

การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกิน  
ด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก

CALCULATION OF THE THIRD HARMONIC RESISTIVE CURRENT OF MOSA  
USING A CURRENT ORTHOGONAL METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-020-162

การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกิน  
ด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก

CALCULATION OF THE THIRD HARMONIC RESISTIVE CURRENT OF MOSA  
USING A CURRENT ORTHOGONAL METHOD



พัชรินทร์ มุลมรัตน์  
PATCHARIN MOONMIRAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2559  
KMITL-2016-EN-M-020-162

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CALCULATION OF THE THIRD HARMONIC RESISTIVE CURRENT OF MOSA  
USING A CURRENT ORTHOGONAL METHOD

PATCHARIN MOONMIRAT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016  
KMITL-2016-EN-M-020-162

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

หัวข้อวิทยานิพนธ์    การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามของกับดักแรงดันเกิน  
ด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก

Thesis Title        Calculation of the Third Harmonic Resistive Current of MOSA  
using a Current Orthogonal Method

นักศึกษา              นางสาวพัชรินทร์ มุลมรัตน์

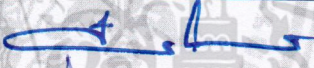
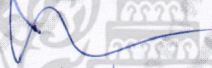
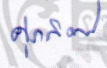
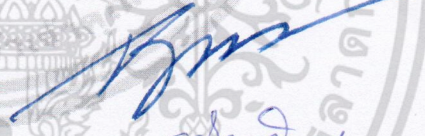
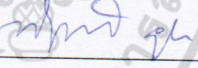
รหัสประจำตัว        56601079

ปริญญา                วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา            วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์    ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

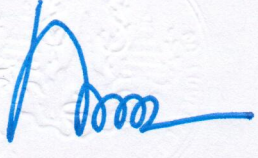
หมายเลขวิทยานิพนธ์              KMITL-2016-EN-M-020-162

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	
ผศ.ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
ผศ.ดร.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ    วันอังคารที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 15.00-17.00 น.  
สถานที่สอบ            ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของ กับดักแรงดันเกินด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก
นักศึกษา	นางสาวพัชรินทร์ มุลมรัตน์
รหัสประจำตัว	56601079
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พีรฤติ ยุทธโกวิท

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก (Current orthogonal method, COM) ค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินถูกใช้เป็นตัวชี้วัดถึงความเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินเนื่องจากเป็นตัวชี้วัดที่ดีและมีความน่าเชื่อถือสูง วิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic analysis method, HAM) วิธีชดเชยกระแสความจุของกับดักแรงดันเกิน (Capacitive current compensation method, CCCM) และวิธีที่นำเสนอถูกใช้ในการคำนวณกระแสความต้านทานบนพื้นฐานข้อมูลจากสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวม ฉะนั้น ในการศึกษาได้เริ่มต้นจาก จำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินโดยใช้วงจรสมมูลอย่างง่ายด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณกระแสรั่วไหลรวม ภายใต้ปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณ ดังนี้ 1) ผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทางความถี่ 2) ผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกที่สาม 3) ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อแรงดัน 4) ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม และ 5) ผลกระทบจากอัตราการใช้ ผลการคำนวณค่ากระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามจากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการจำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแล็บแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำมากกว่าวิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและวิธีชดเชยกระแสความจุ

นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ทำการทดสอบจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับกับดักแรงดันเกินขนาด 9 kV 5 kA ผลการคำนวณค่ากระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สาม จากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งวิธีที่นำเสนอนี้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลรวมเพื่อตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินได้อย่างเป็นที่น่าสนใจ

<b>Thesis</b>	CALCULATION OF THE THIRD HARMONIC RESISTIVE CURRENT OF MOSA USING A CURRENT ORTHOGONAL METHOD
<b>Student</b>	Ms.Patcharin Moonmirat
<b>Student ID.</b>	56601079
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith

## ABSTRACT

This thesis presents calculation of the third harmonic resistive current of MOSA using a current orthogonal method. Maximum amplitude of the third harmonic resistive current has been used as an indicator for monitoring degradation of MOSA. Since it is well known that the third harmonic resistive current is a good and high reliable indicator of MOSA. Several algorithms include the harmonic analysis method (HAM), the capacitive current compensation method (CCCM) and the proposed method (COM) are used to extract the resistive current based on voltage and total leakage current signals. Surge arrester model for calculating total leakage current has been performed in MATLAB software. The effect of the power frequency deviation, the third harmonic voltage, the white noise on the voltage, the white noise on the total leakage current, and the sampling rate have been investigated to show the ability of proposed method in calculation of the third resistive current. In addition, the calculation of the third harmonic resistive current using COM, CCCM and HAM have been done using matlab software. The results show that the COM is more accurate than other methods.

Moreover, the real voltage and total leakage current signals of a 9 kV MOSA are acquired by experiment. The COM is the most stable method and provides satisfactory results.

||

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยูทธโกวิท ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณนวคุณ ไตรรัตน์ภริรักษ์ ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ บริษัท แอลจี อีเลคโทรนิคส์ ประเทศไทย และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ และขอขอบคุณน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่ให้การช่วยเหลือในการทดสอบมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครุอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า



พัชรินทร์ มุลมรัตน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 กัมบัตกแรงดันเกิน.....	6
2.2.1 กัมบัตกแรงดันเกินชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์.....	6
2.2.2 กัมบัตกแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์.....	7
2.3 วงจรสมมูลของกัมบัตกแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์.....	8
2.4 ลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสของกัมบัตกแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์.....	9
2.5 กระแสรั่วไหลรวมของกัมบัตกแรงดันเกิน.....	10
2.5.1 กระแสความจุของกัมบัตกแรงดันเกิน.....	10
2.5.2 กระแสความต้านทานของกัมบัตกแรงดันเกิน.....	10
2.6 การเสื่อมสภาพและโหมดความล้มเหลวของกัมบัตกแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์.....	11
2.7 ความสำคัญในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกัมบัตกแรงดันเกิน.....	12
2.8 การจำลองการทำงานของกัมบัตกแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแลบ.....	12
2.8.1 แบบจำลองของกัมบัตกแรงดันเกินอย่างง่าย.....	12
2.8.2 วิธีการจำลองทางวงจรไฟฟ้าของกัมบัตกแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแลบ.....	12
2.8.3 การคำนวณทางวงจรไฟฟ้าของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น.....	14
2.8.4 การคำนวณแรงดันและกระแสของแบบจำลองกัมบัตกแรงดันเกิน.....	16
2.9 การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกัมบัตกแรงดันเกิน.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.1 วิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	18
2.9.2 วิธีชดเชยกระแสความจุของกัปดักแรงดันเกิน.....	21
2.9.3 วิธีกระแสตั้งฉาก.....	23
2.10 การประเมินความเสี่ยงและกลยุทธ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพ ของกัปดักแรงดันเกิน.....	25
บทที่ 3 การคำนวณกระแสความต้านทานของกัปดักแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแลบและ ผลการคำนวณ.....	26
3.1 การจำลองการทำงานของกัปดักแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแลบ.....	26
3.2 ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกัปดักแรงดันเกินจาก สัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการจำลอง.....	27
3.2.1 ผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทางความถี่.....	27
3.2.2 ผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกที่สามของแรงดันไฟฟ้า.....	28
3.2.3 ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	33
3.2.4 ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม.....	36
3.2.5 ผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกที่สาม สัญญาณรบกวนต่อแรงดัน และสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม.....	39
3.2.6 ผลกระทบจากอัตราการสุ่มข้อมูล.....	44
3.3 สรุป.....	48
บทที่ 4 การทดลองและประเมินผล.....	49
4.1 การทดสอบกัปดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์.....	49
4.1.1 วงจรทดสอบ.....	49
4.1.2 วิธีการทดสอบ.....	52
4.2 ผลการทดสอบ.....	53
4.2.1 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u (8.1 kVrms).....	53
4.2.2 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u (9.0 kVrms).....	56
4.2.3 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u (9.9 kVrms).....	60
4.2.4 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u (10.8 kVrms).....	63
4.2.5 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u (11.7 kVrms).....	66
4.2.6 ความจุไฟฟ้าของกัปดักแรงดันเกิน.....	70
4.3 สรุป.....	71
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุป.....	72

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	84



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่าแรงดันและกระแสของกับดักแรงดันเกิน.....	26
4.1 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระดับต่างๆที่ใช้ในการทดสอบกับดักแรงดันเกิน.....	52
4.2 แสดงผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM (ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u.).....	56
4.3 แสดงผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM (ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u.).....	59
4.4 แสดงผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM (ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.).....	62
4.5 แสดงผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM (ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.).....	65
4.6 แสดงผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM (ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.).....	68
4.7 แสดงค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามที่คำนวณด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. ถึง 1.3 p.u.....	69
4.8 แสดงค่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. ถึง 1.3 p.u.....	69
4.9 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกินที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี COM.....	70

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ไดอะแกรมของขนาดแรงดันเกิน..... 5
2.2	หลักการการทำงานของกักตักแรงดันเกินภายใต้สภาวะแรงดันปกติ..... 6
2.3	หลักการการทำงานของกักตักแรงดันเกินภายใต้สภาวะแรงดันเกิน..... 6
2.4	โครงสร้างและส่วนประกอบของกักตักแรงดันเกินชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์..... 7
2.5	รูปหน้าตัดตามขวางของกักตักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์..... 7
2.6	บล็อกซิงค์ออกไซด์วาริสเตอร์..... 7
2.7	โครงสร้างจุลภาคของบล็อกซิงค์ออกไซด์วาริสเตอร์..... 8
2.8	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของกักตักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์..... 8
2.9	ลักษณะเส้นแรงดัน-กระแส..... 9
2.10	กักตักแรงดันเกินพังเสียหาย..... 11
2.11	หม้อแปลงในระบบไฟฟ้าได้รับความเสียหายเนื่องจากกักตักแรงดันเกินทำงานล้มเหลว..... 11
2.12	วงจรสมมูลอย่างง่ายของกักตักแรงดันเกิน..... 12
2.13	ตัวต้านทานต่อระหว่างปม 1 และปม 2..... 13
2.14	ตัวเก็บประจุต่อระหว่างปม 1 และปม 2..... 14
2.15	ตัวอย่างการประมาณค่าด้วยเส้นตรง..... 15
2.16	การเทียบเคียงของค่าความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น..... 15
2.17	วงจรที่ใช้ในการจำลองแบบจำลองของกักตักแรงดันเกิน..... 16
2.18	เส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันคงเหลือกับค่ากระแสฮิมพัลส์..... 17
2.19	แผนผังการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธี HAM..... 20
2.20	แผนผังการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธี CCCM..... 22
2.20	แผนผังการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธี COM..... 21
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกักตักแรงดันเกินต่อความถี่..... 28
3.2	รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่มีฮาร์มอนิกลำดับสามและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมต่อเวลา..... 29
3.3	รูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3)..... 29
3.4	รูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3)..... 30
3.5	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ ) (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3)..... 30
3.6	ภาพขยายค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ ) (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3)..... 31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ ).....	32
3.8 ภาพขยายค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ ).....	32
3.9 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่มีสัญญาณรบกวนและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมต่อเวลา.....	33
3.10 รูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีสัญญาณรบกวน).....	34
3.11 รูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีสัญญาณรบกวน).....	34
3.12 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่อ SNR (เมื่อแรงดันมีสัญญาณรบกวน).....	35
3.13 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่อ SNR (เมื่อแรงดันมีสัญญาณรบกวน).....	35
3.14 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมที่มีสัญญาณรบกวนต่อเวลา.....	36
3.15 รูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน).....	37
3.16 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านความต้านทานอ้างอิงกับวิธี HAM ต่อเวลา (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน).....	37
3.17 รูปคลื่นกระแสความต้านทาน อ้างอิงกับวิธี COM และวิธี CCCM ต่อเวลา (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน).....	38
3.18 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ $I_{R3}$ 3 ต่อ SNR (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน).....	38
3.19 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่อ SNR (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน).....	39
3.20 รูปคลื่นแรงดันที่มีฮาร์มอนิกลำดับสาม สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและ สัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB.....	40
3.21 รูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับสาม สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและ สัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB).....	40
3.22 รูปคลื่นกระแสความต้านทาน ต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับสาม สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB).....	41
3.23 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ ) (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับสาม สัญญาณรบกวนต่อแรงดัน และสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB).....	42
3.24 ภาพขยายความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ ) (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับสาม สัญญาณรบกวนต่อแรงดัน และสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB).....	42
3.25 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ ) (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับสาม สัญญาณรบกวนต่อแรงดัน และสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB).....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26 ภาพขยายความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ $I_{R3}$ ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ ) (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับสาม สัญญาณรบกวนต่อแรงดัน และสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB).....	44
3.27 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มีอัตราการสุ่มข้อมูล 5 kHz ต่อเวลา.....	45
3.28 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมผ่านความจุไฟฟ้าต่อเวลา (เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีอัตราการสุ่มข้อมูล 5 kHz).....	46
3.29 รูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลา (เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีอัตราการสุ่มข้อมูล 5 kHz).....	46
3.30 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อ SNR (เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีอัตราการสุ่มข้อมูล 50 kHz และ 5 kHz).....	47
3.31 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดต่อ SNR (เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีอัตราการสุ่มข้อมูล 50 kHz และ 5 kHz).....	48
4.1 วงจรทดสอบ.....	49
4.2 กัปดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ ขนาด 9 kV 5 kA.....	50
4.3 ความต้านทานชั้นที่.....	50
4.4 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป.....	50
4.5 หม้อแปลงแรงดันกระแสสลับ ขนาด 15 kV.....	51
4.6 โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV.....	51
4.7 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 0-250 Vac 50 Hz 20 A.....	52
4.8 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u.).....	53
4.9 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 2 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u.).....	54
4.10 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u.).....	55
4.11 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทาน ต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u.).....	55
4.12 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u.).....	57
4.13 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 2 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u.).....	57
4.14 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u.).....	58
4.15 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u.).....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.).....	60
4.17 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 2 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.).....	61
4.18 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.).....	61
4.19 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.).....	62
4.20 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.).....	63
4.21 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 2 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.).....	64
4.22 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.).....	64
4.23 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.).....	65
4.24 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.).....	66
4.25 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 2 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.).....	67
4.26 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.).....	67
4.27 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.).....	68

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันกับดักแรงดันเกินถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติในการป้องกันแรงดันเกินที่ตี ราคาถูก และมีอายุการใช้งานยาวนาน ในระบบไฟฟ้าแรงสูงถือว่ากับดักแรงดันเกินมีความสำคัญทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์สำคัญต่างๆในระบบจากแรงดันเกิน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า รีแอกเตอร์ และสายเคเบิล เป็นต้น

กับดักแรงดันเกินในขณะที่ใช้งานจะต้องสัมผัสกับ แรงดันเกินฟ้าผ่า แรงดันเกินสวิตชิง แรงดันเกินชั่วคราว และมลภาวะ ด้วยสาเหตุเหล่านี้อาจส่งผลให้กับกับดักแรงดันเกินเสื่อมสภาพหรือทำให้ความสามารถในการป้องกันแรงดันเกินของกับดักแรงดันเกินลดลง ซึ่งการเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินอาจเป็นสาเหตุของอันตรายทั้งกับชีวิต และทรัพย์สิน ดังนั้นการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินจึงเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญ ที่จะช่วยให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาและยังช่วยในการวิเคราะห์คุณภาพในการซ่อมบำรุงก่อนที่จะนำอุปกรณ์ตัวใหม่ทดแทนอุปกรณ์ตัวเก่าที่เสื่อมสภาพ

การเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้ 1) การเสื่อมสภาพของฉนวน (insulation properties) 2) การเสื่อมสภาพของลักษณะเส้นแรงดัน-กระแส (protective characteristics) และ 3) การเสื่อมสภาพทางกายภาพ เช่น การก่อเกิดความชื้น เนื่องจากปัญหาการซีล หรือรอยแตกบนผิวพอร์ซเลน เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าตัวชี้วัดที่มีความน่าเชื่อถือที่ใช้ในการประเมินสถานะภาพของกับดักแรงดันเกิน ได้แก่ ค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกิน เนื่องจากแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สาม จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสของกับดักแรงดันเกินเสื่อมสภาพ การเพิ่มขึ้นของค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สาม จะส่งผลให้กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้อุณหภูมิของบล็อกชิ่งค็อกเอาต์เพิ่มขึ้นด้วย ถ้าหากค่ากระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามนี้มีค่าเกินค่าที่กำหนดจะทำให้พลังงานสะสมในบล็อกชิ่งค็อกเอาต์มีค่าเกินกว่าความสามารถในการสลายพลังงาน (energy dissipation capability) สุดท้ายอาจเกิดสภาวะความร้อนเกินไม่หยุดยั้ง (Thermal Runaway) และนำไปสู่การระเบิดได้

ในอดีตได้มีบทความวิจัยหลายฉบับนำเสนอวิธีในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกิน โดยจะมีทั้งวิธีการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินทั้งแบบออฟไลน์ (off-line) โดยการสุ่มเลือกกับดักแรงดันเกินที่ใช้งานจริงในระบบมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ และแบบออนไลน์ (on-line) โดยการตรวจสอบกับดักแรงดันเกินขณะใช้งานจริง จากการศึกษาพบว่าบางวิธีมีข้อจำกัดและยังขาดความน่าเชื่อถือ ถ้าหากเลือกใช้วิธีในการตรวจสอบสภาพความเสื่อมของกับดักแรงดันเกินที่ขาดความแม่นยำอาจนำไปสู่การเปลี่ยนกับดักแรงดันเกินใหม่โดยไม่จำเป็น เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายทั้งในอุปกรณ์และเวลาทำงานเพิ่มขึ้นอีก ฉะนั้น เพื่อป้องกันการประเมินผลและแปลความหมายในการวิเคราะห์

สถานะของกัปดักแรงดันเกินผิด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอตัวชี้วัดที่เหมาะสมและวิธีในการคำนวณตัวชี้วัดนี้เพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกัปดักแรงดันเกินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความมุ่งหมายในการส่งเสริมงานวิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตลอดจนการพัฒนาโปรแกรมการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกัปดักแรงดันเกินให้มีความง่าย รวดเร็วและแม่นยำ เพื่อนำไปใช้ในการประเมินผลและตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกัปดักแรงดันเกินได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีสมมุติฐานของการศึกษา ดังต่อไปนี้

1.3.1 ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกัปดักแรงดันเกินจากสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแลบด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก (COM) มีความแม่นยำและมีเสถียรภาพดีกว่าวิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (HAM) และวิธีชดเชยกระแสความจุของกัปดักแรงดันเกิน (CCCM) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง

1.3.2 ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกัปดักแรงดันเกินจากสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีกระแสตั้งฉากมีความแม่นยำและมีเสถียรภาพดีกว่าวิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (HAM) และวิธีชดเชยกระแสความจุของกัปดักแรงดันเกิน (CCCM)

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตการวิจัย ดังต่อไปนี้

1.4.1 จำลองการทำงานของกัปดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์โดยใช้วงจรสมมูลอย่างง่ายด้วยโปรแกรมแมทแลบ ภายใต้ปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกัปดักแรงดันเกิน ดังนี้

1.1) ผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทางความถี่ โดยมีความถี่อยู่ในช่วง 49.5 Hz - 50.5 Hz

1.2) ผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ 3 โดยมีอัตราส่วนของขนาดแรงดันฮาร์มอนิกที่ 3 ต่อขนาดฮาร์มอนิกที่ 1 ( $U_3 / U_1$ ) อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.1 ในแต่ละอัตราส่วนแรงดันจะมีมุมเฟสเริ่มตั้งแต่ 0 โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ  $\pi/6$  จนถึง  $2\pi$  เรเดียน รวมทั้งหมด 13 มุมเฟส ซึ่งค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกัปดักแรงดันเกินในแต่ละอัตราส่วนแรงดันจะได้รับการเฉลี่ยมุมเฟสทั้ง 13 มุมเฟส

1.3) ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อแรงดัน โดยมีขนาดของอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่ต้องการต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio, SNR) อยู่ในช่วง 40dB ถึง 50dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4) ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม โดยมี SNR อยู่ในช่วง 20dB ถึง 50dB

1.5) ผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดัน และสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม โดยมีอัตราส่วนของขนาดแรงดัน ( $U_3/ U_1$ ) อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.1 ในแต่ละอัตราส่วนแรงดันจะมีมุมเฟส เริ่มตั้งแต่ 0 โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ  $\pi/6$  จนถึง  $2\pi$  เรเดียน รวมทั้งหมด 13 มุมเฟส ซึ่งค่ากระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินในแต่ละอัตราส่วนแรงดันจะได้จากการเฉลี่ยมุมเฟสทั้ง 13 มุมเฟส และในแต่ละอัตราส่วนแรงดันมีขนาดอัตราส่วน SNR ของกระแสรั่วไหลรวมและแรงดันที่ 40dB

1.6) ผลกระทบจากอัตราการสุ่มข้อมูล โดยลดขนาดอัตราการสุ่มข้อมูลลง 10 เท่า จากข้อมูลที่มีอัตราการสุ่ม 50 kHz เป็น 5 kHz

1.4.2 ทำการทดสอบจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับดักแรงดันเกินขนาด 9 kV 5kA ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u 1.0 p.u 1.1 p.u 1.2 p.u และ 1.3 p.u. ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลรวมด้วยออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบ ในแต่ละระดับแรงดัน จากนั้นคำนวณหาค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามจากรูปคลื่นทั้ง 10 คาบด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก วิเคราะห์ฮาร์มอนิก และวิธีการชดเชยกระแสความจุตามลำดับ

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

การศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.5.1 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ศึกษาการจำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินด้วยโปรแกรม ATPdraw และโปรแกรมแมทแลบ

1.5.3 ศึกษาการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (fast fourier transform,FFT) ด้วยโปรแกรมแมทแลบ

1.5.4 จำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแลบภายใต้ 6 เงื่อนไขดังในหัวข้อที่ 1.4.1

1.5.5 จากการจำลองในหัวข้อที่ 1.5.4 จะได้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันอ้างอิง รูปคลื่นสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมอ้างอิง รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทาน อ้างอิง และรูปคลื่นกระแสความจุอ้างอิง ทั้ง 6 เงื่อนไข

1.5.6 คำนวณหาค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามอ้างอิงด้วยการคำนวณ FFT ของสัญญาณกระแสความต้านทานอ้างอิง ทั้ง 6 เงื่อนไขในหัวข้อที่ 1.5.5 ด้วยโปรแกรมแมทแลบ

1.5.7 คำนวณหารูปคลื่นกระแสความต้านทาน และรูปคลื่นกระแสความจุ จากสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการจำลองทั้ง 6 เงื่อนไขในหัวข้อที่ 1.5.5 ด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก วิเคราะห์ฮาร์มอนิก และวิธีชดเชยกระแสความจุด้วยโปรแกรมแมทแลบ

1.5.8 คำนวณหาค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยการคำนวณ FFT ของสัญญาณกระแสความต้านทาน ทั้ง 6 เงื่อนไข ที่คำนวณได้จาก 3 วิธีในหัวข้อที่ 1.5.7 ด้วยโปรแกรมแมทแล็บ

1.5.9 คำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (Average relative error) และคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุด (Maximum relative error) ของการคำนวณค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินจากทั้ง 3 วิธี ด้วยโปรแกรมแมทแล็บ

1.5.10 วิเคราะห์ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธีกระแสตั้งฉาก วิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก และวิธีชดเชยกระแสความจุ ทั้ง 6 เงื่อนไข

1.5.11 ทำการทดสอบจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับกับดักแรงดันเกินขนาด 9 kV 5 kA ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u 1.0 p.u. 1.1 p.u 1.2 p.u และ 1.3 p.u. ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลรวมด้วยออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบ ในแต่ละระดับแรงดันโดยพร้อมกัน

1.5.12 คำนวณหาค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินจากสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการทดสอบจากทั้ง 3 วิธี ในแต่ละคาบ และคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

1.5.13 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ มีดังต่อไปนี้

1.6.1 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของกับดักแรงดันเกินสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าแรงสูง

1.6.2 ได้โปรแกรมการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ที่ง่าย แม่นยำ และมีเสถียรภาพ

1.6.3 สามารถทำการทดสอบและวิเคราะห์สถานะของกับดักแรงดันเกินได้

1.6.4 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินด้วยวิธีกระแสตั้งฉากในที่ประชุมวิชาการ

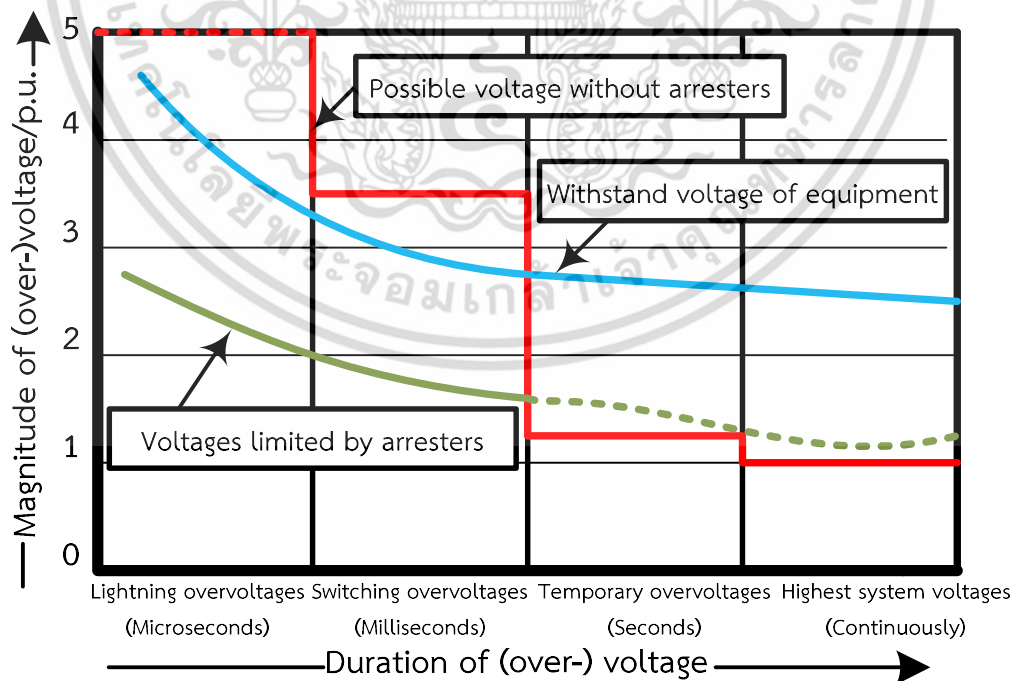
## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง การฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบมีโอกาสได้รับแรงดันเกินฟ้าผ่า แรงดันเกินสวิตชิง และแรงดันเกินชั่วคราว ซึ่งแรงดันเกินเหล่านี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้การฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบล้มเหลวและเกิดความเสียหายได้ ฉะนั้น ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องมีการป้องกันด้วยอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

รูปที่ 2.1 แสดงค่าของแรงดันเกินที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินในหน่วยเปอร์ยูนิต (per unit, p.u.) โดยแกนนอนถูกแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงของแรงดันเกินฟ้าผ่า ( $\mu\text{s}$ ) แรงดันเกินสวิตชิง (ms) แรงดันเกินชั่วคราว (s) และแรงดันสูงสุดในระบบ (อย่างต่อเนื่อง) ในช่วงของแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันสวิตชิง ขนาดของแรงดันเกินอาจมีค่าถึง 3 ถึง 4 p.u. ถ้าระบบไฟฟ้านั้นไม่มีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน แต่ถ้าในระบบมีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินจะสามารถจำกัดขนาดแรงดันเกินให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันที่อุปกรณ์ทนได้ (Withstand voltage) จากปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินในการป้องกันการฉนวนของอุปกรณ์และระบบจากแรงดันเกิน [1]

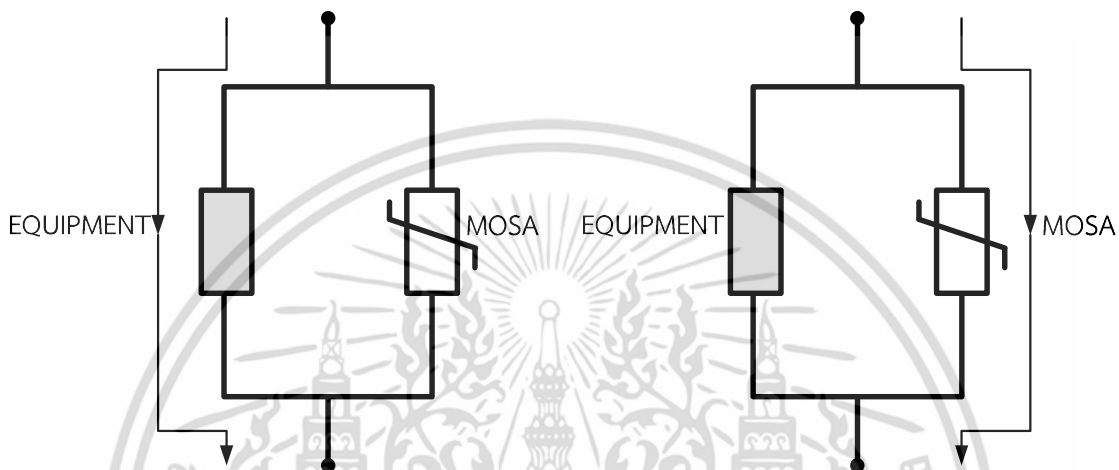


รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมของขนาดแรงดันเกิน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กักตักแรงดันเกิน (Surge arrester) [2]

กักตักแรงดันเกินทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจากแรงดันเกินทรานเซียนท์ ซึ่งกักตักแรงดันเกินจะถูกติดตั้งขนานใกล้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการป้องกัน โดยจะต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของกักตักแรงดันเกินภายใต้สภาวะแรงดันปกติ และรูปที่ 2.3 แสดงการทำงานของกักตักแรงดันเกินภายใต้สภาวะแรงดันเกิน



รูปที่ 2.2 การทำงานของกักตักแรงดันเกินภายใต้สภาวะแรงดันปกติ

รูปที่ 2.3 การทำงานของกักตักแรงดันเกินภายใต้สภาวะแรงดันเกิน

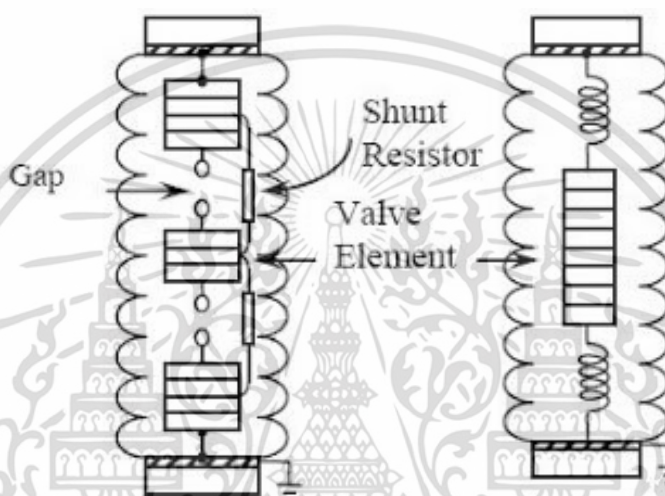
รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของกักตักแรงดันเกินที่สภาวะแรงดันปกติ กักตักแรงดันเกินจะมีค่าความต้านทานสูงมากในระดับเมกะโอห์ม เปรียบเสมือนกับตักแรงดันเกินเปิดวงจรตัวเอง (Open circuit) ฉะนั้น กระแสทั้งหมดในวงจรจะไหลผ่านอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน จะไม่ไหลผ่านกักตักแรงดันเกิน สำหรับรูปที่ 2.3 แสดงการทำงานของกักตักแรงดันเกินในสภาวะที่มีแรงดันเกิน ความต้านทานของกักตักแรงดันเกินจะลดลงเหลือประมาณ 2-3 โอห์มหรือน้อยกว่า เปรียบเสมือนกับตักแรงดันเกินลัดวงจรตัวเอง ในขณะที่เกิดแรงดันเกินเพื่อทำให้กระแสเปลี่ยนทิศทางวิ่งผ่านตัวเองลงกราวด์ แทนที่จะเข้าไปทำอันตรายกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ในขณะเดียวกันแรงดันคร่อมกักตักแรงดันเกินก็จะถูกจำกัดไว้ที่ค่าระดับหนึ่งเพื่อไม่ให้สูงเกินไปจนเป็นอันตรายกับอุปกรณ์ จากนั้นเมื่อแรงดันเกินผ่านลงกราวด์ไปแล้ว กักตักแรงดันเกินก็จะทำการเปิดวงจรตัวเองกลับมาสู่สถานะปกติเช่นเดิม

กักตักแรงดันเกินที่นิยมใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าแรงสูงมี 2 ชนิด ได้แก่ 1) กักตักแรงดันเกินชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) และ 2) กักตักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 กักตักแรงดันเกินชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ [3]

กักตักแรงดันเกินชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) จะมีสปาร์กแกปต่ออนุกรมกับความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น สปาร์กแกปเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันพิกัดของกักตักแรงดันเกินทำ

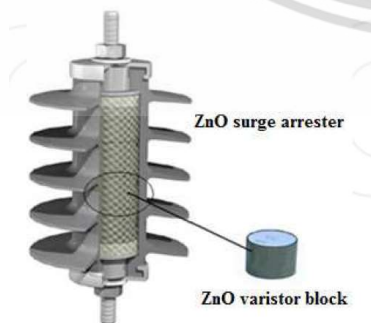
หน้าที่เป็นฉนวนกันมิให้กระแสไหลผ่านลงดินในขณะที่ใช้แรงดันปกติ อันเป็นเงื่อนไขของคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันเกิน สปาร์กแกปจะทนต่อแรงดันเกินไม่ได้เกิดเบรกดาวนผ่านแกปแรงดันที่กับังคับแรงดันเกินเกิดเบรกดาวนเรียกว่าแรงดันสปาร์กผ่าน (Sparkover Voltage) เมื่อสปาร์กผ่านแล้วแรงดันที่คร่อมกับดักแรงดันเกินจะลดลง จะเป็นแรงดันที่เหลือคร่อมตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักแรงดันเกิน เรียกว่าแรงดันคงค้าง (Residual Voltage) ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ของการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบโครงสร้างและส่วนประกอบของกับดักแรงดันเกินชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างและส่วนประกอบของกับดักเสิร์จชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์  
(ที่มา: <http://www.powerqualityworld.com/2011/05/surge-arresters.html>)

### 2.2.2 กับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์

กับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ (Metal oxide surge arrester) ประกอบด้วยชั้นของบล็อกซิงค์ออกไซด์วาไรสเตอร์วางอนุกรมกัน บรรจุในกระบอกฉนวนที่หามาจากวัสดุพอร์ซเลนหรือโพลีเมอร์ แสดงดังรูปที่ 2.5 บล็อกซิงค์ออกไซด์วาไรสเตอร์ที่นิยมใช้ทำกับดักแรงดันเกินแสดงดังรูปที่ 2.6

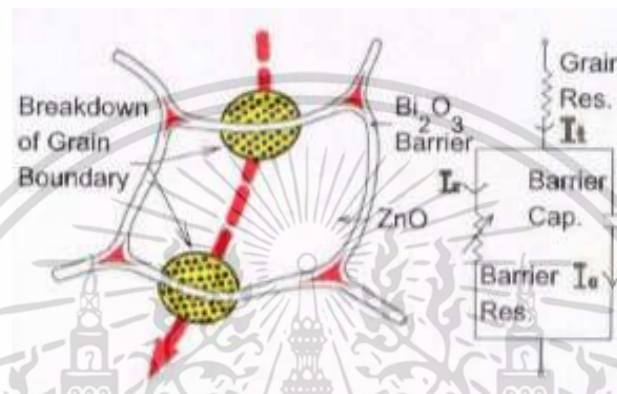


รูปที่ 2.5 กับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ [1]

รูปที่ 2.6 บล็อกซิงค์ออกไซด์วาไรสเตอร์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

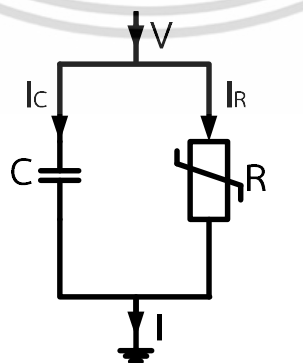
องค์ประกอบของบล็อกซิงค์ออกไซด์วาริสเตอร์เป็นส่วนประกอบสำคัญของกั๊บดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ เพราะมีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและมีความสูญเสียน้อย จึงไม่จำเป็นที่จะต้องมีช่องว่างอากาศมาต่ออนุกรมกับโครงสร้างของกั๊บดักแรงดันเกิน สภาพต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear resistivity) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของตัวต้านทานชนิดเซรามิกแบบผสม ที่ประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เป็นส่วนใหญ่และมีส่วนผสมของวัสดุอื่นๆเล็กน้อย เช่น  $Ba_2O_3$   $CoO_2$   $MnO_3$  และ  $Sb_2O_3$  เป็นต้น [1] โครงสร้างจุลภาคของบล็อกซิงค์ออกไซด์วาริสเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของบล็อกซิงค์ออกไซด์วาริสเตอร์ [1] :

### 2.3 วงจรสมมูลของกั๊บดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์

กั๊บดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ หรือ ZnO ซึ่ง ZnO จะมีความต้านทานจำเพาะน้อยแต่สารเคลือบรอบนอกมีความต้านทานจำเพาะสูงถึง  $10^{10} \Omega\text{-cm}$  และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative dielectric constant,  $\epsilon_r$ ) ประมาณ 500-1200 ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตของบริษัทผู้ผลิต ทำให้มีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ C [3] ฉะนั้น วงจรสมมูลอย่างง่ายที่ใช้อธิบายองค์ประกอบทางไฟฟ้าของกั๊บดักแรงดันเกิน คือ วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น (R) ขนานกับความจุไฟฟ้า (C) แสดงดังรูปที่ 2.8



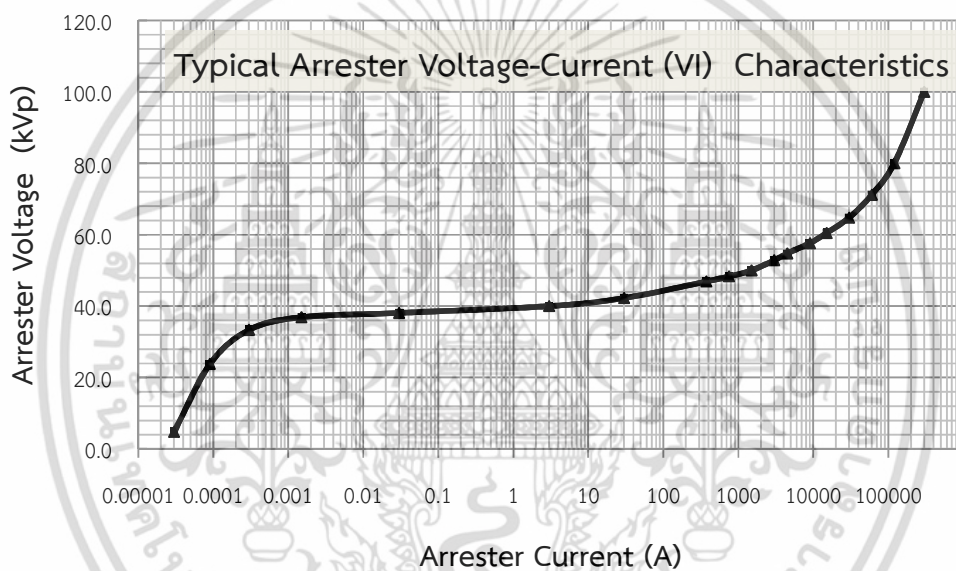
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของกั๊บดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $u(t)$  คือ แรงดัน  $i_R(t)$  คือ กระแสความต้านทาน  $i_C(t)$  คือ กระแสความจุ และ  $i_t(t)$  คือ กระแสรั่วไหลรวม

## 2.4 ลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสของกัปดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ [4]

ในขณะใช้งานกัปดักแรงดันเกินจะมีกระแสไหลผ่านต่อเนื่อง ซึ่งเป็นกระแสรั่วไหลรวมที่มีขนาดต่ำประมาณ 0.2 ถึง 3 mA กระแสรั่วไหลรวมนี้จะถูกทำให้เด่นด้วยองค์ประกอบของกระแสความจุ ในขณะที่องค์ประกอบของกระแสความต้านทานจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 5 ถึง 20% ขององค์ประกอบกระแสความจุ นอกจากนี้กระแสความต้านทานยังมีค่าขึ้นอยู่กับแรงดัน เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะเส้นแรงดัน-กระแส

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของกัปดักแรงดันเกินแสดงได้ดังนี้

$$I = KV^\alpha \quad (2.1)$$

เมื่อ  $I$  คือ กระแสไหลผ่านวาริสเตอร์

$K$  คือ ค่าคงตัวขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดของเกรน  $R$  ถ้าเกรนยิ่งเล็กความคงทนต่อแรงดันยิ่งสูง

$V$  คือ แรงดันตกคร่อมวาริสเตอร์

$\alpha$  คือ ค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุของ  $R$  (มีค่าประมาณ 20-50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 กระแสรั่วไหลรวมของกัปดักแรงดันเกิน

รูปที่ 2.9 แสดงถึงลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสของกัปดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์เมื่อถูกจ่ายด้วยแรงดันรูปคลื่นไซน์ (pure sinusoidal voltage) กระแสรั่วไหลรวมของกัปดักแรงดันเกินสามารถแบ่งออกเป็นองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

- องค์ประกอบกระแสความจุพื้นฐาน (Fundamental capacitive current component)
- องค์ประกอบกระแสความต้านทานมูลฐาน (Fundamental resistive current component)
- องค์ประกอบกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวต้านทานที่ใช้ทำกัปดักแรงดันเกิน ( $3^{\text{rd}}$  harmonic resistive current component)

### 2.5.1 กระแสความจุของกัปดักแรงดันเกิน

กระแสความจุ ( $i_C$ ) เป็นกระแสที่รั่วไหลผ่านสเตรคาปาซิเต้นซ์ของกัปดักแรงดันเกิน ซึ่งค่าสเตรคาปาซิเต้นซ์ของอิลิเมนต์ความต้านทานจากคู่มือผู้ผลิตโดยทั่วไปมีค่าประมาณ  $60 \text{ pF.kV/cm}^2$  ถึง  $150 \text{ pF.kV/cm}^2$  ที่พิกัดแรงดัน (rated voltage) ส่งผลให้กระแสความจุมีค่าประมาณประมาณ  $0.2 \text{ mA}$  ถึง  $3 \text{ mA}$  ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ

จากการศึกษาพบว่า ไม่มีหลักฐานที่ชี้ชัดว่ากระแส  $i_C$  มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความเสื่อมสภาพของลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสของซิงค์ออกไซด์วาไรสเตอร์ ดังนั้น กระแส  $i_C$  ไม่สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดสถานะของกัปดักแรงดันเกินได้

### 2.5.2 กระแสความต้านทานของกัปดักแรงดันเกิน

เมื่อป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับตัวกัปดักแรงดันเกินจะมีลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสของกัปดักแรงดันเกิน แสดงดังรูปที่ 2.9 องค์ประกอบกระแสความต้านทาน ของกระแสรั่วไหลรวมเป็นตัวชี้วัดที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสของกัปดักแรงดันเกิน ดังนั้น กระแสความต้านทานสามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับชี้วัดในการเปลี่ยนแปลงสภาวะของกัปดักแรงดันเกินขณะใช้งาน

คุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของบล็อกซิงค์ออกไซด์จะทำให้กระแสความต้านทานมีฮาร์มอนิกที่สาม ( $I_{R3}$ ) ซึ่งค่า  $I_{R3}$  นี้จะถูกใช้เป็นตัวชี้วัดถึงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสเมื่อกัปดักแรงดันเกินเสื่อมสภาพ

กระแสรั่วไหลรวมของกัปดักแรงดันเกินตัวเดียวกันอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงกว้างเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- แรงดันฮาร์มอนิกที่ 3
- สัญญาณรบกวนต่อแรงดัน
- สัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม
- อุณหภูมิ

## 2.6 การเสื่อมสภาพและโหมดความล้มเหลวของกักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์

กักแรงดันเกินที่ดีจะต้องมีลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสที่ดีที่ค่าตั้งต้นระหว่างการใช้งานและหลังจากที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันเกิน แต่อย่างไรก็ตามลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสอาจเสื่อมสภาพจากความเครียดทางความร้อนหรือความเครียดทางไฟฟ้า (Electrical and thermal stress) โดยความเครียดทางความร้อนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจาก 1) รังสีจากดวงอาทิตย์ 2) สิ่งสกปรกบนผิวภายนอกกักแรงดันเกิน 3) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขององค์ประกอบภายในของกักแรงดันเกินหลังจากได้รับแรงดันเกินที่มีพลังงานสูง สำหรับความเครียดทางไฟฟ้า เกิดจากแรงดันเกินฟ้าผ่า แรงดันเกินสวิตชิง และแรงดันเกินชั่วคราว เพราะในระบบปกติ กักแรงดันเกินจะต้องสัมผัสกับปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้กักแรงดันเกินเสื่อมสภาพเหล่านี้ เมื่อกักแรงดันเกินเสื่อมสภาพจะส่งผลให้กระแสรั่วไหลรวมผ่านกักแรงดันเกินเพิ่มขึ้น ถ้าหากกระแสนี้เพิ่มเกินค่าลิมิต อาจทำให้กักแรงดันเกินเสียหายได้

นอกจากนี้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งก็คือ การระบายความร้อนจาก ZnO กักแรงดันเกินควรได้รับพลังงาน  $\leq 85\%$  ของค่ากำหนด เนื่องจากกักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ไร้แก๊สที่รับแรงดันใช้งานตลอดเวลา จะมีกระแสรั่วไหลรวมผ่าน เป็นพลังงาน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เป็นผลให้กระแสเพิ่มขึ้น ความร้อนก็เพิ่มขึ้นและต่อไป อาจเกิดสภาวะความร้อนเกินไม่หยุดยั้ง (Thermal runaway) นำไปสู่การระเบิดได้ แสดงดังรูปที่ 2.10 ทำให้อุปกรณ์ที่อยู่รอบๆ เช่น หม้อแปลงกระแส (Current transformer) หม้อแปลงแรงดัน (Potential transformer) และบุชชิ่งหม้อแปลง (Transformer bushing) ได้รับความเสียหาย แสดงดังรูปที่ 2.11 นอกจากนี้อาจทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจรอีกด้วย



รูปที่ 2.10 กักแรงดันเกินพังเสียหาย



รูปที่ 2.11 หม้อแปลงในระบบไฟฟ้าได้รับความเสียหายเนื่องจากกักแรงดันเกินทำงานล้มเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ความสำคัญในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกักเก็บแรงดันเกิน

บทความหลายฉบับได้นำเสนอวิธีการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกักเก็บแรงดันเกินทั้งแบบออฟไลน์ (off-line measurement) โดยการสุ่มเลือกกักเก็บแรงดันเกินที่ใช้งานจริงในระบบมาทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการวัดแบบออนไลน์ (on-line measurement) โดยการตรวจสอบกักเก็บแรงดันเกินขณะใช้งานจริง เช่น การวัดความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Measurement) [1] การวัดกระแสรั่วไหลรวม (Total leakage current measurement,  $i(t)$ ) [5] และการวัดกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกักเก็บแรงดันเกิน (Third harmonic resistive current) [6]–[8]

การตรวจสอบสถานะของกักเก็บแรงดันเกินด้วยวิธีต่างๆ เหล่านี้อาจมีส่วนช่วย

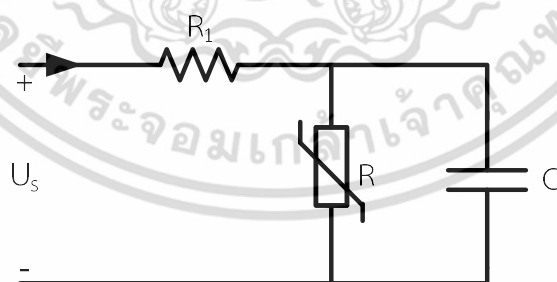
- ป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดกับกักเก็บแรงดันเกินโดยการแทนที่กักเก็บแรงดันเกินที่เสื่อมสภาพก่อนที่จะเบรกดาวน์
- เพิ่มความปลอดภัยสำหรับพนักงาน
- ลดความเสี่ยงที่จะก่อความเสียหายต่ออุปกรณ์อื่นๆ เนื่องจากกักเก็บแรงดันเกินทำงานล้มเหลว เช่น บุชชิงหม้อแปลง

## 2.8 การจำลองการทำงานของกักเก็บแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแล็บ [9]

การจำลองการทำงานของกักเก็บแรงดันเกินสามารถจำลองได้โดยใช้สมการทางไฟฟ้าของวงจรสมมูลอย่างง่ายของกักเก็บแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแล็บมีรายละเอียด ดังนี้

### 2.8.1 แบบจำลองของกักเก็บแรงดันเกินอย่างง่าย

รูปที่ 2.12 เป็นแบบจำลองของกักเก็บแรงดันเกินอย่างง่ายที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแล็บประกอบด้วยตัวต้านทานชั้นที่  $R_1$  ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายกระแสสลับ และตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ( $R$ ) 1 ตัว ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ( $C$ ) 1 ตัว



รูปที่ 2.12 แบบจำลองกักเก็บแรงดันเกินอย่างง่าย

### 2.8.2 วิธีการจำลองทางวงจรไฟฟ้าของกักเก็บแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแล็บ

#### 2.8.2.1 กฎสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับองค์ประกอบเชิงเส้นทางไฟฟ้า

การจำลองแบบการคำนวณทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรมแมทแล็บจำเป็นต้องใช้สมการในการสร้างแบบจำลองขึ้น ดังนั้นกฎสี่เหลี่ยมคางหมูจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณ

ค่าองค์ประกอบที่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลอง โดยการแปลงสมการอนุพันธ์ขององค์ประกอบในแบบจำลองให้เป็นสมการทางพีชคณิตที่เกี่ยวข้องกับแรงดันและกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังสมการ (2.2)

$$[G][U(t)] = [i(t)] - [i_h] \quad (2.2)$$

เมื่อ  $[G]$  คือ matrix ของค่าความนำ (Conductance)  
 $[U(t)]$  คือ เวกเตอร์ของแรงดัน  
 $[i(t)]$  คือ เวกเตอร์ของค่าแหล่งจ่ายกระแส  
 $[i_h]$  คือ เวกเตอร์ของค่าในอดีต

ขั้นตอนการเปลี่ยนสมการองค์ประกอบเชิงเส้นซึ่งประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุให้อยู่ในรูปของกฎสี่เหลี่ยมคางหมูนั้นสามารถทำได้ดังนี้

1) ตัวต้านทาน (R)



รูปที่ 2.13 ตัวต้านทานต่อระหว่างปม 1 และปม 2

สมการตั้งต้นของกระแสแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$i_R = \frac{U_R(t)}{R} \quad (2.3)$$

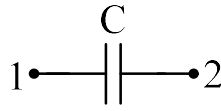
จากสมการ (2.3) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$i_{12}(t) = \frac{U_1(t) - U_2(t)}{R} \quad (2.4)$$

เนื่องจากสมการ (2.4) ไม่ติดค่าอนุพันธ์ในสมการจึงไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าเวลาในอดีต ( $t-\Delta t$ ) และสามารถใช้ค่าเวลาในปัจจุบัน ( $t$ ) ในทุกๆรอบของการคำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ตัวเก็บประจุ (C)



รูปที่ 2.14 ตัวเก็บประจุต่อระหว่างปม 1 และปม 2

สมการตั้งต้นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแสดงดังสมการ (2.5)

$$i_c = C \frac{dU_c(t)}{dt} \quad (2.5)$$

เมื่อเปลี่ยน  $i_c$  ให้อยู่ในรูปแบบของค่าเฉลี่ยระหว่างค่าเวลาปัจจุบัน ( $t$ ) และค่าเวลาในอดีต ( $t-\Delta t$ ) และเปลี่ยนผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุต่อเวลา  $dU_c/dt$  ให้อยู่ในรูปแบบของความชันที่เกิดจากผลต่างของแรงดันที่ค่าเวลาปัจจุบันเวลา ( $t$ ) และ ค่าเวลาในอดีต ( $t-\Delta t$ ) ทหารด้วย  $\Delta t$  แสดงดังสมการ (2.6)

$$\frac{i_c(t) + i_c(t-\Delta t)}{2} = \frac{C}{\Delta t} [(U_1(t) - U_2(t)) - (U_1(t-\Delta t) - U_2(t-\Delta t))] \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการ (2.7)

$$i_{12}(t) = \frac{2C}{\Delta t} (U_1(t) - U_2(t)) - \frac{2C}{\Delta t} (U_1(t-\Delta t) - U_2(t-\Delta t)) - i_{12}(t-\Delta t) \quad (2.7)$$

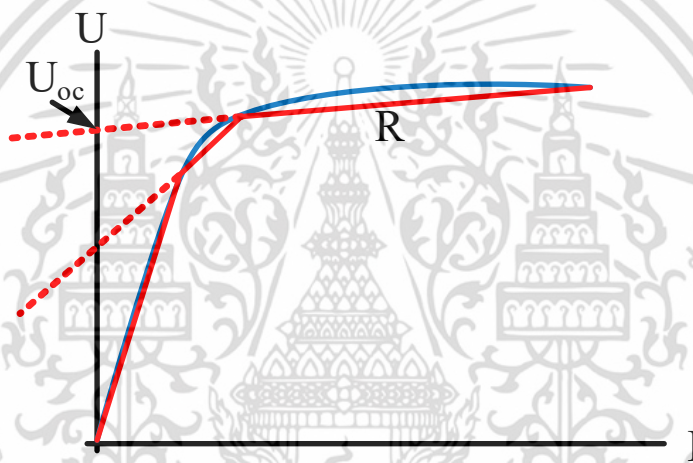
### 2.8.3 การคำนวณทางวงจรไฟฟ้าของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

เนื่องจากแบบจำลองของกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่าประกอบไปด้วยองค์ประกอบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการ (2.2) โดยนำความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองเข้ามารวมจะสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (2.8)

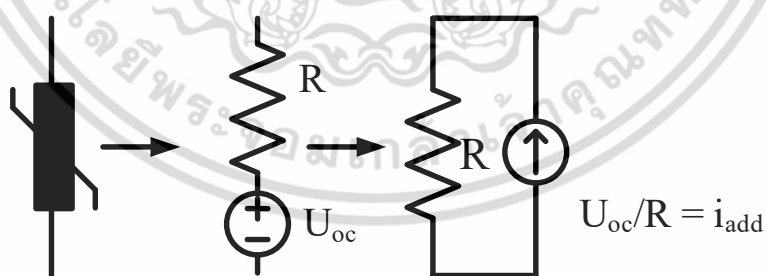
$$[G][U(t)] + [f(U(t))] = [i(t)] - [i_h] \quad (2.8)$$

เมื่อ  $[f(U(t))]$  คือกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยเขียนในรูปแบบของฟังก์ชันแรงดัน

การหาค่าตอบของสมการไม่เป็นเชิงเส้น (2.8) สามารถทำได้ด้วยวิธีการประมาณค่าเชิงเส้นเป็นช่วง การประมาณค่าเชิงเส้นเป็นช่วงถูกใช้ในการแก้ไขปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลอง โดยประมาณให้เป็นเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 2.15 ขั้นตอนการแก้ปัญหานั้นจะเริ่มต้นจากการหาค่าความชันของเส้นตรงโดยหาจาก  $(\Delta U/\Delta I)$  จะเห็นได้ว่าความชันของเส้นตรงจะมีค่าเท่ากับความต้านทาน ( $R$ ) และเมื่อพิจารณาในขณะที่กระแสเป็นศูนย์จะพบว่าเส้นตรงที่มีความชัน ( $R$ ) จะตัดกับแกนแรงดันที่จุด ( $U_{oc}$ ) หรือค่าแรงดันขณะเปิดวงจร ซึ่งเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันต่ออนุกรมกับความต้านทานและสามารถเทียบเคียงเป็นแหล่งจ่ายกระแส ( $U_{oc}/R$ ) ต่อขนานกับค่าความต้านทานดังรูปที่ 2.16 เมื่อนำค่าส่วนกลับของความชัน ( $1/R$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับconductance หรือแอดมิตแตนซ์มารวมกับค่าแอดมิตแตนซ์ที่เกิดจากองค์ประกอบเชิงเส้นพร้อมทั้งนำกระแสที่ได้จากแหล่งจ่ายกระแสมารวมกับกระแสก่อนการคำนวณ  $[i(t-\Delta t)]$  จะสามารถหาค่าตอบของแรงดันที่ปม  $[U(t)]$  ของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นได้



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการประมาณค่าด้วยเส้นตรง



รูปที่ 2.16 การเทียบเคียงของค่าความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

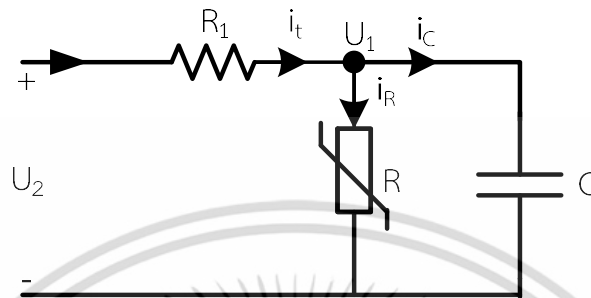
จากนั้นนำค่าแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ( $[g]$ ) และแหล่งจ่ายกระแสเข้าไปต่อกับวงจรที่ยังไม่ได้รับผลของความต้านทานเชิงเส้นทำให้ได้สมการ (2.8) ในรูปแบบดังสมการ (2.9)

$$[G][U(t)] + [g][f(U(t))] = [i(t)] - [i_h] + [i_{add}] \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.4 การคำนวณแรงดันและกระแสของแบบจำลองกับดักแรงดันเกิน

การจำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินเริ่มต้นจากการต่อวงจรเครื่องกำเนิดกระแสสลับเข้ากับแบบจำลองดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรที่ใช้ในการจำลองแบบจำลองของกับดักแรงดันเกิน

จากแบบจำลองของกับดักแรงดันเกิน สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสแรงดัน และ แอดมิตแตนซ์ในรูปของเมตริกซ์โดยไม่คำนึงความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการ (2.10)

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$G_{11} = \frac{2C}{\Delta t} + \frac{1}{R_1}$$

$$G_{12} = -\frac{1}{R_1}$$

$$G_{21} = 0$$

$$G_{22} = 1$$

$$i_1 = \frac{2C}{\Delta t} U_1(t - \Delta t) + i_c(t - \Delta t)$$

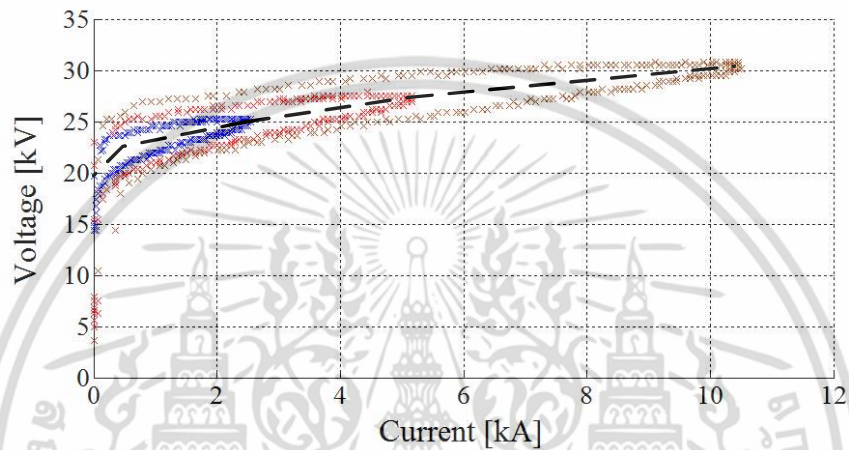
$$i_2 = U_2$$

$$U_2 = U_0 + \sum_{k=1}^N U_k \sin(k\omega t + \alpha_k)$$

จากสมการ (2.10) เมื่อพิจารณาผลของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ใช้การประมาณค่าเชิงเส้นเป็นช่วงในการคำนวณหาค่าแรงดันคงเหลือ โดยเริ่มจากการเลือกจุดคู่อันดับระหว่างแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีวิธีเลือกจุดคู่อันดับดังนี้

การเลือกจุดคู่อันดับสำหรับการประมาณเชิงเส้นเป็นช่วง ทำได้โดยสร้างเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส (U-I Curve) โดยนำข้อมูลค่าแรงดันคงเหลือและกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ได้จาก

การทดสอบกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่าซึ่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ทดสอบขนาด 2.5 kA 5 kA และ 10 kA ดังรูปที่ 2.18 จากนั้นทำการเลือกจุดคู่อันดับบริเวณค่ายอดของกระแสอิมพัลส์ทั้ง 3 ระดับแล้วคำนวณหาเส้นตรงระหว่างจุดคู่อันดับแต่ละคู่ และเพิ่มจุดคู่อันดับในส่วนที่กระแสต่ำกว่า 2.5 kA อีก 2 จุด โดยจุดแรกคือจุดที่กระแสมีค่าประมาณ 1 mA ซึ่งเป็นจุดคู่อันดับของค่าแรงดัน MCOV และจุดที่สองคือจุดที่กระแสมีค่าประมาณ 200 A โดยในจุดนี้จะใช้เส้นตรงที่มีความชันเดียวกันกับเส้นตรงที่เชื่อมต่อกับจุดคู่อันดับ 2.5 kA และ 5 kA



รูปที่ 2.18 เส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันคงเหลือกับค่ากระแสอิมพัลส์

เมื่อพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานจะได้ค่า  $G_{11}$  และ  $i_1$  จากสมการที่ 2.10 ใหม่ดังนี้

$$G_{11} = \left( \frac{2C}{\Delta t} + \frac{1}{R_1} \right) + \frac{1}{R}$$

$$i_1 = \frac{2C}{\Delta t} U_1(t - \Delta t) + i_c(t - \Delta t) + \left( \frac{U_1(t - \Delta t) * U_{oc}}{R} \right)$$

เมื่อ  $R$  คือ ความชันของกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสในรูปที่ 2.16 ( $\Delta U / \Delta I$ )

$U_{oc}$  คือ จุดตัดแกน y ของกราฟในรูปที่ 2.16

ฉะนั้น ค่าแรงดัน  $U_1$  เมื่อพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$U_1 = \frac{i_1 - G_{12}U_2}{G_{11}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสรั่วไหลรวมของกับดักแรงดันเกินเมื่อพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$i_t = \frac{U_2 - U_1}{R_1} \quad (2.11)$$

ค่ากระแสความจุของกับดักแรงดันเกินเมื่อพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$i_c = \frac{2C}{\Delta t} U_1(t) - \frac{2C}{\Delta t} U_1(t - \Delta t) - i_c(t - \Delta t) \quad (2.12)$$

ฉะนั้น ค่ากระแสความต้านทานของกับดักแรงดันเกินเมื่อพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$i_R = i_t - i_c \quad (2.13)$$

ค่าสัญญาณแรงดัน สัญญาณกระแสรั่วไหลรวม สัญญาณกระแสความต้านทาน และสัญญาณกระแสความจุที่ได้จากการจำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแลบจะถูกนำไปเป็นค่าสัญญาณอ้างอิง

## 2.9 การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกิน

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น กระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินเป็นตัวชี้วัดที่ดีในการวิเคราะห์สถานะของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ ในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สาม มีหลายวิธีดังได้นำเสนอใน [10]-[11] ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณ  $i_{R3}$  ด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก (Current Orthogonal Method, COM) [6] เปรียบเทียบกับวิธีแบบดั้งเดิม 2 วิธี ได้แก่ วิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic Analysis Method, HAM) [7] วิธีชดเชยกระแสความจุ (Capacitive Current Compensation Method, CCCM) [8] รายละเอียดในการคำนวณของแต่ละวิธีแสดงดังต่อไปนี้

### 2.9.1 วิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

การคำนวณแอมพลิจูดฮาร์มอนิกลำดับ  $k$  ของกระแส  $i_R$  ด้วยวิธี HAM จะคำนวณบนพื้นฐานการแปลงฟังก์ชันเวลาของแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมให้เป็นฟังก์ชันของความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast fourier transform, FFT) การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic analysis method, HAM) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการสัญญาณแรงดันและกระแสรีโวลรวมของกับกับดักแรงดันเกินแสดงดังสมการ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ

$$U(t) = U_0 + \sum_{k=1}^N U_k \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (2.14)$$

$$i(t) = i_0 + \sum_{k=1}^N i_k \sin(k\omega t + \beta_k) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $U_0$  คือ องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (d.c. component) ของแรงดัน  $i_0$  คือ องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงของกระแสรีโวลรวม  $U_k$  คือ แอมพลิจูดของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับ  $k$   $i_k$  คือ แอมพลิจูดของกระแสรีโวลรวมฮาร์โมนิกลำดับ  $k$   $\alpha_k$  คือ มุมเฟสของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับ  $k$   $\beta_k$  คือ มุมเฟสของกระแสรีโวลรวมฮาร์โมนิกลำดับ  $k$  และ  $k$  คือ จำนวนเต็ม มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $N$

กระแสรีโวลรวมของกับดักแรงดันเกินสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$i_t(t) = i_c(t) + i_r(t) \quad (2.16)$$

ค่ากระแสความจุของกับดักแรงดันเกินสามารถคำนวณได้จาก

$$i_c(t) = C \frac{dU(t)}{dt} = \sum_{k=1}^N i_{ck} \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $i_{ck} = k\omega C U_k$ .

กำหนดให้มุมเฟสของแรงดันฮาร์โมนิกที่  $k$  เท่ากับมุมเฟสของกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่  $k$  ดังนั้น สามารถคำนวณกระแสความต้านทานได้ดังนี้

$$i_r(t) = i_0 + \sum_{k=1}^N i_{rk} \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (2.18)$$

เมื่อ  $i_{rk}$  คือ กระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่  $k$  ของกับดักแรงดันเกิน

แทนสมการ (2.17) และ (2.18) ใน (2.16) จะได้สมการกระแสรีโวลรวมใหม่ดังนี้

$$i_t(t) = i_0 + \sum_{k=1}^N i_{ck} \cos(k\omega t + \alpha_k) + \sum_{k=1}^N i_{rk} \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

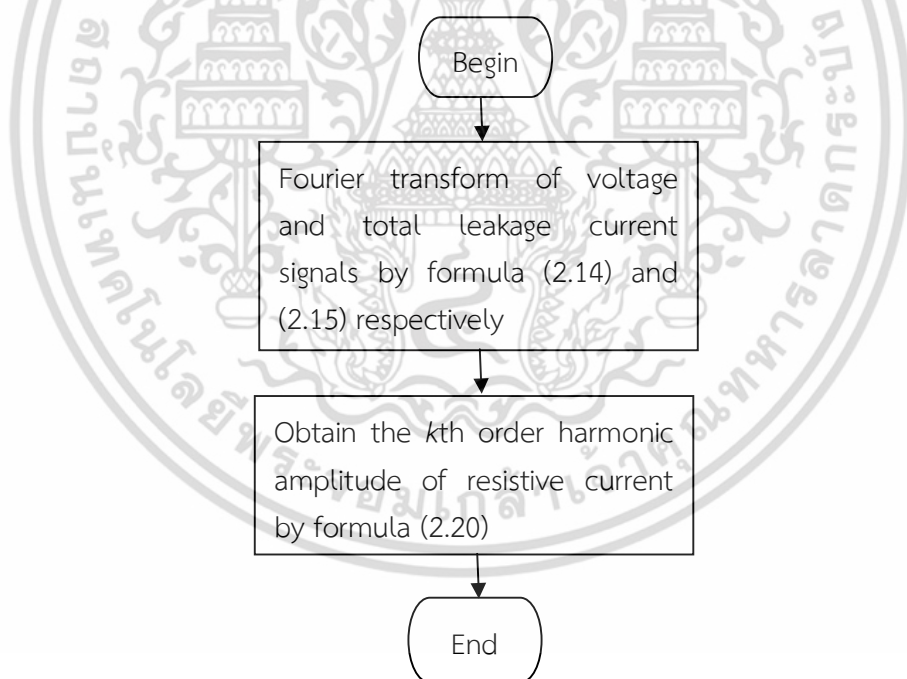
จากคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก “อินทิกรัลของผลคูณของฟังก์ชันตรีโกณมิติ 2 ฟังก์ชันในช่วงเวลา 1 คาบ มีค่าเท่ากับศูนย์” ดังนั้น เมื่อคูณทั้ง 2 ข้างของสมการ (2.19) ด้วย  $\sin(k\omega t + \alpha_k)$  แล้วคำนวณหาอินทิกรัลทั้งสองข้างสมการในช่วงเวลา 1 คาบ จะได้สมการสำหรับคำนวณแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่  $k$  ดังนี้

$$i_{Rk} = i_k (\cos \beta_k \cos \alpha_k + \sin \beta_k \sin \alpha_k) \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกัน คูณทั้ง 2 ข้างของสมการ (2.19) ด้วย  $\cos(k\omega t + \alpha_k)$  จะได้สมการสำหรับคำนวณแอมพลิจูดของกระแสรั่วไหลรวมผ่านความจุฮาร์มอนิกลำดับ  $k$  ดังนี้

$$i_{Ck} = i_k (\sin \beta_k \cos \alpha_k + \cos \beta_k \sin \alpha_k) \quad (2.21)$$

แผนผังการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินด้วยวิธี HAM โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แผนผังการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธี HAM

การคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี HAM จะแม่นยำในกรณีที่มุมเฟสของแรงดันเท่ากับมุมเฟสของกระแสความต้านทาน ซึ่งกับดักแรงดันเกินนั้นจะต้องประกอบด้วยความต้านทานแบบเชิงเส้น แต่เนื่องจากกับดักแรงดันเกินที่ใช้งานในปัจจุบันประกอบด้วยความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าวิธีนี้แม่นยำมากเพียงพอให้นำมาใช้ตรวจสอบความเสถียรภาพของกับดักแรงดันเกิน

### 2.9.2 วิธีชดเชยกระแสความจุของกับดักแรงดันเกิน

วิธีการชดเชยกระแสความจุเป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้ในการแยกกระแสความต้านทานออกจากกระแสรั่วไหลรวมของกับดักแรงดันเกิน การคำนวณกระแสความต้านทานด้วยวิธี CCCM เป็นการใช้สัญญาณแรงดันชดเชยองค์ประกอบกระแสความจุ หลักการคำนวณของวิธีนี้อยู่บนพื้นฐานการตั้งฉากกันระหว่างกระแส  $i_R$  กับกระแส  $i_C$  โดยที่สามารถคำนวณกระแสความต้านทาน ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$i_R(t) = i_t(t) - i_C(t) \quad (2.22)$$

ถ้าแรงดันที่จ่ายให้กับกับดักแรงดันเกินเป็นรูปคลื่นไซน์ องค์ประกอบของกระแสความจุในสมการที่ (2.22) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$i_C(t) = GU_{s0} \quad (2.23)$$

เมื่อ แรงดัน  $U_{s0}$  มีเฟส 90 องศา และ  $G = \omega C$

ถ้ากระแสความต้านทานตั้งฉากกับกระแสความจุ อินทิกรัลของผลคูณระหว่างกระแสทั้งสองมีค่าเท่ากับศูนย์ มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\int_0^{2\pi} i_C i_R d\omega t = 0 \quad (2.24)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.22) และ (2.23) ลงใน (2.24) จะได้สมการอินทิกรัลระหว่างผลคูณของกระแส  $i_R$  และ  $i_C$  ใหม่ดังนี้

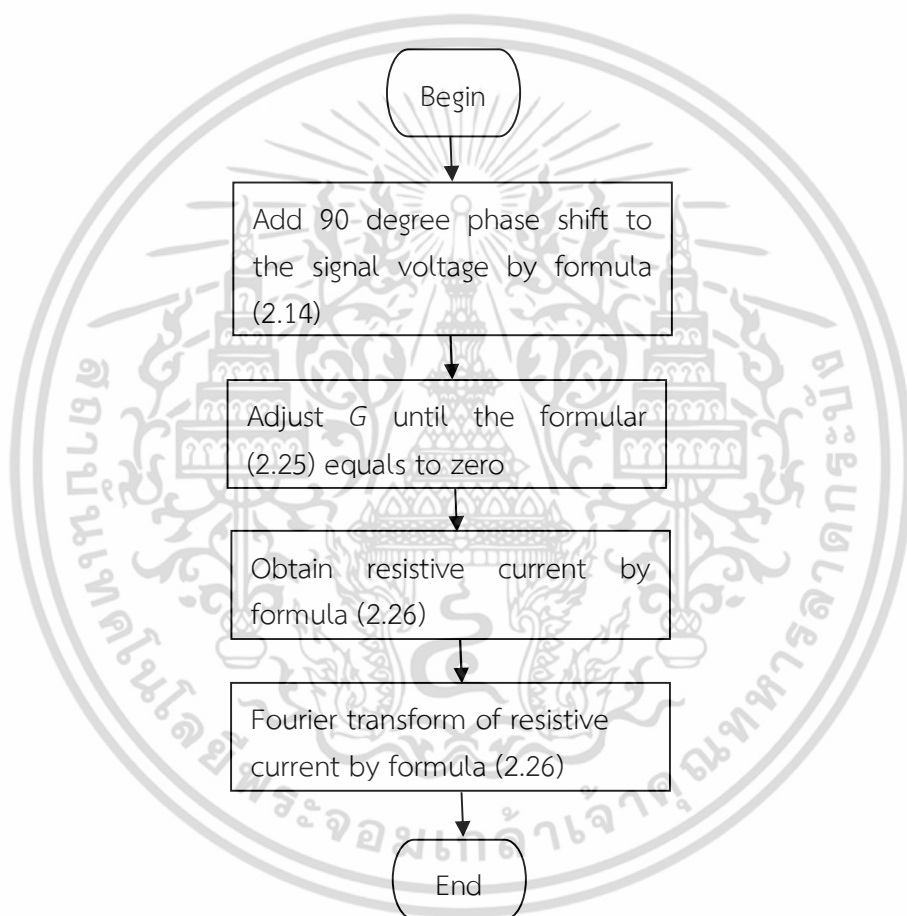
$$\int_0^{2\pi} U_{s0}(t)(i_t(t) - GU_{s0}(t))dt = 0 \quad (2.25)$$

เมื่อ  $G$  คือ เกนขยาย (amplifier gain)

การชดเชยกระแสความจุจะสมบูรณ์ได้โดยการปรับค่าเกน  $G$  ให้อินทิกรัลของสมการ 2.25 มีค่าเท่ากับ ศูนย์ เมื่อการชดเชยกระแสความจุสมบูรณ์ จากสมการที่ (2.22) สามารถเขียนสมการคำนวณกระแสความต้านทาน ใหม่ได้ดังนี้

$$i_R(t) = i_t(t) - GU_{s0}(t) \quad (2.26)$$

แผนผังการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินด้วยวิธี CCCM โดยใช้โปรแกรมแมทแลบ แสดงดังรูปที่ (2.20)



รูปที่ 2.20 แผนผังการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธี CCCM

ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ถ้าป้อนแรงดันที่ไม่ทราบค่าให้กับกับดักแรงดันเกิน จะทำให้ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่ามุมระหว่างกระแสความต้านทานและกระแสความจุตั้งฉากกัน นอกจากนี้ ถ้ามีฮาร์มอนิกในแหล่งจ่ายแรงดันที่ป้อนให้กับกับดักแรงดันเกินจะทำให้ผลการคำนวณที่ได้คลาดเคลื่อน

### 2.9.3 วิธีกระแสตั้งฉาก

การคำนวณกระแสความต้านทานด้วยวิธี COM จะอาศัยหลักการที่กระแส  $i_R(t)$  ตั้งฉากกับกระแส  $i_C(t)$  วิธีนี้สามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้า  $C$  ของกัปดักแรงดันเกินได้อย่างแม่นยำ ซึ่งค่ากระแส  $i_R(t)$  คำนวณได้จากผลต่างระหว่างกระแส  $i(t)$  กับกระแส  $i_C(t)$  โดยที่กระแส  $i_C(t)$  คำนวณได้จากผลคูณของความจุไฟฟ้า (Capacitance,  $C$ ) กับอนุพันธ์ของฟังก์ชันแรงดัน ( $du(t)/dt$ ) รายละเอียดการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM มีดังต่อไปนี้

เมื่ออนุพันธ์ของฟังก์ชันแรงดันเท่ากับกระแสความจุเมื่อแรงดันถูกจ่ายไปยังตัวเก็บประจุ  $C$  มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$i_C^*(t) = \frac{du(t)}{dt} = \frac{i_C(t)}{C} \quad (2.27)$$

จากสมการกระแสความจุ (2.17) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$i_C(t) = C i_C^*(t) \quad (2.28)$$

อินทิกรัลของผลคูณของกระแสรั่วไหลรวม  $i(t)$  และกระแส  $i_C^*(t)$  ใน 1 คาบเวลา  $T$  ของแรงดันแสดงดังนี้

$$A = \int_0^T i_C^*(t) i(t) dt \quad (2.29)$$

แทนสมการ 2.16 และ 2.28 ใน 2.29 จะได้

$$A = \int_0^T i_C^*(t) (i_R(t) + C i_C^*(t)) dt = C \int_0^T i_C^*(t)^2 dt \quad (2.30)$$

เมื่อสมการ 2.29 = 2.30 จะได้สมการความจุไฟฟ้าจริงของกัปดักแรงดันเกินดังนี้

$$C = \frac{\int_0^T i_C^*(t) i(t) dt}{\int_0^T i_C^*(t)^2 dt} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $i_C^*(t)$  เท่ากับ อนุพันธ์ของฟังก์ชันแรงดันในสมการ 2.14 จะได้

$$i_C^*(t) = \sum_{k=1}^N k\omega U_k \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

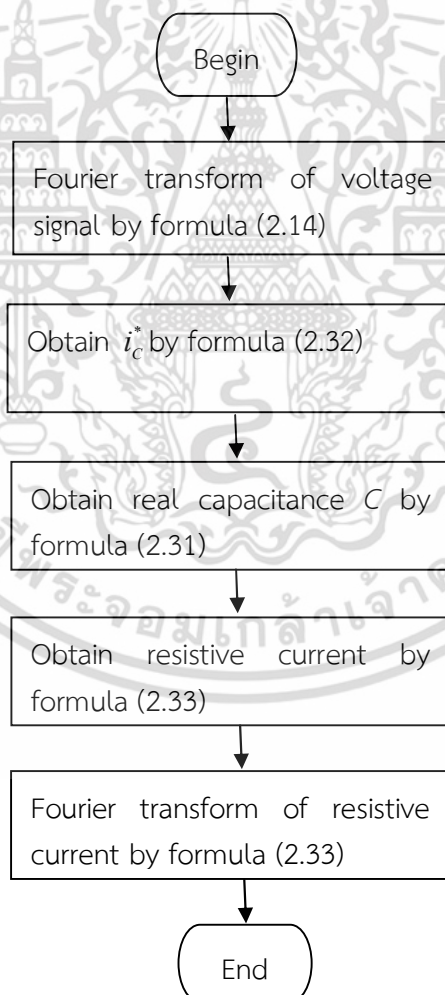
ค่า  $U_k$  และ  $\alpha_k$  จะได้จากการคำนวณ FFT ของสมการ 2.14 จากนั้นสามารถคำนวณค่า  $C$  ได้โดยตรงด้วย 2.31 เพราะในทางปฏิบัติจะทราบค่าของสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวม  $i(t)$  จากการวัด

ฉะนั้น กระแสความต้านทานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$i_R(t) = i(t) - Ci_c^*(t) \quad (2.33)$$

ค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินสามารถคำนวณได้ โดยแปลง FFT ของสมการ (2.33)

แผนผังการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินด้วยวิธี COM โดยใช้โปรแกรมแมทแลบ แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แผนผังการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธี COM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 การประเมินความเสี่ยงและกลยุทธ์ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของก๊าดักแรงดันเกิน

สำหรับก๊าดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ การประเมินความเสี่ยงที่ดีที่สุดเ็นทางปฏิบัติอยู่บนพื้นฐานของแนวโน้มและระดับกระแสความต้านทานที่สภาวะมาตรฐานอ้างอิง โดยค่ากระแสความต้านทานควรมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนด (Threshold value) ซึ่งค่าที่กำหนดสำหรับกระแสความต้านทานของก๊าดักแรงดันเกินแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันดังนี้

1) บริษัทผู้ผลิตกำหนดข้อมูลที่เรียกว่า ระดับค่าสูงสุดของกระแสความต้านทาน ที่แนะนำ (Maximum recommended levels) สำหรับแรงดันเกินแต่ละชนิด ถ้าทราบระดับค่าสูงสุดของกระแสความต้านทานที่แนะนำ สามารถเปรียบเทียบค่ากระแสความต้านทานที่วัดได้โดยตรง โดยที่ระดับค่าสูงสุดของกระแสความต้านทานที่แนะนำจะมีค่าอยู่ในช่วง 100-500  $\mu\text{A}$  ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าดักแรงดันเกิน

2) ถ้าหากบริษัทผู้ผลิตไม่ได้กำหนดค่ากระแสความต้านทานสูงสุดที่แนะนำมาในคู่มือการประเมินความเสี่ยงหรือค่ากำหนดสำหรับก๊าดักแรงดันเกินสามารถกำหนดได้จากการทดลองโดยวัดค่ากระแสความต้านทานของก๊าดักแรงดันเกินตัวที่เพิ่งซื้อใหม่ใช้ค่านีเ็นค่าอ้างอิง ถ้าหลังจากการใช้งาน ค่ากระแสความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น 3-4 เท่าของค่าอ้างอิง บ่งบอกถึงความเสี่ยงสภาพของก๊าดักแรงดันเกิน

### บทที่ 3

## การคำนวณกระแสความต้านทานของกับดักแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแลบและผลการคำนวณ

การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ด้วยโปรแกรมแมทแลบ สามารถคำนวณได้จากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมตามสมการที่ได้อธิบายในบทที่ 2 ฉะนั้น จำเป็นต้องจำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินเพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมอ้างอิง และสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมทั้ง 6 กรณีศึกษา การจำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินและผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1 การจำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแลบ

กับดักแรงดันเกินชนิดโหลหะออกไซด์ขนาด 9 kV 5kA จะถูกจำลองในสถานะที่กระแสความต้านทานนำกระแส โดยใช้แบบจำลองทางไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกิน ดังรูปที่ 2.17 ด้วยโปรแกรมแมทแลบ ตามรายละเอียดที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.8 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น (Defaulted parameters) ของแบบจำลองมีดังนี้

- (1) ค่ายอดแรงดันมูลฐาน (fundamental voltage amplitude) เท่ากับ 12.73 kV มีมุมเฟสเท่ากับ 0 เรเดียน
- (2) ค่าความจุไฟฟ้า C เท่ากับ 57 pF
- (3) ค่าความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) เท่ากับ 50 Hz
- (4) ค่าความต้านทานชั้นที่ เท่ากับ 0.05 โอห์ม
- (5) ค่าแรงดันและกระแสของกับดักแรงดันเกิน [9] มีค่าดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าแรงดันและกระแสของกับดักแรงดันเกิน

แรงดัน $V_p$ (kV)	กระแส $I_R$ (mA)
10.4	0.059
11.7	0.089
12.9	0.158
14.2	0.362
15.4	1.40
16.3	4.10

อัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling rate) เท่ากับ 50 kHz และความยาวของสัญญาณข้อมูลเท่ากับ 1000 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองการทำงานของกับดักแรงดันเกินทั้ง 6 กรณีศึกษาด้วยโปรแกรมแมทแลบจะได้

- (1) รูปคลื่นสัญญาณแรงดันอ้างอิง  $u_R(t)$
- (2) รูปคลื่นสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมอ้างอิง  $i_{rR}(t)$
- (3) รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุอ้างอิง  $i_{CR}(t)$
- (4) และรูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานอ้างอิง  $i_{RR}(t)$

ค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทาน ฮาร์มอนิกที่สามอ้างอิงคำนวณโดยการแปลง FFT ของสัญญาณกระแส  $i_{rR}(t)$  โดยจะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิง ( $I_{R3R}$ ) เปรียบเทียบกับค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามที่คำนวณได้ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM

### 3.2 ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินจากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการจำลอง

ในทางปฏิบัติ ระบบการวัดจะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนทั้งภายในและภายนอกระบบ นอกจากนี้อาจยังได้รับผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิก ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงศึกษาผลกระทบต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สาม โดยนำรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการจำลองในหัวข้อที่ 3.1 มาคำนวณหาความต้านทานกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

- (1) ผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทางความถี่
- (2) ผลกระทบจากฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของแรงดัน
- (3) ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อแรงดัน
- (4) ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม
- (5) ผลกระทบจากฮาร์มอนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม
- (6) ผลกระทบจากอัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling rate)

จากนั้น เปรียบเทียบผลการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM กับค่าอ้างอิง ดังนี้

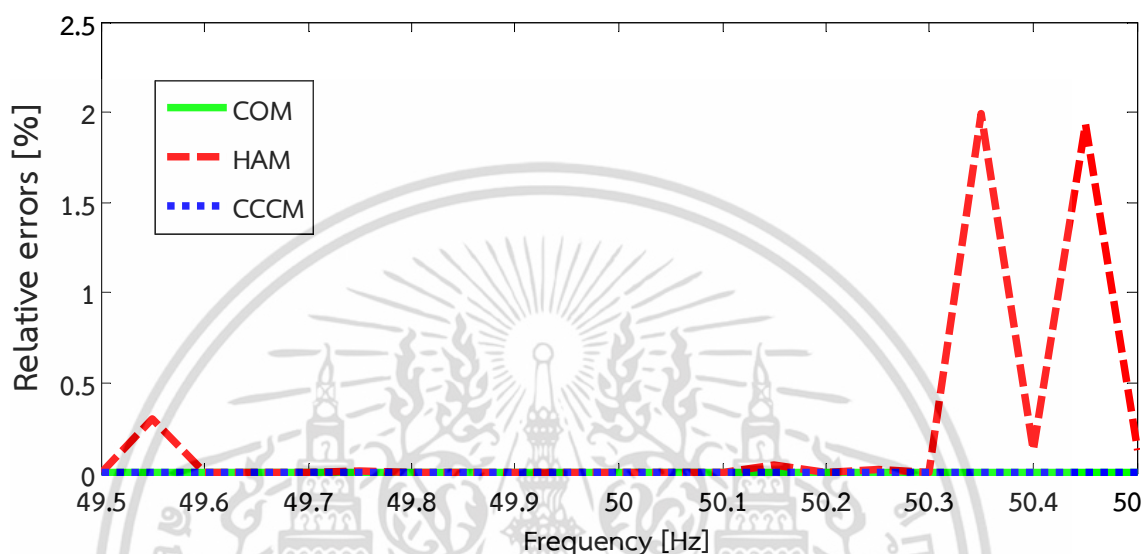
$$\text{ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ [\%]} = \frac{I_{R3R} - I_{R3}}{I_{R3R}} \times 100 \quad (3.1)$$

#### 3.2.1 ผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทางความถี่

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้กำหนดเกณฑ์ของความถี่ของไฟฟ้าในระบบที่สภาวะการทำงานปกติให้มีค่าไม่เกิน 50 Hz $\pm$ 0.5 Hz [12] ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบในการ

ค่านวณ  $I_{R3}$  เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงในช่วง 49.5 Hz ถึง 50.5 Hz กำหนดให้ ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์อื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลง

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อความถี่เบี่ยงเบนไปจากความถี่มูลฐาน  $\pm 0.5$  Hz แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินต่อความถี่

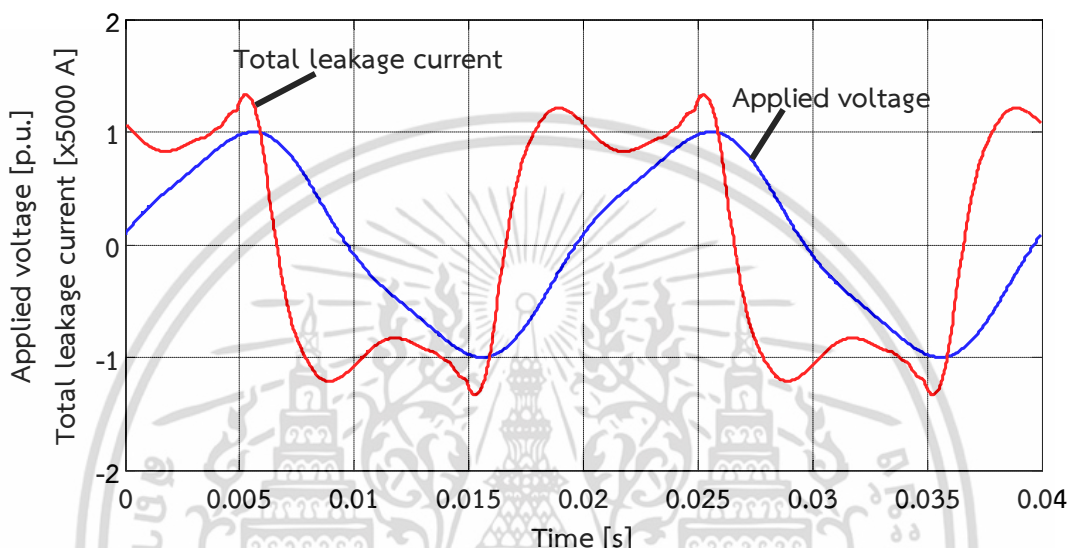
จากรูปที่ 3.1 สรุปได้ว่า เมื่อความถี่เบี่ยงเบนไปจากความถี่มูลฐาน  $\pm 0.5$  Hz ค่าของความถี่ที่เบี่ยงเบนไปส่งผลต่อการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM และ CCCM น้อยมาก ซึ่งวิธี CCCM มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในการคำนวณ  $I_{R3}$  ใกล้เคียงกับวิธี COM โดยทั้ง 2 วิธี มีค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$  ประมาณ 0 % สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี HAM จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 2% โดยจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 50.35 Hz

### 3.2.2 ผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกที่สาม

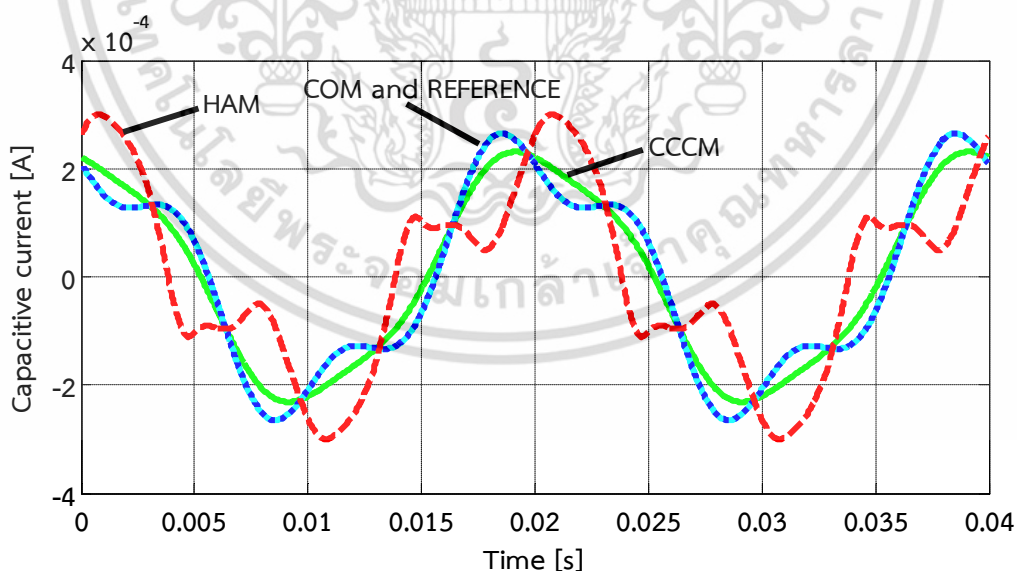
แอมพลิจูดฮาร์มอนิกลำดับ  $k$  ของกระแสความต้านทานของกับดักแรงดันเกินขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดและมุมเฟสของฮาร์มอนิกลำดับ  $k$  ของแรงดัน โดยเฉพาะฮาร์มอนิกลำดับที่สามของแรงดันจะส่งผลต่อค่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแส  $i_R$  ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบในการคำนวณ  $I_{R3}$  เมื่อในระบบมีอัตราส่วนของแอมพลิจูดแรงดัน ( $U_3/U_1$ ) ในช่วง 0 ถึง 0.1 ซึ่งในแต่ละอัตราส่วนแรงดัน มีมุมเฟสของ  $U_3$  แตกต่างจาก  $U_1$  โดยเริ่มจาก 0 เพิ่มขึ้นครึ่งละ  $\pi/6$  เรเดียน จนถึง  $2\pi$  เรเดียน รวมทั้งหมด 13 มุมเฟส ต่ออัตราส่วนแรงดัน กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของแบบจำลองพารามิเตอร์อื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลง

ค่า  $I_{R3}$  ในแต่ละอัตราส่วนแรงดันจะได้จากการคำนวณค่า  $I_{R3}$  ในแต่ละอัตราส่วนแรงดัน ทั้ง 13 มุมเฟส แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ผลการคำนวณน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

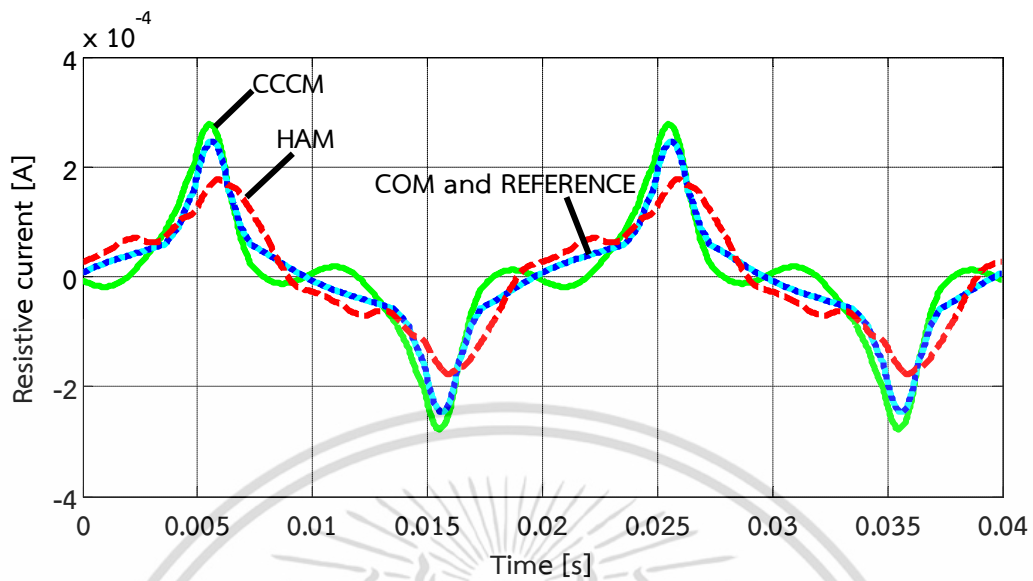
รูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่มีฮาร์มอนิกลำดับ 3 และสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมต่อเวลา รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา และรูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลาตามลำดับ



รูปที่ 3.2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่มีฮาร์มอนิกลำดับ 3 และสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมต่อเวลา



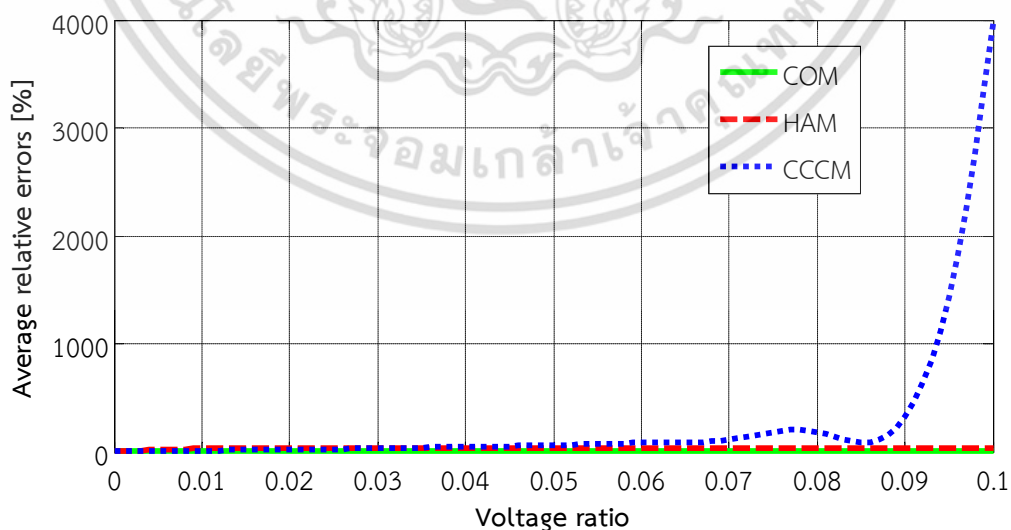
รูปที่ 3.3 รูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3)



รูปที่ 3.4 รูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3)

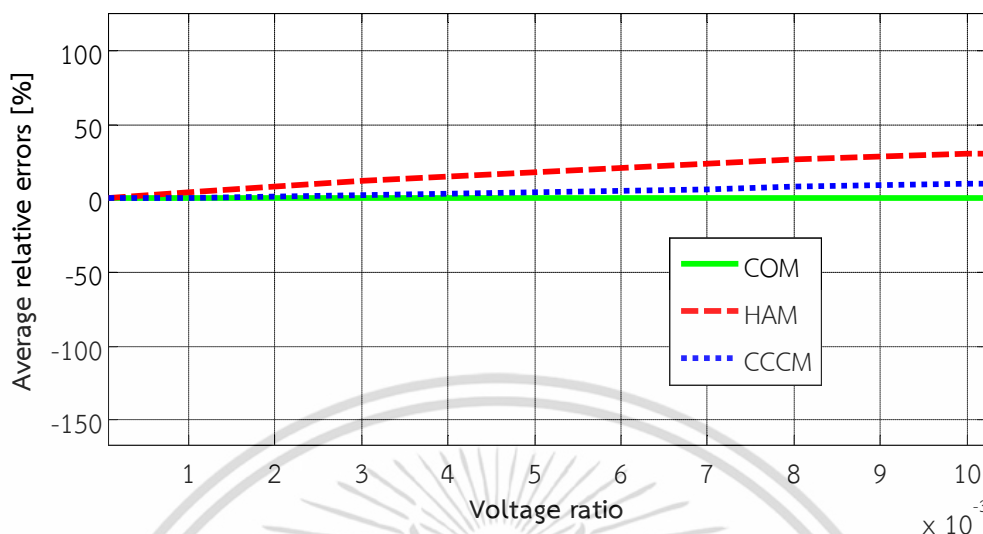
จากรูปที่ 3.3 และ 3.4 พบว่ารูปคลื่นกระแสความจุและกระแสความต้านทานที่คำนวณได้จากวิธี COM มีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง ในขณะที่รูปคลื่นกระแส  $i_R$  และ  $i_C$  ที่คำนวณได้จากวิธี CCCM และ HAM มีความคลาดเคลื่อนอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง โดยที่รูปคลื่น  $i_R$  ที่คำนวณได้จากวิธี CCCM จะมีค่ายอดสูงสุดเมื่อเทียบกับ 3 รูปคลื่นข้างต้น สำหรับรูปคลื่น  $i_R$  ที่คำนวณได้จากวิธี HAM จะมีค่ายอดต่ำสุดเมื่อเทียบกับ 3 วิธีข้างต้น

รูปที่ 3.5 และ 3.6 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยและภาพขยายค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดันจากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM



รูปที่ 3.5 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ )

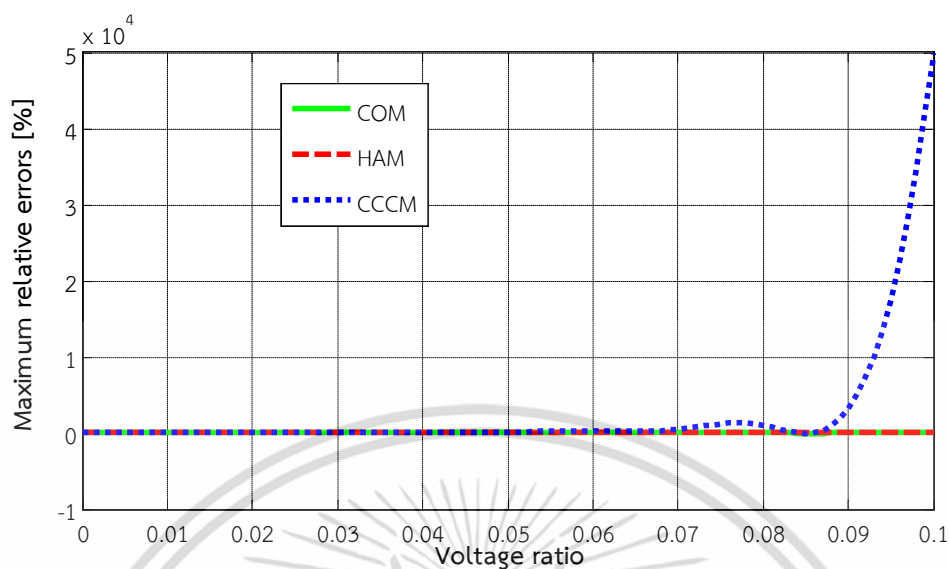
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



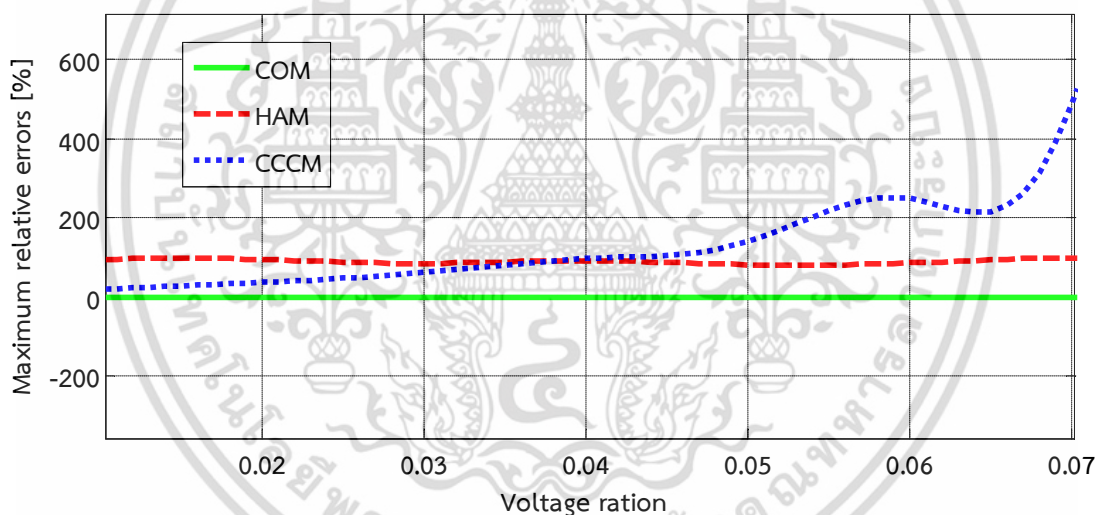
รูปที่ 3.6 ภาพขยายค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ )

จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี CCCM มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 – 4000% เมื่ออัตราส่วนแรงดัน  $U_3/U_1$  เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.1 สาเหตุของความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี CCCM เมื่ออัตราส่วนแรงดันเพิ่มขึ้นมาจากความไม่แน่นอนระหว่างมุมเฟสของฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของแรงดันและแรงดันมูลฐาน สำหรับวิธี HAM จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยคงที่ประมาณ 35% สาเหตุของความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี HAM มาจากความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานที่ใช้ทำกับดักแรงดันเกิน ทำให้มุมเฟสของแรงดันแตกต่างจากกระแสความต้านทาน ในแต่ละลำดับฮาร์มอนิก ในขณะที่วิธี COM จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยน้อยสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งมีค่าประมาณ 0 %

รูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดันจากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ )



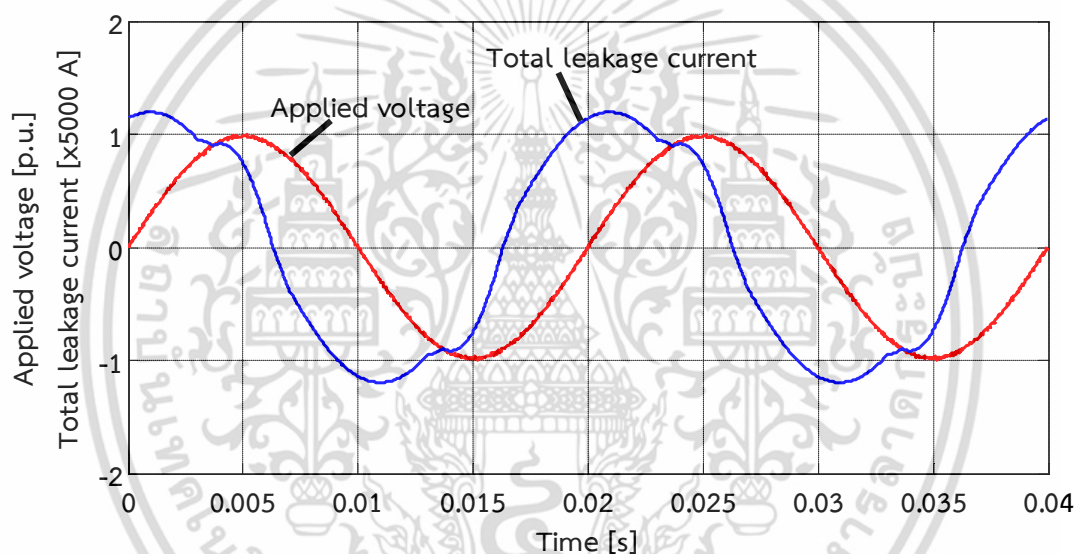
รูปที่ 3.8 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดัน ( $U_3/U_1$ )

จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี CCCM มีค่าเพิ่มขึ้น 20 – 5000% เมื่ออัตราส่วนแรงดัน  $U_3/U_1$  เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.1 สำหรับวิธี HAM จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดคงที่ประมาณ 95% ในขณะที่วิธี COM จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดน้อยสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งมีค่าประมาณ 0 % จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนแรงดันเพิ่มขึ้นจาก 0 – 0.1 และความไม่แน่นอนของเฟสในแต่ละอัตราส่วนแรงดัน ไม่ส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM

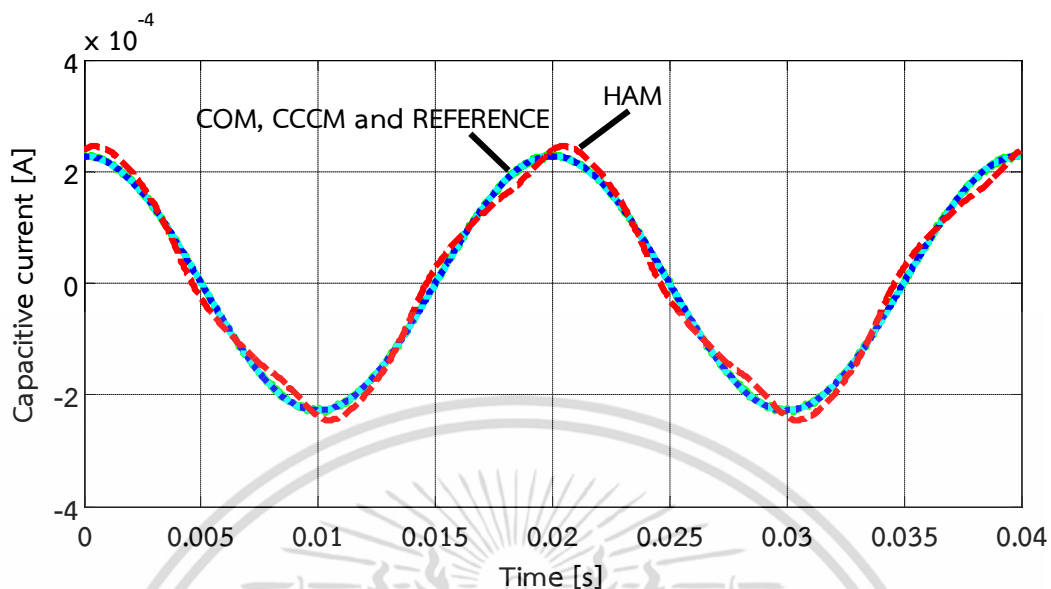
### 3.2.3 ผลกระทบสัญญาณรบกวนต่อแรงดันไฟฟ้า

ในระบบการวัดทุกระบบจะมีสัญญาณที่ไม่ต้องการเข้ามารบกวน อย่างเช่น สัญญาณรบกวนจากเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณรบกวนจากธรรมชาติ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น ฉะนั้นเพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนต่อระบบแรงดันใช้งานในการคำนวณ  $I_{R3}$  จึงเพิ่มสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (Additive white Gaussian noise, AWGN) เข้าไปให้กับสัญญาณแรงดัน โดยมีอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่ต้องการต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise Ratio, SNR) ที่เข้ามาในระบบอยู่ในช่วง 40 ถึง 50 dB กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นอื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลง

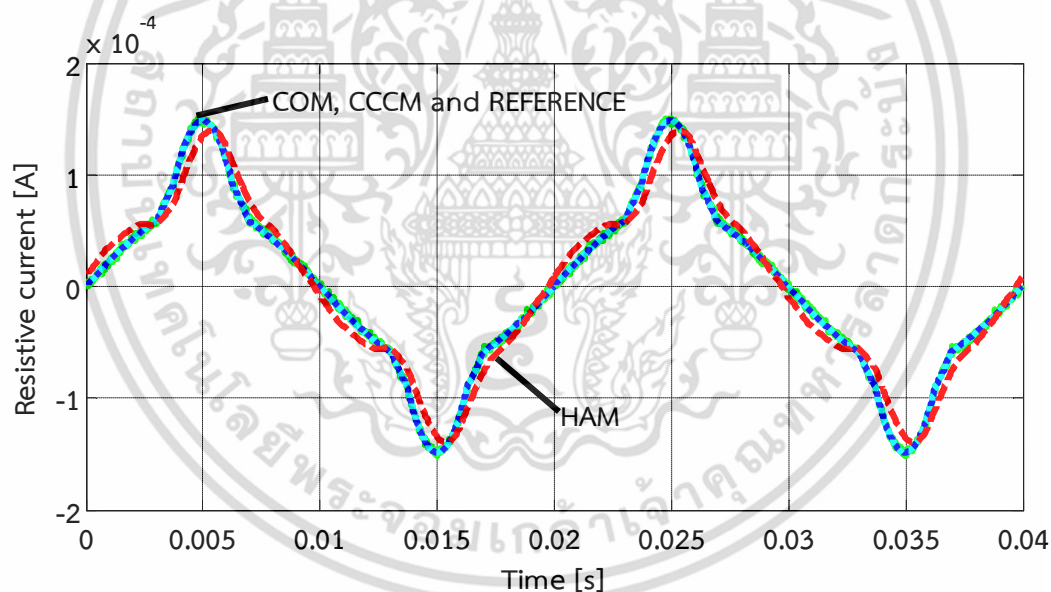
รูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่มีสัญญาณรบกวนและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมต่อเวลา รูปที่ 3.10 แสดงรูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา และรูปที่ 3.11 แสดงรูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลาตามลำดับ



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่มีสัญญาณรบกวนและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมต่อเวลา



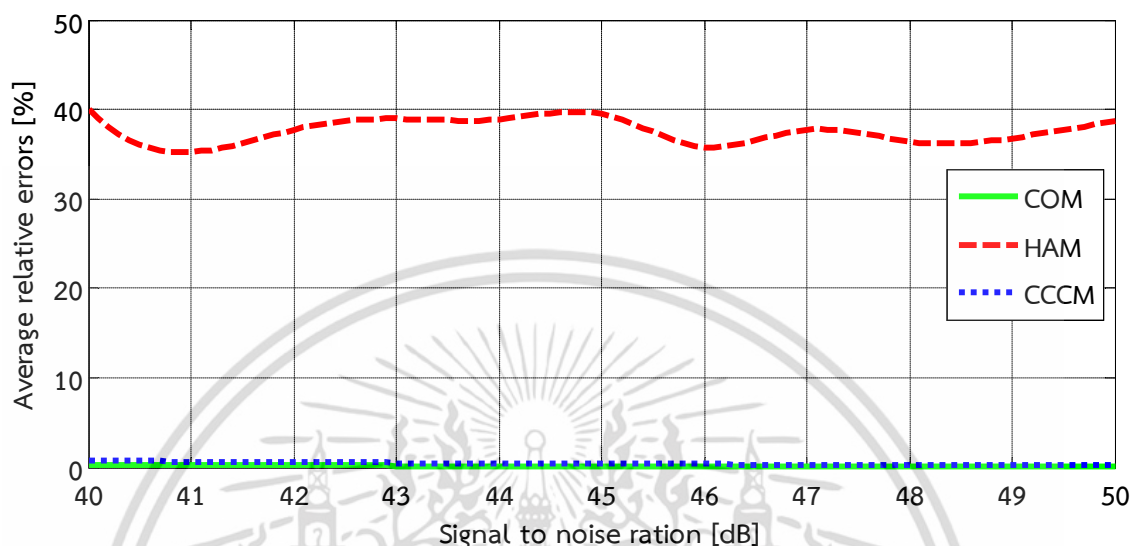
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านความจุต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีสัญญาณรบกวน)



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีสัญญาณรบกวน)

จากรูปที่ 3.10 และ 3.11 พบว่ารูปคลื่นกระแสไหลผ่านความจุ ( $i_C$ ) และกระแสความต้านทาน ( $i_R$ ) ที่คำนวณได้จากวิธี COM และวิธี CCCM มีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง ในขณะที่รูปคลื่นกระแส  $i_R$  และ  $i_C$  ที่คำนวณได้จากวิธี HAM มีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง โดยรูปคลื่น  $i_R$  ที่คำนวณได้จากวิธี HAM มีค่ายอดต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 รูปคลื่น

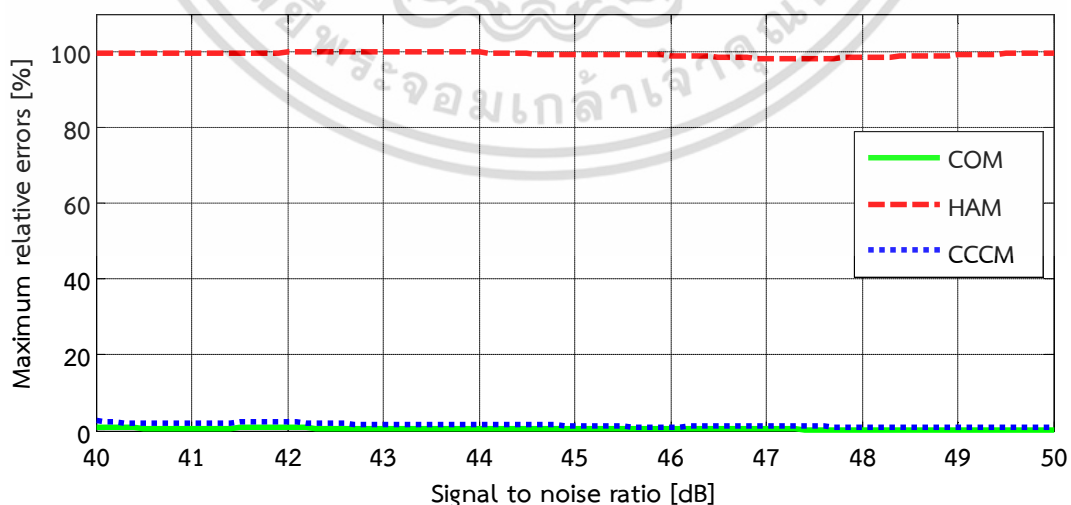
รูปที่ 3.12 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่อ SNR จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อแรงดันใช้งานมีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.12 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่อ SNR (เมื่อแรงดันมีสัญญาณรบกวน)

จากรูปที่ 3.12 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM และวิธี CCCM มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1% เมื่อสัญญาณแรงดันมีสัญญาณรบกวนที่มี SNR อยู่ในช่วง 40 ถึง 50dB ในขณะที่วิธี HAM มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีดังกล่าวข้างต้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 36-40 %

รูปที่ 3.13 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่อ SNR จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อแรงดันใช้งานมีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.13 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในการคำนวณ  $I_{R3}$  สูงสุดต่อ SNR (เมื่อแรงดันมีสัญญาณรบกวน)

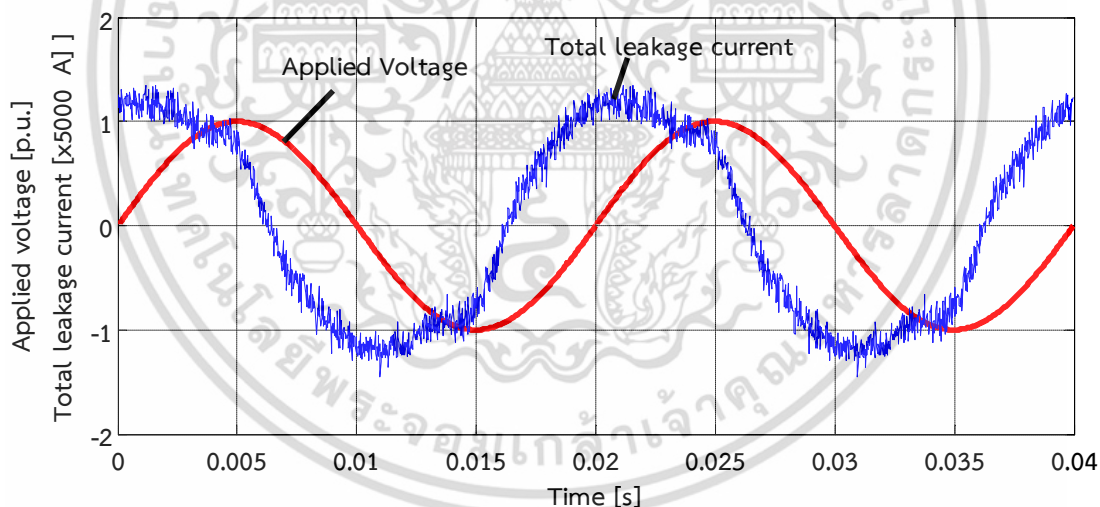
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM มีค่าน้อยกว่า 1% เมื่อสัญญาณแรงดันมีสัญญาณรบกวนที่มี SNR อยู่ในช่วง 40 ถึง 50dB ในขณะที่วิธี CCCM มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดลดลงจาก 3% ถึง 1% สำหรับวิธี HAM มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งมีค่าคงที่ประมาณ 100%

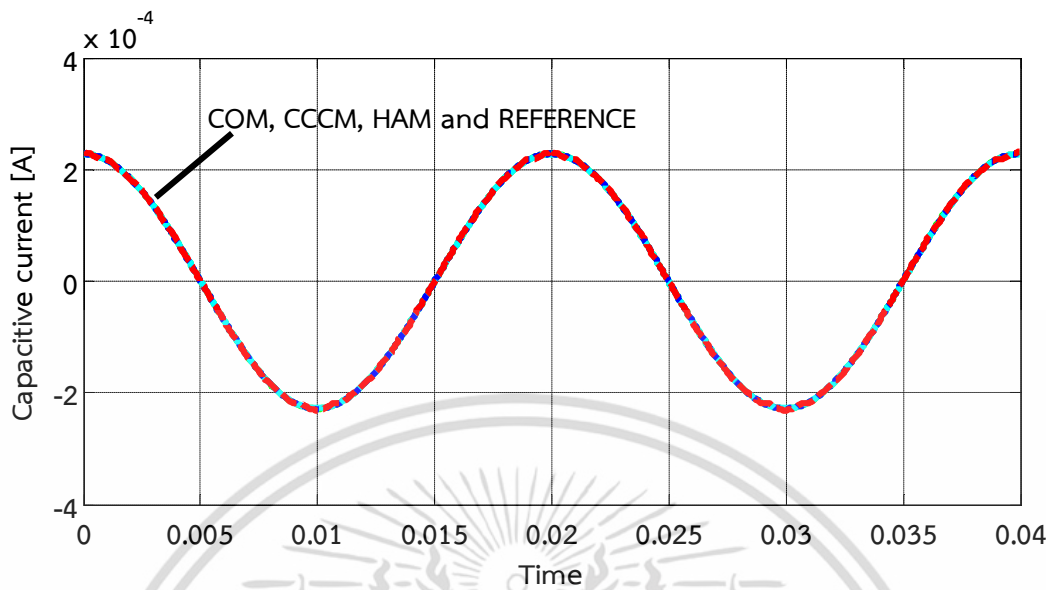
### 3.2.4 ผลกระทบสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม

ในทางปฏิบัติกระแสรั่วไหลรวมจะมีสัญญาณเข้ามารบกวนได้ง่ายกว่าแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากกระแสรั่วไหลรวมมีค่าต่ำในระดับมิลลิแอมป์ (mA) ซึ่งสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมในการศึกษาครั้งนี้เป็นสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนแบบบวกเช่นเดียวกับแรงดัน โดยจะมีอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่ต้องการต่อกำลังของสัญญาณรบกวน อยู่ในช่วง 20dB ถึง 50dB กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นอื่นๆไม่เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 3.14 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมที่มีสัญญาณรบกวนรบกวนต่อเวลา รูปที่ 3.15 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลผ่านความจุต่อเวลา และรูปที่ 3.16 และ 3.17 แสดงรูปคลื่นกระแสความต้านทานอ้างอิงกับที่คำนวณได้จากวิธี HAM วิธี CCCM และวิธี COM ตามลำดับ

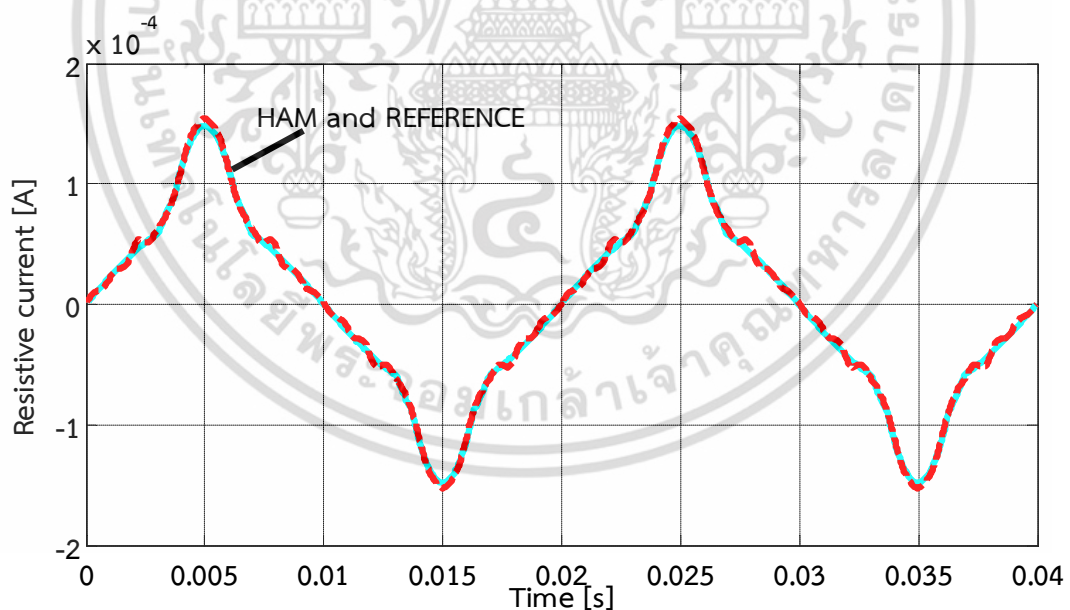


รูปที่ 3.14 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมที่มีสัญญาณรบกวนต่อเวลา



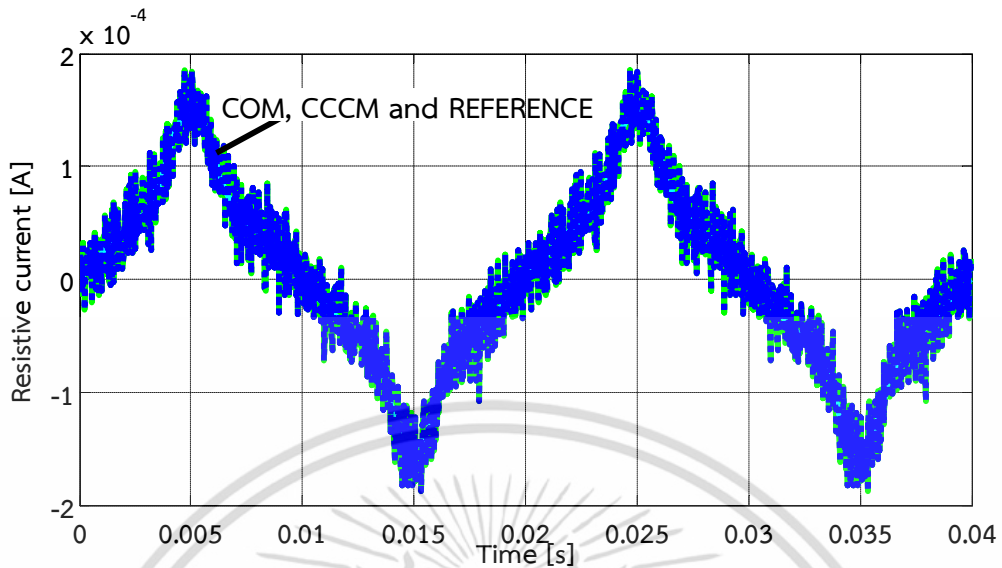
รูปที่ 3.15 รูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน)

จากรูปที่ 3.15 รูปคลื่นกระแสความจุที่คำนวณจากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM มีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นอ้างอิง



รูปที่ 3.16 รูปคลื่นกระแสความต้านทานอ้างอิงกับวิธี HAM ต่อเวลา (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน)

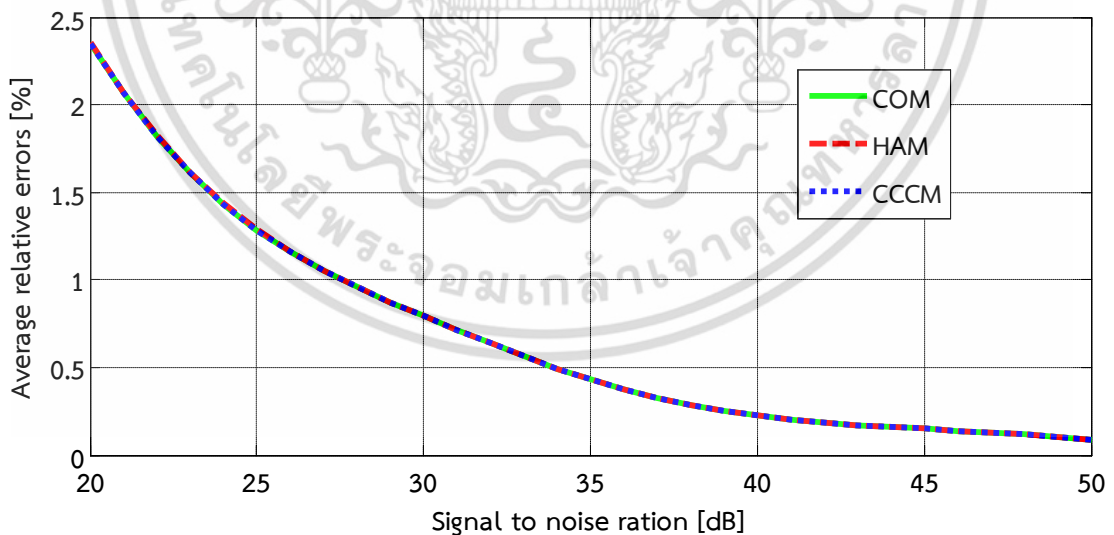
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นกระแสความต้านทานอ้างอิงกับวิธี COM และวิธี CCCM ต่อเวลา (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน)

จากรูปที่ 3.16 และ 3.17 รูปคลื่นกระแสความต้านทานที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM มีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง

รูปที่ 3.18 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่อ SNR จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน

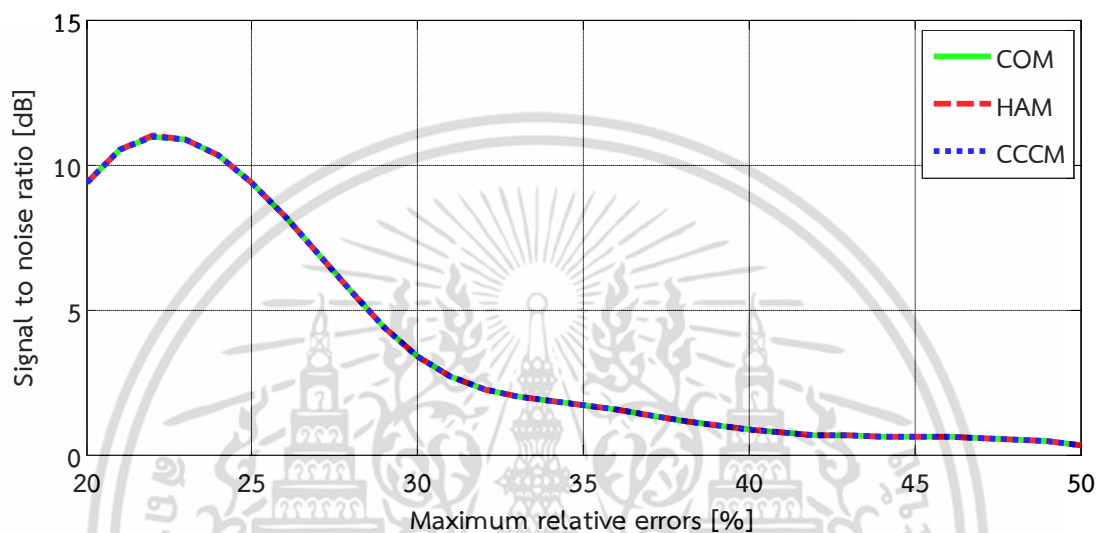


รูปที่ 3.18 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อ SNR (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.18 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีจะมีค่าลดลงจาก 2.4 % ถึง 0.1% เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวนที่มีค่า SNR เพิ่มขึ้นจาก 20dB ถึง 50dB

รูปที่ 3.19 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.19 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดต่อ SNR (เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน)

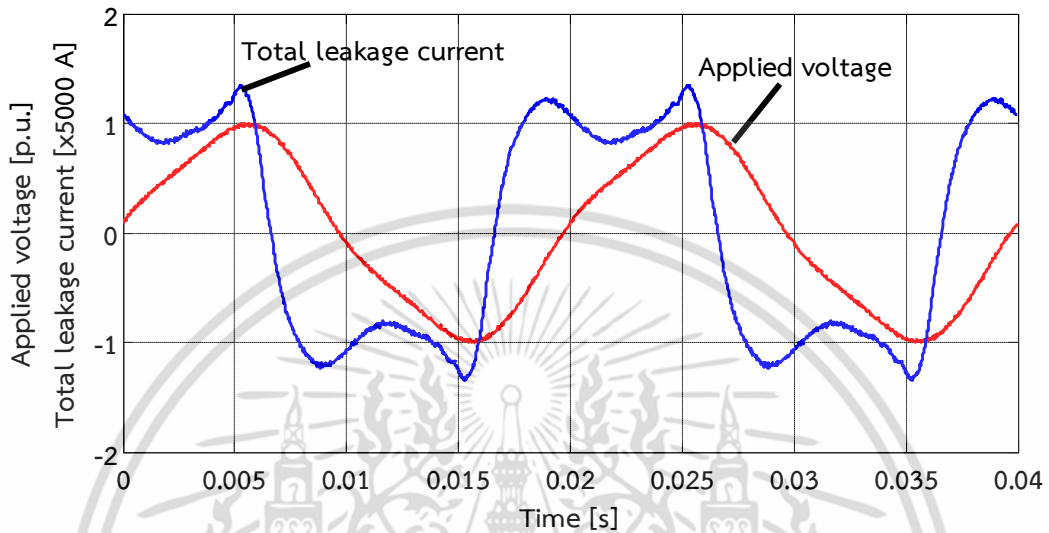
จากรูปที่ 3.19 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีจะมีค่าลดลงจาก 12% ถึง 0.2% เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวนที่มีค่า SNR เพิ่มขึ้นจาก 20dB ถึง 50dB

### 3.2.5 ผลกระทบแรงดันฮาร์มอนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและกระแสรั่วไหลรวม

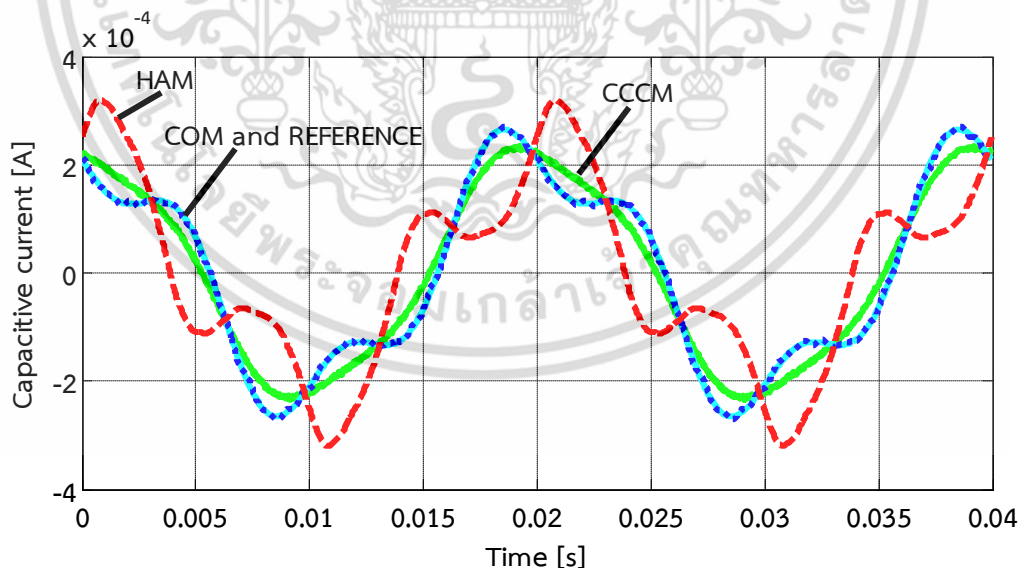
ในทางปฏิบัติ การวัดของสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมจะมีสัญญาณรบกวนต่างๆ นอกจากนี้ ในระบบยังมีแรงดันฮาร์มอนิกอีกด้วย ดังนั้น จึงได้ศึกษาผลกระทบของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมพร้อมกัน โดยมีอัตราส่วนของแอมพลิจูดแรงดัน ( $U_3/U_1$ ) ในช่วง 0 ถึง 0.1 ซึ่งในแต่ละอัตราส่วนแรงดัน มีมุมเฟสของ  $U_3$  แตกต่างจาก  $U_1$  โดยเริ่มจาก 0 เพิ่มขึ้นครั้งละ  $\pi/6$  เรเดียน จนถึง  $2\pi$  เรเดียน รวมทั้งหมด 13 มุมเฟสต่ออัตราส่วนแรงดัน และสัญญาณรบกวนต่อแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมี SNR เท่ากับ 40 dB กำหนดให้ ค่าเริ่มต้นของแบบจำลองพารามิเตอร์อื่นๆไม่เปลี่ยนแปลง

ค่า  $I_{R3}$  ในแต่ละอัตราส่วนแรงดันจะได้จากการคำนวณค่า  $I_{R3}$  ในแต่ละอัตราส่วนแรงดันทั้ง 13 มุมเฟสแล้วหาค่าเฉลี่ย

รูปที่ 3.20 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่มีฮาร์มอนิกลำดับ 3 แรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน ที่มี SNR เท่ากับ 40dB ต่อเวลา รูปที่ 3.21 แสดงรูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา รูปที่ 3.22 แสดงรูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลาตามลำดับ

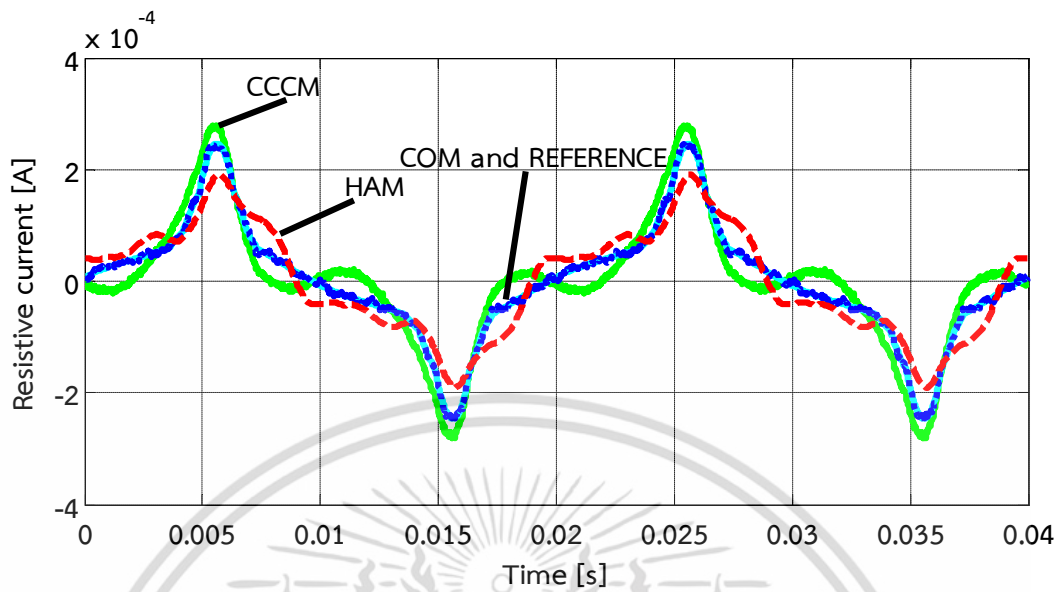


รูปที่ 3.20 รูปคลื่นแรงดันที่มีฮาร์มอนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB



รูปที่ 3.21 รูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา (เมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB)

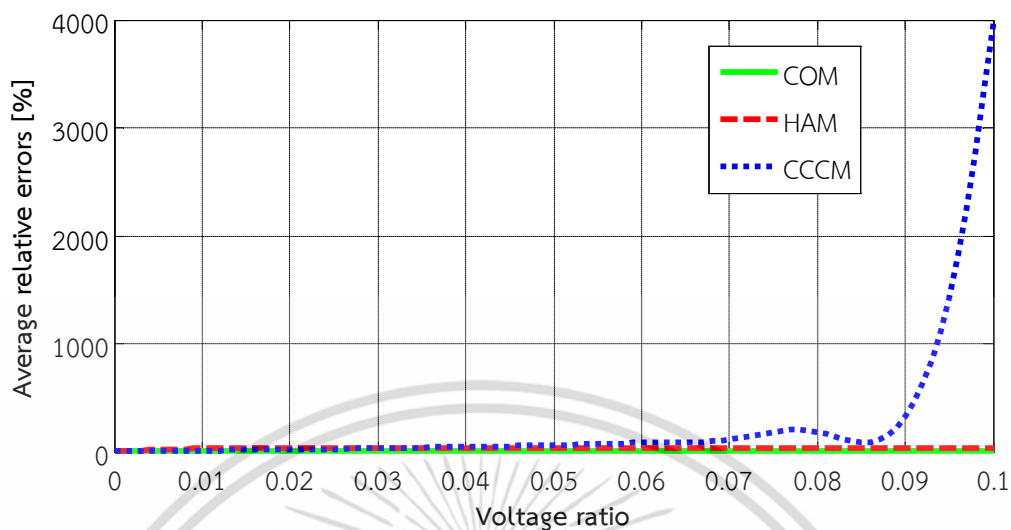
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



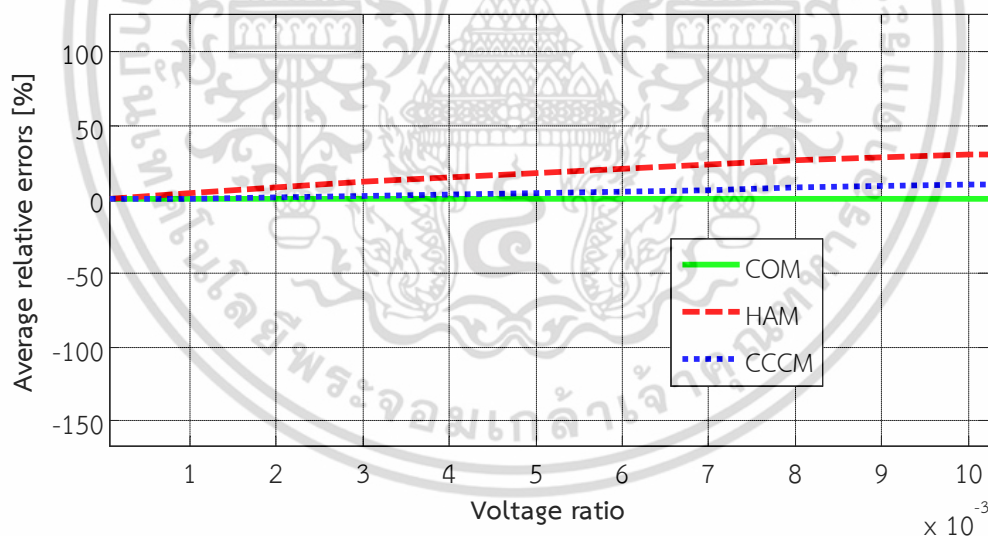
รูปที่ 3.22 รูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลา (เมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรบกวนที่มี SNR เท่ากับ 40dB)

จากรูปที่ 3.21 ถึง 3.22 พบว่ารูปคลื่นกระแสความจุ ( $i_C$ ) และกระแสความต้านทาน ( $i_R$ ) ที่คำนวณได้จากวิธี COM มีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง ในขณะที่รูปคลื่นกระแส  $i_R$  และ  $i_C$  ที่คำนวณได้จากวิธี CCCM และ HAM มีความคลาดเคลื่อนอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง

รูปที่ 3.23 และ 3.24 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยและภาพขยายค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $i_{R3}$  จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3 แรงดันและกระแสรบกวนมีสัญญาณรบกวนที่มี SNR เท่ากับ 40dB ตามลำดับ



รูปที่ 3.23 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดัน (เมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์โมนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB)

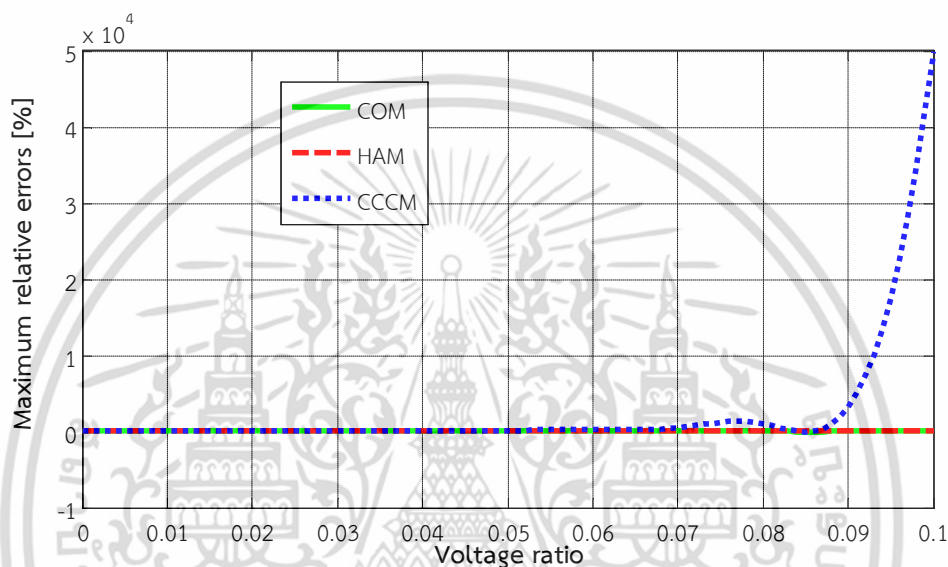


รูปที่ 3.24 ภาพขยายความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดัน (เมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์โมนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB)

จากรูปที่ 3.23 และ 3.24 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี CCCM มีค่าเพิ่มขึ้น 10 - 4000% เมื่ออัตราส่วนแรงดันเพิ่มขึ้นจาก 0 - 0.1 แรงดันและกระแส

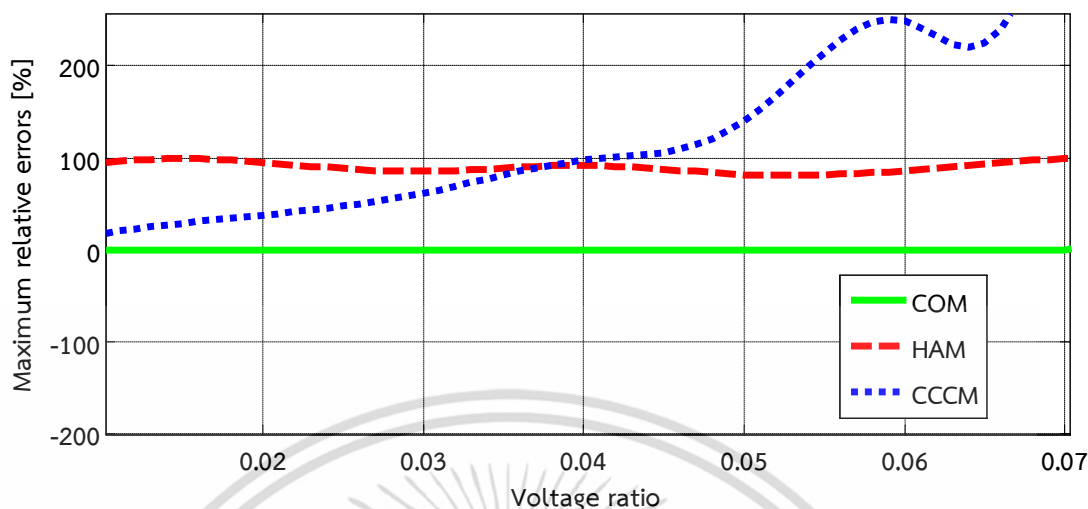
รั้วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน ที่มี SNR เท่ากับ 40 dB สำหรับวิธี HAM จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยคงที่ประมาณ 35% ในขณะที่วิธี COM จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยน้อยสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งมีค่าประมาณ 0 %

รูปที่ 3.25 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3 แรงดันและกระแสรั้วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน ที่มี SNR เท่ากับ 40 dB



รูปที่ 3.25 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดัน (เมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั้วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB)

รูปที่ 3.26 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดและภาพขยายค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3 แรงดันและกระแสรั้วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน ที่มี SNR เท่ากับ 40 dB



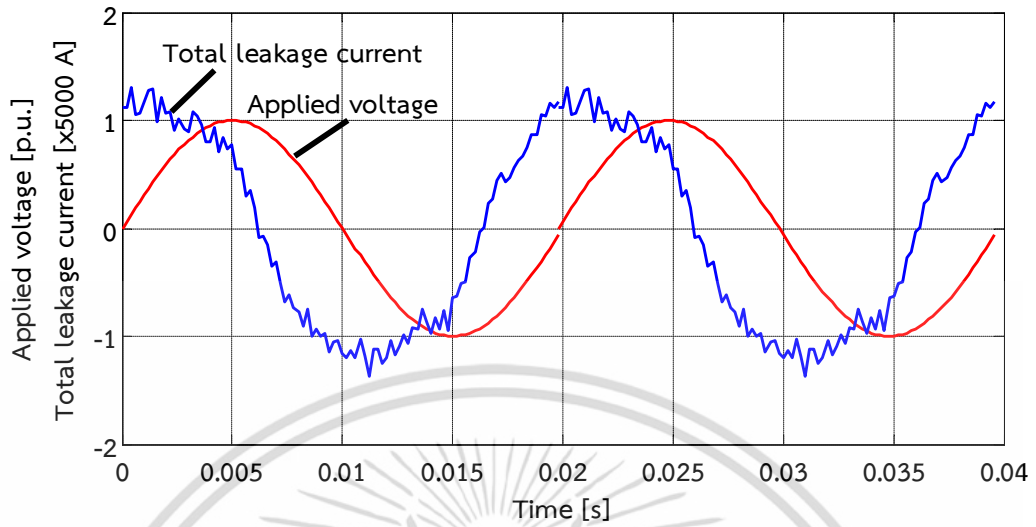
รูปที่ 3.26 ภาพขยายความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่ออัตราส่วนแรงดัน (เมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3 สัญญาณรบกวนต่อแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มี SNR เท่ากับ 40dB)

จากรูปที่ 3.25 และ 26 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี CCCM มีค่าเพิ่มขึ้น 20 – 5000% เมื่ออัตราส่วนแรงดันเพิ่มขึ้นจาก 0 – 0.1 แรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวน ที่มี SNR เท่ากับ 40 dB สำหรับวิธี HAM จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดคงที่ประมาณ 100% ในขณะที่วิธี COM จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดน้อยสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งมีค่าประมาณ 0 %

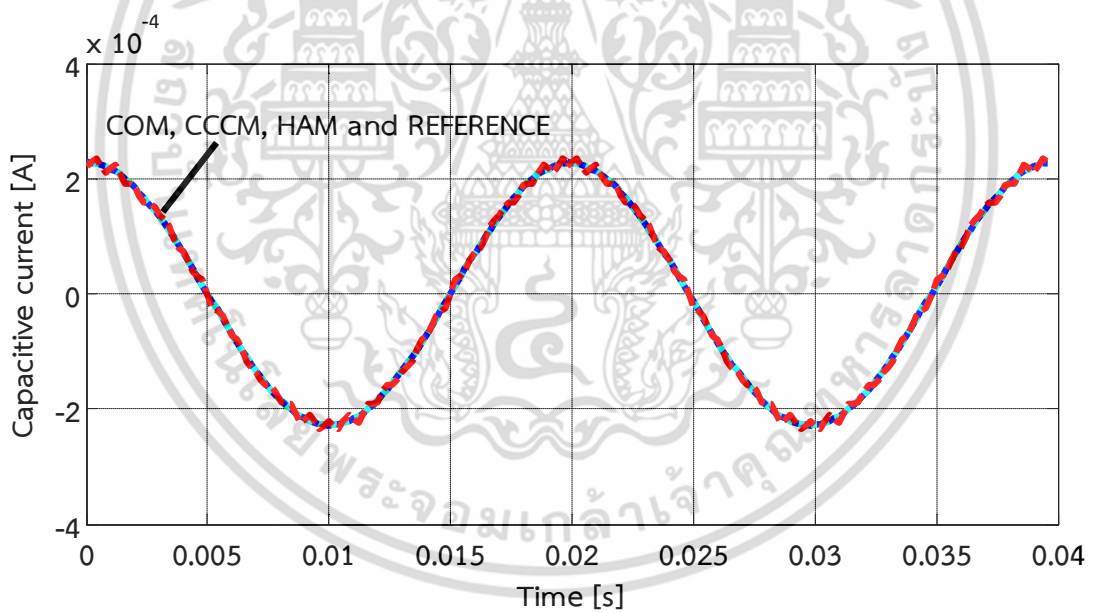
### 3.2.6 ผลกระทบจากอัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling rate)

ศึกษาผลกระทบจากอัตราการสุ่มข้อมูลต่อการคำนวณ  $I_{R3}$  โดยการลดอัตราการสุ่มข้อมูลลง 10 เท่าของอัตราการสุ่มข้อมูลเริ่มต้น (50 kHz) เป็น 5 kHz

รูปที่ 3.27 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มีอัตราการสุ่มข้อมูล 5 kHz ต่อเวลา รูปที่ 3.28 แสดงรูปคลื่นกระแสความจุต่อเวลา และรูปที่ 3.29 แสดงรูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลา

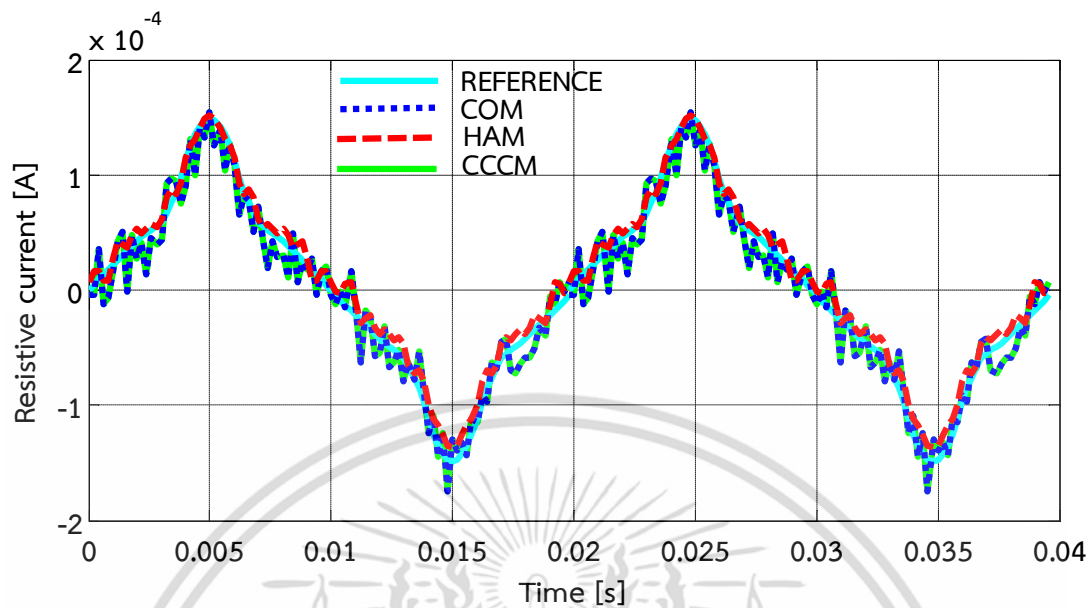


รูปที่ 3.27 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมที่มีอัตราการสุ่มข้อมูล 5 kHz ต่อเวลา



รูปที่ 3.28 รูปคลื่นกระแสความจุไฟฟ้าต่อเวลา (เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีอัตราการสุ่มข้อมูล 5 kHz)

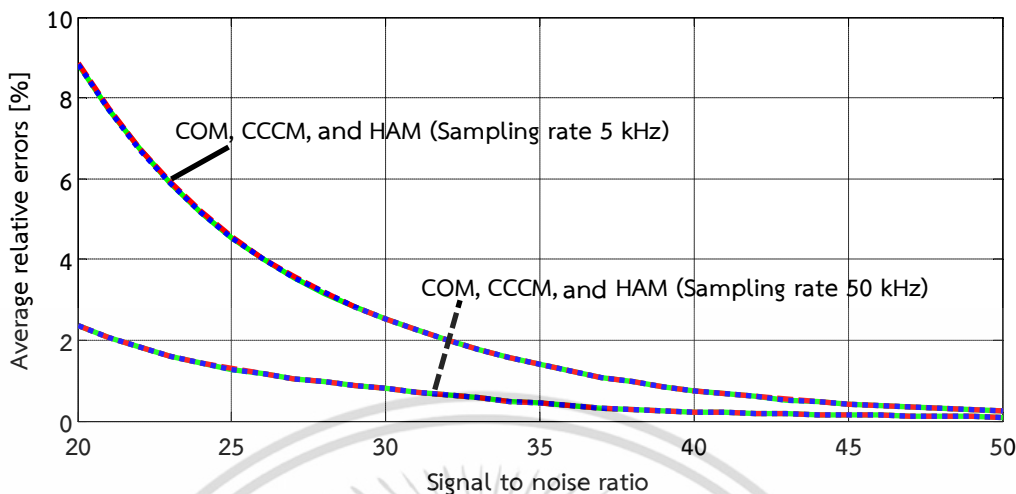
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 รูปคลื่นกระแสความต้านทานต่อเวลา (เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีอัตราการสุ่มข้อมูล 5 kHz)

จากรูปที่ 3.28 รูปคลื่นกระแสความจุที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM มีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง สำหรับรูปที่ 3.29 รูปคลื่นกระแสความต้านทานที่คำนวณได้จากทั้ง 3 มีรูปคลื่นคลาดเคลื่อนจากรูปคลื่นอ้างอิงเล็กน้อย

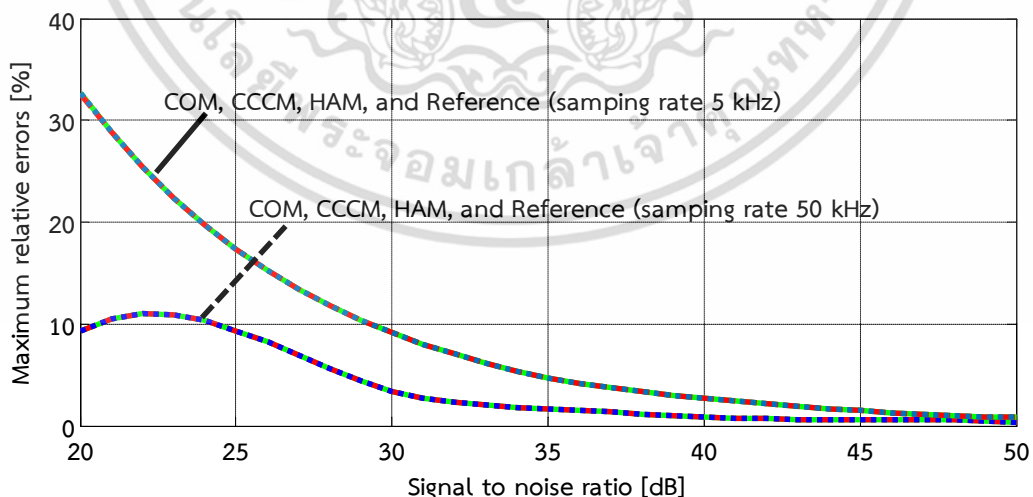
รูปที่ 3.30 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณมีอัตราการสุ่มข้อมูล 5 kHz เปรียบเทียบกับ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณมีอัตราการสุ่มข้อมูล 50 kHz



รูปที่ 3.30 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่อ SNR (เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสไหลรวมมีอัตราการสุ่มข้อมูล 50 kHz และ 5 kHz)

จากรูปที่ 3.30 แสดงให้เห็นว่าการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่สัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสไหลรวมมีอัตราการสุ่ม 50 kHz มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยน้อยกว่าสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสไหลรวมที่มีอัตราการสุ่ม 5 kHz

รูปที่ 3.31 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสไหลรวมมีสัญญาณมีอัตราการสุ่มข้อมูล 5 kHz เปรียบเทียบกับ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสไหลรวมมีสัญญาณมีอัตราการสุ่มข้อมูล 50 kHz



รูปที่ 3.31 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดในการคำนวณ  $I_{R3}$  ต่อ SNR (เมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสไหลรวมมีอัตราการสุ่มข้อมูล 50 kHz และ 5 kHz)

จากรูปที่ 3.31 แสดงให้เห็นว่าการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่สัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีอัตราการสุ่ม 50 kHz มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดน้อยกว่าสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมที่มีอัตราการสุ่ม 5 kHz

### 3.3 สรุป

ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินจากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจากการจำลองทั้ง 6 กรณีศึกษาด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่คำนวณได้โดยตรงจากแบบจำลอง สรุปได้ว่าวิธี COM มีความแม่นยำมากที่สุดในกรณีที่สัญญาณรั่วไหลรวมไม่มีสัญญาณรบกวน สำหรับวิธี CCCM มีค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามใกล้เคียงกับวิธี COM ยกเว้นในกรณีที่สัญญาณแรงดันมีฮาร์มอนิกที่สาม ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธีนี้มีความคลาดเคลื่อนอย่างมาก สำหรับวิธี HAM มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามมากที่สุดในเกือบทุกกรณีเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ความคลาดเคลื่อนของวิธี HAM เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานที่ใช้ทำกับดักแรงดันเกิน

## บทที่ 4

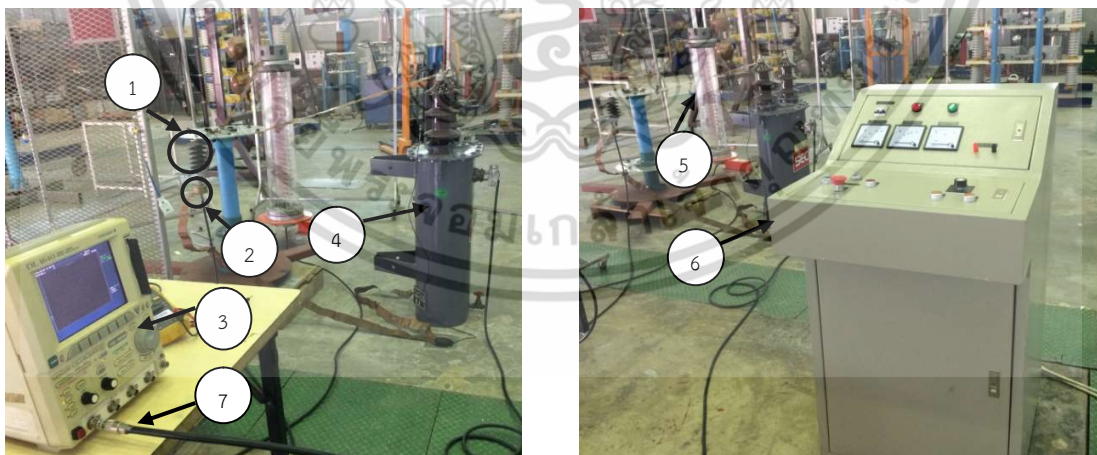
### การทดสอบและผลการทดสอบ

การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินจากการทดสอบสามารถคำนวณได้จากสัญญาณรูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการทดสอบกับดักแรงดันเกินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (Aged MOSA) ที่ระดับแรงดันตั้งแต่ 0.9 p.u. 1 p.u. 1.1 p.u. 1.2 p.u. และ 1.3 p.u. ที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การทดสอบและการประเมินผลมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 การทดสอบกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์

กับดักแรงดันเกิน ขนาด 9 kV 5 kA จะถูกทดสอบ ที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยการจ่ายแรงดันกระแสสลับที่ระดับต่ำกว่าแรงดันพิกัดของกับดักแรงดันเกิน ที่ระดับแรงดันพิกัดของกับดักแรงดันเกิน และที่ระดับแรงดันมากกว่าแรงดันพิกัดของกับดักแรงดันเกิน 1 ถึง 3 เท่า ให้กับกับดักแรงดันเกิน เพื่อศึกษาผลกระทบจากแรงดันเกินต่อการคำนวณค่าแอมพลิจูดของกระแส  $I_{R3}$  วงจรและขั้นตอนในการทดสอบกับดักแรงดันเกินมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ในวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย

(1) กักตักแรงดันเกินขนาด 9 kV 5 kA

1 ตัว



รูปที่ 4.2 กักตักแรงดันเกินชนิดโลหะออกไซด์ขนาด 9 kV 5 kA

(2) ความต้านทานชัณฑ์ (Shunt resistor) ขนาด 2.5 k $\Omega$

1 ตัว



รูปที่ 4.3 ความต้านทานชัณฑ์

(3) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป

1 เครื่อง



รูปที่ 4.4 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) หม้อแปลงกระแสสลับแรงดันสูง ขนาด 15 kV

1 เครื่อง



รูปที่ 4.5 หม้อแปลงกระแสสลับแรงดันสูง ขนาด 15 kV

(5) โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV

1 เครื่อง

พิกัดแรงดัน	A.C./D.C./Impulse 100 kV
อัตราส่วน	A.C. 980:1/D.C. 985:1/Impulse 993:1
ค่าตัวเก็บประจุแรงสูง	110 pF
ค่าตัวเก็บประจุแรงต่ำ	110 nF
ค่าความต้านทานแรงสูง	250 M $\Omega$
ค่าความต้านทานแรงต่ำ	250 k $\Omega$
ความถี่	50 Hz
การฉนวนภายใน	บรรจุแก๊ส SF <sub>6</sub>



รูปที่ 4.6 โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (6) หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 0-250 V<sub>ac</sub> 50 Hz 20 A 1 เครื่อง



รูปที่ 4.7 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 0-250 V<sub>ac</sub> 50 Hz 20 A

- (7) สายเคเบิล RG 11 2 เส้น

#### 4.1.2 วิธีการทดสอบ

- (1) ต่อบางจรทดสอบตามรูปที่ 4.1
- (2) บ้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับต่างๆ  
ที่ใช้ในการทดสอบกับดักแรงดันเกิน

ระดับแรงดัน (p.u.)	ระดับแรงดัน (kV <sub>rms</sub> )
0.9	8.1
1.0	9.0
1.1	9.9
1.2	10.8
1.3	11.7

- (3) บันทึกรูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจำนวน 10 คาบ ที่มีอัตราการสุ่มของข้อมูล (Sampling rate) เท่ากับ 50 kHz จากเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคปโดยพร้อมกัน ในแต่ละระดับแรงดันตามตารางที่ 4.1

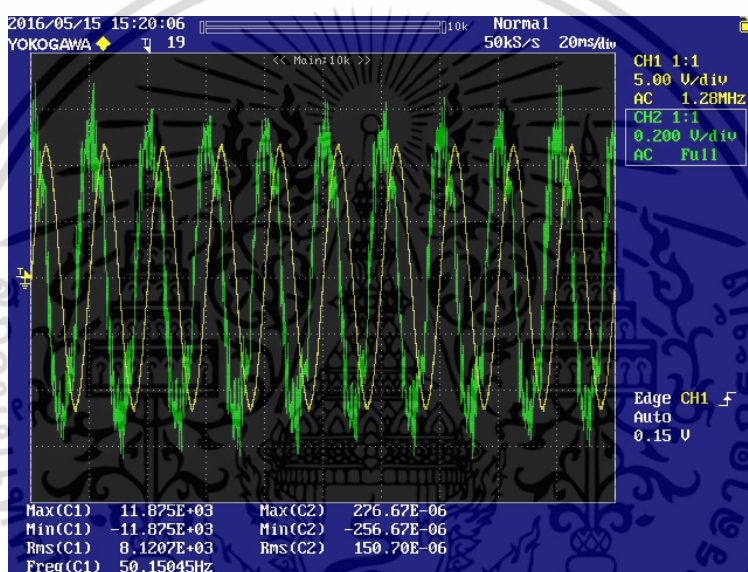
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดสอบ

ค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากออสซิลโลสโคป ผลการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ด้วยโปรแกรมแมทแล็บ แสดงดังต่อไปนี้

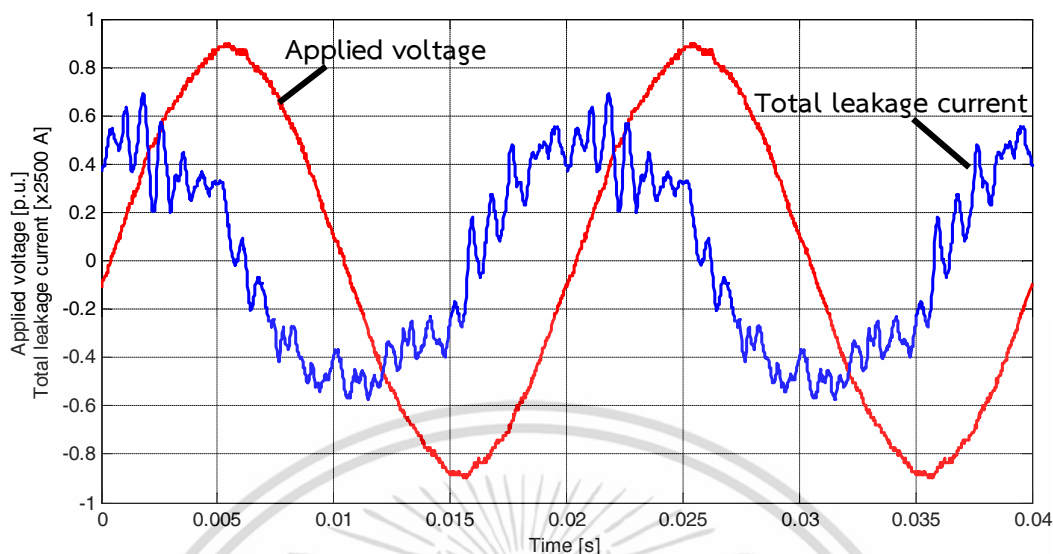
### 4.2.1 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. (8.1 kV<sub>rms</sub>)

รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบ และรูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวม 2 คาบ ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u.)

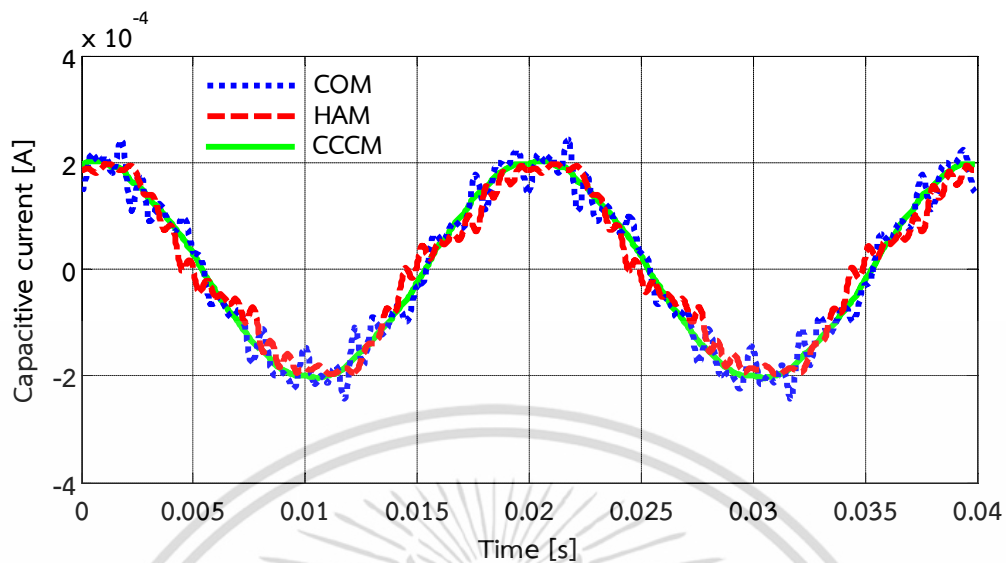
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



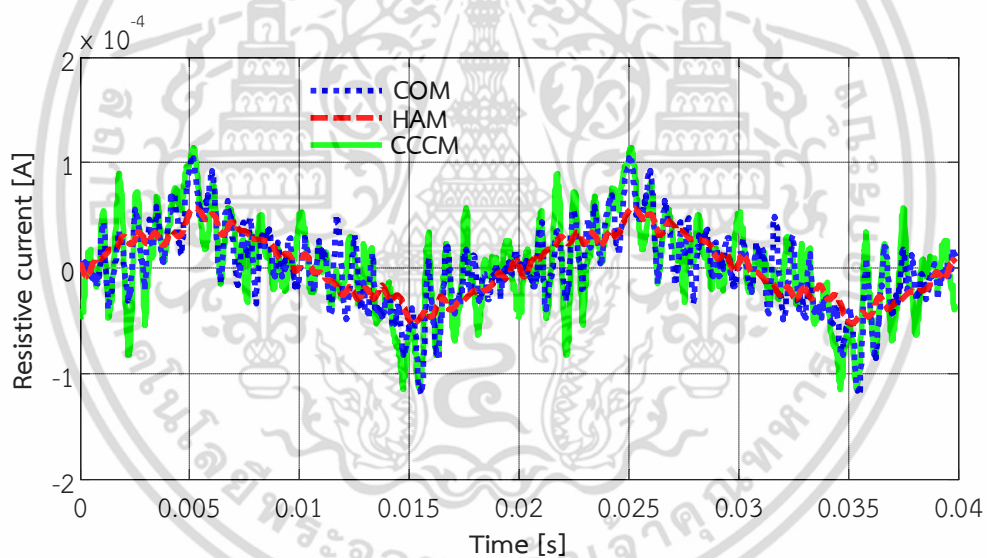
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 2 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u.)

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นแรงดันค่อนข้างเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากมีแอมพลิจูดของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 3 ประมาณ 0.008 เท่าของแอมพลิจูดมูลฐาน มีมุมเฟสประมาณ 2 เรเดียน นอกจากนี้ รูปคลื่นแรงดันยังมีสัญญาณรบกวนอีกด้วย สำหรับรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจะมีสัญญาณรบกวนมากอย่างเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากมีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่ามิลลิแอมป์ (mA)

รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุและกระแสความต้านทานของกัปดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u.)



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทาน ต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u.)

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสความจุที่คำนวณได้จากวิธี COM และวิธี CCCM มีรูปคลื่นใกล้เคียงกัน สำหรับวิธี HAM มีค่าน้อยสุดเมื่อเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นกระแสความต้านทานที่คำนวณได้จากวิธี COM และวิธี CCCM มีค่าใกล้เคียงกัน แต่วิธี CCCM มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย สำหรับวิธี HAM มีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น

ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ ออกไซด์ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. แสดงดังตารางที่ 4.2

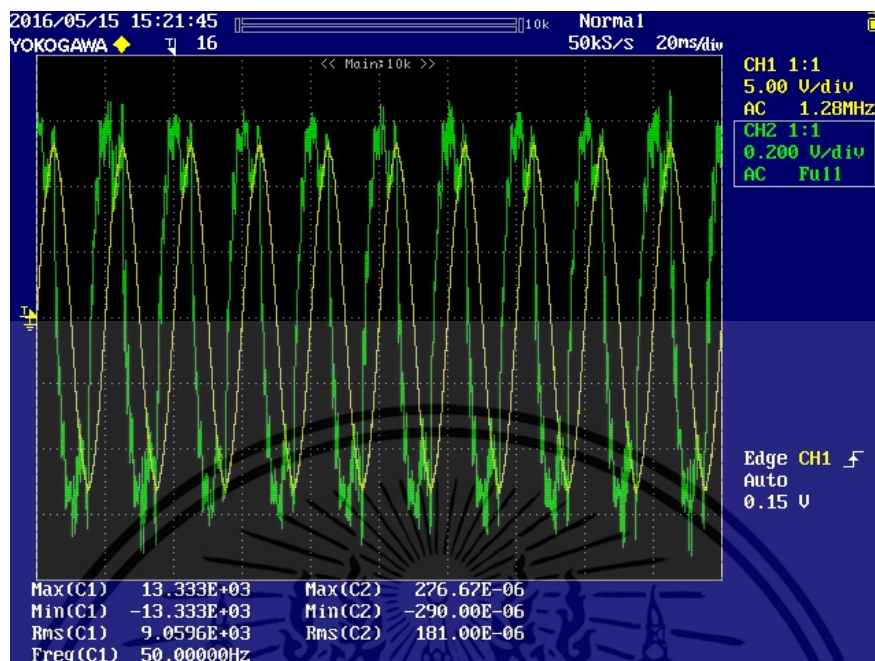
**ตารางที่ 4.2** ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ ออกไซด์จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM

วิธีการคำนวณ	ค่าเฉลี่ย (mA)	ค่าสูงสุด (mA)	ค่าต่ำสุด (mA)	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mA)
COM	$1.69 \times 10^{-2}$	$1.74 \times 10^{-2}$	$1.65 \times 10^{-2}$	$3.09 \times 10^{-4}$
CCCM	$2.01 \times 10^{-2}$	$2.07 \times 10^{-2}$	$1.96 \times 10^{-2}$	$3.78 \times 10^{-4}$
HAM	$2.84 \times 10^{-3}$	$5.20 \times 10^{-3}$	$4.39 \times 10^{-4}$	$1.45 \times 10^{-2}$

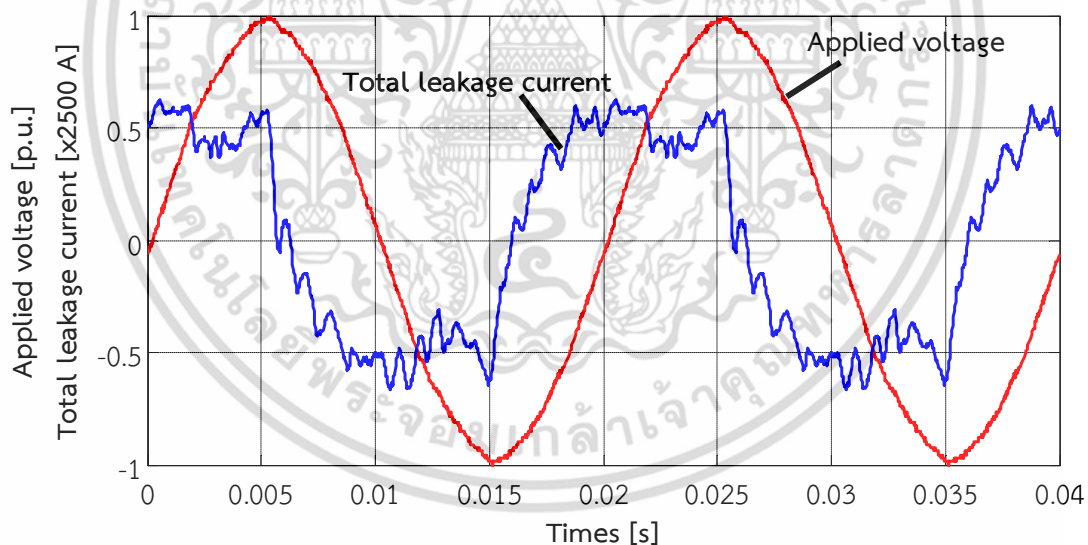
จากตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าเฉลี่ย  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM มีค่าแตกต่างกันถึงแม้ว่าจะมีสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมเหมือนกันก็ตาม จากผลการคำนวณ  $I_{R3}$  จากการจำลองภายใต้ 6 กรณีศึกษาในบทที่ 3 สามารถวิเคราะห์ผลการคำนวณ  $I_{R3}$  จากการทดสอบได้ดังนี้ 1) สาเหตุที่ทำให้ค่า  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จากวิธี CCCM มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีทั้ง 2 อาจมาจากผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ 3 ที่มีค่าแอมพลิจูดประมาณ 0.008 เท่าของแอมพลิจูดแรงดันมูลฐาน มีมุมเฟสประมาณ 2 เรเดียน หรือประมาณ 120 องศา 2) การคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี HAM มีค่าน้อยสุดและมีความแตกต่างของค่า  $I_{R3}$  มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น อาจมีสาเหตุมาจากความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักแรงดันเกินทำให้มุมเฟสของแรงดันในแต่ละลำดับฮาร์มอนิก  $k$  แตกต่างจากมุมเฟสของกระแสความต้านทานของกับดักแรงดันเกินในแต่ละลำดับฮาร์มอนิก  $k$  3) การคำนวณด้วยวิธี COM มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณน้อยมาก ประมาณ 0 % จากผลการจำลองในกรณีที่แรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3 มุมเฟส 2 เรเดียน ฉะนั้น ในกรณีนี้สามารถสรุปได้ว่าการคำนวณด้วยวิธี COM มีความแม่นยำกว่าวิธี CCCM และวิธี HAM นอกจากนี้ วิธี COM ยังมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการคำนวณ  $I_{R3}$  จาก 10 คาบเวลาดำที่ต่ำสุดเมื่อเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งแสดงถึงความมีเสถียรภาพในการคำนวณมากกว่า วิธี CCCM และวิธี HAM 4) ถึงแม้ในระบบการวัดจะมีสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณแรงดันการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM ก็ยังเป็นวิธีที่แม่นยำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น แต่ถ้าในระบบการวัดมีสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวมอาจทำให้การคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM คลาดเคลื่อน

#### 4.2.2 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u. (9.0 kV<sub>rms</sub>)

รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา และรูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวม 2 คาบเวลา ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบ (ที่แรงดัน 1.0 p.u.)

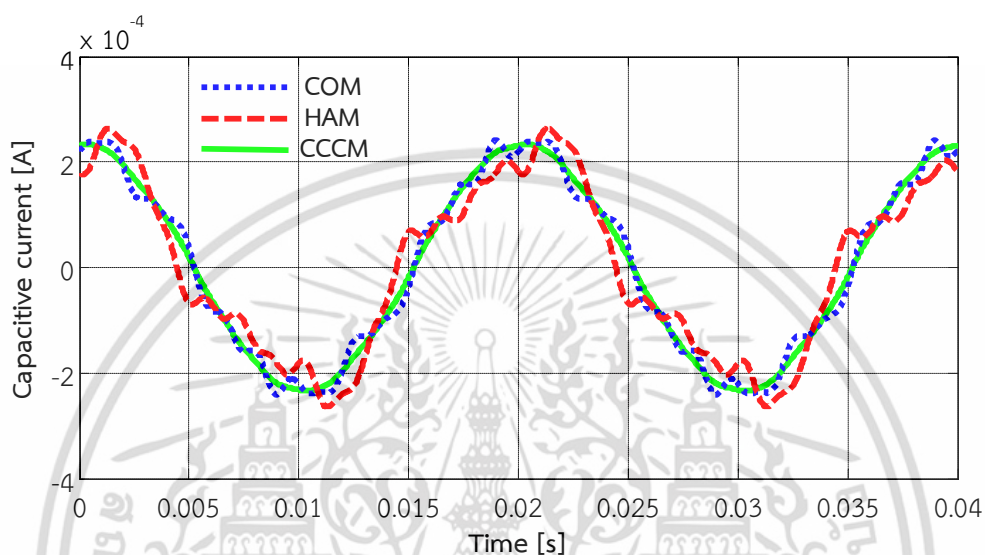


รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบ (ที่แรงดัน 1.0 p.u.)

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นแรงดันค่อนข้างเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากมีแอมพลิจูดฮาร์มอนิกลำดับ 3 ประมาณ 0.004 เท่าของแอมพลิจูดมูลฐาน ที่มีเฟสประมาณ 1.5 เรเดียน นอกจากนี้ รูปคลื่นแรงดันยังมีสัญญาณรบกวนอีกด้วย สำหรับ

รูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจะมีสัญญาณรบกวนมากอย่างเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากมีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า มิลลิแอมป์ (mA)

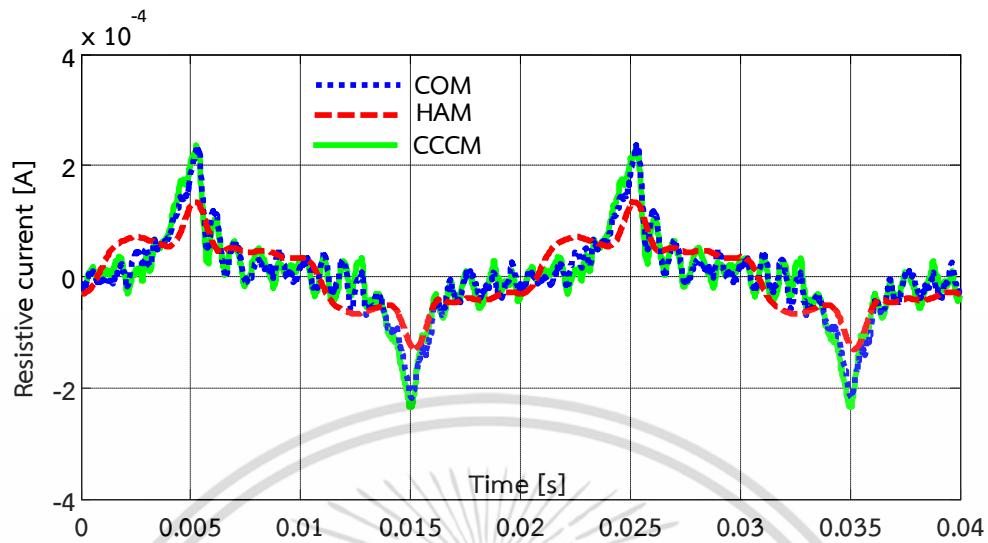
รูปคลื่นสัญญาณกระแสไหลผ่านความจุของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u.)

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสความจุที่คำนวณได้จากวิธี COM และวิธี CCCM มีรูปคลื่นใกล้เคียงกัน สำหรับวิธี HAM มีรูปคลื่นแตกต่างกับ 2 วิธีข้างต้น

รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทาน ต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u.)

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นกระแสความต้านทานที่คำนวณได้จากวิธี COM และวิธี CCCM มีค่าใกล้เคียงกัน แต่วิธี CCCM มีค่าสูงกว่าวิธี COM เล็กน้อย สำหรับวิธี HAM มีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น

ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ ออกไซด์ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u. แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณกระแสความต้านทาน ฮาร์มอนิกที่สาม ของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ

ออกไซด์จากการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.0 p.u.

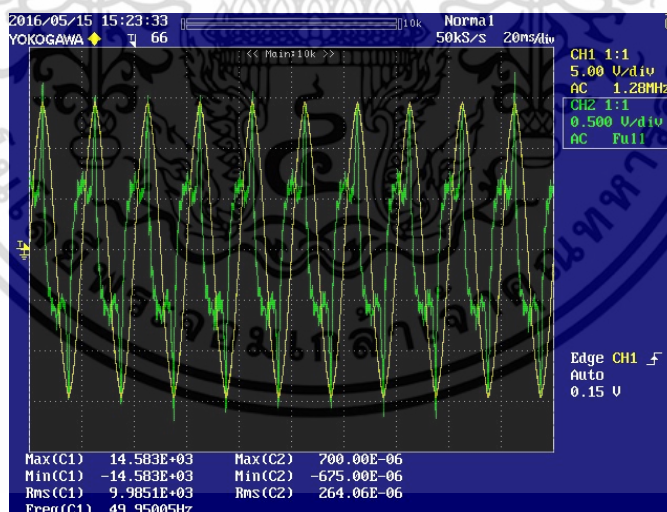
วิธีการคำนวณ	ค่าเฉลี่ย (mA)	ค่าสูงสุด (mA)	ค่าต่ำสุด (mA)	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mA)
COM	$4.54 \times 10^{-2}$	$4.62 \times 10^{-2}$	$4.50 \times 10^{-2}$	$3.86 \times 10^{-4}$
CCCM	$4.74 \times 10^{-2}$	$4.80 \times 10^{-2}$	$4.69 \times 10^{-2}$	$4.56 \times 10^{-4}$
HAM	$1.39 \times 10^{-2}$	$1.90 \times 10^{-2}$	$9.60 \times 10^{-3}$	$3.01 \times 10^{-3}$

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าเฉลี่ย  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM มีค่าแตกต่างกันถึงแม้ว่าจะมีสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมเหมือนกันก็ตาม จากผลการคำนวณ  $I_{R3}$  จากการจำลองภายใต้ 6 กรณีศึกษาในบทที่ 3 สามารถวิเคราะห์ผลการคำนวณ  $I_{R3}$  จากการทดสอบได้ดังนี้ 1) สาเหตุที่ทำให้ค่า  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จากวิธี CCCM มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีทั้ง 2 อาจมาจากผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ 3 ที่มีค่าแอมพลิจูดประมาณ 0.004 เท่าของแอมพลิจูดมาตรฐาน

มีมุมเฟสประมาณ 1.5 เรเดียน หรือประมาณ 90 องศา แต่ในกรณีจะเห็นว่าค่า  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จากวิธี CCCM มีค่าแตกต่างจากวิธี COM น้อยกว่า ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. เนื่องจากมีอัตราส่วนของแอมพลิจูด  $U_3/U_1$  น้อยกว่า 2 เท่า ทำให้ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$  ลดลง 2) การคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี HAM มีค่าน้อยสุด และมีความแตกต่างของค่า  $I_{R3}$  มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น อาจมีสาเหตุมาจากความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักแรงดันเกินทำให้มุมเฟสของแรงดันในแต่ละลำดับฮาร์มอนิก  $k$  แตกต่างจากมุมเฟสของกระแสความต้านทานของกับดักแรงดันเกินในแต่ละลำดับฮาร์มอนิก  $k$  3) การคำนวณด้วยวิธี COM มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณน้อยมาก ประมาณ 0 % จากผลการจำลองในกรณีที่แรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3 มุมเฟส 2 เรเดียน ฉะนั้น ในกรณีนี้สามารถสรุปได้ว่าการคำนวณด้วยวิธี COM มีความแม่นยำกว่าวิธี CCCM และวิธี HAM นอกจากนี้ วิธี COM ยังมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการคำนวณ  $I_{R3}$  จาก 10 คาบเวลาต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งแสดงถึงความมีเสถียรภาพในการคำนวณมากกว่า วิธี CCCM และวิธี HAM 4) ถึงแม้ในระบบการวัดจะมีสัญญาณรบกวน การคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM ก็ยังเป็นวิธีที่แม่นยำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น แต่ถ้าในระบบการวัดมีสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม) อาจทำให้การคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM คลาดเคลื่อน

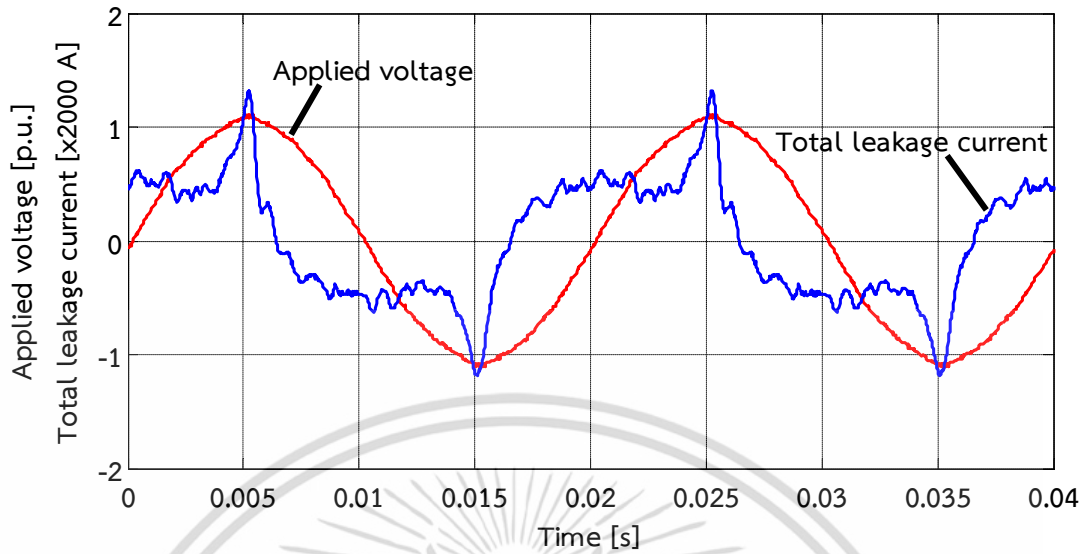
#### 4.2.3 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u. (9.9 kV<sub>rms</sub>)

รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา และรูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวม 2 คาบเวลา ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.)

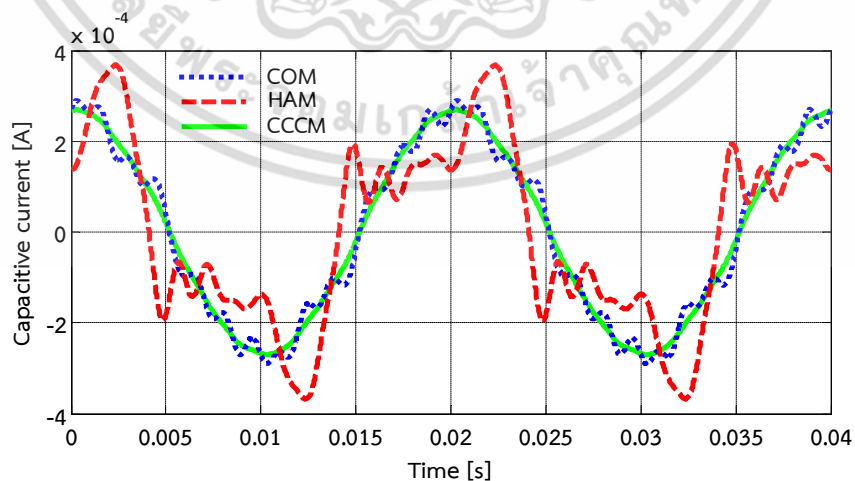
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 2 คาบเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.)

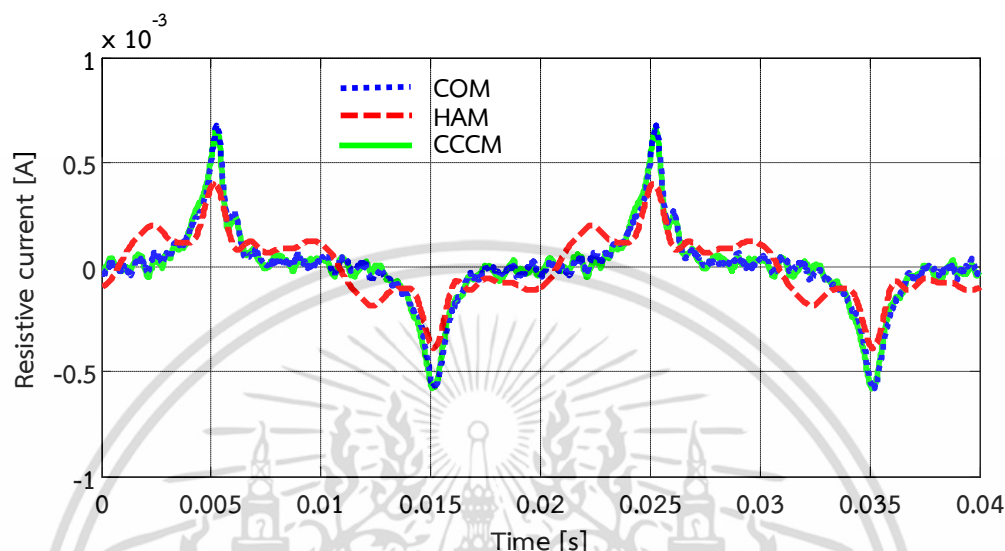
จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นแรงดันค่อนข้างเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากมีสัญญาณรบกวน ในกรณีนี้มีอัตราส่วนแอมพลิจูดแรงดันฮาร์มอนิกลำดับ 3 ประมาณ 0.002 เท่าของแอมพลิจูดมูลฐาน มีเฟสประมาณ 1.3 เรเดียน สำหรับรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวนน้อยกว่า กรณีการทดสอบที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. และ 1.0 p.u. เนื่องจากกระแสรั่วไหลรวมมีค่ามากขึ้นแต่ก็ยังคงมีสัญญาณรบกวน

รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.)

รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.)

จากรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นกระแสความจุและกระแสความต้านทานที่คำนวณได้จากวิธี COM และ วิธี CCCM มีรูปคลื่นใกล้เคียงกัน สำหรับวิธี HAM มีรูปคลื่นแตกต่างกับ 2 วิธีข้างต้นอย่างชัดเจน

ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ ออกไซด์ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u. แสดงดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ

ออกไซด์จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u.

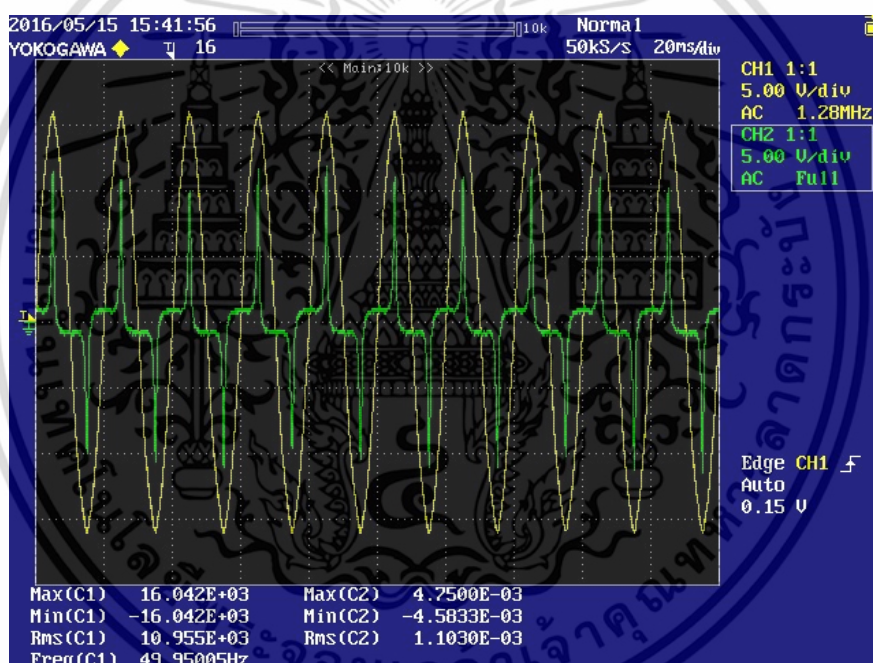
วิธีการคำนวณ	ค่าเฉลี่ย (mA)	ค่าสูงสุด (mA)	ค่าต่ำสุด (mA)	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mA)
COM	$1.29 \times 10^{-1}$	$1.30 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^{-1}$	$1.44 \times 10^{-3}$
CCCM	$1.30 \times 10^{-1}$	$1.31 \times 10^{-1}$	$1.26 \times 10^{-1}$	$1.79 \times 10^{-3}$
HAM	$4.90 \times 10^{-2}$	$8.50 \times 10^{-2}$	$1.42 \times 10^{-2}$	$2.24 \times 10^{-2}$

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าเฉลี่ย  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จาก CCCM มีค่าใกล้เคียงกับวิธี COM เนื่องจากอัตราส่วนแอมพลิจูดฮาร์มอนิกลำดับ 3 ต่อแอมพลิจูดแรงดันมูลฐานมีค่าน้อย ส่งผลให้การ

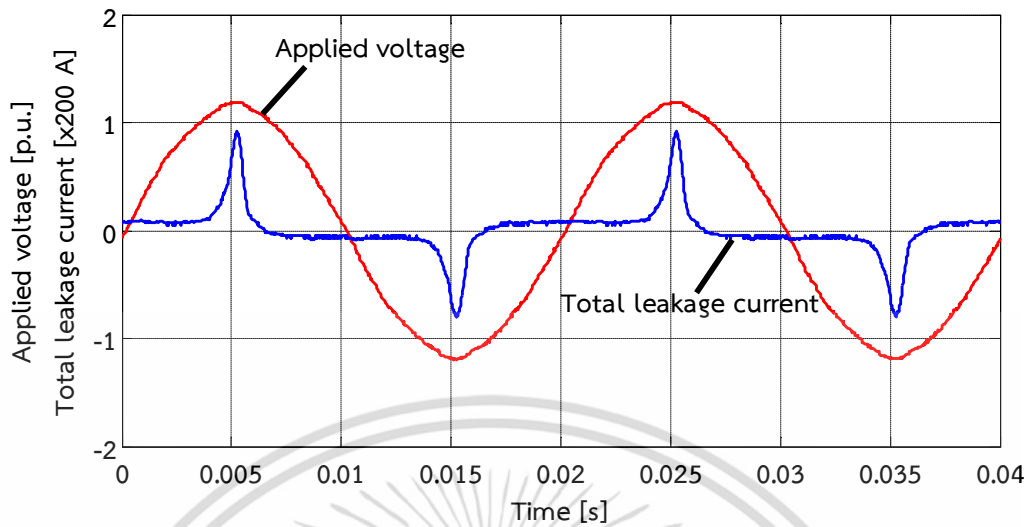
คำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี CCCM ในกรณีนี้มีความแม่นยำมากขึ้น ในขณะที่ค่าเฉลี่ย  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จากวิธี HAM ยังมีค่า  $I_{R3}$  แตกต่างจากวิธี COM และวิธี CCCM และมีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของมุมเฟสในแต่ละลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสความต้านทาน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$  อย่างมาก ความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากทั้ง 3 วิธี มีค่าน้อยกว่า 1% โดยที่วิธี COM จะมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น

#### 4.2.4 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u. (10.8 kV<sub>rms</sub>)

รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา และรูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวม 2 คาบเวลา ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 ตามลำดับ



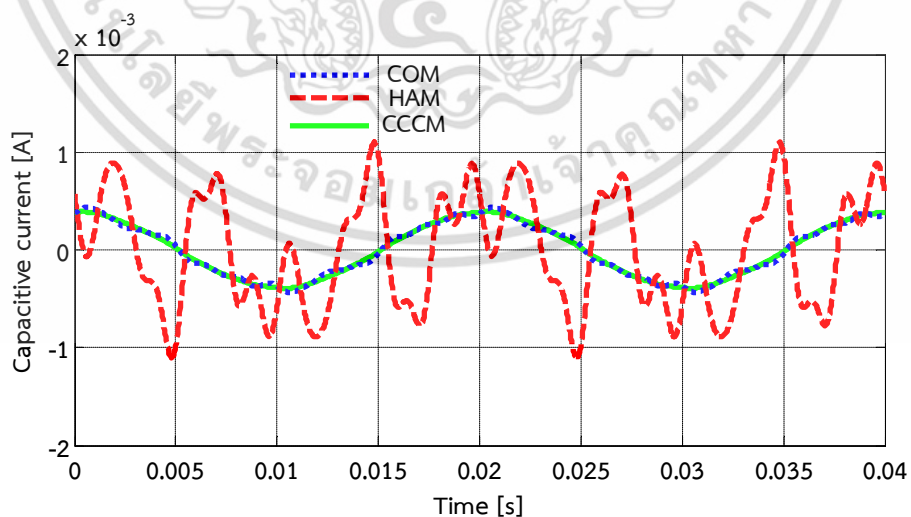
รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบ (ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.)



รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 2 คาบ (ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.)

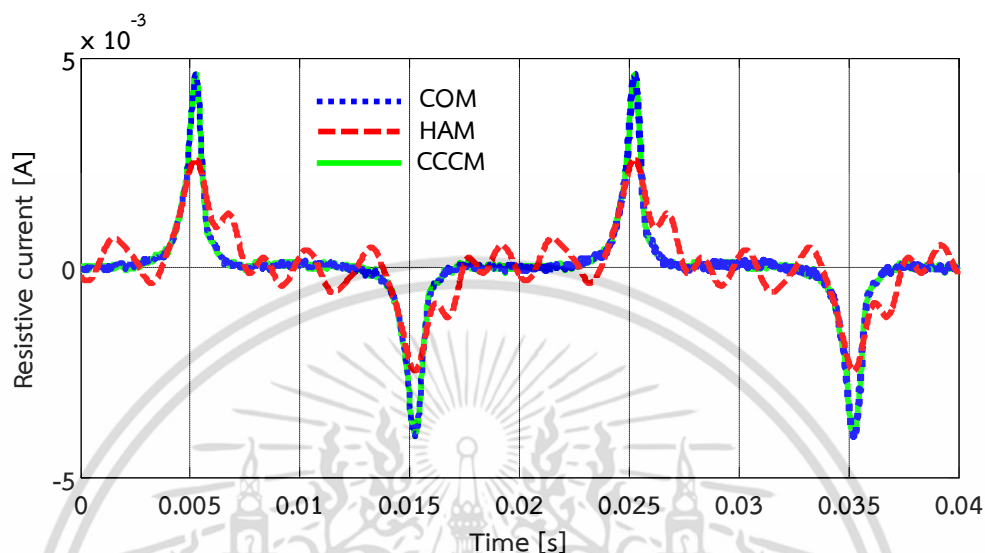
จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นแรงดันค่อนข้างเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่มีอัตราส่วนแอมพลิจูดฮาร์มอนิกลำดับ 3 ประมาณ 0.001 เท่าของแอมพลิจูดมูลฐาน มีมุมเฟสประมาณ  $-0.20$  เรเดียน สำหรับรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวนน้อยมากเนื่องจากกระแสกระแสรั่วไหลรวมมีค่ามากขึ้นและมีความเป็นกระแสความต้านทานมากกว่ากระแสรั่วไหลรวมผ่านความจุ

รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุของกัปดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไหลผ่านความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.)

รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทาน ต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.)

จากรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นกระแสความจุและกระแสความต้านทาน ที่คำนวณได้จากวิธี COM และ วิธี CCCM มีรูปคลื่นใกล้เคียงกัน สำหรับวิธี HAM มีรูปคลื่นแตกต่างกับ 2 วิธีข้างต้นอย่างชัดเจน

ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ ออกไซด์ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u. แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ

ออกไซด์จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.2 p.u.

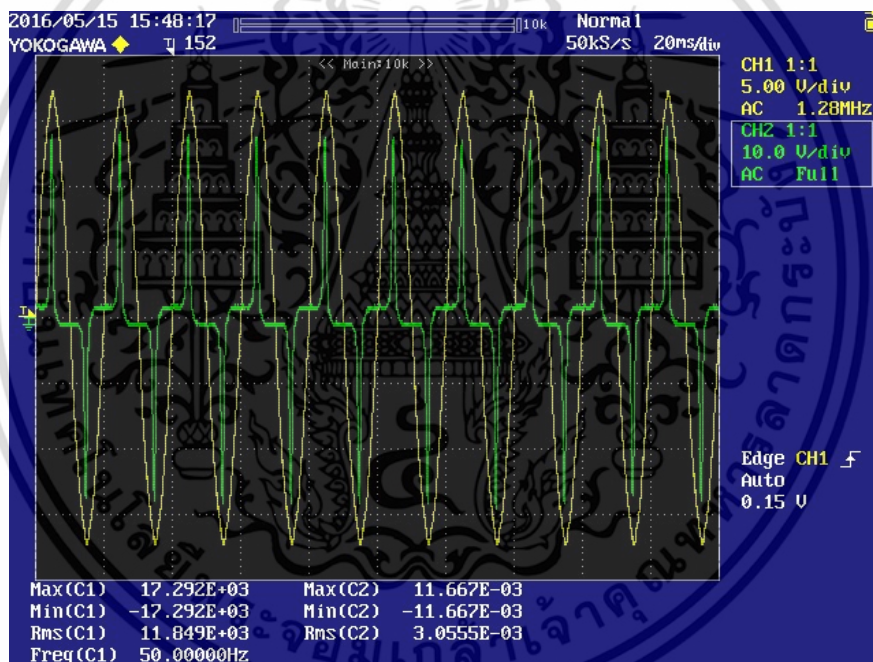
วิธีการคำนวณ	ค่าเฉลี่ย (mA)	ค่าสูงสุด (mA)	ค่าต่ำสุด (mA)	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mA)
COM	$7.51 \times 10^{-1}$	$7.64 \times 10^{-1}$	$7.40 \times 10^{-1}$	$6.97 \times 10^{-3}$
CCCM	$7.50 \times 10^{-1}$	$7.63 \times 10^{-1}$	$7.40 \times 10^{-1}$	$7.01 \times 10^{-3}$
HAM	$6.92 \times 10^{-1}$	$7.46 \times 10^{-1}$	$6.43 \times 10^{-1}$	$4.14 \times 10^{-2}$

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าเฉลี่ย  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จากวิธี CCCM มีค่าใกล้เคียงกับวิธี COM เนื่องจากอัตราส่วนแอมพลิจูดของอัตราส่วนแรงดัน  $U_3/U_1$  มีค่าน้อย ส่งผลให้การคำนวณ  $I_{R3}$

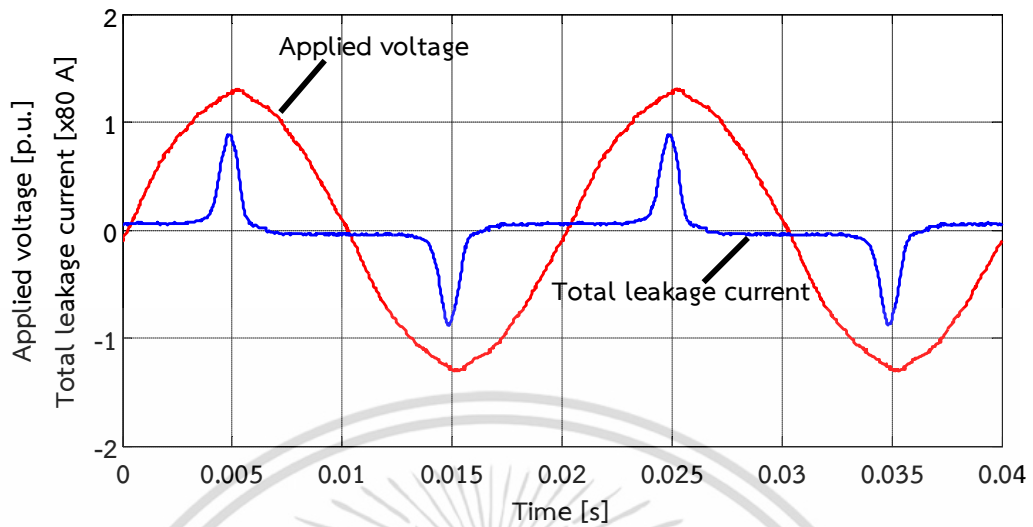
ด้วยวิธี CCCM ในกรณีนี้มีความแม่นยำมากขึ้น ในขณะที่ค่าเฉลี่ย  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จากวิธี HAM ยังมีค่า  $I_{R3}$  แตกต่างจากวิธี COM และวิธี CCCM ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของมุมเฟสในแต่ละลำดับฮาร์โมนิกของแรงดันและกระแสความต้านทาน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$  ความเปี่ยงเบนมาตรฐานในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากทั้ง 3 วิธี มีค่าน้อยกว่า 1% โดยที่วิธี COM จะมีความเปี่ยงเบนมาตรฐานน้อยสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธี

#### 4.2.5 การทดสอบที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u. (11.7 kV<sub>rms</sub>)

รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบเวลา และรูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวม 2 คาบเวลา ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 ตามลำดับ



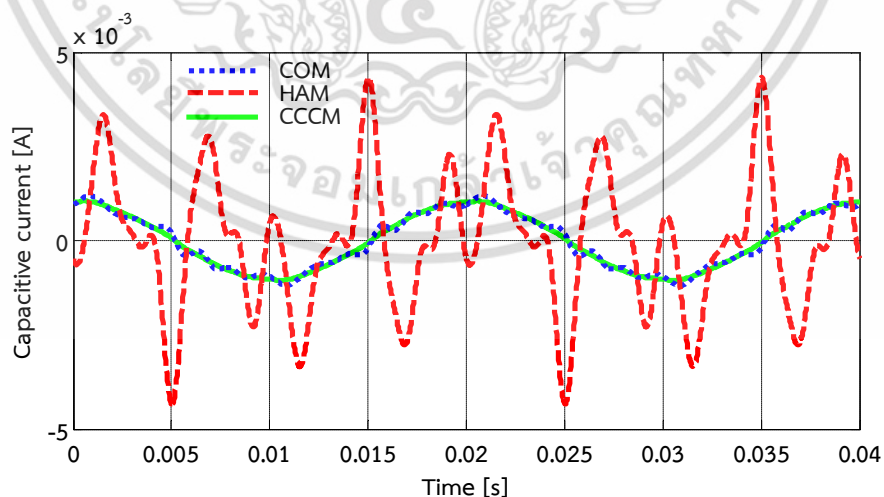
รูปที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 10 คาบ (ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.)



รูปที่ 4.25 รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมจากออสซิลโลสโคปจำนวน 2 คาบ (ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.)

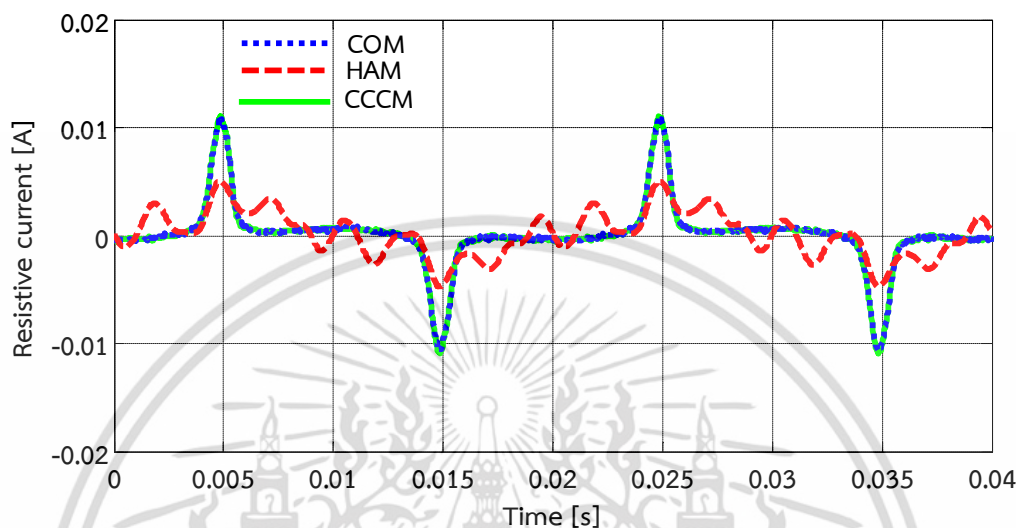
จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นแรงดันค่อนข้างเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่มีอัตราส่วนแอมพลิจูดของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับ 3 ประมาณ 0.001 เท่าของแอมพลิจูดแรงดันมูลฐาน มีเฟสประมาณ  $-0.80$  เรเดียน สำหรับรูปคลื่นกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวนน้อยมากเนื่องจากกระแสรั่วไหลรวมมีค่ามากขึ้นและมีความเป็นกระแสความต้านทานมากกว่ากระแสความจุ

รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความจุต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.)

รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทานของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณได้จากวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u. แสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 รูปคลื่นสัญญาณกระแสความต้านทาน ต่อเวลา (ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.)

จากรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นกระแสความจุและกระแสความต้านทานที่คำนวณได้จากวิธี COM และ วิธี CCCM มีรูปคลื่นใกล้เคียงกัน สำหรับวิธี HAM มีรูปคลื่นแตกต่างกับ 2 วิธีข้างต้นอย่างชัดเจน

ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ ออกไซด์ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u. แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินชนิดโลหะ

ออกไซด์จากการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u.

วิธีการคำนวณ	ค่าเฉลี่ย (mA)	ค่าสูงสุด (mA)	ค่าต่ำสุด (mA)	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mA)
COM	2.16	2.170	2.14	$9.57 \times 10^{-3}$
CCCM	2.15	2.165	2.14	$9.57 \times 10^{-3}$
HAM	0.91	1.21	0.60	$1.78 \times 10^{-1}$

จากตารางที่ 4.6 พบว่า ค่าเฉลี่ย  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จากวิธี CCCM มีค่าใกล้เคียงกับวิธี COM เนื่องจากอัตราส่วนแอมพลิจูดของ  $U_3/U_1$  มีค่าน้อย ส่งผลให้การคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี CCCM ใน

กรณีนี้มีความแม่นยำมากขึ้น ในขณะที่ค่าเฉลี่ย  $I_{R3}$  ที่คำนวณได้จาก วิธี HAM ยังมีค่า  $I_{R3}$  แตกต่างจาก วิธี COM และวิธี CCCM และมีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของมุมเฟสในแต่ละลำดับฮาร์โมนิกของแรงดันและกระแสความต้านทาน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$  ความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการคำนวณ  $I_{R3}$  จากทั้ง 3 วิธี มีค่าน้อยกว่า 1% โดยที่วิธี COM และวิธี CCCM มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับวิธี HAM จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น

ค่าเฉลี่ย  $I_{R3}$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้ด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM จากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการทดสอบจ่ายแรงดันกระแสสลับ ตั้งแต่ 0.9 p.u. ถึง 1.3 p.u. สรุปได้ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามที่คำนวณด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. ถึง 1.3 p.u.

วิธีการคำนวณ	0.9 p.u.	1.0 p.u.	1.1 p.u.	1.2 p.u.	1.3 p.u.
	$I_{R3}$ เฉลี่ย	$I_{R3}$ เฉลี่ย	$I_{R3}$ เฉลี่ย	$I_{R3}$ เฉลี่ย	$I_{R3}$ เฉลี่ย
COM	$1.69 \times 10^{-2}$	$4.54 \times 10^{-2}$	$1.29 \times 10^{-1}$	$7.51 \times 10^{-1}$	2.16
CCCM	$2.01 \times 10^{-2}$	$4.74 \times 10^{-2}$	$1.30 \times 10^{-1}$	$7.50 \times 10^{-1}$	2.15
HAM	$2.84 \times 10^{-3}$	$1.39 \times 10^{-2}$	$4.90 \times 10^{-2}$	$6.92 \times 10^{-1}$	0.91

ตารางที่ 4.8 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) ในการคำนวณแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM ที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. - 1.3 p.u.

วิธีการคำนวณ	0.9 p.u.	1.0 p.u.	1.1 p.u.	1.2 p.u.	1.3 p.u.
	STD (mA)	STD (mA)	STD (mA)	STD (mA)	STD (mA)
COM	$3.09 \times 10^{-4}$	$3.86 \times 10^{-4}$	$1.44 \times 10^{-3}$	$6.97 \times 10^{-3}$	$9.57 \times 10^{-3}$
CCCM	$3.78 \times 10^{-4}$	$4.56 \times 10^{-4}$	$1.79 \times 10^{-3}$	$7.01 \times 10^{-3}$	$9.57 \times 10^{-3}$
HAM	$1.45 \times 10^{-2}$	$3.01 \times 10^{-3}$	$2.24 \times 10^{-2}$	$4.14 \times 10^{-2}$	$1.78 \times 10^{-1}$

จากตารางที่ 4.7 สามารถสรุปได้ว่าผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามจากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM มีค่าสอดคล้องกับผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สาม จากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากผลการจำลอง กล่าวคือวิธี COM มีความแม่นยำในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น สำหรับวิธี CCCM จะมีความคลาดเคลื่อนใน

การคำนวณเมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์มอนิกที่ 3 ที่มีแอมพลิจูดมากกว่า 0.002 เท่าของแรงดันมูลฐาน ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามที่คำนวณได้ด้วยวิธี CCCM แตกต่างไปจากวิธี COM ประมาณ 20% สำหรับวิธี HAM ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สาม เนื่องจากมีค่าแตกต่างกับการคำนวณด้วยวิธี COM และวิธี CCCM อย่างมาก

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่า การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามด้วยวิธี COM จะมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยสุดเกือบทุกกรณี โดยเฉพาะในการทดสอบที่ระดับแรงดัน 0.9 p.u. ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่แนะนำในการทดสอบกับดักแรงดันเกินเพื่อตรวจสอบความเสื่อมสภาพ นั้นหมายความว่าวิธี COM มีเสถียรภาพในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี CCCM และวิธี HAM

#### 4.2.6 ความจุไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกิน

วิธี COM นอกจากจะคำนวณ  $I_{R3}$  ได้แม่นยำแล้ว ยังสามารถคำนวณความจุไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกิน  $C$  ได้อย่างแม่นยำเช่นเดียวกัน ผลการคำนวณความจุไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกินในแต่ละระดับแรงดันแสดงดังตารางที่ 4.9 ดังนี้

ตารางที่ 4.9 ค่าความจุไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกินที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี COM

ระดับแรงดัน (p.u.)	ค่า C เฉลี่ย (pF)	ค่าสูงสุด (pF)	ค่าต่ำสุด (pF)	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (pF)
0.9	56.401	56.487	56.299	$5.16 \times 10^{-2}$
1.0	57.747	57.822	57.671	$4.73 \times 10^{-2}$
1.1	60.200	60.318	60.091	$6.62 \times 10^{-2}$
1.2	79.680	80.746	78.997	$6.07 \times 10^{-2}$
1.3	164.859	196.709	160.168	$1.12 \times 10^1$

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยของกับดักแรงดันเกินในแต่ละระดับแรงดันมีค่าแตกต่างกัน โดยที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับแรงดันเพิ่มขึ้น ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการคำนวณ  $C$  จาก 10 คาบเวลาในแต่ละแรงดัน พบว่าที่ระดับแรงดัน 1.3 p.u. มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดประมาณ 11.2 pF

### 4.3 สรุป

การคำนวณกระแสความต้านทาน ฮาร์มอนิกที่สาม ทานของกับดักแรงดันเกิน ( $i_{R3}$ ) จากสัญญาณรูปคลื่นแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจากการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM พบว่าวิธี COM มีความแม่นยำและมีเสถียรภาพดีกว่าวิธี CCCM และวิธี HAM เหมาะสมในการนำไปใช้ตรวจสอบความสัมพันธ์ของกับดักแรงดันเกินในทางปฏิบัติ

นอกจากนี้จากการทดสอบ จะเห็นว่าค่า  $I_{R3}$  ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 วิธี มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้น นั้นแสดงถึงผลกระทบของแรงดันเกินต่อค่ากระแสความต้านทาน และค่าความจุไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณจากวิธี COM มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจหมายความว่าตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นในวงจรสมมูลของกับดักแรงดันเกินเป็นตัวเก็บประจุแบบไม่เป็นเชิงเส้น



## บทที่ 5

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุป

กับดักแรงดันเกินมีคุณสมบัติในการป้องกันแรงดันเกินที่ตี ราคาถูก และมีอายุการใช้งานยาวนานทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์สำคัญต่างๆ ในระบบจากแรงดันเกิน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า รีแอกเตอร์ และสายเคเบิล เป็นต้น โดยในขณะที่ใช้งานกับดักแรงดันเกินจะต้องสัมผัสกับทั้ง แรงดันเกินฟ้าผ่า แรงดันเกินสวิตชิง แรงดันเกินชั่วคราว และมลภาวะ ด้วยสาเหตุเหล่านี้อาจส่งผลให้กับดักแรงดันเกินเสื่อมสภาพหรือทำให้ความสามารถในการป้องกันแรงดันเกินของกับดักแรงดันเกินลดลง ซึ่งการเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินอาจเป็นสาเหตุของอันตรายทั้งกับชีวิต และทรัพย์สิน ดังนั้นการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินจึงเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญ ที่จะช่วยให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาและยังช่วยในการวิเคราะห์คุณภาพในการซ่อมบำรุงก่อนที่จะนำอุปกรณ์ตัวใหม่ทดแทนอุปกรณ์ตัวเก่าที่เสื่อมสภาพ ค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินเป็นตัวชี้วัดในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกิน เนื่องจากแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลักษณะเส้นแรงดัน-กระแสของกับดักแรงดันเกินเสื่อมสภาพ การเพิ่มขึ้นของค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สาม จะส่งผลให้กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้อุณหภูมิของบล็อกชิ่งค็อกเอาต์เพิ่มขึ้นด้วย ถ้าหากค่ากระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามนี้มีค่าเกินค่าที่กำหนด จะทำให้พลังงานสะสมในบล็อกชิ่งค็อกเอาต์มีค่าเกินกว่าความสามารถในการสลายพลังงาน สุดท้ายอาจเกิดสภาวะความร้อนเกินไม่หยุดยั้ง และนำไปสู่การระเบิดได้

เพื่อป้องกันการประเมินผลและแปลความหมายในการวิเคราะห์สถานะของกับดักแรงดันเกินผิควิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอตัวชี้วัดที่เหมาะสมและวิธีการคำนวณตัวชี้วัดนี้เพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกับดักแรงดันเกินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินถูกใช้เป็นตัวชี้วัดในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพเนื่องจากเป็นตัวชี้วัดที่ดีและมีความน่าเชื่อถือสูง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าแอมพลิจูดของกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินด้วยวิธีกระแสเชิงตั้งฉากเปรียบเทียบกับวิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก และวิธีชดเชยกระแสความจุ บนพื้นฐานข้อมูลจากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการจำลองการทำงานกับดักแรงดันเกินด้วยโปรแกรมแมทแลบภายใต้ผลกระทบจากความเบี่ยงเบนทางความถี่ แรงดันฮาร์มอนิกที่สาม สัญญาณรบกวนต่อแรงดัน สัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลรวม และอัตราการสุ่มข้อมูลและสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการทดสอบกับดักแรงดันเกิน

ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์มอนิกที่สามของกับดักแรงดันเกินจากสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมจากการจำลองทั้ง 6 กรณีศึกษาด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่คำนวณได้โดยตรงจากแบบจำลอง สรุปได้ว่าวิธี COM มีความแม่นยำมากที่สุดใน

กรณีที่มีสัญญาณรบกวนรวมไม่มีสัญญาณรบกวน สำหรับวิธี CCCM มีค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ กระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามใกล้เคียงกับวิธี COM ยกเว้นในกรณีที่สัญญาณแรงดันมีฮาร์โมนิกที่สาม ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามด้วยวิธีนี้มีความคลาดเคลื่อนอย่างมาก สำหรับวิธี HAM มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น ความคลาดเคลื่อนของวิธี HAM เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานที่ใช้ทำกับดักแรงดันเกิน

ผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามจากสัญญาณแรงดันและกระแสรบกวนที่รบกวนที่ได้จากผลการทดสอบด้วยวิธี COM วิธี CCCM และวิธี HAM มีค่าสอดคล้องกับผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามจากสัญญาณแรงดันและกระแสรบกวนที่รบกวนที่ได้จากผลการจำลอง กล่าวคือวิธี COM มีความแม่นยำในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีข้างต้น สำหรับวิธี CCCM จะมีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณเมื่อสัญญาณแรงดันมีฮาร์โมนิกที่สาม ที่มีแอมพลิจูดมากกว่า 0.002 เท่าของแรงดันมูลฐาน ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามที่คำนวณได้ด้วยวิธี CCCM แตกต่างไปจากวิธี COM ประมาณ 20% สำหรับวิธี HAM ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สาม เนื่องจากมีค่าแตกต่างกับการคำนวณด้วยวิธี COM และวิธี CCCM อย่างมาก นอกจากนี้วิธี COM ยังมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยสุดในเกือบทุกกรณี นั่นหมายความว่าวิธี COM มีเสถียรภาพในการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี CCCM และวิธี HAM

นอกจากนี้จากการทดสอบ จะเห็นว่ากระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 วิธี มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้น นั่นแสดงถึงผลกระทบของแรงดันเกินต่อค่ากระแสความต้านทาน และค่าความจุไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกินที่คำนวณจากวิธี COM มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจหมายความว่าตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นในวงจรสมมูลของกับดักแรงดันเกินเป็นตัวเก็บประจุแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ดังนั้น จากผลการคำนวณกระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามจากสัญญาณแรงดันและกระแสรบกวนที่รบกวนจากการจำลองและการทดสอบ สรุปได้ว่าวิธี COM เป็นวิธีที่เหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์กระแสรบกวนเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของกับดักแรงดันเกินในทางปฏิบัติ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะ ในการดำเนินการวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

- 1) หางจรสมมูลของกับดักแรงดันเกินที่มีความแม่นยำมากกว่านี้
  - วงจรสมมูลของตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นขนานกับตัวเก็บประจุไม่เป็นเชิงเส้น
- 2) พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิของกับดักแรงดันเกินขณะนั้นๆ ในการคำนวณหากระแสความต้านทาน เพื่อให้ได้ค่ากระแสความต้านทานฮาร์โมนิกที่สามที่ถูกต้อง แม่นยำมากขึ้นในทางปฏิบัติ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Nasin U. "A Report on Condition Monitoring of Lightning Arrester." [Online]. Available : [http://elocos.railnet.gov.in/MSG\\_ESC/Lightning\\_Arrester.pdf](http://elocos.railnet.gov.in/MSG_ESC/Lightning_Arrester.pdf). 2016.
- [2] ZULKURNAIN BIN ABDUL MALEK. "A New Technique for Metal Oxide Surge Arresters Failure Diagnostic using Return Voltage Measurement." Fakulti Kejuruteraan Elektrik Universiti Teknologi Malaysia. 2009
- [3] ดร.สำรวย สังข์สะอาด. "การฉนวนระบบไฟฟ้าแรงสูงและการป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ"  
วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, มีนาคม 2549. หน้า 8-11 - 8-15
- [4] Vegard Larsen, Kjetil Lien. "In-service Testing and Diagnosis of Gapless Metal Oxide Surge Arresters." IX international symposium on lightning protection, Nov. 2007
- [5] K. P. Mardira, M. Darveniza and T. K. Saha, "Search for new Diagnostics for Metal Oxide Surge Arresters." Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Prop. Appl. Dielect. Mater., 2000, pp. 947-950
- [6] Z Xu, L. Zhao, A. Ding and F. Lü. "A Current Orthogonality Method to Extract Resistive Current of MOSA." IEEE Trans. Power Del., Vol. 16, no. 1, Jan. 2013. pp. 947-950
- [7] R. J. Liao, Z. Y. Wang, C. X. Sun, L. G. Gu, P. Yan and B. Yang, "The harmonic Analysis Method and its Application in the On-line Detection of electric Equipment Insulation." Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Prop. Appl. Dielect. Mater., 2000 pp. 947-950
- [8] H X, L. Zhu, M. R Raghuvver. "Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics." IEEE Trans. Power Del., Vol. 16, no. 4, Oct. 2001. pp. 599-603
- [9] นวคุณ ไตรรัตน์กริชย์. "การสร้างกระแสิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับการทดสอบหาแรงดันคงเหลือของกัณฑ์แรงดันเกินฟ้าผ่าและแบบจำลองทางไฟฟ้า."วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] C Heinrich, V. Hinrichsen. “Diagnostics and Monitoring of Metal Oxide Surge Arrester in High-voltage Networks – Comparison of Existing and newly developed Procedures.” *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 16, no. 1, Jan. 2001. pp. 138-143
- [11] S Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Kurita, K. Goto and M. Sakai. “Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector.” *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 3, no. 3, Jul. 1998. pp. 998-1003
- [12] กระทรวงพลังงาน. “ประเด็นยุทธศาสตร์ด้านการพัฒนาความเชื่อถือได้และคุณภาพของไฟฟ้า.” **แผนแม่บทการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของประเทศไทย พ.ศ. 2558-2579**, กุมภาพันธ์ 2558, หน้า ค.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# EENET2016

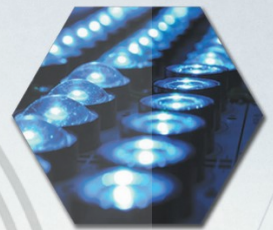
Innovation for Sustainability Entrepreneur

25-27 May 2016, Duangjitt Resort & Spa,  
Patong Beach, Phuket



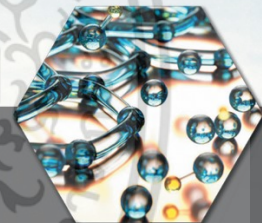
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

The 8th Conference of Electrical Engineering Network  
of Rajamangala University of Technology



## Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



### การคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกัณฑ์ดักเสิร์จชนิด

### โลหะออกไซด์ด้วยวิธีการสะเชิงตั้งฉาก

### Calculation of the Third Harmonic Resistive Current of MOSA using a Current Orthogonality Method

พัชรินทร์ มุลมรัตน์ และ พีรภูมิ ยุทธโกวิท

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยคลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 02-577-5100 ต่อ 1254 E-mail: patcharinm@nimt.or.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ( $I_{R3}$ ) ของกัณฑ์ดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ด้วยวิธีการสะเชิงตั้งฉาก เนื่องจาก  $I_{R3}$  เป็นตัวชี้วัดที่ดีในการวิเคราะห์สถานะของกัณฑ์ดักเสิร์จ นอกจากนี้ บทความนี้ยังได้เปรียบเทียบการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธีการสะเชิงตั้งฉากกับวิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ภายใต้ปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อกัณฑ์ดักเสิร์จดังนี้ 1)ผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทางความถี่ 2)ผลกระทบจากฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของแรงดัน 3)ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อแรงดัน และ 4)ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหล และได้อธิบายความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ  $I_{R3}$  ภายใต้ 4 กรณีศึกษาข้างต้นจากทั้ง 2 วิธี จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธีการสะเชิงตั้งฉากมีความแม่นยำมากกว่าวิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงทั้ง 4 กรณีศึกษา

คำสำคัญ: กัณฑ์ดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ วิธีการสะเชิงตั้งฉาก วิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

#### Abstract

This paper presents calculation of the third harmonic resistive current of MOSA using a current orthogonality method (COM). Since it is well know that the third harmonic resistive current is a good indicator of MOSA condition. The third harmonic resistive current calculation using the COM is compared to harmonic analysis method (HAM) under the following effects: 1)the effect of power frequency deviation, 2)the effect of the third harmonic component of an applied voltage, 3)the effect of the white noise on the applied voltage, and 4)the effect of the white noise on leakage current. The relative errors in the third harmonic resistive current calculation under above-mentioned effects by the COM and the HAM are also described. The calculation results show that the COM is more accurate than the HAM

in the third harmonic resistive current calculation for all cases when they are compared to the reference values.

Keywords: Metal oxide surge arrester, Current orthogonality method, Harmonic analysis method

#### 1. บทนำ

การประสานสัมพันธ์การฉนวน (Insulation coordination) เป็นมาตรการที่จะทำให้ฉนวนของอุปกรณ์ หรือระบบไม่ให้เกิดความเสียหายจากแรงดันเกินเสิร์จ ในระบบไฟฟ้าแรงดันเกินเสิร์จมีขนาดสูงมาก เมื่อเทียบกับแรงดันระบบ การออกแบบจะให้ฉนวนทนแรงดันเกินได้ระดับหนึ่ง ส่วนที่เกินกว่าระดับนั้นจะอาศัยอุปกรณ์ป้องกันเป็นตัวทำให้ระดับแรงดันเกินเสิร์จลดลงต่ำพอที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ฉนวน [1]

กัณฑ์ดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ไร้แก๊ป (Gapless metal oxide surge arrester, MOSA) เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางในระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์สำคัญและราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า รีแอกเตอร์ หรืออุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย จากแรงดันเกินที่เกิดจากเสิร์จฟ้าผ่า เสิร์จสวิตชิง และแรงดันเกินชั่วคราว ตลอดจนอายุการใช้งานของกัณฑ์ดักเสิร์จพบว่ามีความสามารถในการป้องกันแรงดันเกินได้ดี แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการป้องกันแรงดันเกินของกัณฑ์ดักเสิร์จในขณะที่ใช้งานอาจลดลงเนื่องจากได้รับผลกระทบจากแรงดันเกินและเสิร์จต่างๆ แรงดันเกินเหล่านี้อาจส่งผลให้ค่ากระแสไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ( $I_R$ ) ของกัณฑ์ดักเสิร์จเพิ่มขึ้น เมื่อค่า  $I_R$  เพิ่มขึ้นค่าวิกฤต (Critical limit) จะทำให้กัณฑ์ดักเสิร์จชำรุดเสียหาย ส่งผลให้อุปกรณ์ที่อยู่รอบๆ เช่น หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน และบุชชิงหม้อแปลงได้รับความเสียหาย และยังทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจรอีกด้วย

ดังนั้น การตรวจสอบความผิดปกติของกัณฑ์ดักเสิร์จในขณะที่ใช้งานเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อเป็นการยืนยันความเชื่อถือได้ของระบบและความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน มีหลายวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์สถานะของกัณฑ์ดักเสิร์จดังได้เสนอใน [2]-[5] นอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้

## บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

ตรวจหาความผิดปกติของตัวกับดักเครื่อง คือ การคำนวณแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ( $I_{R3}$ ) ของกับดักเครื่อง

โดยปกติเมื่อจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับตัวกับดักเครื่อง กระแสรั่วไหลรวม  $i(t)$  ที่วัดได้จะมีฮาร์มอนิก เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานภายในกับดักเครื่อง ทั้งนี้หากกับดักเครื่องเสื่อมสภาพ จะทำให้ค่าแอมพลิจูดของ  $I_{R3}$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าแอมพลิจูดของ  $I_{R3}$  นี้เป็นตัวชี้วัดที่ดีในการวิเคราะห์สถานะของกับดักเครื่องชนิดโลหะออกไซด์ในปัจจุบัน

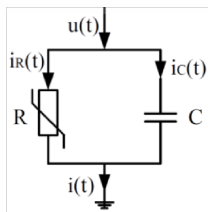
บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณแอมพลิจูด  $I_{R3}$  ของ MOSA ที่รวดเร็วและแม่นยำด้วยวิธีกระแสเชิงตั้งฉาก โดยเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม คือ วิเคราะห์ฮาร์มอนิก ภายใต้ปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อตัวกับดักเครื่อง ดังนี้ 1) ผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทางความถี่ 2) ผลกระทบจากฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของแรงดัน 3) ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อแรงดัน และ 4) ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหล จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธีกระแสเชิงตั้งฉากมีความแม่นยำมากกว่าวิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงทั้ง 4 กรณีศึกษา

## 2. วิธีการคำนวณกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทาน

### 2.1 วงจรสมมูลของกับดักเครื่องชนิดโลหะออกไซด์

กับดักเครื่องชนิด MO จะใช้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำงานด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกันประกอบอยู่ในกระบอกฉนวนพอร์ซเลน (Porcelain) [1] เนื่องจากกับดักเครื่องชนิด MO มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง หมายความว่า ในสภาวะการใช้งานปกติกับดักเครื่องจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High impedance) แต่เมื่อมีกระแสรั่วเข้ามาในระบบเพิ่มมากขึ้นค่าอิมพีแดนซ์จะลดลง (Low impedance) เพื่อขจัดกระแสรั่วที่เข้ามาในระบบลงสู่พื้นดิน

กับดักเครื่องชนิด MO หรือ ZnO ซึ่ง ZnO จะมีความต้านทานจำเพาะน้อยแต่สารเคลือบรอบนอกมีความต้านทานจำเพาะสูงถึง  $10^{10} \Omega\text{-cm}$  และมี  $\epsilon_r = 500-1000$  ทำให้มีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ C [1] ฉะนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลอย่างง่ายของกับดักเครื่องได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของกับดักเครื่องชนิด MO

เมื่อ  $u(t)$  คือ แรงดัน  $i_R(t)$  คือ กระแสความรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น  $i_C(t)$  คือ กระแสรั่วไหลผ่านความจุไฟฟ้า และ  $i(t)$  คือ กระแสรั่วไหลรวม

### 2.2 วิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

การคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic analysis method, HAM) [6] มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมการสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหลรวมของกับดักเครื่องแสดงดังสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^N U_k \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^N I_k \sin(k\omega t + \beta_k) \quad (2)$$

เมื่อ  $U_0$  คือ องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (d.c. component) ของแรงดัน  $I_0$  คือ องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงของกระแสรั่วไหล  $U_k$  คือ แอมพลิจูดของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับ  $k$   $I_k$  คือ แอมพลิจูดของกระแสรั่วไหลฮาร์มอนิกลำดับ  $k$   $\alpha_k$  คือ มุมเฟสของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับ  $k$   $\beta_k$  คือ มุมเฟสของกระแสรั่วไหลฮาร์มอนิกลำดับ  $k$  และ  $k$  คือ จำนวนเต็ม มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N

จากรูปที่ 1 กระแสรั่วไหลรวมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$i(t) = i_C(t) + i_R(t) \quad (3)$$

ซึ่งสามารถคำนวณหาค่ากระแสรั่วไหลผ่านความจุไฟฟ้าได้จาก

$$i_C(t) = C \frac{du(t)}{dt} = \sum_{k=1}^N I_{Ck} \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (4)$$

เมื่อ  $I_{Ck} = k\omega C U_k$

กำหนดให้มุมเฟสของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับ  $k$  เท่ากับมุมเฟสของฮาร์มอนิกกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานลำดับ  $k$  สามารถคำนวณกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานได้ดังนี้

$$i_R(t) = I_0 + \sum_{k=1}^N I_{Rk} \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (5)$$

เมื่อ  $I_{Rk}$  คือ ฮาร์มอนิกลำดับที่  $k$  ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานแทนสมการ (4) และ (5) ใน (3) จะได้สมการกระแสรั่วไหลรวมใหม่ดังนี้

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^N I_{Ck} \cos(k\omega t + \alpha_k) + \sum_{k=1}^N I_{Rk} \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (6)$$

จากคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก “อินทิกรัลของผลคูณของฟังก์ชันตรีโกณมิติ 2 ฟังก์ชันในช่วงเวลา 1 คาบ มีค่าเท่ากับศูนย์” ดังนั้น เมื่อคูณทั้ง 2 ข้างของสมการ (6) ด้วย  $\sin(k\omega t + \alpha_k)$  แล้วคำนวณหาอินทิกรัลทั้งสองข้าง

## บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

สมการในช่วงเวลา 1 คาบ จะได้สมการสำหรับคำนวณแอมพลิจูดของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานฮาร์มอนิกลำดับ  $k$  ดังนี้

$$I_{Rk} = I_k (\cos \beta_k \cos \alpha_k + \sin \beta_k \sin \alpha_k) \quad (7)$$

ในทำนองเดียวกัน ถูคูณทั้ง 2 ข้างของสมการ (6) ด้วย  $\cos(k\omega t + \alpha_k)$  จะได้สมการสำหรับคำนวณแอมพลิจูดของกระแสรั่วไหลผ่านความจุฮาร์มอนิกลำดับ  $k$  ดังนี้

$$I_{Ck} = I_k (\sin \beta_k \cos \alpha_k + \cos \beta_k \sin \alpha_k) \quad (8)$$

การคำนวณ  $I_{Rk}$  ด้วยวิธี HAM จะแม่นยำในกรณีที่มุมเฟสของแรงดัน  $u(t)$  เท่ากับมุมเฟสของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทาน  $i_R(t)$  ซึ่งกับดักเสิร์จนั้นจะต้องประกอบด้วยความต้านทานแบบเชิงเส้น แต่เนื่องจากกับดักเสิร์จที่ใช้งานทั่วไปในปัจจุบันประกอบด้วยความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าวิธีนี้แม่นยำมากพอในการวิเคราะห์สถานะของกับดักเสิร์จชนิด MO

### 2.3 วิธีกระแสเชิงตั้งฉาก

สำหรับการคำนวณกระแสรั่วไหลผ่านต้านทานด้วยวิธีกระแสตั้งฉาก (Current orthogonality method, COM) [7] การคำนวณด้วยวิธีนี้อาศัยหลักการที่กระแส  $i_R(t)$  ตั้งฉากกับกระแสรั่วไหลผ่านความจุ  $i_C(t)$  นอกจากนี้ วิธีนี้ยังสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance,  $C$ ) ของกับดักเสิร์จได้ ค่ากระแส  $i_R(t)$  สามารถคำนวณได้จากผลต่างระหว่างกระแส  $i(t)$  กับกระแส  $i_C(t)$  โดยที่กระแส  $i_C(t)$  สามารถคำนวณได้จากผลคูณของความจุไฟฟ้า  $C$  กับอนุพันธ์ของฟังก์ชันแรงดัน ( $du(t)/dt$ ) รายละเอียดการคำนวณ  $I_{Rk}$  ด้วยวิธี COM แสดงดังต่อไปนี้

กำหนดให้  $i_C^*(t)$  เท่ากับ กระแสรั่วไหลผ่านความจุเมื่อแรงดันถูกจ่ายไปยังตัวเก็บประจุ  $C$  ดังรูปที่ 1 มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$i_C^*(t) = \frac{du(t)}{dt} = \frac{i_C(t)}{C} \quad (9)$$

จากสมการ (4) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$i_C(t) = C i_C^*(t) \quad (10)$$

อินทิกรัลของผลคูณของกระแสรั่วไหล  $i(t)$  และกระแส  $i_C^*(t)$  ใน 1 คาบเวลา  $T$  ของแรงดัน แสดงดังนี้

$$A = \int_0^T i_C^*(t) i(t) dt \quad (11)$$

แทนสมการ (3) และ (10) ใน (11) จะได้

$$A = \int_0^T i_C^*(t) (i_R(t) + C i_C^*(t)) dt = C \int_0^T i_C^*(t)^2 dt \quad (12)$$

สมการ (11) = (12) จะได้สมการความจุไฟฟ้าจริงของกับดักเสิร์จดังนี้

$$C = \frac{\int_0^T i_C^*(t) i(t) dt}{\int_0^T i_C^*(t)^2 dt} \quad (13)$$

เมื่อ  $i_C^*(t)$  เท่ากับ อนุพันธ์ของฟังก์ชันแรงดันใน (1) จะได้

$$i_C^*(t) = \sum_{k=1}^N k\omega U_k \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (14)$$

ค่า  $U_k$  และ  $\alpha_k$  ได้จากการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast fourier transform, FFT) ของ (1) จากนั้นคำนวณค่า  $C$  โดยตรงด้วย (13) เพราะในทางปฏิบัติ จะทราบค่าของสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวม  $i(t)$  จากการวัด

เมื่อแทน (13) และ (14) ใน (3) สามารถคำนวณกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานได้ดังนี้

$$i_R(t) = i(t) + C i_C^*(t) \quad (15)$$

ค่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ( $I_{R3}$ ) สามารถคำนวณได้จากการคำนวณ FFT ของสมการ (15)

## 3. การคำนวณด้วยโปรแกรมแมทแลบ (Matlab)

### 3.1 แบบจำลองกับดักเสิร์จ

จำลองการทำงานของกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ ในภาวะเกิดแรงดันเกินในระบบ โดยใช้วงจรสมมูลอย่างง่ายของกับดักเสิร์จ ดังรูปที่ 1 ด้วยโปรแกรมแมทแลบ (Matlab) [8] รายละเอียดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น (Defaulted parameters) ต่างๆของแบบจำลองมี ดังนี้ 1) ค่ายอดแรงดันมูลฐาน (fundamental voltage amplitude) เท่ากับ 12.73 kV มีมุมเฟสเท่ากับ 0 เรเดียน 2) ค่าความจุไฟฟ้า  $C$  เท่ากับ 57 pF 3) ค่าความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) เท่ากับ 50 Hz และ 4) ค่าลักษณะเส้นแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จ  $U-I$  ได้จาก [8] โดยมีความถี่ของการสุ่ม (Sampling frequency,  $F_s$ ) เท่ากับ 5 kHz และความยาวของสัญญาณข้อมูล เท่ากับ 1000 จุด

จากการจำลองการทำงานของกับดักเสิร์จด้วยโปรแกรมแมทแลบนี้จะได้ รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน  $u(t)$  สัญญาณกระแสรั่วไหลรวม  $i(t)$  สัญญาณกระแสรั่วไหลผ่านความจุ  $i_C(t)$  และสัญญาณกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น  $i_R(t)$  ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง นอกจากนี้ ค่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานอ้างอิงจะถูกคำนวณด้วย FFT และจะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิง ( $I_{R3R}$ )

## บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

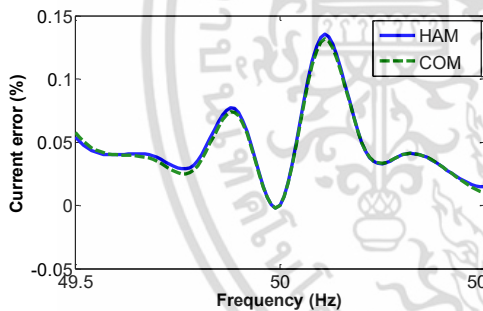
Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

การคำนวณ  $i_{R3}(t)$  จากสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี COM และวิธี HAM โดยใช้โปรแกรมเมทแลบ ภายใต้เงื่อนไขดังนี้ 1)ผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทางความถี่ 2)ผลกระทบจากฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของแรงดัน 3)ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อแรงดัน และ 4)ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหล จากนั้นคำนวณค่าแอมพลิจูดของ  $I_{R3}$  และเปรียบเทียบค่า  $I_{R3}$  ที่ได้จากการคำนวณจากทั้ง 2 วิธีกับค่าอ้างอิง  $I_{R3R}$

### 3.2 ผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทางความถี่

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้กำหนดเกณฑ์ของความถี่ของไฟฟ้าในระบบที่สภาวะการทำงานปกติให้มีค่าไม่เกิน  $50 \text{ Hz} \pm 0.5 \text{ Hz}$  [9] ดังนั้น บทความนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบการเบี่ยงความถี่ต่อการคำนวณค่าแอมพลิจูดของ  $I_{R3}$  ในช่วงความถี่ 49.5 Hz ถึง 50.5 Hz โดยที่ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์อื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลง

เปรียบเทียบผลการคำนวณแอมพลิจูดของ  $I_{R3}$  ที่ได้จากวิธี COM และวิธี HAM เมื่อความถี่เบี่ยงเบนไปจากความถี่มาตรฐาน  $\pm 0.5 \text{ Hz}$  กับค่าอ้างอิง  $I_{R3R}$  ค่าความคลาดเคลื่อนแอมพลิจูดเฉลี่ยสัมพัทธ์ (mean amplitude of relative error) ของทั้ง 2 วิธี แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนในการคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานต่อความถี่

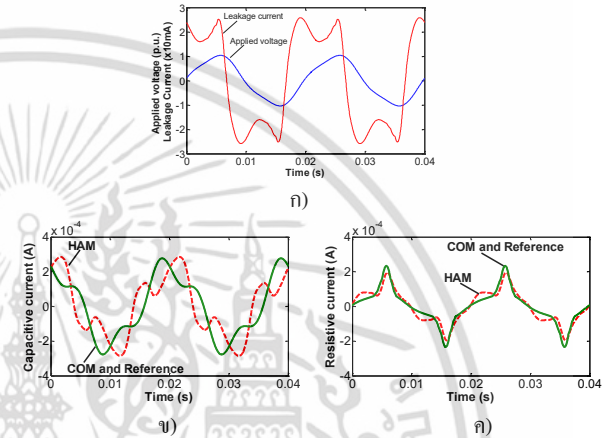
จากรูปที่ 2 สรุปได้ว่า เมื่อความถี่เบี่ยงเบนไปจากความถี่มาตรฐาน  $-0.5 \text{ Hz}$  ถึง  $0.5 \text{ Hz}$  ค่าของความถี่ที่เบี่ยงเบนไปส่งผลกระทบต่อค่า  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM และวิธี HAM น้อยมาก ซึ่งวิธี HAM มีค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$  ใกล้เคียงกับวิธี COM โดยทั้ง 2 วิธี มีค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$  น้อยกว่า 0.15%

### 3.3 ผลกระทบจากฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของแรงดันไฟฟ้า

ศึกษาผลกระทบจากฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของแรงดันไฟฟ้าต่อการคำนวณ  $I_{R3}$  เมื่อสัญญาณแรงดันมีค่าแอมพลิจูดฮาร์มอนิกลำดับ 3 ( $U_3$ ) ตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.1 เท่าของแอมพลิจูดแรงดันมูลฐาน ( $U_1$ ) โดยที่มุมเฟสของ  $U_3$  แตกต่างจาก  $U_1$  ตั้งแต่ 0 ถึง  $2\pi$  เรเดียน เพิ่มขึ้นครั้งละ  $\pi/3$  เรเดียน

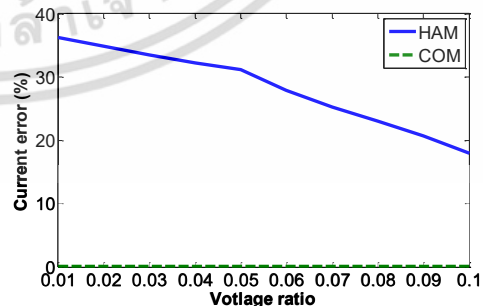
จากนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยของ  $I_{R3}$  เพื่อให้ผลการคำนวณน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยที่ค่าเริ่มต้นของแบบจำลองพารามิเตอร์อื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 3 แสดง รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่มีฮาร์มอนิกลำดับ 3 และสัญญาณกระแสรั่วไหลรวม รูปคลื่นกระแสรั่วไหลผ่านความจุ และรูปคลื่นกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น จะเห็นว่าการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM มีความแม่นยำมากกว่าวิธี HAM เมื่อเทียบกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 3 รูปคลื่น ก) สัญญาณแรงดันที่มีสัญญาณรบกวนและกระแสรั่วไหล ข) กระแสรั่วไหลผ่านความจุ ค) กระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีฮาร์มอนิกลำดับ 3)

รูปที่ 4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนแอมพลิจูดเฉลี่ยสัมพัทธ์ของการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM และวิธี HAM จะเห็นว่าการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี HAM มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ลดลงจาก 36% ถึง 18% เมื่อค่าแอมพลิจูดของ  $U_3$  มีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.01 ถึง 0.1 เท่าของ  $U_1$  ในขณะที่การคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM มีความคลาดเคลื่อนน้อยมากซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 0 %



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนในการคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานต่ออัตราส่วนแรงดัน

## บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

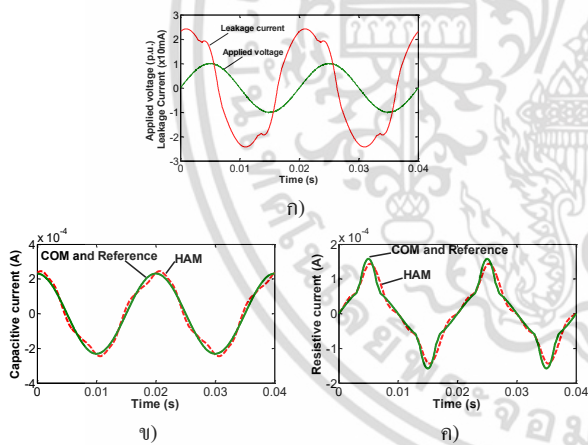
Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

เมื่อมอมเฟสของฮาร์โมนิกลำดับ 3 ของแรงดันแตกต่างจากมุมเฟสของแรงดันมูลฐานจะทำการหาค่าความ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี HAM มีความคลาดเคลื่อนสูง ในขณะที่ความแตกต่างของมุมเฟสทั้งสองนี้จะไม่ส่งผลต่อการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM

### 3.4 ผลกระทบสัญญาณรบกวนต่อแรงดันไฟฟ้า

ในระบบการวัดทุกระบบจะมีสัญญาณที่ไม่ต้องการเข้ามารบกวน อย่างเช่น สัญญาณรบกวนจากเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณรบกวนจากธรรมชาติ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น ในการศึกษาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณแรงดันของบทความนี้ จะใช้สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (Additive white Gaussian noise, AWGN) เพิ่มเข้าไปให้สัญญาณแรงดัน โดยมีอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่ต้องการต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise Ratio, SNR) ที่เข้ามาในระบบอยู่ในช่วง 40 ถึง 50 dB

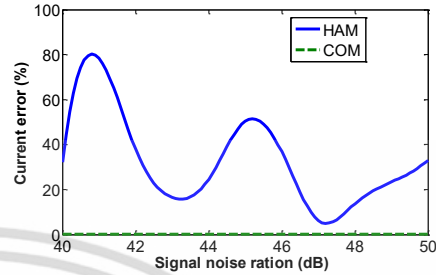
รูปที่ 5 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่มีสัญญาณรบกวนและสัญญาณกระแสรั่วไหล รูปคลื่นกระแสรั่วไหลผ่านความจุ และรูปคลื่นกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น จะเห็นว่าการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM มีความแม่นยำมากกว่าวิธี HAM เมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง  $I_{R3R}$



รูปที่ 5 รูปคลื่น (ก) สัญญาณแรงดันที่มีสัญญาณรบกวนและกระแสรั่วไหล (ข) กระแสรั่วไหลผ่านความจุ (ค) กระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นต่อเวลา (เมื่อแรงดันมีสัญญาณรบกวน)

รูปที่ 6 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนแอมพลิจูดเฉลี่ยสัมพัทธ์ของการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM และวิธี HAM จะเห็นว่าการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี HAM มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 4% ถึง 80% เมื่อสัญญาณแรงดันมีสัญญาณรบกวนที่มี SNR ในช่วง 40dB ถึง 50dB ในขณะที่การคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี HAM มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0% เมื่อมีสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณแรงดันจะทำให้มุมเฟสของแรงดันไม่แน่นอน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้วิธี HAM มีความคลาดเคลื่อนใน

การคำนวณ  $I_{R3}$  แต่ความไม่แน่นอนของมุมเฟสของสัญญาณแรงดันนี้ไม่ส่งผลต่อการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี COM

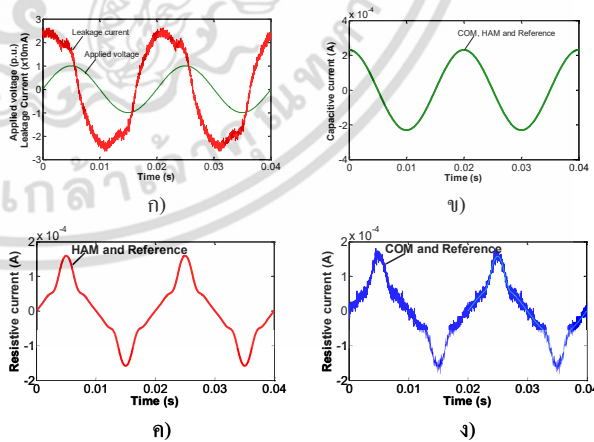


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนในการคำนวณฮาร์โมนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานต่อ SNR

### 3.5 ผลกระทบสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหล

โดยปกติกระแสรั่วไหลจะมีสัญญาณเข้ามารบกวนได้ง่ายกว่าแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากกระแสรั่วไหลมีค่าต่ำในระดับ mA สัญญาณรบกวนของกระแสรั่วไหลในที่มีเป็นสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวกเช่นเดียวกับแรงดัน ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่ต้องการต่อกำลังของสัญญาณรบกวน อยู่ในช่วง 20dB ถึง 50dB

รูปที่ 7 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่มีสัญญาณรบกวนและสัญญาณกระแสรั่วไหลรวม รูปคลื่นกระแสรั่วไหลผ่านความจุ และรูปคลื่นกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น จะเห็นว่าการคำนวณ  $I_{R3}$  ด้วยวิธี HAM มีค่าใกล้เคียงกับวิธี COM ถึงอย่างไรก็ตามวิธี COM มีความแม่นยำมากกว่าวิธี HAM เมื่อเทียบกับรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 7 รูปคลื่น (ก) สัญญาณแรงดันที่มีสัญญาณรบกวนและกระแสรั่วไหลรวม (ข) กระแสรั่วไหลผ่านความจุ และกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นคำนวณจาก (ค) วิธี HAM และ (ข) วิธี COM ต่อเวลา (เมื่อกระแสรั่วไหลมีสัญญาณรบกวน)

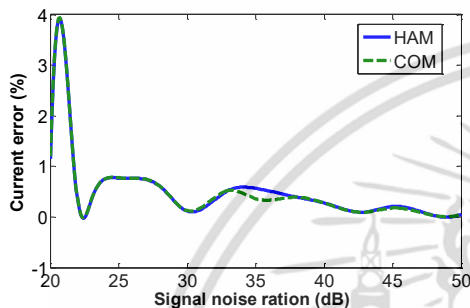
## บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

รูปที่ 8 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนแอมพลิจูดเฉลี่ยสัมพัทธ์ของการคำนวณ  $I_{R3}$  จากวิธี COM และวิธี HAM จะเห็นว่าการคำนวณ  $I_{R3}$  จากทั้ง 2 วิธี มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 4 % เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมมีสัญญาณรบกวนที่มี SNR ในช่วง 20dB ถึง 50dB

เมื่อมีสัญญาณรบกวนต่อกระแสรั่วไหลจะทำให้มุมเฟสของกระแสรั่วไหลรวมไม่แน่นอน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ทั้งสองวิธีนี้มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ  $I_{R3}$



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนในการคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานต่อ SNR

### 4. วิเคราะห์และสรุปผลการคำนวณ

จากผลการคำนวณกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานด้วยวิธีกระแสเชิงตั้งฉาก (COM) และวิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (HAM) โดยใช้โปรแกรมแมทแลบ พบว่า การคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธี HAM จะแม่นยำและมีค่าใกล้เคียงกับวิธี COM เมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง ถ้ามุมเฟสของสัญญาณแรงดันเท่ากับ  $2\pi n$  เรเดียน เมื่อ  $n = 0, 1, 2, \dots$  แต่อย่างไรก็ตาม วิธี HAM จะมีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นมากกว่าวิธี COM เมื่อ 1) มุมเฟสของสัญญาณแรงดัน และ 2) มุมเฟสระหว่างฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของแรงดันกับแรงดันมูลฐาน แตกต่างจากมุมเฟสที่ได้กล่าวไปข้างต้น

สำหรับการคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธี COM จะมีความแม่นยำมากกว่าวิธี HAM ในทุกกรณีศึกษา แต่วิธี COM จะมีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณฮาร์มอนิกลำดับ 3 ของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น สูงสุดจากทั้ง 4 กรณี เมื่อสัญญาณกระแสรั่วไหลมีสัญญาณรบกวนที่มีค่า SNR เท่ากับ 21 dB ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 4%

### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและบริษัท แอลจี อิเล็กทรอนิกส์

ประเทศไทย และขอขอบคุณ คุณวคุณ ไตรรัตน์ภักดิ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อมูลสำหรับการจำลองกับคัสเตอร์จินิกโลหะออกไซด์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.สำราญ สังข์สะอาด, “การลดนาระบบไฟฟ้าแรงสูงและการป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ,” วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, หน้า 8-11 – 8-15, มีนาคม 2549
- [2] K. P. Mardira, M. Darveniza, and T. K. Saha, “Search for new diagnostics for metal oxide surge arrester,” in Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Prop. Appl. Dielect. Mater., Xi’an, China, 2000, vol.2, pp.947-950
- [3] C.Heinrich and V. Hinrichsen, “Diagnostics and monitoring of metaloxide surge arresters in high-voltage networks- comparison of existing and newly developed procedures,” IEEE Trans. Power Del.; vol:16, no. 1, pp. 138-143, Jan. 2001.
- [4] H.X.Zhu and M. R. Raghuvver, “Influence of representation model and voltage harmonics on metal oxide surge arrester diagnostics,” IEEE Trans. Power Del.; vol. 16, no. 4, pp. 599-603, Oct. 2001.
- [5] S. Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Kurita, K. Goto, and M. Sakai, “Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector,” IEEE Trans. Power Del.; vol. 3, no. 3, pp. 998-1003, Jul. 1988.
- [6] R. J. Liao, Z. Y. Wang, C. X. Sun, L. G. Gu, P. Yan, and B. Yang, “The harmonic analysis method and its applications in the on-line detection of electric equipment insulation,” in Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Prop. Appl. Dielect. Mater., Xi’an, china, 2000, pp. 474-478.
- [7] Z. Xu, L. Zhao, A. Ding, and F. Lü, “A current orthogonality method to extract resistive current of MOSA,” IEEE Trans. Power Del.; vol. 28, no. 1, pp. 93-101, Jan. 2013.
- [8] นวคุณ ไตรรัตน์ภักดิ์, “การคำนวณทางจรไฟฟ้าของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น,” วิทยานิพนธ์ระดับมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สจล., กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, 2557, หน้า 20
- [9] กระทรวงพลังงาน, “ประเด็นยุทธศาสตร์ด้านการพัฒนาความเชื่อถือได้และคุณภาพของไฟฟ้า,” แผนแม่บทการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ทกริดของประเทศไทย พ.ศ. 2558-2579, กุมภาพันธ์ 2558, หน้า ค.10

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวพัชรินทร์ มุลมิรัตน์  
 วัน เดือน ปีเกิด 2 กุมภาพันธ์ 2534 ที่กาฬสินธุ์  
 ที่อยู่ 12/885 หมู่ 4 ถ.รังสิต-นครนายก  
 ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120 โทร.085-6596067  
 ประวัติการศึกษา 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ1)  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การตรวจสอบสถานะของกัปดักแรงดันเกิน  
 2.) การสอบเทียบตัวเก็บประจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐาน  
 3.) การสอบเทียบเครื่องมือวัด LCR Meter  
 ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย  
 พ.ศ.2556-ปัจจุบัน ตำแหน่งนักมาตรวิทยาปฏิบัติการสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ  
 - ผลงานการพัฒนาระบบการวัดความจุไฟฟ้ามาตรฐานที่ความถี่ในช่วง 10 kHz  
 ถึง 1 MHz  
 ปัจจุบัน นักศึกษาหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้