



การวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่เพื่อประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
Frequency Response Analysis For Power Transformer

นายธีรภัทร ทวีวงศ์
Mr. Teerapat Thaweewong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีการศึกษา 2561



การวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่เพื่อประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
Frequency Response Analysis For Power Transformer

นายธีรภัทร ทวีวงศ์
Mr. Teerapat Thaweewong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่เพื่อประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
ชื่อ นามสกุล นายธีรภัทร ทวีวงศ์
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์)

..... กรรมการและเลขานุการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(อาจารย์ ดร. ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)

วันที่ 22 เดือน เมษายน พ.ศ. 2562

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ผลตอบสนองของความถี่เพื่อประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
ชื่อ นามสกุล	นายธีรภัทร ทวีวงศ์
รหัสนักศึกษา	056070403502-4
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทำการตรวจสอบหาความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ โดยทำการป้อนความถี่ตั้งแต่ 2 Hz ถึง 2 MHz แล้วนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงมาตรฐาน พิจารณาลักษณะความแตกต่างของกราฟที่แสดงการตอบสนองความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์การเสีรูปของแกนเหล็กและขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้รู้สภาพภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัดขนาด 50 MVA พิกัดแรงดัน 115 kV/22 kV ขดลวดเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง ในเฟส A ทั้งด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ เนื่องจากเกิดความผิดปกติในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจากกระแสลัดวงจรที่เฟส A เป็นเหตุให้หม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถใช้งานในระบบไฟฟ้าต่อไปได้ และทำการแจ้งเตือนเพื่อดำเนินการซ่อมหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป

คำสำคัญ : เอฟอาร์เอ, หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, การตอบสนองความถี่

Thesis title Frequency Response Analysis For Power Transformer
Author Mr. Teerapat Thaweewong
Student ID 056070403502-4
Degree Master of Engineering
Major program Electrical Engineering
Thesis Advisor (s) Assoc. Prof. Dr. Nattachote Rugthaicharoencheep
Assist. Prof. Dr. Sakhon Woothipatanapan
Academic Year 2018

ABSTRACT

This paper presents an analysis of transformer faults to determine the damage occurring within the transformer by the frequency response analysis (FRA) method. Enter the frequency from 10 Hz to 3 MHz, and then the measured value is compared to the standard reference value. Consider the different graphs of frequency response in various frequency ranges to analyze the deformation of the iron cores and transformer coils to know the internal condition of the transformer. The tests show that the 50 MVA 115 kV/22 kV transformer has severe damage to the high voltage side and low voltage side of phase-A coil. As a result, the transformer can not be used in the power system, and make a reminder to repair the transformer.

Keywords: FRA, Power Transformer, Frequency Response

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของรองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และกองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง และ กองทดสอบหม้อแปลง ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่รวมถึงวัสดุอุปกรณ์ต่างๆสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา และรวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ ทีมงานวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้กำลังใจและร่วมแรงใจในการปฏิบัติงานตลอดมา

ธีรภัทร ทวีวงศ์



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์หลักของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 โครงสร้างของโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า	4
2.3 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า	7
2.4 การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	8
2.5 การตรวจวัดทางไฟฟ้า	8
2.6 แรงแม่เหล็กไฟฟ้า	17
2.7 การทดสอบผลตอบสนองของความถี่	19
2.8 เทคนิคในการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่	20
2.9 การวินิจฉัยความผิดปกติ	25
2.10 การเปรียบเทียบ	26
2.11 กรณีศึกษา	27
บทที่ 3 การออกแบบและคำนวณ	29
3.1 การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า	29
3.2 วิธีการตรวจวัด	29
3.3 การทดสอบการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	29
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ	31
3.5 วิธีการต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	33
3.6 โปรแกรมในการกำหนดค่าในการวัดและการแสดงผล	37

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 การวิเคราะห์และผลการทดสอบ	40
4.1 การวิเคราะห์และผลการทดสอบ	40
บทที่ 5 สรุปผล	51
5.1 สรุปผลการทดสอบ	51
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	55
ประวัติผู้จัดทำปฏิญานิพนธ์	66



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า PI ในการพิจารณาสภาพของหม้อแปลงฟ้า	8
2.2 ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	9
2.3 ค่าสภาพของฉนวน (%PF) ที่ 20 องศาเซลเซียส	9
2.4 ค่ากระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูง	10
2.5 ระดับค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็ก	10
2.6 ระดับความถี่ที่ใช้พิจารณาความผิดปกติ	26
5.1 ตารางสรุปผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 50 MVA	51



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส	4
2.2 โครงสร้างภายในของหม้อแปลง	5
2.3 การเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า	6
2.4 วงจรวัดค่าสภาพของฉนวน (%PF)	9
2.5 Change of tap transformer	12
2.6 ตัวอย่างผลการทดสอบหม้อแปลงในการวัดกระแสกระตุ้น	12
2.7 เครื่อง Megger	13
2.8 ทดสอบ Winding resistance หม้อแปลง Distribution	13
2.9 ขั้นตอนการ Set และ Run เครื่อง DGA	14
2.10 ขั้นตอนการนำผลที่ได้จากเครื่อง DGA มาจับกราฟเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล	14
2.11 การฉีดตัวอย่างน้ำมันเข้าเครื่องทดสอบ moisture content	15
2.12 เครื่องทดสอบ Degree of polymerization	16
2.13 เครื่องทดสอบ Dielectric breakdown voltage	16
2.14 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	17
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวรัศมีและแรงในแนวแกน	18
2.16 แรงในแนวรัศมี (Radial Force)	18
2.17 แรงในแนวแกน (Axial Force)	18
2.18 ความสัมพันธ์ของค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน	19
2.19 ความสัมพันธ์ในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	20
2.20 การแบ่งย่านความถี่ต่างๆในการตรวจวัด	22
2.21 การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Open, Open Circuit Self Admittance	23
2.22 การเชื่อมต่อแบบ End to End Short Circuit ,Short Circuit Self Admittance	24
2.23 การเชื่อมต่อแบบ Capacitive Inter – Winding (CIW) หรือ Inter – Winding	24
2.24 การเชื่อมต่อแบบ Inductive Inter Winding (IIW) หรือ Transfer Admittance	25
2.25 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนและหลังการเกิดการลัดวงจร	26
2.26 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนการบำรุงรักษา	27
2.27 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงหลังการบำรุงรักษา	27
2.28 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนและหลังการเกิดความผิดปกติ	28
3.1 การปลดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	30
3.2 การเชื่อมต่อของเครื่อง Winding analyser 2293	30
3.3 วิธีการเชื่อมต่อเครื่องทดสอบ FRA 5310	31
3.4 วิธีการเชื่อมต่อสายสัญญาณจากเครื่องทดสอบFRA 5310 กับขั้วของหม้อแปลง	31
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ	32
3.6 จุดต่างๆในการต่อสายสัญญาณ	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.7 จุดในการต่อสาย Ground	32
3.8 การต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ HV open circuit H1-H2	33
3.9 การต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ HV open circuit H2-H3	33
3.10 การต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ HV open circuit H3-H1	34
3.11 การต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ Short HV LV. H1H2, X1X2X3	34
3.12 การต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ Short HV LV. H2H3, X1X2X3	35
3.13 การต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ Short HV LV. H3H1, X1X2X3	35
3.14 การต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ LV open circuit X1 – X0	36
3.15 การต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ LV open circuit X2 – X0	36
3.16 การต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ LV open circuit X3 – X0	37
3.17 การกรอกค่าประจำตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า	37
3.18 การกำหนด Vector Group ของหม้อแปลงไฟฟ้า	38
3.19 การกำหนดค่าความถี่และค่าต่างๆ ในกราฟการประมวลผล	38
3.20 การตอบสนองของความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า	39
3.21 ความสัมพันธ์ของการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	39
4.1 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H1 – H2 [OPEN]	40
4.2 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H2 – H3 [OPEN]	41
4.3 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H3 – H1 [OPEN]	42
4.4 บทวิเคราะห์ขดลวดลัดวงจรถึงกันของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149	42
4.5 กราฟการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149	43
4.6 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H1-H2, X1-X2-X3 [Short circuit]	43
4.7 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H2-H3, X1-X2-X3 [Short circuit]	44
4.8 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H3-H1, X1-X2-X3 [Short circuit]	44
4.9 บทวิเคราะห์ขดลวดลัดวงจรถึงกันของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149	45
4.10 กราฟการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149	45
4.11 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ X1 – X0 [OPEN]	46
4.12 บทวิเคราะห์การเสีรูปของขดลวดแนวแกนของหม้อแปลงตาม IEEE C57.149	46
4.13 กราฟการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149	47
4.14 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ X2 – X0 [OPEN]	47
4.15 บทวิเคราะห์การเสีรูปของขดลวดแนวแกนของหม้อแปลงตาม IEEE C57.149	48
4.16 กราฟการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149	48
4.17 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ X3 – X0 [OPEN]	49
4.18 บทวิเคราะห์การเสีรูปของขดลวดแนวแกนของหม้อแปลงตาม IEEE C57.149	50

บทที่ 1

บทนำ

บทนำของวิทยานิพนธ์เรื่องการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่เพื่อประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง มีเนื้อหาทั้งหมด 4 ส่วนด้วยกันคือ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยในแต่ละส่วนมีรายละเอียดของเนื้อหา ดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการเติบโตในด้านธุรกิจและอุตสาหกรรมต่อเนื่อง จึงทำให้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในการพัฒนาธุรกิจและอุตสาหกรรมในประเทศ ดังนั้น ระบบไฟฟ้าจะต้องมีเสถียรภาพสูง มีความมั่นคงทางไฟฟ้า และมีความเชื่อถือได้ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังถือว่าเป็นอุปกรณ์หลักตัวหนึ่งที่ใช้ในการส่งผ่านพลังงานในระบบไฟฟ้า

การใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังไม่สามารถหลีกเลี่ยงความผิดปกติที่เกิดจากความผิดปกติ (Fault) ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจากกระแสลัดวงจร (Short Circuit Current) ได้ บางครั้งอาจจะเกิดจากความผิดปกติภายในหม้อแปลง (Internal Fault) เองซึ่งปกติบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าจะพิจารณาออกแบบความแข็งแรงของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้ทนต่อกระแสลัดวงจรที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ก็ตาม แต่ไม่อาจที่ครอบคลุมความรุนแรงจากกระแสลัดวงจรที่มีค่าเกินการออกแบบให้รอดพ้นจากความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด หากเกิดความผิดปกติขึ้นมีความรุนแรงหรือเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ย่อมจะทำให้แกนเหล็กและขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้นมีโอกาสเสียรูปได้ โดยการเสียรูปจะเริ่มต้นจากด้วยแรงทางกล (Mechanical Force) ก่อน และเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเสียรูปไปแล้วจะทำให้เกิดความเสียหายทางไฟฟ้าตามมาซึ่งจะรุนแรงจนเป็นเหตุให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความเสียหายและยากต่อการแก้ไขในที่สุด สาเหตุเหล่านี้จำเป็นต้องมีการประเมินสภาพของแกนเหล็กและขดลวดทุกครั้งเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรดังกล่าว

วิธีการทดสอบหาความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ในย่านต่างๆ เพื่อหาสาเหตุความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังรุ่นเดียวกัน ปีเดียวกัน รายละเอียดและผลการทดสอบที่ได้ จะสามารถบ่งบอกถึงความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อเป็นผลประกอบการวิเคราะห์ ประเมินสภาพและซ่อมบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังก่อนที่จะเกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าโดยรวมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการตอบสนองความถี่ในย่านความถี่ต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์วิธีการตอบสนองความถี่ในย่านความถี่ต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.2.3 เปรียบเทียบวิธีการทดสอบความถี่ตอบสนองของหม้อแปลงไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตการศึกษา

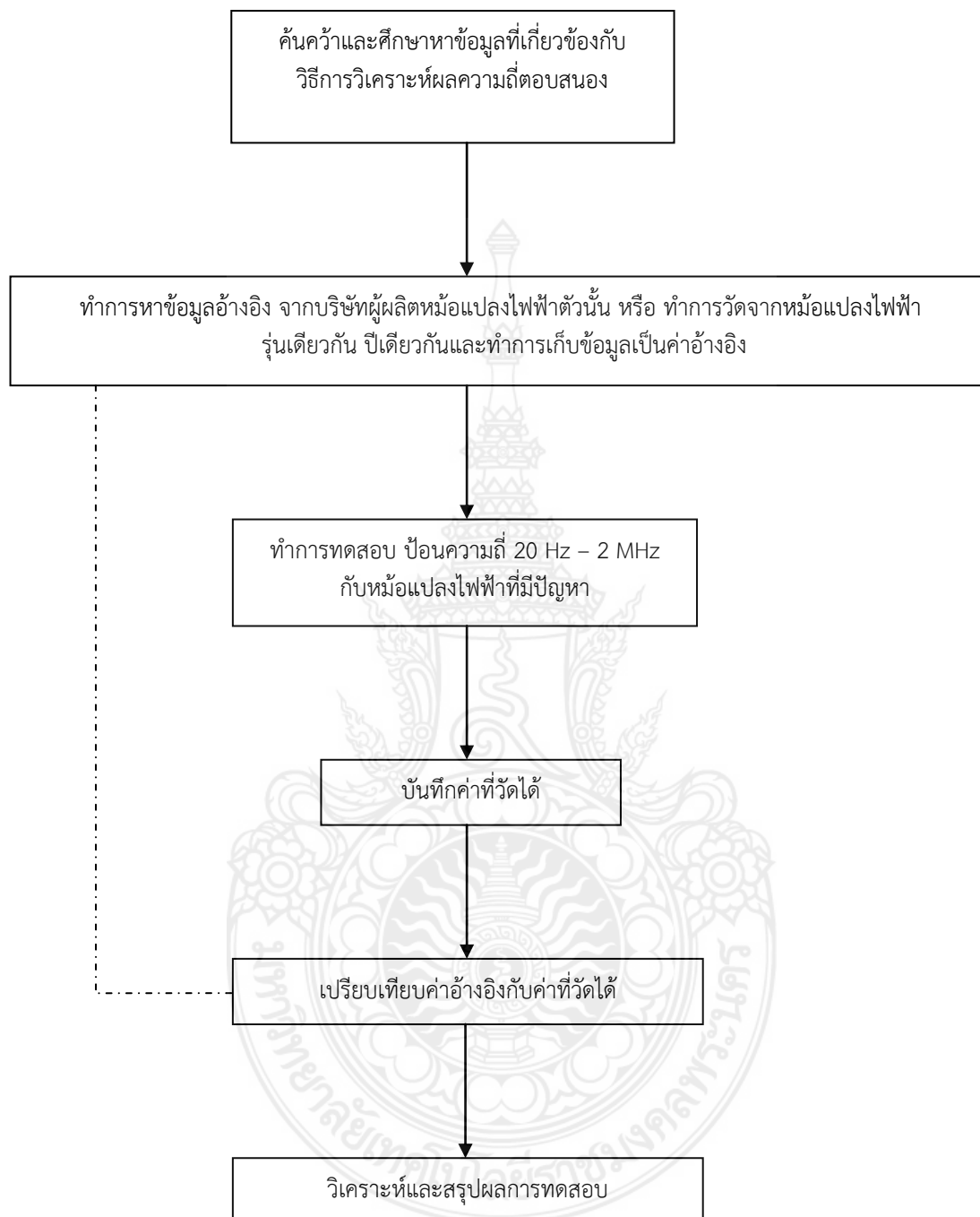
- 1.3.1 ศึกษากระบวนการตรวจสอบหม้อแปลงโดยวิธีการวิเคราะห์ผลการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า (Frequency Response Analysis ; FRA) ตามมาตรฐาน IEEE Std. C57 149
- 1.3.2 การทดสอบวิเคราะห์ความถี่ตอบสนองใช้ความถี่ประมาณ 20 Hz – 2 MHz นำสัญญาณมาวิเคราะห์ผล
- 1.3.3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองวิธีใช้พิกัด ขนาดตั้งแต่ 10 MVA ขึ้นไป
- 1.3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการตอบสนองความถี่ใช้เครื่อง FRA 5310 ในการทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เข้าใจหลักการทำงานของเครื่องตรวจสอบหม้อแปลงด้วยวิธีการตอบสนองความถี่
- 1.4.2 เข้าใจเทคนิคในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการตอบสนองความถี่
- 1.4.3 สามารถใช้หลักการและเหตุผลประกอบการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงในย่านความถี่ต่างๆ และสามารถอธิบายได้ว่าเกิดความผิดปกติ ในส่วนใดของหม้อแปลงไฟฟ้า



1.5 โครงสร้างของโครงการ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีเนื้อหาประกอบไปด้วย ส่วนหลักๆ ได้แก่ การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการกวาดความถี่ การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีอื่น การเปรียบเทียบ วินิจฉัย และกรณีศึกษา

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 Doble Engineering Company (2008) ได้ทำการผลิตเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบหม้อแปลงด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ ชื่อว่า Doble M5100 ซึ่งเครื่องสามารถปรับย่านความถี่ได้ ตั้งแต่ 20 Hz ถึง 2 MHz

1.2.2 Eilert Bjerkan (2012) ได้ทำการศึกษาวิธีการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ โดยเปรียบเทียบกันระหว่าง วิธีการกวาดความถี่และวิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ ซึ่งพบว่าการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการกวาดความถี่ เป็นวิธีที่ได้ผลออกมาถูกต้องแม่นยำกว่า วิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ

1.2.3 Mr. Mohammadreza Barzegaran (2015) ได้ทำการศึกษาคำวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลง เพื่อหาความผิดปกติ ของหม้อแปลงเนื่องจากการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงว่าเกิดความเสียหายที่ตำแหน่งใด โดยใช้ความถี่ 50 Hz ในการวัด

1.2.4 Muhammad Azizi Abdul Rahman (2017) ได้ทำการตรวจสอบคุณภาพของหม้อแปลง โดยการทดสอบด้วยวิธีการทั่วไปเพื่อตรวจสอบความเสียหายของหม้อแปลง และทำการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่และพบว่า การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่เป็นวิธี ที่สามารถบอกถึงความเสียหายในส่วน ของขดลวดและแกนของหม้อแปลง จึงพบว่าวิธี การวิเคราะห์ การตอบสนองความถี่เป็นวิธี ที่มีประสิทธิภาพ ในการตรวจสอบความผิดปกติ ของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า [1]

2.2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้ในการส่งผ่านพลังงานจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีก วงจรโดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปกติจะใช้เชื่อมโยงระหว่างไฟฟ้าแรงสูง และไฟฟ้าแรงต่ำ หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์หลักในระบบกำลังไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส

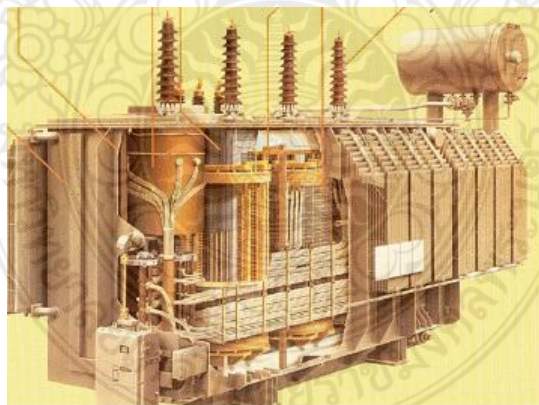
2.2.2 โครงสร้าง [2]

หม้อแปลงแบ่งออกตามการใช้งานของระบบไฟฟ้ากำลังได้ 2 แบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด

1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟสแต่ละชนิดมีโครงสร้างสำคัญประกอบด้วย

- ขดลวดตัวนำปฐมภูมิ (Primary Winding) ทำหน้าที่รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า
- ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) ทำหน้าที่จ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า
- ขั้วต่อสายไฟ (Terminal) ทำหน้าที่เป็นจุดต่อสายไฟกับขดลวด
- แผ่นป้าย (Name Plate) ทำหน้าที่บอกรายละเอียดประจำตัวหม้อแปลง
- อุปกรณ์ระบายความร้อน (Coolant) ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับขดลวด เช่น อากาศ, พัดลม, น้ำมัน หรือใช้ทั้งพัดลมและน้ำมันช่วยระบายความร้อน เป็นต้น
- โครง (Frame) หรือตัวถังของหม้อแปลง (Tank) ทำหน้าที่บรรจุขดลวด แกนเหล็กรวมทั้งการติดตั้งระบบระบายความร้อนให้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่
- สวิตช์และอุปกรณ์ควบคุม (Switch Controller) ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และมีอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย
- วัสดุที่ใช้ทำขดลวดหม้อแปลงโดยทั่วไปทำมาจากสายทองแดงเคลือบน้ำยาฉนวน มีขนาดและลักษณะลวดเป็นทรงกลมหรือแบนขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลง ลวดเส้นโตจะมีความสามารถในการจ่ายกระแสได้มากกว่าลวดเส้นเล็ก

หม้อแปลงขนาดใหญ่มักใช้ลวดถักแบบตีเกลียวเพื่อเพิ่มพื้นที่สายตัวนำให้มีทางเดินของกระแสไฟมากขึ้น สายตัวนำที่ใช้พันขดลวดบนแกนเหล็กทั้งขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอาจมีแทปแยก (Tap) เพื่อแบ่งขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ในหม้อแปลงขนาดใหญ่จะใช้การเปลี่ยนแทปด้วยสวิตช์อัตโนมัติ) ดังแสดงใน ดังภาพที่ 2.2

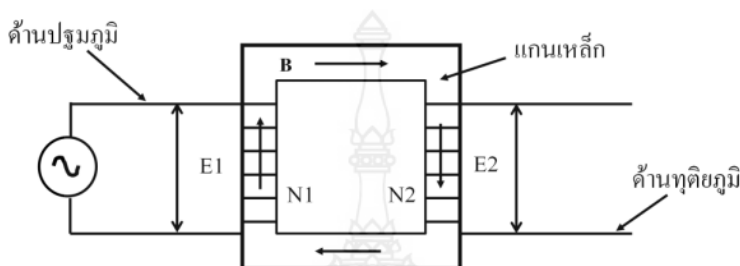


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างภายในของหม้อแปลง

2.2.3 หลักการทำงาน

กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) กล่าวว่า ถ้าเมื่อขดลวดได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้ขดลวดมีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กตามขนาดของรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ และทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดนี้

คำอธิบาย : เมื่อขดลวดปฐมภูมิได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ขึ้นอยู่กับ จำนวนรอบของขดลวด พื้นที่แกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กนี้เปลี่ยนแปลงตามขนาดของรูปคลื่นไฟฟ้าที่ได้รับ เส้นแรงแม่เหล็กเกือบทั้งหมดจะอยู่รอบแกนเหล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กผ่านขดลวด จะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมินี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า

สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้า คือ

$$E_1 = 4.44 \times N_1 \times f \times B \times A \quad (2.1)$$

$$E_2 = 4.44 \times N_2 \times f \times B \times A \quad (2.2)$$

เมื่อ E คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

f คือ ความถี่

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

2.2.4 ชนิดของหม้อแปลง ในระบบไฟฟ้ากำลัง [1]

ชนิดของหม้อแปลงอาจแบ่งได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามโครงสร้าง แบ่งตามตัวกลางที่ใช้เป็นฉนวนและตัวระบายความร้อน แบ่งตามขนาด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้แบ่งตามโครงสร้างออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

- แบบ Core Type ซึ่งประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆมาเรียงติดกันเป็นแท่งส่วนขดลวดจะพันทับขาของแกนเหล็กโดย ขดลวดปฐมภูมิ และ ขดลวดทุติยภูมิ แยกไว้คนละขาของแกนเหล็ก สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ขดลวดปฐมภูมิ และ ขดลวดทุติยภูมิ จะพันคนละขุดสวมอยู่ในแกนเดียวกันโดยขดลวดปฐมภูมียู่ด้านนอกส่วนขดลวดทุติยภูมียู่ด้านใน ดังนั้นแกนเหล็กแบบนี้ จึงเรียกว่าเป็นแบบขดลวดหุ้มแกน สำหรับหม้อแปลงเฟสเดียวมีขาแกนเหล็ก 2 ขา ส่วนหม้อแปลง 3 เฟสจะมีแกนเหล็ก 3 ขา

- แบบ Shell Type ลักษณะของแกนเหล็กแบบนี้ จะประกอบด้วยเหล็กบางๆ 2 ส่วน คือ รูปตัว E และตัว I นำมาเรียงติดกันเป็นแท่ง ขดลวดปฐมภูมิ และ ทุติยภูมิ จะพันทับกันบนขากลางของแกนเหล็ก จึงเรียกแกนเหล็กแบบนี้ ว่าชนิดแกนหุ้มขดลวด โดยหม้อแปลงเฟสเดียวมีขาแกนเหล็ก

3 ขา และหม้อแปลง 3 เฟส มีขาแกนเหล็ก 5 ขา แบ่งตามตัวกลางที่ใช้ เป็นฉนวนและตัวระบาย ความร้อนออกเป็น 2 ชนิด คือ

- แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Dry Type) ซึ่งใช้อากาศเป็นฉนวนระบายความร้อน แทนน้ำมันปัจจุบันมี ใช้ 2 แบบ คือ

- แบบ Air Ventilated หม้อแปลงแบบนี้ขดลวดจะสัมผัสกับอากาศโดยตรง หม้อแปลงชนิดนี้เมื่อพันขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำไปเคลือบฉนวนเช่น วานิช แล้วอบให้ ปราศจากความชื้น ประกอบกับแกนเหล็กให้ สมบูรณ์ไม่ต้องใส่ถังหม้อแปลง โดยเมื่อใช้งานจะนำไปประกอบอยู่ในตู้

- แบบ Cast Resin หม้อแปลงชนิดนี้จะทำการหล่อโดยใช้ฉนวนจำพวก Epoxy Resin หุ้มขดลวดปฐมภูมิ และ ทุติยภูมิ ด้วยระบบสุญญากาศ เพื่อไม่ให้ เกิดฟองอากาศขึ้นใน Epoxy Resin เพื่อป้องกันการปล่อยประจุผ่านฟองอากาศทำให้เกิดความเสียหายแก่ หม้อแปลงได้ หม้อแปลงชนิดนี้ จะทนต่อสภาพความชื้นได้ดีกว่าแบบ Air Ventilated แต่ การระบายความร้อน จากขดลวดสู่ฉนวน Epoxy Resin และระบายออกสู่อากาศต้องใช้เทคนิคสูงกว่าชนิดแรก

- แบบขดลวดจุ่มในน้ำมัน (Oil Immerse) ซึ่งใช้ของเหลวเป็นฉนวน และ ระบายความร้อน แบ่งตามขนาดได้ 3 ชนิด คือ

- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) เป็นหม้อแปลงขนาดใหญ่ ที่มีการติดตั้งตามสถานี ต้นทาง สถานี ย่อยของการไฟฟ้า บริษัทผลิตไฟฟ้าเอกชน หรือสถานี จ่ายไฟของโรงงานอุตสาหกรรม ขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่ โดยทั่วไปมี ขนาด 1 MVA จนถึงหลายร้อย MVA

- หม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformer) เป็นหม้อแปลงขนาดกลางที่ ใช้ในระบบ ของการจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง ติดตั้งบนเสาไฟฟ้า ผนังร้าน หรือวางบนพื้น โดยทั่วไปมี ขนาดตั้งแต่ 1 kVA – 20 MVA

- หม้อแปลงเพื่อการวัด (Instrument Transformer) เป็นหม้อแปลงสำหรับวัดค่าแรงดัน หรือกระแสไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟสูงๆ ซึ่งไม่สามารถใช้โวลท์มิเตอร์ หรือ แอมป์มิเตอร์ วัดได้โดยตรง เพราะอาจทำให้เครื่องมือวัดและบุคคลที่เข้าไปเกี่ยวข้องได้รับอันตราย

2.3 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า [1]

การบำรุงรักษา ส่วนใหญ่ มีจุดมุ่งหมายเพื่อ รักษาอุปกรณ์ ให้อยู่ในสภาพใหม่ และปลอดภัย อยู่เสมอ ซึ่งการกระทำเช่นนั้นอาจไม่เหมาะสมเมื่อคิดในแง่เศรษฐศาสตร์ เช่น ราคาในการบำรุงรักษาสูงเกินไปเมื่อเทียบกับมูลค่าของอุปกรณ์ หรือความเสี่ยงเมื่อเกิดความเสียหายดังนั้นการกำหนดตารางในการบำรุงรักษาจึงต้องคำนึงถึงหลายองค์ ประกอบ ทั้งทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- ความสำคัญของอุปกรณ์ ที่มีต่อระบบประเมินเป็นมูลค่าของความเสียหาย
- สภาพของการใช้งานนั้นเสี่ยงต่อความเสื่อมของอุปกรณ์ หรือไม่ เช่น หม้อแปลงมีความจำเป็นต้องจ่ายโหลดเกินพิกัดบ่อยครั้ง หรือมีการที่ป้องกันที่ไม่ดีนักต้องทำการตรวจสอบบ่อยขึ้น
- สภาพแวดล้อมของสถานที่ติดตั้ง เช่น ร้อนจัด มีฝุ่นมาก มีสารเคมีแพร่กระจายอยู่ในอากาศต้องมีการปรับระยะเวลาในการตรวจสอบให้เหมาะสม

2.4 การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าถือเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยจะมี การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ และยังทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่นานขึ้นซึ่งในระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยฉนวนน้ำมัน กระดาษ ซิลิคาต ฉนวนทองแดง โดยวัสดุ เหล่านี้ จะมีการเสื่อมสภาพเมื่อมี ความชื้น เหม่า หรือสิ่งเจือปนอื่นๆ และก๊าซปะปนอยู่ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุ ที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการลัดวงจร หรือระเบิดได้ดังนั้นจึงควรทำการตรวจสอบสภาพ และบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเป็นการลดความเสียหายที่ อาจเกิดขึ้นอีกทั้งยังทำให้ได้ ประโยชน์ และประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้าจึงต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ โดยทั่วไปจะมี การตรวจสอบทุกๆ 6 เดือน หรือ 1 ปี เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของ หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้ามักจะใช้การตรวจวัดทางไฟฟ้า และ การตรวจวัดทางน้ำมัน ในการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.5 การตรวจวัดทางไฟฟ้า [3]

2.5.1 การวัดค่าความต้านทานของฉนวน (Insulation Resistance Measurement)

สำหรับการทดสอบค่าความต้านทาน ของฉนวน เพื่อ ตรวจสอบ แนวโน้มของการเสื่อมสภาพของฉนวน ที่ เกิดขึ้น ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนในการทดสอบ เป็น วิธีการลัดวงจรของขดลวดในแต่ละขดของหม้อแปลงเข้าด้วยกันเพื่อที่จะให้แรงดันทดสอบมีค่าเท่ากันในแต่ละเฟสถ้าขดลวดทดสอบมี พิกัดแรงดันตั้งแต่ 3, 300 V ขึ้นไปให้ ทดสอบด้วยแรงดัน 2,500 Vdc และถ้าพิกัดแรงดันน้อยกว่า 3,300 V ลงมาให้ทดสอบด้วยแรงดัน 1,000 Vdc จากนั้นทดสอบตั้งแต่ 1 นาที ถึง 10 นาที แล้วคำนวณค่า Polarization Index (PI) หรือค่าอัตราส่วนความต้านทานฉนวนที่ นาที ที่ 10 ต่อ นาที ที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE C57.125-1999

ตารางที่ 2.1 ค่า PI ในการพิจารณาสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

สภาพ	PI
ดี	2.0
พอใช้	1.25 – 2.0
อาจเกิดความผิดปกติ	1.1 – 1.25
อันตราย	น้อยกว่า 1.1

2.5.2 การวัดค่าความสูญเสียทางฉนวน (Insulation Power – Factor Measurement)

สำหรับการวัดค่าความสูญเสียทางฉนวนจะทำการทดสอบเพื่อตรวจหาการย่อยสลายของฉนวนที่มักเกิดจาก ความชื้นหรือคาร์บอนที่ปนเปื้อนอยู่ ซึ่งจะบอกถึงการเสื่อมสภาพของฉนวน บุทซิ่งและขดลวด ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการวัดค่าความต้านทานของฉนวน ซึ่งจะบอกถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเป็น ทดสอบเพื่อวัดค่าการสูญเสียในฉนวน (Dielectric Loss) โดยผลที่วัดได้จะเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานที่สูญเสียไปในฉนวนกับผลคูณของแรงดันและกระแสที่จ่ายให้ กับหม้อแปลงนั้น จุดประสงค์ เพื่อหาการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ถ้าค่าความต้านทานของฉนวนอยู่ในสภาพอันตราย ก็ไม่ต้องทดสอบค่าความสูญเสียและ %PF แต่ ถ้าค่าความต้านทานของ ฉนวนอยู่ระหว่าง 1.1 – 1.15 ให้ทำการทดสอบ

ค่าความสูญเสียและ %PF ที่แรงดัน 2.5 kV ก่อนแล้วจึงทำการทดสอบตาม Data Test ที่แนบมา กับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยต้องบันทึกอุณหภูมิของน้ำมัน อากาศ และความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ 2.2 ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

แรงดันที่พิกัดของขดลวด (kV)	แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (kV)
3-5	2.5
5-10	5
> 10	10

ตารางที่ 2.3 ค่าสภาพของฉนวน (%PF) ที่ 20 องศาเซลเซียส

ชนิด	สภาพดี (%PF)	น่าสงสัย (%PF)	อันตราย (%PF)
Power Tx	< 0.5	0.5 – 1.0	> 1.0
Dist Tx	< 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
DRY - Type	< 2.0	2.0 – 5.0	> 5.0
ASKAREL	< 0.5	0.5 – 10.0	> 10.0



ภาพที่ 2.4 วงจรวัดค่าสภาพของฉนวน (%PF)

2.5.3 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Winding Resistance Measurement)

เป็นการวัดความต้านทานของขดลวดแต่ละขด เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ระหว่างเฟสว่ามีขดลวดใดผิดปกติ หรือไม่ สำหรับการทดสอบ กระแสที่ทดสอบไม่ควรเกิน 15% ของกระแสพิกัดของหม้อแปลง โดยการสับสวิตช์ และรอจนกว่า โวลต์มิเตอร์ และ แอมป์มิเตอร์ จะหยุดนิ่ง (Steady State) ทำการอ่านค่ากระแสและแรงดันพร้อมกัน โดยโวลต์มิเตอร์ ที่ใช้ควรมีค่า ความต้านทาน สูง เมื่อเทียบกับขดลวดทดสอบ ในกรณี ที่ โวลต์มิเตอร์ ที่ใช้วัดมีค่าความต้านทาน ยังไม่สูงพอเมื่อเทียบกับขดลวดทดสอบ ซึ่งทำให้ไม่สามารถอ่านค่ากระแสที่ถูกต้องของขดลวดได้ ก็ให้อ่านค่าแรงดันก่อนแล้วปลดโวลต์มิเตอร์ ออกหลังจากนั้นจึงอ่านค่ากระแส บันทึกค่าอุณหภูมิ ของขดลวด และ

น้ำมันระหว่างการทดสอบสำหรับฉนวน (Dry Type) ในกรณี ที่ปลดหม้อแปลงออกจากระบบนานเกิน 8 ชั่วโมง ให้ใช้อุณหภูมิของอากาศแทนอุณหภูมิของขดลวดได้ ความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้ไม่ควรเกิน 5 % (IEEE Std . 62-1995) เมื่อเทียบกับค่าทดสอบจากโรงงาน (Factory Test) ที่อุณหภูมิเดียวกัน และใช้เทียบกันระหว่างเฟส

2.5.4 การวัดค่าของกระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูง (High Voltage Exciting Current Measurement)

การวัดค่ากระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูงเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบสภาพของขดลวดว่ามี การลัดวงจร ระหว่างขดลวดหรือไม่ ซึ่งการทดสอบจะใช้เครื่องวัด %PF โดยทำการวัดค่ากระแส กระตุ้นด้วยแรงดันสูงที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงด้านเดียว โดยวัดที่ชุดของขดลวดแรงดัน สูงสุด (ในกรณี บำรุงรักษาให้วัดที่ชุดของขดลวดที่ใช้งานโดยไม่ต้องเลื่อน ชุดของขดลวดตาม มาตรฐาน NETA MTS-05)

ตารางที่ 2.4 ค่ากระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูง

สภาพ	ปริมาณกระแสกระตุ้น (mA)
ดี < 50	< 50
น่าสงสัย	≥ 50 and < 100
อันตราย	≥ 100

2.5.5 การวัดค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็ก (Core Insulation Resistance)

การวัดค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็กเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบฉนวน ระหว่างแกน เหล็กกับตัวถังของหม้อแปลง ว่าเกิดการชำรุด หรือเสื่อมสภาพ หรือไม่ สำหรับ วิธี การวัดค่าความ ต้านทานของแกนเหล็กจะใช้แรงดันในการทดสอบไม่เกิน 1,000 Volt โดยมี ขั้นตอนในการทดสอบ คือการหาตำแหน่งของจุดต่อสายดินของแกนเหล็กให้พบ ซึ่งหม้อแปลง ไฟฟ้า สมัยใหม่จะมีจุดต่อสาย ดินจะต่อภายในออกมาที่ บุทซึ่งขนาดเล็กที่ตัวหม้อแปลง แล้วทำการปลดสายที่ต่อจากจุดต่อสายดิน ของแกนเหล็กลงตัวถังของหม้อแปลง หรือต่อลงดินแล้วทำการวัดค่าฉนวนของแกนเหล็กเทียบกักราวด์ โดยพิจารณาค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็กเทียบกับกราวด์ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ ดังนี้

ตารางที่ 2.5 ระดับค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็ก

ลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า	ค่าความต้านทานของแกน เหล็ก	การประเมินสภาพ
หม้อแปลงใหม่	> 100 M	ปกติ
หม้อแปลงที่ผ่านการใช้ งานในระบบ	> 100 M	ปกติ
	10 – 100 M	แสดงการเสื่อมของฉนวน
	< 10 M	ฉนวนเสื่อมสภาพทำให้ เกิดกระแสไหลวน

2.5.6 การวัดค่าอัตราส่วนของขดลวด (Winding Ratio Measurement)

การวัดค่าอัตราส่วนของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิว่ามีอัตราจำนวนรอบตามที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งอัตราส่วนของขดลวดอาจเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากหลายปัจจัย รวมถึงความเสียหายทางกายภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า และความผิดปกติ ของฉนวนที่เสื่อมสภาพ โดยหากอัตราส่วนของขดลวดเปลี่ยนแปลงไปเกิน 0.5% อาจส่งผลกระทบต่อระดับของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการวัดค่าอัตราส่วนของขดลวดเป็นการทดสอบด้วยวิธี Volt Meter Method (มีเครื่องมือเป็นชุดสำหรับทดสอบอัตราส่วนซึ่งสามารถอ่านค่าได้เลย สำหรับที่นิยมใช้คือเครื่อง Multi-amp TR#800) สำหรับการทดสอบให้พิจารณาความเหมาะสมของแรงดันโดยใช้แรงดันไม่เกิน 80% ของพิกัดแรงดันหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้การวัดในทุกชุดของขดลวด และทุกเฟสของหม้อแปลง โดยการหาค่าอัตราส่วนให้นำค่า แรงดัน L-L ไปหาค่าอัตราส่วนของขดลวด และในกรณี ที่ต้องใช้ค่า แรงดัน L-N การคำนวณหาค่าอัตราส่วน คำนวณได้จากสูตร

$$\text{Line to Neutral Voltage} = \frac{\text{Line to Line Voltage}}{1.732} \quad (2.3)$$

หมายเหตุ ค่าอัตราส่วนของขดลวดกำหนดให้เป็น นทศนิยม 4 ตำแหน่ง สำหรับการหาค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนของขดลวด คำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{ Error} = \frac{R_m - R_r}{R_r} \times 100 \quad (2.4)$$

กำหนดให้ % Error = ความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนขดลวด

R_m = อัตราส่วนของขดลวดที่วัดได้

R_r = อัตราส่วนของขดลวดจาก Name Plate

โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่วัดได้ต้องไม่เกิน 0.5%

เทียบกับอัตราส่วนจาก Name Plate มาตรฐาน ANSIC57.12.90-1973

2.5.6.1. Ratio test

Ratio test ทดสอบเพื่อเป็นการทดสอบเบื้องต้น เช็ครัตวส่วนของขดลวดว่าปกติดีหรือไม่ ทดสอบโดยใช้เครื่อง Omicron cpc100 ถ้าเกิด Short true ratio จะเปลี่ยนไปจาก Nameplate จากสูตรพื้นฐาน เป็นการคิดอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.5)$$

การทดสอบทำโดย การป้อนแรงดันกระแสสลับ 200 V ด้านแรงสูง และทำการวัดด้านแรงต่ำ ตาม Vector group เช่น หม้อแปลงจำหน่ายDYN1

เช่น ป้อน H1H2 วัด X0X2

ป้อน H2H3 วัด X0X3

ป้อน H3H1 วัด X0X1

***** Ratio test ต้องทำการวัดทุก Tap ของหม้อแปลงดังแสดงในดังภาพที่ 2.5 *****



ภาพที่ 2.5 Change of tap transformer

2.5.6.2. Exciting current test

Exciting current test เป็นการวัดกระแสกระตุ้นทดสอบเพื่อเป็นการตรวจสอบว่า ขดลวดมีการลัดวงจรหรือแกนเหล็กมีสภาพที่ผิดปกติหรือไม่ ทดสอบโดยใช้เครื่อง Omicron cpc 100

ถ้าขดลวดมีพิกัดแรงดันตั้งแต่ 1 kV ขึ้นไปให้ใช้แรงดันกระแสสลับ 200V

ถ้าขดลวดมีพิกัดแรงดันน้อยกว่า 1 kV ให้ใช้แรงดันกระแสสลับ 50V

ตัวอย่างการต่อป้อนแรงดัน ทดสอบหม้อแปลง

ทดสอบด้านแรงสูงป้อน H1H2, H2H3, H3H1 ด้านแรงต่ำปล่อยลอยไว้

HV WDG.	TERMINAL	H1H2	TERMINAL	H2H3	TERMINAL	H3H1
TAP	AC (V)	AC (mA)	AC (V)	AC (mA)	AC (V)	AC (mA)
1	200	0.261	200	0.281	200	0.271
2	200	0.263	200	0.283	200	0.284
3	200	0.268	200	0.282	200	0.288
4	200	0.273	200	0.300	200	0.301
5	200	0.283	200	0.304	200	0.297

ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างผลการทดสอบหม้อแปลงในการวัดกระแสกระตุ้น

2.5.6.3. Insulation resistance test

Insulation resistance test ทดสอบเพื่อวัดความต้านทานของฉนวน โดยการป้อนแรงดันกระแสตรงคงที่ 10 min วัดค่าความต้านทานทุกๆ 1 min และทำการคิดค่า PI โดย นาที่ที่10หารนาที่ที่ 1 ถ้าค่า PI มาก ไม่ดีฉนวนอาจกรอบและแห้ง ค่า PI เป็นค่าที่บ่งชี้ตัวหนึ่งว่าฉนวนอยู่ในสภาพเป็นอย่างไร ฉนวนดีความต้านทานสูงขึ้น กระแสลดลง ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Megger ดังแสดงในภาพที่ 2.7

ตัวอย่างการต่อป้อนแรงดัน

ทดสอบด้านแรงสูงป้อน H1H2H3 ด้านแรงต่ำ X0X1X2X3 ต่อลง Ground

ทดสอบด้านแรงต่ำป้อน X0X1X2X3 ด้านแรงสูง H1H2H3 ต่อลง Ground



ภาพที่ 2.7 เครื่อง Megger

2.5.6.4. Winding resistance test

Winding resistance test ทดสอบเพื่อวัดความต้านทานของขดลวด เช็คสภาพขดลวดป้อนแรงดันกระแสตรงที่ ดูความต้านทาน ทดสอบโดยใช้เครื่อง Omicron cpc 100

ตัวอย่างการต่อป้อนแรงดัน ทดสอบหม้อแปลง Distribution ในดังแสดงในภาพที่ 2.8

ทดสอบด้านแรงสูงป้อน H1H2, H2H3, H3H1

ทดสอบด้านแรงต่ำป้อน X0X1, X0X2, X0X3



ภาพที่ 2.8 ทดสอบ Winding resistance หม้อแปลง Distribution

2.5.7. การทดสอบทางเคมี

2.5.7.1 การทดสอบ DGA (Dissolve Gas Analysis)

การทดสอบ DGA ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นการทดสอบโดยการแยก GAS ที่ปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าออกมาเพื่อทำการวิเคราะห์ว่าเป็น GAS ที่เกิดจากการใช้งานปกติ โดยทั่วไป หรือ เกิดจากความผิดปกติต่างๆ เช่น การลัดวงจรในขดลวด การเกิดความผิดปกติต่างๆ (Fault) เช่น partial discharge, heat แล้วพัฒนาให้เกิดอาร์ค (Arc) ขึ้นในหม้อแปลง เมื่อมี fault ต่างๆ ที่กล่าวมานี้ในหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำให้เกิดแก๊ส fault ตั้งแต่แก๊สที่มีโมเลกุลเบา ไปจนถึงแก๊สร้อนที่มีโมเลกุลหนัก ซึ่งละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงได้



ภาพที่ 2.9 ขั้นตอนการ Set และ Run เครื่อง DGA



ภาพที่ 2.10 ขั้นตอนการนำผลที่ได้จากเครื่อง DGA มาจับกราฟเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

2.5.7.2 water content or moisture content (ASTM D1533 Standard)

นัยสำคัญของการทดสอบ น้ำที่พบในฉนวนหลายรูปแบบ การมีอยู่ของ free water จะบ่งบอกด้วยการตรวจสอบจากสายตา น้ำมันจะขุ่นหรือจะเห็นการแยกตัวออกเป็นหยดน้ำมักจะอยู่ในผิวด้านล่าง การมีอยู่ของ free water สามารถแก้ไขได้ด้วยการกรองหรือวิธีอื่นๆ น้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมันไม่สามารถตรวจสอบด้วยสายตาได้ น้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมันจะส่งผลต่อค่า Dielectric breakdown รวมถึงเปอร์เซ็นต์ความชื้นอิมิตัวปริมาณ และขนาดของสารปนเปื้อน วิธีนี้อ้างถึงความเหมาะสมในการหาค่าน้ำมันฉนวนซึ่งขึ้นอยู่กับ

สภาพวะการเก็บตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์จะถูกใช้ประเมินค่าน้ำรวมตลอดงาน ค่าน้ำที่ละลายในน้ำมันฉนวน หน่วยของการวัดค่าน้ำ คือ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยทั่วไป น้ำมันฉนวนใหม่ที่รับมาจากผู้ผลิตจะมีความชื้นน้อยกว่า 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำมันฉนวนใหม่ควรจะถูกทดสอบปริมาณความชื้นในกรณีที่เป็นมาตรการที่ใช้บังคับควรจะหลีกเลี่ยงการนำน้ำมันที่มีปริมาณความชื้นสูงใส่เข้าไปในเครื่องสำเร็จทางไฟฟ้า เนื่องจากการมีอยู่ของน้ำที่มากเกินไปจะเร่งให้เกิดการกัดกร่อนและอายุที่สั้นลงของฉนวนแข็ง



ภาพที่ 2.11 การฉีดตัวอย่างน้ำมันเข้าเครื่องทดสอบ moisture content

2.5.7.3 Furanic compound (ASTM D5837 Standard)

นัยสำคัญของการทดสอบ ผลผลิตที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของเซลลูโลสและละลายลงในน้ำมันฉนวนคือสารประกอบ Furanic 2 furfural ที่มีความเข้มข้นสูง เป็นข้อบ่งชี้เด่นชัดว่าเซลลูโลสเสื่อมสภาพ เมื่อเซลลูโลสมีการสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงมาก ส่งผลให้สารประกอบ Furanic ถูกทำลายและอาจจะเห็นเพียงคาร์บอนออกไซด์ที่เป็นผลผลิตที่เหลืออยู่ในปริมาณที่มีนัยสำคัญ ประสบการณ์มีความสำคัญในการประเมินข้อมูลสารประกอบ Furanic เนื่องจากมีปัจจัยต่างๆ เช่น ประเภทของการดูแลรักษาฉนวน ระบบการขยายตัวน้ำมัน ประเภทของฉนวนกันความร้อนที่ห่อตัวนำ อุปกรณ์ประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าและการปรับปรุงสภาพของน้ำมันหรือหม้อแปลง ซึ่งมีผลต่อการแปรผลการทดสอบหาสารประกอบ furanic ควรจะดำเนินการในทุกหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อไว้เป็นข้อมูลพื้นฐาน หม้อแปลงที่สำคัญหรือมีอายุการใช้งานนาน เมื่อพบการเกิดคาร์บอนออกไซด์ในปริมาณสูง สำหรับหม้อแปลงที่รับโหลดสูง และเมื่อการทดสอบอื่นๆบ่งชี้ว่ามีการเสื่อมสภาพ

2.4.7.4 Degree of polymerization or DP (ASTM D4243 Standard)

นัยสำคัญของการทดสอบ เป็นวิธีการในการประเมินอายุฉนวน การทดสอบนี้จะดำเนินการกับตัวอย่างกระดาษ กระดาษทดสอบ DP เป็นการประมาณค่าเฉลี่ยขนาดพอลิเมอร์ของโมเลกุล เซลลูโลส เช่นกระดาษและ pressboard โดยทั่วไปกระดาษในหม้อแปลงใหม่มีค่า DP ประมาณ 1000 กระดาษที่หมดอายุ จะมีค่า DP 150-200 ที่ยังคงเหลือความแข็งแรงเชิงกลเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำให้ลวดอ่อนแอกขึ้น และอาจเกิดความเสียหายทางกลในระหว่างการเคลื่อนไหวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเหตุการณ์รุนแรง เช่น เกิด Fault การเสื่อมของฉนวนในหม้อแปลงสามารถเกิดจากการความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ

ความชื้น ออกซิเจนและตัวอย่างในส่วนต่างๆมีความจำเป็นเพื่อให้การวินิจฉัยที่ดีที่สุดของสภาพฉนวนโดยรวมดังแสดงในภาพที่ 2.12

การทดสอบ DP จะแนะนำให้ทดสอบในกรณี ดังนี้

1. ในกรณีที่การทดสอบอื่นๆแสดงว่าเกิดการเสื่อม
2. เป็นหม้อแปลงที่มีอายุมากกว่า 20 ปี และมีการตรวจสอบภายใน
3. สำหรับการประเมินสภาพของหม้อแปลงเก่าที่สามารถจะทำการ refurbish ได้
4. เพื่อหาสาเหตุความเสียหาย
5. สำหรับประเมินสภาพฉนวนเมื่อมีการซื้อ ขาย หม้อแปลงที่ผ่านการใช้งานแล้ว
6. ประเมินสภาพหม้อแปลงหลังผ่านเหตุการณ์ Over heating อย่างรุนแรง



ภาพที่ 2.12 เครื่องทดสอบ Degree of polymerization

2.5.8 การทดสอบทางไฟฟ้า

2.5.8.1 Dielectric breakdown voltage (ASTM D1816 and IEC 60156 Standard)

นัยสำคัญของการทดสอบ การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเสียดสภาพของน้ำมันฉนวน คือการวัดความสามารถของน้ำมันฉนวนที่คงทนต่อความเครียดของแรงดันไฟฟ้าไม่เกิดบกพร่อง น้ำมันที่แห้งและสะอาดค่า Breakdown Voltage จะสูง Free water และ Solid particles โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมกับ dissolved water ที่สูง มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณที่มีความเครียดทางไฟฟ้าสูง ซึ่งจะทำให้ค่า Breakdown Voltage ลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการทดสอบ Breakdown Voltage จึงเป็นตัวบ่งชี้การปนเปื้อนที่เกิดขึ้นเช่น น้ำ หรือ particle และค่า Breakdown Voltage ที่ต่ำจะชี้ให้เห็นถึงการปนเปื้อนจากสิ่งเหล่านั้น อย่างไรก็ตาม ค่า Breakdown Voltage ที่สูงก็ไม่ได้บ่งชี้ว่าน้ำมันไม่มีการปนเปื้อนทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 เครื่องทดสอบ Dielectric breakdown voltage

2.6 แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force)

แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force) ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยปกติจะมีแรงที่เกิดขึ้นกับขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.6)

$$F = B \cdot I \cdot L \sin \alpha \quad (2.6)$$

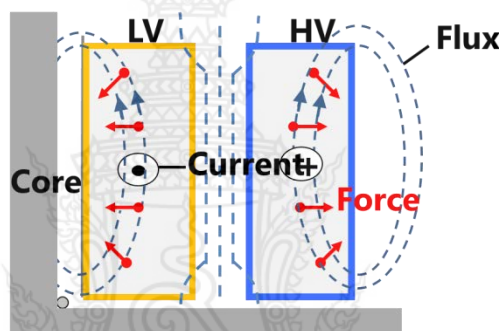
โดยที่

B : ความหนาแน่นของฟลักซ์, หน่วย เทสลา

I : กระแสในตัวนำไฟฟ้า, หน่วย แอมป์

L : ความยาวของตัวนำ, หน่วย เมตร

α : มุมระหว่าง B และ I



ภาพที่ 2.14 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

แรงดังกล่าวไม่มีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า [1-3], [11]

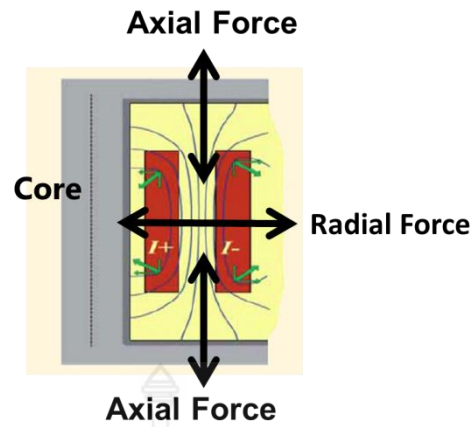
กรณีเกิดกระแสลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้มีกระแสจำนวนมากไหลผ่านขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงจำนวนมากที่ขดลวดตามไปด้วย แรงที่จะเกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแนวแรง 2 ทิศทาง

2.6.1 แรงในแนวรัศมี (Radial Force)

ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากการเกิดความผิดปรongในระบบไฟฟ้า เช่น มีกระแสเกินในระบบไฟฟ้า ทำให้มีแรง มีความเค้น ทำให้ขดลวดเกิดลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า หรือการที่มีแรงมากกระทำตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.16

2.6.2 แรงในแนวแกน (Axial Force) ดังแสดงในภาพที่ 2.17

จะเกิดจากการขนย้ายหม้อแปลงไฟฟ้า หรือการที่มีแรงมากกระทำตามแนวแกนของหม้อแปลงไฟฟ้า แรงทั้ง 2 แนวนี้มีผลกับหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวรัศมี (Radial Force) และแรงในแนวแกน (Axial Force)



ภาพที่ 2.16 แรงในแนวรัศมี (Radial Force)



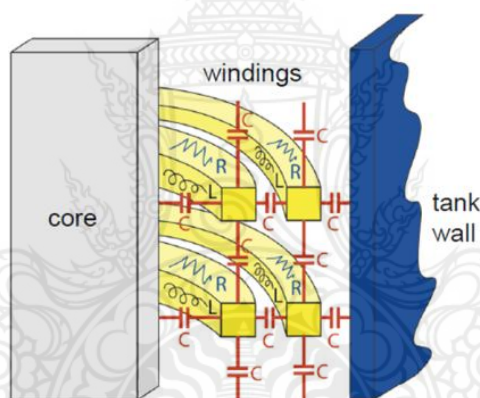
ภาพที่ 2.17 แรงในแนวแกน (Axial Force)

2.7 การทดสอบผลตอบสนองของความถี่ (Frequency Response Analysis: FRA) [5],[7-11]

หม้อแปลงไฟฟ้าคือองค์ประกอบสำคัญส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้า โดยความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบที่รองรับซึ่งอาจเกิดจากการขาดการตรวจสอบ และบำรุงรักษาสิ่งที่สำคัญที่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ คือการตรวจสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงเป็นประจำ

การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ (Frequency Response Analysis : FRA) เป็นวิธีการตรวจสอบหม้อแปลงเพื่อดูแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีความไวในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงภายในขดลวดอาจนำไปสู่การลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่จะแสดงถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงแม้จะเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย โดยการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าควรมีการเปรียบเทียบกับ การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธี อื่นๆ เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกัน

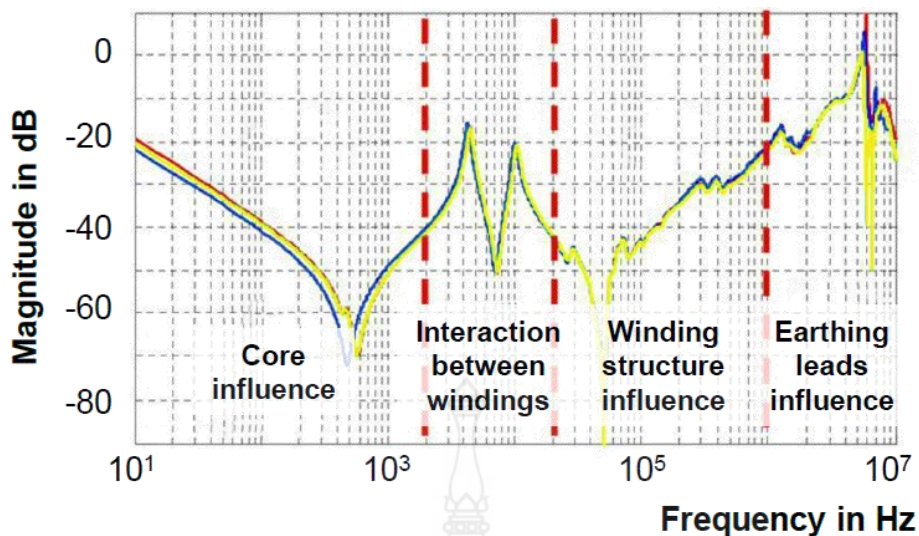
การทดสอบในหัวข้อ FRA เป็นการทดสอบที่สามารถวินิจฉัยการเสีรูปของแกนเหล็กและขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงรู้สภาพภายในของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างละเอียด [11] เป็นการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการป้อนความถี่และวิเคราะห์ผลตอบสนองของความถี่(Frequency Response Analysis, FRA) ซึ่งใช้วงจรสมมูลไฟฟ้าของหม้อแปลงที่แทนด้วยค่า ตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของค่า ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน ในหม้อแปลงไฟฟ้า

2.7.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ [11], [14]

การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำการตรวจวัดเพื่อเก็บค่าอ้างอิง ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในสภาพสมบูรณ์ หรือเริ่มติดตั้งหม้อแปลงใหม่ และหากมีความผิดปกติภายในระบบ ซึ่งคาดว่าอาจส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงจะทำการตรวจวัดเพื่อนำกราฟการตอบสนองความถี่มาเปรียบเทียบกับ เพื่อหาความแตกต่างของการตอบสนองความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

2.7.2 หลักในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเราจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่เพื่อติดตามผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อที่จะให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจวัดนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบเนื่องจากหลายกรณี เพื่อตรวจหาความผิดปกติ ของหม้อแปลง เช่น

- การตรวจสอบคุณภาพของหม้อแปลงขณะที่กำลังทำงาน
- ก่อนและหลังจากการขนส่งหรือเคลื่อนย้ายสถานที่ติดตั้งหม้อแปลง
- หลังจากการเกิดความผิดพลาดหรือการลัดวงจรภายในระบบ
- หลังจากเกิดเหตุการณ์ภัยพิบัติ เช่น แผ่นดินไหว หรือ เกิดฟ้าผ่า
- ก่อนและหลังจากการบำรุงรักษาหม้อแปลง

2.8 เทคนิคในการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ [12], [18-20]

การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ยังมีความหลากหลายมาตรฐานในการตั้งค่าที่ใช้ในการวัด นอกจากนี้ยังมีวิธีในการวัดแยกเป็น 2 วิธี คือ วิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ (Low Voltage Impulse ; LVI) และ วิธีการกวาดความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis ; SFRA)

2.8.1 วิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ (Low Voltage Impulse)

การกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากแรงดันกระตุ้นที่เริ่มทดสอบ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการกระตุ้นจากเครื่องกำเนิด ซึ่งจะทำให้การวัดพร้อมกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ หรือกระแสจากกราวด์ ซึ่งสามารถทำการวัดได้หลายจุดในเวลาเดียวกัน ซึ่งการวัด ค่าจาก Time domain จะแปลงไปยัง Frequency domain โดยการคำนวณ Fourier Transform และ Transfer Function ซึ่งจะทำให้การแปลงสัญญาณทั้งสอง

ข้อดี ของวิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ

- สามารถตรวจวัดได้หลายจุดในเวลาเดียวกัน ลดเวลาการหยุดทำงานของหม้อแปลงขณะทำการตรวจวัด

- ข้อเสียของวิธี การกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ
- ที่ความถี่ต่ำสัญญาณที่ได้จะมีความละเอียดต่ำ
 - ไม่สามารถกรองสัญญาณรบกวนได้
 - คลื่นความถี่และกำลังของสัญญาณที่ส่งเข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของสัญญาณที่ได้รับ
 - มีอุปกรณ์จำนวนมาก
 - ความถูกต้องขึ้นอยู่กับวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์

2.8.2 วิธีการกวาดความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis)

วิธีการกวาดความถี่จะทำการทดสอบโดยการปล่อยสัญญาณความถี่ตั้งแต่ 2 Hz – 2 MHz เข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อนำสัญญาณที่ได้จากการตอบสนองต่อความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆมาทำการวิเคราะห์ผลซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าการเก็บประจุ ที่เปลี่ยนแปลงไปภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งวิธีการกวาดความถี่เป็นวิธี ที่ช้ากว่าวิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ เนื่องจากวิธีนี้จะทำการกวาดความถี่ที่ใช้กระตุ้นเพียงสัญญาณเดียวกับขั้วของหม้อแปลงที่ทำการเชื่อมต่ออยู่ โดยจะทำการปล่อยสัญญาณเข้าสู่ขั้วของหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบ ซึ่งจะมีการกวาดความถี่ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงครั้งละ 1 ชั่วโมงนั้นจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการทดสอบนานเพื่อทำการทดสอบให้ครบทุกจุด การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการกวาดความถี่

ข้อดี ของวิธีการกวาดความถี่

- สัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์มีช่วงที่กว้าง
- สามารถปรับความถี่ในการทดสอบได้
- สามารถควบคุมความละเอียดโดยการกำหนดช่วงความถี่ได้
- มีอุปกรณ์น้อย

ข้อเสียของวิธีการกวาดความถี่

- มาตรฐานในการเปรียบเทียบการส่งผ่านพลังงานมีอยู่หลายมาตรฐานซึ่งจะแบ่งช่วงของความถี่ในการพิจารณาแตกต่างกัน
- ในการวัดหม้อแปลงแต่ละลูกต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นอยู่กับจำนวนจุดที่ต้องการวัดและระดับในการกรองสัญญาณรบกวน
- เทคนิคในการหาค่าเฉลี่ยต้องใช้เวลา

ซึ่งในโครงการนี้จะใช้การตรวจสอบการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธี การกวาดความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis)

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ ด้วยวิธีการกวาดความถี่ถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบ หม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งภายในแกนเหล็ก ภายในขดลวด และส่วนเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยการวัดค่าของการตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง

ซึ่งความแตกต่างที่ปรากฏจะบ่งบอกถึงความเสียหายที่หม้อแปลงได้รับซึ่งสามารถตรวจสอบเพิ่มเติมได้ด้วยการตรวจสอบภายในโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าในลำดับต่อไปสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการกวาดความถี่ มีรายละเอียดพื้นฐานดังนี้

- เป็นการทดสอบแบบ off – line
- มีการวัดการตอบสนองของความถี่ในช่วงที่กว้าง
- ผลที่ได้จากการตอบสนองของ Transfer Function มีหน่วยเป็น dB
- การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆ สามารถตรวจพบได้เมื่อทำการวัดเทียบกับค่าอ้างอิงที่ทำการบันทึกไว้
- เป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบความผิดปกติ ที่หลากหลาย เช่น ภายในขดลวด ภายใน แกนเหล็ก และจุดเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าในการตรวจสอบเพียงวิธีเดียวสำหรับความผิดปกติ ที่สามารถตรวจพบ
- ความผิดปกติ ภายในขดลวด เช่น ความผิดปกติ ภายในโครงสร้างของขดลวด ระยะระหว่างขดลวด และการลัดวงจร
- ความผิดปกติ ภายในแกนเหล็ก เช่น การเคลื่อนที่ของแกนเหล็ก การเชื่อมต่อของสายดิน ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแกนเหล็ก
- ความผิดปกติ และการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง เช่น ชิ้นส่วนต่างๆของหม้อแปลงจุดเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่นั้นจะใช้ความถี่ ตั้งแต่ ประมาณ 2 Hz – 2 MHz โดยจะแบ่งอย่างง่ายออกเป็น 3 ช่วงความถี่ดังแสดงใน ภาพที่ 2.20

- ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency) ประมาณ 20 Hz – 10 kHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพของแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- ย่านความถี่ปานกลาง (Medium Frequency) ประมาณ 10 kHz – 100 kHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- ย่านความถี่สูง (High frequency) ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพที่ 2.20 การแบ่งย่านความถี่ต่างๆในการตรวจวัด

การตรวจสอบหม้อแปลงด้วยวิธี การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ถือเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดใน การ ประเมินผลของการชำรุดหรือการเสียรูปของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแนวคิดของการวิเคราะห์ การตอบสนองความถี่สำหรับการประเมินสภาพภายในหม้อแปลง ขึ้นอยู่กับความจริงที่ว่า การเบี่ยงเบนหรือ การผิดรูปทางเรขาคณิตของขดลวดเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะภายในซึ่งจะส่งผลให้ความจุ และการเหนี่ยวนำ ไฟฟ้าภายในของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งความแตกต่างของสิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง การตอบสนองความถี่ ซึ่งสังเกตได้จากการส่งผ่านพลังงาน (Transfer Function) ภายในหม้อแปลงจากด้าน แรงดันด้านอินพุทและแรงดันด้านเอาต์พุท

2.8.3 ตัวอย่างการเชื่อมต่อ [7]

ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบการตอบสนองความถี่เข้ากับตัวหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีด้วยกันหลายวิธีโดยขึ้นอยู่กับความต้องการในการตรวจสอบว่าต้องการทราบความผิดปกติ ในส่วนใดของ หม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะยกตัวอย่างการเชื่อมต่อใน 2 มาตรฐาน ดังต่อไปนี้

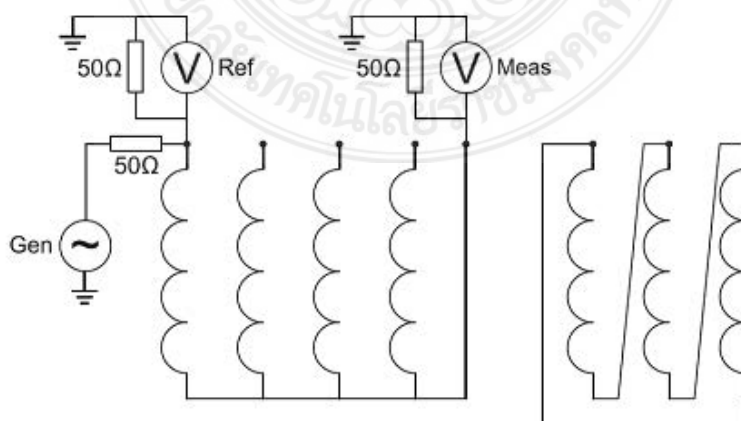
2.7.3.1 แบบ CIGRE report 342

- End - to - End Open
- End - to - End Short - Circuit
- Capacitive Inter - Winding (CIW)
- Inductive Inter - Winding (IIW)

2.7.3.2 แบบ IEEE FRA draft

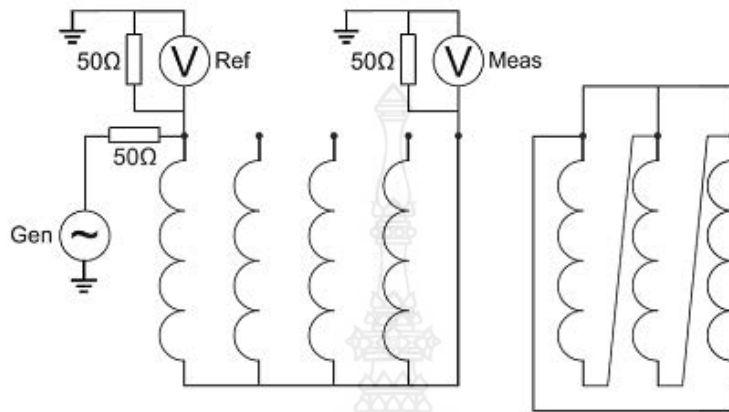
- Open Circuit Self Admittance (OC)
- Short Circuit Self Admittance (SC)
- Inter - Winding (IW)
- Transfer Admittance (TA)

- การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Open หรือ Open Circuit Self Admittance (OC) สัญญาณความถี่จะถูกปล่อยเข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะใช้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำใน การทดสอบซึ่งถือเป็นการทดสอบพื้นฐานในการตรวจสอบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการวัดที่ค่า แรงดันและกระแสกระตุ้นของแต่ละเฟสดังแสดงในภาพที่ 2.21



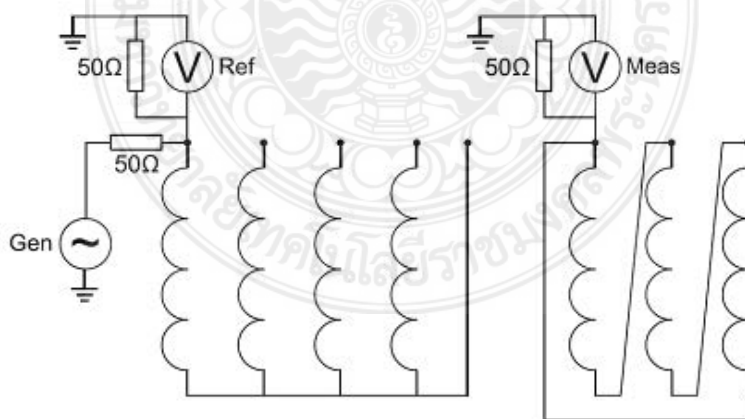
ภาพที่ 2.21 การเชื่อมต่อแบบ End- to - End Open หรือ Open Circuit Self Admittance (OC)

- การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Short - Circuit หรือ Short Circuit Self Admittance (SC) การวัดจะเหมือนกับแบบแรกแต่ ในขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำการลัดวงจรถึงกัน โดยปล่อยสัญญาณความถี่ต่ำเข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานภายในขดลวดดังแสดงในภาพที่ 2.22



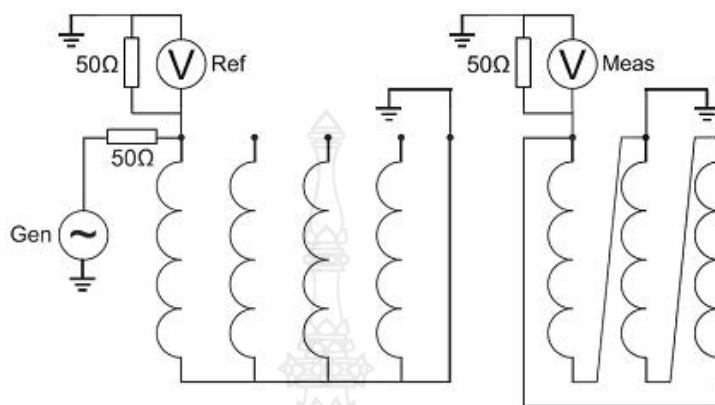
ภาพที่ 2.22 การเชื่อมต่อแบบ End to End Short - Circuit หรือ Short Circuit Self Admittance (SC)

- การเชื่อมต่อแบบ Capacitive Inter - Winding (CIW) หรือ Inter - Winding (IW) สัญญาณความถี่จะถูกปล่อยเข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิและจะทำการวัดที่ขดลวดด้านปฐมภูมิในเฟสเดียวกันการทดสอบนี้ เป็นการตรวจสอบค่าการเก็บประจุ และค่าการสูญเสียต่อค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 การเชื่อมต่อแบบ Capacitive Inter - Winding (CIW) หรือ Inter - Winding (IW)

- การเชื่อมต่อแบบ Inductive Inter – Winding (IIW) สัญญาณความถี่ถูกปล่อยเข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิและทำการวัดที่ขดลวดด้านปฐมภูมิเหมือนกับการเชื่อมต่อในวิธีที่สามจะแตกต่างกันที่แต่ละด้านของขดลวดจะทำการต่อลงดินซึ่งการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจสอบการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดจากด้านปฐมภูมิไปสู่ด้านทุติยภูมิตั้งแสดงในภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 การเชื่อมต่อแบบ Inductive Inter- Winding (IIW) หรือ Transfer Admittance (TA)

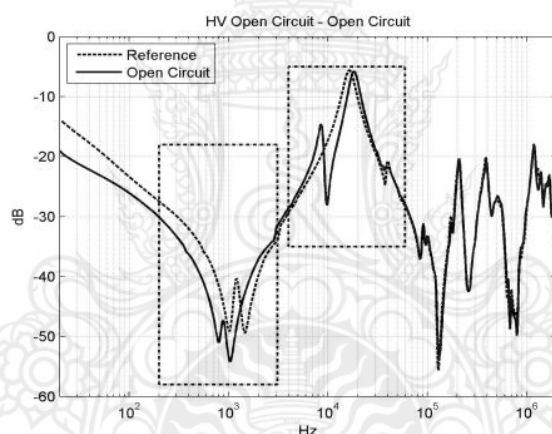
2.9 การวินิจฉัยความผิดปกติ

การวินิจฉัยความผิดปกติ ของหม้อแปลงประกอบด้วยการวัดค่าความต้านทานของแกนเหล็ก ขดลวด และชิ้นส่วนต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ในช่วงความถี่ต่างๆและนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อทำการเปรียบเทียบเพื่อหาความเบี่ยงเบนไปของกราฟแสดงการตอบสนองความถี่ แม้จะเป็นเพียงการเบี่ยงเบนแม้เพียงเล็กน้อย หากไม่ได้รับการตรวจสอบและทำการบำรุงรักษาอาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้ในอนาคต โดยความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นจากหลายกรณี เช่น เกิดลัดวงจรภายในระบบซึ่งอาจส่งผลทำให้หม้อแปลงเกิดการชำรุด เกิดความเสียหายในหลายส่วนของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น ถ้าใช้การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่จะพบว่าการตอบสนองที่ความถี่ต่ำการไหลวนของกระแสภายในแกนเหล็กโดยหากภายในแกนเหล็กมีความเสียหายก็จะส่งผลให้การตอบสนองต่อความถี่ในย่านความถี่ต่ำเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในขณะที่ย่านความถี่ปานกลางจะมีความไวต่อความผิดปกติ หรือการเปลี่ยนแปลงภายในคุณสมบัติของขดลวด หากมีการเพิ่มขึ้นของความถี่ หมายถึงการเคลื่อนไหวของแกนขดลวดลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยปกติ หมายถึงการเคลื่อนไหวของรัศมี ในขดลวดชั้นใน ส่วนในย่านความถี่สูง การตอบสนองต่อความถี่สูงของหม้อแปลงมีความไวต่อความผิดปกติ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของชิ้นส่วนของขดลวดและส่วนเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

การเปรียบเทียบที่ดีที่สุดคือการทำการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดในจุดเดียวกันกับที่ทำการวัดในครั้งแรก เพื่อเก็บค่าอ้างอิงโดยหากเป็นหม้อแปลงน้ำมันก็ ควรจะมี ระดับของน้ำมันใกล้เคียงกับปริมาณที่ทำการวัดเพื่อเก็บค่าอ้างอิงและเป็นน้ำมันชนิดเดิมเนื่องจากชนิดของน้ำมันปริมาณน้ำมันและค่าความชื้นที่อยู่ภายในน้ำมันหม้อแปลง อาจส่งผลต่อการตอบสนองความถี่ ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้

2.10 การเปรียบเทียบ

โดยทั่วไปภาพของการตอบสนองความถี่ที่มีจุดมุ่งหมายในการตรวจสอบความเบี่ยงเบนของการตอบสนองความถี่ในช่วงต่างๆ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในความถี่ใหม่อาจแสดงถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้น ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแม้ว่าการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ สามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ แต่ยังคงต้องการการวินิจฉัยเพิ่มเติมด้วยการตรวจสอบวิธีอื่นๆ เพื่อนำผลมาวิเคราะห์ร่วมกัน ในการเปรียบเทียบสัญญาณของการตอบสนองความถี่ โดยทั่วไปจะเป็นการส่งผ่านพลังงานจากด้านอินพุทและเอาต์พุทซึ่งโดยปกติ จะมีความต้านทานของขดลวดอัตราส่วนแรงดันระหว่างขดลวดหรือการลดลงของสัญญาณที่ได้จากการวัด โดยในการวัดเพื่อเก็บค่าอ้างอิงมักจะเป็นการเปรียบเทียบกับเฟสอื่นๆ เทียบกับการวัดเพื่อเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันของสัญญาณและในการตรวจสอบจริง เมื่อทำการวัดเพื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิงจะมีความถูกต้องเชื่อถือได้มากขึ้นโดยรูปแบบที่ได้เมื่อนำเปรียบเทียบกันจะมีความแม่นยำ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากความแตกต่างมาประกอบกันเพื่อหาความเปลี่ยนแปลงภายในหม้อแปลง ซึ่งการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของการส่งผ่านพลังงานจะมีความสัมพันธ์ต่อความผิดปกติของหม้อแปลง ซึ่งสิ่งเหล่านี้ปกติ จะตรวจสอบได้ยากและใช้เวลานานและการประเมินมักมีความผิดพลาด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างมากดังแสดงในภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนและหลังการเกิดการลัดวงจร

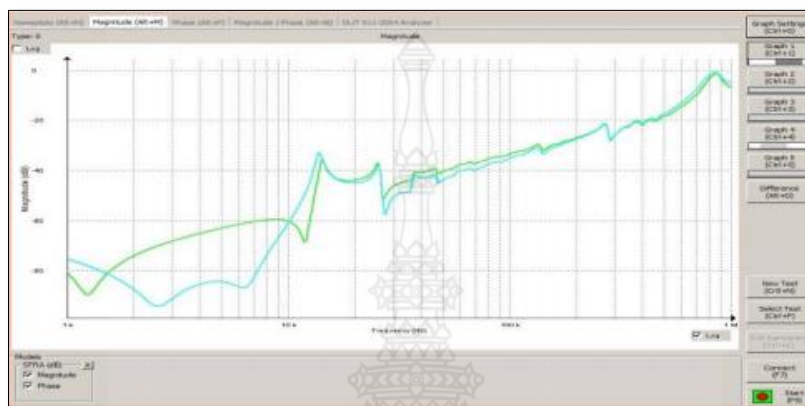
ตารางที่ 2.6 ระดับความถี่ที่ใช้พิจารณาความผิดปกติ

ความถี่	ความผิดปกติที่ตรวจพบ
< 2 kHz	การเสียรูปของแกนเหล็ก การลัดวงจรของขดลวด และ สนามแม่เหล็กตกค้าง
2 kHz - 20 kHz	การเคลื่อนที่ของขดลวดระหว่างขดลวดกับโครงสร้าง ภายใน
20 kHz - 400 kHz	การเสียรูปของขดลวดหลัก หรือ ขดลวดในชุดต่างๆ
400 kHz - 1 MHz	การเคลื่อนที่ของขดลวดหลัก และ ขดลวดในชุดต่างๆ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของกราวด์

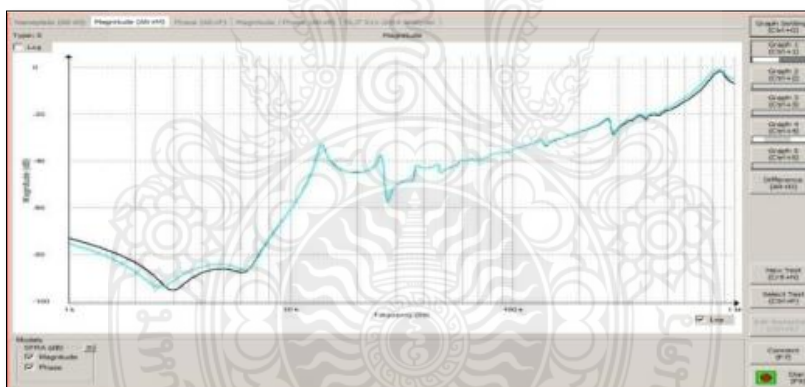
2.11 กรณีศึกษา

2.11.1 การตรวจสอบก่อนและหลังการบำรุงรักษา

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าทำได้ในหลายกรณี เช่น ตัวอย่างการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ก่อนและหลังการบำรุงรักษาโดยทำการทดสอบกับหม้อแปลง Single - phase Generator Transformer , 400 kV ดังแสดงในภาพที่ 2.26 และ ภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.26 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนการบำรุงรักษา



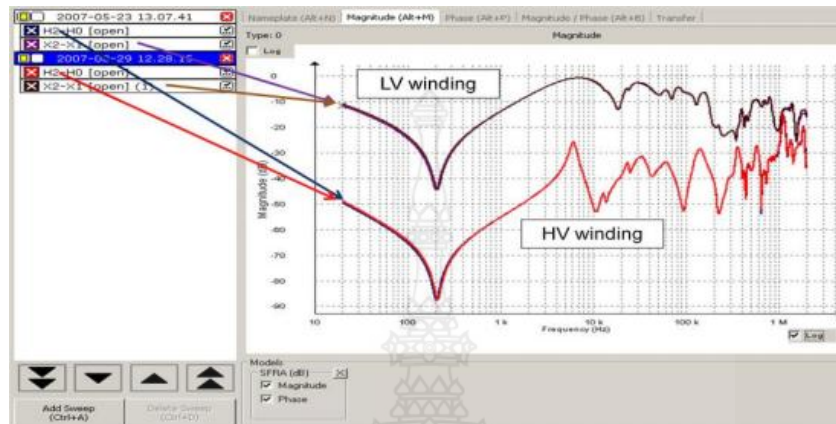
ภาพที่ 2.27 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงหลังการบำรุงรักษา

จากภาพที่ 2.26 เส้นสีฟ้าแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ทำการวัดเป็นค่าอ้างอิง ขณะเริ่มติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนเส้นสีเขียวแสดงการตอบสนองความถี่ ของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากเกิดความผิดปกติของระบบจึงได้ทำการตรวจสอบ เพื่อหาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งพบว่าในช่วงความถี่ต่ำถึงช่วงความถี่ปานกลางที่ประมาณ 10 Hz - 100 kHz กราฟที่ได้มีความแตกต่างกับค่าอ้างอิงมาก จึงต้องทำการตรวจสอบเพิ่มเติมและบำรุงรักษาซึ่งพบความเสียหายในส่วนของแกนเหล็กและขดลวดภายในหม้อแปลง

จากภาพที่ 2.27 เส้นสีฟ้าแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นค่าอ้างอิง ส่วนเส้นสีดำแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากทำการบำรุงรักษา ซึ่งจะเห็นว่ากราฟที่ได้จากการตรวจวัดหลังการบำรุงรักษามีความใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมากขึ้น

2.11.2 การตรวจสอบหม้อแปลงหลังการเกิดความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการเกิดการลัดวงจรภายในระบบหรือความผิดปกติ ใดๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบอาจมีความกังวลว่าความผิดปกติ ใดๆ ที่เกิดขึ้นในระบบอาจส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงที่ทำการจ่ายพลังงาน จึงมีความจำเป็นต้องทำการตรวจสอบโดยในการทดสอบนี้จะทำการตรวจสอบหม้อแปลง Single phase Generator Step – up transformer 105 MVA ดังแสดงในภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนและหลังการเกิดความผิดปกติ

จากภาพที่ 2.28 เป็นการตรวจวัดการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจากกราฟ เส้นสี ม่วง คือค่าอ้างอิงส่วนสีน้ำตาลคือการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า หลังจากเกิด การลัดวงจร ของด้านปฐมภูมิ และเส้นสีน้ำเงินคือค่าอ้างอิง ส่วนเส้นสีแดงคือการตอบสนองความถี่ หลังจากเกิดการลัดวงจรของด้านทุติยภูมิ จากการพิจารณารูปแสดงการตอบสนองความถี่ของทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิแสดงว่าการเกิดความผิดปกติภายในระบบไม่ได้ส่งผลกระทบต่อตัวหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 3

การออกแบบและคำนวณ

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการต่อเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้า และโปรแกรมในการวิเคราะห์ผล

3.1 การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า [6-12],[18-22]

ในส่วนของ การทดลองและศึกษา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินหาความผิดปกติหรือความเสียหาย ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อเป็นการป้องกันและทำการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพในการทำงานและสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบที่รองรับ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการตรวจสอบสภาพของหม้อแปลงด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ โดยในการทดลองจะใช้เทคนิคในการกวาด ความถี่ในการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis ; SFRA) ซึ่งการตรวจสอบหม้อแปลงด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ คือวิธีการที่สามารถบอกถึงสภาพของแกนเหล็ก ขดลวด และจุดเชื่อมต่อต่างๆ

การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่คือการตรวจสอบการส่งผ่านพลังงานของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งบอกผลที่ผิดเพี้ยนไปภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนใดเพื่อที่จะทำการป้องกันและบำรุงรักษาได้ตรงจุด

3.2 วิธีการตรวจวัด [14]

สำหรับกระบวนการตรวจสอบหม้อแปลงด้วยวิธีการวิเคราะห์ การตอบสนองความถี่นั้น จะมีวิธีการตรวจวัดโดยการปล่อยสัญญาณความถี่เข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อหาสิ่งผิดปกติ ในแต่ละส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าและนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ออกมาทำการศึกษา และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

3.2.1 วิธีการกวาดความถี่ (Sweep Frequency Method ; SFM)

วิธีการกวาดความถี่เป็นวิธีการที่ทำการปล่อยความถี่เข้าไปสู่หม้อแปลงในหลายย่านความถี่ โดยทำการกวาดความถี่ตั้งแต่ ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูง โดยอาจทำการวัดโดยแยกสัญญาณที่ปล่อยเข้าไปแต่ ละเฟสได้โดยวงจรที่ใช้ในการตรวจวัด

3.3 การทดสอบการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

สำหรับโครงการ เรื่อง การวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่เพื่อประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า กำลังผู้จัดทำโครงการได้เข้าไปทำการตรวจวัดหม้อแปลงไฟฟ้า ที่สถานีไฟฟ้าย่อยแห่งหนึ่ง ที่จังหวัดสระบุรี ซึ่งได้เข้าไปทำการตรวจวัดหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 2 ลูก โดยครั้งแรก ได้ทำการตรวจวัดหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 50 MVA , 115/22 kV เพื่อ เก็บค่าอ้างอิง และ ครั้งที่ 2 ได้ทำการตรวจวัดหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 50 MVA , 115/22 kV เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าอ้างอิง ที่ทำการบันทึกไว้ โดยขั้นตอนในการปฏิบัติงานดังนี้

3.3.1 เตรียมความพร้อมด้านความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน

3.3.2 ตัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังออกจากระบบ



ภาพที่ 3.1 การปลดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

3.3.3 ทำการ Discharge หม้อแปลงลงกราวด์

3.3.4 ทำความสะอาดลูกถ้วย และจุดที่จะทำการวัด โดยใช้ผ้าที่สะอาด ชุบน้ำแอลกอฮอล์ หรือน้ำเปล่า เพื่อให้ลูกถ้วยมีค่าความเป็นฉนวนมากขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย

3.3.5 ทำการเชื่อมต่อระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังกับชุดทดสอบ Winding analyser 2293 ก่อนทำการวัด FRA ต้องล้างฟลักซ์แม่เหล็กออกให้หมดจากในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 3.2 การเชื่อมต่อของเครื่อง Winding analyser 2293

เครื่องทดสอบ FRA 5310 จะมีหน้าที่เป็นตัวส่งและรับสัญญาณความถี่ที่ปล่อยเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้า และส่งข้อมูลที่ได้อุปกรณ์ [18] ดังแสดงในภาพที่ 3.3 โดยทำทั้งหมด 9 วิธีที่จะกล่าวใน ข้อ 3.5



ภาพที่ 3.3 วิธีการเชื่อมต่อเครื่องทดสอบ FRA 5310



ภาพที่ 3.4 วิธีการเชื่อมต่อสายสัญญาณจากเครื่อง ทดสอบ FRA 5310
กับขั้วของหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบ

3.3.6 เรียกใช้โปรแกรมการตรวจสอบการตอบสนองความถี่ (FRAX)
แล้วทำการจ่ายความถี่ 20 Hz – 2 MHz ให้กับหม้อแปลง แล้วบันทึกข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

3.3.7 นำผลที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงแล้วทำการวิเคราะห์ผล

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ

อุปกรณ์ ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องมือวัดกับหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงใน ภาพที่ 3.5
ภาพที่ 3.6 และภาพที่ 3.7 ประกอบด้วย

- สายสัญญาณ ทำหน้าที่ในการส่งและรับสัญญาณระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับเครื่อง FRA 5310
- สายต่อ Ground ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อ Ground ของระบบในการวัด



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ



ภาพที่ 3.6 จุดต่างๆในการต่อสายสัญญาณ



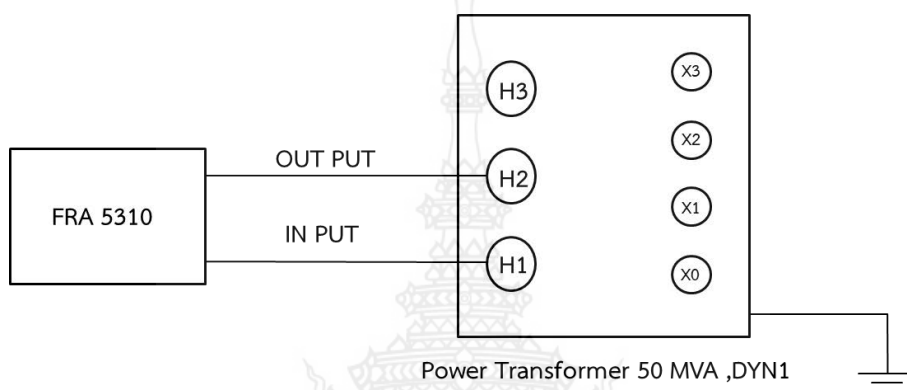
ภาพที่ 3.7 จุดในการต่อสาย Ground

3.5 วิธีการต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

วิธีการต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งวิธีการต่อวงจรวัด มีด้วยกัน 9 แบบ ดังต่อไปนี้

3.5.1 HV open circuit (All other terminal floating) H1-H2

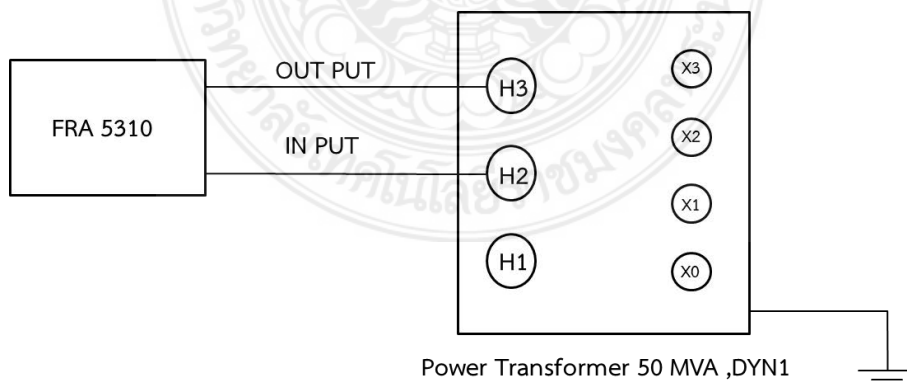
การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H1 และวัดสัญญาณออกที่ H2 ส่วนด้าน H3 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Open circuit แสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แบบ HV open circuit H1-H2

3.5.2 HV open circuit (All other terminal floating) H2-H3

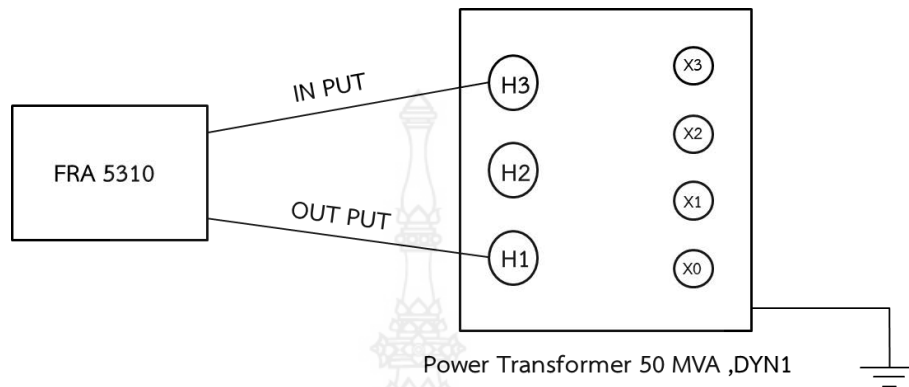
การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H2 และวัดสัญญาณออกที่ H3 ส่วนด้าน H1 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Open circuit แสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แบบ HV open circuit H2-H3

3.5.3 HV open circuit (All other terminal floating) H3-H1

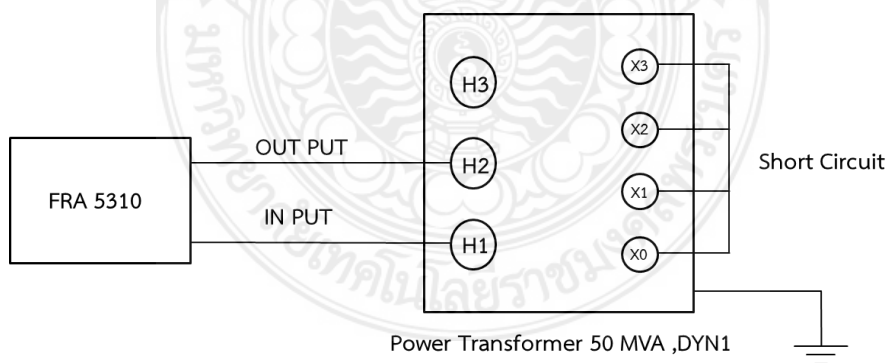
การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H1 และวัดสัญญาณออกที่ H2 ส่วนด้าน H3 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Open circuit แสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แบบ HV open circuit H3-H1

3.5.4 Short circuit HV to LV. H1-H2, X1-X2-X3

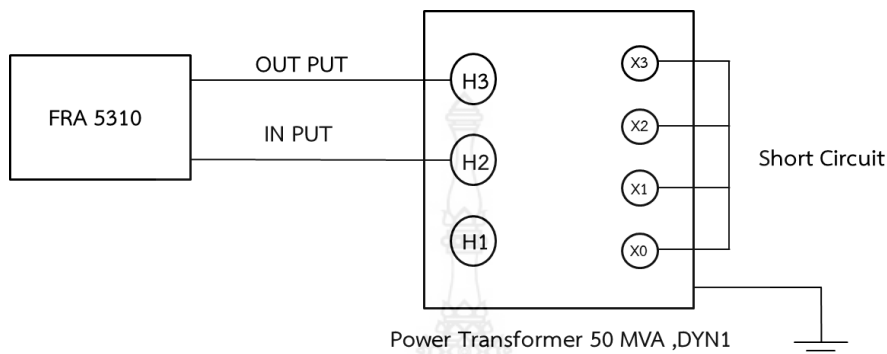
การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H1 และวัดสัญญาณออกที่ H2 ส่วนด้าน H3 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Short circuit แสดงดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แบบ Short circuit HV to LV. H1-H2, X1-X2-X3

3.5.5 Short circuit HV to LV. H2-H3, X1-X2-X3

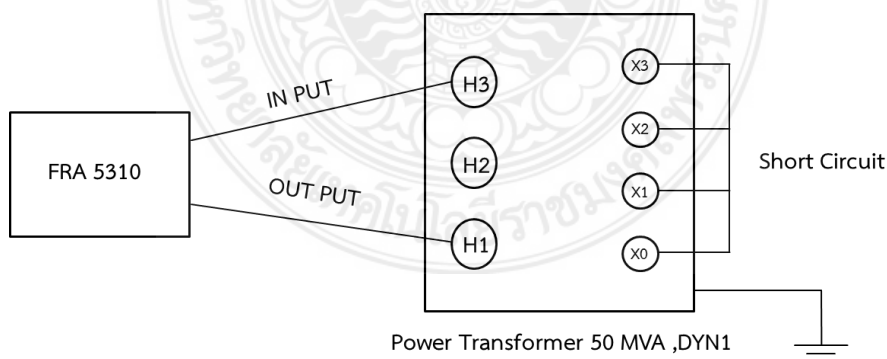
การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H2 และวัดสัญญาณออกที่ H3 ส่วนด้าน H1 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Short circuit แสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แบบ Short circuit HV to LV. H2-H3, X1-X2-X3

3.5.6 Short circuit HV to LV. H3-H1, X1-X2-X3

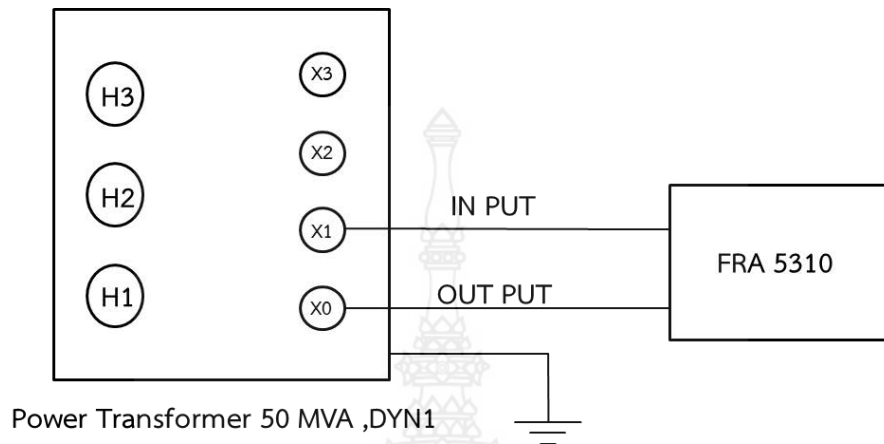
การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H3 และวัดสัญญาณออกที่ H1 ส่วนด้าน H2 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Short circuit แสดงดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แบบ Short circuit HV to LV. H3-H1, X1-X2-X3

3.5.7 LV open circuit (All other terminal floating) X1 – X0

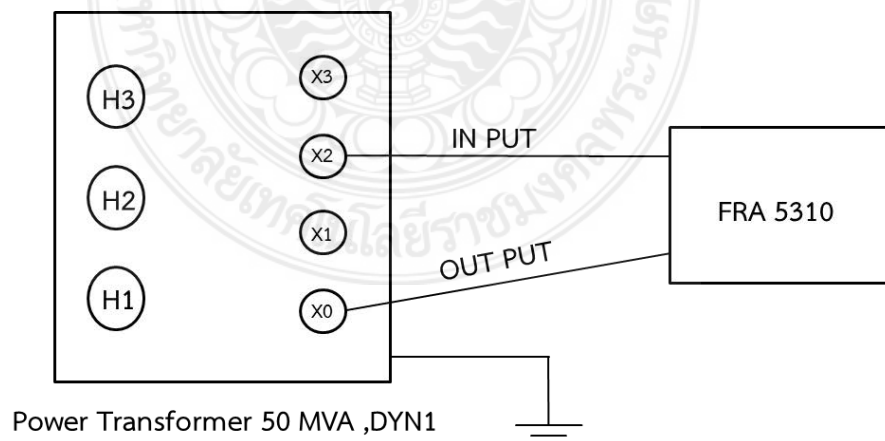
การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ X1 และวัดสัญญาณออกที่ X0 ส่วนด้าน X2 และ X3 Open circuit โดยด้าน High voltage H1,H2 และ H3 Open circuit แสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ LV open circuit X1 – X0

3.5.8 LV open circuit (All other terminal floating) X2 – X0

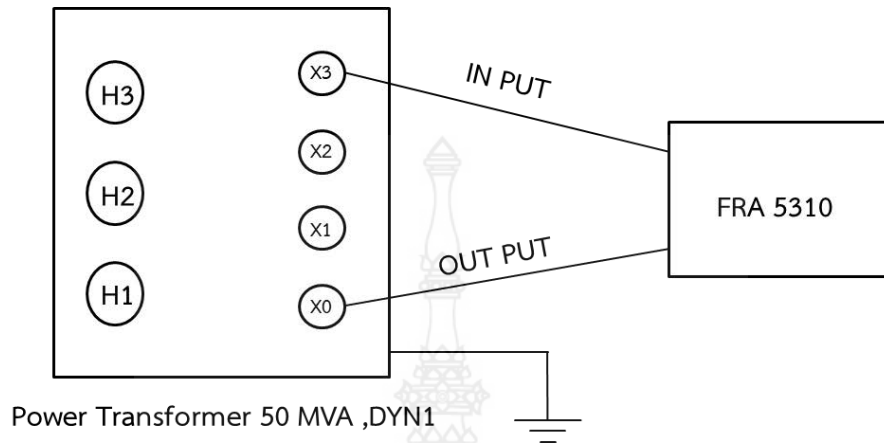
การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ X2 และวัดสัญญาณออกที่ X0 ส่วนด้าน X1 และ X3 Open circuit โดยด้าน High voltage H1,H2 และ H3 Open circuit แสดงดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ LV open circuit X2 – X0

3.5.9 LV open circuit (All other terminal floating) X3 – X0

การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H3 และวัดสัญญาณออกที่ X0 ส่วนด้าน X1 และ X2 Open circuit โดยด้าน High voltage X1,X2 และ X3 Open circuit แสดงดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ LV open circuit X3 – X0

3.6 โปรแกรมในการกำหนดค่าในการวัดและการแสดงผล [13]

ในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ ในการกำหนดค่าความถี่ที่จะปล่อยเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าจะกำหนดค่าจากโปรแกรมเพื่อทำการส่งคำสั่งและค่าความถี่ที่ต้องการใช้ในการตรวจวัดต่างๆ ส่งผ่านไปยังเครื่อง FRA 5310 และรับค่าที่ได้จากการตรวจวัด ส่งกลับมายังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลและสร้างกราฟความสัมพันธ์ของการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า และการคำนวณค่าของสัญญาณต่างๆที่ได้จากการตรวจวัด

3.6.1 การกรอกค่าประจำตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า

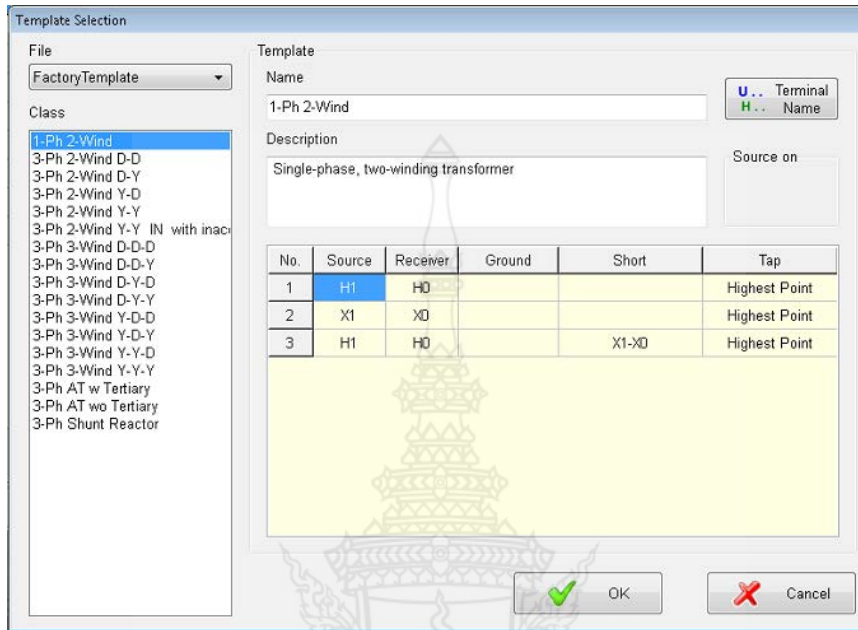
ก่อนเริ่มทำการวัดจะต้องมีการกรอกข้อมูลเกี่ยวกับหม้อแปลงลูกนั้นๆก่อน เช่น ชื่อ บริษัทผู้ผลิต ชนิดของหม้อแปลง ขนาดพิกัดของหม้อแปลง ปี ที่ผลิต วันที่ทำการทดสอบ

The screenshot shows the software interface for entering transformer data. The 'Device Under Test (DUT) Information' section includes fields for Type (Distribution Transformer), Built (1990), Serial No. (990203T01.5), Manufacturer (MF Derikon), Description (Yz5 / 75kVA), User (HTA, Demo), Location (HTAG, Basel), and Inventory No. (128280). The 'Auxiliary' section includes Measuring turn (2006 / G1 - 2) and a Notes field containing 'Suspect bushing X1'.

ภาพที่ 3.17 การกรอกค่าประจำตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.6.2 การเลือก Vector Group ของหม้อแปลงเพื่อกำหนดขั้วในการทดสอบ

ในการตรวจวัดหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละลูกจะต้องมีการกำหนด Vector Group ของหม้อแปลงไฟฟ้าตามที่ระบุไว้ เพื่อกำหนดจุดในการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดกับขั้วต่างๆของ หม้อแปลงไฟฟ้า การกำหนด Vector Group ของหม้อแปลงไฟฟ้าดังที่แสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 การกำหนด Vector Group ของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.6.3 การกำหนดค่าความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ

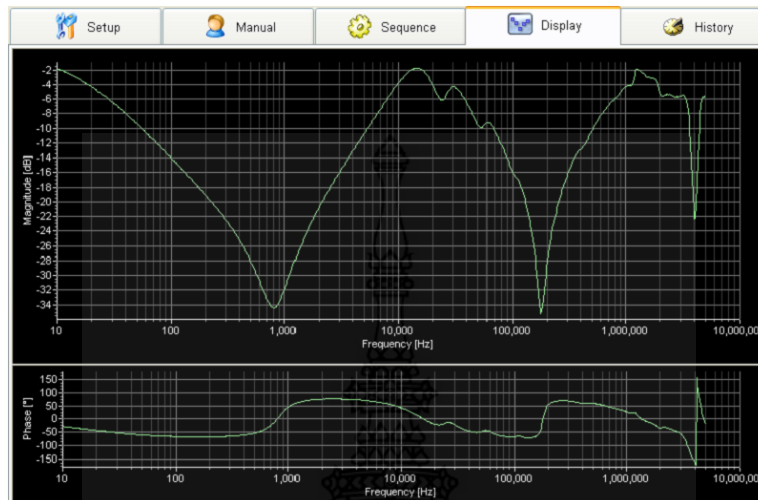
ในการตรวจวัดจะต้องมีการกำหนดค่าความถี่ที่จะปล่อยเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้า และ กำหนดค่าต่างๆบนกราฟที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อมีการประมวลผลที่ได้จากการตรวจวัด การกำหนดค่าความถี่และค่าต่างๆ ในกราฟการประมวลผลดังที่แสดงในภาพที่ 3.19

No.	Start	Stop	Mode	Points	Voltage	Source	Receiver	Grounded	Shorted	Tap	Imp.	Z. Cal.	Notes
1	20 Hz	2 MHz	Log	800	10 Vpp	H1	H3			fighes..	50 Ω	No	
2	20 Hz	2 MHz	Log	800	10 Vpp	H2	H1			fighes..	50 Ω	No	
3	20 Hz	2 MHz	Log	800	10 Vpp	H3	H2			fighes..	50 Ω	No	
4	20 Hz	2 MHz	Log	800	10 Vpp	X1	X0			fighes..	50 Ω	No	
5	20 Hz	2 MHz	Log	800	10 Vpp	X2	X0			fighes..	50 Ω	No	
6	20 Hz	2 MHz	Log	800	10 Vpp	X3	X0			fighes..	50 Ω	No	
7	20 Hz	2 MHz	Log	800	10 Vpp	H1	H3		X1-X2...	fighes..	50 Ω	No	
8	20 Hz	2 MHz	Log	800	10 Vpp	H2	H1		X1-X2...	fighes..	50 Ω	No	
9	20 Hz	2 MHz	Log	800	10 Vpp	H3	H2		X1-X2...	fighes..	50 Ω	No	

ภาพที่ 3.19 การกำหนดค่าความถี่และค่าต่างๆ ในกราฟการประมวลผล

3.6.4 การแสดงผลการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อทำการปล่อยสัญญาณความถี่เข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าเข้าทางด้านอินพุทผลที่ถูกส่งกลับมาจากการวัดจะถูกประมวลผล และแสดงออกในรูปของกราฟแสดงผลการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงลูกนั้นๆดังแสดงในภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.6.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำการตรวจวัดเพื่อเก็บค่าอ้างอิง ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในสภาพสมบูรณ์ หรือเริ่มติดตั้งหม้อแปลงใหม่ และหากมีความผิดปกติภายในระบบ ซึ่งคาดว่าอาจส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงจะทำการตรวจวัดเพื่อนำกราฟการตอบสนองความถี่ มาเปรียบเทียบกับกัน เพื่อหาความแตกต่างของการตอบสนองความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆ ความสัมพันธ์ของการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีการบ่อนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 ความสัมพันธ์ของการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 4

การวิเคราะห์และผลการทดสอบ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบของทั้ง 9 แบบ ด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการป้อนความถี่ผลออกมาเป็นกราฟพร้อมบทวิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟ

วิธีการต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่นั้นจะใช้ความถี่ ตั้งแต่ ประมาณ 2 Hz – 2 MHz โดยจะแบ่งอย่างง่ายออกเป็น 3 ช่วงความถี่ดังแสดงใน

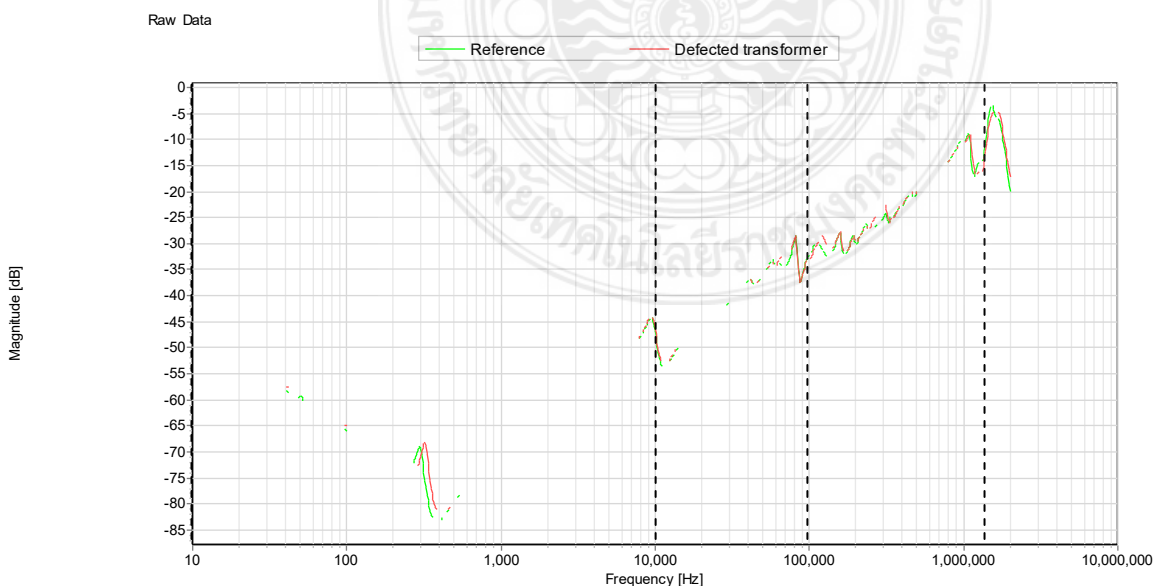
- ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency) ประมาณ 20 Hz – 10 kHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพของแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- ย่านความถี่ปานกลาง (Medium Frequency) ประมาณ 10 kHz – 100 kHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- ย่านความถี่สูง (High frequency) ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

4.1 การวิเคราะห์และผลการทดสอบ

ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบความการป้อนความถี่เข้าไปในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 50 MVA นี้ จะได้ผลตามวิธีการวัดทั้ง 9 แบบ และวิเคราะห์ตามช่วงความถี่ต่ำ ช่วงความถี่ปานกลาง และช่วงความถี่สูง โดยมี Open circuit 6 แบบ และ Short circuit 3 แบบ

4.1.1 HV open circuit (All other terminal floating) H1-H2

การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H1 และ วัดสัญญาณออกที่ H2 ส่วนด้าน H3 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Open circuit ดังแสดงในภาพที่ 4.1



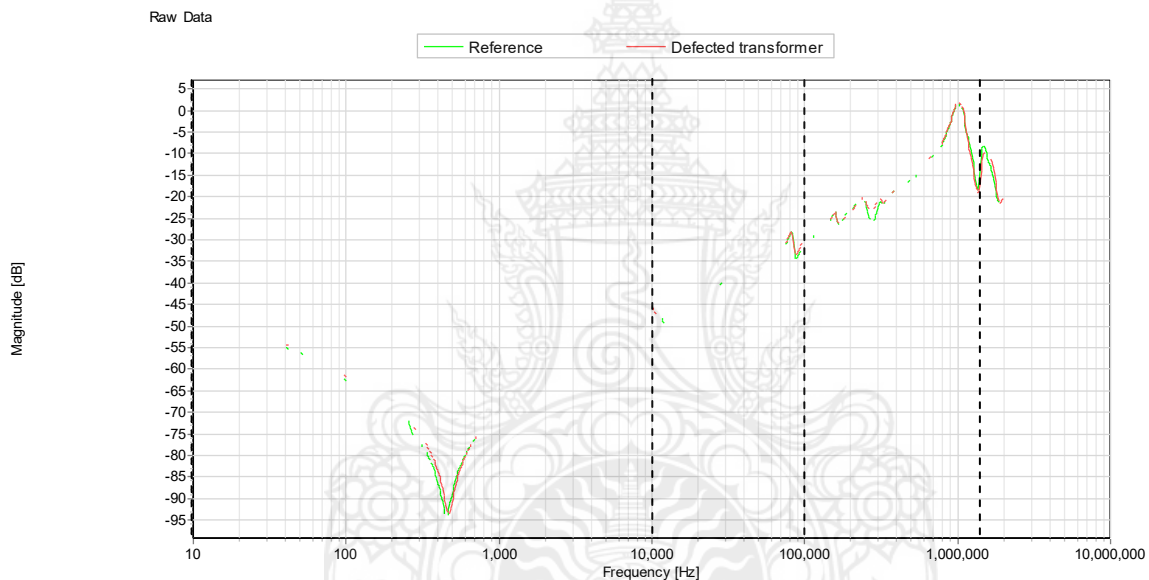
ภาพที่ 4.1 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H1 – H2 [OPEN]

จากภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า

- ย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 20Hz–10 kHz สภาพแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ
- ย่านความถี่ปานกลาง ประมาณ 10kHz – 100kHz สภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ
- ย่านความถี่สูง ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ

4.1.2 HV open circuit (All other terminal floating) H2-H3

การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H2 และวัดสัญญาณออกที่ H3 ส่วนด้าน H1 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Open circuit ดังแสดงในภาพที่ 4.2



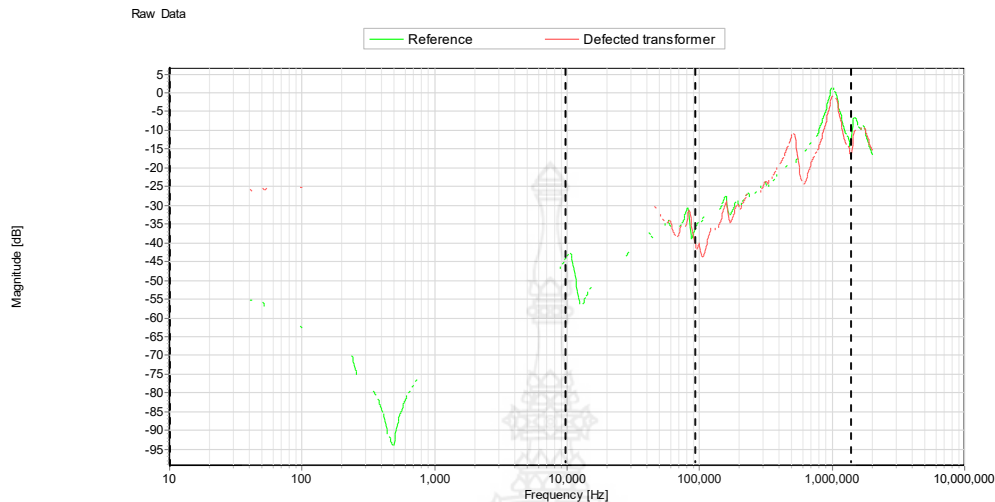
ภาพที่ 4.2 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H2 – H3 [OPEN]

จากภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า

- ย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 20Hz–10kHz สภาพแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ
- ย่านความถี่ปานกลาง ประมาณ 10kHz – 100kHz สภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ
- ย่านความถี่สูง ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ

4.1.3 HV open circuit (All other terminal floating) H3-H1

การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H1 และ วัดสัญญาณออกที่ H2 ส่วนด้าน H3 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Open circuit ดังแสดงในภาพที่ 4.3



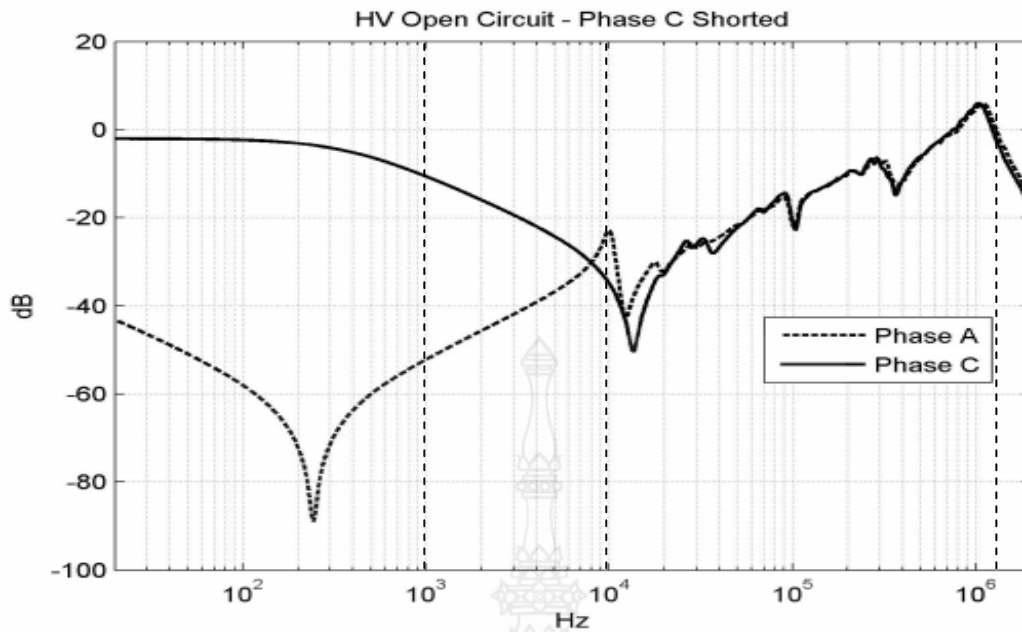
ภาพที่ 4.3 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H3 – H1 [OPEN]

จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า

- ย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 20Hz–10kHz สภาพแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ กราฟมีความเบี่ยงเบนสูงมาก แสดงให้เห็นว่า แกนเหล็กเสียรูป และรวมไปถึงขดลวด
- ย่านความถี่ปานกลาง ประมาณ 10kHz – 100kHz สภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ ขดลวดมีแรงมากระทำ ขดลวดเกิดความเสียหาย เกิดการลัดวงจร
- ย่านความถี่สูง ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ ผลจากการลัดวงจรขดลวดกับขดลวดทางด้าน High voltage และแกนเหล็กเสียรูปซึ่งอธิบายได้ ตามภาพที่ 4.4 และ 4.5 ตามมาตรฐาน IEEE C57.149

Frequency range	Winding turn-to-turn short circuit Assuming, no other failure modes exist:
20 Hz – 10 kHz	Open Circuit Tests: The short circuit failure mode removes the effect of the core's reluctance from the open circuit FRA results. The FRA open circuit trace assumes a similar behavior as the short circuit test. The affected winding will show the greatest change. This failure mode will also affect the FRA responses for all other windings, but not as much. Short Circuit Tests: The results will not compare well against previous data or amongst phases. The affected winding is generally offset.
5 kHz – 100 kHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: This range can shift or produce new resonance peaks and valleys. The changes will be greater for the affected phase.
50 kHz – 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: This range can shift or produce new resonance peaks and valleys. The changes will be greater for the affected phase.
> 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: This range can shift or produce new resonance peaks and valleys. The changes will be greater for the affected phase.

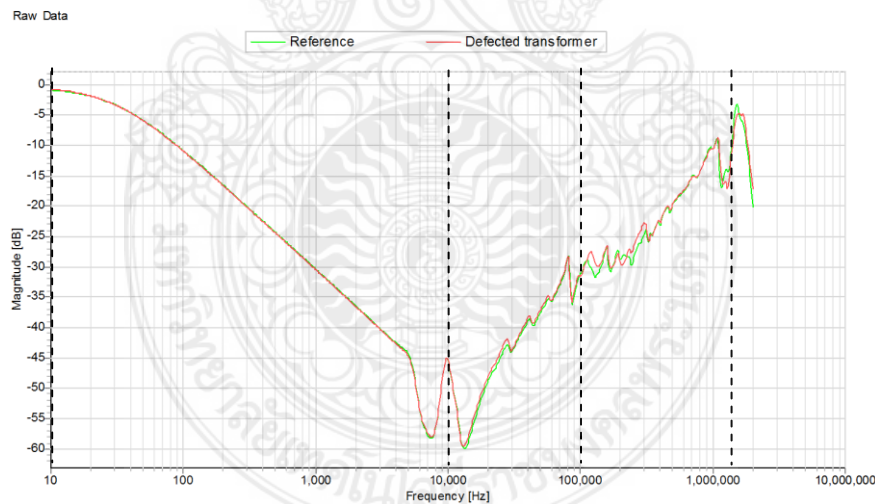
ภาพที่ 4.4 ตารางวิเคราะห์ขดลวดลัดวงจรถึงกันของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149



ภาพที่ 4.5 กราฟการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149

4.1.4 Short circuit HV to LV. H1-H2, X1-X2-X3

การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H1 และวัดสัญญาณออกที่ H2 ส่วนด้าน H3 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Short circuit ดังแสดงในภาพที่ 4.6



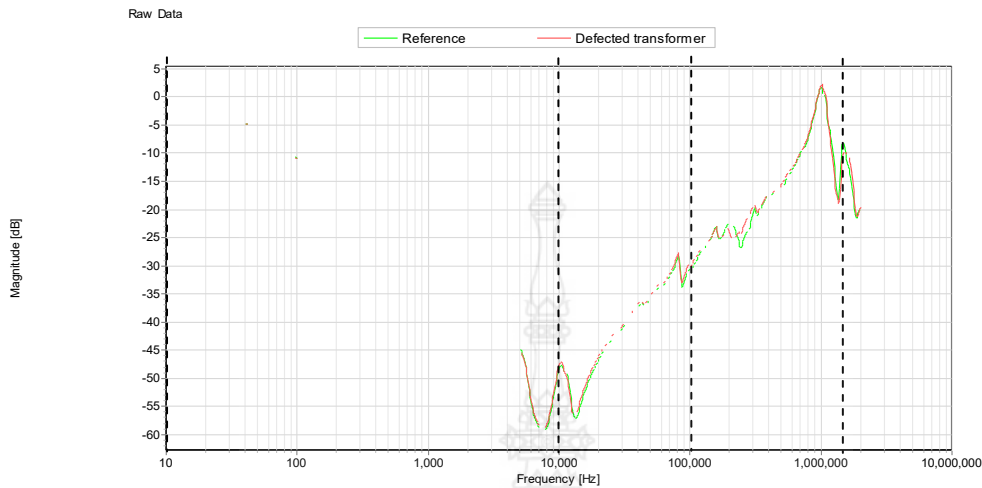
ภาพที่ 4.6 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H1-H2, X1-X2-X3 [Short circuit]

จากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า

- ย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 20Hz–10kHz สภาพแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ
- ย่านความถี่ปานกลาง ประมาณ 10kHz - 100kHz สภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ
- ย่านความถี่สูง ประมาณ 100 kHz - 2 MHz สภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ

4.1.5 Short circuit HV to LV. H2-H3, X1-X2-X3

การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H2 และวัดสัญญาณออกที่ H3 ส่วนด้าน H1 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Short circuit ดังแสดงในภาพที่ 4.7



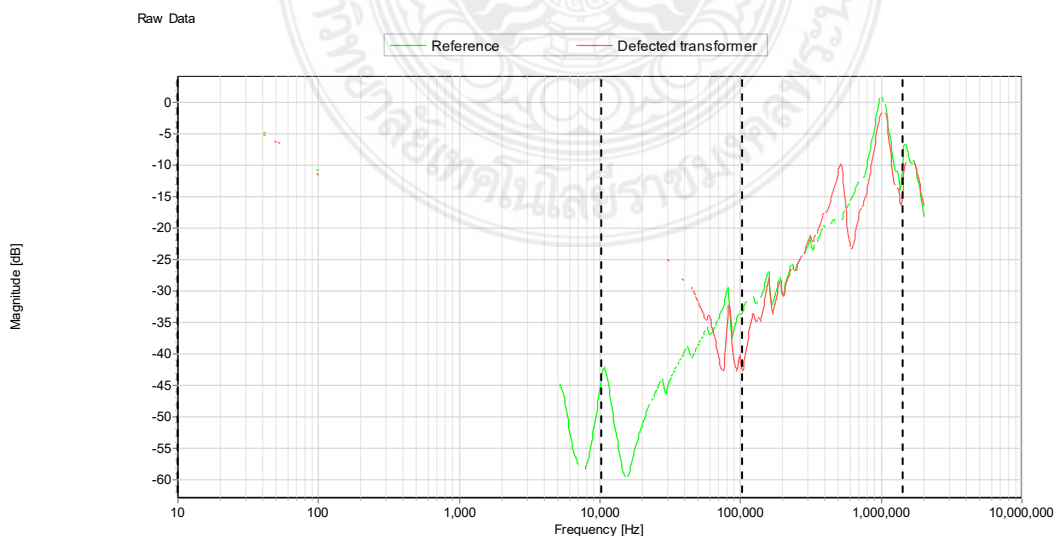
ภาพที่ 4.7 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H2-H3, X1-X2-X3 [Short circuit]

จากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า

- ย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 20Hz-10kHz สภาพแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ
- ย่านความถี่ปานกลาง ประมาณ 10kHz - 100kHz สภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ
- ย่านความถี่สูง ประมาณ 100 kHz - 2 MHz สภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติ

4.1.6 Short circuit HV to LV. H3-H1, X1-X2-X3

การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H3 และวัดสัญญาณออกที่ H1 ส่วนด้าน H2 Open circuit โดยด้าน Low voltage X1,X2 และ X3 Short circuit ดังแสดงในภาพที่ 4.8



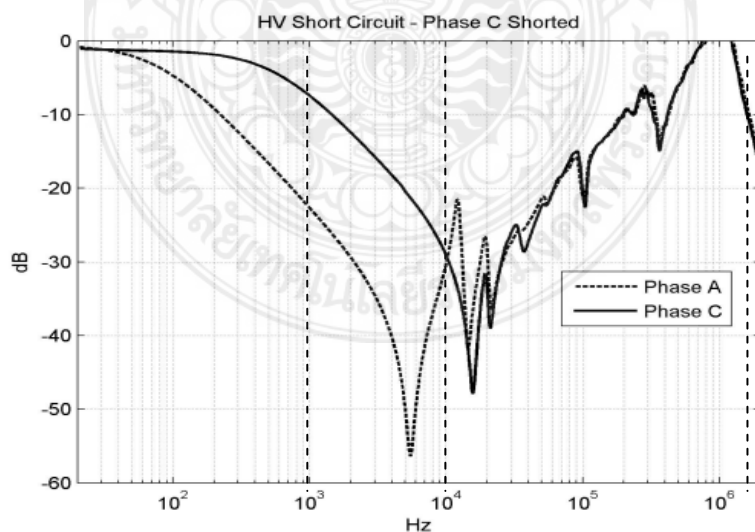
ภาพที่ 4.8 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ H3-H1, X1-X2-X3 [Short circuit]

จากภาพที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า

- ย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 20Hz–10kHz สภาพแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ กราฟมีความเบี่ยงเบนสูงมาก แสดงให้เห็นว่า แกนเหล็กเสียรูป และรวมไปถึงขดลวด
- ย่านความถี่ปานกลาง ประมาณ 10kHz – 100kHz สภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ ขดลวดมีแรงมากระทำ ขดลวดเกิดความเสียหาย เกิดการลัดวงจร
- ย่านความถี่สูง ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ ผลจากการลัดวงจรขดลวดกับขดลวดทางด้าน High voltage และแกนเหล็กเสียรูปซึ่งอธิบายได้ ตามภาพที่ 4.9 และ 4.10 ตามมาตรฐาน IEEE C57.149

Frequency range	Winding turn-to-turn short circuit Assuming, no other failure modes exist:
20 Hz – 10 kHz	Open Circuit Tests: The short circuit failure mode removes the effect of the core's reluctance from the open circuit FRA results. The FRA open circuit trace assumes a similar behavior as the short circuit test. The affected winding will show the greatest change. This failure mode will also affect the FRA responses for all other windings, but not as much. Short Circuit Tests: The results will not compare well against previous data or amongst phases. The affected winding is generally offset.
5 kHz – 100 kHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: This range can shift or produce new resonance peaks and valleys. The changes will be greater for the affected phase.
50 kHz – 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: This range can shift or produce new resonance peaks and valleys. The changes will be greater for the affected phase.
> 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: This range can shift or produce new resonance peaks and valleys. The changes will be greater for the affected phase.

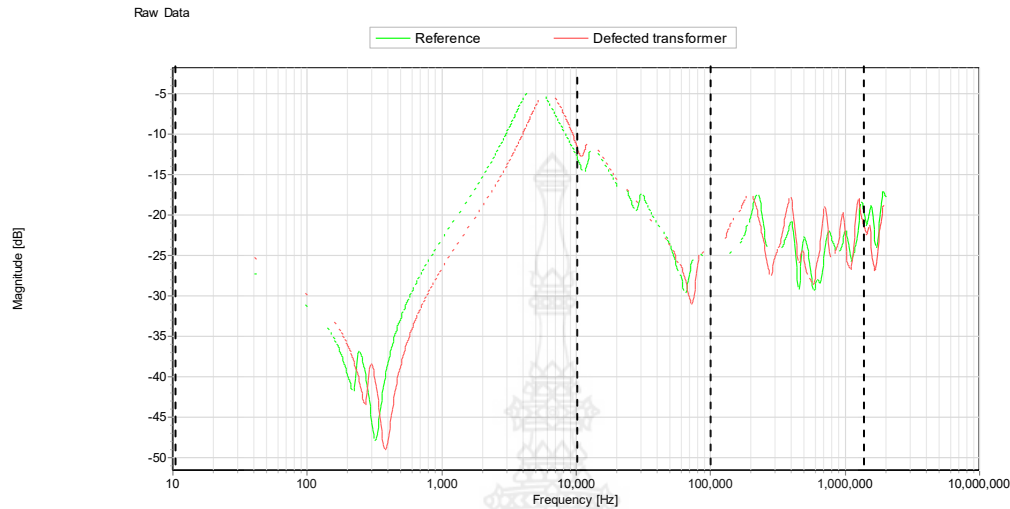
ภาพที่ 4.9 ตารางวิเคราะห์ขดลวดลัดวงจรถึงกันของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149



ภาพที่ 4.10 กราฟการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149

4.1.7 LV open circuit (All other terminal floating) X1 – X0

การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ X1 และวัดสัญญาณออกที่ X0 ส่วนด้าน X2 และ X3 Open circuit โดยด้าน High voltage H1,H2 และ H3 Open circuit ดังแสดงในภาพที่ 4.11



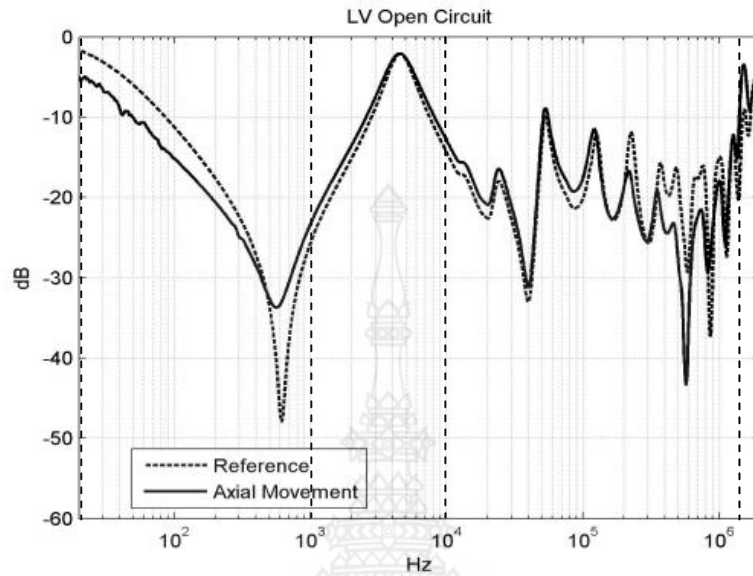
ภาพที่ 4.11 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ X1 – X0 [OPEN]

จากภาพที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า

- ย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 20Hz–10kHz สภาพแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ กราฟมีความเบี่ยงเบน แสดงให้เห็นว่า แกนเหล็กเริ่มเสียรูป และรวมไปส่วนอื่นๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- ย่านความถี่ปานกลาง ประมาณ 10kHz – 100kHz สภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ การเรียงตัวของขดลวดไม่สม่ำเสมอ
- ย่านความถี่สูง ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ ผลจากการเรียงตัวของขดลวดที่ไม่สม่ำเสมอทางด้าน Low voltage และแกนเหล็กเริ่มเสียรูปซึ่งอธิบายได้ ตามภาพที่ 4.12 และ 4.13 ตามมาตรฐาน IEEE C57.149

Frequency range	Axial winding deformation Assuming, no other failure modes exist:
20 Hz – 10 kHz	Open Circuit Tests: This region (core region) is generally unaffected during axial winding deformation. Short Circuit Tests: Results in a change in impedance. The FRA trace for the affected winding causes a difference between phases or previous results in the inductive roll-off portion.
5 kHz – 100 kHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: Axial winding deformation is most obvious in this range. The bulk winding range can shift or produce new resonance peaks and valleys depending of the severity of the deformation. The changes will be greater for the affected winding, but it is still possible to have the effects transferred to the other winding(s).
50 kHz – 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: Axial winding deformation can shift or produce new resonance peaks and valleys depending of the severity of the deformation. The changes will be greater for the affected winding, but it is still possible to have the effects transferred to the other winding(s).
> 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: The response to axial winding deformation is unpredictable.

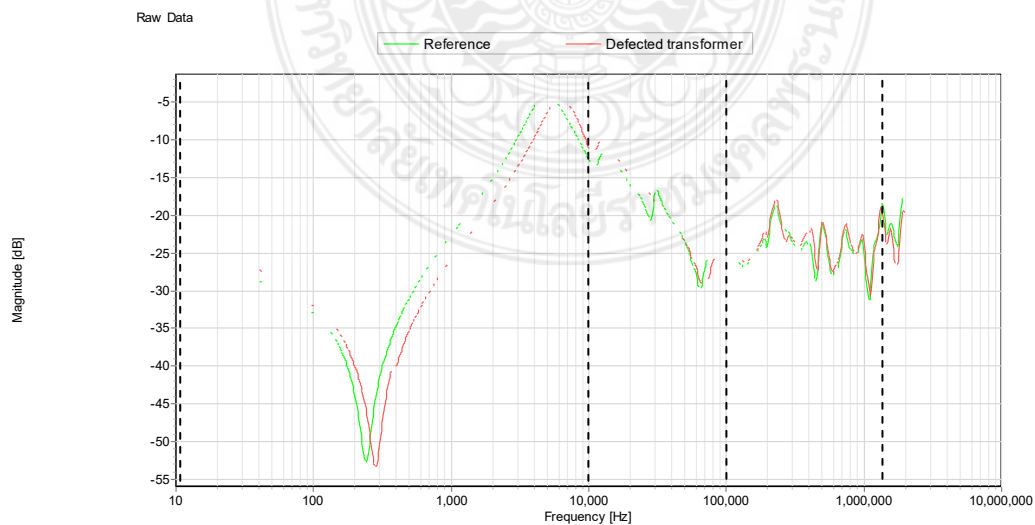
ภาพที่ 4.12 บทวิเคราะห์การเสียรูปของขดลวดแนวแกนของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149



ภาพที่ 4.13 กราฟการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149

4.1.8 LV open circuit (All other terminal floating) X2 – X0

การต่อเครื่องมื่อวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ X2 และวัดสัญญาณออกที่ X0 ส่วนด้าน X1 และ X3 Open circuit โดยด้าน High voltage H1,H2 และ H3 Open circuit ดังแสดงในภาพที่ 4.14



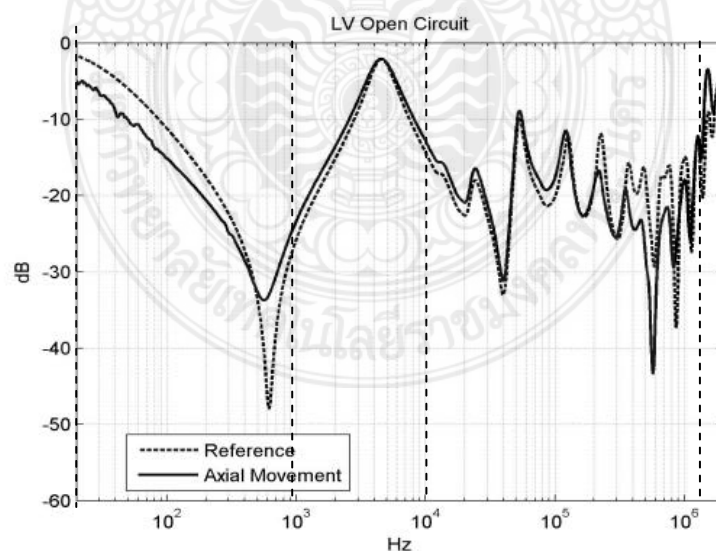
ภาพที่ 4.14 ผลของการตอบสนองความถี่โดยต่อแบบ X2 – X0 [OPEN]

จากภาพที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า

- ย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 20Hz–10kHz สภาพแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ กราฟมีความเบี่ยงเบน แสดงให้เห็นว่า แกนเหล็กเริ่มเสีกรูป และรวมไปส่วนอื่นๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- ย่านความถี่ปานกลาง ประมาณ 10kHz – 100kHz สภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ การเรียงตัวของขดลวดไม่สม่ำเสมอ
- ย่านความถี่สูง ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ ผลจากการเรียงตัวของขดลวดที่ไม่สม่ำเสมอทางด้าน Low voltage และแกนเหล็กเริ่มเสีกรูปซึ่งอธิบายได้ ตามภาพที่ 4.15 และ 4.16 ตามมาตรฐาน IEEE C57.149

Frequency range	Axial winding deformation Assuming, no other failure modes exist:
20 Hz – 10 kHz	Open Circuit Tests: This region (core region) is generally unaffected during axial winding deformation. Short Circuit Tests: Results in a change in impedance. The FRA trace for the affected winding causes a difference between phases or previous results in the inductive roll-off portion.
5 kHz – 100 kHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: Axial winding deformation is most obvious in this range. The bulk winding range can shift or produce new resonance peaks and valleys depending of the severity of the deformation. The changes will be greater for the affected winding, but it is still possible to have the effects transferred to the other winding(s).
50 kHz – 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: Axial winding deformation can shift or produce new resonance peaks and valleys depending of the severity of the deformation. The changes will be greater for the affected winding, but it is still possible to have the effects transferred to the other winding(s).
> 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: The response to axial winding deformation is unpredictable.

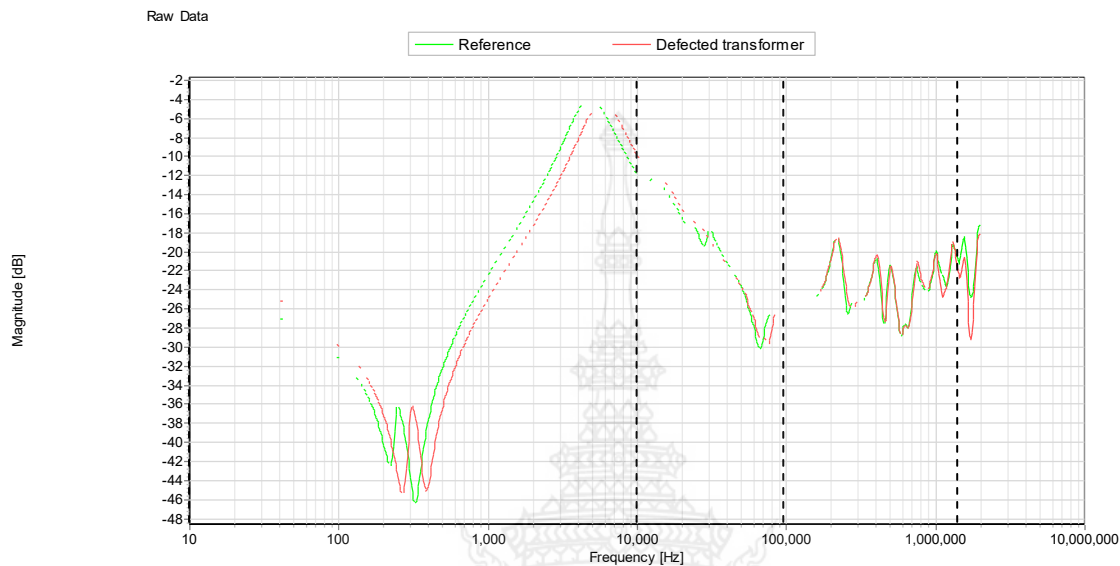
ภาพที่ 4.15 บทวิเคราะห์การเสีกรูปของขดลวดแนวแกนของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149



ภาพที่ 4.16 กราฟการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149

4.1.9. LV open circuit (All other terminal floating) X3 – X0

การต่อเครื่องมือวัด (FRA5310) กับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการเข้าสัญญาณที่ H3 และวัดสัญญาณออกที่ X0 ส่วนด้าน X1 และ X2 Open circuit โดยด้าน High voltage X1,X2 และ X3 Open circuit ดังแสดงในภาพที่ 4.17



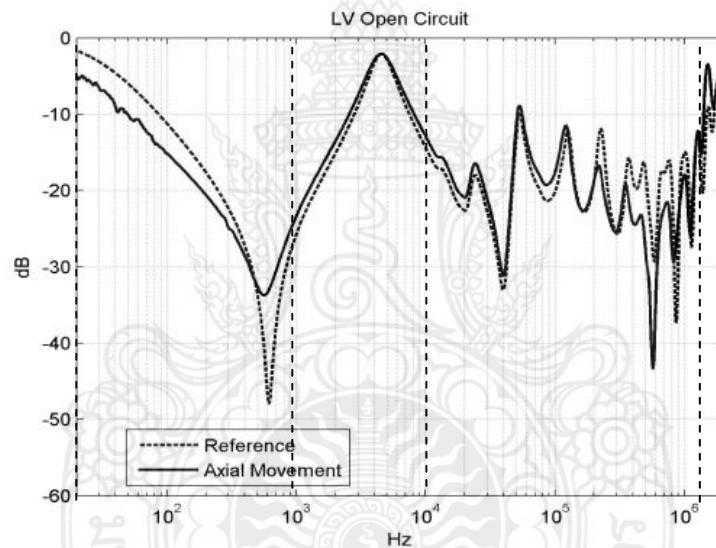
ภาพที่ 4.17 ผลของการตอบสนองความถี่ต่อแบบ X3 – X0 [OPEN]

จากภาพที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า

- ย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 20Hz–10kHz สภาพแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ กราฟมีความเบี่ยงเบน แสดงให้เห็นว่า แกนเหล็กเริ่มเสีรูปร่าง และรวมไปส่วนอื่นๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- ย่านความถี่ปานกลาง ประมาณ 10kHz – 100kHz สภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ การเรียงตัวของขดลวดไม่สม่ำเสมอ
- ย่านความถี่สูง ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ผิดปกติ ผลจากการเรียงตัวของขดลวดที่ไม่สม่ำเสมอทางด้าน Low voltage และแกนเหล็กเริ่มเสีรูปร่างซึ่งอธิบายได้ ตามภาพที่ 4.18 และ 4.19 ตามมาตรฐาน IEEE C57.149

Frequency range	Axial winding deformation Assuming, no other failure modes exist:
20 Hz – 10 kHz	Open Circuit Tests: This region (core region) is generally unaffected during axial winding deformation. Short Circuit Tests: Results in a change in impedance. The FRA trace for the affected winding causes a difference between phases or previous results in the inductive roll-off portion.
5 kHz – 100 kHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: Axial winding deformation is most obvious in this range. The bulk winding range can shift or produce new resonance peaks and valleys depending of the severity of the deformation. The changes will be greater for the affected winding, but it is still possible to have the effects transferred to the other winding(s).
50 kHz – 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: Axial winding deformation can shift or produce new resonance peaks and valleys depending of the severity of the deformation. The changes will be greater for the affected winding, but it is still possible to have the effects transferred to the other winding(s).
> 1 MHz	Open Circuit and Short Circuit Tests: The response to axial winding deformation is unpredictable.

ภาพที่ 4.18 บทวิเคราะห์การเสถียรของขดลวดแนวแกนของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149



ภาพที่ 4.19 กราฟการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.149

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 50 MVA ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลการตอบสนองความถี่พบว่าเกิดการลัดวงจรขดลวดกับขดลวดทางด้าน High voltage และแกนเหล็กเสียรูป ส่วนด้าน Low voltage เกิดการเรียงตัวของขดลวดที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งเกิดจากผลของการลัดวงจรทางด้าน High voltage และการเสียที่เสียรูป ทำให้ขดลวดเสียรูปเป็นลักษณะตามแนวแกน โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 50 MVA

Test type	Test sequence	Energize	Shorted	Result
HV open circuit (All other terminal floating)	1	H1-H2	-	PASS
	2	H2-H3	-	PASS
	3	H3-H1	-	FAIL
Short circuit HV to LV	4	H1-H2	X1-X2-X3	PASS
	5	H2-H3	X1-X2-X3	PASS
	6	H3-H1	X1-X2-X3	FAIL
LV open circuit (All other terminal floating)	7	X1-X0	-	FAIL
	8	X2-X0	-	FAIL
	9	X3-X0	-	FAIL

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Frequency Response Analysis for Power Transformer) ทำให้ทราบถึงความเสียหายของโครงสร้างขดลวด และ ส่วนประกอบต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบสภาพความผิดปกติ ของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากการใช้งานสำหรับการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Frequency Response Analysis for Power Transformer) ซึ่งทำการทดสอบหม้อแปลงขนาด 50 MVA , 115/22 kV โดยปล่อยความถี่ ตั้งแต่ 2 Hz – 2 MHz และนำผลของการตอบสนองความถี่มาวิเคราะห์เพื่อหาความผิดปกติ ของหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEEE C57.149 ซึ่งแยกความถี่ออกเป็น 3 ช่วงคือ

1. ช่วงความถี่ต่ำบอกถึงสภาพของแกนเหล็กอยู่ในช่วง ความถี่ 1 kHz – 100 kHz
2. ช่วงความถี่ปานกลาง บอกถึงสภาพของขดลวดอยู่ในช่วง ความถี่ 100 kHz – 600 kHz
3. ช่วงความถี่สูงบอกถึงสภาพของส่วนเชื่อมต่อต่างๆอยู่ในช่วง ความถี่ 600 kHz – 1 MHz

การทดสอบพบว่าผลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่ได้ จากการตรวจสอบครั้งที่ 2 มีการเบี่ยงเบนมาก ซึ่งความถี่ที่เบี่ยงเบนไปมีค่าอยู่ในเกณฑ์ ไม่ปกติ หม้อแปลงไฟฟ้าเสียหายความสมดุลภายใน สนามแม่เหล็กเคลื่อนผ่านตัวขดลวดมีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้การปรับแรงดันและส่งจ่ายพลังงานมีความผิดปกติ ทำให้ประสิทธิภาพลดลง ชำรุดเสียหาย ซึ่งเราอาจนำผลที่ได้จากการตรวจสอบการตอบสนองความถี่มาวิเคราะห์ร่วมกับการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธี อื่นๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งหมายความว่าถึงแม้จะทำการตรวจสอบหม้อแปลงด้วย วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่แล้ว ก็จำเป็นต้องทำการตรวจสอบหม้อแปลงด้วยวิธี อื่นๆอีก เนื่องจากอาจมีความเบี่ยงเบนของการตอบสนองความถี่ของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า

จากปัจจัยภายนอกที่ผู้ทำการทดสอบไม่ทราบ ดังนั้น การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าก็เพื่อการวิเคราะห์เจาะจงจุดที่เกิดความ ผิดปกติ ของโครงสร้างภายในหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อช่วยลด ระยะเวลา และต้นทุน ในการวิเคราะห์ หาสาเหตุ ของการเกิดความผิดปกติต่างๆที่ เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการทดสอบหม้อแปลงด้วย วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ ในการทดสอบจะต้องเตรียมอุปกรณ์ ด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากระบบในการทดสอบมีความไวต่อสัญญาณรบกวน เช่น ฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งอาจทำให้สัญญาณความถี่ที่ปล่อยเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการเบี่ยงเบน หรือการต่อยึดอุปกรณ์ ทดสอบกับขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า หากเปลี่ยนไปจากจุดเดิมหรือทำการยึดจับไม่แน่นก็จะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการวัดคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่แท้จริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมาคมวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศไทย (IEEE Thailand Section)
“ Maintenance of Electrical Equipment for Industrial Power System ”
- [2] <http://ee50291242.exteen.com>
- [3] นายเชาวลิต ชวนรักษาสัตย์ วิศวกรระดับ 7 แผนกวิศวกรรมและทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า “ เอกสารการบรรยายการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ”
- [4] นายณัฐชัย รัตนคช , ส.อ.เอกรินทร์ โพธิวัฒน์ “ ประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดน้ำมันเพื่อนำไปสู่แผนการบำรุงรักษา ” ปริญญานิพนธ์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม 2554
- [5] Charles Sweetser, B.Sc., M.Sc. Dr. Tony McGrail , B. Sc. , M.Sc. , “ Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications A Technical Paper from Doble Engineering ” Doble Engineering Company 85 Walnut St. Watertown MA 02472 USA , Version 1.0 , 2003
- [6] Eilert Bjerkan , “HIGH FREQUENCY MODELING OF POWER TRANSFORMERS STRESSES AND DIAGNOSTICS ” , Doctoral Thesis for the degree of Doctor Ingenior Trondheim , May 2005 Faculty of Information Technology , Matematics and Electrical Engineering
- [7] Megger Group Limited , “ USER'S MANUAL for Sweep Frequency Response Analyzer FRAX 99, 101 and 150 ” , 2009 Megger AB Released in 2008
- [8] S. Tenbohlen ALSTOM Schorch Transformatoren GmbH, Monchengladbach, Germany and S. A. Ryder ALSTOM Transformer Research Centre, Saint-Ouen, France, “ Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods ” , XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003, Smit (ed.) 2003 Millpress, Rotterdam
- [9] IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, Sponsored by the Transformers Committee IEEE, Park Avenue, New York, USA, March 8, 2013.
- [10] Operating Instructions, Hefley Test AG, FRA 5310, Frequency Response Analyzer.
- [11] M. Wang and A.J.Vandermaar, “Transformer winding movement monitoring in service-key factors affecting FRA measurements,” feature article DEIS, Canada, vol. 20, No. 5, Sep-October 2004.
- [12] L. Coffeen, J. Britton and J. Rickmann, “A new technique to detect winding displacements in power transformers using frequency response analysis,” IEEE bologna power tech conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [13] A. Amini, N. Das, S. Islam, "Impact of buckling deformation on the FRA signature of power transformer", Power Engineering Conference (AUPEC) 2013 Australasian Universities, pp. 1-4, 2013.
- [14] X. Liang, A. Kadri, J. Stevens, R. Adedun, "Frequency response analysis for phase-shifting transformers in oil field facilities", Industrial & Commercial Power Systems Technical Conf (I&CPS) 2013 IEEE/IAS 49th, pp. 1-10, 2013.
- [15] V. Behjat, M. Mahvi, E. Rahimpour, "New statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: non-parametric statistical methods", IET Sci. Meas. Technol., vol. 10, no. 4, pp. 364-369, 2016.
- [16] O. Aljohani, A. Abu-Siada, "Application of DIP to Detect Power Transformers Axial Displacement and Disk Space Variation Using FRA Polar Plot Signature", IEEE Transaction on Industrial Informatics, vol. 13, no. 4, August 2017
- [17] M. H. Samimi, A. A. S. Akmal, H. Mohseni, S. Tenbohlen, "Detection of transformer mechanical deformations by comparing different FRA connections", Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 86, pp. 53-60, Mar. 2017.
- [18] K. Usha, S. Usa, "Inter disc fault location in transformer windings using SFRA", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, no. 6, pp. 3567-3573, Dec. 2015.. K. Usha, S. Usa, "Inter disc fault location in transformer windings using SFRA", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, no. 6, pp. 3567-3573, Dec. 2015.
- [19] IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil- Immersed Transformers, Sponsored by the Transformers Committee IEEE, Park Avenue, New York, USA, March 8, 2013.
- [20] Operating Instructions, Hefley Test AG, FRA 5310, Frequency Response Analyzer.
- [21] M. Wang and A.J.Vandermaar, "Transformer winding movement monitoring in service-key factors affecting FRA measurements," feature article DEIS, Canada, vol. 20, No. 5, Sep-October 2004.
- [22] Larry Coffeen, Jeffrey Britton and Johannes Rickmann, "A new technique to detect winding displacements in power transformers using frequency response analysis," IEEE bologna power tech conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.

ภาคผนวก
เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ
Conference Proceedings

ECTI-CARD 2018

การประชุมวิชาการ ภาควิชาฯ และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10

ณ ศูนย์วัฒนธรรมภาคเหนือตอนล่าง วังจันทร์ ริเวอร์วิว จ.พิษณุโลก

26 - 29 มิถุนายน 2561



การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อตอบสนองนโยบายประเทศไทย 4.0
10th ECTI-CARD-2018, Pattaya, Thailand

ECTI-CARD 2018

การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10
การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีเพื่อตอบสนองนโยบายประเทศไทย 4.0

วันที่ 26-29 มิถุนายน 2561

ณ ศูนย์วัฒนธรรมภาคเหนือตอนล่าง วังจันทน์ริเวอร์วิว

จังหวัดพิษณุโลก

จัดโดย

สมาคมวิชาการไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม และสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
สถาบันมาตรฐานวิชาชีพแห่งประเทศไทย

วันที่ 26-29 มิถุนายน ๒๕๖๑ ณ ศูนย์วัฒนธรรมภาคเหนือตอนล่าง วังจันทน์ริเวอร์วิว จังหวัดพิษณุโลก

อีเมลตอบรับ ECTI-CARD 2018**ECTI-CARD 2018 : Notification**

ECTI-CARD 2018 Secretary <mailcard@ecti-thailand.org>

ศ. 20/4/2018 10:19

คุณ

Dear Teerapat Thaweewong

Affiliation: Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

Paper ID: 1067

Title: การทดสอบความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 MVA ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของความถี่ Fault Test of A 50 MVA Transformer By Using Frequency Response Analysis method

The ECTI-CARD 2018 Technical Program Committee has completed the review process, and we are pleased to inform you that the manuscript listed above has been ACCEPTED for presentation. Congratulations!

Information on many aspects of ECTI-CARD 2018 are available on the conference web site <http://ecticard2018.ecticard.org> and more will come very soon. The conference information will be updated shortly to include the full technical program.

Included in this e-mail are the reviewers' comments on your paper. Please revise your paper according to reviewers' comments.

Also importance! The final manuscript MUST BE LIMITED to only 4 pages. Violating this limit WILL cause your paper being unpublished.

The final manuscript MUST be uploaded to the <http://ecticard2018.ecticard.org> web site ONLY by May 1, 2018. We do not accept any submission by e-mail or any other way.

CRITICAL INFORMATION: ***At least one author MUST REGISTER for the conference at a REGULAR rate before May 1, 2018.*** Note that ONE regular registration will cover only 1 PAPER. Failure to do so will result in removal of the paper from the Technical Program and proceedings. Additionally, the paper MUST be presented at the conference by one of the authors. You can make a payment of registration by following the instruction shown on the ECTI-CARD 2018 website.

Again, congratulations and we look forward to welcoming you to the ECTI-CARD 2018.

Sincerely,

Technical Program Committee

ผศ.ดร.อภิรักษ์ จันทร์สร้าง (มก.)
 ดร.ชัยรัตน์ พินทอง (มน.)
 ผศ.ดร.ปิยนัย ภาชนะพรรณ (มน.)
 รศ.ดร.ไพศาล มุณีสว่าง (มน.)
 รศ.ดร.พรชัย พุกฤษัทรานนท์ (มอ.)
 รศ.ดร.เอกรัฐ บุญเชียง (มช.)
 รศ.ดร.พีระยศ แสนโกชน์ (มก.)
 ผศ.ดร.ชัยพร ใจแก้ว (มก.)
 รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล (สจล.)
 ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า (สจล.)
 รศ.ดร.ชานนท์ วาริสาร (สจล.)
 ผศ.ดร.ศุภกิต แก้วดวงตา (มทร.ล้านนา)
 ผศ.ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว (มทร.พระนคร)
 ดร.ชัยวัฒน์ เจษฎาจินต์ (มว.)
 ดร.ศรียุญา ปะสะกวี (มว.)
 ผศ.ดร.พีรวัฒน์ วัฒนพงศ์ (มก.)
 รศ.ดร.อภิรักษ์ อรุโสมภณ (มมส.)
 เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร (กทพ.)

 --- Comments from the Reviewers: ---

----- Review for Paper#1067-----

การประเมินตนเอง: กรุณาประเมินความสามารถของคุณในหัวข้อนี้ :

Self-Evaluation: Please assess your competence in the subject matter :

-เชี่ยวชาญ

-Strong

บทความฉบับนี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือสัมพันธ์กับงานประชุม ECTI-CARD หรือไม่
 Is this paper relevance to ECTI-CARD or match with ECTI-CARD's objective?

-ใช่

-Yes

ประโยชน์ต่อส่วนรวม (Contribution)

Contribution

-มีประโยชน์มากในแง่ของการบูรณาการความรู้ หรือการช่วยประหยัดทรัพยากร การลงทุน และเวลา

-Major contribution in term of know-how or cost/time/lost saving

ความสมบูรณ์ของงาน (Completeness)

Completeness

-นวัตกรรมที่พร้อมใช้งาน ส่วนติดต่อผู้ใช้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ พร้อมด้วยการทดลองบางส่วนและวิเคราะห์ผล
 ถูกต้องตามการทางวิทยาศาสตร์

-Ready-to-use product, accepted user interface with little scientific quantitative testing results

ประสิทธิผลต่อการลงทุน (Effectiveness)

Effectiveness

- ประสิทธิผลอยู่ในระดับดีด้วยการลงทุนที่เหมาะสม
- Good cost effectiveness with appropriate investment

การนำไปประยุกต์ใช้งานจริง (Real Adoption)

Real Adoption

- ได้ข้อมูลความต้องการมาจากผู้ใช้จริงพร้อมมีการทดสอบบางส่วน
- Get requirements from real users with little test results

ทักษะนำเสนอ (Paper Readability)

Paper Readability

- นำเสนอได้ดี มีการใช้ภาษาที่เหมาะสม
- Well-written presentation with proper language

ผลการประเมินในภาพรวม (Overall Recommendation)

Overall Recommendation

- ตอบรับ (คุณภาพงานดี)
- Accept (Good quality)

จุดแข็งของบทความ:

Strengths of the paper:

--

จุดอ่อนของบทความ:

Weaknesses of the paper:

--

ความเห็นต่อการพัฒนาบทความต่อไป:

Comment for paper improvement:

--

----- Review for Paper#1067-----

การประเมินตนเอง: กรุณาประเมินความสามารถของคุณในหัวข้อนี้ :

Self-Evaluation: Please assess your competence in the subject matter :

- ค่อนข้างเข้าใจ
- General

บทความฉบับนี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือสัมพันธ์กับงานประชุม ECTI-CARD หรือไม่

Is this paper relevance to ECTI-CARD or match with ECTI-CARD's objective?

- ใช่
- Yes

ประโยชน์ต่อส่วนรวม (Contribution)

Contribution

- มีประโยชน์มากในแง่ของการบูรณาการความรู้ หรือการช่วยประหยัดทรัพยากร การลงทุน และเวลา
- Major contribution in term of know-how or cost/time/lost saving

ความสมบูรณ์ของงาน (Completeness)

Completeness

- นวัตกรรมที่พร้อมใช้งาน ส่วนติดต่อผู้ใช้ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ พร้อมด้วยการทดลองบางส่วนและวิเคราะห์ผลถูกต้องตามการทางวิทยาศาสตร์
- Ready-to-use product, accepted user interface with little scientific quantitative testing results

ประสิทธิผลต่อการลงทุน (Effectiveness)

Effectiveness

- ประสิทธิภาพอยู่ในระดับดีด้วยการลงทุนที่เหมาะสม
- Good cost effectiveness with appropriate investment

การนำไปประยุกต์ใช้งานจริง (Real Adoption)

Real Adoption

- สามารถนำไปใช้งานได้จริงทันที หรือได้มีการนำไปใช้จริงแล้วพร้อมมีการแสดงผลการทำงาน
- Already implemented or real adoption in production line with running results

ทักษะนำเสนอ (Paper Readability)

Paper Readability

- นำเสนอได้ดี มีการใช้ภาษาที่เหมาะสม
- Well-written presentation with proper language

ผลการประเมินในภาพรวม (Overall Recommendation)

Overall Recommendation

- ตอบรับแน่นอน (คุณภาพงานดีเยี่ยม)
- Definitely accept (High quality)

จุดแข็งของบทความ:

Strengths of the paper:

--

จุดอ่อนของบทความ:

Weaknesses of the paper:

--

ความเห็นต่อการพัฒนาบทความต่อไป:

Comment for paper improvement:

--

ECTI-CARD 2018

ขอมอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

ธีรภัทร ทวีวงศ์, วิศวกร วุฒิปริญญาโท, วิศวกร รัชภัฏไทยเจริญชีพ

ได้นำเสนอบทความวิชาการภาคบรรยาย

เรื่อง “การทดสอบความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 MVA ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่”

ในการประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10

ระหว่างวันที่ 26 - 29 มิถุนายน พ.ศ.2561

ณ ศูนย์วัฒนธรรมภาคเหนือตอนล่าง วิทยาลัยนานาชาติ จ.พิษณุโลก



ผู้ว่าราชการจังหวัดสุโขทัย (นาย)
ประธานในการจัดงาน



ศาสตราจารย์ ดร.ไคยสิทธิ์ งามไพบูลย์ (นาย)
นายกสมาคม ECTI





SPU
SRIPATUM
UNIVERSITY



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๑ The 41st Electrical Engineering Conference (EECON-41)

วันที่ ๒๑ - ๒๓ พฤศจิกายน ๒๕๖๑

โรงแรมสุมิย์ แกรนด์ โทเทล แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี
เจ้าภาพจัดงาน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และ มหาวิทยาลัยศรีนครินทร

Volume 2

ไฟฟ้าสื่อสาร
อิเล็กทรอนิกส์
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
วิศวกรรมชีวการแพทย์
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า



อีเมลตอบรับ EECON-41

EECON-41 : Notification of Acceptance : Paper Code 0194

ตั้งค่าสถานะเพื่อติดตาม

EECON-41 Technical Program Committee Chair <eecon41-tpc@ubu.ac.th>

ศ. 7/9/2018 10:25

คุณ

Dear Sir/Madam,

Congratulations !

Your paper number **194** entitled

A Study Effect Transformer Effect by Frequency Response Analysis.

has been accepted for presentation at the **41th Electrical Engineering Conferences (EECON-41)** to be held in Ubon Ratchathani, Thailand, from November 21-23, 2018.

Please revise your paper according to the comment of the reviewers (if any) following this message and uploading the paper as a camera-ready to the online system again.

Reviewer 1 Comment :

บทความต้องการปรับปรุงค่อนข้างมาก 1.บทคัดย่อ ต้องปรับปรุงให้อ่านและทำความเข้าใจได้ง่าย และ abstract ไวยากรณ์ ประโยคต่างๆ ผิดอยู่มาก 2.ขาดทฤษฎีที่สำคัญทางคณิตศาสตร์ที่มาอธิบายผลการวัด 3.การทดลองด้วย FRA มีความ sensitive มากในการการจับวงจร ต่อผลการทดสอบ ซึ่งผู้เขียนไม่ได้แสดงให้เห็นในส่วนนี้เลย 4.ไม่มีการแสดงผลการทดสอบอะไรทั้งสิ้น 5.การใช้ตัวเลขอ้างอิงในบทความ ไม่ได้เรียงลำดับ(ข้อนี้อาจจะยอมรับได้)

Reviewer 2 Comment :

Reviewer 3 Comment :

ย่อหน้าหลังของบทนำควรจัดกันหลังให้เท่ากัน ควรมีแสดงข้อมูลผลการทดสอบที่สำคัญและมีผลต่อการวิเคราะห์ให้มากขึ้น เนื่องจากในบทความไม่ได้มีส่วนของผลการเก็บข้อมูลในการวิเคราะห์ โดยในหัวข้อที่ 5 เป็นการกล่าวถึงกรณีทั่วไปแทนการแสดงผลลัพธ์จากการวิจัย

The deadline for the submission of the camera ready will be on **October 8, 2018.**

The camera ready submission can be proceeded with the same Username and Password of the paper submission.

In addition, the early-bird registration is due on **October 8, 2018.** Thank you for your contribution to the EECON-41 conference.

The registration details can be found at : <https://eecon41.ubu.ac.th/registration>

We look forward to meeting you in EECON-41 at Ubon Ratchathani.

With best regards,

EECON-41 Technical Program Committee Chair



การประชุมวิชาการงานวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๑ (EECON-41)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ระหว่างวันที่ ๒๑ - ๒๓ พฤศจิกายน ๒๕๖๑

ขออวยพรให้ทุกท่านประสบความสำเร็จ

ธีรภัทร ทวีวงศ์

ได้นำเสนอบทความวิจัยเรื่อง

การวิเคราะห์ผลกระทบของหม้อแปลงไฟฟ้า
ด้วยเทคนิคการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ ชูเกียรติวิลาศ)
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวิชญ์ อภิวิชญ์)
นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)

๑๑

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรากร วงศ์สายเชื้อ)
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม

ประวัติผู้จัดทำวิทยานิพนธ์



ชื่อ สกุล นาย ธีรภัทร ทวีวงศ์
วันเดือนปีเกิด วันที่ 10 พฤศจิกายน 2535
สถานที่เกิด จังหวัด กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน 39 ซอย ไทยานนท์ 4 ถนน สนามบินน้ำ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
Email: teerapat.taveewong@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2557 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.2561 ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร