enhancement) จากการศึกษาโมเลกุลเชิงซ้อนเป็นส่วนสำคัญในการทำความเข้าใจและปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ด้วยการควบคุมองค์ประกอบและโครงสร้างของวัสดุเหล่านี้ในระดับโมเลกุล จึงเป็นไปได้ที่จะพัฒนาฉนวนให้ตรงตามข้อกำหนดเฉพาะสำหรับการใช้งานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่หลากหลาย

ปี ค.ศ. 1933 Hubert H. Race [2] ได้นำเสนอการทดสอบแนวความคิดของคุณสมบัติฉนวนในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความถี่ ฉนวนที่ใช้ทดสอบเป็นฉนวนคอมโพสิต (Composite insulation) ความแปรผันของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนคอมโพสิตมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความถี่ถือว่าสำคัญ เนื่องจากสามารถนำไปสู่แนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์สภาวะทางกายภาพของฉนวนจากการแปรผันดังกล่าวและสามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้นในวัสดุเชิงพาณิชย์ ผลลัพธ์การทดสอบของวัสดุฉนวนเคลือบเรซินสังเคราะห์และฉนวนคอมโพสิตที่ไม่สมบูรณ์จากการผสมควอตซ์หรือแก้วหลอมละลายและของเหลวกึ่งตัวนำจะนำเสนอด้วยค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกทางวัสดุฉนวนที่ความถี่ต่างๆ ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงถึงผลจากการคำนวณและการทดสอบเป็นไปในแนวทางเดียวกัน

ปี ค.ศ. 1937 E. J. Murphy และ S. O. Morgan [3] ได้นำเสนอถึงการศึกษเพิ่มเติมเรื่องของคุณสมบัติไดอิเล็กทริกสำหรับการใช้งานฉนวนสำหรับงานทางไฟฟ้าจากพฤติกรรมภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า รวมถึงค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุฉนวน (Permittivity) การสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) กลไกโพลาไรเซชัน และอิทธิพลจากปัจจัยภายนอก เช่น ความถี่ อุณหภูมิ และโครงสร้างของวัสดุ และได้นำเสนอการจำแนกประเภทวัสดุฉนวน (Materials classification) จากการคุณลักษณะเฉพาะของคุณสมบัติไดอิเล็กทริกให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้าน ได้แก่ โพลีเมอร์ เซรามิก และวัสดุคอมโพสิต รวมถึงวิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริกเช่น การใช้แอลซีอาร์มิเตอร์ (LCR meter) เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance analyzers) และสเปกโทรสโกปีไดอิเล็กทริกแบบบรอดแบนด์ (Broadband dielectric spectroscopy) ซึ่งสามารถนำใช้อธิบายถึงพฤติกรรมของวัสดุฉนวนในด้านต่างๆ และการสร้างแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนเพื่อทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมไดอิเล็กทริกของวัสดุฉนวน โดยอ้างอิงจากแบบจำลองดั้งเดิมของเดอไบน์ (Debye's model) และแมกซ์เวลล์-วากเนอร์ (Maxwell-Wagner's model) และแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลอื่นๆที่มีความซับซ้อนในระบบการฉนวนที่แตกต่างกัน และได้ทิ้งท้ายถึงการประยุกต์ถึงคุณสมบัติไดอิเล็กทริกสำหรับการใช้งานในโลกความจริง เช่น ตัวเก็บพลังงาน (Energy storage) ระบบฉนวน (Insulation system) และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความสำคัญถึงการพัฒนาวัสดุฉนวนชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรงของไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) ที่สูงขึ้นและมีการสูญเสียที่น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี ค.ศ. 1939 E. J. Murphy และ S. O. Morgan [4] ได้นำเสนอถึงการศึกษารื่องของคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุฉนวนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและการประยุกต์ใช้วัสดุในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หลายประเภทเช่นตัวเก็บประจุ หม้อแปลงไฟฟ้า สายเคเบิล และระบบฉนวน วัสดุฉนวนที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับจะมีการตอบสนองที่ขึ้นกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและมีการเกิดกระบวนการโพลาไรเซชันและกระบวนการคลายตัวของไดอิเล็กทริกภายในโครงสร้างโมเลกุลวัสดุฉนวนซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ถึงสถานะโครงสร้างของวัสดุรวมถึงระบุการมีอยู่ของข้อบกพร่อง (Defect) สิ่งเจือปน (Impurity) และ ความสม่ำเสมอ (Homogeneity) โดยรวมของวัสดุภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าคงที่ การตรวจสอบพฤติกรรมของวัสดุฉนวนจะเน้นที่วิเคราะห์กลไกต่างๆที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของวัสดุฉนวนเช่น อุณหภูมิ องค์ประกอบของวัสดุ และ สภาพแวดล้อม กลไกที่เกิดขึ้นในวัสดุฉนวนจะได้แก่การเคลื่อนตัวของไอออนิก (Ionic migration) และการนำไฟฟ้า (Electronic conduction) จากพฤติกรรมการตอบสนองไดอิเล็กทริกของวัสดุฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงสามารถนำเสนอกำหนดรูปแบบจำลองและกรอบทางทฤษฎีที่ใช้ในการทำควมเข้าใจและทำนายพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของวัสดุฉนวนไฟฟ้าในแบบจำลองโมเลกุลดั้งเดิมและแบบรวมสมัยเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุฉนวนและสำรวจแนวทางการวิจัยในอนาคตโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพัฒนาวัสดุฉนวนที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานเฉพาะด้าน

ปี ค.ศ. 1941 R. F. Field [5] ได้นำเสนอถึงแนวความคิดพื้นฐานของการทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับฉนวนไฟฟ้าโดยใช้คุณสมบัติพื้นฐานของความแข็งแรงของไดอิเล็กทริกที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (Breakdown voltage) แนวความคิดนี้ได้พัฒนาจากการทดสอบเพื่อหาขนาดของแรงดันเบรกดาวน์ซึ่งส่งผลเสียให้ฉนวนในวัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบนั้นเสียหายและเสื่อมสภาพ แนวทางปฏิบัติสำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลายของวัสดุฉนวนคือการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ค่าความจุไฟฟ้า ตัวประกอบความสูญเสีย (Dissipation factor) และ ความต้านทานรั่วไหล (Leakage resistance) ระดับแรงดันทดสอบของการทดสอบดังกล่าวจะมีขนาดต่ำไม่เกินระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งาน (Operating voltage) โดยทั่วไปที่ความถี่พลังงานระดับแรงดันทดสอบจะมีขนาด 100 V ถึง 10 kV ตัวประกอบความสูญเสียจากกระบวนการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นจากภายในวัสดุที่วัดจากการทดสอบเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญและน่าเชื่อถือสำหรับการประเมินสภาพของฉนวนไฟฟ้า

ปี ค.ศ. 1941 และ 1942 Kenneth S. Cole และ Robert H. Cole [6], [7] ได้นำเสนอ การศึกษาพฤติกรรมไดอิเล็กทริกที่ซับซ้อนของวัสดุฉนวนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงโดยเน้นไปที่ปรากฏการณ์การกระจายตัว (Dispersion phenomena) และกลไกการดูดซับ (Absorption mechanism) การศึกษาปรากฏการณ์การกระจายตัวในไดอิเล็กทริกโดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแปรผันตามความถี่และกลไกการดูดซับมุ่งเน้นไปที่การกระจายพลังงานจากกลไกการคลายตัวของไดโพลและการนำไอออนิกเกิดเป็นความร้อนเมื่อวัสดุฉนวนอยู่ภายใต้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้ากระแสสลับ และนำเสนอการทดสอบการกระจายตัวและการดูดซับในไดอิเล็กทริกด้วยวิธีอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Impedance spectroscopy) ไดอิเล็กทริกสเปกโทรสโกปี (Dielectric spectroscopy) และการวัดไดอิเล็กทริกด้วยวัฏจักรเวลา (Time domain measurements)

ปี ค.ศ. 1956 R. F. Field และ I. G. Easton [8] ได้นำเสนอถึงความเทียบเท่าของการวัดการตอบสนองไดอิเล็กทริกด้วยค่าความจุไฟฟ้าและค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกในวัฏจักรเวลา (Time domain) และวัฏจักรความถี่ (Frequency domain) จากการศึกษาเชิงปฏิบัติผลลัพธ์การทดสอบจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกด้วยสะพานตัวเก็บประจุ (Capacitance-bridge measurement) ในย่านความถี่เสียง โดย ฌ ความถี่การวัดที่มีประจุน้อยกว่า 1 kC ค่าความจุมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่ไม่สม่ำเสมอ การศึกษาถึงผลลัพธ์ดังกล่าวนี้เกิดจากกลไกโพลาริเซชันแบบอินเทอร์เฟซเชียล (Interfacial polarization) ในย่านความถี่ค่าตัวเก็บประจุระหว่าง 0.1 mC ถึง 10 C โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่เหมาะสมกับวัสดุทดสอบแล้วนำแหล่งจ่ายออกและวัดกระแสที่ดิสชาร์จจากวัสดุเวลาของกระแสที่ดิสชาร์จจะมีระยะเวลานานเทียบเท่ากับเวลาที่ผ่อนคลาย (Relaxation time) ซึ่งค่ากระแสดิสชาร์จและช่วงเวลาการดิสชาร์จดังกล่าวสามารถนำมาแปลผลทางคณิตศาสตร์ได้ถึงค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้า (C) เวลาผ่อนคลาย (t) และ ค่าสัมประสิทธิ์การจับเก็บพลังงาน (Storage coefficient ; α) ที่เป็นตัวกำหนดกลไกโพลาริเซชันแปลสามารถนำมาแปลผลสำหรับหาค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดในวัฏจักรความถี่ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์สถานะของฉนวนไฟฟ้า

1.7.2 ยุคการพัฒนาเครื่องมือวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

ปี ค.ศ. 1996 Vahe Der Houhanessian และ Walter S. Zaengl [9] ได้นำเสนอถึงการสร้างวงจรสมมูลอย่างง่ายจากพฤติกรรมการตอบสนองไดอิเล็กทริกในการจำลองสภาพของโมเลกุลฉนวนกระดาษอัดน้ำมันที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous impregnated pressboard) ในระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงด้วยองค์ประกอบทางไฟฟ้าจากการวัดกระแสดิสชาร์จของวัสดุทดสอบ โดยใช้หลักการของกระบวนการผ่อนคลายของวัสดุฉนวนภายในซึ่งจะเกิดกลไกการดูดซับและกลไกการกระจายของประจุไฟฟ้าหรือก็คือกระแสไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับเนื้อฉนวนและกระแสไฟฟ้าที่ดิสชาร์จจากเนื้อฉนวนซึ่งได้มีการนิยามภายหลังว่าคือกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน โดยแบบจำลองฉนวนที่พัฒนาขึ้นจากข้อมูลของกระแสดีโพลาริเซชันจะเป็นลักษณะวงจรแบบกิ่ง (Branch circuit) โดยกิ่งที่หนึ่งจะเป็นตัวเก็บประจุที่หาจากการวัดตัวเก็บประจุที่ความถี่พลังงานหรือความถี่ที่สูงกว่า กิ่งที่สองจะเป็นตัวต้านทานที่คำนวณจากแรงดันทดสอบต่อค่ากระแสโพลาริเซชันหรือกระแสดีโพลาริเซชันที่มีค่าเวลาสูงสุดสองกิ่งดังกล่าวเป็นตัวแทนของเนื้อฉนวน และจะมีกิ่งเพิ่มเติมโดยแต่ละกิ่งจะประกอบไปด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมไว้ซึ่งแต่ละกิ่งเป็นมีค่าคงที่เวลาตอบสนองเฉพาะโดยเป็นตัวแทนการตอบสนองกระบวนการผ่อนคลายภายในเนื้อฉนวนหรือสามารถเรียกได้ว่าเป็นกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนซึ่งสามารถนำไปแปลผลได้เป็นค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกในวัฏจักรความถี่ที่บ่งบอกถึงสถานะของฉนวนแต่ละชนิดได้คือไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดาษและน้ำมัน แล้วได้นำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับหม้อแปลงแรงดันสูงหนึ่งเฟส 500 kVA, 50 kV ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ผลลัพธ์การทดสอบจากการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและการคำนวณองค์ประกอบของแบบจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ปี ค.ศ. 1997 Vahe Der Houhanessian และ Walter S. Zaengl [10] ได้ต่อยอดงานวิจัยก่อนหน้าในปี ค.ศ. 1996 โดยทดสอบฉนวนกระดาษอัดน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานะไม่ผ่านการใช้งานและแบบผ่านการใช้งานซึ่งจะมีผลของปัจจัยการเสื่อมสภาพและความชื้นมาเกี่ยวข้องด้วยการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันแล้วนำผลลัพธ์มาแปลผลเป็นแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายใต้สถานะการใช้งาน โดยทำการทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังติดตั้งใหม่ขนาด 32 MVA, 150 kV สามเฟส และ หม้อแปลงที่ผ่านการใช้งานแล้ว 21 MVA, 150 kV หนึ่งเฟสสองตัว ผลลัพธ์ข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันที่คำนวณจากองค์ประกอบของแบบจำลองฉนวนของฉนวนกระดาษอัดน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อแปลผลไปเป็นตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่วัฏจักรความถี่ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ถึงสถานะของฉนวนไฟฟ้าใหม่หรือเก่าที่มีความชื้นเข้ามาเป็นปัจจัยในกลไกการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ปี ค.ศ. 1998 Vahe Der Houhanessian และ Walter S. Zaengl [11] ได้ต่อยอดงานวิจัยก่อนหน้าในปี ค.ศ. 1997 คือการนำแบบจำลองฉนวนที่พัฒนาขึ้นจากข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันของการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันมาทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงภายใต้สถานะการใช้งานเพื่อบ่งบอกถึงสถานะของฉนวนไฟฟ้า โดยทดสอบกับหม้อแปลงหนึ่งเฟสสามตัวที่ใช้ในระบบสามเฟส โดยมีขนาด 600 MVA, $400/247\pm 17 \times 3.6/30$ kV ผลลัพธ์องค์ประกอบของแบบจำลองฉนวนที่พัฒนาขึ้นจากกระแสดีโพลาริเซชันจากการทดสอบสามารถที่จะระบุได้ถึง ความชื้นหรือกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษอัดน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้สถานะการใช้งาน ซึ่งยืนยันได้ถึงความต้องการขององค์ประกอบจากแบบจำลองฉนวนที่พัฒนาขึ้นจากข้อมูลของกระแสดีโพลาริเซชันและยืนยันได้ว่าแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการวินิจฉัยฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายใต้สถานะการใช้งานได้ แต่ยังคงพัฒนาในเรื่องของวงจรทดสอบสำหรับการทดสอบภาคสนามเนื่องจากยังใช้อุปกรณ์ในวงจรทดสอบจำนวนมากและขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างทั่วถึงและมีประสิทธิภาพ

ปี ค.ศ. 2000 Jean-Jacques Alff, Vahe Der Houhanessian, Walter S. Zaengl และ Adolf J. Kachler [12] ได้นำเสนอการออกแบบเครื่องมือทดสอบการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสำหรับการวินิจฉัยสถานะฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภาคสนาม โดยเครื่องมือวัดที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นใช้หลักการวัดบนวัฏจักรเวลาโดยหลักการการทำงานของเครื่องมือวัดคือการปล่อยแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดให้กับวัสดุฉนวนจนเกิดกลไกการดูดซับของประจุไฟฟ้าหรือกระแสดีโพลาริเซชันและทำการสับสวิตซ์ลัดวงจรจนวัสดุเริ่มเข้าสู่กระบวนการผ่อนคลายประจุไฟฟ้าหรือกระแสดีโพลาริเซชัน การทำงานของเครื่องมือวัดจะถูกสั่งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่บรรจุติดตั้งภายในกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดโดยใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ซึ่งสามารถถ่ายโอนข้อมูลผลลัพธ์ของการวัดได้สะดวกและสามารถบันทึกข้อมูลได้ตั้งแต่เวลา 1 วินาทีสูงสุดถึง 200,000 วินาทีหลังจากป้อนแรงดันไฟฟ้าซึ่งสามารถแปลงผลลัพธ์สำหรับวิเคราะห์ในวัฏจักรความถี่เพื่อระบุถึงกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า

ปี ค.ศ. 2001 M. Hassig, R. Braunlich, R. Gysi, J.-J. Alff, V. Der Houhanessian และ W. S. Zaengl [13] ได้นำเสนอวิธีการวินิจฉัยขั้นสูงเพื่อประเมินคุณภาพของฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ไซตังงานที่ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ สามวิธีได้แก่การวิเคราะห์ดิซชาร์จบางส่วน การวิเคราะห์การตอบสนองของความถี่ (Frequency response analysis ; FRA) และการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน โดยผลลัพธ์จากการทดสอบของวิธีการที่นำเสนอได้ชี้ถึงจุดแข็งและจุดอ่อนและวิธีการเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ตามเทคนิคหรือสถานการณ์ เช่น การวิเคราะห์ด้วยการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจะใช้เมื่อตรวจพบความชื้นสูงในฉนวนเซลลูโลส (Cellulose insulation) และใช้แรงดันทดสอบต่ำไม่ส่งผลเสียต่อฉนวนไฟฟ้า เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ดิซชาร์จบางส่วนจะใช้สำหรับการวิเคราะห์แก๊สในน้ำมันที่แสดงถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนและอะเซทิลีนสูงแต่ใช้แรงดันทดสอบสูงซึ่งอาจทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้น

ปี ค.ศ. 2003 Walter S. Zaengl [14], [15] ได้ตีพิมพ์งานวิจัยในนิตยสารของไอทรีพีบีอี (IEEE magazine) ถึงเรื่องความเป็นมาทางทฤษฎีของไดอิเล็กทริกสเปกโทรสโกปี (Dielectric spectroscopy) หรือการตอบสนองไดอิเล็กทริกในวัฏจักรเวลาและวัฏจักรความถี่และแสดงภาพรวมเกี่ยวกับวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันซึ่งเป็นวิธีการทดสอบในวัฏจักรเวลาซึ่งสามารถแปลงผลลัพธ์เป็นวัฏจักรความถี่สำหรับวิเคราะห์คุณภาพฉนวนด้วยตัวประกอบความสูญเสียและการนำทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ดังกล่าวมาทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มเติมนอกจากหม้อแปลงไฟฟ้าเช่น หม้อแปลงกระแส สายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนโพลีเอทิลีนหรือพีอี (Polyethylene ; PE) และครอสลิงค์โพลีเอทิลีน (Cross-linked polyethylene) ซึ่งเป็นการเพิ่มทางเลือกสำหรับการประเมินสภาพฉนวนของอุปกรณ์ทั้งแบบไม่เดินเครื่อง (off-line test) และบริเวณภาคสนามเพื่อประเมินถึงการซ่อมบำรุงรักษา ซึ่งการตีพิมพ์ในนิตยสารฉบับนี้นับว่าเป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาเทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่แสดงถึงทฤษฎีและความเป็นมาที่ครบถ้วนและสามารถนำไปต่อยอดสำหรับการศึกษาวิจัยหรือการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

1.7.3 ยุคการวินิจฉัยฉนวนไฟฟ้าด้วยการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

ปัจจุบันได้เริ่มมีการศึกษาวิจัยการวิเคราะห์คุณภาพของฉนวนไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้นรวมถึงการแปลงผลลัพธ์เพื่อบ่งบอกถึงสภาวะของฉนวนไฟฟ้า เช่น [16] การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบย่อยสลายได้ (Biodegradable oil) และน้ำมันแร่ (Mineral oil) ที่ระดับความชื้นที่แตกต่างกัน [17] วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนเซลลูโลส [18] การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันวิเคราะห์หาเพื่อหาสาเหตุปัญหาที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการศึกษาเรื่องคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีการตอบสนองไดอิเล็กทริกเฉพาะทำให้ทราบถึงสถานะของฉนวนที่มีการตอบสนองต่อความเครียดต่างๆขณะอุปกรณ์ปฏิบัติงานอยู่แต่ข้อมูลยังไม่เพียงพอสำหรับการประเมินถึงสถานะของฉนวน การสร้างแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าในวัสดุฉนวนด้วยข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันจากการวัดที่เป็นตัวแทนกระบวนการคลายตัวของโครงสร้างในภายในของวัสดุฉนวนจากวิธีการกราฟที่เหมาะสม ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คาดว่าแบบจำลองฉนวนไฟฟ้าที่ได้นำเสนอขึ้นนี้มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำ สามารถเพิ่มโอกาสสำหรับการวิเคราะห์ถึงสาเหตุของความเสื่อมสภาพฉนวนที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และสามารถต่อยอดในด้านงานวิจัยและด้านการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงแบบไม่ทำลาย รวมถึงเป็นประโยชน์ต่อผู้จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ในการฝึกทักษะการประยุกต์และการทำความเข้าใจทางทฤษฎีของคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องและวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



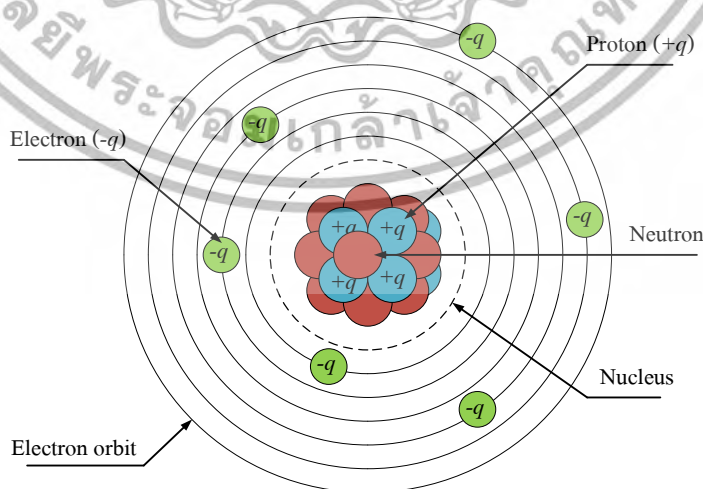
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองไดอิเล็กทริก

บทที่สองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงแนวความคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการพัฒนาแบบจำลองไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นตัวแทนแสดงการตอบสนองของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงการเกิดกลไกการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ภายใต้การปฏิบัติงานโดยรับความเครียดที่เกิดขึ้นตลอดเวลา และการแปลผลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกเพื่อหาตัวประกอบความสูญเสียที่บ่งบอกถึงสถานะของฉนวนไฟฟ้า ทฤษฎีที่วิทยานิพนธ์ได้ทำการศึกษาและค้นคว้าประกอบไปด้วย วัสดุไดอิเล็กทริก กลไกโพลาริเซชัน การตอบสนองไดอิเล็กทริก แบบจำลองไดอิเล็กทริก และ วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับพัฒนาแบบจำลองไดอิเล็กทริก

2.1 วัสดุไดอิเล็กทริก

วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) เป็นฉนวนไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วไฟฟ้าได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ความสามารถในการมีขั้วของวัสดุไดอิเล็กทริกสามารถบ่งบอกได้ด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) โครงสร้างของอะตอมทั่วไปภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะประกอบไปด้วยประจุลบหรืออิเล็กตรอน (Electron) และ นิวเคลียส (Nucleus) โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ที่อยู่รอบนิวเคลียสดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถใช้แสดงถึงการอธิบายลักษณะของโมเลกุลในวัสดุไดอิเล็กทริก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมทั่วไปภายในวัสดุไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะปกติประจุบวกและประจุลบจะมีจำนวนเท่ากันจึงทำให้อะตอมและโมเลกุลภายในวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกถูกวางอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบจะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมที่มีสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้าเป็นระยะห่างความยาวหนึ่งซึ่งเป็นเวกเตอร์ระยะการกระจัด (Displacement vector) โดยประจุบวกจะเคลื่อนที่สวนทางกับสนามไฟฟ้าและประจุลบจะเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้าแรงที่เคลื่อนประจุทั้งสองข้างสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.1)$$

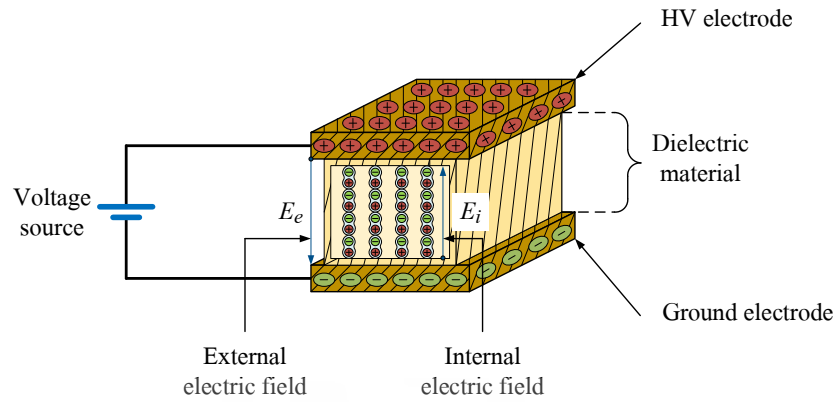
การเคลื่อนตัวของประจุทั้งสองข้างทำให้เกิดความเป็นขั้วไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กทริกด้วยขนาดของไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.2 เรียกปรากฏการณ์ประจุถูกทำให้เป็นขั้วหรือแยกขั้วว่าปรากฏการณ์โพลาไรซ์ (Polarize phenomena) [19], [20] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์โพลาไรซ์ในวัสดุไดอิเล็กทริก

ในสภาวะโพลาไรซ์กลุ่มของอิเล็กตรอนจะมีกระจายตัวไปตามเส้นทางของสนามไฟฟ้าอ้างอิงจากหลักการทับซ้อน (Superposition) คือประจุที่กระจายตัวจะมีค่าเท่ากับประจุที่มีการกระจายเริ่มต้น (Original distribution) รวมกับไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นซึ่งจะสร้างสนามไฟฟ้าภายในที่มีลักษณะต้านทานสนามไฟฟ้าวางในวัสดุไดอิเล็กทริกและกลุ่มของอิเล็กตรอนจะเรียงตัวเพื่อให้เกิดแนวสมมาตรในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

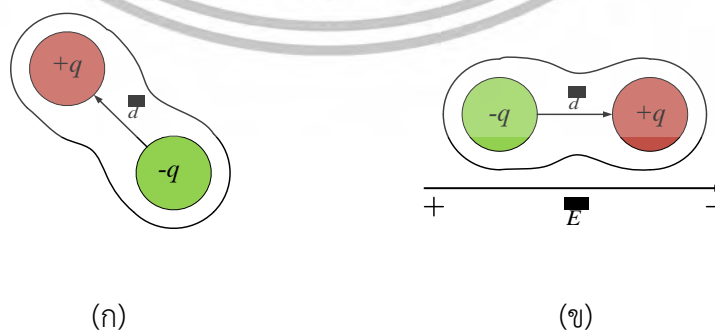


รูปที่ 2.3 การเรียงตัวของกลุ่มอิเล็กตรอนในวัสดุไดอิเล็กทริก

สามารถเขียนไดโพลโมเมนต์ให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 2.3 โดยไดโพลโมเมนต์จะขึ้นอยู่กับความสามารถการโพลาไรซ์ของวัสดุ

$$\vec{P} = \alpha \vec{E} \tag{2.3}$$

นอกจากวัสดุไดอิเล็กทริกที่เกิดขั้วไฟฟ้าจากโมเมนต์ไดโพลแล้วยังมีวัสดุไดอิเล็กทริกแบบอื่นดังเช่น วัสดุไดอิเล็กทริกแบบไม่มีขั้ว (Nonpolar dielectric material) เกิดจากโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กทริกที่จะไม่เกิดไดโพลโมเมนต์จนกว่าจะมีการป้อนสนามไฟฟ้า ตัวอย่างวัสดุไดอิเล็กทริกแบบไม่มีขั้ว เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และแก๊สอื่นๆบางชนิด และวัสดุไดอิเล็กทริกแบบมีไดโพลถาวรอยู่ในโมเลกุลของวัสดุซึ่งโมเลกุลจะหันเหอย่างไม่มีทิศทางแสดงดังรูปที่ 2.4 จะถูกทำให้มีขั้วหรือเชิงขั้วเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำต่อโมเลกุล ไดโพลถาวรจะเกิดแรงบิด (Torque) จัดเรียงโมเมนต์ไดโพลถาวรของโมเลกุลให้ไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า [21], [22] ตัวอย่างวัสดุดังกล่าวได้แก่ น้ำ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดไฮโดรคลอริก



รูปที่ 2.4 การเกิดโพลาไรซ์ของโมเลกุลแบบมีไดโพลถาวร ก) ไดโพลถาวรในสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และข) ไดโพลถาวรภายใต้สนามไฟฟ้า ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

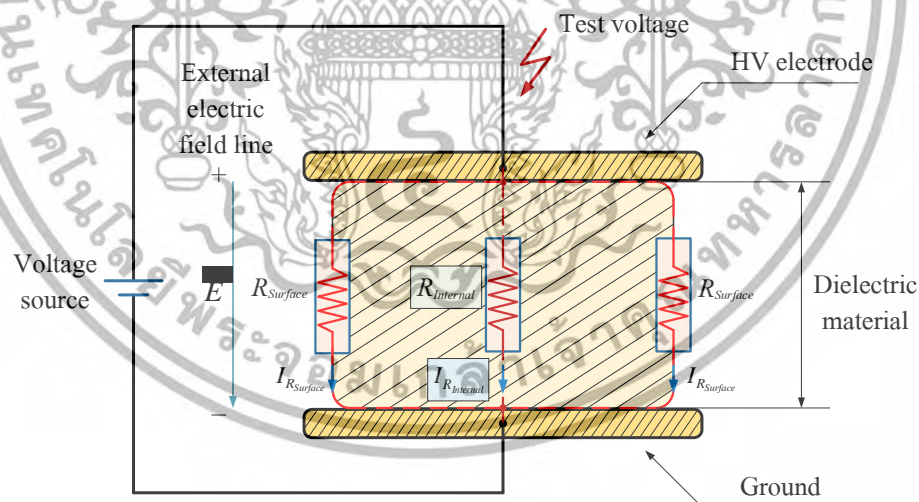
2.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก

คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) ของวัสดุไดอิเล็กทริกที่สำคัญสำหรับเป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติและคุณภาพของฉนวนไฟฟ้ามัดังนี้

2.1.1.1 ความต้านทาน

ความต้านทาน (Resistivity) คือ คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า การวัดค่าความต้านทานจะทดสอบด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวัสดุฉนวนทดสอบ สำหรับทางอุดมคติวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์จะต้องไม่มีการนำกระแสไฟฟ้าหรือก็คือไม่มีค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นอนันต์แต่ในทางปฏิบัติเมื่อป้อนแรงดันทดสอบกับฉนวนทดสอบจะมีกระแสรั่วไหลชนิดหนึ่งที่ไหลผ่านฉนวนเสมอ กระแสรั่วไหลผ่านฉนวนในกรณีของฉนวนแข็งสามารถแบ่งกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นได้เป็นกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวน ($I_{R_{Internal}}$) และกระแสที่ไหลผ่านผิวฉนวน ($I_{R_{Surface}}$) โดยมีความต้านทานฉนวน ($R_{Insulation}$) ที่ประกอบไปด้วย $R_{Internal}$ แสดงความต้านทานในเนื้อฉนวนและ $R_{Surface}$ แสดงความต้านทานที่ผิวฉนวนแสดงได้ดังสมการที่ 2.4 ความต้านทานและกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนแสดง [23], [24] ได้ดังรูปที่ 2.5

$$R_{Insulation} = R_{Internal} + R_{Surface} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.5 ความต้านและกระแสรั่วไหลในฉนวนไฟฟ้า

2.1.1.2 เพอร์มิตติวิตี

เพอร์มิตติวิตี (Permittivity) เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงพลังงานที่สามารถสะสมในวัสดุไดอิเล็กทริกและความสูญเสียภายในวัสดุไดอิเล็กทริก ค่าเพอร์มิตติวิตีของวัสดุไดอิเล็กทริกจะประกอบไปด้วยค่าเพอร์มิตติวิตีของสูญญากาศ (ϵ_0) และค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของไม่ว่างรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

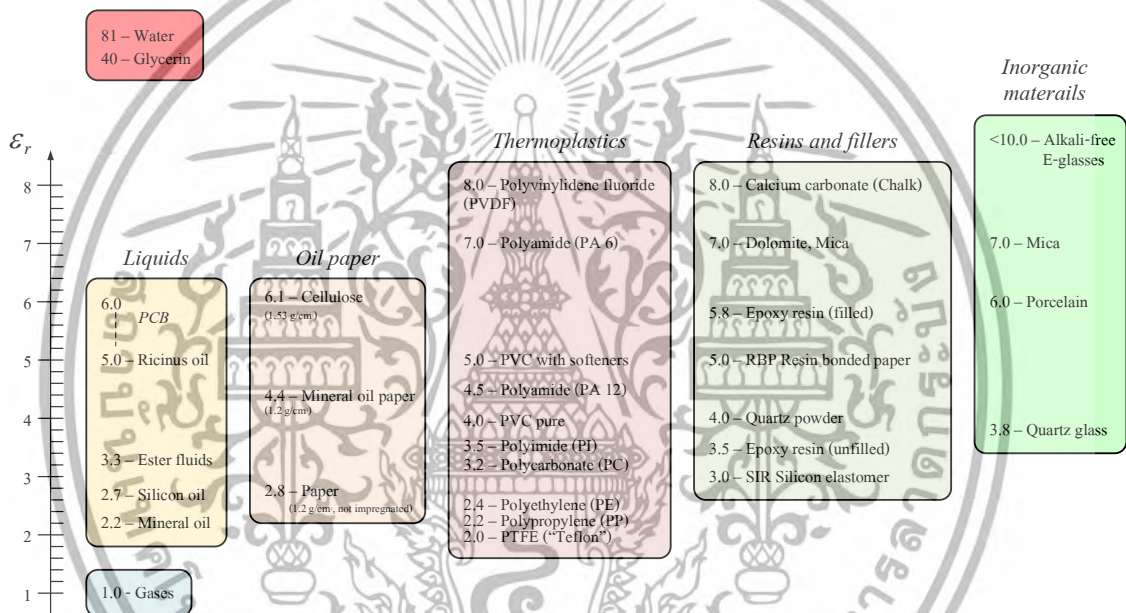
วัสดุ (ϵ_r) เป็นค่าที่บอกถึงฉนวนทดสอบจะมีค่าความจุไฟฟ้าอยู่เป็นกี่เท่าของค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศภายใต้สภาวะหรือเงื่อนไขเดียวกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 [25] ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุไดอิเล็กทริกแต่ละชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \tag{2.5}$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี

ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุไดอิเล็กทริก



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 MHz อุณหภูมิ 20 องศาความดันบรรยากาศ 1 บาร์

ค่าเปอร์มิตติวิตีวัสดุไดอิเล็กทริกสามารถวิเคราะห์ในระบบเชิงซ้อนซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าเปอร์มิตติวิตีสวนจริง (ϵ') จะบ่งบอกถึงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าเปอร์มิตติวิตีสวนจินตภาพ (ϵ'') จะบ่งบอกถึงค่าความสูญเสียของไดอิเล็กทริกและสภาพความนำไฟฟ้า ดังแสดงได้จากสมการที่ 2.6

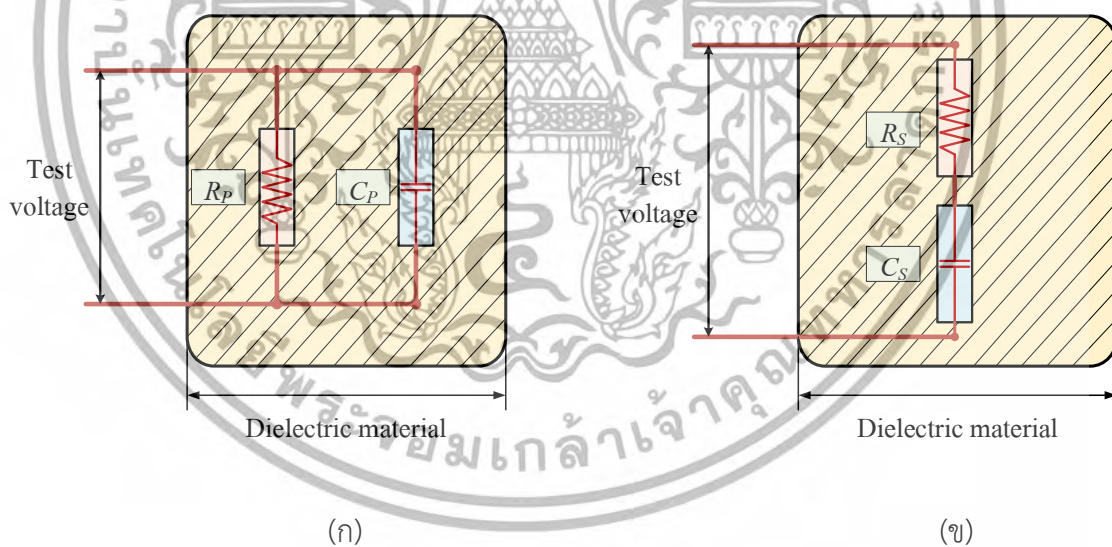
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon(\omega, T) = \varepsilon'(\omega, T) + j\varepsilon''(\omega, T) \quad (2.6)$$

โดยที่ ε คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี
 ε' คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีส่วนจริง
 ε'' คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีส่วนจินตภาพ
 T คือ อุณหภูมิ
 ω คือ ความถี่เชิงมุม

2.1.1.3 ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริก

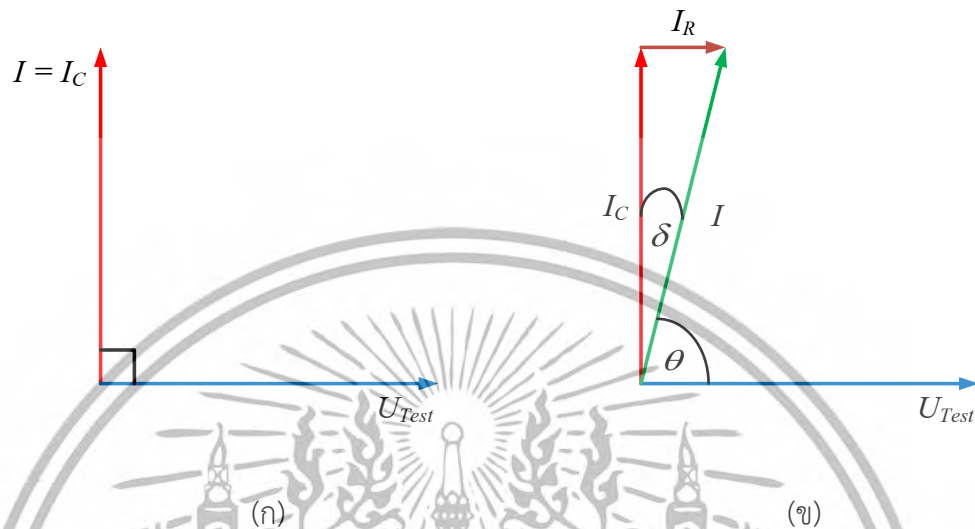
ฉนวนไฟฟ้าในทางทฤษฎีของวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงจะมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุที่เก็บพลังงานในรูปสนามไฟฟ้า ในทางปฏิบัติฉนวนไฟฟ้าจะมีความสูญเสียภายในเกิดขึ้น โดยอาจจะเกิดจากความเครียดสนามไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อฉนวน เป็นต้น [26], [27] จากความสูญเสียดังกล่าวสามารถเขียนวงจรสมมูลโดยมีความต้านทานภายในเนื้อฉนวนเพื่อแสดงถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นขึ้น สามารถเขียนวงจรสมมูลของฉนวนได้สองแบบคือความต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุและความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของฉนวนไฟฟ้าในทางปฏิบัติ ก) วงจรสมมูลแบบขนาน และ ข) วงจรสมมูลแบบอนุกรม

จากความสูญเสียภายในเนื้อฉนวนที่แสดงได้จากรูปที่ 2.7 กระแสที่ไหลผ่านฉนวนจะไม่ได้มีแต่กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียว จึงมีกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานในรูปความสูญเสียด้วย มุมระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฉนวนไฟฟ้าในทางปฏิบัติกับแรงทดสอบมีค่าน้อยกว่า 90 องศาหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นค่ามุม θ มุมระหว่างกระแสไฟฟ้ารวมกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเรียกว่ามุมตัวประกอบกำลังสูญเสียหรือมุม δ โดยจะมีค่าน้อย เฟเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าทางอุดมคติและทางปฏิบัติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เฟเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า (ก) ฉนวนในอุดมคติ และ (ข) ฉนวนในทางปฏิบัติ

แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทดสอบกระแสสลับรูปคลื่นไซน์สำหรับป้อนฉนวนไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

$$U = U_m \sin(\omega t) \quad (2.7)$$

$$I = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (2.8)$$

จากวงจรสมมูลของฉนวนไฟฟ้าในทางปฏิบัติสามารถหาค่าองค์ประกอบ (Parameters) ของวงจรได้ดังนี้

1) วงจรสมมูลแบบขนาน

$$R_p = \frac{1 + (\omega C_s R_s)^2}{R_s (\omega C_s)^2} \quad (2.9)$$

$$C_p = \frac{C_s}{1 + (\omega C_s R_s)^2} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่เวลาของวงจร :
$$\tau = R_p C_p = \frac{1}{\omega^2 C_s R_s} \quad (2.11)$$

ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก :
$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (2.12)$$

2) วงจรสมมูลแบบอนุกรม

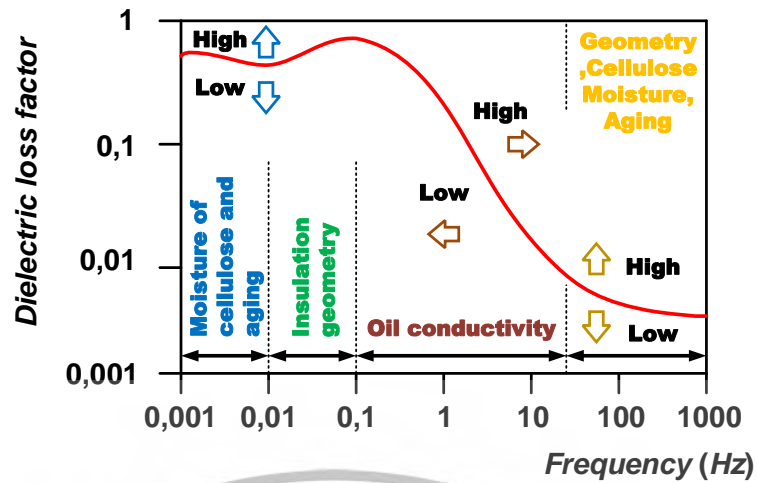
$$R_s = \frac{R_p}{1 + (\omega C_p R_p)^2} \quad (2.13)$$

$$C_s = \frac{1 + (\omega R_p C_p)^2}{\omega^2 C_p R_p^2} \quad (2.14)$$

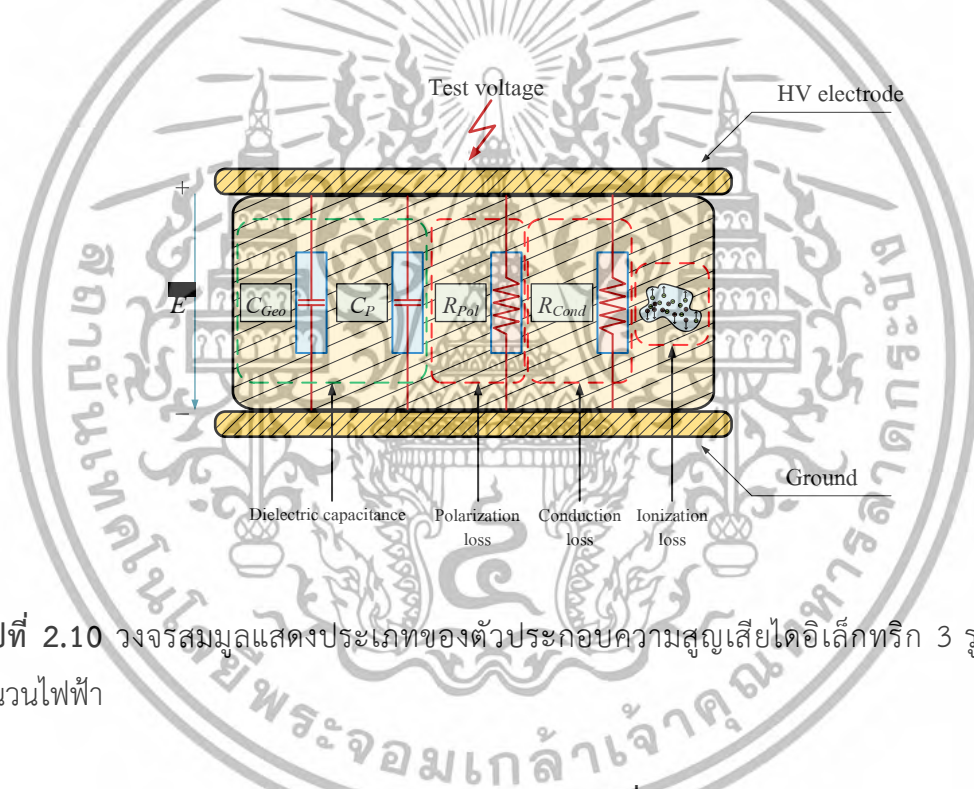
ค่าคงที่เวลาของวงจร :
$$\tau = R_s C_s = \frac{1}{\omega^2 C_s R_s} \quad (2.15)$$

ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก :
$$\tan \delta = \omega C_s R_s \quad (2.16)$$

ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกเป็นองค์ประกอบค่าหนึ่งที่ใช้บ่งบอกถึงสถานะของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งจะแปรตามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานและสภาพแวดล้อม (Ambient) เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ คุณสมบัติของเนื้อฉนวน และอื่นๆ ซึ่งสามารถบ่งบอกผลลัพธ์ที่ตอบสนองได้ในวัฏจักรความถี่ (frequency domain) ตัวอย่างคุณลักษณะตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในวัฏจักรความถี่แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 [28] สำหรับในทางปฏิบัติสามารถจำแนกประเภทของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกได้ 3 รูปแบบ คือ ความสูญเสียเนื่องจากสภาพความนำไฟฟ้า ความสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน และความสูญเสียเนื่องจากไอออนเซชันหรือดิซชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน โดยสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 คุณสมบัติของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกในวัฏจักรความถี่



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลแสดงประเภทของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริก 3 รูปแบบของฉนวนไฟฟ้า

2.1.1.3.1 ความสูญเสียเนื่องจากสภาพความนำไฟฟ้า

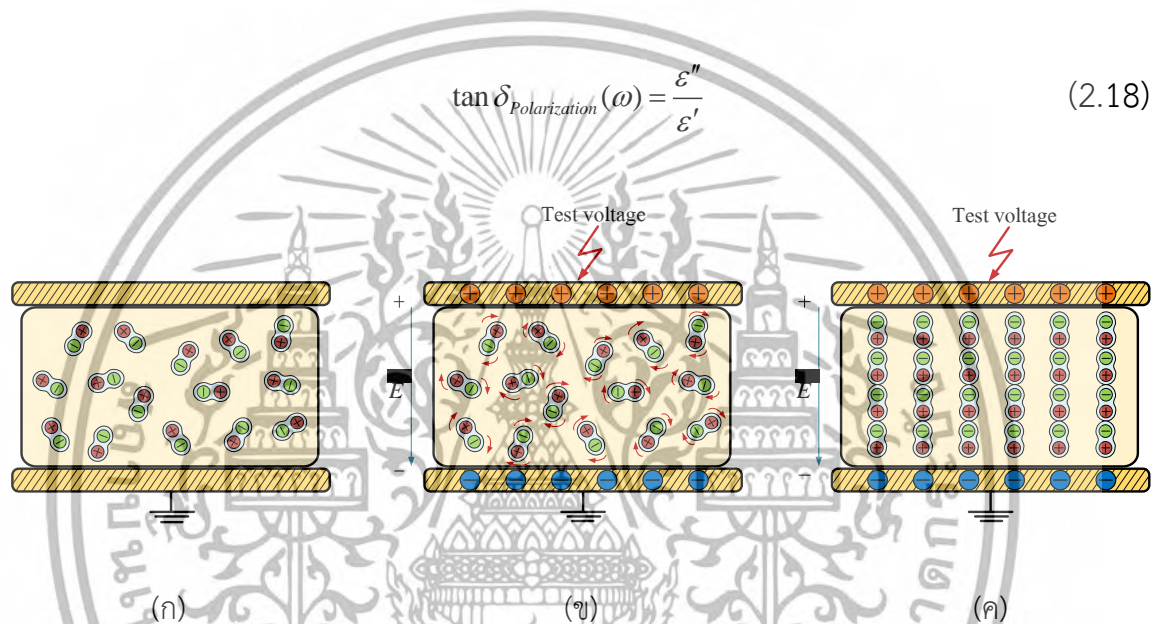
เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีกระบวนการโพลาไรส์เกิดขึ้นในเนื้อของวัสดุเนื่องจากประจุมีการเคลื่อนที่ทำให้มีกระแสที่ไหลผ่านฉนวนจนเกิดความร้อนขึ้นเป็นกระบวนการสูญเสียภายใน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17

$$\tan \delta_{Conduct}(\omega) = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r'} \tag{2.17}$$

โดยที่ σ คือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3.2 ความสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน

ฉนวนไฟฟ้าในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าโมเลกุลภายในจะเรียงตัวกันอย่างอิสระ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้านิวเคลียสและประจุลบของโมเลกุลจะแยกออกจากกันด้วยไดโพลโมเมนต์เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้โมเลกุลของฉนวนประพฤติตัวเหมือนไดโพลที่มีขนาดประจุเท่ากันแต่อยู่ในลักษณะขั้วตรงข้ามและเรียงตัวแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า ถ้าฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับไดโพลจะเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้าที่สลับขั้วกันไปมาตลอดเวลา ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 การเรียงตัวแบบสลับกันไปมาทำให้เกิดความสูญเสียในรูปของความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18



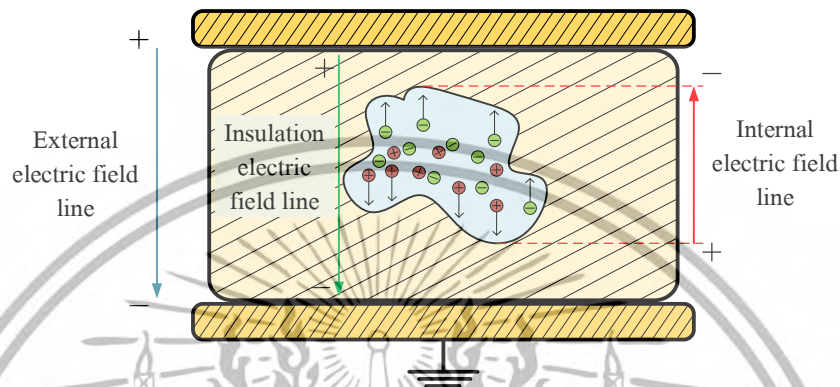
รูปที่ 2.11 การเรียงตัวของไดโพลในโมเลกุลฉนวนไฟฟ้าภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ก) โมเลกุลในเนื้อฉนวนที่สถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า ข) การเคลื่อนตัวของประจุภายในโมเลกุลภายใต้สนามไฟฟ้า และ ค) การสิ้นสุดการจัดเรียงโมเลกุลภายในฉนวนไฟฟ้า

2.1.1.3.3 ความสูญเสียเนื่องจากไอออนในเซชันหรือดิสชาร์จ

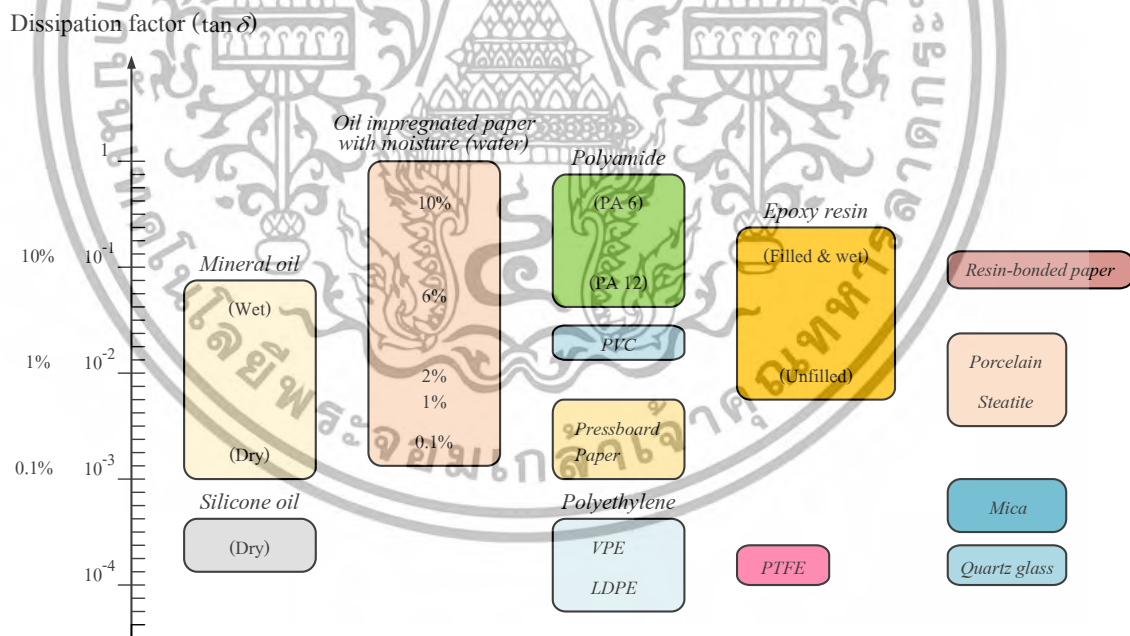
บางส่วน

ฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ผ่านการใช้งานมาอย่างยาวนานไม่ว่าจะเป็นฉนวนแข็งอย่างเอ็กซ์แอลพีอี (XLPE) หรือครอสลิงค์โพลีเอทีลีน (Cross-link polyethylene) ในสายเคเบิลแรงดันสูง และฉนวนของเหลวผสมของแข็งได้แก่กระดาษอัดน้ำมัน (Oil impregnated paper) ในหม้อแปลงไฟฟ้าต้องรับความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อของฉนวน ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นมีอุณหภูมิสูงมากอาจจะทำให้เกิดรอยแตกในฉนวนแข็งจนเกิดโพรงอากาศเช่นเดียวกับฉนวนเหลวที่เกิดฟองแก๊ส โพรงอากาศหรือฟองแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กทรอนิกส์ของฉนวนเหลวและแข็งหลายเท่า [29], [30] ทำให้บริเวณดังกล่าวมีโอกาสเกิดอัตราการเกิดการเบรกดาวน์มากขึ้นและเมื่อเกิดเบรกดาวน์จะทำให้เกิดโพรงอากาศเพิ่มขึ้น การเกิดเบรกดาวน์บริเวณช่องว่างอากาศจะเกิดกระแสดีสชาร์จภายในโพรงอากาศหรือแก๊สจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนชนกับเนื้อฉนวนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 จากการเกิดความร้อนและปฏิกิริยาเคมีส่งผลให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง



รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโพรงอากาศ



รูปที่ 2.13 ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกต่างๆ

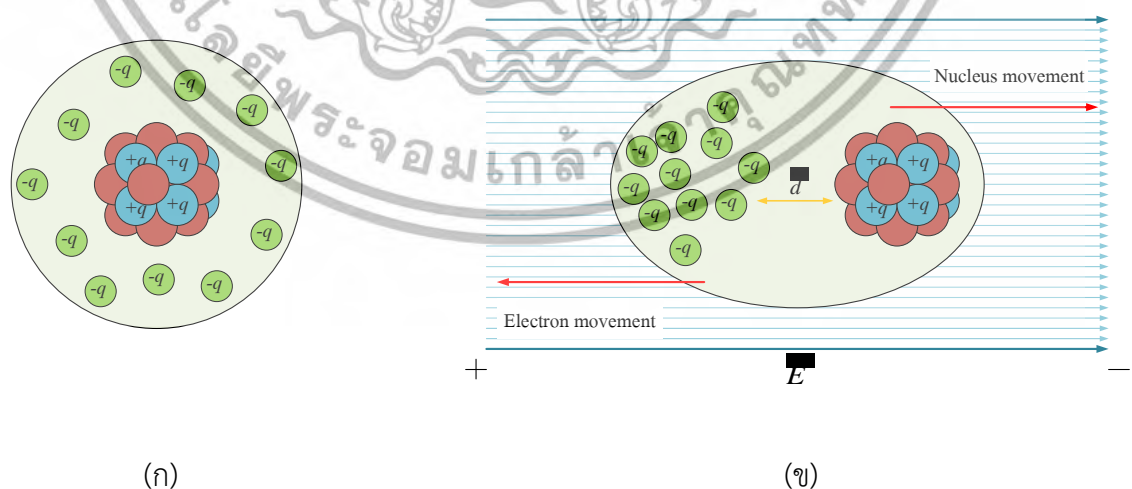
2.2 กลไกโพลาริเซชัน

วัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า อะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุจะถูกทำให้เป็นขั้วหรือแยกขั้วจึงเกิดเป็นพฤติกรรมแม่เหล็กขั้วตอับสัมพันธ์กับทิศทางของสนามไฟฟ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกที่เกิดขึ้น พฤติกรรมการตอบสนองดังกล่าวเป็นกลไกโพลาไรเซชัน (Polarization mechanism) ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวัสดุไดอิเล็กทริกโดยทั่วไปการทดสอบการเกิดกลไกโพลาไรเซชันจะใช้แรงดันไฟฟ้าทดสอบกระแสตรงในการทดสอบเพื่อให้การจัดเรียงโมเลกุลมีความใกล้เคียงกับทฤษฎี การสิ้นสุดกลไกโพลาไรเซชันคือปลดแหล่งจ่ายออกจากวัสดุไดอิเล็กทริก โมเลกุลภายในเนื้อวัสดุไดอิเล็กทริกจะทำการเรียงตัวกลับสู่สภาพเดิมเหมือนตอนสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า กลไกโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทดังนี้ [31]

2.2.1 อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชันหรือออปติคอลโพลาไรเซชัน

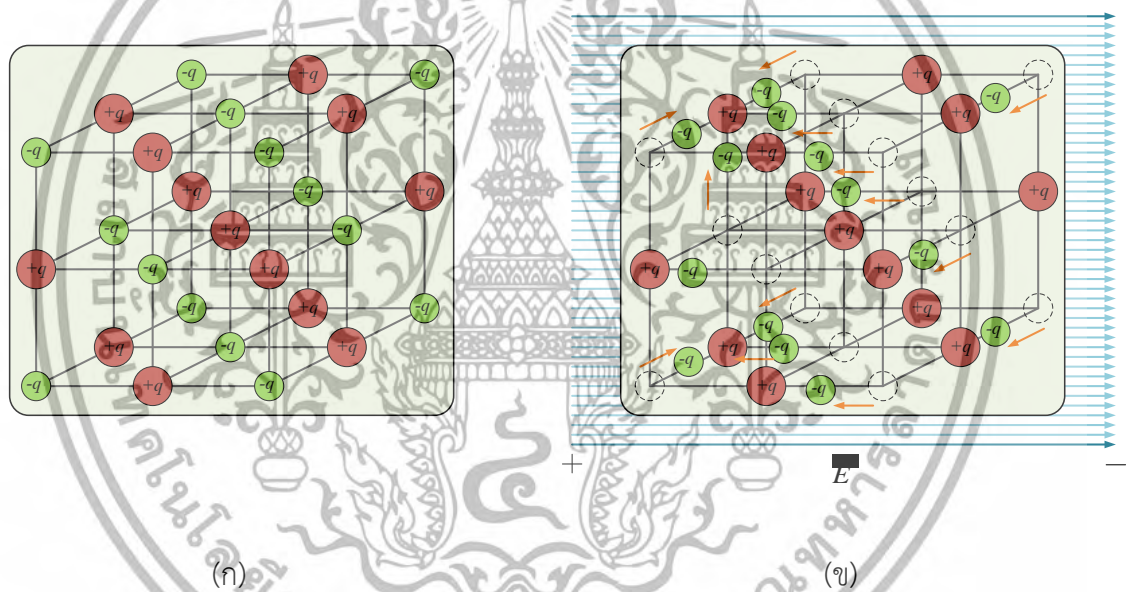
อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน (Electronic polarization) หรือ ออปติคอลโพลาไรเซชัน (Optical polarization) เป็นกลไกโพลาไรเซชันที่เกิดในระดับอะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริก สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุไดอิเล็กทริกจะส่งผลให้กลุ่มอิเล็กตรอนของอะตอมหรือโมเลกุลที่มีลักษณะสมมาตรที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการจัดเรียงวงโคจรการเคลื่อนที่ที่รอบนิวเคลียสใหม่ตามแนวทิศทางของสนามไฟฟ้าการเคลื่อนตัวของกลุ่มอิเล็กตรอนจะเกิดไดโพลโมเมนต์ด้วยระยะการกระจัดที่สัมพันธ์กับนิวเคลียสของอะตอมในลักษณะยึดวงโคจรออกตามแนวของทิศทางสนามไฟฟ้าจนเกิดการมีขั้วของวัสดุไดอิเล็กทริก แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเล็กตรอนดังกล่าวจะมีขนาดเล็กมากเนื่องจากแรงกระทำของสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระทำต่อกลุ่มอิเล็กตรอนและนิวเคลียสมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอมที่นิวเคลียสกระทำต่อกลุ่มอิเล็กตรอน อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชันเป็นกลไกโพลาไรเซชันที่ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้าและเป็นกลไกที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ กลไกโพลาไรเซชันประเภทนี้จะเกิดขึ้นภายในเวลาประมาณ 10^{-14} วินาที กลไกโพลาไรเซชันแบบอิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กลไกโพลาไรเซชันแบบอิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 อะตอมมิคโพลาริเซชันหรือไอออนิกโพลาริเซชัน

อะตอมมิคโพลาริเซชัน (Atomic polarization) หรือ ไอออนิกโพลาริเซชัน (Ionic polarization) เป็นกลไกโพลาริเซชันที่เกิดกับวัสดุไดอิเล็กทริกของแข็งที่เป็นสารประกอบไอออนิก เช่น เกลือคลอไรด์ (NaCl) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เป็นต้น โดยปกติโมเลกุลที่มีพันธะไอออนิกอะตอมที่มีไอออนบวกและไอออนลบจะมีทิศทางที่แน่นอนไม่สามารถเคลื่อนที่หรือหมุนได้ได้ โพลีเมอร์ที่สร้างขึ้นจะหักล้างกันเป็นศูนย์ เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกดังกล่าวมีพันธะไอออนิกได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก อะตอมที่มีไอออนบวกจะเคลื่อนที่ตามแนวทิศทางของสนามไฟฟ้าและอะตอมที่มีไอออนลบจะเคลื่อนที่ตรงข้ามทิศทางของสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้โครงสร้างผลึกเกิดความไม่สมดุลและเกิดไดโพลโมเมนต์ลัพธ์ระหว่างไอออนบวกและไอออนลบภายในวัสดุไดอิเล็กทริก กลไกโพลาริเซชันประเภทนี้จะเกิดขึ้นภายในเวลาประมาณ 10^{-12} วินาที กลไกโพลาริเซชันแบบอะตอมมิคโพลาริเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.15

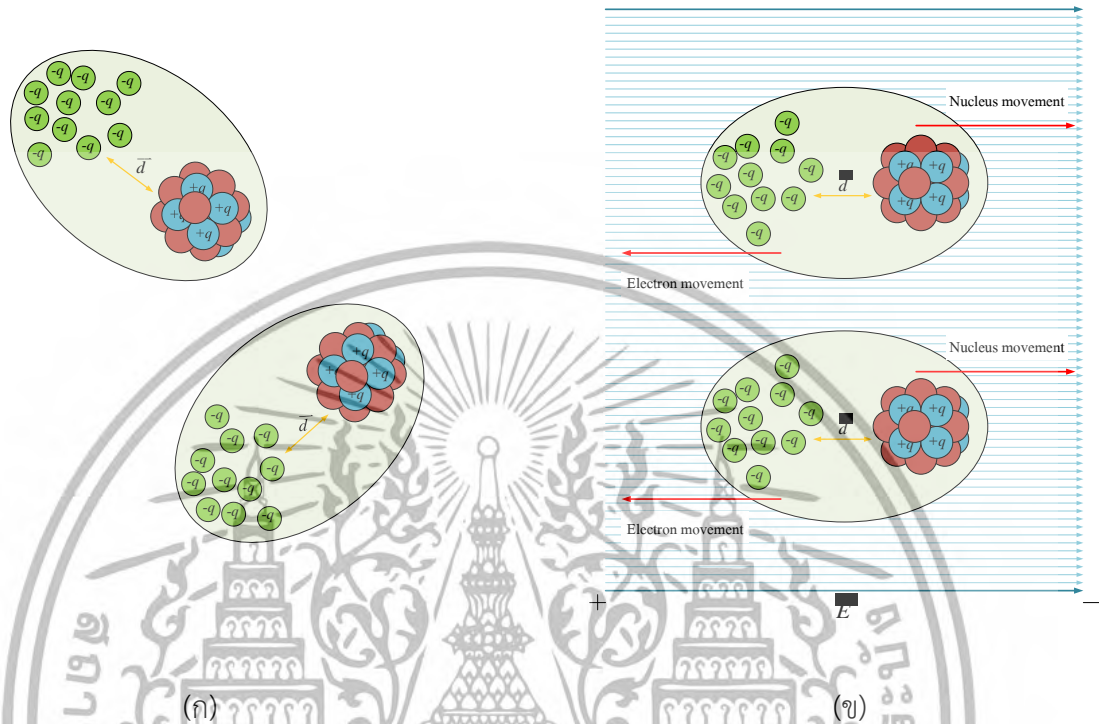


รูปที่ 2.15 กลไกโพลาริเซชันแบบอะตอมมิคโพลาริเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า

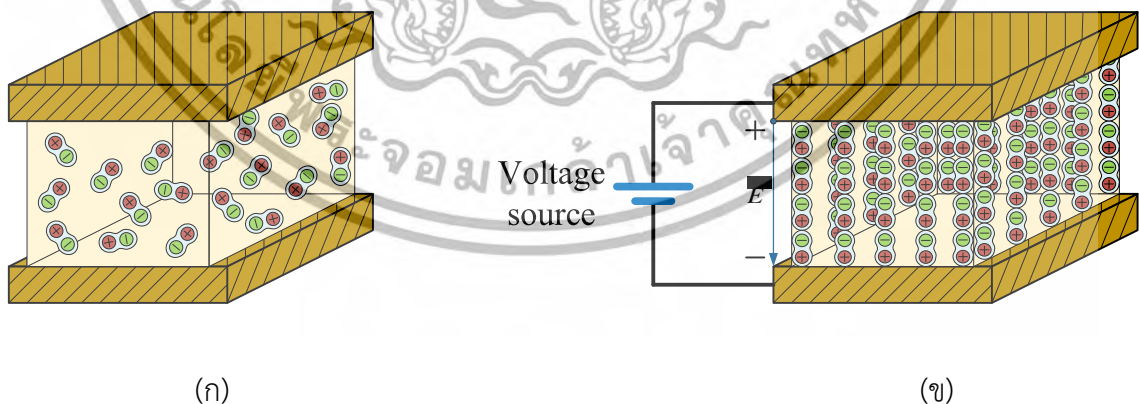
2.2.3 ออเรนเทชันโพลาริเซชันหรือไดโพลาร์โพลาริเซชัน

ออเรนเทชันโพลาริเซชัน (Orientation polarization) หรือไดโพลาร์โพลาริเซชัน (Dipolar polarization) เป็นกลไกโพลาริเซชันที่เกิดกับวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีขั้วหรือไดโพลถาวร โดยปกติจะเป็นของเหลวหรือแก๊ส เช่น น้ำ (H_2O) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น ที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้าโมเลกุลเชิงขั้วภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบมีการเคลื่อนที่และหมุนอย่างอิสระไม่มีการยึดกันระหว่างโมเลกุล เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กทริกที่มีโมเลกุลดังกล่าวได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอกไดโพลภายในโมเลกุลจะเคลื่อนที่จัดเรียงตัวไปตามแนวของทิศทางสนามไฟฟ้าภายนอก กลไกโพลาริเซชันประเภทนี้จะเกิดขึ้นภายในเวลาประมาณ 10^{-8} วินาที กลไกโพลาริเซชันแบบออเรนเทชันโพลาริเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กลไกโพลาริเซชันแบบออเรนเทชันโพลาริเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า

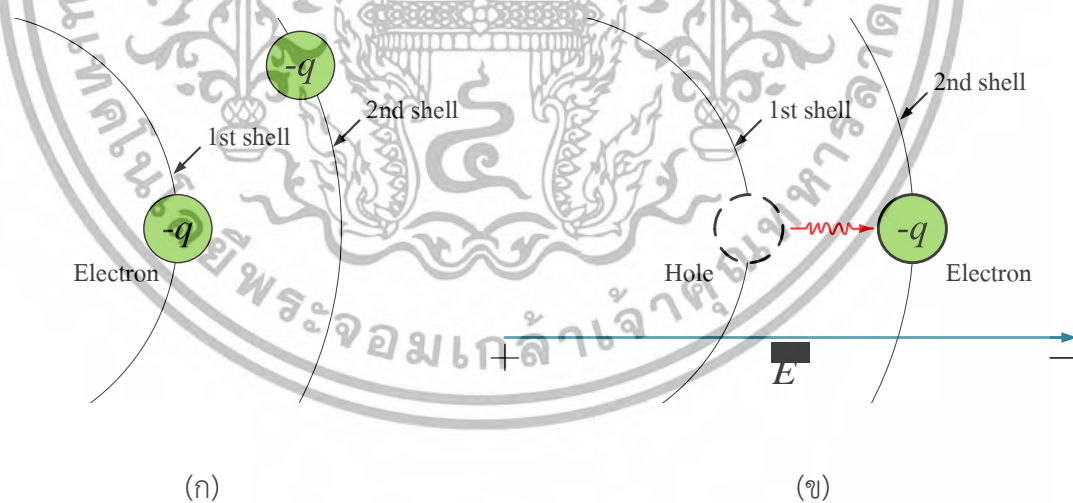


รูปที่ 2.17 กลไกโพลาริเซชันแบบออเรนเทชันโพลาริเซชันภายในวัสดุไดอิเล็กทริก ก) การเรียงตัวของโมเลกุลไดโพลถาวรที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) การเรียงตัวของโมเลกุลไดโพลถาวรภายใต้สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ฮอปปีงโพลาริเซชัน

ฮอปปีงโพลาริเซชัน (Hopping polarization) เป็นกลไกโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่งที่อยู่ของประจุภายในโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กทริก ตัวอย่างเช่นตำแหน่งของไอออนในพื้นที่ว่างสำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างไอออนิกหรือคริสตัล (Crystal) หรือ อิเล็กตรอนและโฮล (Hole) ในโครงสร้างของแก้ว (Glass) และสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส (Amorphous semiconductor) โดยประจุดังกล่าวจะสามารถเคลื่อนที่แบบการกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอกอิเล็กตรอนภายในวัสดุจะเกิดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบการกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งซึ่งการกระโดดของอิเล็กตรอนนี้จะทำให้ตำแหน่งเดิมกลายเป็นโฮลหรือพฤติกรรมเป็นประจุบวกและทำให้ตำแหน่งใหม่ที่อิเล็กตรอนกระโดดไปแสดงพฤติกรรมเป็นประจุลบโดยที่พฤติกรรมการกระโดดนี้จะเกิดในระยะเวลาสั้นๆจากนั้นประจุดังกล่าวจะค้างอยู่ในตำแหน่งใหม่ที่กระโดดไป ซึ่งพฤติกรรมการย้ายตำแหน่งของประจุภายในฉนวนทำให้เกิดกลไกโพลาริเซชันหรือการเกิดขั้วภายในเนื้อวัสดุ บางครั้ง-ฮอปปีงโพลาริเซชันอาจถูกมองว่าเป็นออเรนเทชันโพลาริเซชัน แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่ออเรนเทชันเป็นกลไกของไดโพลโมเมนต์ถาวรซึ่งเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากการกระโดดของประจุภายในโมเลกุลขณะที่ไดโพลของฮอปปีงโพลาริเซชันเกิดจากโมเลกุลของประจุที่แยกออกจากกันมีการกระโดดจากคัก์หนึ่งไปยังอีกคัก์หนึ่ง กลไกโพลาริเซชันประเภทนี้จะเกิดขึ้นภายในเวลาประมาณ 10^{-5} วินาที กลไกโพลาริเซชันแบบฮอปปีงโพลาริเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.18

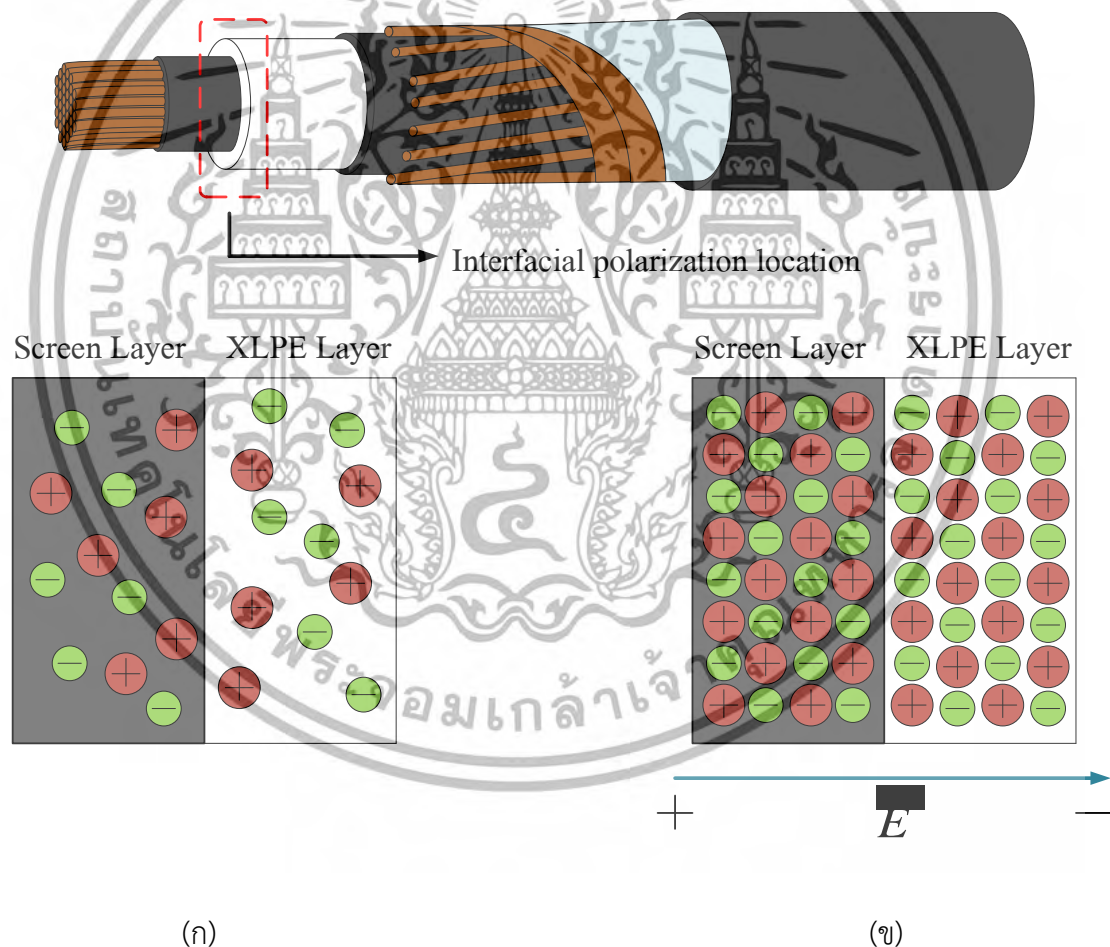


รูปที่ 2.18 กลไกโพลาริเซชันแบบฮอปปีงโพลาริเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

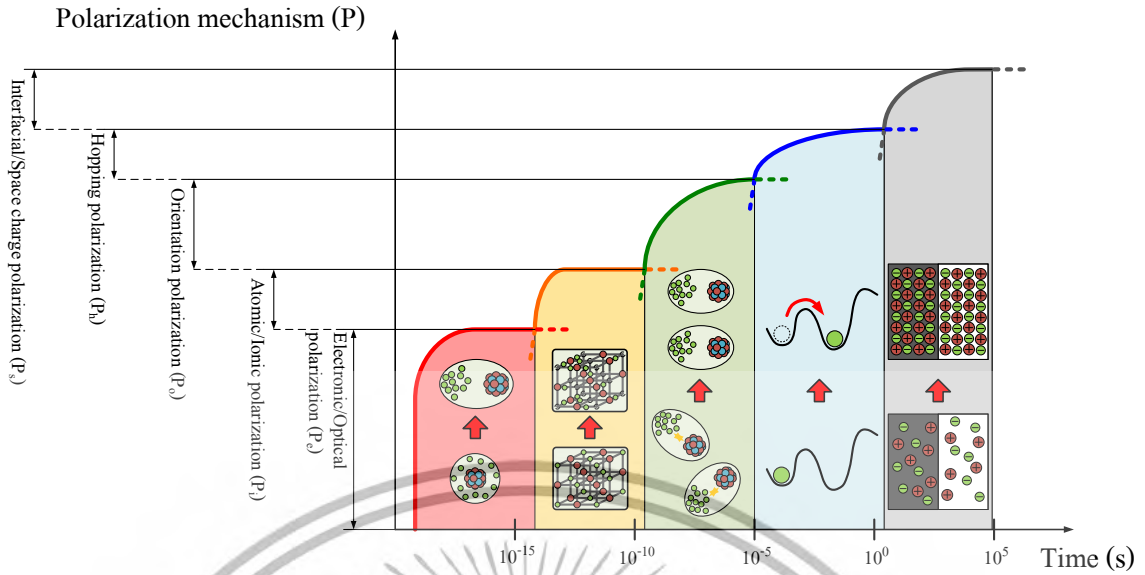
2.2.5 อินเตอร์เฟซเชียลโพลาริเซชันหรือสเปซชาร์จ์โพลาริเซชัน

อินเตอร์เฟซเชียลโพลาริเซชัน (Interfacial polarization) หรือสเปซชาร์จ์โพลาริเซชัน (Space charge polarization) เป็นกลไกโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของวัสดุไดอิเล็กทริกขอบเกรน และรอยต่อระหว่างพื้นผิววัสดุที่มีความนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันและค่าเปอร์มิตติวิตีที่แตกต่างกัน เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ประจุบวกและประจุลบในเนื้อวัสดุจะกระจายตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ประจุดังกล่าวจะเคลื่อนที่มาสะสมกันตรงบริเวณรอยต่อของวัสดุไดอิเล็กทริก 2 ชนิดที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของประจุบวกหรือประจุลบที่รอยต่อของวัสดุไดอิเล็กทริกดังกล่าวซึ่งจะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนผิดเพี้ยนไป กลไกโพลาริเซชันประเภทนี้จะเกิดขึ้นภายในเวลาประมาณ 10^{-3} วินาที กลไกโพลาริเซชันแบบอินเตอร์เฟซเชียลโพลาริเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.19

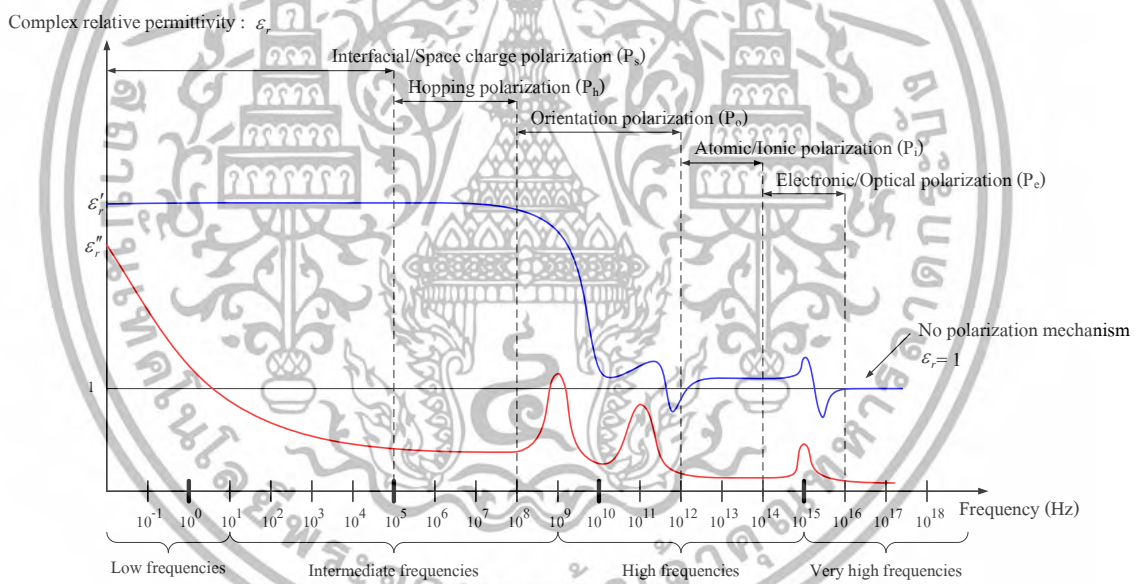


รูปที่ 2.19 กลไกโพลาริเซชันแบบอินเตอร์เฟซเชียลโพลาริเซชัน ก) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกที่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า และ ข) อะตอมของวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ระยะเวลาการเกิดกลไกโพลาริเซชันทั้ง 5 ประเภท



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของค่าเปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนและการเกิดกลไกโพลาริเซชัน

2.3 การตอบสนองไดอิเล็กทริก

การวัดผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณไฟฟ้า (Electric quantities) ของวัสดุไดอิเล็กทริกซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งจะมีค่าการตอบสนองทางไฟฟ้า (Electric susceptibility) [32] ของวัสดุเฉพาะซึ่งเป็นตัวแปรสำหรับกระบวนการการเกิดโพลาริเซชันแสดงถึงความไวต่อการเป็นขั้วทางไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้าโดยจะสัมพันธ์กับค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพันธ์ของวัสดุสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\chi = \epsilon_r - 1 \quad (2.19)$$

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกถูกทำให้เป็นขั้วทางไฟฟ้าด้วยการเคลื่อนตัวของประจุอิเล็กตรอนและนิวเคลียสจนเกิดไดโพลโมเมนต์ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าหรือก็คือกระบวนการโพลาไรเซชัน จากสมการ 2.19 การตอบสนองทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการโพลาไรเซชัน การตอบสนองทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก และสนามไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 2.20

$$\bar{P} = \chi \epsilon_0 \bar{E} \quad (2.20)$$

กระบวนการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นจากการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์วัสดุไดอิเล็กทริกจะเริ่มการดิสชาร์จประจุความเป็นขั้วจึงลดลง กระบวนการดิสชาร์จประจุดังกล่าวเป็นกระบวนการผ่อนคลาย (Relaxation process) ของโมเลกุลภายในวัสดุเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการดีโพลาไรเซชัน (Depolarization process) กระบวนการดังกล่าวจะใช้เวลาเทียบเท่าหรือนานกว่ากระบวนการโพลาไรเซชันในการทำให้ความเป็นขั้วของโมเลกุลหมดลงหรือสนามมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์

สามารถสรุปเกี่ยวกับการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกได้ว่าวัสดุไดอิเล็กทริกมีการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า ณ เวลาใดๆซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการมีขั้วทางไฟฟ้าหรือกระบวนการโพลาไรเซชันและกระบวนการดิสชาร์จประจุของโมเลกุลในวัสดุหรือกระบวนการดีโพลาไรเซชันซึ่งเป็นสมบัติการตอบสนองแบบพลวัต (Dynamic response) ซึ่งผลการตอบสนองแบบพลวัตดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในวัฏจักรเวลา (Time domain) และวัฏจักรความถี่ (Frequency domain)

2.3.1 การตอบสนองของไดอิเล็กทริกในวัฏจักรเวลา

ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าวัสดุไดอิเล็กทริกสุญญากาศที่คั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า (Electric displacement) จากการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนหรือนิวเคลียส หรือความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (Electric flux density) หรือ การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นปริมาณทางเวกเตอร์ที่เป็นสัดส่วนกับค่าสนามไฟฟ้าและค่าเปอร์มิตติวิตีสุญญากาศ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.21

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} \quad (2.21)$$

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโตรดจนเกิดเป็นสนามไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นไฟฟ้า ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะมีทั้งขั้วบวกและขั้วลบในหนึ่งหน่วยพื้นที่จากการเหนี่ยวนำที่ผิวของอิเล็กโตรดปริมาณประจุที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายและจะลดลงตามเส้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

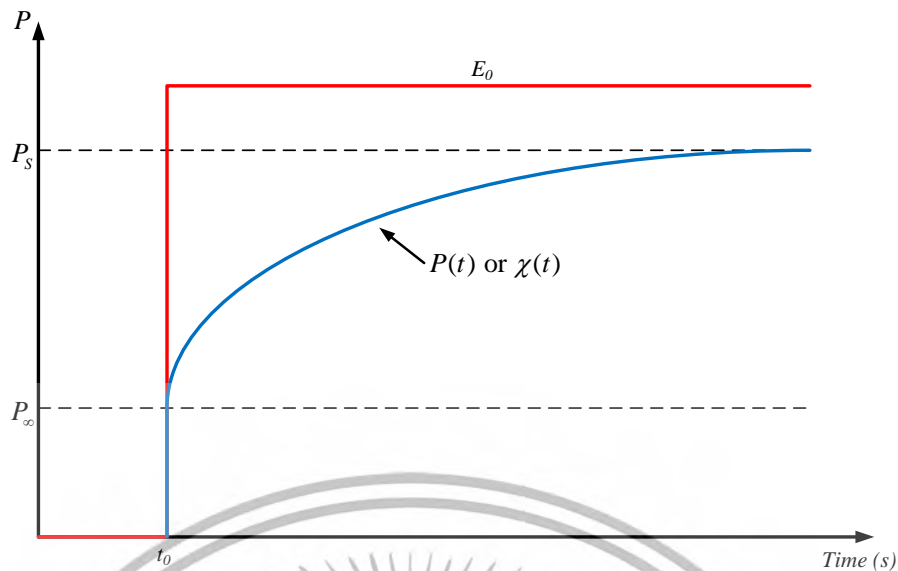
สนามไฟฟ้า สำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบพลวัตหรือสนามไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับเวลาความหนาแน่นสนามไฟฟ้าหรือการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าจากการเคลื่อนตัวของประจุไฟฟ้าซึ่งสามารถเรียกว่าเป็นกระแสการกระจัด (Displacement current) สามารถเขียนค่าสนามไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาของแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 2.22

$$\bar{D}(t) = \epsilon_0 \bar{E}(t) \quad (2.22)$$

วัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการเกิดขั้วของกระบวนการโพลาไรเซชันจากสมการที่ 2.20 และการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในเวลาใดๆ ในสมการที่ 2.22 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่รวมผลลัพธ์ของกระบวนการโพลาไรเซชันได้ดังสมการที่ 2.23

$$\bar{D}(t) = \epsilon_0 \bar{E}(t) + \bar{P}(t) = \epsilon_0 (1 + \chi) \bar{E}(t) = \epsilon_0 \epsilon_r \bar{E}(t) \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.23 ได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.19 และ 2.20 ระยะเวลาของกระบวนการโพลาไรเซชันจะมีระยะเวลาที่สั้นกว่าระยะเวลาของสนามไฟฟ้าซึ่งมีความแตกต่างของช่วงเวลาดังกล่าวเกิดจากการหน่วงเวลา (Time delay) ที่สัมพันธ์กับการเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้า โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบขั้น (Step voltage) จนเกิดเป็นสนามไฟฟ้าแบบขั้นได้ค่ายอด E_0 ให้กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เวลา t_0 เมื่อเวลาหลังจาก t_0 เริ่มมีการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ถูกระบุโดยค่าการตอบสนองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-dependent behavior of the susceptibility) หรือ $\chi = \chi(t)$ ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับกระบวนการโพลาไรเซชันที่ขึ้นอยู่กับเวลาและเหมือนกับผลตอบสนองในวัฏจักรเวลา การตอบสนองดังกล่าวก็คือการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบที่ต่างกันของกลไกโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้น การตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การตอบสนองไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้าแบบขั้น

จากรูปที่ 2.22 แสดงการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกของแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นหนึ่งหน่วยในวัฏจักรเวลา จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.20 สามารถแสดงการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นหนึ่งหน่วยดังสมการที่ 2.24

$$\frac{\bar{P}(t)}{\bar{E}(t)} = \epsilon_0 \chi(t) 1(t) \quad (2.24)$$

$\chi(t)$ และ $P(t)$ อยู่ในรูปฟังก์ชันผลตอบสนองแบบขั้นหนึ่งหน่วย (Unit step response function) แทนด้วย $1(t)$ ฟังก์ชันหนึ่งหน่วยแสดงถึงการเกิดกลไกโพลาริเซชันเริ่มต้นที่รวดเร็วมากในเวลา t_0 หรือโพลาริเซชันแบบทันทีทันใด (Instantaneous polarization) $P(t)$ โดยที่ $t = t_0$ มีค่าเทียบเท่ากับ P_∞ โดยไม่นับผลของกลไกโพลาริเซชันแบบอิล็กทริกที่เร็วมากที่เกิดขึ้นเร็วมากมีจำนวนเล็กน้อยในวัสดุไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขนาดใหญ่และไม่สามารถบันทึกในรูปของวัฏจักรเวลาและวัฏจักรความถี่ ช่วงเวลาที่เข้าใกล้อนันต์จะเป็นช่วงสุดท้ายของกระบวนการโพลาริเซชันโดย $t = \infty$ ทำให้ $P(t) = P_s$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ ซึ่งขอบเขตของกระบวนการโพลาริเซชันกำหนดโดยขนาดและระยะเวลา สามารถเขียนผลตอบสนองแบบขั้นหนึ่งหน่วยของกระบวนการโพลาริเซชันได้ดังสมการที่ 2.25

$$P(t) = P_\infty + (P_s - P_\infty)g(t - t_0) \quad (2.25)$$

โดย $g(t)$ นั้นไม่มีขนาด เป็นฟังก์ชันที่แสดงถึงความต่อเนื่อง สามารถเขียนได้สมการ 2.26
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการแจ้งเพื่อการค้าเท่านั้น มิใช่เอกสารที่เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P(t) = \varepsilon_0[\chi_\infty + (\chi_s - \chi_\infty)g(t-t_0)]E_0 \quad (2.26)$$

ค่าเปอร์มิตติวิตีจากสมการที่ 2.19 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.27

$$P(t) = \varepsilon_0[(\varepsilon_\infty - 1) + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)g(t-t_0)]E_0 \quad (2.27)$$

ผลของการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกด้วยกระบวนการโพลาไรเซชันภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ระยะเวลาใดๆที่มีความต่อเนื่องในสมการที่ 2.26 เพื่อให้สามารถวิเคราะห์คำนวณผลลัพธ์การตอบสนองของกระบวนการโพลาไรเซชันที่เวลาใดๆจึงนำการอินทิกรัลของดูฮาเมล (Duhamel's integral) หรือการคอนโวลูชัน (Convolution) ซึ่งเป็นการคำนวณการตอบสนองของระบบเชิงเส้นที่มีลักษณะเป็นพลวัตในวัฏจักรเวลา สามารถแสดงสมการโดยใช้วิธีดังกล่าวได้ดังสมการที่ 2.28

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi_\infty E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t f(t-\tau)E(\tau)d\tau \quad (2.28)$$

สามารถเขียนฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกได้ดังสมการที่ 2.29

$$f(t) = (\chi_s - \chi_\infty) \frac{\partial g(t)}{\partial t} = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{\partial g(t)}{\partial t} \quad (2.29)$$

ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในสมการที่ 2.29 แสดงถึงผลตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการศึกษาพฤติกรรมธรรมชาติของวัสดุไดอิเล็กทริก

การวัดขนาดของกระแสโพลาไรเซชันไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถหาได้จากกระแสการกระจัดเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกจากกลไกโพลาไรเซชัน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระแสการกระจัด จากสมการของแมกซ์เวล (Maxwell's equation) ในปี 1891 สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้วัสดุไดอิเล็กทริกจะสร้างความหนาแน่นกระแส ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสการกระจัดของกลไกโพลาไรเซชันดังสมการที่ 2.30 และ 2.31

$$\nabla \times H(t) = J(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \quad (2.30)$$

$$= \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{\partial E(t)}{\partial t} + \frac{\partial P(t)}{\partial t} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ 2.28 เมื่อ $E(t)$ มีค่าคงที่ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 [\varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)] E(t) \quad (2.32)$$

จากสมการที่ 2.32 สามารถพิจารณาสมการพื้นฐานสำหรับฟังก์ชันการตอบสนองของไดอิเล็กทริกในวัฏจักรเวลาตามวิธีของ AK Joscher [33-36] ได้ดังสมการที่ 2.33

$$I_{Polarization}(t) = C_0 U_0 \left\{ \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right\} \quad (2.33)$$

โดยที่ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าเรขาคณิตของวัสดุไดอิเล็กทริก (ที่เกิดจากค่าความจุไฟฟ้าในสุญญากาศระหว่างอิเล็กโทรดหรือค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูง ณ เวลาเริ่มต้น t_0 โดยเกิดจากการวัดกระแสตอนเริ่มต้น)

U_0 คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าทดสอบ

$\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันจากการป้อนแรงดันแบบขึ้นอย่างทันทีทันใด

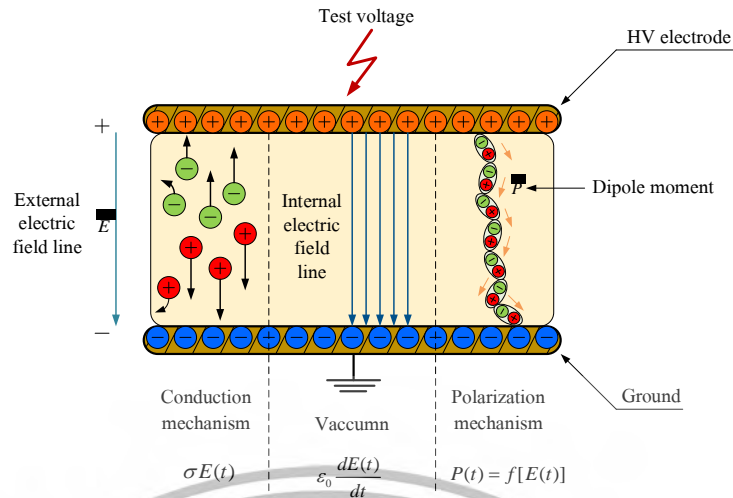
จากการแปลงรูปของสมการที่ 2.32 2.33 และรูปที่ 2.23 แสดงให้เห็นถึงกระแสโพลาริเซชันที่ประกอบด้วยสามเทอมได้แก่

เทอมที่หนึ่ง คือ เทอมของ $\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$ เป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าภายในเนื้อวัสดุไดอิเล็กทริกและไม่ขึ้นกับกลไกโพลาริเซชัน เทอมนี้จะปรากฏในขณะทำการป้อนแรงดันให้กับวัสดุจนวนเท่านั้นซึ่งสัมพันธ์กับกระแสการนำไฟฟ้า (Conduction current ; $I_{Conduction}$) ของวัสดุ

เทอมที่สอง คือ เทอมของ $\varepsilon_\infty \delta(t)$ เป็นเทอมที่ไม่สามารถทำการบันทึกได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากเป็นย่านที่ขนาดของกระแสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เทอมนี้จะเกิดกลไกโพลาริเซชันที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดอย่างรวดเร็ว เช่น อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน เป็นต้น

เทอมที่สาม คือ เทอมของฟังก์ชันการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกในวัฏจักรเวลา $f(t)$ เป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกลไกโพลาริเซชันเกือบทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กทริกยกเว้นกลไกโพลาริเซชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในเทอมที่สอง เทอมนี้จะมีผลสัมพันธ์กับกระแสคาปาซิทีฟ (Capacitive current ; $I_{Capacitive}$) เป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุภายในวัสดุไดอิเล็กทริกและจะลดลงในทันทีทันใดและกระแสดูดซับ (Absorption current ; $I_{Absorption}$) เป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากกลไกโพลาริเซชันภายในวัสดุไดอิเล็กทริก

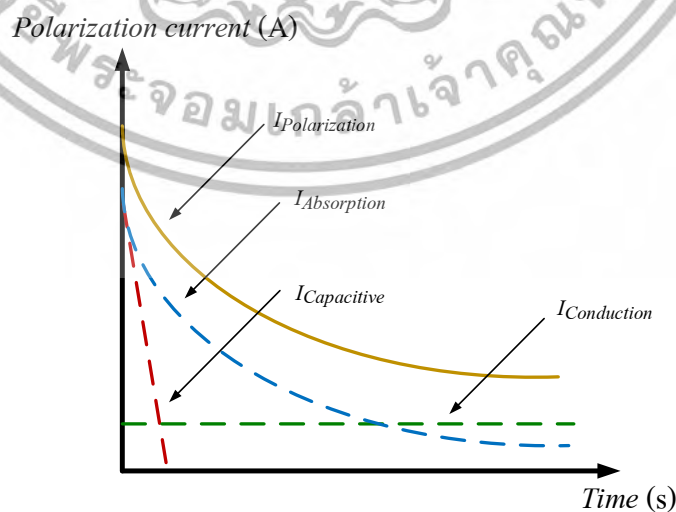
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 การเกิดกระแสโพลาร์ไรเซชันจากสามเทอมองค์ประกอบ

กระแสโพลาร์ไรเซชันที่วัดได้ในช่วงท้ายของเวลาที่ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุไดอิเล็กทริกจะเริ่มมีค่ากระแสลดลงน้อยมากหรือเทียบเท่าเป็นค่าคงที่เนื่องจากเป็นผลของค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง (DC conductivity ; σ_0) จนเกิดกระแสการนำไฟฟ้า (Conduction current ; $I_{Conduction}$) จากการเกิดการความนำไฟฟ้าของวัสดุเป็นการตอบสนองแบบสถานะคงตัว (Steady state response) กระแสการนำไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ 2.34 กระแสโพลาร์ไรเซชันและองค์ประกอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.24

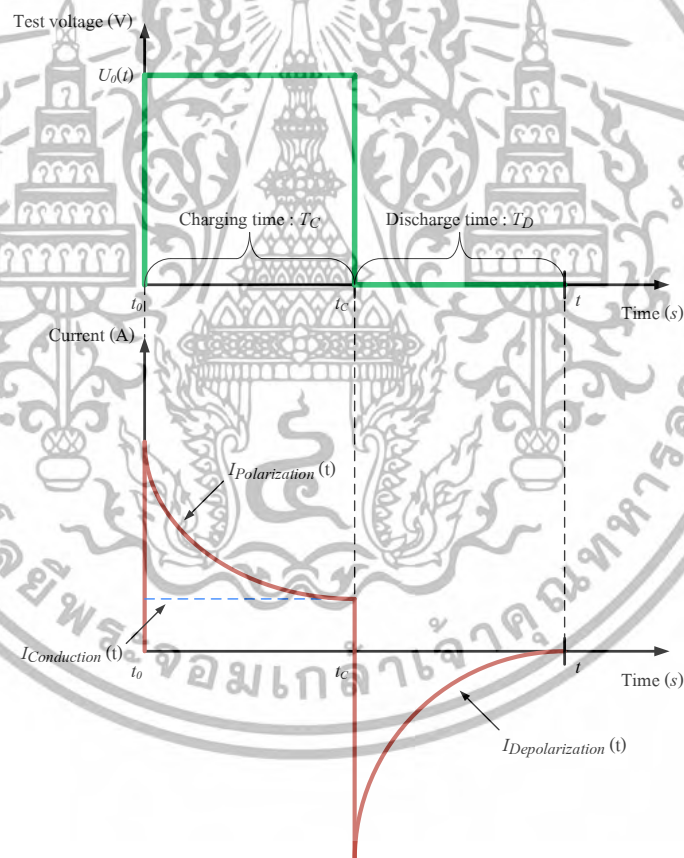
$$I_{Conduction} = \frac{U_0}{R_0} \tag{2.34}$$



รูปที่ 2.24 กระแสโพลาร์ไรเซชันและองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเข้าสู่ช่วงของการตอบสนองแบบสภาวะคงตัวของกระแสโพลาริเซชันช่วงเวลาของการป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มต้น (t_0) จนถึงเวลาสุดท้ายของการป้อนแรงดันไฟฟ้า (t_c) คือช่วงระยะเวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบรูปขั้น (Charging time ; T_c) จากนั้นทำการลัดวงจรหรือลดแรงดันไฟฟ้าอย่างทันทีทันใดเพื่อให้สนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ณ เวลา $t = t_c$ ประจุที่อยู่ภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะเริ่มการดิสชาร์จหรือเข้าสู่กระบวนการผ่อนคลายจนเข้าสู่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้าที่เวลาสุดท้ายของการดิสชาร์จ (t) คือช่วงระยะเวลาการดิสชาร์จ (Discharge time ; T_D) การเคลื่อนตัวของประจุดังกล่าวจะเกิดเป็นกระแสโพลาริเซชัน ในทางทฤษฎีกระแสดังกล่าวจะมีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับกระแสโพลาริเซชันถ้าวัสดุไดอิเล็กทริกมีความจุไฟฟ้าแบบอุดมคติแต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากการเกิดกลไกโพลาริเซชันและความสูญเสียอื่นๆในเนื้อวัสดุซึ่งทำให้เนื้อของวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดความเสื่อมสภาพกระแสโพลาริเซชันจึงมีค่าไม่เท่ากับกระแสโพลาริเซชัน รูปคลื่นกระแสโพลาริเซชันและกระแสโพลาริเซชันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 รูปคลื่นของแรงดันทดสอบแบบขั้น กระแสโพลาริเซชัน และ กระแสดีโพลาริเซชัน

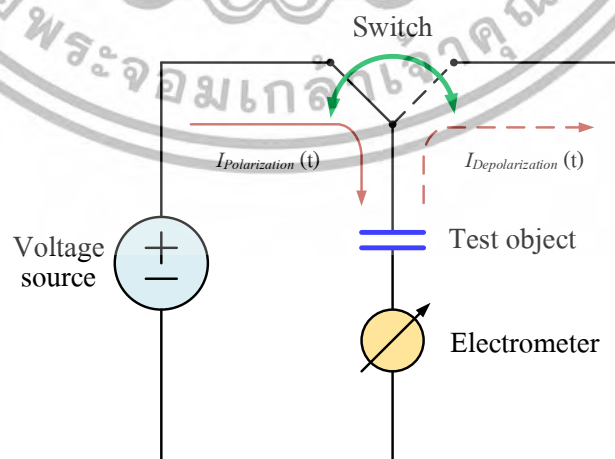
เมื่อ U_0 คือแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ป้อนให้กับวัสดุไดอิเล็กทริก ณ เวลา $t = t_0$ และลดลงอย่างทันทีทันใดจนมีค่าเท่ากับศูนย์ที่เวลา $t = t_c$ รูปคลื่นแรงดันทดสอบจึงมีลักษณะเป็นขั้น ในช่วงเวลา $t_0 - t_c$ แสดงถึงการป้อนแรงดันไฟฟ้าและกระแสโพลาริเซชันมีค่าเป็นบวก ช่วงเวลาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t_c - t$ แสดงถึงแรงดันทดสอบที่มีค่าเป็นศูนย์และกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันมีค่าเป็นลบ กระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.35

$$I_{\text{Depolarization}}(t) = -C_0 U_0 [f(t) - f(t + T_c)] \quad (2.35)$$

จากสมการที่ 2.35 $f(t)$ คือฟังก์ชันการตอบสนองไดอิเล็กทริกของกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันในวัฏจักรเวลาในช่วงเวลา $t_0 - t_c$ และ $-f(t + T_c)$ คือฟังก์ชันการตอบสนองไดอิเล็กทริกของกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันในวัฏจักรเวลา ณ ช่วงเวลา $t_c - t$ ระยะของเวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ (T_c) จะต้องเพียงพอสำหรับกระบวนการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุอย่างสมบูรณ์โดยกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชัน $f(t)$ ซึ่งจะไม่เกี่ยวข้องกับผลของค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงภายในวัสดุ อย่างไรก็ตามถ้าระยะเวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบไม่เพียงพอฟังก์ชันการตอบสนองไดอิเล็กทริกของกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชัน $-f(t + T_c)$ จะมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากผลของการเกิดกระบวนการโพลาไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ (Memory effect) ในวัสดุไดอิเล็กทริก

ผลการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกในวัฏจักรเวลาจากกระบวนการโพลาไรเซชันในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน ปัจจุบันได้นำหลักการดังกล่าวมาใช้สำหรับการวัดกระบวนการโพลาไรเซชันหรือเรียกว่าการทดสอบด้วยการวัดกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and depolarization current measurement ; PDC measurement) กับวัสดุไดอิเล็กทริกหรือฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อประเมินถึงสภาพของฉนวนสำหรับดำเนินการวางแผนการซ่อมบำรุง วงจรสมมูลการวัดกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 วงจรสมมูลการวัดกระแสไฟฟ้าโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การตอบสนองของไดอิเล็กทริกในวัฏจักรความถี่

คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นการเกิดกลไกโพลาริเซชันดังสมการที่ 2.28 และ ผลการตอบสนองในวัฏจักรเวลาดังสมการที่ 2.29 สามารถแปลงผลลัพธ์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปของวัฏจักรความถี่ได้โดยการใช้วิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) หรือการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier transform) ของผลรวมความหนาแน่นของกระแสที่มีฟังก์ชันผลการตอบสนองไดอิเล็กทริก และผลตอบสนองที่เป็นแบบขึ้นของแรงดันทดสอบของกระบวนการโพลาริเซชันในวัฏจักรเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (2.36)

$$J(t) = \sigma_0 E(t) + \epsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \quad (2.36)$$

จากสมการที่ 2.36 สามารถแปลงเป็นวัฏจักรความถี่โดยแทน t ด้วย p และสามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ของลาปลาซโอเปอเรเตอร์ (Laplace operator) หรือ P ในเทอมสุดท้ายของสมการที่ติดอยู่ในรูปของคอนโวลูชันได้ดังสมการที่ 2.37

$$J(p) = \sigma_0 E(p) + \epsilon_0 p E(p) + \epsilon_0 p F(p) E(p) \quad (2.37)$$

โดยที่ p คือความถี่เชิงซ้อน (Complex frequency ; $j\omega$) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.38

$$J(\omega) = E(\omega) [\sigma_0 + j\omega \epsilon_0 (1 + F(\omega))] \quad (2.38)$$

โดยที่ $F(\omega)$ คือ การแปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกหรือความสามารถตอบสนองเชิงซ้อน (Complex susceptibility ; $\chi(\omega)$)

$$\chi(\omega) = F(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) \quad (2.39)$$

$$= \int_0^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (2.40)$$

ความถี่ช่วงของการอินทริกัล $0 \leq \omega \leq \infty$ สามารถรวมสมการ (2.38) และ (2.40) เขียนเป็นผลรวมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 2.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J(\omega) = \{\sigma_0 + \varepsilon_0 \omega \chi''(\omega) + j\omega \varepsilon_0 [1 + \chi'(\omega)]\} E(\omega) \quad (2.41)$$

จากสมการที่ 2.22 กระแสการกระจัดที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าเมื่อพิจารณาค่าเปอร์มิตติวิตีที่ซับซ้อน (Complex dielectric permittivity) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.42

$$D(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon(\omega) E(\omega) \quad (2.42)$$

โดยที่

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = (1 + \chi'(\omega)) - j\chi''(\omega) \quad (2.43)$$

จากสมการที่ 2.40 แสดงให้เห็นค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้เกิดค่ากระแสการนำไฟฟ้า (σ_0) และค่าความสูญเสียของไดอิเล็กทริก $\chi''(\omega)$ ไม่มีผลลัพธ์ที่แตกต่างจากการวัดจริง ผลลัพธ์จากการวัดจากสมการที่ 2.42 และ 2.43 สามารถนำมาอธิบายเพื่อให้สอดคล้องกับผลการวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพันธ์ของไดอิเล็กทริก ($\varepsilon_r(\omega)$) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$J(\omega) = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega) E(\omega) \quad (2.44)$$

ดังนั้น

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) \quad (2.45)$$

$$= \varepsilon_r'(\omega) - j \left(\varepsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right) \quad (2.46)$$

$$= 1 + \chi'(\omega) - j \left(\chi''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) \quad (2.47)$$

ค่าตัวประกอบความสูญเสียของไดอิเล็กทริกแสดงได้ดังสมการที่ 2.48

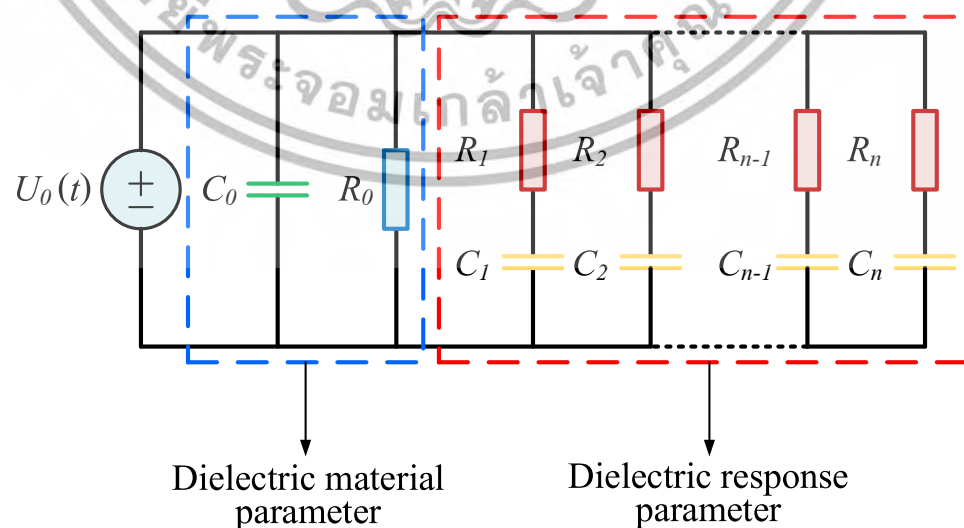
$$\text{Tan } \delta(\omega) = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} = \frac{\varepsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \varepsilon_0 \omega}{\varepsilon_r'(\omega)} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกในวัฏจักรความถี่เป็นไปได้อย่างยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากเป็นย่านความถี่ที่ใช้สำหรับการวัดผลลัพธ์มีช่วงกว้างและโดยปกติจะใช้วิธีการวัดค่าอัตราส่วนความจุไฟฟ้า (C ratio measurement) และตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกหรือ $\tan \delta$ ที่เพียงความถี่พลังงานความถี่เดียวเท่านั้น ซึ่งจากสมการที่ 2.47 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก ส่วนจินตภาพแสดงค่าความสูญเสียซึ่งอยู่ในรูปวัฏจักรความถี่และจะไม่พบข้อแตกต่างถ้าทำการวัดเพียงแค่ความถี่พลังงาน ดังนั้นจึงต้องมีการวัดที่ความถี่อื่นๆเพื่อให้เห็นถึงสภาวะการเสื่อมอายุของวัสดุไดอิเล็กทริกหรือฉนวนไฟฟ้า ในปัจจุบันยังมีการทดสอบการวัดผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกในวัฏจักรความถี่ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

2.4 แบบจำลองไดอิเล็กทริก

การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในวัสดุไดอิเล็กทริกหรือฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นการวัดการตอบสนองไดอิเล็กทริกในวัฏจักรเวลา เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบกระแสตรงรูปคลื่นไฟฟ้าแสดงเป็นรูปขั้นจากการป้อนแบบทันทีทันใด กระแสไฟฟ้าเมื่อไหลผ่านเนื้อวัสดุจะเกิดกลไกโพลาริเซชันขึ้นภายในโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กทริก กลไกดังกล่าวทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของประจุภายในโมเลกุลจนเกิดเป็นกระแสโพลาริเซชันและเมื่อนำแหล่งจ่ายป้อนแรงดันไฟฟ้าออกอย่างทันทีทันใดจะรับรู้คลื่นแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นที่กลับฝั่ง จากการเอาแหล่งจ่ายออกประจุไฟฟ้าภายในโมเลกุลจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการคายตัวการเคลื่อนตัวของประจุดังกล่าวจะเกิดเป็นกระแสดีโพลาริเซชัน ประจุจะเริ่มคลายตัวจนเข้าสู่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้ากระแสดีโพลาริเซชันจะมีค่าเป็นศูนย์ จากผลลัพธ์การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันดังกล่าวสามารถนำมาเขียนเป็นแบบจำลองวัสดุไดอิเล็กทริกในรูปแบบวงจรมูลทางไฟฟ้าตามทฤษฎีของเดอไบน์ (The extended Debye's model) [37] ได้ดังรูปที่ 2.27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.27 วงจรมูลแบบจำลองวัสดุไดอิเล็กทริกใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิงจากรูปที่ 2.27 แบบจำลองดังกล่าวจะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุระชาคณิต (C_0) ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกมีค่าเปอร์มิตติวิตีที่สภาวะสุญญากาศสามารถวัดค่าได้ที่ความถี่พลังงานหรือที่ความถี่สูงของการเริ่มต้นป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบจนเกิดกลไกโพลาริเซชันแบบอเล็กทรอนิกส์ ค่าความต้านทานของวัสดุไดอิเล็กทริก (R_0) เป็นค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการนำไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากช่วงเวลาท้ายๆของกระแสโพลาริเซชันที่กระแสมีการลดลงอย่างคงที่ เนื่องจากเป็นผลขององค์ประกอบกระแสการนำไฟฟ้า และองค์ประกอบ $R_i C_i$ ซึ่งต่ออนุกรมกันในลักษณะแบบกึ่งเป็นตัวแทนของการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นภายในซึ่งมีค่าคงที่เวลาการตอบสนองเฉพาะแต่ละกึ่งนั้นๆ การสร้างแบบจำลองวัสดุไดอิเล็กทริกดังกล่าวเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์สภาวะของฉนวนไฟฟ้านั้นจะใช้ข้อมูลของกระแสโพลาริเซชันซึ่งเป็นตัวแทนผลการตอบสนองของกระบวนการคลายตัวของประจุไฟฟ้าในโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กทริกอย่างแท้จริงเนื่องจากกระแสโพลาริเซชันมีองค์ประกอบของกระแสสามเทอมดังสมการที่ 2.33 ซึ่งอาจจะทำให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีผลจากปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้องและทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำลดลง สามารถเขียนสมการของกระแสโพลาริเซชันสำหรับการสร้างแบบจำลองวัสดุไดอิเล็กทริกได้ดังสมการที่ 2.49

$$I_{Depolarization}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp\left(-\frac{t_c}{\tau_i}\right) \quad (2.49)$$

โดยค่าคงที่เวลาการตอบสนองของกึ่ง $R_i C_i$ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.50

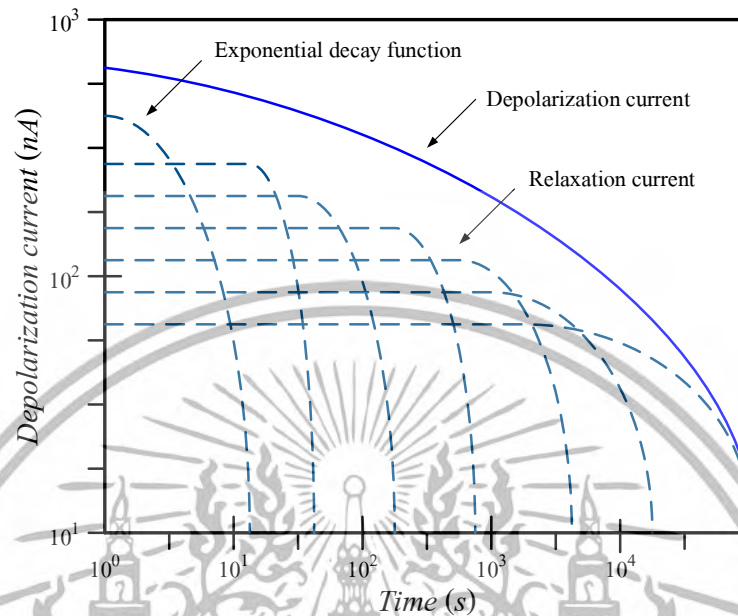
$$\tau_i = R_i C_i \quad (2.50)$$

$$A_i = \frac{U_0}{R_i} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t_c}{\tau_i}\right) \right\} \quad \text{เมื่อ } i = 1, \dots, n \quad (2.51)$$

โดยที่ A_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential coefficient) ของกระแสโพลาริเซชันและ τ_i คือค่าคงที่เวลาการตอบสนองขององค์ประกอบ $R_i C_i$ ในแต่ละกึ่ง ผลรวมของการตอบสนองของกึ่ง $R_i C_i$ ภายในแบบจำลองที่คูณกับค่าสัมประสิทธิ์การเก็บพลังงานซึ่งจะมีลักษณะเป็นแบบการสลายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential decay) ได้ผลลัพธ์คือกระแสผ่อนคลาย (Relaxation current) ที่เกิดจากกระบวนการผ่อนคลายแต่ละกึ่งขององค์ประกอบ $R_i C_i$ ซึ่งผลรวมของกระแสดังกล่าวคือกระแสโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองวัสดุไดอิเล็กทริก ตัวอย่างของกระแสโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นจากผลรวมของกระแสผ่อนคลายจากผลการตอบสนองของกึ่ง $R_i C_i$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในแบบจำลองที่มีค่าคงที่เวลาการตอบสนองแตกต่างกันในฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 45 MVA [38] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การแสดงกระแสผ่อนคลายที่มีค่าคงที่เวลาการตอบสนองแตกต่างกันและกระแสดีโพลารีเซชันที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 45 MVA

จากสมการที่ 2.44 สามารถนำมาพิจารณาในรูปของวัฏจักรความถี่ ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบกระแสไฟฟ้าสลับที่เกิดจากการวัดได้ดังสมการที่

$$I(\omega) = j\omega C(\omega)U(\omega) \quad (2.52)$$

เมื่อ $C(\omega)$ คือค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex capacitance) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์โดยอ้างอิงจากสมการที่ 2.45 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.53

ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน :

$$C(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) \quad (2.53)$$

$$= C_0 \left\{ \epsilon_r'(\omega) - j \left(\epsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \right) \right\} \quad (2.54)$$

โดยที่ $C'(\omega)$ คือ ส่วนจริงแสดงค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็น $C''(\omega)$ คือ ส่วนจินตภาพแสดงค่าความสูญเสียจากการนำไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนสามารถแสดงในรูปของแอดมิตแตนซ์เชิงซ้อน (Complex admittance) ได้ดังสมการที่ 2.55

$$C(\omega) = \frac{Y(\omega)}{j\omega} = C_0 + \frac{1}{j\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + j\omega R_i C_i} \quad (2.55)$$

ความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนส่วนจริงและส่วนจินตภาพสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้
ความจุไฟฟ้าส่วนจริง

$$C'(\omega) = C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (2.56)$$

ความจุไฟฟ้าส่วนจินตภาพ

$$C''(\omega) = \frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (2.57)$$

จากสมการที่ 2.48 สามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบความสูญเสียหรือ $\tan \delta(\omega)$ ในรูปของอัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนได้ดังสมการที่ 2.58

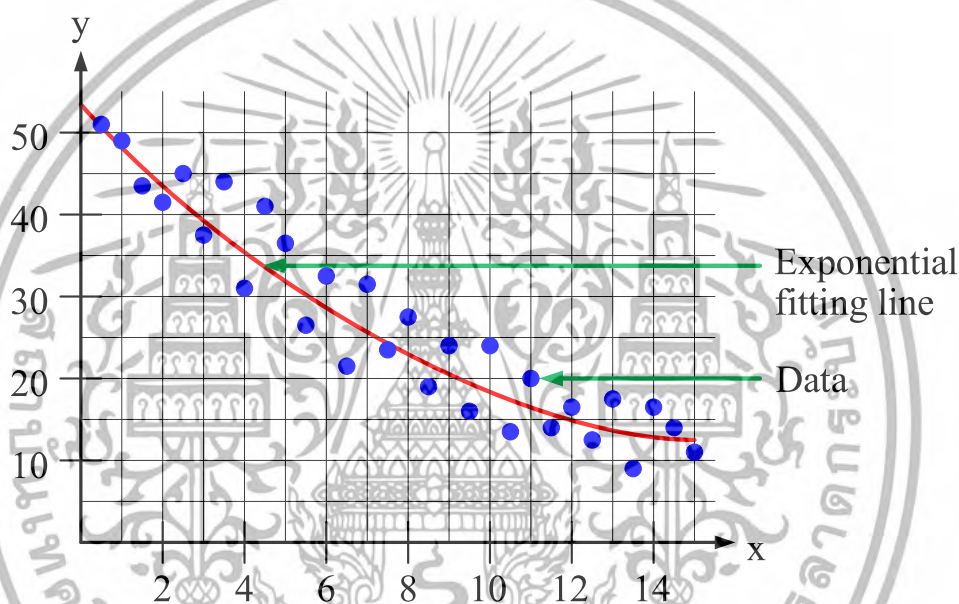
$$\tan \delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} = \frac{\frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2}}{C_0 + \frac{1}{j\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + j\omega R_i C_i}} \quad (2.58)$$

2.5 วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับพัฒนาแบบจำลองไดโอิเล็กทริก

การพัฒนาแบบจำลองไดโอิเล็กทริกซึ่งเป็นตัวแทนของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำจำเป็นต้องทราบถึงองค์ประกอบของแบบจำลองไดโอิเล็กทริกที่แน่นอนหรือใกล้เคียงกับสถานะของฉนวนไฟฟ้าที่ทำการทดสอบในเวลานั้นเพื่อเป็นแนวทางสำคัญสำหรับการวิเคราะห์และประเมินถึงคุณภาพของฉนวนไฟฟ้า โดยต้องอาศัยการประยุกต์ทักษะความแม่นยำในการทดสอบและเก็บข้อมูลในทางปฏิบัติที่บริเวณภาคสนามของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงรวมถึงวิธีการแปลผลลัพธ์ของข้อมูลที่เก็บมาเป็นองค์ประกอบของแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำ และมีความผิดพลาดน้อยที่สุด วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาแปลผลลัพธ์เพื่อหาองค์ประกอบของแบบจำลองไดโอิเล็กทริกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอหลักการกราฟที่เหมาะสม (Curve fitting) และวิธีวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) [39-43] มาไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การหากราฟที่เหมาะสม

การหากราฟที่เหมาะสมคือกระบวนการสร้างเส้นกราฟหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลมากที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Constraint) การหากราฟที่เหมาะสมเป็นการประมาณค่าของชุดข้อมูลด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ลากผ่านชุดของข้อมูล การหากราฟที่เหมาะสมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้การหากราฟที่เหมาะสมแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และจะมีจะมีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ตัวอย่างกราฟที่เหมาะสมแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 กราฟที่เหมาะสมแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

2.5.2 การวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีการทางด้านสถิติ (Statistical method) สำหรับการศึกษารูปร่างความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่สองตัวขึ้นไป โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะประมาณหรือพยากรณ์ค่าของตัวแปรหนึ่งจากตัวแปรอื่นๆที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ โดยจะต้องมีการกำหนดหรือทราบค่าของตัวแปรอื่นๆล่วงหน้าซึ่งจะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณหรือเชิงคุณภาพก็ได้ในที่นี้ก็คือตัวแปรอิสระ (Independent variable) หรือตัวแปรควบคุมได้ (Controlled variable) หรือตัวแปรทำนาย (Predictor variable) ทั้งหมดสามารถเรียกได้เป็นตัวแปรต้นใช้สัญลักษณ์ X เพื่อให้ทราบค่าของอีกตัวแปรหนึ่งที่ประมาณหรือพยากรณ์ไว้ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ก็คือตัวแปรตอบสนอง (Response variable) หรือตัวแปรกระทบ (Effect variable) หรือตัวแปรตาม (Dependent variable) ใช้สัญลักษณ์ Y ถ้า X และ Y มีความสัมพันธ์กันมากแสดงว่าถ้า X มีค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อค่าของ Y เป็นอย่างมาก แต่ถ้า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย แสดงว่าถ้า X มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อค่า Y ค่อนข้างน้อย การหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y นั้น ขั้นแรกคือต้องนำข้อมูลของตัวแปรทั้งสองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ซึ่งเรียกว่าแผนภาพการกระจาย (Scatter diagram) จากแผนภาพการกระจายที่ได้ ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองอาจอยู่ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งเช่น เส้นตรง (Linear model) พาราโบลา (Parabola model) เอ็กซีโพเนนเชียล (Exponential model) และ เลขชี้กำลัง (Polynomial model) เป็นต้น

การวิเคราะห์การถดถอยมีหลายชนิดขึ้นกับลักษณะของตัวแปร รูปแบบความสัมพันธ์ และการกำหนดตัวแปรต้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression analysis) สำหรับการหากระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันที่คำนวณจากองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก หลักการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นมีรายละเอียดดังนี้

2.5.2.1 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น

การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นเป็นการวิเคราะห์การถดถอยโดยที่ตัวแปรอิสระส่วนใหญ่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ส่วนตัวแปรตามจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเช่นกัน ตัวแปรต้นและตัวแปรตามจะต้องมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นตรงและค่าของตัวแปรตามขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรต้น รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามสามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น สามารถแบ่งการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นได้ตามจำนวนของตัวแปร ได้แก่ การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression) และ การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression)

2.5.2.1.1 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นอย่างง่าย

การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นอย่างง่ายเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวที่มีความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2.59

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i ; i = 1, \dots, N \quad (2.59)$$

โดยที่	X_i	คือ	ตัวแปรอิสระ
	Y_i	คือ	ผลลัพธ์หรือตัวแปรตาม
	β_0	คือ	ระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงจุดตัดบนแกน Y (Y – intercept) หรือค่าของ Y เมื่อ X มีค่าเป็นศูนย์
	β_1	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนไปหนึ่งหน่วยหรือความชัน (Slope) ของเส้นตรงเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) โดยอาจจะมีค่าเป็นบวก ลบ หรือ ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ควรวางไว้สำหรับความคลาดเคลื่อนเชิงสุ่ม (Random error) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของค่า β_1

1. $\beta_1 > 0$ หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน คือถ้า X เพิ่มขึ้น Y จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้า X ลดลง Y ก็จะลดลงด้วยเช่นกัน
2. $\beta_1 < 0$ หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม คือถ้า X เพิ่มขึ้น Y จะลดลง แต่ถ้า X ลดลง Y ก็จะเพิ่มขึ้น
3. β_1 มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย
4. β_1 มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันมาก
5. β_1 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 และ 0.7 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันปานกลาง
6. $\beta_1 = 0$ หมายถึง X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กันเลย

2.5.2.1.1 การประมาณค่าองค์ประกอบของสมการ

ถดถอยอย่างง่าย

จากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ถ้าพิจารณาแล้วพบว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้นจะต้องหาค่า β_0 และ β_1 ซึ่งจะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยแค่ไหน ในทางสถิติการหาค่า β_0 และ β_1 นั้นจะต้องทราบค่า X และ Y ทุกค่าซึ่งถ้าข้อมูลมีจำนวนมากจะใช้การสุ่มตัวอย่างขนาด n จากจำนวนข้อมูลทั้งหมด N เพื่อประมาณค่า β_0 และ β_1 ค่าประมาณของ Y สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.60 และ 2.61

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i \quad (2.60)$$

หรือ

$$\hat{Y}_i = a + bX_i ; i = 1, 2, \dots, n \quad (2.61)$$

โดยที่ $\hat{\beta}_0 = a$ และ $\hat{\beta}_1 = b$

การประมาณค่า β_0 ด้วย a และประมาณค่า β_1 ด้วย b นั้น เพื่อให้ส่วนเหลือ (Residual) ในการประมาณค่า Y_i ด้วย \hat{Y}_i มีค่าต่ำที่สุด ผลบวกกำลังสองของส่วนเหลือ (Residual sum of square) บ่อยครั้งเรียกว่าผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum square of the error) เขียนแทนด้วย SSE วิธีการประมาณค่าองค์ประกอบนี้เรียกว่าวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่า a และ b ที่ทำให้ผลบวกกำลังสองของส่วนเหลือที่ค่าน้อยที่สุดหรือเป็นการหาค่า a

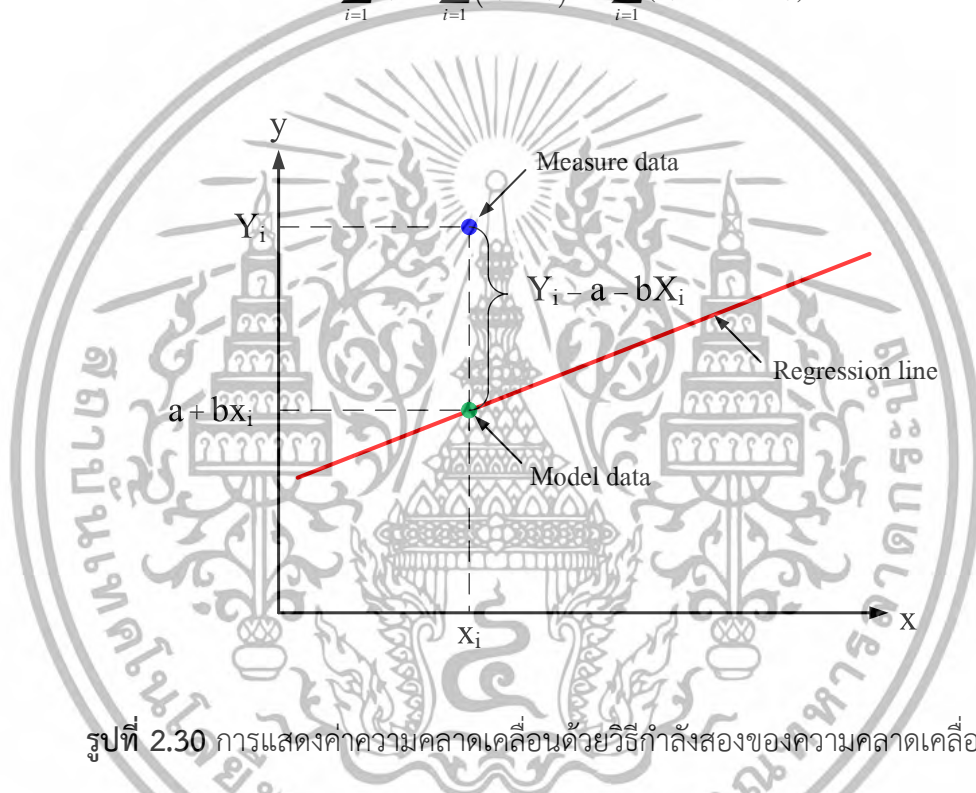
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ b ที่ทำให้ $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$ มีค่าน้อยที่สุด จากสมการเชิงเส้นในสมการ 2.59 และสมการการประมาณเชิงเส้นในสมการ 2.61 สามารถแสดงสมการความคลาดเคลื่อนได้ดังสมการที่ 2.62

$$(2.59) - (2.61) : \quad \varepsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (2.62)$$

จากสมการที่ 2.62 สามารถหาผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนได้ดังสมการที่ 2.63

$$SSE = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)^2 \quad (2.63)$$



รูปที่ 2.30 การแสดงค่าความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

สามารถแก้สมการเพื่อหาค่า a และ b ได้โดยการใช้อนุพันธ์บางส่วน (Partial derivative) กับสมการที่ 2.63 เทียบกับ a และ b ให้เท่ากับศูนย์

จากสมการที่ 2.63 อนุพันธ์บางส่วนเทียบกับ a

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\partial a} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)^2}{\partial a} = 0$$

$$-2 \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=1}^n Y_i - an - b \sum_{i=1}^n X_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i = an + b \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.64)$$

จากสมการที่ 2.63 อนุพันธ์บางส่วนเทียบกับ b

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\partial b} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)^2}{\partial b} = 0$$

$$-2 \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)(X_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i - a \sum_{i=1}^n X_i - b \sum_{i=1}^n X_i^2 = 0$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (2.65)$$

จากสมการที่ (2.64) และ (2.65) สามารถแก้หาค่า a และ b ได้ดังนี้

$$(2.64) \times \sum_{i=1}^n X_i \quad ; \quad an \sum_{i=1}^n X_i + b \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 = \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i \quad (2.66)$$

$$(2.65) \times n \quad ; \quad an \sum_{i=1}^n X_i + bn \sum_{i=1}^n X_i^2 = n \sum_{i=1}^n X_i Y_i \quad (2.67)$$

$$(2.67) - (2.66) \quad ; \quad bn \sum_{i=1}^n X_i^2 - b \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 = n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$b \left\{ n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right\} = n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i \quad (2.68)$$

จากสมการที่ 2.68 จัดรูปเพื่อหาค่า b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2}{n}}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \bar{X}^2}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

จากสมการที่ 2.66 จัดรูปเพื่อหาค่า a

$$an = \sum_{i=1}^n Y_i - b \sum_{i=1}^n X_i$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} - b \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$= \bar{Y} - b \bar{X}$$

สามารถสรุปได้ว่า

$$a = \hat{\beta}_0 = \bar{Y} - b \bar{X} \quad (2.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = \hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2} = \frac{S^2_{XY}}{S^2_{XX}} \quad (2.70)$$

โดยที่

$$S^2_{XX} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2$$

$$S^2_{YY} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}{n} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2$$

$$S^2_{XY} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$

2.5.2.1.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ

การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระจำนวน k ตัวกับตัวแปรตาม โดยที่มีความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น ตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเพียงอย่างเดียวหรือมีทั้งตัวแปรเชิงปริมาณและตัวแปรเชิงคุณภาพ ในกรณีที่ตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพต้องทำให้เป็นตัวแปรหุ่น (Dummy variable) ส่วนตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเท่านั้น เชิงเส้นอย่างง่ายเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวที่มีความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2.61

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon_i \quad ; \quad i = 1, \dots, N \quad (2.71)$$

โดยที่ X_1, X_2, \dots, X_k คือ ตัวแปรอิสระ
 Y_i คือ ผลลัพธ์หรือตัวแปรตาม
 β_0 คือ ระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงจุดตัดบนแกน Y หรือค่าของ Y
 $X_1 = X_2 = \dots = X_k$ มีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$	คือ	สัมประสิทธิ์การถดถอยบางส่วน (Partial regression coefficient) แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X_i เปลี่ยนไปหนึ่งหน่วยโดยที่ตัวแปรอิสระอื่น ๆ มีค่าคงที่
ε_i	คือ	ความคลาดเคลื่อนเชิงสุ่ม (Random error)

2.5.2.1.2.1 การประมาณค่าองค์ประกอบของสมการ

ถดถอยแบบพหุคูณ

จากสมการถดถอยพหุคูณ ซึ่งมีองค์ประกอบ $k + 1$ ตัว คือ จากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ถ้าพิจารณาแล้วพบว่า X และ Y มี $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ การประมาณค่า $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ จะต้องใช้ข้อมูลตัวอย่างของ ตัวแปร Y, X_1, X_2, \dots, X_k โดยใช้ตัวอย่างขนาด n ค่าประมาณของ Y สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.72 และ 2.73

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{i1} + \hat{\beta}_2 X_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k X_{ik} \quad (2.72)$$

หรือ

$$\hat{Y}_i = a + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_k X_{ik} \quad (2.73)$$

ความหมายของสัมประสิทธิ์การถดถอยพหุคูณบางส่วน

1. a คือ ระยะตัดแกน Y หรือคือค่าของ Y เมื่อกำหนดให้ $X_1 = X_2 = \dots = X_k = 0$
2. b_1 คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X_1 หมายถึงถ้า X_1 เพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยจะทำให้ Y เปลี่ยนแปลงไป b_1 หน่วย โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระอื่น ๆ คือ X_2, X_3, X_4 มีค่าคงที่
3. b_2 คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X_2 หมายถึงถ้า X_2 เพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยจะทำให้ Y เปลี่ยนแปลงไป b_2 หน่วย โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระอื่น ๆ คือ X_1, X_3, X_4 มีค่าคงที่

การประมาณค่า a, b_1, b_2, \dots, b_k ด้วย a, b_1, b_2, \dots, b_k เพื่อให้ผลบวกของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุดหรือวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า \hat{Y}_i ด้วย \hat{Y}_i

คือ $\varepsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i$ หา a, b_1, b_2, \dots, b_k ที่ทำให้ $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ มีค่าต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีที่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวไปในเรื่องของวัสดุไดอิเล็กทริก กลไกโพลาริเซชัน การตอบสนองไดอิเล็กทริก แบบจำลองไดอิเล็กทริก และ วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับพัฒนาแบบจำลองไดอิเล็กทริกซึ่งจะเป็นการนำทฤษฎีดังกล่าวมาใช้ในการประยุกต์การทดสอบสมมติฐาน และสร้างแบบจำลองไดอิเล็กทริกเพื่อบ่งบอกถึงสถานะของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งจะนำเสนอในบทถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

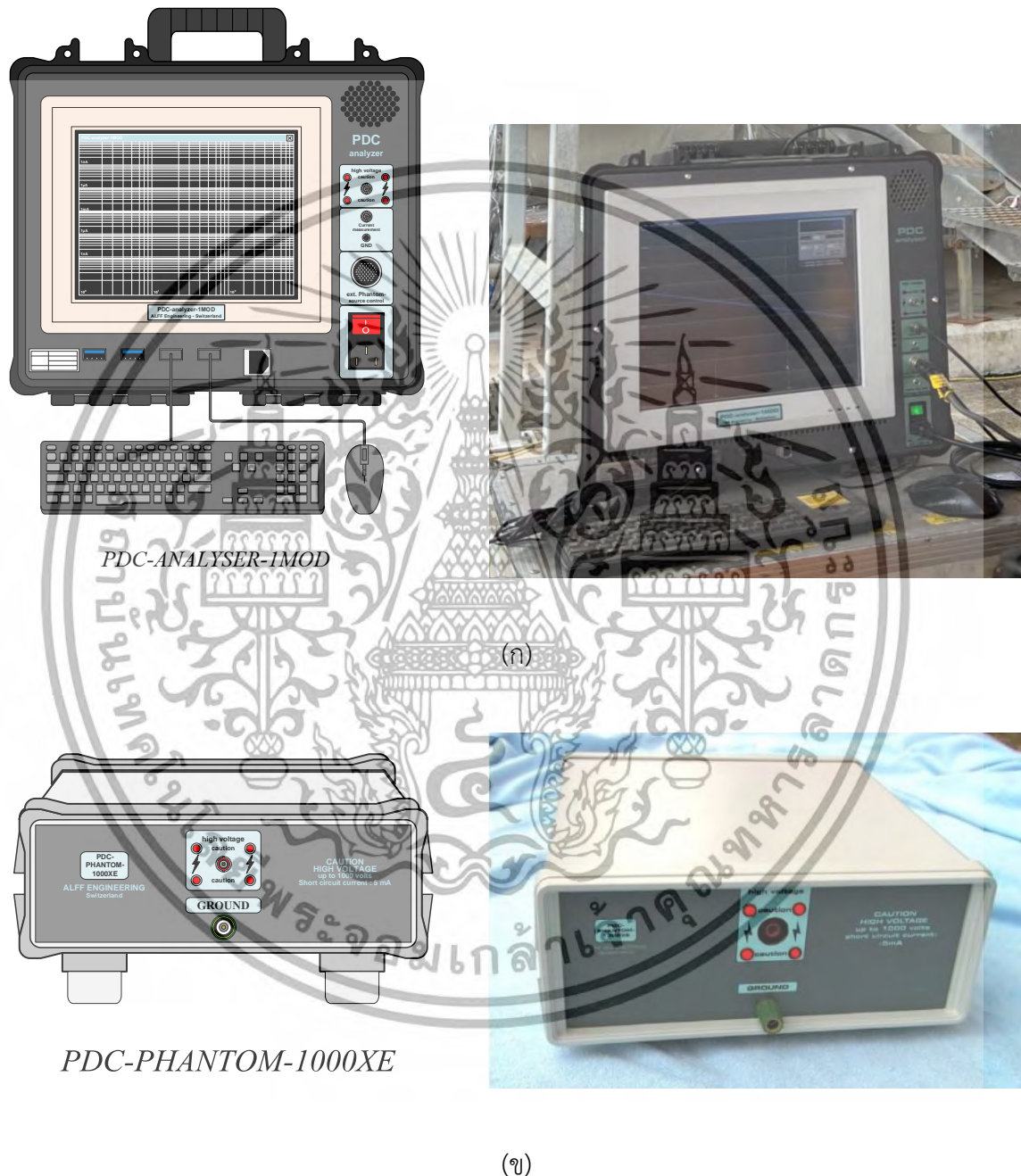
การหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก

บทที่สามของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกที่อ้างอิงตามหลักทฤษฎีของเดอไบน์ที่เป็นตัวแทนการแสดงถึงลักษณะของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในรูปแบบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของวัสดุไดอิเล็กทริกและองค์ประกอบการตอบสนองไดอิเล็กทริกของตัววัสดุ การหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกจะใช้ข้อมูลของกระแสดีโพลาร์ไรเซชันจากการทดสอบการวัดกระแสดีโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชันภายในเนื้อฉนวนซึ่งเป็นผลรวมของกระแสที่ดิสชาร์จภายในเนื้อฉนวนหรือเรียกว่ากระแสผ่อนคลายจากกระบวนการผ่อนคลายภายในวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่เวลาการตอบสนองเฉพาะ จากทฤษฎีของกระแสดีโพลาร์ไรเซชันซึ่งเป็นกระแสที่ไม่มีองค์ประกอบของกระแสดูดซับ กระแสการนำไฟฟ้า และ กระแสความจุไฟฟ้าหรือกระแสคาปาซิทีฟ เหมือนกระแสดีโพลาร์ไรเซชันทำให้สามารถหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นจากกลไกการเชื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าได้อย่างแท้จริง วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอสำหรับการหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกจะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบพหุเอ็กซ์โพเนนเชียลที่เป็นลักษณะเดียวกันกับการลดกระแสดีโพลาร์ไรเซชันโดยจะหาค่าที่เหมาะสมหรือฟิตในแต่ละช่วงเวลาการดิสชาร์จของกระแสดีโพลาร์ไรเซชันแล้วทำการหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นที่มีเงื่อนไขของวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุด โดยจะนำเสนอการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานและวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ ความถูกต้องของแบบจำลองไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ได้จากข้อมูลของกระแสดีโพลาร์ไรเซชันที่สอดคล้องกับค่ากระแสดีโพลาร์ไรเซชันที่วัดได้จากการทดสอบ ขั้นตอนของการหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกที่นำเสนอจะประกอบไปด้วย การเก็บข้อมูลด้วยการทดสอบการวัดกระแสดีโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชันบริเวณภาคสนาม และการนำข้อมูลของกระแสดีโพลาร์ไรเซชันมาหาค่าที่เหมาะสมเพื่อหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นที่มีเงื่อนไขของกำลังสองที่น้อยที่สุด

3.1 การเก็บข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการทดสอบการวัดกระแสดีโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชันภาคสนาม

การเก็บข้อมูลด้วยวิธีการทดสอบการวัดกระแสดีโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นเป็นส่วนสำคัญสำหรับการหาแบบจำลองไดอิเล็กทริกเนื่องจากต้องทำการเก็บข้อมูลที่มีความแม่นยำ (Accuracy) และเที่ยงตรง (Precision) เพื่อให้แบบจำลองไดอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและสอดคล้องกับกลไกการเชื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจริงกับฉนวนภายในอุปกรณ์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าแรงสูง สำหรับการเก็บข้อมูลภาคสนามจะใช้เครื่องมือวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของ ALFF Engineering ชื่อรหัสเครื่อง PDC—ANALYSER—1MOD [44] สำหรับการเก็บข้อมูล และอุปกรณ์แหล่งจ่ายเพิ่มเติมชื่อรหัสเครื่อง PDC—Phantom—1000XE [45] ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



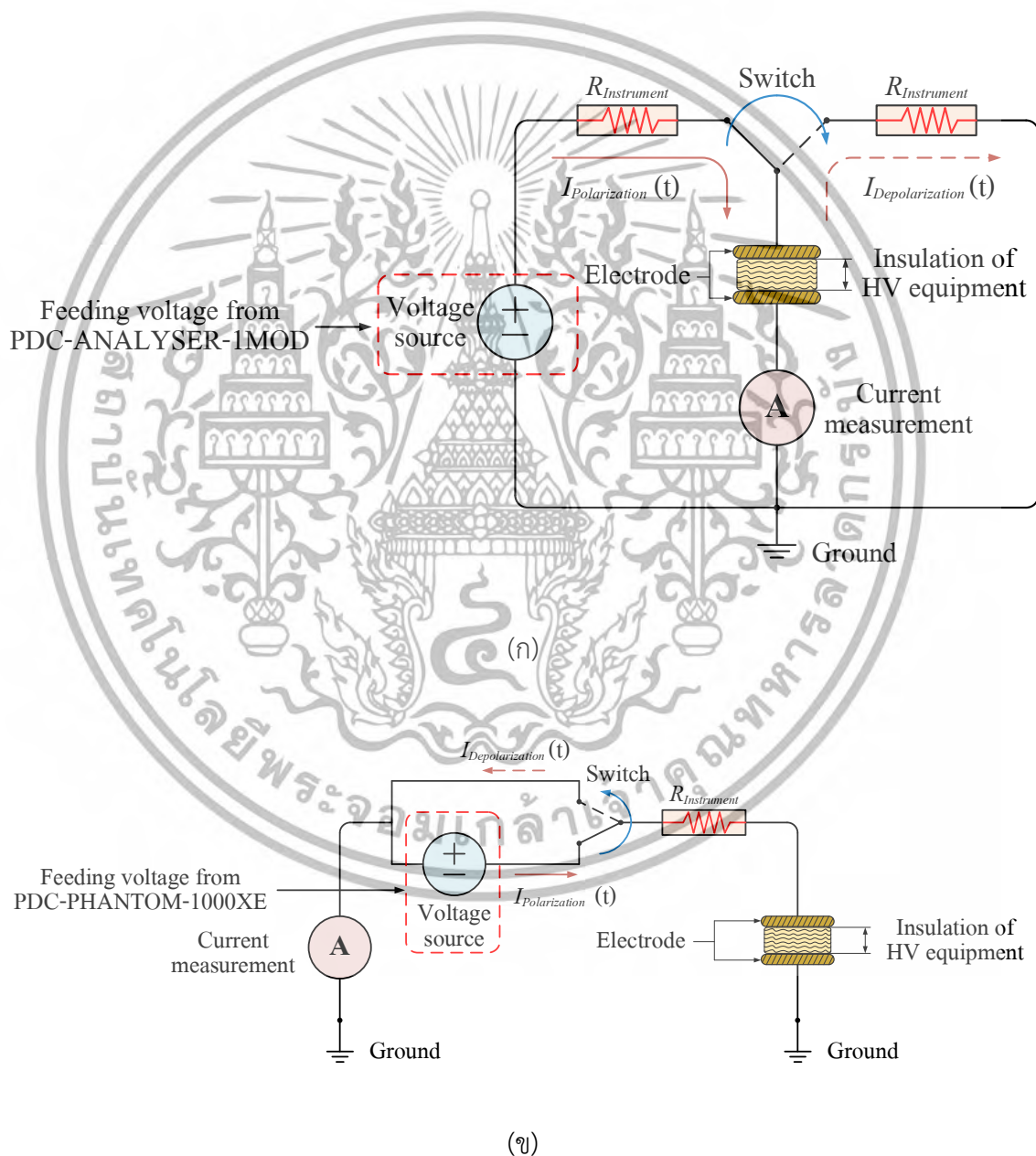
รูปที่ 3.1 เครื่องมือสำหรับการเก็บข้อมูลภาคสนาม ก) เครื่องมือวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน รหัสเครื่อง PDC—ANALYSER—1MOD และ ข) อุปกรณ์แหล่งจ่ายเพิ่มเติม รหัสเครื่อง

PDC—Phantom—1000XE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 วงจรการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

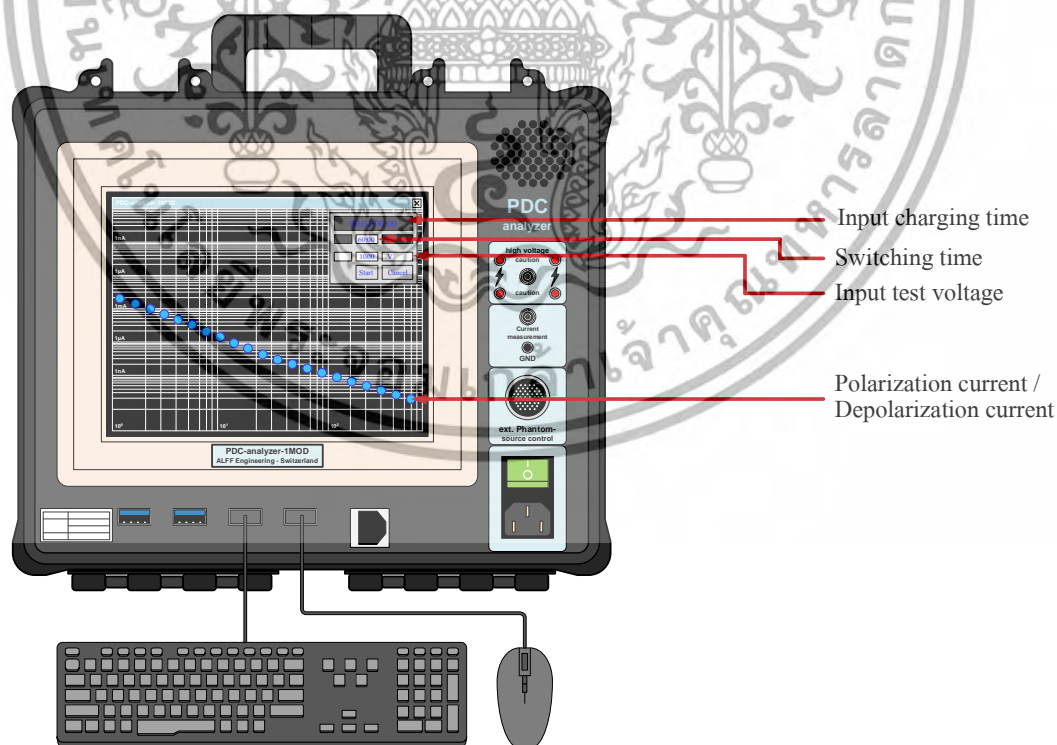
วงจรการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงสามารถแบ่งได้เป็นสองวงจรทดสอบตามรูปแบบการต่อวัดฉนวนไฟฟ้าได้แก่วงจรทดสอบการวัดฉนวนกับกราวด์ (Phase to ground) โดยฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะต่อโครงลงกราวด์ และวงจรทดสอบการวัดฉนวนระหว่างเฟส (Phase to phase) โดยฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะไม่ได้ต่อกราวด์โดยวงจรทดสอบจะใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริมเพิ่มเติมสำหรับการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ วงจรทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ก) วงจรทดสอบการวัดฉนวนกับกราวด์ และ ข) วงจรทดสอบการวัดฉนวนระหว่างเฟส
 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

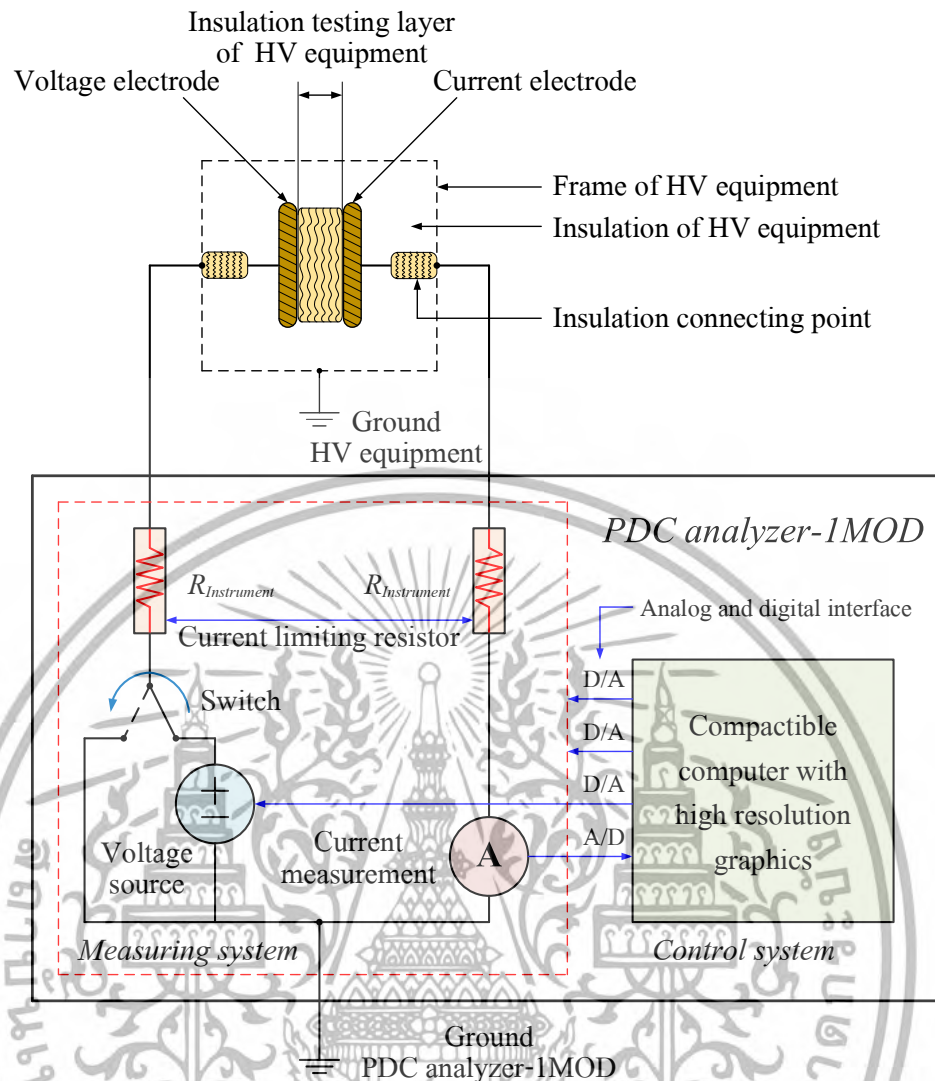
3.1.2 เทคนิคการวัดของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD

เทคนิคการวัดหรือวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD จะเป็นการทำงานของอิเล็กโทรดสองฝั่ง (Two active electrodes) โดยมีเนื้อฉนวนไฟฟ้าที่ต้องการทำการทดสอบอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดสองฝั่ง โดยฉนวนไฟฟ้าดังกล่าวต้องเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีความจุไฟฟ้า อิเล็กโทรดสองฝั่งสามารถแบ่งได้เป็นอิเล็กโทรดหนึ่งฝั่งเป็นอิเล็กโทรดกระตุ้นหรืออิเล็กโทรดสำหรับป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ และอิเล็กโทรดอีกหนึ่งฝั่งเป็นอิเล็กโทรดตรวจจับหรืออิเล็กโทรดสำหรับการลัดวงจรเพื่อให้กระแสที่เกิดขึ้นไหลไปสู่ฝั่งกราวด์ที่มีแอมป์มิเตอร์ความไวสูงวัดกระแสที่ไหลผ่าน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของเครื่องมือทดสอบ โดยปกติแล้วกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันจะมีขนาดกระแสที่เล็กและค่ากระแสที่ได้จากการทดสอบของฉนวนไฟฟ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะมีช่วงกว้างที่ต่างกันอย่างหลายสิบเท่า การวัดกระแสขนาดเล็กนี้ทำได้ยากขึ้นหากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีการช้อนทับที่เกิดจากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูงประเภทมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบริเวณใกล้เคียงรวมถึงการเกิดกระแสชั่วครู่ (Transient current) ขึ้นเมื่อเดินเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าหรือเครื่องป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบครั้งแรกในการใช้งาน รูปจำลองการทำงานของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 การทำงานการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของเครื่องมือทดสอบ

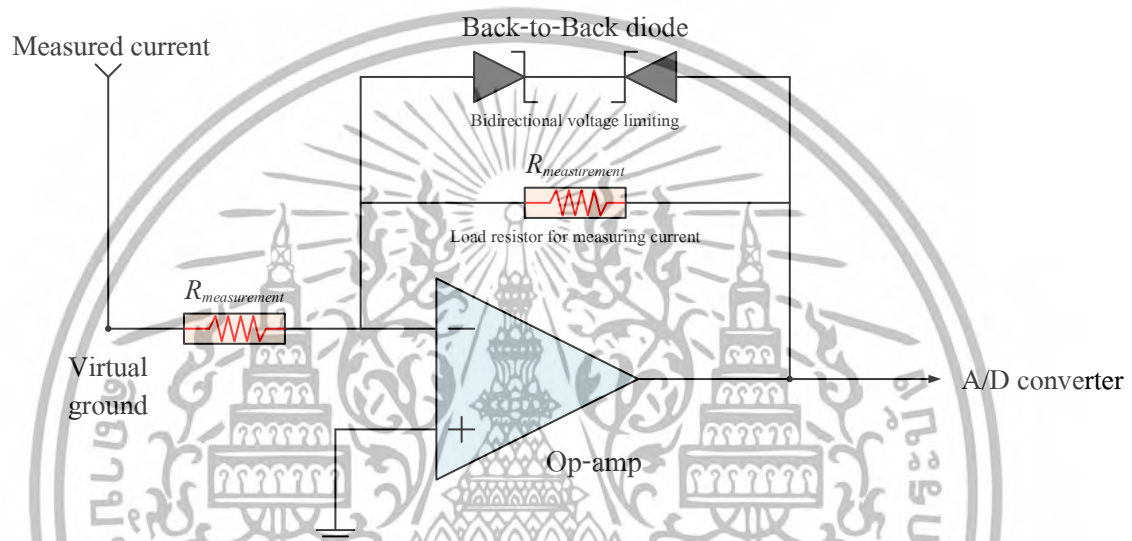
PDC—ANALYSER—1MOD ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การจำลองวงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสโพลาริเซชันของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD

หลักการดำเนินงานพื้นฐานของแอมป์มิเตอร์ภายในเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD จะประกอบไปด้วยออปแอมป์ (Operational amplifier ; Op-amp) ที่มีหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าที่จุดกราวด์เสมือน (Virtual ground) ให้มีค่าเป็นศูนย์โวลต์ ฉะนั้นอิมพีแดนซ์ของแอมป์มิเตอร์จะมีค่าน้อยมากหรือเทียบเท่ากับศูนย์โอห์ม (รวมถึงอิมพีแดนซ์จำกัดกระแส) การวัดกระแสในช่วงหลักพิโคแอมป์จนถึงมิลลิแอมป์และป้องกันกระแสเกิน 100 มิลลิแอมป์หรือมากกว่าจำเป็นต้องใช้ออปแอมป์ที่จำกัดกระแสขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและอุณหภูมิน้อยกว่า 1 พิโคแอมป์ความต่างของแรงดันออฟเซต (Offset) ขาเข้าต่ำและความสามารถในการส่งกระแสออกไม่น้อยกว่า 100 มิลลิแอมป์ การจำกัดแรงดันแบบสองทิศทาง (The bi-directional voltage limiting) ด้วยการต่อไดโอดแบบแบ็คทูแบ็ค (Back to back diode) จำเป็นต้องใช้วงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์แบบพิเศษเพื่อให้สามารถทำการวัดกระแสต่ำที่มีความช่วงกว้างของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาสูง สำหรับการแปลงผลลัพธ์หรือส่งข้อมูลจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to digital converter) จะใช้ค่าความต้านทานสำหรับการวัดกระแส (Measurement resistor) ในช่วง 10 กิโลโอห์มถึง 10 กิกะโอห์มเพื่อเป็นกำลังขยายของวงจรให้มีแรงดันขาออกสูงสุด สำหรับการใช้มิเตอร์ควรมีช่วงกระแสไฟฟ้า ± 1 มิลลิแอมป์ที่มีความละเอียดประมาณ 0.5% ของค่าที่วัดค่าได้ ความคลาดเคลื่อนสูงสุดและความละเอียดขั้นต่ำควรมีค่ามากกว่า 1 พิโคแอมป์ อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้คือ $1:10^9$ วงจรของออปแอมป์ภายในของวงจรแอมป์มิเตอร์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD แสดงได้ดังรูปที่ 3.5

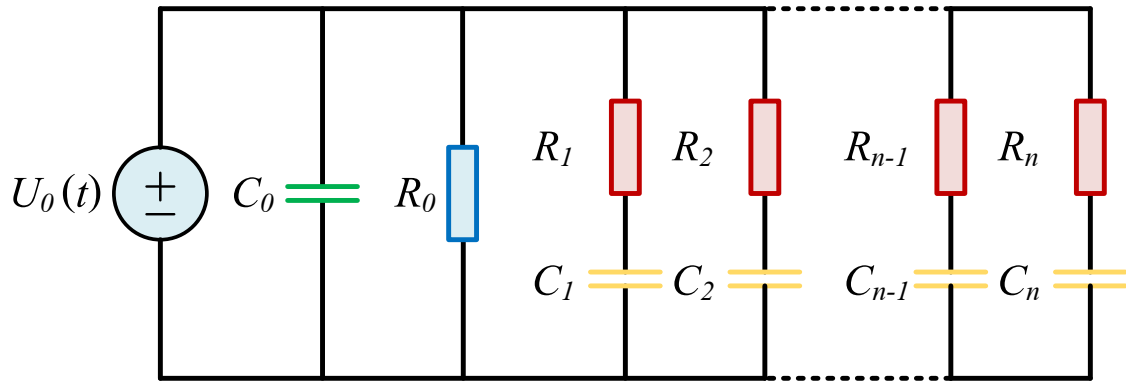


รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของออปแอมป์ภายในของวงจรแอมป์มิเตอร์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD

3.1.3 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD

นอกจากการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD เครื่องมือทดสอบยังประกอบไปด้วยโปรแกรมหรือซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ (Commercial software) [46] ภายในเครื่องมือทดสอบสำหรับการหาค่าประกอบแบบจำลองไดโอดเล็กทริกด้วยการใช้หลักการของการหากราฟที่เหมาะสมของข้อมูลกระแสโพลาริเซชันหรือกระแสตีโพลาริเซชันที่ได้ทำการบันทึกไว้หลังจากการทดสอบและแสดงเป็นองค์ประกอบของแบบจำลองไดโอดเล็กทริกขึ้นมา องค์ประกอบของแบบจำลองไดโอดเล็กทริกที่สำคัญแสดงเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 องค์ประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก

การหาองค์ประกอบของวงจรไดโอดีเล็กทริกจากวงจรสมมูลจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่เป็นการตอบสนองของวัสดุไดโอดีเล็กทริกที่มีค่าคงที่เวลาการตอบสนองแบบเฉพาะในลักษณะกึ่งของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุไฟฟ้าต่อกันประกอบกันเป็นแบบวงจรรอบปิด กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของกึ่งตัวต้านทานและตัวเก็บประจุไฟฟ้าจากการดิสชาร์จประจุเนื่องจากกระบวนการผ่อนคลายจะมีลักษณะแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ผลรวมของกระแสจากการดิสชาร์จดังกล่าวรวมกันได้เป็นกระแสผลลัพธ์หรือกระแสดีโพลาร์ไรเซชัน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.1

$$i_{depol}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (3.1)$$

โดยค่าคงที่เวลาการตอบสนองของกึ่ง $R_i C_i$ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

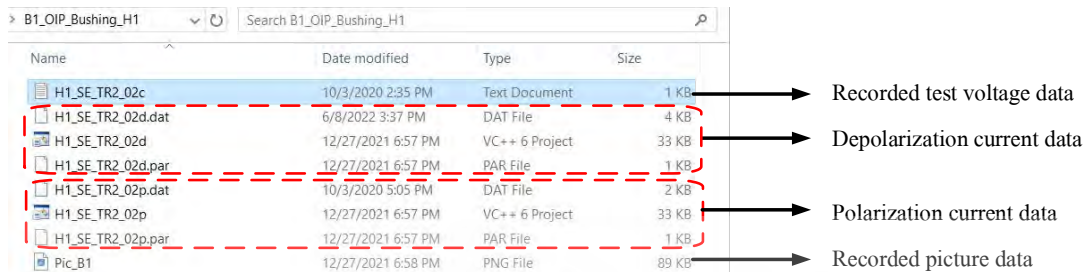
$$\tau_i = R_i C_i \quad (3.2)$$

$$A_i = \frac{U_0}{R_i} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right\} \quad \text{เมื่อ } i = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

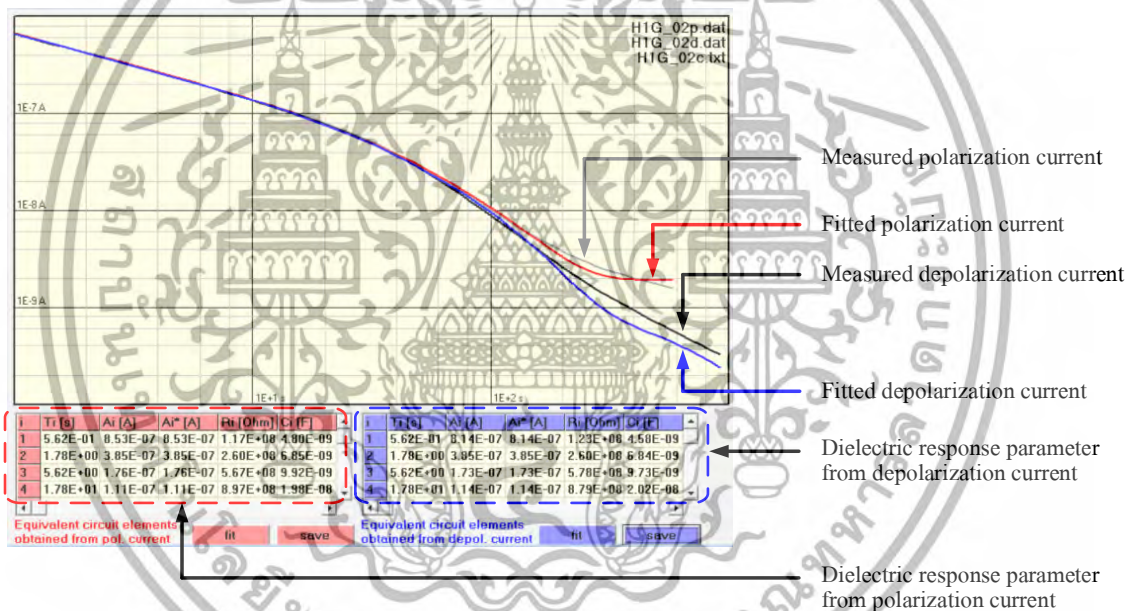
โดยที่ A_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential coefficient) ของกระแสดีโพลาร์ไรเซชันและ τ_i คือค่าคงที่เวลาการตอบสนองขององค์ประกอบ $R_i C_i$ ในแต่ละกึ่ง โดยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบจะใช้หลักการของกราฟที่เหมาะสมหากกราฟที่เหมาะสมแต่ละช่วงของกระแสดีโพลาร์ไรเซชันด้วยสมการที่ 3.1 แล้วคำนวณหาเป็นองค์ประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริกออกมาเช่น A_i , τ_i , R_i และ C_i ตัวอย่างของข้อมูลกระแสดีโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชันที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกภายในเครื่องมือทดสอบและการหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 ข้อมูลของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่บันทึกในเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD



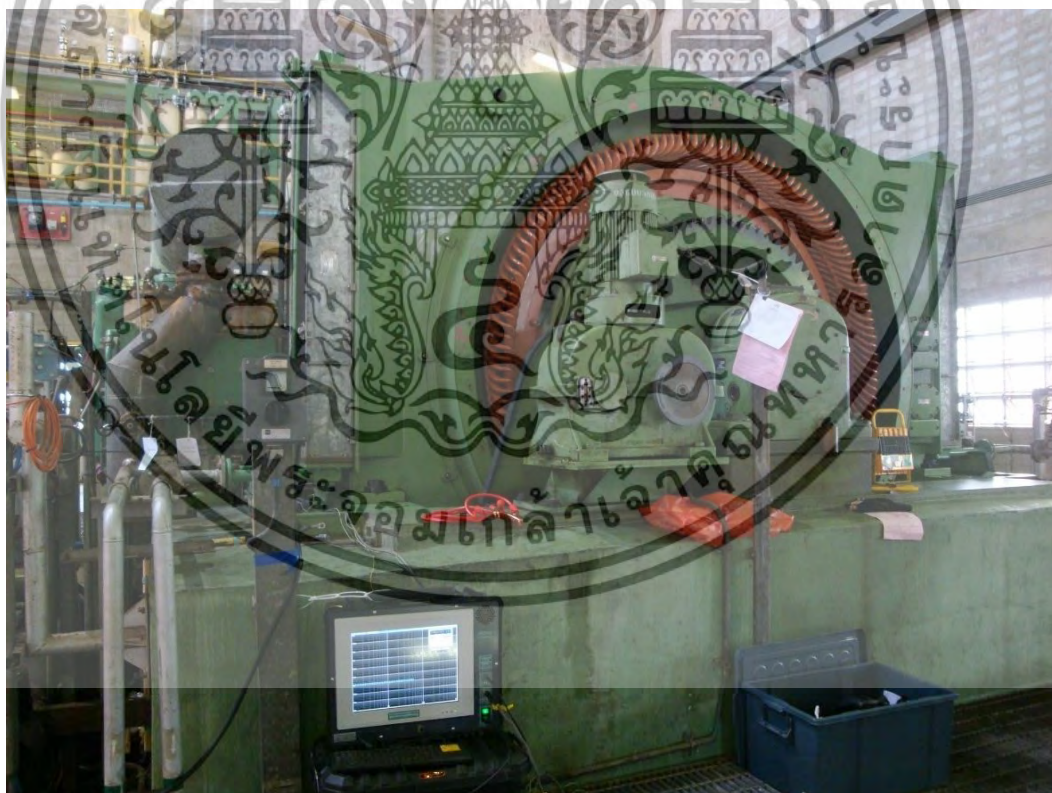
รูปที่ 3.8 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD

ตัวอย่างการเก็บข้อมูลการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันภาคสนามของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆด้วยเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.9 การเก็บข้อมูลการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันภาคสนามของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆด้วยเครื่องมือทดสอบ PDC-ANALYSER-1MOD ก) สายเคเบิลแรงดันสูง ข) มอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง ค) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง และ ง) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์

หลังจากการเก็บข้อมูลจากการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงบริเวณภาคสนามและจากทฤษฎีของกระแสดีโพลาริเซชันที่เป็นผลรวมของกระแสผ่อนคลายจากการคลายประจุภายในฉนวนไฟฟ้าขององค์ประกอบแบบกึ่งที่อนุกรมกันของตัวต้านทานและประจุไฟฟ้าซึ่งมีค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่เฉพาะของแต่ละกึ่ง กระแสผ่อนคลายดังกล่าวมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential coefficient) หรือ A_i ที่สอดคล้องกับค่าคงที่เวลาการตอบสนองหรือ τ_i ของกึ่งที่อนุกรมกันของตัวต้านทานและประจุไฟฟ้าอ้างอิงจากทฤษฎีแบบจำลองไดอิเล็กทริก

ขั้นตอนถัดไปคือการหาค่าประกอบดังกล่าวของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยข้อมูลของกระแสดีโพลาริเซชันที่เก็บจากการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันซึ่งเป็นผลรวมของกระแสผ่อนคลายที่มีรูปแบบเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์พื้นฐานเริ่มต้นด้วยการหากราฟที่เหมาะสมแบบพหุเอ็กซ์โพเนนเชียล (Multi-exponential fitting) ที่เป็นลักษณะเดียวกันกับการลดลงกระแสดีโพลาริเซชันด้วยสมการที่ 3.1 แล้วทำการหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) ที่มีเงื่อนไขของวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least square method) โดยจะนำเสนอการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน (Ordinary linear least square) และวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ (Percentage linear least square) [47]

3.2.1 การหาค่าประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน

การหาค่าประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานนั้นจะใช้วิธีการพื้นฐานของการหากราฟที่เหมาะสมแบบพหุเอ็กซ์โพเนนเชียลของกระแสดีโพลาริเซชัน โดยเริ่มต้นจะทำการกำหนดค่าคงที่เวลาการตอบสนองเริ่มต้น (Predetermination of time constants) โดยอ้างอิงจากข้อมูลของซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD ที่ทำการหาค่าประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริก ค่าคงที่เวลาการตอบสนองจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบอนุกรมเรขาคณิต (Geometric series) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยค่าคงที่เวลาการตอบสนองเริ่มต้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.4

$$\tau_i = (10^{0.25})^{i-2} \quad (3.4)$$

โดยที่ i คือ จำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

Computing time constant

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [Ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	9.43E-08	9.43E-08	5.30E+09	1.06E-10
2	1.78E+00	3.55E-08	3.55E-08	1.41E+10	1.26E-10
3	5.62E+00	1.85E-08	1.85E-08	2.71E+10	2.08E-10
4	1.78E+01	8.60E-09	8.60E-09	5.81E+10	3.06E-10

Equivalent circuit elements
obtained from depol. current

fit save

รูปที่ 3.10 ค่าคงที่เวลาการตอบสนองจากการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์เครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD

เมื่อทราบค่าคงที่เวลาการตอบสนองเริ่มต้นและค่าคงที่เวลาการตอบสนองลำดับถัดๆไปคือ 0.5623 1 1.7783 3.1623 5.6234 10 ... และ τ_n ต่อมาคือการเลือกช่วงของค่าคงที่เวลาการตอบสนอง $\tau_1 \tau_2 \tau_3 \dots$ และ τ_n โดยจะเลือกให้ครอบคลุมกับช่วงของระยะเวลาการบันทึกกระแสไฟฟ้าไรเซชันทั้งหมด โดยที่ n เป็นจำนวนเต็มบวกและค่าคงที่เวลาตอบสนองลำดับ τ_n มีค่ามากกว่าช่วงเวลาการบันทึกกระแสไฟฟ้าไรเซชัน ตัวอย่างการแสดงผลการเลือกช่วงค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่ครอบคลุมกับเวลาการบันทึกกระแสไฟฟ้าไรเซชันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11

Time (s)	i_A (A)
40	3.3100E+01 7.3200E-09
41	3.6300E+01 6.8700E-09
42	3.9800E+01 6.4500E-09
43	4.3700E+01 6.0400E-09
44	4.7900E+01 5.6600E-09
45	5.2500E+01 5.3000E-09
46	5.7500E+01 4.9600E-09
47	6.3100E+01 4.6300E-09
48	6.9200E+01 4.3200E-09
49	7.5900E+01 4.0300E-09
50	8.3200E+01 3.7500E-09
51	9.1200E+01 3.4800E-09
52	1.0000E+02 3.2300E-09
53	1.1000E+02 2.9900E-09
54	1.2000E+02 2.7700E-09
55	1.3200E+02 2.5600E-09
56	1.4500E+02 2.3600E-09
57	1.5900E+02 2.1700E-09
58	1.7400E+02 1.9900E-09
59	1.9100E+02 1.8300E-09
60	2.0900E+02 1.6700E-09
61	2.2900E+02 1.5200E-09
62	2.5100E+02 1.3800E-09
63	2.7500E+02 1.2500E-09
64	3.0200E+02 1.1300E-09
65	3.3100E+02 1.0100E-09
66	3.6300E+02 9.0700E-10

ข้อมูลการบันทึกกระแสไฟฟ้าไรเซชัน

เวลาสุดท้ายของการบันทึกกระแสไฟฟ้าไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา(ก)เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	<code>clear all;</code>	
2	<code>close all;</code>	
4	<code>load("Bldata.mat");</code>	การนำเข้าข้อมูลกระแสไฟฟ้าโรเซชันและเวลาที่บันทึก
6	<code>r=10^0.25;</code>	การสร้างค่าคงที่เวลาการตอบสนอง มีค่า 1.7783
8	<code>tau=[1 r r^2 r^3];</code>	การสร้างลำดับของค่าคงที่เวลาการตอบสนอง มีค่า 1, 1.7783, 3.16234, 5.6234
10	<code>tau1=[1/r tau 10*tau 100*tau 1000*tau];</code>	การสร้างค่าคงที่เวลาการตอบสนองในหน่วยอื่นๆ
12	<code>tau1=tau1(1:13);</code>	การเลือกค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่ครอบคลุมเวลาที่บันทึกข้อมูลกระแสไฟฟ้าโรเซชัน โดยที่ค่าคงที่เวลาการตอบสนองลำดับที่ 13 มีค่า 562.3413

(ข)

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการแสดงการเลือกช่วงค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่ครอบคลุมกับเวลาการบันทึกกระแสไฟฟ้าโรเซชัน ก) การเลือกช่วงของค่าคงที่เวลาการตอบสนอง และ ข) ลำดับการสร้างค่าคงที่เวลาการตอบสนองให้ครอบคลุมกับเวลาบันทึกกระแสไฟฟ้าโรเซชัน

ขั้นตอนต่อมาคือการหากราฟที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้าโรเซชันที่ทำการบันทึกจากการเก็บข้อมูลด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานโดยสมการที่ใช้หากราฟที่เหมาะสมหรือพีตจะใช้สมการของกระแสไฟฟ้าโรเซชันในสมการที่ 3.1 เพื่อหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล (A_1, A_2, A_3, \dots และ A_n)

$$i_{depol}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (3.1)$$

การหากราฟที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้าโรเซชันในรอบแรกของการพิชผลลัพท์ของค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลจะมีค่าบางส่วนที่ติดลบ ก่อนเริ่มการหากราฟที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้าโรเซชันในรอบถัดไปจะทำการตัดค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลที่ติดลบออกโดยการตัดค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลที่ติดลบออกแล้วหาผลลัพท์ค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลในรอบถัดไป ทำกระบวนการนี้วนซ้ำต่อไปจนกว่าค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลจะไม่มีค่าติดลบ สามารถแสดงตัวอย่างขั้นตอนการหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลได้ดังรูปที่ 3.12

11	<code>tau1=tau1(1:13);</code>	การเลือกค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่ครอบคลุมเวลาที่บันทึกข้อมูลกระแสไฟฟ้าโรเซชัน
12	<code>alpha=1./tau1;</code>	การแปลงส่วนกลับค่าคงที่เวลาการตอบสนองหรือสัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน
14	<code>X=exp(-t*alpha);</code>	เทอมของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล
16	<code>A=X\id;</code>	ผลลัพท์ค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล

(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	Ai	Time constant (s)
2	1.1850E-07	0.562341325
3	-3.4200E-08	1
4	6.9209E-08	1.77827941
5	-2.9994E-08	3.16227766
6	4.7344E-08	5.623413252
7	-3.1733E-08	10
8	4.6888E-08	17.7827941
9	-5.1954E-08	31.6227766
10	8.4946E-08	56.23413252
11	-1.2202E-07	100
12	1.5297E-07	177.827941
13	-1.1720E-07	316.227766
14	4.0700E-08	562.3413252

ค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลที่คิดลบ
ที่สอดคล้องกับค่าคงที่เวลาการตอบสนอง

(ข)

```

19 tau2=[tau1(1) tau1(3) tau1(5) tau1(7) tau1(9) tau1(11) tau1(13)];
20
21 alpha=1./tau2;
22
23 X=exp(-t*alpha);
24
25 A=X*id;

```

การนำค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่ทำให้
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลคิดลบออก

สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน

เทอมของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล

ผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล

(ค)

1	Ai	Time constant (s)
2	9.4350E-08	0.562341325
3	3.5495E-08	1.77827941
4	1.8439E-08	5.623413252
5	8.6180E-09	17.7827941
6	5.1601E-09	56.23413252
7	2.4037E-09	177.827941
8	1.1459E-09	562.3413252

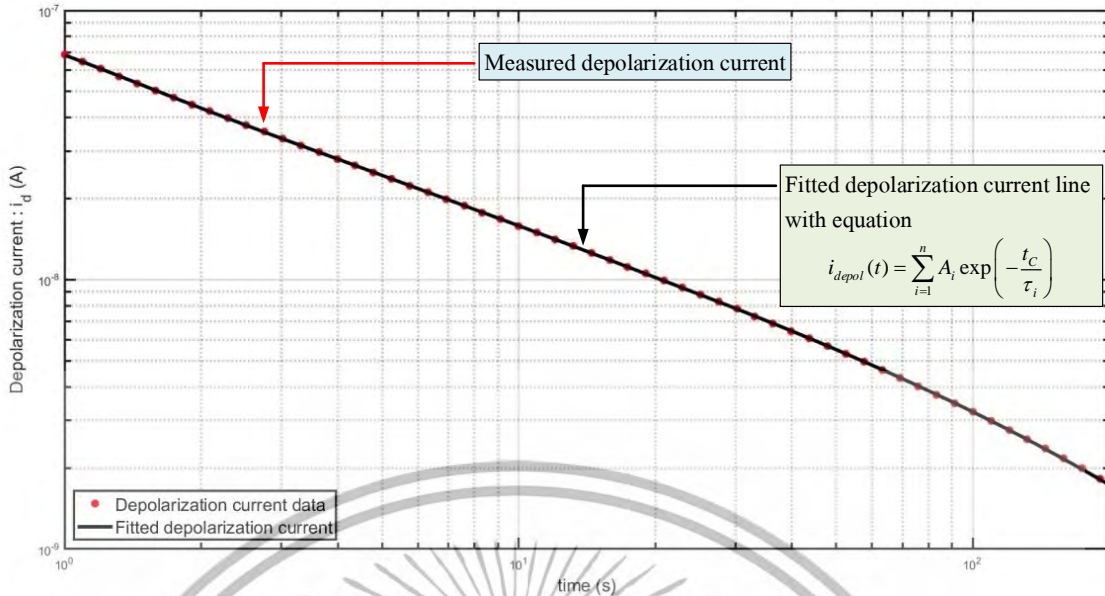
ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลและ
ค่าคงที่เวลาการตอบสนองในรอบสุดท้าย

รูปที่ 3.12 ลำดับการหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลของกระแสโพลาริเซชัน ก) การหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานรอบที่หนึ่ง ข) ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบที่หนึ่ง ค) การหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบที่สอง และ ง) ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบสุดท้าย

การแสดงกราฟที่เหมาะสมของกระแสโพลาริเซชันด้วยสมการที่ 3.1 สามารถ

แสดงได้ดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ผลลัพธ์กราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานเทียบกับกระแสดีโพลาริเซชันจากการวัด

หลังจากทราบค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล (A_i) ค่าคงที่เวลาตอบสนอง (τ_i) ระดับแรงดันไฟฟ้าทดสอบฉนวนไฟฟ้า (U_0) สามารถหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลาร์ทริก R_i และ C_i ได้จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

$$\tau_i = R_i C_i \tag{3.2}$$

$$A_i = \frac{U_0}{R_i} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t_c}{\tau_i}\right) \right\} \text{ เมื่อ } i = 1, \dots, n \tag{3.3}$$

ผลลัพธ์กราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันที่หาจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานที่นำมาประยุกต์ใช้สำหรับการหาแบบจำลองไดโพลาร์ทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นผลลัพธ์ส่วนใหญ่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่ากระแสดีโพลาริเซชันจากการวัดและกราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันจากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามผลลัพธ์กราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานและซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบจะมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่ากระแสจากการวัด ณ ช่วงเวลาท้ายของการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและช่วงที่มีค่ากระแสต่ำซึ่งทำให้ความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองไดโพลาร์ทริกของฉนวนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงลดลง การปรับปรุงวิธีการที่นำเสนอดังกล่าวเพื่อเพิ่มความถูกต้องและแม่นยำจะนำเสนอในหัวข้อย่อยถัดไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การหาค่าประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์

การหาค่าประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์นั้นจะใช้หลักการเดียวกันกับวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานโดยจะมีการปรับปรุงในเรื่องของการหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล หลักการของวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์คือวิธีการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นถ่วงน้ำหนัก (Weighted linear least square method) [48], [49] โดยเริ่มต้นจะทำการถ่วงน้ำหนักข้อมูลหรือคือการกลับส่วนของข้อมูลในที่นี้ข้อมูลที่สนใจในที่นี้จะทำการถ่วงน้ำหนักข้อมูลคือข้อมูลของกระแสดีโพลาริเซชันที่ทำการบันทึกเป็นลำดับ i th หรือก็คือ $(i_d(i))$ โดยจะแสดงสมการการถ่วงน้ำหนักของข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันได้ดังสมการที่ 3.5

$$w(i) = \frac{1}{i_d(i)} \quad (3.5)$$

เมื่อจัดรูปข้อมูลการถ่วงน้ำหนักของกระแสดีโพลาริเซชันแล้วขั้นตอนถัดมาคือการจัดรูปข้อมูลการถ่วงน้ำหนักดังกล่าวให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์แนวทแยงมุม (Diagonal matrix) [50] เพื่อให้ข้อมูลในเมทริกซ์สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลได้จากเมทริกซ์ของเทอมฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล เมทริกซ์ของเทอมฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลและการจัดรูปเมทริกซ์แนวทแยงมุมข้อมูลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.6 และ 3.7

$$[X] = \begin{bmatrix} e^{-\frac{t_0}{\tau_1}} & e^{-\frac{t_0}{\tau_2}} & e^{-\frac{t_0}{\tau_3}} & \dots & e^{-\frac{t_0}{\tau_{n-2}}} & e^{-\frac{t_0}{\tau_{n-1}}} & e^{-\frac{t_0}{\tau_n}} \\ e^{-\frac{t_1}{\tau_1}} & e^{-\frac{t_1}{\tau_2}} & e^{-\frac{t_1}{\tau_3}} & \dots & e^{-\frac{t_1}{\tau_{n-2}}} & e^{-\frac{t_1}{\tau_{n-1}}} & e^{-\frac{t_1}{\tau_n}} \\ e^{-\frac{t_2}{\tau_1}} & e^{-\frac{t_2}{\tau_2}} & e^{-\frac{t_2}{\tau_3}} & \dots & e^{-\frac{t_2}{\tau_{n-2}}} & e^{-\frac{t_2}{\tau_{n-1}}} & e^{-\frac{t_2}{\tau_n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{-\frac{t_{N-2}}{\tau_1}} & e^{-\frac{t_{N-2}}{\tau_2}} & e^{-\frac{t_{N-2}}{\tau_3}} & \dots & e^{-\frac{t_{N-2}}{\tau_{n-2}}} & e^{-\frac{t_{N-2}}{\tau_{n-1}}} & e^{-\frac{t_{N-2}}{\tau_n}} \\ e^{-\frac{t_{N-1}}{\tau_1}} & e^{-\frac{t_{N-1}}{\tau_2}} & e^{-\frac{t_{N-1}}{\tau_3}} & \dots & e^{-\frac{t_{N-1}}{\tau_{n-2}}} & e^{-\frac{t_{N-1}}{\tau_{n-1}}} & e^{-\frac{t_{N-1}}{\tau_n}} \\ e^{-\frac{t_N}{\tau_1}} & e^{-\frac{t_N}{\tau_2}} & e^{-\frac{t_N}{\tau_3}} & \dots & e^{-\frac{t_N}{\tau_{n-2}}} & e^{-\frac{t_N}{\tau_{n-1}}} & e^{-\frac{t_N}{\tau_n}} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[W] = \begin{bmatrix} 1/i_d(t_0) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/i_d(t_1) & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/i_d(t_2) & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1/i_d(t_{N-2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1/i_d(t_{N-1}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1/i_d(t_N) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.6 และ 3.7 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลได้ดังสมการที่ 3.8

$$\{A\} = ([X]^T [W]^2 [X])^{-1} [X]^T [W]^2 \{y\} \quad (3.8)$$

โดยที่ $[X]$ คือ เมทริกซ์ของเทอมฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล
 $[W]$ คือ เมทริกซ์แนวทแยงมุมข้อมูลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชัน
 $\{y\}$ คือ เวกเตอร์หลัก (Column vector) ข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชัน โดยที่

$$\{y\} = [i_d(t_0) \ i_d(t_1) \ i_d(t_2) \ \dots \ i_d(t_{N-1}) \ i_d(t_N)]^T$$

ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลของข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันจากวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบร้อยละสามารถแสดงได้ดังรูปสมการเมทริกซ์ที่ 3.9

$$\{A\} = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ \dots \ A_{n-1} \ A_n] \quad (3.9)$$

สามารถแสดงตัวอย่างขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลของข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันจากวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบร้อยละโดยจะอ้างอิงข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันจากวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานที่ได้นำเสนอไปแสดงดังรูปที่ 3.14

1	clear all;	
2	close all;	
3		
4	load("B1data.mat");	การนำเข้าข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันและเวลาที่บันทึก
5		
6	r=10^0.25;	การสร้างค่าคงที่เวลาการตอบสนอง มีค่า 1.7783
7		
8	tau=[1 r r^2 r^3];	การสร้างลำดับของค่าคงที่เวลาการตอบสนอง มีค่า 1, 1.7783, 3.16234, 5.6234
9		
10	tau1=[1/r tau 10*tau 100*tau 1000*tau];	การสร้างค่าคงที่เวลาตอบสนองในหน่วยอื่นๆ
11		
12	tau1=tau1(1:13);	การเลือกค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่ครอบคลุมเวลาที่บันทึกข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชัน
13		
14	alpha=1./tau1;	การแปลงส่วนกลับค่าคงที่เวลาการตอบสนองหรือสัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน
15		
16	X=exp(-t*alpha);	เทอมของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา(ก) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18	<code>weight=1./id;</code>	การถ่วงน้ำหนักข้อมูลกระแสดีโพลารเซชัน
19		
20	<code>D=diag(weight);</code>	การจัดรูปเมทริกซ์ทแยงมุมของข้อมูลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลกระแสดีโพลารเซชัน
21		
22	<code>A=(D*X)\(D*id);</code>	ผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล

(ข)

	A	B
1	Ai	Time constant (s)
2	9.9895E-08	0.562341325
3	-6.0410E-09	1
4	3.7590E-08	1.77827941
5	2.0667E-09	3.16227766
6	1.5482E-08	5.623413252
7	1.2994E-09	10
8	8.9769E-09	17.7827941
9	-1.7213E-09	31.6227766
10	9.6790E-09	56.23413252
11	-9.1423E-09	100
12	1.4778E-08	177.827941
13	-9.7561E-09	316.227766
14	4.4082E-09	562.3413252

ค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลที่ติดลบ ที่สอดคล้องกับค่าคงที่เวลาการตอบสนอง

(ค)

24	<code>tau2=[tau1(1) tau1(3:7) tau1(9) tau1(11) tau1(13)];</code>	การนำค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่ทำให้สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลติดลบออก
25		
26	<code>alpha=1./tau2;</code>	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน
27		
28	<code>X=exp(-t*alpha);</code>	เทอมของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล
29		
30	<code>weight=1./id;</code>	การถ่วงน้ำหนักข้อมูลกระแสดีโพลารเซชัน
31		
32	<code>D=diag(weight);</code>	การจัดรูปเมทริกซ์ทแยงมุมของข้อมูลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลกระแสดีโพลารเซชัน
33		
34	<code>A=(D*X)\(D*id);</code>	ผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล

(ง)

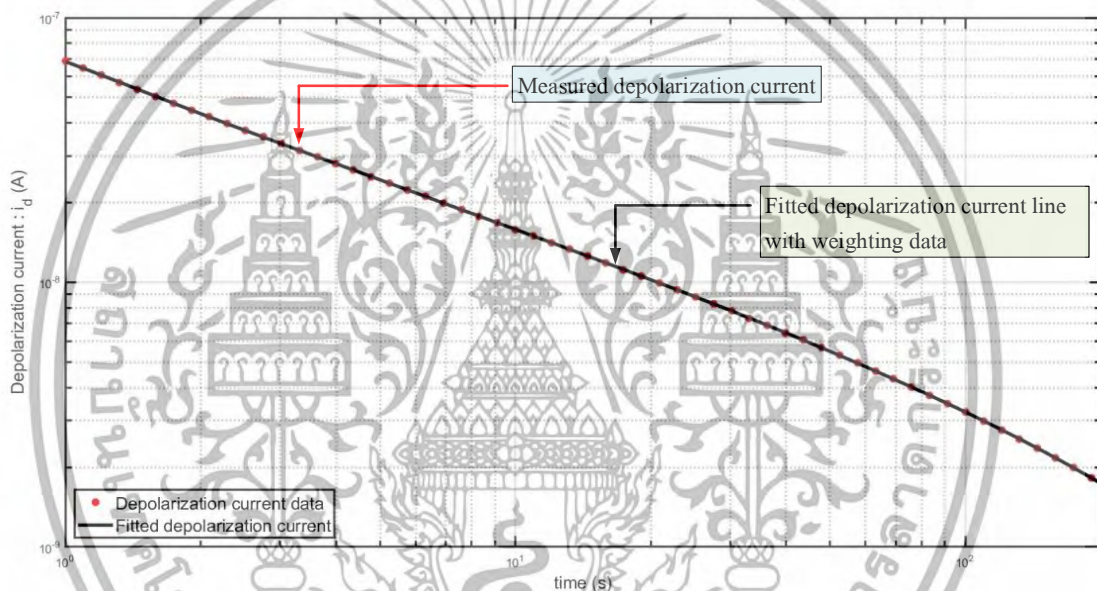
	Ai	Time constant (s)
1	9.4148E-08	0.562341325
2	3.4019E-08	1.77827941
3	2.8792E-09	3.16227766
4	1.6373E-08	5.623413252
5	9.2084E-11	10
6	9.2614E-09	17.7827941
7	4.7678E-09	56.23413252
8	2.6440E-09	177.827941
9	1.0618E-09	562.3413252

ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลและค่าคงที่เวลาการตอบสนองในรอบสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา(ง)เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 ตัวอย่างขั้นตอนการหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลของข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันจากวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ ก) การสร้างค่าคงที่เวลาการตอบสนองให้ครอบคลุมกับเวลาบันทึกกระแสดีโพลาริเซชันและข้อมูลอื่นๆ ข) การถ่วงน้ำหนักข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันและคำนวณผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล ค) ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบที่หนึ่ง ง) การหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบที่สอง และ จ) ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลรอบสุดท้าย

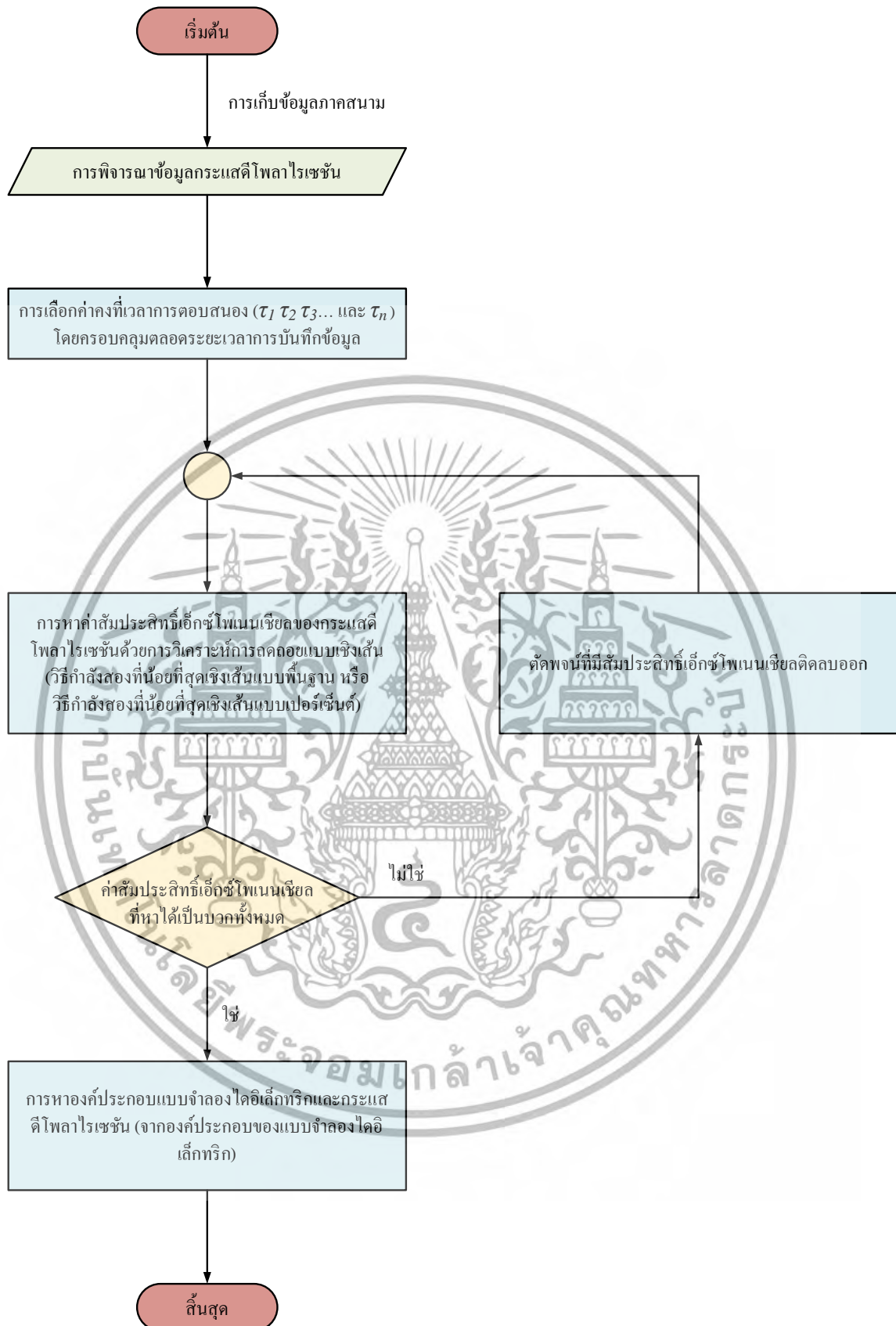
การแสดงผลกราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ผลลัพธ์กราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์เทียบกับกระแสดีโพลาริเซชันจากการวัด

จากการปรับปรุงผลลัพธ์กราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันจากวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์สามารถปรับปรุงความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าของกระแสดีโพลาริเซชันจากการวัด ณ ช่วงเวลาทำและช่วงที่มีค่ากระแสต่ำให้มีค่าลดลงและใกล้เคียงกับค่ากระแสดีโพลาริเซชันจากการวัดจึงทำให้สามารถหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอิเล็กทริกที่มีความถูกต้อง และ แม่นยำ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าได้ แผนผังแสดงการหาค่าประกอบไดโอิเล็กทริกด้วยการวิเคราะห์การถดถอดเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานและเปอร์เซ็นต์แสดงดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แผนภาพแสดงการหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลของกระแสไฟฟ้าโวลตาไรเซชันด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานและแบบเปอร์เซ็นต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การหาตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกจากองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก

จากการหาองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ซึ่งสามารถแปลผลลัพธ์ขององค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกที่อยู่ในวัฏจักรเวลาไปสู่ค่าปัจจัยความสูญเสียหรือค่า $\tan \delta$ ในวัฏจักรความถี่เพื่อวิเคราะห์สภาวะของฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากกลไกการเสื่อมสภาพได้ ซึ่งตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้าส่วนจินตภาพและส่วนจริง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.10 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ

$$C'(\omega) = C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (3.10)$$

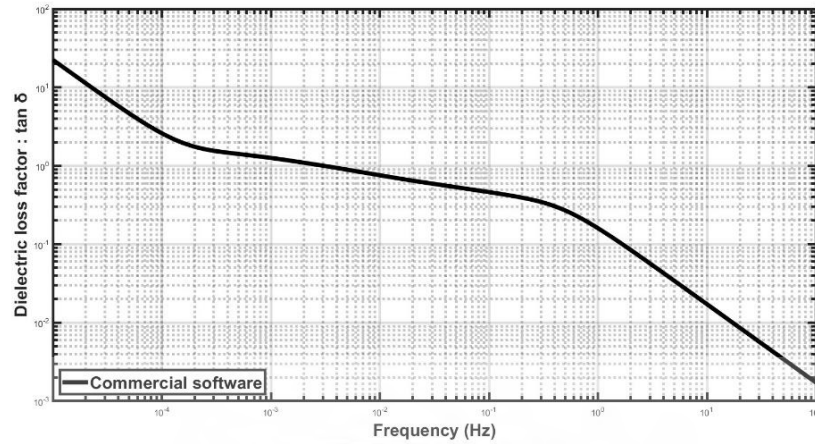
$$C''(\omega) = \frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (3.11)$$

$$\tan \delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} = \frac{\frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2}}{C_0 + \frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + \omega R_i C_i}} \quad (3.12)$$

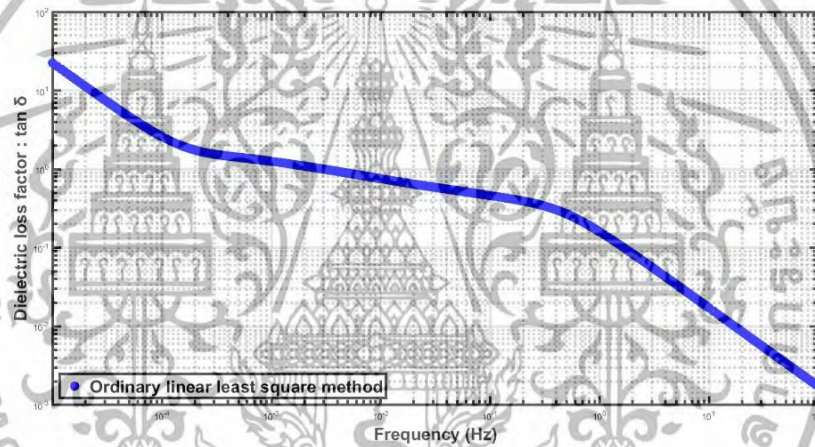
โดยที่ $C'(\omega)$ คือ ส่วนจริงแสดงค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก

$C''(\omega)$ คือ ส่วนจินตภาพแสดงค่าความสูญเสียจากการนำไฟฟ้า

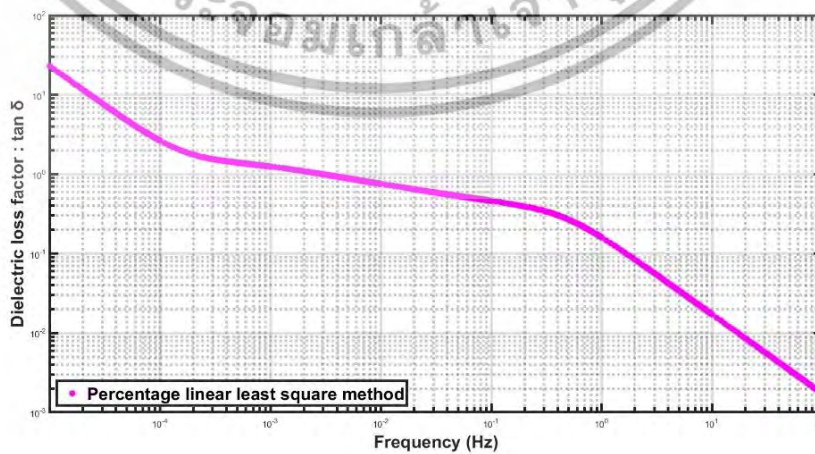
ตัวอย่างการหาค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



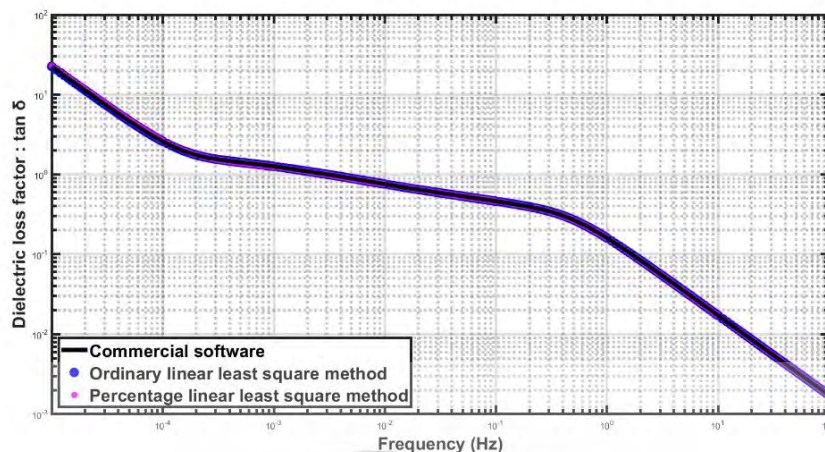
(ก)



(ข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา(ค)เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการหาค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริก ก) ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD ข) วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน ค) วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ และ ง) การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกจากทั้งสามวิธี

จากการนำเสนอการหาค่าตัวประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้แสดงถึงความแม่นยำของการหากระแสดีโพลาร์ไรเซชันที่เป็นตัวแทนของการตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนไฟฟ้ารวมถึงสามารถแปลผลลัพธ์ขององค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกไปสู่ค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่มีความแม่นยำเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์สถานะหรือสาเหตุของกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ความสำเร็จอื่นๆได้ จากหลักการดังกล่าวที่ได้นำเสนอในบทนี้สามารถนำไปทดสอบกับข้อมูลกระแสดีโพลาร์ไรเซชันจากการเก็บข้อมูลจริงที่บริเวณหน้างานเพื่อหาค่าตัวประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งจะนำเสนอผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอดังกล่าวในบทถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบการหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

บทที่สี่ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จากบทที่แล้วได้กล่าวถึงการนำเสนอการหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์จากข้อมูลของกระแสดีโพลาริเซชันที่เป็นตัวแทนการตอบสนองไดอิเล็กทริกในวัฏจักรเวลาซึ่งการตอบสนองดังกล่าวเป็นการตอบสนองเนื่องจากการดิสชาร์จประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนไฟฟ้าเรียกว่ากระบวนการผ่อนคลายซึ่งสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าในลักษณะของวงจรที่มีกิ่งที่มีตัวต้านทาน (R_i) และ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C_i) ต่ออนุกรมกันและมีค่าคงที่เวลาการตอบสนองเฉพาะกิ่งนั้นๆหลายกิ่งประกอบกัน ประจุไฟฟ้าที่ดิสชาร์จ ณ เวลาใดๆ จะเกิดกระแสไฟฟ้าเรียกว่ากระแสผ่อนคลาย ซึ่งกระแสผ่อนคลายจะแสดงถึงการตอบสนองของกิ่ง $R_i C_i$ และมีค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่สอดคล้องกับกิ่ง $R_i C_i$ นั้นๆ ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล จากสมการของกระแสดีโพลาริเซชันซึ่งเป็นผลรวมของกระแสผ่อนคลายที่มีลักษณะเป็นรูปแบบพหุเอ็กซ์โพเนนเชียลโดยสมการของพหุฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลดังกล่าวจะประกอบไปด้วยสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล (A_i) ค่าคงที่เวลาการตอบสนอง (τ_i) และเวลาการป้อนแรงดันทดสอบหรือเวลาการชาร์จ (t_c) ของกระแสผ่อนคลายหลายค่ารวมกัน การหาค่าของสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลจากข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันด้วยหลักการของกราฟที่เหมาะสมในภาพรวมของข้อมูลกระแสดีโพลาริเซชันที่มีเงื่อนไขของวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดและการหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกอื่นๆจากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD และ วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานได้นำเสนอถึงความแม่นยำของกราฟกระแสดีโพลาริเซชันที่เหมาะสมจากสองวิธีการดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสดีโพลาริเซชันจากการวัดในการเก็บข้อมูลแต่สองวิธีการดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องของกราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันในช่วงท้ายเวลาของการบันทึกข้อมูลกระแสและในช่วงการวัดที่มีค่ากระแสต่ำๆ ทำให้การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกมีความถูกต้องและแม่นยำลดลง จึงได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นการหาสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลและองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกอื่นๆด้วยหลักการวิธีการของวิธีการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นถ่วงน้ำหนักโดยทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่วงน้ำหนักข้อมูลหรือคือการกลับส่วนของข้อมูลในที่นี้คือข้อมูลของกระแสดีโพลาริเซชันแล้วทำการจัดรูปข้อมูลให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์แนวทแยงมุมเพื่อหาผลลัพธ์ขององค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกที่มีการปรับปรุงข้อบกพร่องของสองวิธีก่อนหน้าในเรื่องของความแม่นยำและเสถียรภาพขององค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกและกราฟของกระแสดีโพลาริเซชันที่เหมาะสม จากหลักการดังกล่าวที่ได้นำเสนอสามารถหาองค์ประกอบของแบบจำลองแปรผลลัพธ์ไปสู่ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกหรือค่า $\tan \delta$ ในวัฏจักรความถี่เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ที่สถานะหรือสาเหตุของกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ณ ความถี่อื่นๆได้

การทดสอบประสิทธิภาพ ความถูกต้อง และความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอสำหรับการหาองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยจะนำเสนอผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอดังกล่าวด้วยผลลัพธ์ขององค์ประกอบของแบบจำลอง กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี ซึ่งสามารถจำแนกประเภทอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบในแต่ละกรณีศึกษาเป็นสี่ประเภทได้แก่ กรณีศึกษาที่ 1 - 2 คือ ปลอกฉนวนตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง (HV bushing) กรณีศึกษาที่ 3 - 6 คือ สายเคเบิลแรงดันสูง (HV power cable) กรณีศึกษาที่ 7 - 12 คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง (HV Rotating machine) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง (HV motor) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (HV generator) และ กรณีศึกษาที่ 13 - 16 คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (HV transformer) สามารถแสดงชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบและพิกัดของอุปกรณ์ทดสอบได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบและพิกัดของอุปกรณ์

กรณีศึกษา	ชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ	พิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ
1	ปลอกฉนวนตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง	69 kV
2	ปลอกฉนวนตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง	69 kV
3	สายเคเบิลแรงดันสูง (6 เมตร)	22 kV
4	สายเคเบิลแรงดันสูง (100 เมตร)	22 kV
5	สายเคเบิลแรงดันสูง (6 เมตร)	115 kV
6	สายเคเบิลแรงดันสูง (100 เมตร)	115 kV
7	เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง (มอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง)	6.8 MW
8	เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง)	50 MVA
9	เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง)	50 MVA
10	เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง)	150 MVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

กรณีศึกษา	ชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ	พิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ
11	เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง)	150 MVA
12	เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง)	800 MVA
13	หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง	6 MVA
14	หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง	6 MVA
15	หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง	55 MVA
16	หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง	72 MVA

4.1 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดโอดเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี

การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบทั้ง 16 กรณี โดยจะนำเสนอผลลัพธ์ขององค์ประกอบของแบบจำลองไดโอดเล็กทริก และ กระแสดีโพลาริเซชัน ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ รวมถึงการแปลผลลัพธ์ขององค์ประกอบแบบจำลองไดโอดเล็กทริกที่ได้ จากวิธีการที่นำเสนอไปสู่ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดโอดเล็กทริกในวัฏจักรความถี่ ความความถูกต้อง และความแม่นยำของผลลัพธ์กราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชันที่หาจากองค์ประกอบของจำลองไดโอดเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบทั้ง 16 กรณีจะแสดงด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์ (Relative root mean square error ; RRMSE) และ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (Root mean square relative error ; RMSRE) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (i_{d_{measured}} - i_{d_{estimated}})^2}{\sum_{i=1}^n (i_{d_{measured}})^2}} \quad (4.1)$$

$$RMSRE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{i_{d_{measured}} - i_{d_{estimated}}}{i_{d_{measured}}} \right)^2} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีกริก กระแสดีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีกริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีกริก : C_0 (F)
500	300	1.2200×10^{11}	3.1900×10^{-10}

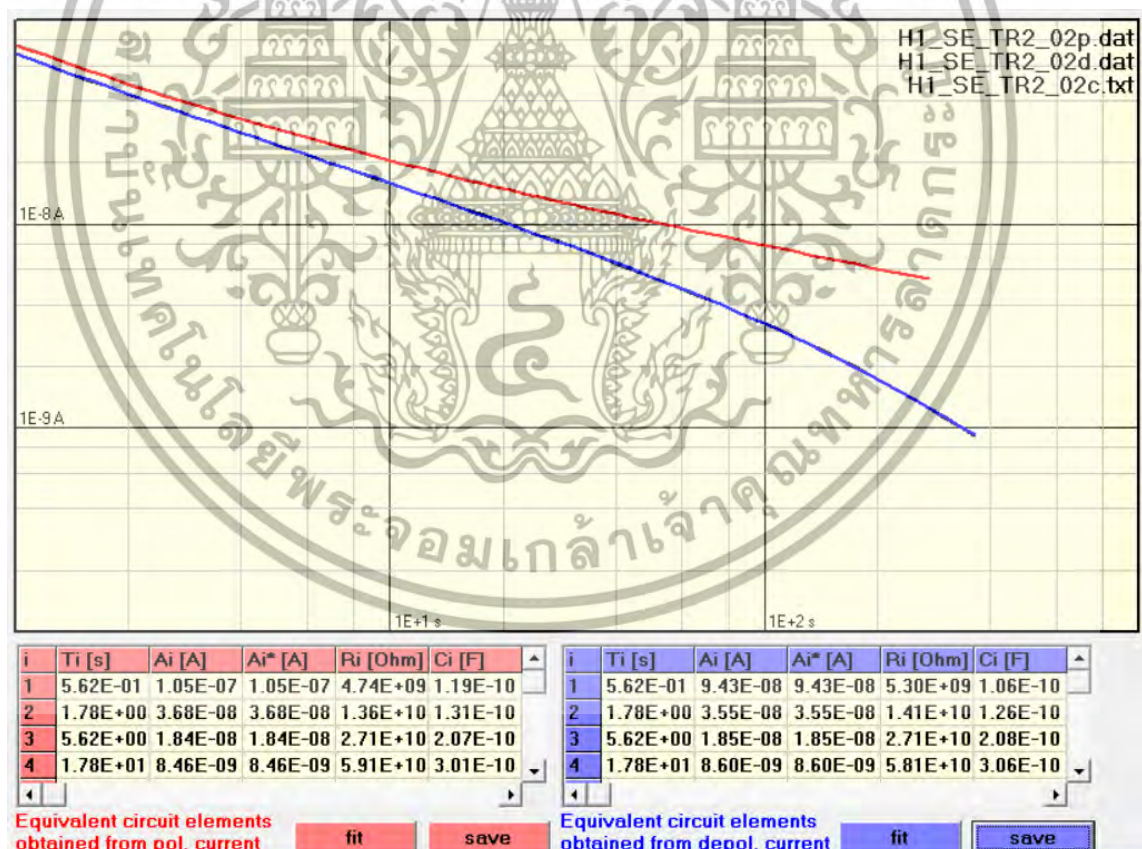
ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
9.4318×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	5.3012×10^9	1.0608×10^{-10}
3.5477×10^{-8}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.4094×10^{10}	1.2618×10^{-10}
1.8457×10^{-8}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	2.7090×10^{10}	2.0758×10^{-10}
8.6038×10^{-9}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.8114×10^{10}	3.0600×10^{-10}
5.1699×10^{-9}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	9.6248×10^{10}	5.8426×10^{-10}
2.3973×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.6997×10^{11}	1.0462×10^{-9}
1.1480×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	1.8006×10^{11}	3.1230×10^{-9}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
9.4350×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	5.2994×10^9	1.0611×10^{-10}
3.5495×10^{-8}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.4086×10^{10}	1.2624×10^{-10}
1.8439×10^{-8}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	2.7116×10^{10}	2.0739×10^{-10}
8.6180×10^{-9}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.8018×10^{10}	3.0651×10^{-10}
5.1601×10^{-9}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	9.6430×10^{10}	5.8316×10^{-10}
2.4037×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.6952×10^{11}	1.0490×10^{-9}
1.1459×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	1.8040×10^{11}	3.1173×10^{-9}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

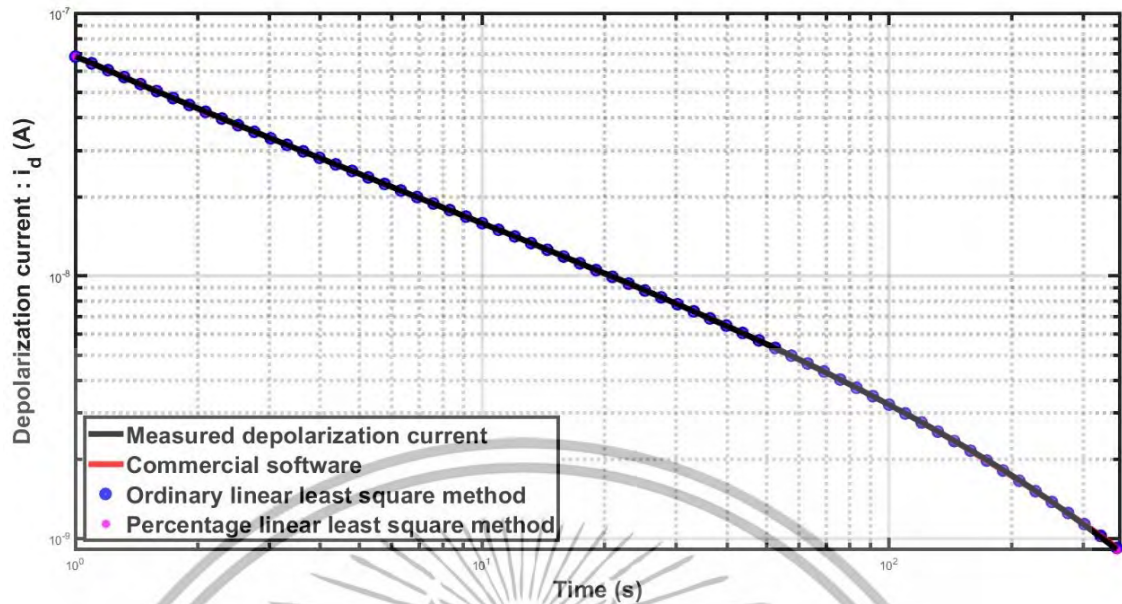
ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
9.4148×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	5.3108×10^9	1.0589×10^{-10}
3.4019×10^{-8}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.4698×10^{10}	1.2099×10^{-10}
2.8792×10^{-9}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	1.7366×10^{11}	1.8210×10^{-11}
1.6373×10^{-8}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	3.0537×10^{10}	1.8415×10^{-10}
9.2084×10^{-11}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	5.4299×10^{12}	1.8417×10^{-12}
9.2614×10^{-9}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.3988×10^{10}	3.2939×10^{-10}
4.7678×10^{-9}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.0436×10^{11}	5.3882×10^{-10}
2.6440×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.5411×10^{11}	1.1539×10^{-9}
1.0618×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	1.9469×10^{11}	2.8883×10^{-9}



รูปที่ 4.1 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 1 ภาคสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

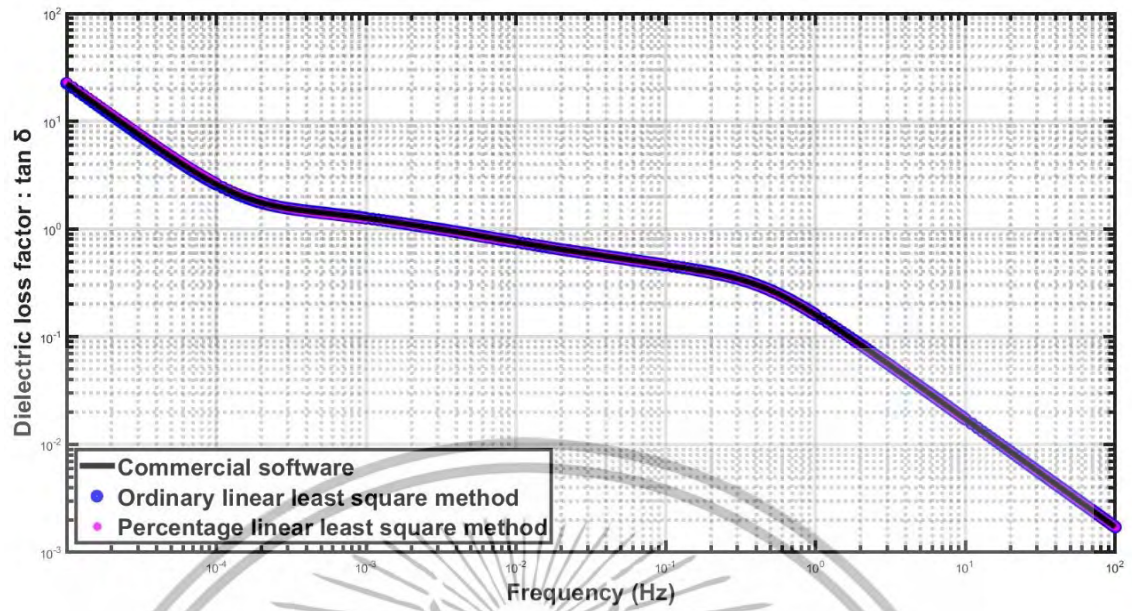


รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพล่าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.4 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพล่าไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีที่ 1

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
2.5688×10^{-2}	2.5663×10^{-2}	2.4902×10^{-2}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
3.4947×10^{-1}	3.4219×10^{-1}	1.2406×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีกริก กระแสตีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสตีโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีกริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีกริก : C_0 (F)
1000	150	2.4000×10^{13}	4.1500×10^{-10}

ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

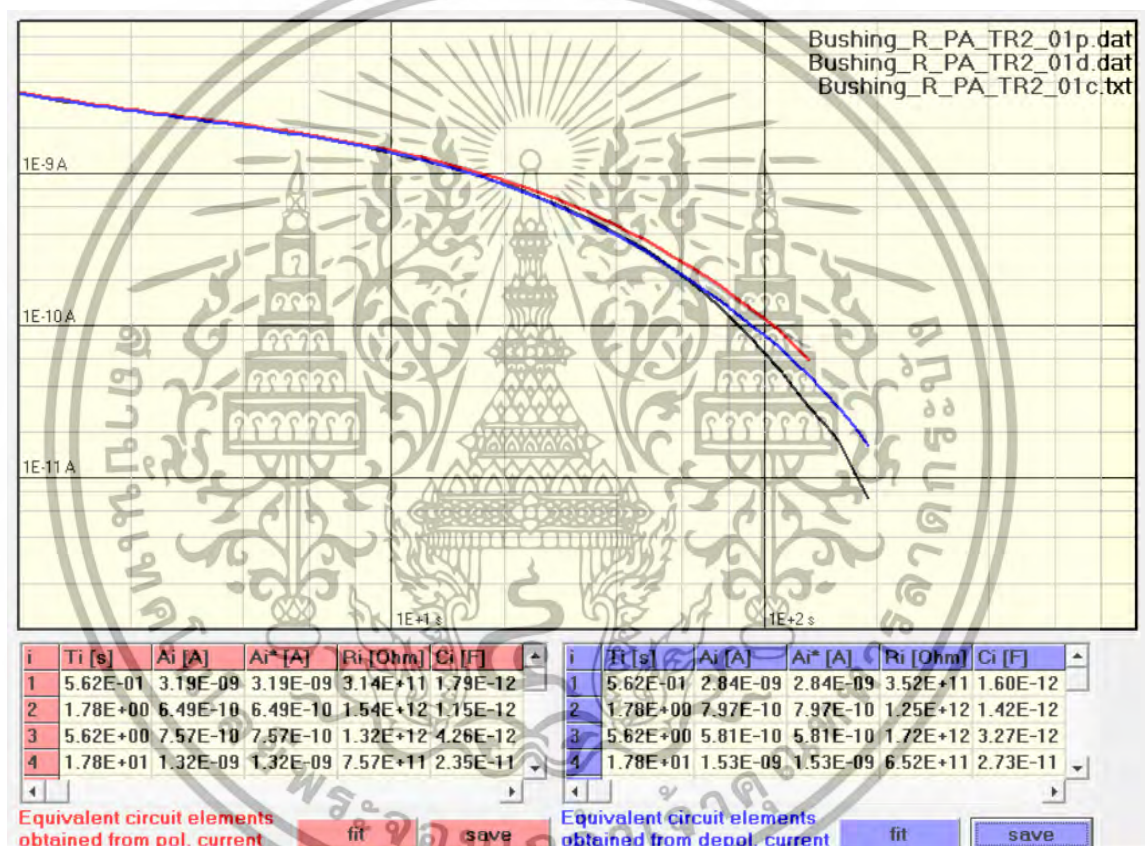
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.8384×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.5231×10^{11}	1.5962×10^{-12}
7.9682×10^{-10}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.2550×10^{12}	1.4170×10^{-12}
5.8131×10^{-10}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.7203×10^{12}	3.2689×10^{-12}
1.5337×10^{-9}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	6.5189×10^{11}	2.7279×10^{-11}
4.7419×10^{-10}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.9624×10^{12}	2.8655×10^{-11}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.8393×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.5220×10^{11}	1.5966×10^{-12}
7.9760×10^{-10}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.2538×10^{12}	1.4184×10^{-12}
5.8055×10^{-10}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.7225×10^{12}	3.2647×10^{-12}
1.5341×10^{-9}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	6.5171×10^{11}	2.7286×10^{-11}
4.7414×10^{-10}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.9627×10^{12}	2.8652×10^{-11}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.8186×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.5478×10^{11}	1.5850×10^{-12}
4.3474×10^{-10}	1.0000×10^0	1.0000×10^0	2.3002×10^{12}	4.3474×10^{-13}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

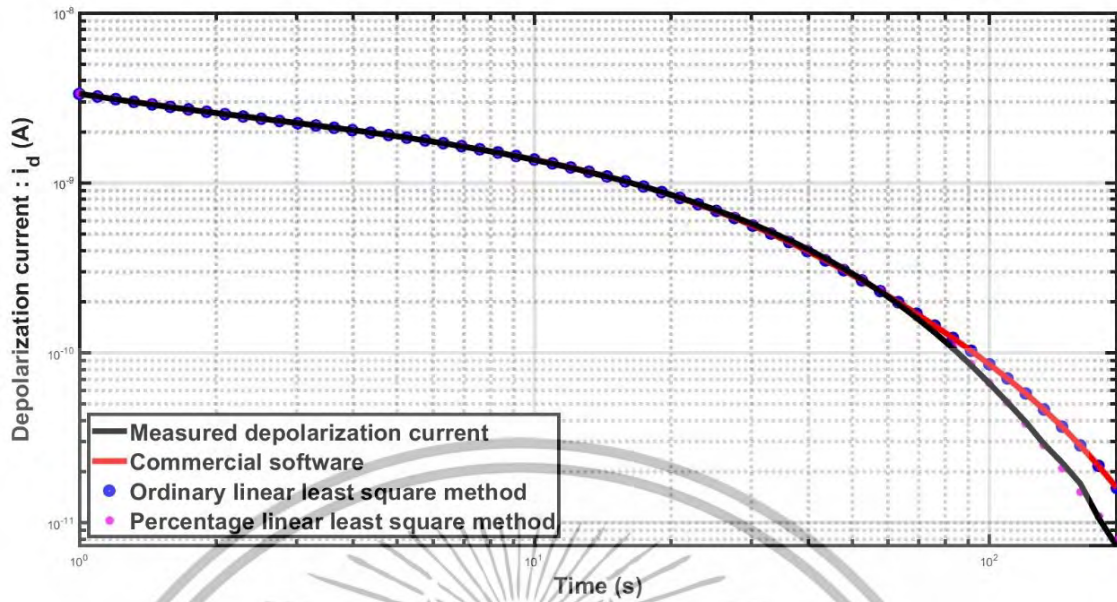
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
7.3157×10^{-10}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	1.3669×10^{12}	2.3134×10^{-12}
9.6876×10^{-10}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	1.0322×10^{12}	9.6876×10^{-12}
1.3011×10^{-9}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	7.6191×10^{11}	4.1505×10^{-11}
3.1810×10^{-11}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	2.4422×10^{13}	4.0947×10^{-12}



รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2 ภาคสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

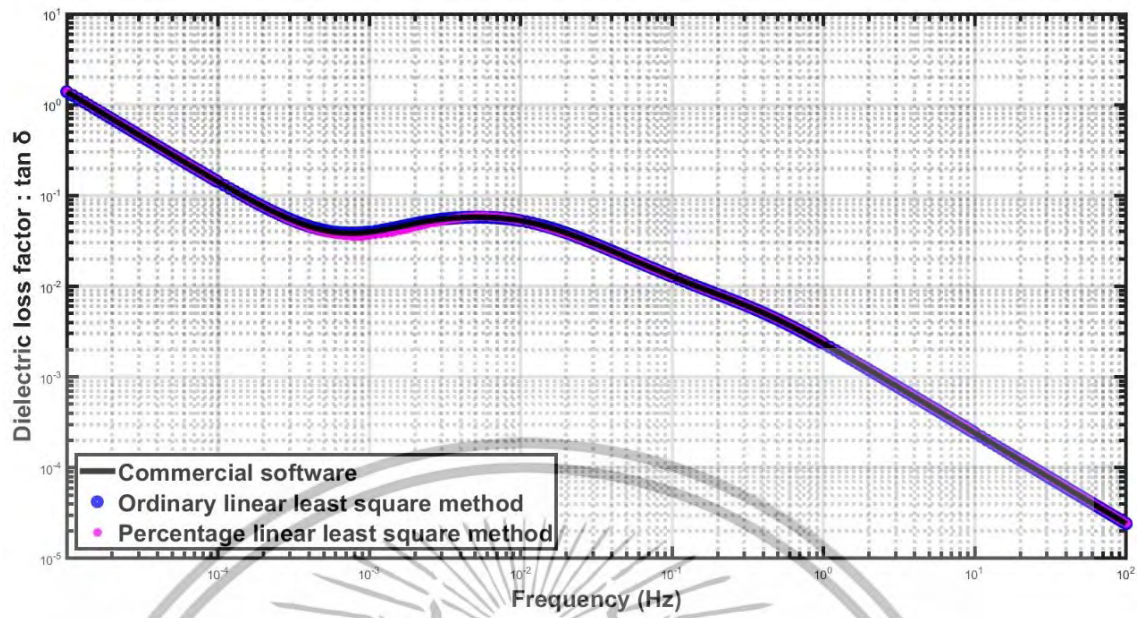


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพล่าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

ตารางที่ 4.7 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพล่าไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
7.6491×10^{-4}	7.6485×10^{-4}	2.9245×10^{-4}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
2.7007×10^1	2.6999×10^1	2.0769×10^0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีกริก กระแสดีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 3

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทดสอบการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 3

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีกริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีกริก : C_0 (F)
500	1000	7.3200×10^{12}	1.5210×10^{-9}

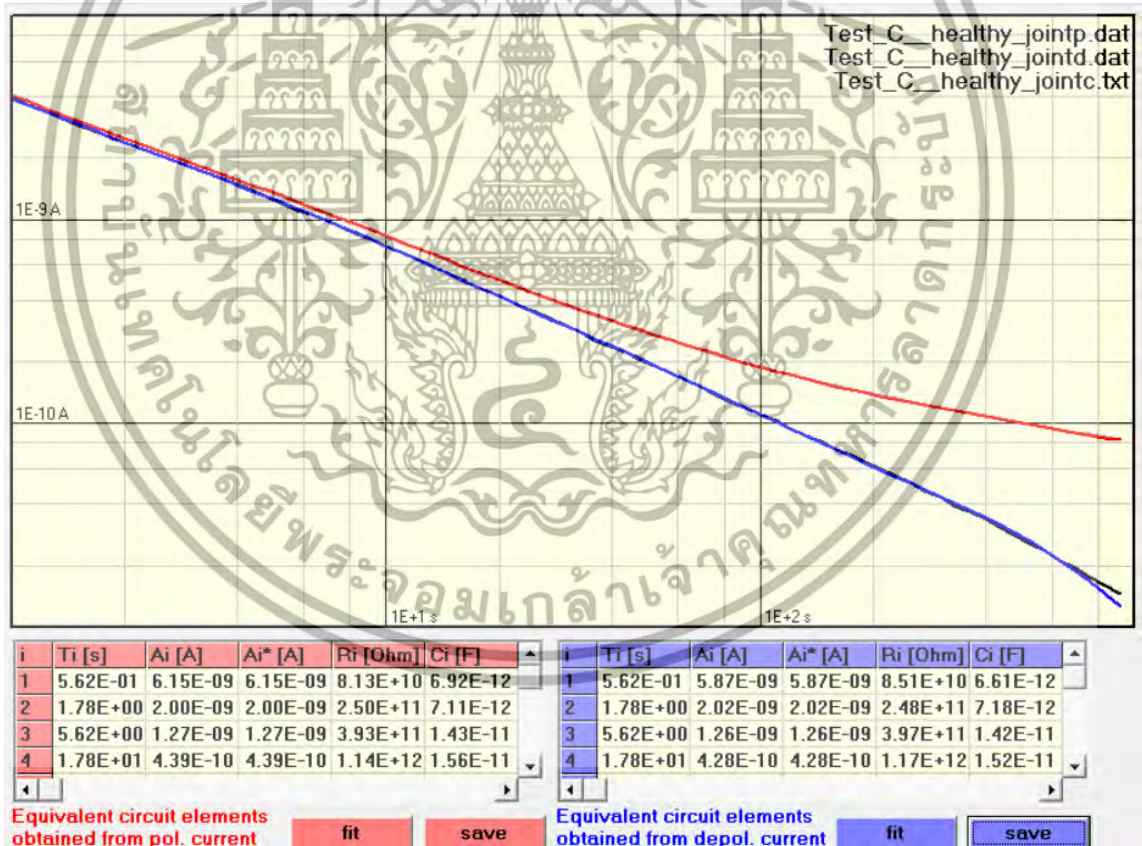
ตารางที่ 4.9 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 3

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
5.8749×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	8.5108×10^{10}	6.6074×10^{-12}
2.0196×10^{-9}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.4757×10^{11}	7.1829×10^{-12}
1.2598×10^{-9}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	3.9688×10^{11}	1.4169×10^{-11}
4.2776×10^{-10}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.1689×10^{12}	1.5213×10^{-11}
2.1926×10^{-10}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.2804×10^{12}	2.4659×10^{-11}
3.3428×10^{-11}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.4904×10^{13}	1.1932×10^{-11}
6.2483×10^{-11}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	6.6504×10^{12}	8.4558×10^{-11}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
5.8773×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	8.5073×10^{10}	6.6101×10^{-12}
2.0205×10^{-9}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.4746×10^{11}	7.1860×10^{-12}
1.2590×10^{-9}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	3.9713×10^{11}	1.4160×10^{-11}
4.2835×10^{-10}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.1673×10^{12}	1.5234×10^{-11}
2.1894×10^{-10}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.2837×10^{12}	2.4624×10^{-11}
3.3578×10^{-11}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.4837×10^{13}	1.1985×10^{-11}
6.2448×10^{-11}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	6.6541×10^{12}	8.4511×10^{-11}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

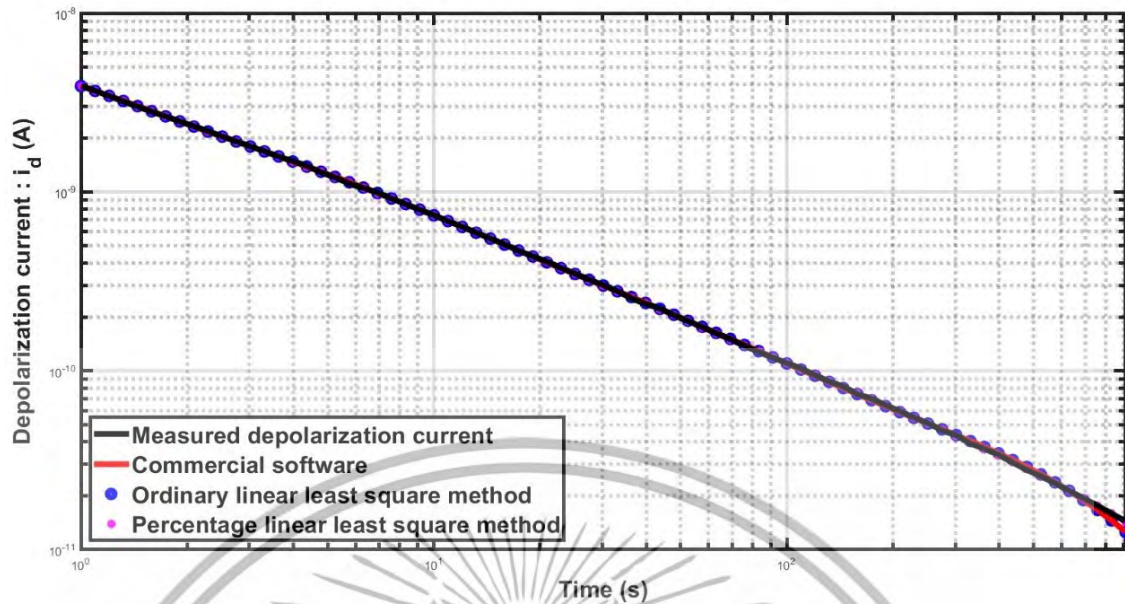
ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
5.5434×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	9.0197×10^{10}	6.2346×10^{-12}
2.1687×10^{-9}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.3056×10^{11}	7.7130×10^{-12}
1.1727×10^{-9}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	4.2636×10^{11}	1.3189×10^{-11}
4.8454×10^{-10}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.0319×10^{12}	1.7233×10^{-11}
1.7742×10^{-10}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.8181×10^{12}	1.9954×10^{-11}
6.6409×10^{-11}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	7.5019×10^{12}	2.3705×10^{-11}
1.5579×10^{-11}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	3.0736×10^{13}	1.0289×10^{-11}
3.2569×10^{-11}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	9.7045×10^{12}	1.0305×10^{-10}



รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 3 ภาคสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

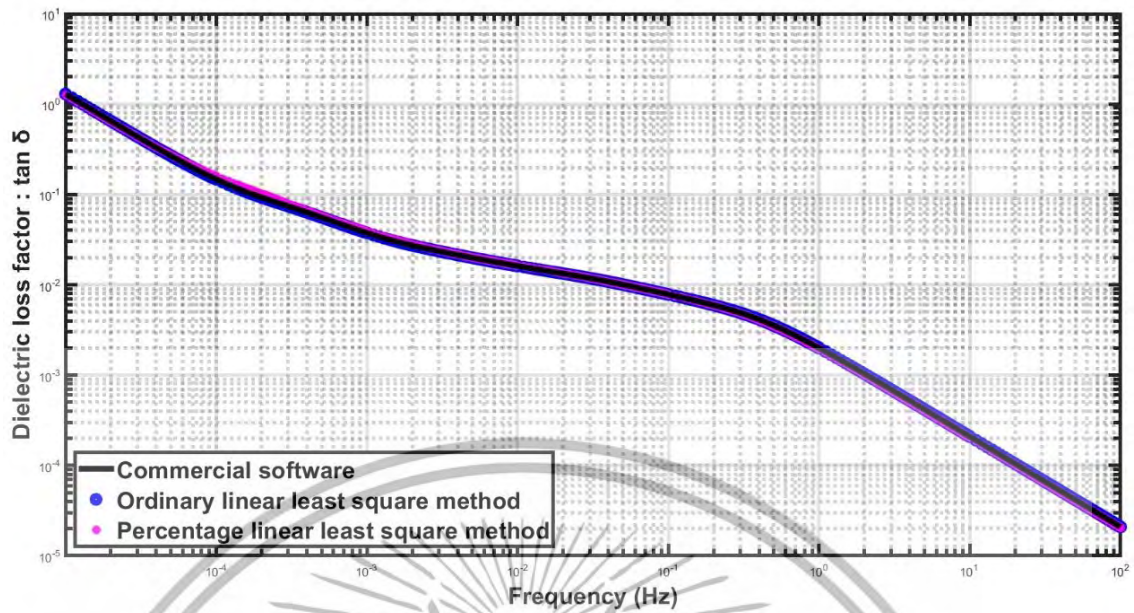


รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 3

ตารางที่ 4.10 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีที่ 3

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
5.1845×10^{-2}	5.1828×10^{-2}	5.8238×10^{-2}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
2.2025×10^0	2.2071×10^0	5.8930×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลทริก กระแสดีโพลลาไรเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4

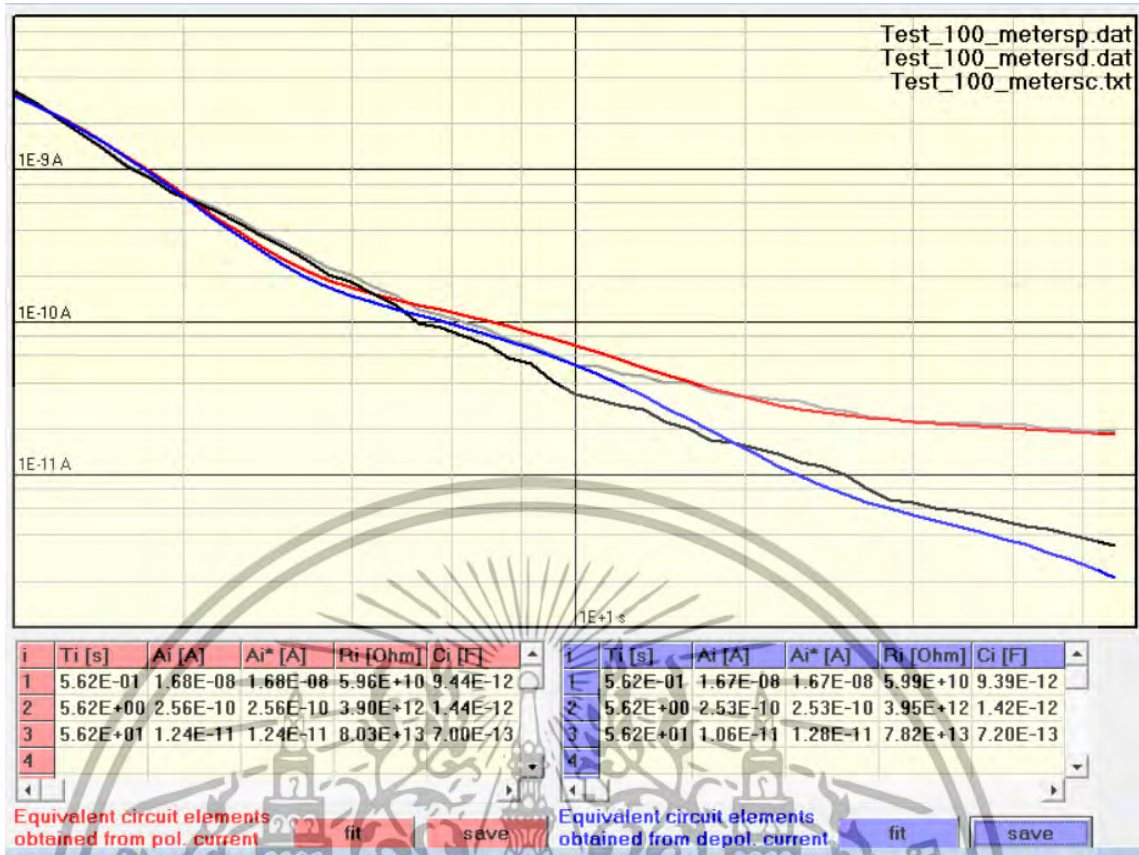
ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสดีโพลลาไรเซชันและกระแสดีโพลลาไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลทริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลทริก : C_0 (F)
1000	100	6.3700×10^{13}	1.2150×10^{-8}

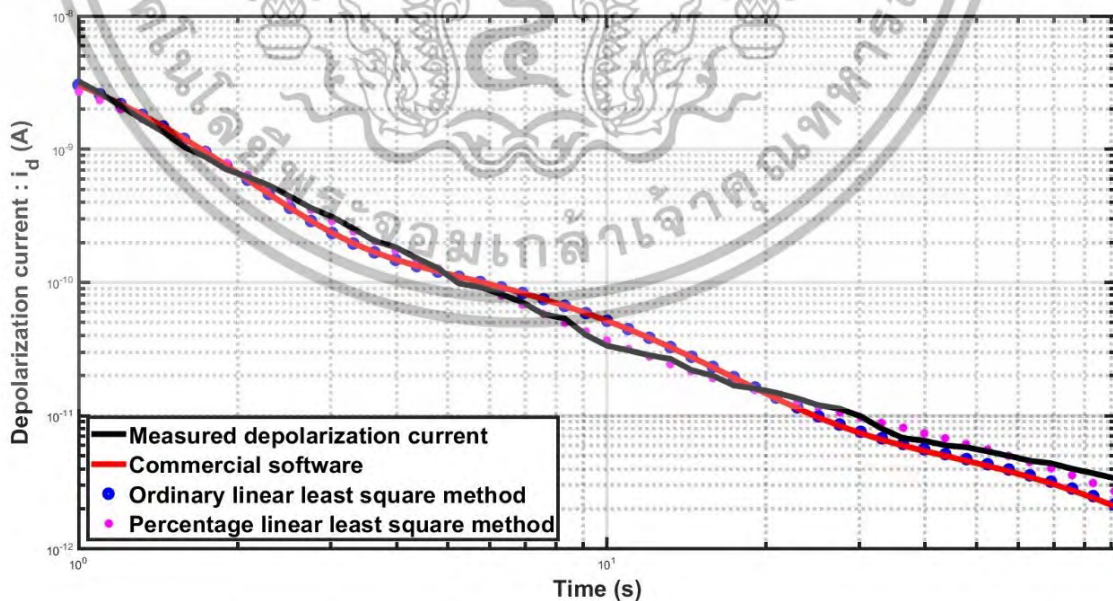
ตารางที่ 4.12 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.6695×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	5.9899×10^{10}	9.3882×10^{-12}
2.5288×10^{-10}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	3.9545×10^{12}	1.4220×10^{-12}
1.0633×10^{-11}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	7.8156×10^{13}	7.1951×10^{-13}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.6664×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	6.0008×10^{10}	9.3711×10^{-12}
2.5124×10^{-10}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	3.9803×10^{12}	1.4128×10^{-12}
1.0955×10^{-11}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	7.5861×10^{13}	7.4127×10^{-13}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.2785×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	7.8219×10^{10}	7.1893×10^{-12}
5.2364×10^{-10}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.9097×10^{12}	9.3117×10^{-13}
2.4868×10^{-10}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	4.0212×10^{12}	7.8640×10^{-13}
3.5040×10^{-11}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	2.8537×10^{12}	3.5042×10^{-13}
1.3670×10^{-11}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	6.0793×10^{13}	9.2501×10^{-13}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



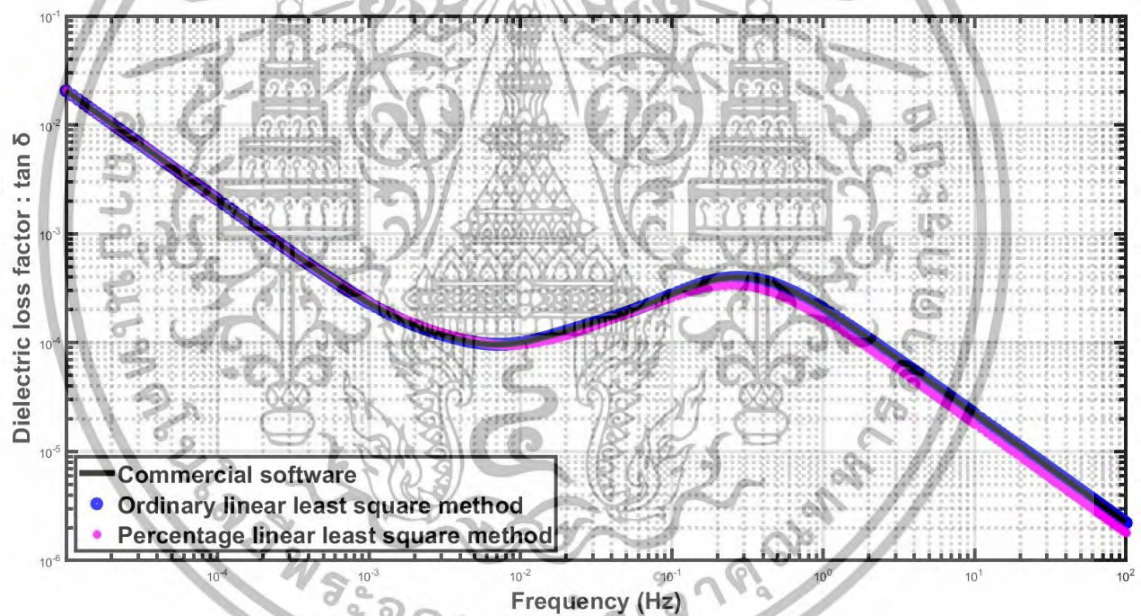
รูปที่ 4.10 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4 ภาคสนาม



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4 การที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดิโพลาร์ไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
9.8655×10^{-1}	9.8819×10^{-1}	1.8918×10^0
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
2.2385×10^1	2.1767×10^1	8.1292×10^0



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลทริก กระแสตีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 5

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 5

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลทริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลทริก : C_0 (F)
400	250	1.5000×10^{10}	2.0380×10^{-9}

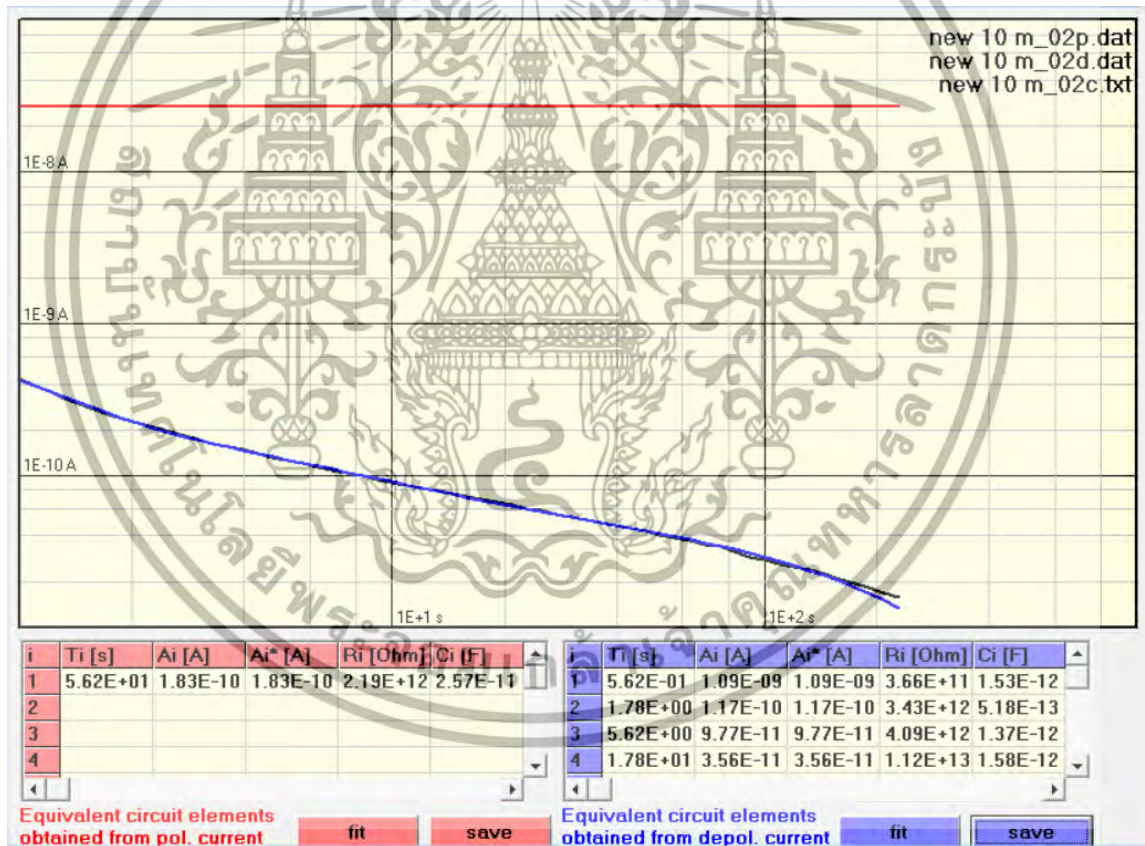
ตารางที่ 4.15 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 5

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.0918×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.6636×10^{11}	1.5349×10^{-12}
1.1651×10^{-10}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	3.4333×10^{12}	5.1795×10^{-13}
9.7697×10^{-11}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	4.0943×10^{12}	1.3735×10^{-12}
3.5630×10^{-11}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.1226×10^{13}	1.5840×10^{-12}
1.0053×10^{-11}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	3.9321×10^{13}	1.4301×10^{-12}
4.7617×10^{-11}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	6.3409×10^{12}	2.8045×10^{-11}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.0923×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.6621×10^{11}	1.5356×10^{-12}
1.1657×10^{-10}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	3.4313×10^{12}	5.1826×10^{-13}
9.7625×10^{-11}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	4.0973×10^{12}	1.3725×10^{-12}
3.5686×10^{-11}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.1209×10^{13}	1.5865×10^{-12}
1.0021×10^{-11}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	3.9448×10^{13}	1.4255×10^{-12}
4.7630×10^{-11}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	6.3393×10^{12}	2.8052×10^{-11}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

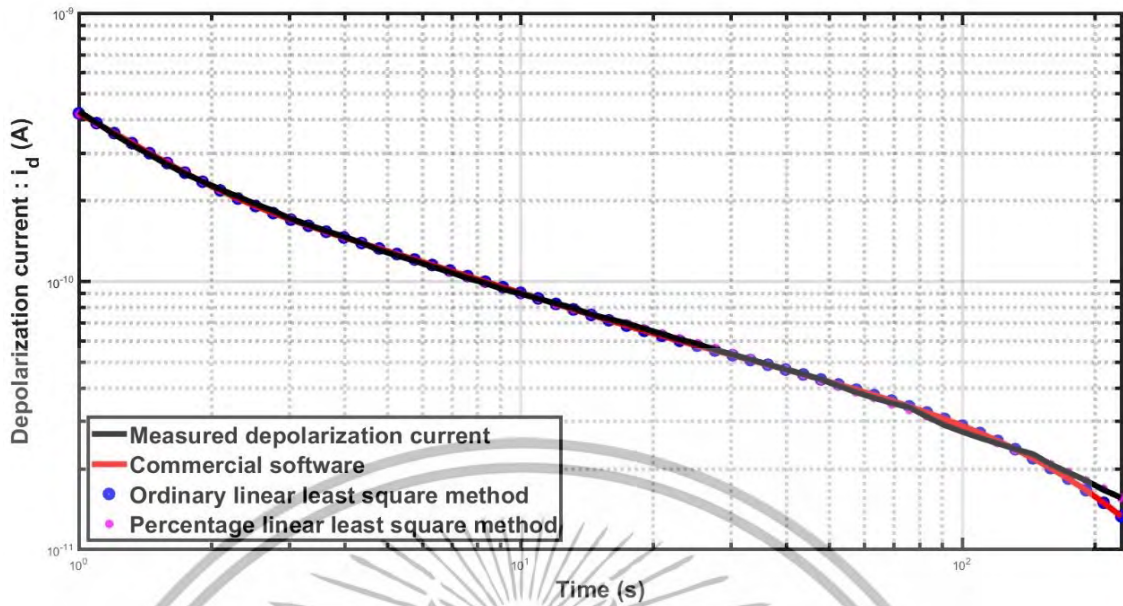
ตารางที่ 4.15 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.0753×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.7200×10^{11}	1.5117×10^{-12}
5.0244×10^{-11}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	7.9612×10^{12}	2.2337×10^{-13}
1.2798×10^{-10}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	3.1255×10^{12}	1.0118×10^{-12}
4.0424×10^{-11}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	9.8951×10^{12}	1.0106×10^{-12}
3.8617×10^{-11}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	1.0354×10^{13}	3.0540×10^{-12}
1.4331×10^{-11}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	2.5620×10^{13}	3.9032×10^{-12}
2.9020×10^{-11}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	7.5316×10^{12}	4.1987×10^{-11}



รูปที่ 4.13 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 5 ภาคสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

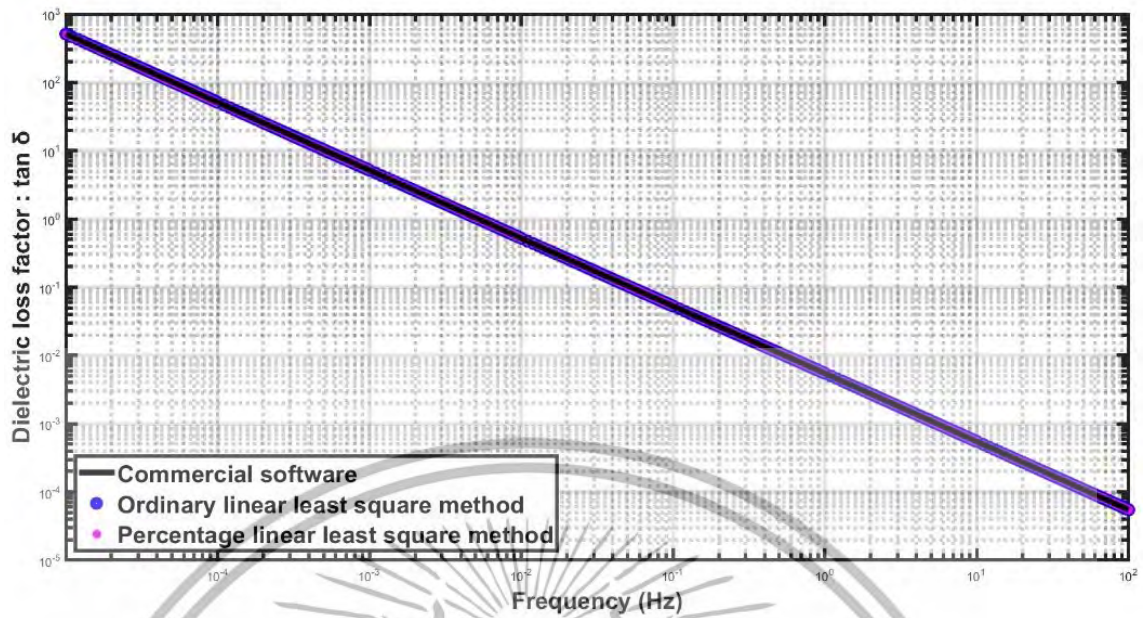


รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 5

ตารางที่ 4.16 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีที่ 5

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
1.6587×10^{-1}	1.6584×10^{-1}	1.5483×10^{-1}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
3.1970×10^0	3.1934×10^0	9.2343×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโอดีเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6

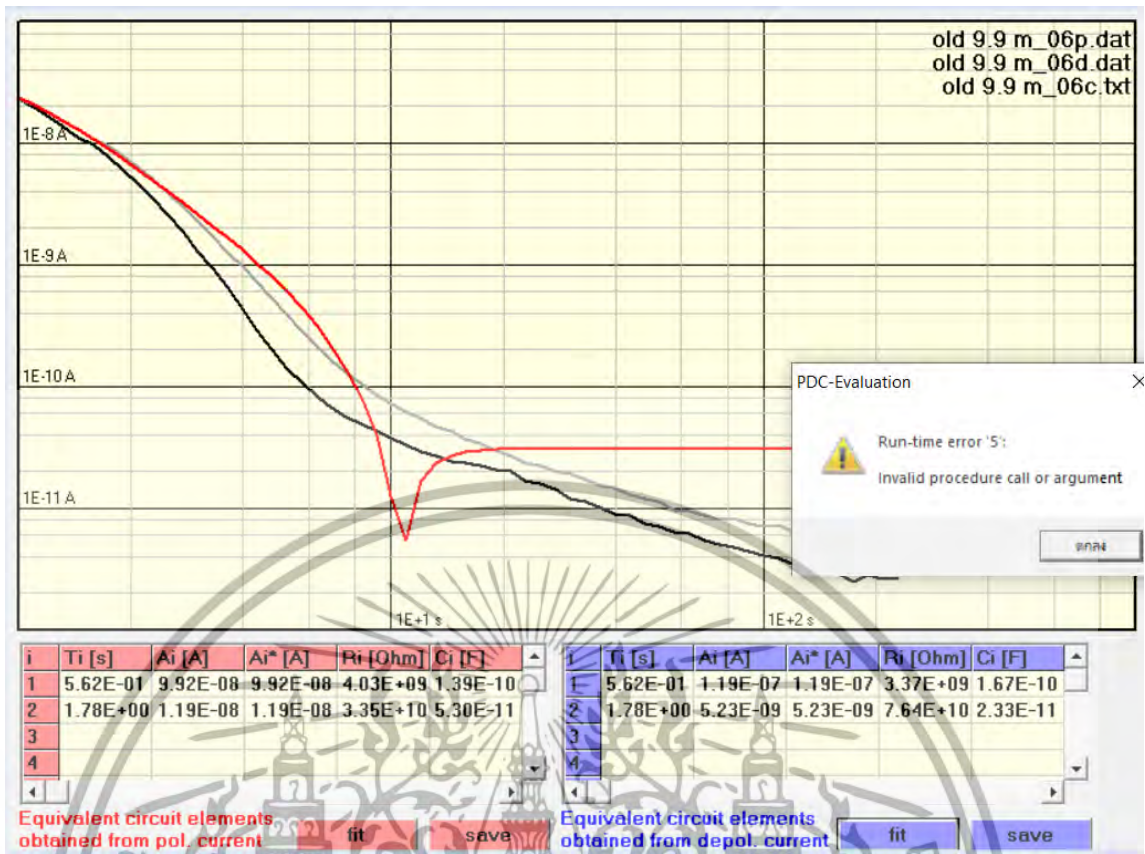
ตารางที่ 4.17 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโอดีเล็กทริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโอดีเล็กทริก : C_0 (F)
400	250	1.4925×10^{14}	1.5710×10^{-9}

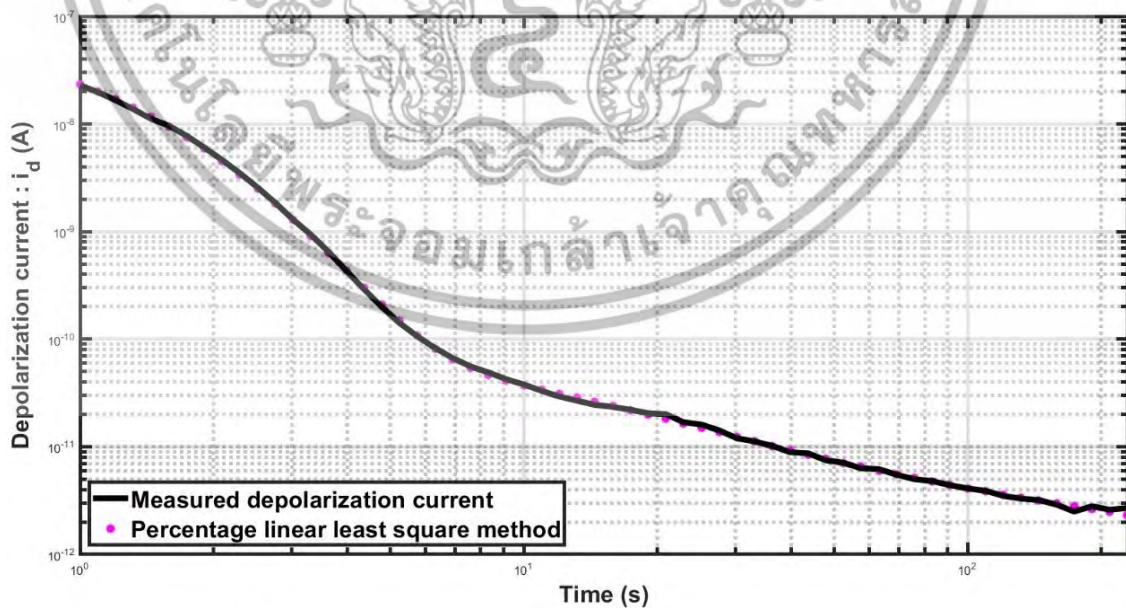
ตารางที่ 4.18 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโอดีเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.0597×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.7746×10^9	1.4898×10^{-10}
1.4693×10^{-8}	1.0000×10^0	1.0000×10^0	2.7224×10^{10}	3.6732×10^{-11}
8.0517×10^{-11}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	4.9679×10^{12}	6.3654×10^{-13}
4.8632×10^{-11}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	8.2251×10^{12}	1.2158×10^{-12}
1.4660×10^{-11}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	2.7274×10^{13}	1.1594×10^{-12}
4.7774×10^{-12}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	4.5750×10^{13}	6.9121×10^{-12}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



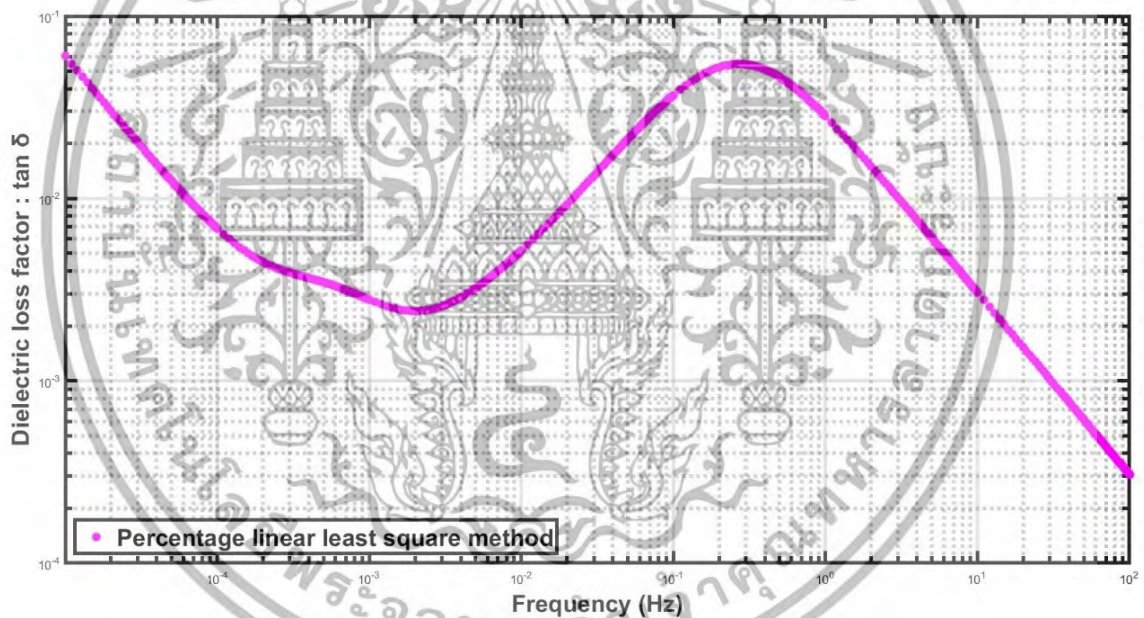
รูปที่ 4.16 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6 ภาคสนาม



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันด้วยวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบแปรเชิงเส้นของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6 ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดิโพลาร์ไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
N/A	N/A	3.3313×10^{-1}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
N/A	N/A	4.1612×10^0



รูปที่ 4.18 การแสดงผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 6 ด้วยวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีกริก กระแสดีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 7

ตารางที่ 4.20 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 7

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีกริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีกริก : C_0 (F)
500	1000	1.1741×10^{11}	3.1900×10^{-10}

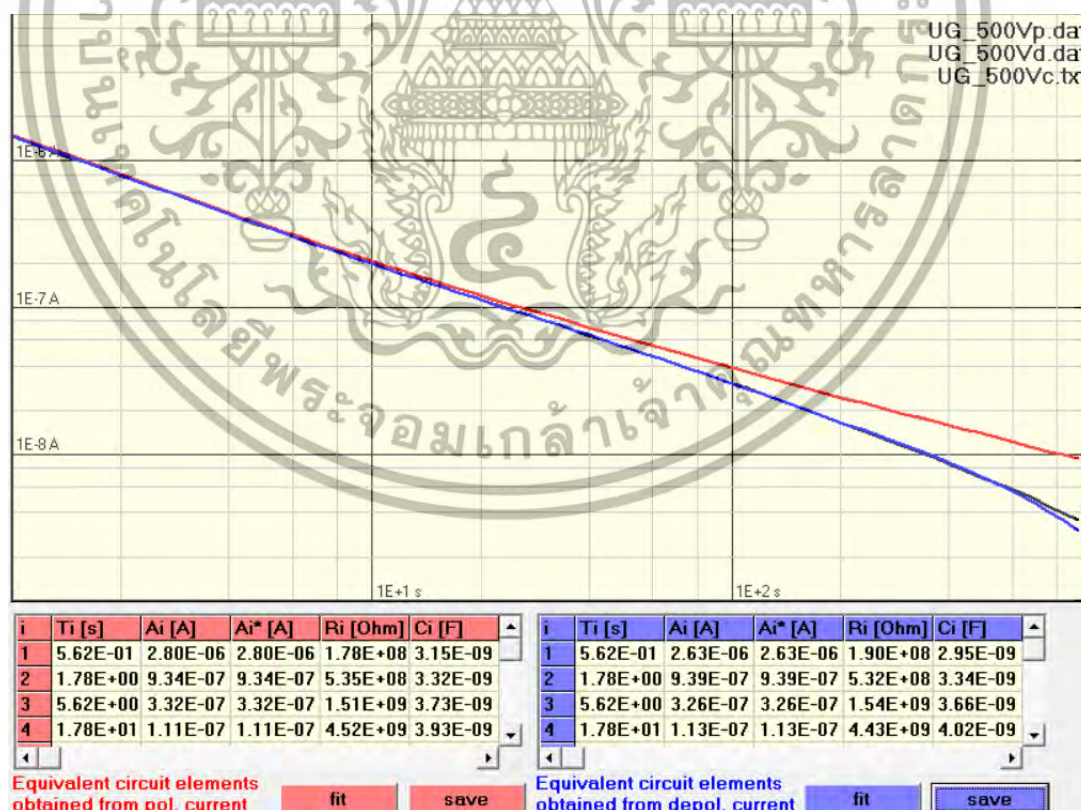
ตารางที่ 4.21 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 7

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.6272×10^{-6}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.9031×10^8	2.9548×10^{-9}
9.3945×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	5.3223×10^8	3.3412×10^{-9}
3.2552×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.5360×10^9	3.6611×10^{-9}
1.1297×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	4.4260×10^9	4.0178×10^{-9}
5.6485×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	8.8519×10^9	6.3527×10^{-9}
1.3658×10^{-8}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	3.6477×10^{10}	4.8750×10^{-9}
1.4939×10^{-8}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	2.7815×10^{10}	2.0217×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.6270×10^{-6}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.9033×10^8	2.9545×10^{-9}
9.3950×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	5.3220×10^8	3.3414×10^{-9}
3.2550×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.5361×10^9	3.6609×10^{-9}
1.1297×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	4.4258×10^9	4.0180×10^{-9}
5.6483×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	8.8523×10^9	6.3525×10^{-9}
1.3659×10^{-8}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	3.6475×10^{10}	4.8754×10^{-9}
1.4939×10^{-8}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	2.7816×10^{10}	2.0217×10^{-8}

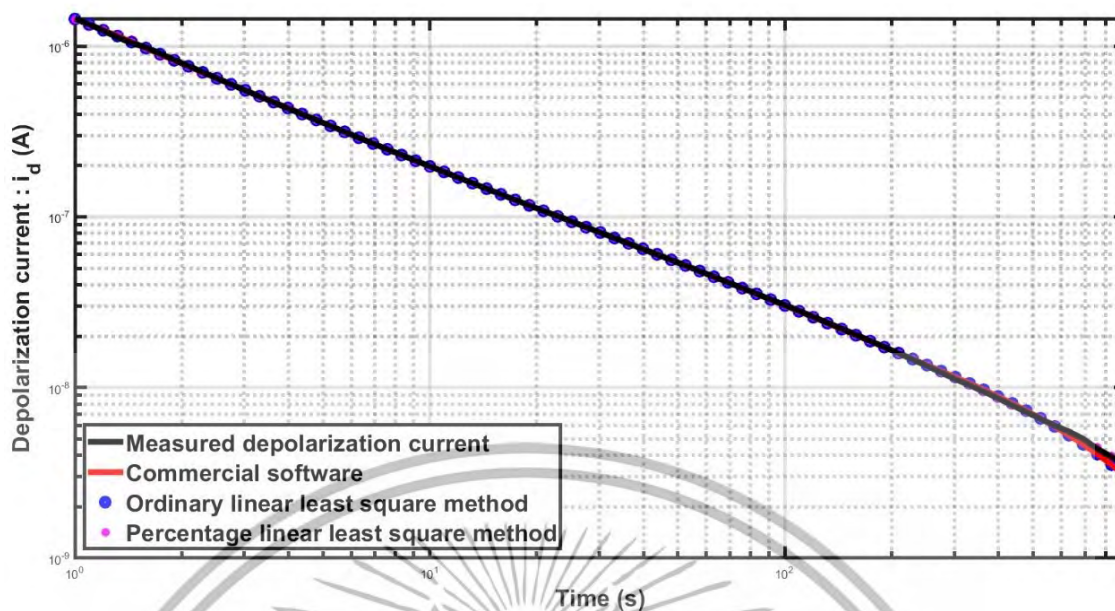
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.2188×10^{-6}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	2.2534×10^8	2.4955×10^{-9}
4.2610×10^{-7}	1.0000×10^0	1.0000×10^0	1.1734×10^9	8.5219×10^{-10}
6.0975×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	8.2001×10^8	2.1686×10^{-9}
2.4909×10^{-7}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	2.0073×10^9	1.5754×10^{-9}
1.3759×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	3.6339×10^9	1.5475×10^{-9}
1.3140×10^{-7}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	3.8053×10^9	2.6279×10^{-9}
2.3511×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	2.1267×10^{10}	8.3617×10^{-10}
6.9366×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	7.2082×10^9	4.3871×10^{-9}
3.4940×10^{-8}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	1.4310×10^{10}	6.9883×10^{-9}
1.0687×10^{-8}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	4.4805×10^{10}	7.0578×10^{-9}
7.3527×10^{-9}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	4.2986×10^{10}	2.3264×10^{-8}



รูปที่ 4.19 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลารไรเซชันและกระแสตีโพลารไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 7 ภาคสนาม ศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

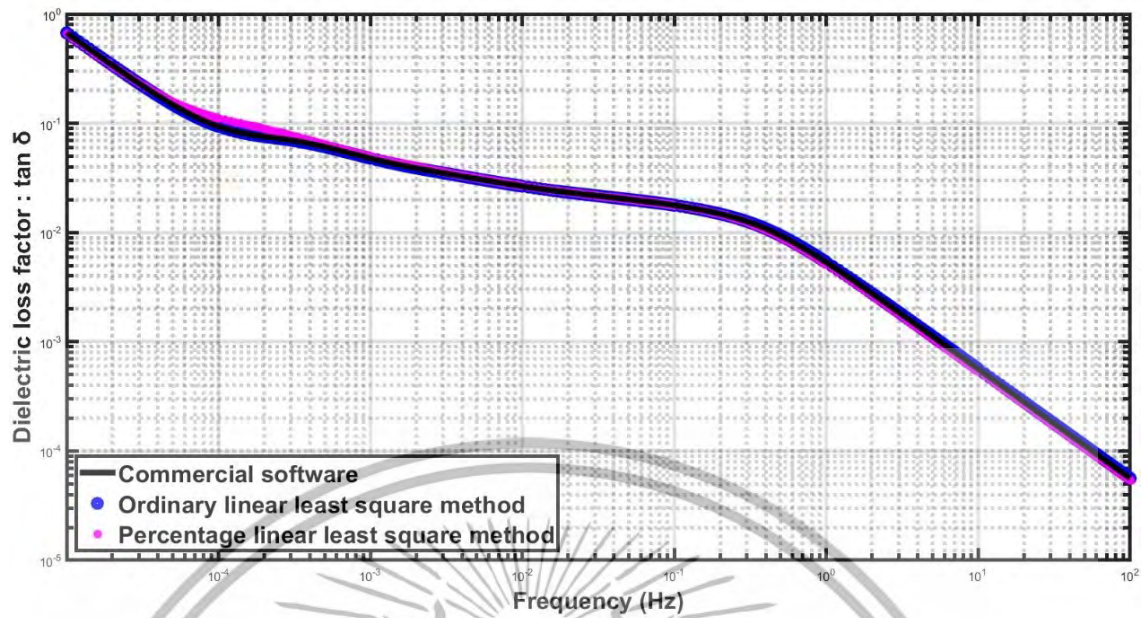


รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพล่าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 7

ตารางที่ 4.22 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพล่าไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีที่ 7

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
9.4637×10^{-2}	9.4638×10^{-2}	1.0161×10^{-1}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
2.5937×10^0	2.5939×10^0	5.2441×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.8 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลทริก กระแสตีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8

ตารางที่ 4.23 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลทริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลทริก : C_0 (F)
100	1100	1.5000×10^{11}	1.8280×10^{-7}

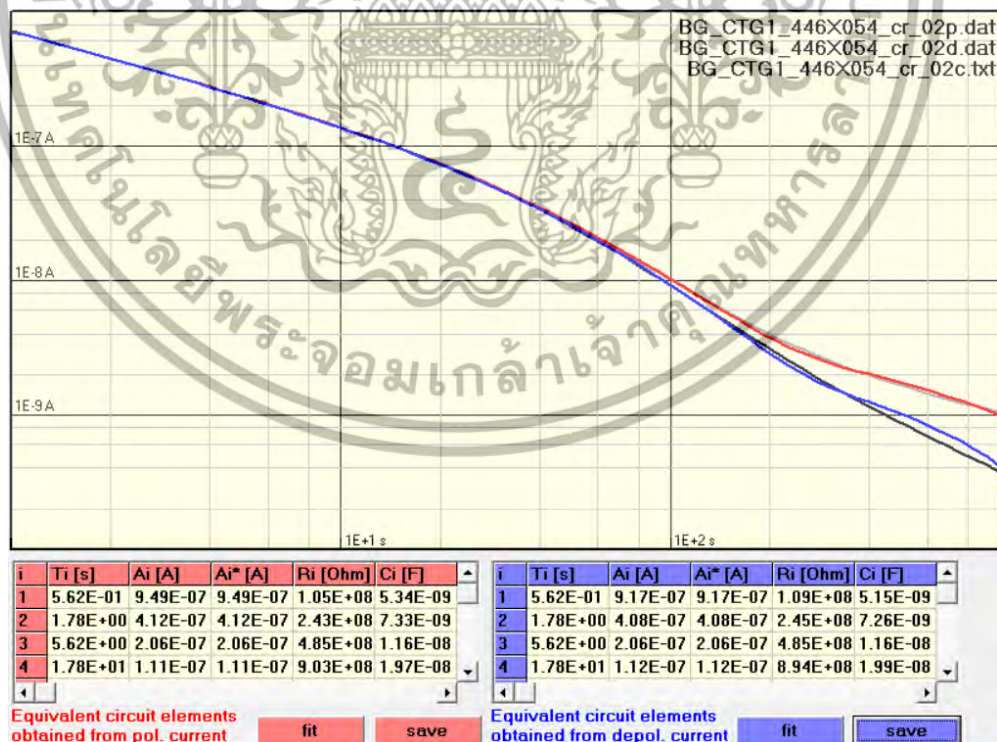
ตารางที่ 4.24 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
9.1662×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.0910×10^8	5.1545×10^{-9}
4.0823×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.4496×10^8	7.2594×10^{-9}
2.0600×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	4.8544×10^8	1.1584×10^{-8}
1.1184×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	8.9411×10^8	1.9889×10^{-8}
4.0153×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.4905×10^9	2.2580×10^{-8}
2.4487×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	3.5064×10^{10}	1.6038×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
9.1661×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.0910×10^8	5.1545×10^{-9}
4.0823×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.4496×10^8	7.2594×10^{-9}
2.0599×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	4.8545×10^8	1.1584×10^{-8}
1.1185×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	8.9406×10^8	1.9890×10^{-8}
4.0151×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.4906×10^9	2.2578×10^{-8}
2.4490×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	3.5059×10^{10}	1.6040×10^{-8}

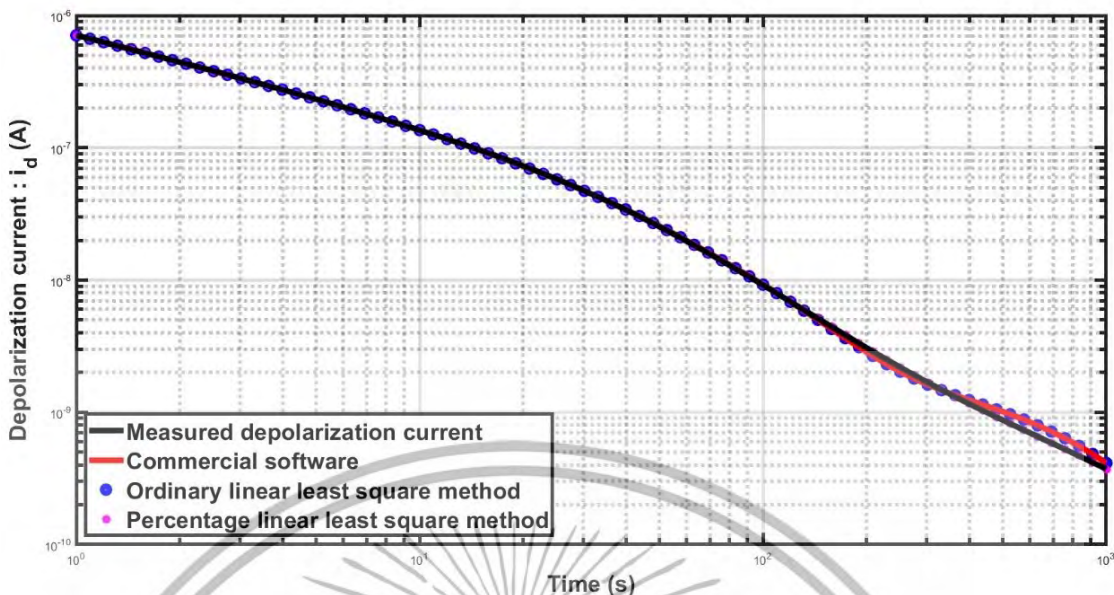
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.24 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
9.3472×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.0698×10^8	5.2563×10^{-9}
3.5069×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.8515×10^8	6.2363×10^{-9}
1.0444×10^{-7}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	9.5745×10^8	3.3028×10^{-9}
1.0575×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	9.4562×10^8	5.9468×10^{-9}
6.5536×10^{-8}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	1.5259×10^9	6.5536×10^{-9}
6.9715×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.4344×10^9	1.2397×10^{-8}
3.3956×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	2.9450×10^9	1.0738×10^{-8}
1.8901×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	5.2908×10^9	1.0629×10^{-8}
4.1555×10^{-9}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	2.4064×10^{10}	4.1556×10^{-9}
2.7507×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	3.6280×10^{10}	4.9016×10^{-9}
1.0446×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	8.2195×10^{10}	6.8416×10^{-9}
3.2613×10^{-10}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	1.4144×10^{11}	1.2572×10^{-8}



รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8 ภาคสนาม ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

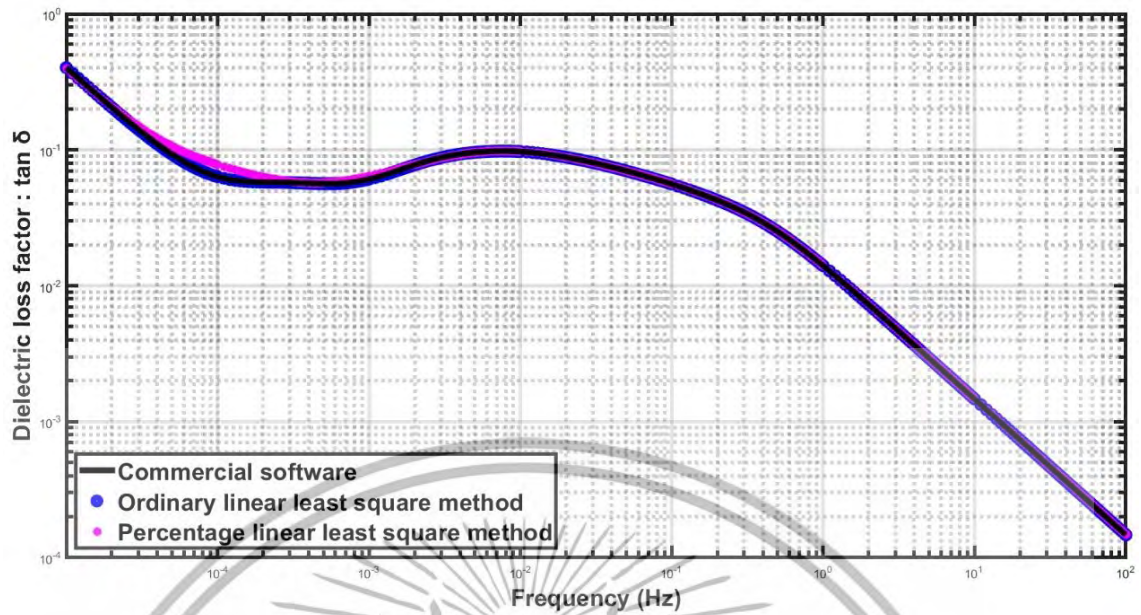


รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพล่าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8

ตารางที่ 4.25 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพล่าไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
2.9308×10^{-2}	2.9308×10^{-2}	2.5307×10^{-2}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
6.8372×10^0	6.8414×10^0	1.0861×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.9 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลทริก กระแสดีโพลลาไรเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9

ตารางที่ 4.26 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลลาไรเซชันและกระแสดีโพลลาไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลทริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลทริก : C_0 (F)
100	650	1.0100×10^{11}	1.8700×10^{-7}

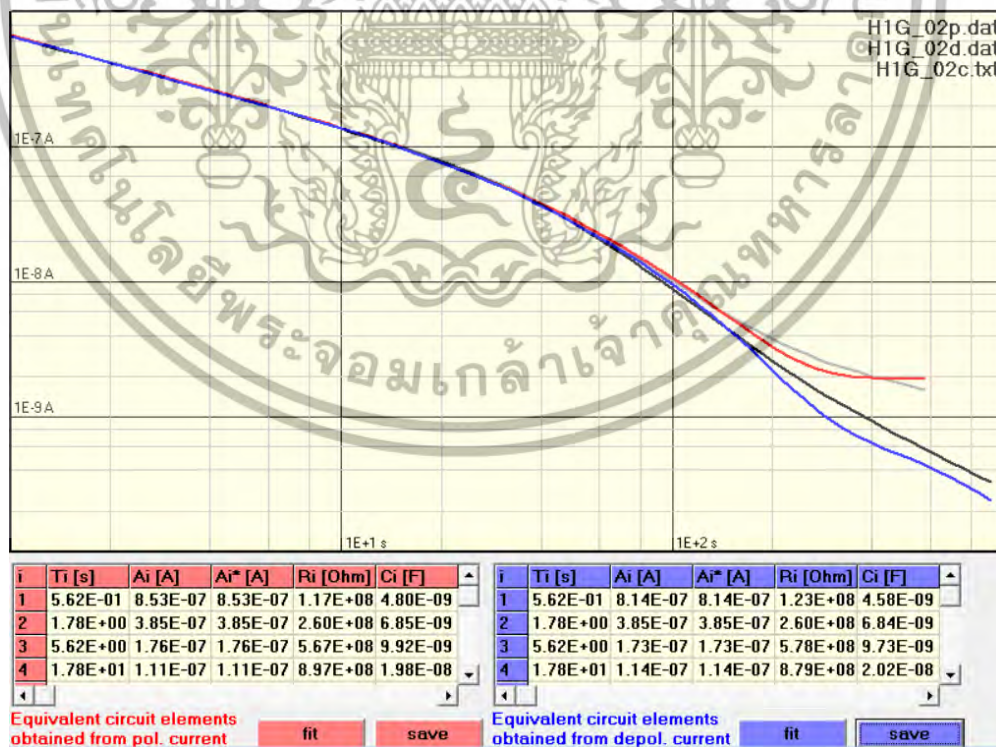
ตารางที่ 4.27 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
8.1380×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.2288×10^8	4.5763×10^{-9}
3.8482×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.5986×10^8	6.8431×10^{-9}
1.7305×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	5.7786×10^8	9.7314×10^{-9}
1.1375×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	8.7914×10^8	2.0227×10^{-8}
4.7643×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.0989×10^9	2.6792×10^{-8}
1.2183×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	5.6242×10^{10}	9.9986×10^{-9}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
8.1375×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.2289×10^8	4.5761×10^{-9}
3.8484×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.5985×10^8	6.8436×10^{-9}
1.7303×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	5.7793×10^8	9.7303×10^{-9}
1.1376×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	8.7906×10^8	2.0229×10^{-8}
4.7640×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.0991×10^9	2.6790×10^{-8}
1.2187×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	5.6227×10^{10}	1.0001×10^{-8}

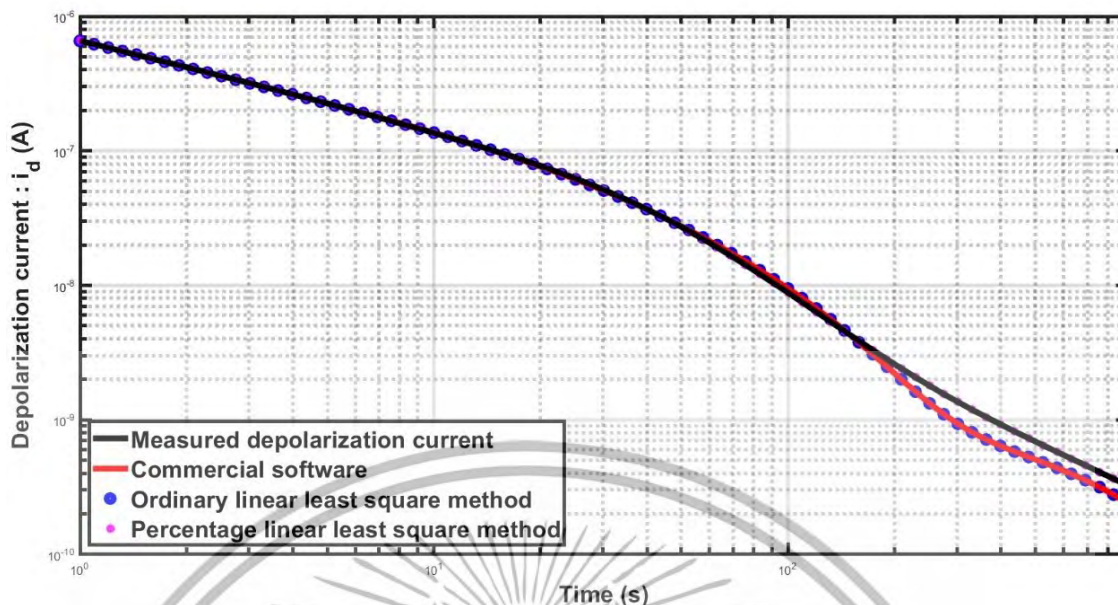
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.27 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
8.6611×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.1546×10^8	4.8705×10^{-9}
2.8482×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	3.5110×10^8	5.0648×10^{-9}
1.3974×10^{-7}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	7.1559×10^8	4.4191×10^{-9}
8.5825×10^{-8}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.1652×10^9	4.8263×10^{-9}
2.8281×10^{-8}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	3.5359×10^9	2.8281×10^{-9}
8.4108×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.1890×10^9	1.4957×10^{-8}
4.6875×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	2.1333×10^9	1.4823×10^{-8}
1.8408×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	5.4324×10^9	1.0352×10^{-8}
3.3961×10^{-9}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	2.9401×10^{10}	3.4012×10^{-9}
1.9161×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	5.0839×10^{10}	3.4978×10^{-9}
6.2805×10^{-10}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	1.3884×10^{11}	2.2777×10^{-9}
6.9180×10^{-10}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	6.9088×10^{10}	1.4474×10^{-8}



รูปที่ 4.25 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลารไรเซชันและกระแสดีโพลารไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9 ภาคสนาม ศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

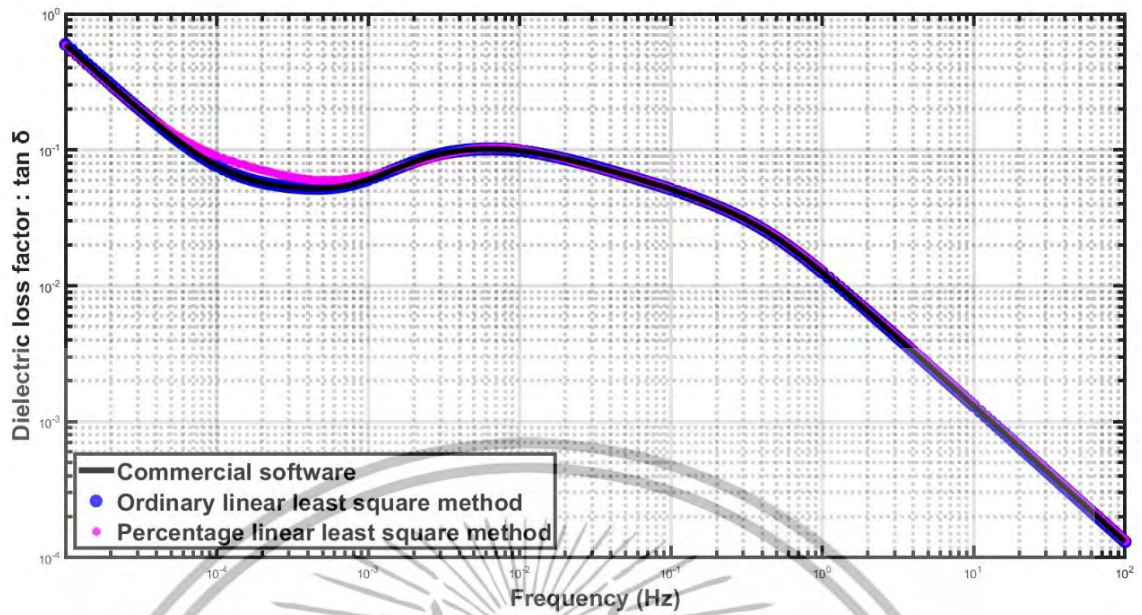


รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9

ตารางที่ 4.28 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
4.0928×10^{-2}	4.0928×10^{-2}	2.4202×10^{-2}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
1.2878×10^1	1.2870×10^1	1.2791×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.10 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลทริก กระแสไฟฟ้าไรเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10

ตารางที่ 4.29 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสไฟฟ้าไรเซชันและกระแสไฟฟ้าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลทริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลทริก : C_0 (F)
100	1100	2.7300×10^{10}	4.2930×10^{-7}

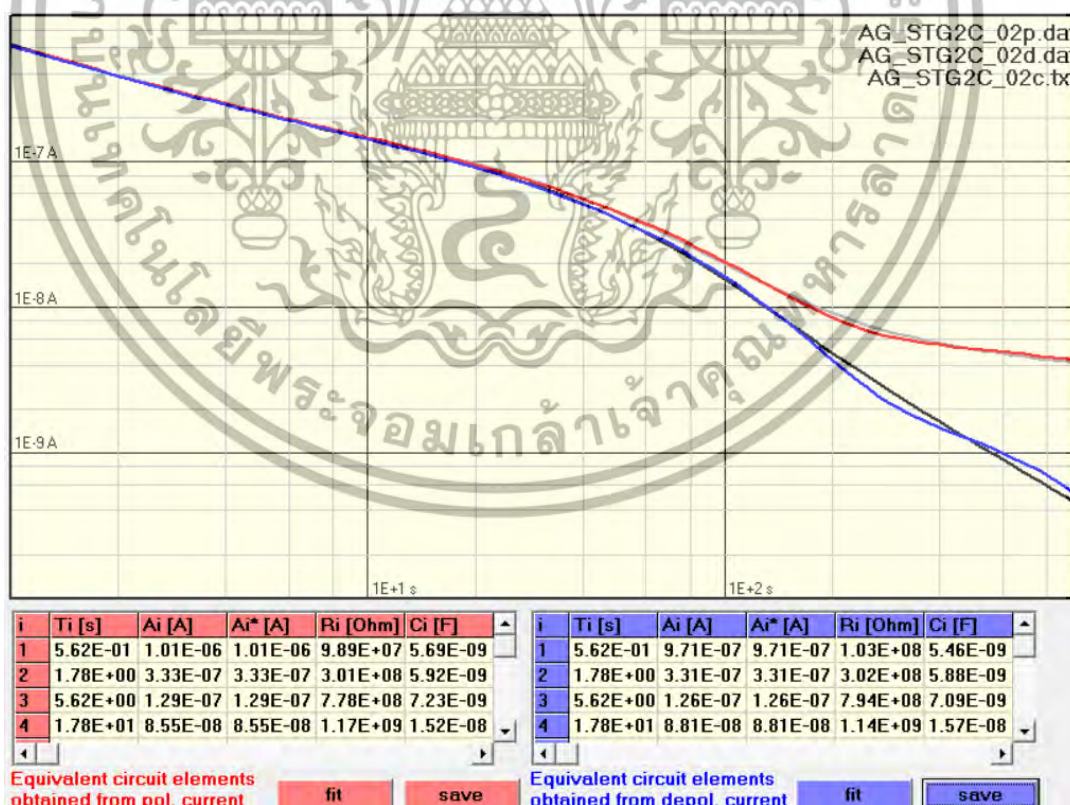
ตารางที่ 4.30 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
9.7103×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.0298×10^8	5.4605×10^{-9}
3.3087×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	3.0223×10^8	5.8839×10^{-9}
1.2602×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	7.9350×10^8	7.0868×10^{-9}
8.8095×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.1351×10^9	1.5666×10^{-8}
7.9404×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.2594×10^9	4.4652×10^{-8}
2.8897×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	2.9712×10^{10}	1.8926×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
9.7147×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.0294×10^8	5.4630×10^{-9}
3.3099×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	3.0212×10^8	5.8860×10^{-9}
1.2592×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	7.9416×10^8	7.0809×10^{-9}
8.8159×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.1343×10^9	1.5677×10^{-8}
7.9386×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.2597×10^9	4.4642×10^{-8}
2.8931×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	2.9678×10^{10}	1.8948×10^{-8}

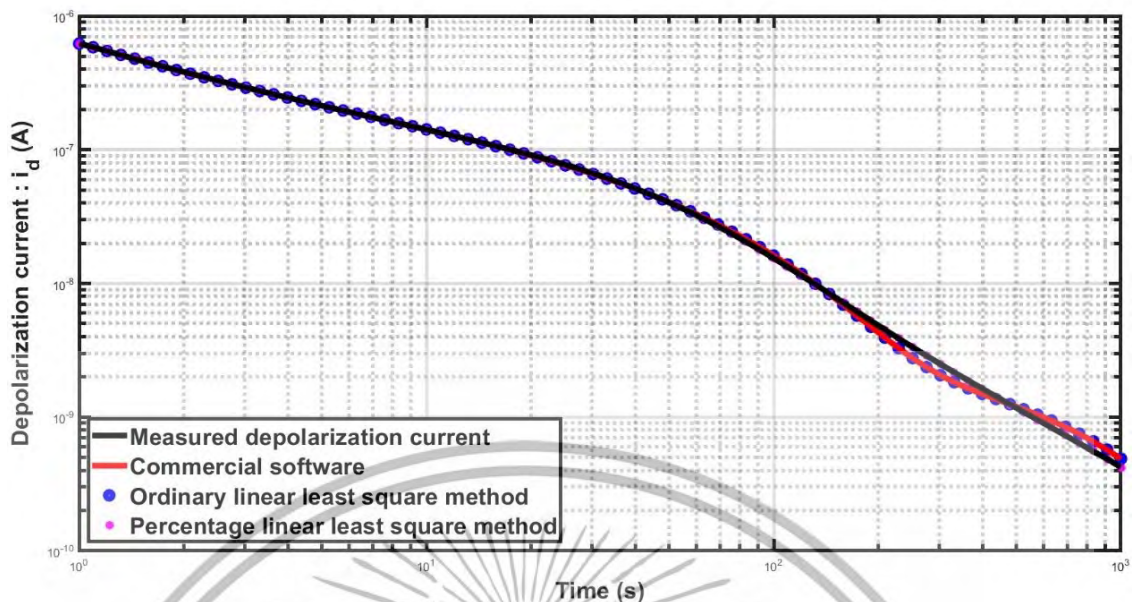
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.30 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.0100×10^{-6}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	9.9014×10^7	5.6794×10^{-9}
2.4505×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	4.0809×10^8	4.3576×10^{-9}
1.2983×10^{-7}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	7.7023×10^8	4.1056×10^{-9}
2.6412×10^{-8}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	3.7862×10^9	1.4852×10^{-9}
6.5886×10^{-8}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	1.5178×10^9	6.5886×10^{-9}
7.0820×10^{-9}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.4120×10^{10}	1.2594×10^{-9}
9.5579×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	1.0463×10^9	3.0225×10^{-8}
1.8233×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	5.4846×10^9	1.0253×10^{-8}
1.5057×10^{-8}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	6.6413×10^9	1.5057×10^{-8}
2.7591×10^{-9}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	3.5126×10^{10}	9.0027×10^{-9}
8.1780×10^{-10}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	8.1576×10^{10}	1.2258×10^{-8}



รูปที่ 4.28 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10 ภาคีสยาม ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

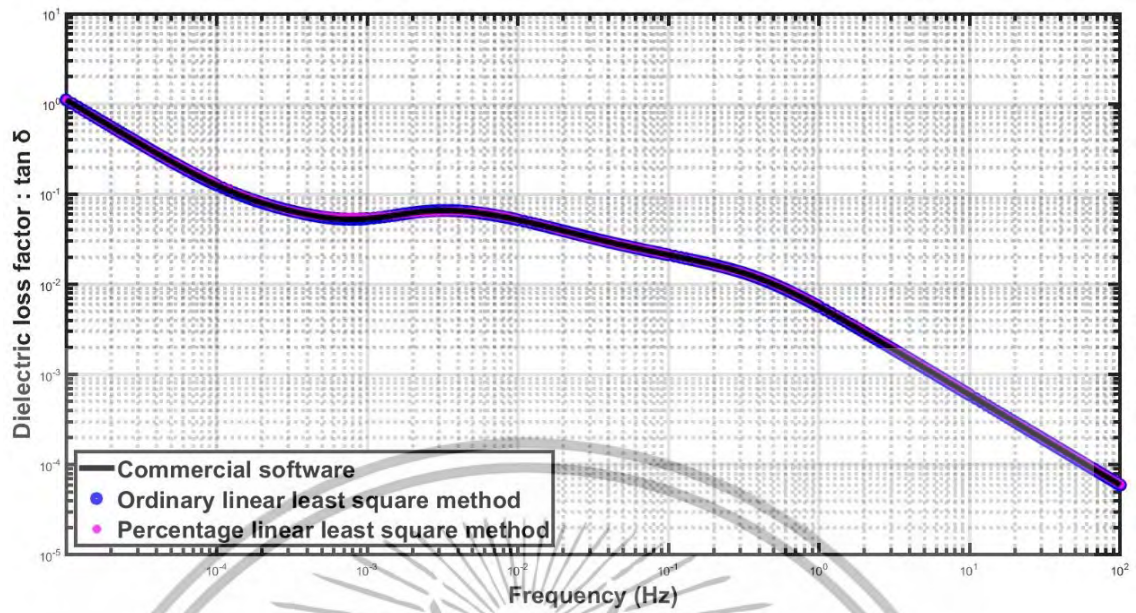


รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10

ตารางที่ 4.31 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพลาริเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
4.6411×10^{-2}	4.6394×10^{-2}	3.3456×10^{-2}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
7.1240×10^0	7.1347×10^0	2.7699×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.11 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีกริก กระแสดีโพลีไรเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11

ตารางที่ 4.32 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสดีโพลีไรเซชันและกระแสดีโพลีไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีกริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีกริก : C_0 (F)
50	1100	4.9400×10^{10}	4.3130×10^{-7}

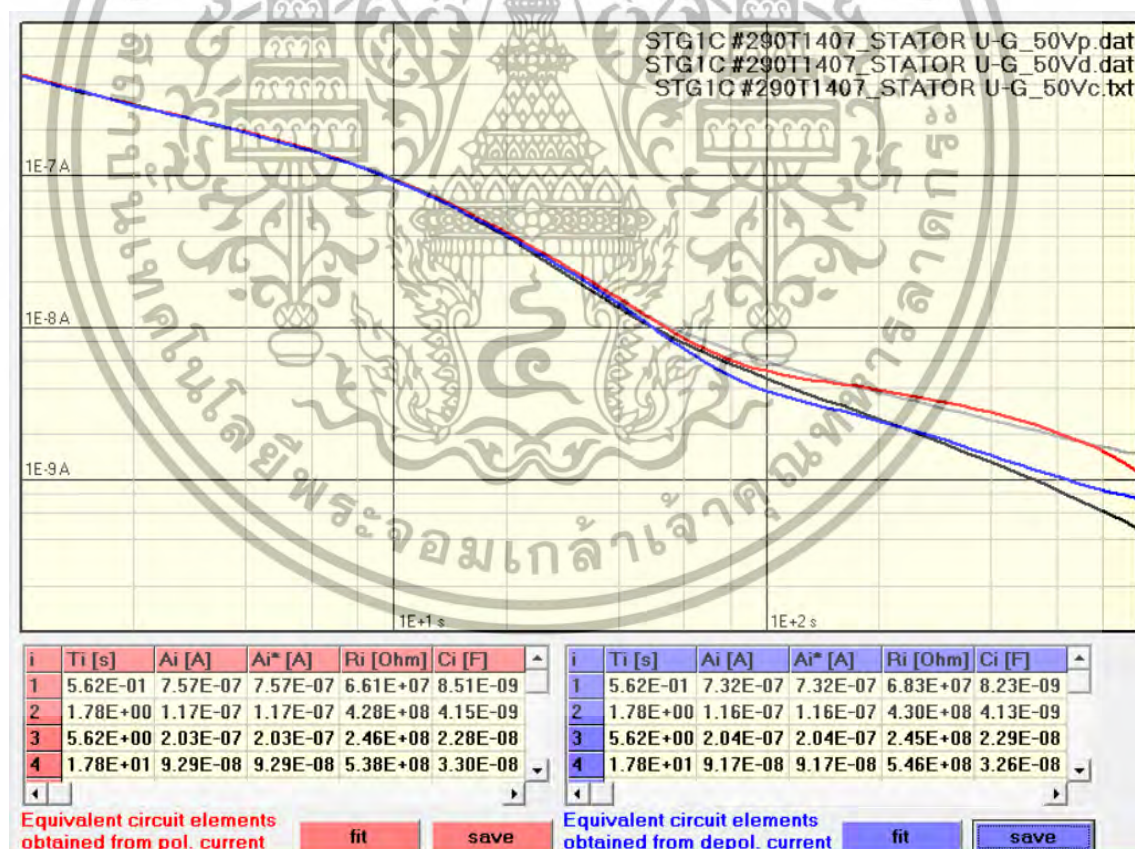
ตารางที่ 4.33 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
7.3177×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	6.8328×10^7	8.2300×10^{-9}
1.1616×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	4.3043×10^8	4.1314×10^{-9}
2.0380×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	2.4534×10^8	2.2921×10^{-8}
9.1652×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.4554×10^8	3.2597×10^{-8}
4.0236×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.2401×10^{10}	1.4340×10^{-8}
1.2693×10^{-9}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	1.8172×10^{10}	9.7860×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
7.3051×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	6.8446×10^7	8.2159×10^{-9}
1.1720×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	4.2664×10^8	4.1681×10^{-9}
2.0266×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	2.4672×10^8	2.2793×10^{-8}
9.2663×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.3959×10^8	3.2956×10^{-8}
2.1964×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	2.2717×10^{10}	7.8278×10^{-9}
2.6885×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	1.5968×10^{10}	3.5217×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

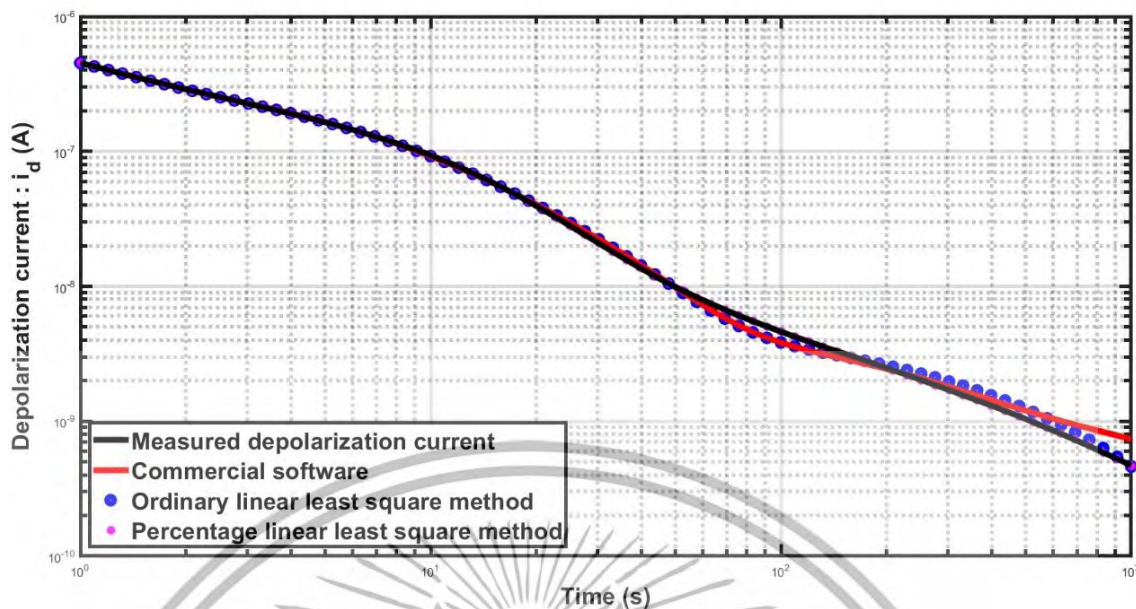
ตารางที่ 4.33 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
6.9323×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	7.2126×10^7	7.7966×10^{-9}
1.5630×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	3.1989×10^8	5.5590×10^{-9}
1.0538×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	4.7447×10^8	1.1852×10^{-8}
1.3719×10^{-7}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	3.6446×10^8	2.7438×10^{-8}
1.3839×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	3.6130×10^9	4.9219×10^{-9}
1.2973×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	3.8541×10^9	8.2050×10^{-9}
4.7912×10^{-9}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	1.0436×10^{10}	9.5827×10^{-9}
1.7842×10^{-9}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	2.7158×10^{10}	1.1644×10^{-8}
1.0548×10^{-9}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	3.1625×10^{10}	3.1621×10^{-8}



รูปที่ 4.31 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11 ภาคสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

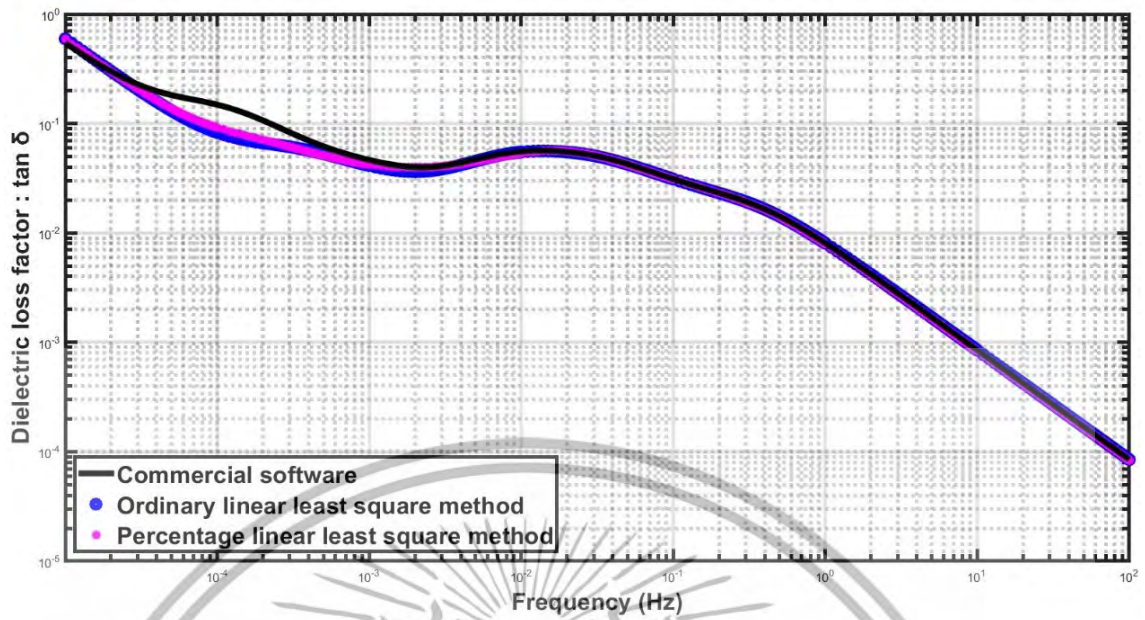


รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพล่าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11

ตารางที่ 4.34 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพล่าไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 11

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
5.6624×10^{-2}	5.5552×10^{-2}	2.6344×10^{-2}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
1.3594×10^1	9.0095×10^0	3.2594×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.12 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 12

ตารางที่ 4.35 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 12

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีทริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีทริก : C_0 (F)
100	1100	9.5800×10^{10}	1.9360×10^{-7}

ตารางที่ 4.36 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 12

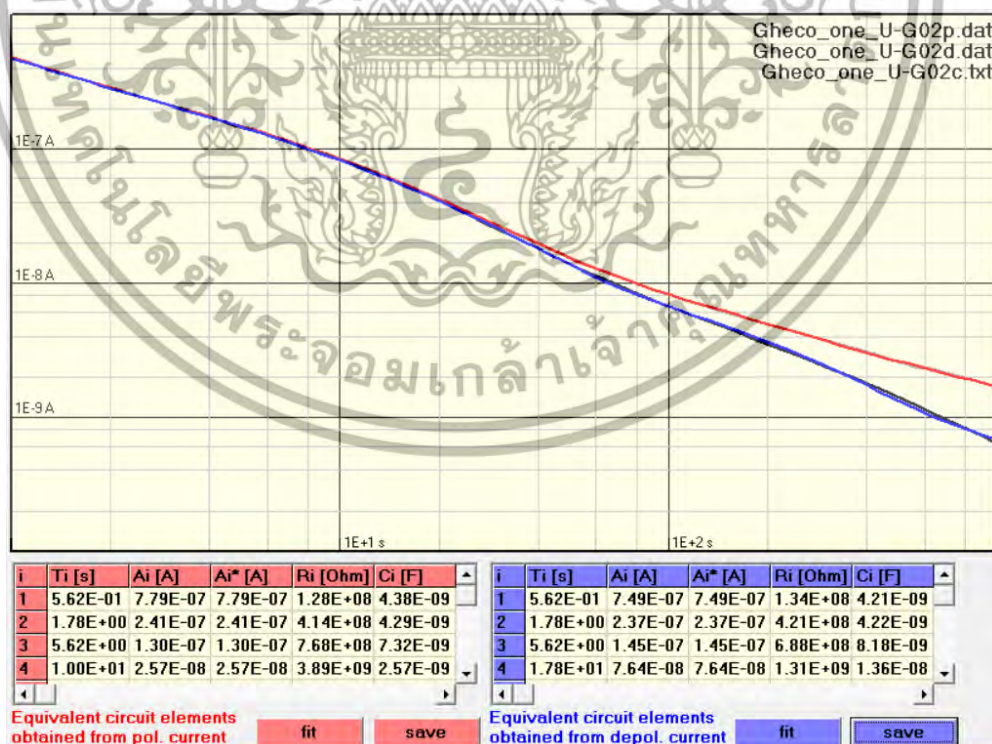
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
7.4875×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.3356×10^8	4.2106×10^{-9}
2.3728×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	4.2144×10^8	4.2195×10^{-9}
1.4544×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	6.8759×10^8	8.1784×10^{-9}
7.6392×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.3090×10^9	1.3585×10^{-8}
5.4713×10^{-9}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.8277×10^{10}	3.0767×10^{-9}
7.6655×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.3019×10^{10}	1.3660×10^{-8}
1.1403×10^{-9}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	4.0454×10^{10}	4.3958×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
7.4898×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.3351×10^8	4.2118×10^{-9}
2.3742×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	4.2119×10^8	4.2220×10^{-9}
1.4533×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	6.8811×10^8	8.1722×10^{-9}
7.6467×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.3078×10^9	1.3598×10^{-8}
5.4384×10^{-9}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.8388×10^{10}	3.0583×10^{-9}
7.6771×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.2999×10^{10}	1.3680×10^{-8}
1.1389×10^{-9}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	4.0504×10^{10}	4.3904×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

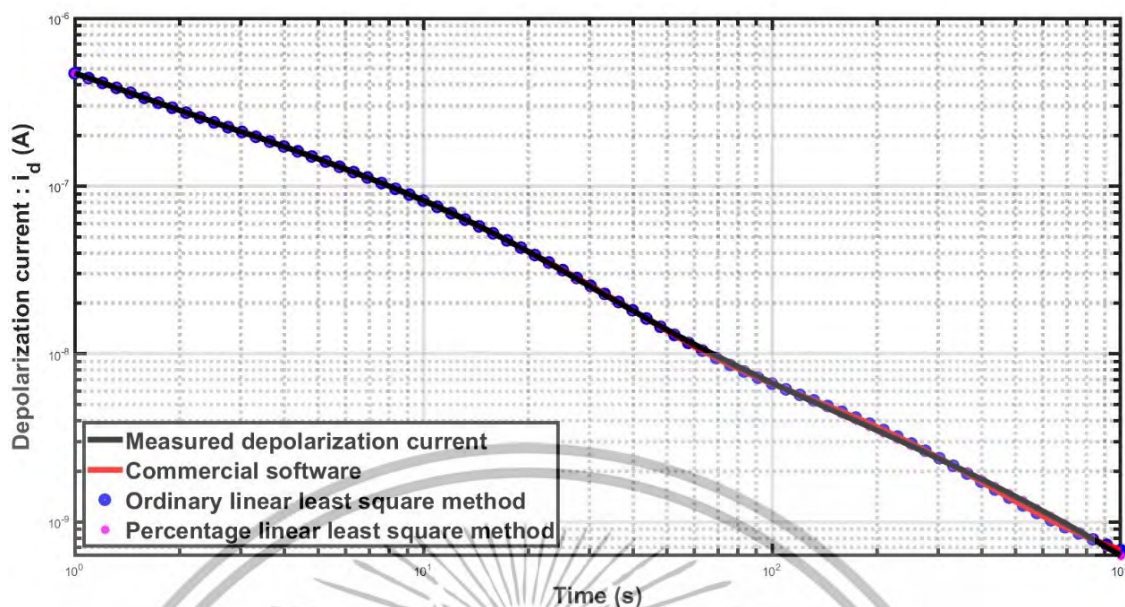
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.36 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
7.2179×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.3854×10^8	4.0589×10^{-9}
2.5662×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	3.8968×10^8	4.5634×10^{-9}
1.0727×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	9.3225×10^8	6.0321×10^{-9}
5.4836×10^{-8}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	1.8236×10^9	5.4836×10^{-9}
3.9586×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	2.5262×10^9	7.0394×10^{-9}
9.0333×10^{-9}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	1.1070×10^{10}	2.8566×10^{-9}
7.1510×10^{-9}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.3984×10^{10}	4.0213×10^{-9}
2.6463×10^{-9}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	3.7788×10^{10}	2.6463×10^{-9}
2.5111×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	3.9742×10^{10}	4.4746×10^{-9}
1.4285×10^{-9}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	6.7842×10^{10}	4.6613×10^{-9}
1.0942×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	7.8470×10^{10}	7.1663×10^{-9}
6.5704×10^{-10}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	7.0207×10^{10}	2.5329×10^{-8}



รูปที่ 4.34 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 12 ภาคสนามศึกษาเท่านั้น ไม่นิยนาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

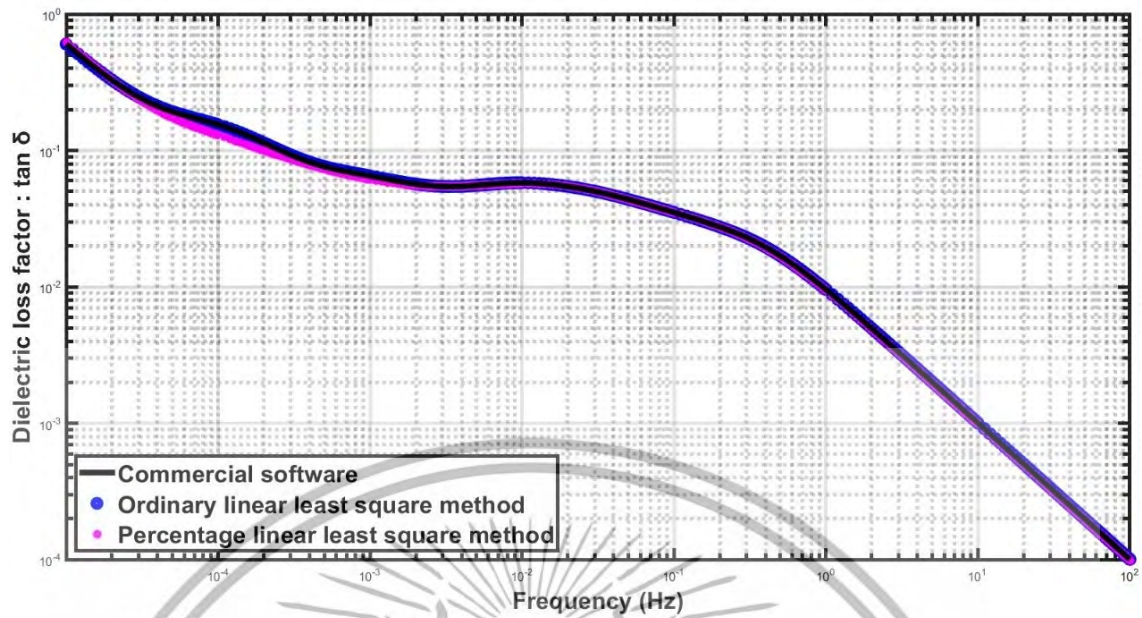


รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพล่าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 12

ตารางที่ 4.37 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพล่าไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 12

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
2.4518×10^{-2}	2.4487×10^{-2}	2.5346×10^{-2}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
2.5091×10^0	2.5195×10^0	1.1860×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทดสอบกรณีศึกษาที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.13 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีกริก กระแสดีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 13

ตารางที่ 4.38 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 13

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีกริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีกริก : C_0 (F)
200	2100	7.4500×10^9	3.5940×10^{-9}

ตารางที่ 4.39 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 13

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.3928×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	8.3584×10^9	6.7278×10^{-11}
9.0561×10^{-9}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.2085×10^{10}	8.0521×10^{-11}
5.1283×10^{-9}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	3.8999×10^{10}	1.4419×10^{-10}
1.5453×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.2943×10^{10}	1.3739×10^{-9}
7.7544×10^{-9}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.5792×10^{10}	2.1803×10^{-9}
7.7296×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	2.5874×10^{10}	6.8728×10^{-9}
2.7100×10^{-10}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	7.2039×10^{11}	7.8061×10^{-10}
8.4133×10^{-10}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	1.6474×10^{11}	1.0794×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.3933×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	8.3567×10^9	6.7292×10^{-11}
9.0542×10^{-9}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.2089×10^{10}	8.0505×10^{-11}
5.1295×10^{-9}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	3.8990×10^{10}	1.4423×10^{-10}
1.5452×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.2944×10^{10}	1.3739×10^{-9}
7.7549×10^{-9}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.5790×10^{10}	2.1805×10^{-9}
7.7294×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	2.5875×10^{10}	6.8726×10^{-9}

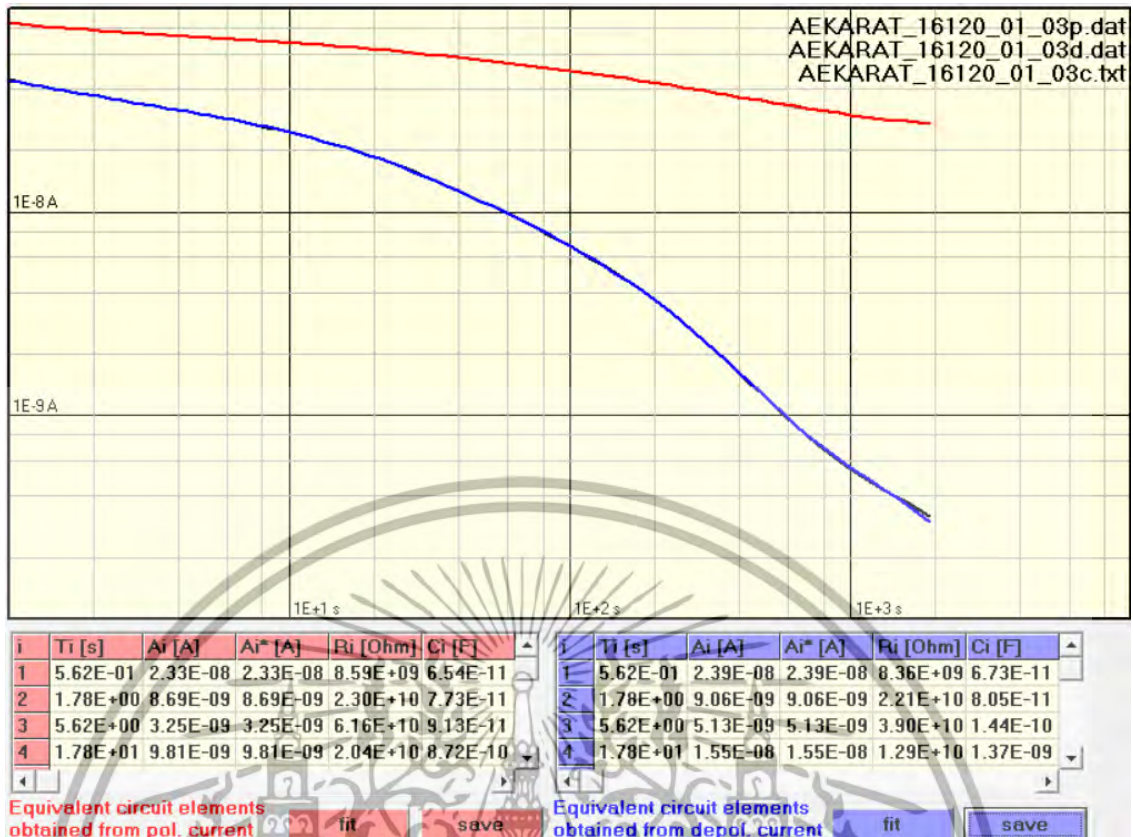
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

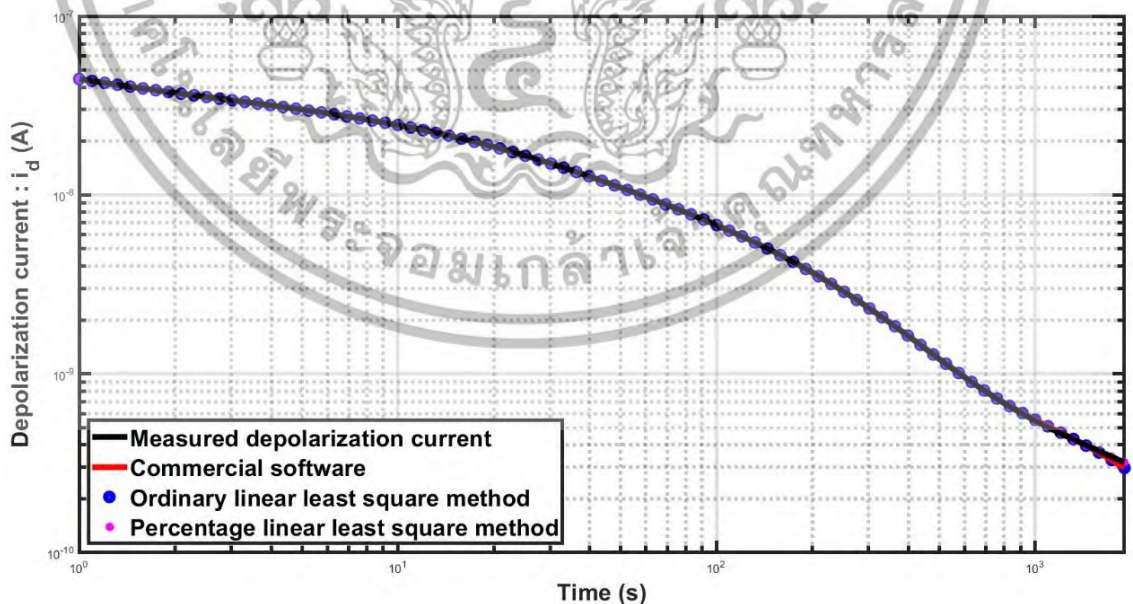
ตารางที่ 4.39 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบคำตอบ	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.7109×10^{-10}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	7.2015×10^{11}	7.8087×10^{-10}
8.4130×10^{-10}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	1.6475×10^{11}	1.0794×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบคำตอบ	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.4824×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	8.0566×10^9	6.9799×10^{-11}
6.9443×10^{-9}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.8801×10^{10}	6.1745×10^{-11}
4.0744×10^{-9}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	4.9087×10^{10}	6.4422×10^{-11}
5.7991×10^{-9}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	3.4488×10^{10}	2.8996×10^{-10}
8.8575×10^{-9}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	2.2580×10^{10}	7.8755×10^{-10}
6.9146×10^{-9}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	2.8924×10^{10}	1.0933×10^{-9}
1.6735×10^{-9}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.1951×10^{11}	4.7054×10^{-10}
4.5127×10^{-9}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	4.4319×10^{10}	2.2564×10^{-9}
4.7901×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	4.1752×10^{10}	4.2591×10^{-9}
1.4366×10^{-9}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	1.3904×10^{11}	2.2744×10^{-9}
2.7776×10^{-10}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	6.3187×10^{11}	1.5826×10^{-9}
5.0063×10^{-10}	3.1623×10^{-4}	3.1623×10^3	1.9386×10^{11}	1.6312×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 13 ภาคสนาม

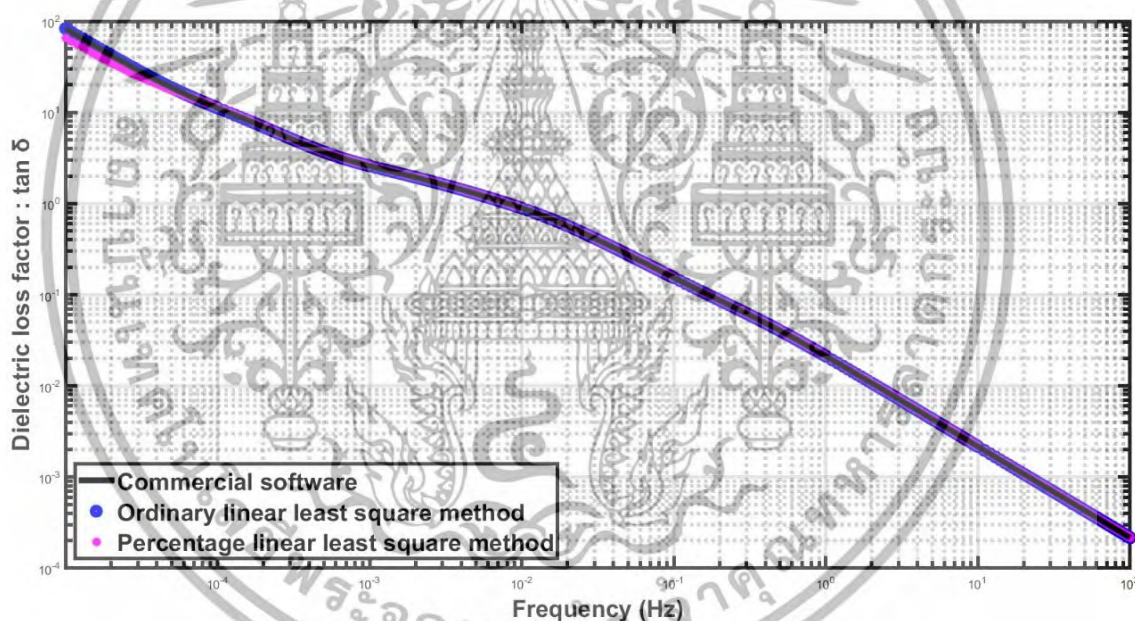


รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.40 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดิโพลาร์ไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 13

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
8.5868×10^{-3}	8.5869×10^{-3}	7.0589×10^{-3}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
9.7289×10^{-1}	9.7317×10^{-1}	7.7792×10^{-2}



รูปที่ 4.39 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.14 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีกริก กระแสไฟฟ้าไรเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 14

ตารางที่ 4.41 องค์ประกอบทดสอบการวัดกระแสไฟฟ้าไรเซชันและกระแสไฟฟ้าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 14

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีกริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีกริก : C_0 (F)
200	2100	8.4700×10^9	3.0400×10^{-9}

ตารางที่ 4.42 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 14

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบทดสอบ	
			R_i (Ω)	C_i (F)
8.5462×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	2.3402×10^9	2.4029×10^{-10}
3.2854×10^{-8}	1.0000×10^0	1.0000×10^0	6.0875×10^9	1.6427×10^{-10}
1.9817×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.0092×10^9	1.7620×10^{-9}
2.3962×10^{-7}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	8.3465×10^8	3.7888×10^{-9}
3.3534×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	5.9641×10^8	9.4288×10^{-9}
1.0161×10^{-7}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	1.9683×10^9	5.0804×10^{-9}
1.0948×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.8269×10^9	9.7340×10^{-9}
3.6032×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	5.5507×10^9	1.0131×10^{-8}
1.3289×10^{-8}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.5049×10^{10}	1.1816×10^{-8}
4.6378×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	4.2094×10^{10}	1.3359×10^{-8}
2.1173×10^{-9}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	6.5460×10^{10}	2.7166×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบทดสอบ	
			R_i (Ω)	C_i (F)
8.5295×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	2.3448×10^9	2.3983×10^{-10}
3.3024×10^{-8}	1.0000×10^0	1.0000×10^0	6.0561×10^9	1.6512×10^{-10}
1.9813×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.0094×10^9	1.7617×10^{-9}

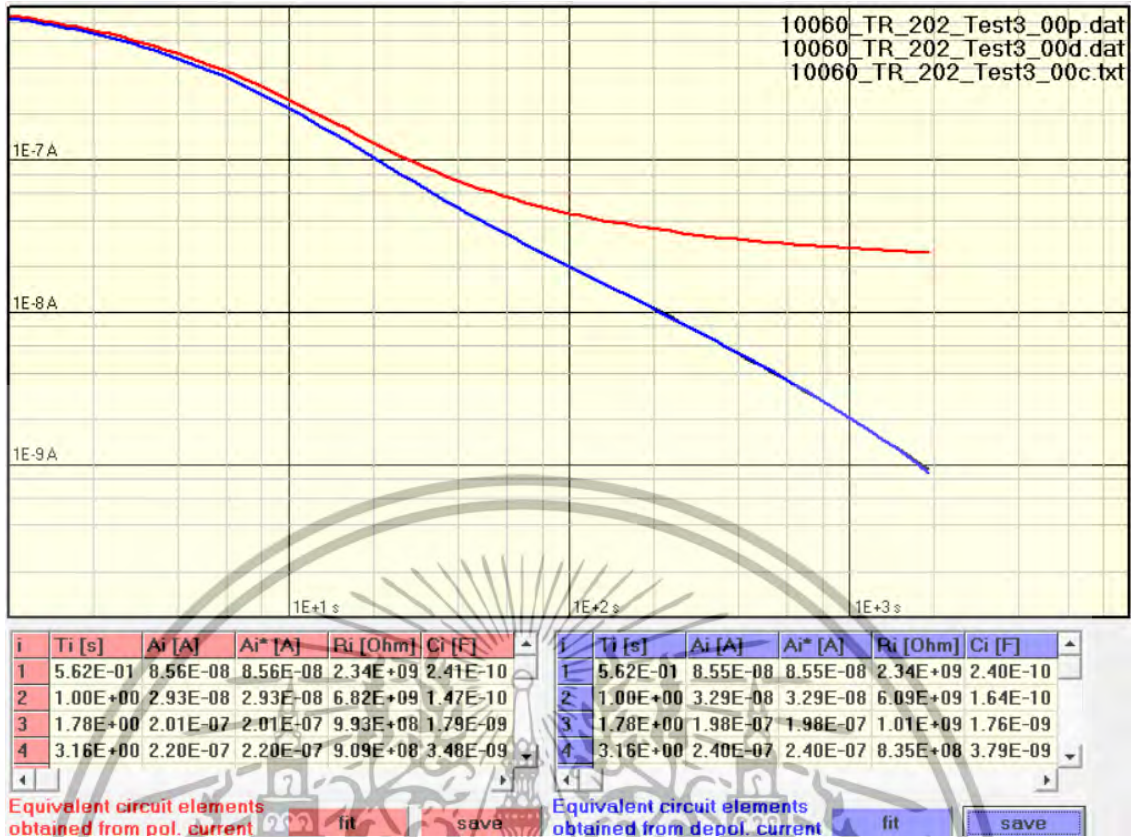
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

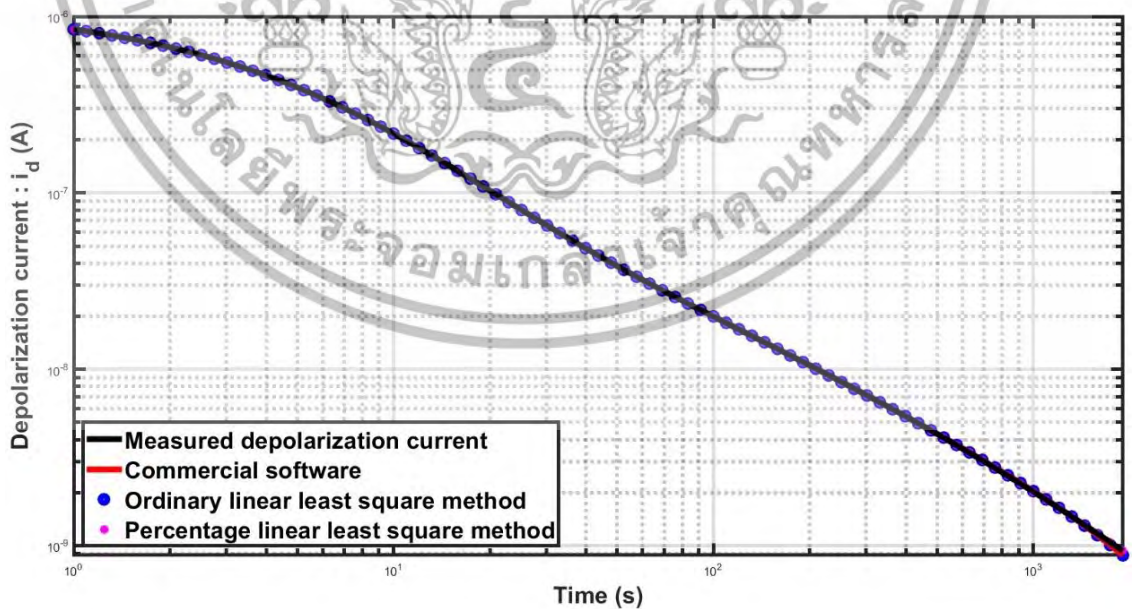
ตารางที่ 4.42 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบคำตอบ	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.3953×10^{-7}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	8.3497×10^8	3.7873×10^{-9}
3.3546×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	5.9620×10^8	9.4321×10^{-9}
1.0154×10^{-7}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	1.9696×10^9	5.0771×10^{-9}
1.0949×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.8266×10^9	9.7356×10^{-9}
3.6031×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	5.5508×10^9	1.0131×10^{-8}
1.3290×10^{-8}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.5049×10^{10}	1.1816×10^{-8}
4.6377×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	4.2094×10^{10}	1.3359×10^{-8}
2.1174×10^{-9}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	6.5459×10^{10}	2.7166×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบคำตอบ	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.8531×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	7.0099×10^9	8.0221×10^{-11}
1.2138×10^{-7}	1.0000×10^0	1.0000×10^0	1.6478×10^9	6.0688×10^{-10}
9.9907×10^{-8}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.0019×10^9	8.8831×10^{-10}
3.3314×10^{-7}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	6.0035×10^8	5.2674×10^{-9}
2.5388×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	7.8776×10^8	7.1385×10^{-9}
1.6814×10^{-7}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	1.1895×10^9	8.4070×10^{-9}
5.9136×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	3.3820×10^9	5.2580×10^{-9}
3.3918×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	5.8965×10^9	5.3630×10^{-9}
1.6384×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.2207×10^{10}	4.6068×10^{-9}
1.0236×10^{-8}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	1.9539×10^{10}	5.1181×10^{-9}
7.5960×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	2.6330×10^{10}	6.7539×10^{-9}
3.0612×10^{-9}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	6.5248×10^{10}	4.8466×10^{-9}
3.9855×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	4.8984×10^{10}	1.1480×10^{-8}
1.2061×10^{-9}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	1.1491×10^{11}	1.5475×10^{-8}
6.8898×10^{-10}	3.1623×10^{-4}	3.1623×10^3	1.4086×10^{11}	2.2450×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



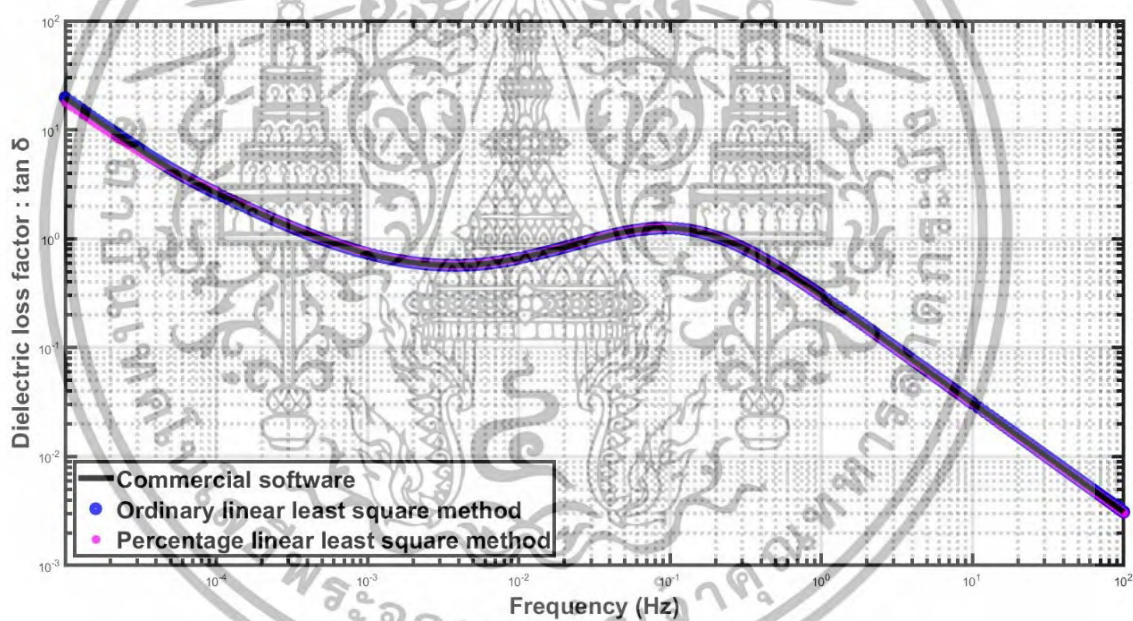
รูปที่ 4.40 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบปริญญาที่ 14 ภาคสนาม



รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบปริญญาที่ 14 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.43 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดิโพลาร์โรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 14

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
6.5961×10^{-3}	6.5962×10^{-3}	6.9304×10^{-3}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
8.0184×10^{-1}	8.0176×10^{-1}	5.4264×10^{-2}



รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.15 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีกริก กระแสดีโพลาริเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 15

ตารางที่ 4.44 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 15

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีกริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีกริก : C_0 (F)
1000	3100	1.3100×10^{11}	5.8430×10^{-9}

ตารางที่ 4.45 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 15

ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.4032×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	4.1610×10^{10}	1.3514×10^{-11}
5.6556×10^{-9}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.7681×10^{11}	1.0057×10^{-11}
7.4817×10^{-9}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.3366×10^{11}	4.2073×10^{-11}
1.9364×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.1643×10^{10}	3.4434×10^{-10}
5.2310×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	1.9117×10^{10}	1.6542×10^{-9}
3.5354×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.8286×10^{10}	1.9881×10^{-9}
8.2453×10^{-8}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	1.2128×10^{10}	8.2453×10^{-9}
8.1697×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.2240×10^{11}	1.4528×10^{-9}
4.6282×10^{-8}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	2.1606×10^{10}	1.4636×10^{-8}
1.2370×10^{-8}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	7.7196×10^{10}	1.2954×10^{-8}
4.9742×10^{-9}	3.1623×10^{-4}	3.1623×10^3	1.2561×10^{11}	2.5175×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.4065×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	4.1553×10^{10}	1.3533×10^{-11}
5.6353×10^{-9}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.7745×10^{11}	1.0021×10^{-11}
7.4954×10^{-9}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.3341×10^{11}	4.2150×10^{-11}

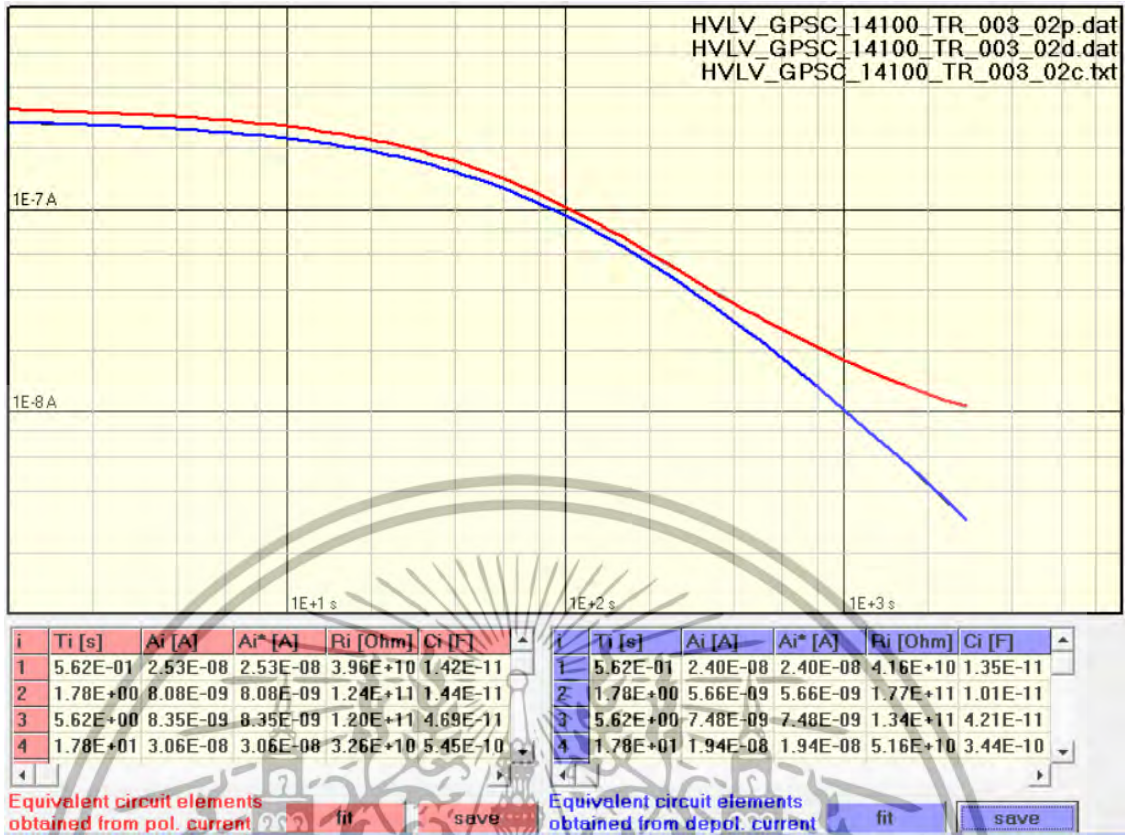
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

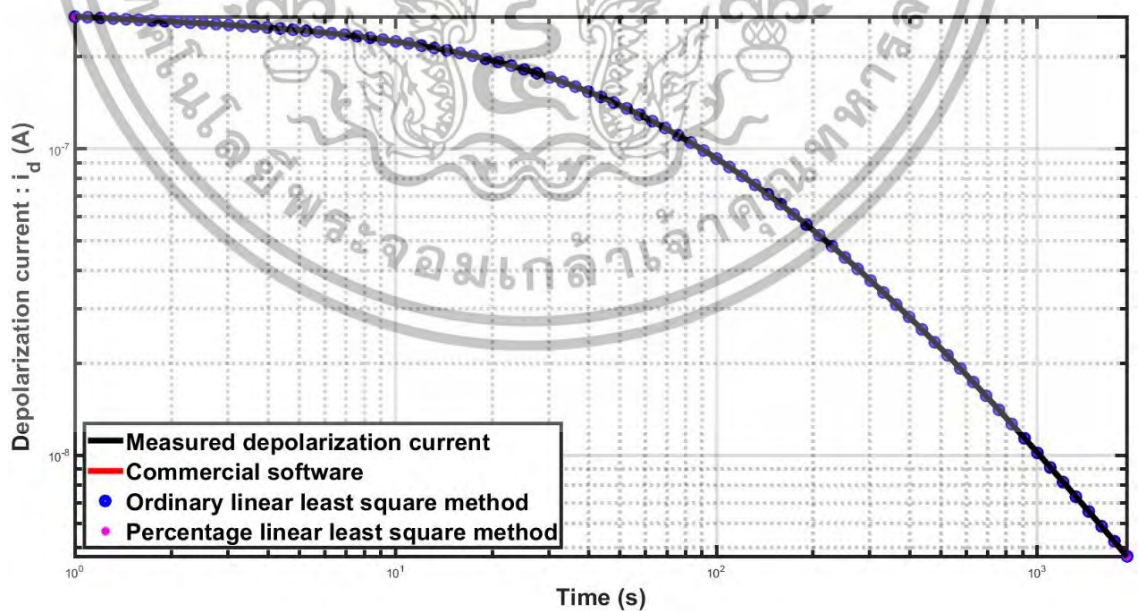
ตารางที่ 4.45 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบคำตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.9361×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.1649×10^{10}	3.4430×10^{-10}
5.2286×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	1.9126×10^{10}	1.6534×10^{-9}
3.5398×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.8250×10^{10}	1.9906×10^{-9}
8.2414×10^{-8}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	1.2134×10^{10}	8.2414×10^{-9}
8.1943×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.2204×10^{11}	1.4572×10^{-9}
4.6272×10^{-8}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	2.1610×10^{10}	1.4633×10^{-8}
1.2372×10^{-8}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	7.7187×10^{10}	1.2956×10^{-8}
4.9738×10^{-9}	3.1623×10^{-4}	3.1623×10^3	1.2562×10^{11}	2.5173×10^{-8}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบคำตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
1.9408×10^{-8}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	5.1525×10^{10}	1.0914×10^{-11}
1.0098×10^{-8}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	9.9032×10^{10}	1.7957×10^{-11}
4.5731×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	2.1867×10^{10}	8.1322×10^{-10}
9.6501×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.0363×10^{10}	5.4266×10^{-9}
2.7526×10^{-8}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	3.6330×10^{10}	2.7526×10^{-9}
5.1092×10^{-8}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.9573×10^{10}	9.0855×10^{-9}
1.6076×10^{-8}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	6.2203×10^{10}	5.0838×10^{-9}
1.7702×10^{-8}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	5.6264×10^{10}	9.9948×10^{-9}
5.8686×10^{-9}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	1.6272×10^{11}	6.1454×10^{-9}
5.7343×10^{-9}	3.1623×10^{-4}	3.1623×10^3	1.0896×10^{11}	2.9022×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



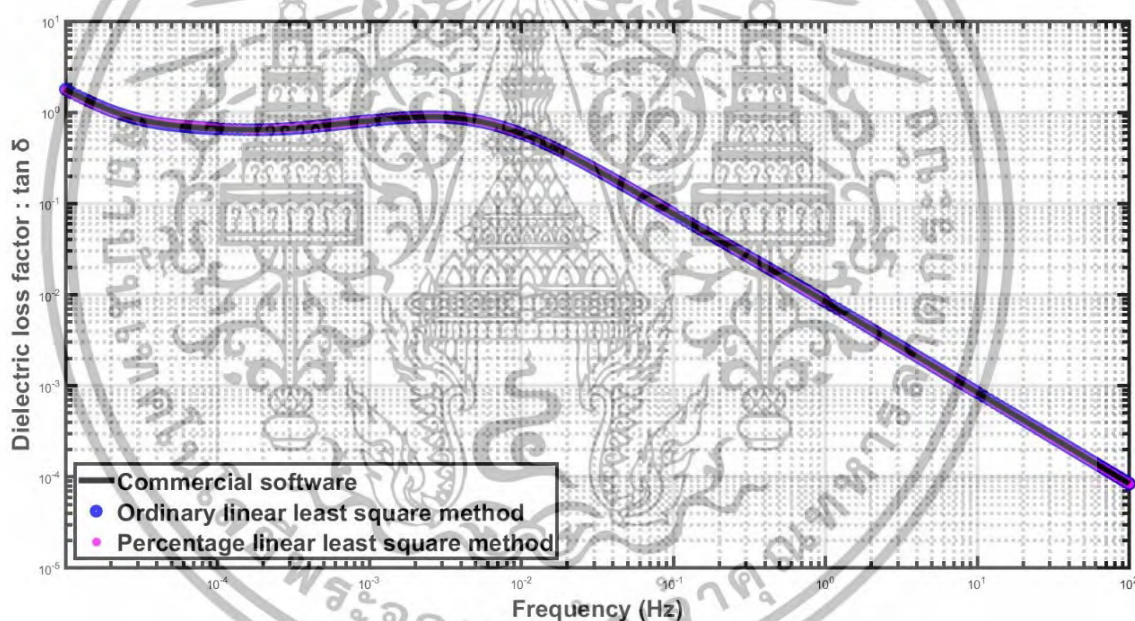
รูปที่ 4.43 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 15 ภาคสนาม



รูปที่ 4.44 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 15 ที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.46 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดิโพลาร์ไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 15

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
3.9479×10^{-3}	3.9484×10^{-3}	8.4784×10^{-3}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
1.7340×10^{-1}	1.7351×10^{-1}	7.9266×10^{-2}



รูปที่ 4.45 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.16 การหาค่าประกอบของแบบจำลองไดโพลีกริก กระแสไฟฟ้าไรเซชัน และค่าตัวประกอบความสูญเสียไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 16

ตารางที่ 4.47 องค์ประกอบการทดสอบการวัดกระแสไฟฟ้าไรเซชันและกระแสไฟฟ้าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 16

แรงดันไฟฟ้าทดสอบ : U_0 (V)	เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ : t_c (s)	ค่าความต้านทานวัสดุไดโพลีกริก : R_0 (Ω)	ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดโพลีกริก : C_0 (F)
1000	3100	2.4300×10^9	2.1370×10^{-8}

ตารางที่ 4.48 ผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโพลีกริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 16

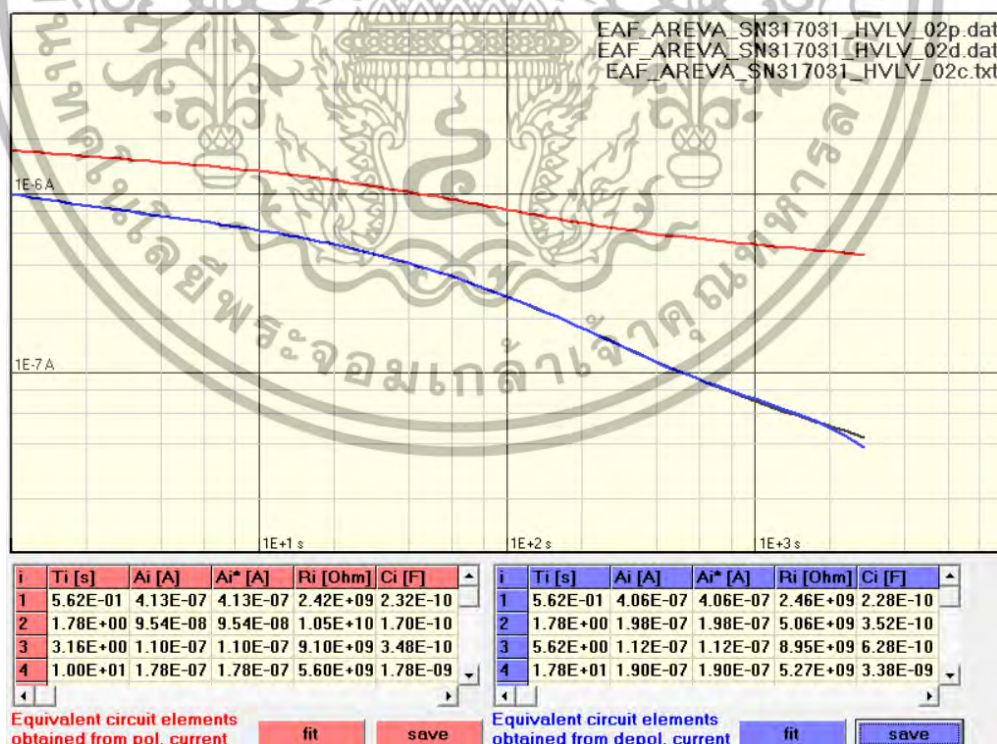
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
4.0575×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	2.4646×10^9	2.2817×10^{-10}
1.9781×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	5.0554×10^9	3.5176×10^{-10}
1.1176×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	8.9480×10^9	6.2846×10^{-10}
1.8986×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.2672×10^9	3.3762×10^{-9}
2.1569×10^{-7}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	4.6363×10^9	1.2129×10^{-8}
2.1207×10^{-7}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	4.7155×10^9	3.7712×10^{-8}
2.3713×10^{-8}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	4.2001×10^{10}	1.3389×10^{-8}
9.1775×10^{-8}	3.1623×10^{-4}	3.1623×10^3	6.8080×10^9	4.6450×10^{-7}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
4.0572×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	2.4647×10^9	2.2816×10^{-10}
1.9780×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	5.0555×10^9	3.5175×10^{-10}
1.1178×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	8.9463×10^9	6.2857×10^{-10}
1.8983×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.2678×10^9	3.3758×10^{-9}
2.1571×10^{-7}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	4.6359×10^9	1.2130×10^{-8}
2.1206×10^{-7}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	4.7157×10^9	3.7710×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

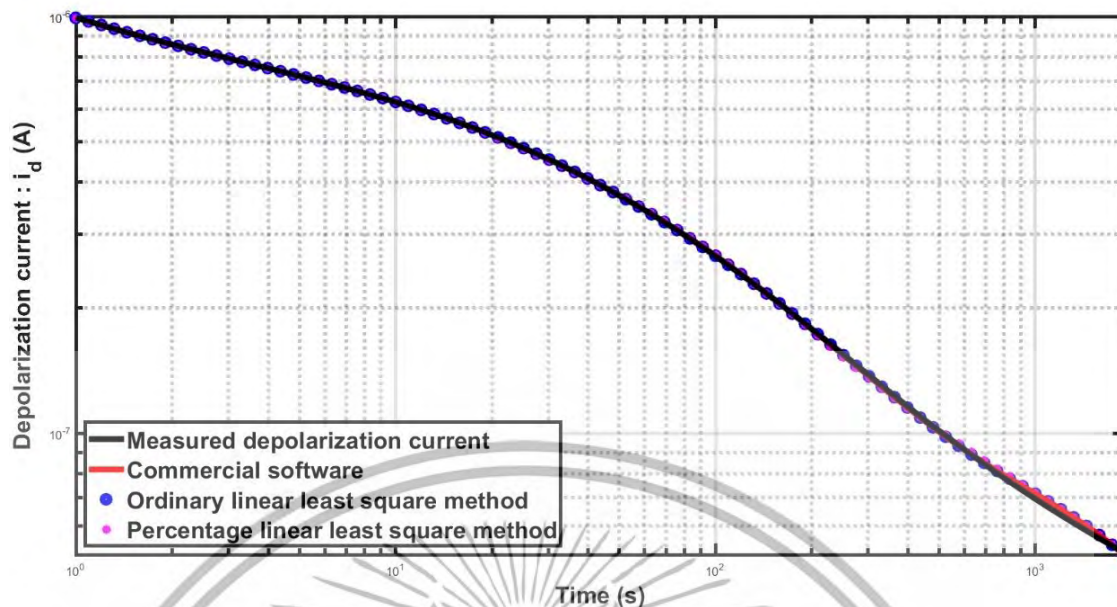
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.48 (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
2.3718×10^{-8}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	4.1992×10^{10}	1.3392×10^{-8}
9.1774×10^{-8}	3.1623×10^{-4}	3.1623×10^3	6.8080×10^9	4.6449×10^{-7}
วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์				
สัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล : A_i	สัมประสิทธิ์การเก็บพลังงาน : α	ค่าคงที่เวลาตอบสนอง : τ_i (s)	องค์ประกอบการตอบสนอง	
			R_i (Ω)	C_i (F)
3.7494×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	2.6671×10^9	2.1084×10^{-10}
2.3219×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	4.3067×10^9	4.1291×10^{-10}
2.0086×10^{-7}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	4.9787×10^9	2.0086×10^{-9}
1.6314×10^{-7}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	6.1295×10^9	5.1591×10^{-9}
2.6721×10^{-7}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	3.7424×10^9	2.6721×10^{-8}
9.9139×10^{-8}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	1.0086×10^{10}	3.1352×10^{-8}
9.3119×10^{-8}	3.1623×10^{-4}	3.1623×10^3	6.7097×10^9	4.7130×10^{-7}



รูปที่ 4.46 ผลลัพธ์การทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 16 ภาคีสยาม ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

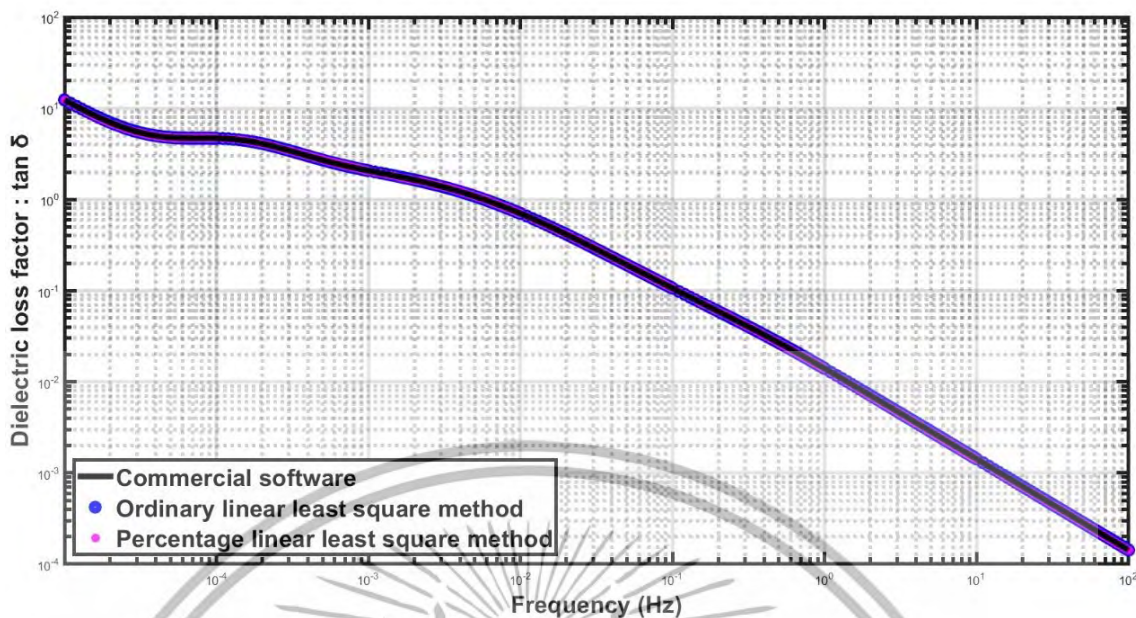


รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระแสดีโพล่าไรเซชันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 16

ตารางที่ 4.49 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสดีโพล่าไรเซชันจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 16

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
2.8984×10^{-2}	2.8984×10^{-2}	3.9954×10^{-2}
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย		
ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
1.9296×10^0	1.9297×10^0	1.9225×10^{-2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกรณีศึกษาที่ 16

ตารางที่ 4.50 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์ของกระแสไฟฟ้าโรเซชันจากกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบทั้ง 16 กรณี

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์			
ลำดับกรณีศึกษา	ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์
1	2.5688×10^{-2}	2.5663×10^{-2}	2.4902×10^{-2}
2	7.6491×10^{-4}	7.6485×10^{-4}	2.9245×10^{-4}
3	5.1845×10^{-2}	5.1828×10^{-2}	5.8238×10^{-2}
4	9.8655×10^{-1}	9.8819×10^{-1}	1.8918×10^0
5	1.6587×10^{-1}	1.6584×10^{-1}	1.5483×10^{-1}
6	N/A	N/A	3.3313×10^{-1}
7	9.4637×10^{-2}	9.4638×10^{-2}	1.0161×10^{-1}
8	2.9308×10^{-2}	2.9308×10^{-2}	2.5307×10^{-2}
9	4.0928×10^{-2}	4.0928×10^{-2}	2.4202×10^{-2}
10	4.6411×10^{-2}	4.6394×10^{-2}	3.3456×10^{-2}
11	5.6624×10^{-2}	5.5552×10^{-2}	2.6344×10^{-2}
12	2.4518×10^{-2}	2.4487×10^{-2}	2.5346×10^{-2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ขออนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.50 (ต่อ)

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์			
ลำดับ กรณีศึกษา	ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบ พื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบ เปอร์เซ็นต์
13	8.5868×10^{-3}	8.5869×10^{-3}	7.0589×10^{-3}
14	6.5961×10^{-3}	6.5962×10^{-3}	6.9304×10^{-3}
15	3.9479×10^{-3}	3.9484×10^{-3}	8.4784×10^{-3}
16	2.8984×10^{-2}	2.8984×10^{-2}	3.9954×10^{-2}

ตารางที่ 4.51 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไรเซนชันจากกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบทั้ง 16 กรณี

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย			
ลำดับ กรณีศึกษา	ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบ พื้นฐาน	วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบ เปอร์เซ็นต์
1	3.4947×10^{-1}	3.4219×10^{-1}	1.2406×10^{-1}
2	2.7007×10^1	2.6999×10^1	2.0769×10^0
3	2.2025×10^0	2.2071×10^0	5.8930×10^{-1}
4	2.2385×10^1	2.1767×10^1	8.1292×10^0
5	3.1970×10^0	3.1934×10^0	9.2343×10^{-1}
6	N/A	N/A	4.1612×10^0
7	2.5937×10^0	2.5939×10^0	5.2441×10^{-1}
8	6.8372×10^0	6.8414×10^0	1.0861×10^{-1}
9	1.2878×10^1	1.2870×10^1	1.2791×10^{-1}
10	7.1240×10^0	7.1347×10^0	2.7699×10^{-1}
11	1.3594×10^1	9.0095×10^0	3.2594×10^{-1}
12	2.5091×10^0	2.5195×10^0	1.1860×10^{-1}
13	9.7289×10^{-1}	9.7317×10^{-1}	7.7792×10^{-2}
14	8.0184×10^{-1}	8.0176×10^{-1}	5.4264×10^{-2}
15	1.7340×10^{-1}	1.7351×10^{-1}	7.9266×10^{-2}
16	1.9296×10^0	1.9297×10^0	1.9225×10^0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การอภิปรายผลลัพธ์องค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริก กระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกจากกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี

จากการหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์จากกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี ผลลัพธ์องค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกดังแสดงได้จากรูปที่ 4.1 – 4.48 และ ตารางที่ 4.41 – 4.42 สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ดังกล่าวตามประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบได้ดังนี้

4.2.1 กรณีศึกษาที่ 1 - 2 : ปลอกฉนวนตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง

กรณีศึกษาของอุปกรณ์ประเภทปลอกฉนวนตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง ผลลัพธ์กระแสดีโพลาริเซชันจากการคำนวณด้วยองค์ประกอบของแบบจำลองในกรณีศึกษาที่ 1 ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความใกล้เคียงกันและไม่มีข้อแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันที่แม่นยำใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ทำการบันทึกจากการทดสอบภาคสนามมากกว่าสองวิธีดังกล่าวโดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยที่มีค่าต่ำกว่า ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าให้ผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่หาจากองค์ประกอบแบบจำลองด้วยวิธีการของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์เป็นผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำกว่าสองวิธีดังกล่าว ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.3

กรณีศึกษาที่ 2 ผลลัพธ์กระแสดีโพลาริเซชันจากการคำนวณด้วยองค์ประกอบของแบบจำลองจากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความเบี่ยงเบนในช่วงเวลาท้ายของการวัด และ ณ จุดที่กระแสดีโพลาริเซชันมีค่าต่ำ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์กระแสดีโพลาริเซชันที่แม่นยำใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ทำการบันทึกมากกว่าสองวิธีดังกล่าวอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยจะมีค่าที่ต่ำกว่าเช่นกัน ทำให้ผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่หาจากองค์ประกอบแบบจำลองด้วยวิธีการของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์เป็นผลลัพธ์ที่มีความแตกต่างจากสองวิธีดังกล่าวอย่างชัดเจน ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.6

4.2.2 กรณีศึกษาที่ 3 - 6 : สายเคเบิลแรงดันสูง

กรณีศึกษาของอุปกรณ์ประเภทสายเคเบิลแรงดันสูง ผลลัพธ์กระแสดีโพลาริเซชันจากการคำนวณด้วยองค์ประกอบของแบบจำลองในกรณีศึกษาที่ 3 ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือทดสอบ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความใกล้เคียงกัน และไม่มีข้อแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์ของกระแสไฟฟ้าโรเซชันที่แม่นยำใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ทำการบันทึกจากการทดสอบภาคสนามมากกว่าสองวิธีดังกล่าวโดยพิจารณาจาก ค่าราคที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่าราคที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยที่มีค่าต่ำกว่า ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าให้ผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่หาจากองค์ประกอบแบบจำลองด้วยวิธีการของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์เป็นผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำกว่าสองวิธีดังกล่าว ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.9

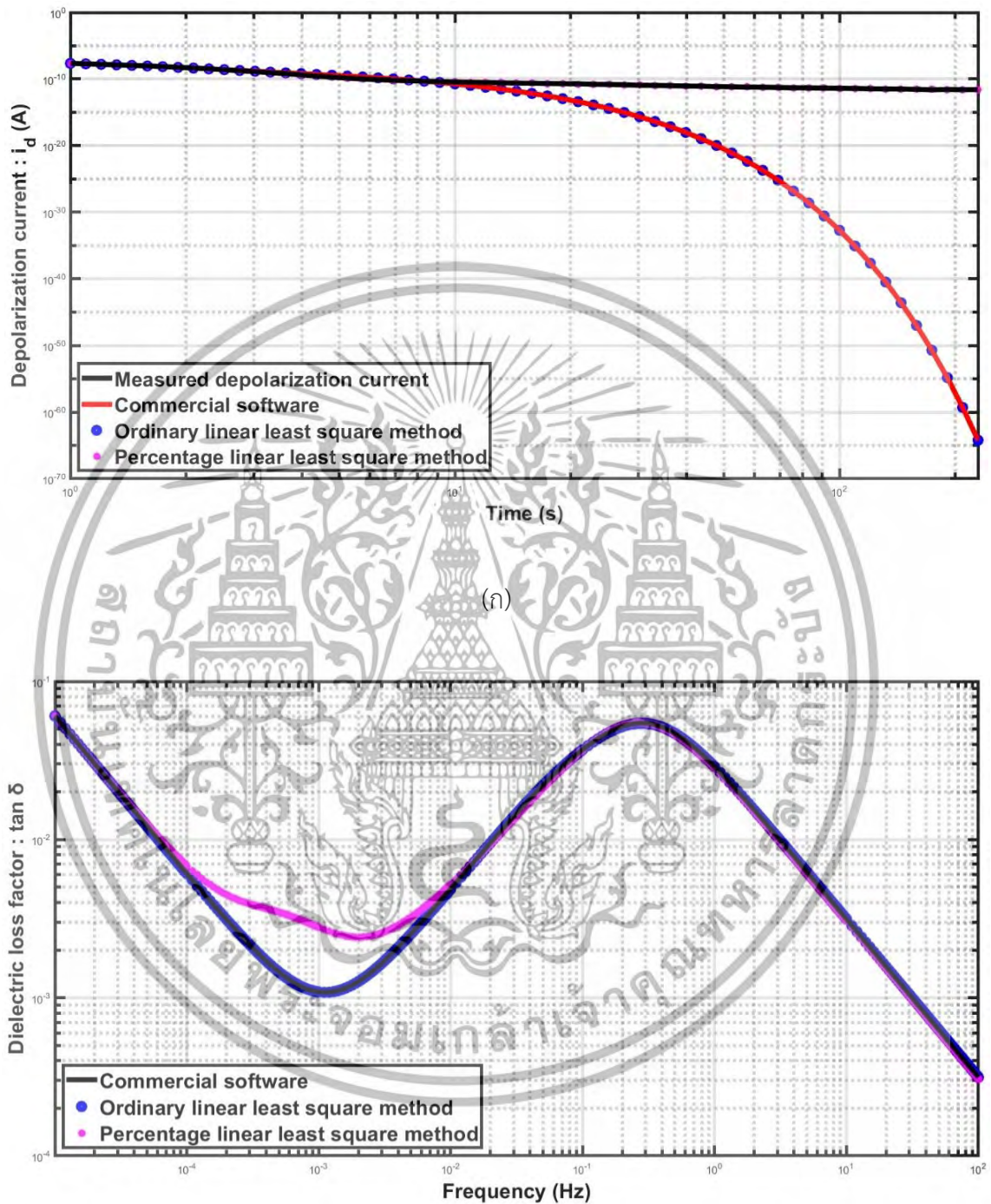
กรณีศึกษาที่ 4 ผลลัพธ์กระแสไฟฟ้าโรเซชันจากการคำนวณด้วยองค์ประกอบของแบบจำลองจากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความเบี่ยงเบนจากค่ากระแสไฟฟ้าโรเซชันที่ทำการบันทึกจากการทดสอบภาคสนามอย่างชัดเจนซึ่งส่งผลให้ค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกมีความแม่นยำลดลง แต่วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์กระแสไฟฟ้าโรเซชันที่มีความใกล้เคียงกับค่ากระแสจากการวัดได้อย่างชัดเจนทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าให้ผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่หาจากองค์ประกอบแบบจำลองด้วยวิธีการของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์เป็นผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำกว่า ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.12

กรณีศึกษาที่ 5 ผลลัพธ์กระแสไฟฟ้าโรเซชันจากการคำนวณด้วยองค์ประกอบของแบบจำลองจากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความเบี่ยงเบนในช่วงเวลาท้ายของการวัด และ ณ จุดที่กระแสไฟฟ้าโรเซชันมีค่าต่ำ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์กระแสไฟฟ้าโรเซชันที่มีแม่นยำใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ทำการบันทึกมากกว่าสองวิธีดังกล่าวอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาจากค่าราคที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่าราคที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยจะมีค่าที่ต่ำกว่าเช่นกัน ผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่หาจากองค์ประกอบแบบจำลองแสดงได้จากรูปที่ 4.16

กรณีศึกษาที่ 6 เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าโรเซชันที่ทำการบันทึกจากการทดสอบภาคสนามมีค่าที่ต่ำมาก ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบและวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานไม่สามารถหาผลลัพธ์ขององค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกได้เนื่องจากไม่สามารถหาราฟที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้าโรเซชันที่สอดคล้องกับค่ากระแสที่ทำการบันทึกได้ รวมถึงทำให้ไม่สามารถหาค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ แต่วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์สามารถแสดงผลลัพธ์ในการหาองค์ประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยผลลัพธ์ของกระแสไฟฟ้าโรเซชันที่มีความเบี่ยงเบนจากค่ากระแสที่ทำการบันทึกได้ต่ำและสามารถทำให้คำนวณหาตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.18 ตัวอย่างผลลัพธ์ของกระแสไฟฟ้าโรเซชัน และ ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่คำนวณได้จากแบบจำลองและจากการวัดภาคสนามเปรียบเทียบกันแสดงในรูปที่ 4.19

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กทริกจากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบและวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน ในกรณีศึกษาที่ 6 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.49



(ข)

รูปที่ 4.49 ตัวอย่างของการหาผลลัพธ์ในกรณีศึกษาที่ 6 ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบและวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน ก) กระแสโพลาริเซชัน และ ข) ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 กรณีศึกษาที่ 7 - 12 : เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง

กรณีศึกษาของอุปกรณ์ประเภทเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง ผลลัพธ์กระแสดีโพลาริเซชันจากการคำนวณด้วยองค์ประกอบของแบบจำลองในกรณีศึกษาที่ 7 และ 12 โดยกรณีศึกษาที่ 7 เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนประเภทมอเตอร์แรงดันสูง และ กรณีศึกษาที่ 12 เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนประเภทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความใกล้เคียงกันและไม่มีข้อแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันที่แม่นยำใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ทำการบันทึกจากการทดสอบภาคสนามมากกว่าสองวิธีดังกล่าวโดยพิจารณาจากค่าราคาที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่าราคาที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยที่มีค่าต่ำกว่า ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าให้ผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่หาจากองค์ประกอบแบบจำลองด้วยวิธีการของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์เป็นผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำกว่าสองวิธีดังกล่าว ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.21 และ 4.36

กรณีศึกษาที่ 8 - 11 ผลลัพธ์กระแสดีโพลาริเซชันจากการคำนวณด้วยองค์ประกอบของแบบจำลองจากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความเบี่ยงเบนในช่วงเวลาท้ายของการวัด และ ณ จุดที่กระแสดีโพลาริเซชันมีค่าต่ำ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์กระแสดีโพลาริเซชันที่แม่นยำใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ทำการบันทึกมากกว่าสองวิธีดังกล่าวอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาจากค่าราคาที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่าราคาที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยจะมีค่าที่ต่ำกว่าเช่นกัน ทำให้ผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่หาจากองค์ประกอบแบบจำลองด้วยวิธีการของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์เป็นผลลัพธ์ที่มีความแตกต่างจากสองวิธีดังกล่าวอย่างชัดเจน ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.24 4.27 4.30 และ 4.33 ตามลำดับ

4.2.4 กรณีศึกษาที่ 13 - 16 : หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

กรณีศึกษาของอุปกรณ์ประเภทหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ผลลัพธ์กระแสดีโพลาริเซชันจากการคำนวณด้วยองค์ประกอบของแบบจำลองในกรณีศึกษาที่ 13 -16 ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความใกล้เคียงกันและไม่มีข้อแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ให้ผลลัพธ์ของกระแสดีโพลาริเซชันที่แม่นยำใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ทำการบันทึกจากการทดสอบภาคสนามมากกว่าสองวิธีดังกล่าวโดยพิจารณาจากค่าราคาที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่าราคาที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยที่มีค่าต่ำกว่า ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าให้ผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่หาจากองค์ประกอบแบบจำลองด้วยวิธีการของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์เป็นผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำกว่าสองวิธีดังกล่าว ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.39 4.42 4.45 และ 4.48 ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการหาผลลัพธ์องค์ประกอบแบบจำลองไดโอดีเล็กทริกและตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ จากการอภิปรายผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอดังกล่าว ภาพรวมสามารถแสดงผลลัพธ์ของการตอบสนองไดโอดีเล็กทริกด้วยจำนวนกิ่ง $R_i C_i$ และค่าคงที่เวลาการตอบสนองของกิ่งนั้นๆของแบบจำลองที่สามารถคำนวณหากระแสดีโพลาร์ไซเซชันที่เป็นผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ทำการบันทึกจากการเก็บข้อมูลภาคสนาม รวมถึงการหาตัวประกอบความสูญเสียไดโอดีเล็กทริกในวัฏจักรความถี่จากองค์ประกอบของแบบจำลองที่หาได้ซึ่งสามารถนำผลลัพธ์ดังกล่าวไปวิเคราะห์ถึงสภาวะหรือสาเหตุของกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ การสรุปผลลัพธ์และความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอสำหรับการหาองค์ประกอบแบบจำลองไดโอดีเล็กทริกจะกล่าวในบทถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

บทที่ห้าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดสอบการทางองค์ประกอบแบบจำลองไดอิเล็กทริกของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการของซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีการกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐาน และ วิธีการกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ในเรื่องของประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และผลลัพธ์ของตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกจากวิธีการทำเสนอ รวมถึงข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันวิธีการที่นำเสนอ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาเรื่องคุณภาพของวัสดุฉนวนไฟฟ้า (Insulation material) มีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง วัสดุฉนวนเหล่านี้ปฏิบัติงานอยู่ภายใต้สภาวะการใช้งานภายใต้ปัจจัยความเครียดต่างๆ เช่น ความเครียดจากสนามไฟฟ้า (Electrical stress) จากจุดบกพร่องของฉนวน, ความเครียดจากอุณหภูมิ (Thermal stress) จากการเดินเครื่องใช้งาน, ความเครียดทางกล (Mechanical stress) จากการสั่นภายในอุปกรณ์เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กอิมตัว และ ความเครียดจากสภาวะแวดล้อม (Ambient stress) จากสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นละออง น้ำ หรือความชื้น ย่อมทำให้เกิดความเสื่อมสภาพของระบบการฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือต่อการใช้งาน โดยวัสดุฉนวนไฟฟ้าแต่ละชนิดจะมีลักษณะการตอบสนองทางฉนวน (Dielectric response) ที่แตกต่างกันออกไป การตอบสนองของวัสดุฉนวนต่อความเครียดของวัสดุ นั้นเป็นกระบวนการทางสถิติ (Stochastic process) ที่มีตัวแปรตาม (Dependent variables) แตกต่างกันได้แก่ สภาพของฉนวนไฟฟ้า, การเปลี่ยนแปลงของความเครียด และ สภาพแวดล้อม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการนำหลักการตอบสนองไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริกหรือฉนวนไฟฟ้ามาสร้างแบบจำลองในรูปแบบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าโดยอ้างอิงจากทฤษฎีแบบจำลองของเดอไบน์ที่นำเสนอวงจรสมมูลที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบของวัสดุไดอิเล็กทริกค่าความต้านทานวัสดุไดอิเล็กทริก (R_0) ค่าความจุไฟฟ้าวัสดุไดอิเล็กทริก (C_0) และ องค์ประกอบการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกซึ่งจะเป็นการอนุกรมกันของต้านทาน (R_i) และ ตัวเก็บประจุ (C_i) ประกอบกันในลักษณะกึ่งโดยที่แต่ละกึ่งมีค่าคงที่เวลาการตอบสนอง (τ_i) เฉพาะกึ่งนั้นๆ การเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองไดอิเล็กทริกโดยใช้หลักการตอบสนองไดอิเล็กทริกจะใช้วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนไฟฟ้าโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ (U_0) เป็นระยะเวลา t คือเวลาการป้อนแรงดันทดสอบหรือระยะเวลาการชาร์จเมื่อโมเลกุลภายในไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวัสดุไดอิเล็กทริกเริ่มเกิดการทำให้เป็นขั้วเนื่องจากกลไกโพลาริเซชันทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของประจุไฟฟ้าตามแนวทิศทางของสนามไฟฟ้าเกิดเป็นกระแสโพลาริเซชัน เมื่อนำแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกหรือการลัดวงจรประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ตามแนวทิศทางของสนามไฟฟ้าจะเริ่มการคลายตัวจากทิศทางทางเดิมหรือเรียกว่ากระบวนการผ่อนคลายการเคลื่อนตัวของประจุไฟฟ้างกล่าวเนื่องจากกระบวนการผ่อนคลายจะเกิดเป็นกระแสผ่อนคลายซึ่งมีรูปแบบเป็นลักษณะฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลและมีค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่สอดคล้องกับกึ่งของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (R, C) ผลรวมของจำนวนกระแสผ่อนคลายดังกล่าวที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผ่อนคลายภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะเป็นผลลัพธ์ของกระแสโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นซึ่งจะเป็นลักษณะฟังก์ชันพหุเอ็กซ์โพเนนเชียลและเป็นผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นภายในฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

การสร้างแบบจำลองไดอิเล็กทริกที่เป็นตัวแทนของฉนวนไฟฟ้าด้วยข้อมูลจากการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสโพลาริเซชันนั้นจะเลือกใช้ข้อมูลของกระแสโพลาริเซชันในการหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกเนื่องจากกระแสโพลาริเซชันมีส่วนประกอบของกระแสสามส่วนคือกระแสสตูดซ์ กระแสคาปาซิทีฟ และ กระแสการนำไฟฟ้า ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้การแปลผลลัพธ์จากองค์ประกอบของแบบจำลองไปสู่ค่าตัวประกอบความสูญเสียที่มีความแม่นยำลดลงและกระแสโพลาริเซชันเป็นผลรวมของกระแสผ่อนคลายซึ่งเป็นผลลัพธ์การตอบสนองไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กทริก วิธีการสำหรับการหาค่าประกอบเพื่อสร้างแบบจำลองไดอิเล็กทริกที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพัฒนาจากหลักการของวิธีการหากราฟที่เหมาะสมของซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ภายในเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD โดยจะทำการหาค่าคงที่เวลาการตอบสนองเริ่มต้นและค่าคงที่เวลาการตอบสนองอื่นๆซึ่งจะอยู่ในรูปของอนุกรมเลขาคณิตซึ่งจะมีค่า $0.5623 \cdot 1 \cdot 1.7783 \cdot 3.1623 \cdot 5.6234 \cdot 10 \dots$ และ τ_n ตามลำดับ วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานจะใช้หลักการกราฟที่เหมาะสมของกระแสโพลาริเซชันโดยการเลือกค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่สร้างขึ้นให้ครอบคลุมกับข้อมูลกระแสโพลาริเซชันและระยะเวลาที่ทำการบันทึกแล้วทำการหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นที่มีเงื่อนไขของกำลังสองที่น้อยที่สุดโดยจะได้ผลลัพธ์เป็นสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียล (A_i) และค่าคงที่เวลาการตอบสนอง (τ_i) ในการหาผลลัพธ์ในครั้งแรกจะมีพจน์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ติดลบทำให้การหาผลลัพธ์รอบต่อไปต้องตัดพจน์สัมประสิทธิ์ที่ติดลบและค่าคงที่เวลาการตอบสนองที่สอดคล้องออกจนกว่าผลลัพธ์ของสัมประสิทธิ์เอ็กซ์โพเนนเชียลจะมีค่าเป็นบวก เมื่อนำองค์ประกอบผลลัพธ์จากวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานมาคำนวณหากระแสโพลาริเซชันผลลัพธ์แล้วนำมาเปรียบกับกระแสผลลัพธ์จากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ และ กระแสโพลาริเซชันจากการบันทึกนั้นก็มีกระแสผลลัพธ์จากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์และ วิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานมีความใกล้เคียงกับค่ากระแสจากการบันทึกแต่ผลลัพธ์ของทั้งสองวิธียังมีข้อบกพร่องในเรื่องความเบี่ยงเบนของกระแสผลลัพธ์ในช่วงท้ายของเวลาการบันทึกและกระแสที่บันทึกมีค่าต่ำ การปรับปรุงข้อบกพร่องดังกล่าวได้นำเสนอวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์โดยจะใช้หลักการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกันกับวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานแต่จะใช้วิธีการของการถ่วงน้ำหนักข้อมูลของกระแสดีโพลาริเซชันก่อนทำการหาค่าประกอบซึ่งวิธีการดังกล่าวได้ให้ผลลัพธ์ของจำนวนองค์ประกอบที่มากกว่าวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานแต่ได้ให้กระแสผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำกว่ารวมถึงลดความเบี่ยงเบนในช่วงท้ายของเวลาการบันทึกและกระแสที่บันทึกมีค่าต่ำทำให้ผลลัพธ์องค์ประกอบดังกล่าวเมื่อนำไปแปลผลสู่ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ต่ำ (0.001 ถึง 0.01 เฮิรต) ที่แสดงถึงกลไกการเสื่อมสภาพเนื่องจากความชื้นภายในเนื้อฉนวนมีความแม่นยำที่เพิ่มขึ้น

การทดสอบประสิทธิภาพ ความถูกต้อง และความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอสำหรับการหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยจะนำเสนอผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอดังกล่าวด้วยผลลัพธ์ขององค์ประกอบของแบบจำลอง กราฟที่เหมาะสมของกระแสดีโพลาริเซชัน และ ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของกรณีศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบ 16 กรณี ซึ่งสามารถจำแนกประเภทอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบในแต่ละกรณีศึกษาเป็นสี่ประเภทได้แก่ ปลอกฉนวนตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง สายเคเบิลแรงดันสูง เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง และ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง โดยทั่วไปของกรณีศึกษาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทดสอบกระแสผลลัพธ์ที่คำนวณจากองค์ประกอบด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานและจากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความใกล้เคียงกับค่ากระแสจากการบันทึกแต่ยังมีข้อบกพร่องในเรื่องความเบี่ยงเบนของกระแสผลลัพธ์ในช่วงท้ายของเวลาการบันทึกและกระแสที่บันทึกมีค่าต่ำ กระแสผลลัพธ์ที่คำนวณจากองค์ประกอบของวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้ลดความเบี่ยงเบนในช่วงท้ายของเวลาการบันทึกและกระแสที่บันทึกมีค่าต่ำทำให้มีความแม่นยำกว่าสองวิธีการดังกล่าวโดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยที่มีค่าต่ำกว่าซึ่งทำให้สามารถแปลผลลัพธ์จากองค์ประกอบไปสู่ตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่มีความแม่นยำและสามารถนำไปวางแผนสำหรับการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคุณภาพหรือการบำรุงรักษาเพื่อเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ

5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย

1) การเก็บข้อมูลด้วยวิธีการทดสอบการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำต้องใช้ทักษะและประสบการณ์ในเรื่องของการตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากกระแสดีโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมีค่าต่ำ จึงต้องอาศัยทักษะ ความรู้ และ ประสบการณ์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ไปสร้างแบบจำลองไดอิเล็กทริกที่มีความแม่นยำรวมถึงการแสดงตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกที่แสดงถึงกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าอย่างแท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ในปัจจุบันการพัฒนาและการค้นพบวัสดุฉนวนชนิดใหม่ที่อาจมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่าฉนวนแบบดั้งเดิมที่ได้ใช้กันมา เพื่อทำให้เกิดความรู้และความเข้าใจลักษณะฉนวนที่พัฒนาขึ้น นักวิจัยและวิศวกรได้ใช้การตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนซึ่งเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการสร้างต่อยอด หรือ พัฒนา แบบจำลองไดอิเล็กทริกของฉนวนไฟฟ้าและเป็นเครื่องมือสำหรับการประเมินคุณลักษณะและสภาพของฉนวน

3) วิธีการที่นำเสนอสำหรับการหาค่าประกอบของแบบจำลองไดอิเล็กทริกได้นำเสนอจำนวนผลลัพธ์ขององค์ประกอบที่แตกต่างกัน จำนวนขององค์ประกอบของวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานจะมีจำนวนใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับวิธีการของซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบ PDC—ANALYSER—1MOD ส่วนจำนวนขององค์ประกอบของวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์จะมีจำนวนมากกว่าสองวิธีดังกล่าวเนื่องจากการถ่วงน้ำหนักของข้อมูลกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันซึ่งทำให้สามารถหาผลลัพธ์ของกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันที่มีความเบี่ยงเบนต่ำเมื่อเทียบกับค่ากระแสจากการบันทึก

4) การพัฒนาการหาค่าประกอบไดอิเล็กทริกเพื่อแสดงผลลัพธ์การตอบสนองไดอิเล็กทริกด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ยังสามารถพิจารณาด้วยวิธีการของการแปลงฟูเรียร์โดยตรงของข้อมูลกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันในวัฏจักรเวลาให้อยู่ในรูปของผลลัพธ์ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกในวัฏจักรความถี่

5) เพื่อยืนยันความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองไดอิเล็กทริกด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานและแบบเปอร์เซ็นต์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ควรจะมีการทดสอบการหาค่าประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆเพิ่มเติมซึ่งจะเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการแปลผลลัพธ์เป็นตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกเพื่อใช้ในการวางแผนวางแผนสำหรับการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคุณภาพหรือการบำรุงรักษาเพื่อความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีความแม่นยำและประเมินสภาพของฉนวนไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ

6) หลักการหาค่าประกอบของแบบจำลองด้วยวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์ได้แสดงถึงประสิทธิภาพในเรื่องของความแม่นยำในช่วงท้ายของเวลาการบันทึกของกระแสไฟฟ้าโพลาริเซชันที่มีค่ากระแสต่ำกว่าวิธีของซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์และวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบพื้นฐานจึงทำให้สามารถหาตัวประกอบความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งหลักการของวิธีของกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบเปอร์เซ็นต์สามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของเครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าประกอบแบบจำลองที่มีความถูกต้องและแม่นยำสำหรับการเก็บข้อมูลภาคสนามของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Peter J. W. Debye. **Polar molecules**. New York : The Chemical Catalog Company, inc. 1929.
- [2] Race, H. H. “Capacitance and loss variations with frequency and temperature in composite insulation.” **Trans. AIEE.**, vol. 52, no. 2, June 1933. pp. 682-689.
- [3] Murphy, E. J. and Morgan, S. O. “The dielectric properties of insulating materials.” **Bell Syst. Tech. J.**, vol. 16, no. 4, Oct. 1937. pp. 493-512.
- [4] Murphy, E. J. and Morgan, S. O. “The dielectric properties of insulating materials, III alternating and direct current conductivity.” **Bell Syst. Tech. J.**, vol 18, no. 3, 1939. pp. 502-537.
- [5] Field, R. F. The basis for the nondestructive testing of insulation.” **Electrical Engineering**, vol 60, no. 9, Sept. 1941. pp. 890-895.
- [6] Cole, K. S. and Cole, R. H. “Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics.” **J. Chem. Phys.**, vol. 9, no. 4, Apr. 1941. pp. 341-351.
- [7] Cole, K. S. and Cole, R. H. “Dispersion and absorption in dielectrics II. Direct current characteristics.” **J. Chem. Phys.**, vol. 10, no. 2, Feb. 1942. pp. 98-105.
- [8] Field, R. F. and Easton, I. G. “The equivalence of time and frequency measurements of dielectrics.” **Conf. Electr. Insul., Schenectady, New York, USA, 1956.** pp. 24-25.
- [9] Houhanessian, V. D. and Zaengl, W. S. “Time domain measurements of dielectric response in oil-paper insulation systems.” **IEEE Int. Sym. Electr. Insul., Montreal, Quebec, Canada, vol. 1, 1996.** pp. 47-52.
- [10] Houhanessian, V. D. and Zaengl, W. S. “Application of relaxation current measurements to on-site diagnosis of power transformers.” **Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP).**, Minneapolis, Minnesota, USA, vol.1, 1997. pp. 45-51.
- [11] Houhanessian, V. D. and Zaengl, W. S. “On-site diagnosis of power transformers by means of relaxation current measurements.” **IEEE Int. Sym. Electr. Insul., Arlington, Virginia, USA, vol. 1, 1998.** pp. 28-34.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Alff, J. J., Houhanessian, V. D., Zaengl, W. S. and Kachler, A. J. "A novel, compact instrument for the measurement and evaluation of relaxation currents conceived for on-site diagnosis of electric power apparatus." **IEEE Int. Sym. Electr. Insul., Anaheim, California, USA, 2000.** pp. 161-167.
- [13] Hassig, M., Braunlich, R., Gysi, R. and Alff, J. J. "On-site applications of advanced diagnosis methods for quality assessment of insulation of power transformers." **Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), Kitchener, Ontario, Canada, 2001.** pp. 441-447.
- [14] Zaengl, W. S. "Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations." **IEEE Electr. Insul. Mag.,** vol. 19, no. 5, Sept.-Oct. 2003, pp. 5-19.
- [15] Zaengl, W. S. "Applications of dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment." **IEEE Electr. Insul. Mag.,** vol. 19, no. 6, Nov.-Dec. 2003, pp. 9-22.
- [16] Muhamad, N. A., Phung, B. T., Blackburn, T. R. and Lai, K. X. "Polarization and Depolarization Current (PDC) tests on biodegradable and mineral transformer oils at different moisture levels." **Australasian Universities Power Engineering Conference, Adelaide, South Australia, Australia, 2009.** pp. 1-6.
- [17] Suleiman, A. A., Bashir, N., Muhamad, N. A., Jamail, N. A. M. and Kamarudi, Q. E. "Polarization & depolarization current (PDC) measurement in cellulose insulating materials." **Conf. Electr. Insul. Dielectr Phenomena (CEIDP), Chenzhen, China, 2013.** pp. 1073-1076.
- [18] Pattanadech, N., Phongsirichairojna, T., Navapittayaratana, N., Nimsanong, P., Jirathipchaisakul, T., Chuayin, C. "Polarization and Depolarization Current Measurement Applied for Investigation of Underground Cable System Problems." **Proc. 16th Int. Conf. Electr. Eng./Electron. Comput. Telecommun. Inf. Technol. (ECTI-CON), Pattaya, Thailand, 2019.** pp. 361-364.
- [19] Maryott, A. A., Buckley, F. **Table of dielectric constants and electric dipole moments of substances in the gaseous state.** Vol. 537, US Department of Commerce, National Bureau of Standards. 1953.

- [20] Chupp, T. E., Fierlinger, P., Ramsey-Musolf, M. J. and Singh, J. T. “Electric dipole moments of atoms, molecules, nuclei, and particles.” **Rev. Mod. Phys.**, vol. 91, no. 1, Jan. 2019.
- [21] Deiglmayr, J., Grochola, A., Repp, M., Dulieu, O., Wester, R. and Weidemüller, M. “Permanent dipole moment of LiCs in the ground state.” **Phys. Rev. A.**, vol. 82, no. 3, Sep. 2010.
- [22] Fortson, N., Sandars, P. and Barr, S. “The search for a permanent electric dipole moment.” **Physics Today**, vol 56, no. 6, June 2003, pp. 33-39.
- [23] McKinnon, D. L. “Insulation Resistance Profile (IRP) and its use for assessing insulation systems.” **IEEE Int. Sym. Electri. Insul., San Diego, California, USA**, 2010. pp. 1-4.
- [24] Brown, A., David, E. and Essalihi, M. “Insulation resistance measurements for machine insulation.” **Electr. Insul. Conf. (EIC).**, Annapolis, Maryland, USA, 2011. pp. 261-264.
- [25] Freitas, T. S., Guimarães, A. S., Roles, S., Peixoto de Freitas, V., Cataldo, A. “Is the Time-Domain Reflectometry (TDR) Technique Suitable for Moisture Content Measurement in Low-Porosity Building Materials?.” **Sustainability**, vol 12, no 19, Sep. 2020, p. 7855.
- [26] Hamon, B. V. “An approximate method for deducing dielectric loss factor from direct-current measurements.” **Proceedings of the IEE-Part IV: Institution Monographs**, vol 99, no 3, July 1952, pp. 151-155
- [27] Gray, I. A. R. “Dissipation factor, power factor and relative permittivity (Dielectric Constant).” **Transformer Chemistry Services**.
- [28] IEEE Standard C57.152TM-2013, **Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors**. IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2013.
- [29] Refaat, S. S. and Shams, M. A. “A review of partial discharge detection, diagnosis techniques in high voltage power cables.” **12th Int. Conf. Compat., Power Electron. and Power Eng. (CPE-POWERENG 2018)**, Doha, Qatar, Apr. 2018, pp. 1-5.
- [30] IEC Standard 60270-2015, **High-voltage test techniques – Partial discharge measurements**. Nov. 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [31] Dakin, T. W. “Conduction and polarization mechanisms and trends in dielectric.” **IEEE Electr. Insul. Mag.**, vol. 22, no. 5, Sept.-Oct. 2006, pp. 11-28.
- [32] Kuffel, E., Zaengl, W. S. and Kuffel, J. “Non-destructive insulation test techniques” in **High Voltage Engineering : Fundamentals**, 2nd ed., Oxford, UK : Newnes, 2000, pp. 398–411.
- [33] Jonscher, A. K. “The 'universal' dielectric response. I” **IEEE Electr. Insul. Mag.**, vol. 6, no. 2, Mar.-Apr. 1990, pp. 16-22.
- [34] Jonscher, A. K. “The 'universal' dielectric response. II” **IEEE Electr. Insul. Mag.**, vol. 6, no. 3, May-June 1990, pp. 24-28.
- [35] Jonscher, A. K. “The 'universal' dielectric response. III” **IEEE Electr. Insul. Mag.**, vol. 6, no. 4, July-Aug. 1990, pp. 19-24.
- [36] Jonscher, A. K. “The universal dielectric response and its physical significance” **IEEE Trans. Electr. Insul.**, vol. 27, no. 3, June 1992, pp. 407-423.
- [37] Zhang, Y., Liu, J., Wei, H. and Liao, R. “Study on Quantitative Correlations between the Ageing Condition of Transformer Cellulose Insulation and the Large Time Constant Obtained from the Extended Debye Model.” **Energies**, vol 10, no 11, Nov. 2017, p.1842.
- [38] Saha, T. K., Purkait, P. and Muller, F. “Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements.” **IEEE Trans. Power Del.**, vol. 20, no. 1, Jan. 2005, pp. 149-157.
- [39] Chapra, S. C. “Part four : curve fitting overview - Linear regression.” in **Applied numerical methods with Matlab for engineer and scientist**, 4th ed., New York, USA : McGraw-Hill, 2017, pp. 321-351.
- [40] Chapra, S. C. “General Linear Least-Squares and Nonlinear Regression.” in **Applied numerical methods with Matlab for engineer and scientist**, 4th ed., New York, USA : McGraw-Hill, 2017, pp. 361-373.
- [41] Montgomery, D. C., Peck, E. A., Vining, G. G. “Multiple linear regression.” in **Introduction to Linear Regression Analysis**, 6th ed., New Jersey, USA : Wiley-Blackwell, 2021; pp. 69–86.
- [42] สายชล สีนสมบูรณ์ทอง. **Statistical analysis**. ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553

- [43] สายชล สิ้นสมบุรณ์ทอง. **Nonparametric statistics**. ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553
- [44] ALFF Engineering. **PDC-ANALYSER-1MOD User's guide**. ALFF Engineering, Switzerland. 2000.
- [45] ALFF Engineering. **PDC-Phantom-1000XE User's guide**. ALFF Engineering, Switzerland, 2000.
- [46] Houhanessian, V. D. "PDC Evaluation: Polarization and Depolarization Current Evaluation Program." In **ALFF Engineering**, Version 3.0. 2000. Available online: <http://www.alff-engineering.ch/> (accessed on 10 October 2015).
- [47] Tofallis, C. "Least squares percentage regression." **J. Mod. Appl. Stat. Meth.**, vol. 7, 2009
- [48] Bethehem, J. G. and Keller, W. J. "Linear weighting of sample survey data." **J. Off. stat.**, vol. 3, no. 2, 1987, pp. 141-153.
- [49] R. J. Carroll and D. Ruppert. **Transformation and weighting in regression**. London : Chapman and Hall. 1988.
- [50] Phulip J. Schneider and David H. Eberly. **Geometric tools for computer graphics**. San Francisco : Morgan Kaufmann. 2003.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Open Access Journal by MDPI

Impact Factor 3.2
CiteScore 5.5



Energies

[mdpi.com/
journal/
energies](https://mdpi.com/journal/energies)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



energies

IMPACT
FACTOR
3.252

CITESCORE
5.5



Review of Thermal Management Technology for Electric Vehicles

Volume 16 • Issue 12 | June (II) 2023



mdpi.com/journal/energies
ISSN 1996-1073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Open Access Article

13 pages, 3222 KIB

Short-Term Power Load Forecasting Based on PSO-Optimized VMD-TCN-Attention Mechanism

by Guanchen Geng, Yu He, Jing Zhang, Tingxiang Qin and Bin Yang

Energies 2023, 16(12), 4616; <https://doi.org/10.3390/en16124616> - 09 Jun 2023

Cited by 8 | Viewed by 1472

Abstract A new prediction framework is proposed to improve short-term power load forecasting accuracy. The framework is based on particle swarm optimization (PSO)-variational mode decomposition (VMD) combined with a time convolution network (TCN) embedded attention mechanism (Attention). The framework follows a two-step process. In [...] [Read more](#). (This article belongs to the Section F: Electrical Engineering)

► Show Figures

Open Access Article

21 pages, 21249 KIB

Determination of Dielectric Models Based on Effective Multi-Exponential Fittings

by Jedsada Raxsa, Phethai Nimsanong, Thanatorn Mai-Eiam and Peerawat Yutthagowith

Energies 2023, 16(12), 4615; <https://doi.org/10.3390/en16124615> - 09 Jun 2023

Viewed by 795

Abstract In high-voltage (HV) transmission and distribution systems, HV apparatuses are subjected to electrical, thermal, and mechanical stresses that deteriorate the insulation performance. The polarization and depolarization current (PDC) measurement is an effective tool used for evaluating insulation performances. The depolarization current represented by [...] [Read more](#). (This article belongs to the Topic High Voltage Engineering)

► Show Figures

Open Access Review

21 pages, 4050 KIB

Research Progress on Audible Noise Emitted from HVDC Transmission Lines

by Li Li, Wei Meng, Qi Li, Yifan Wang, Xiaoguang Zheng and Hongbin Wang

Energies 2023, 16(12), 4314; <https://doi.org/10.3390/en16124314> - 09 Jun 2023

Cited by 2 | Viewed by 1443

Abstract The audible noise (AN) of DC transmission lines is a crucial factor affecting environmental assessment and electromagnetic design. In recent years, the public has paid increasing attention to the audible noise after the emergence of the HVDC technique. This paper emphatically reviewed the [...] [Read more](#). (This article belongs to the Special Issue Evaluation and Mitigation of Electromagnetic Environment and Electromagnetic Interference Impacts for Power Grids)

► Show Figures

Journals / Energies / Volume 16 / Issue 12 / 10.3390/en16124615



Submit to this Journal

Review for this Journal

Propose a Special Issue

Article Menu

Academic Editors



Issouf Fofana



Ayman El-Hag



Refat Ghunem

Open Access Article

Determination of Dielectric Models Based on Effective Multi-Exponential Fittings

by Jedsada Raxsa ¹, Phethai Nimsanong ², Thanatorn Mai-Eiam ¹ and Peerawat Yutthagowith ^{1,*}

¹ Department of Electrical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

² Metropolitan Electricity Authority, Bangkok 10110, Thailand

* Author to whom correspondence should be addressed.

Energies 2023, 16(12), 4615; <https://doi.org/10.3390/en16124615>

Submission received: 14 April 2023 / Revised: 23 May 2023 / Accepted: 27 May 2023 / Published: 9 June 2023

(This article belongs to the Topic High Voltage Engineering)

Download

Browse Figures

Versions Notes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Article

Determination of Dielectric Models Based on Effective Multi-Exponential Fittings

Jedsada Raxsa ¹, Phethai Nimsanong ², Thanatorn Mai-Eiam ¹ and Peerawut Yutthagowith ^{1,*}

- ¹ Department of Electrical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; 65016021@kmitl.ac.th (J.R.); 65016046@kmitl.ac.th (T.M.-E.)
² Metropolitan Electricity Authority, Bangkok 10110, Thailand; phethai.ni@gmail.com
^{*} Correspondence: peerawut.yu@kmitl.ac.th; Tel.: +66-(0)2-329-8330

Abstract: In high-voltage (HV) transmission and distribution systems, HV apparatuses are subjected to electrical, thermal, and mechanical stresses that deteriorate the insulation performance. The polarization and depolarization current (PDC) measurement is an effective tool used for evaluating insulation performances. The depolarization current represented by the summation of the discharge currents with the different time constants can be utilized for the development of the dielectric model based on the extended Debye's model (EDM). This paper presents effective techniques for determining the dielectric model. Iterative approaches with predetermination of the time constants and least squares methods (either linear ordinary or percentage ones) were utilized to fit the depolarization current in the form of multi-exponential functions. The fitting parameters determined by the proposed method with the linear ordinary least squares (OLLS) method and provided by commercial software agree very well only in the high current and beginning range. Application of the linear percentage least squares (PLLS) method shows better accuracy than that of the OLLS method, and the deviation from the measured one in the low current range and the late measuring time were reduced significantly. The fitted current by this proposed technique with the PLLS method agrees well with the measured current throughout the whole recording time, even in the low current and late time range. From the accurately fitted currents, the dielectric model and the dielectric loss factors can be determined precisely, and the insulation condition of HV equipment can be evaluated properly.

Keywords: dielectric loss factor; extended Debye's model; multi-exponential function fit; PDC measurement; percentage least squares method



Citation: Raxsa, J.; Nimsanong, P.; Mai-Eiam, T.; Yutthagowith, P. Determination of Dielectric Models Based on Effective Multi-Exponential Fittings. *Energies* **2023**, *16*, 4615. <https://doi.org/10.3390/en16124615>

Academic Editors: Issouf Eofana, Ayman El-Hag, Refat Ghunem, Behzad Kordi and Ali Naderian

Received: 14 April 2023

Revised: 23 May 2023

Accepted: 27 May 2023

Published: 9 June 2023



Copyright: © 2023 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

High-voltage (HV) apparatuses installed in electrical transmission and distribution systems are subjected to physical stresses consisting of electrical stress, mechanical stress, thermal stress, and so on. Such stresses deteriorate the insulation performance of the HV apparatuses. Therefore, effective analysis of the electrical insulation performance is an important tool for assessing equipment life expectancy and planning maintenance.

Polarization and depolarization current (PDC) measurement [1–4] is commonly an effective tool used for the evaluation of the dielectric condition of HV equipment [5]. Under the PDC measurement, the depolarization current being discharging current can be represented by the summation of the discharged current with the different time constants [6]. This characteristic of the depolarization current is utilized to develop the dielectric model based on the extended Debye's model (EDM) [7–9]. From the model and its equivalent circuit, the dielectric loss factor ($\tan \delta$) can be determined in the frequency domain. At each frequency range, the dielectric loss factor [10] can be used for the evaluation of the dielectric condition of the HV equipment. For example, as illustrated in Figure 1, the dielectric loss factor in the high- and low-frequency ranges can be utilized to estimate the moisture content in the cellulose, and in the mid-frequency range is affected by oil conductivity [11].

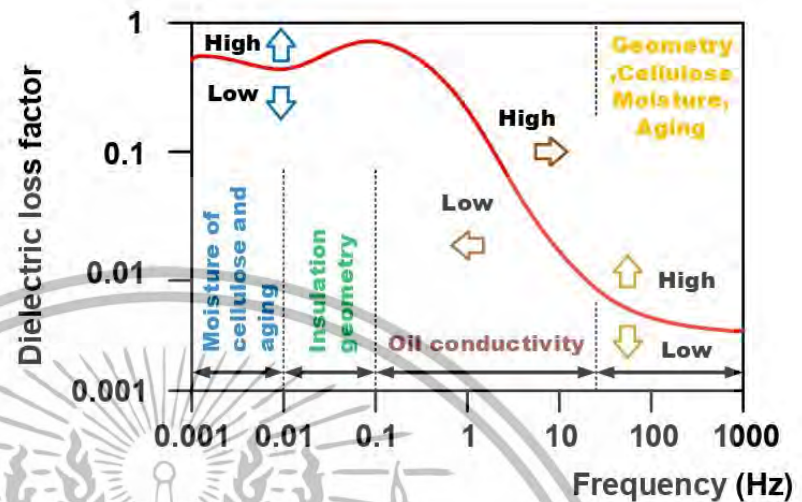


Figure 1. The dielectric frequency response.

The EDM requires accurate multi-exponential fitting to obtain the dielectric model parameters [1,12,13]. Such parameters are generally determined using a conventional non-linear curve fitting method. On the other hand, the fitting approach is not always a useful tool since it requires an initial value close to the solution and is frequently trapped by the local minimum [1,14]. In some specific cases, the conventional method fails in fitting the depolarization current. Furthermore, in certain cases, a commercial curve fitting tool cannot deliver accurate results at a low current range and late PDC measurement time. Inaccurate current fitting in this range affects the accuracy of the dielectric loss factor in the low-frequency range (0.01 to 0.001 Hz) as well as the precision of evaluating insulation age and moisture [1]. Therefore, there are some attempts to fit the depolarization current using non-parametric methods such as particle swarm optimization [15] and the genetic algorithm [16]. It was found that such methods could provide a better solution than the non-linear curve fitting and the commercial software in some cases. However, the non-parametric methods seem impractical for the determination of the dielectric model, because the methods are quite time-consuming, and the number of branches of the model is necessary to specify.

To overcome such problems with fitting the depolarization current, this paper presents simple and effective curve-fitting techniques for the determination of the dielectric model parameters. The proposed techniques start with the predetermination of the time constant span throughout the recorded time of the depolarization current and use either an ordinary linear least squares (OLLS) method or a percentage linear least squares (PLLS) method [17] to determine the unknown coefficient terms. Then, the components with negative coefficients are removed. The process is carried out repeatedly until there is no negative coefficient. The technique with the OLLS method cannot provide a fitted current that agrees with the measured one in the late time and low current range. To overcome such a problem, instead of the OLLS method, the PLLS method [18] is utilized to determine the unknown coefficients. For a demonstration of the performance of the proposed techniques, the PDC measurement was performed on the various HV apparatuses. The proposed techniques and the commercial software [19–21] were applied to determine the fitted depolarization currents, the dielectric models, and the dielectric loss factors. Comparison of the relative root mean square errors (RRMSEs) and the root mean square relative errors (RMSREs) of the depolarization current computed by the proposed techniques and the commercial software are presented. From the demonstrated cases, the technique with the PLLS method can fit the depolarization current very well, not only at the beginning but also at the late time and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

in the low current range. There is no case failing in the determination of the EDM. It is also found in some cases that the dielectric loss factor computed by the model of the improved approach is quite different from that of the first developed technique and the commercial software. Such deviations from the dielectric loss factors may influence the evaluation of the insulation condition of HV equipment. For the comprehensive presentation, this paper is separated into 4 sections. Section 1 devotes to the introduction of this paper, Section 2 presents the dielectric model and its parameter determination, and the proposed techniques are explained in Section 3. In Section 4, the proposed techniques were verified by various cases of the HV apparatuses, and the conclusions are presented in Section 5.

2. The Dielectric Model and Its Parameter Determination

The parameters of the dielectric model based on the EDM can be determined from the depolarization current collected from the PDC measurement. The EDM can well represent the relaxation process (charging and discharging processes) of the insulation material. The PDC measurement and the parameter determination of the dielectric model are described in the following subsections.

2.1. Polarization and Depolarization Measurement

PDC measurement is an effective tool used to diagnose the insulation of HV apparatuses. The equivalent circuit for PDC measurement is illustrated in Figure 2. The measurement procedure starts with the application of the DC voltage to the insulation for a specific time range. During the DC voltage application of electrical stress, the current flow through the insulation material is defined as the polarization current, consisting of decay current and DC conduction current. In this process, the insulation material behaves as a capacitor that stores energy within. Then, when the insulation material is short-circuited, some of the stored energy and charge are discharged. The discharged energy leads to the current flow, which is defined as the depolarization current. The polarization and depolarization current waveforms [6] are shown in Figure 3.

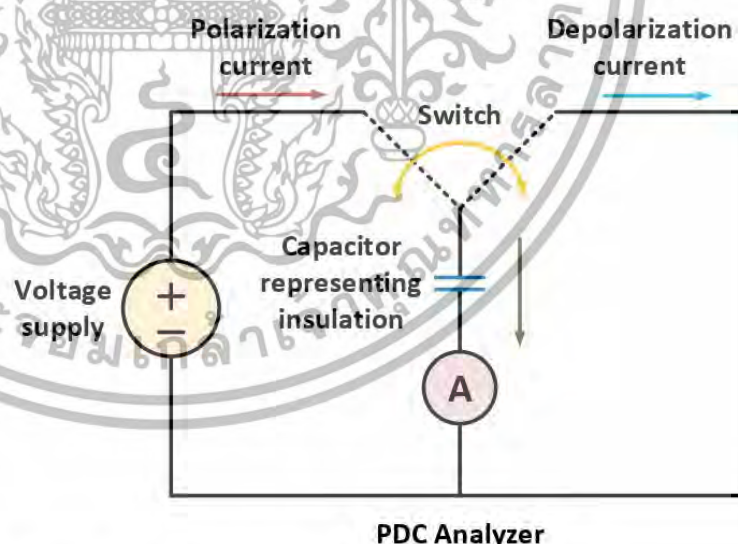


Figure 2. The equivalent circuit of PDC measurement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

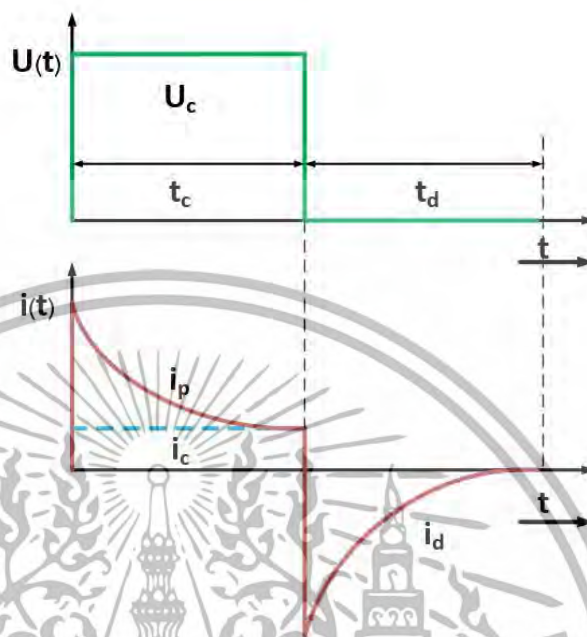


Figure 3. Waveforms of applied voltage and polarization and depolarization currents during the PDC measurement.

2.2. Extended Debye's Model

From the procedure of the PDC measurement, the application of DC voltage to the insulation material, a dipole molecule within the insulation is excited and aligned in the direction of the electric field. Then, by short-circuiting the insulation material, a dipole is relaxed and returned to its normal state [6]. The change in the dipole state under the electric field requires the energy of the moving charge or current, called the relaxation current. In the insulation material, there are various dipole groups with different characteristics and response times. These relaxation currents can be utilized to develop the dielectric model based on EDM, as shown in Figure 4. The EDM was developed based on the relaxation process (charging and discharging processes) within the insulation material. The total relaxation current can be represented by the sum of various relaxation currents (with different response times). Such relaxation mechanisms can be presented by an equivalent circuit model consisting of parallel branches. Each branch is represented by a resistor and a capacitor (RC) connected in series. R_0 and C_0 are the insulation resistance and geometrical capacitance of the insulation material, respectively. R_0 can be calculated from the conduction current, which is a component of a polarization current flowing through the insulation. C_0 can be determined by conventional capacitor measurement techniques at the power frequency [14].

From the equivalent circuit in Figure 4, the depolarization current can be represented by the summation of the discharging current of the RC branches, so it can be written in the form of the sum of exponential functions as expressed by (1),

$$i_d = \sum_{i=1}^n (A_i e^{-t/\tau_i}) \quad (1)$$

The coefficient (A_i) and the time constant (τ_i) of the i th branch can be calculated by (2) and (3), where U_0 and τ_c are the DC voltage applied during the charging process and the charging time of PDC measurement, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

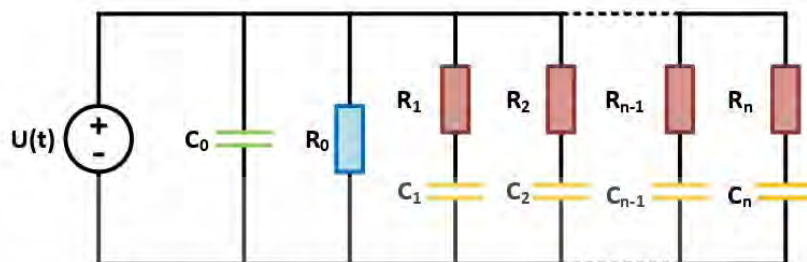


Figure 4. The equivalent circuit of the extended Debye's model.

$$\tau_i = R_i C_i \quad (2)$$

$$A_i = \frac{U_0}{R_i} \left(1 - e^{-t/\tau_i} \right) \quad (3)$$

From the determination of the EDM circuit parameters, the dielectric loss factor of the insulation can be determined in the next subsection.

2.3. The Dielectric Loss Factor

The insulation material in HV equipment has behaved as the capacitor, the capacitance of the insulation material in the frequency domain can be written in the complex form as given in (4) that is separated into real and imaginary parts as given in (5) and (6), respectively.

$$C(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) \quad (4)$$

Real part:

$$C'(\omega) = C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (5)$$

Imaginary part:

$$C''(\omega) = \frac{1}{\omega R_0} - \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (6)$$

With the known parameters (A_i and τ_i) in (1), R_i and C_i can be calculated by (2) and (3). From (5) and (6), the dielectric loss factor ($\tan \delta$) can be determined as the ratio of the imaginary and real parts of the complex capacitance as given in (7).

$$\tan \delta = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (7)$$

3. Proposed Techniques for Determining the Dielectric Model Parameters

The relaxation process in the insulation material is represented by the depolarization current, which is the sum of the discharged currents of the RC branches from the EDM. The interpretation of the depolarization current is significant for developing the precise dielectric model. As has been mentioned, the depolarization current can be written in the form of the sum of exponential functions. Several techniques [22–24] for fitting the sum of exponential functions have been proposed, but there are some restrictions in terms of computational accuracy, efficiency, and stability. Therefore, two simple and effective techniques for fitting the depolarization current are presented in the following subsections.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1. The First Developed Technique

The first developed technique is based on fitting a sum of multi-exponential functions. The procedure for the determination of the current fitting and the EDM parameters is expressed in Figure 5.

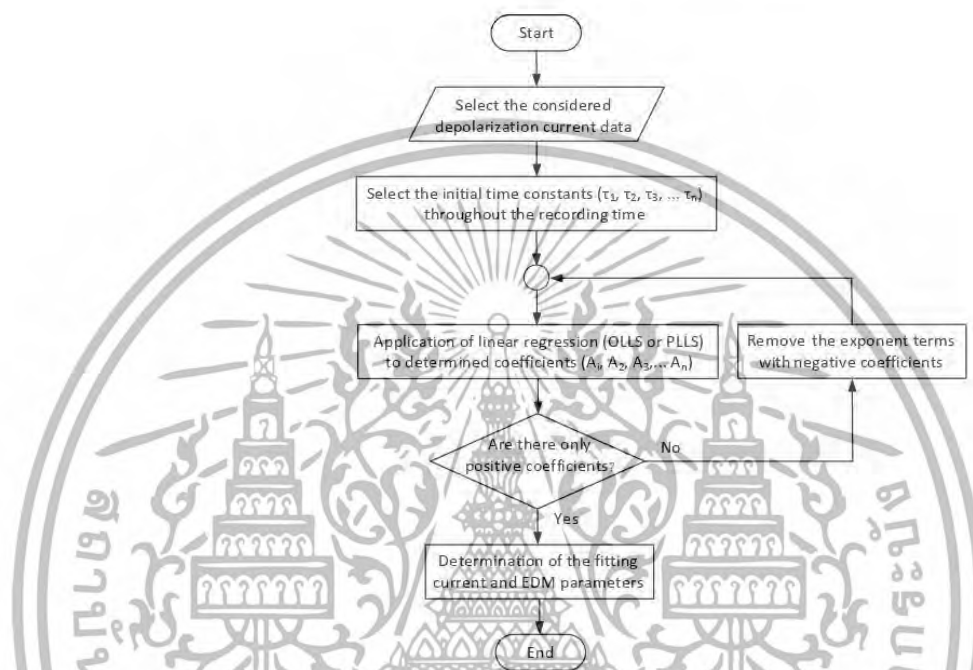


Figure 5. The procedure the first developed and improved techniques for the determination of the EDM parameters.

This technique starts with the selection of the time constant (τ_i) of (1) as given in (8), where i is an integer in the range of 1 to n . $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$, and τ_n are selected to span throughout the recorded time of the depolarization current (i_d), so n is the minimum positive integer which τ_n is greater than the record time of the depolarization current.

$$\tau_i = (10^{0.25})^{i-2} \quad (8)$$

Secondly, the application of an ordinary linear regression to fit the recorded depolarization current with (1), the coefficients (A_1, A_2, A_3, \dots , and A_n) can be determined. Then, all exponential terms with negative coefficients are removed from (1). Therefore, there are time constants with only positive coefficients, and the application of linear regression as is carried out in the second step for the determination of the coefficients. The processes for the determination of the time constants and the coefficient are performed repetitively until no negative coefficient is found. Finally, the fitted current is determined from (1), and the number of branches in the EDM equals the final number of the exponential terms in (1).

From the known time constants, coefficients, and applied DC voltage, the dielectric model parameters, i.e., R_i and C_i can be determined by (2) and (3).

In most cases, it was found that the fitted depolarization currents determined by the first developed technique agreed well with those of the measured data and those determined by the commercial software. However, in some cases, the computed results are deviated in the low current and the late time range. Therefore, a more accurate technique for fitting the depolarization current is still required for further development.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2. The Improved Technique

The improved technique is based on the first developed technique, but the percentage linear least squares (PLLS) method is applied for determining the coefficients instead of the ordinary linear least squares (OLLS) method [17]. The procedure for the determination of the fitting current and EDM parameters is also presented in Figure 5.

The PLLS method [18] is a kind of weighted linear least squares method [25], and the weight of the i th recorded current ($i_d(i)$) is set to be an inversed proportion of its value as given in (9). From the predetermination of the time constants, the coefficients can be computed by (10), where N , $\{y\}$, $\{A\}$, $[X]$, and $[W]$ given in (11) to (14) are the number of the current recorded points, a column vector of the depolarization current, a vector column of the unknown coefficients in (1), a matrix of the calculated value of the basis function in (1), and a diagonal matrix of the weights associated with (9), respectively.

$$w(i) = 1/i_d(i) \quad (9)$$

$$\{A\} = ([X]^t [W]^2 [X])^{-1} [X]^t [W]^2 \{y\} \quad (10)$$

$$\{y\} = [i_d(t_0) i_d(t_1) i_d(t_2) \cdots i_d(t_N) i_d(t_{N-1})]^t \quad (11)$$

$$\{A\} = [A_1 A_2 A_3 \cdots A_{n-1} A_n]^t \quad (12)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} e^{-t_0/\tau_1} & e^{-t_0/\tau_2} & e^{-t_0/\tau_3} & \cdots & e^{-t_0/\tau_{n-1}} & e^{-t_0/\tau_n} \\ e^{-t_1/\tau_1} & e^{-t_1/\tau_2} & e^{-t_1/\tau_3} & \cdots & e^{-t_1/\tau_{n-1}} & e^{-t_1/\tau_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ e^{-t_{N-1}/\tau_1} & e^{-t_{N-1}/\tau_2} & e^{-t_{N-1}/\tau_3} & \cdots & e^{-t_{N-1}/\tau_{n-1}} & e^{-t_{N-1}/\tau_n} \\ e^{-t_N/\tau_1} & e^{-t_N/\tau_2} & e^{-t_N/\tau_3} & \cdots & e^{-t_N/\tau_{n-1}} & e^{-t_N/\tau_n} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Weighting diagonal matrix:

$$[W] = \begin{bmatrix} 1/i_d(t_0) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1/i_d(t_1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/i_d(t_{N-1}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1/i_d(t_N) & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

With the same process as the first developed technique, the exponential terms with negative coefficients are removed, and the calculation of the coefficients is performed repeatedly until no negative coefficient is found. Most of the determined time constants and coefficients, including R_i and C_i , from this technique are different from those determined by the first developed technique. It was found that this technique can provide quite accurate results throughout the recorded time, including at the low current and late time range.

4. Verification of Proposed Techniques

Using some experimental data from the PDC measurement, the two proposed techniques (the first developed and improved ones) were verified by comparison of the depolarization current, and the dielectric loss factor determined by the proposed techniques and commercial software (polarization and depolarization current evaluation program (Version 3.0: 2000) produced by ALFF Engineering Co., Ltd., Gomweg 7, CH8915 Hausen am Albis, Switzerland). For the demonstration of the performance and stability of the proposed methods, which can be applied to all cases of HV apparatuses, there are sixteen cases of PDC measurement on HV apparatuses consisting of bushings in Cases 1 and 2, cables in Cases 3 to 6, rotating machines in Cases 7 to 12, and transformers in Cases 13 to

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. Some photos of the actual experiments are illustrated in Figure 6. In the experiment, the compact and commercial instrument (PDC-ANALYSER-1MOD (ed. 2012) produced by ALFF Engineering Co., Ltd.) [20] was utilized for the PDC measurements. The rating of the considered HV apparatuses and the testing parameters of the PDC measurements are given in Tables 1 and 2, respectively.

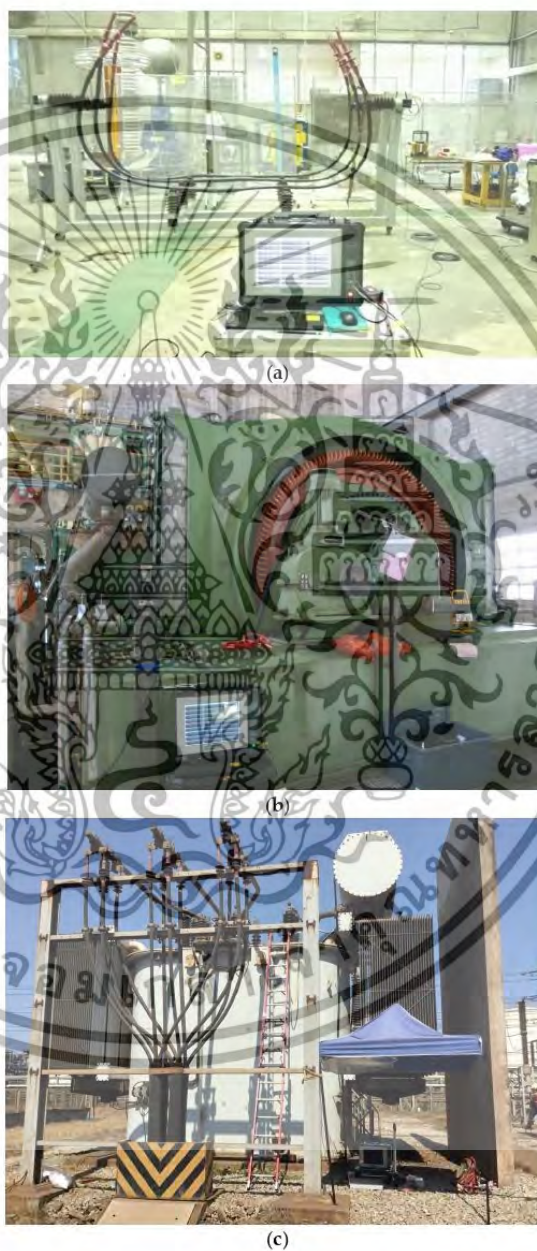


Figure 6. Examples of the actual experiments for the PDC measurements, (a) 6 m cable (b) 1.65 MW motor (c) 72 MVA transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Considered cases and their rating.

Case	HV Apparatuses	Rating
1	Bushing	69 kV
2	Bushing	69 kV
3	Cable (6 m)	22 kV
4	Cable (100 m)	22 kV
5	Cable (6 m)	115 kV
6	Cable (100 m)	115 kV
7	Rotating machine (Motor)	1.65 MW
8	Rotating machine (Generator)	50 MVA
9	Rotating machine (Generator)	50 MVA
10	Rotating machine (Generator)	150 MVA
11	Rotating machine (Generator)	150 MVA
12	Rotating machine (Generator)	800 MVA
13	Transformer T3	6 MVA
14	Transformer T4	6 MVA
15	Transformer T1	55 MVA
16	Transformer T2	72 MVA

Table 2. Testing parameters of the PDC measurements.

Case	U_0 (V)	t_c (s)	R_0 (Ω)	C_0 (F)
1	500	300	1.2200×10^{11}	3.1900×10^{-10}
2	1000	150	2.4000×10^{13}	4.1500×10^{-10}
3	500	1000	7.3200×10^{12}	1.5210×10^{-9}
4	1000	100	6.3700×10^{13}	1.2150×10^{-8}
5	400	250	1.5000×10^{10}	2.0380×10^{-9}
6	400	250	1.4925×10^{14}	1.5710×10^{-9}
7	500	1000	1.1741×10^{11}	3.1900×10^{-10}
8	100	1100	1.5000×10^{11}	1.8280×10^{-7}
9	100	650	1.0100×10^{11}	1.8700×10^{-7}
10	100	1100	8.5700×10^{10}	2.3180×10^{-7}
11	50	1100	4.9400×10^{10}	4.3130×10^{-7}
12	100	1100	9.5800×10^{10}	1.9360×10^{-7}
13	200	2100	7.4500×10^9	3.5940×10^{-9}
14	200	2100	8.4700×10^9	3.0400×10^{-9}
15	1000	3100	2.4300×10^9	2.1370×10^{-8}
16	1000	3100	1.3100×10^{11}	5.8430×10^{-9}

Comparisons of the depolarization currents from measurement, from the commercial software [19–21], and computed by the proposed techniques are presented in Figures 7a, 8a, 9a, 10a, 11a, 12a, 13a, 14a, 15a, 16a, 17a, 18a, 19a, 20a, 21a and 22a. For the sake of the presentation in a compact manner and the requirement of the space limitation, the EDM circuit parameters in only Cases 2, 9, and 11 are presented in Tables 3–5 because these cases are used for demonstration of the performance of the proposed techniques. In addition, comparisons of the com-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

puted dielectric loss factors by the commercial software and the proposed techniques are also presented in Figures 7b, 8b, 9b, 10b, 11b, 12b, 13b, 14b, 15b, 16b, 17b, 18b, 19b, 20b, 21b and 22b.

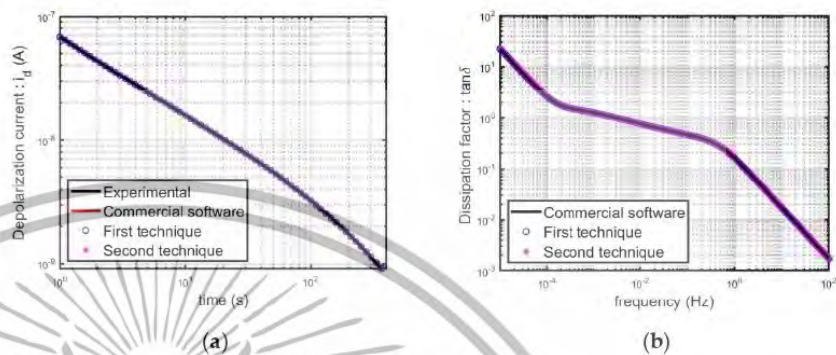


Figure 7. Comparison results of Case 1 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

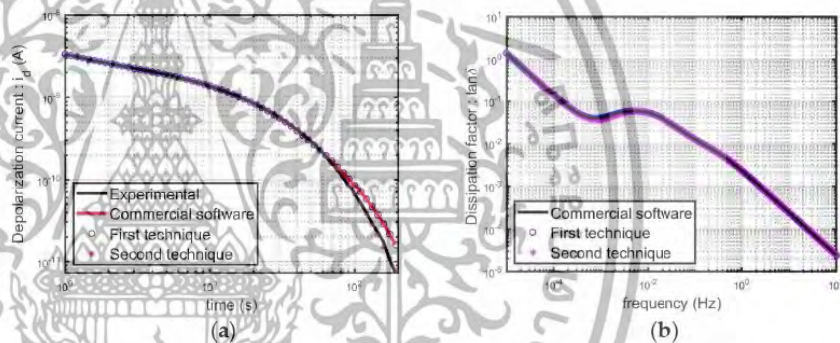


Figure 8. Comparison results of Case 2 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

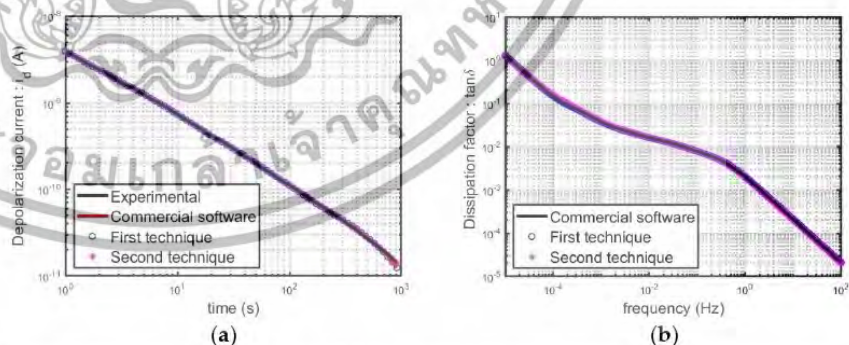


Figure 9. Comparison results of Case 3 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

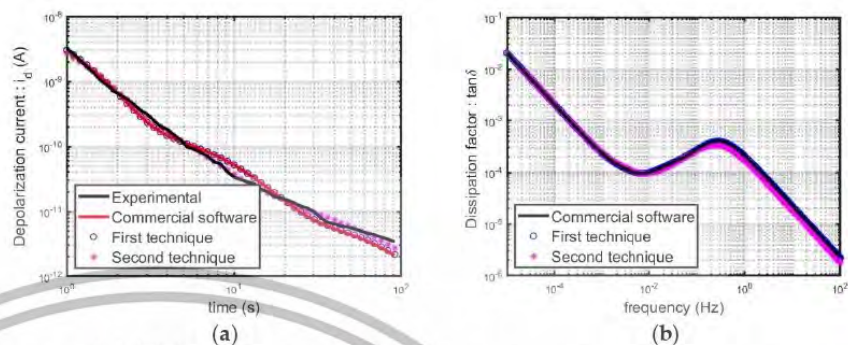


Figure 10. Comparison results of Case 4 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

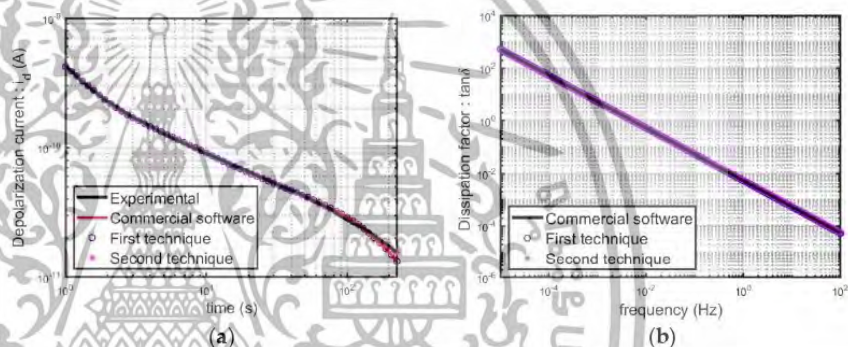


Figure 11. Comparison results of Case 5 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

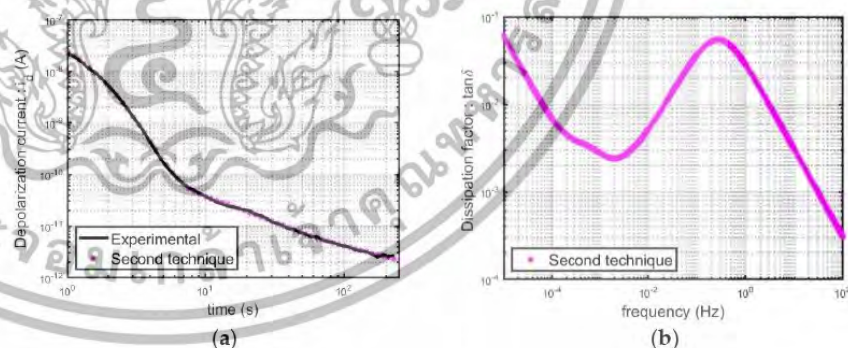


Figure 12. Comparison results of Case 6 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

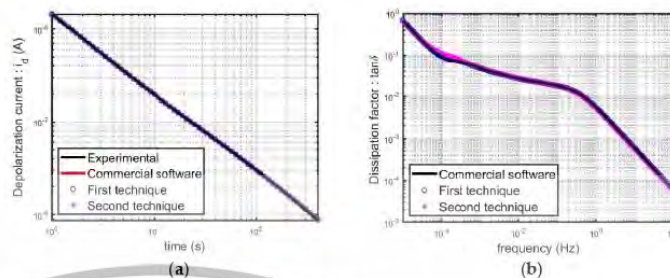


Figure 13. Comparison results of Case 7 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

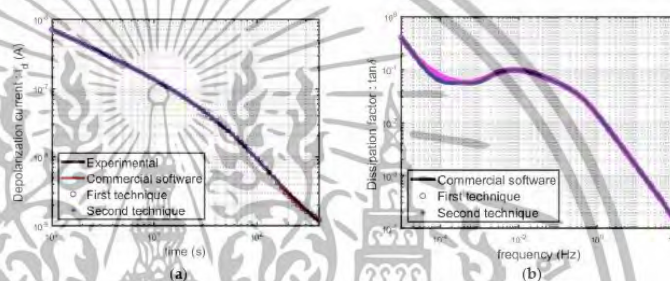


Figure 14. Comparison results of Case 8 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

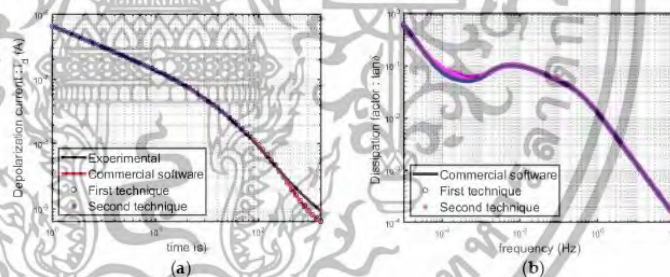


Figure 15. Comparison results of Case 9 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

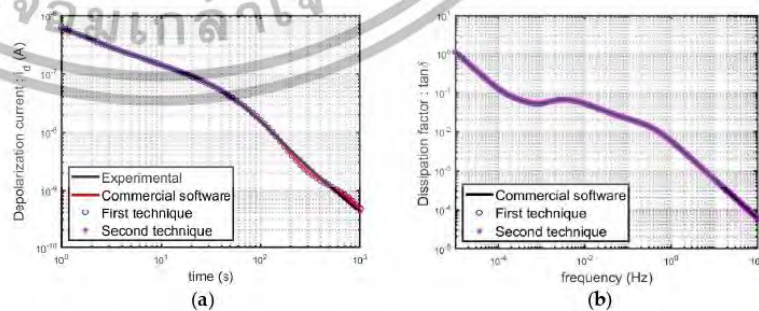


Figure 16. Comparison results of Case 10 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

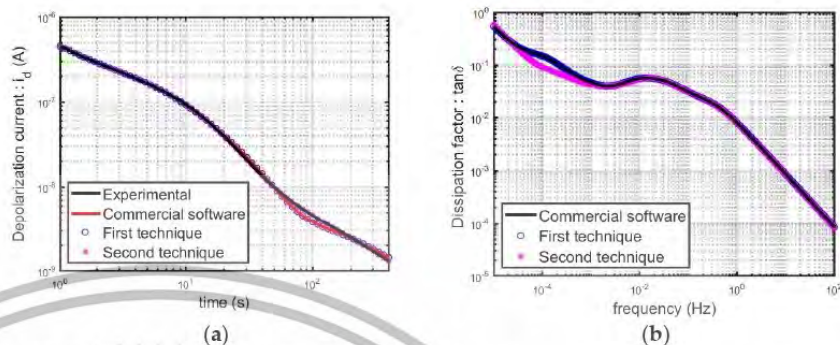


Figure 17. Comparison results of Case 11 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

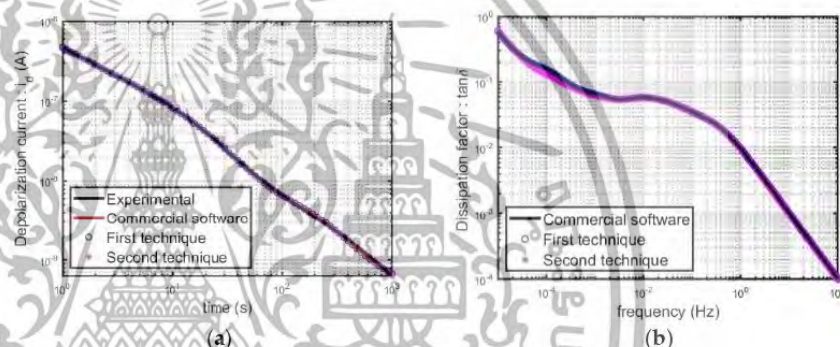


Figure 18. Comparison results of Case 12 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

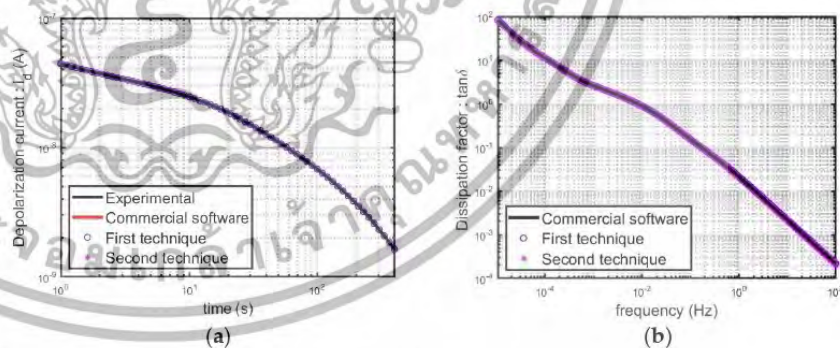


Figure 19. Comparison results of Case 13 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

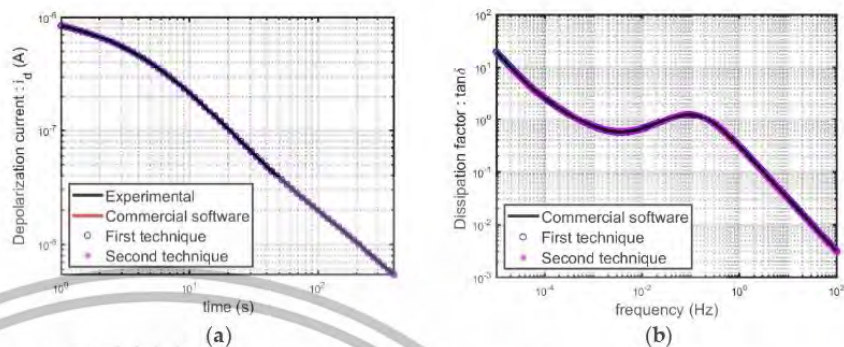


Figure 20. Comparison results of Case 14 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

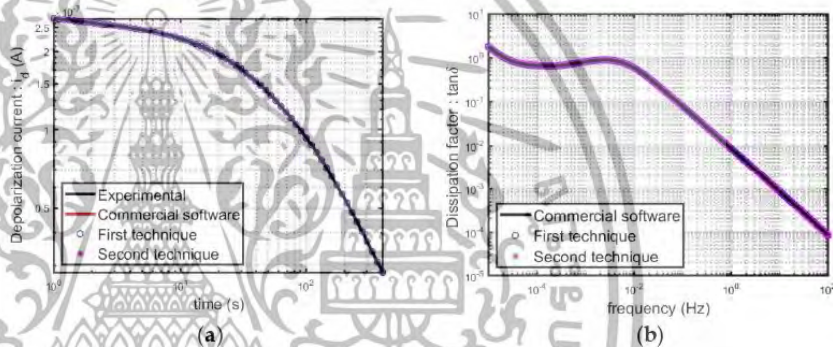


Figure 21. Comparison results of Case 15 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

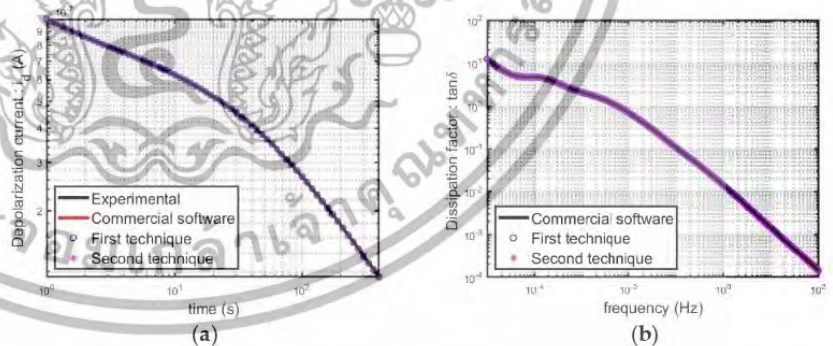


Figure 22. Comparison results of Case 16 determined by the proposed techniques, commercial software, and collected from the experiment, (a) depolarization currents (b) dielectric loss factors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3. The determined EDM circuit parameters by the commercial software, the first developed technique, and the improved technique in Case 2.

The Commercial Software				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time Constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
2.8384×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.5231×10^{11}	1.5962×10^{-12}
7.9682×10^{-10}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.2550×10^{12}	1.4170×10^{-12}
5.8131×10^{-10}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.7203×10^{12}	3.2689×10^{-12}
1.5337×10^{-9}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	6.5189×10^{11}	2.7279×10^{-11}
4.7419×10^{-10}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.9624×10^{12}	2.8655×10^{-11}
The First Developed Technique				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
2.8393×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.5220×10^{11}	1.5966×10^{-12}
7.9760×10^{-10}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	1.2538×10^{12}	1.4184×10^{-12}
5.8055×10^{-10}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.7225×10^{12}	3.2647×10^{-12}
1.5341×10^{-9}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	6.5171×10^{11}	2.7286×10^{-11}
4.7414×10^{-10}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	1.9627×10^{12}	2.8652×10^{-11}
The Improved Technique				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
2.8186×10^{-9}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	3.5478×10^{11}	1.5850×10^{-12}
4.3474×10^{-10}	1.0000×10^0	1.0000×10^0	2.3002×10^{12}	4.3474×10^{-13}
7.3157×10^{-10}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	1.3669×10^{12}	2.3134×10^{-12}
9.6876×10^{-10}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	1.0322×10^{12}	9.6876×10^{-12}
1.3011×10^{-9}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	7.6191×10^{11}	4.1505×10^{-11}
3.1810×10^{-11}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	2.4422×10^{13}	4.0947×10^{-12}

The relative root mean square error (*RRMSE*) and the root mean square relative error (*RMSRE*) utilized to evaluate the accuracy of the proposed techniques can be calculated by (15) and (16), where y_i and \hat{y}_i is the actual and estimated values, respectively, and n is the number of the considered points. The *RRMSE* and The *RMSRE* of the fitted currents determined by the proposed methods and the commercial software are presented in Tables 6 and 7, and the measured currents are used as the reference (the actual values, y_i in (15) and (16)).

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}} \quad (15)$$

$$RMSRE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2} \quad (16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4. The determined EDM circuit parameters by the commercial software, the first developed technique, and the improved technique in Case 9.

The Commercial Software				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time Constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
8.1400×10^{-7}	1.7794×10^0	5.6200×10^{-1}	1.2300×10^8	4.5800×10^{-9}
3.8500×10^{-7}	5.6180×10^{-1}	1.7800×10^0	2.6000×10^8	6.8400×10^{-9}
1.7300×10^{-7}	1.7794×10^{-1}	5.6200×10^0	5.7800×10^8	9.7300×10^{-9}
1.1400×10^{-7}	5.6180×10^{-2}	1.7800×10^1	8.7900×10^8	2.0200×10^{-8}
4.7600×10^{-8}	1.7794×10^{-2}	5.6200×10^1	2.1000×10^9	2.6800×10^{-8}
1.2200×10^{-9}	1.7794×10^{-3}	5.6200×10^2	5.6200×10^{10}	1.0000×10^{-8}
The First Developed Technique				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
8.1375×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.2289×10^8	4.5761×10^{-9}
3.8484×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	2.5985×10^8	6.8436×10^{-9}
1.7303×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	5.7793×10^8	9.7303×10^{-9}
1.1376×10^{-7}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	8.7906×10^8	2.0229×10^{-8}
4.7640×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	2.0991×10^9	2.6790×10^{-8}
1.2187×10^{-9}	1.7783×10^{-3}	5.6234×10^2	5.6227×10^{10}	1.0001×10^{-8}
The Improved Technique				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
8.6611×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	1.1546×10^8	4.8705×10^{-9}
2.8482×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	3.5110×10^8	5.0648×10^{-9}
1.3974×10^{-7}	3.1623×10^{-1}	3.1623×10^0	7.1559×10^8	4.4191×10^{-9}
8.5825×10^{-8}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	1.1652×10^9	4.8263×10^{-9}
2.8281×10^{-8}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	3.5359×10^9	2.8281×10^{-9}
8.4108×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	1.1890×10^9	1.4957×10^{-8}
4.6875×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	2.1333×10^9	1.4823×10^{-8}
1.8408×10^{-8}	1.7783×10^{-2}	5.6234×10^1	5.4324×10^9	1.0352×10^{-8}
3.3961×10^{-9}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	2.9401×10^{10}	3.4012×10^{-9}
1.9161×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	5.0839×10^{10}	3.4978×10^{-9}
6.2805×10^{-10}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	1.3884×10^{11}	2.2777×10^{-9}
6.9180×10^{-10}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	6.9088×10^{10}	1.4474×10^{-8}

Table 5. The determined EDM circuit parameters by the commercial software, the first developed technique, and the improved technique in Case 11.

The Commercial Software				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time Constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
7.3177×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	6.8328×10^7	8.2301×10^{-9}
1.1616×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	4.3043×10^8	4.1314×10^{-9}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5. Cont.

The Commercial Software				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time Constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
2.0380×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	2.4534×10^8	2.2921×10^{-8}
9.1652×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.4554×10^8	3.2597×10^{-8}
4.0236×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.2401×10^{10}	1.4340×10^{-8}
1.2693×10^{-9}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	1.8172×10^{10}	9.7860×10^{-8}
The First Developed Technique				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
7.3181×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	6.8324×10^7	8.2305×10^{-9}
1.1615×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	4.3049×10^8	4.1308×10^{-9}
2.0380×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	2.4533×10^8	2.2922×10^{-8}
9.1650×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	5.4555×10^8	3.2596×10^{-8}
4.0240×10^{-9}	5.6234×10^{-3}	1.7783×10^2	1.2400×10^{10}	1.4341×10^{-8}
1.2691×10^{-9}	5.6234×10^{-4}	1.7783×10^3	1.8173×10^{10}	9.7852×10^{-8}
The Improved Technique				
Coefficient (A_i)	Alpha (α)	Time constant (τ_i)	R_i (Ω)	C_i (F)
6.9323×10^{-7}	1.7783×10^0	5.6234×10^{-1}	7.2126×10^7	7.7966×10^{-9}
1.5630×10^{-7}	5.6234×10^{-1}	1.7783×10^0	3.1989×10^8	5.5590×10^{-9}
1.0538×10^{-7}	1.7783×10^{-1}	5.6234×10^0	4.7447×10^8	1.1852×10^{-8}
1.3719×10^{-7}	1.0000×10^{-1}	1.0000×10^1	3.6446×10^8	2.7438×10^{-8}
1.3839×10^{-8}	5.6234×10^{-2}	1.7783×10^1	3.6130×10^9	4.9219×10^{-9}
1.2973×10^{-8}	3.1623×10^{-2}	3.1623×10^1	3.8541×10^9	8.2050×10^{-9}
4.7912×10^{-9}	1.0000×10^{-2}	1.0000×10^2	1.0436×10^{10}	9.5827×10^{-9}
1.7842×10^{-9}	3.1623×10^{-3}	3.1623×10^2	2.7158×10^{10}	1.1644×10^{-8}
1.0548×10^{-9}	1.0000×10^{-3}	1.0000×10^3	3.1625×10^{10}	3.1621×10^{-8}

Table 6. RRMSEs of the computed depolarization currents.

Case	RRMSEs (Commercial Software) (%)	RRMSEs (First Developed Technique) (%)	RRMSEs (Improved Technique) (%)
1	2.5688×10^{-2}	2.5663×10^{-2}	2.4902×10^{-2}
2	7.6491×10^{-4}	7.6485×10^{-4}	2.9245×10^{-4}
3	5.1845×10^{-2}	5.1828×10^{-2}	5.8238×10^{-2}
4	9.8655×10^{-1}	9.8819×10^{-1}	1.8918×10^0
5	1.6587×10^{-1}	1.6584×10^{-1}	1.5483×10^{-1}
6	N/A	N/A	3.3313×10^{-1}
7	9.3972×10^{-2}	9.4638×10^{-2}	1.0161×10^{-1}
8	3.1191×10^{-2}	3.1230×10^{-2}	2.6966×10^{-2}
9	4.0939×10^{-2}	4.0928×10^{-2}	2.4202×10^{-2}
10	4.6411×10^{-2}	4.6394×10^{-2}	3.3456×10^{-2}
11	6.0334×10^{-2}	6.0177×10^{-2}	2.7993×10^{-2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6. Cont.

Case	RRMSEs (Commercial Software) (%)	RRMSEs (First Developed Technique) (%)	RRMSEs (Improved Technique) (%)
12	2.4518×10^{-2}	2.4487×10^{-2}	2.5346×10^{-2}
13	1.0728×10^{-2}	1.0769×10^{-2}	2.5134×10^{-2}
14	1.0151×10^{-2}	9.8452×10^{-2}	1.0583×10^{-2}
15	3.9636×10^{-3}	3.9484×10^{-3}	8.4784×10^{-3}
16	2.8953×10^{-2}	2.8984×10^{-2}	3.9954×10^{-2}

Table 7. RMSREs of the computed depolarization currents.

Case	RMSREs (Commercial Software) (%)	RMSREs (First Developed Technique) (%)	RMSREs (Improved Technique) (%)
1	3.4947×10^{-1}	3.4219×10^{-1}	1.2406×10^{-1}
2	2.7007×10^1	2.6999×10^1	2.0769×10^0
3	2.2025×10^1	2.2071×10^0	5.8930×10^{-1}
4	2.2385×10^1	2.1767×10^1	8.1292×10^0
5	3.1970×10^0	3.1934×10^0	9.2343×10^{-1}
6	N/A	N/A	4.1612×10^0
7	2.5932×10^0	2.5939×10^0	5.2441×10^{-1}
8	6.8378×10^0	6.8414×10^0	1.0861×10^{-1}
9	1.2869×10^1	1.2870×10^1	1.2791×10^{-1}
10	7.1240×10^0	7.1347×10^0	2.7699×10^{-1}
11	1.3595×10^1	1.3591×10^1	3.2594×10^{-1}
12	2.5091×10^0	2.5195×10^0	1.1860×10^{-1}
13	9.7362×10^{-1}	9.7317×10^{-1}	8.2364×10^{-1}
14	8.0304×10^{-1}	8.0176×10^{-1}	7.2518×10^{-2}
15	1.7513×10^{-1}	1.7351×10^{-1}	7.9266×10^{-1}
16	1.9291×10^0	1.9297×10^0	1.9225×10^0

The results determined by the proposed techniques and the commercial software in the considered cases presented by Figures 7–22 and Tables 3–7 can be noticed and are described as follows.

- (1) In the cases of the bushings (Cases 1 and 2), there is no significant difference in the results in Case 1 (Figure 7), but the first technique and the commercial software provide the fitting current that deviated from the measured one in the low current and late time ranges in Case 2 (Figure 8). The improved technique still provides good agreement with the measured one throughout the recording time. It results in the difference of the dielectric loss factors in the low-frequency range (10^{-5} Hz to 10^{-2} Hz) as noticed by the results in Figure 8.
- (2) In the cases of the cables (Cases 3 to 7), there is no significant difference in results in Cases 3, 5, and 7 (Figures 9, 11 and 13), but the first technique and the commercial software provide the fitting current that deviated from the measured one throughout the recording ranges in Case 4 (Figure 10), and it leads to the deviation of the loss factor throughout the considered frequency range (10^{-5} Hz to 10^2 Hz). In addition,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

they also fail in fitting the depolarization current in Case 6 (Figure 12). From the failure in the current fitting, the dielectric loss factor also cannot be determined. However, the improved technique still provides good agreement with the measured one throughout the recording time in all considered cases of the cables.

- (3) In the cases of the rotating machines (Cases 8 to 13), the significant difference in the results cannot be found in Cases 8, 12, and 13 (Figures 14, 18 and 19), but the first technique and the commercial software provide the fitting current that deviated from the measured one in the low current and late time ranges in Cases 9 to 11 (Figures 15–17). Such deviation affects the computed dielectric loss factor in the low-frequency range (10^{-5} Hz to 10^{-2} Hz). However, the improved technique still provides good agreement with the measured one throughout the recording time in all considered cases of the rotating machines.
- (4) In the cases of the transformers (Cases 14 to 16), the proposed technique and the commercial software provide almost the same results in Cases 14 to 16 (Figures 20–22), which agree with the measured one.
- (5) In all cases, the first developed technique and the commercial software provide almost the same results as the fitted depolarization currents, the determined EDM, and computed dielectric loss factors.
- (6) As noticed in Table 6, even though the RRMSEs of the current computed by the improved technique in some cases are a bit higher than those of the first technique, the RRMSEs of the improved technique are still on the same level as those of the first technique. Furthermore, as noticed in Table 7, the RMSREs of the improved technique are lower than those of the first one in all cases. The maximum RMSRE of the improved technique is around 8%, whereas that of the commercial software is around 22%. The fitted current by the first technique and the commercial software deviates significantly from the measured one in the late time and low current range, but the improved method can fit the current agreeing well with the measured one throughout the recorded time even in the low current and late time range.
- (7) The deviations of the current computed by the first technique in the low current and late time affect the computed dielectric loss factors in the low-frequency range (10^{-5} Hz to 10^{-3} Hz) as can be seen in the results in the Cases of 2, 9, and 11 (Figures 8, 15 and 17). Additionally, in Case 6 (Figure 12), the first developed technique with the OLLS method and the commercial software failed in the determination of the dielectric model and fitting with the measured current, but the improved technique with the PLLS method can provide the fitted current agreeing well with the measured one.
- (8) The application of the PLLS method in the improved technique can provide a better performance in terms of accuracy and stability than the OLLS method and the commercial software. To achieve higher accuracy of the improved technique than that of the first technique and commercial software, a higher number of branches in the EDM determined by the improved technique is required as noticed in Tables 3–5.

5. Conclusions

This paper has presented effective iterative techniques for fitting the depolarization current and parameter determination of the dielectric model based on the EDM. The first developed technique employs the predetermination of the time constants. Then, an ordinary linear least squares method for the determination of the coefficients of the fitting function in the form of the sum of exponential functions. The exponential terms with negative coefficients are removed during the iterative process of coefficient determination. The results of this technique agree very well with those provided by the commercial software. The RRMSEs and RMSREs of the fitted depolarization current by the first developed technique are almost the same as those provided by the commercial software. However, in some cases of the considered HV equipment, this technique provides the deviated current at the low current and the late time range. It affects the deviation of the determined dielectric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

loss factor in the low-frequency range (0.001 Hz to 0.01 Hz) and influences the precision in the evaluation of the moisture content in the insulation and insulation aging. Additionally, in some cases, the first-developed technique and the commercial software cannot provide the proper fit of the depolarization current and the dielectric model parameters. In some cases, the first developed technique provides high deviations of the fitted currents in the low current and late time range and fails to fit the depolarization current. Therefore, the improved technique has been proposed to increase the accuracy and the reliability of the first developed technique, and the percentage least squares method was utilized to determine the dielectric parameters instead of the ordinary one. It was found that the RRMSEs of the fitted depolarization current by the improved technique are almost the same as those of the first developed one, but the RMSREs of the improved technique are lower than those of the first developed one and the commercial software. There are no cases in this paper that the improved technique cannot use to determine the dielectric parameters. Using the improved technique, the depolarization current can be very well fitted, and the dielectric model and the dielectric loss factors can be accurately determined. Additionally, the insulation condition of HV equipment can be evaluated properly.

Author Contributions: Conceptualization, J.R. and P.Y.; methodology, J.R., P.N. and P.Y.; validation, J.R. and T.M.-E.; formal analysis, P.Y.; investigation, P.Y. and J.R.; writing—original draft preparation, J.R. and P.Y.; writing—review and editing, P.Y. and J.R.; supervision, P.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang [2565-02-01-103].

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors would also like to thank the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, and JD Co., Ltd. for supporting testing facilities and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang [2565-02-01-103] for financial support.

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

References

- David, E.; Soltani, R.; Lamarre, L. PDC measurements to assess machine insulation. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2010**, *17*, 1461–1469. [CrossRef]
- Mishra, D.; Haque, N.; Baral, A.; Chakravorti, S. Assessment of interfacial charge accumulation in oil-paper interface in transformer insulation from polarization–depolarization current measurements. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2017**, *24*, 1665–1673. [CrossRef]
- Wang, D.; Zhou, L.; Yang, Z.-X.; Cui, Y.; Wang, L.; Jiang, J.; Guo, L. A New Testing Method for the Dielectric Response of Oil-Immersed Transformer. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2020**, *67*, 10833–10843. [CrossRef]
- Zhou, K.; Yuan, H.; Li, Y.; Li, M.; Li, Z.; Lin, S. Assessing Aging Status and Type of XLPE Cable Insulation with a Graphic Approach Based on PDC Measurement. *IEEE Trans. Power Deliv.* **2022**, *37*, 5114–5123. [CrossRef]
- Der Houhanessian, V. Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems. Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1998. [CrossRef]
- Saha, T.K.; Purkait, P.; Muller, F. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements. *IEEE Trans. Power Deliv.* **2005**, *20*, 149–157. [CrossRef]
- Zhang, Y.; Liu, J.; Zheng, H.; Wei, H.; Liao, R. Study on Quantitative Correlations between the Ageing Condition of Transformer Cellulose Insulation and the Large Time Constant Obtained from the Extended Debye Model. *Energies* **2017**, *10*, 1842. [CrossRef]
- Cheng, X.; Ye, G.; Sun, H.; Li, T.; Sun, C. Analysis of low-frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model. *AIP Adv.* **2021**, *11*, 085103. [CrossRef]
- Yang, F.; Tang, C.; Zhou, Q.; Du, L.; Wan, H.; Chen, J. Novel Characteristic Quantities for Determining the Moisture State of Oil-Impregnated Cellulose Insulation Using the Extended Debye Model. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2022**, *29*, 1087–1094. [CrossRef]
- Kuffel, E.; Zaengl, W.S.; Kuffel, J. Non-destructive insulation test techniques. In *High Voltage Engineering Fundamental*, 2nd ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2000; pp. 411–421.
- IEEE Standard C57.152TM-2013; Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors. IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2013.
- Papy, J.M.; De Lathauwer, L.; Van Huffel, S. Exponential data fitting using multilinear algebra: The single-channel and multi-channel case. *Numer. Linear Algebra Appl.* **2005**, *12*, 809–826. [CrossRef]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Brübach, J.; Janicka, J.; Dreizler, A. An algorithm for the characterisation of multi-exponential decay curves. *Opt. Lasers Eng.* **2009**, *47*, 75–79. [CrossRef]
14. Roongroj, C.h.; Pattanadech, N.; Praisuwanna, P.; Yutthagowith, P.; Thongkaemkaew, K. Equivalent circuit approximation of transformer insulation by using PDC measurement. In Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Krabi, Thailand, 14–17 May 2008.
15. Mousavi, S.A.; Bigdeli, M. A Particle Swarm Optimization based method for estimation of transformer insulation model parameters. In Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Phetchaburi, Thailand, 16–18 May 2012. [CrossRef]
16. Mousavi, S.A. Genetic Algorithm in evaluating insulation model parameters. In Proceedings of the International Conference on Intelligent and Advanced Systems, Kuala Lumpur, Malaysia, 15–17 June 2010.
17. Montgomery, D.C.; Peck, E.A.; Vining, G.G. Multiple linear regression. In *Introduction to Linear Regression Analysis*, 6th ed.; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2021; pp. 69–86.
18. Tofallis, C. Least squares percentage regression. *J. Mod. Appl. Stat. Meth.* **2009**, *7*. [CrossRef]
19. Houhanessian, V.D. PDC Evaluation: Polarization and Depolarization Current Evaluation Program. In *ALFF Engineering*, Version 3.0. 2000. Available online: <http://www.alff-engineering.ch/> (accessed on 10 October 2015).
20. Alff, J.; Houhanessian, V.D.; Zaengl, W.S.; Kachler, A.J. A novel, compact instrument for the measurement and evaluation of relaxation currents conceived for on-site diagnosis of electric power apparatus. In Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA, USA, 5 April 2002; pp. 161–167. [CrossRef]
21. Zaengl, W.S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment (transformers, cables etc.). In Proceedings of the 12th International Symposium on High Voltage Engineering-ISH 2001, Bangalore, India, 20–24 August 2001.
22. Pattanadech, N.; Yutthagowith, P. Fast curve fitting algorithm for parameter evaluation in lightning impulse test technique. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2015**, *22*, 2931–2936. [CrossRef]
23. Yutthagowith, P.; Pattanadech, N. Improved least-square Prony analysis technique for parameter evaluation of lightning impulse voltage and current. *IEEE Trans. Power Deliv.* **2016**, *31*, 271–277. [CrossRef]
24. Yutthagowith, P. Effective technique for circuit and waveform parameter extraction in impulse current tests and its application. *IEEE Trans. Power Deliv.* **2016**, *31*, 704–710. [CrossRef]
25. Carroll, R.J.; Ruppert, D. Combining transformations and weighting. In *Transformation and Weighting in Regression*, 1st ed.; Springer: New York, NY, USA, 1988; pp. 161–165. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทร่วมที่ 2

Study of High voltage AC Generation using A Series Resonant Circuit
Publication on The 7th International Symposium on Lightning Protection
and High Voltage Engineering (ISLH 2023), KMITL, Bangkok, Thailand,
23 February 2023, pp. 78-81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISLH 2023

THE 7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON
LIGHTNING PROTECTION AND HIGH VOLTAGE ENGINEERING



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ORGANIZING COMMITTEE

ORGANIZED BY:

High Voltage Engineering Laboratory, Department of Electrical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

CO-ORGANIZED BY:

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chubu University

SPONSORED BY:

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

STEERING COMMITTEE:

N. Nagaoka	Doshisha University
Y. Baba	Doshisha University
K. Yamabuki	Wakayama National College of Technology
K. Yamamoto	Chubu University
H. T. Tran	Tsuruoka National College of Technology
S. Potivejkul	KMITL
A. Kunakorn	KMITL
P. Yuthagowith	KMITL

LOCAL ORGANIZING COMMITTEE:

P. Yuthagowith	Chairperson, KMITL
P. Chaisiri	Secretary, KMITL
S. Polmai	KMITL

TECHNICAL PROGRAM COMMITTEE:

P. Yuthagowith	KMITL
A. Pruksanubal	KMUTNB
S. Chotigo	KMUTT
B. Marungsri	SUT
N. Tanthanuch	TU

Numerical Model of Front-wheel Drive Vehicle for Lightning Surge Phenomena

Yuka Kinoshima and Kazuo Yamamoto

Over-Voltage Mitigation of Individual Grounding Electrodes Buried Outside a Structure

N.Triruttanapiruk, H. Sakakibara, A. Higano, A. Fujiwara, T. Shoda and K. Yamamoto

Calculation of Electromagnetic, Heat and Thermal Stress of a Transmission-Line Arrester for Lightning Currents

Yoshiki Nishimura and Yoshihiro Baba

Effective Method for Determining Stray and Load Circuit Parameters in Lightning Impulse Voltage Generation

Pongsatorn Termachaitpongsa and Peeravut Yuthagowith

Verification of Cable Damage Accidents Caused by Lightning Strike to Wind Turbine

Kota Yoshida and Kazuo Yamamoto

Study of High Voltage AC Generation using A Series Resonant Circuit

Jedsada Raxsa, Peeravut Yuthagowith and Thanatorn mai-eiam

14.45 - 15.15 Closing ceremony

Conference Venue: Room ECC-302, Department of Electrical, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Study of High Voltage AC Generation using A Series Resonant Circuit

J. Raxsa, P. Yutthagowith, and T. Mai-eiam

School of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalongkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
65016021@kmitl.ac.th

Abstract

This paper studies an approach for high-voltage AC generation using a series resonant circuit in case of high capacitive load. The capacitor of 0.5 μF was a selected capacitive load in the test circuit. An HV inductor with 3 changing taps (53.2 H, 24.2 H, and 18.6 H) is used in the circuit for the generation of AC voltage with frequencies of about 30 Hz, 40 Hz, and 50 Hz, respectively. The square wave was generated by a variable frequency converter. The frequency of the square wave is adjusted to meet the resonant conditions associated with the inductance and capacitance of the circuit. It was found that using the test circuit the voltage gains of 30 can be achieved in the experiments. From the test results, it can confirm the possibility for further development of the test circuit used in the onsite test of MV and HV power cables in the near future.

Keywords: HVAC testing, series resonance, the resonant condition

1. Introduction

High voltage (HV) testing is still a crucial research field. HV equipment and insulation materials must be confirmed their performances by HV tests. According to the IEC standard 60060-1[1], the quality of high voltage alternating current (HVAC) for testing is defined by two factors. One is the percentage of total harmonic distortion of voltage ($\%THD_V$), and the other is the difference between root means square voltage (V_{rms}) and the peak voltage divided by the square root of two ($V_{peak}/\sqrt{2}$). These two factors shall be less than 5%. In practice, the supply voltage contained the harmonics [2] due to effects of non-linear and power electronic components [3]. This causes the test waveform to distort from the desired sinusoidal waveform.

In the HVAC tests on insulation materials and HV equipment, most of the test objects act as the capacitive load [4]. In cases of large capacitive loads such as medium-voltage (MV) and HV cables, a large power testing transformer is required. However, very high currents can occur during HV tests due to electrical breakdown, and this short circuit current can cause damage to the measuring system and the HV equipment under test. In addition, the large testing transformer is improper for on-site tests due to space and transportation limits. As a result, in HV tests of high capacitive loads, a series resonant circuit with

variable inductance or variable frequency is used for HV generation. At the resonant condition, the voltages across the inductor and the capacitor are amplified with an almost pure sinusoidal waveform, and undesired harmonic contents are eliminated. Also, the required supply power is much lower than the conventional HVAC test circuit. In addition, the power factor is almost unity. Therefore, the size and weight of the generator based on the resonant circuit are dramatically reduced when compared with the conventional system. Also, the short circuit current due to the electrical breakdown is very small, because of the loss of the resonant condition.

From the described reason, the resonant circuit is an effective tool for the development of test circuits used in the onsite HV test with high capacitive load i.e. MV and HV power cables, large rotating machines, and gas-insulated substations (GIS).

In this paper, the study of the series resonant circuit [5], [6] for HVAC generation is presented. The considered circuit consists of a square wave voltage generator acting as an input voltage source, an HV inductor, and a capacitor acting as a high capacitive load. The square wave voltage is generated by a variable power frequency converter, and the frequency is adjusted to meet the resonant condition. The HV inductor has 3 changing taps for inductance of 53.2 H, 24.2 H, and 18.6 H. The considered capacitor of 0.5 μF is used for the high capacitive load in the circuit. The experiments were performed to validate the test circuit. From the test results, the developed system can amplify the voltage up to almost 30 times of the input voltage. From this achievement, it is quite high possibility to develop a system with the higher output voltage for the on-site HV tests in the near future.

2. The Relating Theory

2.1 Resonant frequency

The resonant frequency is the frequency at the resonant condition that provided the maximum output voltage gain. The important components of the circuit consists of a resistor, an inductor, and a capacitor from the principle. The equivalent circuit of the ideal series resonant circuit is shown in Fig 1. In practice, the circuit is contained the internal resistor in the circuit from the wire connection, inductor, and capacitor. The accuracy of the voltage gain depends on the accuracy of the determined internal resistance. To obtain the accurate voltage gain, the proposed series resonant circuit should include the internal

resistors as illustrated in Fig 2, where R_s is represented the internal series resistor of the circuit and inductor and R_L is represented the internal parallel resistor of the capacitor. From Fig 2, the total impedance (Z) of the circuit can be expressed in (1). At the resonant condition, the imaginary part of (1) is equal to zero, and the resonant angular frequency (ω_r) of the proposed test circuit can be determined by (2).

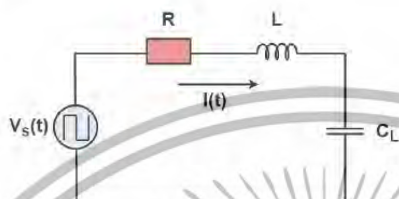


Fig 1. The ideal equivalent series resonant circuit

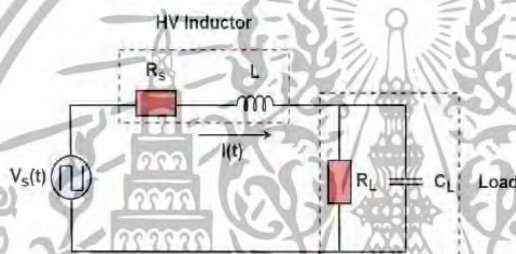


Fig 2. The proposed equivalent series resonant circuit

$$Z = R_s + j\omega L + \frac{R_L}{1 + j\omega C_L R_L} \quad (1)$$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC_L} - \left(\frac{1}{R_L C_L}\right)^2} \quad (2)$$

Using the determined resonant frequency from (2), the voltage gains from the proposed test circuit can be determined and explained in the next subsection.

2.2 Voltage gain

At the resonant condition, the output voltage of the proposed circuit reached the maximum. The voltage gain of the proposed circuit is the ratio of the maximum output voltage to the input voltage that can be expressed in (3).

$$\frac{V_{out}(\omega_r)}{V_{in}(\omega_r)} = \frac{R_L C_L \sqrt{\frac{L}{C_L}}}{R_d R_L C_L + L} \quad (3)$$

2.3 Quality factor

The quality factor or Q factor is used to present the loss of the resonant circuit [8]. The Q factor of the proposed circuit is the ratio of the peak energy storage in the circuit by the inductor to the energy dissipated within the circuit

by the resistor. The quality factor can be approximated as the voltage gain given in (3).

3. Experimental setup

This topic is presented an experimental setup of the HVAC test with the proposed series resonant system, which can be separated into three main parts; i.e.1) the square wave generator, 2) the proposed series resonant test circuit, and 3) the measuring system. The descriptions of the main equipment are as follows.

3.1 The square wave generator

The square wave generator is developed from the basis of the H bridge configuration with the IGBT with the rating voltage of 650 V used for switching's devices [9]. From Fourier series, the square wave voltage can represent in the form of the summation of the fundamental frequency signal and the other odd harmonics [10]. The frequency of the square wave voltage generator can be adjusted from 20 Hz to 300 Hz. The frequency is adjusted to meet resonant condition associated with the inductance and the capacitance of the test circuit. The control signal is generated from a microcontroller for switching IGBT [11], [12]. For mitigation of the noise effects from the input voltage supply, three units of the isolated transformers rated 1 kVA and the ratio of voltage is 115/220 with the star-delta connection is used for supply the power to the rectifier circuit. The IGBTs are controlled to operate as switches for obtain the square waveform. The equivalent circuit of the square generator is shown in Fig 3.

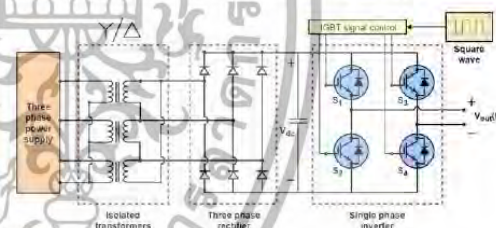


Fig 3. The square wave generator

3.2 The proposed series resonant test circuit

The test series resonant circuit as shown in Fig. 4 has 3 main components, i.e. 1) the variable frequency square wave generator, 2) the capacitor of 0.5 μ F as the capacitive load, and 3) a single phase HV inductor with rating voltage of 20 kV. The inductor was designed with adjustable inductances as given in Table I, and the inductances can be selected by tap changing.

TABLE I
The inductance of HV tap changing inductor

Tap	Inductance (H)
1	53.1777
2	24.2172
3	18.5556

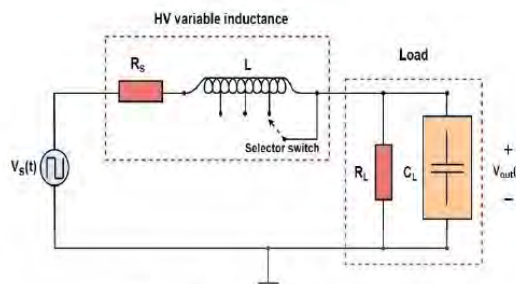


Fig. 4 The equivalent circuit of the proposed test circuit

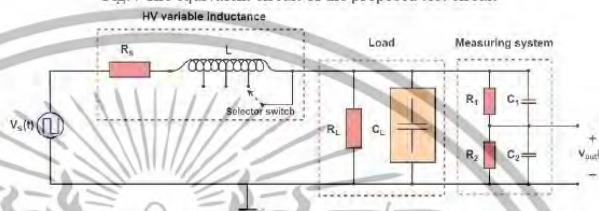


Fig. 5 The proposed test circuit with the measuring system

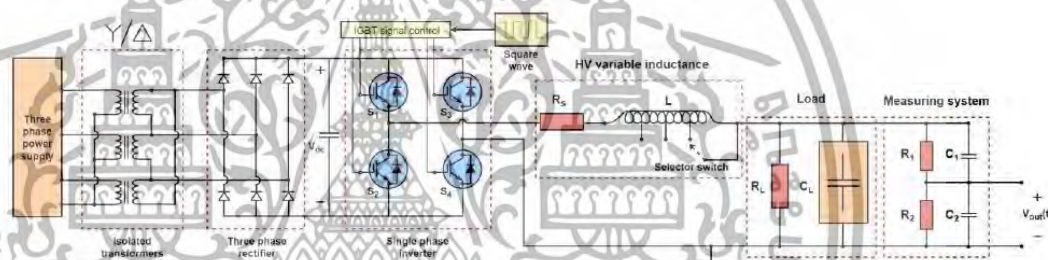


Fig. 6 The full equivalent circuit of the proposed test circuit

3.3 The measuring system

The output voltage across the capacitor was measured by a voltage divider with the scale 1:1000 and the digital oscilloscope was employed to record the input and output waveforms. The proposed test circuit including the measuring system is shown in Fig. 5.

The equivalent circuit of the whole test system circuit including the measuring system is shown in Fig. 6.

4. Verification of the proposed method

For verification of the proposed test circuit, the experiments were performed in the HV laboratory, KMITL as shown in Fig. 7.

In the experiments, the frequency of the square wave generator was adjusted to meet the resonant condition associated with the inductances in Table I of about 53.2 H, 24.2 H, and 18.6 H in Table I and the load capacitance of 5 μF. The resonant frequencies of about 30 Hz, 40 Hz, and 50 Hz can be achieved at the resonant conditions, respectively. The experimental results of the resonant frequencies, input voltages, output voltages, and voltage gains are presented in Table II, III, and IV. The experimental waveforms at the resonant conditions are shown in Figs. 8, 9, and 10.

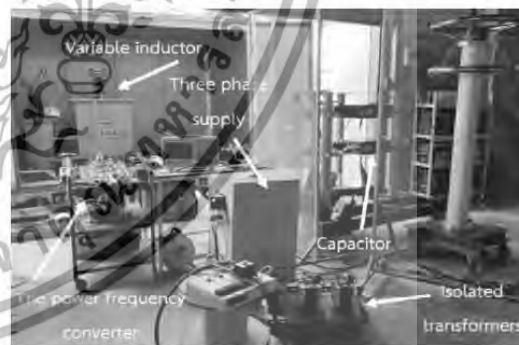


Fig. 7 The proposed test circuit

TABLE II
The parameters of the result at 30.15 Hz

Resonant frequency (Hz)	Inductance (H)	V _{in} (rms) (V)	V _{out} (rms) (V)	Voltage Gain
30.15	53.1777	14.6	422	28.9041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

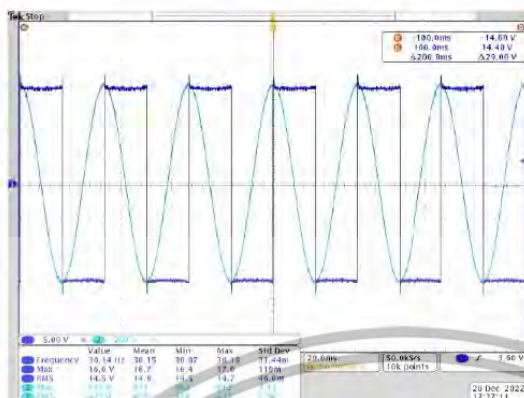


Fig. 8 The result of the output voltage at 30.15 Hz

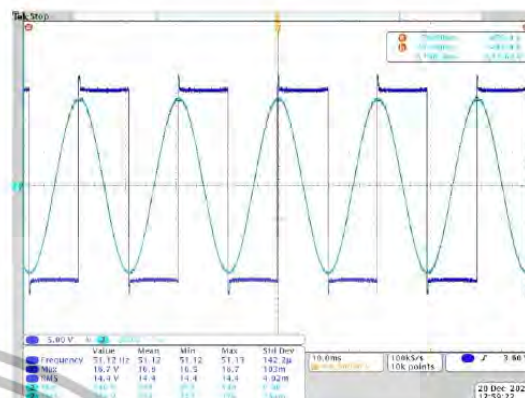


Fig. 10 The result of the output voltage at 51.12 Hz

TABLE III
The parameters of the result at 44.83 Hz

Resonant frequency (Hz)	Inductance (H)	$V_{in}(rms)$ (V)	$V_{out}(rms)$ (V)	Voltage Gain
44.83	24.2172	14.2	370	26.0563

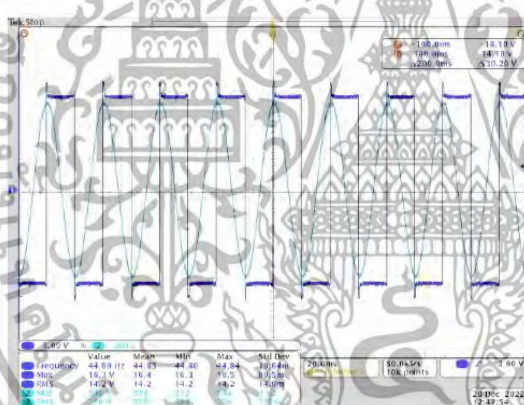


Fig. 9 The result of the output voltage at 44.83 Hz

TABLE IV
The parameters of the result at 51.12 Hz

Resonant frequency (Hz)	Inductance (H)	$V_{in}(rms)$ (V)	$V_{out}(rms)$ (V)	Voltage Gain
51.12	18.5556	14.4	374	25.9722

5. Conclusion

The study of HVAC generation using a series resonant circuit has been presented in this paper. Using the test circuit composed of an adjustable HV inductor with 3 changing taps (53.2 H, 24.2 H, and 18.6 H), a high capacitive load (0.5 μ F), and a variable frequency converter, the AC high voltages with frequencies of about 30 Hz, 40 Hz, and 50 Hz can be generated, and the voltage gain approximate of 30 can be achieved. It has been confirmed that the presented circuit has high possibility for using for on-site tests of MV and HV power cables.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to give acknowledgement to the School of Engineering, KMITL for providing the facility in this research work. Also, this project is funded by National Research Council of Thailand.

6. References

- [1] IEC Publication 60060-1 High voltage test techniques. General definitions and test requirement, 2010.
- [2] A. Luo, C. Tang, Z. Kang Shuai, W. Zhao, F Rong, K Zhou, "A Novel Three-Phase Hybrid Active Power Filter With a Series Resonance Circuit Tuned at the Fundamental Frequency", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 56, NO. 7, JULY 2009.
- [3] S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde, "Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics", 2nd ed, CRC Press Taylor & Francis Group LLC, 2013, pp.38-44.
- [4] W. Hauschild, E.Lemke, "High-voltage Test and Measuring system", 2nd ed, Springer, 2019, pp 2-17.
- [5] C.K. Alexander, M.N.O. Sadiku, "Fundamental of electric circuit", 5th ed, McGraw-Hill, 2013, pp 629-636
- [6] A. Schure, "Resonant circuit", John F. rider publisher, pp 7-34.
- [7] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering", vol. 2. Butterworth-Heinemann, 2000, p. 43.
- [8] N. Riedel, "Electric circuits", 9th ed, Pearson, 2011, p. 540.
- [9] P.Yuthagowith, T.Prombud, B.Leelachariyakul, "Development of a resonant frequency converter for partial discharge tests on potential transformers" 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP).
- [10] B. Boulet, "Fundamentals of signals and systems", Charles river media, 2006, pp. 132-148.
- [11] M. H. Rashid, "Power electronics handbook", 2nd ed, Elsevier Inc, 2007, pp 500-538.
- [12] V. Subrahmanyam, "Electric drives concept and applications", 2nd ed, McGraw-Hill, 2013, pp 653-662.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทความที่ 3

Fringing Flux Factors Used for Design of High-Voltage Reactor

Publication on The 9th International Symposium on EMC and Transients

in Infrastructures / International Student Session (ISET/ISS 2023),

Doshisha University, Kyoto, Japan, 9 December 2023, pp. 65-70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISET / ISS, 9th December, 2023



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISET / ISS, 9th December, 2023

3.2	[ISET2023-10] Development of Data Recorder for Lightning Current Waveforms using STM32 Nucleo-64 , Kenta Hanai, Kazuo Yamamoto (Chubu University).....	40
3.3	[ISET2023-11] Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment , Thanatorn Mai-eiam (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Phethai Nimsanong (Power System Control Department, Metropolitan Electricity Authority), Peerawut Yutthagowith (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang).....	45
3.4	[ISET2023-12] Calibration of Partial Discharge Calibrators Based on Numerical Integration , Peerawut Yutthagowith (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Sumitta Konglaithong (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Sarawuth Pramualsingha (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang)	51
4.	Lightning Analysis and High Voltage	56
4.1	[ISET2023-09] Effects of Soil Frequency Dependence on Electromagnetic Fields and Surges in FDTD Simulations , Toshihisa Ohno (Doshisha University), Yoshihiro Baba (Doshisha University).....	56
4.2	[ISET2023-14] Effects of Filter Circuit to Suppress Transfer Surge on Surge Isolation Transformer , Shohei Yamashita, Kazuo Yamamoto (Chubu University)	60
4.3	[ISET2023-15] Fringing Flux Factors Used for Design of High-Voltage Reactor , Jedsada Raxsa (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Peerawut Yutthagowith (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang)	65
4.4	[ISET2023-16] FDTD simulation of LEMP propagation in the Earth-Ionosphere waveguide , Koki Ryokume (Doshisha University), Yoshihiro Baba (Doshisha University)	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fringing Flux Factors Used for Design of High-Voltage Reactor

Jedsada Raxsa

School of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, Thailand
65016021@kmitl.ac.th

Peerawut Yutthagowith

School of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, Thailand
peerawut.yu@kmitl.ac.th

Abstract— This paper introduces an experimental approach for the determination of the fringing flux factor (F) for designing the high-voltage reactor. The high-voltage reactor is designed to operate at voltage levels considerably higher than standard transformers, making it vital for managing and controlling high-voltage electrical power. The reactor is also used in the resonant circuit for on-site high-voltage tests on power cables. The important requirements of such reactors are constant inductance throughout the operating frequency range and low power loss or a high-quality factor (Q factor). Designing of the reactor, air gaps are introduced into the iron core to control the inductance. Additionally, these air gaps can lead to leakage flux in the form of a loss, known as fringing flux. Understanding and managing fringing flux is essential in designing efficient and reliable electrical devices, as it ensures that the magnetic components operate as intended while minimizing energy losses and improving overall system performance. An experimental approach for the determination of the F for the design of high-voltage reactors is presented. The formula for the F was developed from some experiments on a reduced-scale model, which is composed of an iron core, windings, and an adjustable air gap length. Furthermore, the high-voltage reactor was designed based on this determined F to ensure precision in the design of total inductance and to minimize loss.

Index Terms—Fringing flux factor, High-voltage tests, Inductance, High-Voltage reactor design, Reduced-scale model.

I. INTRODUCTION

A high-voltage reactor, a crucial component in electrical power systems, plays a fundamental role in ensuring the reliability and stability of power transmission and distribution. These reactors are designed to operate at voltage levels considerably higher than standard transformers, making them vital for managing and controlling high-voltage electrical power.

One primary function of high-voltage reactors is voltage regulation. They help maintain the voltage levels within acceptable limits, especially in situations where power quality is essential. Adjusting the reactive power flow, high-voltage reactors can stabilize the grid, preventing voltage sags or surges [1-4], which can otherwise lead to equipment damage and power outages. Another crucial role of high-voltage reactors is current limiting [5],[6]. They can restrict excessive current flow, safeguarding the power system from overloads and short-circuits. This function is particularly critical in high-voltage lines and substations, where managing fault currents is essential for protecting equipment and ensuring the safety of the electrical network. Also, high-voltage reactors are used for impedance matching [7]. They help optimize the power transfer between different components of the electrical grid, ensuring that the energy is efficiently transmitted from generation sources to end-users. Furthermore, the reactors used

in the resonant circuit for the on-site withstand voltage tests and partial discharge detection on power cables [8-13] and in-lab tests on HV equipment, i.e., power transformers [14], [15] and instrument transformers [16-18].

The important requirements of such reactors are the constant inductance throughout the operating frequency range and low power loss or high-quality factor (Q factor). Designing the reactor, air gaps are inserted in the iron core for controlling the inductance of the reactor [19]. Such air gaps lead to the leakage flux called fringing flux as illustrated in Fig. 1.

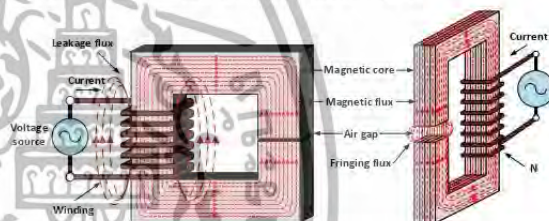


Fig. 1. The leakage flux and the fringing flux phenomena within the reactor

The fringing plays a significant role in understanding the behavior of magnetic fields in various electrical devices and systems. It refers to the magnetic field lines that extend beyond the core of a magnetic component, such as a transformer, inductor, or magnetic coil, and do not follow the desired path within the core. Fringing flux occurs because magnetic fields tend to spread out and follow the path of least resistance, which often means some of the magnetic field lines take routes through the surrounding air or other non-magnetic materials rather than staying confined within the core. This phenomenon results in a portion of the magnetic flux not contributing to the device's primary function, which can lead to energy losses and reduced efficiency. Engineers and designers of electromagnetic devices must account for fringing flux when calculating the magnetic properties and performance of their systems. Special care is taken to minimize fringing flux through design modifications, such as increasing the length of the magnetic core or shaping it to direct the magnetic field lines more effectively.

Reducing fringing flux in magnetic components is essential for improving their efficiency and minimizing energy losses. Here are some strategies and design considerations to help mitigate fringing flux as following aspects [20].

1) Reducing air gaps is to minimize or eliminate air gaps within the core to prevent magnetic flux from escaping into the

surrounding air. Tighter manufacturing tolerances can help achieve this.

2) Increasing core cross section area is to extend the area of the magnetic core can help confine the magnetic flux within the core, reducing the extent to which it fringes into the surrounding space.

3) Reducing winding length is to reduce the area of the magnetic core which the magnetic flux leaks from the core.

4) Shape the Core: Designing the core with appropriate shapes, such as closed magnetic circuits or more tightly wound coils, can help guide the magnetic flux along desired paths and minimize fringing.

5) Precision winding and stacking are to ensure precise winding and stacking of coil windings can help reduce gaps and spaces within the core, minimizing opportunities for fringing.

6) Using flux concentrators, like magnetic shunts or pole pieces, can help guide and concentrate magnetic flux lines, reducing their spread.

7) Using magnetic shielding materials, like mu-metal or high-permeability alloys, can redirect and contain magnetic flux lines, reducing their escape into the surrounding environment. Shields can be strategically placed around the component to channel the flux.

8) Optimizing core material is to choose core materials with properties that suit the specific application, as some materials may inherently exhibit lower fringing effects.

9) Simulation and modeling is to use electromagnetic simulation software to analyze and optimize the design for reduced fringing flux.

10) Using high permeability materials which allows magnetic fields to be concentrated within the material, can help reduce fringing flux.

11) Magnetic path analysis is to conduct a comprehensive analysis of the magnetic path to identify and address areas where flux may escape.

Reducing fringing flux requires a combination of design expertise, material selection, and precision manufacturing. Engineers often employ a combination of these strategies to achieve the desired magnetic field confinement and minimize losses. The specific approach will depend on the application and the magnetic component in question.

Understanding and managing fringing flux is essential in designing efficient and reliable electrical devices, as it ensures that the magnetic components operate as intended while minimizing energy losses and improving overall system performance. The fringing flux factor (F), an important parameter in electromagnetism, provides valuable insights into the behavior of magnetic fields in various devices and systems. It is a dimensionless quantity that characterizes the extent to which magnetic flux lines deviate or "fringe" outside of the core of a magnetic component, such as transformers, inductors, or magnetic coils. Understanding and quantifying F is crucial for engineers and designers working with magnetic circuits.

F accounts for the leakage flux that escapes the primary magnetic core, often passing through surrounding materials

like air or non-magnetic barriers. This phenomenon can result in energy losses, decreased efficiency, and even electromagnetic interference in nearby circuits.

In practical terms, F is used to modify calculations related to magnetic components, considering the fringing effect. Engineers aim to minimize fringing flux by carefully designing the shape and dimensions of magnetic cores, using specific materials, or employing techniques like magnetic shielding. Accounting for F , engineers can optimize the performance of magnetic devices, ensuring they operate efficiently while minimizing losses. This understanding is particularly crucial in power electronics, electrical distribution, and numerous other fields where magnetic circuits are integral to the functioning of the system.

In this paper, simple approaches for reducing effects of the fringing flux are considered. An experimental approach for the determination of F for design of high-voltage reactors is presented. The formula F was developed from some experiments on a reduced scale model which is composed of an iron core, windings, and an adjustable air gap length. The determined F was verified by the other reduced scale models. From the experiments on the verified models, the determined F agrees well with the developed formula. In addition, a high-voltage reactor was designed from the determined F .

II. DESIGN OF HV REACTORS

Reducing the fringing flux effects, two separated air gaps are utilized, and windings are wound around such gaps as illustrated in Fig. 2.

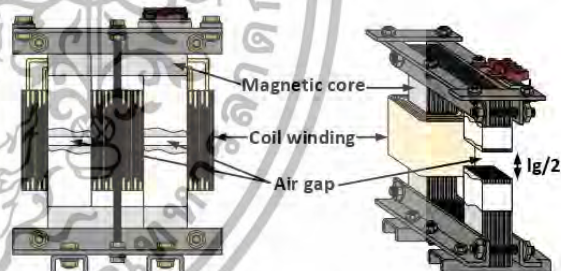


Fig. 2. The proposed configuration of the designed reactor

The design of high-voltage (HV) reactors involves several crucial input parameters, including the desired inductance (L), rated voltage (U_r), rated frequency (f), maximum magnetic flux density (B_{max}), and the required air gap (l_g). The relationships among these input parameters are mathematically described by (1) to (3). In these equations, A_g represents the cross-sectional area of the iron core within the reactor, W corresponds to the length of the winding wound around the reactor, and F signifies the fringing flux factor.

$$U_r = \sqrt{2\pi fNB_{max}A_g} \tag{1}$$

$$L = \frac{F\mu_0N^2A_g}{l_g} = \frac{F(4\pi \times 10^{-7})N^2A_g}{l_g} \tag{2}$$

$$F = f(l_g, A_g, W) \tag{3}$$

To facilitate controlled magnetic flux, a simple magnetic core structure with an air gap is utilized, and the value of F can be determined using (4).

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_g}} \ln \left(\frac{2W}{l_g} \right) \tag{4}$$

With the reference of (1) to (3), (2) can be divided by (1), resulting in the calculation of the number of turns required for the winding, as expressed in (5).

$$N = \frac{10^7}{2\sqrt{2}} \left(\frac{Ll_g\sqrt{B_{max}}}{FU_r} \right) \tag{5}$$

Once the value of N is determined A_g can be computed using (1), which can be further simplified as described in (6). Additionally, the rated current can be determined by employing (7).

$$A_g = \frac{U_r}{\sqrt{2\pi fB_{max}N}} \tag{6}$$

$$I_r = \frac{U_r}{2\pi fL} \tag{7}$$

III. DETERMINATION OF THE FRINGING FLUX FACTORS

In the preceding section, the fringing flux factor (F) emerges as a pivotal parameter indispensable for reactor design. Utilizing the configuration depicted in Fig. 2, it becomes imperative to ascertain the value of F . Within the context of this study, experiments were conducted using reduced-scale models to determine F . Two distinct air gap sizes, 5 mm and 10 mm for each gap, and two different numbers of winding turns, 85 and 300 turns for each winding, were implemented in these models. Voltage levels ranging from 40 V to 400 V, corresponding to calculated magnetic flux densities of approximately 0.1 T to 1.4 T, were applied to these experimental models. Notably, voltage, current, and power losses were meticulously recorded. The experimental of the reduced-scale models is illustrated in Fig. 3.

The calculation of F is based on the ratio of the measured inductance to the calculated inductance. In the case of the inductance calculated using (2), F is assumed to be 1. Interestingly, the measured inductances exhibit remarkable constancy across each experimental case. The cross-section area of the iron core is 45 cm². The configuration of the core is presented in millimeter units and illustrated in Fig. 4.

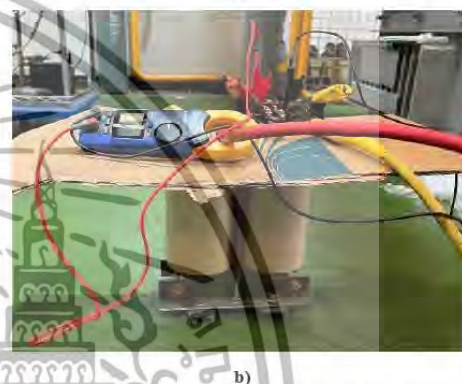
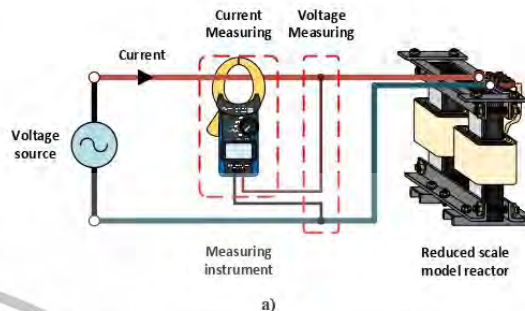


Fig. 3. The experimental of the reduced-scale model a) The testing circuit diagram, b) The experimental testing

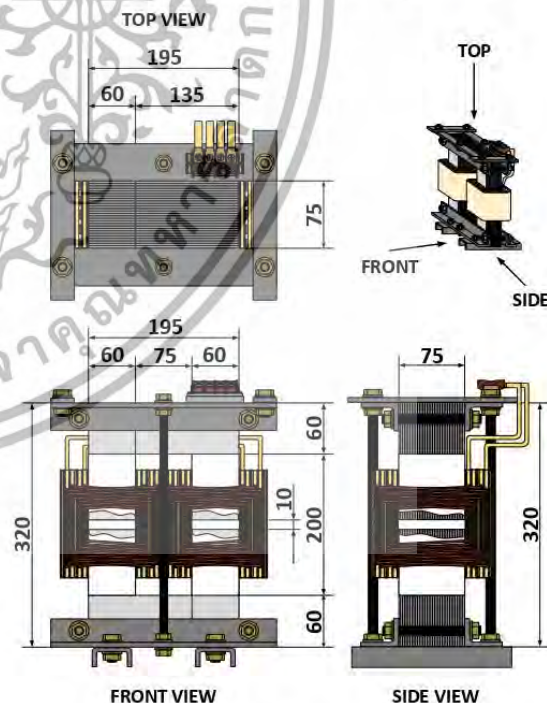


Fig. 4. The configuration of the reduced-scale model.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The results, both measured and calculated, are presented comprehensively in Table I.

TABLE I
THE MEASURED AND CALCULATED RESULTS.

Case	Total l_g	Total N	Computed L	Measured L	F
1	10 mm.	170	16.34 mH	21.23 mH	1.285
2		600	203.60 mH	260.30 mH	1.277
3	20 mm.	170	8.17 mH	12.40 mH	1.518
4		600	101.80 mH	156.30 mH	1.533

Employing the data provided in Table I, the formula of F was developed through a process of curve fitting, and it is expressed as (8).

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_g}} \left\{ 0.18 \ln \left(\frac{W}{l_g} \right) + 1.35 \right\} \quad (8)$$

With (8), the calculated inductance aligns closely with the measured data, displaying an absolute error of less than 2%. The resultant inductance, derived through the computation of F , is presented in Table II.

TABLE II
THE MEASURED AND CALCULATED RESULTS WITH THE F FACTOR.

Case	Total l_g	Computed F	Total N	Computed L	Measured L	Abs error (%)
1	10 mm.	1.280	170	20.92 mH	21.23 mH	1.47
2			600	260.63 mH	260.3 mH	0.13
3	20 mm.	1.523	170	12.45 mH	12.40 mH	0.38
4			600	155.05 mH	156.3 mH	0.80

In the experimental approach, F represents the fringing flux within the reduced-scale model as influenced by the air gap length in the magnetic circuit. Understanding the magnetic behavior of the circuit involves adjusting the air gap length and changing the turn number of coil windings. The formula for determining F serves as an effective tool for accurately computing the reactor's inductance and serves as a guide for designing high-voltage reactors. An illustrative example of HV reactor design is presented in the following section.

IV. EXAMPLE DESIGN OF HV REACTOR

The example design of a reactor used in the resonant circuit for HV cable tests. The first step of the design is for determining the specifications of the reactor. Targeting design of the reactor is to be used in a resonant test system with a frequency range of 20 Hz to 300 Hz, adjusting the frequency to meet the resonant condition of a capacitance load ranging from about 10 nF to 2 μF. The reactor's inductance was designed based on the resonant condition of the test system frequency. The reactor inductance is determined with (9).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

The design specification of the reactor's inductance is expressed in Table III.

TABLE III
THE DESIGNING SPECIFICATION HV REACTOR

Design specification		
Rated voltage (V)	kV	36
Rated current (I)	A	5
Rated power (S)	kVA	180
Minimum frequency of the rated voltage	Hz	20 (at 20 kV)
Design rated voltage frequency	Hz	36 (at 36 kV)
Inductance of the reactor	H	32
Minimum capacitance at 300 Hz	nF	9
Maximum capacitance at 20 Hz	nF	1979
Maximum capacitance at design rated voltage	nF	611

Illustrations of the operational characteristics of a frequency-tuned resonant system are presented in Fig. 5.

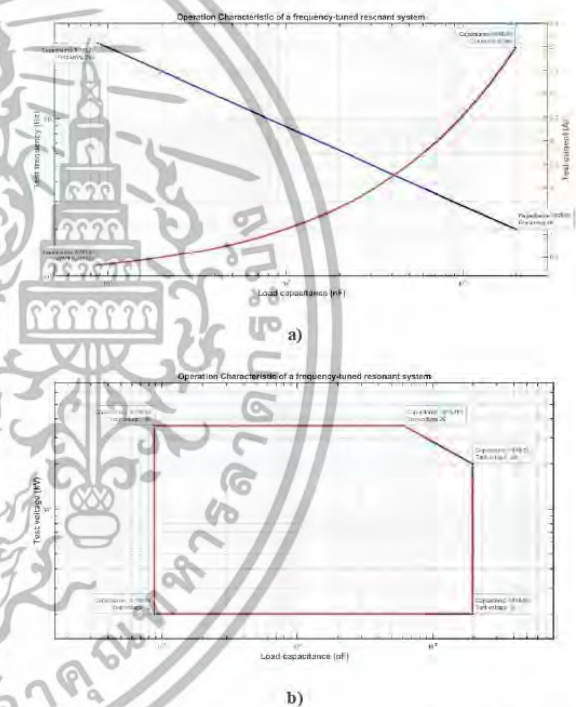


Fig. 5. The operational characteristics of a frequency-tuned resonant system. a) Frequency and current versus load capacitance. b) Voltage operating range versus load capacitance

Following with the previous step, specification of the reactor is 32 H with a rated voltage of 36 kV and a rated current of 5 A. The next step is designing the dimensions of the magnetic core. The magnetic core with two air gaps is used to control the magnetic flux within the reactor for constant inductance, with a total length of 20 mm. Preventing the saturation of the core material, the magnetic flux density is chosen to be 1.2 T at the operation of the rated voltage. The number of turns in the coil winding is determined by (5). Once the turn number is determined, the cross-section area of the magnetic core is determined with (6), and the rated current can be computed by

(7). Due to F depending on the dimension of core and winding, in the design, the initial F is set to be 1, and the configurations and vital parameters of the reactor is determined as shown in Table IV.

TABLE IV
THE DESIGNING CONFIGURATION HV REACTOR

Design configuration		
Inductance with the unity of F (L)	32	H.
Magnetic flux density (B)	1.2	T.
Total air gap length (l_g)	20	mm.
Computed Configuration		
Turn number winding (N)	2714	Turn
Area (A_g)	694	cm ²
Length of winding (W)	400	mm
Magnetic core weight	1210.30	kg.
Coil winding weight	181.44	kg.
The fringing flux factor (F)	1.14	
Inductance including the effect of F (L)	36.48	H
Absolute error	12	%

The initial parameters led to an absolute error in the total inductance of 12%, primarily due to fringing flux. Reaching a target reduction of 12% in the total inductance, equivalent to 28.16 H, iterative calculations using the initial F facilitate to determine the configurations and parameters of the reactor. The second-round design, detailed in Table V, shows that the total inductance is nearing the desired value. Typically, this iterative process requires only 3 or 4 rounds to achieve the desired total inductance.

TABLE V
THE NEW DESIGNING AND CONFIGURATION HV REACTOR

Design specification		
Inductance with the unity of F (L)	28	H.
Rated power (S)	198	kVA
Rated voltage (V)	36	kV
Rated current (I)	5.5	A
Minimum capacitance at 300 Hz	10	nF
Maximum capacitance at 20 Hz	2184	nF
Maximum capacitance at design rated voltage	675	nF
Magnetic flux density (B)	1.2	T
Total air gap length (l_g)	20	mm.
Computed Configuration		
Turn number winding (N)	2460	Turn
Area (A_g)	761	cm ²
Length of winding (W)	400	mm
Magnetic core weight	1328.03	kg
Coil winding weight	171.00	kg
The fringing flux factor (F)	1.13	
Inductance including the effect of F (L)	32.89	H

V. CONCLUSIONS

The fringing flux within the magnetic circuit emerges as a crucial factor influencing the design of HV reactors. The effective formula for determining the fringing factor (F) is

developed through an experimental approach utilizing reduced-scale model reactors. This model incorporates a configuration with two air gaps, each with a total length of 10 and 20 mm, and coil windings wound around the air gaps with turn numbers of 170 and 600, respectively. The formulated equation serves as a valuable tool in designing the inductance of HV reactors, ensuring its constancy throughout operation. Processing of designing the actual reactor's inductance, it is crucial to account for the influence of fringing flux, which tends to reduce the desired inductance. Consequently, recalculating the reactor's configuration becomes necessary to achieve the desired HV reactor's performance. The results obtained through the experimental approach with the reduced-scale model in designing the HV reactor provide a promising guideline, with the aim of minimizing trial and error and enhancing precision in the construction of future HV reactors.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to give special acknowledgement to School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the facility in this research work and SEC Co., Ltd. for providing the facility for experiments in this research. Also, this project is funded by National Research Council of Thailand.

REFERENCES

- [1] H. Saadat, "Line model and performance," in *Power System Analysis*, 3rd ed., UK: PSA Publishing LLC, 2011, pp.181-210.
- [2] M. Aftabuzzaman, A. S. M. Shahriar Haque, C. J. I. Joy and M. S. Hasan, "Impact of System Parameters on EHV Line Shunt Reactor Requirements," in *Proc. 2022 12th Int. Conf. on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, pp. 276-279.
- [3] R. Chowdhury, N. Fischer, D. Taylor, D. Caverly, and A.B. Dehkordi, "A Fresh Look at Practical Shunt Reactor Protection," in *Proc. 2023 76th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conf.*
- [4] M. A. Al-Tak, M. F. B. Am, O. S. Al-Yozbaky and M. K. M. Jamil, "Impact of Shunt Reactor Overvoltages Switching in High Voltage System," in *Proc. 2022 Int. Conf. on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, pp. 1-6.
- [5] Cigre WG Report B5.37, "Protection, Monitoring and Control of Shunt reactors," Aug. 2013.
- [6] *IEEE Guide for the application of Shunt Reactor Switching*, IEEE std. C37.015-2009, Feb. 2010.
- [7] H. Dalvand, S. W. Su and Q. P. Ha, "Design of a variable reactor for load balancing and harmonics elimination," in *Proc. 2008 Australasian Universities Power Engineering Conf.*, pp. 1-6.
- [8] P. Yutthagowith, J. Raxsa, P. Chaisiri and T. Mai-eiam, "The Study of High Voltage AC Generation Using A Series Resonant Circuit," in *Proc. 2023 9th Int. Conf. on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, pp. 164-167.
- [9] *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*, IEC std. 60270-2015, Nov. 2015.
- [10] Cigre WG Report B1.28, "On-site Partial Discharge Assessment of HV and EHV Cable Systems," May. 2018.
- [11] V. Chatpattananan, N. Pattanadech and P. Yutthagowith, "Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment with K-Means," in *Proc. 2006 IEEE 8th Int. Conf. on Properties & applications of Dielectric Materials*, pp. 191-194.
- [12] S. Ludpa, N. Pattanadech, M. Leelajindakraierk and P. Yutthagowith, "Pattern Classification of Partial Discharge in High Voltage Equipment by Regression Analysis," in *Proc. 2008 5th Int. Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 921-924.

- [13] P. Petchphung, M. Leelajindakrairerk, N. Pattanadech, P. Yuthagowith and K. Aunchaleevarapan, "The study of disc monopole antenna for partial discharge measurement," in *Proc. 2007 Int. Power Engineering Conf. (IPEC 2007)*, pp. 1292-1296.
- [14] P. Yuthagowith and N. Pattanadech, "Improved Least-Square Prony Analysis Technique for Parameter Evaluation of Lightning Impulse Voltage and Current," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 1, pp. 271-277, Feb. 2016.
- [15] P. Tuethong, K. Kitwattana, P. Yuthagowith and A. Kunakorn, "An Algorithm for Circuit Parameter Identification in Lightning Impulse Voltage Generation for Low-Inductance Loads," *Energies*, vol. 13, no. 15, p.3913, Jul. 2020.
- [16] B. Leelachariyakul and P. Yuthagowith, "Resonant Power Frequency Converter and Application in High-Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer," *Energies*, vol. 14, no.7, Apr. 2021.
- [17] B. Leelachariyakul and P. Yuthagowith, "The Development of An Adjustable Low-pass Filter for A Partial Discharge Detection System under Testing with The Power Frequency Converter," in *Proc. 2019-54th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC)*, pp. 1-4.
- [18] T. Prombud and P. Yuthagowith, "Development of High-voltage Testing System Based on Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers," *Sens. mat.*, vol. 32, no. 2, pp. 573-585, 2020.
- [19] Y. Ozupak (2022, May). Designing a Reactor for Use in High Voltage Power Systems and Performing Experimental and Simulation Analysis. *J. Eng. Res.*, 2022. [Online]. Available: <https://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/article/view/17017>
- [20] COL W. T. Mclyman, "Fundamental of Magnetics," in *Transformer and Inductor Design Handbook*, 3rd ed. Florida: CRC Press, 2004, pp.21-28.



บทความที่ 4

Designing HV Reactor With Multiple Air Gap Structure Based On Fringing Flux Factor

Publication on The 8th International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH 2024), KMUTL, Bangkok, Thailand,

28 February 2024, pp. 25-30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Proceedings of the 8th International Symposium on
Lightning Protection and High Voltage Engineering
(ISLH 2024)

ISLH 2024 Proceeding

February 28th, 2024
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

<http://power.kmitl.ac.th/islh2024/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ORGANIZING

ORGANIZED BY:

High Voltage Engineering Laboratory, Department of Electrical Engineering, School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

CO-ORGANIZED BY:

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Chubu University
Chubu University

SPONSORED BY:

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

STEERING COMMITTEE:

N. Nagaoka	Doshisha University
Y. Baba	Doshisha University
K. Yamabuki	Wakayama National College of Technology
K. Yamamoto	Chubu University
H. T. Tran	Tsuruoka National College of Technology
S. Potivejkul	KMITL
A. Kunakorn	KMITL
P. Yutthagowith	KMITL

LOCAL ORGANIZING COMMITTEE:

P. Yutthagowith Chairperson,	KMITL
P. Chaisiri Secretary,	KMITL
S. Polmai	KMITL

TECHNICAL PROGRAM COMMITTEE:

P. Yutthagowith	KMITL
A. Pruksanubal	KMUTNB
S. Chotigo	KMUTT
B. Marungsri	SUT
N. Tanthanuch	TU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TECHNICAL PROGRAM

07.30 - 08.30	Registration
08.30- 09.20	Opening ceremony - Dean of School of Engineering, KMITL - Head of Dept. of Electrical Engineering, KMITL - Head of High Voltage Engineering Laboratory, KMITL
09.20-10.00	Keynote speech session 1 Testing of Distribution Transformers at Manufacturer Facilities <i>Mr. Virat Pongpitak Mr. Siriwit Pongpitak</i>
10.00-10.15	Coffee Break
10.20-12.00	Oral presentation session 1
10.20-10.43	Effects of Filter Circuit to Suppress Transfer Surge on Surge Isolation Transformer <i>Presenter: Shohei Yamashita</i>
10.45-11.08	Fringing Flux Factors Used for Design of High-Voltage Reactor <i>Presenter: Jedsada Raxsa</i>
11.10-11.33	Development of Lightning Detection System Using Large-diameter Rogowski Coil and its Performance Evaluation Results <i>Presenter: Rikuto Tanaka</i>
11.35-11.58	Calibration of Partial Discharge Calibrators Based on Numerical Integration <i>Presenter: Sarawuth Pramualsingha</i>
12.00 - 13.00	Lunch
13.00-13.40	Keynote speech session 2 Field test experience of PD measurement <i>Dr. Phethai Nimsanong</i>
13.45-16.00	Oral presentation session 2
13.45-14.08	Development of Data Recorder for Lightning Current Waveforms using STM32 Nucleo-64 <i>Presenter: Kenta Hanai</i>
14.10-14.33	Lightning Impulse Voltage Test on Low Voltage Windings of Transformers <i>Presenter: Sarun Pinthong</i>
14.35-14.58	Statistical Data of Lightning Points and Damage on Automobiles and Effect of Outflow Route on Lightning Current Distributions inside Automobiles <i>Presenter: Teisei Omura</i>
15.00-15.15	Coffee Break
15.15-15.38	Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment <i>Presenter: Thanatorn Mai-eiam</i>
15.40-16.03	Study of Lightning Detection Method Using Acoustic Data <i>Presenter: Yutaro Higashi</i>
16.05-16.28	A System for PD Pulse Generating, Monitoring, and System Characterization <i>Presenter: Dr. Busayapol Paophan</i>
16.30-16.40	Best presentation award ISHL2024
16.40-17.00	Closing Ceremony

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Designing HV Reactor With Multiple Air Gap Structure Based On Fringing Flux Factor

J. Raxsa¹, J. Khumpho² and P. Yutthagowith¹

¹School of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
No. 1, Soi Chalongsung 1, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

²Engineering department, Sahabthant electric co.,Ltd (SEC), Samut prakan, 10540, Thailand
65016021@kmitl.ac.th

Abstract

This paper introduces an experimental approach to determining the fringing flux factor (F), representing the leakage flux within the air gap of the magnetic core, for the design of high-voltage (HV) reactors. The formula for determining F was developed from the AC excitation experimental data using curve-fitting techniques on the proposed reduced-scale model, which features a CC-shaped magnetic core with six air gaps. The significant configuration of the model includes an iron core and coil windings. The test conditions for the reduced-scale model are based on the number of turns in the winding, 85 and 300 turns for each coil winding and the length of the air gap, 2 mm and 5 mm, for each gap. Based on experiments with the reduced-scale model, the developed formula for F demonstrates effective results, exhibiting an absolute error lower than 20%. The determination of the F formula provides a promising guideline for the design of HV reactors.

Keywords: HV reactor, Reactor design, Inductance, Leakage flux, Fringing flux factor, High-voltage tests, Reduced-scale model

1. Introduction

The high-voltage (HV) reactor, a significant component within electrical power systems, assumes a pivotal role in upholding the dependability and stability of the transmission and distribution system. These reactors are meticulously engineered to function at voltage thresholds significantly surpassing those of conventional transformers, thereby rendering them essential for managing and controlling HV electrical power.

One primary function of HV reactors is voltage regulation. These reactors play a pivotal role in sustaining voltage levels within acceptable limits, especially in situations where the imperative of power quality assumes paramount significance. Adjusting the reactive power flow, HV reactors serve as a critical mechanism for grid stabilization, mitigating the occurrence of voltage sags or surges [1-4], which can otherwise lead to equipment damage and power outages within the electrical infrastructure. Another significant role of HV reactors is current limiting [5],[6]. These reactors can restrict excessive current flow, safeguarding the power system from overloads and short-circuits. This function is particularly critical in HV lines and substations, where

adept management of fault currents assumes critical importance for the preservation of equipment integrity and the overall safety of the electrical network. Also, HV reactors serve a crucial purpose in impedance matching [7], a process integral to the optimization of power transfer across diverse components within the electrical grid, ensuring efficient transmission of energy from generation sources to end-users. Furthermore, reactors are employed in the resonant circuit for on-site withstand voltage tests and partial discharge detection on power cables [8-13], as well as their utilization in laboratory examinations of HV equipment, i.e., power transformers [14], [15] and instrument transformers [16-18].

An essential criterion in the design of these reactors is to maintain constant inductance throughout the operating frequency range while minimizing power loss or achieving a high-quality factor (Q factor) within the AC resonant test system. Achieving the designed inductance of the reactor, the air gap is chosen to control the magnetic flux within the core, thereby generating the desired inductance due to the lower permeability of the air gap compared to the material of the core. The occurrence of magnetic flux with high AC excitation leads to the generation of leakage flux in the surrounding coil winding and air gap called flux linkage and fringing flux as illustrated in Fig. 1.

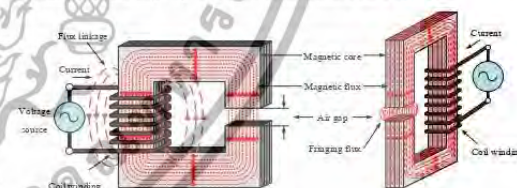


Fig. 1. The leakage flux phenomena within the magnetic core

The role of leakage flux is of paramount importance in analyzing the behavior of magnetic fields in various electrical devices and systems, such as transformers, inductors, or magnetic coils. It refers to the magnetic field path lines that extend beyond the core area of a magnetic component. The occurrence of fringing flux is caused by magnetic path lines tending to spread out and follow the path of the least reluctance, often leading some of the magnetic field lines to take routes through the surrounding air or other non-magnetic materials rather than remaining confined within the core. This phenomenon results in a portion of the magnetic flux not contributing to the

device's primary function, potentially leading to energy losses and reduced efficiency. Engineers and designers of electromagnetic devices must account for fringing flux when calculating the magnetic properties and performance of their systems. Special care is taken to minimize fringing flux through design modifications, such as increasing the length of the magnetic core or shaping it to direct the magnetic field lines more effectively.

Reducing fringing flux in magnetic components is essential for improving their efficiency and minimizing energy losses. Here are some strategies and design considerations to help mitigate fringing flux as following aspects [20].

1) Reducing air gaps is to minimize or eliminate air gaps within the core to prevent magnetic flux from escaping into the surrounding air. Tighter manufacturing tolerances can help achieve this.

2) Increasing core cross section area is to extend the area of the magnetic core can help confine the magnetic flux within the core, reducing the extent to which it fringes into the surrounding space.

3) Reducing winding length is to reduce the area of the magnetic core which the magnetic flux leaks from the core.

4) Shape the Core: Designing the core with appropriate shapes, such as closed magnetic circuits or more tightly wound coils, can help guide the magnetic flux along desired paths and minimize fringing.

5) Precision winding and stacking are to ensure precise winding and stacking of coil windings can help reduce gaps and spaces within the core, minimizing opportunities for fringing.

6) Using flux concentrators, like magnetic shunts or pole pieces, can help guide and concentrate magnetic flux lines, reducing their spread.

7) Using magnetic shielding materials, like mu-metal or high-permeability alloys, can redirect and contain magnetic flux lines, reducing their escape into the surrounding environment. Shields can be strategically placed around the component to channel the flux.

8) Optimizing core material is to choose core materials with properties that suit the specific application, as some materials may inherently exhibit lower fringing effects.

9) Simulation and modeling is to use electromagnetic simulation software to analyze and optimize the design for reduced fringing flux.

10) Using high permeability materials which allows magnetic fields to be concentrated within the material, can help reduce fringing flux.

11) Magnetic path analysis is to conduct a comprehensive analysis of the magnetic path to identify and address areas where flux may escape.

Reducing fringing flux requires a combination of design expertise, material selection, and precision manufacturing. Engineers often employ a combination of these strategies to achieve the desired magnetic field confinement and minimize losses. The specific approach will depend on the application and the magnetic component in question.

Understanding and managing fringing flux is essential in designing efficient and reliable electrical devices, as it ensures that the magnetic components operate as intended while minimizing energy losses and improving overall system performance. The fringing flux factor (F), an important parameter in electromagnetism, provides valuable insights into the behavior of magnetic fields in various devices and systems. It is a dimensionless quantity that characterizes the extent to which magnetic flux lines deviate or "fringe" outside of the core of a magnetic component, such as transformers, inductors, or magnetic coils. Understanding and quantifying F is significant for engineers and designers working with magnetic circuits.

F accounts for the leakage flux that escapes the primary magnetic core, often passing through surrounding materials like air or non-magnetic barriers. This phenomenon can result in energy losses, decreased efficiency, and even electromagnetic interference in nearby circuits.

In practical terms, F is used to modify calculations related to magnetic components, considering the fringing effect. Engineers aim to minimize fringing flux by carefully designing the shape and dimensions of magnetic cores, using specific materials, or employing techniques like magnetic shielding. Accounting for F , engineers can optimize the performance of magnetic devices, ensuring they operate efficiently while minimizing losses. This understanding is particularly crucial in power electronics, electrical distribution, and numerous other fields where magnetic circuits are integral to the functioning of the system.

In this paper, the simple approaches for reducing effects of the fringing flux are considered. An experimental approach for the determination of F for design of HV reactors is presented. The formula F was developed using a curve-fitting technique based on experiments conducted on a reduced-scale model with multiple air gaps within the magnetic core, composed of an iron core and coil winding. The determined F was verified through an experimental approach, adjusting the air gap length and the number of coil windings on a case-by-case basis. Through experiments conducted on the reduced-scale model under various conditions, the determined F aligns well with the developed formula. In addition, the determined F serves as a guideline for designing a HV reactor.

2. Designing of the reduced-scale model

The important consideration for designing the HV reactor is the magnetic core shape and dimension, which have to be proportional to reduce the occurrence of fringing flux. In typical designs, the magnetic core shapes of EI, EE, and CC are commonly used. However, a limitation of these designs is the size of the core, which increases the weight of the core and the device and makes it unsuitable for transportation in on-site testing.

In response to this limitation and guided by the theoretical framework, a reduced-scale model with a CC shape and multiple air gaps is constructed.

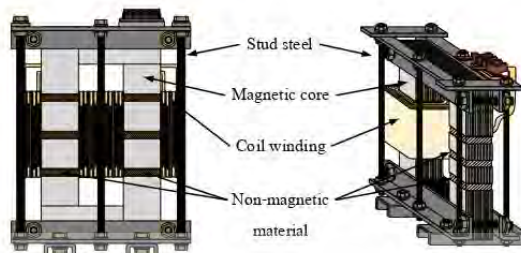


Fig. 2. The configuration of proposed reduced-scale model

The reduced-scale model represents the prototype design of the HV reactor's structure. The model has six gaps to distribute the occurrence of fringing flux, and the wound coil winding surrounds the gaps to direct the magnetic path lines, compelling them to remain confined within the core. In practical applications, the air gap in the core is filled with non-magnetic materials such as pressboard and bakelite to balance the core. The laminated core structure is secured with stud steel, as illustrated in Fig. 2.

The design of HV reactors involves several crucial input parameters, including the desired inductance (L), rated voltage (U_r), rated frequency (f), maximum magnetic flux density (B_{max}), and the required air gap (l_g). The relationships among these input parameters are mathematically described by (1) to (3). In these equations, A_g represents the cross-sectional area of the iron core within the reactor, W corresponds to the length of the winding wound around the reactor, and F signifies the fringing flux factor.

$$U_r = \sqrt{2\pi f N B_{max} A_g} \quad (1)$$

$$L = \frac{F \mu_0 N^2 A_g}{l_g} = \frac{F (4\pi \times 10^{-7}) N^2 A_g}{l_g} \quad (2)$$

$$F = f(l_g, A_g, W) \quad (3)$$

The magnetic core structure, with the air gap component, results in the occurrence of fringing flux that leaks out into the surrounding air of the core. The value of F can be determined using equation (4).

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_g}} \ln \left(\frac{2W}{l_g} \right) \quad (4)$$

With the reference of (1) to (3), (2) can be divided by (1), resulting in the calculation of the number of turns required for the winding, as expressed in (5).

$$N = \frac{10^7}{2\sqrt{2}} \left(\frac{L l_g f B_{max}}{F U_r} \right) \quad (5)$$

Once the value of N is determined A_g can be computed using (1), which can be further simplified as described in (6). Additionally, the rated current can be determined by employing (7).

$$A_g = \frac{U_r}{\sqrt{2\pi f B_{max} N}} \quad (6)$$

$$I_r = \frac{U_r}{2\pi f L} \quad (7)$$

3. Determination of the fringing flux factor

In the preceding section, the fringing flux factor (F) emerges as a pivotal and indispensable parameter for reactor design. Utilizing the configuration depicted in Fig. 2, it becomes imperative to ascertain the value of F . Within the context of this study, experiments were conducted using reduced-scale models to determine F . The experimental conditions were varied in four cases, incorporating two distinct air gap sizes, 2 mm. and 5 mm. for each gap and two different numbers of winding turns, 85 and 300 turns for each winding in the reduced-scale model experiment. The experiment involved AC excitation applied to the reduced-scale model to determine magnetic flux densities ranging from approximately 0.1 T to 1.4 T. This was achieved by feeding a stepping voltage from 17 V to 238 V for the case with 85 turns winding and from 60 V to 600 V for the case with 300 turns winding. Notably, voltage, current, and power losses were meticulously recorded. The experimental of the reduced-scale models is illustrated in Fig. 3.

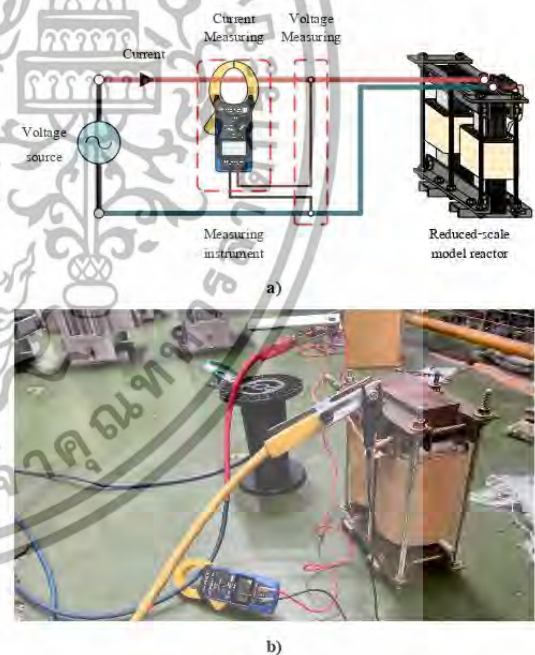


Fig. 3. The experimental of the reduced-scale model a) The testing circuit diagram, b) The experimental testing

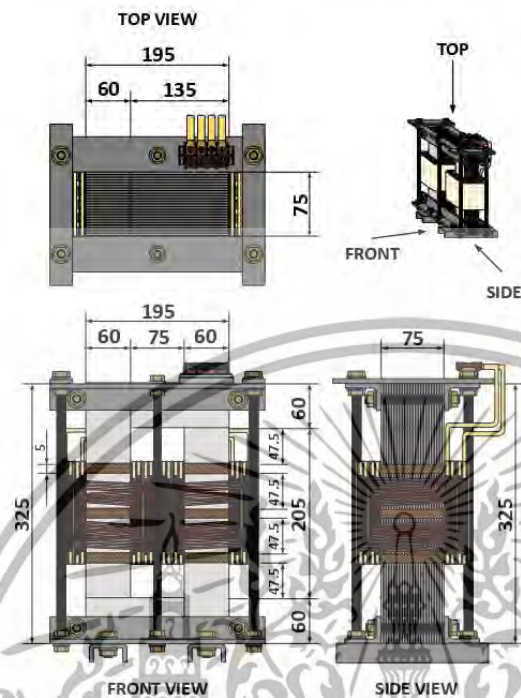


Fig. 4. The configuration of reduced-scale model of 170 total turn winding and air gap length total 30 mm.

The calculation of F is based on the ratio of the measured inductance to the calculated inductance. In the case of the inductance calculated using (2), F is assumed to be 1 for pre-determination. Interestingly, the measured inductances exhibit remarkable constancy across each experimental case. The cross-section area of the iron core is 45 cm^2 . The configuration of the core is presented in millimeter units and illustrated in Fig. 4.

The results, both measured and calculated, are presented comprehensively in Table I.

TABLE I
The measured and calculated results

Case	Total l_g	Total N	Computed L	Measured L	F
1	12	170	13.6188	14.8297	1.0889
2	mm.	600	169.6460	177.7981	1.0481
3	30	170	5.4475	7.3784	1.3545
4	mm.	600	67.8584	80.2830	1.1831

Employing the data provided in Table I, the formula of F was developed through a process of curve fitting, and it is expressed as (8).

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_g}} \left\{ 0.2185 \ln \left(\frac{W}{l_g} \right) + 0.5254 \right\} \quad (8)$$

With (8), The calculated inductance closely aligns with the measured data under conditions of a lower number of turns in the winding, displaying an absolute error of less than 10%. However, higher errors are observed when increasing the number of turns and air gap length. The

resultant inductance, derived through the computation of F , is presented in Table II.

TABLE II
The measured and calculated results with F

Case	Total l_g	Computed F	Total N	Computed L	Measured L	Abs error (%)
1	12	1.2019	170	16.3691	14.8297	9.4043
2	mm.		600	203.9056	177.7981	12.8037
3	30	1.4153	170	7.7101	7.3784	4.3016
4	mm.		600	96.0422	80.2830	16.408

In the experimental approach, F represents the fringing flux within the reduced-scale model as influenced by the air gap length and turning pattern of coil winding in the magnetic circuit. Understanding the magnetic behavior of the circuit involves adjusting the air gap length and changing the turn number of coil windings. The formula for determining F serves as an effective tool for accurately computing the reactor's inductance and serves as a guideline for designing HV reactors. An illustrative example of HV reactor design is presented in the following section.

4. Example design of HV reactor

The example design of a reactor used in the resonant circuit for HV cable tests. The first step of the design is for determining the specifications of the reactor. Targeting design of the reactor is to be used in a resonant test system with a frequency range of 20 Hz to 300 Hz, adjusting the frequency to meet the resonant condition of a capacitance load ranging from about 10 nF to 2 μ F. The reactor's inductance was designed based on the resonant condition of the test system frequency. The reactor inductance is determined with (9).

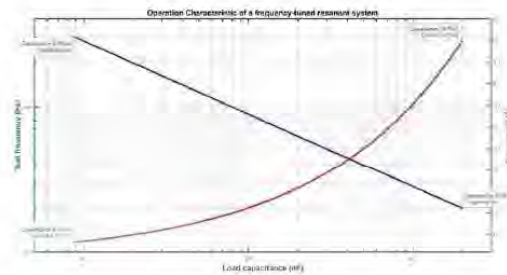
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

The design specification of the reactor's inductance is expressed in Table III.

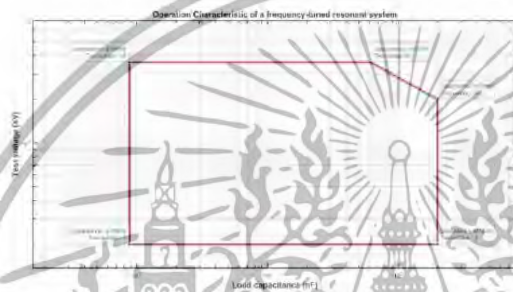
TABLE III
The measured and calculated results
Design specification

Rated voltage (V)	kV	36
Rated current (I)	A	5
Rated power (S)	kVA	180
Minimum frequency of the rated voltage	Hz	20 (at 20 kV)
Design rated voltage frequency	Hz	36 (at 36 kV)
Inductance of the reactor	H	32
Minimum capacitance at 300 Hz	nF	9
Maximum capacitance at 20 Hz	nF	1979
Maximum capacitance at design rated voltage	nF	611

Illustrations of the operational characteristics of a frequency-tuned resonant system are presented in Fig. 5.



a)



b)

Fig. 5. The operational characteristics of a frequency-tuned resonant system. a) Frequency and current versus load capacitance. b) Voltage operating range versus load capacitance

Following with the previous step, specification of the reactor is 32 H with a rated voltage of 36 kV and a rated current of 5 A. The next step is designing the dimensions of the magnetic core. The magnetic core with six air gaps is used to control the magnetic flux within the reactor for constant inductance, with a total length of 60 mm. Preventing the saturation of the core material, the magnetic flux density is chosen to be 1.2 T at the operation of the rated voltage. The number of turns in the coil winding is determined by (5). Once the turn number is determined, the cross-section area of the magnetic core is determined with (6), and the rated current can be computed by (7). Due to F depending on the dimension of core and winding, in the design, the initial F is set to be 1, and the configurations and vital parameters of the reactor is determined as shown in Table IV.

TABLE IV
The designing configuration HV reactor

Designed configuration		
Inductance with the unity of $F (L)$	32	H
Magnetic flux density (B)	1.2	T
Total air gap length (l_g)	60	mm
Indicated the width of the area cross-section	27	cm
Computed configuration		
Turn number winding (N)	8140	Turn
Area (A_c)	232.2	cm ²
Length of winding (W)	400	mm
Magnetic core weight	405.00	kg
Coil winding weight	396.25	kg
The fringing flux factor (F)	1.3701	
Inductance including the effect of $F (L)$	44.15	H
Absolute error of design value	37.00	%

The initial parameters led to an absolute error in the total inductance of 37%, primarily due to fringing flux. Reaching a target reduction of 37% in the total approximate inductance, equivalent to 26 H, iterative calculations using the initial F facilitate to determine the configurations and parameters of the reactor. The second-round design, detailed in Table V, shows that the total inductance is nearing the desired value with an absolute error under 10%. Typically, this iterative process requires only 3 or 4 rounds to achieve the desired total inductance, which conforms to the fitting equation of the data.

TABLE IV
The new designing and configuration HV reactor

Design specification		
Inductance with the unity of $F (L)$	25.97	H
Rated power (S)	220.59	kVA
Rated voltage (V)	36	kV
Rated current (I)	6.1	A
Minimum capacitance at 300 Hz	10.82	nF
Maximum capacitance at 20 Hz	2435.61	nF
Maximum capacitance at design rated voltage	749.11	nF
Magnetic flux density (B)	1.2	T
Total air gap length (l_g)	60	mm
Indicated the width of the area cross-section	27	cm
Computed Configuration		
Turn number winding (N)	6614	Turn
Area (A_c)	283.5	cm ²
Length of winding (W)	400	mm
Magnetic core weight	494.48	kg
Coil winding weight	335.35	kg
The fringing flux factor (F)	1.3349	
Inductance including the effect of $F (L)$	34.67	H
Absolute error of design value	7.60	%

5. Conclusion

The analysis of magnetic behaviors, such as leakage flux, is an important factor to consider when designing equipment based on electromagnetics. The occurrence of the fringing flux within the magnetic circuit emerges as a crucial factor influencing the design of HV reactors. An effective formula for guiding the determination of the fringing factor (F) is developed through an experimental approach using reduced-scale model reactors with AC excitation test and the curve-fitting technique, incorporating testing results. The developed reduced-scale model is constructed based on the magnetic core CC shape with a configuration featuring six air gaps, each with a total length of 12 and 30 mm. Coil windings are wound around the air gaps with turn numbers of 170 and 600, respectively, aiming to reduce the fringing flux. The formulated equation serves as a valuable tool in designing the inductance of HV reactors, demonstrating an absolute error of less than 20% compared to experimental data. This error can be further reduced by addressing issues such as minimizing the parasitic gap resulting from the movement of the laminated core and ensuring a tight coil squeeze around the magnetic core. In the process of designing the actual reactor's inductance, it is crucial to account for the influence of fringing flux, which tends to reduce the desired inductance and create a hotspot for eddy current loss heating. Consequently, recalculating the reactor's configuration becomes necessary to achieve the desired HV reactor's performance. The results obtained through

the experimental approach with the reduced-scale model in designing the HV reactor provide a promising guideline, with the aim of minimizing trial and error and enhancing precision in the construction of future HV reactors.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to give special acknowledgement to School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the facility in this research work and SEC Co., Ltd. for providing the facility for experiments in this research. Also, this project is funded by National Research Council of Thailand.

References

- [1] H. Saadat, "Line model and performance," in *Power System Analysis*, 3rd ed., UK: PSA Publishing LLC, 2011, pp.181-210.
- [2] M. Aftabuzzaman, A. S. M. Shahinur Haque, C. J. I. Joy and M. S. Hasan, "Impact of System Parameters on EHV Line Shunt Reactor Requirements," in *Proc. 2022 12th Int. Conf. on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, pp. 276-279.
- [3] R. Chowdhury, N. Fischer, D. Taylor, D. Caverly, and A.B. Dehkordi, "A Fresh Look at Practical Shunt Reactor Protection," in *Proc. 2023 76th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conf.*
- [4] M. A. Al-Tak, M. F. B. Ain, O. S. Al-Yozbaky and M. K. M. Jamil, "Impact of Shunt Reactor Overvoltages Switching in High Voltage System," in *Proc. 2022 Int. Conf. on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, pp. 1-6.
- [5] Cigre WG Report B5.37, "Protection, Monitoring and Control of Shunt reactors," Aug. 2013.
- [6] *IEEE Guide for the application of Shunt Reactor Switching*, IEEE std. C37.015-2009, Feb. 2010.
- [7] H. Dalvand, S. W. Su and Q. P. Ha, "Design of a variable reactor for load balancing and harmonics elimination," in *Proc. 2008 Australasian Universities Power Engineering Conf.*, pp. 1-5.
- [8] P. Yutthagowith, J. Raxsa, P. Chaisiri and T. Mai-iam, "The Study of High Voltage AC Generation Using A Series Resonant Circuit," in *Proc. 2023 9th Int. Conf. on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, pp. 164-167.
- [9] *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*, IEC std. 60270-2015, Nov. 2015.
- [10] Cigre WG Report B1.28, "On-site Partial Discharge Assessment of HV and EHV Cable Systems," May. 2018.
- [11] V. Chatpattananan, N. Pattanadech and P. Yutthagowith, "Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment with K-Means," in *Proc. 2006 IEEE 8th Int. Conf. on Properties & Applications of Dielectric Materials*, pp. 191-194.
- [12] S. Ludpa, N. Pattanadech, M. Leelajindakrairek and P. Yutthagowith, "Pattern Classification of Partial Discharge in High Voltage Equipment by Regression Analysis," in *Proc. 2008 5th Int. Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 921-924.
- [13] P. Petchphung, M. Leelajindakrairek, N. Pattanadech, P. Yutthagowith and K. Aunchaleewarapan, "The study of disc monopole antenna for partial discharge measurement," in *Proc. 2007 Int. Power Engineering Conf. (IPEC 2007)*, pp. 1292-1296.
- [14] P. Yutthagowith and N. Pattanadech, "Improved Least-Square Prony Analysis Technique for Parameter Evaluation of Lightning Impulse Voltage and Current," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 1, pp. 271-277, Feb. 2016.
- [15] P. Tuethong, K. Kitwattana, P. Yutthagowith and A. Kunakorn, "An Algorithm for Circuit Parameter Identification in Lightning Impulse Voltage Generation for Low-Inductance Loads," *Energies*, vol. 13, no. 15, p. 3913, Jul. 2020.
- [16] B. Leelachariyakul and P. Yutthagowith, "Resonant Power Frequency Converter and Application in High-Voltage and Partial Discharge Test of a Voltage Transformer," *Energies*, vol. 14, no.7 Apr. 2021.
- [17] B. Leelachariyakul and P. Yutthagowith, "The Development of An Adjustable Low-pass Filter for A Partial Discharge Detection System under Testing with The Power Frequency Converter," in *Proc. 2019 34th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC)*, pp. 1-4.
- [18] T. Prombud and P. Yutthagowith, "Development of High-voltage Testing System Based on Power Frequency Converter Used in Partial Discharge Tests of Potential Transformers," *Sens. mat.*, vol. 32, no. 2, pp. 573-585, 2020.
- [19] Y. Özüpak. (2022, May). Designing a Reactor for Use in High Voltage Power Systems and Performing Experimental and Simulation Analysis. *J. Eng. Res.*, 2022. [Online]. Available: <https://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/article/view/17017>
- [20] COL W. T. Melyman, "Fundamental of Magnetics," in *Transformer and Inductor Design Handbook*, 3rd ed, Florida: CRC Press, 2004, pp.21-28.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ทดสอบ PDC-ANALYSER-1MOD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDC-ANALYSER-1 MOD



User's Guide

ALFF Engineering
 Gomweg 7
 CH 8915 Hausen am Albis
 Switzerland
 phone: +41 44 77 66 77 6
 fax: +41 44 77 66 77 7
 email: info@alff-engineering.ch
 web: www.alff-engineering.ch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Caution

The PDC-ANALYSER-1MOD contains an externally accessible high voltage source producing up to 2 kV and up to 5mA (internal current limit).

The instrument must be operated only by skilled persons.

The operators are responsible for protecting the test site against the hazards related to high voltages. All the elements of a test setup, which are connected to this high voltage source or which could be set under voltage by any insulation breakdown, must be protected against being contacted by the operator or by any other person as long as the mains power is supplied to the instrument.

Also, the PDC-ANALYSER-1MOD must be stored and operated in a mechanically secured position and all the cables connected to it must be protected against making anyone fall over them or accidentally pull on them.

Content

1 Hardware	3
2 Measuring program	3
3 Evaluation program	4
4 Performing a measurement	4
5 Specifications	7
Appendix A	8



Figure 1: The connections of the **PDC-ANALYSER-1MOD**.

1 Hardware

Please connect the keyboard to jack "4" before turning on the **PDC-ANALYSER-1MOD**.

Use switch "3" to turn on the instrument.

The high voltage cable, which has a SHV plug, is connected to jack "1" and the current sensing cable with the BNC plug is connected to the jack "2" labelled "current measurement".

Plug "5" is for connecting the optional PDC-Phantom-1000XE voltage source, see separate instruction sheet.

For an accurate measurement, a warm-up time period of 60 min is recommended.

2 Measuring program

To perform a measurement with the **PDC-ANALYSER-1MOD**, start "PDC Measurement" by double clicking on this icons on the desktop of the instrument.

On the first window after invoking the program, the measuring parameters can be set:

- The name of directory, where the generated files will be saved.
- The name prefix for generated files (see Appendix A).
- The temperature value (important for the evaluation).
- The test voltage.
- The duration of an initial delay period before the measurement.
- The duration of the polarisation.
- The duration of the depolarisation.
- The description of the test object (only for information).

After the desired measuring parameters have been set, the measurement can be started by clicking "start measurements".

A new display appears and the instrument is internally initialised (this takes about seven seconds).

Then the first delay duration is counted down and the current from the current sensing cable is displayed. The measurement can be aborted anytime by pressing ALT-F4. The delay duration can be prematurely cancelled by pressing "jump to measurements".

Caution: As soon as the delay duration has been counted down or brought to end by pressing "jump to measurements", the high voltage source is turned on.

Now the polarisation takes place and the polarisation duration is counted down. During this period, the high voltage is indicated with four red lamps around the high voltage SHV jack "1". The polarisation period can be automatically jumped over by setting the polarisation duration to zero on the setup screen. The measurement program can be aborted anytime by pressing ALT-F4. If the accumulated data should be stored, click on "save and terminate" to terminate the program.

After the polarisation duration has been counted down, the high voltage source is set to exactly zero volts and the depolarisation duration is started. Still, the measurement program can be aborted anytime by pressing ALT-F4, but all the data will be lost. If the accumulated data should be stored, click on "save and terminate".

3 Evaluation program

The measured polarisation and depolarisation currents can be evaluated with the *PDC-Evaluation* program. The basic version of this program permits the determination of the resistance, polarisation index (PI), recovery voltage and derived polarisation spectrum in the time domain and the complex capacitance $C = C'(\omega) - jC''(\omega)$ and the derived $\tan\delta(\omega)$ in the frequency domain. For more information, see the User's Guide of *PDC-Evaluation* program.

4 Performing a measurement

To perform an accurate measurement, it is important to connect the test object to be investigated as long as possible to **PDC-ANALYSER-1MOD** before starting the measurement, because both the high voltage supply and the current sense input are normally short circuited to ground. Thus, the capacitances of the test object are well discharged.

Now, a 3-phase power transformer is taken as an example of a test object.

The transformer must be connected to the **PDC-ANALYSER-1MOD** as a capacitor (see figure 2). To obtain such an arrangement, all the high voltage bushings could be connected together, the high voltage windings behave as a first electrode of the capacitor under investigation. The second electrode of the capacitor is formed by connecting all the "low" voltage bushings together. The relaxation currents are sensed from the low voltage windings to ground. During the measurement the tank of transformer must be grounded (see figure 3).

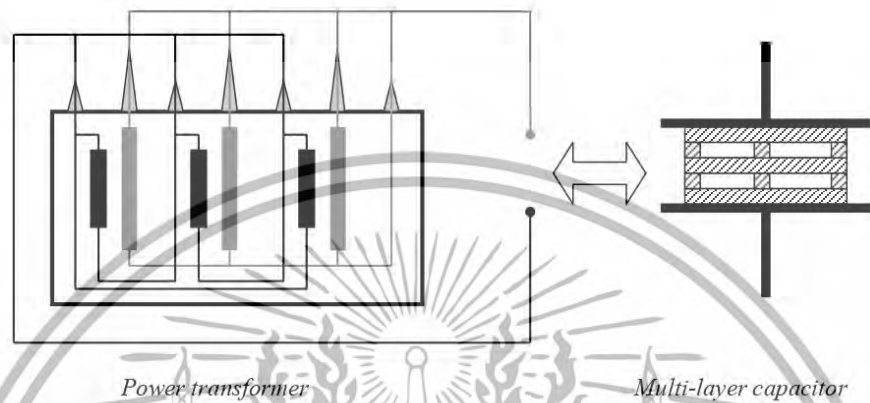


Figure 2: How to connect a power transformer as capacitor for the dielectric investigation of the main insulation.

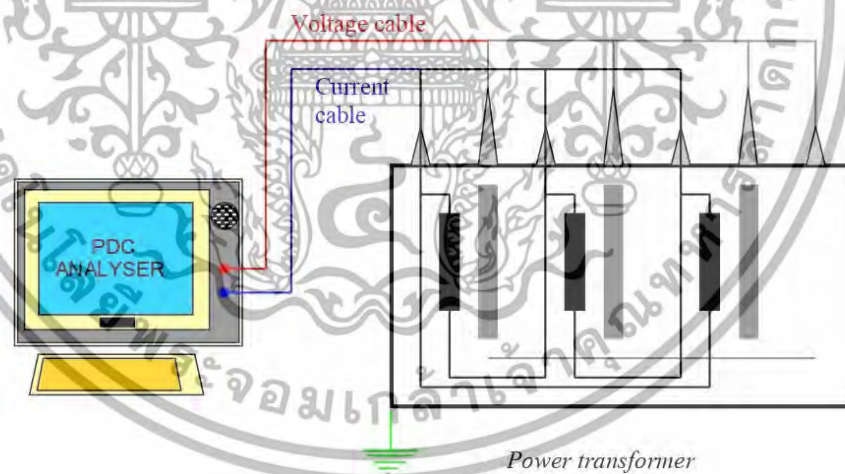


Figure 3: Connection of a power transformer to **PDC-ANALYSER-1MOD**.

For an accurate measurement, it is necessary to determine the initial condition of the test object before any application of excitation voltage.

The initial condition (or charging state) of a test object can be determined by monitoring the initial current which flows through it. For visualisation of this current, it is sufficient to start a current measurement with a polarisation duration of zero seconds. It is important, that the initial current is low and at least in a steady state. In case of a high, but constant amplitude of initial current, this current can be considered as an "offset" for the evaluation: it can be subtracted from the measurements.

Before starting the main measurement, it is recommended to carry out control measurements with a short charging duration e.g. 5 seconds to control the whole setup. Verify the amplitudes of measured currents and the value of the capacitance. Such a short control measurement will not affect the main measurement, because the relaxation currents induced by a short charging duration can be neglected after a few minutes of waiting time.

The main measurement can be performed after the *control* measurement by choosing adequate values for the charging voltage amplitude and for the duration of polarisation and depolarisation.

For new power transformers, a charging voltage amplitude of up to 500 V is recommended. Used transformers are less sensitive to the non-linear effects due to their high conductivity of oil. So, for used transformers the excitation voltage can be increased up to 1'000 V. In general, a polarisation duration of 5'000 to 7'000 seconds is sufficient to assess the insulation quality of a power transformer, the same duration is also recommended for the depolarisation duration.

In general, it is important to avoid non-linear effects by keeping the amplitude of the applied excitation voltages as low as possible. It is also recommended to keep the discharge periods between the successive dc voltage applications long enough to avoid any superposition of dielectric responses.

5 Specifications

Electrical Insulation Diagnostic System PDC-ANALYSER-1MOD

Current measurement

range	±1 mA
resolution (current display when measuring)	1 pA
resolution (recorded data)	0.1 pA
accuracy	0.5 % of the measured value ±1 pA after 1 hour warming up
impedance	10 kΩ
protection	up to 100 mA respectively 1kV for 50ms
noise suppression	up to 10 µA eff at 50 / 60 Hz mains frequency
filtering (current display when measuring)	mean value in 1 s intervals
filtering (recorded data)	mean value in intervals increasing proportionally with the time from the voltage source switching moment

Voltage source

voltage range when switched on	+30 ... +2000 V
maximum current sourcing when switched on	<+5 mA
impedance when switched on	< 20 kΩ
impedance when switched to zero	< 0,2 Ω
current limiting when switching cap. loads	≤ ±100 mA for 20 ms

Capacitance measurement

the load capacitance is indirectly measured by computing the ratio charge to voltage when the voltage source is switched off for measuring of the depolarisation current. However, the current measurement is not impaired by a load capacitance departing the range listed below.

accuracy
maximum load capacitance

source voltage			
2 kV	1 kV	500 V	100 V
±2 % ±5 pF	±2 % ±10 pF	±2 % ±20 pF	±2 % ±100 pF
25 nF	50 nF	100 nF	500 nF

Computer

display
processor
memory
hard disk
standard interfaces
options

15" TFT, 262 144 colours, resolution 1024 x 786 pixels
Intel Pentium III 1 GHz
SDRAM 256 MB
40 GB
DVD+RW, 3½" Floppy, 2 x PCMCIA, parallel and serial ports, Ethernet
additional serial ports, Audio in/out, external monitor out

Software

operating system
measuring and control program

Windows XP home SP2
installed ready to use, outputs for each measurement one file with polarisation data, one file with depolarisation data and one file with general measurement descriptions

standard evaluation software

installed ready to use, easy to use, extensive possibilities to postprocess, to display, to print and to export the measured data, computation of the complex capacitance in function of frequency, computation of a lumped equivalent circuit of the measured insulation, computation of recovery voltages and the derived "polarisation spectrum", computation of polarisation indexes and of insulation resistances according to all known standards and definitions

advanced evaluation software

quality assessment of oil-paper insulation systems, quantitative determination of moisture content in pressboard and of oil conductivity for power transformers

Miscellaneous

weight
power supply
size
temperature (use)
temperature (stock)
pressure
humidity
acceleration
length of standard measurement cables

17.3 kg
90 ... 260 V, 47 ... 63 Hz, <160 VA
514 x 185 x 428 (width x depth x height in mm)
0 ... 35 °C
-10 ... 50 °C
70 ... 106 kPa
5 ... 80 % non condensing
< 2 g
15 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix A

The **PDC-ANALYSER-1MOD** generates 3 files for each measurement.

These files are stored in the directory as entered during setup.

The polarisation current data are registered in a *.p.dat file. The depolarisation current data are registered in a *.d.dat file. Information about the measurement are registered in a *.c.txt file.

The name of each generated file is composed of 3 different parts.

Example: The name of a file could be **testa14p.dat**

testa: is a name prefix, which identifies a measurement series.

14: is a number between 01 to 99, which identifies a single measurement in a measurement series with a given name prefix (in this example, testa). This number increments automatically for each further measurement performed in this series.

p: indicates the type of the file, in this example, polarisation current data file.

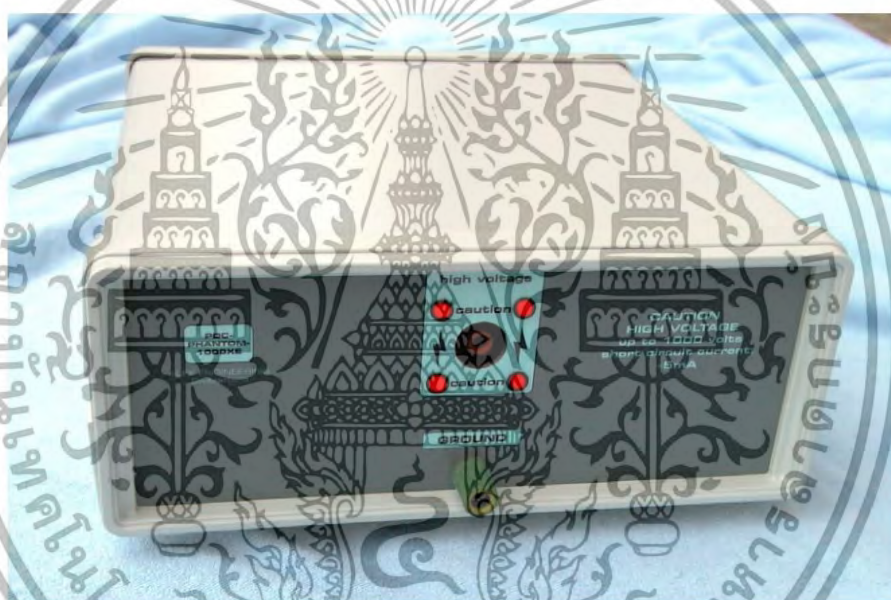




คู่มือการใช้งานแหล่งจ่ายแรงดันเสริม PDC-PHANTOM-1000XE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDC-Phantom-1000XE Manual



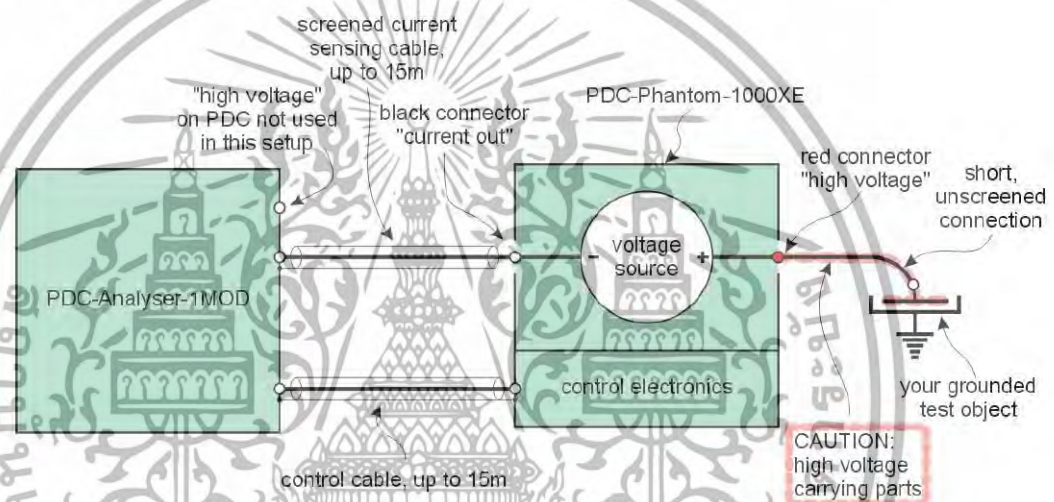
ALFF ENGINEERING

Gomweg 7, CH-8915 Hausen am Albis, Switzerland
 Phone: +41 1 77 66 77 6 fax: +41 1 77 66 77 7
 e-mail: info@alff-engineering.ch
 Web: www.alff-engineering.ch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description of PDC-Phantom-1000XE

The **PDC-Phantom-1000XE** voltage source is a “flying voltage source” for performing measurements on grounded objects. The insulation level between the control electronics and the voltage source is extremely high such as not to compromise the pA resolution of the PDC-Analyser-1MOD. This **PDC-Phantom-1000XE** must be located as near as possible to the connection of the object to be tested. If it was build into the PDC, the properties of the cable connecting the PDC to the test object would be superimposed to the properties of the test object. Also, be aware, that the cable from the Phantom to the test object is part of the system under assessment; any leak currents to ground or shifting electrostatic charges will be recorded by the PDC.



Operating the PDC-Phantom-1000XE

Before starting any cabling or changes to an existing cabling, the **PDC-Analyser-1MOD** should be in the off state. As the **PDC-Analyser-1MOD** powers the **PDC-Phantom-1000XE**, no high voltage will be present. This will prevent operators from touching excessive high voltage and equipment from being damaged. After setting up the connections as shown above, the **PDC-Analyser-1MOD** can be turned on. The green lamp “Phantom powered” on the **PDC-Phantom-1000XE** should light up, but not the four red “high voltage” warning lamps. Now, the program “PDC measurement” can be evoked. The external Phantom source must be chosen as voltage source for the measurement and the polarisation voltage can be set from 30 to 1000 V. Then execute the measurements as if the internal voltage source was used. Make sure, noone can come within reach of the test object or even touch any conductor carrying high voltage. At an ongoing measurement, people or objects moving around at vicinity of the high voltage connection should be avoided, because shifting electrostatic charges may produce currents of the same order of magnitude than the polarisation and depolarisation currents to be recorded.

CAUTION

- Make sure, nobody can approach or touch cables, equipment or electrodes possibly carrying high, dangerous voltages.
- This instrumentation must be run in all cases by experienced operators.
- Do not make any changes in the cabling as long as the PDC-Analyser-1MOD is on.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นาย เจษฎา รักษา
 วัน เดือน ปีเกิด 22 มิถุนายน พ.ศ. 2542
 ที่อยู่ เลขที่ 333/18 ถ.ราชบุรินทร์บำรุง
 ต.เนินพระ อ.เมือง จ.ระยอง 21000
 ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2564 สำเร็จการศึกษาระดับ
 ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 (วศ.บ.) คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
 ทหารลาดกระบัง

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และมีส่วนร่วม

1. Yutthagowith, P. and Raxsa, J. "Loss Tangent Estimation in Damped Alternating Current Voltage Tests." **15th Int. Symp. EMC and Transients in Infrastructures / International Student Session (ISET/ISS 2021), Online conference, Dec. 2021.**
2. Yutthagowith, P., Pramualsingha, S. and Raxsa, J. "Development of High-Voltage Alternating Current Measuring System." **16th Int. Symp. on EMC and Transients in Infrastructures / International Student Session (ISET/ISS 2022), Online conference, Dec. 2022. pp. 24-28.**
3. Raxsa, J., Yutthagowith, P. and Mai-eiam, T. "Study of High Voltage AC Generation using A Series Resonant Circuit." **7th Int. Symp. Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH 2023), Bangkok, Thailand, Feb. 2023, pp. 78-81.**
4. Mai-eiam, T., Raxsa, J., Nimsanong, P. and Yutthagowith, P. "The Study of the Voltage Frequency Effects on Partial Discharge Characteristics." **7th Int. Symp. Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH 2023), Bangkok, Thailand, Feb. 2023, pp. 30-35.**
5. Yutthagowith, P., Raxsa, J., Chaisiri, P. and Mai-eiam, T. "The Study of High Voltage AC Generation Using A Series Resonant Circuit." **9th Int. Conf. Eng., Appl. Sci, Technol. (ICEAST), Vientiane, Laos, May 2023, pp. 164-167.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Marukatat, N, Mai-eiam, T., Chaisiri, P., Raxsa, J., Nimsanong, P. and Yutthagowith, P. "The Study of the Voltage Frequency Effects on Partial Discharge Characteristics." **9th Int. Conf. Eng., Appl. Sci, Technol. (ICEAST), Vientiane, Laos, May 2023**, pp. 152-155.
7. Raxsa, J. and Yutthagowith, P. "Fringing Flux Factors Used for Design of High-Voltage Reactor." **17th Int. Symp. EMC and Transients in Infrastructures / International Student Session (ISET/ISS 2023), Kyoto, Japan, Dec. 2023**, pp. 65-70.
8. Raxsa, J., Khumpho, J. and Yutthagowith, P. "Designing HV Reactor With Multiple Air Gap Structure Based On Fringing Flux Factor." **8th Int. Symp. Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH 2024), Bangkok, Thailand, Feb. 2024**, pp. 25-30.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้