

การวินิจฉัยสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่

TRANSFORMER DIAGNOSIS BY USING FREQUENCY RESPONSE  
ANALYSIS METHOD

ภูษิต ถึงสุข

POOCHIT TUENGSOOK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของเอกสารต้นฉบับที่ส่งต่อให้ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมหอดูดาวภาคใต้

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2002-EN-14-020-167

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวินิจฉัยสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่

TRANSFORMER DIAGNOSIS BY USING FREQUENCY RESPONSE  
ANALYSIS METHOD



T105496

ภูชิต ถึงสุข

POOCHIT TUENGSOOK

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....105496  
วัน,เดือน,ปี..... 24 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-020-167

**TRANSFORMER DIAGNOSIS BY USING FREQUENCY RESPONSE  
ANALYSIS METHOD**

**POOCHIT TUENGSOOK**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2009  
KMITL-2009-EN-M-020-167**

**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวินิจฉัยสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่  
Thesis Title Transformer Diagnosis by Using Frequency Response Analysis Method  
นักศึกษา นายภูชิต ถึงสุข  
รหัสประจำตัว 50060221  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-020-167

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	
ดร.ศุภกิตติ์	โชติโก	
ดร.สุรินทร์	คำฝอย	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2552 เวลา 11.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2552



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวินิจฉัยสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่
นักศึกษา	นายภูชิต ถึงสุข
รหัสนักศึกษา	50060221
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สุรินทร์ คำฝอย

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการวินิจฉัยสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสภาพสมบูรณ์และมีความผิดปกติในกรณีต่างๆ โดยใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่ วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้คือ การใช้แรงดันไซน์ปรับเปลี่ยนความถี่กวาดในช่วงความถี่ที่กว้างโดยที่คุณลักษณะเชิงความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองขึ้น ได้ถูกวัดและบันทึกไว้เป็นฐานข้อมูลก่อนที่จะทำการจำลองให้เกิดความผิดปกติในลักษณะต่างๆ ขึ้นที่ตัวหม้อแปลงและทำการวัดผลตอบสนองอีกครั้ง ผลตอบสนองความถี่ที่ได้มีความแตกต่างกันชัดเจน นอกจากนี้การหาค่าสหสัมพันธ์และการเบี่ยงเบนสเปคตรัม ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความแตกต่าง ของฐานข้อมูลกับกรณีที่เกิดความผิดปกติได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

<b>Thesis Title</b>	Transformer Diagnosis by Using Frequency Response Analysis Method
<b>Student</b>	Mr. Poochit Tuengsook
<b>Student ID.</b>	50060221
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Surin Khomfoi

### **ABSTRACT**

This thesis presents the transformer condition analysis in case of healthy and failure transformer employing frequency response diagnosis. The sweep sine voltage in wide frequency ranges is the input of the transformer model. The frequency response is measured and recorded as a finger print. Then, the failed cases of transformer model are simulated for frequency response measurements. The test results show that there are significant differences between the finger print and the failure transformer responses. Besides, the correlation value and spectrum deviation analysis are also used in this thesis for analyzing the different of the test data.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก ดร. สุรินทร์ คำฝอย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์, ผศ. นรเศรษฐ พัฒนเดช, อาจารย์พิรุณ ฤทธิโกวิท, และ Prof. Dr. Masaaki Kando ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสี่ท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณคุณสามภพ แสงอำยวน, คุณกฤษวัฒน์ ทองแถมแก้ว วิศวกรไฟฟ้าการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูล และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคุณคุณณัฐพันธ์ บุญเสนอ, คุณโกสินทร์ คล่องเชิงสถาน, คุณเพทาย นิ่มสนอง, และคุณอภิชาติ นิ่มเทียน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชากรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภูษิต ถึงสุข

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	5
2.1 หลักการเบื้องต้น.....	5
2.2 การวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	6
2.3 วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	7
2.3.1 Low Voltage Impulse(LVI).....	8
2.3.2 Sweep Frequency (SFRA).....	8
2.4 วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	9
2.4.1 Open Circuit Test.....	9
2.4.2 Short Circuit Test.....	10
2.5 เครื่องมือในการวิเคราะห์.....	10
2.5.1 การเปรียบเทียบด้วยตา.....	10
2.5.2 การเปรียบเทียบด้วยการใช้ครรชนิจวัดทางสถิติ.....	11
2.5.2.1 สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficients).....	11
2.5.2.2 การเบี่ยงเบนสเปคตรัม (Spectrum Deviation).....	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ.....	13
2.7 ผลตอบสนองความถี่ของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน.....	14
2.7.1 ทฤษฎี.....	14
2.7.2 รีโซแนนซ์.....	16
2.7.3 รีโซแนนซ์ ในการต่ออนุกรม.....	16
2.7.4 รีโซแนนซ์ในการต่อขนาน.....	18
บทที่ 3 การออกแบบและการจำลอง.....	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบง่าย.....	22
3.2.1 การจำลองผลที่เกิดจากแบบจำลอง 2 คอยล์ที่แตกต่างกัน.....	22
3.2.1.1 แบบเป็นชั้น (Layer).....	22
3.2.1.2 แบบคอยล์เป็นวงกลม (Disk).....	22
3.2.2 การจำลองการต่ออนุกรมและการต่อขนาน.....	23
3.2.2.1 สองคอยล์เหมือนกันขนานกัน.....	23
3.2.2.2 สองคอยล์เหมือนกันต่ออนุกรมกัน.....	23
3.2.2.3 แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน.....	23
3.2.2.4 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่อขนานกัน.....	24
3.2.3 การจำลองความปฏิสัมพันธ์ของคอยล์.....	24
3.2.3.1 การจำลองการวางใกล้กัน.....	24
3.2.3.2 การจำลองการวางแบบซ้อนแกนร่วม.....	25
3.2.3.3 การจำลองการต่อร่วมกันระหว่างคอยล์ 2 แบบ.....	25
3.2.3.4 การจำลองการต่อหม้อแปลงแบบออดได้ และการจำลองให้เกิดความผิด พร้อม.....	25
3.2.4 การจำลองผลของขดลวดและแกนเหล็ก.....	26
3.2.5 การจำลองส่วนประกอบขดลวด และตัวเปลี่ยนแท็บ.....	27
3.2.6 การทดสอบการลัดวงจร และเปิดวงจร.....	28
3.2.7 การลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน.....	28
3.3 การจำลองผลของน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส.....	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การจำลองความผิดพร่องของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส.....	30
3.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V 50 Hz.....	30
3.4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาดพิกัด 5 kVA 220/5000 V 50 Hz.....	31
3.4.2.1 การจำลองหม้อแปลงในสภาพปกติ Open Circuit Test.....	31
3.4.2.2 การจำลองหม้อแปลงในสภาพปกติ Short Circuit Test.....	32
3.4.2.3 การจำลองการลัดวงจรที่ต้นคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Top Winding).....	32
3.4.2.4 การจำลองการลัดวงจรที่กลางคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Middle Winding).....	33
3.4.2.5 การจำลองการลัดวงจรที่ปลายคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Bottom Winding).....	33
3.4.2.6 การจำลองแกนของหม้อแปลงเกิดการขยับตัว (Shorted Laminates)....	34
3.4.2.7 การจำลองขดลวดหม้อแปลงเกิดการคลายตัว (Loosened).....	34
3.4.2.8 การจำลองขดลวดหม้อแปลงยุบตัวในแนวแกนที่พื้น (Buckling).....	35
3.4.2.9 การจำลองขดลวดหม้อแปลงโป่งตัวออกในแนวแกนที่พื้น (Buckling)	35
3.5 การจำลองความผิดพร่องของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส.....	36
3.5.1 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 12 kV /416 V 50 Hz Dyn1.....	36
3.5.2 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 12 kV / 400 V 50 Hz Dyn5.....	36
3.6 การเก็บข้อมูลภาคสนาม.....	36
3.6.1 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 22.4 MVA 15.7 kV/7.2kV 50 Hz.....	36
3.6.2 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 300 MVA 230/69 kV 50 Hz.....	36
บทที่ 4 การทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	37
4.1 บทนำ.....	37
4.2 การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบง่าย.....	37
4.2.1 การจำลองผลที่เกิดจากแบบจำลอง 2 คอยล์ที่แตกต่างกัน.....	37
4.2.1.1 การเตรียมการทดสอบ.....	38
4.2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	38
4.2.1.3 ผลการทดสอบ.....	39

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	41
4.2.2 การเปรียบเทียบระหว่างคอยล์ทั้งสอง.....	42
4.2.3 การจำลองการต่ออนุกรมและการต่อขนาน.....	44
4.2.3.1 การจำลองสองคอยล์เหมือนกันขนานกัน.....	44
4.2.3.1.1 การเตรียมการทดสอบ.....	44
4.2.3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	44
4.2.3.1.3 ผลการทดสอบ.....	45
4.2.3.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	46
4.2.3.2 การจำลองสองคอยล์เหมือนกันต่ออนุกรมกัน.....	46
4.2.3.2.1 การเตรียมการทดสอบ.....	47
4.2.3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	47
4.2.3.2.3 ผลการทดสอบ.....	47
4.2.3.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	48
4.2.3.3 การจำลองแบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน.....	49
4.2.3.3.1 การเตรียมการทดสอบ.....	49
4.2.3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	49
4.2.3.3.3 ผลการทดสอบ.....	50
4.2.3.3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	51
4.2.3.4 การจำลองแบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่อขนานกัน.....	51
4.2.3.4.1 การเตรียมการทดสอบ.....	52
4.2.3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	52
4.2.3.4.3 ผลการทดสอบ.....	52
4.2.3.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	54
4.2.4 การจำลองความปฏิกิริสัมพันธ์ของคอยล์.....	54
4.2.4.1 การจำลองการวางใกล้กัน.....	55
4.2.4.1.1 การเตรียมการทดสอบ.....	55
4.2.4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	55
4.2.4.1.3 ผลการทดสอบ.....	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	57
4.2.4.2 การจำลองการวางแบบซ้อนแกนร่วม.....	57
4.2.4.2.1 การเตรียมการทดสอบ.....	57
4.2.4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	57
4.2.4.2.3 ผลการทดสอบ.....	58
4.2.4.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	59
4.2.4.3 การจำลองการต่อร่วมกันระหว่างคอยล์ 2 แบบ.....	59
4.2.4.3.1 การเตรียมการทดสอบ.....	59
4.2.4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	59
4.2.4.3.3 ผลการทดสอบ.....	59
4.2.4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	60
4.2.4.4 การจำลองการต่อหม้อแปลงแบบออโต้ และการจำลองให้เกิดความผิด พียง.....	60
4.2.4.4.1 การเตรียมการทดสอบ.....	60
4.2.4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	60
4.2.4.4.3 ผลการทดสอบ.....	61
4.2.4.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	63
4.2.4.5 การจำลองผลของขดลวดและแกนเหล็ก.....	63
4.2.4.5.1 การเตรียมการทดสอบ.....	64
4.2.4.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	64
4.2.4.5.3 ผลการทดสอบ.....	64
4.2.4.5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	65
4.2.4.6 การจำลองส่วนประกอบขดลวด และตัวเปลี่ยนแท็บ.....	66
4.2.4.6.1 การเตรียมการทดสอบ.....	66
4.2.4.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	67
4.2.4.6.3 ผลการทดสอบ.....	67
4.2.4.6.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	67
4.2.4.7 การจำลองการทดสอบการลัดวงจรและการเปิดวงจร.....	68

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4.7.1 การเตรียมการทดสอบ.....	69
4.2.4.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	69
4.2.4.7.3 ผลการทดสอบ.....	69
4.2.4.7.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	70
4.2.4.8 การจำลองการลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน.....	71
4.2.4.8.1 การเตรียมการทดสอบ.....	71
4.2.4.8.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	71
4.2.4.8.3 ผลการทดสอบ.....	71
4.2.4.8.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	72
4.2.5 ส่วนที่สำคัญ.....	73
4.3 ผลของน้ำมัน.....	74
4.3.1 การเตรียมการทดสอบ.....	74
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	75
4.3.3 ผลการทดสอบ.....	76
4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	77
4.4 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส.....	78
4.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V 50 Hz.....	78
4.4.1.1 การเตรียมการทดสอบ.....	78
4.4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	78
4.4.1.3 ผลการทดสอบ.....	79
4.4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	80
4.4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาดพิกัด 5 KVA 220/5000 V 50 Hz.....	80
4.4.2.1 การเตรียมการทดสอบ.....	80
4.4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	81
4.4.2.3 ผลการทดสอบ.....	82
4.4.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	86
4.5 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส.....	90

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.1 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 12 kV / 416 V 50 Hz Dyn1.....	90
4.5.1.1 การเตรียมการทดสอบ.....	90
4.5.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	91
4.5.1.3 ผลการทดสอบ.....	92
4.5.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	94
4.5.2 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 12 kV / 400 V 50 Hz Dyn5.....	94
4.5.2.1 การเตรียมการทดสอบ.....	95
4.5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	95
4.5.2.3 ผลการทดสอบ.....	96
4.5.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	98
4.6 ข้อมูลภาคสนาม.....	98
4.6.1 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 22.4 MVA 15.7 kV/7.2 kV 50 Hz.....	98
4.6.1.1 ผลการทดสอบ.....	98
4.6.2 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 300 MVA 230/69 kV 50 Hz.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุป.....	102
5.2 อุปสรรคและการแก้ไข.....	103
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	104
บรรณานุกรม.....	105
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก. ข้อเสนอแนะในการวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	107
ภาคผนวก ข. เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	113
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	120

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบในการต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน.....	16
4.1 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรณีศึกษาที่ 3.....	87
4.2 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรณีศึกษาที่ 4.....	87
4.3 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรณีศึกษาที่ 5.....	88
4.4 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรณีศึกษาที่ 6.....	88
4.5 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรณีศึกษาที่ 7.....	88
4.6 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรณีศึกษาที่ 8.....	89
4.7 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรณีศึกษาที่ 9.....	89
5.1 คำแนะนำการวินิจฉัยหม้อแปลงตามช่วงความถี่ และความผิดปกติ.....	102
5.2 เกณฑ์การตัดสินใจจากค่าสหสัมพันธ์.....	103

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการการวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	5
2.2 การจำลองโมเดลขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า.....	6
2.3 วงจรพื้นฐานสำหรับการวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	7
2.4 วิธี Low Voltage Impulse.....	8
2.5 วิธี Sweep Frequency.....	8
2.6 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแบบง่าย.....	9
2.7 การวัดผลตอบสนองความถี่แบบ Open Circuit Test.....	9
2.8 การวัดผลตอบสนองความถี่แบบ Short Circuit Test.....	10
2.9 ช่วงของค่าสหสัมพันธ์.....	11
2.10 แผนภาพการกระจายและสัมประสิทธิ์ค่าสหสัมพันธ์.....	12
2.11 การเปลี่ยนแปลงของ $X_L$ และ $X_C$ อันเนื่องมาจากความถี่.....	13
2.12 วงจร RLC อย่างง่าย.....	14
2.13 ผลตอบสนองความถี่ของการัดวงจร.....	14
2.14 ผลตอบสนองความถี่ของ ตัวต้านทาน 50 โอห์มและ 500 โอห์ม ในอุดมคติ.....	15
2.15 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติ.....	15
2.16 ผลตอบสนองของตัวเก็บประจุในอุดมคติ.....	15
2.17 ส่วนประกอบการต่ออนุกรมของ $X_L$ และ $X_C$ และ R.....	16
2.18 ค่าอิมพีแดนซ์ของการต่ออนุกรม.....	17
2.19 ผลตอบสนองในรูป (dB) ของวงจรอนุกรม.....	18
2.20 การขนานของ R, $X_L$ และ $X_C$ .....	18
2.21 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ขนานกัน.....	19
2.22 ผลตอบสนองในรูปอัตราขยาย dB ของวงจรขนาน.....	20
3.1 การตอบสนองของตัวเก็บประจุที่ไม่ใช่ในอุดมคติ.....	21
3.2 คอยล์แบบเป็นชั้น (Layer).....	22
3.3 แบบคอยล์เป็นวงกลม (Disk).....	22
3.4 สองคอยล์ที่เหมือนกันขนานกัน.....	23
3.5 แบบเป็นชั้นที่เหมือนกันอนุกรมกัน.....	23

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่ออนุกรมกัน.....	24
3.7 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่อขนานกัน.....	24
3.8 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นวางใกล้กัน.....	24
3.9 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นวางซ้อนกัน.....	25
3.10 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่อถึงกันทางไฟฟ้า.....	25
3.11 การต่อหม้อแปลงแบบออโต้.....	26
3.12 การต่อหม้อแปลงแบบออโต้จำลองให้ลัดวงจรที่คอยล์แบบเป็นชั้น.....	26
3.13 จำลองการขยับของคอยล์แบบวงกลม.....	26
3.14 แบบคอยล์เป็นวงกลมและส่วนประกอบของแกนเหล็ก.....	27
3.15 การลัดวงจรที่แกนเหล็กของคอยล์แบบเป็นวงกลม.....	27
3.16 จำลองการต่อหม้อแปลงแบบออโต้ต่อกับด้านๆหนึ่ง.....	27
3.17 การสลับสายที่คอยล์แบบเป็นวงกลม.....	28
3.18 การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้เพื่อทดสอบแบบเปิดวงจร.....	28
3.19 การลัดวงจรระหว่างรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้.....	28
3.20 หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 220 V/0 – 130 V 50 Hz.....	29
3.21 ตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบเพื่อทดสอบผลของน้ำมัน.....	29
3.22 การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส บรรจุอยู่ในตัวถังอะคริลิก.....	30
3.23 การเตรียมแกนและขดลวดในการพันหม้อแปลงขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V.....	30
3.24 การพันหม้อแปลงขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V.....	30
3.25 หม้อแปลงและไดอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 5 kVA 220/5000 V 50 Hz.....	31
3.26 การวัดผลตอบสนองของควมถี่หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Open Circuit Test.....	31
3.27 การวัดผลตอบสนองของควมถี่หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Short Circuit Test.....	32
3.28 การวัดผลตอบสนองของควมถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้เกิดการลัดวงจรที่ต้นคอยล์ของ ขดลวด.....	32
3.29 การวัดผลตอบสนองของควมถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้เกิดการลัดวงจรที่กลางคอยล์ของ ขดลวด.....	33

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้เกิดการลัดวงจรที่ปลายคอยล์ของ ขดลวด.....	33
3.31 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้แกนของหม้อแปลงเกิดการขยับตัว..	34
3.32 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้ขดลวดหม้อแปลงเกิดการคลายตัว...	34
3.33 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้ขดลวดหม้อแปลงขยับตัวในแนวแกนที่ พื้น.....	35
3.34 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้ขดลวดหม้อแปลงไปงตัวออกใน แนวแกนที่พื้น.....	35
3.35 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 12 kV/416 V.....	36
3.36 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 12 kV/400 V.....	36
4.1 รูปแบบคอยล์ที่จะทำการทดสอบ.....	37
4.2 วงจรการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	38
4.3 ลักษณะการต่อวงจรการวัดผลตอบสนองความถี่ และผลการวัดผลตอบสนองความถี่ในกรณี คอยล์แบบเป็นชั้น (Layer).....	39
4.4 ผลตอบสนองความถี่ของแบบเป็นชั้น เริงเส้นสเกล.....	40
4.5 ลักษณะการต่อวงจรการวัดผลตอบสนองความถี่ และผลการวัดผลตอบสนองความถี่ ในกรณี คอยล์แบบเป็นวงกลม (Disk).....	41
4.6 ผลตอบสนองความถี่แบบคอยล์เป็นวงกลม เริงเส้นสเกล.....	41
4.7 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้น Log สเกล.....	42
4.8 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้น เริงเส้นสเกล.....	43
4.9 สองคอยล์ที่เหมือนกันขนานกัน.....	44
4.10 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นที่เหมือนกันขนานกัน.....	45
4.11 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์ที่เหมือนกันขนานกันเปรียบเทียบกับผลตอบสนองความถี่กรณี ที่เป็นคอยล์เดี่ยว.....	45
4.12 แบบเป็นชั้นที่เหมือนกันอนุกรมกัน.....	46
4.13 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นที่เหมือนกันอนุกรมกัน.....	47
4.14 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์ที่เหมือนกันอนุกรมกันเปรียบเทียบกับผลตอบสนองความถี่ กรณีที่เป็นคอยล์เดี่ยว.....	48

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน.....	49
4.16 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน.....	50
4.17 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน เปรียบเทียบกับแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลม.....	50
4.18 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน เปรียบเทียบกับแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลม เชิงเส้นสเกล.....	51
4.19 แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่อขนานกัน.....	52
4.20 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน.....	53
4.21 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่อขนานกัน เปรียบเทียบกับแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลม.....	53
4.22 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่อขนานกัน เปรียบเทียบกับแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลม เชิงเส้นสเกล.....	54
4.23 คอยล์เป็นวงกลมและคอยล์แบบเป็นชั้นวางใกล้กัน.....	55
4.24 ผลตอบสนองความถี่การวางใกล้กันของคอยล์สองคอยล์ที่แตกต่างกัน.....	56
4.25 ผลตอบสนองทางความถี่ของคอยล์แบบวงกลมเทียบกับคอยล์แบบเป็นชั้นวางอยู่ใกล้ๆ.....	56
4.26 คอยล์เป็นวงกลมซ้อนแกนร่วมคอยล์แบบเป็นชั้น.....	57
4.27 ผลตอบสนองของสองคอยล์ซ้อนแกนร่วม.....	58
4.28 คอยล์แบบเป็นวงกลมและคอยล์แบบเป็นชั้นต่อกัน.....	58
4.29 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์แบบเป็นชั้นที่เชื่อมต่อกัน.....	59
4.30 การต่อหม้อแปลงแบบออดิโอ.....	60
4.31 ผลตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงแบบออดิโออย่างง่าย.....	61
4.32 หม้อแปลงแบบออดิโอกรณีเกิดการลัดวงจร.....	61
4.33 ผลตอบสนองของหม้อแปลงแบบออดิโอกรณีเกิดการลัดวงจร.....	62
4.34 รูปแบบความเสียหายของหม้อแปลงแบบออดิโอที่เกิดจากการขยับของคอยล์แบบคอยล์เป็นวงกลม.....	62
4.35 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับหม้อแปลงแบบออดิโอทรานส์ฟอร์เมอร์เกิดความเสียหาย.....	63
4.36 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแกนเหล็ก.....	64
4.37 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์ที่มีแกนเหล็กวางอยู่ใกล้ๆ.....	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่ในกรณีที่มีแกนเหล็กและไม่มีแกนเหล็ก.....	65
4.39 จำลองการต่อหม้อแปลงแบบอโต้ต่อกับด้านๆหนึ่ง.....	66
4.40 การสลับสายที่คอยล์แบบเป็นวงกลม.....	66
4.41 การเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองความถี่ของการสลับข้างต่อคอยล์เป็นวงกลม.....	67
4.42 แบบจำลองอย่างง่ายของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	68
4.43 การลัดวงจรแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า.....	68
4.44 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้ เตรียมการวัดที่คอยล์เป็นวงกลม.....	69
4.45 การวัดผลตอบสนองทางความถี่การเปิดวงจรของคอยล์เป็นวงกลมกับแบบเป็นชั้น.....	70
4.46 ผลตอบสนองการเปิดวงจรและการลัดวงจรของคอยล์แบบเป็นวงกลม.....	70
4.47 การลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้.....	71
4.48 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์แบบเป็นชั้นในสภาวะปกติ เทียบกับกรณีเกิดการลัดวงจร ระหว่างรอบที่พัน.....	72
4.49 ผลตอบสนองแบบเป็นชั้นเปรียบเทียบในกรณีลัดวงจรระหว่างรอบที่พันของแบบคอยล์เป็น วงกลม open circuit test และลัดวงจรระหว่างรอบที่พันของแบบคอยล์เป็นวงกลม short circuit test.....	73
4.50 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการทดสอบผลของน้ำมัน.....	74
4.51 วงจรการทดสอบและลักษณะการต่อเพื่อวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	75
4.52 การใส่น้ำมันเพื่อทดสอบคูผลตอบสนองทางความถี่.....	76
4.53 ไดอะแกรมการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	76
4.54 ผลการวัดตอบสนองความถี่ Open Circuit Test ด้าน HV กรณีหม้อแปลงมีน้ำมัน เทียบกับไม่ มีน้ำมัน.....	76
4.55 ไดอะแกรมการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	77
4.56 ผลการวัดตอบสนองความถี่ Short Circuit Test ด้าน HV กรณีหม้อแปลงมีน้ำมัน เทียบกับไม่ มีน้ำมัน.....	77
4.57 หม้อแปลง 1 เฟสขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V 50 Hz.....	78
4.58 วงจรการทดสอบ.....	79
4.59 วงจรการทดสอบจริง.....	79
4.60 ผลการทดสอบ Open Circuit Test.....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.61 ผลการทดสอบ ถัดวงจรตามแท็บต่างๆ.....	80
4.62 หม้อแปลงไฟฟ้าและ ไดอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า.....	80
4.63 วงจรการทดสอบ.....	81
4.64 วงจรการทดสอบจริง.....	81
4.65 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Open Circuit Test.....	82
4.66 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Short Circuit Test.....	82
4.67 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองการลัดวงจรที่ต้นคอยล์ของ ขดลวด.....	83
4.68 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองการลัดวงจรที่กลางคอยล์ของ ขดลวด.....	83
4.69 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองการลัดวงจรที่ปลายคอยล์ของ ขดลวด.....	84
4.70 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองแกนของหม้อแปลงเกิดการ ขยับตัว.....	84
4.71 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองขดลวดหม้อแปลงเกิดการ คลายตัว.....	85
4.72 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองขดลวดหม้อแปลงยุบตัวในแนวแกน ที่พัน.....	85
4.73 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองขดลวดหม้อแปลง โป่งตัวออกใน แนวแกนที่พัน.....	86
4.74 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองความผิดพร่องให้เกิดการ ลัดวงจร.....	86
4.75 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองความผิดพร่องให้เกิดขึ้นที่ ขดลวด.....	87
4.76 การจำลองความผิดพร่อง โดยการถอดแท็บที่เฟส A ออก.....	90
4.77 การจำลองความผิดพร่อง โดยการลัดวงจรที่แท็บ 4 กับ 5.....	90
4.78 วงจรการทดสอบที่เฟส A.....	91
4.79 การวัดผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A.....	91

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.80 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C ในสภาวะปกติ.....	92
4.81 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ถอดเทปเฟส A.....	93
4.82 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ ถัดวงจรเทป 4 กับ 5 เฟส A.....	93
4.83 การจำลองความผิดพร่องโดยการถอดเทปที่เฟส C ออก.....	94
4.84 การจำลองความผิดพร่องโดยการถัดวงจรที่เฟส C.....	94
4.85 วงจรการทดสอบที่เฟส C.....	95
4.86 การวัดผลตอบสนองความถี่ที่เฟส C.....	95
4.87 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C ในสภาวะปกติ.....	96
4.88 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ถอดเทปเฟส C.....	97
4.89 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ ถัดวงจรเทป 7 กับ 8 เฟส C.....	97
4.90 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ ถัดวงจรเทป 3 กับ 8 เฟส C.....	98
4.91 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันสูง.....	99
4.92 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันต่ำ.....	99
4.93 ไคอะแกรมการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่.....	100
4.94 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันสูงก่อนตรวจซ่อม.....	100
4.95 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันสูงหลังซ่อม.....	101
4.96 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันสูงหลังเคลื่อนย้าย.....	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพราะหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้งาน ในต่างประเทศนั้นหลังจากที่ผ่านกระบวนการผลิตและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ เก็บไว้เป็นฐานข้อมูล (Finger Print) เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้เคลื่อนย้ายจากผู้ผลิตไปยังผู้ใช้งานหรือลูกค้า เพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดความเสียหายในขณะที่ทำการขนส่ง หรือในกรณีเมื่อติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า มีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกินทั้งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างกะทันหัน หรือการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ รวมทั้งที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติ แรงดันเกินดังกล่าวแม้จะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นๆ แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงดันเกินเหล่านี้มีผลกระทบต่อความคงทนของการฉนวนและขดลวดและ โครงสร้างภายในของหม้อแปลง ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าและในระบบได้ การที่โครงสร้างภายในหรือการฉนวนของหม้อแปลงเกิดความเปลี่ยนแปลงนั้น ย่อมส่งผลกระทบต่อการทำงานของหม้อแปลงตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้า ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถใช้การวัดผลตอบสนองทางความถี่ตรวจหาความผิดปกติได้ เพื่อหาสาเหตุก่อนการตรวจซ่อมหม้อแปลงไฟฟ้า วิธีการนี้มีใช้ในต่างประเทศเป็นข้อกำหนดในการจำหน่ายและบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า การวัดผลตอบสนองทางความถี่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมการส่งออกหม้อแปลงไปยังตลาดต่างประเทศโดยเฉพาะหม้อแปลงที่มีพิกัดกำลังสูงๆ เพราะการวัดผลตอบสนองทางความถี่นั้น เป็นการยืนยันว่าหม้อแปลงนั้นมีคุณภาพไม่เกิดความผิดปกติจากผู้ผลิตก่อนถึงผู้ใช้งาน

การวัดผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response Analysis; FRA) คือ การวัดอิมพีแดนซ์ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่กว้าง และนำผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อ้างอิงที่เรียกว่า Finger print ซึ่งเป็นผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงในสภาวะปกติสมบูรณ์ Fingerprint จะมีประโยชน์มากโดยจะนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงที่สงสัยว่าน่าจะมีความผิดปกติหรืออยู่ในสภาพที่ไม่สมบูรณ์ เช่นการตรวจสอบ FRA ของหม้อแปลงหลังจากที่ผ่านการตรวจซ่อมจากความผิดปกติใด ๆ ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง หรือการตรวจสอบหม้อแปลงที่ผ่านการขนย้ายเป็นระยะทางไกล ๆ ซึ่งอาจทำให้แกน

เหล็กเกิดการคลายตัว ขดลวดอาจจะหลุดหลวมจากจุดต่อเป็นต้น การทำ FRA จัดว่าเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ความแตกต่างของ Fingerprint กับ FRA ในขณะนั้นของหม้อแปลง จะบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาหลักการการวัดผลตอบสนองทางความถี่ วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่ การวินิจฉัยสภาพความผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้า และการนำวิธีทางสถิติ คือ การหาค่าสหสัมพันธ์ และการหาค่าเบี่ยงเบนสเปกตรัมมาใช้เพื่อช่วยในการตัดสินใจและวินิจฉัยสภาพความผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้า สิ่งที่ได้จากการวินิจฉัยและการวิจัยนั้นจะนำไปใช้เป็นฐานข้อมูล ในการศึกษาวิจัยและนำไปใช้กับงานจริงในชีวิตประจำวันเป็นลำดับต่อไป

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

หม้อแปลงไฟฟ้านั้นเมื่อนำไปติดตั้งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่า ตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกปิดมิดชิด เพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งแปลกปลอม ความชื้น หรือฝุ่น เข้าไปทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนและการระบายความร้อนเสียไป เมื่อเป็นเช่นนั้น เวลาเกิดความผิดปกติขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า จะไม่สามารถทราบได้เลยว่าเกิดความผิดปกติขึ้นที่ใดบ้าง ซึ่งในบางครั้งอาจเกิดความเสียหายกับตัวหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนที่จะทำการบำรุงรักษาตามปกติได้

วิธีการที่ใช้ตรวจสอบความผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้า ในปัจจุบัน บางวิธีก็ไม่สามารถบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้ทำการนำวิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่หรือที่เรียกอีกอย่างว่า FRA มาใช้เพื่อตรวจหาความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้า การใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่นั้นจะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงภายในหม้อแปลงไฟฟ้าตั้งแต่ ผิดปกติเพียงเล็กน้อยจนไปถึงผิดปกติมาก ซึ่งเมื่อทราบแล้วว่าเกิดความผิดปกติเพียงเล็กน้อยก็สามารถหาวิธีการแก้ไขก่อนที่จะเกิดความผิดปกติมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถแก้ไขได้ แทนที่จะแก้ไขได้อาจจะต้องเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่แทนตัวเดิมที่เกิดความผิดปกติ

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้หลักการการวัดผลตอบสนองทางความถี่ซึ่งจะต้องรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองความถี่ ในการศึกษานี้ได้มองส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะ

ตอบสนองต่อความถี่ที่ความถี่ต่างกัน จึงทำให้การเกิดรีโซแนนซ์เกิดที่ความถี่ต่างกัน และการเกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างกันนี้ จะทำให้ทราบว่าในขณะนั้นสภาพภายในหม้อแปลงไฟฟ้า มีพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นอย่างไร รวมถึงรู้ถึงสภาพว่าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นปกติหรือเกิดความผิดปกติเกิดขึ้น ซึ่งเมื่อเกิดความผิดปกติค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงไป อาจทำให้ค่าความเป็นตัวเก็บประจุ หรือค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองความถี่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความผิดปกติในแบบที่ต่างกัน ซึ่งทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองความถี่ที่ต่างกัน และจะทำให้ทราบว่าความผิดปกติแต่ละแบบจะเกิดในช่วงความถี่ที่ต่างกันด้วย ซึ่งได้สรุปไว้ตามลักษณะความผิดปกติที่เกิดขึ้นต่อช่วงความถี่

### 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

วิธีการตรวจหาความผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดิมสามารถทำการตรวจหาความผิดปกติได้ในกรณีที่มีความผิดปกติค่อนข้างรุนแรงของฉนวนเท่านั้น เช่น การทดสอบหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานและอยู่ในกระบวนการทดสอบของหม้อแปลงอยู่แล้ว การตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงลักษณะอื่นๆ เช่น การหลวมของจุดต่ออาจตรวจสอบด้วยกล้องส่องความร้อน การตรวจสอบแต่ละวิธีจะเหมาะสมกับรูปแบบความบกพร่องแต่ละอย่างเท่านั้น ดังนั้นโดยวิธีการตรวจสอบแบบพื้นฐานจึงจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบหลายวิธีมาก เพื่อหารูปแบบความบกพร่องให้ครบทุกรูปแบบ ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายสูง เมื่อใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่ จะสามารถตรวจหาความบกพร่องได้หลายๆ รูปแบบ ด้วยการตรวจสอบเพียงครั้งเดียว โดยที่วิธีการตรวจสอบแบบนี้มีความสะดวก รวดเร็ว มีผลจากสัญญาณรบกวนจากภายนอกน้อย ใช้อุปกรณ์ไม่มาก ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถวินิจฉัยได้ทันที และที่สำคัญการทดสอบแบบนี้จัดว่าเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย

### 1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดผลตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยได้ทำการจำลองการวัดผลตอบสนองแบบพื้นฐานต่อความถี่กับคอยล์ขนาดเล็ก จำลองความผิดปกติให้เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสและทำการทดสอบ เพื่อดูพฤติกรรม การผลตอบสนองความถี่ที่แตกต่างกัน และได้ทำการเปรียบเทียบความผิดปกติที่เกิดจากการจำลองความผิดปกติที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบังและห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กับข้อมูลจริงซึ่งได้มาจากการเก็บข้อมูลในภาคสนาม รายละเอียดในการศึกษาวิจัยมีดังนี้

- 1.6.1 ศึกษาโครงสร้างภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.6.2 ศึกษาไดอะแกรมเวกเตอร์กรุปของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.6.3 ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.6.4 ศึกษาทฤษฎีการวัดผลตอบสนองทางความถี่
- 1.6.5 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในประเทศ และต่างประเทศ
- 1.6.6 จำลองความผิดพร่อง และเตรียมอุปกรณ์การวัดผลตอบสนองความถี่
- 1.6.7 ทำการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่
- 1.6.8 นำผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์สรุปผล และข้อเสนอแนะ
- 1.6.9 นำข้อมูลทั้งหมดมาจัดทำวิทยานิพนธ์

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยหลักการเบื้องต้นในการวัดผลตอบสนองทางความถี่ การวัดผลตอบสนองทางความถี่ วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่ วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการออกแบบการทดลอง โดยได้ทำการจำลองการวัดผลตอบสนองความถี่แบบพื้นฐานกับคอยล์ขนาดเล็ก การจำลองความผิดพร่องบนหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส การจำลองผลของน้ำมัน การเก็บข้อมูลภาคสนาม

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จาก การจำลองจำลองการวัดผลตอบสนองความถี่แบบพื้นฐานกับคอยล์ขนาดเล็ก ความผิดพร่องบนหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ผลของน้ำมันและผลที่ได้จากข้อมูลภาคสนาม

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยที่ได้จำลองมาทั้งหมด และสรุปช่วงความถี่ที่เกิดความผิดพร่องในแต่ละกรณีที่จำลอง รวมทั้งข้อเสนอแนะ

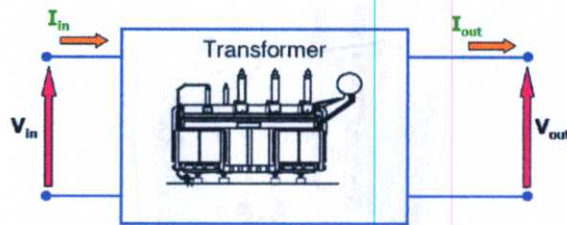
## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดผลตอบสนองทางความถี่ และให้คำแนะนำอย่างง่าย เกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่

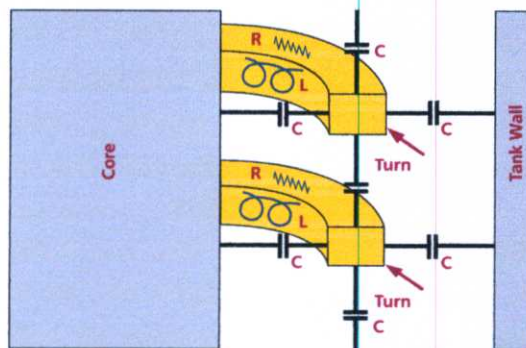
### 2.1 หลักการเบื้องต้น[1]

หลักการในการวัดผลตอบสนองทางความถี่นั้น เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าเมื่อทำการป้อนแรงดันและกระแสเข้าไปตามรูป จากนั้นทำการเช็คทางด้านเอาต์พุต เพื่อดูสัญญาณหรือผลตอบสนองทางความถี่และเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล (Fingerprint) เอาไว้เปรียบเทียบกับกรณีที่มีปัญหาเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า และหาทางแก้ไขต่อไป

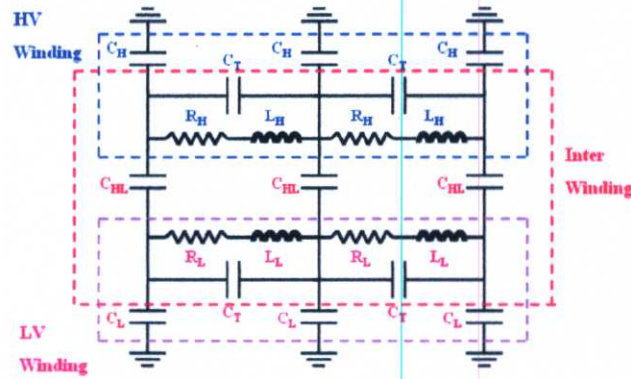


รูปที่ 2.1 หลักการการวัดผลตอบสนองทางความถี่

จากหลักการเบื้องต้น ในการวัดผลตอบสนองทางความถี่ ก่อนที่จะทำการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า จะต้องทราบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยอะไรบ้าง สังเกตได้จากรูปที่ 2.2 ก และ ข



ก) โมเดลขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

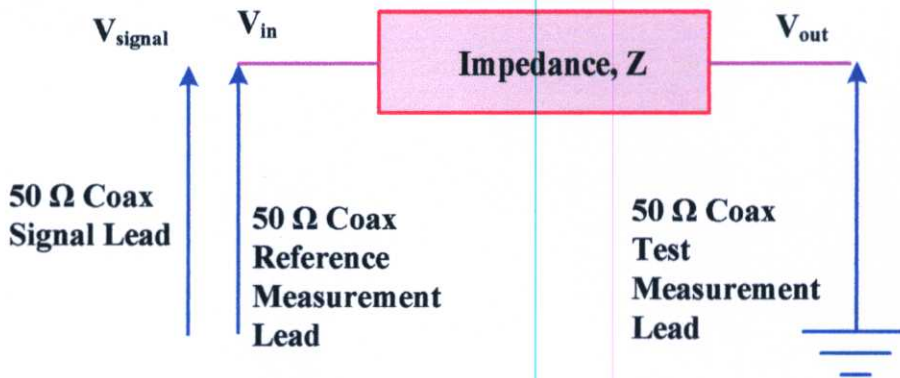


ข) โดอะแกรมโมเดลขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า  
รูปที่ 2.2 การจำลองโมเดลขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.2 เป็นการจำลองโมเดลขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบไปด้วย ตัวถังหม้อแปลง แกนเหล็กที่ใช้สำหรับพันขดลวด และขดลวด ซึ่งขดลวดด้านแรงต่ำจะอยู่ทางด้านในสุด และมีฉนวนหุ้มทับอีกชั้นหนึ่ง ฉนวนจะประกอบด้วย ฉนวนกระดาษ เพอร์สโอบอร์ด ที่ขนาดความหนาต่างๆ ก่อนที่จะมีการพันขดลวดแรงสูงทับซ้อนอีกครั้งหนึ่ง ขดลวดแรงสูงอาจจะมี tap change ต่ออีกทีหนึ่งหรืออาจจะเป็นพวกขดลวดช่วย (tertiary) ซึ่งจะต่อแบบ Delta และทำหน้าที่ป้องกันฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบ จากรูปที่ 2.2 นั้นจะเห็นว่า มีขดลวดทั้งสองด้านมีคุณลักษณะที่ประกอบด้วย ค่าความต้านทาน (R) โดยเมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดซึ่งเป็นตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและค่าความเหนี่ยวนำ (L) ขึ้น และในขณะเดียวกันก็มีความต่างศักย์ระหว่างขดลวดระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก (Core) หรือขดลวดกับตัวถัง (tank) ทำให้เกิดพฤติกรรมของตัวเก็บประจุ (C) ขึ้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า หม้อแปลงทุกตัวต้องมี R, L, C ซึ่งเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน

## 2.2 การวัดผลตอบสนองทางความถี่ [2]

ผลตอบสนองทางความถี่จะถูกนำเสนอในรูปอัตราส่วนรูปคลื่นแรงดันเข้าพุทต่อแรงดันอินพุทให้อยู่ในรูป dB ดังแสดงในสมการที่ 2.1 วงจรการวัดผลตอบสนองความถี่แบบพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันสำหรับทดสอบ สายโคแอกเซียลและอุปกรณ์วิเคราะห์และแสดงผลซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นตัวเดียวกับอุปกรณ์กำเนิดแรงดันทดสอบ หม้อแปลงหรืออุปกรณ์ที่นำมาทำการวัดผลตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 2.3 วงจรพื้นฐานสำหรับการวัดผลตอบสนองทางความถี่

จากวงจรในรูปที่ 2.3 สายโคแอกเซียลนั้นจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของสาย 50 โอห์ม ใช้ต่อกับแหล่งจ่ายเข้ากับหม้อแปลง และชุดวิเคราะห์ เมื่อทำการทดสอบจะวัดแรงดัน  $V_{in}$  และ  $V_{out}$  เทียบกับกราวด์

ผลที่ได้จากการวัดผลตอบสนองทางความถี่ที่แปลงให้อยู่ในรูปของอัตราขยาย(dB) นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$dB = 20 \log_{10} (V_{out} / V_{in}) \quad (2.1)$$

สัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  คือสัญญาณอ้างอิงของอิมพีแดนซ์สายเคเบิล 50 โอห์มเทียบกราวด์ ซึ่งจะทำให้ได้อัตราขยาย (dB) ดังสมการที่ 2.2

$$V_{out} / V_{in} = 50 / (Z + 50) \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 เมื่อค่า  $Z$  คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ หรือค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดของตัวเก็บประจุ หรืออาจเป็นค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดที่ได้จากการวัดผลตอบสนองทางความถี่

### 2.3 วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่ [1]

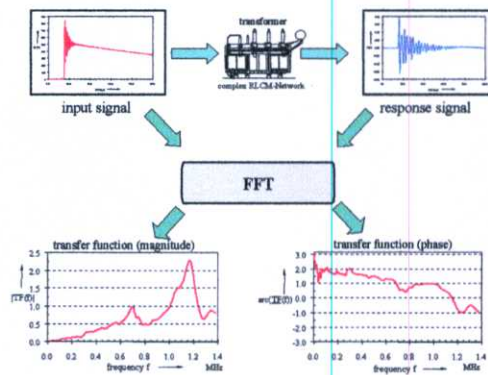
การทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ คือ การป้อนสัญญาณที่มีความถี่สูงเข้าไปเช่น สัญญาณอิมพัลส์แล้วเช็คผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุต เมื่อได้สัญญาณเอาต์พุตแล้วนำไปแยกขนาดคูแอมพลิจูด ผลตอบสนองความถี่ หรืออาจจะป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ซึ่งสัญญาณที่ป้อนเข้าไปต้องมีการกวาดความถี่ได้ในย่านที่ต้องการ โดยการป้อนจากความถี่ต่ำไปจน

ความถี่สูงเป็น MHz ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการสร้างความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณทดสอบ วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่หลักๆ มีสองวิธีการด้วยกันคือ Low Voltage Impulse (LVI) และวิธี Sweep Frequency (SFRA)

### 2.3.1 Low Voltage Impulse (LVI)

คือการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่โดยการใช้การป้อนแรงดันอิมพัลส์แรงดันต่ำประมาณ 200 โวลต์ให้กับหม้อแปลง เมื่อได้สัญญาณเอาต์พุตออกมาจะนำไปหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันก็ด้วย Fast Fourier Transform เพื่อแปลงสัญญาณเอาต์พุตออกมาอยู่ในรูปแอมพลิจูดที่เป็นอัตราขยาย (dB) เทียบกับความถี่ (Frequency) และเป็นมุมเฟส (Degree) เทียบกับความถี่ ดังรูปที่

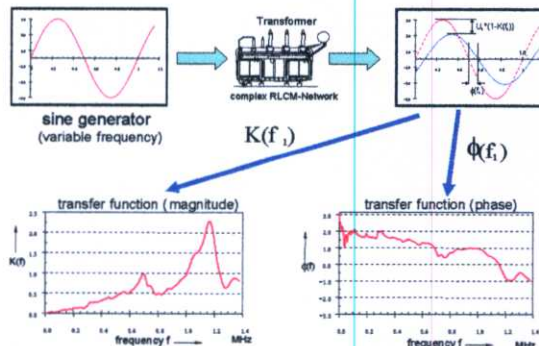
2.4



รูปที่ 2.4 วิธี Low Voltage Impulse

### 2.3.2 Sweep Frequency (SFRA)

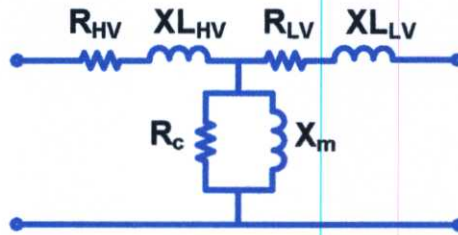
คือการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่โดยการใช้การป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ จากความถี่ต่ำไปถึงช่วงความถี่สูงตามพิกัดของเครื่องให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อได้สัญญาณเอาต์พุตจะนำไปหา ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันก็แปลงสัญญาณเอาต์พุตออกมาอยู่ในรูปแอมพลิจูดที่เป็นอัตราขยาย (dB) เทียบกับความถี่ (Frequency) และเป็นมุมเฟส (Degree) เทียบกับความถี่ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วิธี Sweep Frequency

## 2.4 วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า [1]

ในการวัดหรือการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถแทนโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวงจรสมมูลย์แบบประมาณได้ดังรูปที่ 2.6 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยค่าความต้านทาน ( $R$ ), ความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ของขดลวด และคุณลักษณะของแกนเหล็กแทนด้วย  $R_c$ ,  $X_m$  รูปที่ 2.6 เป็นวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแบบง่าย

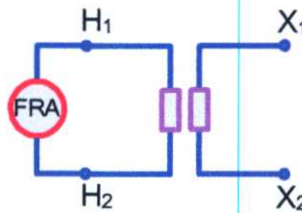


รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแบบง่าย

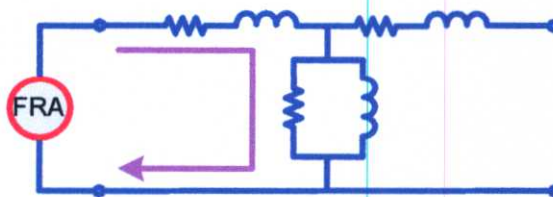
การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า และหาวงจรมูลย์แบบประมาณ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ Open Circuit Test และ Short Circuit Test

### 2.4.1 Open Circuit Test

เป็นการทดสอบการวัดผลตอบสนองความถี่โดยการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าด้านที่จะทำการวัด และเปิดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าด้านที่ไม่ได้วัดดังรูปที่ 2.7 ก และ ข



ก) ไดอะแกรมการวัดผลตอบสนองทางความถี่แบบ Open Circuit Test



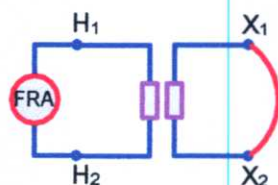
ข) วงจรสมมูลย์ในการวัดผลตอบสนองทางความถี่แบบ Open Circuit Test

รูปที่ 2.7 การวัดผลตอบสนองความถี่แบบ Open Circuit Test

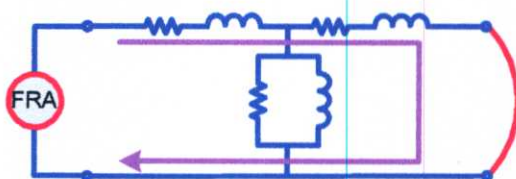
การวัดผลตอบสนองความถี่แบบนี้จะ ได้ผลตอบสนองของแกนเหล็กที่พัน และขดลวดที่ใช้ พันหม้อแปลงไฟฟ้า

### 2.4.2 Short Circuit Test

เป็นการทดสอบการวัดผลตอบสนองความถี่โดยการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าตัวหม้อแปลง ไฟฟ้าด้านที่จะทำการวัด และลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าด้านที่ไม่ได้วัดดังรูปที่ 2.8 ก และ ข



ก) โคออร์แกนการวัดผลตอบสนองทางความถี่แบบ Short Circuit Test



ข) วงจรสมมูลย์ในการวัดผลตอบสนองทางความถี่แบบ Short Circuit Test

### รูปที่ 2.8 การวัดผลตอบสนองความถี่แบบ Short Circuit Test

การวัดผลตอบสนองความถี่แบบนี้จะ ได้ผลตอบสนองของขดลวดที่พันเป็นหม้อแปลง ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

## 2.5 เครื่องมือในการวิเคราะห์ [3-8]

ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่นั้นสามารถทำการวิเคราะห์ได้สองวิธีการด้วยกัน คือ การเปรียบเทียบด้วยตาในการพิจารณารูป curve ที่ได้จากการทดสอบ ผลการทดสอบเหล่านี้ใน บางครั้งเราไม่สามารถแยกแยะได้ด้วยตาเปล่า จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้อีกวิธีคือการใช้ครรชนี่วัด ทางสถิติ

### 2.5.1 การเปรียบเทียบด้วยตา

การเปรียบเทียบการวัดผลตอบสนองความถี่ด้วยวิธีนี้ค่อนข้างสะดวก และง่ายแต่ขึ้นอยู่กับ ความชำนาญและประสบการณ์ของผู้วินิจฉัยเป็นหลัก

## 2.5.2 การเปรียบเทียบด้วยการใช้พรรณนิจีวัตทางสถิติ

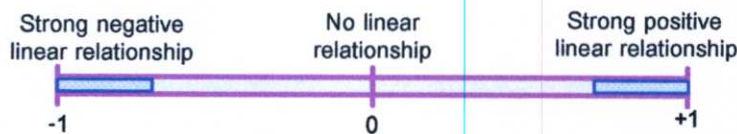
การเปรียบเทียบด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ง่ายและได้ค่าเป็นตัวเลขทางสถิติ สามารถนำค่าที่เป็นตัวเลข มาเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจได้

การเปรียบเทียบด้วยการใช้พรรณนิจีวัตทางสถิติ นั้นมี 2 วิธีการด้วยกันคือ การใช้ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficients) และการใช้ค่าการเบี่ยงเบนสเปคตรัม (Spectrum Deviation)

### 2.5.2.1 สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficients) [2-4]

สหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่องตั้งแต่สองตัวแปรขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ และมากน้อยเพียงใด

ในการศึกษาแต่ละครั้ง ถ้าหากประกอบด้วยตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่องเพียงสองตัว เช่น X และ Y จะเรียกความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรสุ่มว่า สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation) แต่ถ้าหากมีตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่องมากกว่าสองตัวขึ้นไป เรียกว่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) ในกรณีสหสัมพันธ์อย่างง่ายนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรอาจมีสมการอยู่ในรูปเส้นตรงหรือมิใช่ก็ได้ โดยถ้ามีสมการอยู่ในรูปของเส้นตรงจะเรียกว่า สหสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Correlation)



รูปที่ 2.9 ช่วงของค่าสหสัมพันธ์

จากรูปที่ 2.9 ถ้านำมาใช้ในการเปรียบเทียบนั้น ค่าสหสัมพันธ์ตัวมันเองกับตัวมันเองควรมีค่าเป็น 1 ค่าสหสัมพันธ์ตัวมันเองกับค่าสหสัมพันธ์ตัวอื่น ถ้าเหมือนกันหมดควรจะเป็น +1 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ ถ้าลองพิจารณาอาจจะกำหนดให้เป็น  $X_1$  กับ  $X_2$  การ plot curve  $X_1$  กับ  $X_2$  ถ้าค่าสหสัมพันธ์ของ  $X_1$  เพิ่ม  $X_2$  เพิ่ม ความสัมพันธ์จะนั้นก็จะเป็น 1 แต่ถ้าค่าสหสัมพันธ์ของ  $X_1$  เพิ่ม  $X_2$  ลด ความสัมพันธ์จะตรงข้ามกัน คือ -1 ถ้า  $X_1$  กับ  $X_2$  ไม่สัมพันธ์กันหรือไม่เหมือนกันเลยก็จะเป็น 0

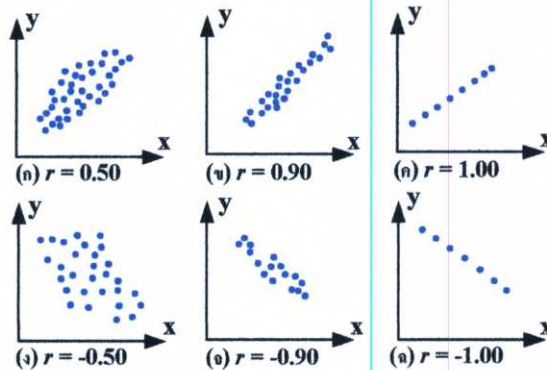
ในการหาค่าสหสัมพันธ์ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.3

$$\rho = \frac{\sum_{x=i}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{x=i}^n x_i^2 \sum_{x=i}^n y_i^2}} \quad (2.3)$$

ค่า  $\rho$  ควรจะมีค่าเข้าใกล้ 1 หรือ -1 หรือ  $-1 \leq \rho \leq 1$  และไม่มีหน่วย

เมื่อพิจารณาข้อมูล 2 ข้อมูลของข้อมูล  $n$  จำนวน โดยกำหนดให้เป็น  $X$  ข้อมูลชุดที่ 1 มีสมาชิกของข้อมูลคือ  $X\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$  และ  $Y$  คือข้อมูลชุดที่ 2 มีสมาชิกของข้อมูลคือ  $Y\{Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n\}$  หากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมาชิกของข้อมูล 2 ข้อมูลได้จากสมการที่ 2.3

ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากรูปที่ 2.10 (ก) ค่าสหสัมพันธ์ 0.5 จะพบว่า  $X$  หนึ่งค่า ให้  $Y$  หลาย ๆ ค่า รูปที่ 2.10 (ข) ค่าสหสัมพันธ์ 0.9 คือ  $X$  หนึ่งค่า ให้  $Y$  สองค่า รูปที่ 2.10 (ค) ค่าสหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 1 คือ  $X$  หนึ่งค่า ให้  $Y$  หนึ่งค่าเมื่อ  $X$  เพิ่ม  $Y$  จะเพิ่มตาม เป็น linear ส่วนรูปที่ 2.10 (ง) , (จ) , (ฉ) เมื่อค่า  $X$  เพิ่มขึ้นแต่ค่า  $Y$  กลับลดลง และมีค่าตรงข้ามกับรูปที่ 2.10 (ก) , (ข) , (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 แผนภาพการกระจายและสัมประสิทธิ์ค่าสหสัมพันธ์

### 2.5.2.2 การเบี่ยงเบนสเปคตรัม (Spectrum Deviation)

การเบี่ยงเบนสเปคตรัม เมื่อพิจารณาจากข้อมูล 2 ข้อมูลถ้ามีความเหมือนกันต้องไม่เบี่ยงเบน การเบี่ยงเบนสเปคตรัมสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.4

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\left[ \frac{x_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right]^2 + \left[ \frac{y_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right]^2} \quad (2.4)$$

ค่า  $\sigma$  ควรจะมีค่าเข้าใกล้ 0

เมื่อพิจารณาข้อมูล 2 ข้อมูลของข้อมูลจำนวน  $n$  ตัว โดยที่กำหนดให้  $X$  นั้นเป็นข้อมูลชุดที่ 1 มีสมาชิกของข้อมูล คือ  $X\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  และกำหนดให้  $Y$  คือข้อมูลชุดที่ 2 มีสมาชิกของข้อมูล คือ  $Y\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  หากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมาชิกของข้อมูล 2 ข้อมูลได้จากสมการที่ 2.4

ค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัมไม่ควรมีค่าเป็น 1 ถ้าเป็น 1 แสดงว่ามีความแตกต่างกันชัดเจนหรือไม่เหมือนกัน หรือตั้งฉาก

## 2.6 วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ [2]

วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่นิยามความถี่ คือ  $f$  และนิยามค่าความถี่เชิงมุมคือ  $\omega$  นั่นคือ

$$\omega = 2\pi f \quad (2.5)$$

ความต้านทานไฟฟ้านั้นจะเป็นอิสระกับความถี่ สำหรับค่าความต้านทานนิยามให้  $R$  มีค่าความต้านทานที่เท่ากันทุกค่าความถี่ สำหรับตัวเก็บประจุค่าอิมพีแดนซ์ของค่าการเก็บประจุคือ  $X_C$  นั่นคือ

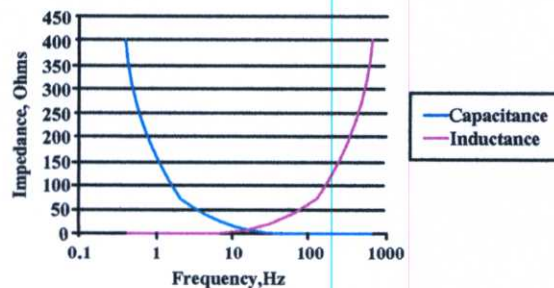
$$X_C = 1/2\pi fC \quad (2.6)$$

โดยที่ค่าของ  $X_C$  นั้นจะลดลงเมื่อค่าของความถี่เพิ่มมากขึ้น และค่าของกระแสจะนำหน้าแรงดัน 1 ไซเคิล ( $90^\circ$ ) ในทางตรงข้าม ค่าของแรงดันก็นำหน้ากระแส 1 ไซเคิล สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ของค่าความเหนี่ยวนำคือ  $X_L$  นั่นคือ

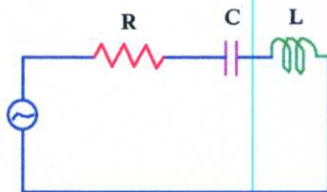
$$X_L = 2\pi fL \quad (2.7)$$

ค่าของ  $X_L$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น และแรงดันนำหน้ากระแส 1 ไซเคิล ( $90^\circ$ ) (หรือกระแสล่าหลังแรงดัน 1 ไซเคิล)

ค่าอิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบทั้งหมดนั้นจะแปรผันตามความถี่ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของ  $X_L$  และ  $X_C$  อันเนื่องมาจากความถี่



รูปที่ 2.12 วงจร RLC อย่างง่าย

วงจร RLC ในรูปที่ 2.12 นั้นจะให้ผลรวมของอิมพีแดนซ์ทั้งหมดคือ ค่า  $Z$  สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 2.8

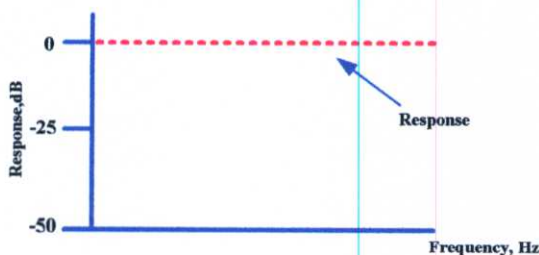
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.8)$$

## 2.7 ผลตอบสนองความถี่ของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน [2]

องค์ประกอบที่เป็นลักษณะเฉพาะของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน จะมีลักษณะการตอบสนองความถี่ที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติไม่มีตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานในอุดมคติ ซึ่งทั้ง 3 แบบจะมีส่วนประกอบย่อยๆ ที่แตกต่างกัน สิ่งที่จะได้ตามมาก็คือ ผลตอบสนองความถี่เหล่านั้น ก็จะตอบสนองความถี่ที่ความถี่แตกต่างกันตามไปคัวย

### 2.7.1 ทฤษฎี

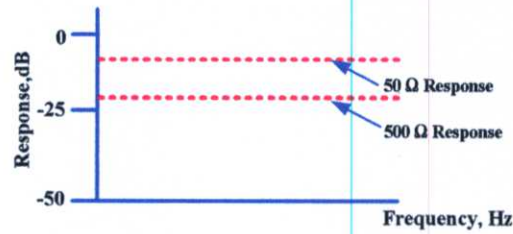
ตามที่นิยามไว้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ กรณีการลัดวงจร ที่เกิดขึ้นจากหลายๆ ความถี่ นั่นคือ  $V_{out}$  เทียบเท่ากับ  $V_{in}$  ที่ค่าอิมพีแดนซ์  $Z = 0$  โอห์ม จะให้ค่าอัตราขยายของผลตอบสนองความถี่เท่ากับ 0 dB



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองความถี่ของการลัดวงจร

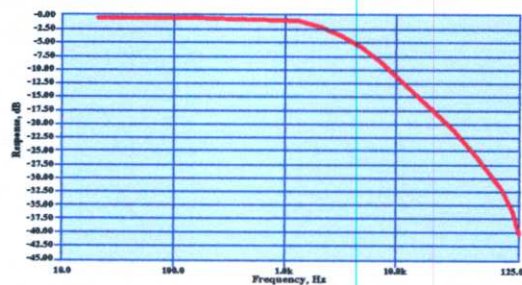
จากรูปที่ 2.13 ค่าความต้านทานในอุดมคติ เมื่อค่าความต้านทานเพิ่มมากขึ้นค่าอัตราขยายจะมีค่าลดลง ในกรณีที่ค่าความต้านทานขนาด 50 โอห์มจะให้เอาต์พุตเพียงครึ่งเดียวของแรงดัน

อินพุตเสมอ ผลการตอบสนองความถี่คือ จะได้เส้นตรงประมาณ -6 dB ผลการตอบสนองความถี่ ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งดูที่ค่าความต้านทาน 500 โอห์ม จะให้ผลตอบสนองที่ประมาณ -20 dB



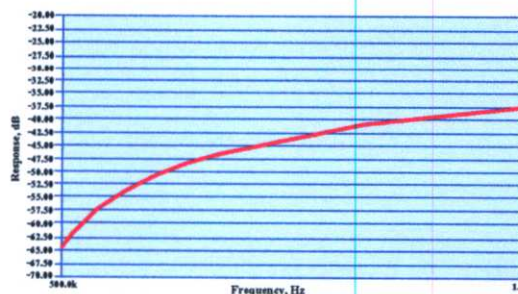
รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองความถี่ของ ตัวต้านทาน 50 โอห์มและ 500 โอห์ม ในอุดมคติ

พิจารณาการเปิดวงจรตามทฤษฎีนั้น สมมติว่าค่าความต้านทานมีค่าเป็นอนันต์ ถ้าค่าของความถี่เพิ่มขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเมื่อดูจากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าถ้าเป็นผลตอบสนองสำหรับตัวเหนี่ยวนำในอุดมคตินั้น เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าของอิมพีแดนซ์เพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นผลให้ค่าอัตราขยายมีค่าลดลงมากขึ้นตามไปด้วย ในรูปที่ 2.15 นั้น จะสังเกตว่า เริ่มต้นที่ 0 dB และหลังจากนั้นจะเป็นลักษณะการตกลงด้วยความชันค่าหนึ่ง เมื่อให้ค่าความถี่นั้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งกราฟที่แสดงนั้นเป็นแบบสเกลแบบ log



รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติ

ตัวเก็บประจุในอุดมคติ ดูเหมือนว่าจะเป็นการเปิดวงจรที่ความถี่ต่ำ แต่ที่ความถี่สูง จะดูเหมือนกับว่ามันเหมือนกับการลัดวงจร ซึ่งผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายที่ได้จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นไปที่ 0 dB เมื่อให้ค่าความถี่นั้นเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองของตัวเก็บประจุในอุดมคติ

### 2.7.2 รีโชนั้นซ์

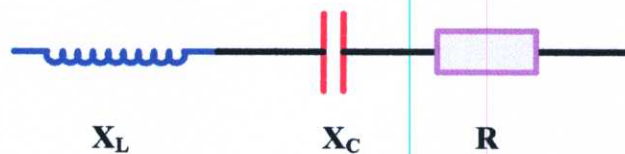
เรโชนั้นซ์ที่แตกต่างกันจะหมายถึง การต่อวงจรแบบอนุกรมและการต่อแบบขนาน ซึ่งในการวิเคราะห์ห้วงจรนั้นจะคิดแยกกัน เมื่อพิจารณาแบบอุดมคติจะกำหนดให้เป็นความต้านทานในอุดมคติ ตัวเก็บประจุในอุดมคติ และตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติ ผลรวมทั้งหมดสามารถคำนวณเป็นวงจรสมมูลที่มี RLC เป็นส่วนประกอบสำหรับการต่ออนุกรมและการต่อขนานผสมกันได้ค่าดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบในการต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน

	resisters	capacitors	inductors
unit	ohm (omega)	farad (F)	henry (H)
I-V relation	$V = IR$	$I = CdV/dt$	$V = Ldi/dt$
Series combination	$Req = R1+R2+...$	$1/Ceq = 1/C1+1/C2+...$	$Leq = L1+L2+...$
Parallel combination	$1/Req = 1/R1+1/R2+...$	$Ceq = C1+C2+...$	$1/Leq = 1/L1+1/L2+...$

### 2.7.3 รีโชนั้นซ์ในการต่ออนุกรม

จากรูปที่ 2.17 เป็นรูปการต่ออนุกรมของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานในอุดมคติ

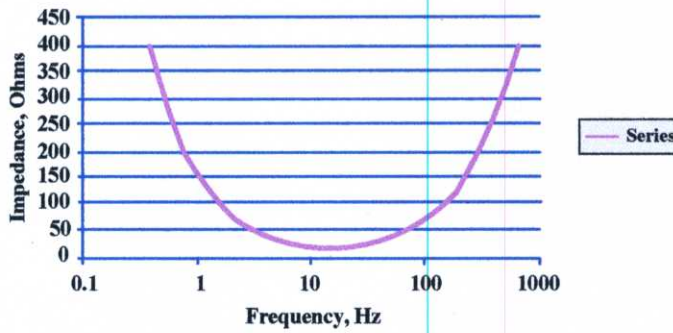


รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบการต่ออนุกรมของ  $X_L$  และ  $X_C$  และ  $R$

ที่ความถี่ต่ำ ตัวเก็บประจุจะมีอิทธิพลต่อผลการตอบสนองความถี่มากๆ ซึ่งจะมองตัวเก็บประจุเหมือนกับการ Open Circuit จะทำให้ค่า  $Z$  เพิ่มขึ้นเป็นอนันต์ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุนั้นจะลดลง

ที่ความถี่สูง ตัวเหนี่ยวนำจะมีอิทธิพลต่อผลการตอบสนองความถี่มากๆ จะเหมือนกับการ Open Circuit จะทำให้ค่า  $Z$  เพิ่มขึ้นเป็นอนันต์ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดสามารถนำเสนอในรูปการพล็อตเทียบกับความถี่ได้ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ค่าอิมพีแดนซ์ของการต่ออนุกรม

จุดที่ต่ำสุดของค่าอิมพีแดนซ์คือ จุดที่เกิดรีโซแนนซ์ และที่จุดนี้ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับ ความต้านทาน R นิยามโดย

$$X_L = X_C \tag{2.9}$$

ใช้สมการที่ 2.6, 2.7, และ 2.9 จะทำให้สามารถหาความถี่รีโซแนนซ์ได้โดย

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \tag{2.10}$$

โดยทั่ว ๆ ไปการต่ออนุกรมกันของตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทาน ที่ความถี่รีโซแนนซ์ จะทำให้เห็นสิ่งที่ตามมาเสมอ คือ

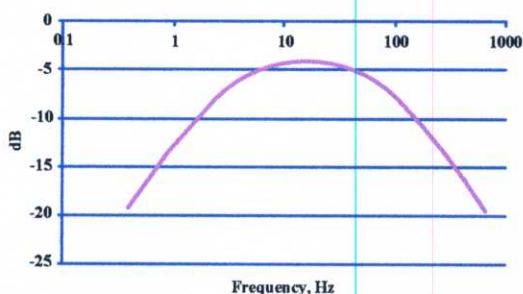
1. ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากัน ( $X_L = X_C$ )
2. ค่าอิมพีแดนซ์ คือค่าต่ำสุดสำหรับค่าที่ได้จาก ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวต้านทาน
3. ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ R ( $Z = R$ )
4. ค่าของแรงดันและกระแสจะมีเฟสตามกัน
5. ค่าของกระแสคือค่าสูงที่สุดสำหรับค่าที่ได้จาก ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวต้านทาน
6. กำลังไฟฟ้าจะถูกจ่ายมากมายในวงจรคือค่าสูงที่สุดสำหรับค่าที่ได้จาก ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวต้านทาน

วงจรที่ใช้ในการวัดคือ Sweep Frequency Response การนำเสนอควรจะพล็อต ผลตอบสนองในรูปอัตราขยาย (dB) มากกว่าในรูปแบบอิมพีแดนซ์ที่เป็น โอห์ม เพราะสามารถดูได้ง่ายกว่าเนื่องจากผลตอบสนองนำเสนอในรูปอัตราขยายที่เป็นสเกลแบบ Log สเกล

ใช้สมการที่ 2.1 และ 2.2 ในการวัดผลตอบสนอง  $D$  ในรูปอัตราขยาย (dB) สำหรับค่า Impedance  $Z$  ที่วัดได้นิยามโดยสมการที่ 2.11

$$D = 20 \log_{10}(50/(Z+50)) \quad (2.11)$$

ค่า  $Z$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ ซึ่งจะมีความซับซ้อนยุ่งยากในการหาส่วนประกอบที่มาต่อร่วมกัน นำเสนอในรูปแบบการพล็อต  $D$  สำหรับอิมพีแดนซ์  $Z$  อนุกรมของรูปที่ 2.17 แปลงให้อยู่ในรูปกราฟอัตราขยาย (dB) ดังรูปที่ 2.19

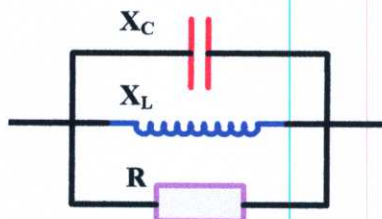


รูปที่ 2.19 ผลตอบสนองในรูป (dB) ของวงจรถอุนุกรม

การแปลงค่าอิมพีแดนซ์ให้อยู่ในรูปอัตราขยาย (dB) ในช่วงที่เกิดรีโซแนนซ์อนุกรมจะให้ค่าอัตราขยายสูงสุด ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าของตัวเก็บประจุที่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นที่ความถี่ค่าหนึ่งของเส้นกราฟ และจะมีลักษณะการลดลงของกราฟที่ความถี่ค่าหนึ่งอันเนื่องมาจากผลของค่าความเหนี่ยวนำ

#### 2.7.4 รีโซแนนซ์ในการต่อขนาน

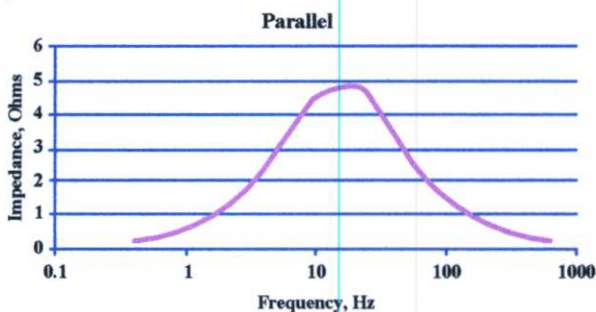
รูปที่ 2.20 แสดงการต่อขนาน ของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานในอุดมคติ



รูปที่ 2.20 การขนานของ  $R$ ,  $X_L$  และ  $X_C$

ที่ความถี่ต่ำ ตัวเหนี่ยวนำจะมีคุณสมบัติเหมือนกับการลัดวงจร ค่าอิมพีแดนซ์  $Z$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในช่วงที่ความถี่เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะลดลง แต่ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้น

ที่ความถี่สูง ตัวเก็บประจุจะมีคุณสมบัติเหมือนกับการลัดวงจรอีกครั้ง ค่าอิมพีแดนซ์  $Z$  จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์อีกครั้ง ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ขนานกัน

จุดสูงสุดของค่าอิมพีแดนซ์ คือ จุดที่เกิดรีโซแนนซ์ นิยามได้โดย

$$X_L = X_C \quad (2.12)$$

สามารถสรุปได้ว่าความถี่รีโซแนนซ์  $f$  หาได้จาก

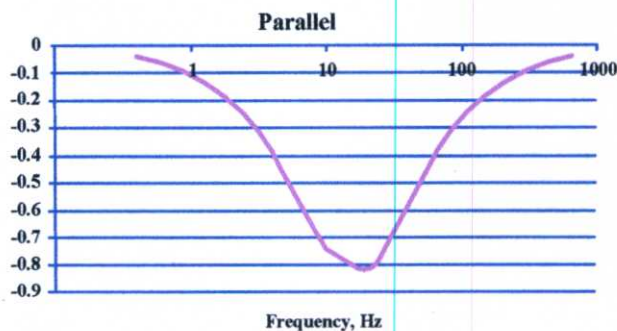
$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (2.13)$$

โดยทั่วไป สำหรับการต่อขนานกันของตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทาน ที่ความถี่รีโซแนนซ์ จะทำให้เห็นสิ่งที่ตามมาเสมอ คือ

1. ความต้านทานของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ( $X_L = X_C$ )
2. มีเฉพาะค่าความต้านทานไฟฟ้า ไม่มีผลของค่าการเก็บประจุ ค่าความเหนี่ยวนำ
3. ค่าความต้านทานของวงจรมีค่าเท่ากับ  $R$  ( $Z = R$ )
4. กระแสและแรงดันจะมีเฟสตามกัน

ถ้าเป็นไปได้ในการวัดผลตอบสนองทางความถี่ ควรจะใช้นำเสนอในรูปแบบการพล็อตในรูปของอัตรายาย (dB) มากกว่าในรูปแบบโอห์ม

ในการ plot ผลตอบสนองทางความถี่  $D$  อยู่ในรูปอัตราขยาย (dB) สำหรับอิมพีแดนซ์คือ  $Z$  นิยามด้วยสมการที่ 2.11 เป็นฟังก์ชันของความถี่ การพล็อตผลตอบสนองสำหรับการขนานค่าอิมพีแดนซ์  $Z$  ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ผลตอบสนองในรูปอัตราขยาย dB ของวงจรขนาน

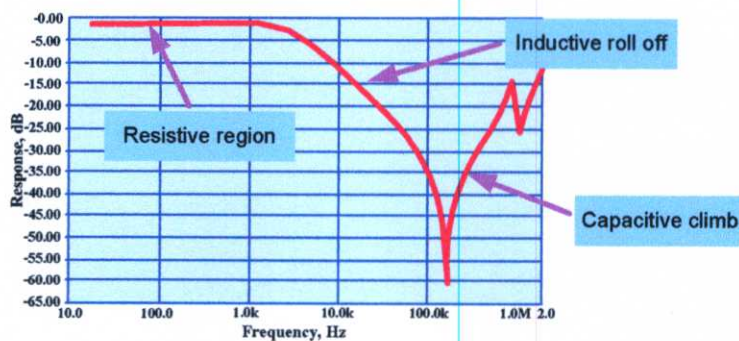
ที่ความถี่ต่ำและความถี่สูง ค่าอิมพีแดนซ์จะคล้ายกับตัวต้านทาน ในกรณีค่าความต้านทาน 10 โอห์ม สามารถคำนวณหาค่าอัตราขยาย (dB) ของ ตัวต้านทาน 10 โอห์ม ได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 มีค่าประมาณ  $-1.6$  dB แสดงในรูปที่ 2.22 ในรูปอัตราขยาย (dB) รีโซแนนซ์แบบขนานคือค่าที่ต่ำ นี่คือการสัมพันธ์ของตัวเหนี่ยวนำที่มีลักษณะการลดลงของกราฟที่ความถี่ต่ำหนึ่งและเพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติของตัวเก็บประจุที่ค่าผลตอบสนองที่น้อยที่สุดที่ปรากฏในการพล็อตผลตอบสนองทางความถี่ จะเหมือนกันกับการขนานกันของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในหม้อแปลง

## บทที่ 3

### การออกแบบและการจำลอง

#### 3.1 บทนำ

ในการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกมองเป็นพารามิเตอร์ที่ประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะไม่มีตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำหรือ ตัวต้านทานที่เป็นไปตามอุดมคติ แต่จะประกอบด้วย องค์ประกอบทั้ง 3 อย่างรวมกันอยู่เสมอ ด้วยอัตราส่วนที่ไม่เท่ากัน พิจารณาคุณสมบัติการตอบสนองต่อความถี่ของตัวเก็บประจุที่ไม่ใช่ในอุดมคติแสดงในรูปที่ 3.1 [2]



รูปที่ 3.1 การตอบสนองของตัวเก็บประจุที่ไม่ใช่ในอุดมคติ

สิ่งที่ได้จากรูปที่ 3.1 คือ สามารถมองเห็นอิทธิพลที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติการตอบสนองต่อความถี่ของตัวเก็บประจุดังกล่าวคือ

1. ที่ความถี่ต่ำมีอิทธิพลของค่าความต้านทานของสายโคแอกเซียลเป็นผลไม่ให้อัตราการขยายเป็น 0 dB ที่ความถี่ต่ำๆ
2. ที่ความถี่สูงขึ้นตัวเหนี่ยวนำจะมีอิทธิพลก่อนที่ความถี่สูงถัดมาตัวเก็บประจุจะมีอิทธิพลอย่างเด่นชัด

ดังนั้นในการพิจารณาคูณลักษณะสมบัติของหม้อแปลงจึงควรทราบว่า โครงสร้างหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยพารามิเตอร์ และพารามิเตอร์พื้นฐานแต่ละตัวมีพฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่อย่างไร ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้จำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบง่าย และได้จำลองความผิดพร่องขึ้นบนหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส โดยได้ทำการออกแบบการทดสอบตามลำดับจากแบบพื้นฐาน ไปจนถึงหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง รายละเอียดการออกแบบการทดสอบเป็นดังนี้

## 3.2 การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบง่าย [2]

ในการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบง่าย จะทำการจำลองในแบบที่เป็นพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบง่ายมีรายละเอียดดังนี้

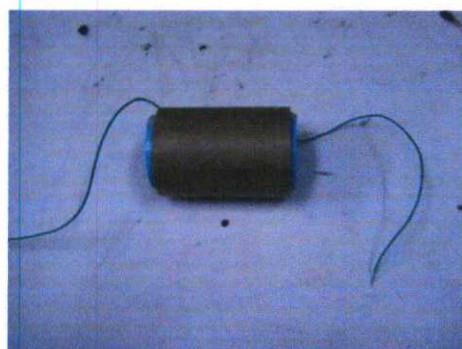
### 3.2.1 การจำลองผลที่เกิดจากแบบจำลอง 2 คอยล์ที่แตกต่างกัน

#### 3.2.1.1 แบบเป็นชั้น (Layer)

จำลองโดยการนำสายไฟที่มีฉนวนหุ้ม สายไฟที่ใช้เป็นตัวนำอลูมิเนียม โดยการพันทับกัน และสลับด้วยฉนวนกระดาษเป็นชั้น ทั้งหมด 3 ชั้น แต่ละชั้นจะพันด้วยสายไฟทั้งหมด 50 รอบ รายละเอียดดังรูปที่ 3.2 ก และ ข



ก. วิธีการพันแบบเป็นชั้น

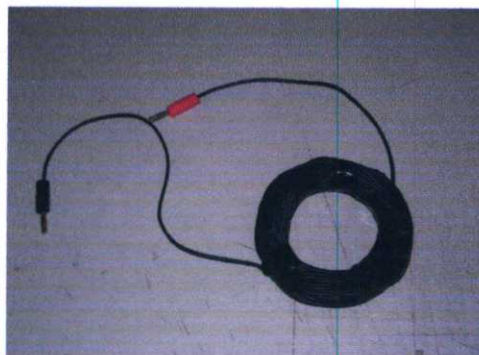


ข. พันแล้วพร้อมทดสอบ

รูปที่ 3.2 คอยล์แบบเป็นชั้น (Layer)

#### 3.2.1.2 แบบคอยล์เป็นวงกลม (Disk)

จำลองโดยการนำสายไฟที่มีฉนวนหุ้ม สายไฟที่ใช้เป็นตัวนำทองแดง วางคอยล์เป็นวงกลม การเรียงกันของสายที่เป็นระเบียบน้อยกว่าแบบเป็นชั้น ซึ่งสายที่เรียงกันนั้นจะเรียงทั้งหมด 65 รอบ ดังรูปที่ 3.3

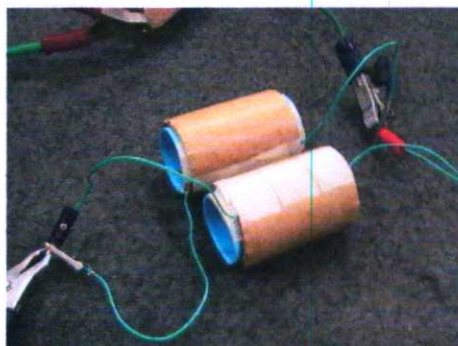


รูปที่ 3.3 แบบคอยล์เป็นวงกลม (Disk)

### 3.2.2 การจำลองการต่ออนุกรมและการต่อขนาน

#### 3.2.2.1 สองคอยล์เหมือนกันขนานกัน

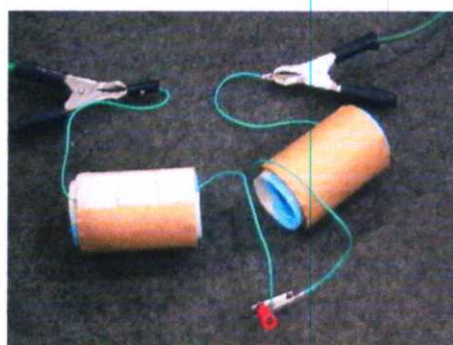
การจำลองทำโดยการนำคอยล์ที่มีรูปร่างเหมือนกันทุกประการ พันด้วยจำนวนรอบที่เท่ากันขนาดเท่ากัน มาทำการขนานกันดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สองคอยล์ที่เหมือนกันขนานกัน

#### 3.2.2.2 สองคอยล์เหมือนกันต่ออนุกรมกัน

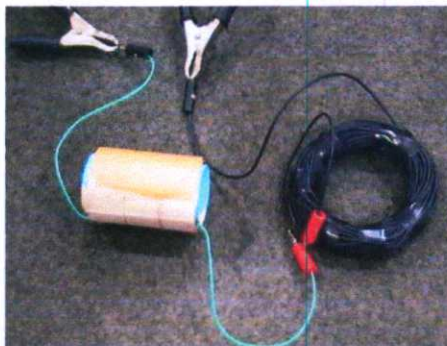
การจำลองทำโดยการนำคอยล์ที่มีรูปร่างเหมือนกันทุกประการ พันด้วยจำนวนรอบที่เท่ากันขนาดเท่ากัน มาทำการอนุกรมกันดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบเป็นชั้นที่เหมือนกันอนุกรมกัน

#### 3.2.2.3 แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน

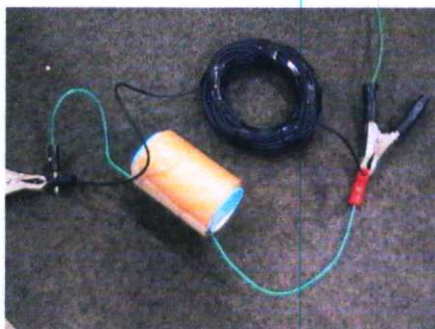
การจำลองทำโดยการนำคอยล์ที่มีรูปร่างไม่เหมือนกัน พันด้วยจำนวนรอบที่ไม่เท่ากัน มาทำการอนุกรมกันดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่อกัน

### 3.2.2.4 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่อขนานกัน

การจำลองทำโดยการนำคอยล์ที่มีรูปร่างไม่เหมือนกัน พันด้วยจำนวนรอบที่ไม่เท่ากัน มาทำการขนานกันดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่อขนานกัน

### 3.2.3 การจำลองความปฏิกิริสัมพันธ์ของคอยล์

#### 3.2.3.1 การจำลองการวางใกล้กัน

ใช้คอยล์ที่แตกต่างกันมาวางไว้ใกล้ๆ กันดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นวางใกล้กัน

### 3.2.3.2 การจำลองการวางแบบซ้อนแกนร่วม

หนึ่ง

ใช้คอยล์ที่แตกต่างกัน มาวางซ้อนแกนร่วมกันดังรูปที่ 3.9 และต่อถึงกัน โดยใช้ด้านใดด้าน



รูปที่ 3.9 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นวางซ้อนแกนร่วมกัน

### 3.2.3.3 การจำลองการต่อร่วมกันระหว่างคอยล์ 2 แบบ

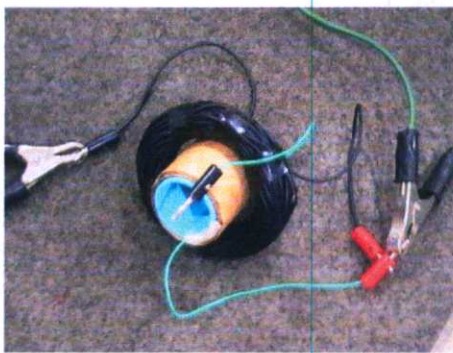
จำลองโดยการใช้อยู่ที่ที่แตกต่างกันมาต่ออนุกรมกัน โดยต่อเข้าที่ด้านใดด้านหนึ่ง ลักษณะการต่อดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่อถึงกันทางไฟฟ้า

### 3.2.3.4 การจำลองการต่อหม้อแปลงแบบอโต้ และการจำลองให้เกิดความผิดพลาด

ทำการจำลองโดยการวางแบบซ้อนแกนร่วม และต่อถึงกันทางไฟฟ้าด้านใดด้านหนึ่ง และทำการวัดวงจรที่คอยล์เป็นวงกลมเพื่อดูลักษณะความผิดพลาด และจำลองลักษณะการขยับของคอยล์แบบวงกลม ให้เลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมดังรูปที่ 3.11, 3.12 และ 3.13



รูปที่ 3.11 การต่อหม้อแปลงแบบออโต้



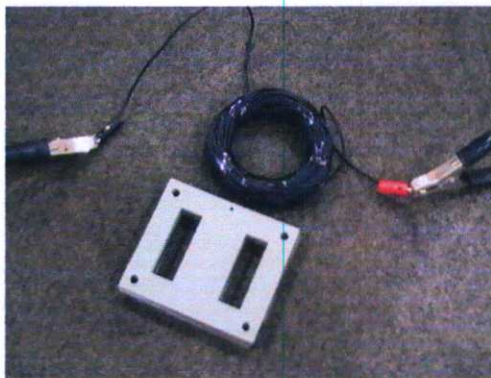
รูปที่ 3.12 การต่อหม้อแปลงแบบออโต้จำลองให้ลัดวงจรที่คอยล์แบบเป็นชั้น



รูปที่ 3.13 จำลองการขั้วของคอยล์แบบวงกลม

#### 3.2.4 การจำลองผลของขดลวดและแกนเหล็ก [9-10]

การจำลองใช้แกนเหล็กตัว E ทั้งหมด 16 ชิ้น และตัว I ทั้งหมด 15 ชิ้น โดยใช้คอยล์แบบเป็นวงกลมมาทำการทดสอบดังรูปที่ 3.14 ซึ่งจะทดสอบโดยการวางคอยล์ไว้ใกล้ๆกับแกนเหล็ก และการคล้องคอยล์แบบคอยล์เป็นวงกลมที่แกนเหล็ก เพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่ ลักษณะการคล้องที่แกนเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.15



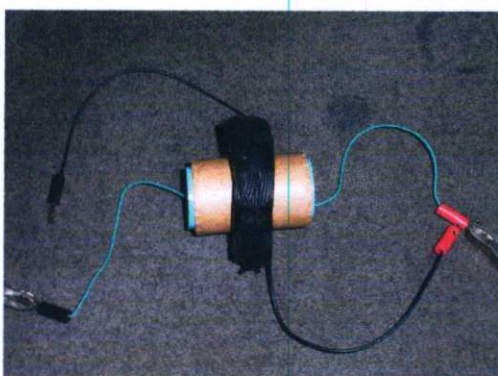
รูปที่ 3.14 แบบคอยล์เป็นวงกลมและส่วนประกอบของแกนเหล็ก



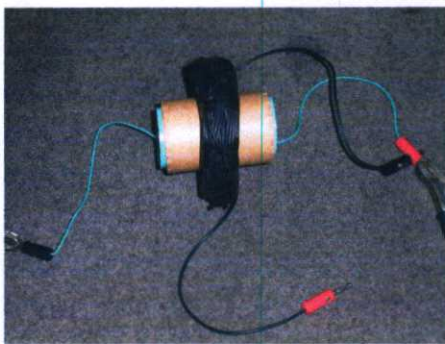
รูปที่ 3.15 การคลึงที่แกนเหล็กของคอยล์แบบเป็นวงกลม

### 3.2.5 การจำลองส่วนประกอบขดลวด และตัวเปลี่ยนแท็บ [9]

การทดลองนี้จะจำลองการเปลี่ยนจุดต่อแท็บ จำลองสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนแท็บ ซึ่งจะใช้การวางแบบซ้อนแกนร่วม และทำการสลับสายในการต่อ การจำลองแสดงดังรูปที่ 3.16 และ 3.17



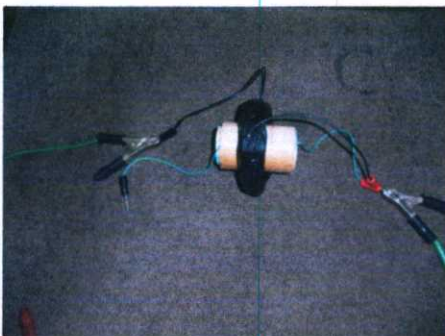
รูปที่ 3.16 จำลองการต่อหม้อแปลงแบบออดได้ต่อกับด้านๆหนึ่ง



รูปที่ 3.17 การสลับสายที่คอยล์แบบเป็นวงกลม

### 3.2.6 การทดสอบการลัดวงจร และเปิดวงจร [9]

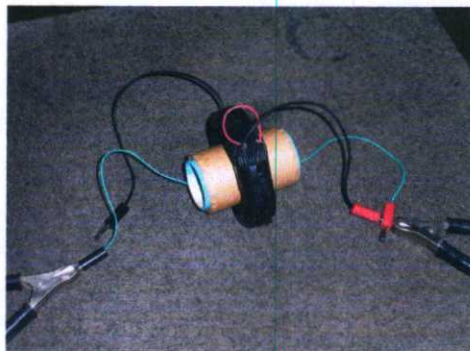
การจำลองแบบนี้ จะจำลองให้เหมือนกับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจริงๆ แล้วทำการทดสอบ Open Circuit Test และ Short Circuit Test



รูปที่ 3.18 การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออดได้เพื่อทดสอบแบบเปิดวงจร

### 3.2.7 การลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน [9]

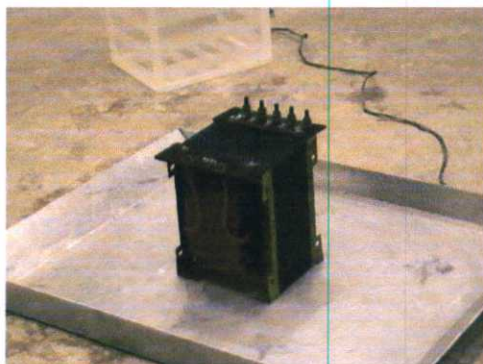
การจำลองแบบนี้ จำลองให้เหมือนกับเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้า คือเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน ลักษณะการจำลองดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การลัดวงจรระหว่างรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออดได้

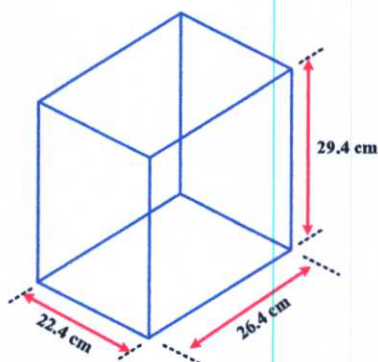
### 3.3 การจำลองผลของน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส [10]

ทำการจำลองเรื่องผลของน้ำมันบนหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 220 V/0 – 130 V หม้อแปลงนั้นมีขนาดกว้าง 16 เซนติเมตร ยาว 19.5 เซนติเมตร สูง 23 เซนติเมตร หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.20



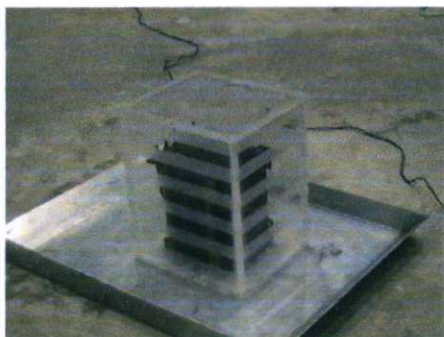
รูปที่ 3.20 หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 220 V/0 – 130 V 50 Hz

ทำการออกแบบอุปกรณ์เพื่อทำเป็นตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในสถานะความเป็นจริง ตัวถังหม้อแปลงนั้นควรจะเป็นเหล็ก ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เลือกใช้อะคริลิก เพื่อให้ง่ายต่อการประกอบสร้าง และสะดวกต่อการขนย้าย รวมไปถึงราคาดันถูกกว่า ซึ่งได้ทำการออกแบบอะคริลิกให้มีรูปทรงลูกบาศก์ โดยเผื่อระยะรอบตัวหม้อแปลงไว้ และเผื่อระยะความสูงด้านบนเพื่อให้มีพื้นที่ในการทดสอบ จึงได้ทำการออกแบบให้มีขนาด กว้าง 22.4 เซนติเมตร ยาว 26.4 เซนติเมตร และสูง 29.4 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.21

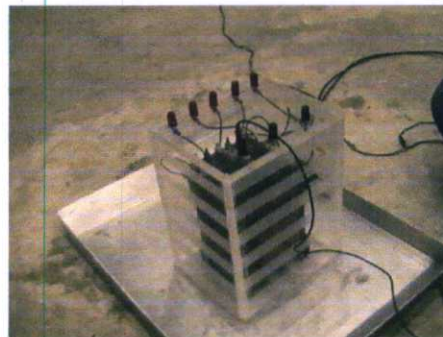


รูปที่ 3.21 ตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบเพื่อทดสอบผลของน้ำมัน

จากนั้นนำหม้อแปลงใส่ลงในกล่องอะคริลิก แล้วทำการต่อสายออกมาเพื่อรอทำการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ ซึ่งเมื่อต่อสายเพื่อที่จะทำการวัดแล้วจะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่บรรจุในกล่องอะคริลิกพร้อมที่จะทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.22



ก) การติดตั้งหม้อแปลงในกล่องอะคริลิก



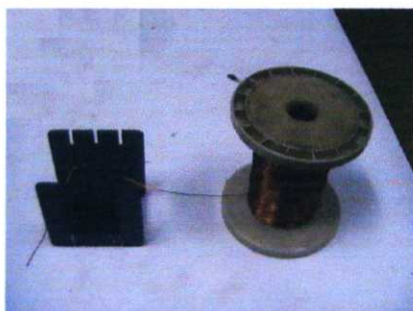
ข) การต่อสายเพื่อทดสอบ

รูปที่ 3.22 การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส บรรจุอยู่ในตัวถังอะคริลิก

### 3.4 การจำลองความผิดพร่องของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

#### 3.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V 50 Hz

เตรียมการพันหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V 50 Hz โดยได้ทำการต่อเป็นแท่งปอกมาฝั่งละ 10 แท่ง ทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิดังรูปที่ 3.23 ก และ ข

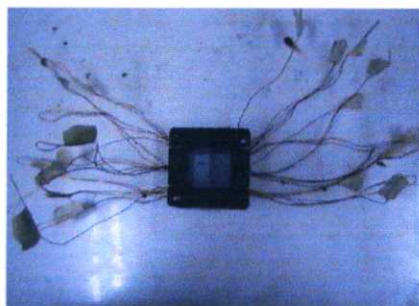


ก. แกนและลวดก่อนพัน

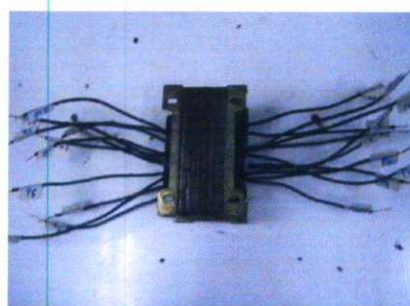


ข. พันขดลวดที่แกน

รูปที่ 3.23 การเตรียมแกนและขดลวดในการพันหม้อแปลงขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V



ก. แกนและลวดที่พันเรียบร้อย



ข. แกนและลวดที่พันพร้อมแกนเหล็ก

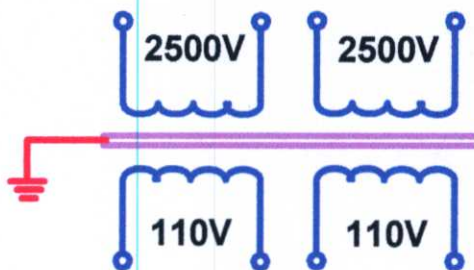
รูปที่ 3.24 การพันหม้อแปลงขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V

นำหม้อแปลงมาทำการทดสอบการลัดวงจรตามแท็บที่ได้พันไว้ เพื่อดูลักษณะการลัดวงจร ว่าถ้า ลัดวงจรในรอบที่น้อยๆ จะเป็นเช่นไร ถ้าลัดวงจรรอบมากๆ จะเป็นเช่นไร

3.4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาดพิกัด 5 kVA 220/5000 V 50 Hz



ก. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบ



ข. ไคอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

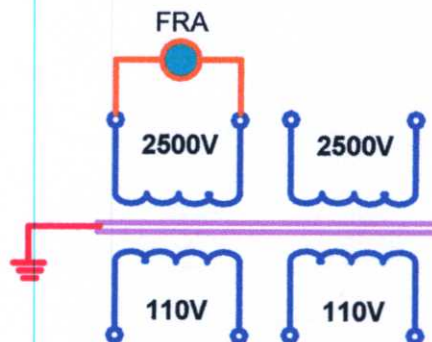
รูปที่ 3.25 หม้อแปลงและไคอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 5 kVA 220/5000 V 50 Hz

3.4.2.1 การจำลองหม้อแปลงในสภาพปกติ Open Circuit Test

การจำลองการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Open Circuit Test ซึ่งจะมีวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 3.26 ก และ ข



ก) การต่อการวัดผลตอบสนองทางความถี่

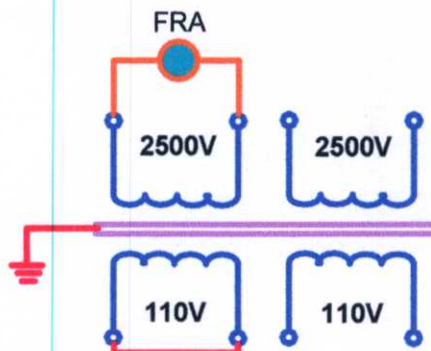


ข) ไคอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 3.26 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Open Circuit Test

### 3.4.2.2 การจำลองหม้อแปลงในสภาพปกติ Short Circuit Test

การจำลองการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Short Circuit Test ซึ่งจะมีวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 3.27 ก และ ข



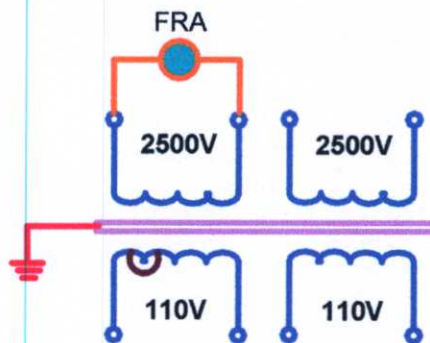
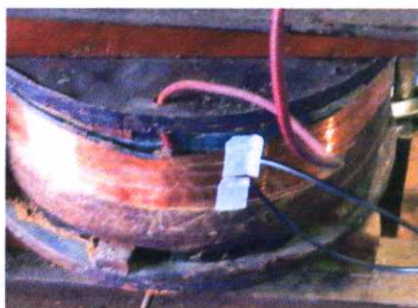
ก) ลักษณะการต่อวงจรการวัด

ข) ไคอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 3.27 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Short Circuit Test

### 3.4.2.3 การจำลองการลัดวงจรที่ต้นคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Top Winding)

การจำลองการลัดวงจรที่ต้นคอยล์ของขดลวดโดยใช้สายที่มีฉนวนหุ้มดังรูปที่ 3.28 ก ซึ่งจะมีวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 3.28 ก และ ข



ก) ลักษณะความผิดปกติ

ข) ไคอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

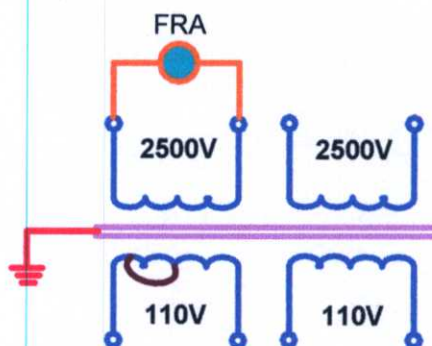
รูปที่ 3.28 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้เกิดการลัดวงจรที่ต้นคอยล์ของขดลวด

### 3.4.2.4 การจำลองการลัดวงจรที่กลางคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Middle Winding)

การจำลองการลัดวงจรที่กลางคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Middle Winding) ซึ่งจะมีวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 3.29 ก และ ข



ก) ลักษณะความผิดปกติ



ข) ไดอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

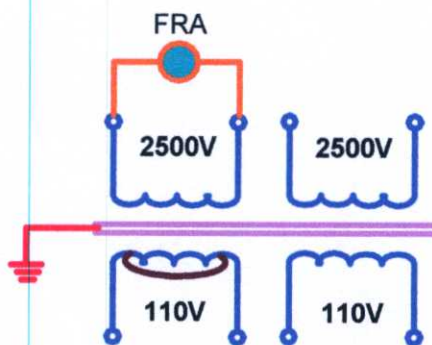
รูปที่ 3.29 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้เกิดการลัดวงจรที่กลางคอยล์ของขดลวด

### 3.4.2.5 การจำลองการลัดวงจรที่ปลายคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Bottom Winding)

การจำลองการลัดวงจรที่ปลายคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Bottom Winding) ซึ่งจะมีวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 3.30 ก และ ข



ก) ลักษณะความผิดปกติ



ข) ไดอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

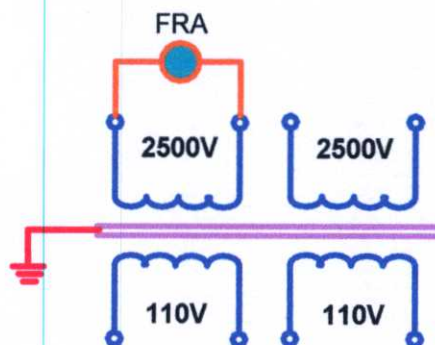
รูปที่ 3.30 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้เกิดการลัดวงจรที่ปลายคอยล์ของขดลวด

### 3.4.2.6 การจำลองแกนของหม้อแปลงเกิดการขยับตัว (Shorted Laminates)

การจำลองแกนของหม้อแปลงเกิดการขยับตัว (Shorted Laminates) โดยการขยับที่แกนเหล็กที่ใช้พันขดลวดดังรูปที่ 3.31 ก ซึ่งจะมึวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 3.31 ข และ ข



ก) ลักษณะความผิดพร่อง



ข) ไดอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

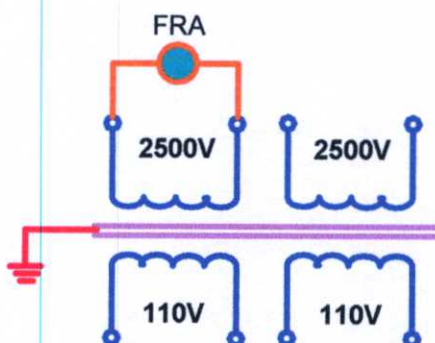
รูปที่ 3.31 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้แกนของหม้อแปลงเกิดการขยับตัว

### 3.4.2.7 การจำลองขดลวดหม้อแปลงเกิดการคลายตัว (Loosened)

การจำลองขดลวดหม้อแปลงเกิดการคลายตัว (Loosened) หรือทำให้ขดลวดหลวม ซึ่งจะมีวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 3.32 ก และ ข



ก) ลักษณะความผิดพร่อง



ข) ไดอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

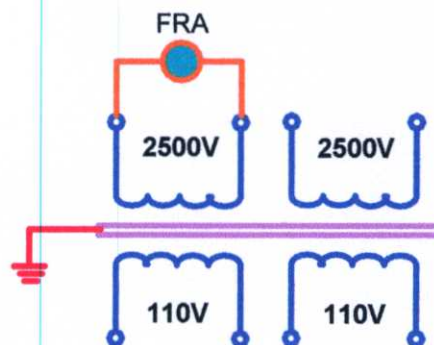
รูปที่ 3.32 การวัดผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้ขดลวดหม้อแปลงเกิดการคลายตัว

### 3.4.2.8 การจำลองขดลวดหม้อแปลงยูปตัวในแนวแกนที่พัน (Buckling)

การจำลองขดลวดหม้อแปลงยูปตัวในแนวแกนที่พัน (Buckling) ซึ่งจะมีวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 3.33 ก และ ข



ก) ลักษณะความผิดพร่อง



ข) โค้ดอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

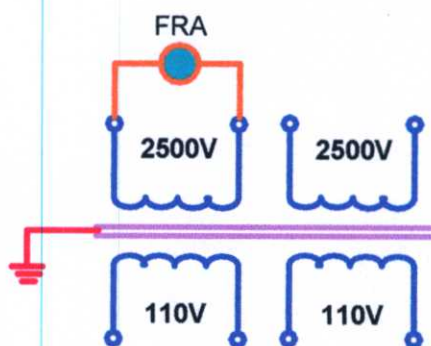
รูปที่ 3.33 การวัดผลตอบสนองทางความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้ขดลวดหม้อแปลงยูปตัวในแนวแกนที่พัน

### 3.4.2.9 การจำลองขดลวดหม้อแปลงโป่งตัวออกในแนวแกนที่พัน (Buckling)

การจำลองขดลวดหม้อแปลงโป่งตัวออกในแนวแกนที่พัน (Buckling) ซึ่งจะมีวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 3.34 ก และ ข



ก) ลักษณะความผิดพร่อง



ข) โค้ดอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 3.34 การวัดผลตอบสนองทางความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่จำลองให้ขดลวดหม้อแปลงโป่งตัวออกในแนวแกนที่พัน

### 3.5 การจำลองความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส [13-16]

#### 3.5.1 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 12 kV /416 V 50 Hz Dyn1

การจำลองความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ได้ทำการจำลองการลัดวงจรที่จุดเปลี่ยนแท็บ โดยสมมติให้เกิดการลัดวงจรตรงจุดเปลี่ยนแท็บ การจำลองในลักษณะเช่นนี้ เป็นการจำลองให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดจากจุดเปลี่ยนแท็บของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายและในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การทดลองนี้ใช้หม้อแปลงพิกัด 12 kV/416 V ดังรูปที่ 3.35



ก) ภาพถ่ายด้านหน้าของหม้อแปลง

ข) ภาพถ่ายด้านหลังของหม้อแปลง

รูปที่ 3.35 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 12 kV/416 V

#### 3.5.2 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 12 kV / 400 V 50 Hz Dyn5

ทำการจำลองการลัดวงจรที่จุดเปลี่ยนแท็บ โดยสมมติให้เกิดการลัดวงจรตรงจุดเปลี่ยนแท็บ การจำลองในลักษณะเช่นนี้ เป็นการจำลองให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดจากจุดเปลี่ยนแท็บ ของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายและในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การทดลองนี้ใช้หม้อแปลงพิกัด 12 kV / 400 V ดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 12 kV/400 V

### 3.6 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

#### 3.6.1 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 22.4 MVA 15.7 kV/7.2kV 50 Hz

#### 3.6.2 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 300 MVA 230/69 kV 50 Hz

## บทที่ 4

# การทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสิ่งที่ได้จำลองจากบทที่ 3 คือ การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบง่ายแล้วทำการวัดผลตอบสนองทางความถี่ และการจำลองความผิดพร่องให้เกิดขึ้นบนหม้อแปลงไฟฟ้าจริง โดยจะทำการจำลองการลัดวงจรที่หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว ขนาดกลาง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวแบบคอร์ และขนาดใหญ่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบฉนวนแข็งผสมฉนวนอากาศ และทำการวัดผลตอบสนองทางความถี่ โดยได้ใช้สถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย เพื่อให้สามารถตัดสินใจ และวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ได้ ในตอนท้ายของบทนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามจากบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งได้เกิดความผิดพร่องจริง ที่ไม่ได้จำลองขึ้นมา และได้นำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับสิ่งที่ได้จำลองและทดลองที่ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง และที่ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

### 4.2 การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบง่าย

#### 4.2.1 การจำลองผลที่เกิดจากแบบจำลอง 2 คอยล์ที่แตกต่างกัน

การทดลองนี้จะใช้คอยล์ที่ได้จำลองไว้ในบทที่ 3 มาทำการทดสอบเพื่อดูลักษณะผลตอบสนองความถี่ของแต่ละคอยล์ ซึ่งคอยล์ที่จะนำมาทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 ก และ ข



ก. แบบเป็นชั้น (Layer)



ข. แบบคอยล์เป็นวงกลม (Disk)

รูปที่ 4.1 รูปแบบคอยล์ที่จะทำการทดสอบ

#### 4.2.1.1 การเตรียมการทดสอบ

การทดสอบได้จัดทำขึ้นที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีลำดับขั้นตอนในการเตรียมการทดสอบดังนี้

1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้พันไว้เรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 4.1

2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย

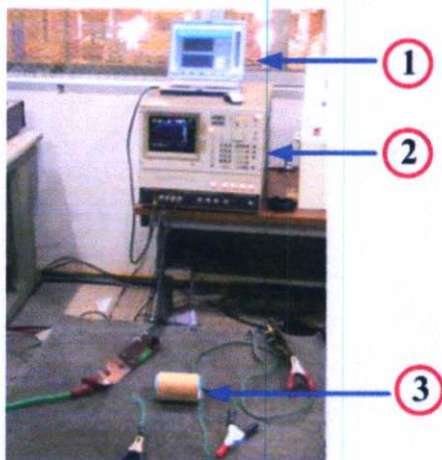
2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)

2.2) คอมพิวเตอร์

2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

#### 4.2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1) ต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 ซึ่งจะประกอบด้วย เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA), คอมพิวเตอร์, วัสดุทดสอบ (Test Object)



รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่

เมื่อ 1 คือ คอมพิวเตอร์

2 คือ เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่(FRA)

3 คือ วัสดุทดสอบ(Test Object)

2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

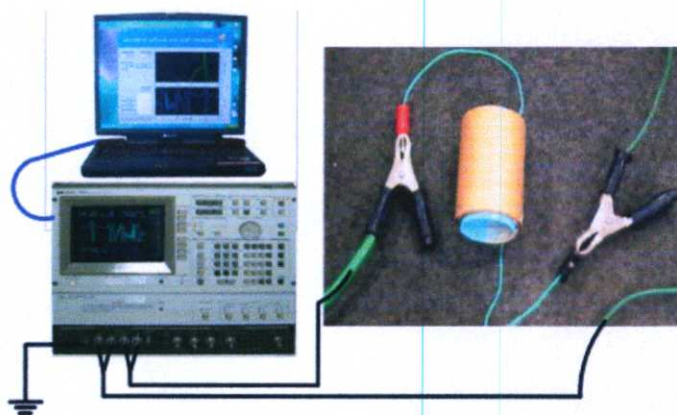
4) ทำการทดสอบอีกครั้ง

5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

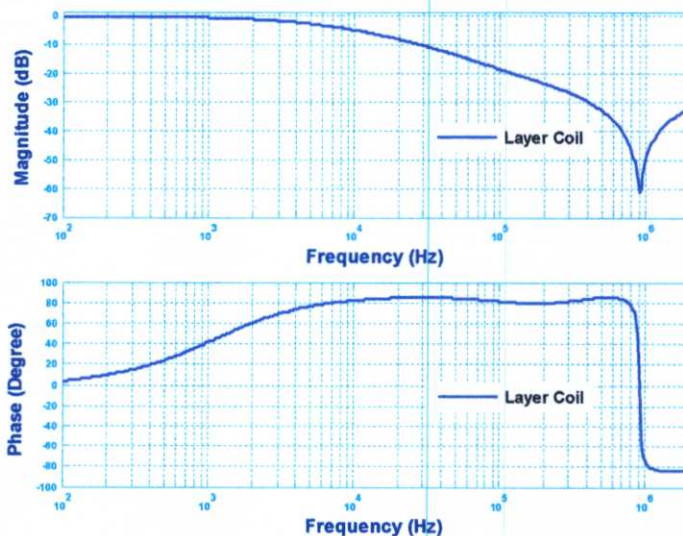
### 4.2.1.3 ผลการทดสอบ

#### 1) แบบเป็นชั้น (Layer)

ผลที่ได้จากการทดสอบ จะแสดงดังรูปที่ 4.3 ก และ ข ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบของอัตราขยาย (dB) เทียบกับความถี่ (Frequency) และเป็นมุมเฟส(Degree)เทียบกับความถี่



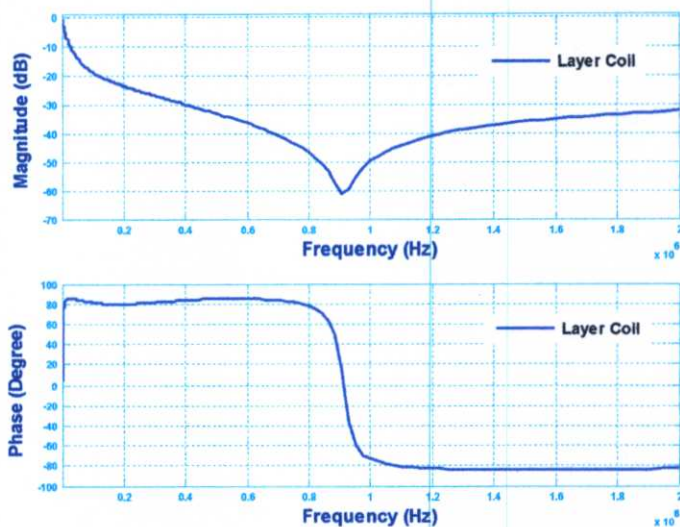
#### ก) ลักษณะการต่อวงจรขณะวัดผลตอบสนองทางความถี่



#### ข) ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้น (Layer)

รูปที่ 4.3 ลักษณะการต่อวงจรการวัดผลตอบสนองความถี่ และผลการวัดผลตอบสนองความถี่ ในกรณีคอยล์แบบเป็นชั้น (Layer)

และสามารถดูผลตอบสนองความถี่ในรูปแบบเชิงเส้นสเกลได้ดังรูปที่ 4.4



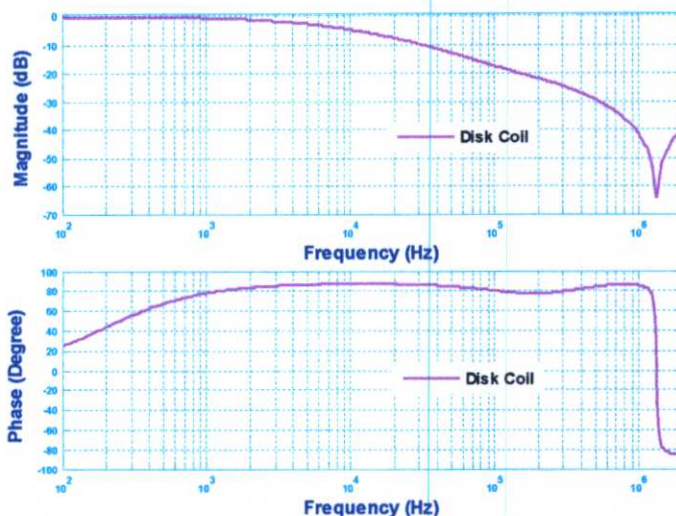
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองความถี่ของแบบเป็นชั้น เจึงเส้นสเกล

## 2) แบบคอยล์เป็นวงกลม (Disk)

ผลที่ได้จากการทดสอบ จะแสดงดังรูปที่ 4.5 ก และ ข ซึ่งจะแสดงผลในรูปของอัตราขยาย (dB) เทียบกับความถี่ (Frequency) และเป็นมุมเฟส(Degree)เทียบกับความถี่



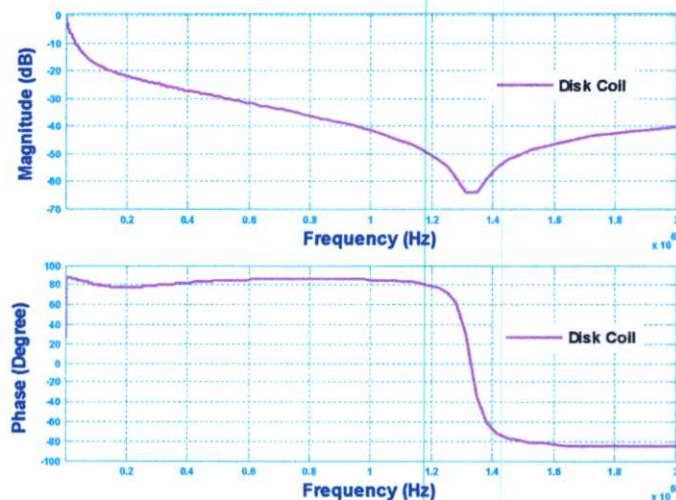
ก) ลักษณะการต่อวงจรขณะวัดผลตอบสนองทางความถี่



จ) ผลตอบสนองความถี่แบบคอลลี่เป็นวงกลม (Disk)

รูปที่ 4.5 ลักษณะการต่อวงจรการวัดผลตอบสนองความถี่ และผลการวัดผลตอบสนองความถี่ ในกรณีคอลลี่แบบคอลลี่เป็นวงกลม (Disk)

และสามารถดูผลตอบสนองความถี่ในรูป เชนเส้นสเกลได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองความถี่แบบคอลลี่เป็นวงกลม เชนเส้นสเกล

#### 4.2.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

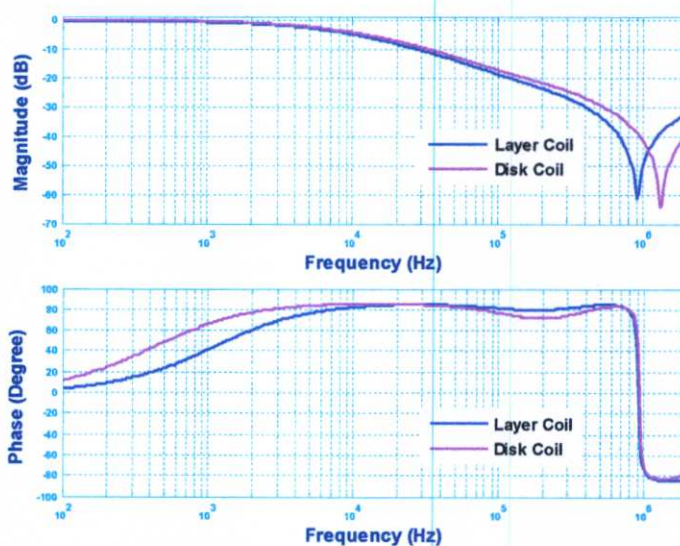
จากผลการทดลอง การวัดผลตอบสนองความถี่ของคอลลี่แบบเป็นชั้น ผลตอบสนองความถี่ของคอลลี่ในรูปที่ 4.3 แสดงในรูป Log สเกล และรูปที่ 4.4 แสดงในรูปเชนเส้นสเกล ซึ่งเป็นข้อมูลชุดเดียวกัน เมื่อสังเกตทั้งสองรูปจะเห็นว่าเกิดรีโซแนนซ์ที่ประมาณ 900 kHz

จากผลการทดลอง การวัดผลตอบสนองความถี่ของคอยล์แบบคอยล์เป็นวงกลม ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์ในรูปที่ 4.5 แสดงในรูป Log สเกล และรูปที่ 4.6 แสดงในรูปเชิงเส้น สเกล ซึ่งเป็นข้อมูลชุดเดียวกัน เมื่อสังเกตทั้งสองรูปจะเห็นว่าเกิดรีโซแนนซ์ที่ประมาณ 1300 kHz

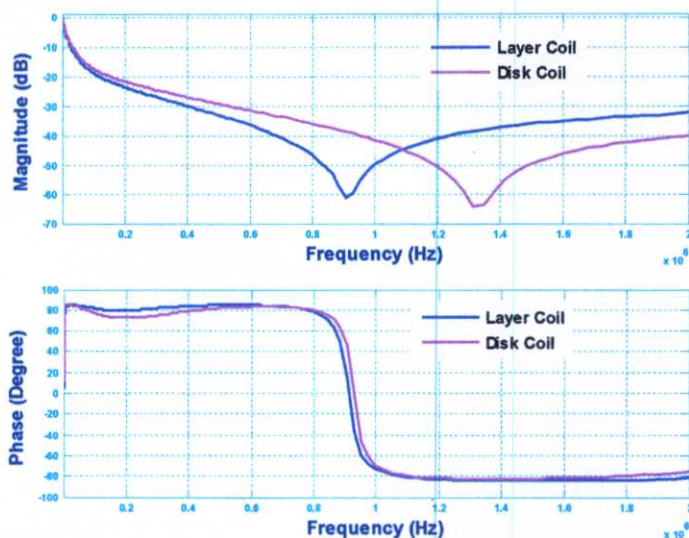
จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าคอยล์ที่จำลองมานั้นมีลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ จะมีรูปร่างที่เหมือนกัน ต่างกันที่จุดที่เกิดรีโซแนนซ์ คือ แบบคอยล์เป็นวงกลมจะเกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่สูงกว่า และค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่าได้จากผลตอบสนองความถี่ที่ค่า dB มากกว่า (ผลตอบสนองทางด้านลบมากกว่า) ในการทดลองนี้สรุปได้ว่าแบบคอยล์เป็นวงกลมมีคุณสมบัติของความเป็นตัวเหนี่ยวนำมากกว่าแบบเป็นชั้นจึงทำให้ผลตอบสนองทางความถี่นั้นเกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่สูงกว่า รวมถึงโครงสร้างหรือรูปทรงของคอยล์ที่ทำมาเพื่อทดสอบอาจมีลักษณะของความเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่มาก

#### 4.2.2 การเปรียบเทียบระหว่างคอยล์ทั้งสอง

จากการวัดผลตอบสนองความถี่ของทั้งสองคอยล์ ได้นำมาเปรียบเทียบในรูป Log สเกล และ เชิงเส้น สเกล ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้น Log สเกล



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้น เริงเส้นสเกล

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าทั้งสองคอยล์นั้นมีลักษณะที่เหมือนกันในการตอบสนองความถี่ คือ

- 1) มีลักษณะการตอบสนองความถี่ที่ค่าอัตราขยาย dB ประมาณ -50 dB ถึง -60 dB
- 2) มีคุณสมบัติของความเป็นตัวเหนี่ยวย่อมๆ จึงทำให้ผลตอบสนองความถี่นั้นตกลงที่ความชันค่าหนึ่งอย่างรวดเร็ว
- 3) มีคุณสมบัติของความเป็นตัวเก็บประจุอยู่ จึงทำให้ผลตอบสนองความถี่นั้นเมื่อตกลงมาแล้ว สามารถเพิ่มกลับขึ้นได้เอง

มีลักษณะการเกิดรีโซแนนซ์ขนาดเล็กซึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับ โครงสร้างของคอยล์ที่พัน ผลของรีโซแนนซ์ขนาดเล็ก สังเกตเปรียบเทียบได้กับผลการวัดที่ได้จากแบบเป็นชั้น ที่มีโครงสร้างเป็นชั้นเรียบร้อย การเกิดรีโซแนนซ์ที่เปลี่ยนไปอาจจะเกิดจากจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นเป็นผลให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้น ก็จะเกิดประจุในระหว่างชั้นที่ได้พันไว้

จากค่าแอมพลิจูด ของผลตอบสนองที่ความถี่ต่ำ ค่าอิมพีแดนซ์ของความเป็นตัวเหนี่ยวนำของแบบเป็นชั้นมากกว่าแบบคอยล์เป็นวงกลมคือ  $L_L > L_D$

จากค่าแอมพลิจูด ของผลตอบสนองที่ความถี่สูง ค่าอิมพีแดนซ์ของแบบเป็นชั้น จะมีค่าน้อยกว่าแบบคอยล์เป็นวงกลม มีความสัมพันธ์ที่ตรงข้ามกันคือมีคุณสมบัติการเก็บประจุคือ  $C_L > C_D$

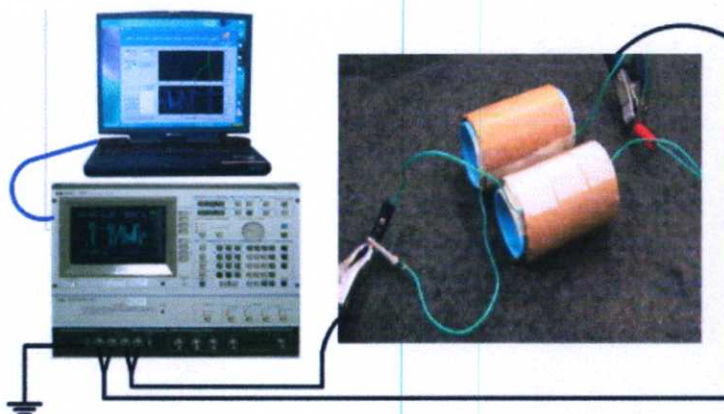
สิ่งที่ได้ตามมาคือ  $L_L > L_D$  และ  $C_L > C_D$  จะทำให้เกิด  $L_L C_L > C_D L_D$  จึงทำให้ความถี่รีโซแนนซ์ในกรณีแบบเป็นชั้นจะต่ำกว่าแบบคอยล์เป็นวงกลม

### 4.2.3 การจำลองการต่ออนุกรมและการต่อขนาน

การทดลองนี้จะใช้คอล์ยที่ได้จำลองไว้หน้าบทที่ 3 มาทำการทดสอบเพื่อดูลักษณะผลตอบสนองความถี่ของแต่ละคอล์ยในกรณีที่น่ามาต่อขนานกันและต่ออนุกรมกัน

#### 4.2.3.1 การจำลองสองคอล์ยเหมือนกันขนานกัน

ผลตอบสนองของ 2 คอล์ยที่เหมือนกัน ต่อแบบขนาน สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากผลของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ โดยที่สามารถใช้ค่าจากตารางที่ 2.1 ในการบอกลักษณะเฉพาะของทั้งสองคอล์ยที่เหมือนกัน รูปที่ 4.9 แสดงการต่อขนานสองคอล์ยที่เหมือนกัน



รูปที่ 4.9 สองคอล์ยที่เหมือนกันขนานกัน

#### 4.2.3.1.1 การเตรียมการทดสอบ

- 1) เตรียมขดลวด (คอล์ย) ที่ได้ทำการต่อขนานกันไว้เรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 4.9
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

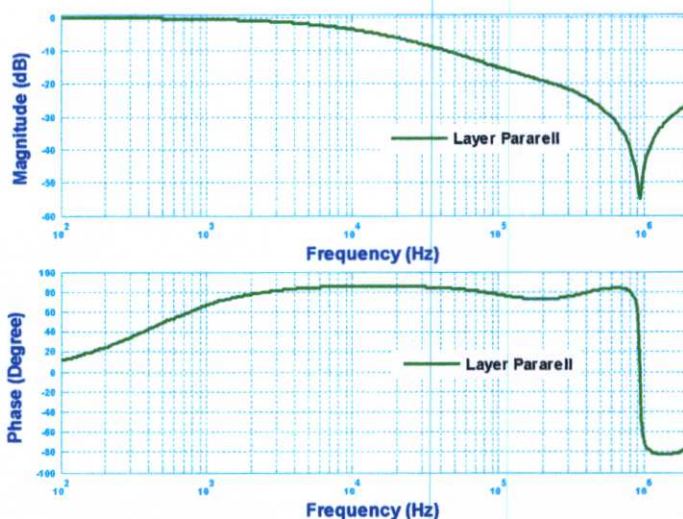
#### 4.2.3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อดวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัตถุทดสอบ (Test Object) เป็นคอล์ย 2 คอล์ยที่เหมือนกันต่อขนานกัน
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง

5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

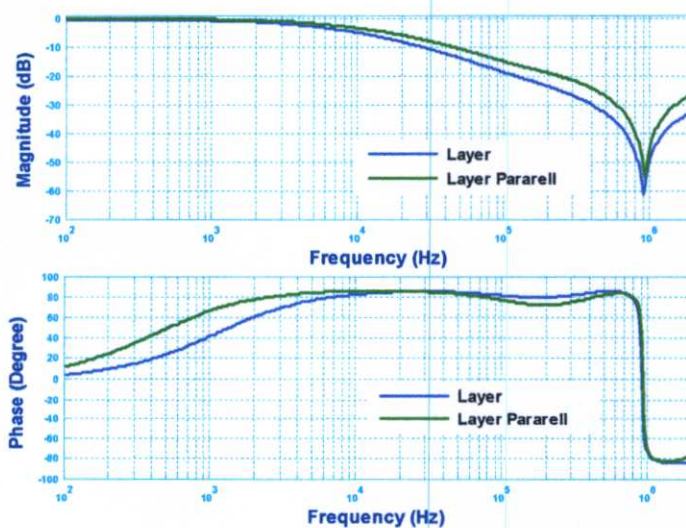
#### 4.2.3.1.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการตอบสนองความถี่ แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันกับผลตอบสนองตอนที่ยังไม่ได้ขนานกัน



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นที่เหมือนกันขนานกัน

และจากรูปที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองของคอยล์เดี่ยว (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสองคอยล์เหมือนกันขนานกัน



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์ที่เหมือนกันขนานกัน เปรียบเทียบกับผลตอบสนองความถี่กรณีที่เป็นคอยล์เดี่ยว

#### 4.2.3.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดสำหรับการต่อแบบขนานนั้นจะมีค่าที่ต่ำกว่าแบบคอยล์เดียว การขนานกันจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรวม  $L_p$  นั้นมีค่าลดลง และค่าการเก็บประจุ  $C_p$  รวมเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว และสามารถใช่วิธีการหาค่าต่างๆ จากตารางที่ 2.1 ซึ่งค่าของ  $L_L$  และ  $C_L$  มีความสัมพันธ์ดังนี้

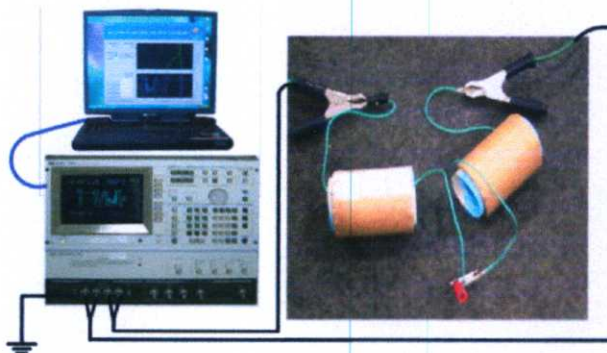
$$L_p = L_L / 2 \quad (4.1)$$

$$C_p = 2 * C_L \quad (4.2)$$

เมื่อดูจากรูปผลตอบสนองความถี่และจากสมการ จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำจะลดลงจากเดิมเพียงครึ่งเดียว ซึ่งมีผลทำให้ผลตอบสนองความถี่เกิดการตกลงอย่างรวดเร็ว แต่ค่าของตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว และทำให้ผลตอบสนองมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความถี่สูง และด้วยเหตุนี้เอง จะทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่จุดนี้เช่นเดียวกัน

#### 4.2.3.2 การจำลองสองคอยล์เหมือนกันต่ออนุกรมกัน

ผลตอบสนองของ 2 คอยล์ที่เหมือนกัน ต่อแบบอนุกรมกัน สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากผลของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ โดยที่สามารถใช้ค่าจากตารางที่ 2.1 ในการบอกลักษณะเฉพาะของทั้งสองคอยล์ที่เหมือนกัน รูปที่ 4.12 แสดงการอนุกรมกันของคอยล์สองคอยล์ที่เหมือนกัน



รูปที่ 4.12 แบบเป็นชั้นที่เหมือนกันอนุกรมกัน

#### 4.2.3.2.1 การเตรียมการทดสอบ

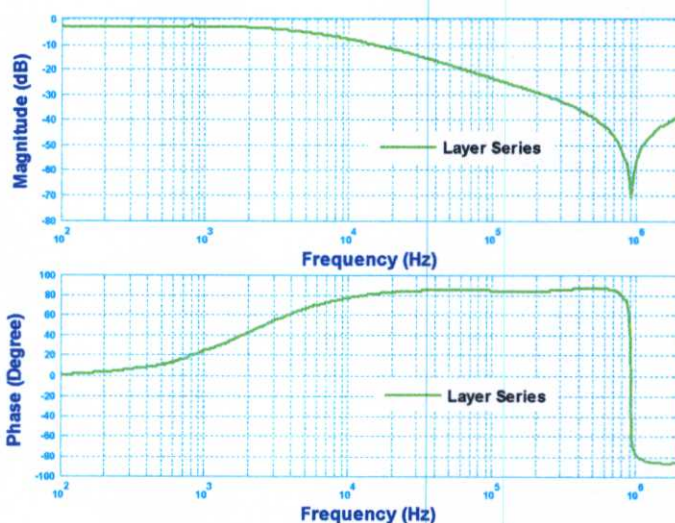
- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการต่ออนุกรมกันไว้เรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 4.12
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ

#### 4.2.3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัตถุทดสอบ (Test Object) เป็นคอยล์ 2 คอยล์ที่เหมือนกันต่ออนุกรมกัน
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

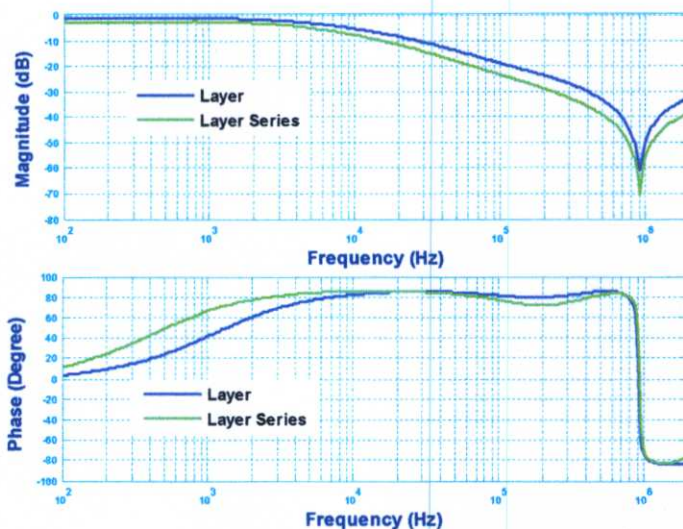
#### 4.2.3.2.3 ผลการทดสอบ

สองขดลวดต่ออนุกรมกันให้ผลตอบสนองในเส้นสีเขียวแสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งรูปจะเห็นว่าผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันกับผลตอบสนองตอนที่ยังไม่ได้อนุกรมกัน



รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นที่เหมือนกันอนุกรมกัน

และจากรูปที่ 4.14 แสดงผลตอบสนองของคอยล์เดี่ยว (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสองคอยล์เหมือนกันอนุกรมกัน



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์ที่เหมือนกันอนุกรมกัน เปรียบเทียบกับผลตอบสนองความถี่กรณีที่เป็นคอยล์เดี่ยว

#### 4.2.3.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดสำหรับการต่อแบบอนุกรมนั้นจะมีค่าที่สูงกว่า การอนุกรมกันจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ  $L_L$  รวมกันเป็น  $L_S$  และค่าการเก็บประจุ คือ  $C_L$  มีค่าลดลงครึ่งเดียว คือ  $C_S$  และสามารถใช้วิธีการคำนวณหาค่าต่างๆ จากตารางที่ 2.1

$$L_S = 2 * L_L \quad (4.3)$$

การหาค่าของตัวเก็บประจุ คิดเหมือนกับตัวต้านทานต่อขนานกัน คือ

$$C_S = C_L / 2 \quad (4.4)$$

จากผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่และจากสมการ สังเกตได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และค่าการเก็บประจุจะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง

ที่ความถี่ต่ำมีผลตอบสนองความถี่ที่ลดลง และผลตอบสนองนั้นตกลงเร็วกว่าอันเนื่องมาจากค่าเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้น

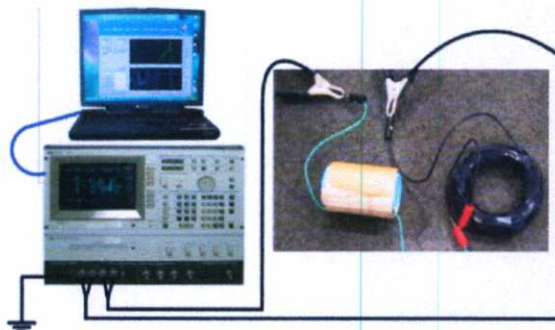
ที่ความถี่ที่สูงกว่า มีผลตอบสนองความถี่ที่ลดลง และค่อยๆเพิ่มขึ้นหลังจากที่ ค่าการเก็บประจุที่ลดลง

ความถี่รีโซแนนซ์จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวกับ  $L_S$  และ  $C_S$  ซึ่งจะเหมือนกันกับกรณีที่เป็นชั้นคอยล์เดียว หาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 4.5

$$L_S * C_S = (2 * L_L) * (C_L / 2) = L_L * C_L \quad (4.5)$$

#### 4.2.3.3 การจำลองแบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน

ผลตอบสนองความถี่ของ 2 คอยล์ที่ต่างกัน ต่อแบบอนุกรมกัน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากผลของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ การต่อคอยล์อนุกรมกัน แสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน

##### 4.2.3.3.1 การเตรียมการทดสอบ

- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการต่ออนุกรมกันไว้เรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 4.15
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

##### 4.2.3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัตถุทดสอบ (Test Object) เป็นคอยล์ 2 คอยล์ที่ต่างกันต่ออนุกรมกัน
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

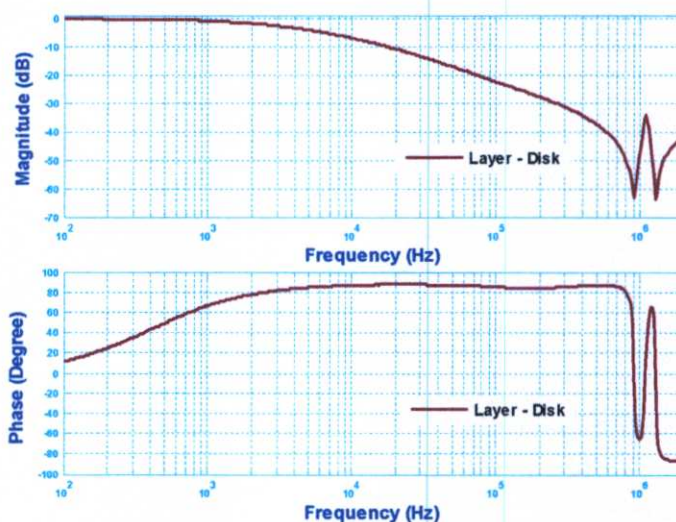
3) ทำการทดสอบ โดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

4) ทำการทดสอบอีกครั้ง

5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

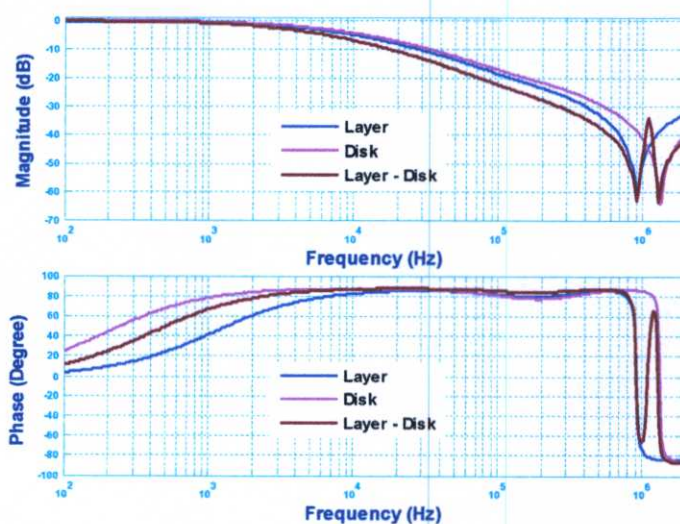
#### 4.2.3.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการวัดตอบสนองความถี่ แสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน

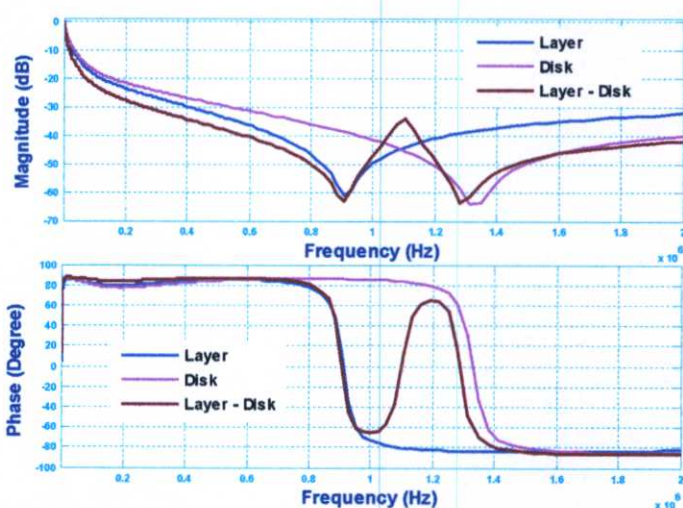
จากผลการทดสอบที่ได้ในรูปที่ 4.16 นำมาเปรียบเทียบกับกรณีแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลมได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน เปรียบเทียบกับแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลม

#### 4.2.3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.16 และผลการเปรียบเทียบรูปที่ 4.17 จะสังเกตเห็นได้ว่า มีลักษณะเฉพาะบางอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน สำหรับการต่ออนุกรมกันของแบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลม ที่ความถี่ต่ำ ผลตอบสนองความถี่ของการต่ออนุกรม จะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าและมีผลตอบสนองอิมพีแดนซ์ที่สูงกว่าแสดงดังรูปผลตอบสนอง dB ที่ต่ำกว่าและมีค่าสูงขึ้นที่ประมาณ 900 kHz ที่ความถี่สูง ผลการตอบสนองมีค่าการเก็บประจุมากกว่า เนื่องจากที่ความถี่สูงค่าอิมพีแดนซ์ของการเก็บประจุจะมีค่าลดลง เห็นได้จากค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงกว่า (มีค่าขึ้นไปทางบวก) ข้อมูลชุดเดียวกันแต่แสดงให้อูในรูป เซึ่งเส้นสเกลดังรูปที่ 4.18 ซึ่งจะเห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองความถี่ที่ความถี่สูง

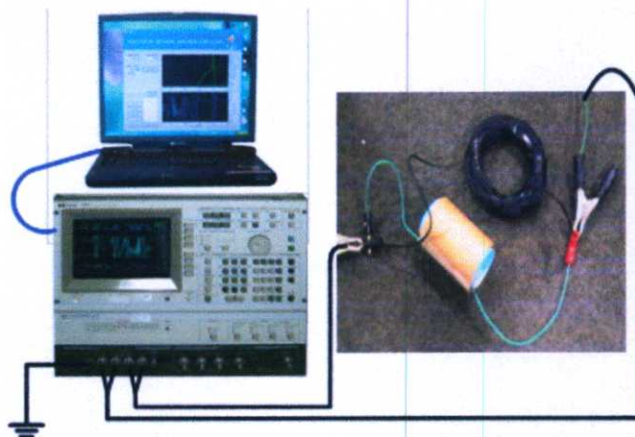


รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน เปรียบเทียบกับแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลม เซึ่งเส้นสเกล

จากรูปที่ 4.18 มีสิ่งที่จะต้องสังเกตบางอย่างสำหรับการเปลี่ยนแปลงจุดที่เกิดรีโซแนนซ์ ของแต่ละคอยล์ จะเกิดที่ประมาณ 1000 kHz

#### 4.2.3.4 การจำลองแบบคอยล์เป็นวงกลมและแบบเป็นชั้นต่อขนานกัน

ผลตอบสนองความถี่ของ 2 คอยล์ที่ต่างกัน ต่อแบบขนานกัน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากผลของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ การต่อคอยล์ขนานกัน แสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่อขนานกัน

#### 4.2.3.4.1 การเตรียมการทดสอบ

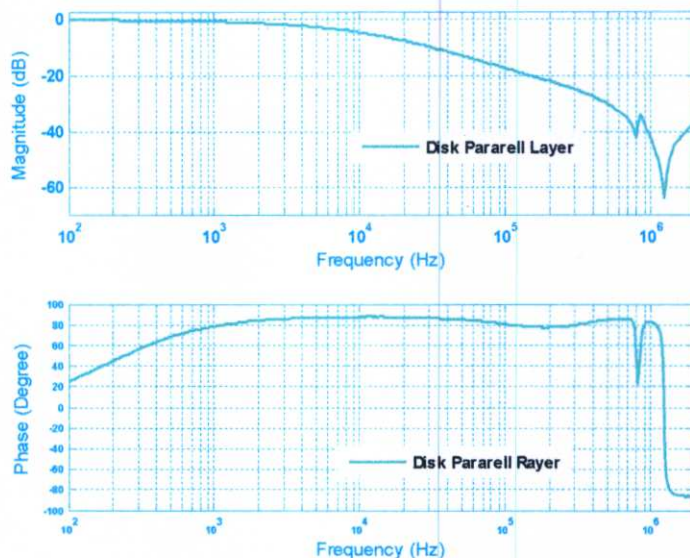
- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการต่อขนานกันไว้เรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 4.19
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

#### 4.2.3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อยंत्रการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัสดุทดสอบ (Test Object) เป็นคอยล์ 2 คอยล์ที่ต่างกันต่อขนานกัน
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และ ปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

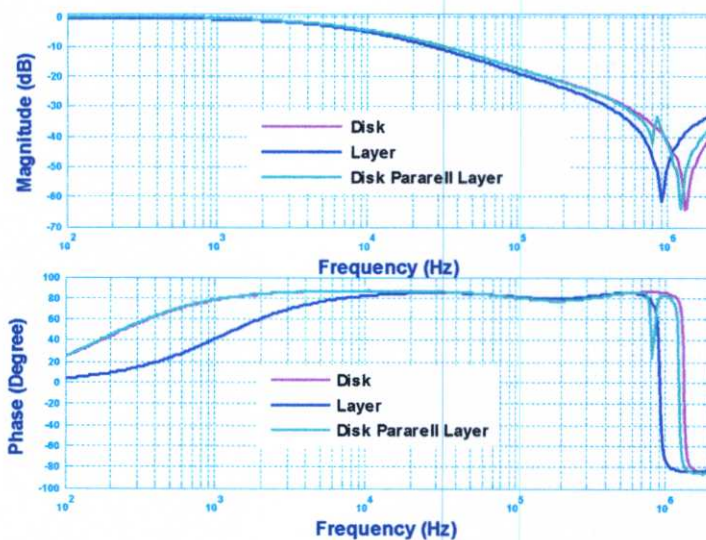
#### 4.2.3.4.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการวัดตอบสนองความถี่ แสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่ออนุกรมกัน

จากผลการทดสอบที่ได้ในรูปที่ 4.20 นำมาเปรียบเทียบกับกรณีแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลมได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่อขนานกัน เปรียบเทียบกับแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลม

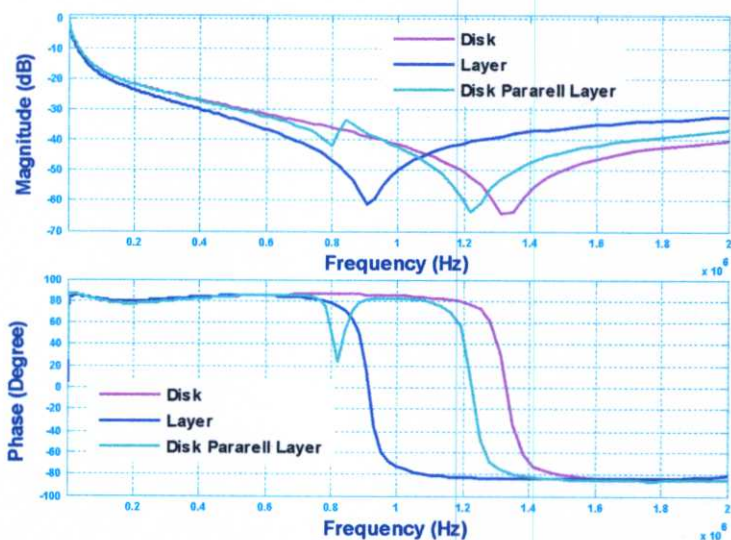
#### 4.2.3.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.20 และผลการเปรียบเทียบรูปที่ 4.21 จะสังเกตเห็นได้ว่า มีลักษณะเฉพาะบางอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน สำหรับการต่อขนานกันของแบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลม

ที่ความถี่ต่ำผลตอบแทนของความถี่นั้น จะให้ค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่า ค่าเหนี่ยวนำแบบอนุกรม ที่ความถี่สูง ผลตอบแทนของความถี่มีค่าการเก็บประจุมากกว่า เห็นจากอิมพีแดนซ์ที่ต่ำกว่า (ค่าความเก็บประจุสูงกว่า) สิ่งที่น่าประหลาดคือค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุสูงกว่า จึงทำให้ผลตอบแทนนั้นมีค่าในทางบวก

ข้อมูลชุดเดียวกันแต่แสดงให้คุณในรูปแบบ เชนเส้นสเกลดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจะเห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของผลตอบแทนความถี่ที่ความถี่สูง

จากรูปที่ 4.22 มีสิ่งที่จะต้องสังเกตบางอย่างสำหรับการเปลี่ยนแปลงจุดที่เกิดรีโซแนนซ์ ของแต่ละคอยล์ จะเกิดที่ประมาณ 900 – 1200 kHz



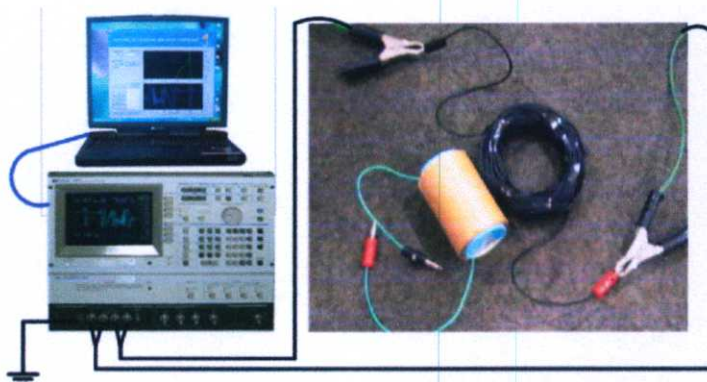
รูปที่ 4.22 ผลตอบแทนความถี่แบบเป็นชั้นและแบบคอยล์เป็นวงกลมต่อขนานกัน เปรียบเทียบกับแบบเป็นชั้น และแบบคอยล์เป็นวงกลม เชนเส้นสเกล

#### 4.2.4 การจำลองความปฏิสัมพันธ์ของคอยล์

การวางคอยล์ไว้ใกล้ๆกัน อาจจะมีผลกระทบอื่นๆ คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำข้อง ระหว่างทั้ง 2 คอยล์ ทั้งที่จริงแล้วโครงสร้างและความใกล้ชิด อาจจะมีอิทธิพลกับผลที่วัดได้ สิ่งต่างๆเหล่านี้ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความแตกต่างดังนั้นจึงจำลองผลของการวางใกล้ๆกัน โดยจะทำการทดลองเป็นลำดับดังนี้

#### 4.2.4.1 การจำลองการวางใกล้กัน

เมื่อคอยล์ 2 คอยล์วางอยู่ใกล้กันอาจจะมีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับคดียระหว่างคอยล์ทั้งสอง ซึ่งอาจจะทำให้ผลตอบสนองความถี่เปลี่ยนแปลงไป ทำการจำลองโดยการใช้อยู่จากรูปที่ 4.1 แล้วนำมาวางไว้ใกล้ๆกันดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 คอยล์เป็นวงกลมและคอยล์แบบเป็นชั้นวางใกล้กัน

##### 4.2.4.1.1 การเตรียมการทดสอบ

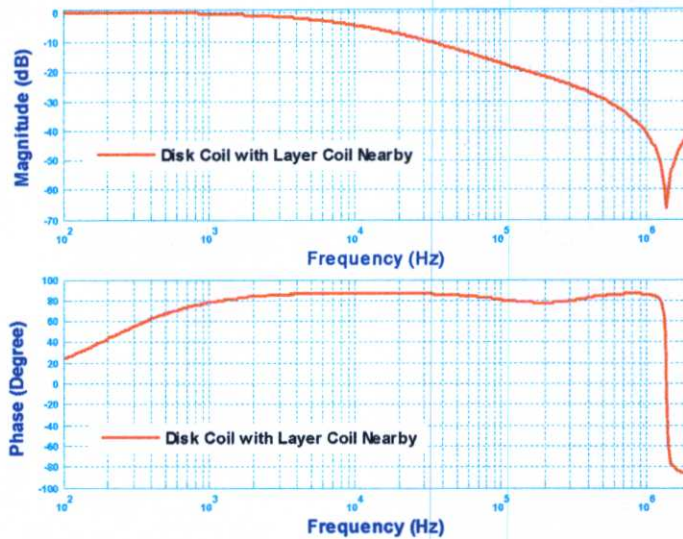
- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการวางไว้ใกล้กันไว้เรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 4.23
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

##### 4.2.4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อดวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัสดุทดสอบ (Test Object) เป็นคอยล์ 2 คอยล์ที่วางไว้ใกล้ๆกัน
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

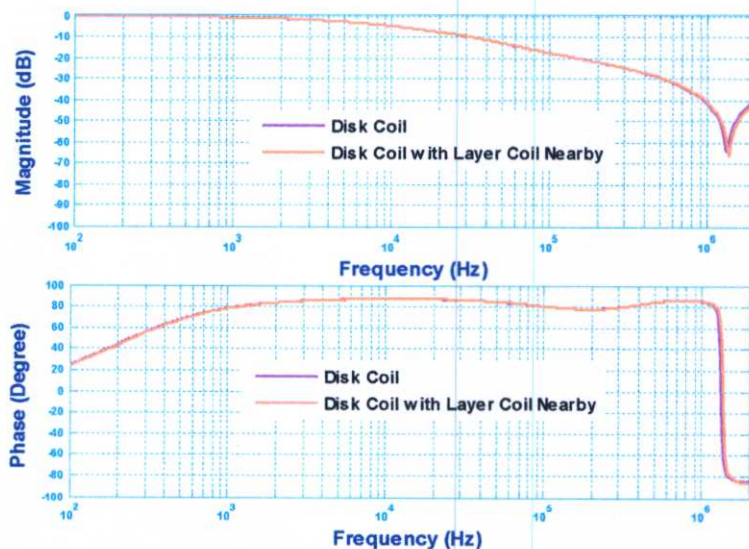
##### 4.2.4.1.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการวัดตอบสนองความถี่ แสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองความถี่การวางใกล้กันของคอยล์สองคอยล์ที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบที่ได้ในรูปที่ 4.24 นำมาเปรียบเทียบกับกรณีแบบคอยล์เป็นวงกลมได้ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลของคอยล์สี่ค่าเพียงคอยล์เดียว และคอยล์สี่เหลี่ยมวางอยู่ใกล้ๆ ซึ่งจะให้ผลที่ได้จากการวัดจะคล้ายกันมากๆ จะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยที่ความถี่ประมาณ 1400 kHz ทั้งนี้ที่ผลตอบสนองทางความถี่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเพราะเส้นทางเดินของฟลักแม่เหล็กยังคงมีอยู่ในทิศทางเดิม และเกี่ยวข้องกับที่คอยล์ที่วางใกล้ๆ เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองทางความถี่ของคอยล์แบบวงกลมเทียบกับคอยล์แบบเป็นชั้นวางอยู่ใกล้ๆ

#### 4.2.4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบและผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่อนำคอยล์มาวางใกล้ๆกัน จะทำให้ฟลักซ์ที่ไหลในคอยล์นั้นเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย คือไปเกี่ยวข้องกับคอยล์ที่อยู่ข้างๆ ด้วย จึงมีผลทำให้ผลตอบสนองของความเปลี่ยนแปลงไป เส้นกราฟมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

#### 4.2.4.2 การจำลองการวางแบบซ้อนแกนร่วม

ใช้คอยล์ที่แตกต่างกัน มาวางซ้อนแกนร่วมกันดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 คอยล์เป็นวงกลมซ้อนแกนร่วมคอยล์แบบเป็นชั้น

#### 4.2.4.2.1 การเตรียมการทดสอบ

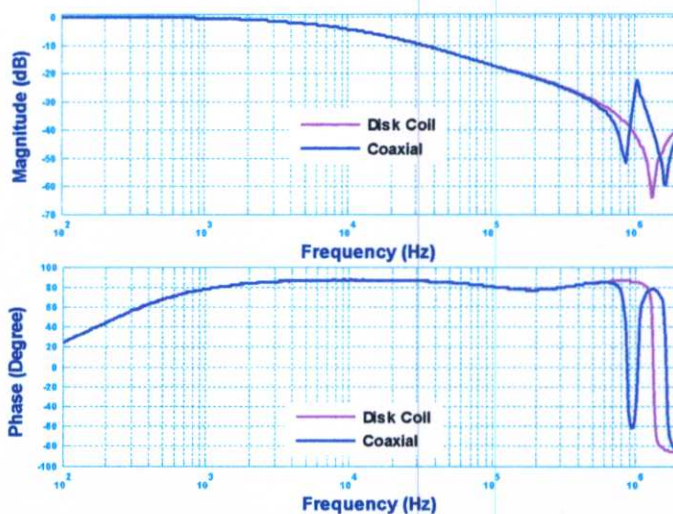
- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการวางแบบซ้อนแกนร่วม ดังรูปที่ 4.26
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

#### 4.2.4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อยंत्रการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัสดุทดสอบ (Test Object) เป็นการจำลองการวางแบบซ้อนแกนร่วม
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยน ความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

#### 4.2.4.2.3 ผลการทดสอบ

ผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่ ดังรูปที่ 4.27 จากรูปที่ 4.26 คอยล์เป็นวงกลมซ้อนแกนร่วมคอยล์แบบเป็นชั้น จะทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำระหว่าง 2 คอยล์



รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองของสองคอยล์ซ้อนแกนร่วม

#### 4.2.4.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่รูปที่ 4.27 จะทำให้เห็นว่าเมื่อนำคอยล์มาซ้อนแกนร่วมกันจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้มีกลุ่มค่าออกของรีโซแนนซ์ใหม่ที่ประมาณ 850 – 1000 kHz เนื่องจากรีโซแนนซ์ตอนแรกเกิดที่ความถี่ประมาณ 1400 kHz

#### 4.2.4.3 การจำลองการต่อร่วมกันระหว่างคอยล์ 2 แบบ

การจำลองผลอันเนื่องมาจากคอยล์ทั้ง 2 ต่อกัน แสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 คอยล์แบบเป็นวงกลมและคอยล์แบบเป็นชั้นต่อกัน

#### 4.2.4.3.1 การเตรียมการทดสอบ

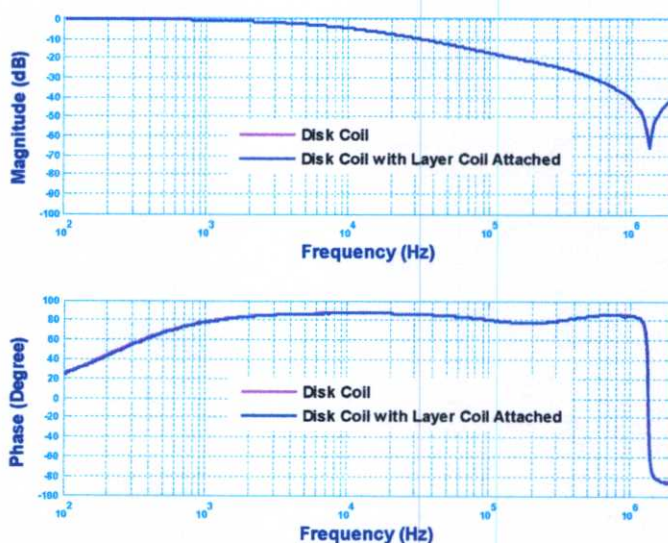
- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการวางไว้ใกล้กันไว้เรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 4.28
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไชควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

#### 4.2.4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อยวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัสดุทดสอบ (Test Object) เป็นคอยล์แบบเป็นวงกลมและคอยล์แบบเป็นชั้นต่อกัน
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

#### 4.2.4.3.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.29 ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



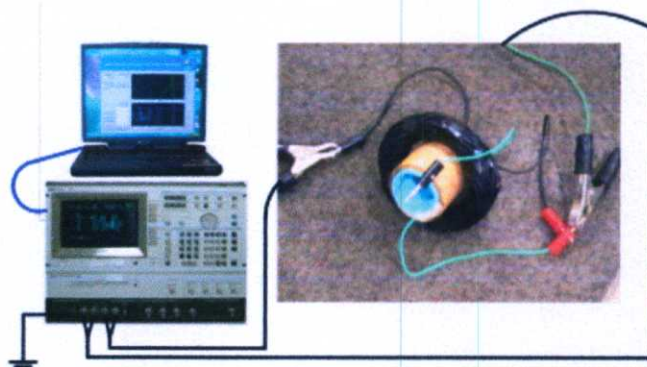
รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์แบบเป็นชั้นที่เชื่อมต่อกัน

#### 4.2.4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่แสดงในรูปที่ 4.29 เมื่อนำคอยล์มาต่อร่วมกัน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะคอยล์ที่นำมาต่อไม่มีผลต่อการเกี่ยวคัลล์ของฟลักซ์แม่เหล็ก

#### 4.2.4.4 การจำลองการต่อหม้อแปลงแบบอโต้ และการจำลองให้เกิดความผิดพลาด

ทำการสร้าง โมเดลหม้อแปลงแบบอโต้ และกำหนดให้ใช้แกนกลางร่วมกันและต่อกัน รูปที่ 4.30 แสดงการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้



รูปที่ 4.30 การต่อหม้อแปลงแบบอโต้

#### 4.2.4.4.1 การเตรียมการทดสอบ

- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการจำลองเป็นหม้อแปลงแบบอโต้ ดังรูปที่ 4.30
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

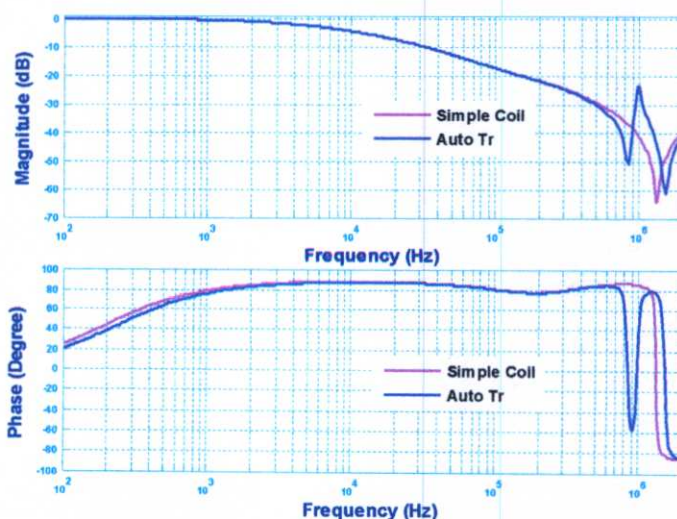
#### 4.2.4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อยวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัตถุทดสอบ (Test Object) เป็นการจำลองหม้อแปลงแบบอโต้
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบ โดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

- 6) ทำการจำลองเพิ่ม โดยการลัดวงจรด้านที่ปล่อยไว้
- 7) ทำการทดสอบตามหัวข้อที่ 3 – 5 อีกครั้ง
- 8) ทำการจำลองให้เกิดการขยับของคอยล์แบบคอยล์เป็นวงกลม
- 9) ทำการทดสอบตามหัวข้อที่ 3 – 5 อีกครั้ง

#### 4.2.4.4.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของการจำลองเป็นหม้อแปลงแบบอโต้ แสดงดังรูปที่ 4.31

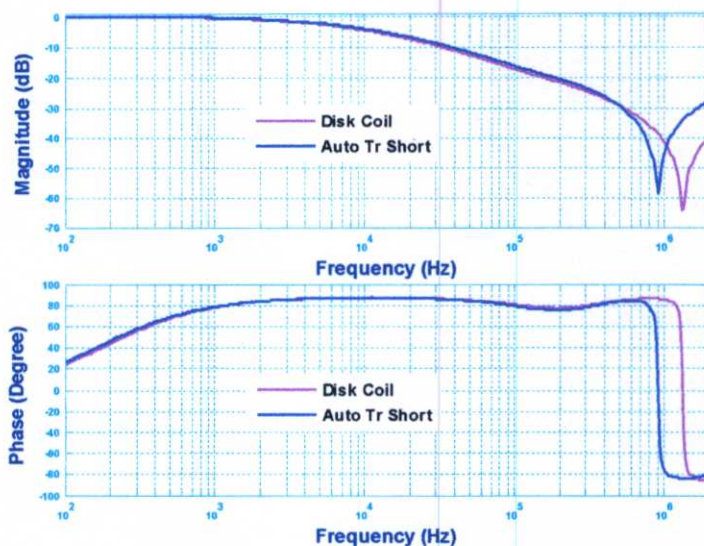


รูปที่ 4.31 ผลตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงแบบอโต้ได้ง่าย

ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของการจำลองเป็นหม้อแปลงแบบอโต้ทำการลัดวงจรที่คอยล์แบบเป็นชั้น ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ก็จะเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังรูปที่ 4.32 และ 4.33



รูปที่ 4.32 หม้อแปลงแบบอโต้กรณีเกิดการลัดวงจร

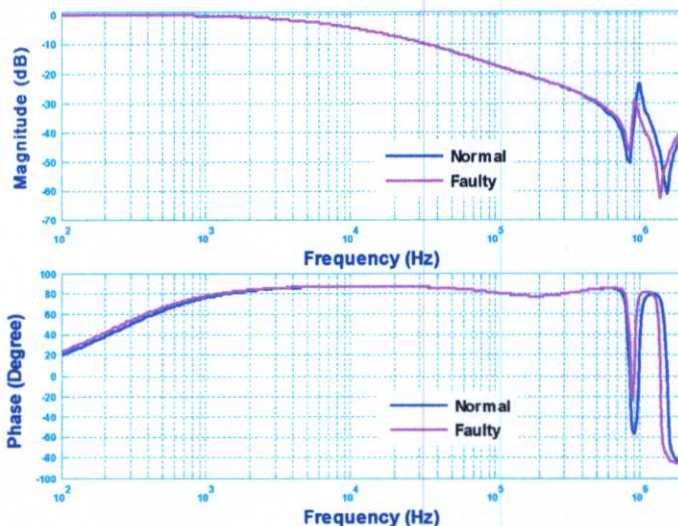


รูปที่ 4.33 ผลตอบสนองของหม้อแปลงแบบอโต้ได้กรณีเกิดการลัดวงจร

ผลตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้ กรณีขั้วให้แบบคอล์ยเป็นวงกลม  
เลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม แสดงดังรูปที่ 4.34 และ 4.35



รูปที่ 4.34 รูปแบบความเสียหายของหม้อแปลงแบบอโต้ที่เกิดจากการขั้วของคอล์ยแบบคอล์ย  
เป็นวงกลม



รูปที่ 4.35 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับหม้อแปลงแบบอโต้ทรานส์ฟอร์มเมอร์เกิดความเสียหาย

#### 4.2.4.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

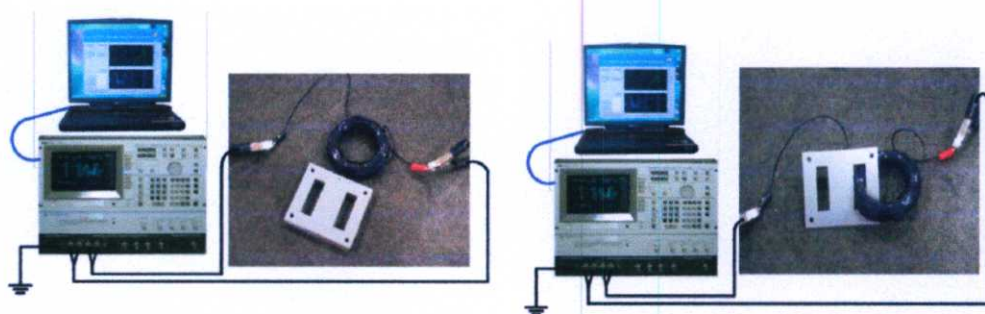
จากผลการทดสอบหม้อแปลงแบบอโต้ อย่างง่ายนั้นจากรูปที่ 4.31 จะทำให้ตำแหน่งการเกิดรีโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปคือเกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ต่ำกว่ากรณีหม้อแปลงอโต้แบบปกติ อันเนื่องมาจากฟลักซ์เกี่ยวคัลลิ่งได้เปลี่ยนแปลงไป

จากผลการลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้ รูปที่ 4.33 จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของคอยล์แบบเป็นชั้นลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอยล์แบบวงกลม และรีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้อันนี้จะหายไป

และจากผลการทดลองการจำลองให้เกิดความผิดพลาด แสดงในรูปที่ 4.35 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้ โดยการจำลองคอยล์มีการขยับ ทำให้ผลตอบสนองความถี่นั้นเปลี่ยนแปลงไปประมาณ 800 -1600 kHz เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคัลลิ่งระหว่างคอยล์ทั้งสอง อันเนื่องมาจากตำแหน่งของคอยล์แบบเป็นชั้นเปลี่ยนแปลงไป เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองทางความถี่

#### 4.2.4.5 การจำลองผลของขดลวดและแกนเหล็ก

อิทธิพลของแกนเหล็กมีแนวโน้มที่จะมีอิทธิพลต่อค่าการเหนี่ยวนำและจะเห็นว่าอิทธิพลที่ความถี่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเป็นสิ่งที่ยากที่จะเลียนแบบอิทธิพลของแผ่นลามิเนต ที่จะทำเป็นแกนสำหรับกรณีขดลวดขนาดใหญ่ ผลการศึกษาในหัวข้อนี้สามารถใช้การบอกลักษณะของอิทธิพลเกี่ยวกับแกนเหล็กโดยใช้คอยล์แบบวงกลม การจำลองจะใช้แกนเหล็กคัลลิ่งด้วยคอยล์เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.36



ก) การวางใกล้กัน

ข) การใช้คอยล์คล้องแกนเหล็ก

รูปที่ 4.36 แบบคอยล์เป็นวงกลมและแกนเหล็ก

#### 4.2.4.5.1 การเตรียมการทดสอบ

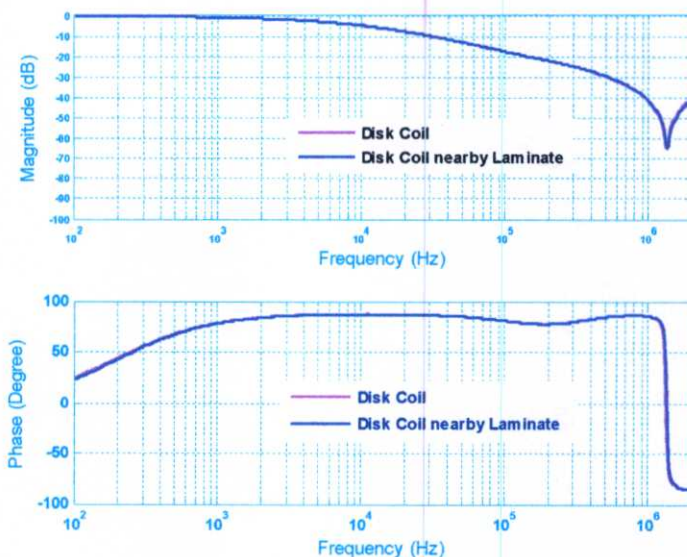
- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) และแกนเหล็กที่จะทำการจำลอง ดังรูปที่ 4.36
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

#### 4.2.4.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อบนวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัสดุทดสอบ (Test Object) เป็นคอยล์และแกนเหล็กวางไว้ใกล้ๆกัน
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล
- 6) ทำการคล้องแกนเหล็กที่เตรียมไว้ด้วยคอยล์แบบเป็นวงกลม
- 7) ทำการทดสอบตามหัวข้อที่ 3 – 5 อีกครั้ง

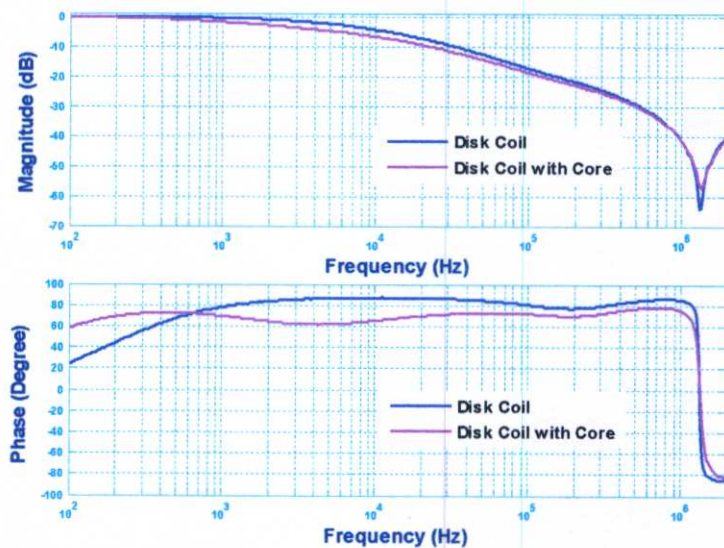
#### 4.2.4.5.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการวางแกนเหล็กไว้ใกล้ๆ กับคอยล์เป็นวงกลมดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์ที่มีแกนเหล็กวางอยู่ใกล้ๆ

และผลการวัดผลตอบสนองความถี่ของคอยล์แบบค้ำแกนเหล็ก เปรียบเทียบกับแบบไม่ค้ำแกนเหล็กดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 ผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่ในกรณีที่มีแกนเหล็กและ ไม่มีแกนเหล็ก

#### 4.2.4.5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดลอง ในรูปที่ 4.38 จะทำให้เห็นอิทธิพลของแกนเหล็กจะทำให้ค่าเหนี่ยวนำของขดลวดลดลงจึงทำให้ผลตอบสนองทางความถี่นั้นมีค่าอัตราขยายลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากฟลักซ์

แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องมีทิศทางเปลี่ยนแปลงไป โดยไปเกี่ยวข้องกับแกนเหล็กด้วยจึงทำให้ค่าความเหนี่ยวนำนั้นมีค่าลดลง

#### 4.2.4.6 การจำลองส่วนประกอบขดลวด และตัวเปลี่ยนแท็บ

ส่วนประกอบของคอยล์หรือขดลวด จะมีอิทธิพลต่อวงจรการวัด จากรูปที่ 4.39 จำลองให้เป็นส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออดิโอ



รูปที่ 4.39 จำลองการต่อหม้อแปลงแบบออดิโอต่อกับด้านๆหนึ่ง

ในรูปที่ 4.39 จำลองการต่อหม้อแปลงแบบออดิโอต่อกับด้านๆหนึ่ง และทำการสลับขั้วคอยล์เป็นวงกลม ผลการจำลองดังรูปที่ 4.40 ในขณะนี้การต่อได้เปลี่ยนแปลงไปที่คอยล์สี่เหลี่ยมแทน



รูปที่ 4.40 การสลับสายที่คอยล์แบบเป็นวงกลม

#### 4.2.4.6.1 การเตรียมการทดสอบ

- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการจำลองการต่อหม้อแปลงแบบออดิโอต่อกับด้านๆหนึ่ง ดังรูปที่ 4.39
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย

2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)

2.2) คอมพิวเตอร์

2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

#### 4.2.4.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1) ต่อยंत्रการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัตถุทดสอบ (Test Object) เป็นการจำลองการต่อหม้อแปลงแบบออดได้ต่อกับด้านๆหนึ่ง

2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

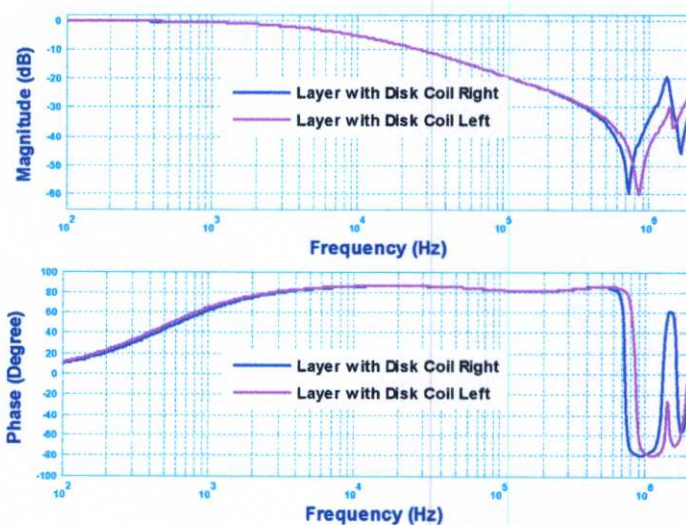
4) ทำการทดสอบอีกครั้ง

5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

6) ทำการสลับข้างอีกด้านของคอยล์เป็นวงกลมแล้วทำซ้ำตามข้อที่ 3 – 5 อีกครั้ง

#### 4.2.4.6.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.41 จะเห็นว่าเกิดความแตกต่างขึ้นจากการสลับข้างต่อแบบคอยล์เป็นวงกลม



รูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองความถี่ของการสลับข้างต่อคอยล์เป็นวงกลม

#### 4.2.4.7.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ ในรูปที่ 4.41 จะเห็นว่าขดลวดแบบเป็นชั้นถูกทดสอบด้วยการต่อสองแบบที่แตกต่างกันจากคอยล์แบบเป็นวงกลม แสดงให้เห็นถึงความ

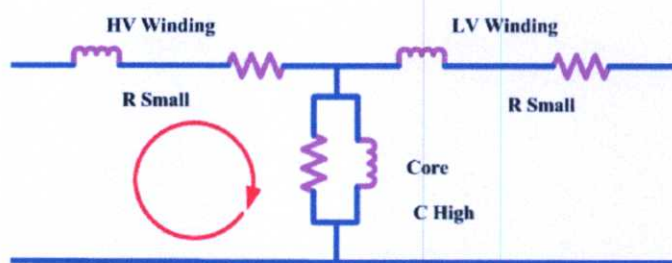
แตกต่างกันอย่างชัดเจนในกรณีนี้ ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนของการเกิตรีโซแนนซ์ไปที่ความถี่ที่สูงกว่า ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากเส้นทางการไหลของฟลักเปลี่ยนแปลงไป

#### 4.2.4.7 การจำลองการทดสอบการลัดวงจรและการเปิดวงจร

การลัดวงจรนั้นเป้าหมายของการทดสอบการลัดวงจรของการวัดผลตอบสนองทางความถี่ คือ เพื่อให้ทราบถึงผลของขดลวดเพียงอย่างเดียว โดยปราศจากอิทธิพลของแกนเหล็ก

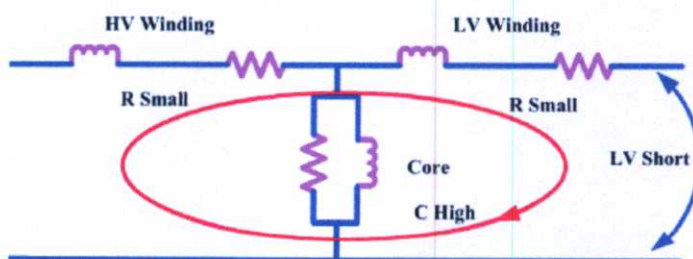
การทดสอบการลัดวงจรการวัดผลตอบสนองทางความถี่หม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีที่ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส จะนิยมทดสอบด้านแรงสูง เพราะสามารถป้อนแรงดันได้สูงๆ แต่กระแสที่ป้อนด้านแรงสูงขณะทำการทดสอบจะต่ำกว่า

การทดสอบด้านขดลวด HV โดยการลัดวงจรด้าน LV ทั้ง 3 เฟสต้องทำให้เหมือนกันทั้งหมด ในหัวข้อนี้ได้ทำการจำลอง โมเดลหม้อแปลงอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 4.42 ทำการจำลองทดสอบด้าน HV วัดผลทางด้าน LV



รูปที่ 4.42 แบบจำลองอย่างง่ายของหม้อแปลงไฟฟ้า

การจำลองการลัดวงจรด้าน LV ค่าอิมพีแดนซ์ของแกนเหล็กจะไม่ถูกนำมาพิจารณาแสดงในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 การลัดวงจรแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.42 และ 4.43 ทำการจำลองให้เหมือนกับรูปที่ 4.42 และ 4.43 โดยทำเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้ดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้ เตรียมการวัดที่คอยล์เป็นวงกลม

#### 4.2.4.7.1 การเตรียมการทดสอบ

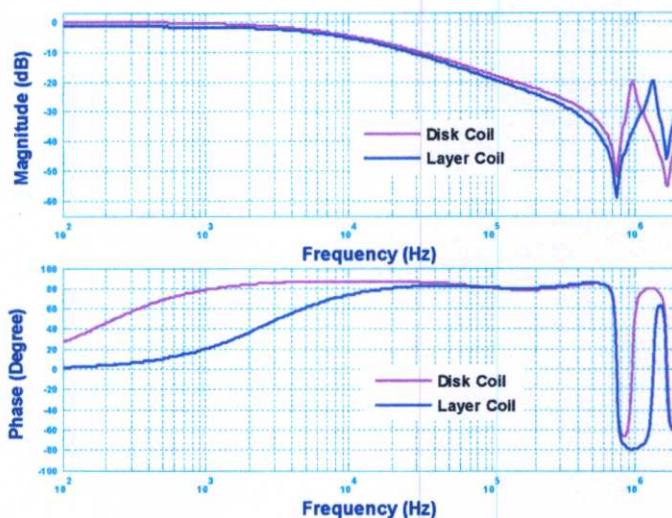
- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้ดังรูปที่ 4.44
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ

#### 4.2.4.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อบังคับการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัสดุทดสอบ (Test Object) เป็นการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และ ปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล
- 6) ทำการจำลองแบบลัดวงจร
- 7) ทำการทดสอบตามหัวข้อที่ 3 – 5 อีกครั้ง

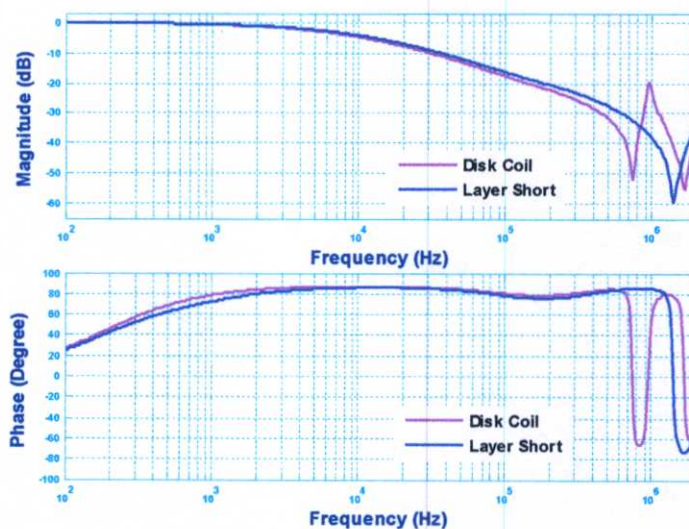
#### 4.2.4.7.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบการเปิดวงจร แสดงผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่จากคอยล์เป็นวงกลม และแบบเป็นชั้นดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 การวัดผลตอบสนองทางความถี่การเปิดวงจรของคอยล์เป็นวงกลมกับแบบเป็นชั้น

การทดสอบการลัดวงจรที่คอยล์แบบเป็นชั้น จะได้ผลตอบสนองที่แตกต่างจากตอนที่ยังไม่ได้ทำการลัดวงจร แสดงผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ผลตอบสนองการเปิดวงจรและการลัดวงจรของคอยล์แบบเป็นวงกลม

#### 4.2.4.7.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.45 และ 4.46 การลัดวงจรที่คอยล์แบบเป็นชั้น จะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองความถี่ของคอยล์เป็นวงกลม คือ ริโซแนนซ์ที่เกิดที่ประมาณ 750 kHz หายไปและทำให้เกิดริโซแนนซ์ที่ความถี่ที่สูงกว่าคือที่ประมาณ 1500 kHz ทั้งนี้เป็นผลมาจากทิศทางเดินของฟลักเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้ผลตอบสนองความถี่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

#### 4.2.4.8 การจำลองการลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน

การลัดวงจรอาจจะทำ 1 รอบหรือมากกว่า บนขดลวด จากรูปได้ทำการลัดวงจรที่รอบที่ 58 กับ 62 โดยการใช้สายต่อลัดวงจร จะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นที่ขดลวด ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 การลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้

##### 4.2.4.8.1 การเตรียมการทดสอบ

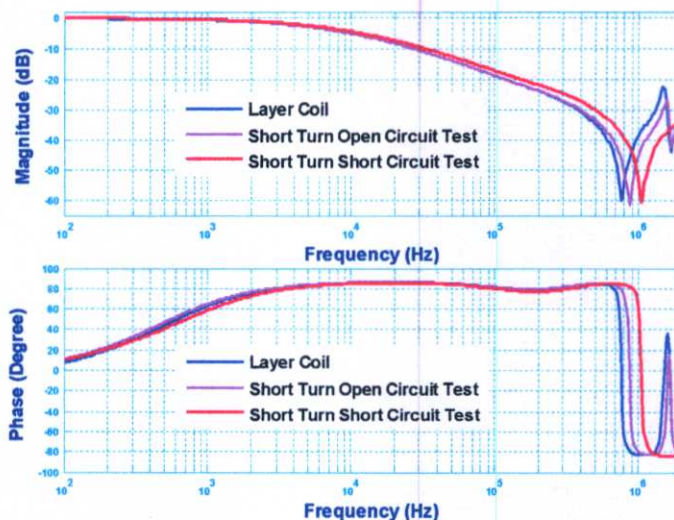
- 1) เตรียมขดลวด (คอยล์) ที่ได้ทำการลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน ดังรูปที่ 4.47
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย
  - 2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)
  - 2.2) คอมพิวเตอร์
  - 2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ,

##### 4.2.4.8.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 และเปลี่ยนวัสดุทดสอบ (Test Object) เป็นคอยล์ ที่ทำการลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

##### 4.2.4.8.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.48



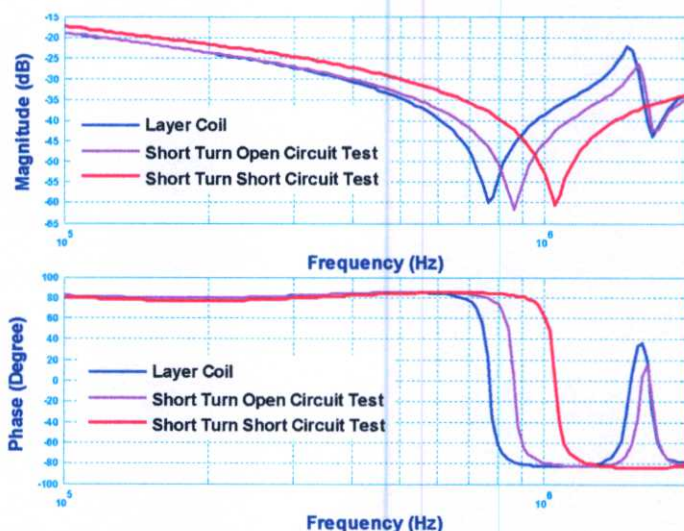
รูปที่ 4.48 ผลตอบสนองความถี่ของคอยล์แบบเป็นชั้นในสภาวะปกติ เทียบกับกรณีเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบที่พัน

จากผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่ รูปที่ 4.48 เส้นสีน้ำเงินคือแบบที่เป็นชั้นปกติ เส้นสีชมพูคือแบบที่เป็นชั้นแล้วเกิดการลัดวงจรที่แบบคอยล์เป็นวงกลม โดยทำการทดสอบ Open Circuit Test ดังรูปที่ 4.49 และเส้นสีแดงคือแบบเป็นชั้นแล้วเกิดการลัดวงจรที่แบบคอยล์เป็นวงกลม โดยทำการทดสอบ Short Circuit Test

การจำลองแบบนี้มีจุดมุ่งหมายคือจำลองให้เห็นถึงการลัดวงจรที่ส่วนเล็กๆ ของขดลวด เปรียบเทียบกับการลัดวงจรระหว่างรอบที่ติดกัน ในสภาพความเป็นจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับ โครงสร้าง (แบบคอยล์เป็นวงกลม, แบบเป็นชั้น) และตำแหน่งของการลัดวงจร

#### 4.2.4.8.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากรูปที่ 4.48 นำมาทำการพิจารณาในช่วงความถี่สูงดังรูปที่ 4.49 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลที่ทำให้เกิดที่รีโซแนนซ์ ผลตอบสนองแบบเป็นชั้นคือเส้นสีน้ำเงิน และเมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบที่พันจะทำการเลื่อนไปที่ความถี่ที่สูงกว่าแสดงดังเส้นสีชมพู เมื่อทำการลัดวงจรแบบช็อตเซอร์กิตเตสของแบบคอยล์เป็นวงกลม ผลตอบสนองก็จะเลื่อนไปที่ความถี่สูงกว่าอีกครั้ง ในเส้นสีแดง คือจะเกิดรีโซแนนซ์ขยับไปที่ความถี่ที่สูงกว่าเดิมเป็นผลมาจากฟลักแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ค่าการเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงและทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่สูงขึ้น



รูปที่ 4.49 ผลตอบสนองแบบเป็นชั้นเปรียบเทียบในกรณีลัดวงจรระหว่างรอบที่พื้นของแบบคอยล์เป็น

วงกลม open circuit test และลัดวงจรระหว่างรอบที่พื้นของแบบคอยล์เป็นวงกลม short circuit test

อิทธิพลของการลัดวงจรระหว่างรอบส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองดังนี้ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของค่าความเหนี่ยวนำก็ลดลง ทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ลดลง ค่าอิมพีแดนซ์ของคอยล์ลดลง ทำให้การเกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่ประมาณ 750 kHz เลื่อนไปที่ความถี่ที่สูงกว่า ซึ่งเมื่อมองดูในสภาวะความเป็นจริงหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่ออยู่ภายใต้การลัดวงจรระหว่างรอบที่พื้น จะให้กำเนิดรูปของการไหลของฟลักซ์รอบๆแกนเหล็ก ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าการลัดวงจรนั้นทำให้รูปการไหลของฟลักซ์เปลี่ยนแปลงไป

#### 4.2.5 ส่วนที่สำคัญ

จากการที่ดำเนินการทดสอบมาข้างต้นและได้แสดงข้อมูลในรูป เชนเส้นสเกล และ log สเกล การนำเสนอข้อมูลในรูป log สเกลจะสามารถทำการดูด้วยตาเปล่าได้ง่ายกว่าการดูจากการนำเสนอในรูป เชนเส้นสเกล

ผลตอบสนองความถี่ที่ทำการทดลองจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองได้จากการที่นำคอยล์ที่แตกต่างกันมาต่อร่วมกัน

ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดที่นำเสนอในรูปการ plot อัตราขยาย dB คือรีโซแนนซ์ที่เกิดภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ในการเกิดรีโซแนนซ์นั้นจะต้องขึ้นอยู่กับรูปทรง และ โครงสร้างของคอยล์ที่ทำขึ้นซึ่งจะมีผลทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างกันและขนาดต่างกัน

สายตัวนำสำหรับทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ ถูกออกแบบมาเพื่อลดสัญญาณรบกวน และป้องกันความชื้นของสนามแม่เหล็ก

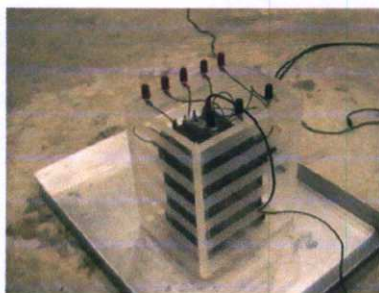
ค่าของอิมพีแดนซ์แฝง จะส่งผลกระทบต่อสายเคเบิลที่ใช้เคเบิลในการวัด หรือ ที่ด้านต่อกราวด์ก็มีผลของอิมพีแดนซ์แฝง เช่นเดียวกัน

อิทธิพลของแกนเหล็กจะส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองความถี่ที่ความถี่ต่ำ

การทดสอบการลัดวงจรเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด และอิมพีแดนซ์ของแกนเหล็กอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน จะถูกใช้สำหรับการเปรียบเทียบกับหม้อแปลงแบบเฟสต่อเฟส การลัดวงจรระหว่างรอบจะทำให้ผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่อยู่ในช่วงระหว่างการทดสอบแบบ Open Circuit Test และการ Short Circuit Test

### 4.3 ผลของน้ำมัน

การจำลองนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว ขนาดพิกัด 220 V/0-130 V 50 Hz การจำลองโดยการนำ ก่อ่งที่ได้จำลองในบทที่ 3 มาทำการทดลองโดยการนำสายมาต่อเข้ากับจุดต่อของหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วติดตั้งหม้อแปลงลงในก่อกแบบไว้ดังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการทดสอบผลของน้ำมัน

ในการทดสอบจะต้องต่อกราวด์เข้ากับตัวหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย เพื่อจำลองสภาพความเป็นจริง เพราะในสภาพความเป็นจริงหม้อแปลงไฟฟ้านั้น ตัวแกนเหล็กจะต้องต่อลงกราวด์ด้วย

#### 4.3.1 การเตรียมการทดสอบ

การทดสอบได้จัดทำขึ้นที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีลำดับขั้นตอนในการเตรียมการทดสอบดังนี้

- 1) เตรียมหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะทำการทดสอบผลของน้ำมัน และเตรียมน้ำมันประมาณ 8 ลิตร พร้อมก่อกแบบอะคริลิก
- 2) ต่อสายไฟเข้ากับจุดต่อของหม้อแปลงเพื่อเตรียมไว้สำหรับการทดสอบ พร้อมกับต่อสายกราวด์เข้ากับแกนเหล็กของตัวหม้อแปลง
- 3) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย

3.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)

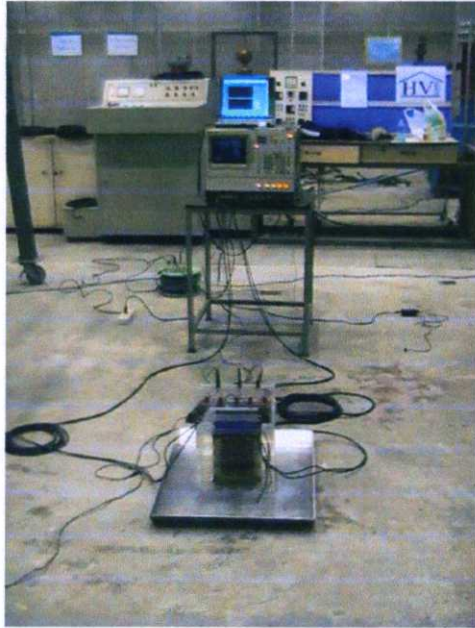
3.2) คอมพิวเตอร์

3.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ, ประแจ, หางปลา, คีมย้ำสายไฟ

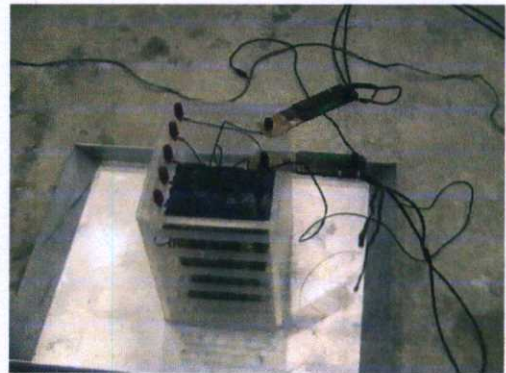
3.4) ถาดรองกันเปื้อน

#### 4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1) ต่อดวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.51



ก) วงจรการทดสอบ



ข) ลักษณะการต่อทดสอบ

#### รูปที่ 4.51 วงจรการทดสอบและลักษณะการต่อเพื่อวัดผลตอบสนองทางความถี่

2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

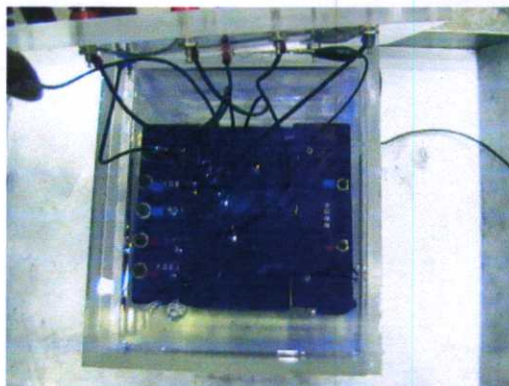
3) จำลองสภาวะ Open Circuit Test และ Short Circuit Test ด้าน HV โดยในตอนแรกนี้ไม่ได้ใส่น้ำมันเพื่อทดสอบ

4) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

5) ทำการทดสอบอีกครั้ง

6) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

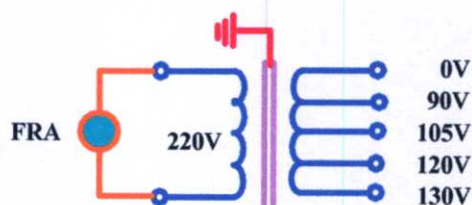
7) ทำการทดสอบเหมือนกับข้อที่ 3 แต่คราวนี้ใส่น้ำมันลงไป ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้ น้ำมันแทรกซึมไปทุกๆ ส่วนของฉนวน ขดลวด และแกนเหล็ก และทำการทดสอบตามข้อที่ 4 – 6



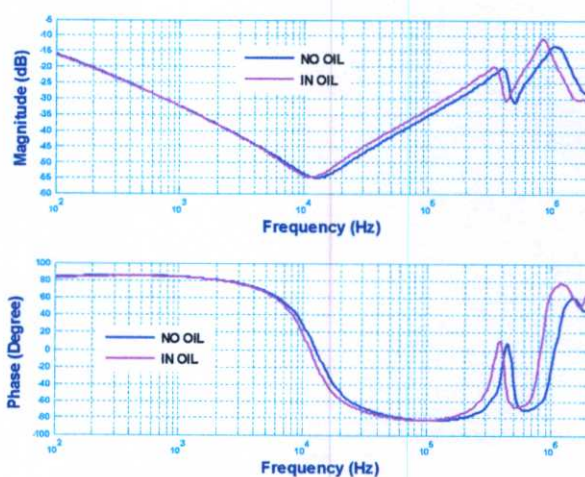
รูปที่ 4.52 การใส่น้ำมันเพื่อทดสอบคุณภาพตอบสนองทางความถี่

#### 4.3.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ Open Circuit Test ด้าน HV ดังรูปที่ 4.54 ซึ่งมีไดอะแกรมการทดสอบ FRA ดังรูปที่ 4.53

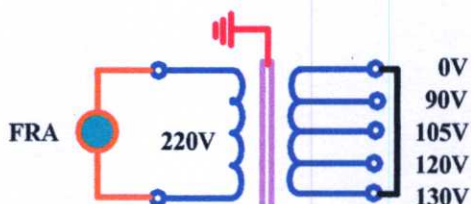


รูปที่ 4.53 ไดอะแกรมการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่

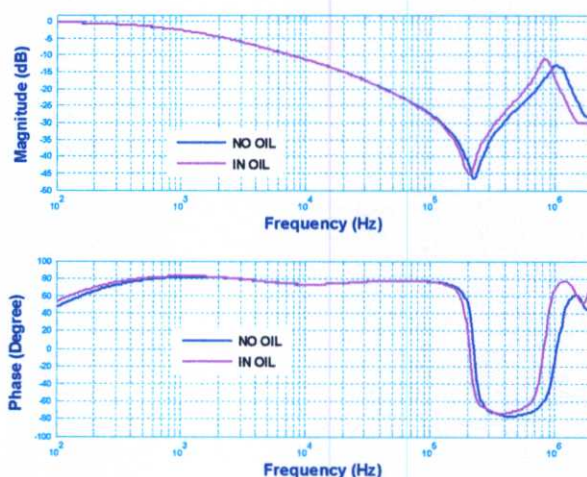


รูปที่ 4.54 ผลการวัดตอบสนองความถี่ Open Circuit Test ด้าน HV กรณีหม้อแปลงมีน้ำมัน เทียบกับไม่มีน้ำมัน

ผลการทดสอบ Short Circuit Test ด้าน HV ดังรูปที่ 4.56 ซึ่งมีไดอะแกรมการทดสอบ FRA ดังรูปที่ 4.55



รูปที่ 4.55 ไดอะแกรมการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 4.56 ผลการวัดตอบสนองความถี่ Short Circuit Test ด้าน HV กรณีหม้อแปลงมีน้ำมัน เทียบกับไม่มีน้ำมัน

#### 4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.54 และ 4.56 พบว่ากรณีที่มีน้ำมันและไม่มีน้ำมัน ผลตอบสนองความถี่จะมีหน้าตาใกล้เคียงกัน กรณีแบบมีน้ำมันจะเกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าแบบไม่มีน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันมีคุณสมบัติค่าเพอร์มิตติวิตี้อยู่ค่าหนึ่งซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความถี่ตัวเก็บประจุอยู่ จึงทำให้ค่าการเก็บประจุภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ผลตอบสนองความถี่จึงเลื่อนไปเกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่า และในน้ำมันมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มากกว่าอากาศ จึงทำให้ค่าการเก็บประจุในหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงเป็นผลให้ผลตอบสนองความถี่เปลี่ยนแปลงไป

## 4.4 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

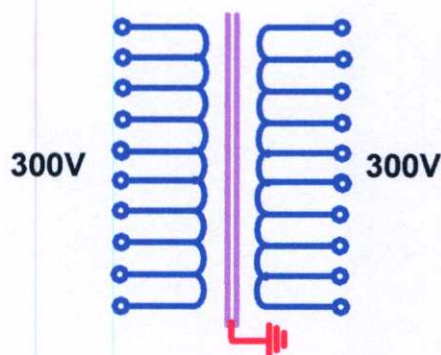
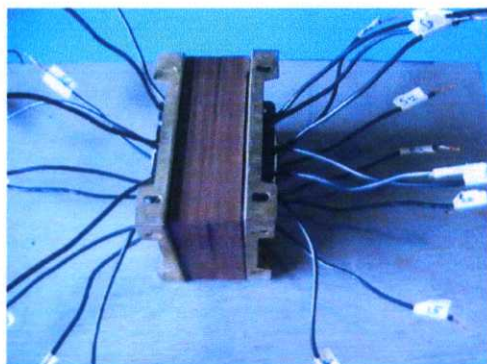
ในหัวข้อที่ 4.4 นี้ได้จำลองโดยการพันหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสขึ้นเอง ขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V 50 Hz และหม้อแปลงขนาดพิกัด 5 kVA 220/5000 V 50 Hz

### 4.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V 50 Hz

#### 4.4.1.1 การเตรียมการทดสอบ

การเตรียมการทดสอบได้ทำการเตรียมการทดสอบที่ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งมีลำดับขั้นตอนในการเตรียมการทดสอบดังนี้

1) เตรียมการพันหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V 50 Hz โดยได้ทำการต่อเป็นแท่งปอกออกมาฝั่งละ 10 แท่ง ทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ



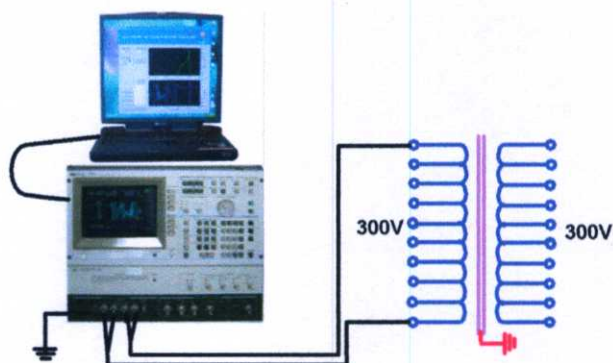
ก. หม้อแปลงไฟฟ้าที่พันเพื่อทดสอบ ข. ไคอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

### รูปที่ 4.57 หม้อแปลง 1 เฟสขนาดพิกัด 500 VA 300/300 V 50 Hz

2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย ไขควง คีมตัดสายไฟ กระดาษทราย

#### 4.4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.58 และ 4.59
- 2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz
- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล
- 6) ทำการลัดวงจรตามแท่งที่พันไว้ และทำการทดสอบตามข้อที่ 3 – 5 จนครบทั้ง 10 แท่ง นำผลที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกัน



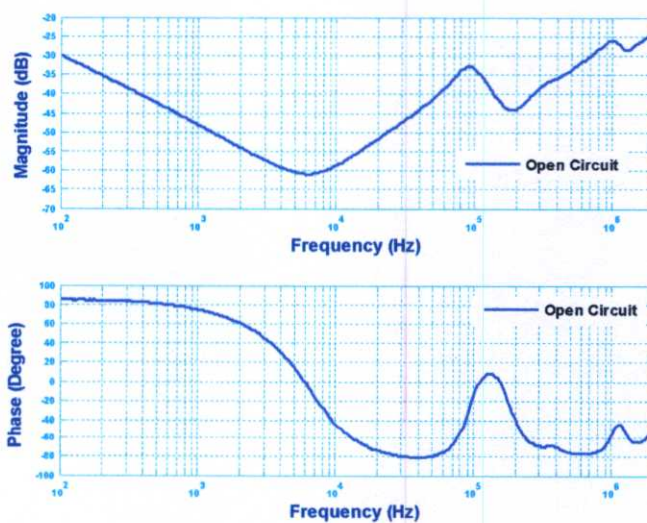
รูปที่ 4.58 วงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.59 วงจรการทดสอบจริง

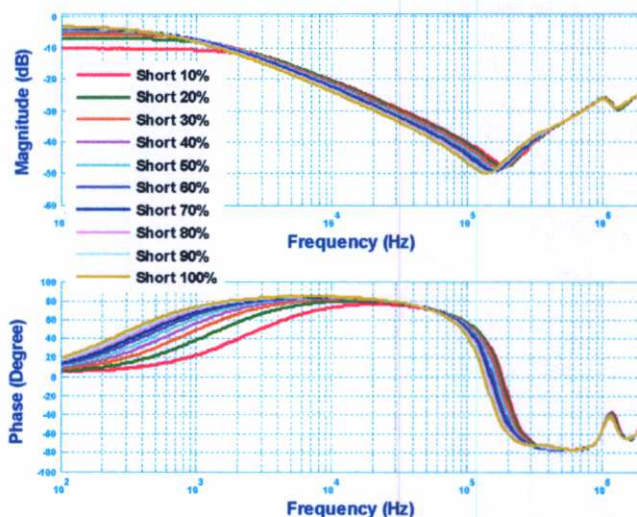
#### 4.4.1.3 ผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากการทดสอบการ Open Circuit Test จะแสดงดังรูปที่ 4.60



รูปที่ 4.60 ผลการทดสอบ Open Circuit Test

ผลที่ได้จากการทดสอบ Short Circuit Test ดังรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.61 ผลการทดสอบ ลัดวงจรตามแท็บต่างๆ

4.4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการจำลองการลัดวงจรในแต่ละแท็บจะพบว่า การลัดวงจรนั้นจะได้ผลของขดลวดเพียงอย่างเดียวไม่มีผลของแกนเหล็กรวมอยู่ด้วย การลัดวงจรในช่วงเริ่มต้นจะทำให้ได้ค่าของอิมพีแดนซ์ขดลวดออกมาน้อย ผลตอบสนองทางความถี่จึงมีค่าแอมพลิจูดต่ำ เมื่อทำการลัดวงจรแบบ 100 % จะ ได้ผลของขดลวดทั้งหมดที่ลัดวงจร จึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดมาในรูปอัตราขยายมีค่าสูง และสังเกตได้ว่าการเกิดรีโซแนนซ์ของขดลวดนั้นจะเกิดในช่วงความถี่สูงขึ้น

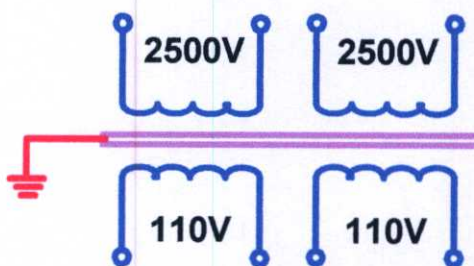
4.4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาดพิกัด 5 kVA 220/5000 V 50 Hz

4.4.2.1 การเตรียมการทดสอบ

การเตรียมการทดสอบได้ทำการเตรียมการทดสอบที่ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งมีลำดับขั้นตอนในการเตรียมการทดสอบดังนี้  
เตรียมหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 5 kVA 220/5000 V 50 Hz ดังรูปที่ 4.64 ก และ ข



ก. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบ

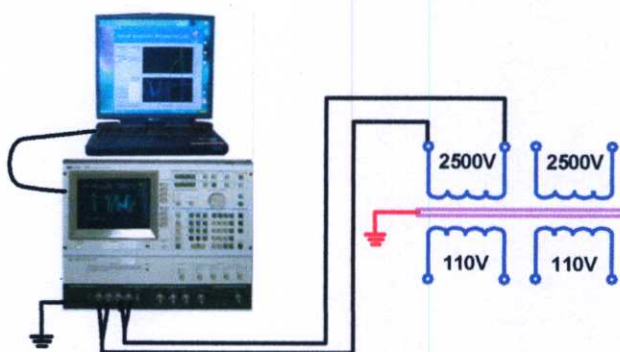


ข. ไคอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.62 หม้อแปลงไฟฟ้าและไคอะแกรมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 4.4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1) ตัวอย่างการทดสอบตามรูปที่ 4.63 และ 4.64 ซึ่งในการทดสอบนี้จะจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าไว้ 9 กรณีศึกษาด้วยกันคือ หม้อแปลงในสภาพปกติ Open Circuit Test, หม้อแปลงในสภาพปกติ Short Circuit Test, การลัดวงจรที่ต้นคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Top Winding), การลัดวงจรที่กลางคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Middle Winding), การลัดวงจรที่ปลายคอยล์ของขดลวด (Short Circuit Bottom Winding), การจำลองแกนของหม้อแปลงเกิดการขยับตัว (Shorted Laminates), การจำลองขดลวดหม้อแปลงเกิดการคลายตัว (Loosened), การจำลองขดลวดหม้อแปลงยุบตัวในแนวแกนที่พัน (Buckling), การจำลองขดลวดหม้อแปลงโป่งตัวออกในแนวแกนที่พัน (Buckling)



รูปที่ 4.63 วงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.64 วงจรการทดสอบจริง

2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz ทำการทดสอบกรณีแรกและกรณีที่ 2 คือหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Open Circuit Test และ Short Circuit Test

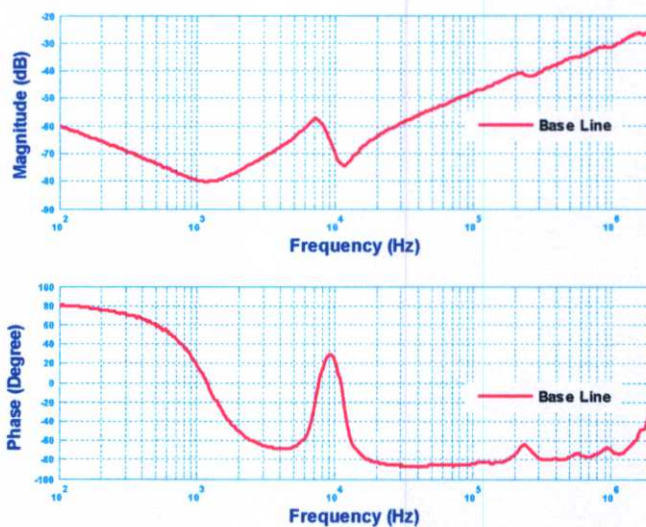
3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

- 4) ทำการทดสอบอีกครั้ง
- 5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล
- 6) ทำการจำลองใน 7 กรณีศึกษาที่เหลือนบันทึกข้อมูล

#### 4.4.2.3 ผลการทดสอบ

- 1) ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่การจำลองหม้อแปลงในสภาพปกติ

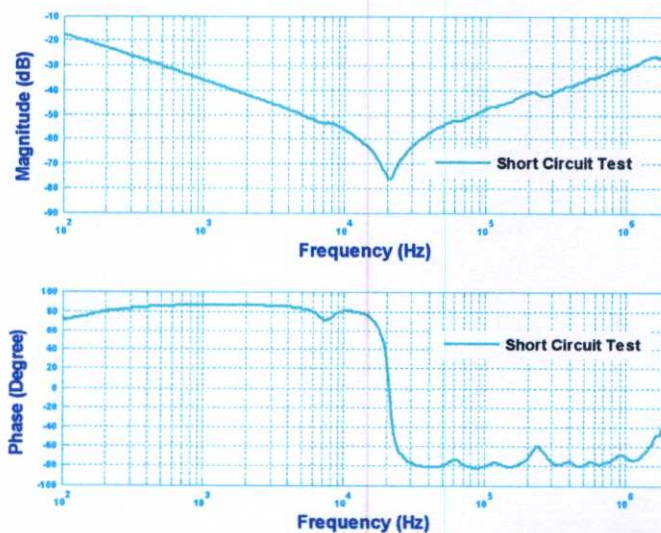
Open Circuit Test ดังรูปที่ 4.65



รูปที่ 4.65 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Open Circuit Test

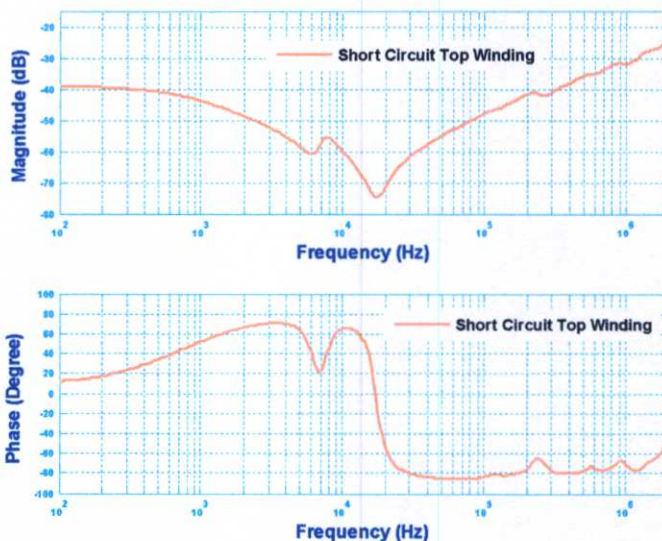
- 2) ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่การจำลองหม้อแปลงในสภาวะปกติ

Short Circuit Test ดังรูปที่ 4.66



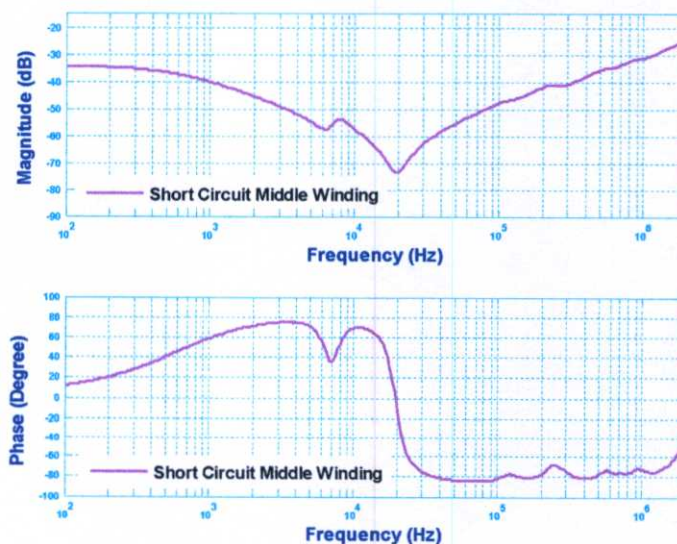
รูปที่ 4.66 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ Short Circuit Test

3) ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่การลัดวงจรที่ต้นคอยล์ของขดลวด ดังรูป  
รูปที่ 4.67



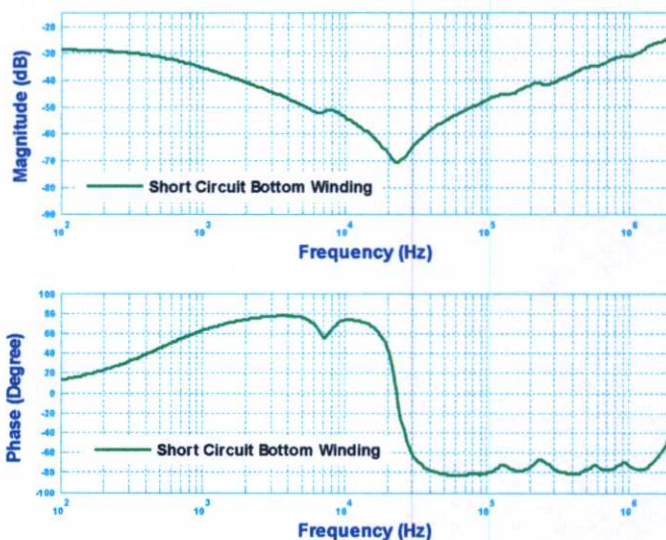
รูปที่ 4.67 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองการลัดวงจรที่ต้น  
คอยล์ของขดลวด

4) ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่การลัดวงจรที่กลางคอยล์ของขดลวดดัง  
รูปที่ 4.68



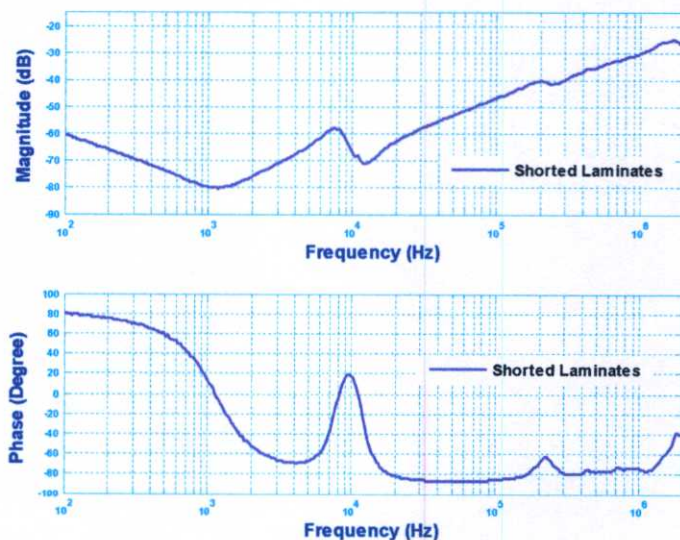
รูปที่ 4.68 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองการลัดวงจรที่กลาง  
คอยล์ของขดลวด

5) ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่การลัดวงจรที่ปลายคอยล์ของขดลวดคัง  
รูปที่ 4.69



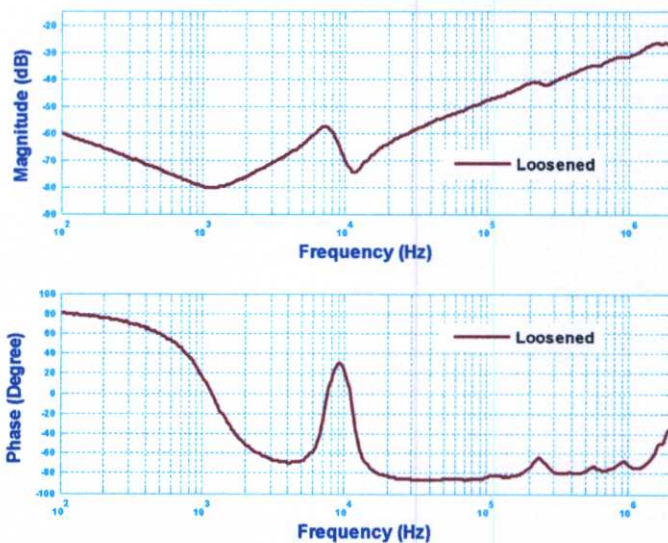
รูปที่ 4.69 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองการลัดวงจรที่ปลาย  
คอยล์ของขดลวด

6) ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่การจำลองแกนของหม้อแปลงเกิดการ  
ขยับตัว ดังรูปที่ 4.70



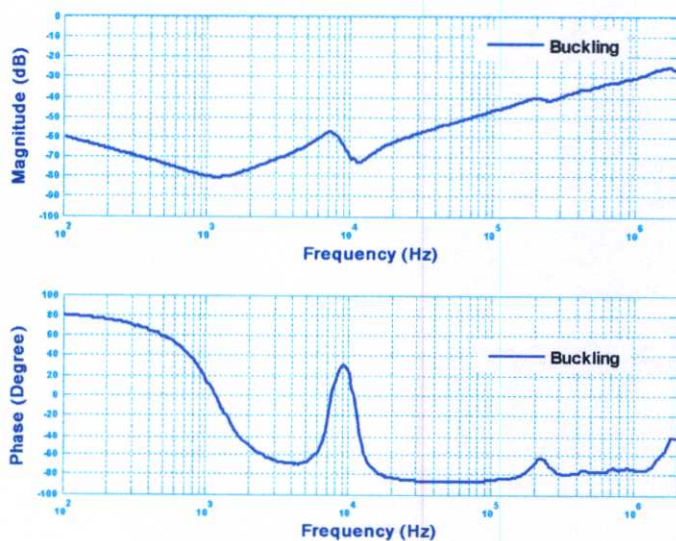
รูปที่ 4.70 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองแกนของหม้อแปลง  
เกิดการขยับตัว

7) ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่การจำลองขดลวดหม้อแปลงเกิดการ คลายตัว ดังรูปที่ 4.71



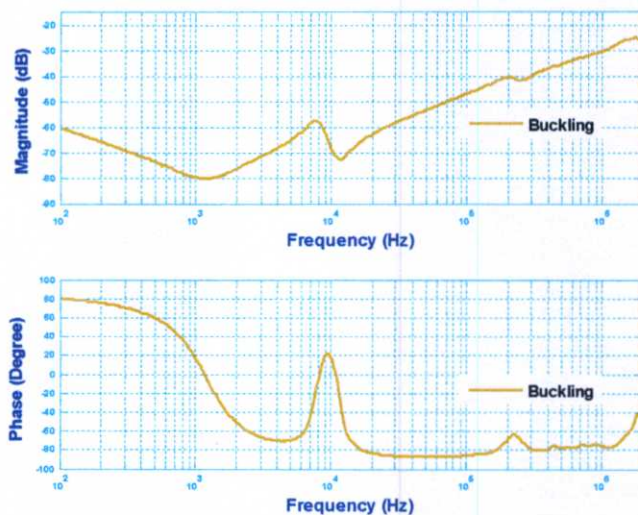
รูปที่ 4.71 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองขดลวดหม้อแปลงเกิดการ คลายตัว

8) ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่การจำลองขดลวดหม้อแปลงยุบตัวใน แนวแกนที่พัน ดังรูปที่ 4.72



รูปที่ 4.72 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองขดลวดหม้อแปลง ยุบตัวในแนวแกนที่พัน

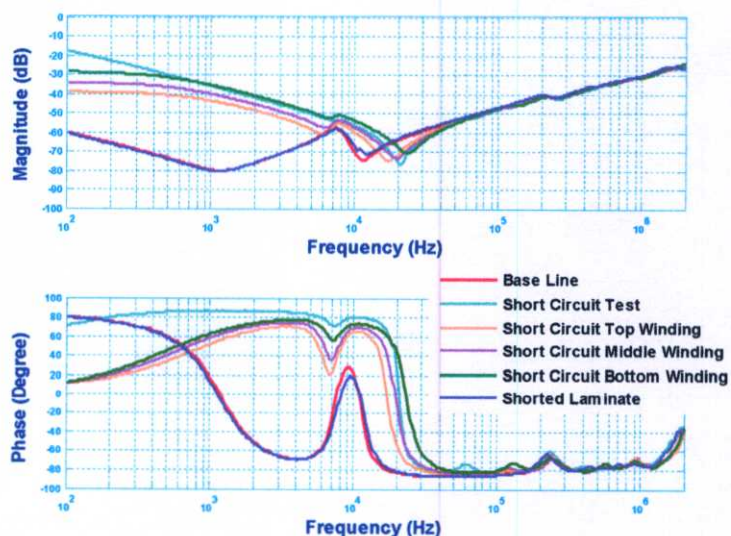
9) ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่การจำลองขดลวดหม้อแปลงโป่งตัวออก  
ในแนวแกนที่พัน (Buckling) ดังรูปที่ 4.73



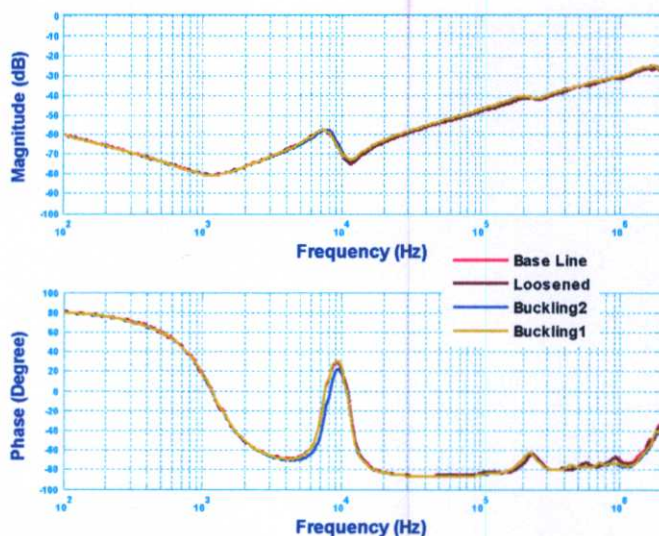
รูปที่ 4.73 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองขดลวดหม้อแปลงโป่งตัวออกในแนวแกนที่พัน

#### 4.4.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบทั้ง 9 กรณี นำมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบและหาค่าสหสัมพันธ์เพื่อดูความแตกต่างและหาค่าเบี่ยงเบนสเป็คตรัม โดยให้การวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงในสภาวะปกติ Open Circuit Test เป็นลักษณะเฉพาะที่ปกติ (Base Line) ไม่เกิดความผิดพร่องเปรียบเทียบกับกรณีที่เกิดความผิดพร่องแสดงดังรูปที่ 4.74 และ 4.75



รูปที่ 4.74 ผลตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองความผิดพร่องให้เกิดการลัดวงจร



รูปที่ 4.75 ผลตอบสนองความถี่หรือแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากการจำลองความผิดพร่องให้เกิดขึ้นที่ขดลวด

การหาค่าสหสัมพันธ์และส่วนเบี่ยงเบนสเปคตรัมของกรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 3, 4, 5, 6, 7, 8, และ 9 แสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 3

ย่านความถี่	ตัวชี้วัดทางสถิติกรณีศึกษาที่ 3	
	ค่าสหสัมพันธ์	ค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัม
100 Hz – 1 kHz	0.9356	0.7287
1 kHz – 10 kHz	-0.9231	0.4933
10 kHz – 100 kHz	0.8188	0.1914
100 kHz – 1 MHz	0.9997	0.0459
1 MHz – 2 MHz	0.9044	0.1495

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 4

ย่านความถี่	ตัวชี้วัดทางสถิติกรณีศึกษาที่ 4	
	ค่าสหสัมพันธ์	ค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัม
100 Hz – 1 kHz	0.9441	0.7983
1 kHz – 10 kHz	-0.9437	0.5557
10 kHz – 100 kHz	0.6978	0.2213
100 kHz – 1 MHz	0.9974	0.0786
1 MHz – 2 MHz	0.9272	0.1380

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 5

ย่านความถี่	ตัวชี้วัดทางสถิติกรณีศึกษาที่ 5	
	ค่าสหสัมพันธ์	ค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัม
100 Hz – 1 kHz	0.9541	0.8808
1 kHz – 10 kHz	-0.9480	0.6393
10 kHz – 100 kHz	0.4840	0.2391
100 kHz – 1 MHz	0.9972	0.0775
1 MHz – 2 MHz	0.9316	0.1355

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 6

ย่านความถี่	ตัวชี้วัดทางสถิติกรณีศึกษาที่ 6	
	ค่าสหสัมพันธ์	ค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัม
100 Hz – 1 kHz	0.9999	0.0813
1 kHz – 10 kHz	0.9934	0.0636
10 kHz – 100 kHz	0.9952	0.1340
100 kHz – 1 MHz	0.9973	0.1434
1 MHz – 2 MHz	0.9809	0.2006

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 7

ย่านความถี่	ตัวชี้วัดทางสถิติกรณีศึกษาที่ 7	
	ค่าสหสัมพันธ์	ค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัม
100 Hz – 1 kHz	0.9999	0.0428
1 kHz – 10 kHz	1.0000	0.0234
10 kHz – 100 kHz	1.0000	0.0179
100 kHz – 1 MHz	1.0000	0.0257
1 MHz – 2 MHz	0.9991	0.0596

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 8

ย่านความถี่	ตัวชี้วัดทางสถิติกรณีศึกษาที่ 8	
	ค่าสหสัมพันธ์	ค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัม
100 Hz – 1 kHz	0.9999	0.0488
1 kHz – 10 kHz	1.0000	0.0380
10 kHz – 100 kHz	0.9997	0.1310
100 kHz – 1 MHz	0.9974	0.1397
1 MHz – 2 MHz	0.9815	0.1899

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 9

ย่านความถี่	ตัวชี้วัดทางสถิติกรณีศึกษาที่ 9	
	ค่าสหสัมพันธ์	ค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัม
100 Hz – 1 kHz	0.9999	0.0512
1 kHz – 10 kHz	0.9939	0.0852
10 kHz – 100 kHz	0.9999	0.1327
100 kHz – 1 MHz	0.9974	0.1399
1 MHz – 2 MHz	0.9809	0.1923

จากผลการทดสอบทั้ง 9 กรณีศึกษา และผลจากการหาค่าสหสัมพันธ์ ค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัม กรณีศึกษาที่ 1 ถึงกรณีศึกษาที่ 6 เปรียบเทียบข้อมูลที่เป็นฐานข้อมูลกับกรณีลัดวงจรทั้ง 4 กรณี ในช่วงความถี่ 100 Hz – 100 kHz จะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนจากค่า เบี่ยงเบนสเปคตรัม และกรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 7 – 9 เมื่อดูด้วยตา จะไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่าง แต่เมื่อดูจากค่าสหสัมพันธ์ก็ยังไม่สามารถตัดสินใจได้ เมื่อดูค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัมจะบอกได้ทันทีเพราะค่าเบี่ยงเบนสเปคตรัมนั้นมีความแตกต่างกัน

จากกรณีศึกษาทั้ง 9 กรณี การเปลี่ยนแปลงภายในหม้อแปลงในกรณีต่าง ๆ ย่อมส่งผลให้เกิดผลตอบสนองทางความถี่ที่แตกต่างกัน จากการวัดผลตอบสนองทางความถี่ทั้ง 9 กรณีศึกษา ทำให้สามารถทราบถึงสภาพการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ทั้งในส่วนของแกนเหล็กและในส่วนของขดลวด ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรของแกนเหล็กและขดลวดจะเกิดขึ้นในช่วงความถี่ประมาณ 100 Hz – 10 kHz ในกรณีที่เกิดการไปงตัวหรือยุบตัวของขดลวดจะเกิดที่ประมาณ 10 kHz – 100 kHz และในกรณีที่ขดลวดหลวมจะเกิดความผิดพร่องในช่วงความถี่ประมาณ 100 kHz – 2 MHz

## 4.5 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

### 4.5.1 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 12 kV /416 V 50 Hz Dyn1

การจำลองความผิดปกติบนหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ได้ทำการจำลองการลัดวงจรที่จุดเปลี่ยนแท็บ โดยสมมติให้เกิดการลัดวงจรตรงจุดเปลี่ยนแท็บ ดังนี้คือ กรณีที่ 1 สมมติว่าหม้อแปลงใช้ไปเป็นระยะเวลานานแล้วจุดต่อแท็บหลุดที่เฟส A ดังรูปที่ 4.76



ก) แท็บ A ในสภาวะปกติ



ข) แท็บ A ในสภาวะผิดปกติ

รูปที่ 4.76 การจำลองความผิดปกติโดยการถอดแท็บที่เฟส A ออก

กรณีที่ 2 จำลองให้เกิดการลัดวงจรที่จุดต่อแท็บ 4 กับ 5 ซึ่งโดยปกติหม้อแปลงจะต่ออยู่กับแท็บที่ต่ำที่สุดซึ่งในที่นี้ คือ 5 กับ 6 ดังรูป 4.77



รูปที่ 4.77 การจำลองความผิดปกติโดยการลัดวงจรที่แท็บ 4 กับ 5

#### 4.5.1.1 การเตรียมการทดสอบ

การทดสอบได้จัดทำขึ้นที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีลำดับขั้นตอนในการเตรียมการทดสอบดังนี้

1) เตรียมหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 12 kV / 416 V 50 Hz โดยได้ทำการต่อกราวด์เข้าแกนเหล็กของหม้อแปลง และคูแวกเตอร์กรุป โดยจะวัดผลตอบสนองความถี่ตามแวกเตอร์กรุป ที่ต้องวัดตามแวกเตอร์กรุป เพราะว่าแวกเตอร์กรุปนั้นจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างขด ว่าขณะนี้กำลังวัดผลตอบสนองความถี่ที่ขดนี้ มีขดใดบ้างที่เกี่ยวข้องกันอยู่

2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย

2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)

2.2) คอมพิวเตอร์

2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ, ประแจ, คีมย้ำสายไฟ

2.4) สายไฟที่ใช้สำหรับการลัดวงจร

#### 4.5.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

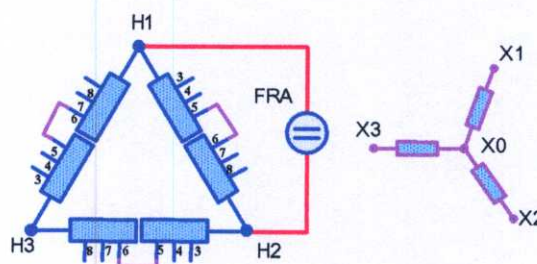
1) ต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.78 โดยทำการป้อนที่ละเฟส ตามแวกเตอร์กรุป ตัวอย่างการวัดผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A ดังรูปที่ 4.79



รูปที่ 4.78 วงจรการทดสอบที่เฟส A



ก) ลักษณะการทดสอบที่เฟส A



ข) โดอะแกรมการทดสอบ

รูปที่ 4.79 การวัดผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A

2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz ทำการทดสอบกรณีแรกคือ Open Circuit Test ที่เฟส A

3) ทำการทดสอบ โดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดัน ไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

4) ทำการทดสอบอีกครั้ง

5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

6) ทำการทดสอบที่เฟส B และ C ตามขั้นตอนที่ได้ทดสอบกับเฟส A

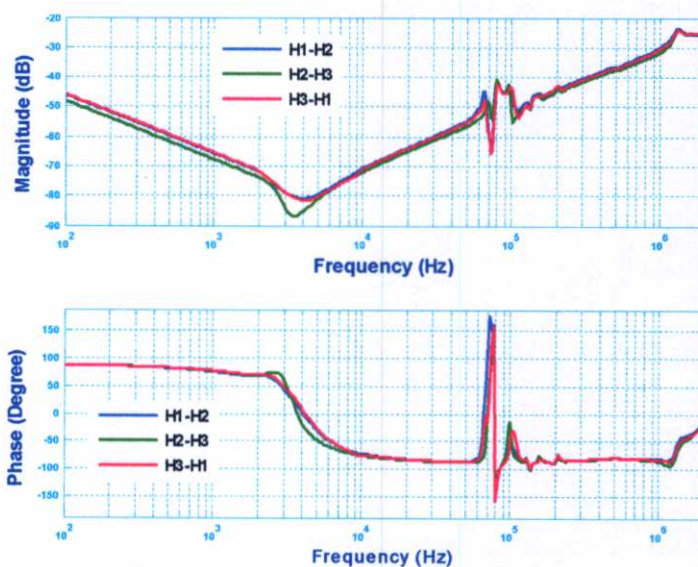
7) ทำการจำลองถอดแற்ப้องที่เฟส A แล้ววัดผลตอบสนองความถี่เหมือนกับข้อ 1 – 5

8) ทำการตัดวงจรที่แท็ป 4 กับ 5 ที่เฟส A แล้ววัดผลตอบสนองความถี่เหมือนกับข้อ 1 – 5

9) นำผลที่วัดได้ทั้งหมดทำการเปรียบเทียบระหว่างเฟส A, B, และ C

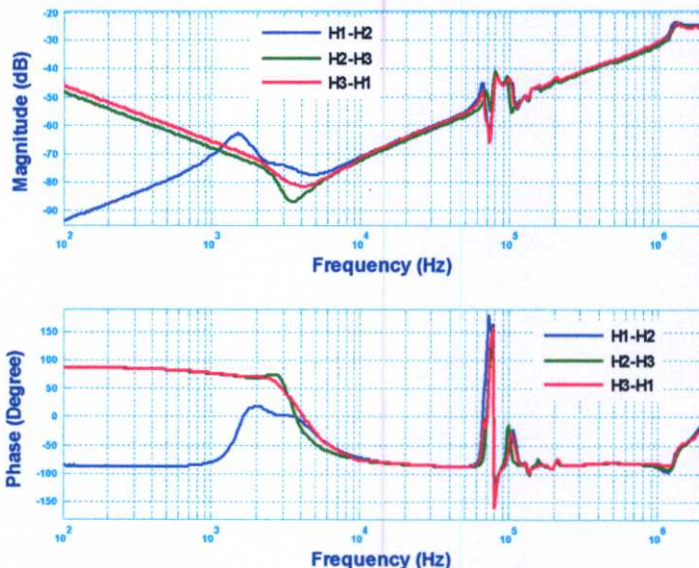
#### 4.5.1.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ Open Circuit Test ด้านขดลวดแรงดันสูง หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ ดังรูปที่ 4.80



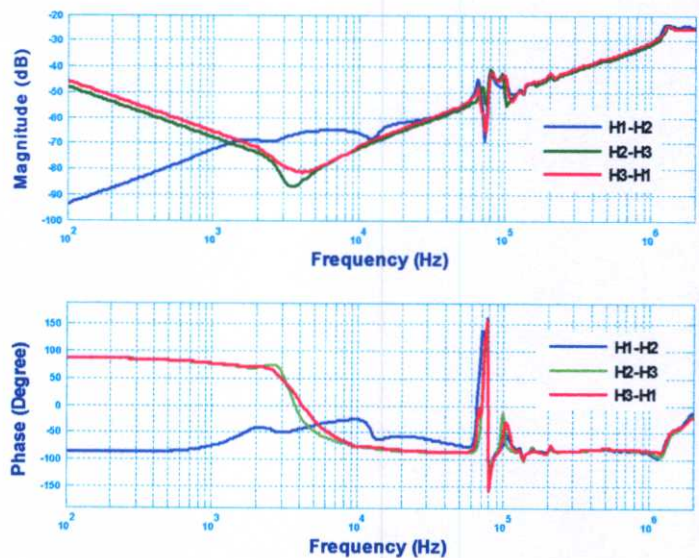
รูปที่ 4.80 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C ในสภาวะปกติ

ผลการทดสอบ Open Circuit Test ด้านขดลวดแรงดันสูง จำลองให้ถอดแท็ปเฟส A ออก ดังรูปที่ 4.81



รูปที่ 4.81 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ถอดเทปเฟส A

ผลการทดสอบ Open Circuit Test ด้านขดลวดแรงดันสูง จำลองให้ลัดวงจรเทป 4 กับ 5 เฟส A ดังรูปที่ 4.84



รูปที่ 4.82 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ ลัดวงจรเทป 4 กับ 5 เฟส A

#### 4.5.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองความถี่ หม้อแปลงไฟฟ้าโดยการจำลองให้เกิดความผิดพร่องที่เฟส A ผลการทดสอบพบว่าเกิดความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ทั้ง 2 กรณีที่ได้จำลองขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเฟส B และ C และทำให้ทราบว่า การลัดวงจรของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวัดผลตอบสนองทางความถี่จะเห็นความผิดพร่องในช่วงความถี่ประมาณ 100 Hz – 10 kHz

#### 4.5.2 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 12 kV / 400 V 50 Hz Dyn5

ทำการจำลองการลัดวงจรที่จุดเปลี่ยนแท็บ โดยสมมติให้เกิดการลัดวงจรตรงจุดเปลี่ยนแท็บ ดังนี้คือ กรณีที่ 1 สมมติว่าหม้อแปลงใช้ไปเป็นระยะเวลานานแล้วจุดต่อแท็บหลุดที่เฟส C ดังรูปที่ 4.83



ก) สภาวะปกติ



ข) จำลองโดยการถอดแท็บออก

รูปที่ 4.83 การจำลองความผิดพร่องโดยการถอดแท็บที่เฟส C ออก

กรณีที่ 2 และ 3 จำลองให้เกิดการลัดวงจรที่จุดต่อแท็บ 7 กับ 8 และ 3 กับ 8 ดังรูปที่ 4.84 ซึ่งโดยปกติหม้อแปลงจะต่ออยู่กับแท็บที่ต่ำที่สุดซึ่งในที่นี้ คือ 5 กับ 6 ดังรูป 4.83 ก



ก) ลัดวงจรที่จุดต่อแท็บ 7 กับ 8



ข) ลัดวงจรที่จุดต่อแท็บ 3 กับ 8

รูปที่ 4.84 การจำลองความผิดพร่องโดยการลัดวงจรที่เฟส C

#### 4.5.2.1 การเตรียมการทดสอบ

การทดสอบได้จัดทำขึ้นที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีลำดับขั้นตอนในการเตรียมการทดสอบดังนี้

1) เตรียมหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 12 kV / 400 V 50 Hz โดยได้ทำการต่อกราวด์เข้าแกนเหล็กของหม้อแปลง และคูแวกเตอร์กรุป โดยจะวัดผลตอบสนองความถี่ตามแวกเตอร์กรุป

2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย

2.1) เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)

2.2) คอมพิวเตอร์

2.3) ไขควง, คีม, เทปพันสายไฟ, ประแจ, คีมย้ำสายไฟ

2.4) สายไฟที่ใช้สำหรับการลัดวงจร

#### 4.5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

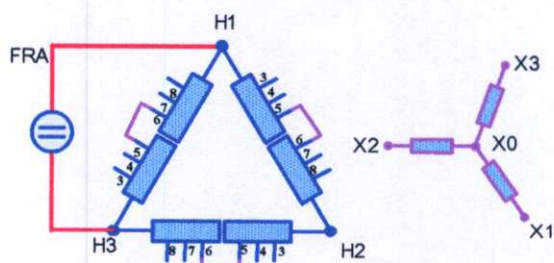
1) ต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.85 โดยทำการป้อนที่ละเฟส ตามแวกเตอร์กรุป ตัวอย่างการวัดผลตอบสนองความถี่ที่เฟส C ดังรูปที่ 4.86



รูปที่ 4.85 วงจรการทดสอบที่เฟส C



ก) ลักษณะการทดสอบที่เฟส C



ข) ไดอะแกรมการทดสอบ

รูปที่ 4.86 การวัดผลตอบสนองความถี่ที่เฟส C

2) ตั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz ทำการทดสอบกรณีแรกคือ Open Circuit Test ที่เฟส A

3) ทำการทดสอบโดยการ Sweep Frequency โดยที่เครื่อง FRA จะจ่ายแรงดันไซน์ขนาด 40 Vrms และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 2 MHz

4) ทำการทดสอบอีกครั้ง

5) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูล

6) ทำการทดสอบที่เฟส B และ C เหมือนกับเฟส A

7) ทำการจำลองถอดเทปออกที่เฟส C แล้ววัดผลตอบสนองความถี่เหมือนกับข้อ 1 – 5

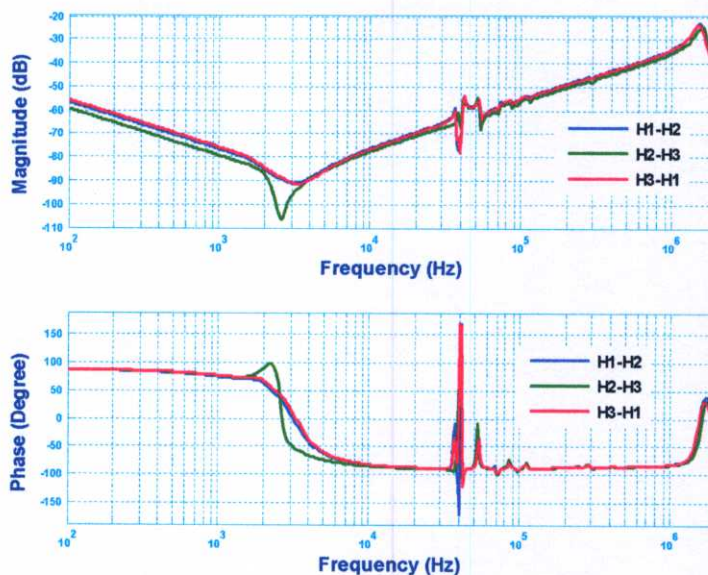
8) ทำการลัดวงจรที่แท็ป 7 กับ 8 ที่เฟส C แล้ววัดผลตอบสนองความถี่เหมือนกับข้อ 1 – 5

9) ทำการลัดวงจรที่แท็ป 3 กับ 8 ที่เฟส C แล้ววัดผลตอบสนองความถี่เหมือนกับข้อ 1 – 5

10) นำผลที่วัดได้ทั้งหมดทำการเปรียบเทียบระหว่างเฟส A, B, และ C

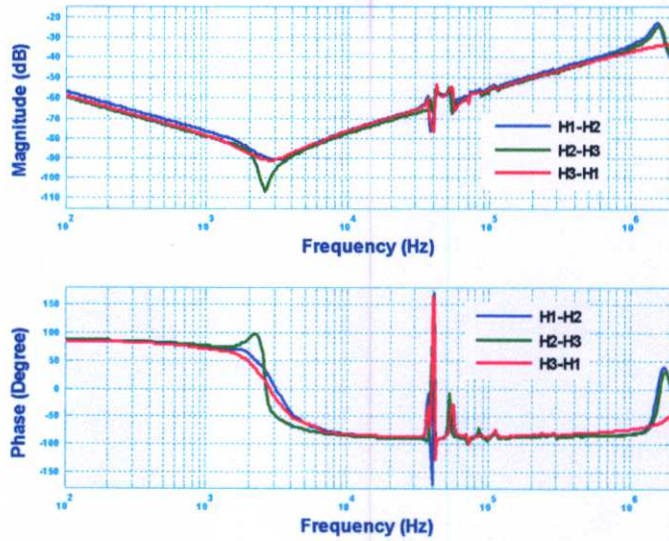
#### 4.5.2.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ Open Circuit Test ด้านขดลวดแรงดันสูง หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ  
 ดังรูปที่ 4.87



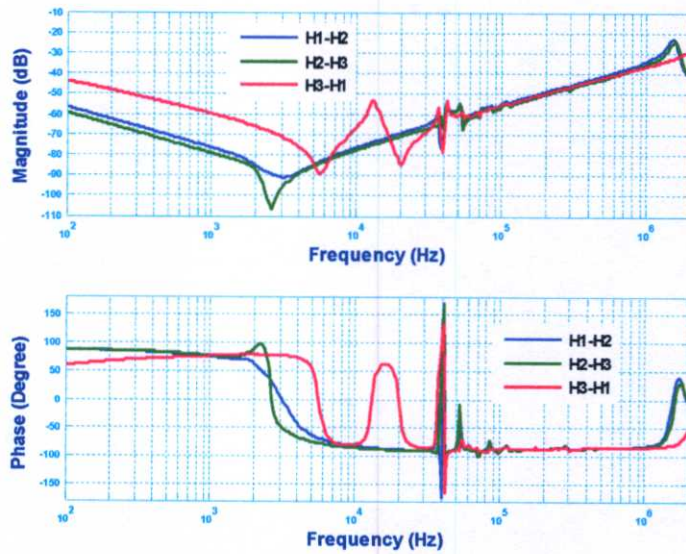
รูปที่ 4.87 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C ในสภาวะปกติ

ผลการทดสอบ Open Circuit Test ด้านขดลวดแรงดันสูง จำลองให้ถอดเทปเฟส C ออก  
 ดังรูปที่ 4.88



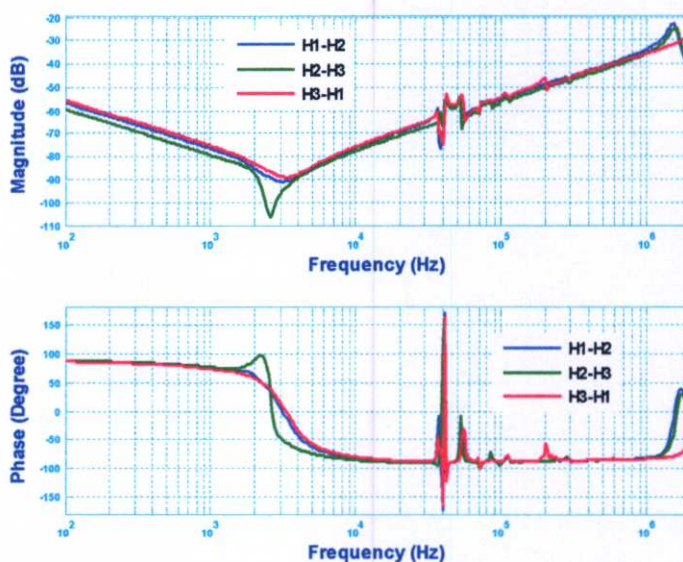
รูปที่ 4.88 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ถอดเทปเฟส C

ผลการทดสอบ Open Circuit Test ด้านขดลวดแรงดันสูง จำลองให้ลัดวงจรเทป 7 กับ 8 เฟส C ดังรูปที่ 4.89



รูปที่ 4.89 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ ลัดวงจรเทป 7 กับ 8 เฟส C

ผลการทดสอบ Open Circuit Test ด้านขดลวดแรงดันสูง จำลองให้ลัดวงจรเทป 3 กับ 8 เฟส C ดังรูปที่ 4.90



รูปที่ 4.90 ผลตอบสนองความถี่ที่เฟส A, B, และ C โดยการจำลองให้ ลัดวงจรแท็บ 3 กับ 8 เฟส C

#### 4.5.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองความถี่ หม้อแปลงไฟฟ้าโดยการจำลองให้เกิดความผิดปกติที่เฟส C ผลการทดสอบพบว่าเกิดความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ทั้ง 3 กรณีที่ได้จำลองขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเฟส B และ A และทำให้ทราบว่า การลัดวงจรของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวัดผลตอบสนองทางความถี่จะเห็นความผิดปกติในช่วงความถี่ประมาณ 100 Hz – 10 kHz และผลที่เกิดจากการถอดจุดเปลี่ยนแท็บจะทำให้เห็นผลตอบสนองความถี่ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ประมาณ 1 MHz – 2 MHz

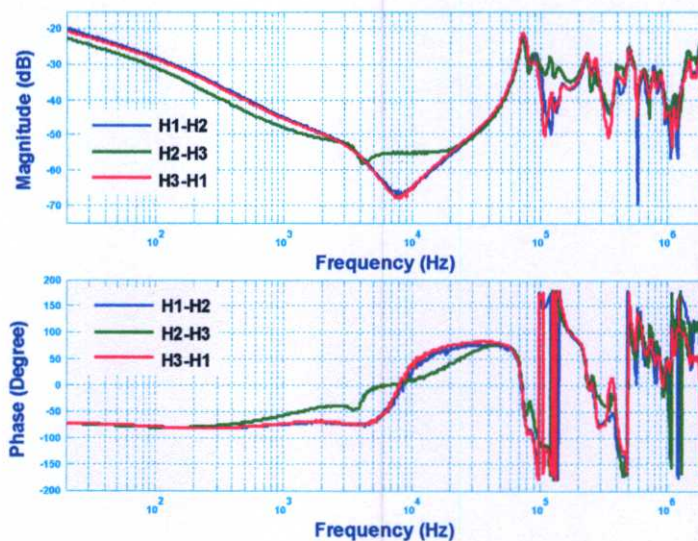
## 4.6 ข้อมูลภาคสนาม

### 4.6.1 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 22.4 MVA 15.7 kV/7.2kV 50 Hz

ข้อมูลนี้ได้จากบริษัทแห่งหนึ่ง ซึ่งลูกค้าได้แจ้งมาว่าหม้อแปลงไม่สามารถจ่ายโหลดได้ จึงได้ปลดโหลดออกแล้วขมาตรวจดูความผิดปกติ แต่ก่อนที่จะทำการตรวจดูและเปิดหม้อแปลงเพื่อหาสาเหตุความผิดปกติ ได้ทำการทดสอบ FRA แล้วผลปรากฏว่า พบความผิดปกติที่เฟส B ดังรูปที่ 4.91 และ 4.92

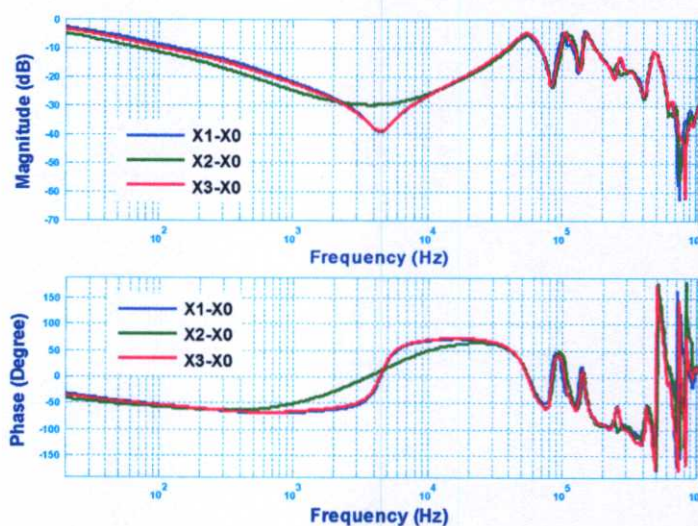
#### 4.6.1.1 ผลการทดสอบ

1) Open circuit test ด้านขดลวดแรงดันสูง



รูปที่ 4.91 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันสูง

## 2) Open circuit test ด้านขดลวดแรงดันต่ำ

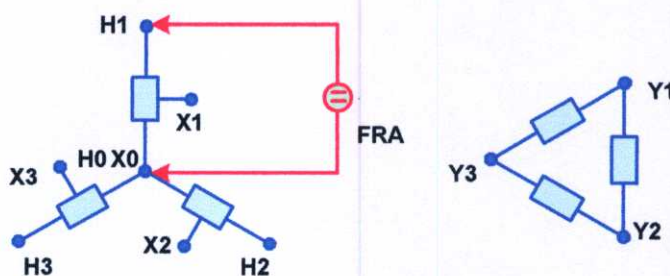


รูปที่ 4.92 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันต่ำ

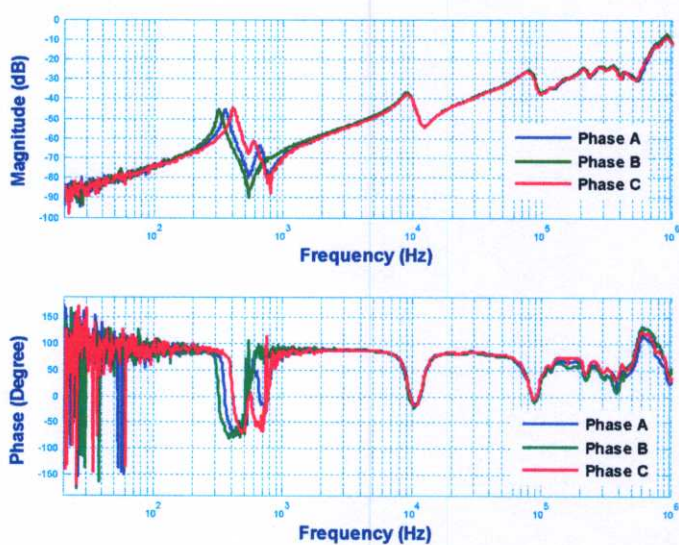
หลังจากที่ได้ทำการตรวจซ่อมหม้อแปลงไฟฟ้า ได้เปิดออกมาพบว่าที่เฟส B นั้นขดลวดที่พันอยู่เกิดตกในแนวแกนที่พันและแกนเหล็กนั้นเสียรูปทรงไม่สามารถรับน้ำหนักของขดลวดได้ เป็นผลทำให้ขดลวดตกและไม่สามารถจ่ายโหลดได้เหมือนเดิม จึงต้องทำการรื้อออกแล้วพันใหม่

#### 4.6.2 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดพิกัด 300 MVA 230/69 kV 50 Hz

ข้อมูลนี้ได้จากบริษัทแห่งหนึ่ง ซึ่งเกิดการระเบิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีผลทำให้ขดลวดขาดและแกนเหล็กเสียหาย ก่อนการเปิดซ่อมได้วัดผลตอบสนองทางความถี่ เก็บไว้เพื่อเอาไว้เทียบหลังการซ่อม ซึ่งผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ ก่อนซ่อมดังรูปที่ 4.94

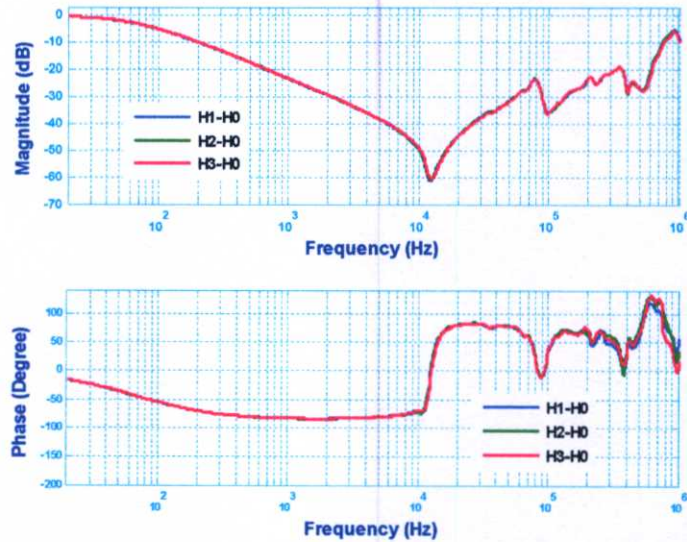


รูปที่ 4.93 ไดอะแกรมการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่



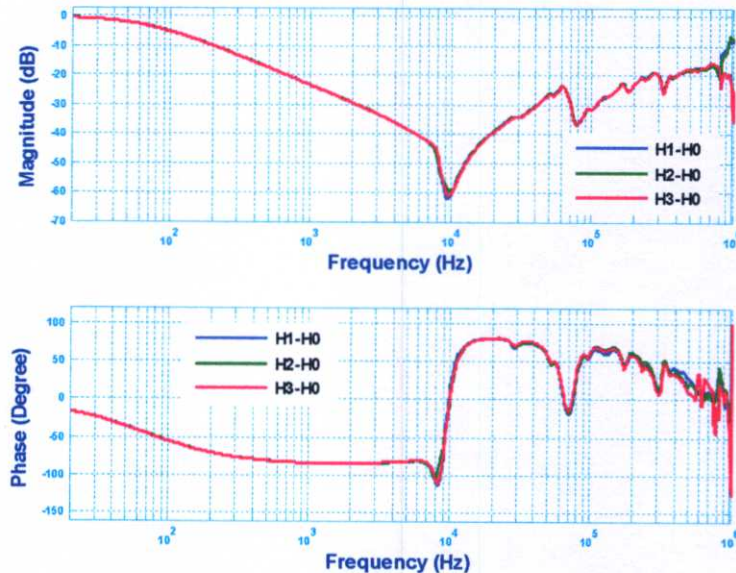
รูปที่ 4.94 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันสูงก่อนตรวจซ่อม

ภายหลังจากที่ทำการซ่อมแล้ว ได้ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบดู ว่ามีความแตกต่างจากก่อนตรวจซ่อมหรือไม่ ดังรูปที่ 4.95 ซึ่งผลก็แตกต่างกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.95 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันสูงหลังซ่อม

หลังจากนั้น ได้เคลื่อนย้ายหม้อแปลงเพื่อไปทำการทดสอบตามปกติ แล้ววัดผลตอบสนองความถี่อีกครั้ง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.96



รูปที่ 4.96 ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ด้านขดลวดแรงดันสูงหลังเคลื่อนย้าย

จากผลการทดสอบรูปที่ 4.96 พบว่าเมื่อทำการเคลื่อนย้ายจากอีกที่ ไปยังอีกที่หนึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนย้าย และเมื่อทำการเปิดออกมาดูผลปรากฏว่าขดลวดทั้งสามขดเกิดการบิดเปลี่ยนตำแหน่งไปจากที่ได้พันและประกอบในตอนแรก

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุป

จากผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ โดยการจำลองการวัดผลตอบสนองความถี่แบบพื้นฐานกับคอยล์ขนาดเล็ก การจำลองความผิดปกติพร้อมหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส การจำลองผลของน้ำมัน และการเก็บข้อมูลภาคสนาม สามารถสรุปเป็นช่วงที่เกิดความผิดปกติได้ 3 ช่วงความถี่คือ

1) ช่วงความถี่ประมาณ  $< 10$  kHz จะเกิดความผิดปกติที่แกนเหล็ก (core deformation) และเกิดการ Open Circuit หรือ Short Circuit ระหว่างรอบของขดลวด

2) ช่วงความถี่ประมาณ 10 kHz – 100 kHz จะเกิดความผิดปกติที่ขดลวด อาจมีการยุบตัวหรือ โป่งตัวออก

3) ช่วงความถี่ประมาณ 100 kHz – 2 MHz จะเกิดความผิดปกติที่ขดลวด ทั้งขดลวดหลักและขดลวดแยก (Deformation Within the main and tap windings) อาจเกิดการเคลื่อนที่ของสายตัวนำขดลวดหลักและขดลวดแยก (Movement of main and tap winding leads) หรือการขยับของขดลวด (Bulk Winding Movement)

สามารถนำช่วงความถี่ทั้ง 3 ช่วงมาสรุปให้เป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 คำแนะนำการวินิจฉัยหม้อแปลงตามช่วงความถี่ และความผิดปกติ

ช่วงที่	ช่วงความถี่	จุดที่เกิดความผิดปกติ	ลักษณะความผิดปกติ
1	$< 10$ kHz	แกนเหล็ก, ขดลวดหลัก	เกิดความผิดปกติที่แกนเหล็ก, เกิดการ Open Circuit หรือ Short Circuit ระหว่างรอบของขดลวด
2	10 kHz - 100 kHz	ขดลวดหลัก	เกิดความผิดปกติที่ขดลวด อาจมีการยุบตัวหรือ โป่งตัวออก
3	100 kHz - 2 MHz	ขดลวดหลัก, จุดต่อแท๊ป, สายต่อตัวนำ	เกิดความผิดปกติที่ขดลวด ทั้งขดลวดหลักและขดลวดแยก, เกิดการเคลื่อนที่ของสายตัวนำขดลวดหลักและขดลวดแยกหรือการขยับของขดลวด

การวิเคราะห์ส่วนใหญ่ คือการเทียบลักษณะ curve ถ้าหมีเปลี่ยนแปลงขนาด MVA เท่ากัน ถ้า curve มีลักษณะที่ผิดไปจากการทดสอบครั้งก่อนให้ถือว่าหมีเปลี่ยนแปลงเกิดความผิดปกติหรือ ในการวิเคราะห์นั้นค่อนข้างยากและจำเป็นต้องมีประสบการณ์ต่อการตัดสินใจว่าหมีเปลี่ยนแปลงผิดปกติหรือปกติ การใช้ค่าสหสัมพันธ์และส่วนเบี่ยงเบนสเปคตรัมมาช่วยวิเคราะห์ ซึ่งจะให้ค่าออกมาเป็นตัวเลขพร้อมทั้งเกณฑ์ในการตัดสินใจดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เกณฑ์การตัดสินใจจากค่าสหสัมพันธ์[16]

การวิเคราะห์	สหสัมพันธ์
ดี	0.95 – 1.0
ยังใช้ได้อยู่	0.90 – 0.94
หาความผิดปกติ	น้อยกว่า 0.90

จากตารางที่ 5.2 ถ้าค่าสหสัมพันธ์น้อยกว่า 0.90 ให้ยกหมีแปลงมาตรวจซ่อมได้ทันที ในกรณีที่ค่าสหสัมพันธ์มีค่าเป็นลบแสดงว่าหมีแปลงไฟฟ้านั้นเกิดความผิดปกติหรือ ในการวินิจฉัยด้วยค่าการเบี่ยงเบนสเปคตรัมยังไม่มีเกณฑ์ที่เป็นทางการ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์ของผู้ทดสอบเป็นหลัก ในการวินิจฉัยคุณสมบัติของหมีแปลงว่ายังอยู่ในสภาพดีหรือควรที่จะนำไปบำรุงรักษาซ่อมแซม

## 5.2 อุปสรรคและการแก้ไข

1) เนื่องจากวิธีการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ยังไม่มีมาตรฐานรองรับ ทำให้ผลการทดสอบที่ได้เวลานำไปวินิจฉัย จะต้องใช้ความชำนาญของผู้ทำการทดสอบเป็นหลัก การแก้ไขคือต้องมีการเก็บข้อมูลในอดีตเอาไว้หลายๆ เพื่อเอาไว้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดในปัจจุบัน

2) เนื่องจากเครื่อง (FRA) ที่ใช้ทำการทดสอบมีน้ำหนักที่มาก ทำให้ไม่สามารถทดสอบเพียงคนเดียวได้ ทำให้ขณะทำการทดสอบต้องใช้คนมากกว่า 2 คนขึ้นไป

3) ขนาดแคลนหมีแปลงขนาดใหญ่ที่จะนำมาจำลองให้เกิดความผิดปกติในรูปแบบต่างๆ เนื่องจากไม่มีทุนสนับสนุนในการที่จะจัดซื้อเพื่อมาทำการทดลอง

4) อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมในการทดสอบ เช่น GPIB การ์ด มีราคาค่อนข้างสูง ต้องขอยืมจากหน่วยงานภายนอก ซึ่งจะมีข้อจำกัดเรื่องเวลาที่ใช้ในการทดสอบ และมีความลำบากในการขอความอนุเคราะห์

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1) ผลการวัดผลตอบสนองความถี่ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นั้น เป็นการจำลองสถานะต่างๆ เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับหม้อแปลงไฟฟ้าจริงๆ ดังนั้นผลที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้น เมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับทดสอบหม้อแปลงจริงๆ จำนวนหลายๆ ลูก

2) เพื่อให้ผลการวัดผลตอบสนองความถี่นั้นมีความครอบคลุมทุกความถี่ ควรจะหาเครื่องวัดผลตอบสนองความถี่ ที่สามารถกวาดได้ทุกความถี่ ตั้งแต่ความถี่ต่ำๆ ไปจนถึงความถี่สูง เพราะที่ความถี่ต่ำๆ จะเห็นผลตอบสนองความถี่ของแกนเหล็กและขดลวดหลัก

## บรรณานุกรม

- [1] นรเศรษฐ พัฒนเดช, “**High Voltage Insulation maintenance, Examination and Diagnosis**”, เอกสารประกอบการเรียนการสอนรายวิชา Selected Topics in High Voltage Engineering, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [2] Tony McGrail Double Engineering, “**SFRA Basic Analysis Volume 1**”, July 14, 2003.
- [3] กฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว, “การวินิจฉัยสภาพขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่”, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [4] ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์, “สถิติพื้นฐานพร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB SPSS และ SAS”, พิมพ์ครั้งที่ 5, เมษายน, 2543.
- [5] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงษ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, “สถิติวิศวกรรม”, 2549.
- [6] Simon A. Ryder, “**Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis**”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume 19, Page 16 – 22, March – April, 2001.
- [7] Simon A. Ryder, “**Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements**”, Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Page 187 – 190, MA USA, April 7 – 10 , 2002.
- [8] Simon A. Ryder, “**Transformer Diagnosis Using Frequency Response Analysis : Results from Fault Simulations**”, 2002.
- [9] Tony McGrail Double Engineering, “**SFRA Basic Analysis Volume 2**”, August 7, 2003.
- [10] Tony McGrail Double Engineering, “**Acceptable Variation in Factory and Field SFRA Comparisons**” August, 2006.
- [11] Tony McGrail Double Engineering, “**Acceptable Variation in Factory and Field SFRA Comparisons Version 2**” July, 2006.
- [12] Tony McGrail Double Engineering, “**Transformer SFRA Application Note #2003/10/06-01 Use of Sister Units in SFRA Analysis**” August 6, 2003.
- [13] ABB, “**Transformer Handbook**”, 2004.
- [14] ABB, “**Service Handbook for Transformers**” August, 2006.
- [15] IEC 60076-1 Power Transformer Part1 – General
- [16] Egat, “**Test Report for Power Transformer Kitashiba 60 MVA 67 MVA 67/12-24 kV**”.
- [17] Doble, “คู่มือการใช้งานเครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่”, Type M5300.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก.**

**ข้อเสนอแนะในการวัดผลตอบแทนจากความถี่**

### ก.1 ข้อเสนอแนะในการวัดผลตอบสนองทางความถี่

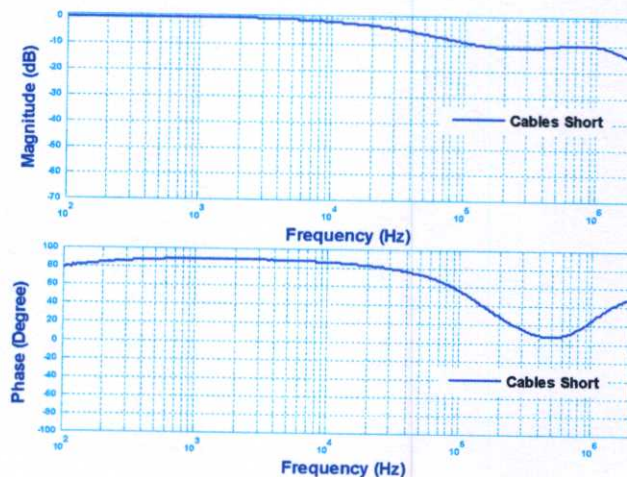
#### ความสมบูรณ์ของสายเคเบิลที่ทำการทดสอบ

การทดสอบสายเคเบิลด้วยการลัดวงจรการทดสอบนี้ ทดสอบเพื่อดูความสมบูรณ์หรือความปกติของสายเคเบิล การทดสอบแสดงดังรูปที่ ก.1 ทำการทดสอบ โดยการลัดวงจรที่ปลายสายที่จะทำการทดสอบวัดผลตอบสนองทางความถี่ ซึ่ง โดยทั่วไปจะถูกประมาณให้มีค่าเป็นศูนย์ ถ้ามีค่าเป็นศูนย์ ผลตอบสนองความถี่จะเรียบไปจนถึงช่วงความถี่ประมาณ 2 MHz



รูปที่ ก.1 การทดสอบความสมบูรณ์ของสายเคเบิลด้วยการลัดวงจร

ผลตอบสนองความถี่ของสายเคเบิลปกติแสดงดังรูปที่ ก.2 ซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงมากมายของผลตอบสนองความถี่ จะสามารถระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในสายโคแอกเซียลเคเบิล



รูปที่ ก.2 การวัดผลตอบสนองความถี่สำหรับสายเคเบิลทดสอบด้วยการลัดวงจร

จากผลการทดสอบในรูปที่ ก.2 คือผลการทดสอบสภาวะปกติของสายเคเบิล เคเบิลที่ถูกใช้ สำหรับการวัดผลตอบสนองทางความถี่ตามหลักการ จะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวัดผลตอบสนองความถี่ จะทำอย่างไรที่จะทำให้อิทธิพลต่างๆ ไม่ส่งต่อการวินิจฉัยที่ผิดพลาดอันเนื่องมาจากสิ่งที่เราได้สร้างขึ้นมาเองต้องพิจารณาจากเรื่องต่างๆ ดังนี้

### ก.2 สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนนั้นเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า มีทุกการทดสอบ ตัวอย่างเช่น ขณะทำการทดสอบห้ามมิให้มีสิ่ง ที่เป็นต้นกำเนิดของคลื่นความถี่สูงอยู่ใกล้กับวงจรการทดสอบ เพราะผลการทดสอบที่ได้จะมีผลของสัญญาณรบกวนปนอยู่ด้วย

### ก.3 การต่อกราวด์

ในการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ มีสิ่งที่จะล้มเสียมิได้คือ การต่อกราวด์ขณะทำการทดสอบ เพราะผลที่ได้จากการทดสอบจะได้ไม่เหมือนกัน ตัวอย่างเช่นการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ไม่ได้ทำการต่อกราวด์ และต่อกราวด์ดังรูปที่ 5.3



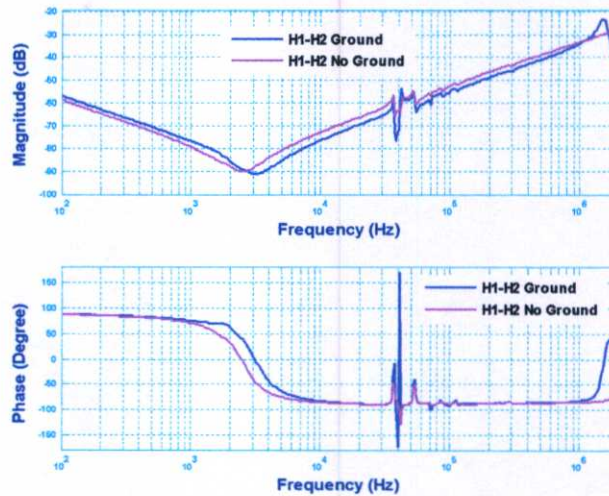
ก) ต่อกราวด์ขณะทดสอบ



ข) ไม่ต่อกราวด์ขณะทดสอบ

### รูปที่ ก.3 ลักษณะการต่อกราวด์และไม่ต่อกราวด์ขณะวัดผลตอบสนองทางความถี่

ผลการวัดผลตอบสนองความถี่ดังรูปที่ ก.4 ซึ่งจากผลการวัดจะเห็นความแตกต่างของผลตอบสนองความถี่ แสดงว่าการต่อกราวด์ขณะทำการทดสอบก็มีผลต่อผลตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงเช่นกัน



รูปที่ ก.4 ผลการวัดผลตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่อกราวด์ และไม่ต่อกราวด์

#### ก.4 ค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรการวัด

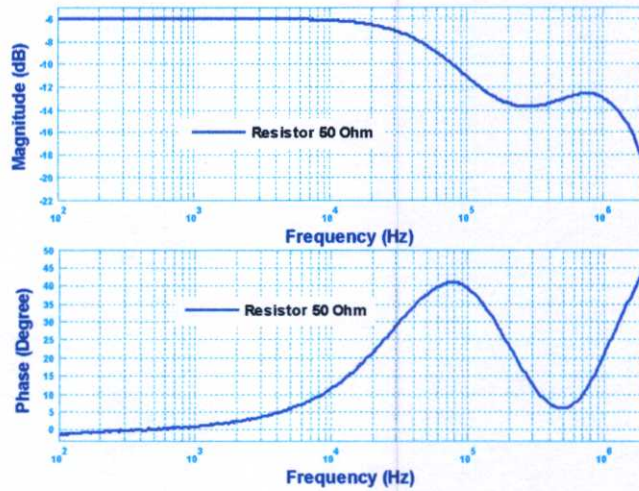
ในการวัดผลตอบสนองความถี่ ค่าอิมพีแดนซ์แฝงก็มีผลต่อการวัดผลตอบสนองความถี่เช่นเดียวกัน ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้จำลองผลของค่าอิมพีแดนซ์แฝงไว้ ซึ่งค่าของอิมพีแดนซ์แฝงจะเป็นสาเหตุทำให้ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลง

#### ก.4.1 ผลตอบสนองความถี่ของตัวต้านทาน

ผลตอบสนองความถี่ของตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม แสดงวงจรการทดสอบดังรูปที่ ก.5 และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ ก.6 สามารถเห็นผลกระทบได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับ

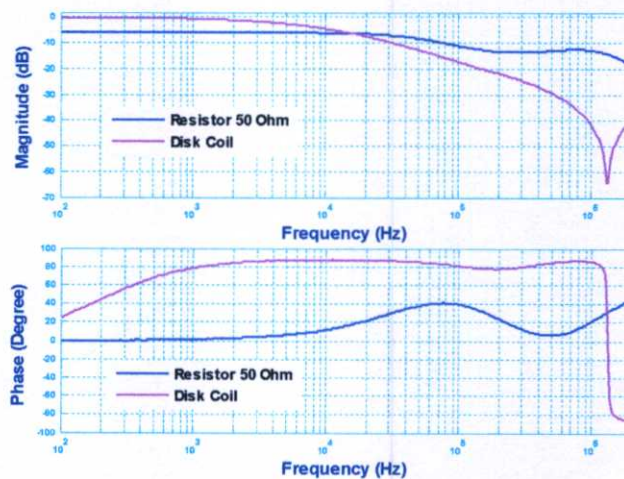


รูปที่ ก.5 การวัดผลตอบสนองความถี่ตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม



รูปที่ ก.6 ผลตอบสนองความถี่ตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม

จากรูปที่ ก.6 นำผลตอบสนองความถี่ของตัวต้านทาน 50 โอห์ม มาเปรียบเทียบกับแบบขดเป็นวงกลม จะทำให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน จากรูปเส้นสีเขียวจะเห็นว่ามีความถี่ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เพราะกราฟมีลักษณะ ไต่ลงอย่างรวดเร็วและ ไต่ขึ้นในภายหลัง



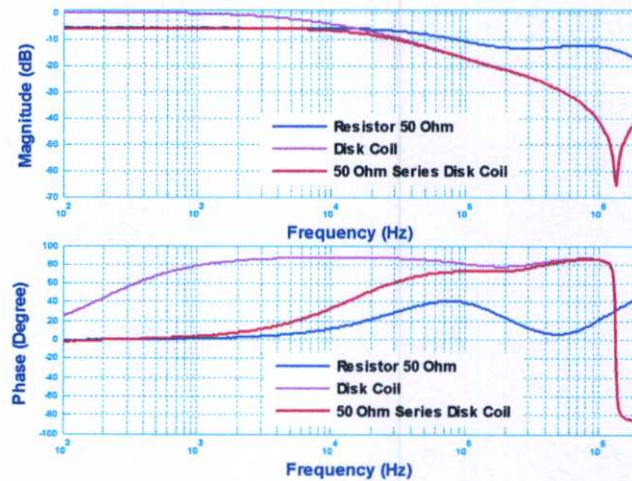
รูปที่ ก.7 ผลตอบสนองความถี่ของตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม เปรียบเทียบกับแบบขดเป็นวงกลม

#### ก.4.2 ผลตอบสนองความถี่แบบขดเป็นวงกลมและตัวต้านทานในการต่ออนุกรม

เมื่อตัวต้านทานขนาด 50 โอห์มคือส่วนประกอบในการต่ออนุกรมแบบขดเป็นวงกลมดังรูปที่ ก.8 ซึ่งจากผลตอบสนองความถี่จะเห็นว่าเมื่อต่อตัวต้านทานอนุกรมเข้าไปค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าสูงกว่าเดิมดังเส้นสีแดง



รูปที่ ก.8 แบบขดเป็นวงกลมอนุกรมกับตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม



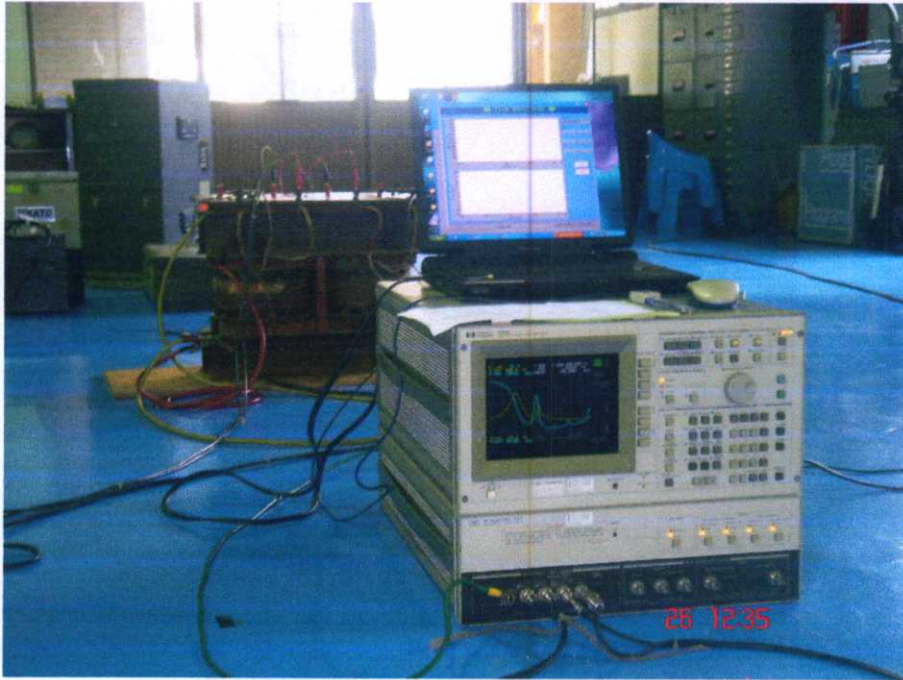
รูปที่ ก.9 ผลตอบสนองความถี่แบบขดเป็นวงอนุกรมกับตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม เปรียบเทียบกับตัวต้านทาน 50 โอห์ม และแบบขดเป็นวงกลม

#### ก.5 อิมพีแดนซ์แฝงในวงจรการวัด

อิทธิพลของอิมพีแดนซ์แฝง คือจะลบกวนผลการทดสอบสนองความถี่ โดยการลดทอนสัญญาณผลตอบสนอง ผลกระทบนั้นขึ้นอยู่กับขนาดอิมพีแดนซ์แฝง และตามธรรมชาติของอิมพีแดนซ์แฝง

## ภาคผนวก ข.

### เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่

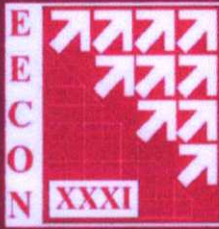


เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ ชื่อรุ่น HP 4194A Impedance/Gain – Phase Analyzer Operation Manual อินพุต 220 โวลต์, เอาต์พุต  $\pm 40$  โวลต์,  $\pm 20$  มิลลิแอมป์, ย่านความถี่ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 40 MHz ให้ความละเอียดของข้อมูล 401 จุด

### **ภาคผนวก ก.**

#### **ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่**

**ภูจิต ถึงสุข, นรเศรษฐ พัฒนเดช, กฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว และสุรินทร์ คำฝอย, “การวินิจฉัยสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่31, หน้า 311-314, นครนายก, ประเทศไทย, ตุลาคม 29-31, 2551.**



# การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31

31<sup>st</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-31)



- Volume I**
- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
  - อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
  - คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

29 - 31 ตุลาคม 2551

ณ รอยัลฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

ร่วมจัดโดย



มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
SRINAKHARINWIROT UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
SRIPATUM UNIVERSITY

สนับสนุนโดย



Western  
Digital®



CAT  
สำนักงานกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ

NECTEC  
a member of NECTO



ABB

# การวินิจฉัยสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่

## Transformer Diagnosis by Using Frequency Response Analysis Method

ภูชิต ดิงสุข<sup>1</sup> นรเศรษฐ พัฒนเดช<sup>1</sup> กฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว<sup>2</sup> และ สุรินทร์ คำผอย<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์: 0-2326-9902 E-mail: s0060221@kmitl.ac.th

<sup>2</sup>ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอผลตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความผิดปกติในกรณีต่าง ๆ โดยที่คุณลักษณะเชิงความถี่ของหม้อแปลงสภาพสมบูรณ์ได้ถูกวัดและบันทึกไว้เป็นฐานข้อมูลก่อนที่จะทำการจำลองให้เกิดความผิดปกติในลักษณะต่าง ๆ ขึ้นที่ตัวหม้อแปลง เช่น การลัดวงจรที่ต้นขดลวด ตรงกลางขดลวด และปลายขดลวด ผลตอบสนองต่อความถี่ที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนกับฐานข้อมูล รวมทั้งการจำลองความผิดปกติที่แทนหม้อแปลงเกิดการขยับ การยุบตัว หรือขดลวดเกิดการคลายตัว ซึ่งให้ผลตอบสนองต่อความถี่ไม่ได้แตกต่างจากฐานข้อมูลเดิมมากนัก นอกจากนี้แล้วการหาความสัมพันธ์และการเบี่ยงเบนสเปกตรัมตลอดความถี่ที่ทำการการวัด จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างของฐานข้อมูลกับกรณีที่เกิดความผิดปกติของข้อมูล ได้ชัดเจนมากขึ้น

คำสำคัญ: ผลตอบสนองต่อความถี่, การลัดวงจร, ลักษณะเฉพาะ

### Abstract

This paper presents the frequency response of faulty transformer compared with that of normal condition transformer, fingerprint. Short circuit of the transformer winding at top, middle, and bottom position are simulated and investigated. According to the test results, the frequency response of the faulty transformer is vividly different with its fingerprint. In the case of shorted laminates, loosened winding and buckling of the transformer core, the frequency response of each case is not much different with the fingerprint. Besides, the correlation coefficient and spectrum deviation are employed to analyze the different of frequency response of the faulty transformer from the fingerprint.

Keywords: Frequency Response Analysis, short turn, fingerprint

### 1. บทนำ

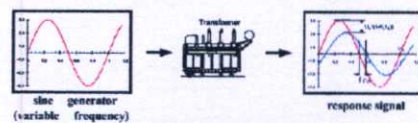
หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้านั้นเมื่อนำไปทำการติดตั้งในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า มีโอกาสได้รับแรงดันเกินซึ่งเกิด

การเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างกะทันหัน หรือการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ รวมทั้งที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติ แรงดันเกินดังกล่าวแม้จะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นๆ แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงดันเกินเหล่านี้มีผลกระทบต่อความคงทนของการฉนวนและขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นภายในตัวหม้อแปลงได้ ย่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงดังกล่าวนี้

การวัดผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response Analysis; FRA) คือ การวัดอิมพีแดนซ์ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่กว้าง และนำผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อ้างอิงที่เรียกว่า Fingerprint ซึ่งเป็นผลการวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงในสภาวะปกติสมบูรณ์ Fingerprint จะมีประโยชน์มากโดยจะนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลงที่สงสัยว่าจะมีความผิดปกติหรืออยู่ในสภาพที่ไม่สมบูรณ์ เช่นการตรวจสอบ FRA ของหม้อแปลงหลังจากที่ผ่านการตรวจสอบจากความผิดปกติใด ๆ ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง หรือการตรวจสอบหม้อแปลงที่ผ่านการขนย้ายเป็นระยะทางไกล ๆ ซึ่งอาจทำให้แกนเหล็กเกิดการคลายตัว ขดลวดอาจจะหลุดหลวมจากจุดต่อเป็นต้น การทำ FRA จัดว่าเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ความแตกต่างของ Fingerprint กับ FRA ในขณะนั้นของหม้อแปลง จะบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ [1-2]

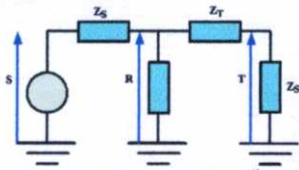
### 2. หลักการเบื้องต้น

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การวัดผลตอบสนองทางความถี่ คือ การวัดอิมพีแดนซ์ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า การวัดผลตอบสนองทางความถี่สามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ Impulse Method และ Swept Frequency Method ในบทความนี้จะกล่าวถึงวิธี Swept Frequency เท่านั้น หลักการของวิธี Swept Frequency คือ การป้อนสัญญาณเข้าด้วยรูปคลื่นไซน์ที่เปลี่ยนแปลงค่าความถี่ได้แล้ววัดผลตอบสนองออกมา หลักการของวิธี Swept Frequency [2] แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 Swept Frequency Method

รูปที่ 1 แสดงการใช้วิธี Swept Frequency ผลที่ได้จะอยู่ในรูปของ Transfer Functions ในรูปของความถี่ (Frequency domain) จากหลักการที่กล่าวมาทำเป็นวงจรการวัดพื้นฐาน [3-5] ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรการวัดพื้นฐาน

เมื่อ S คือสัญญาณที่ป้อน,  $Z_s$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล, R คือสัญญาณที่อ้างอิง,  $Z_r$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดหม้อแปลง, T คือสัญญาณเอาต์พุต

ผลที่ได้จากการวัดผลตอบสนองความถี่ นำไปหาค่า Transfer Functions โดยการแปลงเป็นอัตราขยายให้อยู่ในรูปเดซิเบล (dB) แสดงสมการที่ 1

$$dB = 20 \log_{10}(T/R) \tag{1}$$

จากรูปที่ 2 วงจรพื้นฐาน เมื่อทำการทรานส์ฟอร์มฟังก์ชันได้สมการที่เป็นอัตราขยายคือ

$$dB = 20 \log_{10}\left(\frac{Z_s}{Z_s + Z_r}\right) \tag{2}$$

### 3. เครื่องมือในการวิเคราะห์ [1]

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลจาก Fingerprint กับข้อมูลที่เกิดจากความผิดพลาดต่าง ๆ ผู้วิจัยได้ใช้หลักการของการเปรียบเทียบข้อมูล 2 วิธีคือ

1 การเปรียบเทียบด้วยสายตา (By eye)

จัดว่าเป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นโดยการใช้สายตามองหาความแตกต่างของข้อมูล การวิเคราะห์แบบนี้ผู้ที่ทำการวิเคราะห์จะต้องมีความชำนาญมาก ๆ จึงจะสามารถวิเคราะห์ได้

2 การเปรียบเทียบด้วยวิธีทางสถิติ

เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติเข้ามาช่วย ให้ค่าออกมาเป็นตัวเลขทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ตัดสินใจ ในบทความนี้จะกล่าวถึงตัวชี้วัดที่นิยมใช้ 2 ตัว คือ Correlation Coefficient ( $\rho$ ) และ Spectrum Deviation ( $\sigma$ )

#### 3.1 Correlation Coefficient ( $\rho$ )[1,3]

นิยาม พิจารณาเซตสองเซตของตัวเลขจำนวน  $n$  ตัว คือ  $X \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$  และ  $Y \{ y_1, y_2, \dots, y_n \}$  ค่า Correlation Coefficient ระหว่าง  $X$  และ  $Y$  หาได้จากสมการที่ 3

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2}} \tag{3}$$

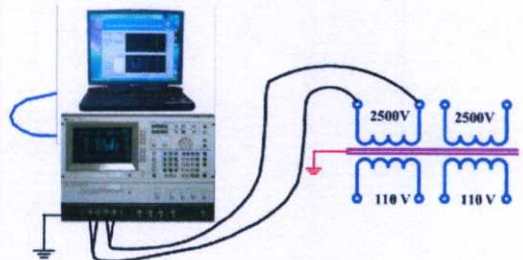
#### 3.2 Spectrum Deviation ( $\sigma$ ) [1,3]

นิยาม พิจารณาเซตสองเซตของตัวเลขจำนวน  $n$  ตัว คือ  $X \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$  และ  $Y \{ y_1, y_2, \dots, y_n \}$  ค่า Spectrum Deviation ระหว่าง  $X$  และ  $Y$  หาได้จากสมการที่ 4

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \left[ \frac{x_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right] + \left[ \frac{y_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right] \right| \tag{4}$$

### 4. การจำลองความคิดพ่วง

งานวิจัยนี้ได้จำลองความคิดพ่วงของหม้อแปลงเฟสเดียว พิกัด 220 V / 5000 V 5 kVA ก่อนการจำลองจะต้องวัดผลตอบสนองความถี่เก็บไว้ก่อนเพื่อทำเป็น fingerprint วงจรการทดลองแสดงดังรูปที่ 3 โดยทำการป้อนแรงดัน  $\pm 40$  โวลต์ ความถี่ช่วง 100Hz - 2 MHz ให้กับขดลวดแรงดันสูง แล้ววัดผลตอบสนองเชิงความถี่ออกมา



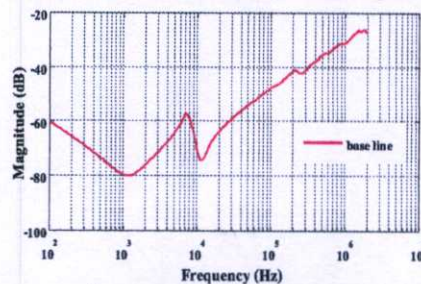
รูปที่ 3 วงจรการทดลอง



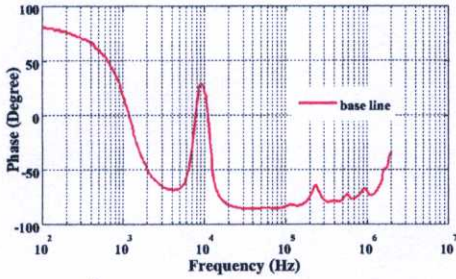
เครื่องวัดผลตอบสนองทางความถี่ (FRA)

รูปที่ 4 วงจรการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางความถี่

ผลการวัดผลตอบสนองความถี่แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งจะแสดงผลออกมาในรูปของอัตราขยาย (dB) เทียบกับความถี่ (Frequency) และเป็นมุมเฟส (Degree) เทียบกับความถี่ (Frequency) แสดงดังรูปที่ 6

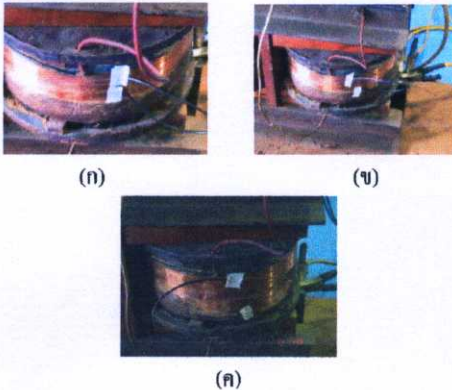


รูปที่ 5 Fingerprint (dB and frequency)

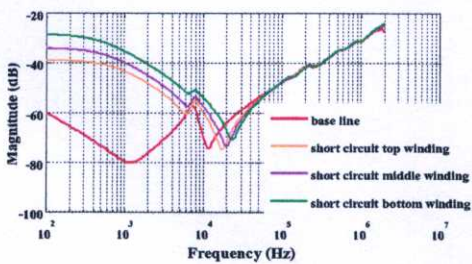


รูปที่ 6 Fingerprint (Degree and frequency)

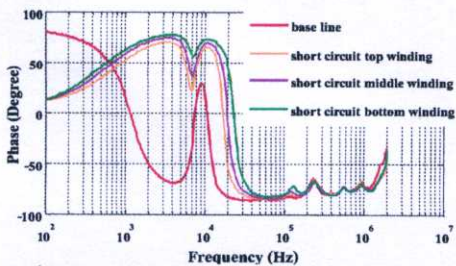
การจำลองความผิดพลาดของงานวิจัยชิ้นนี้ได้จำลองความผิดพลาดไว้ 6 กรณีศึกษา คือ กรณีศึกษาที่ 1 เกิดการลัดวงจรที่ต้นคอล์ย (short circuit top winding) กรณีศึกษาที่ 2 เกิดการลัดวงจรที่ต้นคอล์ยกับตรงกลางคอล์ย (short circuit middle winding) กรณีศึกษาที่ 3 เกิดการลัดวงจรที่ต้นคอล์ยกับด้านล่างสุดของคอล์ย (short circuit bottom winding) แสดงดังรูปที่ 7 ก, ข และ ค ตามลำดับ ผลการวัดผลตอบสนองความถี่เมื่อเปรียบเทียบกับ Fingerprint แสดงดังรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 7 การจำลองการลัดวงจร



รูปที่ 8 กรณีศึกษาเปรียบเทียบเชิงขนาดผลจากการลัดวงจร



รูปที่ 9 กรณีศึกษาเปรียบเทียบเชิงมุมผลจากการลัดวงจร

จากรูปที่ 8 และ 9 ใช้ข้อมูลทางสถิติมาช่วยจะทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายขึ้นแสดงดังตารางที่ 1, 2 และ 3 การหาคุณลักษณะทางสถิติจะทำการคำนวณหาความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างข้อมูล Fingerprint กับข้อมูลในกรณีศึกษา ซึ่งผลตอบสนองที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็นช่วงความถี่ 5 ช่วง จาก 100 Hz – 2 MHz โดยที่หมีอแปลงที่มีสภาพสมบูรณ์ควรมีค่า Correlation Coefficient ใกล้เคียง 1 และค่า Spectrum Deviation เข้าใกล้ 0

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 1

Frequency-Band	ตัวชี้วัดทางสถิติ กรณีศึกษาที่ 1	
	Correlation Coefficient	Spectrum Deviation
100 Hz – 1 kHz	0.9356	0.7287
1 kHz – 10 kHz	-0.9231	0.4933
10 kHz – 100 kHz	0.8188	0.1914
100 kHz – 1 MHz	0.9997	0.0459
1 MHz – 2 MHz	0.9044	0.1495

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 2

Frequency-Band	ตัวชี้วัดทางสถิติ กรณีศึกษาที่ 2	
	Correlation Coefficient	Spectrum Deviation
100 Hz – 1 kHz	0.9441	0.7983
1 kHz – 10 kHz	-0.9437	0.5557
10 kHz – 100 kHz	0.6978	0.2213
100 kHz – 1 MHz	0.9974	0.0786
1 MHz – 2 MHz	0.9272	0.1388

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 3

Frequency-Band	ตัวชี้วัดทางสถิติ กรณีศึกษาที่ 3	
	Correlation Coefficient	Spectrum Deviation
100 Hz – 1 kHz	0.9541	0.8808
1 kHz – 10 kHz	-0.9489	0.6993
10 kHz – 100 kHz	0.4840	0.2391
100 kHz – 1 MHz	0.9972	0.0775
1 MHz – 2 MHz	0.9316	0.1355

ผลทางสถิติที่ได้จากการเปรียบเทียบข้อมูล Fingerprint กับกรณีลัดวงจรทั้ง 3 กรณี ในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz จะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนจากค่า Spectrum Deviation

กรณีศึกษาที่ 4 แกนของหมีอแปลงเกิดการขยับ (Shorted laminates) กรณีศึกษาที่ 5 ขดลวดของหมีอแปลงเกิดการคลายตัว (loosened) กรณีศึกษาที่ 6 ขดลวดของหมีอแปลงเกิดการยุบตัวในแนวแกนที่พัน (buckling) แสดงดังรูปที่ 10 ก, ข และ ค ตามลำดับ ผลการวัดผลตอบสนองความถี่เมื่อเปรียบเทียบกับ Fingerprint แสดงดังรูปที่ 11 และ 12



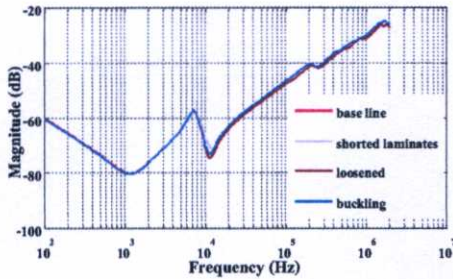
(ก)

(ข)

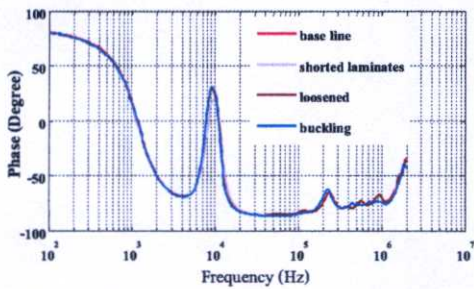


(ค)

รูปที่ 10 การจำลองความผิดพลาด



รูปที่ 11 กรณีศึกษาเปรียบเทียบเชิงขนาดผลจากความผิดพลาด



รูปที่ 12 กรณีศึกษาเปรียบเทียบเชิงมุมผลจากความผิดพลาด

จากรูปที่ 11 และ 12 ใช้ข้อมูลทางสถิติมาช่วยจะทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น แสดงดังตารางที่ 4, 5 และ 6

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 4

Frequency-Band	ตัวชี้วัดทางสถิติ กรณีศึกษาที่ 4	
	Correlation Coefficient	Spectrum Deviation
100 Hz – 1 kHz	0.9999	0.0813
1 kHz – 10 kHz	0.9934	0.0636
10 kHz – 100 kHz	0.9952	0.1340
100 kHz – 1 MHz	0.9973	0.1434
1 MHz – 2 MHz	0.9809	0.2006

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 5

Frequency-Band	ตัวชี้วัดทางสถิติ กรณีศึกษาที่ 5	
	Correlation Coefficient	Spectrum Deviation
100 Hz – 1 kHz	0.9999	0.0428
1 kHz – 10 kHz	1.0000	0.0234
10 kHz – 100 kHz	1.0000	0.0179
100 kHz – 1 MHz	1.0000	0.0257
1 MHz – 2 MHz	0.9991	0.0596

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ของกรณีศึกษาที่ 6

Frequency-Band	ตัวชี้วัดทางสถิติ กรณีศึกษาที่ 6	
	Correlation Coefficient	Spectrum Deviation
100 Hz – 1 kHz	0.9999	0.0488
1 kHz – 10 kHz	1.0000	0.0300
10 kHz – 100 kHz	0.9997	0.1310
100 kHz – 1 MHz	0.9974	0.1397
1 MHz – 2 MHz	0.9815	0.1899

คุณสมบัติเชิงสถิติที่ได้จากการเปรียบเทียบข้อมูล Fingerprint กับกรณีศึกษา พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก

### 5. สรุป

จากกรณีศึกษาทั้ง 6 กรณี การเปลี่ยนแปลงภายในหม้อแปลง ในกรณีต่าง ๆ ย่อมส่งผลให้เกิดผลตอบสนองทางความถี่ที่แตกต่างกัน จากการวัดผลตอบสนองทางความถี่ทั้ง 6 กรณีศึกษา ทำให้สามารถทราบถึงสภาพการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ทั้งในส่วนของแกนเหล็กและในส่วน ของขดลวด ข้อมูลจากการวัดผลตอบสนองทางความถี่ควรใช้การ เปรียบเทียบด้วยตัวชี้วัดวิธีทางสถิติ คือ Correlation Coefficient และ Spectrum Deviation ซึ่งให้ความถูกต้องมากกว่าการเปรียบเทียบด้วย สายตาในกรณีที่การวัดผลตอบสนองทางความถี่ที่คล้ายกันมาก ๆ สำหรับการ ทดสอบเพื่อวัดผลตอบสนองทางความถี่นั้น ควรหลีกเลี่ยงบริเวณที่มี สัญญาณรบกวนซึ่งจะส่งผลต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย ที่ได้อำนวยความสะดวกในการทดสอบ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว, “การวินิจฉัยสภาพขดลวดหม้อแปลงด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่”, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [2] นรเศรษฐ พัฒนเดช, “High Voltage Insulation maintenance, Examination and Diagnosis” เอกสารประกอบการเรียนการสอน รายวิชา Selected Topics in High Voltage Engineering, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [3] Simon A. Ryder, “Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements”, Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, MA USA, April 7-10, 2002
- [4] Simon A. Ryder, “Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume 19, Page 16 – 22, March – April, 2003.
- [5] Tony McGrail Doble Engineering, “SFRA Basic Analy Volume 1”, July 14, 2003

## ประวัติผู้เขียน

นายภูชิต ถึงสุข เกิดเมื่อวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ.2525 ที่จังหวัด นครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และประกาศ นียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิคนครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า กำลัง จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยนักวิจัยห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง

