

ปกิโทสมุดกอง พระจอมเกล้าอาครกระบัง

**การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า
(TESTING OF POWER TRANSFORMER)**

โดย

นายวิศรุต	เล็กอุทัย
นายวุฒิชัย	นันตา
นายสิทธา	ชอบเขต

๒๗
๗๕๒๗
๒๕๕๐

เลขที่.....
82949
เดือน.....
พ.ค. ๒๙ ก.ค. ๒๕๕๑

b. 11956860
i.....

**ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๐**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า
(TESTING OF POWER TRANSFORMER)

โดย

นายวิศรุต	เล็กอุทัย
นายวุฒิชัย	หันตา
นายสิทธิธา	ขอบเขต

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.นรเศรษฐ พัฒนเดช
อ.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

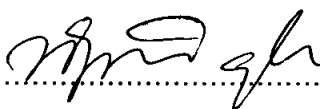
เรื่อง การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นายวิศรุต เล็กอุทัย
2. นายวุฒิชัย นันตา
3. นายสิทธา ขอบเขต



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

นายวิศรุต	เล็กอุทัย	
นายวุฒิชัย	นันดา	
นายสิทธิธา	ชอบเขต	
อ.นรเศรษฐ์	พัฒน์เดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาวิธีการทดสอบหม้อแปลงกำลัง 3 เฟส 24/12 kV 50 Hz ตามมาตรฐาน IEC 60076 ประกอบด้วยรายละเอียดการทดสอบและผลการทดสอบในหัวข้อต่อไปนี้ การวัดค่าความต้านทานของขดลวด, การหาอัตราส่วนแรงดัน, การวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า, การวัดค่าความคงทนจนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีประโยชน์อย่างมากต่อการประเมินวินิจฉัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง

TESTING OF POWER TRANSFORMER

Wisaroot	Lekuthai	
Woothichai	Nanta	
Sittha	Khobkhet	
Norasage	Pattanadech	Supervisor
Peerawut	Yuthagowith	Supervisor

2007

ABSTRACT

This paper represents the test results of 3 phase Power Transformer 24/12 kV 50 Hz complied with IEC 60076. Test items are composed of measuring winding resistance, voltage ratio, no load and on load power loss and basic lightning insulation level. The test results are very useful for evaluation and diagnosis transformer insulation system.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือเป็นอย่างดี จากหลายฝ่ายๆ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช และอาจารย์พีรฤทธิ ยุทธโกวิท ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ช่วยชี้แนะให้คำปรึกษาสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่การศึกษา ค้นคว้าหาข้อมูลเพื่อจัดทำโครงการ ตลอดทั้งปีการศึกษา 2550 โดยมีเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย รวมถึงตรวจสอบและแก้ไขปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณพิสิษฐ ศักดิ์จิรรัตน์ และพี่ๆ ที่ห้องทดสอบที่ บริษัทเอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด ทุกคน ที่ให้ความรู้ที่มีประโยชน์และให้คำปรึกษาในการทำโครงการ รวมถึงสถานที่ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นหัวข้อหนึ่งในปริญญาานิพนธ์นี้

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณภูษิต ถึงสุข รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท ที่ช่วยให้คำแนะนำ และให้การดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ อีกทั้งขอบคุณเพื่อนร่วมงานและสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมแรงสูงทุกคน ที่คอยช่วยเหลือในทุกๆด้าน และคอยให้กำลังใจในการทำงานเสมอ จนกระทั่งโครงการสำเร็จด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่สนับสนุนทางด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน อีกทั้งช่วยเหลือทางด้านการเงินและให้กำลังใจ ซึ่งเป็นสิ่งที่มีค่ามากในยามที่เกิดความท้อแท้ หรือความอ่อนล้า จากการทำงาน ทำให้มีกำลังใจที่จะต่อสู้ฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ จนประสบความสำเร็จได้

คณะผู้จัดทำ

IV สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	IX
สารบัญตาราง.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	4
2.2 ทฤษฎีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	5
2.2.1 การทดสอบที่ต้องทำเป็นประจำ (Routine test)	5
2.2.2 การทดสอบเฉพาะลักษณะบางประการของหม้อแปลง Type or design test)	6
2.2.3 การทดสอบลักษณะพิเศษของหม้อแปลง (Special test).....	6
2.3 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด.....	8
2.3.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	8
2.3.2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ.....	8
2.3.3 ทฤษฎีและวิธีการวัด.....	9
2.3.4 กระบวนการในการทดสอบ.....	10
2.3.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความต้านทานของขดลวด.....	10
2.4 การหาอัตราส่วนแรงดัน กลุ่มของเวคเตอร์ การระบุมุมเฟส.....	11
2.4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	11
2.4.2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ.....	11
2.4.3 วงจรทดสอบ.....	14
2.4.4 กระบวนการวัดอัตราส่วนแรงดัน.....	21
2.4.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความต้านทานของขดลวด.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5	การวัดค่าแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ขณะทำการลัดวงจร และค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า.....	22
2.5.1	วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	22
2.5.2	ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ.....	23
2.5.3	วงจรทดสอบ.....	28
2.5.4	กระบวนการวัด.....	30
2.5.5	การคำนวณผลการทดสอบ.....	31
2.5.6	ค่าที่ยอมรับได้ของการทดสอบ.....	32
2.6	การวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า และค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	33
2.6.1	วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	33
2.6.2	ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ.....	33
2.6.3	วงจรทดสอบ.....	39
2.6.4	กระบวนการทดสอบ	44
2.6.5	การคำนวณผลการทดสอบ.....	45
2.6.6	ค่าที่ยอมรับได้ของการทดสอบ.....	46
2.7	การวัดค่าความทนของฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับ จากแหล่งจ่ายภายนอก.....	46
2.7.1	วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	46
2.7.2	ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ.....	46
2.7.3	กระบวนการทดสอบ.....	46
2.7.4	หลักการในการทดสอบและการต่อวงจร.....	47
2.7.5	ระยะเวลาในการทดสอบ.....	48
2.8	การทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ.....	48
2.8.1	วัตถุประสงค์.....	48
2.8.2	ลักษณะทั่วไป.....	48
2.8.3	หลักการในการทดสอบ.....	50
2.8.4	สิ่งที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	50
2.8.5	ขั้นตอนและการต่อวงจรในการทดสอบ.....	51
2.8.6	ระยะเวลาในการทดสอบ.....	52
2.9	การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน.....	54
2.9.1	วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	54
2.9.2	ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ.....	54

VI

2.9.3	หลักการวัดค่าการดิซซาร์จบางส่วน.....	55
2.9.4	การวัดค่าการดิซซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	57
2.9.5	กระบวนการวัดการดิซซาร์จบางส่วน.....	62
2.9.6	กระบวนการสืบหาแหล่งกำเนิดการดิซซาร์จบางส่วน.....	64
2.9.7	ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าการดิซซาร์จบางส่วน.....	67
2.10	การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซิ่ง.....	68
2.10.1	วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	68
2.10.2	ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ.....	68
2.10.3	หลักการทั่วไปในการทดสอบ.....	70
2.10.4	วงจรการทดสอบ.....	73
2.10.5	กระบวนการทดสอบ.....	77
2.10.6	การบันทึกผลการทดสอบ.....	79
2.10.7	การประเมินผลการทดสอบและการตรวจความผิดพลาดของฉนวน.....	79
2.11	การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของหม้อแปลง (Temperature rise).....	80
2.11.1	จุดประสงค์ของการทดสอบ.....	80
2.11.2	หลักการทั่วไปในการทดสอบ.....	80
2.11.3	วงจรทดสอบ.....	83
2.11.4	กระบวนการทดสอบ.....	84
2.11.5	ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดสอบ.....	89
2.11.6	การประเมินผลการทดสอบ.....	90
2.12	การวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์.....	90
2.12.1	จุดประสงค์ของการวัด.....	90
2.12.2	ลักษณะทั่วไป.....	90
2.12.3	คำนิยามของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์.....	91
2.12.4	กระบวนการวัด.....	92
2.13	การวัดระดับของเสียง.....	93
2.13.1	จุดประสงค์ของการวัด.....	93
2.13.2	ลักษณะทั่วไป.....	93
2.13.3	การวัดและวงจรในการวัดเสียง.....	94
2.13.4	ข้อปฏิบัติในการวัด.....	97
2.13.5	ค่าที่ยอมรับได้ของการทดสอบ.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VII

2.14	การทดสอบการเปลี่ยนแท่งขดลวดที่มีภาระทางไฟฟ้าและอุปกรณ์อื่นๆ.....	101
2.14.1	วัตถุประสงค์.....	101
2.14.2	กระบวนการทดสอบ.....	101
2.14.3	การทดสอบอุปกรณ์อื่นๆ.....	102
2.15	การวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	102
2.15.1	จุดประสงค์ของการทดสอบ.....	102
2.15.2	หลักการทั่วไป.....	102
2.15.3	วงจรการวัด.....	102
2.15.4	กระบวนการวัด.....	102
2.15.5	ค่าที่ได้จากการวัด.....	104
2.16	การวัดค่าความต้านทานของฉนวน.....	105
2.16.1	วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	105
2.16.2	ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ.....	105
2.16.3	วงจรการวัดและกระบวนการวัด.....	105
2.17	การวัดค่าประกอบการกระจายตัว (tan δ) ของค่าความเก็บประจุ ในระบบฉนวน.....	106
2.17.1	จุดประสงค์การทำการวัด.....	106
2.17.2	หลักการทั่วไปในการทดสอบ.....	106
2.17.3	วงจรและกระบวนการทดสอบ.....	107
บทที่ 3	หม้อแปลงทดสอบและเครื่องมือที่ใช้การทดสอบ.....	111
3.1	หม้อแปลงทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบที่บริษัท เอบีบี (ประเทศไทยจำกัด).....	111
3.1.1	หม้อแปลงทดสอบ.....	111
3.1.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	112
3.1.2.1	เครื่องมือที่ทำหน้าที่ทางวงจรไฟฟ้า.....	112
3.1.2.2	เครื่องมือที่ใช้ในการวัด และบันทึกค่าต่างๆ จากการ ทดสอบ.....	114
3.1.2.3	เครื่องมือที่ช่วยในการวัดค่าต่างๆ.....	121
3.2	หม้อแปลงทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้า แรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....	124
3.2.1	หม้อแปลงทดสอบ.....	124
3.2.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	124
3.1.2.1	เครื่องมือที่ทำหน้าที่ทางวงจรไฟฟ้า.....	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IX

3.1.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวัด และบันทึกค่าต่างๆ จากการทดสอบ	124
3.1.2.3 เครื่องมือที่ช่วยในการวัดค่าต่างๆ.....	127
บทที่ 4 ตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	129
4.1 ตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่บริษัทเอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด....	129
4.1.1 การหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์.....	129
4.1.2 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด.....	131
4.1.3 การวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า และค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	136
4.1.4 การวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	139
4.1.5 การวัดค่าแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ขณะทำการลัดวงจรและค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า.....	141
4.1.6 การวัดหาค่าความทนของฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก.....	145
4.1.7 การทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ.....	147
4.1.8 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	148
4.1.9 การวัดค่าความต้านทานของฉนวน.....	163
4.1.10 การวัดค่าประกอบการกระจายตัว (tan δ) ของค่าความเก็บประจุในระบบฉนวน.....	165
4.2 ตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....	167
4.2.1 การหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์.....	167
4.2.2 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	170
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	187
5.1 สรุปผลการดำเนินงานโครงการ.....	187
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	188
เอกสารอ้างอิง	189
ภาคผนวก	190

IX สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.2 วงจรการวัดวิธีใช้โวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์.....	11
2.3 วงจรการวัดวิธีเคลวิน (ชอมป์สัน) บริดจ์.....	11
2.4 ลักษณะการตั้งสัญญาณตามลักษณะการต่อของขดลวด.....	13
2.5 วงจรการวัดอัตราส่วนแรงดันวิธีใช้โวลต์มิเตอร์สองตัว.....	14
2.6 วงจรการทดสอบขั้วของหม้อแปลงหนึ่งเฟสวิธีอนุกรมขดลวดแรงดัน.....	15
2.7 วงจรการทดสอบขั้วของหม้อแปลงหนึ่งเฟสวิธีขนานขดลวดแรงดัน.....	15
2.8 วงจรการทดสอบขั้วของหม้อแปลงสามเฟสวิธีใช้โวลต์มิเตอร์.....	15
2.9 วงจรการทดสอบขั้วของหม้อแปลงโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	15
2.10 ลักษณะทั่วไปของวงจรบริดจ์.....	16
2.11 การต่อวงจรบริดจ์กับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	16
2.12 การต่อวงจรบริดจ์กับหม้อแปลงอัตโนมัติหนึ่งเฟส.....	16
2.13 การเปรียบเทียบแรงดันที่ได้วิธีใช้วงจรบริดจ์.....	17
2.14 การกระจายตัวของฟลักซ์ในขณะที่ทำการทดสอบหม้อแปลงแบบ Yy และความเสียหายที่เกิดขึ้น.....	18
2.15 การจับคู่วัดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงอัตโนมัติสามเฟสที่มี จุดนิวตรอนอยู่ภายนอก.....	19
2.16 การจับคู่วัดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงอัตโนมัติสามเฟสที่ไม่มี จุดนิวตรอนอยู่ภายนอก.....	19
2.17 การจับคู่วัดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงอัตโนมัติสามเฟสที่มีการต่อ แบบเดลต้า.....	20
2.18 การจับคู่วัดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงเรียงกระแส.....	20
2.19 การจับคู่วัดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงเรียงกระแสที่มีการต่อแบบสตาร์.....	21
2.20 การเปรียบเทียบแรงดันด้วยเฟสไดอะแกรมเพื่อตรวจสอบขั้วของหม้อแปลง.....	22
2.21 วงจรสมมูลของหม้อแปลงในขณะที่ทำการลัดวงจร.....	24
2.22 เฟสเซอร์ไดอะแกรมในขณะที่ทำการลัดวงจร.....	24
2.23 วงจรการทดสอบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	29
2.24 วงจรการทดสอบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสวิธีใช้โวลต์มิเตอร์สองตัว.....	29
2.25 วงจรการทดสอบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสวิธีใช้โวลต์มิเตอร์สามตัว.....	29
2.26 ขั้นตอนการคำนวณค่าภาระทางไฟฟ้าขณะมีภาระทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัด.....	32
2.27 วงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X

2.28	เวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	33
2.29	ฮิสเตอร์ซิสลูป.....	34
2.30	แสดงแรงดันที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย.....	36
2.31	กราฟแสดงพฤติกรรมการเป็นแม่เหล็กของแกนเหล็ก.....	39
2.32	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จ่าย กระแสขณะหม้อแปลงไม่มี ภาระทางไฟฟ้าและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก.....	39
2.33	วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าของ หม้อแปลงหนึ่งเฟสโดยจ่ายแรงดันไลน์ทูนิวทรัล.....	40
2.34	วงจรมุมแสดงพฤติกรรมของกระแสเชิงความจุ โดยการจ่ายแรงดัน ไลน์ทูนิวทรัล.....	40
2.35	วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าของ หม้อแปลงหนึ่งเฟสโดยจ่ายแรงดันไลน์ทูไลน์.....	41
2.36	วงจรมุมแสดงพฤติกรรมของกระแสเชิงความจุ โดยการจ่ายแรงดัน ไลน์ทูไลน์.....	42
2.37	ตารางแสดงการต่อวงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มี ภาระทางไฟฟ้าแบบต่างๆ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส.....	42
2.38	วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Y_d , Y_{Nd} และ D_d	43
2.39	วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ D_{yn}	43
2.40	วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Y_{yn} และ Y_{Nyn}	44
2.41	วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Y_y และ Y_{Ny}	44
2.42	วงจรการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับ จากแหล่งจ่ายภายนอกสำหรับหม้อแปลงสามเฟส.....	48
2.43	วงจรพื้นฐานของการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ.....	51
2.44	กราฟแสดงเวลาและแรงดันของการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับระยะสั้น.....	52
2.45	กราฟแสดงเวลาและแรงดันของการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับระยะยาว.....	53
2.46	กราฟแสดงเวลาในการทดสอบของหม้อแปลงที่ใช้มาตรฐาน IEEE สำหรับหม้อแปลงประเภท 2.....	53
2.47	วงจรมุมของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของหม้อแปลง.....	54
2.48	วงจรมุมของการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.49	วงจรที่ใช้ทดสอบเมื่อไม่มีบุขซึ่ง.....	56
2.50	ระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	57
2.51	วงจรที่ใช้ทดสอบและเปรียบเทียบการดิสชาร์จบางส่วนสำหรับบุขซึ่งที่มี คาปาซิทีฟแทป.....	58
2.52	วงจรที่ใช้ทดสอบและเปรียบเทียบการดิสชาร์จบางส่วน สำหรับบุขซึ่งที่ไม่มี คาปาซิทีฟแทป.....	58
2.53	ผลกระทบของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวต่อความไวในการวัด.....	61
2.54	การตรวจจับสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้วิธี PRPDA.....	65
2.55	การตรวจจับสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนโดยระบบวัดแบบดั้งเดิม.....	67
2.56	ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม.....	69
2.57	ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ.....	69
2.58	ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่ง.....	69
2.59	วงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	70
2.60	ลักษณะทางเดินของกระแสขณะทำการสะสมแรงดัน.....	70
2.61	ลักษณะทางเดินของกระแสขณะทำการปล่อยแรงดัน.....	71
2.62	วงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	73
2.63	ลักษณะต่างๆ ของการต่อวงจรทดสอบเข้ากับขดลวดแรงดัน.....	75
2.64	ลักษณะต่างๆ ของการต่อวงจรทดสอบเข้ากับขดลวดแรงดัน สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส.....	75
2.65	ลักษณะต่อวงจรทดสอบเข้ากับขดลวดแรงดันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่ง.....	77
2.66	ลักษณะต่อวงจรทดสอบเข้ากับขดลวดแรงดันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส.....	78
2.67	ไดอะแกรมขั้นตอนการทำงานทดสอบ.....	81
2.68	ลักษณะของอุณหภูมิต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง.....	82
2.69	วงจรการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของหม้อแปลง.....	84
2.70	วงจรการวัดค่าความต้านทานขณะทำการตัดวงจรจ่ายกำลังไฟ.....	85
2.71	การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำมันในกรณีต่างๆ.....	86
2.72	การเปลี่ยนของอุณหภูมิขณะทำการทดสอบ.....	88
2.73	ลักษณะของกราฟที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานของขดลวด ขณะทำการตัดวงจร.....	88
2.74	วงจรพื้นฐานของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์.....	92
2.75	วงจรทั่วไปในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (ในรูปเป็นการยกตัวอย่าง การต่อแบบสตาร์-เดลต้า)	92

XII

2.76	แกนเหล็กแบบต่าง ๆ.....	93
2.77	การทดสอบที่มีการต่อแบบต่าง ๆของหม้อแปลง ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ลำดับศูนย์.....	97
2.78	ตำแหน่งที่สำคัญของไมโครโฟนในการวัดระดับเสียงของหม้อแปลง ที่ไม่ใช้ระบบระบายความร้อน.....	103
2.79	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแกนเหล็กกับความหนาแน่นของฟลักซ์.....	104
2.80	การเกิดฮาร์โมนิกในฟังก์ชันของความหนาแน่นของฟลักซ์.....	104
2.81	รูปวงจรรวัดค่าฮาร์โมนิก.....	105
2.82	วงจรรวัดค่าความต้านทานของฉนวน.....	106
2.83	วงจรรวัดค่าประกอบกำลังและค่าความเก็บประจุของขดลวด.....	108
2.84	แสดงลักษณะของวงจรรบริดจ์ที่มีเครื่องเปรียบเทียบกระแสและไมโครโปรเซสเซอร์..	109
2.85	ลักษณะการแสดงกระแสของหม้อแปลง (I _r)	109
2.86	วงจรรทดสอบแบบดับเบิลเทสต์.....	109
3.1	หม้อแปลงที่จะทำการทดสอบ.....	111
3.2	ป้ายบอกพิกัดของหม้อแปลงที่จะทำการทดสอบ.....	111
3.3	ชุดควบคุมการขึ้นแรงดันของเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้าพิกัด 50Hz.....	112
3.4	ชุดควบคุมการขึ้นแรงดันของเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้า พิกัด 200 Hz.....	113
3.5	หม้อแปลงแคสเคด จ่ายแรงดันได้ 350 kV.....	113
3.6	เครื่องวัดค่าความต้านทานของขดลวด.....	114
3.7	เครื่องตรวจสอบกลุ่มของเวคเตอร์ และวัดอัตราส่วนของหม้อแปลง.....	114
3.8	เครื่องวัดแรงดัน กระแส และพลังงานที่จ่ายให้กับหม้อแปลงทดสอบ.....	115
3.9	เครื่อง NORMA ขณะทำการวัดค่าฮาร์โมนิก.....	115
3.10	เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับแหล่งจ่ายภายนอก.....	116
3.11	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 16 ชั้น 1600 kV.....	116
3.12	ชุดควบคุมและแสดงผลการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์.....	117
3.12	ชุดสร้างรูปคลื่นชอป.....	117
3.13	เครื่องวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน.....	118
3.14	ตัวกรองสัญญาณในการวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน.....	118
3.15	เครื่องวัดค่าความต้านทานของฉนวน.....	119
3.16	เครื่องวัดค่าประกอบกำลังของฉนวน (tan δ).....	119
3.17	เครื่องวัดความระดับเสียงของหม้อแปลง.....	120
3.18	สายเทอร์โมคูเบิลที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ.....	120
3.19	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยรอบหม้อแปลง.....	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XIII

3.20	หม้อแปลงแรงดัน และหม้อแปลงกระแส.....	122
3.21	โวลต์เดจติไวเตอร์สำหรับแรงดันอิมพัลส์.....	122
3.22	โวลต์เดจติไวเตอร์สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	122
3.23	ตัวเก็บประจุขนาด 2000 pF.....	123
3.24	ตัวต้านทานชนิด ใช้ในการอ่านค่ากระแสอิมพัลส์.....	123
3.25	หม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ.....	124
3.26	หม้อแปลงปรับขึ้นแรงดัน.....	125
3.27	เครื่องตรวจสอบกลุ่มของเวคเตอร์ และวัดอัตราส่วนของหม้อแปลง.....	125
3.28	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	126
3.29	เครื่องมือที่ใช้ในการปรับระยะเก็บและอ่านค่าแรงดัน.....	126
3.30	ออสซิลโลสโคป.....	126
3.29	โวลต์เดจติไวเตอร์ที่ใช้สำหรับอ่านค่าแรงดันอิมพัลส์.....	127
3.30	ตัวต้านทานชนิด ใช้ในการอ่านค่ากระแสอิมพัลส์.....	127
3.31	ดีไวเตอร์ที่ใช้สำหรับตรวจจับแรงดันอิมพัลส์.....	128
4.1	วงจรทดสอบหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวคเตอร์.....	129
4.2	ขั้นตอนการทดสอบการหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวคเตอร์.....	130
4.3	วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวด.....	132
4.4	ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าความต้านทานของขดลวด.....	133
4.5	วงจรทดสอบหาค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า และค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	137
4.6	ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า และค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	138
4.7	วงจรทดสอบหาค่าฮาร์โมนิกของกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	139
4.8	ขั้นตอนการทดสอบ (เนื่องจากใช้วงจรการทดสอบเหมือนกับการวัดค่าความ สูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า เพราะฉะนั้น จึงมีเพียงสองขั้นตอน)	140
4.9	วงจรทดสอบหาค่าแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ขณะทำการลัดวงจรและค่าความ สูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า.....	141
4.10	ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ขณะทำการลัดวงจรและ ค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า.....	142
4.11	วงจรทดสอบหาค่าความคงทนจนวนต่อแรงดันกระแสสลับจาก แหล่งจ่ายภายนอก.....	145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XIV

4.12	ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก.....	146
4.13	วงจรทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ.....	147
4.14	ขั้นตอนการทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ.....	148
4.15	วงจรทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	149
4.16	ขั้นตอนการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	162
4.17	วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวน ในกรณีต่างๆ.....	163
4.18	ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าความต้านทานของฉนวน ในกรณีต่างๆ.....	164
4.19	วงจรทดสอบหาค่าประกอบการกระจายตัว ($\tan \delta$) ของค่าความเก็บประจุในระบบฉนวน.....	165
4.20	ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าประกอบการกระจายตัว ($\tan \delta$) ของค่าความเก็บประจุในระบบฉนวน.....	166
4.21	วงจรทดสอบหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์.....	167
4.22	ขั้นตอนการทดสอบหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์.....	168
4.23	วงจรทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	170
4.24	ขั้นตอนการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	171

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจัดประเภทการทดสอบของการทดสอบความคงทนของฉนวนตามแรงดันสูงสุดที่อุปกรณ์ของหม้อแปลงสามารถทนได้ ตามมาตรฐาน IEC.....	7
2.2 การด้อยลงของการทดสอบการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงที่มีสามขดลวดแรงดัน.....	31
2.3 ค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของฉนวนตามระดับแรงดัน U_m	47
2.4 แสดงการวัดค่าพหุคูณดิซฮาร์โมนิกในการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ.....	49
2.5 แสดงชนิดของแหล่งกำเนิดการดิซฮาร์โมนิกบางส่วนในระบบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า...	66
2.6 การตั้งค่ามาตรฐานเวลาสำหรับเครื่องมือวัดในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์.....	79
2.7 ตารางแสดงค่า x จากสมการที่ 2.90.....	87
4.1 ผลการทดสอบการหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์.....	130
4.2 ผลการทดสอบการหาค่าความต้านทานของขดลวด.....	132
4.3 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	137
4.4 ผลการทดสอบหาค่าฮาร์โมนิกของกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	140
4.5 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ขณะทำการลัดวงจรและค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า.....	143
4.6 ผลการทดสอบค่าความคงทนฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก.....	146
4.7 ผลการทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ.....	147
4.8 ผลการทดสอบหาความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	149
4.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บันทึกได้.....	150
4.10 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวน.....	164
4.11 ผลการทดสอบค่าประกอบการกระจายตัว ($\tan \delta$).....	166
4.12 ผลการทดสอบอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์.....	169
4.13 ผลการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	170
4.14 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บันทึกได้.....	172

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าจัดว่าเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันเพื่อให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งหม้อแปลงไฟฟ้านั้นต้องสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง และต้องมีความถูกต้องเหมาะสมกับลักษณะหน้าที่การทำงานที่หม้อแปลงจะถูกนำไปใช้งาน

ดังนั้นก่อนที่จะมีการนำหม้อแปลงไปใช้งานในสถานที่จริง จึงต้องมีการทำการทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลง รวมถึงการวัดและบันทึกค่าต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นการอ้างอิงสภาพการทำงานของหม้อแปลงขณะที่ยังไม่เกิดความชำรุดเสียหาย และการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการคำนวณอุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องและลึกซึ้งในรายละเอียด และเทคนิคต่าง ๆ ของการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า
2. สามารถทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบได้
3. เพื่อให้เกิดความรู้ความสามารถในการวิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

1.3 ขอบเขตของการทดสอบ

1. ทำการศึกษาวิธีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน
 - IEC60060-1 General definitions and test requirements
 - IEC60060-2 Measuring systems
 - IEC60060-3 Definitions and requirements for on-site test
 - IEC60076-1 General
 - IEC60076-2 Temperature rise
 - IEC60076-3 Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
 - IEC60076-4 Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors
 - IEC60076-5 Ability to withstand short circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEC60076-10 Determination of sound levels

IEC60076-10-1 Determination of sound levels – Application guide

IEC60354 Loading guide for oil immerse power transformers

IEEE Std C57.12.90-1999

IEEE Std C57.12.00-2000

IEEE Std C57.98-1993

2. ทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยอ้างอิงตามมาตรฐานข้างต้น
3. ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐานข้างต้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

หัวข้อการทำงาน	พ.ย.	มิ.ย.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้า	■■■■■				
2. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีการทดสอบหม้อแปลง	■■■■■	■■■■■			
3. ทำการศึกษาการทดสอบและเรียนรู้การใช้งานของเครื่องมือทดสอบจากห้องทดสอบจริง		■■■■■	■■■■■	■■■■■	
4. ทำการออกแบบการทดสอบสำหรับหม้อแปลงที่จะทำการทดสอบ				■■■■■	■■■■■
5. เตรียมตัวสอบปลายภาคเรียนที่ 1					■■■■■



ระยะเวลาที่วางแผนไว้

ระยะเวลาที่ทำงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อการทำงาน	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
6. ทบทวนมาตรฐานอีกครั้ง รวมถึงออกแบบกระบวนการทดสอบที่จะต้องไปทดสอบที่บริษัทเอบีบี (ประเทศไทยจำกัด)	████████				
7. ทดสอบหม้อแปลงและเก็บผลการทดสอบ ที่บริษัทเอบีบี (ประเทศไทยจำกัด)		████████			
8. ออกแบบรายงานผลการทดสอบที่ได้ไปทดสอบมา			████████		
9. ออกแบบกระบวนการทดสอบและทดสอบหม้อแปลงที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง				████████	
10. เตรียมตัวสอบปลายภาคเรียนที่ 2					████████

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้รับความรู้ในทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้า และการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างละเอียด ทำให้สามารถทำการทดสอบได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งทราบปัญหาและสามารถแก้ปัญหาต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดสอบได้อย่างถูกต้อง
2. สามารถนำการวิจัยนี้ไปเป็นคู่มือสำหรับการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า และเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับผู้ที่สนใจศึกษาในหัวข้อวิจัยนี้
3. สามารถนำหลักการการทดสอบหม้อแปลงในหัวข้อต่างๆ มาทำการพัฒนาเพื่อสร้างอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบหม้อแปลงได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

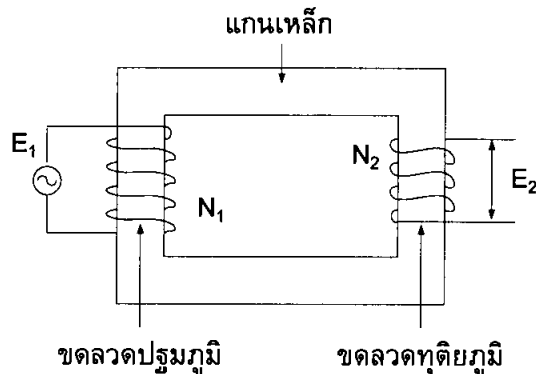
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง อาจสูงขึ้นหรือต่ำลง หรือเท่าเดิมก็ได้ เช่น หม้อแปลงขดลวดแยก หลักการทำงานของหม้อแปลงจะอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลง ประกอบด้วย แกนเหล็กซึ่งเป็นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก และมีขดลวดสองชุด ชุดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันเข้า อีกชุดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันออก พันอยู่บนแกนเหล็ก ดังรูป นอกจากแกนเหล็กและขดลวดแล้ว ก็มีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด

กำหนดให้	ϕ	คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก
	N_1	คือ จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนเข้า
	N_2	คือ จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายออก
	U_1	คือ แรงดันที่ป้อนเข้า
	U_2	คือ แรงดันที่จ่ายออก
	E_1	คือ แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า
	E_2	คือ แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านจ่ายออก
	I_1	คือ กระแสด้านป้อนเข้า
	I_2	คือ กระแสด้านจ่ายออก



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

$$e(t) = -N \frac{d(\phi)}{dt} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดทางด้านกำลังไฟฟ้าเข้าจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย

$$\varphi(t) = \varphi_{\max} \sin \omega t \quad (2.2)$$

ฉะนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอีกชุดหนึ่งด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออกเปลี่ยนไปตามเวลา คือ

$$e(t) = -N\omega\varphi_{\max} \cos \omega t \quad (2.3)$$

จะเห็นได้ว่าแรงดันเหนี่ยวนำ $e(t)$ จะนำหน้าเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก $\varphi(t)$ เป็นมุมทางไฟฟ้า $90^\circ (= \pi/2)$ แรงดันเหนี่ยวนำค่า r.m.s. คือ

$$E = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi f N \varphi_{\max} \quad (2.4)$$

$$E = 4.44 f N \varphi_{\max}$$

โดยที่ $\varphi_{\max} = B_{\max} A$

จะได้สมการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดของหม้อแปลง คือ

$$E = 4.44 f N B_{\max} A \quad (2.5)$$

2.2 ทฤษฎีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าจัดเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญในการผลิตหม้อแปลง อีกขั้นตอนหนึ่ง เพราะหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นมานั้นจะสามารถนำมาใช้งานได้หรือไม่ มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีเพียงใด และมีความถูกต้องตรงตามข้อตกลงที่ทำไว้กับลูกค้าหรือไม่นั้น ขั้นตอนการทดสอบจะเป็นขั้นตอนที่เป็นตัวตัดสินปัญหาข้างต้น

ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ประเภท คือ การทดสอบที่ต้องทำเป็นประจำ (Routine test) การทดสอบเฉพาะลักษณะบางประการของหม้อแปลง (Type test) และการทดสอบลักษณะพิเศษของหม้อแปลงอันนอกเหนือจากหัวข้อที่อยู่ใน 2 ประเภทข้างต้น (Special test) ซึ่งในการทดสอบแต่ละประเภทก็จะมีหัวข้อต่างๆ ในการทดสอบที่แตกต่างกันออกไป โดยแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การทดสอบที่ต้องทำเป็นประจำ (Routine test) การทดสอบประเภทนี้หมายถึง การทดสอบที่จำเป็นต้องทำการทดสอบกับหม้อแปลงทุกลูกที่ถูกผลิตขึ้นมา การทดสอบประเภทนี้ประกอบด้วย

- 1) การวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Measurement of winding resistance)
- 2) การวัดค่าอัตราส่วนแรงดัน และการตรวจสอบกลุ่มของเวกเตอร์ หรือ ทิศทางของเฟส (Measurement of voltage ratio and check of phase displacement)
- 3) การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรและค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า (Measurement of short-circuit impedance and load loss)
- 4) การวัดค่ากระแสและค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า (Measurement of no-load loss and current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การทดสอบความคงทนของฉนวน (Dielectric routine test)

6) การทดสอบการเปลี่ยนแทปขณะมีภาระทางไฟฟ้า (Test on on-load tap changer)

2.2.2 การทดสอบเฉพาะลักษณะบางประการของหม้อแปลง (Type or design test) การทดสอบประเภทนี้ หมายถึง การทดสอบโดยการเลือกสุมหม้อแปลงที่ผลิตขึ้นมาจากการออกแบบที่เหมือนกัน มาทำการทดสอบเพียงบางลูกเท่านั้น โดยมีหัวข้อในการทดสอบดังนี้

- 1) การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของหม้อแปลง (Temperature-rise test)
- 2) การทดสอบความคงทนของฉนวน (Dielectric type test)

2.2.3 การทดสอบลักษณะพิเศษของหม้อแปลง (Special test) เป็นการทดสอบที่ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบก็ได้ โดยส่วนใหญ่การทดสอบประเภทนี้จะเป็นการเก็บค่าเพื่อใช้ในการอ้างอิง และค่าที่ใช้ในการคำนวณระบบป้องกันต่างๆ โดยการทดสอบประเภทนี้จะทำการทดสอบหรือไม่ขึ้นอยู่กับตกลงระหว่างผู้ผลิตกับลูกค้า โดยมีหัวข้อต่างๆ ในการทดสอบดังนี้

- 1) การทดสอบความคงทนของฉนวน (Dielectric special test)
- 2) การหาค่าความเก็บประจุระหว่างขดลวดกับกราวด์ และระหว่างขดลวดกับขดลวด (Determination of capacitances winding-to-earth, and between winding)
- 3) การวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Measurement of zero-sequence impedance)
- 4) การวัดค่าความดังของเสียงของหม้อแปลง (Determination of sound levels)
- 5) การวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า (Measurement of the harmonics of the no-load current)
- 6) การวัดค่าพลังงานที่ใช้ในระบบระบายความร้อน (Measurement of the power taken by the fan and oil pump motors)
- 7) การวัดค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์ หรือการวัดค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของฉนวนและความเก็บประจุในระบบฉนวน (Measurement of insulation resistance to earth of the winding and/or measurement dissipation factor ($\tan\delta$) of insulation system capacitances)
- 8) การวัดวิเคราะห์ค่าความตอบสนองของความถี่ (Measurement of frequency response analysis)

จากการจำแนกหัวข้อต่างๆ ในประเภทการทดสอบจะพบว่าในหัวข้อการทดสอบความคงทนของฉนวนจะถูกจำแนกลงในประเภทของการทดสอบทุกประเภท เนื่องจากในหัวข้อการทดสอบความคงทนของฉนวนนั้น จะสามารถจำแนกการทดสอบออกได้อีกหลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด เช่น การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า เป็นต้น ซึ่งในการที่จะแบ่งการทดสอบในหัวข้อการทดสอบความคงทนของฉนวนลงในประเภทการทดสอบได้นั้น ขึ้นอยู่กับพิสัยของหม้อแปลงที่จะทำการทดสอบ และค่าแรงดันสูงสุดจากภายนอกที่ขดลวดหม้อแปลงสามารถทนได้ (U_m) โดยค่านี้เป็นค่าที่ได้มาจากการออกแบบ โดยการทดสอบในหัวข้อการทดสอบความคงทนของฉนวนมีดังนี้

1) การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซิ่ง (Lightning impulse and switching impulse test)

2) การทดสอบความคงทนของฉนวน ต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก (Separate source AC withstand voltage test or applied voltage test)

3) การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ (Induced voltage test)

ในการทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในหัวข้อต่างๆ ไปนั้น มาตรฐานไม่ได้มีการกำหนดลำดับไว้อย่างแน่นอน แต่จะมีการกำหนดลำดับของการทดสอบการคงทนของฉนวนไว้ดังนี้

1) ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซิ่ง

2) ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

3) ความคงทนของฉนวน ต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก

4) ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ

ซึ่งรายละเอียดของการทดสอบในหัวข้อความคงทนของฉนวนจะกล่าวต่อไปในภายหลัง

ตารางที่ 2.1 การจัดประเภทการทดสอบของการทดสอบความคงทนของฉนวนตามแรงดันสูงสุดที่อุปกรณ์ของหม้อแปลงสามารถทนได้ ตามมาตรฐาน IEC

ลักษณะการฉนวนของขดลวด	ค่าแรงดันสูงสุดที่สามารถทนได้ U_m (kV)	การทดสอบ					
		LI	SI	ACLD	ACSD		AC
					ทดสอบหนึ่งเฟสเทียบกราวด์	ทดสอบสามเฟสเทียบเฟส	
การฉนวนสม่าเสมอ	≤ 72.5	T	NA	NA	NA	R	R
	$72.5 < U_m < 170$	R	NA	S	NA	R	R
	$170 < U_m < 300$	R	R	R	NA	S	R
	≥ 300	R	R	R	NA	S	R
การฉนวนไม่สม่าเสมอ	$72.5 < U_m < 170$	R	NA	S	R	R	R
	$170 < U_m < 300$	R	R	R	S	S	R
	≥ 300	R	R	R	S	S	R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนด

LI	คือ ทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
SI	คือ ทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซิ่ง
ACLD	คือ ทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำระยะเวลานาน
ACSD	คือ ทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำระยะเวลานั้น
AC	คือ ทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก
R	คือ การทดสอบที่ต้องทำเป็นประจำ
T	คือ การทดสอบเฉพาะลักษณะบางประการ
S	คือ การทดสอบในกรณีพิเศษ
NA	คือ ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบ

2.3 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด

2.3.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

- 1) ทำเพื่อเก็บค่าไว้ใช้ในการคำนวณค่าความสูญเสียในขณะที่หม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า
- 2) ทำเพื่อเป็นการตรวจสอบจุดเชื่อมต่อต่างๆ ของขดลวดว่ามีการเชื่อมต่อที่ผิดพลาดหรือไม่
- 3) ทำเพื่อเก็บค่าความต้านทานของขดลวดในขณะอุณหภูมิปกติเพื่อจะใช้อ้างอิงในเรื่องการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวดในหม้อแปลง

2.3.2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ

ในการวัดค่าความต้านทานของขดลวดนั้น จะใช้วิธีการจ่ายไฟกระแสตรงให้กับขดลวด ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความต้านทานจริงในหน่วยโอห์ม (Ω)

1) คุณสมบัติของขดลวดที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

นอกจากค่าความต้านทานของขดลวดจะแปรเปลี่ยนตามวัสดุที่ใช้แล้ว อุณหภูมิก็มีผลต่อค่าความต้านทานของขดลวดด้วยเช่นกัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานของขดลวดก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{C + \Theta_2}{C + \Theta_1} \quad (2.6)$$

เมื่อ

R_1	คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ
R_2	คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ
Θ	คือ อุณหภูมิ หน่วย $^{\circ}\text{C}$
C	คือ ค่าคงที่ของชนิดวัสดุที่ใช้ทำขดลวด

ตามมาตรฐาน IEC ได้กำหนด

C = 235 for copper

C = 225 for aluminium

และ IEEE กำหนดว่า

C = 234.5 for copper

2) คุณสมบัติของขดลวดในขณะที่ทำการวัดค่า

ในขณะที่ทำการวัดค่าความต้านทานของขดลวด ตัวขดลวดไม่ได้มีคุณสมบัติเป็นเพียงตัวต้านทานเท่านั้น แต่ยังเป็นตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่อีกด้วย

ดังนั้นเมื่อทำการจ่ายแรงดันให้กับขดลวด เราจะสามารถสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นได้จากสมการความสัมพันธ์

$$u = R \cdot i + C \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{alt} \quad u = R \cdot i + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.7)$$

เมื่อ

u คือ แรงดันประยุกต์

i คือ กระแสจากแหล่งจ่าย

$\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ คือ อนุพันธ์ของฟลักซ์ในขดลวดที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากกระแส

C คือ ค่าคงที่

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

$\frac{\partial i}{\partial t}$ คือ อนุพันธ์ของกระแส

จากสมการจะพบว่า เมื่อกระแสของแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดไม่คงที่ ค่าความเป็นตัวเหนี่ยวนำของขดลวดจะเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันค่าของฟลักซ์ก็ส่งผลต่อการอ่านค่าแรงดันด้วย ดังนั้นการอ่านค่าจึงต้องอ่านในขณะที่กระแสคงที่และแกนเหล็กมีความอิ่มตัวแล้ว จึงจะได้ค่าแรงดันที่ถูกต้อง ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาความต้านทานต่อไป

2.3.3 ทฤษฎีและวิธีการวัด

1) วิธีใช้โวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์

ทำโดยการจ่ายกระแสเข้าไปให้กับขดลวด แล้วใช้แอมป์มิเตอร์ และโวลต์มิเตอร์ ในการวัดค่ากระแสและแรงดันดังรูป 2.2 หลังจากนั้นจึงนำค่าที่อ่านได้มาคำนวณโดยใช้กฎของโอห์ม ตามสมการ

$$R_x = \frac{U}{I} \quad (2.8)$$

โดยวิธีการนี้มีข้อดีคือง่ายต่อการทำการวัดค่า แต่เนื่องจากการที่ต้องอ่านค่าทั้งสองค่าในเวลาเดียวกัน จึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่า

2) วิธีเคลวิน(ชอมป์สัน)บริดจ์

อาศัยหลักการของวงจรวัดค่าของเคลวิน(ชอมป์สัน) คือ ทำการเปรียบเทียบแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานเป็นคู่ๆ โดยการทำการปรับค่า R_V และ R_{dec} ดังรูป เพื่อให้วงจรวัดเกิดสมดุล โดยสามารถสังเกตได้จากการที่กัลวานอมิเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ และนำค่าความต้านทานทั้งหมดมาคำนวณตามสมการ 2.9

$$R_x = R_N \frac{R_{dec}}{R_V} \quad (2.9)$$

วิธีการนี้มีข้อดีคือ ให้ความละเอียดในการวัดค่าที่สูง แด่วงจรที่ใช้ในการวัดนั้นมีความซับซ้อน ผู้ใช้จึงต้องมีประสบการณ์ในการทดสอบสูงเช่นกัน

2.3.4 กระบวนการในการทดสอบ

ในการทดสอบจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะต้องอ่านค่าหลังจากที่กระแสอยู่ในสภาวะคงที่แล้วเท่านั้น เพราะแรงดันที่เกิดจากความเหนี่ยวนำในขณะกระแสไม่คงที่ จะมีผลต่อค่าความต้านทานที่อ่านได้

1) วิธีการใช้โวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์

ทำการต่อวงจрдังรูป 2.2 หลังจากนั้นทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวด โดยค่าที่สูงที่สุดที่สามารถจ่ายให้กับขดลวดได้นั้น ตามมาตรฐาน IEC จะมีค่าไม่เกิน 10% ของกระแสพิกัด ส่วนมาตรฐาน IEEE กำหนดให้จ่ายกระแสได้ไม่เกิน 15% เพราะหากจ่ายกระแสมากกว่าที่กำหนดให้กับขดลวด อาจทำให้อุณหภูมิของขดลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ สำหรับค่ากระแสที่ต่ำที่สุดที่จะสามารถจ่ายให้กับขดลวดได้นั้นควรมีค่าประมาณ 1.2 เท่าของค่าขดของกระแสที่ไหลในแกนเหล็ก เพื่อให้มั่นใจได้ว่าแกนเหล็กเกิดการอิ่มตัว

2) วิธีการเคลวิน(ชอมป์สัน)บริดจ์

ทำการต่อวงจรวัดค่าความต้านทานแล้วทำการปรับค่า R_N และ R_V ให้คงที่ หลังจากนั้นทำการปรับค่า R_{dec} จนกัลวานอมิเตอร์แสดงผลเป็นศูนย์ แล้วนำมาคำนวณตามสมการ 2.10

$$R_x = R_{dec} \frac{R_N}{R_V} \quad (2.10)$$

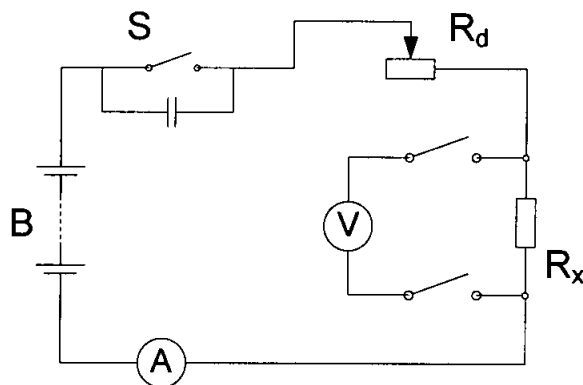
จากสมการจะพบว่าหากเราปรับค่า R_N/R_V ให้มีค่าเป็นสิบ เราจะสามารถอ่านค่าความต้านทานของขดลวดได้โดยตรงจากค่า R_{dec}

2.3.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความต้านทานของขดลวด

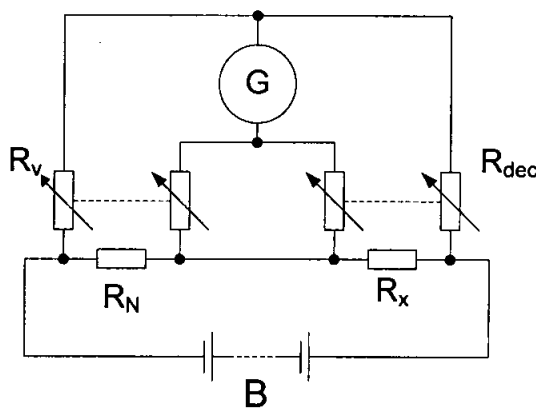
ตามมาตรฐาน IEEE ได้กำหนดความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าความต้านทานได้ไม่เกิน $\pm 0.5\%$ และความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าของอากาศได้ไม่เกิน $\pm 1\%$

1) วิธีใช้โวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์

ถ้าใช้เครื่องมือวัดที่เป็นอะนาล็อกให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 0.5% และมีระดับความถูกต้องของเครื่องมือที่ 0.2 และมาตรฐานตัวต้านทานที่ 0.1 เพื่อใช้ในการวัดค่ากระแส



รูปที่ 2.2 วงจรการวัดวิธีใช้โวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์



รูปที่ 2.3 วงจรการวัดวิธีเคลวิน (ทอมป์สัน) บริดจ์

ถ้าใช้เครื่องมือวัดที่เป็นดิจิทัลให้ความคลาดเคลื่อนได้ 0.15% โดยมีระดับความถูกต้องของเครื่องมือที่ 0.025 และมาตรฐานตัวต้านทานที่ 0.1

2) วิธีเคลวิน(ทอมป์สัน)บริดจ์

เนื่องจากค่าความต้านทานมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่มีความคลาดเคลื่อนได้ $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าความต้านทานประมาณ $\pm 0.4\%$ ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความต้านทานของขดลวดจึงอยู่ในช่วง 0.5-0.9%

2.4 การหาอัตราส่วนแรงดัน กลุ่มของเวคเตอร์ การระบุมุมเฟส

2.4.1 วัดอุปสงค์ของการทดสอบ

1) เพื่อหาค่าอัตราส่วนแรงดัน ซึ่งใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้ออกแบบมาไว้ และนำไปใช้ในการระบุคุณสมบัติของหม้อแปลง

2) เพื่อหากลุ่มของเวคเตอร์ หรือการระบุมุมเฟส ซึ่งใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้ ออกแบบมาไว้ และนำไปใช้ในการระบุคุณสมบัติของหม้อแปลง

2.4.2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ

1) การวัดอัตราส่วนแรงดัน

อัตราส่วนแรงดันสามารถหาได้ 2 วิธี คือ การวัดโดยตรงโดยใช้โวลต์มิเตอร์หรือ

การใช้หลักการของวงจรบริดจ์

สำหรับวิธีแรก คือ เมื่อเราจ่ายแรงดันสลับไปที่ปฐมภูมิ ซึ่งค่านี้อยู่ระหว่าง 100–250 โวลต์ ที่ความถี่พิกัดของหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ แล้วทำการวัดค่าแรงดันทางด้านขดลวดปฐมภูมิกับค่าแรงดันทางด้านขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งเมื่อได้ค่าแรงดันที่วัดได้ แล้วสามารถหาอัตราส่วนแรงดันโดยสมการ

$$r = \frac{N_p}{N_s} = \frac{E_p}{E_s} \quad (2.11)$$

โดยที่

- r คือ อัตราส่วนแรงดัน
- E คือ แรงดันขณะเปิดวงจร
- N คือ จำนวนรอบในการพัน
- p คือ ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ
- s คือ ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

ค่าผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดัน หาได้โดย

$$r_{decl} = \frac{U_{pN}}{U_{sN}} \quad (2.12)$$

$$r_{act} = \frac{U_p}{U_s} \quad (2.13)$$

$$f = \frac{r_{act} - r_{decl}}{r_{decl}} \cdot 100 \quad (2.14)$$

โดยที่

- r_{decl} คือ ค่าอัตราส่วนที่ออกแบบ
- r_{act} คือ ค่าอัตราส่วนที่วัดได้จริง
- U_{pN} คือ แรงดันพิกัดทางด้านปฐมภูมิ
- U_{sN} คือ แรงดันพิกัดทางด้านทุติยภูมิ
- f คือ ค่าผิดพลาด ในหน่วย %

ส่วนวิธีที่สอง คือ การที่เรานำหลักการของวงจรบริดจ์มาใช้วัด เราสามารถนำค่าอัตราส่วนแรงดันที่อ่านได้ไปใช้ได้โดยตรง ส่วนในการหาค่าผิดพลาด สามารถหาได้โดย

$$f = \frac{r_{act} - r_{decl}}{r_{decl}} \cdot 100 \quad (2.15)$$

เพื่อหลีกเลี่ยงค่าผิดพลาด จะต้องทำการทดสอบเมื่อหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า ซึ่งค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานนั้นมีค่า ± 0.1 %

2) ลักษณะของกลุ่มของเวคเตอร์ และการระบุมุมเฟสทั่วไป

ขดลวดของหม้อแปลงสามเฟสสามารถทำการต่อได้ 3 แบบ คือ สตาร์, เดลต้า และ ซิกแซก และการระบุมุมเฟสจะอยู่ในช่วง 0° ถึง 360° ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเรียกลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสจะมีรหัสที่เป็นมาตรฐานในการเรียกตามมุมเฟสของหม้อแปลง โดยใช้การอ้างอิงตามทิศของตัวเลขบนหน้าปัดนาฬิกา เช่น Dyn11, Ynd5, Yy6, Dd0 เป็นต้น

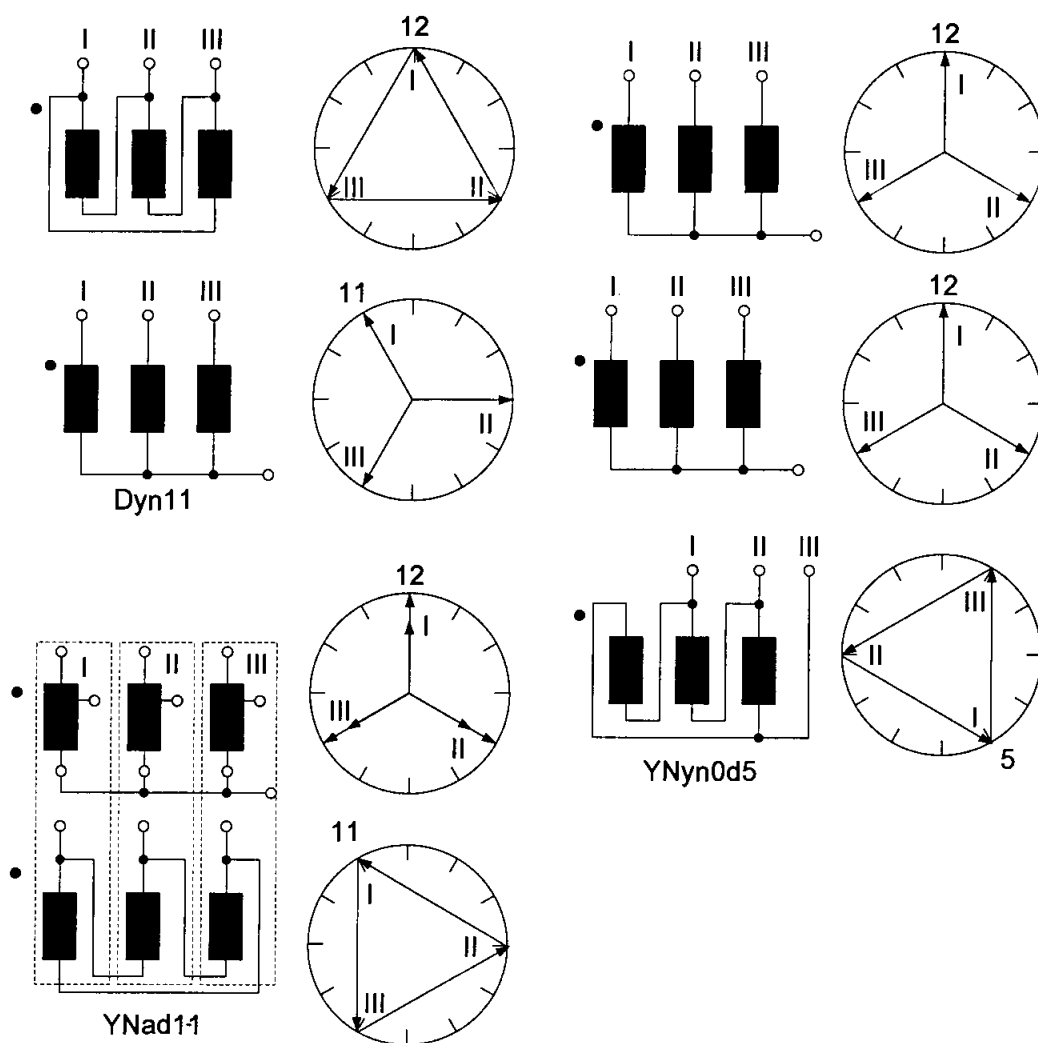
สัญลักษณ์ต่างๆ ของการต่อขดลวดแรงดัน

D, d คือ การต่อขดลวดแบบเดลต้า

Y, y คือ การต่อขดลวดแบบสตาร์

N, n คือ นิวตรอน

โดยที่อักษรตัวใหญ่แทนขดลวดด้านแรงดันสูง และอักษรตัวเล็กแทนขดลวดด้านแรงดันต่ำและในสัญลักษณ์อักษรตัวแรกจะแทนแรงดันทางด้านแรงดันสูงเสมอ ในส่วนของตัวเลข คือ ทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่เวกเตอร์ของเฟสแรกของขดลวดทางด้านแรงดันต่ำชี้ไป ส่วนทิศทางของทางด้านแรงดันสูงจะอยู่ที่ 12 นาฬิกาเสมอ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะการตั้งสัญลักษณ์ตามลักษณะการต่อของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 วงจรทดสอบ

1) การวัดอัตราส่วนแรงดันโดยโวลต์มิเตอร์ 2 เครื่อง

วงจรที่ใช้ในการหาอัตราส่วนแรงดัน ดังรูปที่ 2.5 จะสามารถใช้กับกลุ่มของเวคเตอร์ทุกกลุ่มการป้อนแรงดันควรจะมีป้อนทางด้านแรงดันสูง เพื่อจะได้หลีกเลี่ยงอันตราย โวลต์มิเตอร์ทางด้านแรงดันต่ำควรมีค่าความต้านทานสูง เพื่อลดความผิดพลาดในการวัด

2) การตรวจสอบขั้วของหม้อแปลงโดยใช้โวลต์มิเตอร์

สำหรับหม้อแปลง 1 เฟส จะมีทั้งขั้วเหมือนกันและขั้วต่างกัน ซึ่งในการวัดเราจะทำการลัดวงจรทางด้านคู่ใดคู่หนึ่งของขดลวดทั้งทางด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำ ส่วนคู่ที่เหลือก็ทำการวัดโดยใช้โวลต์มิเตอร์ ทำให้สามารถหาอัตราส่วนแรงดันได้ทั้งในแบบที่ขั้วเหมือนกันและต่างกัน ซึ่งหากขั้วเหมือนกัน จะหาได้ตามสมการ 2.16 รูปที่ 2.6 และถ้าหากขั้วต่างกันจะหาได้ตามสมการ 2.17 รูปที่ 2.7

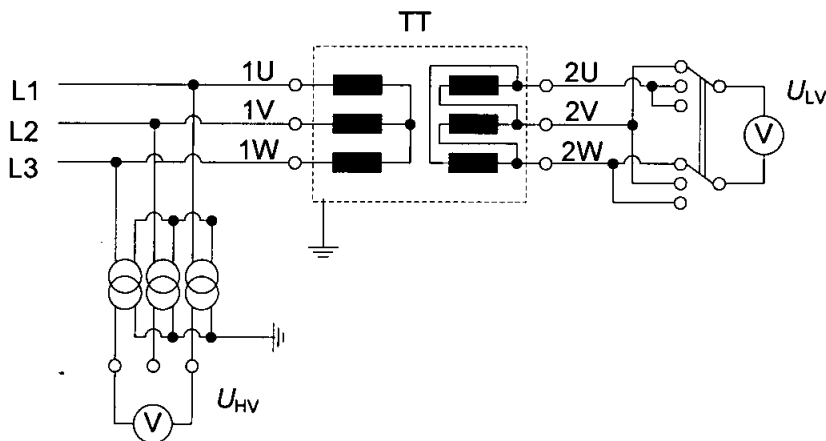
$$U_{\Sigma} = U_p + \frac{U_p}{r} \quad (2.16)$$

$$U_{\Sigma} = U_p - \frac{U_p}{r} \quad (2.17)$$

สำหรับหม้อแปลง 3 เฟส ขั้วของหม้อแปลงจะถูกเรียกว่าเป็นกลุ่มของเวคเตอร์ ซึ่งการต่อวงจรนั้นสามารถทำได้โดย การต่อที่ขั้วทางด้านแรงดันต่ำและแรงดันสูงเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.8 เมื่อจ่ายไฟทางด้านแรงดันสูง ค่าแรงดันที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์ จะสามารถนำไปคิดหากลุ่มของเวคเตอร์ได้

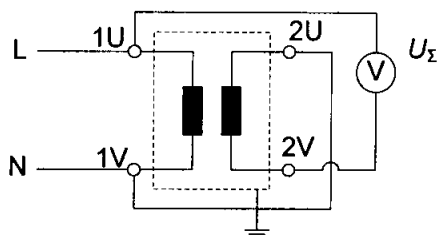
3) การตรวจสอบขั้วโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

วิธีนี้ใช้ได้ทั้งหม้อแปลงชนิด 1 และ 3 เฟส โดยการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านแรงดันสูง ดังรูปที่ 2.9 ขั้วของหม้อแปลงจะสามารถอ่านค่าได้จากโพลาริโวลต์มิเตอร์ที่ถูกต้องอยู่ทางด้านแรงดันต่ำ

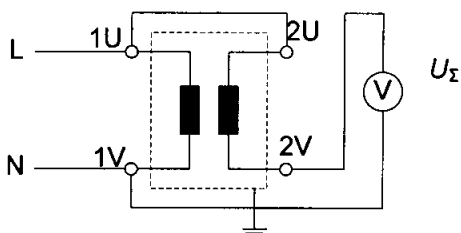


รูปที่ 2.5 วงจรการวัดอัตราส่วนแรงดันวิธีใช้โวลต์มิเตอร์สองตัว

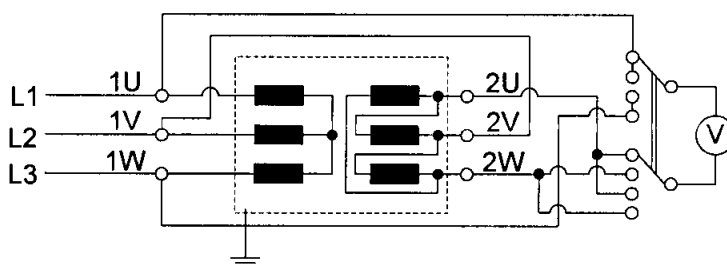
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรการทดสอบขั้วของหม้อแปลงหนึ่งเฟสวิธีอนุกรมขดลวดแรงดัน



รูปที่ 2.7 วงจรการทดสอบขั้วของหม้อแปลงหนึ่งเฟสวิธีขนานขดลวดแรงดัน

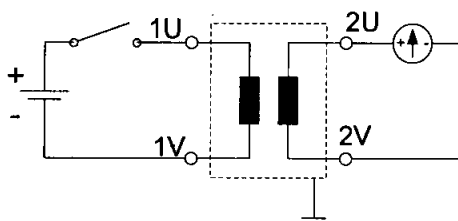


รูปที่ 2.8 วงจรการทดสอบขั้วของหม้อแปลงสามเฟสวิธีใช้โวลต์มิเตอร์

4) การวัดอัตราส่วนแรงดันและตรวจสอบขั้วโดยใช้วงจรบริดจ์

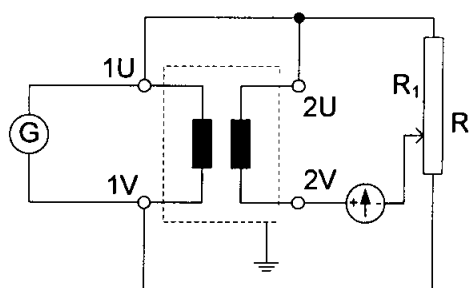
ขดลวดทางแรงดันสูงและแรงดันต่ำจะถูกต่ออยู่ในทางตรงกันข้าม โดยจะมีค่าความต้านทานของหม้อแปลงที่มีค่ามากเป็นตัวทำให้แรงดันทั้งสองสมดุลกัน ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10 ซึ่งส่วนใหญ่จะให้แหล่งจ่ายหนึ่งเฟสในการทดสอบ หากมีกลุ่มของเวคเตอร์แบบพิเศษก็จะใช้แหล่งจ่ายสามเฟสในการทดสอบ แต่ถ้าไม่ได้หากแหล่งจ่ายที่มีไม่เหมาะสมกับหม้อแปลงที่ต้องการจะทดสอบ อาจจะใช้วงจรบริดจ์ในการทดสอบแทนได้

การวัดโดยใช้วงจรบริดจ์จะต้องถูกต่อวงจรให้สัมพันธ์กับกลุ่มของเวคเตอร์ด้วย ดังรูปที่ 2.11 และ 2.12

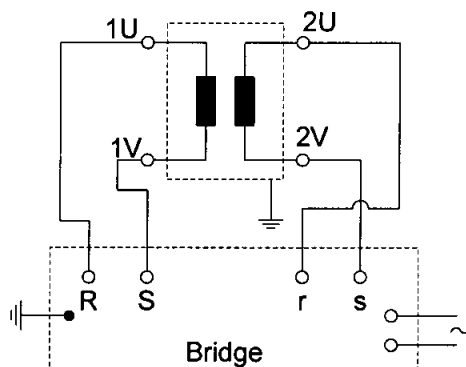


รูปที่ 2.9 วงจรการทดสอบขั้วของหม้อแปลงโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

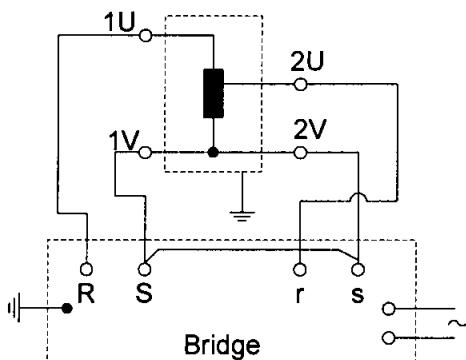
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ลักษณะทั่วไปของวงจรบริดจ์



รูปที่ 2.11 การต่อวงจรบริดจ์กับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส



รูปที่ 2.12 การต่อวงจรบริดจ์กับหม้อแปลงอัตโนมัติหนึ่งเฟส

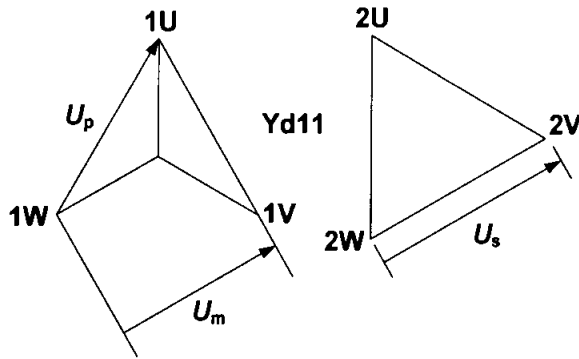
5) การวัดอัตราส่วนแรงดันสำหรับหม้อแปลงสามเฟส

โดยปกติอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงสามเฟสสามารถวัดได้โดยใช้แหล่งจ่ายหนึ่งเฟส ถ้าหากยังมีการคำนึงถึงการแพร่กระจายของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก โดยเฉพาะขดลวด ซึ่งการรวมตัวของขดลวดที่มีการแพร่กระจายคล้ายๆกัน การวัดวงจรจะได้จากเฟสเซอร์โตะแกรมของกลุ่มเวกเตอร์ของหม้อแปลงที่ถูกทดสอบ ซึ่งการเปรียบเทียบดูจากรูปที่ 2.13

ตัวอย่างจากรูปที่ 2.13 ใช้วงจรบริดจ์ในการวัดเพื่อแสดงให้เห็นค่าอัตราส่วนที่ได้

$$r_{mdecl} = k \cdot r_{decl} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบแรงดันที่ได้วิธีใช้วงจรบริดจ์

โดยที่

r_{mdecl} คือ ค่าอัตราส่วนสำหรับวงจรที่ทำการวัด

$$r_{decl} = \frac{U_{pN}}{U_{sN}} \quad (2.19)$$

โดยที่

U_{pN} or U_{sN} คือ ค่าแรงดันทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ

การเปรียบเทียบแรงดันในรูปที่ 2.13 มีดังสมการนี้

$$\frac{1U - 1V}{2U - 2W}, \frac{1V - 1W}{2V - 2U}, \frac{1W - 1U}{2W - 2V} \quad (2.20)$$

โดยที่

$1V1W, 1W1U, 1U1V$ - ต่อวงจรทางไฟฟ้าอยู่

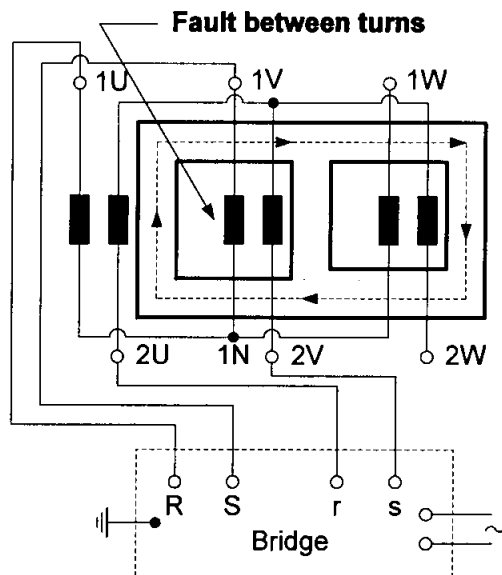
ในกรณีนี้ ค่า k คือ $k = \frac{1.5}{\sqrt{3}}$

$$r_{mdecl} = \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot r_{decl} \quad (2.21)$$

สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Y_{y0} และ Y_{y6} จะต้องใช้หลักการนี้ในการพิจารณาการวัดอัตราส่วนแรงดัน จะเป็นตามสมการนี้

$$\frac{1U - 1V}{2U - 2V}, \frac{1V - 1W}{2V - 2W}, \frac{1W - 1U}{2W - 2U} \quad (2.22)$$

การวัดแบบนี้โดยตรงควรจะหลีกเลี่ยง เนื่องจากจะไม่สามารถทราบได้ว่าการลัดวงจรระหว่างขดลวดได้ ดังรูปที่ 2.14 ถ้ามีการลัดวงจรที่เฟสใดเฟสหนึ่ง ฟลักซ์แม่เหล็กจะไม่รั่วไหลออกไปจะไหลอยู่ในแกนเหล็กและต่อมาฟลักซ์แม่เหล็กก็จะสมดุล สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์นี้ สามารถวัดได้ ดังสมการที่ 2.23



รูปที่ 2.14 การกระจายตัวของฟลักซ์ในขณะที่ทำการทดสอบหม้อแปลงแบบ Yy และความเสียหายที่เกิดขึ้น

$$\frac{1U - 1N}{2U - 2N} , \frac{1U - 1V1W}{2U - 2V2W} \tag{2.23}$$

ถ้าใช้วิธีการอื่นในการวัด หากมีการลัดวงจรระหว่างขดลวด วงจรบริดจ์จะทำให้เกิดการสมดุลของฟลักซ์แม่เหล็ก และจุดที่เกิดฟอลต์จะสามารถตรวจพบได้โดยต่อแอมป์มิเตอร์อนุกรมกับวงจร

6) การวัดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงสามเฟสอัตโนมัติ

1. วงจรแบบสตาร์จะมีนิวทรัลที่อยู่ภายนอกหม้อแปลง ดังรูปที่ 2.15

การวัดอัตราส่วนแรงดันที่ถูกต้อง

$$\frac{1U - 1N}{2U - 2N} , \frac{1V - 1N}{2U - 2N} , \frac{1W - 1N}{2W - 2N} \tag{2.24}$$

การวัด

$$\frac{1U - 1V}{2U - 2V} , \frac{1U - N}{N - 2U} \tag{2.25}$$

2. วงจรแบบสตาร์โดยที่ไม่มีนิวทรัลที่อยู่ภายนอกหม้อแปลง ดังรูปที่ 2.16

การวัดอัตราส่วนแรงดันที่ถูกต้อง

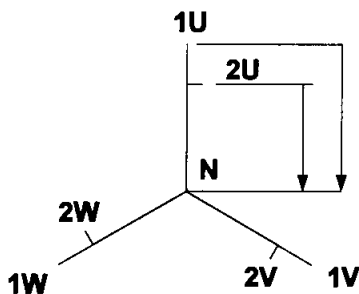
$$\frac{1U - 1V1W}{2U - 1V1W} , \frac{1V - 1U1W}{2V - 1U1W} , \frac{1W - 1U1V}{2W - 1U1V} \tag{2.26}$$

โดยที่

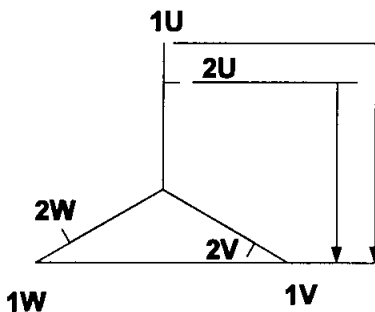
$1V1W, 1W1U, 1U1V$ - ต่ วงจรทางไฟฟ้าอยู่

สำหรับการวัดวงจรนี้ จะต้องปรับค่าอัตราส่วนของวงจรบริดจ์ดังนี้

$$r_{mdecl} = \frac{3 \cdot r_{decl}}{r_{decl} + 2} \tag{2.27}$$



รูปที่ 2.15 การจับคู่วัตต์อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงอัตโนมัติสามเฟส
ที่มีจุดนิวตรอนอยู่ภายนอก



รูปที่ 2.16 การจับคู่วัตต์อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงอัตโนมัติสามเฟส
ที่ไม่มีจุดนิวตรอนอยู่ภายนอก

3. วงจรแบบเดลต้า ดังรูปที่ 2.17

การวัดอัตราส่วนแรงดันที่ถูกต้อง

$$\frac{1U - 1V}{2U - 2V}, \frac{1V - 1W}{2V - 2W}, \frac{1W - 1U}{2W - 2U} \tag{2.28}$$

แรงดัน $2U - 1V (U_x)$ สามารถคำนวณได้จากจำนวนรอบของขดลวดและแรงดันต่อจำนวนรอบ
หากมีป้ายข้อมูล จะสามารถคำนวณแรงดันได้ดังสมการนี้

$$U_{x1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q} \tag{2.29}$$

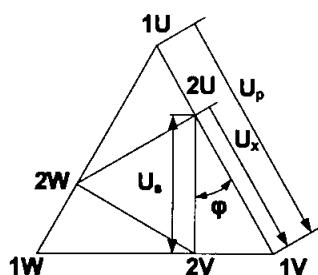
$$p = |U_s| - |U_p| \tag{2.30}$$

$$q = |U_p|^2 - 2 \cdot |U_p| \cdot |U_s| \tag{2.31}$$

โดยที่

U_p คือ แรงดันทางด้านปฐมภูมิ

U_s คือ แรงดันทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 2.17 การจับคู่วัตต์อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงอัตโนมัติสามเฟสที่มีการต่อแบบเดลต้า

ส่วนที่ใหญ่ที่สุดของขดลวดคิดเป็น “ส่วน x” ในการคำนวณ ตัวอย่างเช่น ถ้า $\phi > 60^\circ$ ส่วนระหว่าง $1U-2U$ จะพิจารณาเป็นค่า U_x และค่า U_x ที่อยู่นอกเหนือหลักเกณฑ์จะพิจารณาจากผลที่เป็นค่าบวก
วัตต์อัตราส่วนแรงดันที่วัดได้คือ

$$r_{mdecl} = \frac{U_p}{U_x} \quad (2.32)$$

7) การวัดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงที่มีกลุ่มของเวกเตอร์แบบพิเศษ

1. หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีหลายเฟส ดังรูปที่ 2.18 สำหรับการต่อแบบเดลต้าและ 2 สตาร์ จุดนิวทรัลจะยกมาต่อที่ขั้วแรกติฟายแคโทด ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะทำการเปรียบเทียบกลุ่มของเวกเตอร์ สำหรับการต่อแบบสตาร์และ 2 สตาร์ แรงดันที่ต่อแบบเฟสถึงเฟสจะเปรียบเทียบได้กับกลุ่มของเวกเตอร์ $Yy0$ และ $Yy6$ ดังรูปที่ 2.19

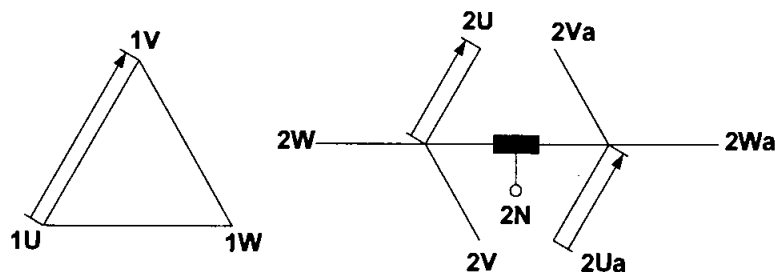
การวัดอัตราส่วนแรงดันที่ถูกต้อง

$$\frac{1U-1V}{2U-2N} \quad , \quad \frac{1U-1V1W}{2N-2U_o2W} \quad (2.33)$$

การต่อวงจรของเดลต้า/สตาร์ คือ

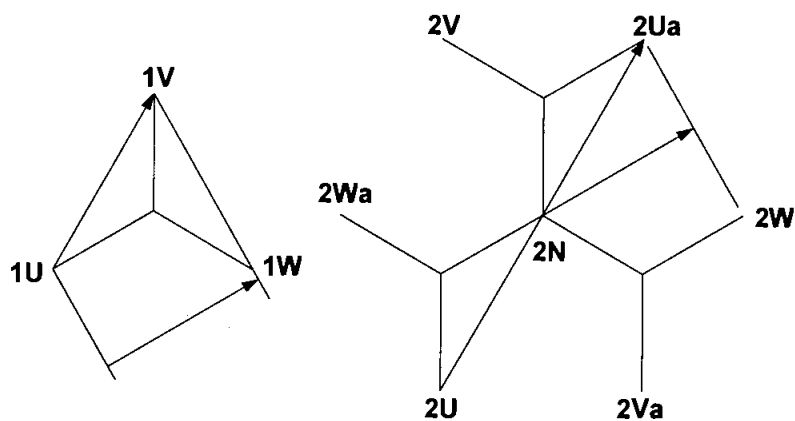
$$\frac{1U-1V}{2U-2V} \quad , \quad \frac{1U-1V}{2W_o-2U_o} \quad (2.34)$$

2. หม้อแปลงที่มีการเลื่อนของเฟส ในการพิจารณาหม้อแปลงที่มีการควบคุมการเลื่อนของเฟส ไม่สามารถที่จะใช้วงจรบริดจ์ในการวัดอัตราส่วนแรงดันได้ ซึ่งการวัดจะทำได้โดยใช้โวลต์มิเตอร์สองตัว แต่ความถูกต้องจะลดลง ถ้าเป็นการต่อระหว่างขดลวดร่วมกัน การเลื่อนของเฟสของขดลวดจะเรียงตัวตามแนวของขดลวดทำให้สามารถวัดค่าได้โดยใช้วงจรบริดจ์ ลำดับเฟสระหว่างแรงดันสูงและต่ำจะต้องทำการทดสอบก่อนด้วย



รูปที่ 2.18 การจับคู่วัตต์อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงเรียงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาเบ้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การจับคู่วัตต์อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงเรียงกระแสที่มีการต่อแบบสตาร์

2.4.4 กระบวนการวัดอัตราส่วนแรงดัน

1) การวัดอัตราส่วนแรงดันโดยใช้โวลต์มิเตอร์สองตัว

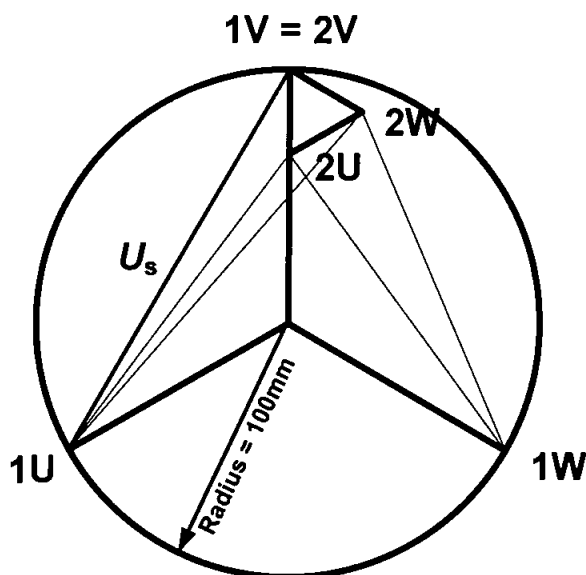
สำหรับการตรวจทดสอบ ดังรูปที่ 2.5 ถ้ามีหากการวัดทางด้านแรงดันต่ำโดยไม่มีการใช้หม้อแปลงแรงดัน จะให้ค่าที่แม่นยำกว่าทางด้านแรงดันสูง การวัดจะใช้ที่ค่าแรงดันประมาณ 10% ของแรงดันเต็ม และการอ่านค่าที่วัดได้จะต้องแตกต่างกันไม่เกิน 1% เครื่องวัดที่เป็นดิจิตอลที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถนำมาใช้วัดค่าได้

2) การทดสอบขั้วโดยใช้โวลต์มิเตอร์

การวัดค่าแรงดันแต่ละค่าสามารถนำมาเขียนได้เป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรม จากขั้วและกลุ่มของเวกเตอร์ที่ถูกต้อง ดังรูปที่ 2.20 จากรูป ที่จุด 2V มีแรงดันเหมือนกับที่จุด 1V ซึ่งจุดทั้งสองจุดนี้ถือเป็นจุดเดียวกันในเฟสเซอร์ไดอะแกรม การวัดที่จุด 2U และ 2W สามารถวัดได้จากแรงดันที่จุด 1U-2U, 1W-2U และ 1U-2W, 1W-2W สำหรับอัตราส่วนแรงดันสูงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันต่ำจะเล็กมาก เพื่อให้มีการอ่านค่าที่แม่นยำ ด้านแรงดันต่ำจะต้องใช้หม้อแปลงแรงดันที่มีกลุ่มของเวกเตอร์ 0

3) การทดสอบขั้วโดยใช้ไฟกระแสดรง

สำหรับวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 2.9 เครื่องมือวัดจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพแล้ว โดยทำการต่อทางด้านแรงดันสูงโดยต่อขนานกับหม้อแปลงที่ถูกทดสอบ ดังรูปที่ 2.9 และต่อตัวต้านทานอนุกรมกับวงจร เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องวัด ถ้ามีขั้วที่ต้องการทดสอบถูกต้อง โวลต์มิเตอร์จะวัดไปทางด้านบวก เมื่อเปิดสวิตช์ไฟกระแสดรง



รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบแรงดันด้วยเฟสโตอะแกรมเพื่อตรวจสอบข้อของหม้อแปลงสามเฟส กรณี YNd11

4) การวัดค่าอัตราส่วนแรงดันและตรวจสอบข้อโดยใช้วงจรถัดจี้
สำหรับวงจรถัดจี้ ดังรูปที่ 2.10 ถึง 2.19 ต้องตรวจสอบข้อของหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบกับวงจรถัดจี้ให้ถูกต้อง และต้องแน่ใจว่าไม่มีส่วนใดของขดลวดต่อลงกราวด์ เพื่อป้องกันการลัดวงจร

2.4.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความต้านทานของขดลวด

วงจรถัดจี้ที่เหมาะสมกับการหาค่าอัตราส่วนแรงดัน และจ่ายต่อการใช้งาน ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ในการใช้วงจรถัดจี้ในการวัดนั้นคือ $\pm 0.1\%$

ส่วนวิธีที่ใช้โวลต์มิเตอร์สองตัวนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ คือ $\pm 0.5\%$

2.5 การวัดค่าแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ขณะทำการลัดวงจรและค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า

2.5.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เพื่อทำการวัดค่าแรงดันกับค่าอิมพีแดนซ์ในขณะหม้อแปลงมีการลัดวงจร และค่าความสูญเสียในขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า ซึ่งทั้งสองค่านี้จะเป็นค่าที่ผู้ผลิตใช้ในการรับรองกับผู้ใช้ โดยค่าความสูญเสียของหม้อแปลงนอกจากจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองขณะใช้งานแล้ว ค่าความสูญเสียที่สูงจะส่งผลให้ขาดความปลอดภัยในขณะหม้อแปลงทำงานด้วย โดยเฉพาะในหม้อแปลงขนาดใหญ่

เมื่อเรานำค่าที่ได้จากการค่าความสูญเสียที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจะทำให้เราสามารถทราบค่าความสูญเสียจากกระแสไหลวนอันเกิดเนื่องจาก ฟลักซ์รั่วไหลกับส่วนต่างๆ ของตัวถัง นอกจากนี้ค่าเราจำเป็นต้องใช้ค่าแรงดันขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลัดวงจรกับค่าความสูญเสียขณะมีภาระทางไฟฟ้าในการทำการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของหม้อแปลงด้วย สำหรับหม้อแปลงที่มีแทปต้องทำการวัดแรงดันลัดวงจรที่แทปสูงสุดและต่ำสุด หรืออาจทำที่แทปพิกัดด้วยก็ได้ ซึ่งค่าแรงดันที่วัดไว้จะมีความสำคัญในการระบุขนาดหม้อแปลง

2.5.2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ

ในการวัดแรงดันลัดวงจร จะกระทำโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่ด้านใดด้านหนึ่งของขดลวด (ด้านปฐมภูมิ หรือทุติยภูมิ) และทำการลัดวงจรอีกด้านหนึ่งที่เหลือ โดยแรงดันที่ป้อนเข้าจะทำการป้อนเข้าที่ขนาดกระแสพิกัด เมื่อกระแสพิกัดไหลผ่านขดลวดทั้งสองด้านของขดลวดจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าขึ้น โดยกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นคือ ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้า

ในความเป็นจริงแล้วค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น จะมีส่วนประกอบของค่าความสูญเสียขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าอยู่ด้วย แต่เนื่องจากแรงดันที่จ่ายในขณะที่จ่ายกระแสพิกัดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันพิกัด ค่าความสูญเสียขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าจึงไม่นำมาคิด

วงจรสมมูลของการลัดวงจร ดูได้จากรูปที่ 2.21

1) แรงดันลัดวงจรและความสัมพันธ์ของแรงดันลัดวงจร

เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรสมมูลของการลัดวงจร ดังรูปที่ 2.22 สามารถนำมาคำนวณตามสมการ

$$U_{cc} = \sqrt{U_x^2 + U_R^2} \quad (2.35)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_r} \cdot 100 \quad (2.36)$$

เมื่อ

U_{cc} คือ แรงดันลัดวงจร

U_R คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน

U_x คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

ε_{cc} คือ ความสัมพันธ์ของแรงดันลัดวงจร ในหน่วย %

U_r คือ แรงดันพิกัดของหม้อแปลง

ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันลัดวงจรจะอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของแรงดันพิกัดของขดลวดที่ได้รับพลังงาน และเป็นค่าที่สามารถนำไปหาค่ากระแสที่ไหลจริงในขณะที่เกิดการลัดวงจร ตามสมการ

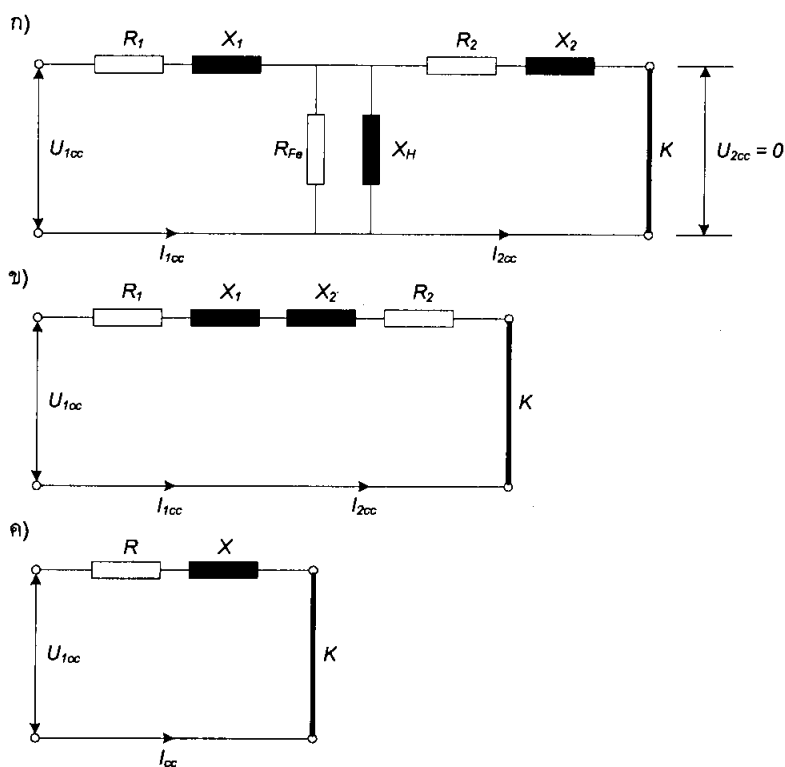
$$I = \frac{100}{\varepsilon_{cc}} \cdot I_r \quad (2.37)$$

เมื่อ

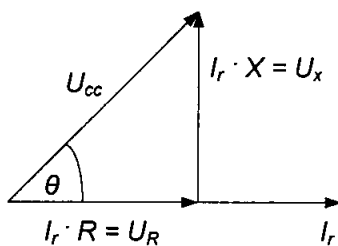
I คือ กระแสลัดวงจร

I_r คือ กระแสพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลของหม้อแปลงในขณะที่ทำการลัดวงจร



รูปที่ 2.22 เฟสเซอร์ไดอะแกรมในขณะที่ทำการลัดวงจร

ก) วงจรสมมูลของหม้อแปลงในขณะที่ทำการลัดวงจร

ข) เนื่องจาก $R_{Fe}, X_H \gg R_1, R_2, X_1, X_2$ จึงสามารถละค่า R_{Fe}, X_H ได้

ค) วงจรสมมูลแสดงให้เห็นว่าการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า เป็นการวัดค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด

2) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลัดวงจร และกระแสในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า ค่าแรงดันลัดวงจรจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นตามกระแสของภาระทางไฟฟ้า ตามสมการ

$$U_{cc} = U_{ccm} \cdot \frac{I_r}{I_m} \tag{2.38}$$

เมื่อ

U_{cc} คือ แรงดันลัดวงจรที่กระแสพิกัด I_r

U_{ccm} คือ แรงดันลัดวงจรที่กระแส I_m

I_m คือ กระแสไหลระหว่างการทำทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสัมพันธ์ของแรงดันลัดวงจรหรือแรงดันลัดวงจรกับอุณหภูมิของขดลวด ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดน้อยกว่า 2 MVA

4) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลัดวงจรและความถี่ แรงดันลัดวงจรเป็นส่วนสัดส่วนโดยตรงกับค่าความถี่เมื่อ U_r มีค่าน้อยกว่า U_x มากๆ ตามสมการ

$$U_{cc} = U_{ccm} \cdot \frac{f_r}{f_m} \quad (2.39)$$

เมื่อ

f_r คือ ความถี่พิกัด

f_m คือ ความถี่ระหว่างการทดสอบ

แรงดันไฟฟาลัดวงจรสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 2 ขดลวด ใช้สมการ

$$Z = \frac{U_{cc}}{I_r} \quad [\Omega] \quad (2.40)$$

$$R = \frac{P_L}{I_r^2} \quad [\Omega] \quad (2.41)$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad [\Omega] \quad (2.42)$$

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 2 ขดลวด ใช้สมการ

$$Z = \frac{U_{cc}}{I_r \cdot \sqrt{3}} \quad Z = \frac{U_{cc} \cdot \sqrt{3}}{I_r} \quad [\Omega / \text{phase}] \quad (2.43)$$

$$R = \frac{P_L}{3 \cdot I_r^2} \quad R = \frac{P_L}{I_r^2} \quad [\Omega / \text{phase}] \quad (2.44)$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad [\Omega / \text{phase}] \quad (2.45)$$

เมื่อ

Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของการลัดวงจร

X คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของการลัดวงจร

R คือ ค่าความต้านทานของการลัดวงจร

I_r คือ กระแสพิกัด

U_{cc} คือ แรงดันของการลัดวงจร

P_L คือ ค่าความสูญเสียขณะมีภาระทางไฟฟ้า

5) ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้า

ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าคือค่าความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากหม้อแปลงในขณะที่ย้ายกระแสพิกัดที่ความถี่พิกัด โดยที่ทำการลัดวงจรขดลวด และอุณหภูมิของขดลวดเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิง (สำหรับมาตรฐาน IEC คือ 75 องศาเซลเซียส และ IEEE คือ 85 องศาเซลเซียส) โดยค่าความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวด (I^2R loss) และค่าความสูญเสียสเตรย์ (Stray loss or Eddy current loss) ที่เกิดจากการรั่วของสนามแม่เหล็กในขดลวดและบริเวณตัวถังของหม้อแปลง โดยหาได้จากสมการ

$$P_L = P_j + P_a \quad (2.46)$$

เมื่อ

- P_L คือ ค่าความสูญเสียขณะที่ขดลวดมีอุณหภูมิ 75 °C/ 85 °C
 P_j คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด
 P_a คือ ค่าความสูญเสียสเตรย์

6) ความสัมพันธ์ของค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าและกระแสของภาระทางไฟฟ้า

ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของกระแสของภาระทางไฟฟ้า ตามสมการ

$$P_L = P_{Lm} \cdot \left(\frac{I_r}{I_m} \right)^2 \quad (2.47)$$

เมื่อ

- P_L คือ ค่าความสูญเสียที่กระแสพิกัด
 P_{Lm} คือ ค่าความสูญเสียที่กระแสทดสอบ
 I_m คือ กระแสที่ใช้ในการทดสอบ

7) ส่วนประกอบอื่นของค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้า เมื่อทราบค่าความต้านทานของขดลวด

ค่าแรงดันลัดวงจรและค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าที่ถูกต้อง ต้องคิดค่าความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิอ้างอิง อย่างไรก็ตามในระหว่างการทำทดสอบในห้องทดสอบอุณหภูมิจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอ้างอิง ในการคำนวณค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าให้เป็นค่าที่อุณหภูมิอ้างอิงต้องทำการแยกส่วนประกอบของค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าให้เป็นสองส่วน คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด และค่าความสูญเสียสเตรย์ ตามสมการ

$$P_L = P_j + P_a = \Sigma I_r^2 R + P_a \quad (2.48)$$

$$P_a = P_L - \Sigma I_r^2 R \quad (2.49)$$

เมื่อ

- R คือ ค่าความต้านทานของขดลวด

8) ความสัมพันธ์ของความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิของขดลวดเพิ่มขึ้น ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ค่าความสูญเสียเดี่ยวยังมีค่าลดลง โดยสามารถดูความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานกับอุณหภูมิได้ในหัวข้อการวัดค่าความต้านทานของขดลวด สำหรับการปรับค่าความสูญเสียทั้งสองค่า สามารถดูได้จากสมการ

$$P_{j2} = P_{j1} \cdot \frac{C + \Theta_2}{C + \Theta_1} \quad P_{a2} = P_{a1} \cdot \frac{C + \Theta_1}{C + \Theta_2} \quad (2.50)$$

เมื่อ

P_{j1} คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลผ่านขดลวดที่อุณหภูมิ Θ_1

P_{j2} คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลผ่านขดลวดที่อุณหภูมิ Θ_2

P_{a1} คือ ค่าความสูญเสียเดี่ยวยที่อุณหภูมิ Θ_1

P_{a2} คือ ค่าความสูญเสียเดี่ยวยที่อุณหภูมิ Θ_2

Θ คือ อุณหภูมิในหน่วย $^{\circ}\text{C}$

C คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขดลวด

ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้

$C = 235$ สำหรับขดลวดทองแดง

$C = 225$ สำหรับขดลวดอลูมิเนียม

ตามมาตรฐาน IEEE จะมีบางค่าที่แตกต่างกัน

$C = 234.5$ สำหรับขดลวดทองแดง

โดยที่การวัดค่าความต้านทานของขดลวดต้องกระทำก่อนการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้า

9) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้ากับความถี่

ค่าความค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ แต่ค่าความสูญเสียเดี่ยวยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามสมการ

$$P_L = P_j + P_{am} \cdot \left(\frac{f_r}{f_m}\right)^2 + P_{st} \cdot \left(\frac{f_r}{f_m}\right)^{0.8} \quad (2.51)$$

เมื่อ

P_L คือ ค่าความสูญเสียที่ความถี่พิกัด f_r

P_{am} คือ ค่าความสูญเสียเดี่ยวยภายในขดลวดที่ความถี่ทดสอบ f_m

P_{st} คือ ค่าความสูญเสียเดี่ยวยในโครงสร้างและตัวถังที่ความถี่ทดสอบ f_m

ถ้าไม่สามารถทำการทดสอบที่ความถี่พิกัดของหม้อแปลงที่จะทำการทดสอบได้ ให้คำนวณตามสมการที่ 2.51 เพื่อที่จะทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้

กระแสที่ใช้ในการทำการทดสอบต้องมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์และไม่มีฮาร์โมนิก ไม่เช่นนั้นขอบเขตที่ยอมรับได้ก็จะมีค่าสูงค่าสูงขึ้นด้วย

2.5.3 วงจรทดสอบ

วงจรการทดสอบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสดูรูปที่ 2.23 ส่วนวงจรการทดสอบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสดูรูปที่ 2.24 ในการทำการลัดวงจรจะทำการจ่ายแรงดันทางด้านแรงดันต่ำ เพื่อความสะดวกในการจัดเตรียมอุปกรณ์และเกิดกระแสไหลน้อยทางด้านแรงดันสูงที่ทำการลัดวงจรไว้

การวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสอาจสามารถใช้วัตต์มิเตอร์สองเครื่องในการวัดก็สามารถทำได้ โดยดูการต่อวงจรจากรูป 2.24 ส่วนการใช้วัตต์มิเตอร์สามเครื่องสามารถดูได้จากรูปที่ 2.25

ทั้งสองวิธีนี้จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดันด้วย เพื่อทำการลดระดับแรงดันและกระแสให้เครื่องมือวัดสามารถอ่านค่าได้

ตัวประกอบกำลังของการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีค่าประมาณ 0.01 ถึง 0.05 นั้นหมายความว่ามีความของมุมเฟสเพียงเล็กน้อยเกิดขึ้นที่หม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดัน โดยที่ค่าความผิดพลาดของระบบวัดจะสามารถยอมรับได้ที่ $\pm 5\%$ (IEEE)

การใช้วัตต์มิเตอร์สองเครื่องจะทำให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังที่น้อยเกินความเหมาะสม เนื่องจากการต่างกันของเครื่องหมายที่เครื่องวัดสามารถวัดได้ จึงทำให้เกิดการหักล้างกันเอง โดยค่าความผิดพลาดเล็กน้อยที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากหากนำมาเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้วัตต์มิเตอร์สามเครื่อง ด้วยเหตุผลดังกล่าววิธีการใช้วัตต์มิเตอร์สองตัวจึงไม่เป็นที่นิยม แม้กระนั้นก็ตามวิธีนี้ก็อาจจะทำได้เป็นครั้งคราวในการทดสอบนอกสถานที่ แต่ไม่เป็นที่ยอมรับในมาตรฐาน IEEE

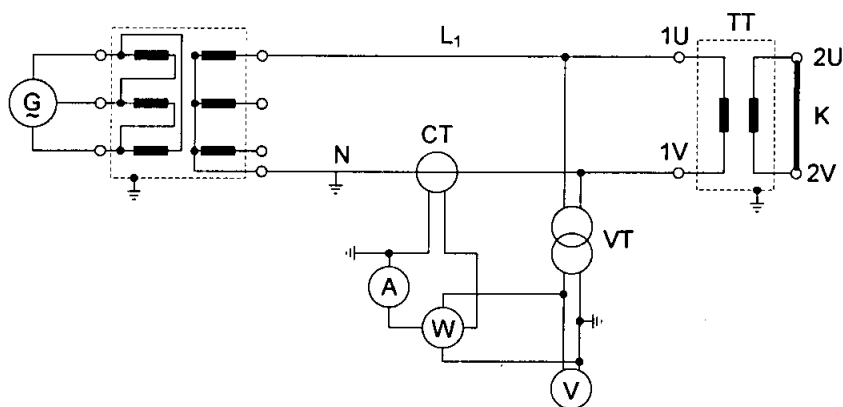
ถ้าในนิวทรัลมีกระแสไหลผ่าน หรือต้องการหาค่ากำลังไฟฟ้าต่อเฟสจะสามารถใช้ได้เพียงวิธีใช้วัตต์มิเตอร์สามเครื่องเท่านั้น

2.5.4 กระบวนการวัด

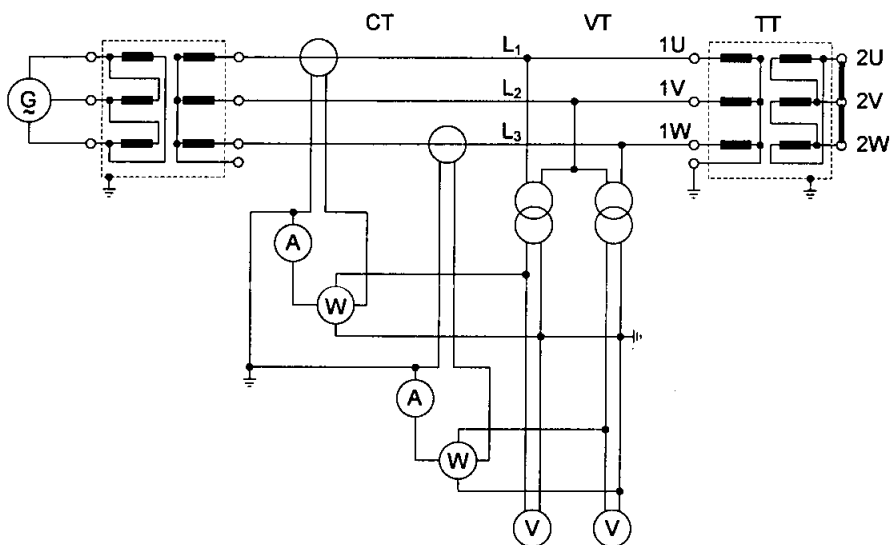
ก่อนที่จะทำการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าต้องทำการวัดค่าความต้านทานและอุณหภูมิของขดลวดตามมาตรฐาน IEC และ IEEE

ถ้ามีหม้อแปลงกระแสอยู่ในตัวหม้อแปลงที่จะทำการทดสอบ จะต้องทำการลัดวงจรหม้อแปลงกระแสแล้วต่อลงกราวด์ เพื่อหลีกเลี่ยงการอิมตัวของแกนเหล็กและการเกิดแรงดันเกินที่ด้านทุติยภูมิ

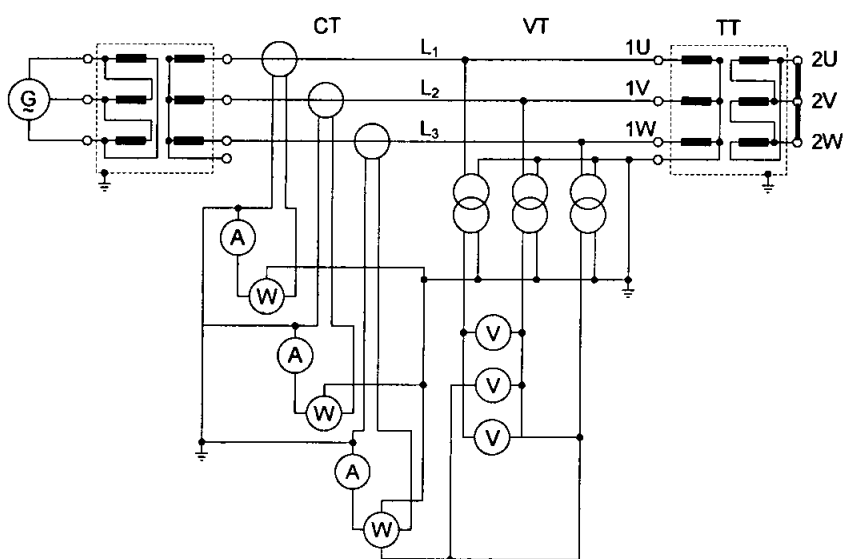
ถ้าหม้อแปลงที่ทำการทดสอบมีการใช้เครื่องเปลี่ยนแทป ทั้งแบบขณะมีภาระทางไฟฟ้าและไม่มีภาระทางไฟฟ้า ให้ทำการทดสอบครั้งแรกที่แทปพิกัด หลังจากนั้นจึงทำที่แทปที่สูงที่สุดและแทปที่ต่ำที่สุดตามลำดับ



รูปที่ 2.23 วงจรการทดสอบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส



รูปที่ 2.24 วงจรการทดสอบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสวิธีใช้โวลต์มิเตอร์สองตัว



รูปที่ 2.25 วงจรการทดสอบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสวิธีใช้โวลต์มิเตอร์สามตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างการทดสอบให้ทำการปรับเพิ่มกระแสที่จ่ายให้กับหม้อแปลงอย่างสม่ำเสมอจนถึงระดับกระแสที่จะทำการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าเพื่อหลีกเลี่ยงการเพิ่มขึ้นของกระแสอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเพิ่มขึ้นที่รวดเร็วของกระแสจะทำให้อุปกรณ์ของหม้อแปลงเกิดความเสียหาย ระยะเวลาในการทดสอบควรมีระยะเวลาสั้น เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ขดลวดเกิดความร้อน

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบโดยประมาณ หาได้จากสมการ

$$T \cong 160 \cdot \frac{g}{J^2} \quad (2.52)$$

เมื่อ

T คือ ระยะเวลาในการทดสอบ

g คือ อุณหภูมิจากขดลวดถึงน้ำมัน (คำนี้น่ามาจากการออกแบบ)

J คือ ความหนาแน่นของกระแสในขดลวด หน่วย A/mm^2

โดยทั่วไปแล้วระยะเวลาที่ใช้ในการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าที่กระแสพิกัดควรมีระยะเวลาประมาณ 30 วินาที

การวัดควรปรับค่ากระแสให้มีค่าใกล้กระแสพิกัดมากที่สุด แม้ว่ามาตรฐาน IEC จะระบุว่าค่ากระแสที่ใช้ไม่ควรต่ำกว่า 50% ของกระแสพิกัด

ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง หรือให้ความที่ไม่คงที่ ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ต้องมีค่าไม่เกิน ± 0.3 เฮิร์ต

1) การวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส หรือหม้อแปลงแรงดันขึ้นเข้าคู่ ในการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ทำการต่อหม้อแปลงกระแสกับเฟสที่มีการจ่ายพลังงาน ตามรูปที่ 2.23

2) การวัดแรงดันลัดวงจรและค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามขดลวดแรงดัน

การหาค่าแรงดันลัดวงจรและค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามขดลวดแรงดันไม่สามารถหาได้โดยการทดสอบการลัดวงจรเพียงคู่เดียว การหาค่าต้องคำนวณจากค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งสามคู่ โดยดูการต่อวงจรได้จากตารางที่ 2.2

การทดสอบการลัดวงจรจะทำให้เราทราบค่าความสูญเสีย และค่าอิมพีแดนซ์ โดยค่าที่ได้ต้องนำไปปรับเป็นค่าที่กระแสพิกัดและอุณหภูมิอ้างอิง การคำนวณค่าแรงดันลัดวงจรต่อหนึ่งขดลวดแรงดัน

ค่าที่วัดได้ทั้งสามค่าจะแสดงในลักษณะของกำลังไฟฟ้าปรากฏ ค่าแรงดันลัดวงจรในแต่ละขดลวดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon_{cc1} = \frac{\varepsilon_{cc12} + \varepsilon_{cc13} - \varepsilon_{cc23}}{2} \quad (2.53)$$

$$\varepsilon_{cc2} = \frac{\varepsilon_{cc12} + \varepsilon_{cc23} - \varepsilon_{cc13}}{2} \quad (2.54)$$

$$\varepsilon_{cc3} = \frac{\varepsilon_{cc23} + \varepsilon_{cc13} - \varepsilon_{cc12}}{2} \quad (2.55)$$

ทำการตรวจสอบได้จากสมการ

$$\varepsilon_{cc12} = \varepsilon_{cc1} + \varepsilon_{cc2} \quad (2.56)$$

$$\varepsilon_{cc13} = \varepsilon_{cc1} + \varepsilon_{cc3} \quad (2.57)$$

$$\varepsilon_{cc23} = \varepsilon_{cc2} + \varepsilon_{cc3} \quad (2.58)$$

3) การคำนวณค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าต่อหนึ่งขดลวดแรงดัน ให้นำค่าที่วัดได้จากการทดสอบมาคำนวณตามสมการ

$$P_{L1} = \frac{P_{L12} + P_{L13} - P_{L23}}{2} \quad (2.59)$$

$$P_{L2} = \frac{P_{L12} + P_{L23} - P_{L13}}{2} \quad (2.60)$$

$$P_{L3} = \frac{P_{L13} + P_{L23} - P_{L12}}{2} \quad (2.61)$$

การหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าต่อขดลวดแรงดัน ให้นำค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบตามตารางที่ 2.1 มาคำนวณดังนี้

ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าต่อขดลวดแรงดันสามารถนำมาคำนวณเพื่อให้ตรงกับสภาพการทำงานจริง ค่าความสูญเสียที่ได้จากการทดสอบนั้นไม่ใช่ค่าที่ตรงตามสภาพการทำงานจริงเพราะว่า มีผลต่างจากค่าฟลักซ์รั่วไหลในการวัดค่าแต่ละคู่ของขดลวดแรงดัน อีกทั้งในการใช้งานจริงนั้นหม้อแปลงทำงานแบบสามขดลวดแรงดัน

2.5.5 การคำนวณผลการทดสอบ

ขั้นตอนการคำนวณผลการทดสอบสามารถดูได้จากรูปที่ 2.26 โดยสามารถดูสมการที่ใช้ในการคำนวณได้จากหัวข้อหลักการโดยทั่วไป

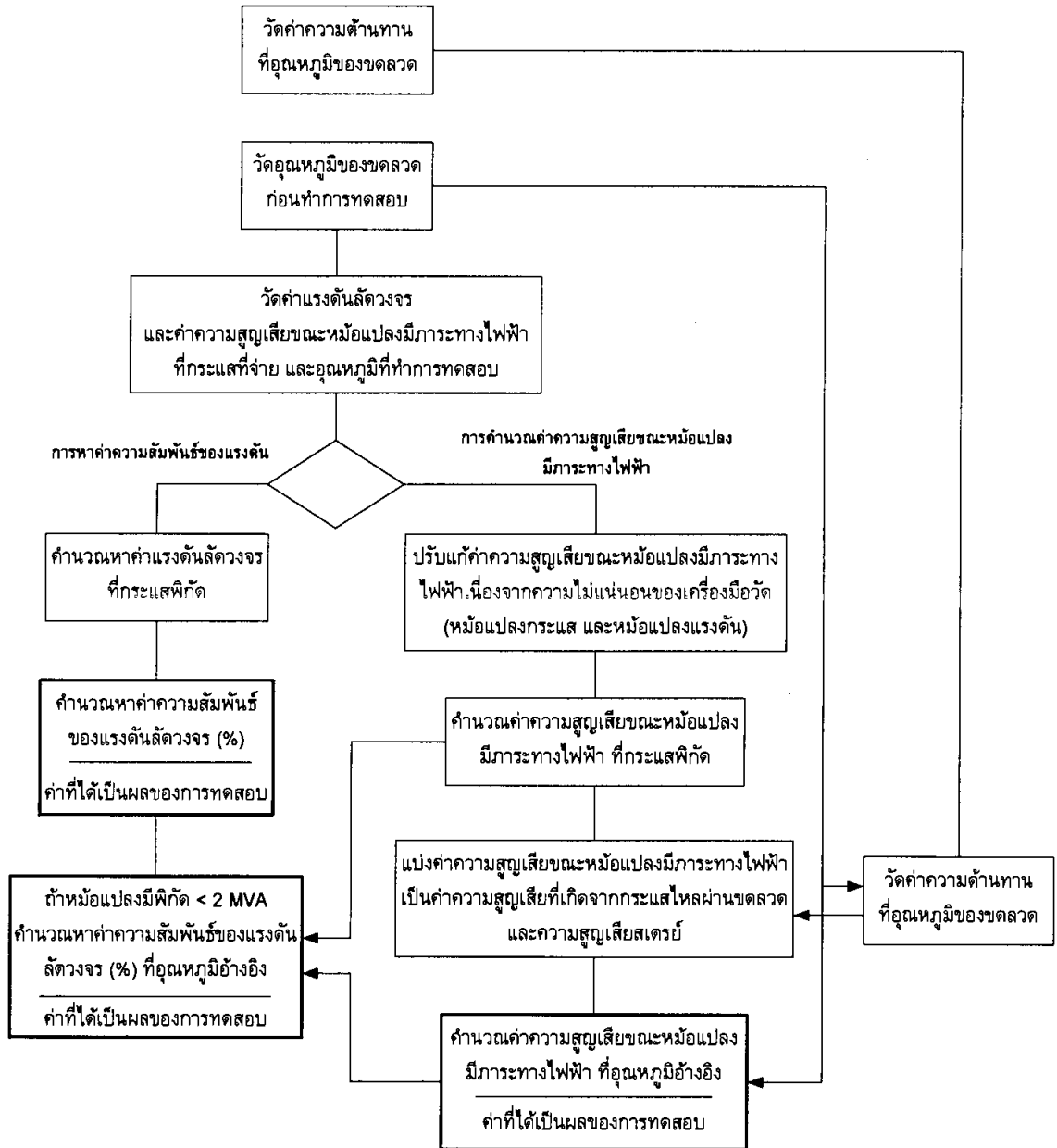
ตารางที่ 2.2 การต่อวงจรของการทดสอบการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงที่มีสามขดลวดแรงดัน

การต่อวงจรทดสอบ			
คู่ขดลวดแรงดันที่ทำ การทดสอบ	ขดลวดแรงดันที่ทำ การป้อนแรงดัน	ขดลวดแรงดันที่ทำ การลัดวงจร	ขดลวดแรงดันที่ทำ การเปิดวงจร
1-2	1	2	3
1-3	1	3	2
2-3	2	3	1

กำหนด 1 คือ ขดลวดแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2 คือ ขดลวดแรงดันระหว่างกลาง
- 3 คือ ขดลวดแรงดันต่ำ



รูปที่ 2.26 ขั้นตอนการคำนวณค่าภาระทางไฟฟ้าขณะมีภาระทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัด

2.5.6 ค่าที่ยอมรับได้ของการทดสอบ

ในการทดสอบการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้ามาตรฐานไม่ได้มีการกำหนดค่าที่ยอมรับได้ไว้ แต่ทางผู้ใช้งานหม้อแปลงจะเป็นคนกำหนดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้ากับทางผู้ผลิตว่าค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นต้องมีค่าไม่เกินเท่าใด โดยมาตรฐาน IEEE ได้กำหนดค่าขอบเขตของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือวัดที่ยอมรับได้มีค่าไม่เกิน $\pm 3\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

2.6.1 วัดคุณสมบัติของการทดสอบ

เพื่อวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า โดยที่ค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าที่ได้มานั้นจะแสดงค่าความสูญเสียของแกนเหล็กตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลง ดังนั้นการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าจึงมีความสำคัญมาก

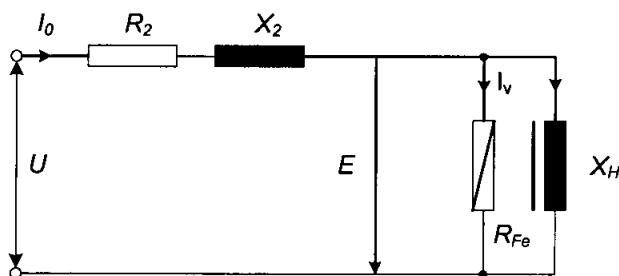
2.6.2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ

1) ทฤษฎีเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

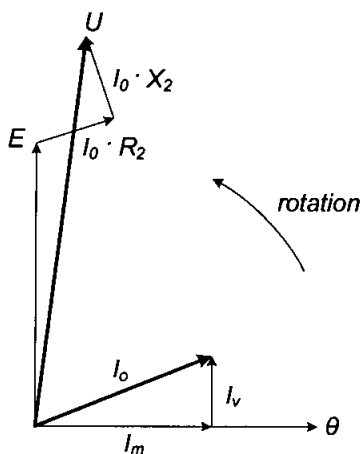
การที่ให้พลังงานกับหม้อแปลงโดยการจ่ายแรงดันพิกัดไปที่ด้านใดด้านหนึ่งของขดลวดขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า จะทำให้แกนเหล็กถูกกระตุ้นอย่างเต็มที่ ตามวงจรสมมูลรูปที่ 2.27 และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรสมมูลในรูปที่ 2.28

ลักษณะความเป็นแม่เหล็กของแกนเหล็กสามารถดูได้จากฮีสเตอร์ซิสม์ ในรูปที่ 2.29 โดยพื้นที่ภายในลูปคือค่าพลังงานที่ทำให้ฟลักซ์เกิดความเปลี่ยนแปลงใน 1 คาบ ทำให้สนามแม่เหล็กเกิดความเปลี่ยนแปลงด้วย

$$P_{Fe} = \frac{E^2}{R_{Fe}} \tag{2.62}$$

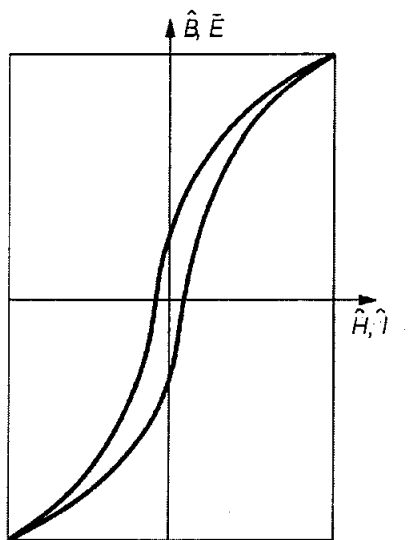


รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.28 เวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 ฮิสเตอร์ซิสลูป

เมื่อ

P_{Fe} คือ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

E คือ แรงดันที่จ่าย

R_{Fe} คือ ความต้านทานของแกนเหล็ก

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวด เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \tag{2.63}$$

เมื่อ

u คือ แรงดันเหนี่ยวนำ

$$\Phi = \hat{\Phi} \cdot \cos \omega t \tag{2.64}$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดอีกด้านหนึ่ง ที่เปลี่ยนไปตามเวลา คือ

$$u = \omega \cdot \Phi_0 \cdot \sin \omega t \tag{2.65}$$

โดย

$$\hat{\Phi}_H = \hat{B}_{Fe} \cdot A$$

$$\omega = 2\pi f$$

เมื่อ

\hat{B} คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ในแกนเหล็ก(ค่าสูงสุด) หน่วย เทสลา

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

ω คือ ความถี่เชิงมุม

f คือ ความถี่ หน่วย เฮิรตซ์

จะได้

$$u = \omega \hat{B} A N \sin \omega t \tag{2.66}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

N คือ จำนวนรอบของขดลวด
จะได้แรงดันเหนี่ยวนำเฉลี่ย \bar{U} ที่ขดลวดอีกด้าน คือ

$$\bar{U} = 4.0 f \hat{B} AN \quad (2.67)$$

สำหรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (r.m.s.) ของแรงดันเหนี่ยวนำ คือ

$$U_e = 4.44 f \hat{B} AN \quad (2.68)$$

เมื่อ

\bar{U} คือ แรงดันเหนี่ยวนำเฉลี่ย หน่วย โวลต์

U_e คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเหนี่ยวนำ หน่วย โวลต์

2) ค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า ค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ 3 ส่วนคือ

1. ความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก

$$P_{Fe} = P_h + P_w = k_h \cdot f \cdot \hat{B}^x + k_w \cdot \delta^2 \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 \quad (2.69)$$

เมื่อ

P_h คือ ความสูญเสียจากฮีสเตอรีซิส

P_w คือ ความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน

k_h, k_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความสูญเสียจากฮีสเตอรีซิส และความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน

δ คือ ความหนาของแกนเหล็ก

x คือ ฟังก์ชันของการเหนี่ยวนำ

2. ความสูญเสียไดอิเล็กตริก

$$P_c = U^2 \cdot \omega C \cdot \text{tg} \delta \quad (2.70)$$

3. ความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลผ่าน

$$P_j = I_0^2 \cdot R_2 \quad (2.71)$$

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก และค่าความสูญเสียที่เกิดจากขดลวดสามารถละทิ้งได้เนื่องจากมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก

$$P_{Fe} \gg P_c + P_j \quad (2.72)$$

นั่นหมายความว่าค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า คือค่าความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก

3) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้ากับความพิດเพี้ยนของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า แรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกทำให้ผิดเพี้ยนเนื่องจากแรงดันที่จ่ายให้หม้อแปลงขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าในขณะทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ภายในแหล่งจ่าย วงจรสมมูลของการทดสอบค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.30

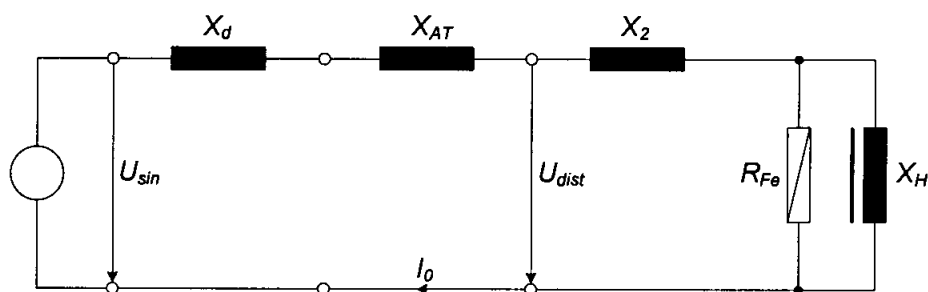
การวัดโดยทั่วไปสมมติให้ค่าความสูญเสียฮีสเตอร์ซิส ขึ้นอยู่กับค่าสูงสุดของการเหนี่ยวนำ และค่าเฉลี่ยของแรงดันที่จ่าย ถ้าตั้งแรงดันที่จ่ายไว้แล้ว แรงดันที่ผิดเพี้ยนจะไม่มีผลกับค่าความสูญเสียฮีสเตอร์ซิส

ส่วนค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน ขึ้นอยู่กับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดัน และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันก็จะได้รับผลกระทบโดยตรงกับแรงดันที่ผิดเพี้ยน จึงทำให้ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนมีผลกระทบด้วย

เนื่องจากค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงมากกับค่าความแตกต่างของรูปคลื่นไซน์ สำหรับแรงดันที่เป็นรูปคลื่นไซน์

$$\text{ค่าฟอร์มแฟกเตอร์ของแรงดัน} \quad k_f = \frac{U}{\bar{U}} = 1.11 \quad (2.73)$$

สำหรับรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน ฟอร์มแฟกเตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลง แรงดันที่มีลักษณะเป็นคลื่นสูงสุด ($k_f > 1.11$) จะทำให้ค่าที่วัดออกมาได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ส่วนแรงดันที่มีลักษณะคลื่นเรียบจะทำให้ค่าที่วัดออกมาได้มากกว่าความเป็นจริง ฉะนั้นค่าความสูญเสียที่วัดได้จึงต้องมีการคำนวณเพื่อปรับแก้เพื่อให้เป็นค่าที่ถูกต้องด้วย



X_d คือ รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

X_{AT} คือ รีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงแรงดันขึ้น

X_2 คือ รีแอกแตนซ์ของขดลวดด้านแรงดันต่ำ

R_{FE} คือ ความต้านทานของแกนเหล็ก

X_H คือ ความต้านทานหลัก

U_{sin} คือ แรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ยังไม่เกิดความผิดเพี้ยน

U_{dist} คือ แรงดันที่เกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

I_0 คือ กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า

รูปที่ 2.30 แสดงแรงดันที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดเพี้ยนของแรงดันจะไม่เกิดขึ้นในขณะหม้อแปลงใช้งานจริง เป็นเพราะว่าอิมพีแดนซ์ของระบบน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ด้วยเหตุผลนี้ และเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างหม้อแปลงได้ ค่าความสูญเสียที่ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าจึงต้องรับรองว่าได้ใช้แหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นไซน์

4) การแก้ค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าด้วยค่าฟอร์มแฟกเตอร์

สมการแสดงค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าที่ยังมีความผิดเพี้ยนอยู่

$$P_{0m} = P_h + P_w \cdot \left(\frac{k_f}{1.11} \right)^2 \quad (2.74)$$

เมื่อ

P_{0m} คือ ความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าที่ยังมีความผิดเพี้ยนอยู่

P_h คือ ความสูญเสียจากฮีสเตอร์ซิส

P_w คือ ความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน

k_f คือ ฟอร์มแฟกเตอร์ของแรงดัน

หารด้วย ค่าสูญเสียจากแรงดันรูปคลื่นไซน์ (P_0) ได้สมการ

$$\frac{P_{0m}}{P_0} = \frac{P_h}{P_0} + \frac{P_w}{P_0} \cdot \left(\frac{k_f}{1.11} \right)^2 \quad (2.75)$$

ตามมาตรฐาน IEC การแก้ไขทำได้โดยสมการ

$$P_0 = P_{0m} \cdot (1 + d) \quad (2.76)$$

เมื่อ

$$d = \frac{\bar{U} \cdot 1.11 - U}{\bar{U} \cdot 1.11}$$

โดยที่ค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันต้องต่างกันไม่เกิน 3% ถ้ามากกว่านี้จะต้องตรวจสอบและแก้ไขวงจรที่ใช้วัดใหม่

ตามมาตรฐาน IEEE การแก้ไขทำได้โดยสมการ

$$\frac{P_h}{P_0} = P_1 \quad \text{และ} \quad \frac{P_w}{P_0} = P_2 \quad (2.77)$$

แล้วจะได้เป็น

$$P_0 = \frac{P_{0m}}{P_1 + P_2 \cdot \left(\frac{U}{\bar{U} \cdot 1.11} \right)^2} = \frac{P_{0m}}{P_1 + P_2 \cdot \left(\frac{k_f}{1.11} \right)^2} = \frac{P_{0m}}{P_1 + P_2 \cdot k} \quad (2.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบค่าต่อหน่วยของ P_1 และ P_2 สามารถคำนวณโดยใช้รูปคลื่นซายน์ที่แท้จริงได้เลย แต่ถ้าไม่ทราบ จะใช้ค่า 0.5 ต่อหน่วยกับทั้งสองค่า ถ้าค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าที่แก้แล้วต่างกับค่าที่วัดได้เกิน 5% โดยใช้สมการข้างต้น จะต้องตรวจสอบและแก้ไขวงจรที่ใช้วัดใหม่

5) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแกนเหล็ก

โดยปกติแล้วอุณหภูมิจะมีผลกับค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงๆ เท่านั้น

ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้ทำการทดสอบหม้อแปลงที่อุณหภูมิแวดล้อมในห้องทดสอบ โดยไม่ต้องแก้อุณหภูมิไปที่อุณหภูมิอ้างอิง

ตามมาตรฐาน IEEE กำหนดให้อุณหภูมิอ้างอิงของค่าความสูญเสียขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าคือ 20°C ไม่ต้องทำการปรับแก้ถ้าเป็นไปตามข้อแม้ว่า

1. อุณหภูมิเฉลี่ย (อุณหภูมิของแกนเหล็ก) มีค่าอยู่ในช่วง $\pm 10^\circ\text{C}$ ของอุณหภูมิอ้างอิง
2. อุณหภูมิที่ต่างกันของอุณหภูมิที่จุดบนสุดของหม้อแปลงและอุณหภูมิที่จุดต่ำสุดของหม้อแปลงต้องไม่เกิน 5°C

ถ้าไม่เป็นไปตามข้อแม้ที่กล่าวมา การวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าจะต้องใช้อุณหภูมิอ้างอิงมาปรับแก้ ตามสมการ

$$P_0 = P_{0m} \cdot (1 + (\Theta_m - 20) \cdot K) \quad (2.79)$$

เมื่อ

P_0 คือ ความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 20°C และอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมัน

P_{0m} คือ ความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันขณะทำการทดสอบ

Θ_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันขณะทำการทดสอบ

K_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแกนเหล็ก สำหรับแกนเหล็กบริสุทธิ์ ค่าสัมประสิทธิ์จะเท่ากับ 0.00065

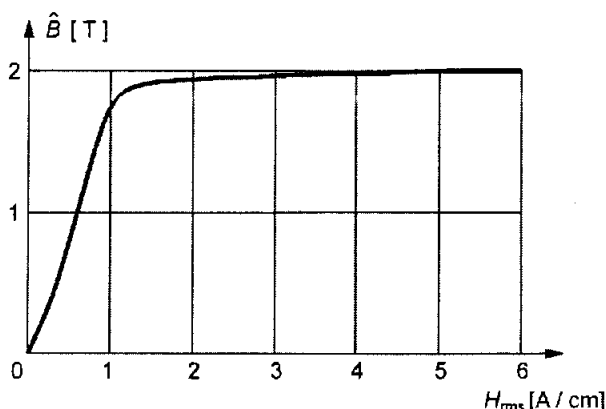
6) กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า

พฤติกรรมการเป็นแม่เหล็กของแกนเหล็กไม่เป็นเชิงเส้น ในรูปที่ 2.31 และค่าความสูญเสียจากแกนเหล็กเป็นไปตามพื้นที่ในรูปในรูปที่ 2.29 กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าจะไม่ผิดเพี้ยนเมื่อจ่ายแรงดันที่เป็นรูปคลื่นซายน์ ดูในรูปที่ 2.32 สำหรับหม้อแปลง

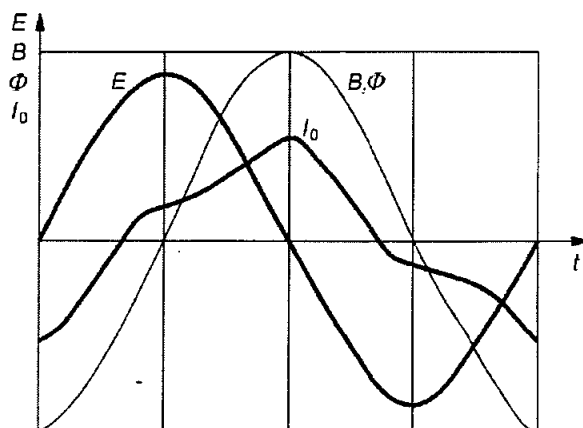
ไฟฟ้ากำลังขนาดเล็ก กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าจะอยู่ที่ประมาณ 1 ถึง 5 % ของ กระแสพิกัด ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่จะอยู่ที่ประมาณ 0.1 ถึง 0.3%

กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าจะเป็นค่ารกกกำลังสองเฉลี่ยของ กระแสที่วัดได้ระหว่างการทดสอบ และจะคิดให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของกระแสพิกัดของขดลวด ในขณะที่จ่ายแรงดัน สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ค่ากระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทาง ไฟฟ้าจะเป็นค่าเฉลี่ยของทั้งสามเฟส

กระแสที่จ่ายให้กับหม้อแปลง เป็นกระแสที่เพียงพอสำหรับกระตุ้นแกนเหล็กให้อิ่มตัว และเป็นผลรวมของกระแสเชิงความจุที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นตัวเก็บประจุของขดลวด ด้วย ถ้าความเป็นแม่เหล็กต่ำ กระแสเชิงความจุมักจะเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง และผลที่ตามมาคือ กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าจะมีค่าลดลงจนถึงค่าต่ำสุดเมื่อเพิ่มแรงดัน แต่หากว่าเพิ่มแรงดันให้มากกว่าค่ากระแสที่ต่ำสุด กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.31 กราฟแสดงพฤติกรรมการเป็นแม่เหล็กของแกนเหล็ก



รูปที่ 2.32 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จ่าย กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทาง ไฟฟ้าและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

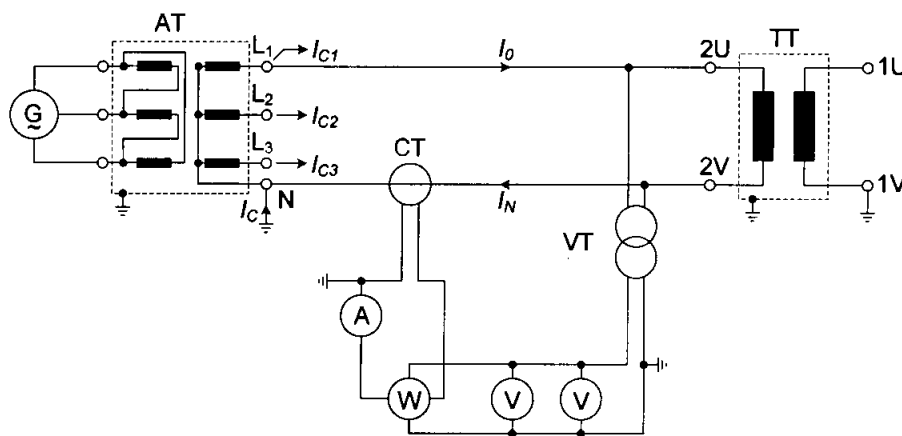
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 วงจรทดสอบ

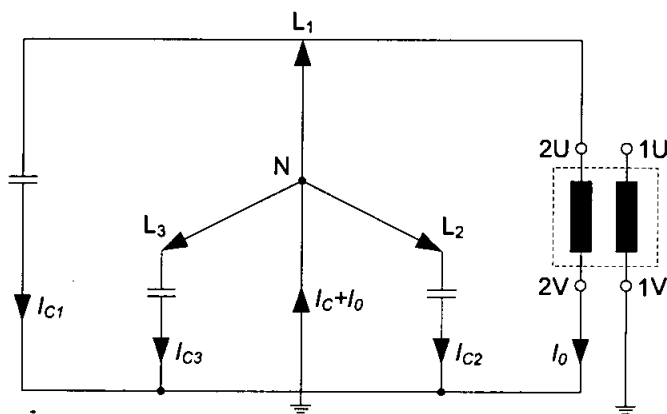
1) หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส

การต่อวงจรทดสอบ และวงจรสมมูลของการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสไม่มีภาระทางไฟฟ้า เมื่อใช้แหล่งจ่ายที่เป็นไลน์ทูนิวทริลดูในรูปที่ 2.33 และ 2.34 ตามลำดับ ส่วนการต่อวงจรทดสอบ และวงจรสมมูลของการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสไม่มีภาระทางไฟฟ้า เมื่อใช้แหล่งจ่ายที่เป็นไลน์ทูนีไลน์ ดูในรูปที่ 2.4.9 และ 2.4.10 ตามลำดับ

แต่ในการต่อวงจรทดสอบ จุดที่เชื่อมลงดินจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้เมื่อทำการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงหนึ่งเฟส ข้อผิดพลาดเกิดจากกระแสไหลลงดินเนื่องมาจากความเป็นตัวเก็บประจุของสายเคเบิลที่ต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ จุดเชื่อมต่อดินของวงจรทดสอบทั้ง 2 แบบ สามารถดูได้ในรูปที่ 2.33 และรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.33 วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าของหม้อแปลงหนึ่งเฟสโดยจ่ายแรงดันไลน์ทูนิวทริล



รูปที่ 2.34 วงจรสมมูลแสดงพฤติกรรมของกระแสเชิงความจุ โดยการจ่ายแรงดันไลน์ทูนิวทริล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.34 กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า I_0 ได้รับผลกระทบจาก กระแสเชิงความจุ I_c โดยปกติ ค่ากระแสเชิงความจุทั้ง 3 ค่า คือ I_{c1} , I_{c2} และ I_{c3} จะมีค่าเท่าๆกัน และมีมุมต่างเฟส 120° ในกรณีนี้ผลรวมของกระแสจะมีค่าเป็นศูนย์

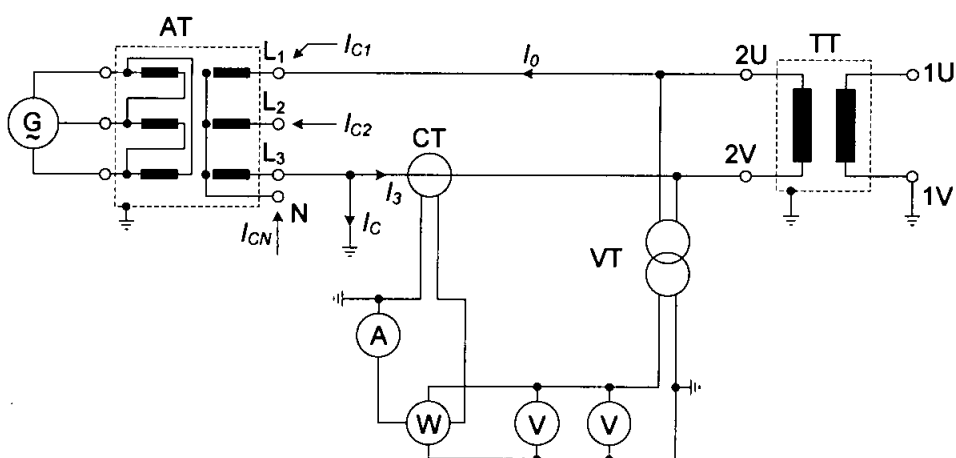
ถ้าแหล่งจ่ายไม่มีจุดที่มีความต่างศักย์เท่ากับดิน ในรูปที่ 2.35 จะเกิดกระแสเหลือ I_c โดยกระแสเหลือมีผลกับกระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ต่อลงดินด้วย ข้อผิดพลาดนี้สามารถขจัดได้โดยการต่อจุดเชื่อมลงดิน ก่อนหม้อแปลง กระแสในด้านแหล่งจ่าย การจ่ายแรงดันไลนทูไลนให้กับหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ ผลของกระแส I_c ต่อกระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า I_0 สามารถดูได้จากวงจรสมมูล รูปที่ 2.36

2) หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

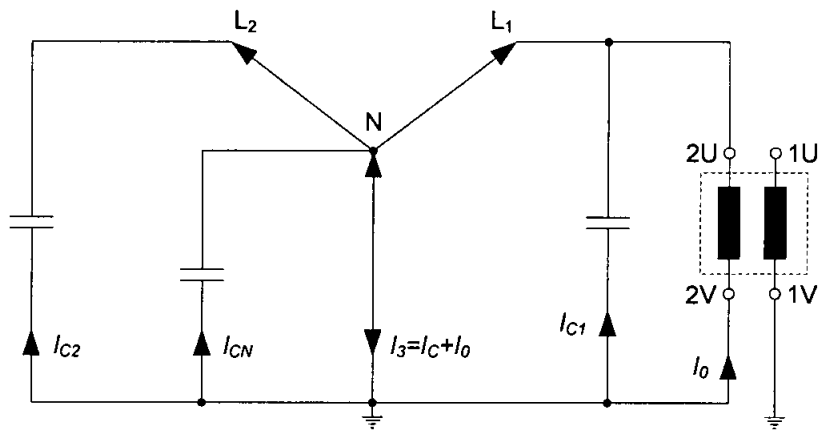
เมื่อการทดสอบค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าต้องใช้ หม้อแปลงไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ จะต้องแบ่งวงจรให้เป็นสองด้าน คือ ด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ ซึ่งสามารถดูได้ในวันไลน์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.37 ซึ่งจะรวมถึงตารางการต่อวงจรแบบต่างๆด้วย

สิ่งที่จำเป็นสำหรับการต่อวงจรทดสอบ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องให้ความถี่ที่คงที่แม้ว่าภาระทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงก็ตาม และ ค่าอิมพีแดนซ์ขณะลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงที่ทำการทดสอบต้องมีค่าน้อยมาก เพราะค่าอิมพีแดนซ์ที่น้อยจะทำให้ค่าแรงดันผิดเพี้ยนมีค่าน้อยลงด้วย

ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส แรงดันที่เหนี่ยวนำทุกขดลวดจะถูกวัด เพื่อที่จะหาค่าฟอร์แฟกเตอร์ของแรงดัน ค่าฟอร์แฟกเตอร์แรงดันไลนทูไลนของการต่อขดลวดแบบสตาร์จะมีค่าต่างจากปกติเนื่องจากไม่มีฮาร์โมนิกลำดับที่สามด้วย 3 ลงตัว



รูปที่ 2.35 วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าของหม้อแปลงหนึ่งเฟสโดยจ่ายแรงดันไลนทูไลน



รูปที่ 2.36 วงจรสมมูลแสดงพฤติกรรมของกระแสเชิงความจุ โดยการจ่ายแรงดันไล้ท์ไลน์

วงจรถางด้านปฐมภูมิ		วงจรถางด้านทุติยภูมิ					
ประเภทการต่อของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ประเภทการต่อของ หม้อแปลงแรงดันขึ้น		การวัดค่า	ประเภทการต่อของ หม้อแปลงแรงดัน		ประเภทการต่อของ หม้อแปลงที่ทำการทดสอบ	
	LV	HV		HV	LV	LV	HV
		หรือ	วัดแรงดันระหว่าง L_1, L_2, L_3				หรือ
				วัดแรงดันระหว่าง L_1, L_2, L_3			
หรือ			วัดแรงดันระหว่าง L_1, N				หรือ
				วัดแรงดันระหว่าง L_1, L_2, L_3			

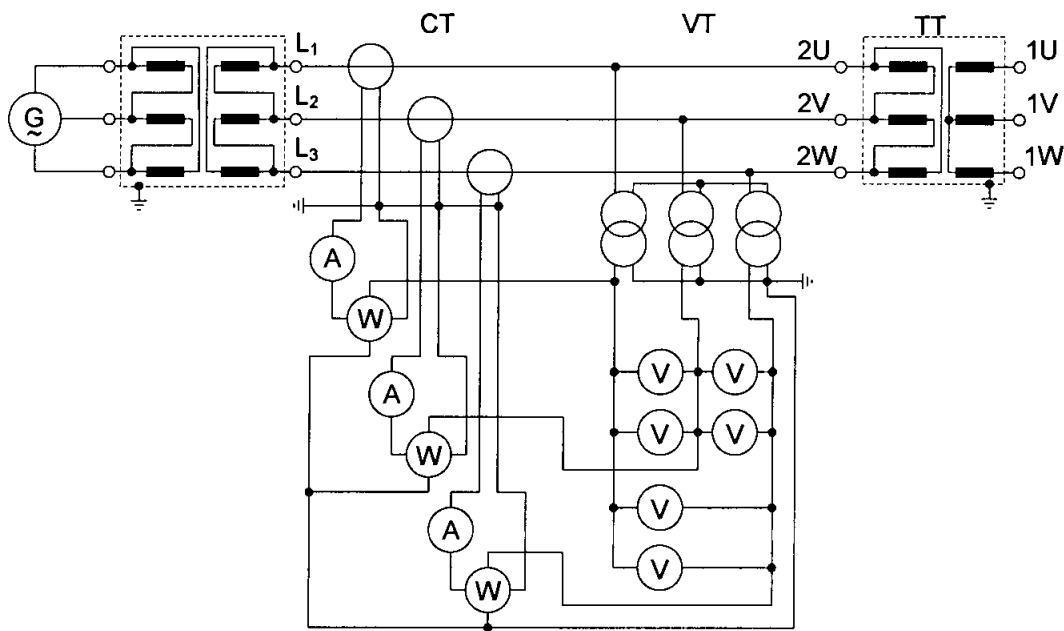
หมายเหตุ : วงจรถางด้านปฐมภูมิสามารถใช้ได้กับวงจรถางด้านทุติยภูมิทั้งหมด

รูปที่ 2.37 ตารางแสดงการต่อวงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าแบบต่างๆ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

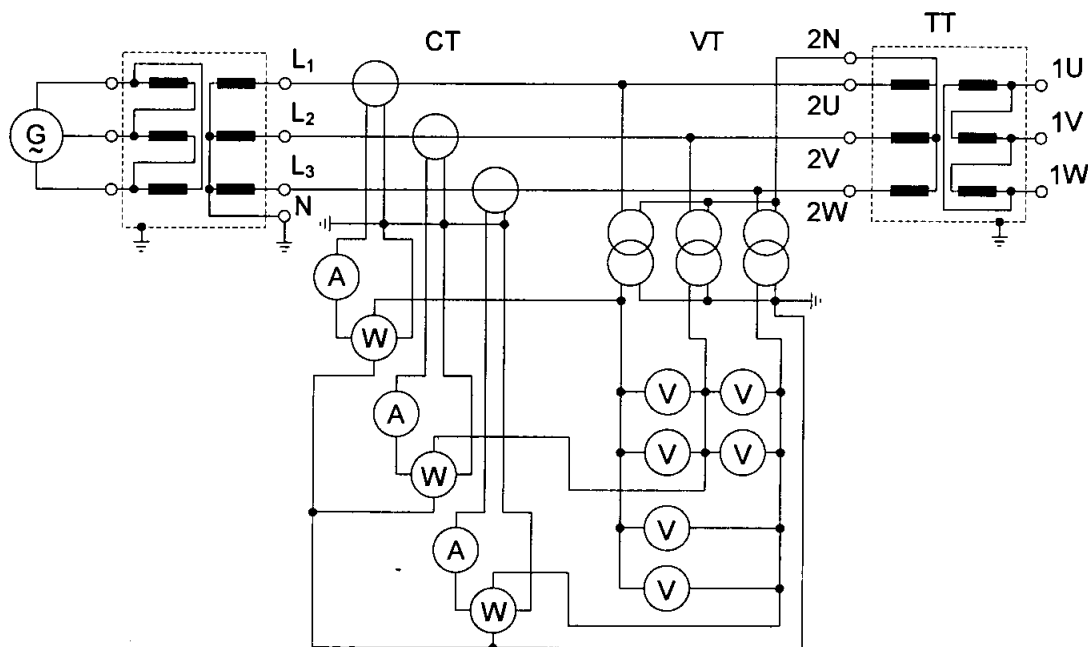
ในรูปที่ 2.38 ถึง 2.41 แสดงการต่อวงจรทดสอบแบบต่างๆ ในรูปที่ 2.38 จะใช้สำหรับทดสอบหม้อแปลงที่มีกลุ่มของเวกเตอร์เป็นแบบ Yd, YNd หรือ Dd โดยที่วัดดีมิเตอร์จะต่อแบบสตาร์ และโวลต์มิเตอร์จะวัดค่าแรงดันไล้ท์ไลน์ สำหรับทดสอบหม้อแปลงที่มีกลุ่มของเวกเตอร์เป็นแบบ Dyn ในรูปที่ 2.39 หม้อแปลงแรงดัน และ วัดดีมิเตอร์จะต่อแบบสตาร์ และ โวลต์มิเตอร์จะวัดค่าแรงดันไล้ท์ไลน์ นั้นเป็นเพราะว่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่สามสามารถไหลออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านขดลวดแรงดันสูงในการต่อแบบเตลต้า ดังนั้นจึงควรระวังการผิดพลาดของแรงดันที่จะเกิดขึ้นที่ขดลวดแรงดันต่ำ

ในรูปที่ 2.40 ใช้สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Yyn และ YNyn ซึ่งโวลต์มิเตอร์จะวัดค่าแรงดัน ไลน์ทูไลน์ ส่วนในรูปที่ 2.41 ใช้สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Yy และ YNy ซึ่งโวลต์มิเตอร์ต่อแบบเตลต้าที่ด้านทุติยภูมิและแรงดันที่ได้เป็นแบบแรงดันไลน์ทูไลน์

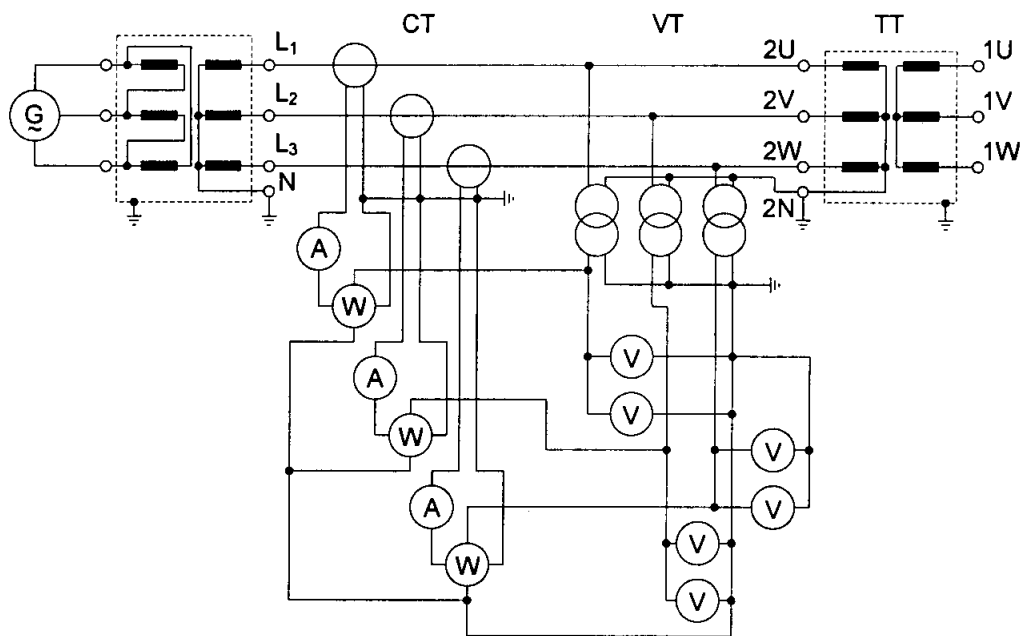


รูปที่ 2.38 วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Yd , YNd และ Dd

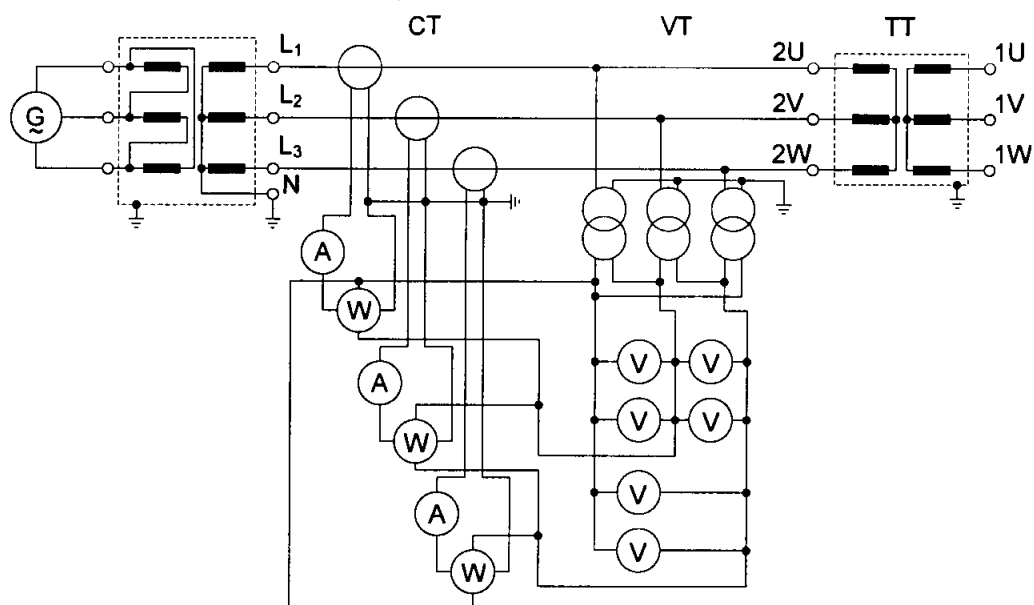


รูปที่ 2.39 วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Dyn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Yyn และ YNyn



รูปที่ 2.41 วงจรการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเวกเตอร์ Yy และ YNy

2.6.4 กระบวนการทดสอบ

ทำการลัดวงจรหม้อแปลงกระแสที่มีอยู่ที่หม้อแปลงที่จะทดสอบ และต่อบขซึ่งแทลงดิน ก่อนที่จะทำการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า ควรตรวจสอบอัตราส่วนแรงดันก่อน และตรวจสอบระดับน้ำมันของหม้อแปลงก่อน

ก่อนที่จะทำการวัดค่าจริงควรกระตุ้นหม้อแปลงด้วยแรงดัน 1.1 ถึง 1.15 เท่าของแรงดันพิกัด เพื่อลดอำนาจแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่หลังจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานของขดลวด หรือที่เกิดจากอิมพัลส์สวิตชิ่ง ค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลง ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าที่ถูกต้องจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อแกนเหล็กอิ่มตัวแล้วเท่านั้น

โดยปกติจะเริ่มวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าที่ 110% ของแรงดันพิกัด แล้วลดลงมาเป็น 100%, 90% และ 80% ของแรงดันพิกัด โดยจะจ่ายเป็นค่าแรงดันเฉลี่ยที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสจะใช้ค่าแรงดันเฉลี่ยของทั้งสามเฟสเพื่อหาค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า ถ้าไม่สามารถปรับแรงดันให้เท่ากับแรงดันที่ต้องการได้ แต่ปรับได้อยู่ใน 0.1% ของแรงดันที่ต้องการ ก็สามารถหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจริงได้โดยใช้วิธีการอินเตอร์โพล

เมื่อทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขนาดใหญ่ วัดดีมิเตอร์ 3 เครื่อง อาจแสดงผลต่างกัน โดยเป็นไปได้ที่อีก 1 เครื่อง จะแสดงผลออกมาในทางตรงกันข้าม เป็นเพราะความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กไม่คงที่และมุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันในหนึ่งเฟสมากกว่า 90° ทำให้เกิดความไม่สมมาตรกันของความเป็นแม่เหล็กของแกนเหล็กทำให้กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าไม่สมมาตรด้วย

2.6.5 การคำนวณผลการทดสอบ

เนื่องจากแรงดันที่ผิดเพี้ยน และแหล่งจ่าย จ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จึงทำให้วัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าผิดเพี้ยนไป การคำนวณผลการทดสอบจึงสามารถทำได้โดย

ตามมาตรฐาน IEC

$$P_0 = P_{0m} \cdot \left(1 + \left(\frac{\bar{U} \cdot 1.11 - U}{\bar{U} \cdot 1.11} \right) \right) \quad (2.80)$$

ตามมาตรฐาน IEEE

$$P_0 = \frac{P_{0m}}{P_1 + P_2 \cdot \left(\frac{U}{\bar{U} \cdot 1.11} \right)^2} \quad (2.81)$$

โดยในมาตรฐาน IEEE การวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าต้องอ้างอิงไปที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 20°C

ค่าการกำลังสองเฉลี่ยของกระแสที่วัดได้จะถือให้เป็นค่ากระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสให้นำค่ากระแสที่วัดได้เฉลี่ยของทั้งสามเฟสมาเป็นค่ากระแสขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า

การแก้ไขค่าที่ผิดพลาดเนื่องจากเครื่องมือวัดมีผลกระทบต่อค่าการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจึงไม่จำเป็นต้องแก้ไขค่าที่ผิดพลาดจากเครื่องมือ

2.6.6 ค่าที่ยอมรับได้ของการทดสอบ

การวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้านั้น มาตรฐานไม่ได้มีการกำหนดเกณฑ์ว่าต้องมีค่าเท่าใดถึงจะผ่านการทดสอบ โดยผู้ใช้หม้อแปลงจะเป็นผู้กำหนดกับทางผู้ผลิตเองว่าค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าได้ไม่เกินเท่าไร ซึ่งค่าความสูญเสียที่ต่ำย่อมหมายถึงราคาของหม้อแปลงที่จะสูงขึ้นตามไปด้วย

2.7 การวัดหาค่าความทนของฉนวนต่อแรงดันกระแอสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก

2.7.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เพื่อทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันภายนอก ซึ่งฉนวนหลักไม่ได้หมายถึงฉนวนระหว่างขดลวดเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงฉนวนที่อยู่ระหว่างขดลวดและระบบดินด้วย

2.7.2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ

โดยทั่วไปการทดสอบในเรื่องนี้จะต้องทดสอบที่อุณหภูมิห้องไม่ต่ำกว่า 10°C ในการทดสอบฉนวนภายในหม้อแปลงนั้น จะสามารถแบ่งชนิดของฉนวนออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. แบบฉนวนสม่ำเสมอ 2. แบบฉนวนไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้มีการทดสอบที่แตกต่างกันตามชนิดของฉนวน

ในการจ่ายแรงดันทดสอบ (U_p) นั้น ระดับของแรงดันที่จ่ายจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันสำหรับทดสอบขดลวดภายในหม้อแปลง (U_m) ซึ่งค่าเป็นค่าที่ผู้ผลิตหม้อแปลงเป็นผู้ที่ออกแบบมา

สำหรับชนิดที่ 1 หม้อแปลงที่มีการฉนวนแบบสม่ำเสมอ ขดลวดภายในหม้อแปลงจะมีการฉนวนที่เท่ากัน การทดสอบหาค่าความทนของฉนวนนั้น จะจ่ายแรงดันทดสอบ (U_p) ซึ่งแรงดันทดสอบนี้จะขึ้นอยู่กับระดับความทนของฉนวนภายในหม้อแปลง ทุกส่วนของขดลวดจะถูกทดสอบด้วยแรงดันทดสอบ 100%

ส่วนชนิดที่ 2 หม้อแปลงที่มีการฉนวนแบบไม่สม่ำเสมอนั้น ขดลวดภายในหม้อแปลงจะมีการฉนวนที่ไม่เท่ากัน การจ่ายแรงดันทดสอบ (U_p) นั้นจะต้องจ่ายแรงดันที่ระดับของฉนวนที่มีความทนน้อยที่สุด

2.7.3 กระบวนการทดสอบ

1) ก่อนที่จะเริ่มการทดสอบนั้น ต้องมั่นใจก่อนว่าการฉนวนของหม้อแปลงที่เราจะทดสอบเป็นแบบชนิดไหน หากมีการฉนวนแบบสม่ำเสมอ จะสามารถจ่ายแรงดันทดสอบได้ แต่ถ้าหากมีการฉนวนแบบไม่สม่ำเสมอ จะต้องจ่ายแรงดันทดสอบที่ระดับของฉนวนที่มีความทนน้อยที่สุด นั่นคือส่วนที่เป็นนิวตรอน

2) บุคลากรจะต้องมีการตรวจสอบก่อนนำมาใช้ในการทดสอบ ในส่วนของกับดักฟ้าผ่าและบุชชิงอาร์คชิงฮอร์นจะต้องปลดออกก่อนทำการทดสอบ

ตารางที่ 2.3 ค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของฉนวนตามระดับแรงดัน U_m

ค่าแรงดันสูงสุดที่สามารถทนได้ U_m (kV r.m.s)	แรงดันทดสอบความทนของฉนวนจาก แหล่งจ่ายภายนอก (kV r.m.s)
3.6	10
7.2	20
12	28
17.5	38
24	50
36	70
52	95
60	115
72.5	140
100	150 หรือ 185
123	185 หรือ 230
145	230 หรือ 275
170	275 หรือ 325

3) ทำการต่อวงจรโดยทำการลัดวงจรทางด้านแรงดันต่ำลงกราวหนึ่ง ส่วนทางด้านแรงดันสูงให้ทำการลัดวงจร แล้วทำการแล้วทำการจ่ายแรงดันทดสอบ (U_p)

4) หากทำการทดสอบที่ระดับแรงดันสูงๆ ควรจะมีอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรงกลมที่ใช้เป็นตัวป้องกันการเกิดอาร์ค เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายบุชซึ่งมีค่าสูง (ส่วนอื่นของหม้อแปลงที่ไม่มีส่วนในการทดสอบจะต้องต่อลงกราวไปด้วย)

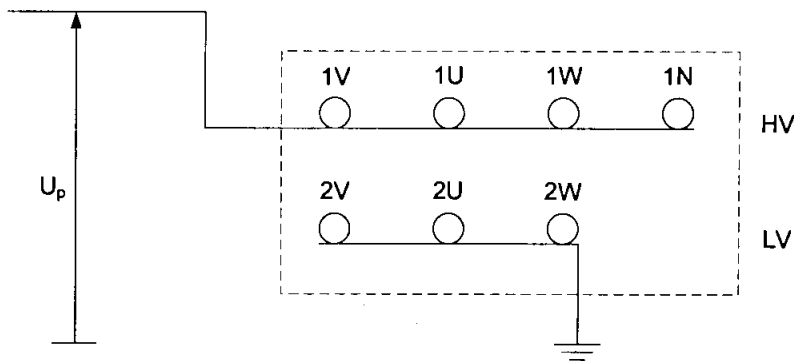
2.7.4 หลักการในการทดสอบและการต่อวงจร

1) การทดสอบในหัวข้อนี้จะต้องจ่ายแรงที่ความถี่ที่พิกัด หากจะต้องการจ่ายแรงดันที่ความถี่สูงกว่านี้จะเป็นการทดสอบในหัวข้อต่อไปคือ การทดสอบความทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ ซึ่งการต่อวงจรในการทดสอบของหม้อแปลงที่มีการฉนวนแตกต่างกันจะเหมือนกัน ดังรูปที่ 2.42

2) หม้อแปลงที่ใช้จ่ายแรงดันทดสอบ ส่วนมากจะใช้หม้อแปลงแคทแคท ซึ่งเป็นหม้อแปลง 1 เฟส

3) ต่อ Reactor ขนาน เพื่อชดเชยกระแสที่อาจมีค่าสูงเกินไปเนื่องจากจ่ายให้กับโหลด (หม้อแปลงที่ทดสอบ)

4) จากหม้อแปลงแคทแคท ต่อวงจรมาที่ติไวเตอร์เพื่อทำการวัดหาค่าแรงดันซึ่งค่าสูงสุดที่วัดได้จากติไวเตอร์จะต้องหารด้วย $\sqrt{2}$ จึงจะเท่ากับค่าแรงดันที่เราต้องการทดสอบ



รูปที่ 2.42 วงจรการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอกสำหรับหม้อแปลงสามเฟส

2.7.5 ระยะเวลาในการทดสอบ

- 1) ระยะเวลาในการทดสอบ 60 วินาที
- 2) การขึ้นแรงดันควรจะขึ้นอย่างรวดเร็วจากระดับแรงดัน 25% ของแรงดันทดสอบ แต่ต้องขึ้นด้วยความสม่ำเสมอ ส่วนการลงแรงดันเมื่อทดสอบเสร็จแล้วให้ลงแรงดันอย่างรวดเร็ว
- 3) ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบควรจะไม่น้อยกว่า 80% ของความถี่พิกัด

2.8 การทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ

2.8.1 วัตถุประสงค์

- 1) การทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำนี้ เพื่อที่จะต้องการทดสอบความทนของฉนวนในแต่ละเฟส
- 2) เพื่อทำการวัดค่าพหุคูณฮาร์มอนิกของหม้อแปลง

2.8.2 ลักษณะทั่วไป

เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานของ IEC อาจจะต้องมีการทดสอบการวัดค่าพหุคูณฮาร์มอนิกควบคู่ไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการพิจารณาค่าต่างๆ ของหม้อแปลง ดังนี้

- 1) ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับระยะสั้น “Short duration AC” (ACSD) และทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับระยะยาว “Long duration AC” (ACLD)
- 2) หม้อแปลงที่ทดสอบมีการฉนวนแบบไหน ซึ่งอาจจะมีการฉนวนแบบสม่ำเสมอ หรือมีการฉนวนแบบไม่สม่ำเสมอ
- 3) หม้อแปลงที่ทดสอบมีค่าแรงดันทดสอบขดลวดภายในหม้อแปลง (U_m) มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่า 72.5 กิโลโวลต์

ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ข้างต้น ที่ใช้ในการพิจารณาการวัดค่าพหุคูณฮาร์มอนิกนั้น ดูได้จากตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงการวัดค่าพาเซี่ยลติสซาร์จในการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ

ลักษณะการ ฉนวนของ ขดลวด	ค่าแรงดันสูงสุดที่ สามารถทนได้ U_m (kV)	หม้อแปลงสามเฟส			หม้อแปลงหนึ่งเฟส	
		ACLD	ACSD		ACLD	ACSD
			ทดสอบ หนึ่งเฟส เทียบ กราวด์	ทดสอบ สามเฟส เทียบเฟส		ทดสอบ หนึ่งเฟส เทียบ กราวด์
การทดสอบตามมาตรฐาน IEC						
การฉนวน สม่ำเสมอ	≤ 72.5			o		o
	$72.5 < U_m < 170$			PD		PD
	$170 < U_m < 300$	PD			PD	
	> 300	PD			PD	
การฉนวนไม่ สม่ำเสมอ	$72.5 < U_m < 170$		PD	PD		PD
	$170 < U_m < 300$	PD			PD	
	> 300	PD			PD	
การทดสอบตามมาตรฐาน IEEE						
ระดับ 1 การฉนวน สม่ำเสมอ	< 115			o		o
ระดับ 1 การฉนวน ไม่สม่ำเสมอ	< 115		o	o		o
ระดับ 2	> 115	PD			PD	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 หลักการในการทดสอบ

1) หากแรงดันทดสอบ (U_p) ที่ใช้ในการทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ มีค่าเกิน 2 เท่าของแรงดันพิกัดทางด้านแรงสูง อาจส่งผลให้เกิดการอิมพัลส์ที่แกนเหล็กจนไม่สามารถขึ้นแรงดันได้ ดังรูปที่ 2.43 ดังนั้นจึงต้องควบคุมให้ความถี่ที่ใช้ทดสอบมีค่าต่ำตามสมการนี้

$$E = 4.44 fNB_{\max} A \quad (2.82)$$

โดยที่

- E คือ แรงดันเหนี่ยวนำ
- N คือ จำนวนรอบของขดลวด
- f คือ ความถี่
- B คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด

2) การจ่ายแรงดันต้องจ่ายแรงดันทางด้านแรงดันต่ำ เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำไปทางด้านแรงดันสูงจะทำให้ได้ค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันพิกัด สำหรับค่าแรงดันทดสอบขดลวดภายในหม้อแปลง (U_m) นั้น นำไปพิจารณาว่าจะมีการวัดพาเซิลลิตสซาร์จควบคุมไปด้วยหรือไม่

3) ก่อนจะทำกาทดสอบนี้ ต้องทราบว่าการฉนวนของหม้อแปลงที่เราต้องการจะทดสอบเป็นการฉนวนแบบใด

4) ก่อนการทดสอบนี้ เมื่อหม้อแปลงที่ต้องการจะทดสอบมีการใส่น้ำมันแล้ว ต้องรอให้น้ำมันนั้น ซึมเข้าไปในเนื้อฉนวนด้วย เรียกกระบวนการนี้ว่า Standing Time ซึ่งเวลาที่จะรอให้น้ำมันซึมเข้าไปในเนื้อฉนวนนี้ จะขึ้นอยู่กับแรงดันพิกัดของหม้อแปลงแต่ละใบ ตัวอย่างเช่น หม้อแปลง 220 กิโลโวลต์ ใช้เวลา 3 วัน , หม้อแปลง 400 กิโลโวลต์ ใช้เวลา 5 วัน เป็นต้น

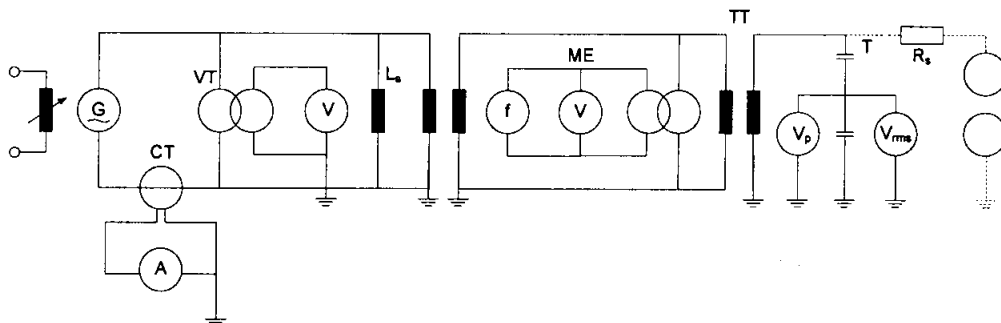
2.8.4 สิ่งจำเป็นสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

รูปและส่วนประกอบต่างๆ ในการต่อวงจร ดังรูปที่ 2.43

1. แหล่งจ่ายของวงจร คือ เครื่องกำเนิดแรงดันที่ใช้ในการจ่ายแรงดันให้หม้อแปลงทดสอบ จะต้องมีส่วนของความถี่ 50 – 400 Hz นอกจากนี้จะมีตัวชดเชยกระแส ซึ่งโดยปกติแล้ว จะทำการชดเชยกระแสทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ แต่ตามหลักการแล้วสามารถจะชดเชยได้ทั้งด้านแรงดันสูงหรือทางด้านแรงดันต่ำ

2. หม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ

เป็นหม้อแปลงที่ใช้ในการปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายก่อนที่จะจ่ายเข้าทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงที่เป็นชนิดอัตโนมัติ หากหม้อแปลงมีหลายขดลวด ขดลวดที่ไม่ถูกใช้จะถูกต่อลงกราวด์



รูปที่ 2.43 วงจรพื้นฐานของการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ

3. การวัดแรงดันและความถี่

แรงดันจะถูกวัดระดับความดันของไฟฟ้าทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงที่ถูกทดสอบด้วยโวลต์มิเตอร์ แรงดันทดสอบจะถูกปรับโดยโวลต์มิเตอร์นี้ ซึ่งแรงดันที่ต้องการสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของหม้อแปลงที่ถูกทดสอบ ดังนี้

$$U_1 = \frac{U_p}{r} \quad (2.83)$$

โดยที่

- U_1 คือ แรงดันทางด้านแรงดันต่ำ
- U_p คือ แรงดันทดสอบ
- r คือ อัตราส่วนของหม้อแปลงที่ถูกทดสอบ

ส่วนความถี่นั้นจะถูกตรวจสอบไปในเวลาเดียวกัน ซึ่งระยะเวลาของการทดสอบนั้นขึ้นอยู่กับค่าของความถี่

2.8.5 ขั้นตอนและการต่อวงจรในการทดสอบ

การต่อวงจรในการทดสอบ แบ่งตามการฉนวนของหม้อแปลงที่ทดสอบ คือ

1) หม้อแปลงทดสอบมีการฉนวนแบบสมำเสมอ

จะเริ่มจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 200 เฮอร์ตซ์ จ่ายให้กับหม้อแปลงแปลงแรงดันขึ้น ทำการปรับหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดันให้อยู่ในขอบเขตที่สามารถวัดค่าแรงดันได้ จากนั้นต่อเข้ากับหม้อแปลงที่ต้องการทำการทดสอบ โดยจ่ายเข้าทางด้านแรงดันต่ำเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำไปทางด้านแรงดันสูง ซึ่งทางด้านแรงดันสูงทำการเปิดวงจรไว้ จ่ายระดับแรงดันและเวลาตามที่กำหนดไว้

2) หม้อแปลงทดสอบที่มีการฉนวนแบบไม่สมำเสมอ

จะเริ่มจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 200 เฮอร์ตซ์ จ่ายให้กับหม้อแปลงแปลงแรงดันขึ้น ใช้วิธีการเหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว (Induced Single Phase)

2.8.6 ระยะเวลาในการทดสอบ

เวลาในการทดสอบนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายและหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบ

1) โดยทุกๆ ค่าความถี่รวมถึงหากความถี่ของแหล่งจ่ายเป็นสองเท่าของความถี่พิกัดหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบ ระยะเวลาในการทดสอบ คือ 60 วินาที

2) แต่หากความถี่ของแหล่งจ่ายมากกว่าสองเท่าของความถี่พิกัดหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบ สามารถคำนวณหาระยะเวลาในการทดสอบ จะเป็นไปตามสมการนี้

$$t = 120 \cdot \frac{f_r}{f_p} \quad (2.84)$$

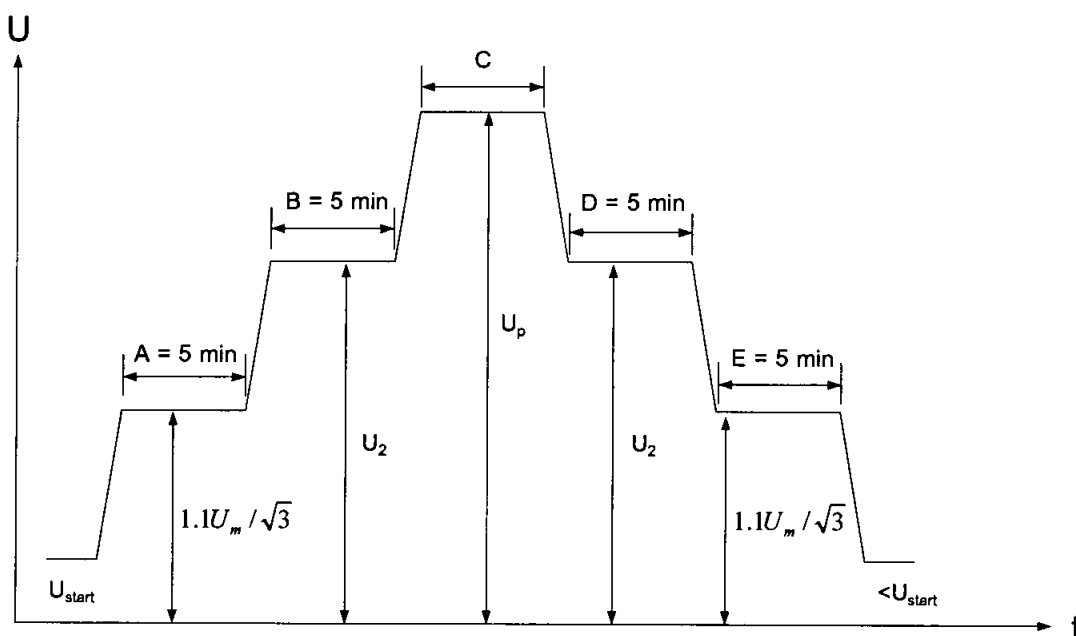
โดยที่

t คือ เวลาในการทดสอบ

f_r คือ ความถี่พิกัดของหม้อแปลงที่ทดสอบ

f_i คือ ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (แหล่งจ่าย)

หมายเหตุ : ระยะเวลาในการทดสอบจะต้องไม่น้อยกว่า 15 วินาที



C คือ เวลาในการทดสอบ

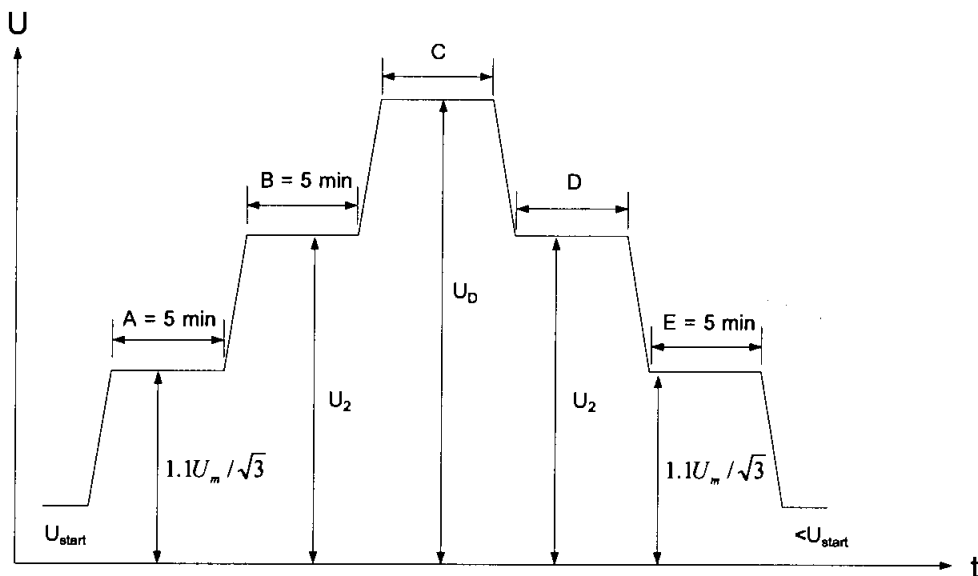
$$U_2 = 1.3 \cdot U_m \quad (\text{phase to phase})$$

$$= 1.3 \cdot U_m / \sqrt{3} \quad (\text{phase to earth})$$

$$U_p = 2 \cdot U_r$$

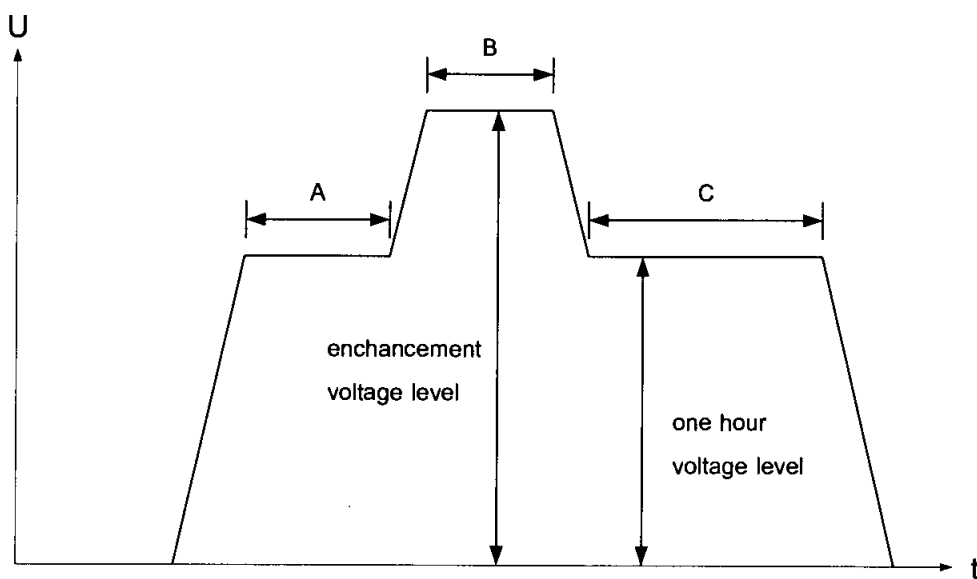
รูปที่ 2.44 กราฟแสดงเวลาและแรงดันของการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับระยะสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- C คือ เวลาในการทดสอบ
- D คือ ถ้า $U_m > 300 \text{ kV}$ จะใช้เวลา 60 นาที, แต่ถ้า $U_m < 300 \text{ kV}$ ใช้เวลา 30 นาที
- $U_2 = 1.5 \cdot U_m / \sqrt{3}$ (phase to earth)
- $U_D = 1.7 \cdot U_m / \sqrt{3}$ (phase to earth)

รูปที่ 2.45 กราฟแสดงเวลาและแรงดันของการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับระยะยาว



- A คือ เวลาที่ใช้ในการวัดค่าพหุคูณดิซฮาร์จ
- B = 7,200 รอบ
- C = 60 นาที

รูปที่ 2.46 กราฟแสดงเวลาในการทดสอบของหม้อแปลงที่ใช้มาตรฐาน IEEE

สำหรับหม้อแปลงประเภท 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน

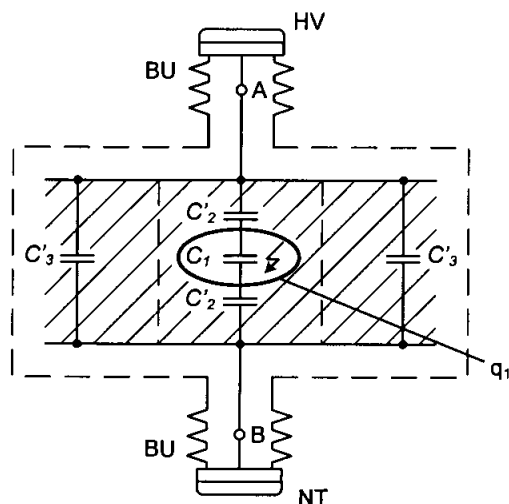
2.9.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนเป็นการทดสอบที่ไม่ทำลายฉนวน แล้วยังเป็น การทดสอบเพื่อแสดงสภาพของฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า เป้าหมายของการวัดค่าการดิสชาร์จ บางส่วนทำเพื่อรับรองว่าค่าการดิสชาร์จบางส่วนจะไม่เป็นอันตรายต่อหม้อแปลงไฟฟ้า การวัด ค่าการดิสชาร์จบางส่วนสามารถระบุตำแหน่งที่ฉนวนเกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าภายใน หม้อแปลงไฟฟ้าได้ ซึ่งความเครียดของสนามไฟฟ้าอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ เมื่อใช้งานหม้อ แปลงไฟฟ้าเป็นเวลานาน

การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนมีการกำหนดให้ทดสอบในมาตรฐานต่างๆ โดย จะทำการทดสอบร่วมกับการทดสอบความคงทนของฉนวนโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ แต่สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนจะ ทำการทดสอบร่วมกับการทดสอบความคงทนของฉนวนโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง ในการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนขณะอยู่นอกห้องทดสอบอาจใช้การวัดค่าการ ดิสชาร์จบางส่วนแบบอื่นๆได้ การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนจะต้องทำเป็นอันดับสุดท้ายของ การทดสอบความคงทนของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า

2.9.2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ

การดิสชาร์จบางส่วนคือกรณีที่แรงดันแบรกดาวน์แบ่งเป็นส่วนๆ เนื่องจากการที่ ฉนวนเรียงกันเป็นแบบอนุกรม ระหว่างอิเล็กโตรด 2 ข้างที่มีขั้วต่างกัน ดังรูป 2.47 ในระหว่าง การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน ค่าของการดิสชาร์จบางส่วนคือค่าแรงดันที่จ่ายเข้าไป



- BU คือ บุชชิง
- HV คือ ด้านแรงดันสูง
- NT คือ จุดต่อนิวทรัล
- $C_{1,2,3}$ คือ ส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลง รวมไปถึงน้ำมันหม้อแปลง
- C_1 คือ จุดที่มีความบกพร่อง

รูปที่ 2.47 วงจรสมมูลของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนของระบบฉนวนของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการดิสชาร์จบางส่วนสามารถแปลงเป็นค่าการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง เมื่อประจุเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วหรือระหว่างประจุเคลื่อนที่ทันทีในครั้งแรก จุดเชื่อมต่อของฉนวนแต่ละส่วนที่ต่ออนุกรมระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว จะถือเป็นจำนวนของตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมอยู่ในวงจรทดสอบ

ถ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วต่อผ่านตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k จากรูปที่ 2.48 การเคลื่อนที่ของประจุในการเรียงตัวแบบอนุกรมของจุดเชื่อมต่อของฉนวนจะถูกสะท้อนไปที่ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k

การตรวจจับการเคลื่อนที่ของประจุสามารถทำได้โดยอาศัยการไหลเวียนของกระแสพัลส์ ในตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบขนานกันคือ C_k และ C_i ดังรูปที่ 2.48

การที่จะเกิดการดิสชาร์จบางส่วนในจุดบกพร่องของฉนวนต้องมีลักษณะ

2 ประการคือ

1. สนามไฟฟ้าในจุดบกพร่องของฉนวนต้องมากกว่าสนามไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย
2. อิเล็กตรอนอิสระจะต้องว่างเพื่อที่จะทำให้เกิดการแบรกดาวน

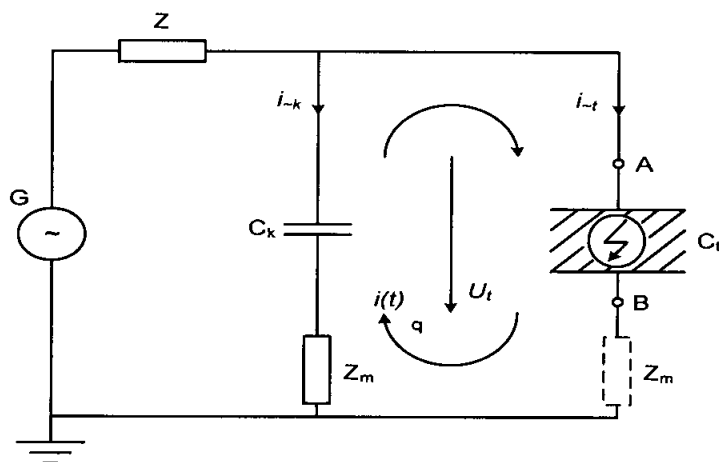
ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าที่มากเกินไปที่จุดต่างๆ อาจเป็นผลมาจากการออกแบบที่ผิดพลาด การเปราะเปื้อน การขนส่งเคลื่อนย้ายในกระบวนการผลิต หรือการที่วัสดุที่เป็นฉนวนมีข้อบกพร่อง ส่วนความผิดพลาดอื่นๆที่ทำให้ฉนวนเกิดความเสียหายน่าจะเกิดจากการทดสอบต่างๆ ก่อนที่จะทำการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน

2.9.3 หลักการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน

การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนทุกวิธีจะใช้หลักการวัดกระแสพัลส์ที่ไหลวนอยู่ในตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน คือ C_k และ C_i โดยผ่านอิมพีแดนซ์วัด Z_m

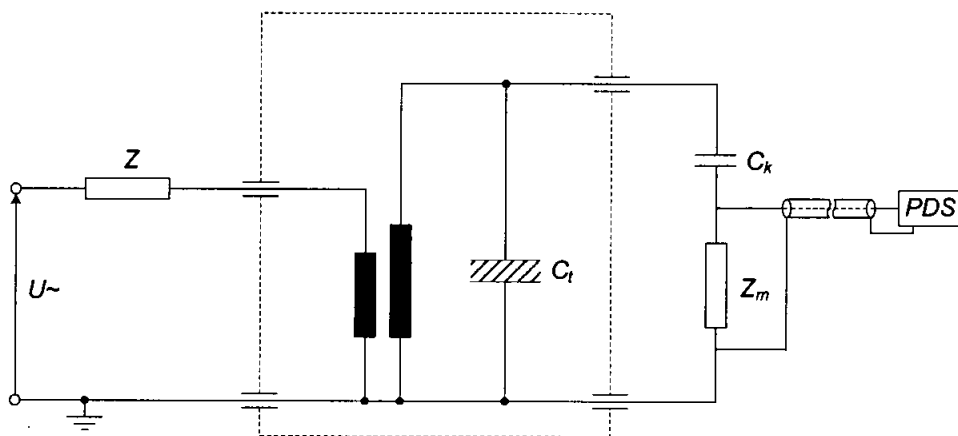
วงจรมูลของการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนแสดงในรูปที่ 2.48 อิมพีแดนซ์วัด Z_m สามารถต่ออนุกรมกับ C_k หรือ C_i ก็ได้ กระแสของการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นจากการที่ประจุไหลผ่านระหว่างตัวเก็บประจุ C_k และ C_i ที่ต่อขนานกัน ในปัจจุบันมาตรฐาน IEC และ IEEE ได้มีการตั้งกฎเพื่อทำการวัดค่าและประเมินค่าสัญญาณที่เกิดจากการดิสชาร์จบางส่วน โดยมีการระบุค่าที่ยอมรับได้ร่วมด้วย มาตรฐาน IEC ได้กล่าวถึงการบันทึกสัญญาณไฟฟ้าต่างจากมาตรฐาน IEEE โดยที่มาตรฐาน IEC ได้แปลงสัญญาณให้เป็นประจุไฟฟ้าปรากฏโดยให้อยู่ในหน่วย พิโกคูลอมบ์ (pC) แต่มาตรฐาน IEEE ได้แปลงสัญญาณให้เป็นแรงดันรบกวนคลื่นวิทยุ (RIV) โดยให้อยู่ในหน่วยไมโครโวลต์ (μV)

การใช้วิธีแรงดันรบกวนคลื่นวิทยุ สำหรับการตรวจจับสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนยังไม่เป็นที่นิยม และตามมาตรฐาน IEEE วิธีนี้ยังไม่ได้รับการรับรองอย่างเป็นทางการ เพราะฉะนั้นวิธีที่นิยมในปัจจุบันก็คือ การตรวจจับสัญญาณของประจุไฟฟ้าที่ปรากฏในหน่วย พิโกคูลอมบ์ ตามมาตรฐาน IEEE std C57.113



- C_t คือ วัตถุทดสอบ
 C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว
 G คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า
 $i(t)$ คือ กระแสการดิซซาร์จบางส่วน
 $i_{-k,-t}$ คือ กระแสที่ไหลในวงจร
 Z คือ ตัวกรองสัญญาณ
 q คือ ประจุที่ถูกถ่ายเท
 U_t คือ แรงดันของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน
 Z_m คือ อิมพีแดนซ์วัด

รูปที่ 2.48 วงจรสมมูลของการวัดค่าการดิซซาร์จบางส่วน



- PDS คือ ระบบวัดการดิซซาร์จบางส่วน
 C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว
 C_t คือ วัตถุทดสอบ
 Z คือ ตัวกรองสัญญาณ
 Z_m คือ อิมพีแดนซ์วัด

รูปที่ 2.49 วงจรที่ใช้ทดสอบเมื่อไม่มีขั้วซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

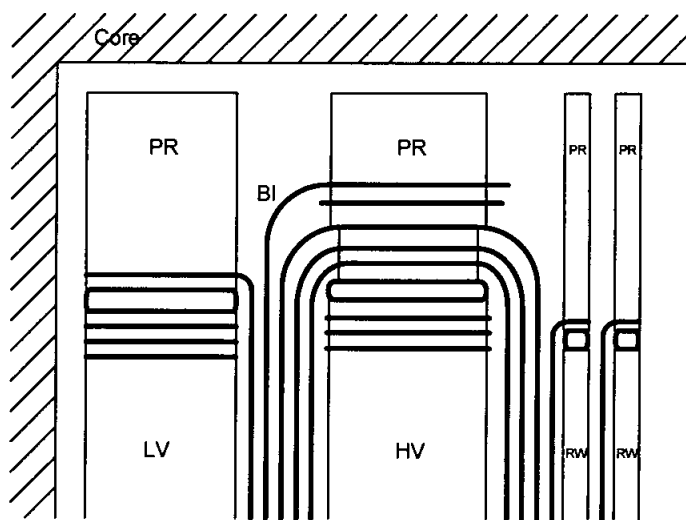
สำหรับการตรวจจับประจุไฟฟ้าที่ปรากฏ จำเป็นต้องหาผลรวมของกระแสของการดิสชาร์จบางส่วนด้วย โดยการหาผลรวมของกระแสของการดิสชาร์จสามารถหาโดยอาศัยขอบเขตของเวลา (Digital Oscilloscope) หรืออาศัยขอบเขตของความถี่ (band-pass filter) แต่ในส่วนใหญ่นิยมใช้วิธี "Quasi-Integration" ในการตรวจจับกระแสของการดิสชาร์จบางส่วนในขอบเขตของความถี่ โดยใช้ ตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่กว้าง และตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่แคบ

สำหรับช่วงเวลาของกระแสสั้น (นาโนวินาที) แหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะต้องแยกกับวงจรการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน โดยการใช้ตัวกรองสัญญาณ Z (การต่อของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าขึ้น)

สำหรับทางด้านแรงดันสูงที่ไม่มีบุชชิ่ง จำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ขนานกับวัตถุที่จะทดสอบ C , ดูในรูปที่ 2.49

2.9.4 การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า

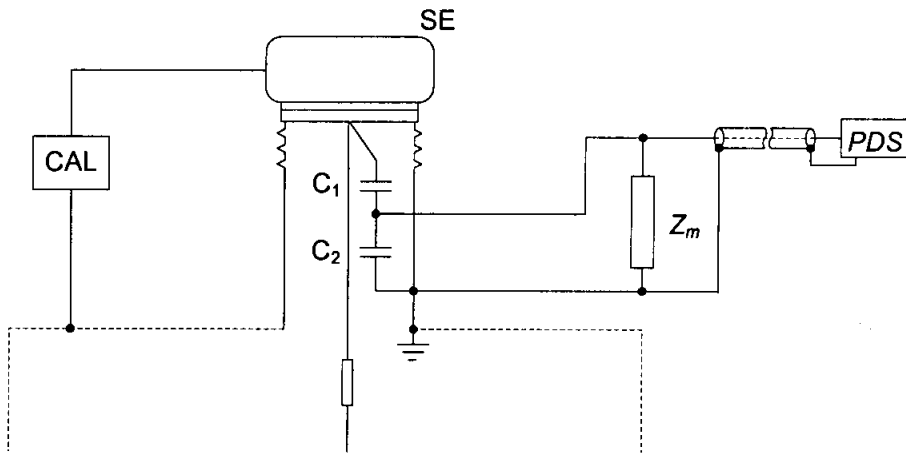
การไหลวนของกระแสของการดิสชาร์จบางส่วนสามารถวัดได้ที่บุชชิ่งของหม้อแปลง ในรูปที่ 2.48 ตัวเก็บประจุบุชชิ่ง C_1 จะกำหนดให้เป็นตัวเก็บประจุ C_k ที่ซึ่งต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C , (วัตถุทดสอบ หรือ ค่าความเป็นตัวเก็บประจุทั้งหมดภายในระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า) ตัวอย่างของชนิดของระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมดแสดงในรูปที่ 2.50 สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง การวัดอิมพีแดนซ์จะวัดระหว่างบุชชิ่งที่แทปที่ทดสอบกับดิน นั่นก็คือการต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C_2 ดังรูปที่ 2.51



- PR คือ กระดาษอัดฉนวน
- BI คือ ฉนวนหุ้มขดลวด
- LV คือ ขดลวดแรงต่ำ
- HV คือ ขดลวดแรงสูง
- RW คือ ขดลวดเรกกูเรชั่น

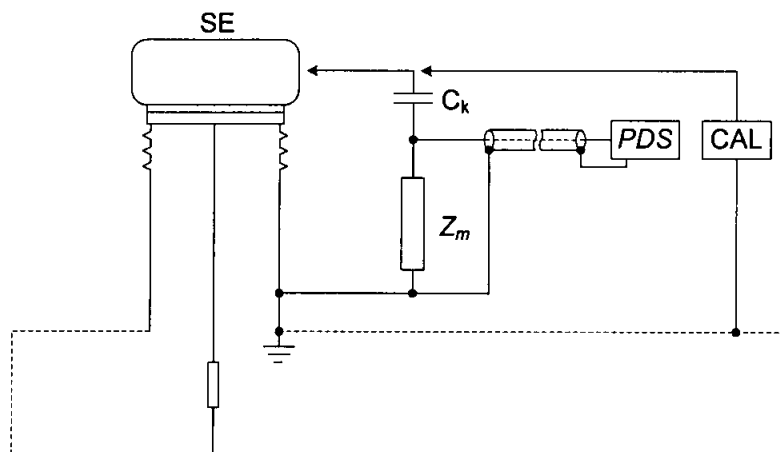
รูปที่ 2.50 ระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- C_1 คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว หรือ C_k
 SE คือ อิเล็กโตรด
 PDS คือ ระบบวัดการดิสชาร์จบางส่วน
 CAL คือ เครื่องคาลิเบรท
 C_2 คือ คาปาซิทีฟแทป
 Z_m คือ อิมพีแดนซ์วัด

รูปที่ 2.51 วงจรที่ใช้ทดสอบและปรับเทียบการดิสชาร์จบางส่วนสำหรับบุชซึ่งมีคาปาซิทีฟแทป



- PDS คือ ระบบวัดการดิสชาร์จบางส่วน
 CAL คือ เครื่องคาลิเบรท
 SE คือ อิเล็กโตรด
 C_k คือ ตัวเก็บประจุภายนอก
 Z_m คือ อิมพีแดนซ์วัด

รูปที่ 2.52 วงจรที่ใช้ทดสอบและปรับเทียบการดิสชาร์จบางส่วน
 สำหรับบุชซึ่งไม่มีคาปาซิทีฟแทป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับบุชชิงที่ไม่มีคาปาซิทีฟแพป จำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุภายนอก C_k ขนานกับบุชชิง ดูในรูปที่ 2.52

การประเมินกระแสของการดิสชาร์จบางส่วน จะมีความแตกต่างบางอย่างระหว่าง มาตรฐาน IEC และ IEEE ดังนี้

1) มาตรฐาน IEC

ตามมาตรฐาน IEC การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนจะกระทำโดยการวัด ประจุไฟฟ้าที่ปรากฏ q ซึ่งในที่นี้ ประจุไฟฟ้าที่ปรากฏสามารถหาได้โดยการรวมกระแสของการดิสชาร์จบางส่วนโดยอาศัยตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่กว้างหรือตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่แคบ

ระบบการวัดการดิสชาร์จบางส่วนจะต่อผ่านสายโคเอเซียลไปถึงอิมพีแดนซ์วัด Z_m ดูในรูปที่ 2.51 และ 2.52 ประจุไฟฟ้าที่ปรากฏจะถูกวัดในหน่วยพิโกคูลอมบ์ ซึ่งก็คือประจุที่ไหลผ่านระหว่างกระบวนการชดเชยแรงดันตก ΔU ที่ตัวเก็บประจุ C_1 อันหนึ่งที่ต้องขนาน และตัวเก็บประจุบุชชิง C_1 หรือตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ดูในรูปที่ 2.48 และรูปที่ 2.51

แรงดันตก ΔU อาจเกิดจากวัดทดสอบ (การดิสชาร์จบางส่วนภายในบุชชิงหรือในระบบนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า) หรือในวงจรทดสอบ (การดิสชาร์จบางส่วนภายนอก) ถ้าการดิสชาร์จบางส่วนถูกตรวจจับระหว่างทดสอบ จำเป็นต้องตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน ดูในหัวข้อ 2.9.7

จำนวนของประจุไฟฟ้าที่ปรากฏ q_m ในหน่วยพิโกคูลอมบ์ (pC) จะถูกทำให้ถูกต้องโดยการปรับเทียบแต่ละวงจรทดสอบก่อน

การปรับเทียบวงจรการวัดการดิสชาร์จบางส่วนทำโดยการใช้เครื่องปรับเทียบที่ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม ที่สามารถปรับค่า U_0 ได้และต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาดเล็ก C_0 (C_0 ควรมีค่าน้อยกว่า 10% ของ C_k) สำหรับการวัดการดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องปรับเทียบจะต่อผ่านบุชชิง หรือต่อผ่านตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ต้องขนานกับบุชชิง ดูในรูปที่ 2.51 และ 2.52 การปรับเทียบต้องทำแยกแต่ละบุชชิงเท่านั้น

เมื่อ $C_0 \ll C_k$ ลูกคลื่นที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดแรงดันลูกคลื่นสี่เหลี่ยมเป็นประจุไฟฟ้า q_0 ที่ตั้งค่าไว้แล้วโดยการปรับค่า U_0 มาตรฐาน IEC 60270 กำหนดให้ ช่วงเวลาขึ้นของลูกคลื่นที่ถูกปล่อยออกมาจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 60 นาโนวินาที และค่า U_0 ต้องอยู่ระหว่าง 2V และ 50V โดยที่สามารถเลือกขั้วทางไฟฟ้า และทำให้ได้ความถี่ 100 Hz

$$q_0 = U_0 \cdot C_0 \quad (2.85)$$

เมื่อ

- q_0 คือ ประจุที่ถูกปล่อยออกมา
- U_0 คือ แรงดันที่มาจากเครื่องกำเนิดแรงดันลูกคลื่นสี่เหลี่ยม
- C_0 คือ ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรที่ใช้ในการวัดที่ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุที่ทำการทดสอบ C_t หรือวัตถุทดสอบ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_x อิมพีแดนซ์วัด Z_m สายโคเอเซียล และระบบวัดต้องทำการปรับเทียบแล้ว ดูในรูปที่ 2.51 และ 2.52 ระหว่างการวัดการดิสซาร์จบางส่วน ค่าที่อ่านได้จากระบบวัดจะอ่านออกมาในหน่วยพิโกคูลอมบ์

2) มาตรฐาน IEEE

สำหรับการทดสอบการดิสซาร์จบางส่วนเป็นประจำ มาตรฐาน IEEE กำหนดให้ใช้วิธี RIV (RIV=Radio Interference Voltage) โดยวิธี RIV นี้จะวัดในหน่วยไมโครโวลต์ ตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่แคบจะใช้วิธี quasi-integration ในการตรวจจับลูกคลื่นของกระแสของการดิสซาร์จบางส่วน โดยอาศัยการตรวจจับ quasi-peak ที่ความถี่ตรงกลางระหว่าง 0.85 MHz และ 1.15 MHz ตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่แคบได้ทำมาเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนจากภายนอกในห้องทดสอบที่ไม่มีการป้องกันสัญญาณภายนอกโดยการปรับค่าความถี่ในช่วงของตัวกรองสัญญาณ ระบบวัดนี้จึงเรียกว่า “RIV-meter หรือ radio-noise-meter”

ค่า RIV ขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเท และอัตราการเข้าไปเข้ามาของลูกคลื่นการดิสซาร์จบางส่วน (จำนวนของลูกคลื่นการดิสซาร์จบางส่วนต่อวินาที) นี่คือนิวตันที่ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนค่า RIV ในหน่วยไมโครโวลต์ (μV) เป็นค่าประจุไฟฟ้าปรากฏในหน่วยพิโกคูลอมบ์ (pC) ได้โดยตรง

ประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทในหน่วยไมโครโวลต์ μV เป็นผลมาจากกระบวนการชดเชยแรงดันตก ΔU ที่ตัวเก็บประจุที่ต่อขนาน C_t (ฉนวนของหม้อแปลง) และค่าความเป็นตัวเก็บประจุของบุชชิ่ง C_1 หรือตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_x ดูในรูปที่ 2.51 และ 2.52

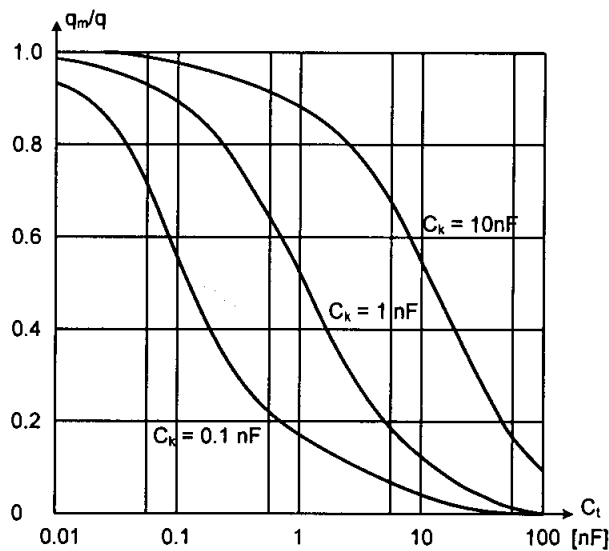
วงจรทดสอบการดิสซาร์จบางส่วนจะทำการปรับเทียบวิธีเดียวกับการวัดประจุไฟฟ้าที่ปรากฏ ดูในรูปที่ 2.51 และ 2.52 เมื่อ $C_0 \ll C_x$ แรงดันรูปคลื่นขายนท์ที่จ่ายเข้าไปจะสัมพันธ์กับค่าที่กำหนดขึ้นและสามารถปรับได้ U_0 ซึ่งอยู่ในหน่วยไมโครโวลต์ μV

ระหว่างการทดสอบการดิสซาร์จบางส่วนระบบวัดจะอ่านค่าในหน่วยไมโครโวลต์ μV ซึ่งค่าที่ได้นี้จะใช้ได้เฉพาะกับบุชชิ่งที่ทำการปรับเทียบแล้ว

จากมาตรฐาน IEEE C57.12.90 การดิสซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงจะถูกวัดได้ในรูปประจุไฟฟ้าที่ปรากฏ วิธีการนี้จะให้ข้อดีหลายด้านรวมทั้งการลดทอนของสัญญาณลดลง

3) ความไวในการตรวจจับการดิสซาร์จบางส่วน

ประจุที่เกิดขึ้นจริง q_1 ที่ปล่อยมาในระหว่างการเสียดสภาพฉนวนภายในในจุดที่มีความบกพร่องภายในฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่สามารถวัดค่าได้ ดูในรูปที่ 2.47 มีแต่ประจุที่ถ่ายเทระหว่างค่าความเป็นตัวเก็บประจุของจุดที่มีความบกพร่อง C_1 และค่าความเป็นตัวเก็บประจุของระบบฉนวน (C_2' และ C_3' ในรูปที่ 2.47) เท่านั้นที่สามารถวัดได้ที่บุชชิ่ง (C_x) ค่าความเป็นตัวเก็บประจุ C_2' และ C_3' (ชุดขดลวดและระบบฉนวนของหม้อแปลง) จะทำการต่อโดยตรงกับบุชชิ่ง



q คือ ประจุไฟฟ้าปรากฏ

q_m คือ ประจุไฟฟ้าที่สามารถวัดได้

รูปที่ 2.53 ผลกระทบของตัวเก็บประจุภายนอกต่อความไวในการวัด โดยที่ $\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_t + C_k}$

ความไวในการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนจะขึ้นกับส่วนประกอบของวงจรทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะขึ้นกับอัตราส่วนของตัวเก็บประจุที่ทดสอบ และ ตัวเก็บประจุภายนอก C_k ผลของ ตัวเก็บประจุภายนอกต่อความไวในการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน แสดงไว้ในรูปที่ 2.53 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับเทียบต้องทำซ้ำถ้าประจุส่วนใหญ่เกิดขึ้นในวงจรทดสอบ เช่นการต่อตัวเก็บประจุภายนอกตัวใหม่

กระแสของการดิสชาร์จบางส่วนโดยเฉพาะที่เกิดจากแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนภายในที่ซ่อนอยู่ในระบบขนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกทำให้เบาบางลงโดยเครือข่าย RLCM ของหม้อแปลงไฟฟ้า (RLCM คือ Resistance, Inductance, Capacitance และ Mutual Inductance) ลูกคลื่นการดิสชาร์จบางส่วนแบบช้าจะถูกตรวจจับที่บุงซึ่ง และอาจจะวัดได้ไม่ถูกต้องเสมอไปด้วยระบบการดิสชาร์จบางส่วนประยุกต์ (applied PD system)

ค่าของประจุไฟฟ้าที่ปรากฏ q_m ไม่ใช่ประเด็นที่สำคัญในการตัดสินใจแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนนี้อันตรายต่อระบบขนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าเสมอไป กระบวนการตรวจสอบแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนภายในจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ กระบวนการการตรวจจับแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน

ปกติแล้ว Z_m และระบบการวัด จะต้องเข้ากันได้ดีกับ “quasi-integration” ของกระแสของการดิสชาร์จบางส่วน และจะไม่แนะนำการใช้อิมพีแดนซ์วัด Z_m สัมผัสกับระบบตรวจจับที่มาจากแหล่งผลิตที่ต่างกัน

สำหรับการทดสอบแบบส่งต่อ จะใช้ในการวัดบุงซึ่งที่มี $U_m > 72.5$ kV (IEC) หรือ $U_m > 115$ kV (IEEE) แนะนำว่าบุงซึ่งทั้งหมดที่ทำการทดสอบจะต้องติดตั้งอิมพีแดนซ์วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z_m เพื่อให้มั่นใจว่าการเกิดการดีสชาร์จบางส่วนจะสามารถตรวจจับได้ในเวลาเดียวกัน ถ้าการดีสชาร์จบางส่วนถูกตรวจจับในวงจรทดสอบ การบอกตำแหน่งของแหล่งกำเนิดการดีสชาร์จบางส่วนจะทำให้รวดเร็วขึ้น

เพื่อหลีกเลี่ยงการดีสชาร์จภายนอก(โคโรนา) วงจรวัดค่าการดีสชาร์จบางส่วนสำหรับบุชชิงทั้งหมดของหม้อแปลงจะต้องติดตั้งอิเล็กโตรด รวมไปถึงบุชชิงที่ต้องต่อลงดินด้วย ดูในรูปที่ 2.51 และ 2.52 อิเล็กโตรดจะถูกใช้กับทุกส่วนที่มีความแหลมคมในส่วนบนสุดของหม้อแปลงและที่จุดเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในห้องทดสอบแรงดันสูงควรปราศจากการดีสชาร์จบางส่วนด้วย วัตถุทุกชิ้นที่อยู่ในบริเวณที่ทำการทดสอบจะต้องต่อลงดิน

2.9.5 กระบวนการวัดการดีสชาร์จบางส่วน

กระบวนการวัดการดีสชาร์จบางส่วนได้อธิบายไว้เรื่องการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ แต่มีความแตกต่างบางอย่างระหว่างมาตรฐาน IEC และมาตรฐาน IEEE บางครั้งข้อกำหนดของผู้ใช้อาจจะกำหนดให้กระบวนการแตกต่างออกไปตามแต่ละความต้องการ และประสบการณ์ของแต่ละบุคคล

1) มาตรฐาน IEC

ตามมาตรฐาน IEC การวัดการดีสชาร์จบางส่วนจะการทดสอบร่วมกับการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดสำหรับวัตถุทดสอบ U_m เหนือระดับปกติ การวัดการดีสชาร์จบางส่วนสามารถทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับระยะยาวหรือทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับระยะสั้นได้ โดยระยะเวลาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับค่า U_m ซึ่งได้กล่าวไว้ในเรื่องการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ ในรูปที่ 2.44 และ 2.45

การดีสชาร์จบางส่วนจะต้องวัดทุกบุชชิงเมื่อแรงดันทดสอบมากกว่า 72.5 kV สำหรับตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่กว้าง หรือตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่แคบสามารถนำมาใช้ในระบวัตการดีสชาร์จบางส่วนได้

ในการวัดการดีสชาร์จบางส่วนครั้งแรกควรทำที่แรงดันทดสอบต่ำ ๆ ตามมาตรฐาน IEC สัญญาณรบกวนพื้นหลังต้องต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของประจุไฟฟ้าที่ปรากฏในห้องทดสอบที่มีการป้องกันสัญญาณรบกวนค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลังจะมีค่าน้อยมาก

การวัดการดีสชาร์จบางส่วนควรทำที่แรงดันทดสอบที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.44 และ 2.45 ควรมีการจดบันทึกค่าที่วัดได้ในหน่วยพิโกคูลอมบ์ทุกค่าที่บุชชิง

ระหว่างการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ การวัดค่าการดีสชาร์จบางส่วนจะถูกทำทุก ๆ 5 นาที ในแต่ละบุชชิง วิธีที่ดีที่สุดในการตรวจสอบการดีสชาร์จบางส่วนของระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าคือการใช้ระบบการวัดหลายช่องสัญญาณ ที่สามารถวัดทุก ๆ บุชชิงได้พร้อมกัน

ค่าที่ยอมรับได้สำหรับการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน

การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนจะประสบผลสำเร็จก็ต่อเมื่อไม่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนต่อเนื่องมากกว่าค่าประจุไฟฟ้าที่ปรากฏ ในหน่วยพิโกคูลอมบ์ที่บุชชิงอันไดอันหนึ่ง หรือเมื่อไม่มีค่าประจุไฟฟ้าปรากฏเพิ่มขึ้นในช่วงทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับระยะยาว

ค่าประจุไฟฟ้าปรากฏที่ยอมรับได้ในมาตรฐาน IEC คือ

- 300 pC ที่ 130% U_m
- 500 pC ที่ 150% U_m
- ระดับของการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ต้องไม่มากกว่า 100 pC ที่ 1.1 U_m

เมื่อ

U_m คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการทดสอบตามที่มาตรฐาน IEC กำหนด หรือแรงดันเฟสเพสสูงที่สุดที่เป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ย สำหรับหม้อแปลงที่ถูกออกแบบขึ้นมาเป็นพิเศษ

2) มาตรฐาน IEEE

ตามมาตรฐาน IEEE การวัดการดิสชาร์จบางส่วนควรทำที่ระดับเดียวกัน 1 ชั่วโมง ของแรงดันทดสอบก่อนการเพิ่มระดับ และระหว่างทำที่ระดับเดียวกัน 1 ชั่วโมง ในรูป 2.46 ระยะเวลาของส่วน A ต้องยาวเพียงพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน (อย่างน้อย 10 นาที)

การดิสชาร์จบางส่วนควรถูกตรวจสอบที่บุชชิงทุกอันที่มีแรงดันทดสอบมากกว่าหรือเท่ากับ 115 kV การดิสชาร์จบางส่วนจะวัดในหน่วยไมโครโวลต์ μV ตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่แคบจะถูกใช้ในระบวัด ความถี่ช่วงตรงกลางของตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่แคบที่แนะนำคือ 1 MHz ถ้ามีสัญญาณรบกวนพื้นหลังสูง ค่าความถี่ช่วงตรงกลางควรอยู่ในช่วง 0.85 MHz ถึง 1.15 Mhz

การวัดการดิสชาร์จบางส่วนครั้งแรก (RIV ในหน่วยไมโครโวลต์ μV) ควรทำที่ระดับแรงดันทดสอบต่ำๆ ซึ่งค่านี้ใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังในห้องทดสอบ จากมาตรฐานค่าระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังควรต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของค่า μV ของหม้อแปลงที่ต้องการ ส่วนในห้องปฏิบัติการที่มีการป้องกันสัญญาณรบกวน ค่าระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ต้องมีค่าต่ำมาก

ค่าที่ยอมรับได้สำหรับการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน

การวัดการดิสชาร์จบางส่วนจะประสบผลสำเร็จก็ต่อเมื่อไม่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนมากกว่าระดับ RIV ที่กำหนดที่บุชชิงอันไดอันหนึ่ง หรือไม่เกิด RIV ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นระหว่างการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับระยะยาว ตามมาตรฐาน IEEE การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน จะประสบผลสำเร็จก็ต่อเมื่อมีคุณสมบัติครบตามนี้

- ขนาดของระดับการดิสชาร์จบางส่วน ไม่เกิน 100 μV
- ระดับการดิสชาร์จบางส่วนสามารถเพิ่มขึ้นได้ไม่เกิน 30 μV ระหว่างการทดสอบที่ระดับแรงดันเดียวกัน 1 ชั่วโมง
- ระดับการดิสชาร์จบางส่วนไม่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องเป็นเวลา 20 นาที ของการทดสอบ

2.9.6 กระบวนการสืบหาแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน

ถ้าการดิสชาร์จบางส่วนมีค่าเกินกว่าที่กำหนดไว้จะต้องมีการหาแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนทั้งในและนอกระบบฉนวน วิธีการหาจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการดิสชาร์จบางส่วนด้วย

1) การหาแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนภายนอก

ขั้นแรก คือ การนำแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนภายนอกที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนอาจเกิดจาก

1. อนุภาคที่สามารถนำไฟฟ้าได้ที่อยู่บนพื้นผิวของบุชชิง
2. จุดที่มีความแหลมคม และไม่มีการป้องกันการเกิดโคโรนาบนหม้อแปลงหรือ

วงจรทดสอบ

3. จุดเชื่อมต่อที่ไม่ดีบนอิเล็กทรอนิกส์

4. สัญญาณรบกวนภายนอก หรือการดิสชาร์จบางส่วนภายในแหล่งจ่ายแรงดัน

ทดสอบ

การดิสชาร์จในอากาศที่เกิดขึ้นจากจุดแหลมคมของอิเล็กทรอนิกส์จะสามารถตรวจจับได้โดยการใช้เครื่องตรวจจับสัญญาณแบบอัลตราโซนิกที่พกพาได้

ปัญหาของการดิสชาร์จบางส่วนในแหล่งจ่ายแรงดันสามารถแก้ได้โดยการแยกวัดการดิสชาร์จบางส่วนก่อนการทดสอบ

2) การหาชนิดของแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน

ชนิดของแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน ถูกกำหนดโดยรูปแบบซึ่งมีลักษณะเฉพาะโดยข้อมูลทางสถิติของการดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการมีอิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นอย่างเพียงพอซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดการดิสชาร์จของไฟฟ้าในจุดที่มีความบกพร่องของระบบฉนวนของหม้อแปลง คุณลักษณะทางกายภาพของการเกิดดิสชาร์จในภาคผนวก ก การมีอิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นอย่างเพียงพอนั้นก็ขึ้นกับชนิดของแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนด้วย และขึ้นกับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนด้วย เป็นผลให้มี 5 ลักษณะที่แสดงถึงแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน ดูในตารางที่ 2.5

รูปแบบของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนจะขึ้นกับลักษณะของการดิสชาร์จที่จุดที่มีการบกพร่อง และตามทฤษฎีจะสามารถตรวจจับได้ในระบบฉนวนทั่วไปรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วนจะไม่ได้รับผลกระทบจากโครงสร้างของระบบฉนวน

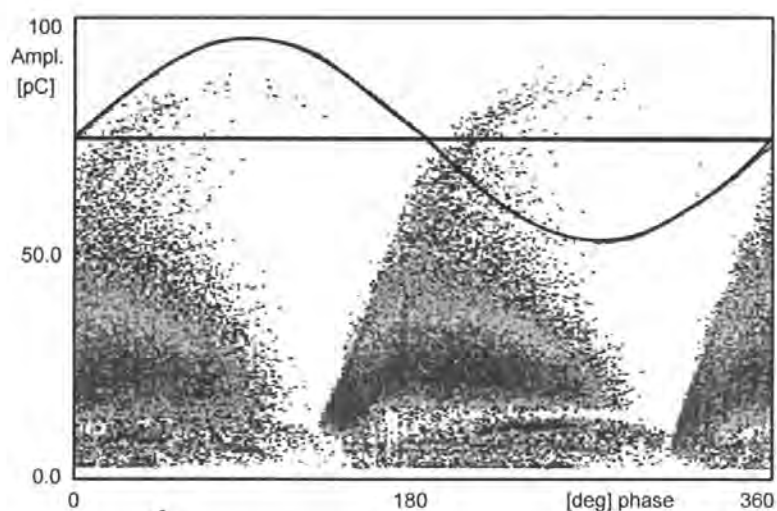
การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนได้พัฒนาขึ้นโดยเรียกว่า PRPDA (Phase Resolving Partial Discharge Analyser) ใช้บันทึกรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วน ระบบตรวจจับที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จะแสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลของการดิสชาร์จบางส่วน ที่แรงดันทดสอบเฉพาะการดิสชาร์จบางส่วนจะถูกบันทึกเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของเฟสและฟังก์ชันของค่าประจุไฟฟ้าที่ปรากฏ ระหว่างเวลาที่กำหนด ผลที่ได้จะแสดงในรูปแบบ 2 มิติ ในรูปที่ 2.54 สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติของแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนจะต้องมีอย่างน้อย 3000 cycle สำหรับแหล่งจ่าย 50 Hz ต้องใช้เวลาวัด 60 วินาที

รูปที่ 2.55 แสดงลูกคลื่นของการดิสชาร์จบางส่วนใน 1 cycle ซึ่งบันทึกโดยระบบวัดแบบดั้งเดิม ในการสืบหาแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน และรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วนครั้งแรกควรถูกบันทึกภายใต้สภาพการทดสอบดังต่อไปนี้

1. แรงดันเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน
2. แรงดันสุดท้ายของแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน
3. 10% เหนือแรงดันเริ่มต้น

การวิเคราะห์รูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วนจะทำโดยการเปรียบเทียบ ค่าการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นจริงที่ได้บันทึกไว้กับรูปแบบการดิสชาร์จบางส่วนมาตรฐานที่แสดงในตารางที่ 2.5

ในความเป็นจริง รูปแบบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน 5 แบบจะมีความหลากหลายมากมาย เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ไหลรอบๆ แหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน และแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนเอง มีเพียง 2-3 รูปแบบเท่านั้นที่แสดงถึงพฤติกรรมที่คงที่ระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 2.54 การตรวจจับสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้วิธี PRPDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงชนิดของแหล่งกำเนิดการดิซาร์จบางส่วนในระบบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

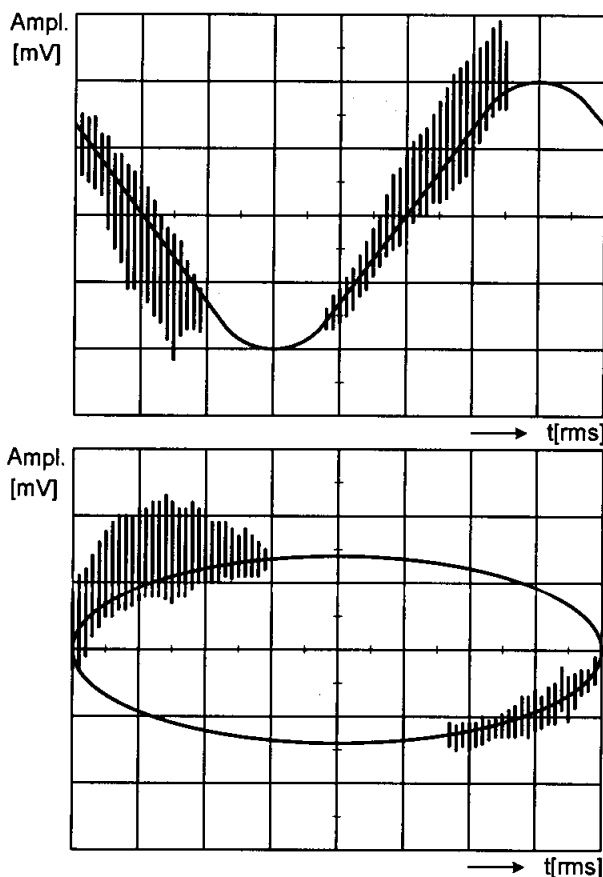
ชนิดของแหล่งกำเนิดการดิซาร์จบางส่วน	รูปจำลองแหล่งกำเนิดการดิซาร์จบางส่วน	รูปแบบของการดิซาร์จบางส่วน
โลหะที่เป็นตัวนำที่มีส่วนที่ติดกับอิเล็กโทรดโลหะโดยตรง		การดิซาร์จบางส่วนแบบที่ 1 [pC] amplitude phase
โลหะที่เป็นตัวนำไม่มีส่วนที่ติดกับอิเล็กโทรดโลหะ		การดิซาร์จบางส่วนแบบที่ 2 [pC] amplitude phase
วัตถุที่ไม่เป็นตัวนำ (โพรงอากาศ) มีส่วนที่ติดกับอิเล็กโทรดโลหะโดยตรง		การดิซาร์จบางส่วนแบบที่ 3 [pC] amplitude phase
วัตถุที่ไม่เป็นตัวนำ (โพรงอากาศ) ไม่มีส่วนที่ติดกับอิเล็กโทรดโลหะ		การดิซาร์จบางส่วนแบบที่ 4 [pC] amplitude phase
วัตถุที่ไม่เป็นตัวนำ (โพรงอากาศ) ไม่มีส่วนที่ติดกับอิเล็กโทรดโลหะและมีหน้าสัมผัสไม่คงที่		การดิซาร์จบางส่วนแบบที่ 5 [pC] amplitude phase

คุณลักษณะของรูปแบบของการเกิดดิซาร์จบางส่วนที่ควรนำมาวิเคราะห์คือ

1. ตำแหน่งเฟสของสัญญาณการดิซาร์จบางส่วน
2. ความมีสมมาตรของสัญญาณการดิซาร์จบางส่วนระหว่างด้านบวกและด้านลบของรูปคลื่นไซน์
3. จำนวนของสัญญาณการดิซาร์จบางส่วนต่อหนึ่งรอบคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเทียบผลให้ถูกรูปแบบของรูปแบบมาตรฐานต้องอาศัยประสบการณ์ และความสามารถในการเข้าใจ ถ้าจุดบกพร่องถูกซ่อนทับ การเปรียบเทียบกับรูปแบบพื้นฐาน และหาลักษณะของรูปแบบให้ถูกต้องก็จะยากขึ้นไปอีก



รูปที่ 2.55 การตรวจจับสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วนโดยระบบวัดแบบดั้งเดิม

ถ้าไม่มีการดิสซาร์จบางส่วนที่ชัดเจนในระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดการดิสซาร์จบางส่วนสามารถหาได้ตามวิธีการอื่น ๆ เช่น การตรวจจับเสียงที่เกิดขึ้น เป็นต้น

2.9.7 ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าการดิสซาร์จบางส่วน

การเปรียบเทียบค่าประจุปรากฏที่วัดได้ในหน่วยพิโกคูลอมบ์ และในหน่วยไมโครโวลต์ จะใช้ได้เฉพาะกับการดิสซาร์จบางส่วนที่ใกล้กับบุชชิ่งเท่านั้น สำหรับการดิสซาร์จบางส่วนอื่นๆที่ไกลจากบุชชิ่งความคลาดเคลื่อนอาจมากกว่า 50%

ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในวงจรการวัดการดิสซาร์จบางส่วนมีผลกับระบบ RIV แล้วอาจทำให้เกิดค่าที่ผิดพลาดถ้าความถี่ตรงกลางของตัวกรองสัญญาณความถี่แคบเป็นค่าเดียวกับความถี่เรโซแนนซ์ในวงจรการตรวจจับการดิสซาร์จบางส่วน

การเปลี่ยนค่าแรงดันที่วัดได้ในหน่วยไมโครโวลต์ เป็นค่าประจุไฟฟ้าปรากฏ จะทำได้ในบางกรณีเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซิ่ง

2.10.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เนื่องจากในการใช้งานจริงของหม้อแปลงไฟฟ้าเราไม่สามารถหลีกเลี่ยงอันตรายอันเกิดจากฟ้าผ่า และการสวิตซ์ซิ่งได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทดสอบความคงทนของฉนวนว่าสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และการถูกรบกวนระบบอันเกิดจากการสวิตซ์ซิ่งได้หรือไม่

2.10.2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบ

1) ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

ตามมาตรฐาน IEC และ IEEE ได้บอกถึงลักษณะของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มไว้ดังรูปที่ 2.56

ระยะเวลาหน้าคลื่น (T_1) = 1.2 μ s โดยสามารถมีความคลาดเคลื่อนได้ประมาณ $\pm 30\%$ (0.84 - 1.56 μ s)

ระยะเวลาของหางคลื่น (T_2) = 50 μ s โดยสามารถมีความคลาดเคลื่อนได้ประมาณ $\pm 20\%$ (40 - 60 μ s)

แต่เนื่องจากวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่สมบูรณ์แบบได้ ดังนั้นการหาค่าของระยะเวลาหน้าคลื่น จึงต้องทำการสร้างเส้นตรงที่ลากผ่านจุดที่มีค่า 30% และ 90% ของค่ายอดของรูปคลื่น โดยมีระยะเวลาระหว่างจุดสองจุดเท่ากับ T แล้วเราสามารถหาระยะเวลาหน้าคลื่นได้จากสมการ

$$T_1 = 1.67T \quad (2.86)$$

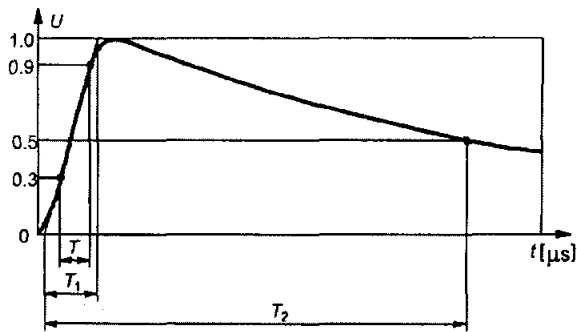
2) ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ

ตามมาตรฐานของ IEC แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับจะต้องมีจุดสูงสุดของรูปคลื่นสูงกว่าแรงดันอิมพัลส์แบบเต็มอยู่ 10% และมีระยะเวลาที่คลื่นถูกตัด (T_c) ตามรูปที่ 2.57 เป็นระยะเวลา 2-6 μ s และค่าโอเวอร์ชูต (U_s) ที่ผ่านเส้นตัดศูนย์ครั้งแรกจะต้องมีค่าไม่เกิน 30% ของแอมพลิจูดที่ทำการทดสอบ

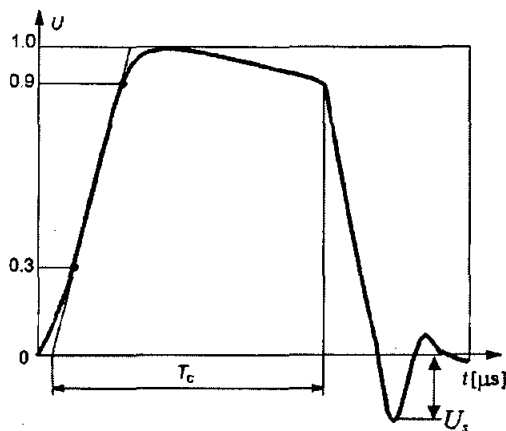
ตามมาตรฐานของ IEEE กล่าวว่าหางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์สับจะต้องมีลักษณะไปในทางเดียวกับหางของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม โดยที่ค่าของแรงดันทดสอบและระยะเวลาของคลื่นที่ถูกตัดสามารถดูได้จากตารางที่ 2.3 ในมาตรฐาน IEEE C57.12.00 [50] และมีจุดสูงสุดของรูปคลื่นสูงกว่ารูปคลื่นแบบเต็มอยู่ประมาณ 10% มีโอเวอร์ชูตไม่เกิน 30%

3) ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซิ่ง

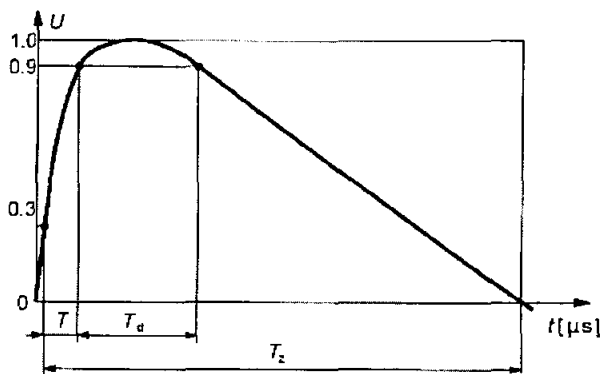
ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันชนิดนี้ตามมาตรฐาน IEC และ IEEE สามารถดูได้จากรูปที่ 2.56 โดยมีรายละเอียดของลักษณะของรูปคลื่นดังนี้



รูปที่ 2.56 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม



รูปที่ 2.57 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ



รูปที่ 2.58 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซิ่ง

มีระยะเวลาหน้าคลื่น (T_1) $\geq 100 \mu s$ โดยที่ $T_1 = 1.67T$

มีระยะเวลาถึง 90% ของค่ายอด (T_d) $\geq 200 \mu s$

มีระยะเวลาที่ค่าแรงดันตกมาเป็นศูนย์ $T_z \geq 500 \mu s$ จะดีกว่าถ้า

$T_z \geq 1000 \mu s$ (IEC) , $T_z \geq 1000 \mu s$ (IEEE)

โดยที่ระยะเวลา T คือ ระยะเวลาตั้งแต่ ค่าแรงดัน 30% ถึงค่า 90% ของค่ายอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

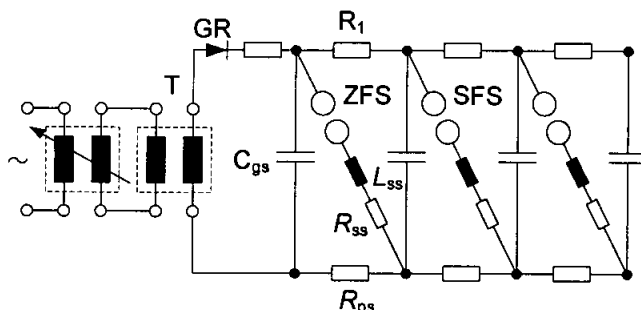
เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีวงจรดังรูปที่ 2.59 โดยมีหลักการทำงานดังนี้

1. ทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากห้องทดสอบเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วทำการสะสมแรงดันไว้ในตัวเก็บประจุแต่ละชั้น ตัวเครื่องจะทำการสะสมแรงดันในลักษณะขนานกันไปทุกชั้นที่ใช้งานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยมีสเฟียร์แกปทำหน้าที่เสมือนตัวต้านทานขนาดใหญ่เพื่อป้องกันการลัดวงจรของแรงดัน โดยดูการสะสมแรงดันได้จากรูปที่ 2.60

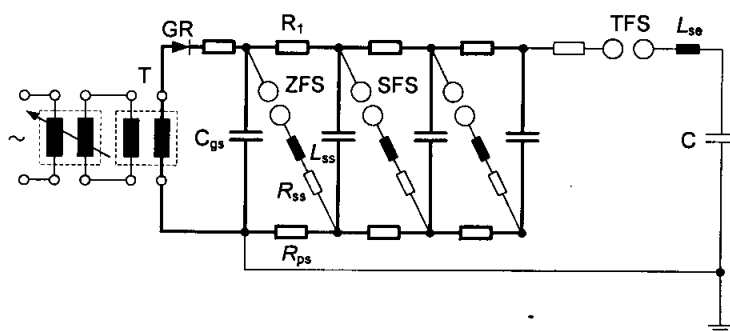
2. เมื่อทำการสะสมแรงดันจนถึงค่าที่จะทำการทดสอบแล้ว ไกสวิทช์ที่อยู่ในสเฟียร์แกปจะทำการเพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้าขึ้น เพื่อเป็นการจุดชนวนให้เกิดการเบรกดาวนผ่านสเฟียร์แกป หลังจากนั้นแรงดันที่สะสมไว้ในตัวเก็บประจุแต่ละชั้นจะเบรกดาวนผ่านสเฟียร์แกปในแต่ละชั้น โดยค่าแรงดันที่ได้ในขั้นสุดท้ายจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่สะสมไว้ในตัวเก็บประจุแต่ละชั้นนำมาอนุกรมกัน ดูการปล่อยแรงดันอิมพัลส์ได้จากรูปที่ 2.61

2.10.3 หลักการทั่วไปในการทดสอบ

การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์จะเป็นการทดสอบความคงทนของฉนวน 3 บริเวณคือ ความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดแรงดัน ความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดแรงดันกับตัวถังของหม้อแปลง และความคงทนของฉนวนระหว่างรอบ

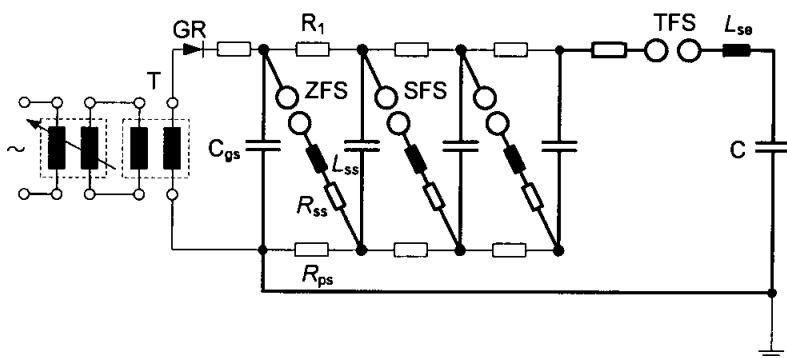


รูปที่ 2.59 วงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 2.60 ลักษณะทางเดินของกระแสขณะทำการสะสมแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.61 ลักษณะทางเดินของกระแสขณะทำการปล่อยแรงดัน

ในขดลวดแรงดัน โดยบริเวณที่จะได้รับผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์มากที่สุดคือ บริเวณส่วนหน้าของขดลวดที่ได้รับแรงดันอิมพัลส์ก่อน หลังจากนั้นความรุนแรงของแรงดันก็จะค่อยๆ ลดลงไปเรื่อยๆ ดังนั้นการทดสอบความคงทนของฉนวนระหว่างรอบของขดลวดแรงดันจึงสามารถบอกผลกระทบอันเกิดจากแรงดันอิมพัลส์ได้ดีที่สุด

ในการทดสอบจะมีค่าๆ หนึ่งเป็นตัวกำหนดว่า ในหม้อแปลงไฟฟ้าลูกหนึ่งๆ จะต้องทำการทดสอบที่แรงดันเท่าใด ซึ่งค่าที่เป็นตัวกำหนดนั้นตามมาตรฐานเรียกว่าค่า บีไอแอล (BIL: Basic lightning Impulse insulation Level) สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และค่า บีเอสแอล (BSL: Basic switching impulse insulation level) สำหรับแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซึ่ง โดยค่าที่จะเป็นตัวกำหนดค่าบีไอแอลของหม้อแปลงแต่ละลูกนั้นคือค่า U_m และระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าจากแรงดันฟ้าผ่าที่ผู้ใช้หม้อแปลงใช้ในระบบ

โดยทั่วไปหากไม่มีข้อเรียกร้องจากผู้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า ผู้ทดสอบจะทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทุกเฟสของทุกขดลวดแรงดัน และหากหม้อแปลงไฟฟ้ามีแทป จะทำการทดสอบที่แทปพิกัด แทป สูงสุดและแทปต่ำสุด ในส่วนของการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซึ่งจะทำการทดสอบที่ขดลวดและแทปที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด ลักษณะของแรงดันที่ใช้ทดสอบนั้นจะเป็นแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ เพื่อลดโอกาสการเกิดการแฟลชโอเวอร์ผ่านอากาศระหว่างขดลวดหรือวงจรทดสอบ

ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์จะต้องกระทำก่อนการทดสอบความคงทนของฉนวนประเภทอื่น และตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้มีการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซึ่งเป็นอันดับแรก เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านหม้อแปลงในขณะการทดสอบนั้น มีระยะเวลาที่แรงดันไหลผ่านหม้อแปลงที่สั้นมาก โดยมีอาจสังเกตได้จากความผิดปกติจากรูปคลื่นเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อสถานการณ์อื่นๆ เป็นการตรวจสอบลักษณะของฉนวนหลังการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เพื่อความมั่นใจว่าฉนวนสามารถทนต่อการทดสอบได้

ลำดับในการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์นั้น ในกรณีที่ต้องทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซึ่ง ผู้ทดสอบจะต้องทำการทดสอบในหัวข้อนี้ก่อนจึงตามด้วยการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยมีรายละเอียดตามแต่ละมาตรฐานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

มาตรฐาน IEC มีลำดับดังนี้

1. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่มีขนาดแรงดันต่ำกว่าแรงดันทดสอบบีโอแอลหนึ่งครั้ง (มีค่าประมาณ 50%-75% ของแรงดันบีโอแอล) เพื่อใช้เป็นรูปคลื่นอ้างอิง
2. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่มีระดับแรงดันทดสอบบีโอแอลหนึ่งครั้ง (100% ของ BIL)
3. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสับที่มีขนาดต่ำกว่าแรงดันทดสอบบีโอแอลหนึ่งครั้ง หรือมากกว่า
4. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสับที่มีระดับแรงดันทดสอบบีโอแอลสองครั้ง
5. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่มีระดับแรงดันทดสอบบีโอแอลสองครั้ง

โดยในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสับนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า และค่าของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบต้องมีค่า 110% ของแรงดันทดสอบบีโอแอล

ตามมาตรฐาน IEEE มีลำดับการทดสอบดังนี้

1. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่มีขนาดแรงดันต่ำกว่าแรงดันทดสอบ บีโอแอลหนึ่งครั้ง เพื่อใช้เป็นรูปคลื่นอ้างอิง
2. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปหน้าคลื่นคลื่นสับที่แอมพลิจูดที่มาตรฐานกำหนดสองครั้ง โดยดูค่าได้จากตารางของมาตรฐาน IEEE (จะทำการทดสอบหากผู้ใช้งานหม้อแปลงต้องการให้ทำการทดสอบ)
3. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสับที่มีระดับแอมพลิจูดที่มาตรฐานกำหนดสองครั้ง
4. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่มีระดับแรงดันทดสอบบีโอแอลหนึ่งครั้ง

2) การทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซิ่ง

มีลำดับการทดสอบดังนี้

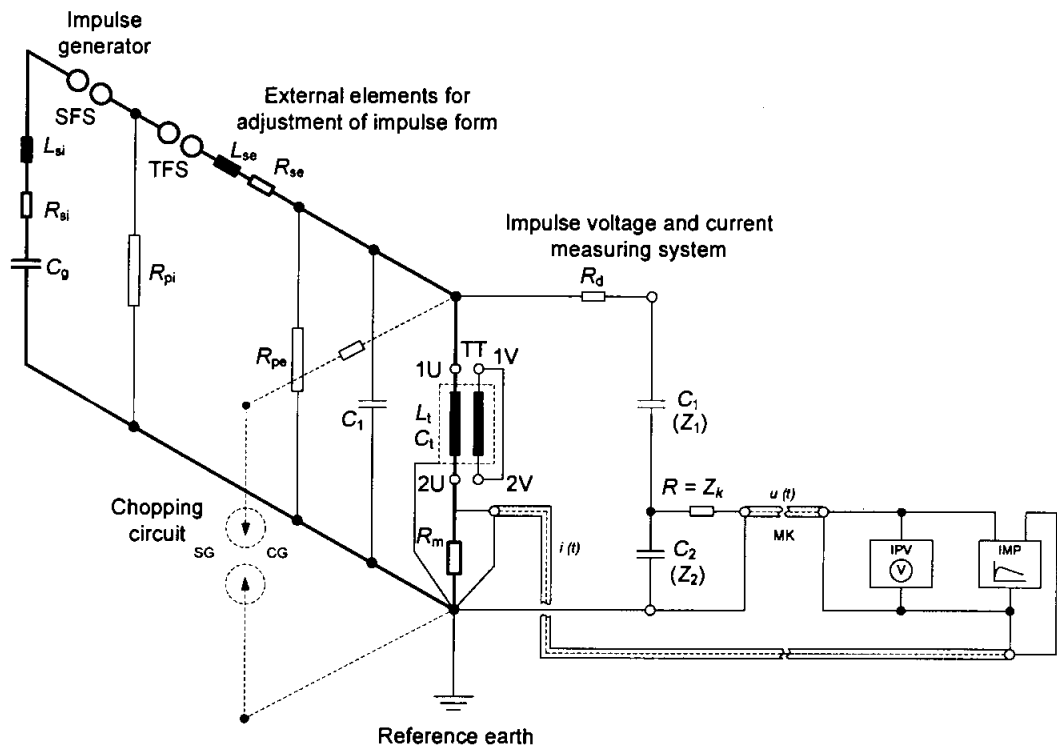
1. ทำการทดสอบด้วยแรงดันที่มีขนาดต่ำกว่าค่าแรงดันทดสอบที่มาตรฐานกำหนดหนึ่งครั้ง ค่าที่ทำการทดสอบจะมีค่าประมาณ 60% ของแรงดันทดสอบ
2. ทำการทดสอบที่มีระดับแรงดันทดสอบ โดยตามมาตรฐาน IEC ทำการทดสอบ 3 ครั้ง และตามมาตรฐาน IEEE ทดสอบ 2 ครั้ง

2.10.4 วงจรการทดสอบ

วงจรการทดสอบมีรูปวงจรถังรูปที่ 2.62 สามารถแบ่งวงจรถังออกได้สามส่วนดังนี้

1. วงจรหลัก แสดงลักษณะเส้นหนา
2. วงจรวัดแรงดัน แสดงในลักษณะเส้นปกติ
3. วงจรชอปปีงแก๊ป แสดงในลักษณะเส้นประ

วงจรถังทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซิงก็จะมีลักษณะเดียวกับรูป 2.62 มีเพียงแต่ค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุเท่านั้นที่แตกต่างออกไป



รูปที่ 2.62 วงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปวงจรถังที่ 2.62 จะพบว่าในการวัดค่ากระแส นั้นจะทำโดยการต่อตัวต้านทานชั้นด่อนุกรมกับวงจรถัง ซึ่งการต่อตัวต้านทานชั้นด่อนุกรมนี้สามารถต่อได้ 3 วิธีตามบริเวณที่เราต้องการทดสอบความคงทนของฉนวน ดังนี้

1. การต่อตัวต้านทานชั้นด่อนุกรมโดยตรงกับขดลวดแรงดันที่ทำการทดสอบ เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนระหว่างรอบในขดลวดแรงดันของหม้อแปลง ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่มีความนิยมที่สุด เนื่องมาจากการตอบสนองต่อค่าของกระแสได้ดี อีกทั้งความรุนแรงของแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีมากที่สุดบริเวณขดลวดแรงดัน แต่การใช้วิธีการนี้กับขดลวดแรงดันต่ำที่มีกระแสสูงอาจสร้างความเสียหายให้กับตัวต้านทานชั้นด่อนุกรมได้

2. การต่อตัวต้านทานชั้นด่อนุกรมที่ขดลวดแรงดันที่ไม่ได้ทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ วิธีนี้จะเป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดแรงดัน วิธีนี้จะลดโอกาสการเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเสียหายให้กับตัวต้านทานชนิดได้มาก แต่การตอบสนองต่อช้อบกพร่องของฉนวนก็ลดน้อยตามไปด้วย วิธีนี้จึงจะใช้ในกรณีที่มีกระแสจากแรงดันอิมพัลส์สูง หรือกรณีที่ตรวจพบความผิดปกติจากรูปคลื่นแรงดันแล้วต้องการตรวจสอบบริเวณที่ฉนวนมีช้อบกพร่อง

3. การต่อตัวต้านทานชนิดบริเวณตัวถังของหม้อแปลง วิธีนี้จะเป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดแรงดันกับตัวถังของหม้อแปลง แต่เนื่องจากความรุนแรงของแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อฉนวนบริเวณนี้มีน้อยมาก อีกทั้งการตอบสนองต่อความบกพร่องมีน้อย วิธีการนี้จึงจะใช้ในกรณีที่ต้องการตรวจสอบหาสาเหตุของช้อบกพร่องเท่านั้น

ในการทดสอบนั้นผู้ทดสอบสามารถเลือกใช้วิธีใดก็ได้ แต่หากใช้วิธีใดแล้วต้องใช้วิธีนั้นในการทำการทดสอบทุกเฟส และทุกขดลวดแรงดัน โดยในรายงานฉบับนี้จะเน้นในการต่อตัวต้านทานชนิดโดยตรงกับขดลวดแรงดันเท่านั้น

1) วงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

โครงสร้างของการต่อวงจรจะมีอิทธิพลที่สำคัญต่อการทดสอบหม้อแปลงต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าดังนี้

1. ความเครียดของหม้อแปลงในขณะที่ทำการทดสอบ
2. ความยากง่ายในการตรวจจับช้อบกพร่องที่เกิดขึ้น
3. การได้มาซึ่งรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และอธิบายการใช้พารามิเตอร์ต่างๆ

สำหรับวงจรการทดสอบ

ในการทดสอบผู้ทดสอบจะต้องทำการเลือกโครงสร้างของวงจรที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะส่งผลต่อสภาพโดยทั่วไปของการทดสอบ โดยลักษณะโครงสร้างวงจรทดสอบของการต่อวงจรวัดกระแสที่ใช้โดยทั่วไปของหม้อแปลงหนึ่งเฟสสามารถดูได้จากรูปที่ 2.63 และหม้อแปลงสามเฟสดูได้จากรูป 2.64 และตามหลักการแล้วขดลวดใดๆ ที่ไม่ได้ทำการทดสอบจะทำการต่อลงกราวด์ หรือลัดวงจรแล้วต่อลงกราวด์ทั้งหมด ยกเว้นแต่หม้อแปลงแบบอัตโนมัติ หรือกรณีที่ต้องการเพิ่มเวลาของหางคลื่นอาจทำการต่อลงกราวด์โดยผ่านตัวต้านทานก่อน และตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้จุดนิวทรัลต้องทำการต่อลงกราวด์ต่อลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ชนิดที่มีค่าน้อย

ตำแหน่งของแทปที่ทำการทดสอบนั้นจะมีความแตกต่างของมาตรฐาน IEC และ IEEE โดยมีรายละเอียดดังนี้

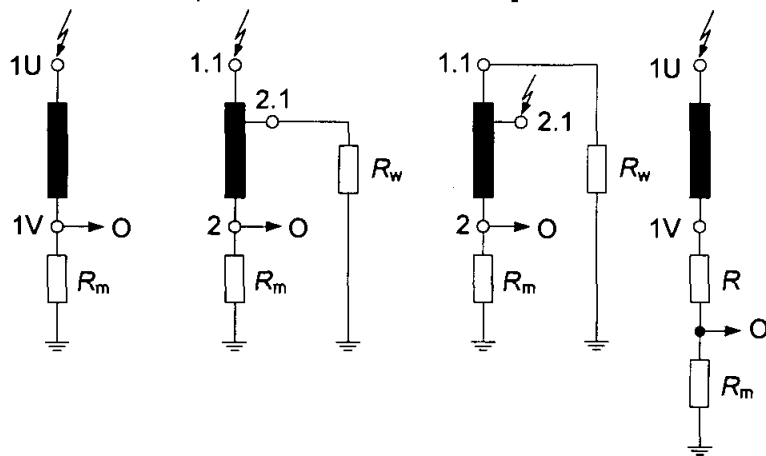
ตามมาตรฐาน IEC การทดสอบจะทำการทดสอบที่แทปพิกัด แทปสูงสุด และแทปต่ำสุด ส่วนแทปอื่นจะทำการทดสอบหรือไม่ก็ได้ แต่ถ้าหากว่าหม้อแปลงที่ทำการทดสอบมีความต่างของแทปไม่เกิน 5% มาตรฐานกำหนดให้สามารถทำการทดสอบที่แทปพิกัดเพียงแทปเดียวก็ได้ ส่วนการทดสอบที่นิวทรัลนั้นให้เลือกใช้แทปที่ให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงที่สุดสำหรับทำการทดสอบ

ตามมาตรฐาน IEEE การทดสอบจะทำการทดสอบที่แทปที่ให้ค่าความเครียดต่อรอบภายในขดลวดแรงดันที่ทำการทดสอบน้อยที่สุด

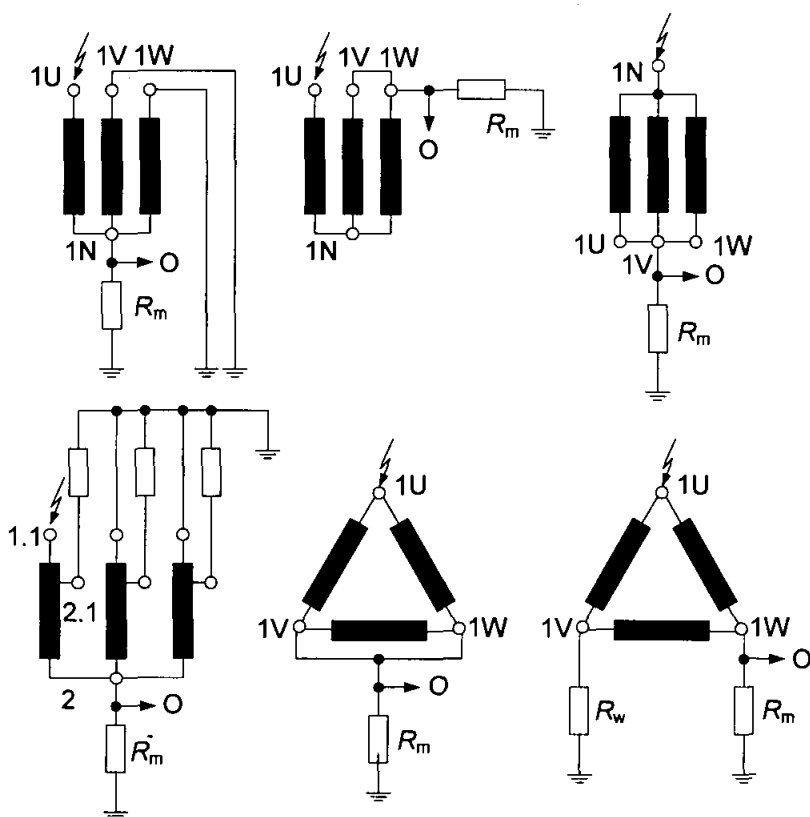
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ที่จุดนิวทรัล เมื่อจุดนิวทรัลของขดลวดมีค่าพิกัดที่สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ เราสามารถทำการทดสอบได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีการโดยอ้อม มีวิธีการคือ ทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์เข้าพร้อมกันทุกเฟสของขดลวดแรงดัน ส่วนนิวทรัลให้ทำการต่อลงกราวด์โดยผ่านค่าอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง หรือปล่อยให้ เมื่อทำการป้อนค่าแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานเข้าที่ทุกเฟส ค่าแอมพลิจูดจะลดค่าลงมาอยู่ในระดับสำหรับการทดสอบจุดนิวทรัล แต่การทดสอบนี้รูปคลื่นที่ได้จะไม่มีค่านั่นแน่นอน



รูปที่ 2.63 ลักษณะต่างๆ ของการต่อวงจรทดสอบเข้ากับขดลวดแรงดัน



รูปที่ 2.64 ลักษณะต่างๆ ของการต่อวงจรทดสอบเข้ากับขดลวดแรงดัน

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการโดยอ้อม มีวิธีการคือ ทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์เข้าพร้อมกันทุกเฟสของขดลวดแรงดัน ส่วนนิวทรัลให้ทำการต่อลงกราวด์โดยผ่านค่าอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง หรือปล่อยให้ลอยไว้ เมื่อทำการป้อนค่าแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานเข้าที่ทุกเฟส ค่าแอมพลิจูดจะลดค่าลงมาอยู่ในระดับสำหรับการทดสอบจุดนิวทรัล แต่การทดสอบนี้รูปคลื่นที่ได้จะไม่มีความแน่นอน

3. วิธีการโดยตรง คือการป้อนแรงดันอิมพัลส์เข้าที่จุดนิวทรัลโดยตรง ส่วนไลน์ทุกเฟสให้ทำการต่อลงกราวด์ หากใช้วิธีนี้ในการทดสอบระยะเวลาหน้าคลื่นของรูปคลื่นมาตรฐาน IEC กำหนดให้มีค่าเพิ่มขึ้นได้ถึง 13 μ s และมาตรฐาน IEEE กำหนดให้เพิ่มขึ้นได้ถึง 10 μ s และมาตรฐาน IEEE จะยอมรับเฉพาะการทดสอบโดยตรงเท่านั้น

2) วงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซิ่ง

วงจรสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสดูรูปที่ 2.65 แรงดันที่กระจายในขดลวดจะมีลักษณะเป็นลิเนียร์คล้ายกับในการทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำ ในขณะที่ทำการทดสอบขดลวดที่ไม่ได้ทำการทดสอบจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นตามอัตราส่วนของแรงดันด้วย ดังนั้นการทดสอบจึงทำเพียงขดลวดเพียงด้านเดียว

วงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซิ่งซึ่งจะมีลักษณะเหมือนการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า คือ นิวทรัลต่อลงกราวด์ และเฟสอื่นที่ไม่ได้ทำการทดสอบให้ทำการลัดวงจรหรือต่อเครื่องมือวัด

การทดสอบจะทำการป้อนแรงดันเข้าที่แทป และขดลวดแรงดันที่มีระดับแรงดันสูงที่สุด คือ การป้อนแรงดันที่ขดลวดแรงดันสูง แต่มีบางกรณีที่อาจทำการทดสอบที่ขดลวดที่มีระดับแรงดันน้อยกว่าขดลวดแรงดันสูงได้ แต่แรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะมีระดับเดียวกับที่ใช้ทดสอบที่ขดลวดแรงดันสูง

ในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสจะต้องทำการลัดวงจรขดลวดแรงดันสูงเฟสที่ไม่ได้ทำการทดสอบเข้าด้วยกัน เพื่อความแน่นอนว่าเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นเท่ากันในเฟสที่ไม่ได้ทำการทดสอบ

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดที่ไม่ได้ทำการทดสอบตามทฤษฎีแล้วจะมีค่าตามอัตราส่วนของรอบของขดลวดแต่การแกว่งอาจทำให้แรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงต้องทำการตรวจสอบกับแรงดันย่อขนาดที่ใช้ในการอ้างอิง

มาตรฐาน IEC ต้องการให้หม้อแปลงสามเฟสที่มีการต่อแบบสตาร์ให้ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 2.66 โดยนิวทรัลจะต้องทำการต่อลงกราวด์ ซึ่งวงจรดังรูปจะทำให้เกิดค่าแรงดันระหว่างเฟสมีค่าเป็น 1.5 เท่าของแรงดันทดสอบ

มาตรฐาน IEEE จะทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซิ่งในลักษณะเฟสสู่กราวด์ ตำแหน่งของแทปที่ใช้ในการทดสอบ โดยปกติแล้วไม่มีการกำหนดแทปที่แน่นอนที่จะใช้ในการทดสอบ ยกเว้นที่ทำการทดสอบกับหม้อแปลงที่ขดลวดแรงดันสองขดขึ้นไป ในกรณีนี้ควรเลือกแทปที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดแรงดันที่ไม่ได้ทำการทดสอบเกิดขนาดแรงดันขึ้นใกล้เคียงระดับแรงดันที่กำหนดในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่ง ตามมาตรฐาน IEC

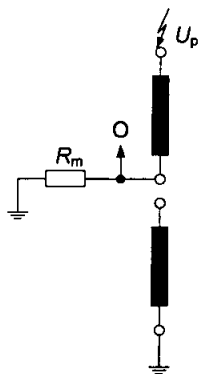
3) การทดสอบแรงดันอิมพัลส์โดยตรงและโดยอ้อม

จากการทดสอบจะพบว่าแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนให้กับเฟสที่ต้องการทำการทดสอบสามารถแสดงได้ว่ามีลักษณะเป็นการทดสอบแรงดันโดยตรง แต่ในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะของการฉนวนที่ไม่สม่ำเสมอ และต้องการทำการทดสอบที่ขั้วที่มีการฉนวนต่ำ จะต้องทำการต่อจุดที่ต้องการทำการทดสอบลงกราวด์โดยผ่านตัวต้านทาน และทำการป้อนแรงดันทดสอบเข้าบริเวณที่มีการฉนวนสูงแทน ผู้ทดสอบสามารถทำการปรับแต่งค่าแอมพลิจูดและรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ให้ได้ตามความต้องการของการฉนวนโดยการปรับตัวต้านทานเมื่อแอมพลิจูดของแรงดันอิมพัลส์มีค่าไม่เกิน 80% ของค่าความต้องการของฉนวนของจุดที่รับการป้อนแรงดันทดสอบ

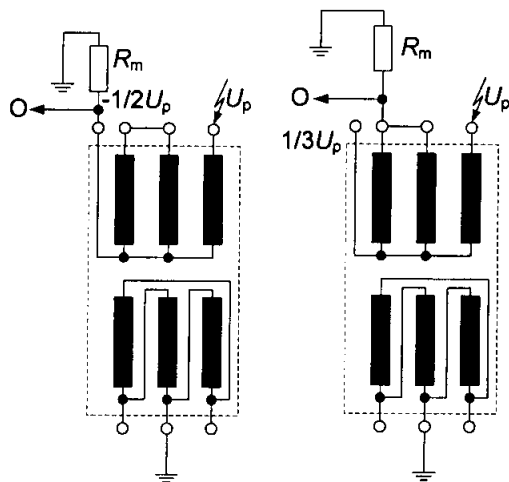
2.10.5 กระบวนการทดสอบ

ก่อนทำการทดสอบต้องทำการตรวจสอบดังนี้

1. ตรวจสอบว่าหม้อแปลงทำการเติมน้ำมันผ่านมาแล้วอย่างน้อย 3 วัน
2. ทำการวัดค่าอัตราส่วนแรงดัน ทิศทางเฟส และค่าความต้านทานของขดลวดของหม้อแปลง
3. ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันของหม้อแปลง
4. ทำการลัดวงจรและต่อลงกราวด์ของหม้อแปลงกระแสที่อยู่ในหม้อแปลง
5. ทำการต่อตัวเก็บประจุในบัสซึ่งลงกราวด์
6. ตรวจสอบระดับน้ำมันในเครื่องเปลี่ยนแทป และในหม้อแปลง
7. ตรวจสอบตำแหน่งของแทป



รูปที่ 2.65 ลักษณะต่อวงจรทดสอบเข้ากับขดลวดแรงดันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่ง



รูปที่ 2.66 ลักษณะต่อวงจรทดสอบเข้ากับขดลวดแรงดันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

1) กระบวนการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ทำการปรับรูปคลื่นแรงดันทดสอบให้มีลักษณะของรูปคลื่นตามรูปที่ 2.56 สำหรับรูปคลื่นเต็ม และรูปที่ 2.57 สำหรับรูปคลื่นสับ

1. ทำการทดสอบตามลำดับในหัวข้อ 2.10.3

2. ทำการตรวจสอบสภาพฉนวนของหม้อแปลงโดยนำรูปคลื่นย่อขนาดแรงดันและรูปคลื่นที่ระดับแรงดันทดสอบมาเปรียบเทียบกัน การบันทึกผลลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นของกระแสจะถูกบันทึกโดยออสซิลโลสโคป หรือเครื่องบันทึกที่เป็นดิจิทัล ซึ่งเครื่องบันทึกที่เป็นดิจิทัลจะสามารถคำนวณและแสดงผลในลักษณะทรานสเฟอร์ฟังก์ชันได้ โดยสิ่งที่จะทำการบันทึกมีดังนี้

ตามมาตรฐาน IEC ทำการบันทึกลักษณะของรูปคลื่นแรงดัน และลักษณะลักษณะรูปคลื่นกระแส โดยจะทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดันทุกรูปที่ทดสอบที่ระดับแรงดันที่มากกว่า 50% ของแรงดันทดสอบบีไอแอล ค่าของกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการวัด จะมีความไวต่อการตรวจพบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของฉนวน และจะเป็นประโยชน์อย่างมากหากนำรูปคลื่นกระแสมาจำลองกับช่วงระยะเวลาที่ต่างไปซึ่งจะสามารถบอกถึงความผิดพลาดได้ดี ตามมาตรฐาน IEEE ทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดัน รวมทั้งรูปคลื่นกระแสในขดลวด และรูปคลื่นกระแสในนิวทรัล โดยจะทำการบันทึกทุกรูปที่ทำการทดสอบที่ระดับแรงดันที่มากกว่า 40% ของแรงดันทดสอบ โดยค่าไทม์สเกลของสโคปที่จะใช้ในขณะทำการทดสอบสามารถดูได้จากตาราง 2.6

2) กระบวนการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซึ่ง

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดแฟลชโอเวอร์ในอากาศระหว่างอุปกรณ์การทดสอบอื่นๆ แรงดันที่ใช้ในการทดสอบจึงเป็นขั้วลบ แต่หากจะทำการทดสอบแรงดันขั้วบวกห้องทดสอบต้องมีขนาดที่กว้างขวางพอสำหรับการจัดวงจรทดสอบ สำหรับการทดสอบจะทำการทดสอบที่ขดลวดและแทปที่มีระดับแรงดันสูงสุด และมีกระบวนการดังนี้

1. ทำการปรับรูปคลื่นแรงดันทดสอบให้มีลักษณะของรูปคลื่นตามหัวข้อ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการทดสอบตามลำดับในหัวข้อ 2.10.3
3. ทำการตรวจสอบสภาพนวนของหม้อแปลงโดยนำรูปคลื่นย่อขนาดแรงดันและรูปคลื่นที่ระดับแรงดันทดสอบมาเปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 2.6 การตั้งค่ามาตรฐานวัดเวลาสำหรับเครื่องมือวัดในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์

รูปคลื่นแรงดัน ที่ทำการทดสอบ	รูปคลื่นที่ ทำการบันทึก	เครื่องมือวัด แบบอนาล็อก (μs)	เครื่องมือวัด แบบดิจิตอล (μs)
รูปคลื่นเต็ม	แรงดัน	50 – 100	(100) – 150
	กระแส	50 – 100	(100) – 150
รูปคลื่นสับ	แรงดัน	10	10 – 25
	กระแส	10 – 25	(10) – 25

เพื่อให้ได้ค่าเวลาที่ค่าแรงดันตกมาเป็นศูนย์ครั้งแรก (T_2) ที่ต้องการ เราอาจทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาดประมาณ 25% - 50% ของแรงดันพิกัดในชั่วครู่กันข้ามกับแรงดันที่จะทำการทดสอบ ก่อนที่จะทำการทดสอบที่แรงดันทดสอบ และเพื่อตรวจสอบสภาพการอิมพัลส์ของแกนเหล็กอันเกิดจากการทดสอบบริเวณทดสอบจึงต้องไม่มีเสียงรบกวนเพื่อฟังเสียงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง

2.10.6 การบันทึกผลการทดสอบ

มาตรฐาน IEC และ IEEE กำหนดให้ทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดัน และรูปคลื่นกระแสในขณะที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป หรือบันทึกด้วยเครื่องบันทึกที่เป็นดิจิทัล ซึ่งเครื่องบันทึกที่เป็นดิจิทัลจะสามารถแสดงผลของรูปคลื่นกระแสในลักษณะทรานสเฟอ์ฟังก์ชันได้ นอกจากรูปคลื่นกระแสแล้วยังอาจมีการบันทึกรูปคลื่นของเสียงในขณะที่ทำการทดสอบด้วยก็ได้ โดยช่วงเวลาที่ใช้ในเครื่องมือวัดอยู่ในช่วงประมาณ 1000 ถึง 2500 μs สำหรับแรงดันรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแส และสำหรับเครื่องบันทึกที่เป็นดิจิทัลค่าพิกัดที่ใช้ในการดึงตัวอย่างข้อมูลมีค่าอยู่ประมาณ 10 MHz

2.10.7 การประเมินผลการทดสอบและการตรวจความผิดพลาดของฉนวน

1) การประเมินผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

การประเมินผลการทดสอบทำโดยการนำรูปคลื่นของแรงดันและกระแสในการทดสอบที่ระดับแรงดันอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ระดับแรงดันทดสอบ ทั้งแบบรูปคลื่นเต็ม และรูปคลื่นสับ การเปรียบเทียบจะทำการตรวจสอบความแตกต่างของรูปคลื่น หากรูปคลื่นไม่มีความแตกต่างกันเลยแสดงว่าหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ถ้าหากพบความแตกต่างระหว่างสองรูปคลื่น ให้ทำการตรวจสอบตามไดอะแกรมรูปที่ 2.67

2) การประเมินผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซิง

การประเมินผลทำได้โดยเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันที่ระดับอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับระดับแรงดันทดสอบ ถ้าหากรูปคลื่นมีลักษณะเหมือนกันแสดงว่าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นผ่านการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซิง แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่แรงดันลดเหลือศูนย์ครั้งแรกนั้นจะไม่คงที่เนื่องจากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับความอิมพัลส์ของแกนเหล็ก แต่หากเกิดความแตกต่างขึ้นที่บริเวณอื่นของรูปคลื่น หรือความถี่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จะต้องทำการตรวจเช็ควงจรทดสอบและทำการตรวจสอบตามไดอะแกรมในรูปที่ 2.67

นอกจากนี้การทดสอบประเภทนี้จะสามารถตรวจพบแรงดันเบรกดาวนภายในหม้อแปลงได้ง่าย เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ที่กระจายในขดลวดจะเบรกดาวนในลักษณะเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดแรงดัน หรือระหว่างส่วนต่างๆ ของขดลวด รวมทั้งการเกิดแฟลชโอเวอร์ระหว่างขดลวดแรงดันกับกราวด์ สามารถแยกแยะได้จากลักษณะของรูปคลื่นที่ทำการบันทึกไว้

2.11 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของหม้อแปลง (Temperature rise)

2.11.1 จุดประสงค์ของการทดสอบ

จุดประสงค์ของการทดสอบนี้คือ ทำเพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในขณะที่หม้อแปลงทำงานเต็มพิกัด เหมือนกับการใช้งานจริง โดยค่าที่ได้จะนำมาใช้รับรองคุณภาพของหม้อแปลงให้กับทางผู้ใช้งานหม้อแปลง และยังสามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาใช้ในการประมาณค่าอุณหภูมิที่สูงที่สุดในขณะทำงานเต็มพิกัดอีกด้วย

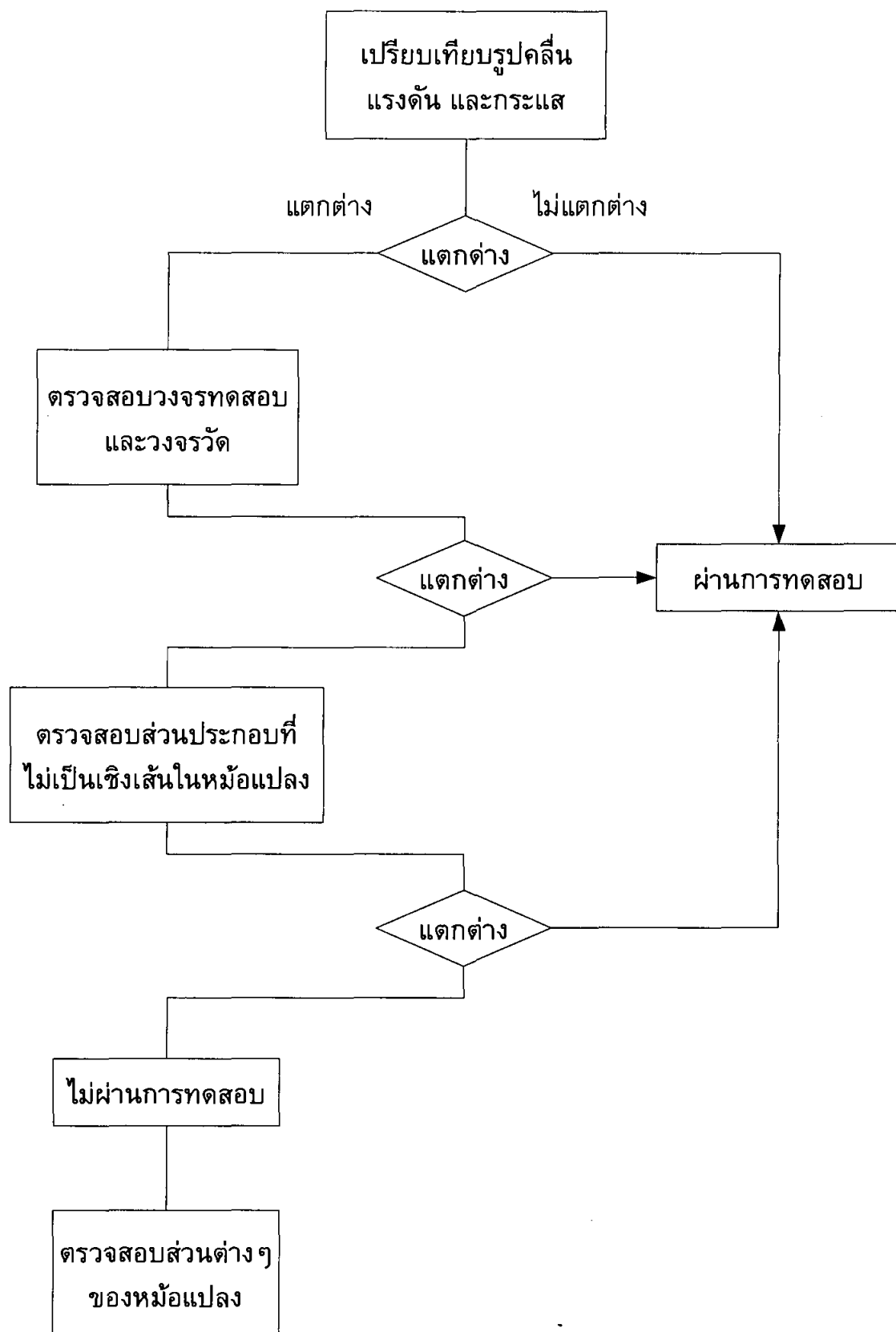
ค่าที่วัดได้จากการทดลองนี้คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่สูงที่สุดของน้ำมันหม้อแปลง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด โดยสามารถดูลักษณะของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นได้จากรูปที่ 2.68

2.11.2 หลักการทั่วไปในการทดสอบ

1) การวัดอุณหภูมิ

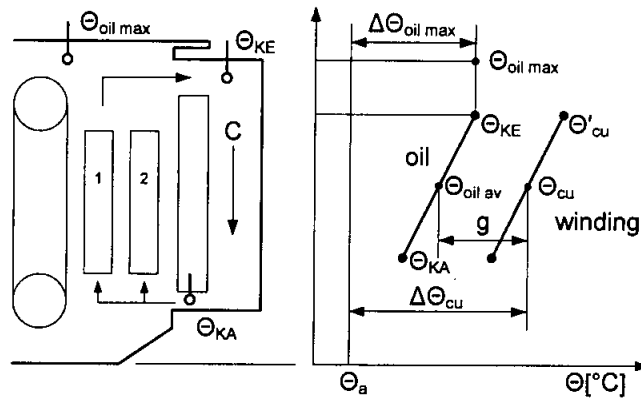
ในการวัดอุณหภูมิของน้ำมันนั้น อาจทำได้โดยการใช้เครื่องมือตรวจจับสัมผัสโดยตรงหรือโดยอ้อมกับน้ำมันก็ได้ ส่วนการวัดอุณหภูมิของขดลวดนั้นจะทำการวัดโดยอ้อมโดยคำนวณจากค่าความต้านทานของขดลวดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ตามสมการที่ 2.6 ในเรื่องการวัดค่าความต้านทานของขดลวด แต่ในปัจจุบันอาจมีการใช้สายไฟเบอร์ออปติกพันเข้าไปพร้อมกับขดลวดและต่อออกมา เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิของขดลวดโดยตรง แต่วิธีนี้ยังไม่มีการกำหนดลงในมาตรฐาน

อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง และขดลวดนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจากด้านล่างของหม้อแปลงสู่ด้านบนของหม้อแปลง



รูปที่ 2.67 ไตอะแกรมขั้นตอนการทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยมีค่าต่างๆ ดังนี้

- $\theta_{oil\ max}$ คือ อุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันหม้อแปลง
- $\Delta\theta_{oil\ max}$ คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดของน้ำมันหม้อแปลง
- θ_a คือ อุณหภูมิของอากาศรอบๆ หม้อแปลง
- θ_{Cu} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด
- $\Delta\theta_{Cu}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้น
- θ_{KE} คือ อุณหภูมิของน้ำมันก่อนเข้าอุปกรณ์ระบายความร้อน
- θ_{KA} คือ อุณหภูมิของน้ำมันหลังออกจากอุปกรณ์ระบายความร้อน
- $\Delta\theta_{oil\ av}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันหม้อแปลง
- θ''_{Cu} คือ อุณหภูมิสูงสุดของขดลวด
- C คือ อุปกรณ์ระบายความร้อน
- 1, 2 คือ ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า
- g คือ อุณหภูมิที่แผ่จากขดลวดสู่น้ำมัน

รูปที่ 2.68 ลักษณะของอุณหภูมิต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง

2) หลักการของวงจรทดสอบ

ในการทดสอบนี้จะทำการลัดวงจรหม้อแปลงทางด้านจ่ายภาระทางไฟฟ้า (ในทางปฏิบัติจะลัดวงจรทางแรงต่ำ) เพื่อเป็นการจำลองลักษณะการใช้งานจริงของหม้อแปลง ในขณะที่ทำงานเต็มพิกัดในเวลาที่ต่อเนื่องกัน โดยในการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ

2.1) ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ให้แก่กับค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าทั้งหมด (Total loss) โดยจะทำการจ่ายค่ากระแสที่สูงเกินกว่ากระแสพิกัด เพื่อเป็นการจำลองค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าไปด้วย ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันหม้อแปลง

2.2) ทำการจ่ายกระแสที่ขนาดกระแสพิกัด เพื่อหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด

3) ระบบระบายความร้อนของหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละลูก จะมีการติดตั้งระบบระบายความร้อนที่แตกต่างกัน ยกเว้นครีป (radiator) ซึ่งถือเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีการติดตั้งที่หม้อแปลงทุกลูก โดยตามมาตรฐาน IEC ได้ทำการกำหนดลักษณะของระบบระบายความร้อนไว้ดังนี้

3.1) อักษรตัวแรกหมายถึงระบบการระบายความร้อนภายในที่มีการสัมผัสโดยตรงกับขดลวด ซึ่งส่วนมากจะเป็นตัวอักษร O ซึ่งหมายถึง น้ำมันหม้อแปลง

3.2) อักษรตัวที่สองหมายถึง อุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อช่วยในการหมุนเวียนสารระบายความร้อน เช่น น้ำมัน ที่อยู่ภายในหม้อแปลงออกสู่อุปกรณ์ระบายความร้อนหรือครีป มีอักษรดังนี้

N คือ ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ใดๆ

F คือ ทำการติดตั้งปั๊มเพื่อควบคุมการไหลเวียนเฉพาะภายในอุปกรณ์ระบายความร้อน

D คือ การติดตั้งปั๊มเพื่อควบคุมการไหลเวียนภายในอุปกรณ์ระบายความร้อน และภายในหม้อแปลง

3.3) อักษรตัวที่สาม หมายถึง การระบายความร้อนภายนอกหม้อแปลง

A คือ ระบายความร้อนด้วยอากาศ

W คือ ระบายความร้อนด้วยน้ำ

3.4) อักษรตัวที่สี่ หมายถึง อุปกรณ์ช่วยระบายความร้อนภายนอกหม้อแปลง

N คือ ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ใดๆ

F คือ มีการติดตั้งอุปกรณ์ เช่น พัดลม

ตัวอย่างการเรียกระบบระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น

ONAN คือ การระบายความร้อนด้วยน้ำมันและมีการไหลเวียนแบบธรรมชาติ

ONAF คือ การระบายความร้อนด้วยน้ำมันและมีการติดตั้งพัดลมไว้ที่ครีปของหม้อแปลง เป็นต้น

2.11.3 วงจรทดสอบ

หม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องตั้งอยู่ในบริเวณห้องทดสอบ โดยที่ผนังรอบๆ ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบระบายความร้อนของหม้อแปลง และห้องทดสอบจะต้องไม่มีการรบกวนจากลม

หม้อแปลงจะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน เช่น รีเลย์ต่างๆ เพื่อป้องกันการเกิดอันตราย เพื่อเป็นการป้องกันผู้ทดสอบจากอุบัติเหตุทางไฟฟ้า การจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะต้องต่อโดยที่ไม่ทำอันตรายต่อสายวัดอุณหภูมิ ที่ติดอยู่บริเวณอุปกรณ์ระบายความร้อน และตัวถังของหม้อแปลง สายไฟที่ใช้จะต้องมีขนาดที่เพียงพอกับปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับหม้อแปลง และควรหลีกเลี่ยงการดึงลากสายไฟที่มีการเชื่อม

เพื่อให้การทดสอบมีความเหมาะสมและเป็นประโยชน์แก่ผู้ทดสอบเอง ดังนั้น การทราบเวลาที่ใช้ในการทดสอบก็เป็นสิ่งสำคัญ โดยสามารถดูรูปวงจรถสอบได้จากรูปที่ 2.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรหลักของการทดสอบนี้จะเป็นการวัดค่าความสูญเสีย ดังนั้นจึงมีการต่อรูปวงจรเหมือนกับการวัดค่าความสูญเสียในขณะมีภาระทางไฟฟ้า แต่วงจรนี้จะมีส่วนแตกต่างบริเวณสวิตช์ T_1 และ T_2 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวตัดต่อวงจรในส่วนของวงจรการวัดค่าความต้านทานของขดลวด ซึ่งจะทำให้การวัดในทันทีเมื่อทำการหยุดจ่ายกระแสและแรงดันให้กับหม้อแปลง โดยสามารถดูรูปวงจรขณะทำการตัดวงจรได้จากรูปที่ 2.70

โดยในการทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่จะมีกระแสที่ไหลทางฝั่งแรงดันต่ำสูง การใช้สวิตช์ตัดต่อนั้นอาจไม่เหมาะสม ในกรณีนี้จึงมีการใช้บัสบาร์ที่สามารถทำการเปิดวงจรได้เร็ววกตัวอย่างเช่น การใช้สกรูแคลมป์ในการยึดบัสบาร์ นอกจากนี้จะต้องทำการตรวจสอบสภาพน้ำมันในหม้อแปลงเสมอ ทั้งก่อนและหลังการทดสอบ

2.11.4 กระบวนการทดสอบ

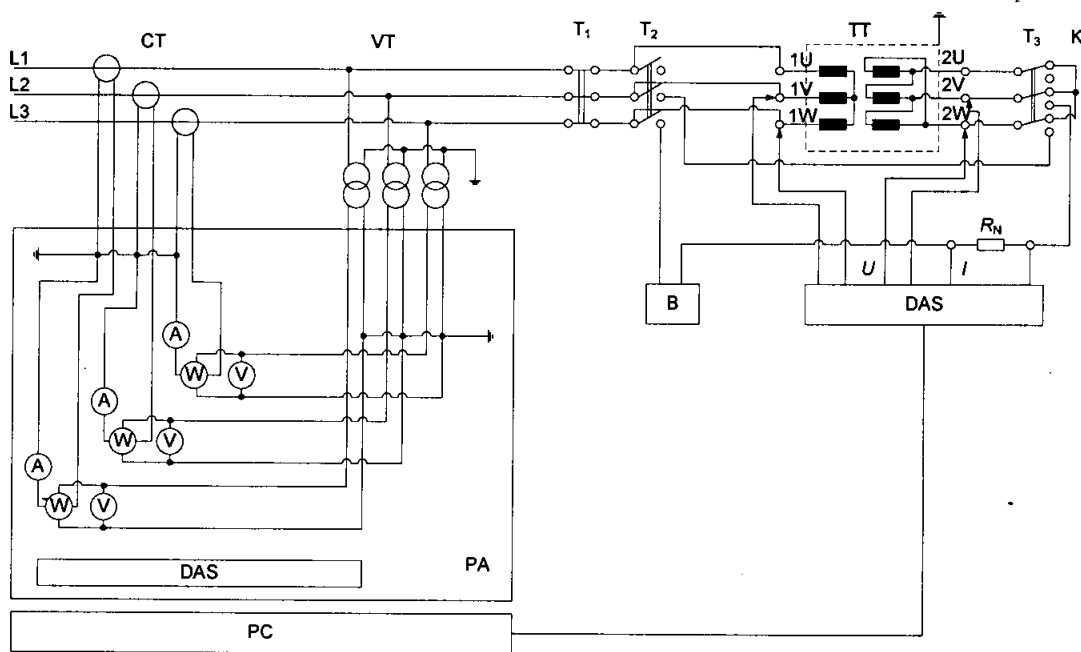
1) การวัดอุณหภูมิของอากาศโดยรอบหม้อแปลงไฟฟ้า

ตามมาตรฐาน IEC และ IEEE ได้กำหนดว่า การวัดอุณหภูมิของอากาศโดยรอบหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องกระทำอย่างน้อย 3 จุด ล้อมรอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะทำการทดสอบ โดยจะต้องมีเครื่องป้องกันผลกระทบอันเกิดจากลมและอุณหภูมิที่เกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเซนเซอร์หรือสายเทอร์โมคูเบิลที่จะใช้ในการวัดอุณหภูมิจะต้องจุ่มอยู่ในน้ำมันด้วย

2) การวัดการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง

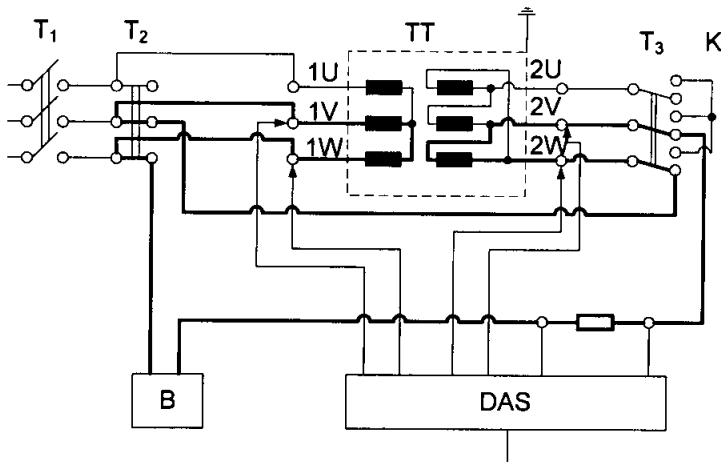
ทำการต่อวงจรทดสอบเหมือนกับการทดสอบการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้า โดยทำการป้องกันกระแสเกินกระแสพิกต์ของหม้อแปลงเพื่อสร้างความสูญเสียขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าจำลองขึ้น โดยทำการติดตั้งจุดตรวจวัดอุณหภูมิไว้ดังนี้

2.1) ทำการติดสายเทอร์โมคูเบิลที่บริเวณท่อน้ำมันด้านบนก่อนเข้าสู่ครีบ เพื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ระบายความร้อน



รูปที่ 2.69 วงจรการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.70 วงจรการวัดค่าความต้านทานขณะทำการตัดวงจรจ่ายกำลังไฟ

2.2) ทำการติดสายเทอร์โมคูเปิลที่บริเวณท่อน้ำมันด้านล่างที่ออกจากครีบริบ เพื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันหลังออกจากอุปกรณ์ระบายความร้อน

ในกรณีที่เป็นระบบระบายความร้อนแบบ ON จะไม่มีช่องสำหรับวัดอุณหภูมิ จึงต้องทำการวัดที่บริเวณที่ผิวของท่อหรืออุปกรณ์ระบายความร้อน

2.3) ทำการจุ่มสายเทอร์โมคูเปิลลงในช่องสำหรับวัดอุณหภูมิที่ด้านบนของหม้อแปลงเพื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิน้ำมันที่ด้านบนของหม้อแปลง

2.4) ทำการจุ่มสายเทอร์โมคูเปิลลงในท่อสายยางที่เปิดน้ำมันออกมาจากวาล์ว ระบายน้ำมันทางด้านล่างของหม้อแปลงเพื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิน้ำมันในส่วนล่างของหม้อแปลง

ในการทดสอบนั้นจะกระทำที่แทปที่สูงที่สุดของหม้อแปลงซึ่งเป็นแทปที่ให้ค่าความสูญเสียสูงที่สุด โดยการทดสอบที่ระดับค่าความสูญเสียรวมนั้นจะกระทำจนกระทั่งค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นเริ่มคงที่ โดยตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมिन้อยกว่า 1 เคลวินต่อชั่วโมงเป็นเวลา 3 ชั่วโมงเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิกคงที่ ส่วนมาตรฐาน IEEE กำหนดให้อุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 2.5% หรือ 1 เคลวิน ในระยะเวลา 3 ชั่วโมงเช่นกัน

ในกรณีที่ต้องการลดระยะเวลาในการทำการทดสอบลง อาจทำได้โดยการเริ่มการทดสอบที่ค่าสูญเสียที่สูงกว่าต้องทำการทดสอบจริงโดยไม่ต้องเปิดระบบระบายอากาศ แต่ในกรณีนี้ผู้ทดสอบจะต้องมีความชำนาญในการกำหนดระยะเวลาในการเริ่มต้นได้ถูกต้องเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงทดสอบ โดยดูลักษณะของกราฟได้จากรูปที่ 2.68

3) การหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมัน

การหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันสามารถหาได้จากสมการ

ตามมาตรฐาน IEC

$$\Theta_{oil\ av} = \frac{1}{2}(\Theta_{oil\ max} + \Theta_{KA}) \tag{2.87}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามมาตรฐาน IEEE

$$\Theta_{oil\ av} = \Theta_{oil\ max} - \frac{1}{2}(\Theta_{KE} - \Theta_{KA}) \quad (2.88)$$

โดยค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta\Theta_{oil\ av} = \Theta_{oil\ av} - \Theta_a \quad (2.89)$$

หากในกรณีที่ผู้ทดสอบไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องทำการทดสอบ ค่าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันที่ได้มาจากการทดสอบแบบลดกำลังไฟฟ้าจะต้องนำมาทำการปรับค่าตามสมการ

$$\Delta\Theta_{oil\ max\ N} = \Delta\Theta_{oil\ max\ M} \left(\frac{P_{tot}}{P_M} \right)^x \quad (2.90)$$

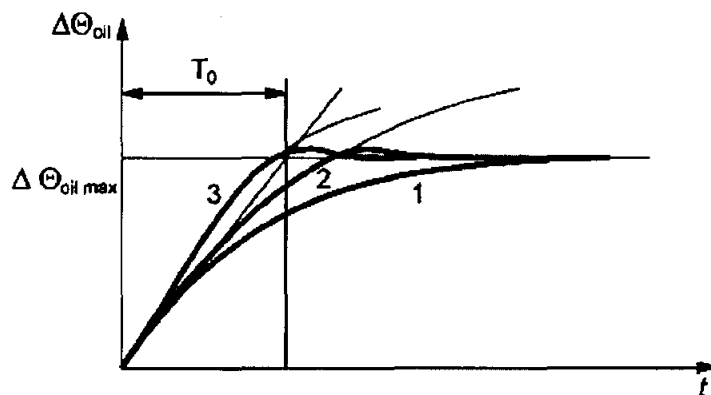
เมื่อ

$\Delta\Theta_{oil\ max\ N}$ คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันที่ค่าทดสอบจริง

$\Delta\Theta_{oil\ max\ M}$ คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันที่ได้มาจากการทดสอบแบบลด

กำลังไฟฟ้า

x คือ ค่ายกกำลังโดยดูได้จากตารางที่ 2.7



เมื่อ

1 คือ ทำการทดสอบที่ระดับความสูญเสียทดสอบ และทำการเปิดระบบระบายความร้อน

2 คือ ทำการทดสอบที่ระดับความสูญเสียทดสอบ แต่ทำการปิดระบบระบายความร้อน

3 คือ ทำการทดสอบที่ระดับความสูญเสียที่สูงกว่าระดับทดสอบ และทำการปิดระบบระบายความร้อน

รูปที่ 2.71 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำมันในกรณีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การวัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของขดลวด

การวัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของขดลวดเป็นขั้นตอนที่สองในการทดสอบที่ ต้องต่อวงจรแบบการทดสอบหาค่าความสูญเสียในขณะที่มีการะทางไฟฟ้า ซึ่งจะกระทำหลังจากที่ การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันมีค่าคงที่ตามหัวข้อที่ 2) ข้างต้น โดยทำการลดขนาดกระแสที่จ่าย ให้กับหม้อแปลงทดสอบอยู่ที่ระดับกระแสพิกต์ โดยจะคงที่การจ่ายกระแสระดับนี้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าได้ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวดที่วัดได้นั้นถูกต้อง โดยดูลักษณะ ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนการจ่ายกระแสได้จากกราฟในรูปที่ 2.72

ขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานของขดลวด

4.1) ในทันทีที่ทำการตัดวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าออก และทำการปลดส่วน ลัดวงจรออก จะต้องทำการต่อวงจรการวัดค่าความต้านทานของขดลวดเข้ากับขดลวดที่จะทำ การวัด โดยถ้าเป็นไปได้ให้ทำการวัดทั้งทางด้านแรงสูงและแรงต่ำไปพร้อมๆ กัน แต่ถ้าหากทำ ไม่ได้ขดลวดอีกด้านหนึ่งจะต้องวัดภายในเวลา 1 ชั่วโมง

เนื่องจากอุณหภูมิและค่าความต้านทานของขดลวด มีการเปลี่ยนแปลงตาม ระยะเวลา ค่าความต้านทานที่วัดได้นั้นจะต้องทำการคำนวณกับไปสู่เวลาที่เริ่มทำการตัดวงจร

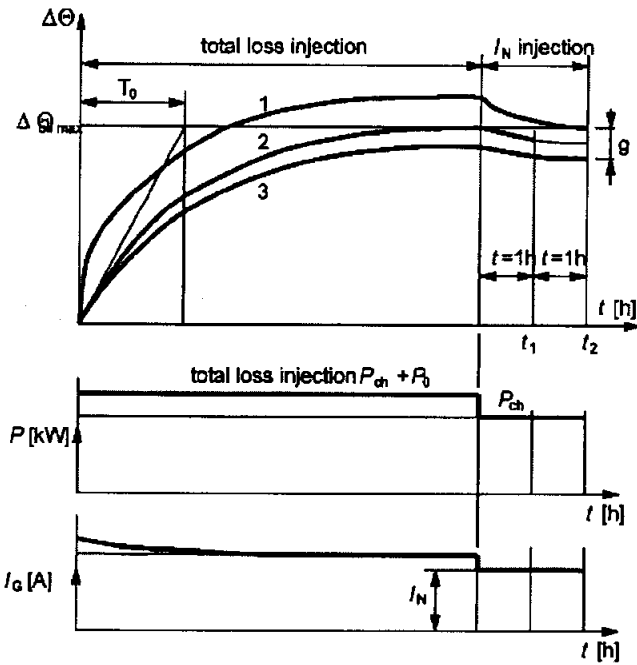
4.2) ในขณะที่ทำการตัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบที่มีระบบระบายความร้อน แบบ OFAF ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้ทำการเปิดปั๊มและพัดลมต่อไปแม้ว่าจะตัดวงจรไป แล้ว แต่ตามมาตรฐานของ IEEE กำหนดว่าจะทำการเปิดหรือปิดอุปกรณ์ช่วยระบายความร้อนก็ได้

4.3) การเริ่มอ่านค่าแรกจะทำเมื่อผลกระทบจากความเหนี่ยวนำลดลง แต่ จะต้องไม่นานเกินกว่า 4 นาทีหลังจากทำการตัดวงจร โดยสามารถทำการติดตั้งโวลต์มิเตอร์ไว้ บริเวณขดลวดที่ไม่ได้ทำการวัดความต้านทาน เพื่อตรวจสอบผลกระทบของความเหนี่ยวนำ โดยค่าของความต้านทานที่จะทำการบันทึกจะทำการบันทึกทุกช่วงเวลาภายในเวลา 10 ถึง 20 นาที ในการวัดค่าความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับเวลานั้น การใช้วิธีการโวลต์มิเตอร์ และแอมมิเตอร์ที่มี ระบบการจับเก็บข้อมูลจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด แต่หากใช้ระบบวงจรปริตซ์ผู้ทำการทดสอบจะต้องมี ประสบการณ์และความชำนาญสูงมาก

ซึ่งในปัจจุบันจะนิยมใช้วิธีการแบบโวลต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ที่มีระบบจับเก็บ ข้อมูล ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความต้านทานขณะที่เริ่มทำการตัดวงจร ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่อุณหภูมิทดสอบที่ถูกต้อง

ตารางที่ 2.7 ตารางแสดงค่า x จากสมการที่ 2.90

ระบบระบายความร้อน	มาตรฐาน IEC	มาตรฐาน IEEE
ONAN	0.9	0.8
ONAF	0.9	0.9
OFAF	1.0	1.0
ODAF	1.0	1.0

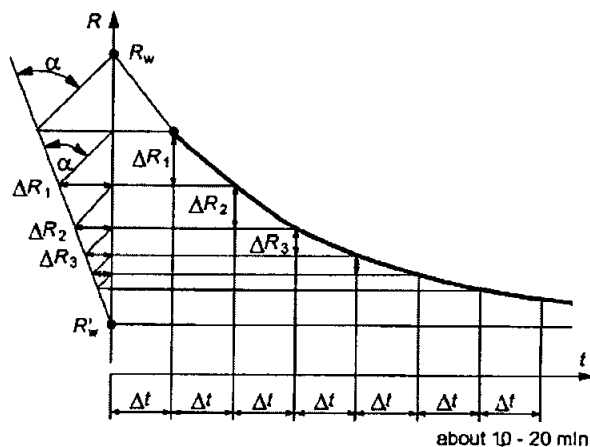


โดยที่

- 1 คือ อุณหภูมิของขดลวด
- 2 คือ อุณหภูมิของน้ำมัน
- 3 คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมัน

รูปที่ 2.72 การเปลี่ยนของอุณหภูมิขณะทำการทดสอบ

แต่ถ้าหากระบบการจับเก็บข้อมูลไม่สามารถคำนวณค่าความต้านทานขณะตัดวงจรได้ ผู้ทำการทดสอบจะต้องบันทึกค่าที่ได้เป็นช่วงๆ แล้วนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟ เพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดในขณะทำการตัดวงจร โดยมีลักษณะของกราฟดังรูปที่ 2.73



เมื่อ

- R_w คือ ค่าความต้านทานของขดลวดในขณะทำการตัดวงจร
- R'_w คือ ค่าความต้านทานที่มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมัน

รูปที่ 2.73 ลักษณะของกราฟที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานของขดลวดขณะทำการตัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้มาใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเมื่อได้ค่าความต้านทานของขดลวดขณะทำการตัดวงจรแล้ว จึงนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการ

$$\Theta'_{Cu} = \frac{R_W}{R_C} (235 + \Theta_C) - 235 \quad (2.91)$$

จะได้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่แท้จริง

เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันลดลงในระหว่างการจ่ายกระแสที่ระดับกระแสพิกัด ค่าอุณหภูมิของขดลวดที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2.91 จะต้องนำมาปรับค่าตามรูปที่ 2.72

ในขั้นแรกจะต้องทำการคำนวณการแพร่ความร้อนจากขดลวดสู่น้ำมันในขณะจ่ายกระแสที่ระดับกระแสพิกัดจากสมการ

$$g = \Theta'_{Cu} - \Theta_{oil av(I_r)} \quad (2.92)$$

แล้วนำค่าที่ได้มาบวกกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของขดลวด ที่ทำการวัดในขั้นตอนแรกในขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าความสูญเสียรวม ตามสมการ

$$\Delta\Theta_{Cu} = \Theta_{oil av(P_{tot})} + g \quad (2.93)$$

ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวดที่ถูกคำนวณได้จากสมการที่ 2.93 จะเป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของขดลวดอย่างแท้จริง

ถ้าหากในการทดลองไม่สามารถทำการจ่ายกระแสที่ระดับกระแสพิกัดได้ ค่าการแพร่ของอุณหภูมิที่ได้จะต้องนำมาทำการปรับค่าตามสมการ

$$g_r = g_M \left(\frac{I_r}{I_t} \right)^y \quad (2.94)$$

เมื่อ

I_r คือ กระแสพิกัดของหม้อแปลง

I_t คือ กระแสที่ใช้ทำการทดสอบ

g_r คือ ค่าการแพร่ของอุณหภูมิที่ระดับกระแสพิกัด

g_M คือ ค่าการแพร่ของอุณหภูมิที่ระดับกระแสทดสอบ

y คือ ค่ายกกำลังตามมาตรฐานของ IEC และ IEEE โดยมีค่าตามระบบ

ระบายความร้อนดังนี้ 1.6 สำหรับแบบ ON และ OF 2.0 สำหรับระบบ OD

สมการนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อค่ากระแสที่ใช้ทดสอบมีค่าน้อยกว่ากระแสพิกัดไม่เกิน

10%

2.11.5 ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดสอบ

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของการทดสอบนี้นั้นเกิดขึ้นจากความผิดพลาดในขั้นตอนต่างๆ ของการทดสอบดังนี้

1) การวัดค่าอุณหภูมิสูงสุด และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมัน

2) การวัดค่าอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งอาจมีผลกระทบจากความร้อนที่แผ่

ออกมาจากหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การวัดค่าความต้านทานของขดลวด ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการสร้างกราฟเพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดขณะทำการตัดวงจร

2.11.6 การประเมินผลการทดสอบ

ในการทดสอบนี้จะประเมินผลโดยการนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเทียบกับค่าที่ได้ทำการรับรองการผู้ให้หม้อแปลงว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ โดยค่าอุณหภูมิต่างๆ ย่อมส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงด้วย เช่น หากค่าการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันและขดลวดมีค่าสูง อายุของฉนวนที่อยู่ภายในหม้อแปลงก็จะมีอายุการใช้งานที่สั้นลงไปด้วย อีกทั้งในขณะที่ทำการทดสอบการลัดวงจรนั้นจะเป็นการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงขณะทำงานเต็มพิกัดอีกด้วย หากในขั้นตอนนี้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นโดยไม่มีอาการคั่งที่ หรืออุณหภูมิสูงเกินกว่า 120 องศาเซลเซียส จะถือว่าหม้อแปลงไม่ผ่านการทดสอบ อีกทั้งหากในขณะที่ทำการทดสอบหม้อแปลงเกิดความดันเพิ่มขึ้นสูง หรือมีน้ำมันทะลักออกมาก็จะถือว่าหม้อแปลงลูกนี้ไม่ผ่านการทดสอบ และต้องนำไปตรวจสอบหาสาเหตุต่อไป

2.12 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์

2.12.1 จุดประสงค์ของการวัด

วิทยาการสมัยใหม่ในการคำนวณหาข้อบกพร่องต่างๆ ของระบบนั้นจะต้องใช้ความรู้ความเข้าใจอย่างมากในการศึกษา แต่ด้วยวิธีการหาอิมพีแดนซ์ของลำดับเฟสนั้นเป็นวิธีเฉพาะที่ใช้กับหม้อแปลง

2.12.2 ลักษณะทั่วไป

แนวทางของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่คำนวณถึงแรงดัน กระแส ฯลฯ สามารถวิเคราะห์โดยหาได้จากหนึ่งเฟส ส่วนเฟสอื่นๆ มุมเฟสจะเลื่อนไป 120° และขนาดของทั้งกระแสและแรงดันก็จะเหมือนกัน ซึ่งกระบวนการนี้ใช้ได้กับการลัดวงจรในแบบสามเฟส

สำหรับระบบสามเฟสที่ไม่สมดุล ยกตัวอย่างในกรณีที่เกิดขึ้นจากหนึ่งเฟสกราวด์ฟอลต์ แต่ละเฟสจะพิจารณาและคำนวณแยกกันตั้งแต่ค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันในระบบ ซึ่งจะต้องใช้ความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีส่วนประกอบทางไฟฟ้าและพฤติกรรมของลำดับเฟสในส่วนนั้นๆ

วิธีการเหล่านี้มีโอกาสนี้จะเปลี่ยนระบบสามเฟสที่ไม่สมดุลไปเป็นระบบสามเฟสที่สมดุลได้ ดังนี้

- ระบบเฟสลำดับบวก (ใช้หมุนเฟส UVW)
- ระบบเฟสลำดับลบ (ใช้หมุนเฟส UWV)
- ระบบเฟสลำดับศูนย์ (ใช้ในทางเดียวกันของหนึ่งเฟสทั้งสามเฟส)

ส่วนประกอบของแรงดันและกระแสในระบบสามเฟสนั้นจะเป็นทำงานเป็นสัดส่วนกับค่าอิมพีแดนซ์ กล่าวคือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก, ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบ และค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Z_+) และค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบ (Z_-) มีค่าเท่ากัน ซึ่งเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ในการลัดวงจรปกติ แต่ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Z_0) เป็นค่าที่แตกต่างจากอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับ การต่อของขดลวดและการออกแบบแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้านั้น

2.12.3 ค่านิยามของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์

อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์เป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากจุดเชื่อมต่อของเฟสกับนิวทรัล เมื่อจุดเชื่อมต่อของทั้งสามเฟสต่อวงจรกันอยู่ อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีเฉพาะในหม้อแปลงสามเฟสที่มีการขดลวดแบบสตาร์หรือแบบซิกแซก ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีคุณสมบัติเฉพาะในแต่ละเฟส คือมีค่าเป็นสามเท่าของค่าที่วัดได้ ดังรูปที่ 2.74

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U}{I} \quad (2.95)$$

เมื่อ

U_p คือ แรงดันพิกัด (เฟสถึงนิวทรัล)

I คือ กระแสที่นิวทรัล

อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์โดยปกติจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าอิมพีแดนซ์เริ่มต้น (Z_b) ของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังเช่นในกรณีที่มีอิมพีแดนซ์จากการลัดวงจรแบบปกติ (อิมพีแดนซ์ลำดับบวกจากการลัดวงจร) ค่าอิมพีแดนซ์เริ่มต้นหาได้จาก

$$Z_b = \frac{U_r^2}{S_r} \quad (2.96)$$

เมื่อ

S_r คือ กำลังไฟฟ้าพิกัด

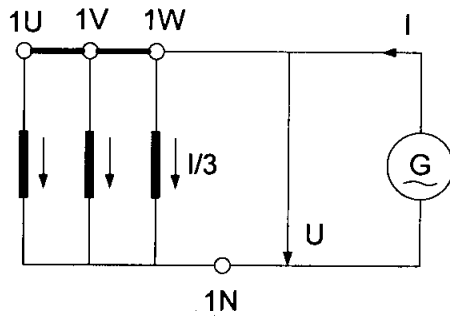
U_r คือ แรงดันจากเฟสถึงเฟสพิกัด

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ได้ดังนี้

$$z_0 = \frac{Z_0}{Z_b} \cdot 100 \quad \text{or alt.} \quad z_0 \frac{S_r}{U_r^2} \cdot 100 \quad (2.97)$$

อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีสององค์ประกอบเหมือนกับค่าอิมพีแดนซ์อื่นๆ ค่าตัวต้านทานลำดับศูนย์ (R_0) และค่าความต้านทานของขดลวดต่อไฟฟ้ากระแสสลับลำดับศูนย์ในทางปฏิบัติ ค่า $R_0 \ll X_0$ ทำให้ไม่พิจารณาค่าความต้านทาน อีกความหมายหนึ่ง คือ อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์จะเท่ากับค่าความต้านทานของขดลวดต่อไฟฟ้ากระแสสลับลำดับศูนย์

การวัดค่าอิมพีแดนซ์จะไม่ใช้การวัดโดยตรง แต่จะใช้วงจรที่มีลักษณะคล้ายการลัดวงจรของอิมพีแดนซ์ปกติในการวัดแทน ดังรูปที่ 2.75

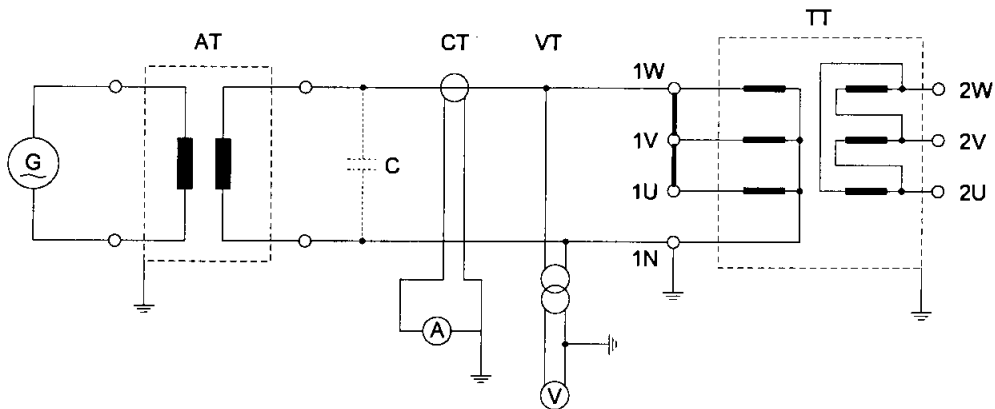


รูปที่ 2.74 วงจรพื้นฐานของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์

2.12.4 กระบวนการวัด

วงจรทดสอบทั่วไปดังรูปที่ 2.75 และทำการวัดที่ความถี่พิกัด จุดสำคัญในการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์สำหรับความแตกต่างของจุดนิวทรัลและระบบ ดังรูปที่ 2.76 การวัดควรจะทำภายในตัวหม้อแปลง เนื่องจากจะได้ค่าจากอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ที่ถูกต้องที่สุด (ชนิดของรีแอคเตอร์)

ภายใต้สภาพที่ขดลวดที่กระแสดอจำนวนรอบเสียความสมดุล ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจะไม่เป็นเส้นตรง (ชนิดของรีแอคเตอร์) ในกรณีนี้ผลจากการวัดค่าของแรงดันที่แตกต่างกัน สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ได้



รูปที่ 2.75 วงจรทั่วไปในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (ในรูปเป็นการยกตัวอย่างการต่อแบบสตาร์-เดลต้า)

แต่ถ้าฟลักซ์ของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ที่มีสาเหตุมาจากความร้อนที่สูงเกินของโครงสร้างที่เป็นโลหะ เช่น ตัวถังหม้อแปลง, ฝาปิดหม้อแปลง, แคลมป์ ในกรณีนี้กระแสที่ใช้ในการวัดไม่ควรจะเกิน 30% กระแสปกติ I_r หากจำเป็นต้องเพิ่มกระแสให้ถึงระดับปกติควรจะทำในระยะเวลาที่สั้นมาก (ไม่กี่วินาที) และการทดสอบแรงดันประยุกต์ค่าแรงดันจะต้องไม่สูงกว่าแรงดันที่เฟสถึงนิวทรัล

สำหรับหม้อแปลงที่กระแสดอจำนวนรอบมีความสมดุล (ชนิดลัดวงจร) กระแสที่ใช้ในการทดสอบสามารถใช้ได้ถึงระดับกระแสปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์สำหรับหม้อแปลงประเภทสตาร์-สตาร์ โดยที่ไม่มีการต่อแบบเดลต้าทางเทอทาริท จะเป็นชนิดรีแอกเตอร์ และหม้อแปลงประเภทสตาร์-เดลต้าจะเป็นชนิดลัดวงจร

2.13 การวัดระดับของเสียง

2.13.1 จุดประสงค์ของการวัด

เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เรียบร้อยแล้ว และทำการย้ายไปในที่ที่ต้องการทดสอบ จะมีการวัดในเรื่องระดับของเสียงที่ออกมาจากหม้อแปลง

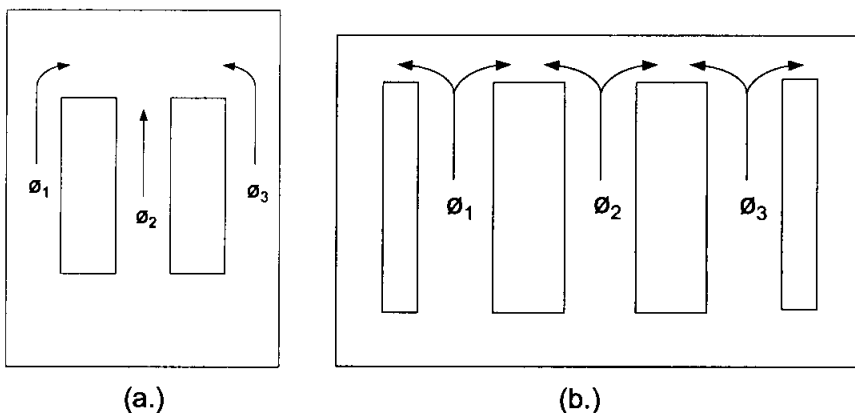
1. เสียงจะได้มาจากการทำงานของหม้อแปลง หรือเสียงที่เหมาะสม ในแต่ละสถานที่จะมีเสียงที่ไม่ต้องการ เพื่อเป็นการป้องกันเสียงรบกวน ซึ่งในแต่ละมาตรฐานที่ใช้ในประเทศต่างๆ จะกำหนดค่าที่เหมาะสมกับระดับของเสียงนั้น

2. สำหรับทฤษฎีในเรื่องของเสียงที่ออกมาจากหม้อแปลงนั้นมีความสำคัญมาก

3. รายละเอียดในการหาค่าและการลดทอนระดับของเสียง โดยทั้งสองหัวข้อนี้จะใช้กับอุปกรณ์ที่คล้ายกับกรอบนอกหรือคล้ายกับวิธีการที่ทำให้เสียงลดระดับความดังลง

2.13.2 ลักษณะทั่วไป

สิ่งที่บ่งบอกถึงเสียงก็คือปรากฏการณ์ที่เกิดจากความเคยชินของธรรมชาติของมนุษย์



รูป a.) แกนเหล็กแบบสามเฟสที่มีก้าน 3 ก้าน (Three-phase core with three limbs)

รูป b.) แกนเหล็กแบบสามเฟสที่มีก้าน 5 ก้าน (Three-phase core with five limbs)

รูปที่ 2.76 แกนเหล็กแบบต่าง ๆ

1. ที่มาของเสียงจากหม้อแปลง

1.1 เสียงขณะที่มีหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า (เสียงจากแกนเหล็ก)

เสียงขณะที่หม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้านั้นมีสาเหตุมาจากแม่เหล็กอย่างแท้จริง (ซึ่งจากแตกต่างกันไปตามส่วนของแกนเหล็ก) เสียงนี้เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำให้เป็นแม่เหล็ก การสั่นนั้นจะผ่านตามน้ำมันและกลไกของเครื่องจักรเหมือนกับการสั่นของกลไก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปไซ่ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเครื่องไปยังตัวถังและแผ่นระบายความร้อนจนผ่านไปสู่อากาศรอบนอก ความดังในการสั่นนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็กและค่าความเป็นแม่เหล็กของแกนเหล็กนั้นๆ

สเปกตรัมความถี่ของระดับการได้ยินเสียงประกอบด้วยค่าสองเท่าของความถี่พิคกิดและเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเลขคู่ เช่น ที่ความถี่ของระบบคือ 50 Hz ฮาร์โมนิกระดับของเสียงที่สามารถได้ยินจะประกอบด้วย 100 Hz, 200Hz, 300 Hz, 400 Hz และอื่นๆ

ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวระบายความร้อน, ป้อนลม และเสียงจากพัดลม (เสียงจากพัดลม)

โดยปกติ จะต้องทำการวัดระดับเสียงขณะที่หม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า

1.2 เสียงขณะที่หม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า (เสียงจากขดลวด)

เนื่องด้วยทั้งแรงจากแม่เหล็กและกระแสที่จ่ายให้กับโหลดได้ทำให้เกิดสั่นที่ขดลวด, ตัวถัง และฉนวนแม่เหล็ก ในกรณีที่เป็นหม้อแปลงสมัยใหม่ (ค่าความเหนี่ยวนำต่ำ) เสียงที่เกิดขึ้นอาจจะดังกว่าในกรณีที่หม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า

2.13.3 การวัดและวงจรในการวัดเสียง

ระดับเสียงจะวัดได้หลายวิธีเช่นวิธีวัดจากระดับความดันของเสียง หรือระดับความเข้มของเสียง โดยปกติแล้ว ตามหลักควรจะมีการวัดระดับความดันของน้ำหนักเสียง

ส่วนการวัดระดับความเข้มของเสียงนั้นจะวัดในกรณีพิเศษ ที่มาของเสียงจากแหล่งต่างๆ นั้นจะทำให้วัดได้ยากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ถ้ามีความแตกต่างในระดับของเสียงเป็นค่าเฉพาะ และเสียงข้างหลังต่ำกว่า 3 เดซิเบล จะไม่สามารถทำการวัดระดับของเสียงได้

1. ตามมาตรฐานของ IEC การทดสอบในเรื่องการวัดระดับของเสียงทั้งขณะที่หม้อแปลงมีภาระ และไม่มีภาระทางไฟฟ้า นั้นจะตกลงตามความต้องการของลูกค้า ดังนี้

1.1 ขณะที่หม้อแปลงอยู่ในขณะมีภาระ และไม่มีภาระทางไฟฟ้า, โดยจัดระบบและป้อน ระบายความร้อน

1.2 ขณะที่หม้อแปลงอยู่ในขณะมีภาระ และไม่มีภาระทางไฟฟ้า, โดยที่ต่อระบบและป้อนระบายความร้อนให้ทำงานอยู่

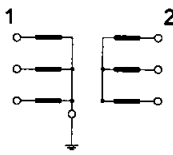
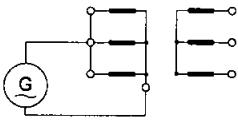
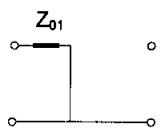
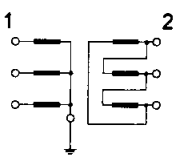
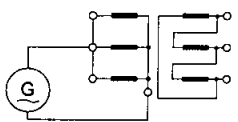
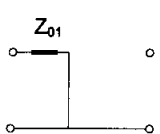
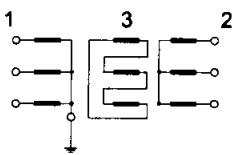
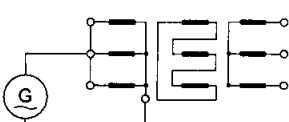
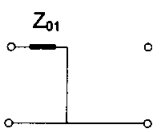
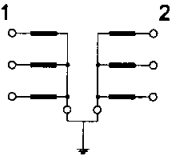
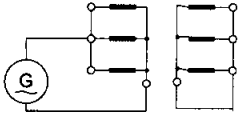
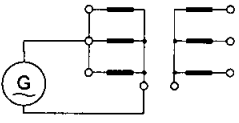
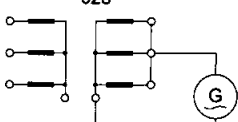
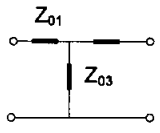
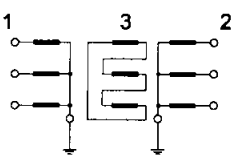
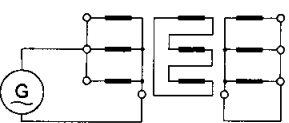
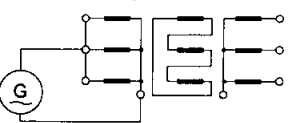
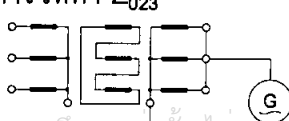
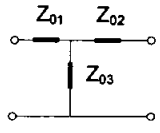
1.3 ขณะที่หม้อแปลงอยู่ในขณะมีภาระ และไม่มีภาระทางไฟฟ้า, โดยจัดระบบระบายความร้อน ส่วนป้อนยังถูกต่อใช้งานอยู่

1.4 ขณะที่หม้อแปลงไม่ทำงาน, โดยที่ต่อระบบและป้อนระบายความร้อนให้ทำงานอยู่

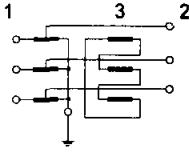
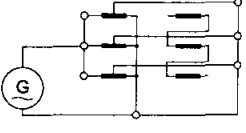
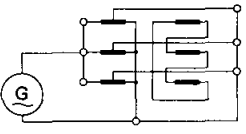
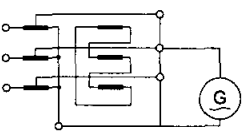
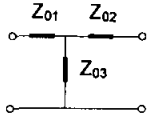
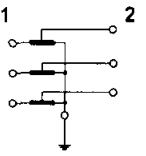
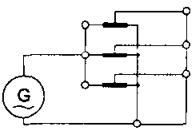
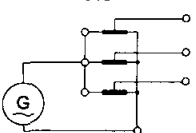
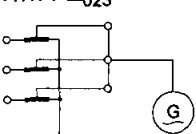
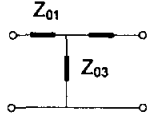
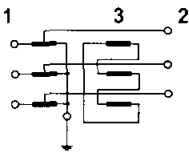
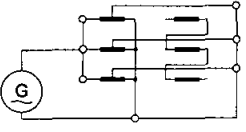
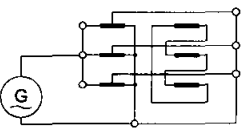
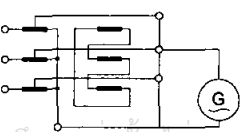
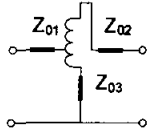
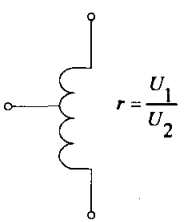
2. ตามมาตรฐาน IEEE นั้น ให้ต่อระบบระบายความร้อนให้ทำงานที่แรงดันพิคกิดจนกว่าจะทำการทดสอบ

สำหรับการวัดเสียงรบกวนของหม้อแปลงขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า การต่อวงจรจะคล้ายกับการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า การปรับแรงดันจะใช้การปรับจากค่าเฉลี่ยของโวลต์มิเตอร์

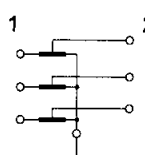
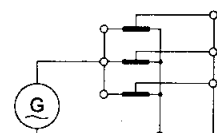
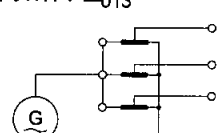
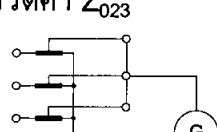
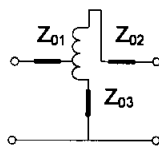
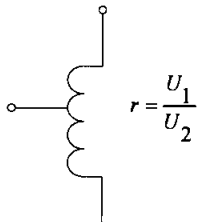
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	ประเภทของหม้อแปลง	วงจรวัดค่าอิมพีแดนซ์	วงจรลำดับศูนย์
1		การวัดค่า Z_{01} 	
2		การวัดค่า Z_{01} 	
3		การวัดค่า Z_{01} 	
4		การวัดค่า Z_{012}  การวัดค่า Z_{013}  การวัดค่า Z_{023} 	
5		การวัดค่า Z_{012} , 3 เปิดวงจร  การวัดค่า Z_{013}  การวัดค่า Z_{023} 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	ประเภทของหม้อแปลง	วงจรวัดค่าอิมพีแดนซ์	วงจรลำดับศูนย์
6		<p>การวัดค่า Z_{012}, 3 เปิดวงจร</p>  <p>การวัดค่า Z_{013}</p>  <p>การวัดค่า Z_{023}</p> 	
7		<p>การวัดค่า Z_{012}</p>  <p>การวัดค่า Z_{013}</p>  <p>การวัดค่า Z_{023}</p> 	
8	 <p>not earth</p> <p>Network neutrals 1 and / or 2 grounded</p> $r = \frac{U_1}{U_2}$	<p>การวัดค่า Z_{012}, 3 เปิดวงจร</p>  <p>การวัดค่า Z_{013}</p>  <p>การวัดค่า Z_{023}</p> 	 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	ประเภทของหม้อแปลง	วงจรวัดค่าอิมพีแดนซ์	วงจรลำดับศูนย์
9	 not earth Network neutrals 1 and / or 2 grounded $r = \frac{U_1}{U_2}$	การวัดค่า Z_{012}  การวัดค่า Z_{013}  การวัดค่า Z_{023} 	  ideal transformer

รูปที่ 2.77 การทดสอบที่มีการต่อแบบต่างๆของหม้อแปลง ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์

สำหรับการวัดเสถียรภาพของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้า การต่อวงจรจะคล้ายกับการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้า โดยระดับเสียงทั้งหมด, ทั้งขณะที่หม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้าจะรวมกับขณะที่หม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า

2.13.4 ข้อปฏิบัติในการวัด

1. สิ่งสำคัญทั่วไปในการวัด

เมื่อทำการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนี้จะแตกต่างกับการทดสอบอื่นๆ คือ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงให้ผู้ทดสอบทำงานใกล้กับหม้อแปลงที่ถูกทดสอบได้ ดังนั้นจะต้องมีการระมัดระวังไม่ให้ไมโครโฟนใกล้กับส่วนที่เป็นแรงสูง ผู้ทดสอบจะต้องเน้นเรื่องความปลอดภัยในระหว่างการทดสอบเป็นสิ่งแรก เพื่อรักษาระยะปลอดภัย รวมทั้งตำแหน่งต่างๆ ในการวัด

2. สภาพแวดล้อมในการทดสอบ

หม้อแปลงที่ถูกทดสอบจะถูกตั้งในส่วนที่ห่างจากเสียงสะท้อนของกำแพงหรือจากอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อที่จะได้รับผลกระทบน้อยที่สุดจากคลื่นต่างๆ การวางตำแหน่งของหม้อแปลงควรจะให้ตัวถังขนานกับผนังของห้องทดสอบ

หม้อแปลงจะต้องมีการติดตั้งล้อหรือตัวค้ำที่ฐานของตัวหม้อแปลง ซึ่งระห่างจากตัวถังถึงพื้นจะต้องไม่น้อยกว่าระยะปฏิบัติการปกติ

3. เงื่อนไขในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหม้อแปลงถูกใช้ในการปรับค่าแรงดันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงที่ถูกทดสอบ ซึ่งหม้อแปลงนี้ตั้งอยู่ในห้องทดสอบแล้ว การต่อวงจรในการทดสอบจะต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ จึงทำให้มีระดับเสียงรบกวนที่ต่ำ

สิ่งสำคัญคือ เมื่อถึงแรงดันถึงภาวะกระตุ้นจะต้องเป็นรูปคลื่นไซน์และต้องควบคุมขนาดของแรงดันและความความถี่ที่พิกัดในระหว่างการทดสอบ

อีกเรื่องที่ต้องคำนึงถึง คือ การให้เวลากับแรงดันที่เป็นกระแสตรงก่อนที่จะเริ่มการทดสอบ เพราะยังคงมีเหลือฟลักซ์แม่เหล็กกระแสตรงค้างอยู่จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกเลขคี่ในสเปกตรัมของเสียงและส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นโดยรวมของระดับเสียงที่วัดออกมา ในหน่วยเดซิเบล เวลาที่ต้องใช้นี้ประมาณ 10-20 นาที สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดกลาง และสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีก้าน 5 ก้าน จะใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.77

4. ตำแหน่งในการวัดและเครื่องมือวัด

4.1 ตามมาตรฐาน IEC 60076-10

ระบายความร้อนแบบธรรมชาติ (หรือระบายความร้อนแบบใช้พัดลมไม่ถูกใช้งาน) :

- กำหนดให้ระยะห่างจากรอบๆ ส่วนระบายความร้อน เป็นระยะ 0.3 เมตร

ระบายความร้อนแบบใช้พัดลม :

- กำหนดให้ระยะห่างจากรอบๆ ส่วนระบายความร้อน เป็นระยะ 2 เมตร

สำหรับหม้อแปลงที่ตัวถังมีความสูงต่ำกว่า 2.5 เมตร :

- จะทำการวัดที่ระดับความสูง 1/2 ของความสูงตัวถัง

สำหรับหม้อแปลงที่ตัวถังมีความสูงสูงกว่า 2.5 เมตร :

- จะทำการวัดที่ระดับความสูง 1/3 และ 2/3 ของความสูงตัวถัง

ในส่วนของตำแหน่งของไมโครโฟน กำหนดไว้ที่ระยะประมาณระยะห่างที่กำหนดไว้และห่างกันไม่เกิน 1 เมตรในแต่ละจุดของการวัด ดังรูป 2.78

4.2 ตามมาตรฐาน IEEE C57.12.90

ระบายความร้อนแบบธรรมชาติ :

- ทำการวัดที่ระยะห่างจากจุดที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงอ้างอิงเป็นระยะ 0.3

เมตร (1 ฟุต)

ระบายความร้อนแบบใช้พัดลม :

- ทำการวัดที่ระยะ 2 เมตร (6 ฟุต) จากจุดรอบๆ ตัวระบายความร้อน

สำหรับหม้อแปลงที่ตัวถังมีความสูงต่ำกว่า 2.4 เมตร (7.2 ฟุต)

- จะทำการวัดที่ระดับความสูง 1/2 ของความสูงตัวถัง

สำหรับหม้อแปลงที่ตัวถังมีความสูงสูงกว่า 2.4 เมตร (7.2 ฟุต) :

- จะทำการวัดที่ระดับความสูง 1/3 และ 2/3 ของความสูงตัวถัง

ในส่วนของตำแหน่งของไมโครโฟน กำหนดไว้ที่ระยะประมาณระยะห่างที่

เอกสารกำหนดไว้และห่างกันไม่เกิน 1 เมตรในแต่ละจุดของการวัดนี้ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องมือวัด

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดจะต้องมีการตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญทันที ทั้งก่อนและหลังการทดสอบ ถ้ามีการคลาดเคลื่อนมากกว่า 0.3 เดซิเบล (ตามมาตรฐาน IEC) และ 1 เดซิเบล ตาม(มาตรฐาน IEEE) จะถือว่าเครื่องมือวัดนี้ใช้ไม่ได้

6. ค่าแก้ไขของเสียงสะท้อนที่ไม่ต้องการ

ตามมาตรฐาน IEC 60076-10 ตัวประกอบค่าแก้ไขสภาพแวดล้อม (K) จะนำมาใช้ในการคำนวณหากมีเสียงสะท้อนต่างๆ ที่ไม่ต้องการ

ตามมาตรฐาน IEEE C57.12.90 ไม่ให้ใช้ค่าแก้ไข เนื่องจากจะไม่มีเสียงสะท้อนหากมีระยะห่าง 3 เมตร จากไมโครโฟนหรือจากผนังต่างๆ

7. การวัดระดับเสียงรบกวนของพื้นหลัง

ระดับความดันเสียงของพื้นหลังจะต้องทำการวัดโดยทันทีก่อนที่จะทำการวัดระดับเสียงของหม้อแปลงที่ถูกทดสอบ ความสูงของไมโครโฟนในการวัดจะเหมือนกับการวัดหม้อแปลงที่ถูกทดสอบ คือ มีตำแหน่งที่กำหนดไว้แน่นอนเหมือนกับการวัดหม้อแปลงนั่นเอง

ระดับของเสียงพื้นหลังได้มีการคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย ถ้าการวัดระดับเสียงของพื้นหลังมีค่าแตกต่างกันในแต่ละจุดไม่เกิน 5 เดซิเบลหรือน้อยกว่า (ตามมาตรฐาน IEC) หรือ 3 เดซิเบล (ตามมาตรฐาน IEEE)

อีกนัยหนึ่งจะเป็นไปตามสมการนี้

$$L_{bg} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0.1L_{bgi}} \right) \quad (2.98)$$

เมื่อ

L_{bg} คือ ค่าเฉลี่ยของระดับความดันเสียงพื้นหลัง

M คือ จำนวนจุดของพื้นหลังที่ใช้ในการวัด จะอยู่ระหว่าง 1 จุด ถึง 10 จุด (ตามมาตรฐาน IEC) แต่ต้องไม่น้อยกว่า 4 จุด (ตามมาตรฐาน IEEE)

L_{bgi} คือ การวัดระดับความดันเสียงพื้นหลังที่จุดวัด i

8. ลำดับการทดสอบ

หลังจากมีการวัดระดับเสียงของพื้นหลังแล้ว จะต้องทำการวัดระดับความดันเสียงอย่างต่อเนื่องจนครบทุกจุดในทันที เครื่องมือที่ใช้วัดจะต้องมีความไวในการตอบสนองเพื่อที่จะได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด

ระดับความดันเสียงเฉลี่ยที่ไม่ได้แก้ไข ($\overline{L_{pA0}}$) คำนวณจากระดับความดันเสียง (L_{pAi}) ถ้าขอบเขตของค่า L_{pAi} ที่ถูกวัดมีค่าไม่เกิน 5 เดซิเบล (หรือ 3 เดซิเบล ตามมาตรฐาน IEEE) การคำนวณจะเป็นไปตามสมการนี้

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L_{pAi}} \right) \quad (2.99)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$\overline{L_{pA0}}$ คือ ค่าเฉลี่ยของระดับความดันเสียงที่ไม่ได้แก้ไข

N คือ จำนวนจุดในการวัด

L_{pAi} คือ การวัดระดับความดันเสียงที่จุดวัด i

หลังจากทำการวัดแล้ว จะต้องมีการวัดระดับเสียงของพื้นหลังครั้งที่ 2 ด้วย ตามมาตรฐาน IEC 60076-10 เมื่อได้ค่าจากการทดสอบแล้ว ค่าระดับเสียงของพื้นหลังในเมื่อก่อนทดสอบและหลังการทดสอบมีค่าต่างกันไม่เกิน 3 เดซิเบล และค่าระดับเสียงเฉพาะกับค่าระดับเสียงของพื้นหลังจะต้องมีค่าต่างกันไม่เกิน 8 เดซิเบล

ค่าระดับความดันเสียง ($\overline{L_{pA}}$) ที่แก้ไขแล้ว จะคำนวณได้จากสมการ

$$\overline{L_{pA}} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{0.1\overline{L_{pA0}}} - 10^{0.1\overline{L_{bgA}}} \right) - K \quad (2.100)$$

ตามมาตรฐาน IEEE C57.12.90 ที่ไม่ให้ใช้ค่าแก้ไข แต่ค่าแก้ไขเฉพาะที่ถูกใช้จะต้องอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า ระดับความดันของเสียงจากหม้อแปลงที่ถูกทดสอบรวมกับเสียงของพื้นหลังแตกต่างจากเสียงของพื้นหลัง มีค่าอยู่ระหว่าง 5-10 เดซิเบล

9. การคำนวณระดับกำลังของเสียง

บางครั้งอาจจะต้องมีการวัดระดับกำลังของเสียง ซึ่งเป็นค่าที่ประกันคุณภาพของหม้อแปลงได้เช่นกัน ซึ่งค่านี้มาจากค่าเฉลี่ยของระดับความดันเสียง ($\overline{L_{pA}}$)

$$L_{wA} = L_{pA} + 10 \cdot \log_{10} \frac{S}{S_0} \quad (2.101)$$

เมื่อ

S คือ พื้นที่ของพื้นผิวที่วัด หน่วย m^2

2.13.5 ค่าที่ยอมรับได้ของการทดสอบ

ถ้าเครื่องมือที่ใช้ในการวัดได้นำไปตรวจสอบตามมาตรฐานแล้ว ค่าที่ได้จากจากวัดจะต้องคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 เดซิเบล แต่ค่าตัวประกอบต่างๆ จะต้องมีความที่คงที่

1. การปรับแรงดัน : 1% ของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้เกิดค่าผิดพลาด 0.5 เดซิเบล สำหรับค่าความเหนี่ยวนำ 1.6 เทสลา และ 1 เดซิเบล สำหรับค่าความเหนี่ยวนำ 1.8 เทสลา

2. การปรับความถี่ : 1 เฮิรท์ซ์ของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้เกิดค่าผิดพลาด 0.4 เดซิเบล

3. ฮาร์มอนิกในสภาวะแรงดันกระตุ้น

4. ฟลักซ์แม่เหล็กของแรงดันกระแสตรงดกค้างในแกนเหล็ก (ระดับของเสียงจะเพิ่มขึ้นถึง 3 เดซิเบล เมื่อเริ่มการทดสอบอย่างรวดเร็ว)

5. ความผิดพลาดในเรื่องของระยะห่างในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ระยะห่างน้อยมากระหว่างตัวถังด้านล่างกับพื้น (ระดับของเสียงจะเพิ่มขึ้นถึง 4 เดซิเบล)
7. เสียงสะท้อนจากผนังห้องที่ทดสอบ
8. ความแตกต่างที่น้อยมากระหว่างระดับเสียงของพื้นหลังกับเสียงของหม้อแปลงที่ถูกทดสอบ

2.14 การทดสอบการเปลี่ยนแท็บขณะมีภาระทางไฟฟ้าและอุปกรณ์อื่น ๆ

2.14.1 วัตถุประสงค์

แม้ว่าการทดสอบการเปลี่ยนแท็บขณะมีภาระทางไฟฟ้านี้ได้จัดเป็นการทดสอบประเภทที่ต้องทำเป็นประจำในห้องทดสอบ ตามมาตรฐานแล้ว สิ่งสำคัญคือการตรวจสอบการทำงานของแท็บหม้อแปลงเมื่อมีการใช้งาน หรือมีภาระทางไฟฟ้านั้นเอง

ส่วนอุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ ที่ทำการทดสอบไปพร้อมกัน จะต้องมีการทดสอบเพื่อตรวจหาค่าการทำงานที่ถูกต้องของระบบ

2.14.2 กระบวนการทดสอบ

การเปลี่ยนแท็บขณะมีภาระทางไฟฟ้านี้ได้ควบคุมหม้อแปลงให้เป็นไปตามการทำงานโดยปราศจากข้อบกพร่อง (เฉพาะหม้อแปลงที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC)

1. หม้อแปลงที่ทดสอบได้เพียงอย่างเดียวหนึ่ง คือ อาจจะเป็นขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า หรือไม่มีภาระทางไฟฟ้า

1.1 ทำการทดสอบจำนวน 8 รอบของการทำงานที่แรงดันพิกัด (1 รอบ คือ เริ่มจากแท็บแรกจนถึงแท็บสุดท้ายและทำย้อนกลับมาอีกครั้งหนึ่ง)

1.2 1 รอบของการทำงานที่แรงดันซึ่งค่าของแรงดันจะถูกลดลงมาที่ 85% ของแรงดันพิกัด

2. หม้อแปลงที่ทดสอบได้ทั้งขณะมีภาระทางไฟฟ้าและไม่มีภาระทางไฟฟ้า

2.1 1 รอบของการทำงานที่แรงดันและความถี่พิกัด แต่ต้องทำการทดสอบขณะที่หม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า

2.2 ทำการทดสอบเปลี่ยนแท็บจำนวน 10 แท็บโดยเปลี่ยนแท็บไปครั้งละ 2 แท็บทางด้านใดด้านหนึ่ง เมื่อการทำงานของแท็บเคลื่อนไปไม่ตรงกับเส้นที่บอกตำแหน่งของแท็บนั้นๆ หรืออีกประการหนึ่ง คือ เริ่มจากกึ่งกลางของแท็บกับด้านหนึ่งของขดลวดที่ทำการลัดวงจรต้องทำที่กระแสพิกัดของแท็บ

วงจรการทดสอบขณะที่หม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า จะต้องทำงานที่แรงดันพิกัด ซึ่งเหมือนกับการวัดค่าความสูญเสียขณะที่หม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า และวงจรการทดสอบขณะที่หม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า จะต้องทำงานที่กระแสพิกัด ซึ่งก็เหมือนกับการวัดค่าความสูญเสียขณะที่หม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้านั้นเอง

การสังเกตการทำงานของแท็บ ไม่ว่าจะหม้อแปลงจะทำการจ่ายโหลด หรือไม่ได้มีการจ่ายโหลดก็ตาม สิ่งที่เกิดขึ้นคือ เสียง ที่แปลกจากการทำงานของอุปกรณ์โดยปกตินั่นเอง

2.14.3 การทดสอบอุปกรณ์อื่น ๆ

ทุกส่วนของไม่ว่าจะเป็นการร้อยสายของอุปกรณ์และการตรวจควบคุมจะต้องทำการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก ซึ่งจ่ายแรงดันที่ 2 kV r.m.s. ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ก็ต้องต่อลงดินด้วย เป็นเวลา 1 นาที ตามมาตรฐาน IEEE C57.12.00 ค่าแรงดันเฉพาะ ซึ่งทดสอบด้วยวิธีนี้จะมีค่า 1.5 kV r.m.s ส่วนอุปกรณ์อื่นๆ ยกเว้น วงจรหม้อแปลงกระแส จะต้องถูกทดสอบด้วยแรงดัน 2.5 kV r.m.s

อุปกรณ์อื่นๆ เช่น มอเตอร์ ที่มีค่าแรงดันทดสอบต่ำกว่าค่าเฉพาะ ก็ควรที่จะถอดอุปกรณ์นั้นออกก่อน

2.15 การวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

2.15.1 จุดประสงค์ของการทดสอบ

เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปสัญญาณชายนีให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นผลให้เกิดกระแสในแกนเหล็กในลักษณะไม่เป็นรูปชายนี เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างแรงแม่เหล็ก (H) กับ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) หรือ B-H Curve

เมื่อทำการพิจารณากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าที่มีขนาดน้อยมากในหม้อแปลงไฟฟ้าสมัยใหม่ ที่มีค่าประมาณ 0.1-0.5% ความสนใจในค่าฮาร์โมนิกที่มีอยู่ในกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าจึงมีน้อย

ค่าฮาร์โมนิกนั้นจะทำการวัดในหม้อแปลงเก่าที่อยู่ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อทำการติดตั้ง หรือปรับแต่งอุปกรณ์ป้องกัน หรือรีเลย์ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง

2.15.2 หลักการทั่วไป

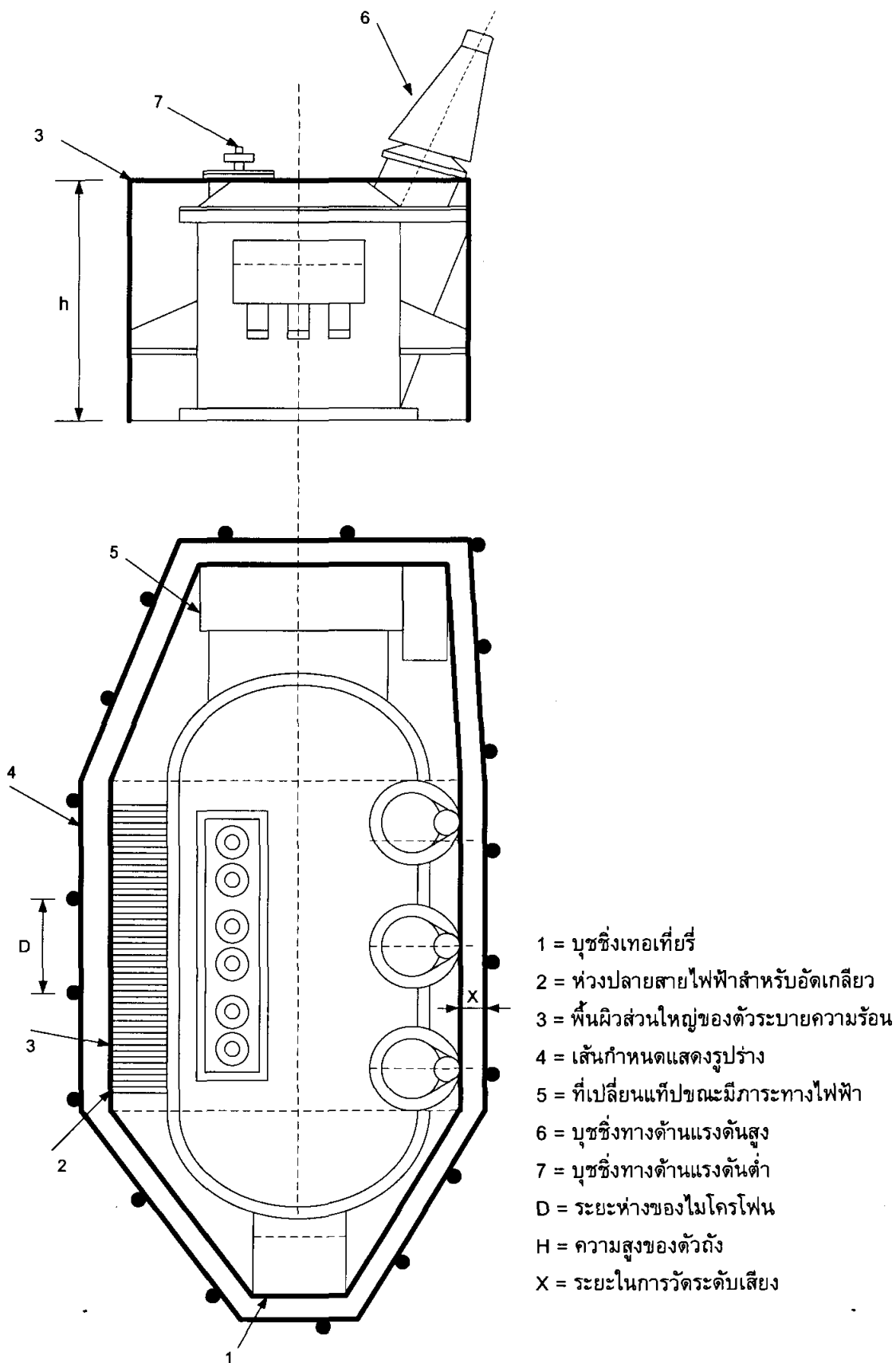
กระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งดูความสัมพันธ์ได้จากกราฟในรูปที่ 2.79 โดยค่าฮาร์โมนิกจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มค่าความหนาแน่นของแม่เหล็ก โดยดูได้จากกราฟในรูปที่ 2.80

2.15.3 วงจรการวัด

วงจรการวัดค่าฮาร์โมนิกนั้น จะมีการต่อวงจรเหมือนกับการทดสอบการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า แต่จะทำการต่อเครื่องมือวิเคราะห์ฮาร์โมนิกเข้ากับแอมมิเตอร์ดังรูปที่ 2.81

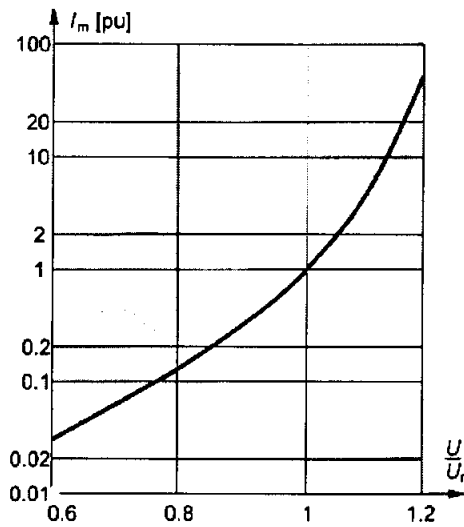
2.15.4 กระบวนการวัด

ในการวัดแรงดันที่ป้อนให้กับการทดสอบนั้นจะใช้โวลต์มิเตอร์ธรรมดา โดยปกติจะต้องสามารถวัดแรงดันที่ ระดับ 90%, 100% และ 110% ของแรงดันพิกัดได้ การเพิ่มแรงดันจะทำการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตั้งแต่ศูนย์จนถึงระดับที่ต้องการ

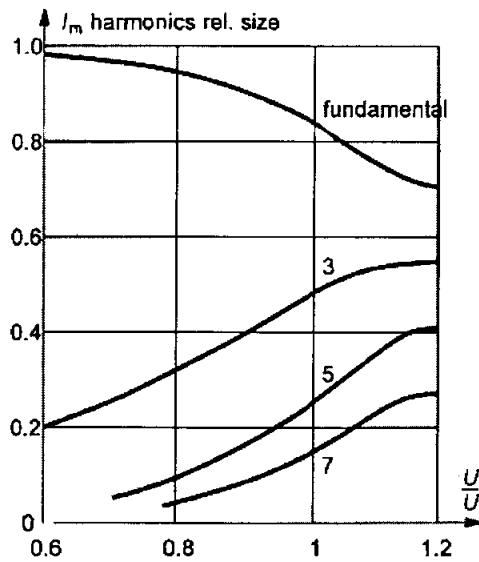


รูปที่ 2.78 ตำแหน่งที่สำคัญของไมโครโฟนในการวัดระดับเสียงของหม้อแปลงที่ไม่ใช้ระบบระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.79 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแกนเหล็กกับความหนาแน่นของฟลักซ์



รูปที่ 2.80 การเกิดฮาร์โมนิกในฟังก์ชันของความหนาแน่นของฟลักซ์

โดยไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะทำให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดได้ โดยจากเหตุผลเดียวกันนี้จึงต้องค่อยๆ ทำการลดระดับแรงดันเมื่อต้องการเลิกการทดสอบ

2.15.5 ค่าที่ได้จากการวัด

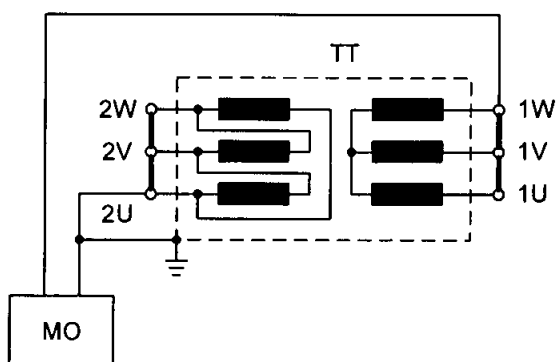
ค่าฮาร์โมนิกที่วัดได้จากการทดสอบนั้น มาตรฐานไม่ได้มีการกำหนดเกณฑ์ว่าต้องมีค่าเท่าใด การวัดค่านี้ทำเพื่อเป็นการเก็บไว้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อใช้ในการตรวจสอบสภาพของหม้อแปลงหลังจากใช้งาน และเพื่อเป็นการบันทึกค่าไว้เพื่อปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันหรือรีเลย์ต่างๆ

จะใช้เครื่องวัดเมกโอห์ม ที่มีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงรวมอยู่ด้วย ในการวัดค่าความต้านทานของฉนวน เครื่องวัดเมกโอห์มจะใช้ในย่านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปกติ คือ 0.5 kV 1kV 2.5 kV และ 5 kV

ระยะเวลาในการวัดควรเป็น 1 นาที การอ่านค่าจะอ่านค่าหลังจากเริ่มวัด 15 และ 60 วินาที ความสัมพันธ์ของค่าที่อ่านได้หลังจากเริ่มวัด 60 วินาที และ 15 วินาที ควรอยู่ในช่วง 1.3 – 3 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้โดยทั่วไป

อุณหภูมิของหม้อแปลงที่ทำการทดสอบควรที่จะต้องบันทึกค่าไว้ด้วย และควรทำให้อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอ้างอิงมากที่สุดคือ 20°C

ในวงจรการวัดเดียวกันนั้นสามารถหาค่าดัชนีโพลาไรเซชัน (PI) ได้ การหาค่า PI คือการหาอัตราส่วนระหว่างค่าที่อ่านได้ 10 นาที กับ 1 นาที โดยที่ค่า PI มากกว่า 2 ถือว่าฉนวนอยู่ในสภาพดี แต่ถ้าค่า PI น้อยกว่า 1 จะถือว่าสภาพของฉนวนนั้นมีปัญหา



รูปที่ 2.82 วงจรการวัดค่าความต้านทานของฉนวน

2.17 การวัดค่าประกอบการกระจายตัว ($\tan \delta$) ของค่าความเก็บประจุในระบบฉนวน

2.17.1 จุดประสงค์การทำการวัด

การทดสอบค่าประกอบกำลังของฉนวน มีส่วนคล้ายการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการตัดสินสภาพของฉนวนภายในหม้อแปลง

ลักษณะสำคัญของค่าประกอบกำลังยังเป็นค่าในทัศนคติเท่านั้น อย่างไรก็ตามค่าประกอบกำลังนี้เป็นประโยชน์ในการตัดสินสภาพของฉนวนอย่างมาก

2.17.2 หลักการทั่วไปในการทดสอบ

มาตรฐาน IEC ได้กำหนดลักษณะของค่าประกอบกำลังว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับกำลังไฟฟ้าเสมือน

มาตรฐาน IEEE ได้กำหนดลักษณะอีกส่วนหนึ่งของค่าประกอบกำลังไว้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่กระจายในเนื้อฉนวนในหน่วยวัตต์กับค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากแรงดันและกระแสในหน่วยของโวลต์-แอมแปร์ เมื่อทำการทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นไซน์ ค่าประกอบกำลังของฉนวนปกติจะอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าประกอบกำลังของฉนวนภายในห้องทดสอบ จะเป็นประโยชน์ในการมาเปรียบเทียบกับค่าประกอบกำลังที่ทำการวัดในบริเวณติดตั้งหม้อแปลง เพื่อพิจารณาสภาพของฉนวนหลังทำการขนย้ายหม้อแปลงไปยังจุดติดตั้ง

โดยไม่สามารถกำหนดค่าที่เหมาะสมของค่าประกอบกำลังนี้ได้ เนื่องจากเหตุผลดังนี้

- 1) ไม่มีความสัมพันธ์หรือมีความสัมพันธ์น้อยมากระหว่างความสามารถในการทดสอบความทนทานของฉนวนกับค่าประกอบกำลัง
- 2) การเปลี่ยนแปลงค่าประกอบกำลังกับอุณหภูมิไม่มีความแน่นอน
- 3) ชนิดของของเหลวและฉนวนต่าง ๆ ที่ถูกใช้ในหม้อแปลงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าประกอบกำลังของฉนวนอย่างมาก

2.17.3 วงจรและกระบวนการทดสอบ

การวัดค่าประกอบกำลังของฉนวนใช้วงจรบริดจ์ชนิดพิเศษ หรือวิธีที่เรียกว่า วิธีโวลต์-แอมแปร์-วัตต์ หรือรู้จักในชื่อ ดับเบิลเทสต์ (Double Test)

1. การใช้วงจรบริดจ์

วิธีการนี้จะใช้พื้นฐานของการเปรียบเทียบค่าความเก็บประจุ C_x ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุของหม้อแปลง กับค่าความเก็บประจุที่เราทราบค่า C_N หรือความเก็บประจุมาตรฐาน

1.1 วงจรเซอร์ริงบริดจ์ โดยสามารถดูรูปวงจรได้จากรูปที่ 2.83

อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรเซอร์ริงบริดจ์มีดังนี้

1.1.1 ตัวเก็บประจุที่เราไม่ทราบค่า C_x ใช้เป็นตัวแทนของค่าความเก็บประจุของหม้อแปลง และค่าประกอบกำลังที่จะทำการวัด

1.1.2 ตัวเก็บประจุมาตรฐาน C_N เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีค่าความสูญเสียทางฉนวนน้อย โดยปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 100 pF ถึง 10 nF

1.1.3 ในกรอบของเซอร์ริงบริดจ์จะประกอบไปด้วยความต้านทาน R_3 , R_4 และ r นอกจากนั้นจะมีตัวเก็บประจุ C_4 และกัลป์วานอิมิตอร์ G

เพื่อเป็นการลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอก จะมีการใช้สายโคแอกเซียลทำการเชื่อมระหว่าง C_x กับวงจรบริดจ์ และใช้ระหว่างตัวเก็บประจุมาตรฐาน C_N กับวงจรบริดจ์ด้วย เมื่อวงจรบริดจ์สมดุลผู้ทดสอบสามารถทำการหาค่าความเก็บประจุ C_x และค่าประกอบกำลัง $\tan \delta$ ได้จากสมการ

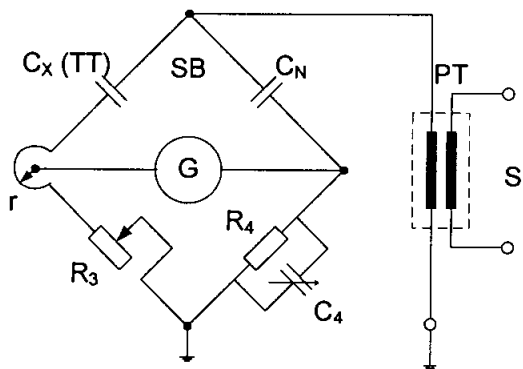
$$C_x = \frac{C_N \cdot R_4}{R_3 + r} \quad (2.102)$$

$$\tan \delta = C_4 \cdot \omega \cdot R_4 \quad (2.103)$$

เมื่อ

$$\omega = 2\pi f \quad (2.104)$$

ในวงจรบริดจ์นี้ส่วนมากจะใช้ค่าความต้านทาน R_4 ที่สามารถทำการคำนวณได้ง่ายเช่น $100/\pi$, $1000/\pi$ หรือ $10000/\pi$ ในหน่วยโอห์ม



รูปที่ 2.83 วงจรการวัดค่าประกอบกำลังและค่าความเก็บประจุของขดลวด

1.2 วงจร $\tan\delta$ บริดจ์สมัยใหม่กับเครื่องเปรียบเทียบกระแสและไมโครโปรเซสเซอร์

วงจรมีลักษณะพื้นฐานของวงจรบริดจ์ที่เหมือนกับวงจรถ่ายที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น โดยคุณลักษณะของวงจรมีจากรูปที่ 2.84

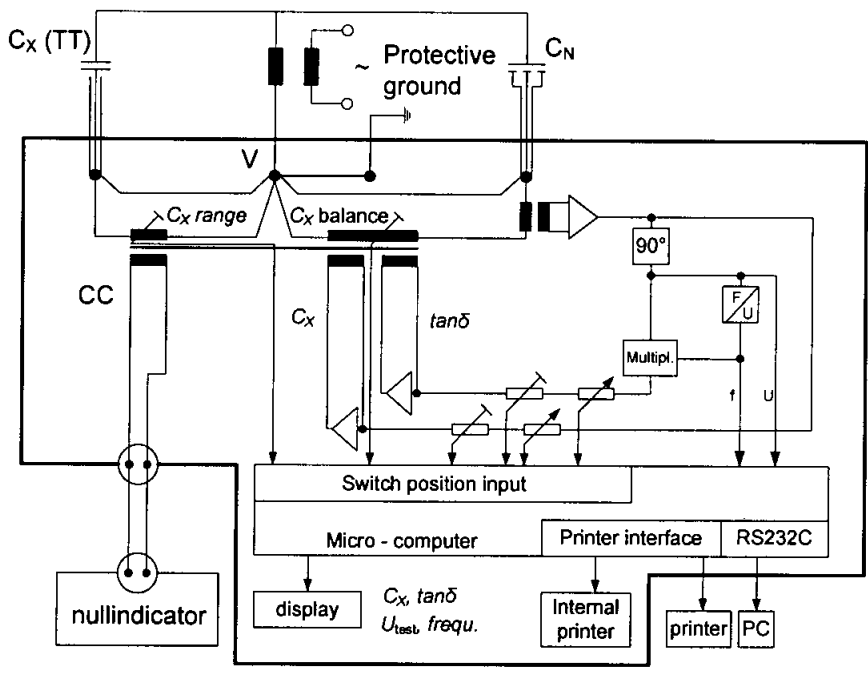
โดยกระแสจะถูกทำให้สมดุลที่เครื่องเปรียบเทียบกระแส และทำการจ่ายกระแสออกเป็น 4 ส่วนเพื่อให้ค่าความสูญเสียสมดุล

สำหรับค่าความเก็บประจุที่ไม่ทราบค่า C_x และตัวเก็บประจุมาตรฐาน C_N รวมถึงการต่อวงจรระหว่างหม้อแปลงทดสอบและวงจรบริดจ์จะมีลักษณะการต่อเหมือนกับที่กล่าวมาข้างต้น

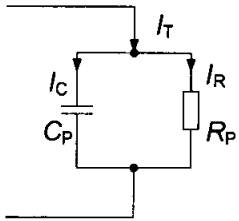
1.3 ดับเบิลเทสต์ (วิธีโวลต์-แอมแปร์-วัตต์)

การทดสอบแบบดับเบิลเทสต์นั้นใช้พื้นฐานของการวัดค่าสะสมกระแสของไฟฟ้ากระแสสลับ ในหน่วย mA หรือ μA ค่าความสูญเสียในฉนวนของไฟฟ้ากระแสสลับในหน่วย W และค่าความเก็บประจุในหน่วย pF โดยเปอร์เซ็นต์ของค่าประกอบกำลังจะถูกคำนวณจากค่ากระแสสะสมและค่าความสูญเสียที่บันทึกไว้ในหน่วยของวัตต์

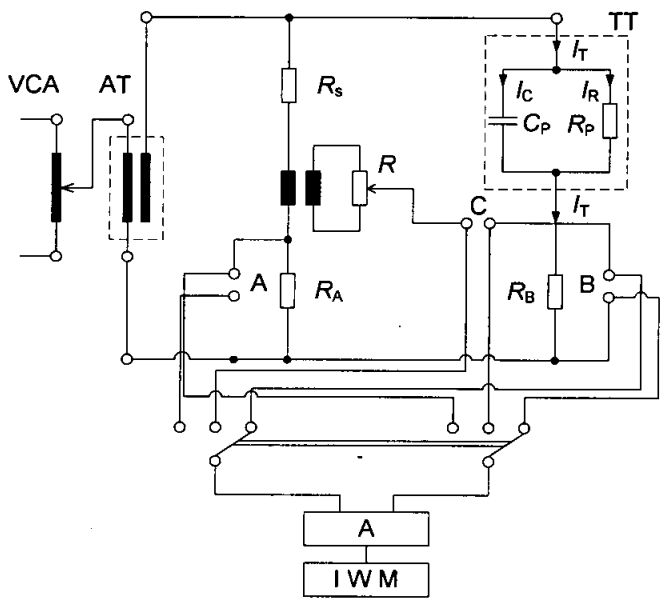
การทดสอบแบบดับเบิลเทสต์มีการต่อวงจรวัดแบบพิเศษ โดยกระแสของหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ (I_T) จะอยู่ในรูปของการขนานกันของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานตามรูปที่ 2.85 จากนั้นวงจรที่สมดุลจะถูกต่อเข้ากับวงจรวัด และในส่วนของความเก็บประจุ I_C ของหม้อแปลงจะถูกทำให้สมดุล เหลือเพียงส่วนประกอบที่มีเฟสเดียวกัน I_R ของกระแสจะถูกวัดด้วยมิเตอร์ โดยสามารถดูรูปวงจรการทดสอบดับเบิลเทสต์ได้จากรูปที่ 2.86



รูปที่ 2.84 แสดงลักษณะของวงจรบริดจ์ที่มีเครื่องเปรียบเทียบกระแสและไมโครโปรเซสเซอร์



รูปที่ 2.85 ลักษณะการแสดงกระแสของหม้อแปลง (IT)



รูปที่ 2.86 วงจรการทดสอบแบบดับเบิลเทสต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบวนการวัดตามมาตรฐาน IEEE [51]

ก่อนทำการทดสอบนั้นขดลวดทุกขดจะต้องถูกทำการลัดวงจรเข้าด้วยกัน ส่วนระดับของแรงดันที่จะใช้ในการทดสอบนั้นจะต้องไม่สูงเกินกว่า 10kV

ในการทดสอบค่าประกอบกำลังนั้นจะต้องถูกทำการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ และระหว่างขดลวดกับขดลวด โดยสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสองขดลวดจะต้องทำการทดสอบ 3 ลักษณะคือ

ขดลวดแรงดันสูง กับ ขดลวดแรงดันต่ำและกราวด์

ขดลวดแรงดันต่ำ กับ ขดลวดแรงดันสูงและกราวด์

ขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำ กับ กราวด์

หากทำการทดสอบค่าประกอบกำลังของฉนวนในขณะที่อุณหภูมิของฉนวนมีค่าสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิอ้างอิง คือ 20°C ค่าที่ได้จะนำมาปรับให้ถูกต้องตามสมการ

$$F_{p20} = \frac{F_{pT}}{K} \quad (2.105)$$

เมื่อ

F_{p20} คือ ค่าประกอบกำลังที่อุณหภูมิ 20°C

F_{pT} คือ ค่าประกอบกำลังที่ได้จากการวัดที่อุณหภูมิทดสอบ

K คือ ค่าตัวประกอบแก้ไข (โดยค่านี้สามารถดูได้จากมาตรฐาน IEEE)

บทที่ 3

หม้อแปลงทดสอบและเครื่องมือที่ใช้การทดสอบ

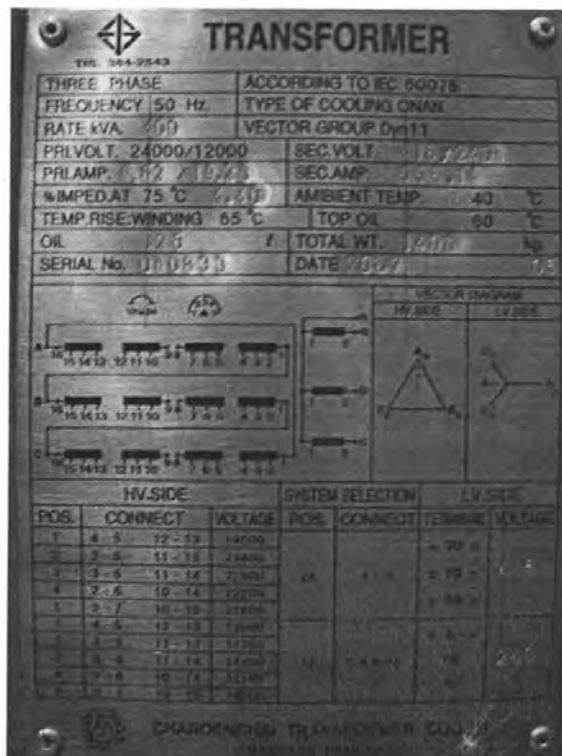
3.1 หม้อแปลงและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบที่บริษัท เอบีบี (ประเทศไทยจำกัด)

3.1.1 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงที่จะใช้ในการทดสอบนั้นเป็นหม้อแปลง 3 เฟส พิกัด 400 kVA 24000/12000 V 50 Hz มีกลุ่มของเวคเตอร์แบบ Dyn11 มีระบบระบายความร้อนแบบ ONAN มีค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของขดลวด 65°C โดยมีลักษณะภายนอกดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หม้อแปลงที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 3.2 ป้ายบอกพิกัดของหม้อแปลงที่จะทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท เอบีบี จำกัด การใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

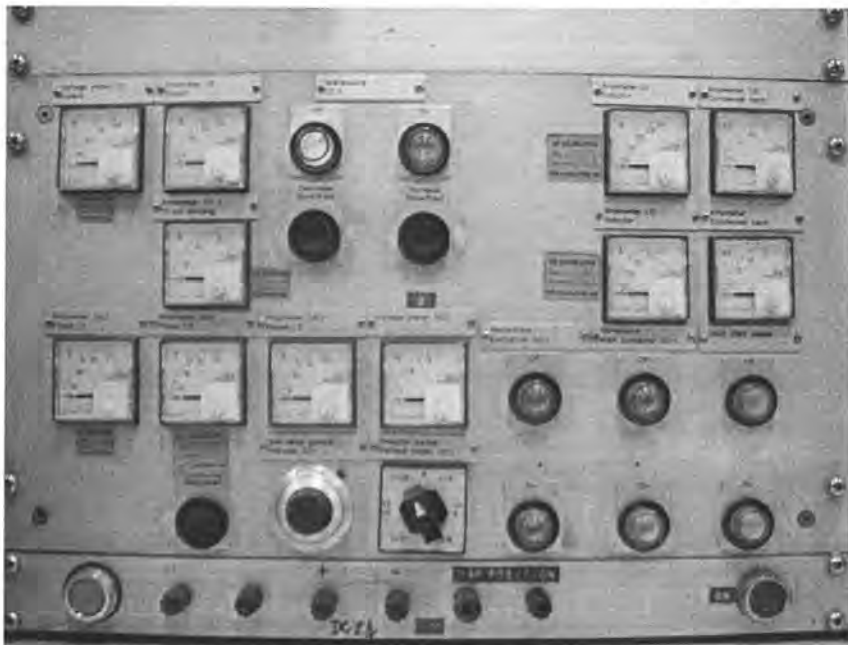
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนั้น สามารถทำการแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เครื่องมือที่ทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงาน แรงดันหรือกระแสให้กับหม้อแปลงทดสอบ ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับการต่อวงจรทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงทดสอบ ส่วนเครื่องมืออีกประเภทหนึ่งคือ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆ เพื่อบันทึกเป็นผลการทดสอบ โดยในการบอกถึงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจะทำการแบ่งประเภทตามหลักการนี้

3.1.2.1 เครื่องมือที่ทำหน้าที่ทางวงจรไฟฟ้า

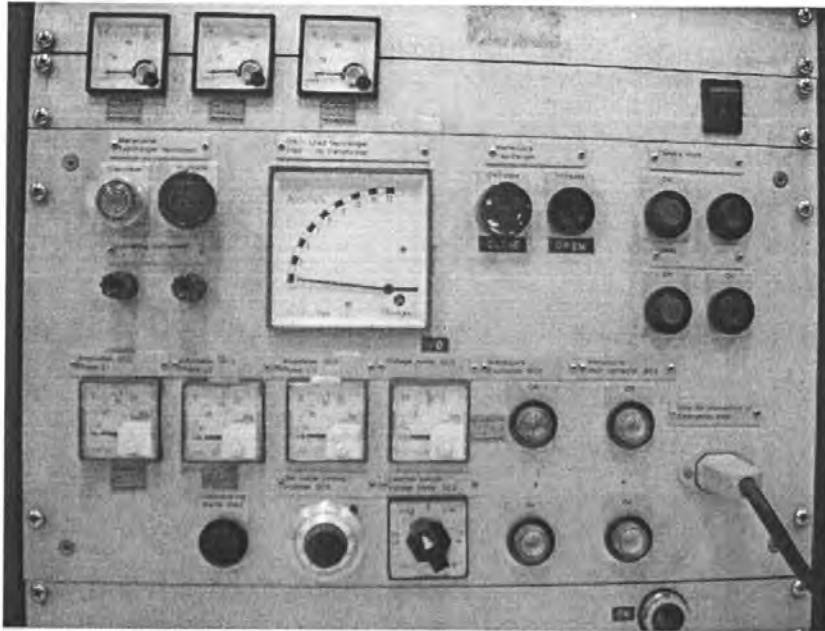
1) เครื่องผลิตกำลังไฟฟ้า (Generator) ใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดสอบการวัดค่าความสูญเสียขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า การวัดค่าความสูญเสียขณะมีภาระทางไฟฟ้า การวัดค่าฮาร์โมนิก การวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ การวัดค่าการเพิ่มอุณหภูมิของหม้อแปลง การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ การทดสอบการเปลี่ยนแปลงขณะมีภาระทางไฟฟ้า การวัดความดังเสียงของหม้อแปลง

โดยเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในห้องทดสอบมี 2 พิกัดคือ พิกัด 6.25 MVA 0.8 p.f. 3 เฟส 50 Hz และ พิกัด 3.75 MVA 0.8 p.f. 3 เฟส 200 Hz



รูปที่ 3.3 ชุดควบคุมการขึ้นแรงดันของเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้าพิกัด 50Hz

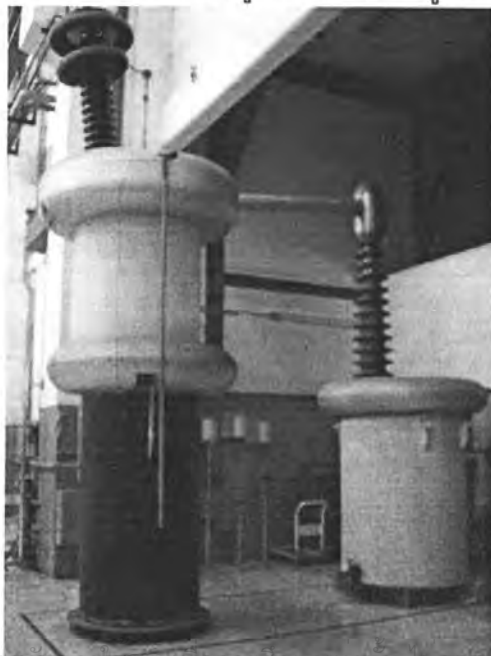
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ชุดควบคุมการขึ้นแรงดันของเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้า พิกัด 200 Hz

2) หม้อแปลงขึ้นแรงดัน (Step up transformer) ใช้ในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องผลิตกำลังไฟฟ้าผลิตออกมา ซึ่งจะทำงานควบคู่กับเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้าเสมอในทุกการทดสอบ โดยหม้อแปลงขึ้นแรงดันที่ใช้มีพิกัด 60 MVA $55 \pm 15 \times 1.89\%$ 10kV/3.2-84.4kV 50 Hz

3) หม้อแปลงแคสเคด (Cascade Transformer) ใช้ในการขึ้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส เพื่อทำการทดสอบความคงของฉนวนต่อแหล่งจ่ายภายนอก โดยหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบนั้นมี 2 ชั้น ชั้นแรกขึ้นแรงดันได้ 150kV และชั้นที่สองขึ้นแรงดันได้อีก 200kV รวมจ่ายแรงดันได้ 350kV โดยสามารถดูลักษณะได้จากรูปที่ 3.5



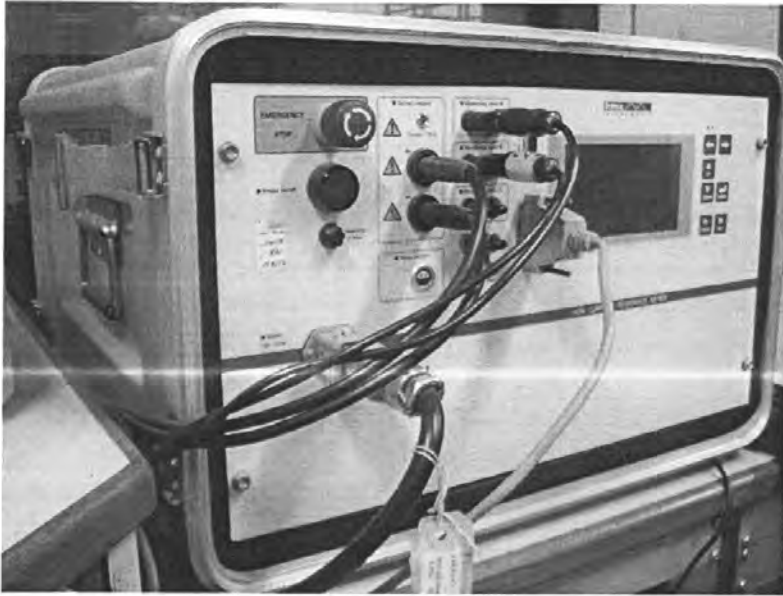
รูปที่ 3.5 หม้อแปลงแคสเคด จ่ายแรงดันได้ 350 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

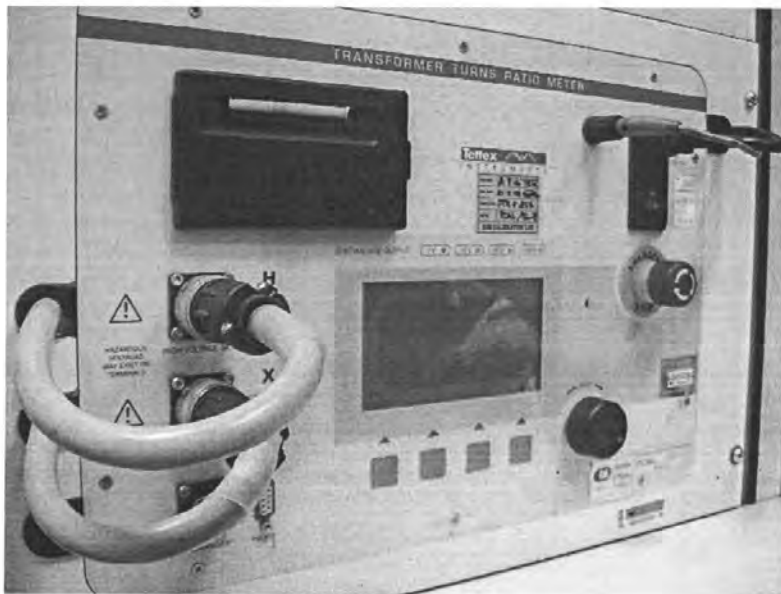
3.1.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวัด และบันทึกค่าต่างๆ จากการทดสอบ

1) เครื่องวัดค่าความต้านทานของขดลวด มีลักษณะตามรูปที่ 3.6 โดยเครื่องวัดที่ใช้ในห้องทดสอบ เป็นเครื่องวัดของ Tettex Instrument แบบมีระบบจัดเก็บข้อมูล มีช่วงการวัดระหว่าง $1 \mu\Omega$ ถึง $20 \text{ k}\Omega$ และสามารถทำการจ่ายกระแสเพื่อใช้ในการวัดได้ 50 A

2) เครื่องวัดอัตราส่วนของหม้อแปลง และกลุ่มเวคเตอร์ มีลักษณะตามรูปที่ 3.5 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องวัดของบริษัท Tettex Instrument สามารถทำการจ่ายแรงดันได้ในช่วง $95 - 240 \text{ VAC}$ จ่ายกระแสได้ไม่เกิน 3.15 A ที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าความต้านทานของขดลวด

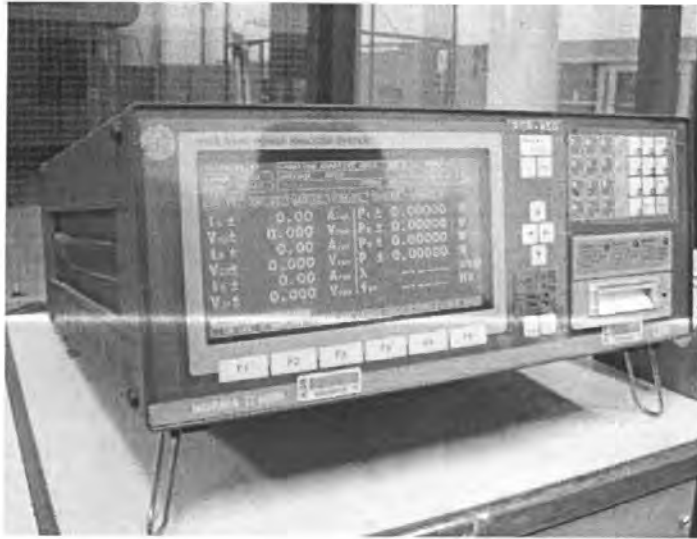


รูปที่ 3.7 เครื่องตรวจสอบกลุ่มของเวคเตอร์ และวัดอัตราส่วนของหม้อแปลง

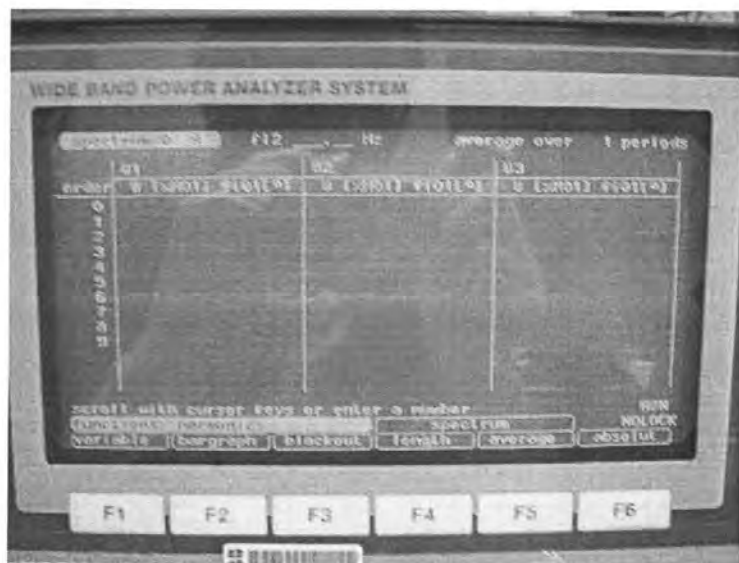
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นได้ชัดว่าผิดระเบียบการดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เครื่องวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า เครื่องมือวัดชนิดนี้จะใช้ทำงานร่วมกับเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้ในการอ่านค่าพลังงาน แรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับหม้อแปลงทดสอบในการทดสอบที่ต้องทำการเปิดเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเครื่องที่ใช้ในห้องทดสอบจะเป็นเครื่องวัดของ LEM รุ่น NORMA D6000 โดยเครื่องวัดจะต้องทำงานร่วมกับหม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดันเพื่อใช้ในการแปลงกระแส และแรงดันให้อยู่ในระดับที่เครื่องวัดสามารถทำงานได้

นอกจากนี้เครื่อง NORMA นี้ยังสามารถใช้ทำการวัดค่าฮาร์โมนิก และอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ได้อีกด้วย



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดแรงดัน กระแส และพลังงานที่จ่ายให้กับหม้อแปลงทดสอบ

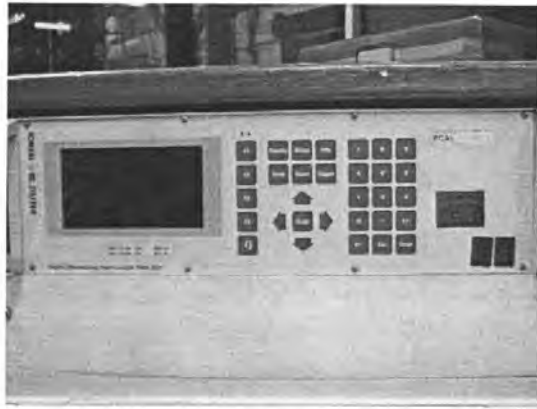


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.9 เครื่อง NORMA ขณะทำการวัดค่าฮาร์โมนิกนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ใช้ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงทดสอบ ในการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแหล่งจ่ายภายนอก

5) ชุดสร้างและตรวจจับแรงดันอิมพัลส์ ใช้ในการจำลองการเกิดแรงดันอิมพัลส์ ในลักษณะต่างๆ เช่น แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า เป็นต้น โดยเครื่องมือชุดนี้จะแบ่งอุปกรณ์หน้าที่การทำงานออกเป็น 4 ส่วน คือ

5.1) เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ มีจำนวน 16 ชั้น สามารถสะสมประจุได้ชั้นละ 100kV รวมความสามารถในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ 1600kV



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับแหล่งจ่ายภายนอก



รูปที่ 3.11 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 16 ชั้น 1600kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2) ชุดควบคุมการขึ้นแรงดัน ใช้ชุดควบคุมของ Haefely Control GC 223 สามารถทำการปรับระยะห่างของแก๊ปได้เองโดยอัตโนมัติ สามารถเลือกระดับแรงดันที่จะทำการสะสมในแต่ละชั้นได้

5.3) ชุดสร้างรูปคลื่นชอป มีจำนวน 6 ชั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสเฟียร์แก๊ป 25 เซนติเมตร

5.4) ชุดตรวจจับรูปคลื่นอิมพัลส์ ใช้อุปกรณ์ของ Haefely รุ่น Test AG HiAS 743 สามารถตรวจจับและแสดงผลรูปคลื่นแรงดัน และกระแสได้พร้อมกัน สามารถทำการเปรียบเทียบลักษณะของรูปคลื่น ในแต่ละรูปได้ พร้อมทั้งสามารถพิมพ์รูปคลื่นออกมาได้



รูปที่ 3.12 ชุดควบคุมและแสดงผลการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์

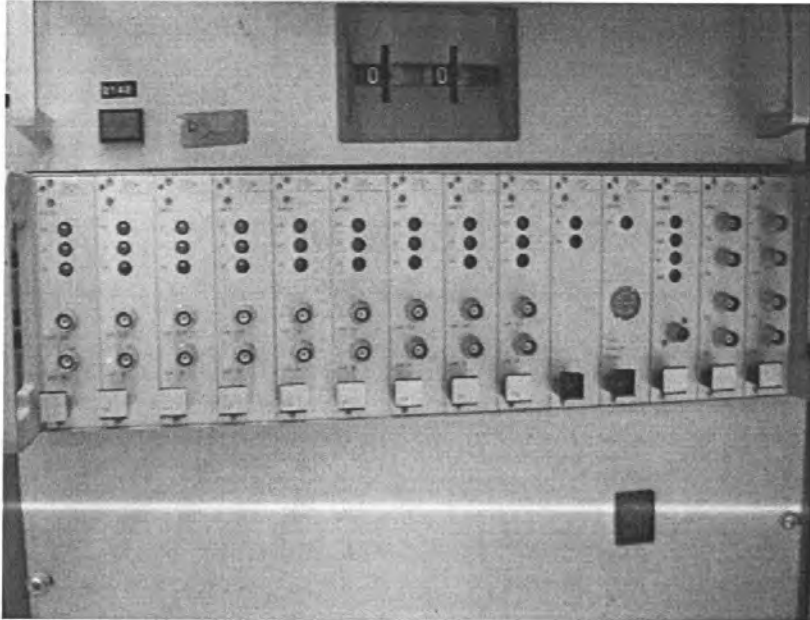


รูปที่ 3.12 ชุดสร้างรูปคลื่นชอป

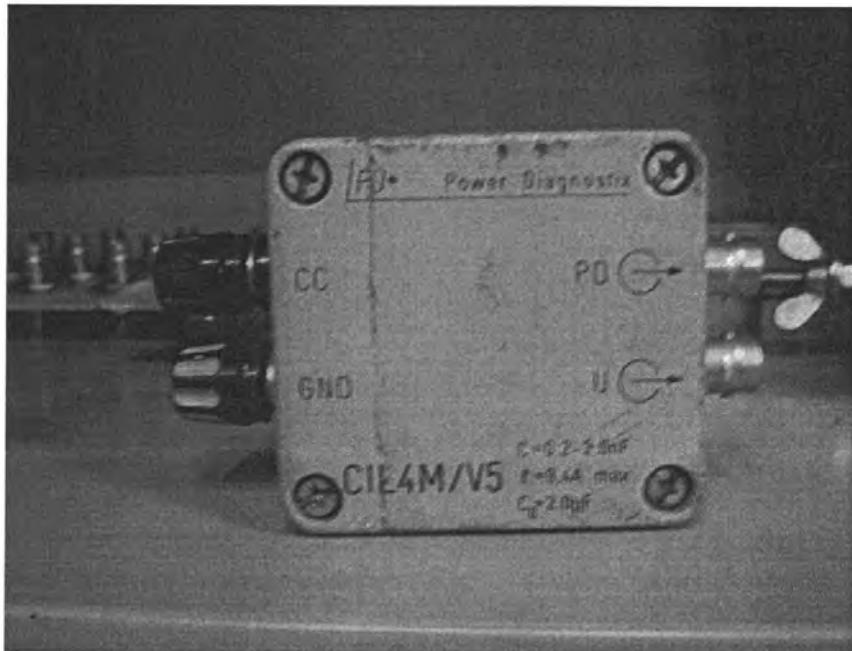
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงวิชาการเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เครื่องตรวจจับการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลง ใช้ในการตรวจจับสัญญาณการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลง โดยเครื่องมือตรวจจับที่ห้องทดสอบจะมีการต่อข้อมูลเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลเป็นรูปคลื่น และข้อมูลที่เป็นตัวเลขอย่างชัดเจน

7) เครื่องวัดค่าความต้านทานของฉนวน หรือที่เรียกว่า เมกเกอร์ สามารถทำการจ่ายแรงดันสำหรับทำการวัดได้ 5000VDC



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 3.14 ตัวกรองสัญญาณในการวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 เครื่องวัดค่าความต้านทานของฉนวน

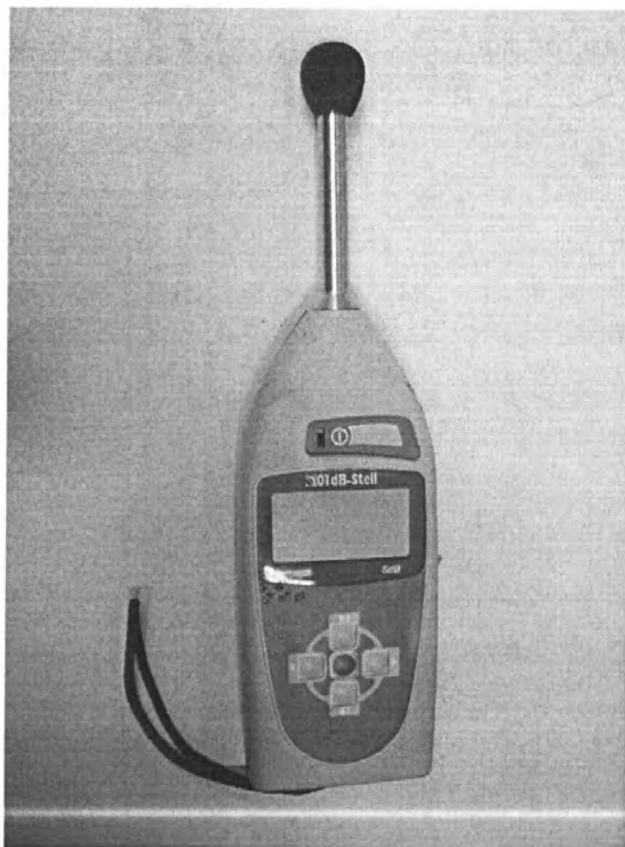
8) เครื่องวัดค่าประกอบกำลังของฉนวน ($\tan\delta$) เป็นเครื่องของ Tettex Instrument รุ่น midas 2880 สามารถวัดค่า $\tan\delta$ ได้ในช่วง 0-100% สามารถจ่ายแรงดันได้ไม่เกิน 15kV จ่ายกระแสได้ในช่วง 30 μ A ถึง 15A

9) เครื่องวัดความมรดับเสียงของหม้อแปลง ขนาดของเครื่องที่ใช้ขึ้นอยู่กับขนาดและระดับเสียงของหม้อแปลง

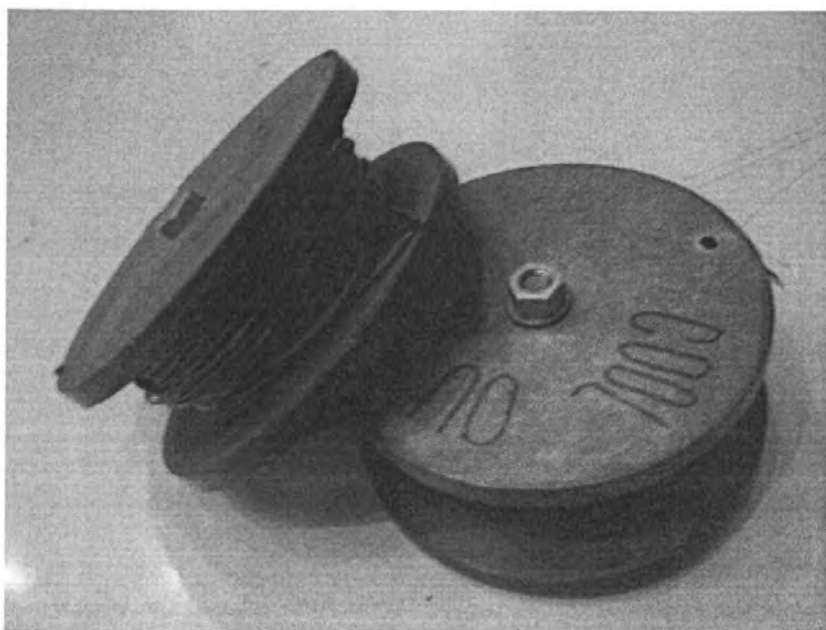
10) เครื่องวัดอุณหภูมิ ในการทดสอบนั้นจะทำการต่อสายเทอร์โมคูเปิลเข้ามายังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณแล้วแสดงผลให้ผู้ทดสอบทราบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง **รูปที่ 3.16** เครื่องวัดค่าประกอบกำลังของฉนวน ($\tan\delta$) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

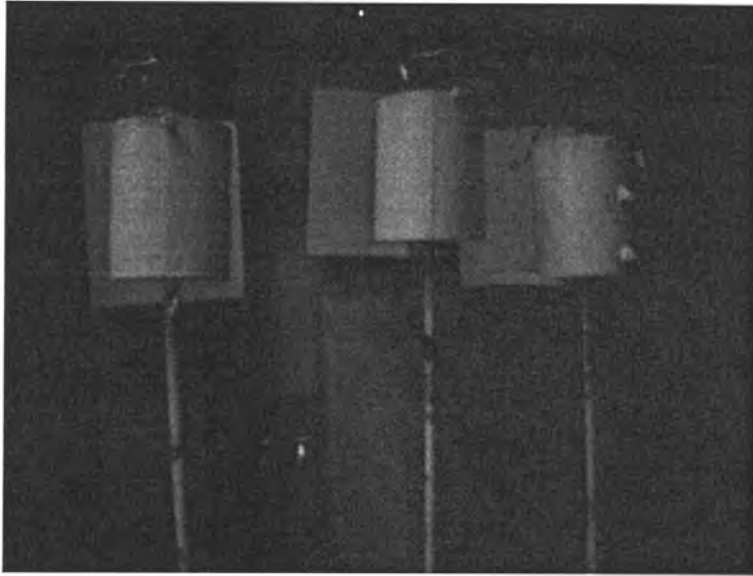


รูปที่ 3.17 เครื่องวัดความระดับเสียงของหม้อแปลง



รูปที่ 3.18 สายเทอร์โมคูเปิลที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

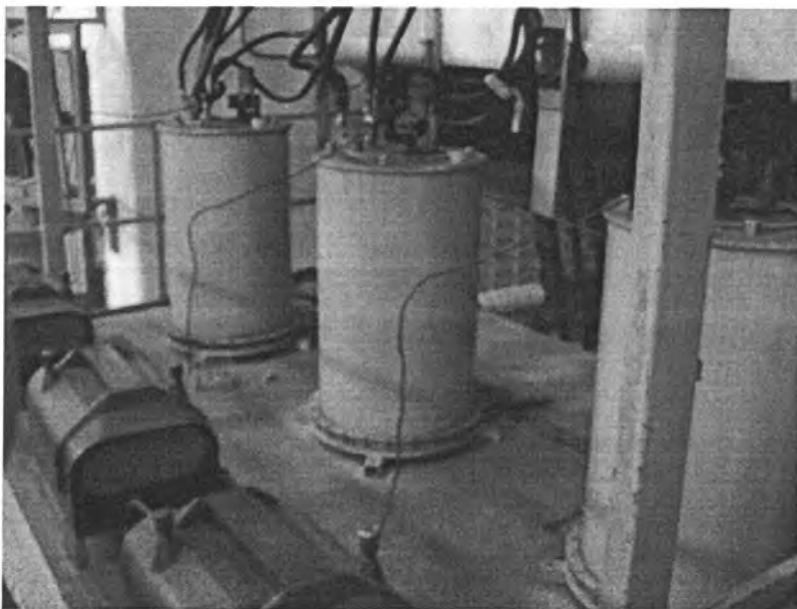
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยรอบหม้อแปลง

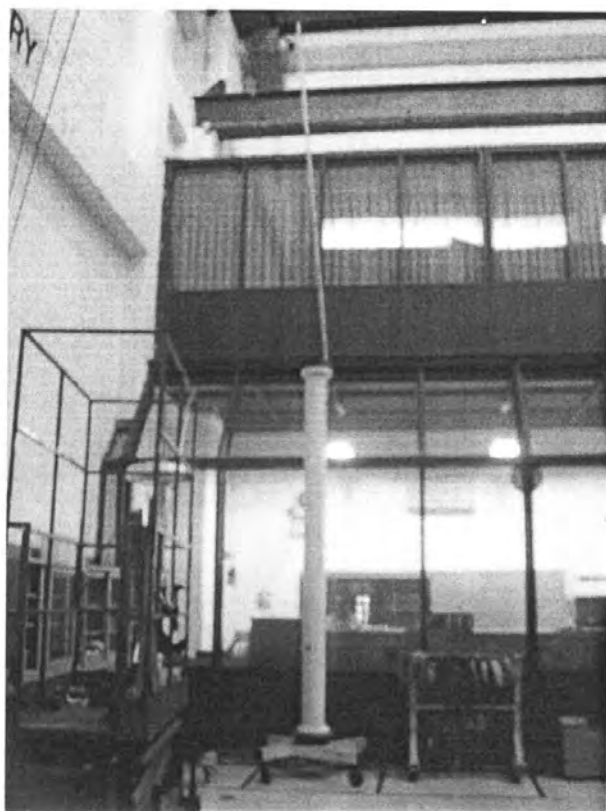
3.1.2.3 เครื่องมือช่วยในการวัดต่างๆ

- 1) หม้อแปลงแรงดัน (PT) ใช้ในการปรับลดระดับแรงดันลงให้เครื่องวัดแรงดันสามารถอ่านค่าได้โดยไม่เกินพิกัดของเครื่องมือวัด
- 2) หม้อแปลงกระแส (CT) มีการใช้งานคล้ายหม้อแปลงแรงดัน แต่จะใช้ในการแปลงกระแสเข้าสู่เครื่องมือวัด
- 3) อิมพัลส์โวลต์เดจดีไวเดอร์ ใช้ในทอนระดับแรงดันอิมพัลส์ เพื่อให้เครื่องมือวัดสามารถทำการวัดได้โดยไม่เกินพิกัด และไม่เกิดอันตราย



รูปที่ 3.20 หม้อแปลงแรงดัน และหม้อแปลงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 โวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับแรงดันอิมพัลส์

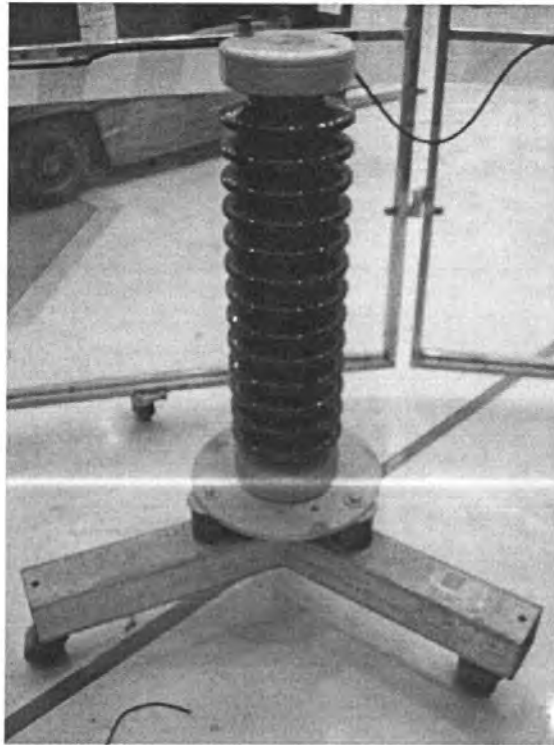


รูปที่ 3.22 โวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

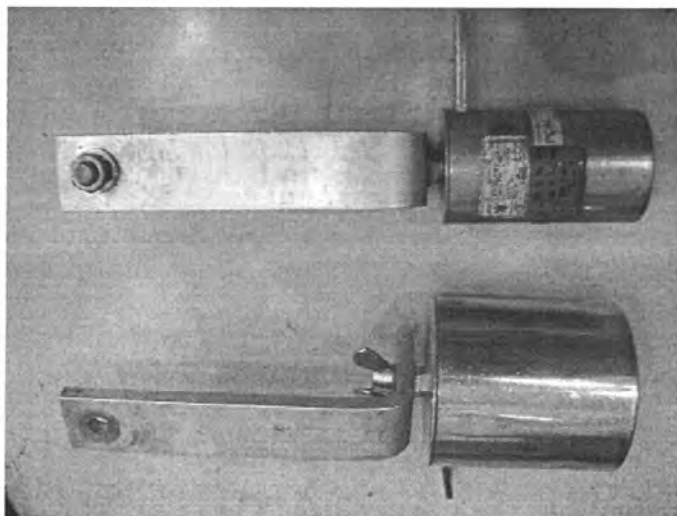
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) โวลต์เดจดีไวเตอร์สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ ใช้ในการลดทอนแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแหล่งจ่ายภายนอก เข้าสู่เครื่องมือวัดค่าและแสดงผล

5) ตัวเก็บประจุ ใช้ในการเป็นตัวเก็บประจุคัปปลิง (C Coupling) ในการวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน หรือใช้ในการแต่งลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 3.23 ตัวเก็บประจุขนาด 2000 pF



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.24 ตัวต้านทานชนิด ใช้ในการอ่านค่ากระแสอิมพัลส์ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 หม้อแปลงและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.1 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงที่จะใช้ในการทดสอบนั้นเป็นหม้อแปลง 3 เฟส พิกัด 12000/416 V 50 Hz มีกลุ่มของเวคเตอร์แบบ Dyn1 โดยมีลักษณะภายนอกดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 หม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนั้น สามารถทำการแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เครื่องมือที่ทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงาน แรงดันหรือกระแสให้กับหม้อแปลงทดสอบซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับการต่อวงจรทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงทดสอบ ส่วนเครื่องมืออีกประเภทหนึ่งคือ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆ เพื่อบันทึกเป็นผลการทดสอบ โดยในการบอกถึงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจะทำการแบ่งประเภทตามหลักการนี้

3.2.2.1 เครื่องมือที่ทำหน้าที่ทางวงจรไฟฟ้า

1) หม้อแปลงขึ้นแรงดัน ใช้สำหรับการขึ้นแรงดันของการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ โดยที่ใช้เป็นหม้อแปลง 1 เฟส รุ่น SD-16 พิกัด 4 kVA ทนกระแสได้มากที่สุด 16 A แรงดันและความถี่ป้อนเข้า 220 V/50-60 Hz จ่ายแรงดันได้ในช่วง 0-250 V แสดงดังรูปที่ 3.26

3.2.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวัด และบันทึกค่าต่างๆ จากการทดสอบ

1) เครื่องตรวจสอบกลุ่มของเวคเตอร์ และวัดอัตราส่วนของหม้อแปลง โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องวัดของบริษัท Tettex Instrument สามารถจ่ายแรงดันได้ที่ 230/115 VAC จ่ายกระแสได้ที่ 0.1/0.2 A ที่ความถี่ 50Hz และ 60Hz ลักษณะตามรูปที่ 3.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 หม้อแปลงปรับขึ้นแรงดัน



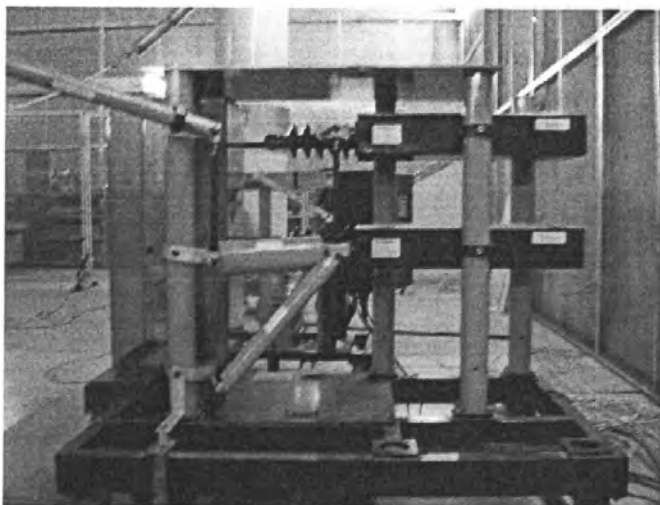
รูปที่ 3.27 เครื่องตรวจสอบกลุ่มของเวคเตอร์ และวัตต์อัตราส่วนของหม้อแปลง

2) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยเครื่องที่ใช้เป็นของบริษัท Passoni Villa รุ่น GTU 02-2.5 สามารถจ่ายแรงดันได้ 200 kV มีจำนวน 2 ชั้น สามารถสะสมประจุชั้นละ 100 kV โดยมีเครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรง จ่ายแรงดันที่ 100 kV แสดงดังรูปที่ 3.28

3) เครื่องที่ใช้ในการปรับระยะเก็บและอ่านค่าแรงดัน โดยที่เครื่องที่ใช้เป็นของบริษัท Passoni Villa ซึ่งเครื่องจะสามารถปรับระยะเก็บได้จากปุ่มที่มีสีเขียวและเหลือง และสามารถอ่านค่าของแรงดันอิมพัลส์ได้ แสดงดังรูปที่ 3.29

4) ออสซิลโลสโคป ใช้ในการแสดงรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ โดยเครื่องนี้เป็นของบริษัท YOKOGAWA รุ่น DL 1520 แสดงผลแบบ 8 Bits แสดงดังรูปที่ 3.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 3.29 เครื่องมือที่ใช้ในการปรับระยะเก็บและอ่านค่าแรงดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **รูปที่ 3.30** ออสซิลโลสโคป ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.3 เครื่องมือช่วยในการวัดต่างๆ

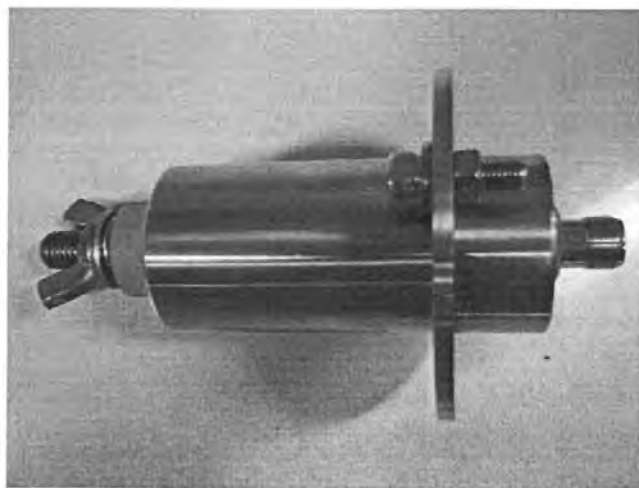
1) อิมพัลส์โวลต์เดจดีไวเดอร์ ใช้ในทอนระดับแรงดันอิมพัลส์ เป็นของบริษัท Passoni Villa รุ่น ILCD-200 เป็นชนิดตัวเก็บประจุ พิกัด 4200 pF อัตราส่วนแรงดัน 26.53 k เพื่อให้เครื่องมือวัดสามารถทำการวัดได้โดยไม่เกินพิกัด และไม่เกิดอันตราย ซึ่งใช้ในการอ่านค่าแรงดันอิมพัลส์แสดงได้ดังรูปที่ 3.29

2) ตัวต้านทานชั้นท์ ใช้ในการอ่านค่ากระแสอิมพัลส์ ที่ได้จากการจ่ายอิมพัลส์ผ่านหม้อแปลงที่ถูกต้องทดสอบ ก่อนจะผ่านตัวต้านทานนี้ โดยมีค่าความต้านทาน 4.32 Ω

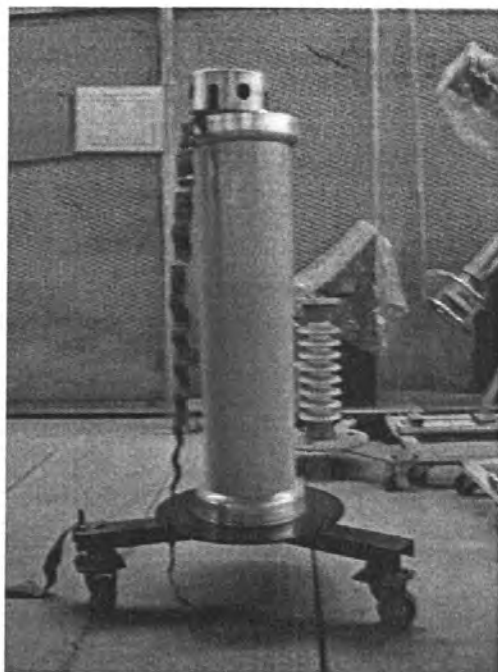
3) อิมพัลส์โวลต์เดจดีไวเดอร์เช่นกัน มีอัตราส่วนแรงดัน 28.88 k แสดงได้ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.29 โวลต์เดจดีไวเดอร์ที่ใช้สำหรับอ่านค่าแรงดันอิมพัลส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 3.30** ตัวต้านทานชั้นท์ ใช้ในการอ่านค่ากระแสอิมพัลส์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 ดิวเตอร์ที่ใช้สำหรับตรวจจับแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

4.1 ตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่บริษัทเอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด

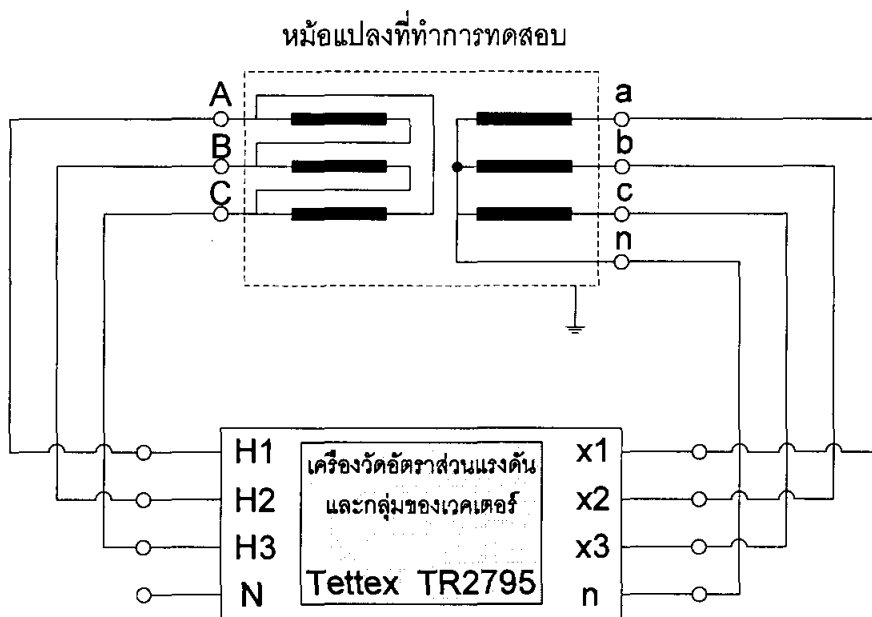
หม้อหม้อแปลงที่จะใช้ในการทดสอบนั้นเป็นหม้อแปลง 3 เฟส พิกัด 400 KVA
24000/12000 V 50 Hz

4.1.1 การหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องวัดของบริษัท Tettex Instrument TR2795 สามารถทำการจ่ายแรงดันได้ในช่วง 95 – 240 VAC จ่ายกระแสได้ไม่เกิน 3.15A ที่ความถี่ 50Hz และ 60Hz

วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์

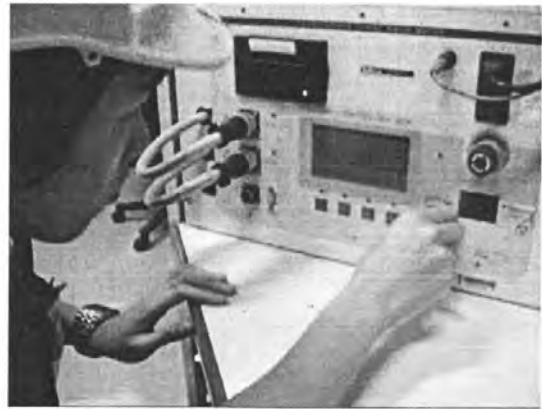
ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.1
- 2) ปรับตั้งเครื่องวัด
- 3) อ่านค่ากลุ่มของเวกเตอร์ แล้วบันทึกผล
- 4) ทำการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันที่ทุกขั้วและทุกแทป ทางด้านแรงดันสูงระบบ 24 kV แล้วบันทึกผลลงในตารางบันทึกผลการทดสอบ
- 5) เปลี่ยนระบบหม้อแปลงเป็นระบบ 12 kV ทำการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันที่ทุกขั้วและทุกแทป แล้วบันทึกผลลงในตารางบันทึกผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทดสอบการหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์

(ก) ต่อบางจรทดสอบ

(ข) ทำการปรับตั้งเครื่องวัด

(ค) เปลี่ยนแทปที่จะทำการทดสอบ

(ง) เปลี่ยนระบบหม้อแปลง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์

กลุ่มของเวกเตอร์ : Dyn11
 ระบบที่ทำการทดสอบ : 24 kV
 ขั้วทางด้านแรงดันสูง : A-B-C(24)
 ขั้วทางด้านแรงดันต่ำ : a-b-c-n

ตำแหน่ง แทป	แรงดันพิกัด (kV)		อัตราส่วนแรงดัน			อัตราส่วน แรงดัน เฉลี่ย	ความคลาด เคลื่อน (%)
	ด้าน แรงดันสูง	ด้าน แรงดันต่ำ	A-C n-c	B-A n-a	C-B n-b		
1	- 24.000	0.41600	99.94	99.95	99.94	99.943	0.017
2	23.400	0.41600	97.48	97.48	97.48	97.480	0.060
3	22.800	0.41600	95.02	95.02	95.02	95.020	0.100
4	22.200	0.41600	92.56	92.56	92.56	92.560	0.140
5	21.600	0.41600	90.10	90.10	90.09	90.097	0.180

กลุ่มของเวกเตอร์	:	Dyn11
ระบบที่ทำการทดสอบ	:	12 kV
ขั้วทางด้านแรงดันสูง	:	A-B-C(12)
ขั้วทางด้านแรงดันต่ำ	:	a-b-c-n

ตำแหน่ง แทป	แรงดันพิกัด (kV)		อัตราส่วนแรงดัน			อัตราส่วน แรงดัน เฉลี่ย	ความคลาด เคลื่อน (%)
	ด้าน แรงดันสูง	ด้าน แรงดันต่ำ	A-C n-c	B-A n-a	C-B n-b		
1	12.000	0.41600	49.97	49.97	49.96	49.967	0.010
2	11.700	0.41600	48.73	48.73	48.73	48.730	0.040
3	11.400	0.41600	47.51	47.51	47.51	47.510	0.090
4	11.100	0.41600	46.27	46.27	46.27	46.270	0.140
5	10.800	0.41600	45.04	45.04	45.04	45.040	0.170

การคำนวณผลการทดสอบ

- ตัวอย่างการหาอัตราส่วนแรงดันเฉลี่ยของหม้อแปลงระบบ 24 kV แทป 1

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราส่วนแรงดันเฉลี่ย} &= \frac{(A-C, n-c) + (B-A, n-a) + (C-B, n-b)}{3} \\
 &= \frac{99.94 + 99.95 + 99.94}{3} \\
 &= \frac{299.83}{3} \\
 &= 99.943
 \end{aligned}$$

- ตัวอย่างการหาค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงระบบ 24 kV แทป 1

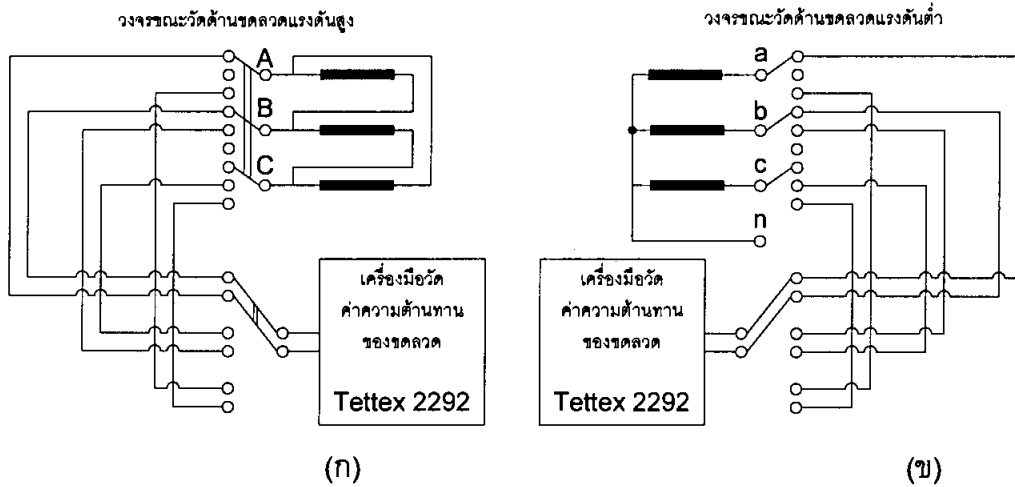
$$\begin{aligned}
 \text{ค่าความคลาดเคลื่อน} &= \left| \frac{\text{Ratio}_{real} - \text{Ratio}_{avg}}{\text{Ratio}_{real}} \right| \times 100 \\
 &= \left| \frac{99.926 - 99.943}{99.926} \right| \times 100 \\
 &= 0.017\%
 \end{aligned}$$

4.1.2 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องวัดของ Tettex Instrument แบบมีระบบจัดเก็บข้อมูล มีช่วงการวัดระหว่าง $1 \mu\Omega$ ถึง $20 \text{ k}\Omega$ และสามารถทำการจ่ายกระแสเพื่อใช้ในการวัดได้ 50A
- 2) เครื่องวัดอุณหภูมิ

วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวด

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) วัดอุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลง ที่บริเวณตัวถังของหม้อแปลงแล้วบันทึกผล
- 2) ต้องวงจรทดสอบตามรูป
- 3) ปรับตั้งค่าของเครื่องวัด
- 4) ที่ระบบหม้อแปลง 24 kV ทางด้านแรงดันสูง ทำการวัดความต้านทานของขดลวดที่ละคู่เฟสและทุกแทป แล้วบันทึกผลลงในตารางบันทึกผลการทดสอบ
- 5) เปลี่ยนระบบหม้อแปลงเป็น 12 kV ทางด้านแรงดันสูง ทำการวัดความต้านทานของขดลวดที่ละคู่เฟสและทุกแทป แล้วบันทึกผลลงในตารางบันทึกผลการทดสอบ
- 6) ทางด้านแรงดันต่ำ ทำการวัดความต้านทานของขดลวดที่ละคู่เฟส แล้วบันทึกผลลงในตารางบันทึกผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบในการหาค่าความต้านทานของขดลวด

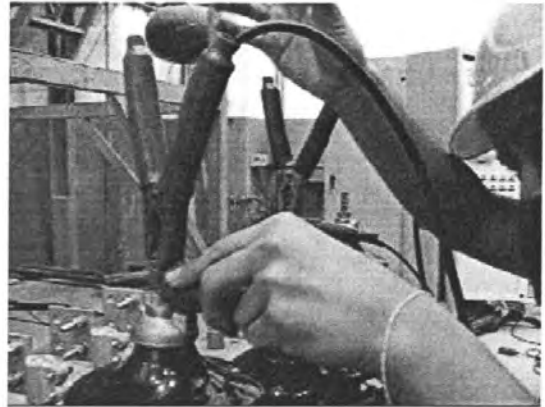
อุณหภูมิอ้างอิง : 75 °C
 อุณหภูมิน้ำมันเฉลี่ย : 30.3 °C
 ขั้วที่ทำการทดสอบ : A-B-C (ระบบ 24 kV)

ตำแหน่ง แทป	ความต้านทานระหว่างเฟส (โอห์ม)			ความต้านทาน เฉลี่ย (โอห์ม/เฟส)	ความต้านทาน ที่อุณหภูมิอ้างอิง (โอห์ม/เฟส)
	A-B	B-C	C-A		
1	13.942	13.932	13.953	20.913	24.437
2	13.560	13.547	13.572	20.340	23.767
3	13.176	13.162	13.182	19.760	23.089
4	12.792	12.781	12.801	19.187	22.420
5	12.405	12.386	12.413	18.602	21.736

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



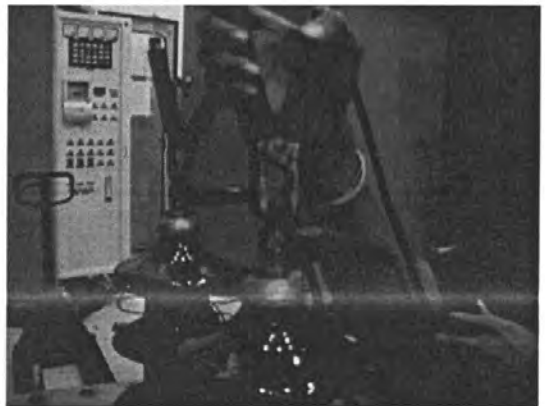
(ก)



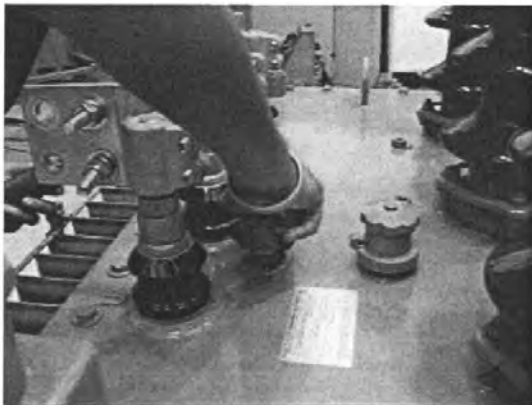
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการทดสอบในการหาค่าความต้านทานของขดลวด

(ก) วัดอุณหภูมิของหม้อแปลง

(ข) ต่วงจรทดสอบ

(ค) ปรับตั้งเครื่องวัด แล้ววัดค่าความต้านทานของขดลวด

(ง) เปลี่ยนเฟสทดสอบ

(จ) เปลี่ยนแทป และเปลี่ยนระบบของหม้อแปลง

(ฉ) วัดค่าความต้านทานของขดลวดทางด้านแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิอ้างอิง : 75 °C
 อุณหภูมิน้ำมันเจลลี่ : 30.3 °C
 ขั้วที่ทำการทดสอบ : A-B-C (ระบบ 12 kV)

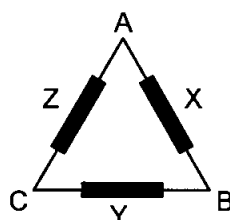
ตำแหน่ง แทป	ความต้านทานระหว่างขั้ว (โอห์ม)			ความต้านทาน เจลลี่ (โอห์ม/เฟส)	ความต้านทาน ที่อุณหภูมิอ้างอิง (โอห์ม/เฟส)
	A-B	B-C	C-A		
1	3.4957	3.4909	3.4988	5.2427	6.1260
2	3.4016	3.3941	3.4041	5.0999	5.9592
3	3.3042	3.2640	3.3066	4.9374	5.7693
4	3.2079	3.2009	3.2102	4.8095	5.6198
5	3.1105	3.1028	3.1128	4.6631	5.4488

อุณหภูมิอ้างอิง : 75 °C
 อุณหภูมิน้ำมันเจลลี่ : 30 °C
 ขั้วที่ทำการทดสอบ : A-B-C (ระบบ 12 kV)

ความต้านทานระหว่างขั้ว (โอห์ม)				ความต้านทาน เจลลี่ (โอห์ม/เฟส)	ความต้านทาน ที่อุณหภูมิอ้างอิง (โอห์ม/เฟส)
A-B	B-C	C-A	A-N		
0.0038360	0.0038650	0.0038730	0.0019730	0.0019290	0.0022540

การคำนวณผลการทดสอบ

- ตัวอย่างการคำนวณค่าความต้านทานเจลลี่ของหม้อแปลงระบบ 24 kV ที่แทป 1



$$\text{ค่าความต้านทานระหว่างขั้ว A-B} = \frac{R_x(R_y + R_z)}{R_x + R_y + R_z}$$

$$\text{ค่าความต้านทานระหว่างขั้ว B-C} = \frac{R_y(R_x + R_z)}{R_x + R_y + R_z}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ค่าความต้านทานระหว่างขั้ว C-A} = \frac{R_z(R_x + R_y)}{R_x + R_y + R_z}$$

เนื่องจากค่าความต้านทานในแต่ละขดลวด มีค่าใกล้เคียงกัน จึงกำหนดให้

$$R_x, R_y, R_z = R_{avg}$$

ดังนั้น

$$R_{A-B}, R_{B-C}, R_{C-A} = \frac{2R_{avg}}{3}$$

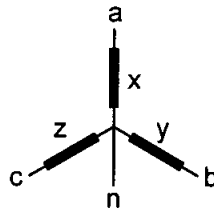
$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานของขดลวด X} &= \frac{3R_{A-B}}{2} \\ &= \frac{3 \times 13.942}{2} \\ &= 20.913 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานของขดลวด Y} &= \frac{3R_{B-C}}{2} \\ &= \frac{3 \times 13.932}{2} \\ &= 20.898 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานของขดลวด Z} &= \frac{3R_{C-A}}{2} \\ &= \frac{3 \times 13.953}{2} \\ &= 20.929 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นค่าความต้านทานเฉลี่ยที่แปด 1} &= \frac{20.913 + 20.898 + 20.929}{3} \\ &= 20.913 \text{ โอห์ม/เฟส} \end{aligned}$$

- ตัวอย่างการคำนวณค่าความต้านทานเฉลี่ยของหม้อแปลงทางต้านแรงดันต่ำ



$$\text{ค่าความต้านทานระหว่างขั้ว a-b} = R_x + R_y$$

$$\text{ค่าความต้านทานระหว่างขั้ว b-c} = R_y + R_z$$

$$\text{ค่าความต้านทานระหว่างขั้ว c-a} = R_x + R_z$$

เนื่องจากค่าความต้านทานในแต่ละขดลวด มีค่าใกล้เคียงกัน จึงกำหนดให้

$$R_x, R_y, R_z = R_{avg}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 R_{a-b}, R_{b-c}, R_{c-a} &= 2R_{avg} \\
 \text{ค่าความต้านทานของขดลวด x,y} &= \frac{R_{a-b}}{2} \\
 &= \frac{0.0038360}{2} \\
 &= 0.001918 \text{ โอห์ม} \\
 \text{ค่าความต้านทานของขดลวด y,z} &= \frac{R_{b-c}}{2} \\
 &= \frac{0.0038650}{2} \\
 &= 0.0019325 \text{ โอห์ม} \\
 \text{ค่าความต้านทานของขดลวด z,x} &= \frac{R_{c-a}}{2} \\
 &= \frac{0.0038730}{2} \\
 &= 0.0019365 \text{ โอห์ม} \\
 \text{ดังนั้นค่าความต้านทานเฉลี่ยต้านแรงดันต่ำ} &= \frac{0.001918 + 0.0019325 + 0.0019365}{3} \\
 &= 0.001929 \text{ โอห์ม}
 \end{aligned}$$

• ตัวอย่างการคำนวณค่าความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิงของหม้อแปลงระบบ 24 kV ที่แทป 1

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร} \quad R_{ref} &= R_{real} \left(\frac{235 + T_{ref}}{235 + T_{real}} \right) \\
 &= 20.913 \left(\frac{235 + 75}{235 + 30.3} \right) \\
 &= 24.441 \text{ โอห์ม}
 \end{aligned}$$

4.1.3 การวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

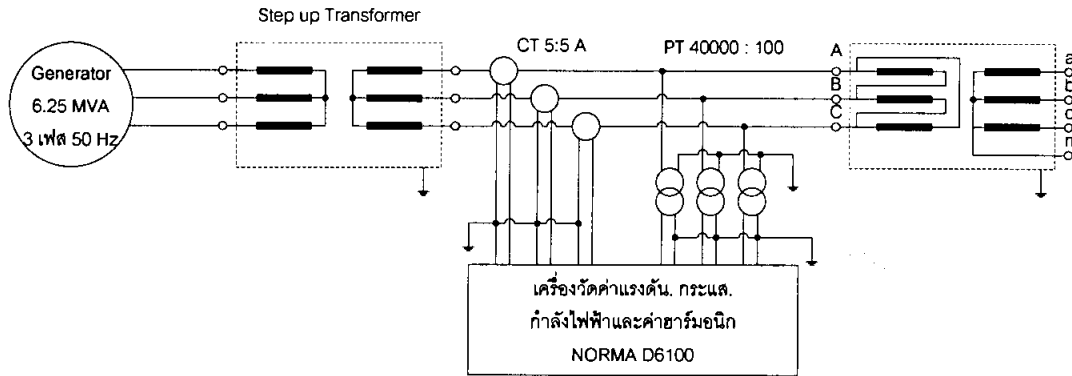
1) เครื่องวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า LEM รุ่น NORMA D6100 ใช้งานร่วมกับหม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดัน

2) หม้อแปลงขึ้นแรงดัน พิกัด 60 MVA $55 \pm 15 \times 1.89\%$ 10kV/3.2-84.4kV 50 Hz

3) เครื่องผลิตกำลังไฟฟ้า พิกัด 6.25 MVA 0.8 p.f. 3 เฟส 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรถดสอบ



รูปที่ 4.5 วงจรถดสอบหาค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า และค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อยังจรถดสอบตามรูป
- 2) ปรับตั้งค่าหม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดัน
- 3) ปรับตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการอ่านค่า
- 4) บ้อนแรงดัน 110% 100% และ 90% ของแรงดันพิกัด ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า
- 5) อ่านค่าและบันทึกผล

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า และค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

ขั้วที่ทำการบ้อนแรงดัน	:	A-B-C (ระบบ 24 kV)
ขั้วที่ทำการเปิดวงจร	:	a-b-c-n
อุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลงเฉลี่ย	:	30.0°C
แทปที่ทำการทดสอบ	:	1
พิกัดกำลังไฟฟ้า	:	0.4 MVA

แรงดันที่บ้อน	U' (kV)	U (kV)	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)	ค่าความสูญเสียทั้งหมด (kW)	ค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า (kW)	กระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า (A)
110%	26.38	26.59	0.8165	0.7076	0.6924	1.593	1.5810	7.6780%
100%	23.99	24.08	0.0998	0.0781	0.0761	0.9306	0.9271	0.8801%
90%	21.68	21.68	0.0301	0.0212	0.0218	0.6437	0.6416	0.2532%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและ

ค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

(ก) ต่อดวงจรทดสอบ

(ข) ปรับตั้งหม้อแปลงแรงดัน

(ค) ปรับตั้งหม้อแปลงกระแส

(ง) ปรับตั้งเครื่องมือวัด

(จ) ป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า

(ฉ) ทำการอ่านค่าแล้วบันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณผลการทดสอบ

- ตัวอย่างการหาค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า เมื่อป้อนแรงดัน 100% ของแรงดันพิกัด

ค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้า, P_0 หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{0m} \times \left(1 + \left(\frac{U' - U}{U} \right) \right) \\ &= 0.9306 \times \left(1 + \left(\frac{23.99 - 24.08}{23.99} \right) \right) \\ &= 0.9271 \text{ kW} \end{aligned}$$

- ตัวอย่างการหากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า เมื่อป้อนแรงดัน 100% ของแรงดันพิกัด

กระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า, I_0 หาได้จากสมการ

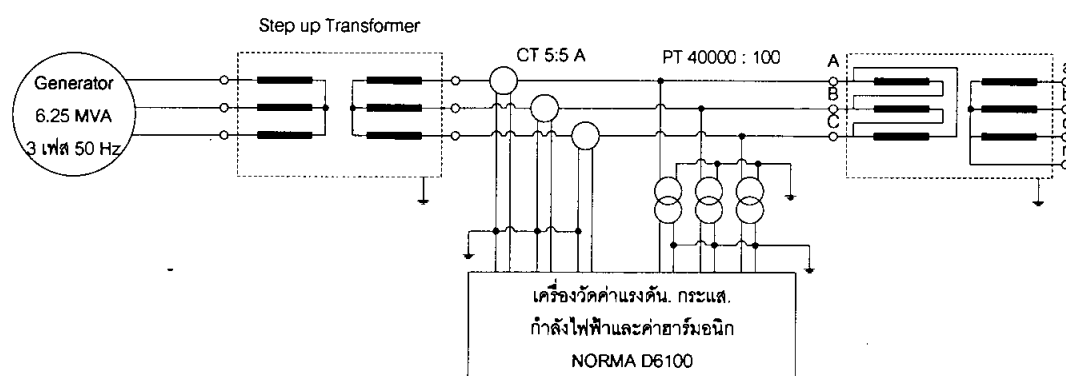
$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{I_{0m}}{I_{rated, HV}} \times 100 \\ &= \frac{0.0998 + 0.0781 + 0.0761}{3 \times 9.62} \times 100 \\ &= 0.8801 \% \end{aligned}$$

4.1.4 การวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า LEM รุ่น NORMA D6100 ใช้งานร่วมกับหม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดัน
- 2) หม้อแปลงขึ้นแรงดัน พิกัด 60 MVA $55 \pm 15 \times 1.89\%$ 10kV/3.2-84.4kV 50 Hz
- 3) เครื่องผลิตกำลังไฟฟ้า พิกัด 6.25 MVA 0.8 p.f. 3 เฟส 50 Hz

วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.7 วงจรทดสอบหาค่าฮาร์โมนิกของกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อดวงจรทดสอบตามรูป
- 2) ปรับตั้งค่าหม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดัน
- 3) ปรับตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการอ่านค่า
- 4) ป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า
- 5) อ่านค่าและบันทึกผล



รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการทดสอบ (เนื่องจากใช้วงจรการทดสอบเหมือนกับการวัดค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงไม่มีภาระทางไฟฟ้าและค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า เพราะฉะนั้น จึงมีเพียงสองขั้นตอน) โดยที่ (ก) ปรับตั้งเครื่องวัดเพื่ออ่านค่าฮาร์โมนิก (ข) อ่านค่าและบันทึกผล

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาค่าฮาร์โมนิกของกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

แรงดันที่จ่าย	:	24 kV
ขั้วที่ทำการทดสอบ	:	A-B-C (ระบบ 24 kV)
ความถี่	:	50 Hz

ลำดับ ฮาร์โมนิก	A		B		C	
	แอมพลิจูด (%)	มุมเฟส (°)	แอมพลิจูด (%)	มุมเฟส (°)	แอมพลิจูด (%)	มุมเฟส (°)
1	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00
3	1.78	178.21	30.70	89.53	34.06	-7.47
5	50.29	-88.06	51.39	-172.37	54.73	-18.36
7	29.09	-44.00	29.68	-137.88	31.82	27.23
9	0.20	0.00	5.57	-40.22	6.03	20.72
11	7.33	-132.08	7.30	56.04	8.05	9.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



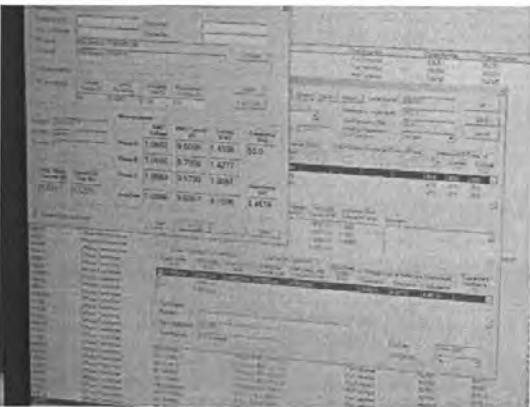
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.10 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ขณะทำการลัดวงจรและค่าความ

สูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า

(ก) ต่อดวงจรถดสอบ

(ข) ปรับตั้งหม้อแปลงแรงดัน และหม้อแปลงกระแส

(ค) ปรับตั้งเครื่องมือวัด

(ง) ป้อนกระแสให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า

(จ) ทำการอ่านค่าแล้วบันทึกผล

(ฉ) เปลี่ยนแรงดันทางด้านแรงสูงเป็นระบบ 12 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ฉ) เปลี่ยนแรงดันทางด้านแรงสูงเป็นระบบ 12 kV ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ขณะทำการลัดวงจร และค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า

ระบบที่ทำการทดสอบ : 24 kV
 ขั้วที่ทำการป้อนแรงดัน : A-B-C
 ขั้วที่ทำการลัดวงจร : a-b-c-n
 พิกัดกำลังไฟฟ้า : 0.4 MVA
 อุณหภูมิอ้างอิง : 75°C
 อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันหม้อแปลงขณะทดสอบ : 30°C

ตำแหน่ง แทป	พิกัด แรงดัน (kV)	ค่าที่วัดได้			ค่าที่ปรับแก้ที่อุณหภูมิอ้างอิง 75°C		
		แรงดัน เฉลี่ย, U_{av} (kV)	กระแส เฉลี่ย, I_m (A)	ค่าความสูญเสียที่ วัดได้, P_{av} (kW)	ค่าความ สูญเสียจริง, P_1 (kW)	ค่าอิมพี แดนซ์ขณะ ลัดวงจร, ϵ_{sc} (%)	ค่าแรงดัน ขณะ ลัดวงจร, U_{sc} (kV)
1	24	1.0796	9.7237	4.2773	4.751	4.53	1.087
3	22.8	1.0042	10.206	4.3553	4.866	4.44	1.012
5	21.6	0.9207	10.641	4.3677	4.9989	4.31	0.93

ระบบที่ทำการทดสอบ : 12 kV
 ขั้วที่ทำการป้อนแรงดัน : A-B-C
 ขั้วที่ทำการลัดวงจร : a-b-c-n
 พิกัดกำลังไฟฟ้า : 0.4 MVA
 อุณหภูมิอ้างอิง : 75°C
 อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันหม้อแปลงขณะทดสอบ : 30°C

ตำแหน่ง แทป	พิกัด แรงดัน (kV)	ค่าที่วัดได้			ค่าที่ปรับแก้ที่อุณหภูมิอ้างอิง 75°C		
		แรงดัน เฉลี่ย, U_{av} (kV)	กระแส เฉลี่ย, I_m (A)	ค่าความสูญเสียที่ วัดได้, P_{av} (kW)	ค่าความ สูญเสียจริง, P_1 (kW)	ค่าอิมพี แดนซ์ขณะ ลัดวงจร, ϵ_{sc} (%)	ค่าแรงดัน ขณะ ลัดวงจร, U_{sc} (kV)
1	12	0.5346	19.274	4.2469	4.7909	4.49	0.539
3	11.4	0.4978	20.225	4.3534	4.92	4.41	0.502
5	10.8	0.4653	21.459	4.4635	5.0482	4.35	0.469

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณผลการทดสอบ

• ตัวอย่างการคำนวณค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า ของหม้อแปลงระบบ 24 kV แทป 1

จากสมการ

$$\begin{aligned} P_L &= P_{Lm} \cdot \left(\frac{I_{rated}}{I_m} \right)^2 \\ &= 4.2773 \cdot \left(\frac{9.6225}{9.723} \right)^2 \\ &= 4.188 \text{ kW ที่ } 30^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องปรับแก้ให้เป็นค่าที่อุณหภูมิอ้างอิง โดยเมื่อ

$$P_L = P_j + P_a$$

$$P_a = P_L - P_j$$

โดยที่

$$P_j = P_{j,HV} - P_{j,LV}$$

$$P_{j,HV} = 1.5 \times I_{rated,HV}^2 \times R_{ph-ph,HV}$$

$$= 1.5 \times 9.6225^2 \times 13.942$$

$$= 1.936 \text{ kW}$$

$$P_{j,LV} = 1.5 \times I_{rated,LV}^2 \times R_{ph-ph,LV}$$

$$= 1.5 \times 555.14^2 \times 0.003858$$

$$= 1.783 \text{ kW}$$

$$P_j = 1.936 + 1.783 = 3.719 \text{ kW ที่ } 30.3^\circ\text{C}$$

ทำการปรับแก้ค่า P_j ไปยังอุณหภูมิ 30°C

$$P_j = 3.719 \times \left(\frac{235 + 30}{235 + 30.3} \right)$$

$$= 3.715 \text{ kW ที่ } 30^\circ\text{C}$$

$$P_a = 4.1887 - 3.715 = 0.4731 \text{ kW ที่ } 30^\circ\text{C}$$

ทำการปรับแก้ค่า P_j และ P_a ไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 75°C

$$P_j = 3.715 \times \left(\frac{235 + 75}{235 + 30} \right) = 4.3466 \text{ kW}$$

$$P_a = 0.4731 \times \left(\frac{235 + 30}{235 + 75} \right) = 0.4045 \text{ kW}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าความสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระทางไฟฟ้า, P_L ที่ 75°C เป็น

$$P_L = 4.3466 + 0.4045 = 4.751 \text{ kW}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวอย่างการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ขณะลัดวงจร , ϵ_{cc} ของหม้อแปลงระบบ 24 kV แทป 1 จากสมการ

$$\epsilon_{cc} = \sqrt{\left(\frac{U_{ccm}}{U_r} \times 100\right)^2 - \left(\frac{P_{Lm}}{S_{rated}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{P_L}{S_{rated}} \times 100\right)^2}$$

$$\epsilon_{cc} = \sqrt{\left(\frac{1.0796}{24} \times 100\right)^2 - \left(\frac{4.2773}{400} \times 100\right)^2 + \left(\frac{4.751}{400} \times 100\right)^2}$$

$$\epsilon_{cc} = \sqrt{20.235 - 1.1435 + 1.408}$$

$$\epsilon_{cc} = \sqrt{20.235 - 1.1435 + 1.408}$$

$$\epsilon_{cc} = 4.53 \%$$

- ตัวอย่างการคำนวณหาค่าแรงดันขณะลัดวงจร , U_{cc} ของหม้อแปลงระบบ 24 kV แทป 1 จากสมการ

$$\epsilon_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_{rated}} \times 100$$

$$U_{cc} = \frac{\epsilon_{cc} \times U_{rated}}{100}$$

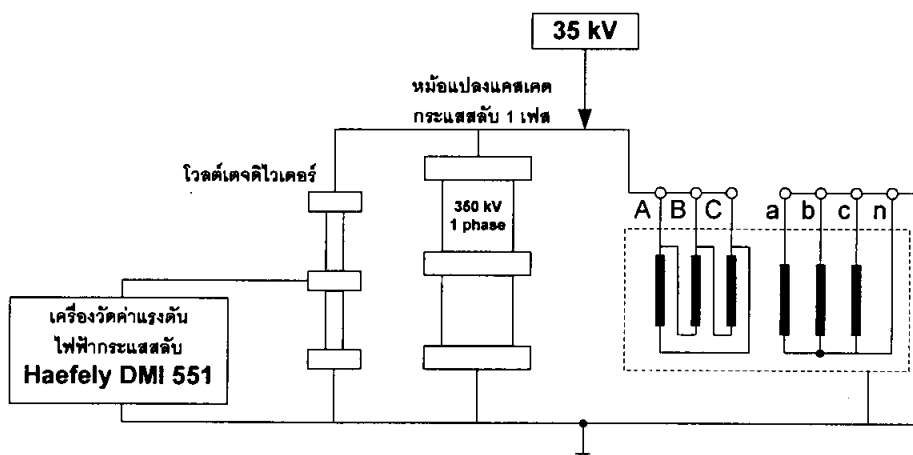
$$U_{cc} = \frac{4.53 \times 24}{100}$$

$$U_{cc} = 1.087 \text{ kV}$$

4.1.6 การวัดหาค่าความทนของฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอกอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) หม้อแปลงแคสเคด (Cascade Transformer) ใช้ในการขึ้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส สามารถจ่ายแรงดันได้ 350kV
- 2) โวลต์เดจดีไวเดอร์สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ

วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.11 วงจรทดสอบหาค่าความทนของฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรทดสอบตามรูป
- 2) ป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลง ทางด้านแรงดันสูง 35 kV แล้วเริ่มจับเวลา
- 3) จับเวลา 60 วินาที เมื่อครบแล้ว ปรับแรงดันลง
- 4) ป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลง ทางด้านแรงดันต่ำ 2.1 kV แล้วเริ่มจับเวลา
- 5) จับเวลา 60 วินาที เมื่อครบแล้ว ปรับแรงดันลง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.12 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก

(ก) ต่อวงจรทดสอบ (ข) ป้อนแรงดันทางด้านแรงสูง (ค) วงจรทดสอบทางด้านแรงต่ำ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าความคงทนฉนวนต่อแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายภายนอก

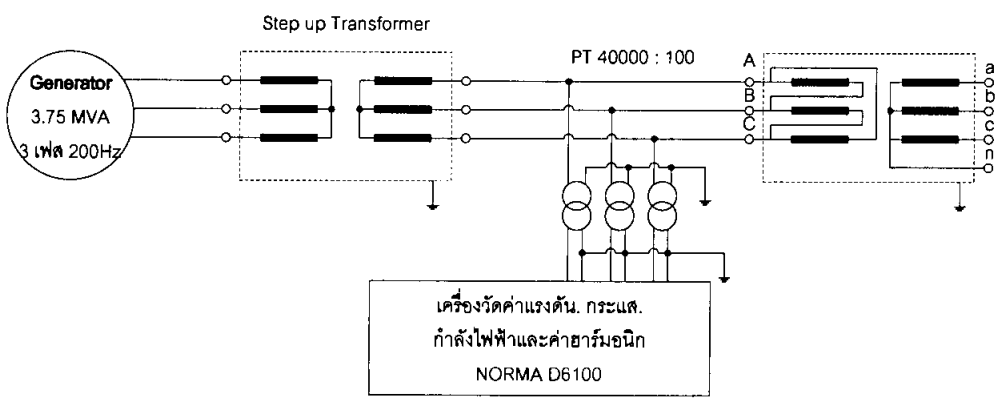
ความถี่	:	50 Hz
ขั้วที่ทำการทดสอบ	แรงดัน (kV)	ระยะเวลา (s)
A-B-C	35	60
a-b-c-n	2.1	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 การทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) หม้อแปลงแคสเคด (Cascade Transformer) ใช้ในการขึ้นแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ 1 เฟส สามารถจ่ายแรงดันได้ 350kV
- 2) โวลต์เดจดีไวเดอร์สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ
- 3) เครื่องวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า LEM รุ่น NORMA D6100 ใช้งานร่วมกับ หม้อแปลงแรงดัน

วงจรถดสอบ



รูปที่ 4.13 วงจรถดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อยังจรถดสอบตามรูป
- 2) ปรับตั้งค่าหม้อแปลงแรงดัน และลัดวงจรหม้อแปลงกระแส
- 3) บ้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ทางด้านแรงดันสูงของระบบ 24 kV ที่แทปพิกัด โดยบ้อนแรงดันขนาด 33.6 kV เริ่มจับเวลา
- 4) จับเวลา 30 วินาที เมื่อครบแล้ว ปรับแรงดันลง

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ

แทปที่ทำการทดสอบ : 1
 ความถี่ : 200 Hz

ขั้วที่ทำการทดสอบ	ขั้วที่ต่อลงดิน	แรงดัน (kV)	ระยะเวลา (s)
A-B-C(24)	n	33.6	30

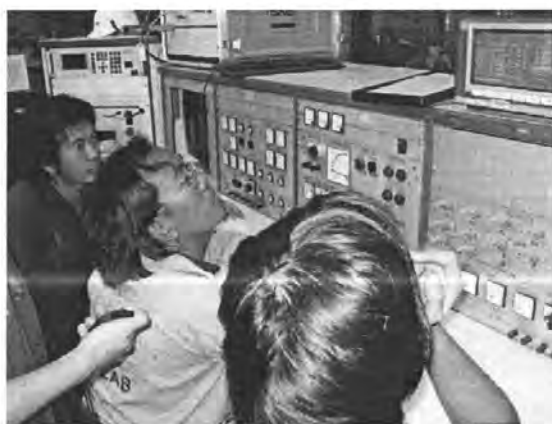
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.14 ขั้นตอนการทดสอบความทนของฉนวนด้วยแรงดันเหนี่ยวนำ

- (ก) ต่อบางจรทดสอบ
- (ข) ปรับตั้งหม้อแปลงแรงดัน และลัดวงจรหม้อแปลงกระแส
- (ค) ทำการป้อนแรงดัน แล้วจับเวลา 30 วินาที

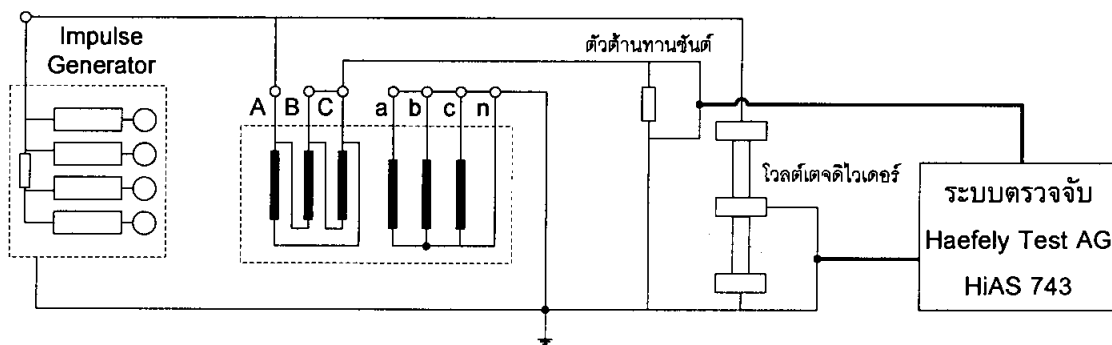
4.1.8 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ มีจำนวน 16 ชั้น สามารถสะสมประจุได้
ชั้นละ 100kV รวมความสามารถในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ 1600kV
- 2) ชุดควบคุมการขึ้นแรงดัน ใช้ชุดควบคุมของ Haefely Control GC 223
สามารถทำการปรับระยะห่างของแกปได้เองโดยอัตโนมัติ สามารถเลือกระดับแรงดันที่จะทำการ
สะสมในแต่ละชั้นได้
- 3) ชุดตรวจจับรูปคลื่นอิมพัลส์ ใช้อุปกรณ์ของ Haefely รุ่น Test AG HiAS 743
- 4) อิมพัลส์โวลต์เดจดีไวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 5) ตัวด้านทวนชั้นดี งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.15 วงจรทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ตรวจสอบวงจรทดสอบตามรูป
- 2) ทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงสูงทุกเฟส โดยแต่ละเฟสจะทำการป้อนแรงดันลดทอนขนาด 60% ของแรงดันเต็ม 1 ครั้ง และป้อนแรงดันเต็มอีก 3 ครั้ง
- 3) บันทึกการเปลี่ยนแปลงแรงดัน และรูปคลื่นกระแส เพื่อนำมาเปรียบเทียบ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบหาความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

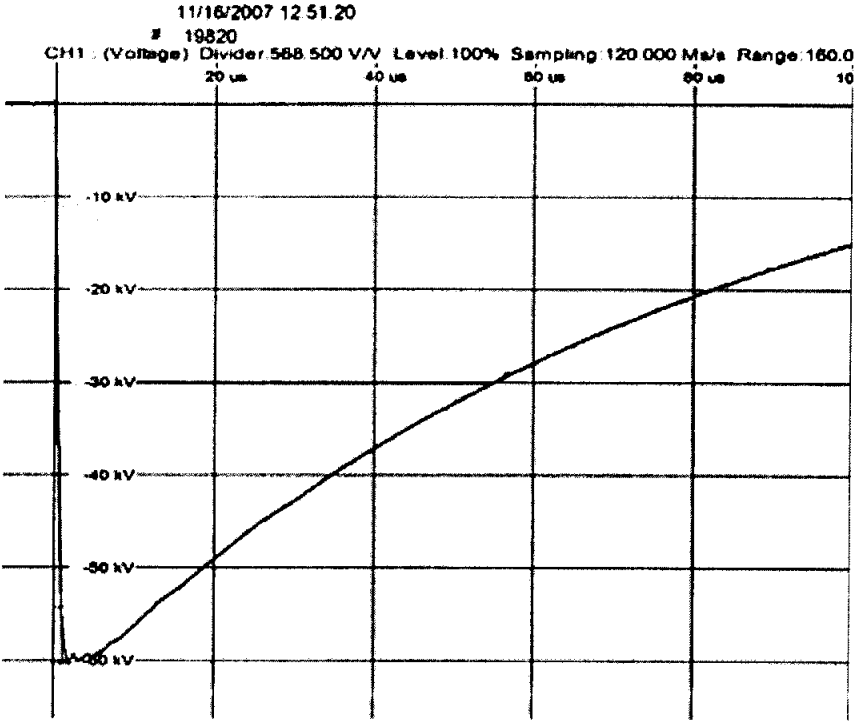
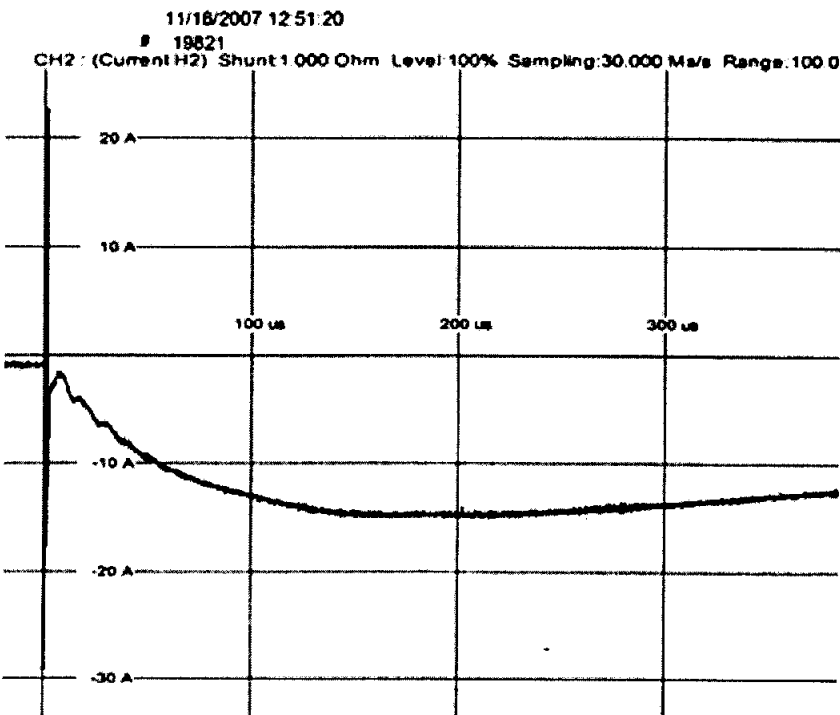
ชนิดแรงดัน	เฟสที่ทดสอบ	แรงดันที่ต้องการ	แรงดันทดสอบจริง (kV)	ตำแหน่งแทป	เวลาหน้าคลื่น	เวลาหางคลื่น
ลดทอนเต็ม	A	36.000	35.747	1	1.29	54.66
	A	60.000	60.090	1	1.26	54.75
	A	60.000	60.138	1	1.27	54.67
	A	60.000	60.034	1	1.28	54.72
ลดทอนเต็ม	B	36.000	36.124	3	1.42	53.78
	B	60.000	60.067	3	1.44	53.78
	B	60.000	60.072	3	1.44	53.8
	B	60.000	60.101	3	1.46	53.72
ลดทอนเต็ม	C	36.000	35.912	5	1.36	52.96
	C	60.000	60.167	5	1.38	53.03
	C	60.000	60.197	5	1.34	52.99
	C	60.000	60.169	5	1.37	53.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ตารางผลการทดสอบรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
<p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส: A</p> <p>แทป: 1</p> <p>T/Div: 20 μs</p> <p>แรงดัน: ลดทอน</p> <p>ต้องการ: 36 kV</p> <p>ทดสอบ: 35.747</p> <p>หน้าคลื่น: 1.29 μs</p> <p>หางคลื่น: 54.66 μs</p>	
ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
<p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส: A</p> <p>แทป: 1</p> <p>T/Div: 20 μs</p> <p>แรงดัน: ลดทอน</p> <p>ต้องการ: 36 kV</p> <p>ทดสอบ: 35.747</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : A แทป : 1 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.090 kV หน้าคลื่น: 1.26 μ s หางคลื่น: 54.75 μ s	
ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: กระแส เฟส : A แทป : 1 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.090 kV	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดหลอดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : A แทป : 1 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.138 kV หน้าคลื่น: 1.27 μ s หางคลื่น: 54.67 μ s	<p>11/16/2007 12:53:00 # 19822 CH1: (Voltage) Divider 568 500 V/V Level 100% Sampling 120.000 Ms/s Range 160.0</p>
ชนิดหลอดแรงดันสูง: รูปคลื่น: กระแส เฟส : A แทป : 1 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.138 kV	<p>11/16/2007 12:53:00 # 19823 CH2: (Current H2) Shunt 1.000 Ohm Level 100% Sampling 30.000 Ms/s Range 100.0</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส: A แทป: 1 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.034 kV หน้าคลื่น: 1.28 μ s หางคลื่น: 54.72 μ s	
ขลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: กระแส เฟส: A แทป: 1 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.034 kV	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : B แทป : 3 T/Div 20 μ s แรงดัน: ลดทอน ต้องการ: 36 kV ทดสอบ: 36.124 kV หน้าคลื่น: 1.42 μ s หางคลื่น: 53.78 μ s	
ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: กระแส เฟส : B แทป : 3 T/Div 20 μ s แรงดัน: ลดทอน ต้องการ: 36 kV ทดสอบ: 36.124 kV	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : B แทป : 3 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.067 kV หน้าคลื่น: 1.44 μ s หางคลื่น: 53.78 μ s	
ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: กระแส เฟส : B แทป : 3 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.067 kV	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
<p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส: B</p> <p>แทป: 3</p> <p>T/Div: 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 60.072 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.44 μs</p> <p>หางคลื่น: 53.80 μs</p>	<p>11/16/2007 1:14:22 P</p> <p># 19836</p> <p>CH1: (Voltage) Divider:566.500 V/V Level:100% Sampling:120.000 Ms/s Range:160.0</p>
ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
<p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส: B</p> <p>แทป: 3</p> <p>T/Div: 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 60.072 kV</p>	<p>11/16/2007 1:14:22 P</p> <p># 19837</p> <p>CH2: (Current H2) Shunt:1.000 Ohm Level:100% Sampling:30.000 Ms/s Range:100.0</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : B แทป : 3 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.101 kV หน้าคลื่น: 1.46 μ s หางคลื่น: 53.72 μ s	
ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: กระแส เฟส : B แทป : 3 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.101 kV	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : C แทป : 5 T/Div 20 μ s แรงดัน: ลดทอน ต้องการ: 36 kV ทดสอบ: 35.912 kV หน้าคลื่น: 1.36 μ s หางคลื่น: 52.96 μ s	
ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: กระแส เฟส : C แทป : 5 T/Div 20 μ s แรงดัน: ลดทอน ต้องการ: 36 kV ทดสอบ: 35.912 kV	

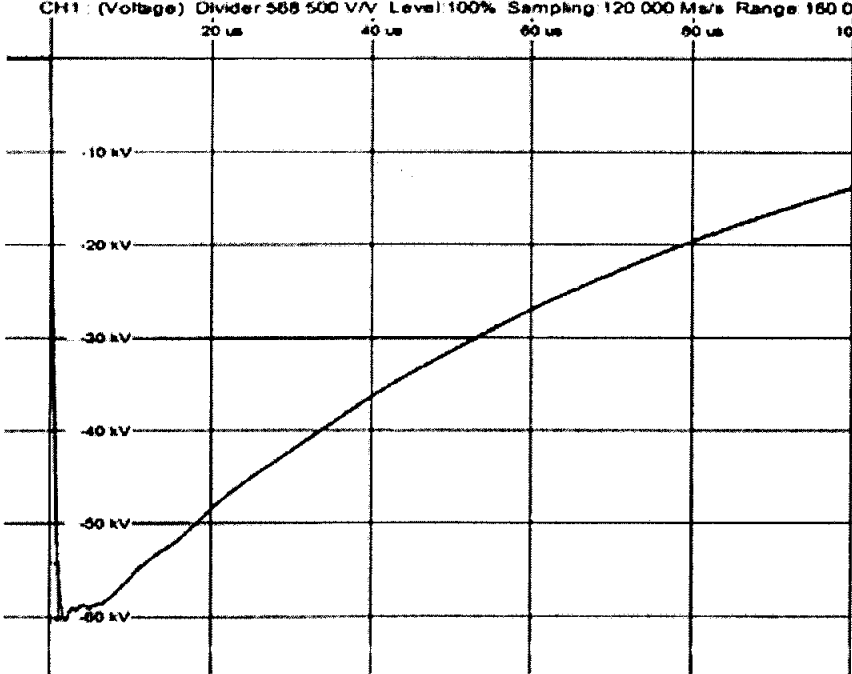
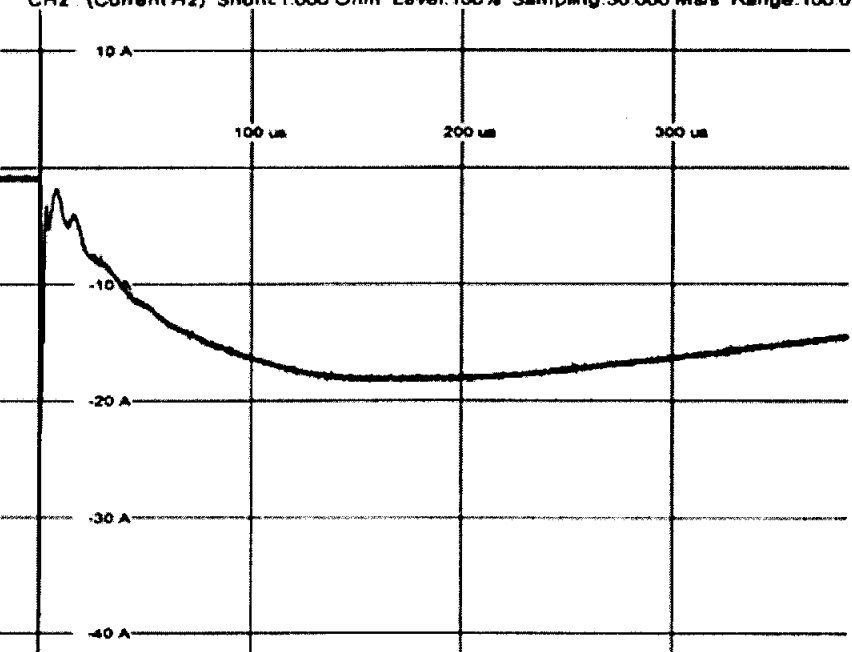
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : C แทป : 5 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.167 kV หน้าคลื่น: 1.38 μ s หางคลื่น: 53.03 μ s	
ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
รูปคลื่น: กระแส เฟส : C แทป : 5 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 60.167 kV	

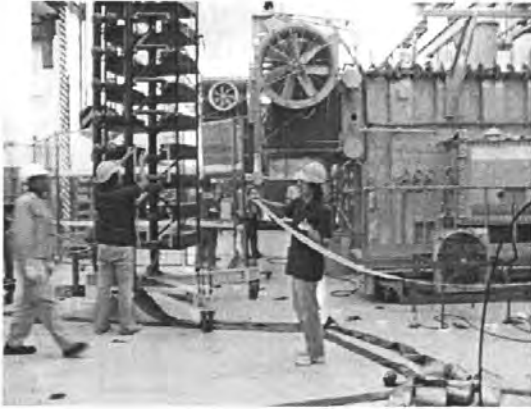
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
<p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส : C</p> <p>แทป : 5</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 60.197 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.34 μs</p> <p>หางคลื่น: 52.99 μs</p>	
ชดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
<p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส : C</p> <p>แทป : 5</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 60.197 kV</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
<p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส : C</p> <p>แทป : 5</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 60.169 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.37 μs</p> <p>หางคลื่น: 53.06 μs</p>	<p>11/16/2007 1:31:27 P</p> <p># 19848</p> <p>CH1: (Voltage) Divider 568 500 V/V Level:100% Sampling:120 000 Ms/s Range:160.0</p> 
ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่แสดงทางจอแสดงผล
<p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส : C</p> <p>แทป : 5</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 60.169 kV</p>	<p>11/16/2007 1:31:27 P</p> <p># 19849</p> <p>CH2: (Current M2) Shunt:1.000 Ohm Level:100% Sampling:30 000 Ms/s Range:100.0</p> 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



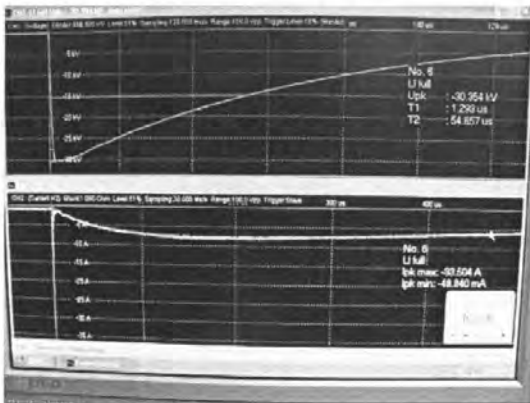
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.16 ขั้นตอนการทดสอบหาความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า

- (ก) ต่อวงจรทดสอบ
- (ข) วงจรทดสอบที่ต่อเสร็จแล้ว
- (ค) ทำการป้อนแรงดันเพื่อปรับเทียบรูปคลื่น
- (ง) ปรับแต่งวงจรเพื่อให้ได้รูปคลื่นที่ต้องการ
- (จ) รูปคลื่นที่ต้องการ

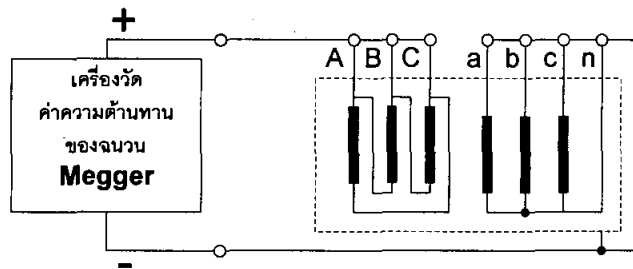
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.9 การวัดค่าความต้านทานของฉนวน

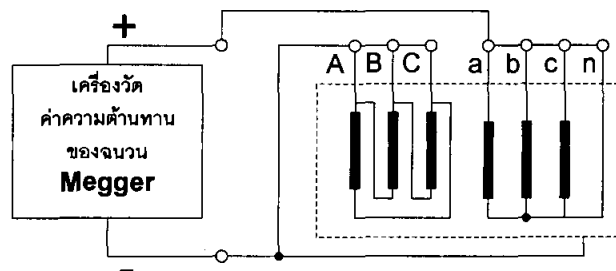
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องวัดค่าความต้านทานของฉนวน หรือที่เรียกว่า เมกเกอร์ สามารถทำการจ่ายแรงดันสำหรับทำการวัดได้ 5000VDC

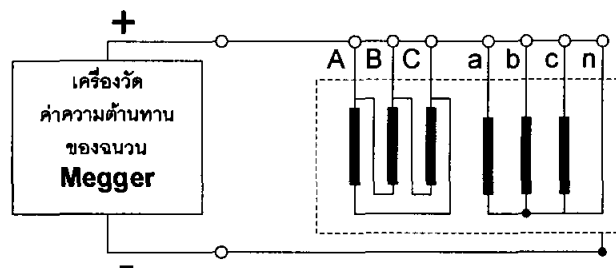
วงจรทดสอบ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.17 วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวน ในกรณีต่างๆ

- (ก) ป้อนแรงดันทดสอบที่ A-B-C ต่อ a-b-c-n ลงดิน
- (ข) ป้อนแรงดันทดสอบที่ a-b-c-n ต่อ A-B-C และ ตัวถึงลงดิน
- (ค) ป้อนแรงดันทดสอบที่ A-B-C และ a-b-c-n ต่อตัวถึงลงดิน

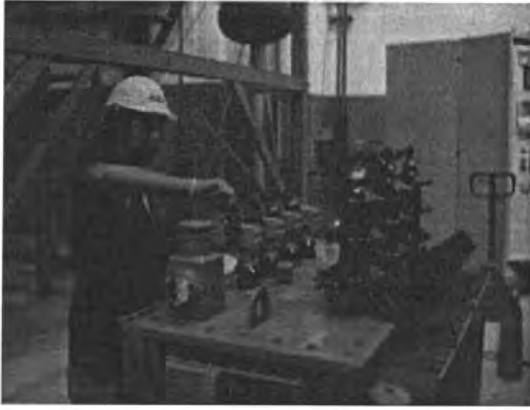
ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรทดสอบตามรูป
- 2) ทำการป้อนแรงดันทดสอบ 2.5 kV จับเวลา 1 นาที แล้วบันทึกผลลงใน

ตาราง

- 3) ทำการเปลี่ยนวงจรทดสอบ เพื่อทดสอบให้ครบทุกกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.18 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวน

(ก) ต่อบางจรทดสอบ

(ข) ป้อนแรงดันทดสอบจับเวลา และบันทึกผล

(ค) ทดสอบให้ครบทุกกรณี

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวน

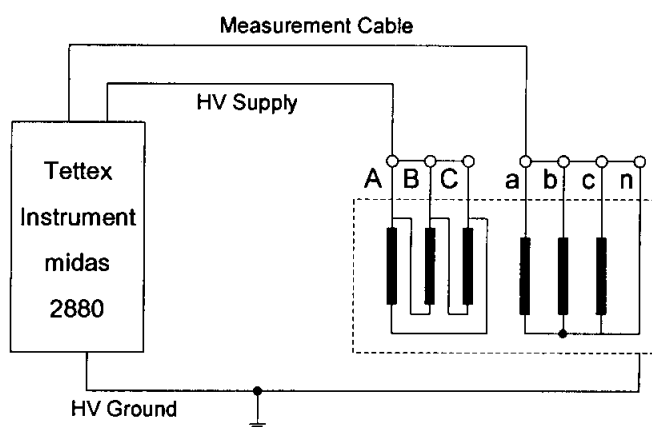
ขั้วที่ทำการทดสอบ	ขั้วที่ต่อลงดิน	อุณหภูมิ(°C)	ค่าความต้านทานที่เวลา 1 นาที
A-B-C	a-b-c-n Tank	30	4500
a-b-c-n	A-B-C Tank	30	6200
A-B-C A-b-c-n	Tank	30	5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

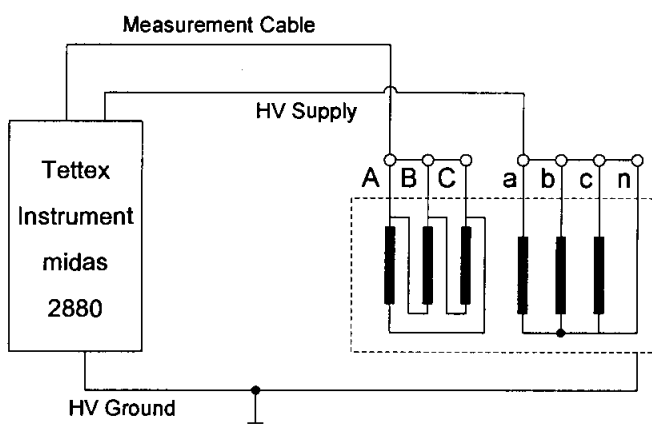
4.1.10 การวัดค่าประกอบการกระจายตัว ($\tan\delta$) ของค่าความเก็บประจุในระบบฉนวน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องวัดค่าประกอบกำลังของฉนวน ($\tan\delta$) เป็นเครื่องของ Tettex Instrument รุ่น midas 2880 สามารถวัดค่า $\tan\delta$ ได้ในช่วง 0-100% สามารถจ่ายแรงดันได้ไม่เกิน 15kV จ่ายกระแสได้ในช่วง 30 μ A ถึง 15A

วงจรทดสอบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 วงจรทดสอบหาค่าประกอบการกระจายตัว ($\tan\delta$) ของค่าความเก็บประจุ ในระบบฉนวน

(ก) ป้อนแรงดันทดสอบที่ A-B-C วัดค่าที่ a-b-c-n

(ข) ป้อนแรงดันทดสอบที่ a-b-c-n วัดค่าที่ A-B-C

ขั้นตอนการทดสอบ

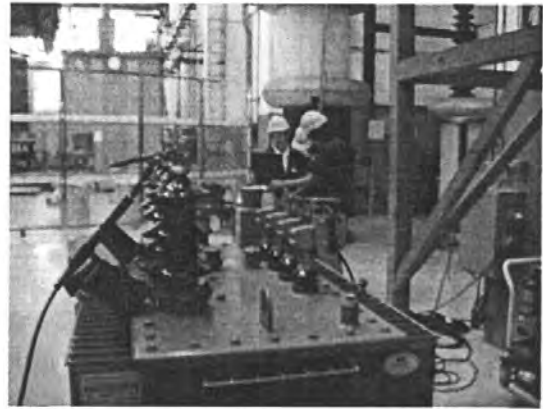
- 1) ต้องวงจรทดสอบตามรูป
- 2) ทำการป้อนแรงดันทดสอบ 10 kV สำหรับด้านแรงดันสูง แต่ทางด้านแรงดันต่ำใช้แรงดันทดสอบ 1 kV แล้วบันทึกผลลงในตาราง

3) ทำการเปลี่ยนวงจรทดสอบ เพื่อทดสอบให้ครบทุกกรณี

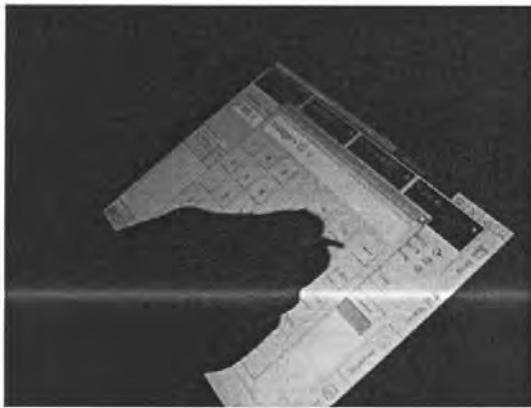
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ล่วงหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.20 ขั้นตอนการทดสอบ

- (ก) ต่อวงจรทดสอบ
- (ข) ป้อนแรงดันทดสอบ
- (ค) บันทึกผลการทดสอบ
- (ง) เปลี่ยนวงจรทดสอบ โดยทำให้ครบทุกกรณี

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบค่าประกอบการกระจายตัว (tan δ)

แรงดันที่ป้อน : 10 kV สำหรับทดสอบด้านแรงดันสูง
 1 kV สำหรับทดสอบด้านแรงดันต่ำ

ค่าตัวประกอบแก้ไข (K) : 1.25

ขั้วที่ทำการวัด	ค่าความเก็บประจุที่วัดได้ (pF)	Dissipation Factor (%) , tanδ	
		ที่ 30.0 °C	ที่ 20.0 °C
C _{HL}	1398	0.21	0.168
C _{HG}	858.8	0.24	0.192
C _{LG}	2870	0.31	0.248
C _{HG+C_{LG}}	3746	0.34	0.272

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณผลการทดสอบ

- ตัวอย่างการคำนวณค่า $\tan\delta$ ของค่า C_{HL} ไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C

จากสูตร

$$F_{p20} = \frac{F_{pT}}{K}$$

เมื่อ

F_{p20} คือ ค่าประกอบกำลังที่อุณหภูมิ 20°C

F_{pT} คือ ค่าประกอบกำลังที่ได้จากการวัดที่อุณหภูมิทดสอบ

K คือ ค่าตัวประกอบแก้ไข

แทนค่า

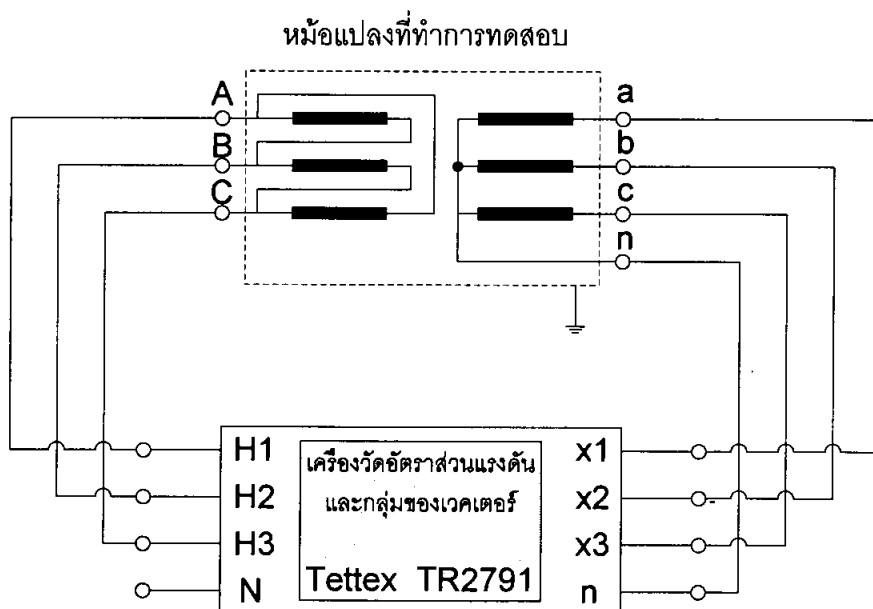
$$\begin{aligned} F_{p20} &= \frac{0.21}{1.25} \\ &= 0.168\% \end{aligned}$$

4.2 ตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4.2.1 การหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวคเตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องวัดของบริษัท Tettex Instrument TR2791 สามารถทำการจ่ายแรงดันได้ 115 และ 230 VAC จ่ายกระแสได้ 0.2 และ 0.1 A ที่ความถี่ 50Hz และ 60Hz

วงจรทดสอบ



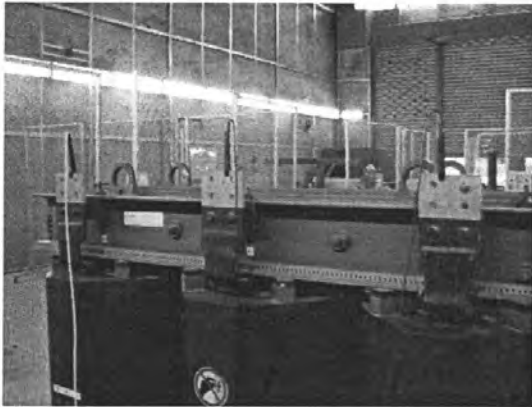
รูปที่ 4.21 วงจรทดสอบหาอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อดวงจรทดสอบตามรูป
- 2) อ่านค่ากลุ่มของเวกเตอร์ แล้วบันทึกผล
- 3) ทำการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันที่ทุกขั้วและทุกแทป แล้วบันทึกผลลงในตาราง

บันทึกผลการทดสอบ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.22 ขั้นตอนการทดสอบอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์

- (ก) ต่อดวงจรทดสอบ
- (ข) ป้อนแรงดัน แล้วอ่านค่ากลุ่มของเวกเตอร์
- (ค) ป้อนแรงดัน แล้วอ่านหาค่าอัตราส่วนแรงดัน
- (ง) เปลี่ยนแทปของหม้อแปลง โดยทำให้ครบทุกกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์

กลุ่มของเวกเตอร์	:	Dyn1
ระบบที่ทำการทดสอบ	:	12 kV
ขั้วทางด้านแรงดันสูง	:	1U-1V-1W(12)
ขั้วทางด้านแรงดันต่ำ	:	2u-2v-2w-n

ตำแหน่ง แทป	แรงดันพิกัด (kV)		อัตราส่วนแรงดัน			อัตราส่วน แรงดัน เฉลี่ย	ความคลาด เคลื่อน (%)
	ด้าน แรงดันสูง	ด้าน แรงดันต่ำ	A-B n-b	B-C n-c	C-A n-a		
5-6	12.000	0.41600	50.11	50.11	50.10	50.107	0.294
4-6	11.700	0.41600	48.88	48.88	48.88	48.880	0.349
4-7	11.400	0.41600	47.60	47.60	47.60	47.600	0.295
3-7	11.100	0.41600	46.38	46.37	46.38	46.377	0.340
3-8	10.800	0.41600	45.37	45.09	45.10	45.187	0.483

การคำนวณผลการทดสอบ

- ตัวอย่างการหาค่าอัตราส่วนแรงดันเฉลี่ยของหม้อแปลง แทป 5-6

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราส่วนแรงดันเฉลี่ย} &= \frac{(A-B, n-b) + (B-C, n-c) + (C-A, n-a)}{3} \\
 &= \frac{50.11 + 50.11 + 50.10}{3} \\
 &= \frac{150.32}{3} \\
 &= 50.107
 \end{aligned}$$

- ตัวอย่างการหาค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลง แทป 5-6

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าความคลาดเคลื่อน} &= \frac{|Ratio_{real} - Ratio_{avg}|}{Ratio_{real}} \times 100 \\
 &= \frac{|50.107 - 49.96|}{50.107} \times 100 \\
 &= 0.294\%
 \end{aligned}$$

4.2.2 การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

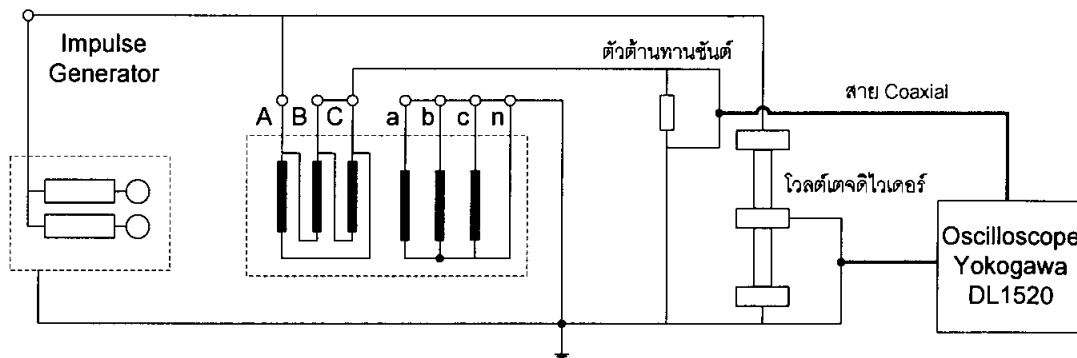
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ของ Passoni Villa มีจำนวน 2 ชั้น สามารถสะสมประจุได้ชั้นละ 100kV รวมความสามารถในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ 200kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ชุดควบคุมการขึ้นแรงดัน และปรับระยะเก็บใช้ชุดควบคุมของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3) ชุดตรวจจับรูปคลื่นอิมพัลส์ ใช้ออสซิลโลสโคปของ Yokogawa DL1520
- 4) อิมพัลส์โวลต์เดจดีไวเดอร์ มีอัตราส่วน 20880 : 1
- 5) ตัวต้านทานชนิดค่า 4.32 Ω

วงจรทดสอบ



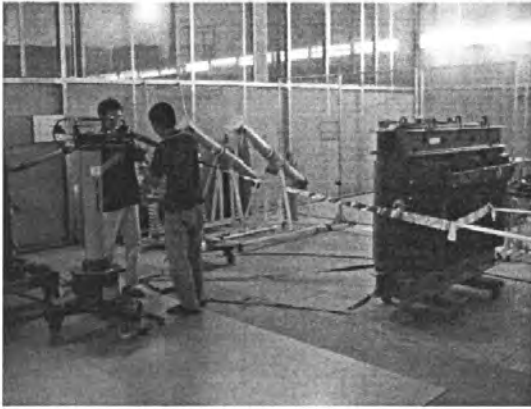
รูปที่ 4.23 วงจรทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ขั้นตอนการทดสอบ

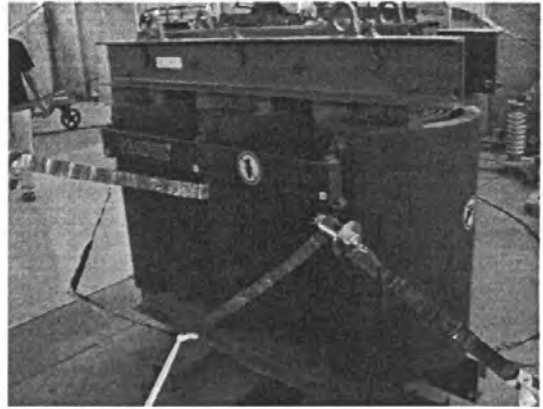
- 1) ต่อวงจรทดสอบตามรูป
- 2) ทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงสูงทุกเฟส โดยแต่ละเฟสจะทำการป้อนแรงดันลดทอนขนาด 60% ของแรงดันเต็ม 1 ครั้ง และป้อนแรงดันเต็มอีก 3 ครั้ง
- 3) บันทึกรูปคลื่นแรงดัน และรูปคลื่นกระแส เพื่อนำมาเปรียบเทียบ

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

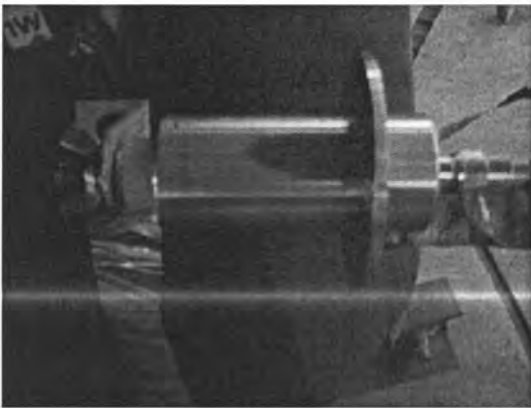
ชนิดแรงดัน	เฟสที่ทดสอบ	แรงดันที่ ต้องการ (kV)	แรงดันทดสอบ จริง (kV)	ตำแหน่ง แทป	เวลาหน้าคลื่น	เวลาทางคลื่น
ลดทอน	1U	40.000	40.100	5-6	1.14	48.75
	เต็ม	60.000	59.300	5-6	1.09	45.00
ลดทอน	1V	40.000	39.250	4-7	1.09	44.25
	เต็ม	60.000	58.500	4-7	1.12	44.00
ลดทอน	1W	40.000	39.700	3-8	1.25	53.00
	เต็ม	60.000	59.700	3-8	1.25	52.00



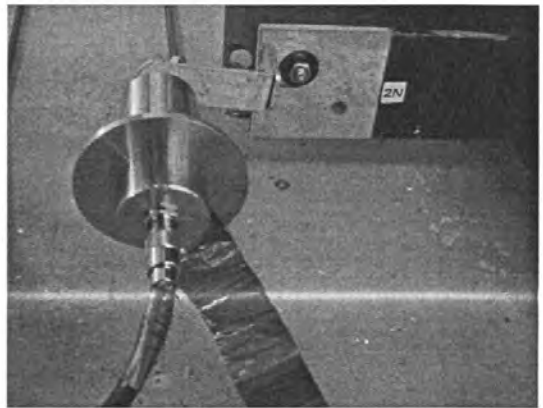
(ก)



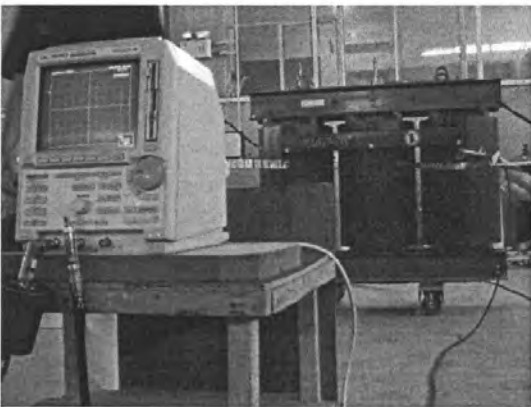
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.24 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

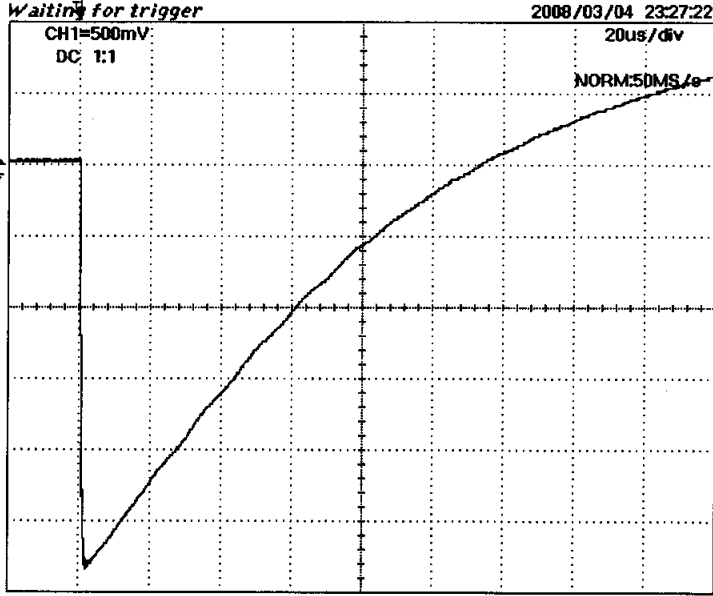
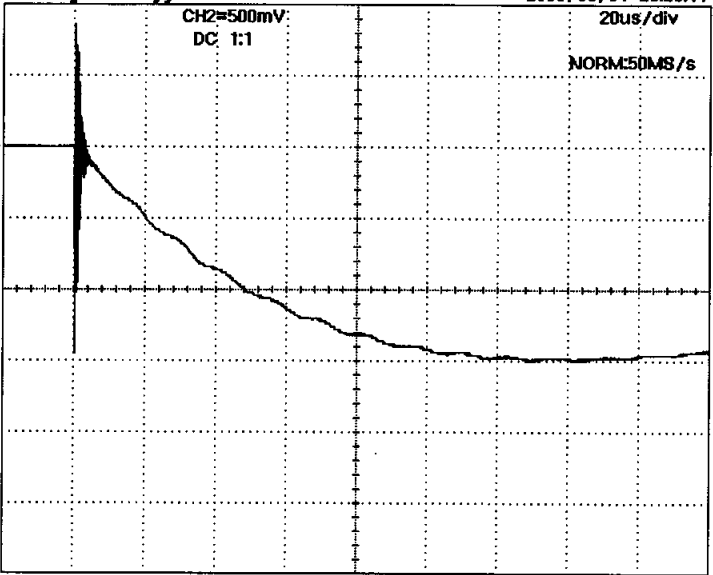
- (ก) ตรวจสอบ
- (ข) จัดระยะห่างของสาย เพื่อความปลอดภัย
- (ค) การต่อตัวต้านทานชนิด ทางด้านแรงดันสูง
- (ง) การต่อตัวต้านทานชนิด ทางด้านแรงดันต่ำ
- (จ) ต่อออสซิลโลสโคป เพื่อบันทึกรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

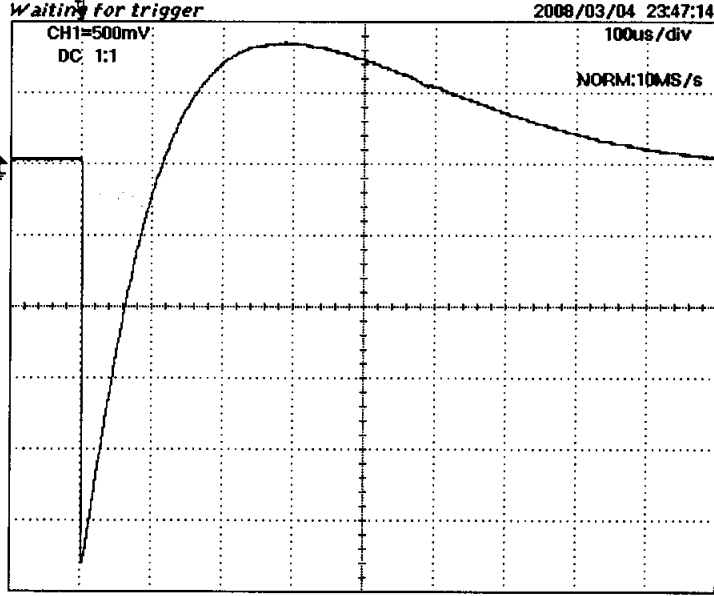
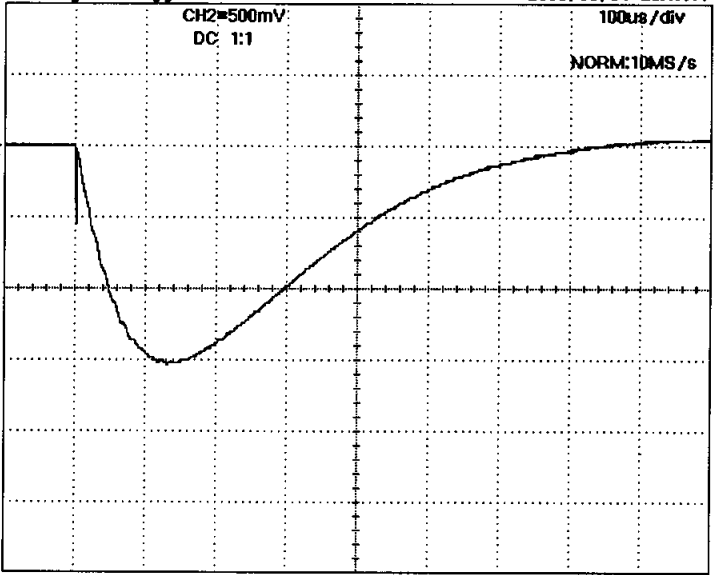
ตารางที่ 4.14 รูปคลื่นอิมพัลส์ที่บันทึกได้

ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : 1U แทป : 5-6 T/Div 20 μ s แรงดัน: ลดทอน ต้องการ: 40 kV ทดสอบ: 40.1 kV หน้าคลื่น: 1.1356 μ s หางคลื่น: 48.75 μ s	<p>Stopped 2008/03/04 22:52:59 CH1=500mV: 20us/div DC 1:1 (20us/div) NORM50MS/s</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 1K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>
ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
รูปคลื่น: กระแส เฟส : 1U แทป : 5-6 T/Div 20 μ s แรงดัน: ลดทอน ต้องการ: 40 kV ทดสอบ: 40.1 kV	<p>Stopped 2008/03/04 22:45:47 CH2=500mV: 20us/div DC 1:1 (20us/div) NORM50MS/s</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 1K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>

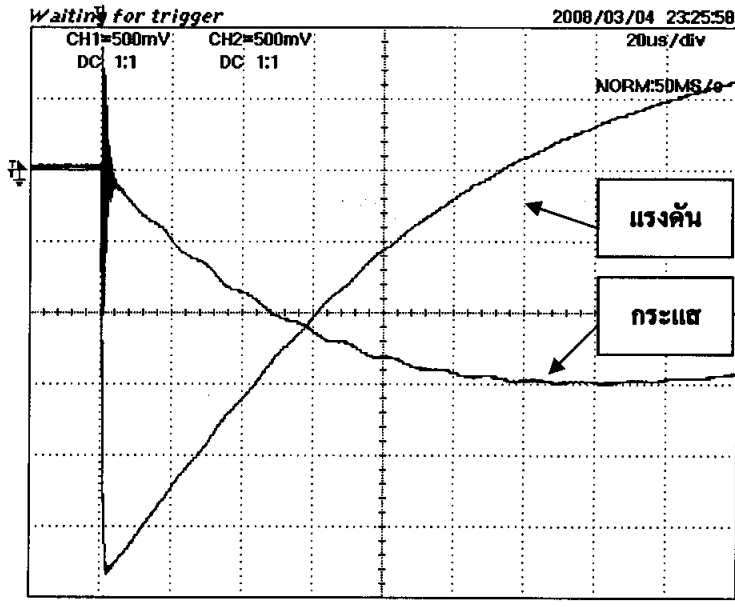
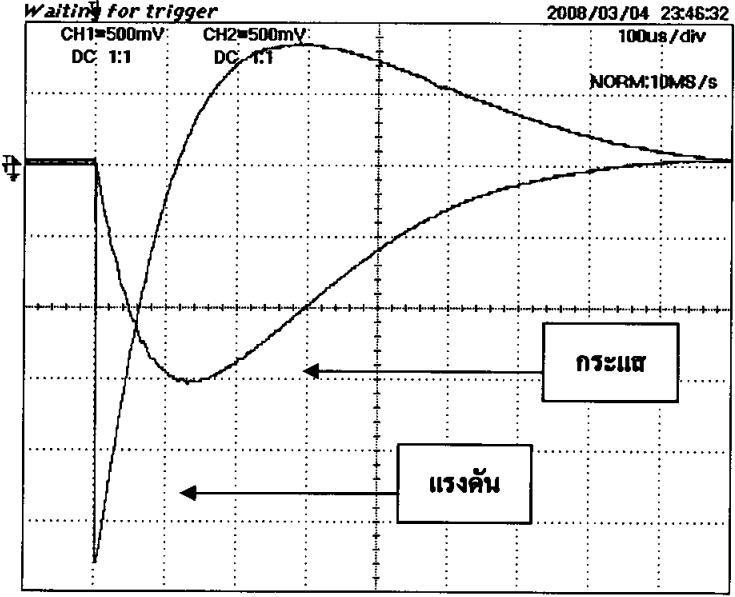
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงดันสูง รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : 1U แทป : 5-6 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 59.3 kV หน้าคลื่น: 1.09 μ s หางคลื่น: 45.00 μ s	<p style="text-align: center;">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 250 Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>
ขดลวดแรงดันสูง รูปคลื่น: กระแส เฟส : 1U แทป : 5-6 T/Div 20 μ s แรงดัน: เต็ม ต้องการ: 60 kV ทดสอบ: 59.3 kV	<p style="text-align: center;">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 250 Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>

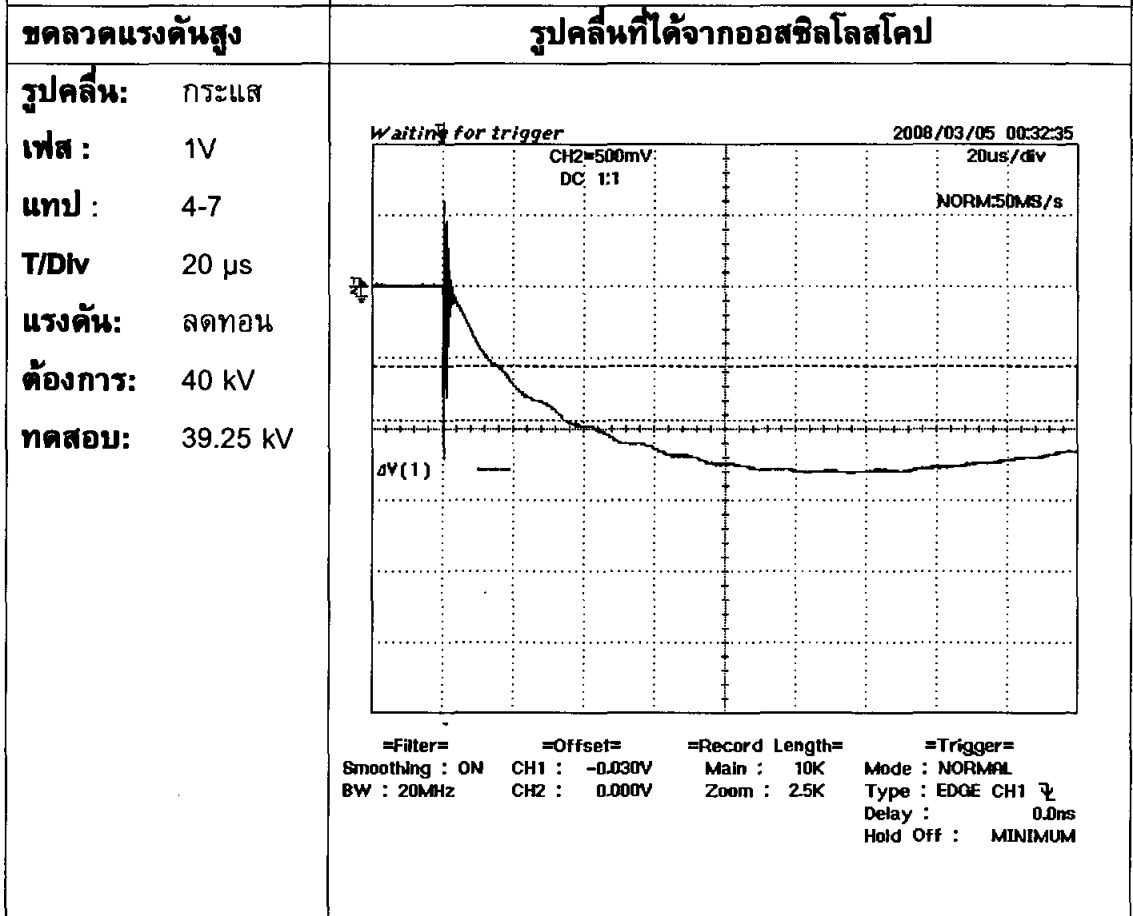
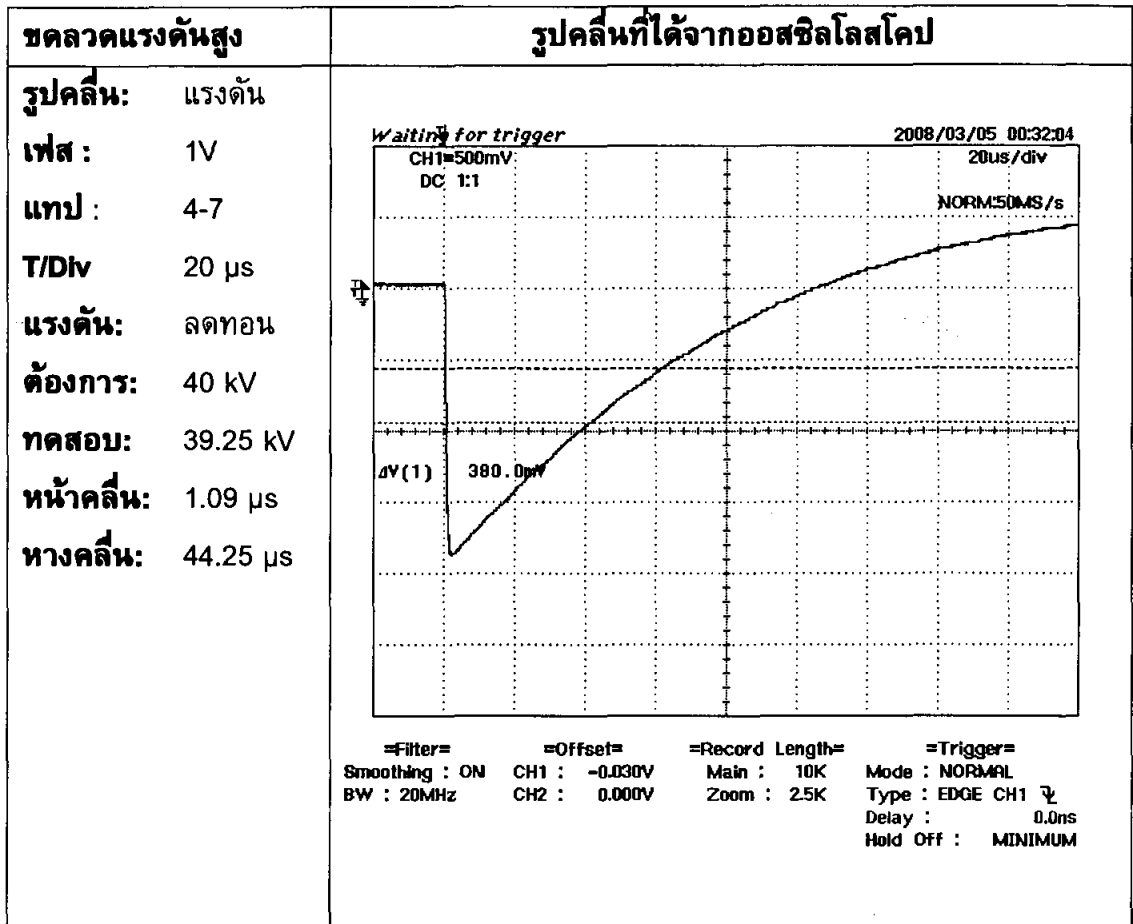
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส : 1U</p> <p>แทป : 5-6</p> <p>T/Div 100 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 59.3 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.09 μs</p> <p>หางคลื่น: 45.00 μs</p>	<p align="center">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p>CH1=500mV DC 1:1 2008/03/04 23:47:14 100us/div NORM:10MS/s</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 200 Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>
<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส : 1U</p> <p>แทป : 5-6</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 59.3 kV</p>	<p align="center">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p>CH2=500mV DC 1:1 2008/03/04 23:47:44 100us/div NORM:10MS/s</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 200 Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>

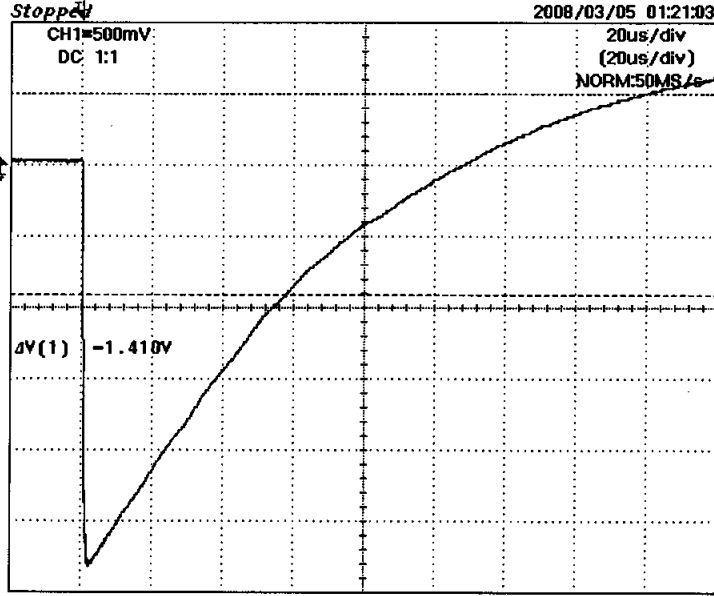
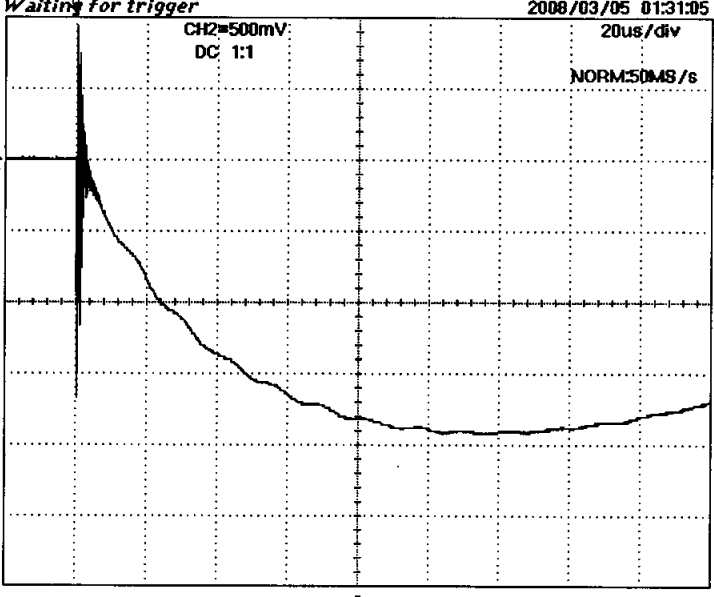
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: เปรียบเทียบ</p> <p>เฟส : 1U</p> <p>แทป : 5-6</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 59.3 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.09 μs</p> <p>หางคลื่น: 45.00 μs</p>	<p align="center">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p align="center">=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 250 Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>
<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: เปรียบเทียบ</p> <p>เฟส : 1U</p> <p>แทป : 5-6</p> <p>T/Div 100 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 59.3 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.09 μs</p> <p>หางคลื่น: 45.00 μs</p>	<p align="center">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p align="center">=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 200 Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>

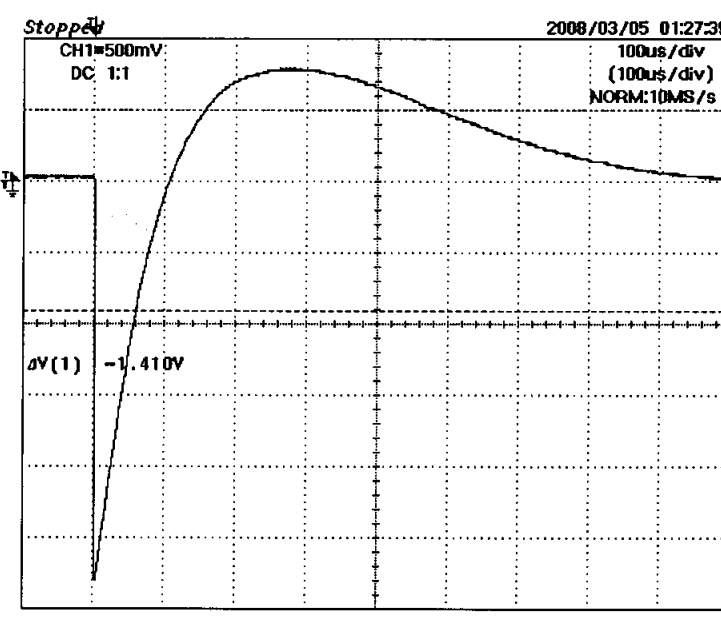
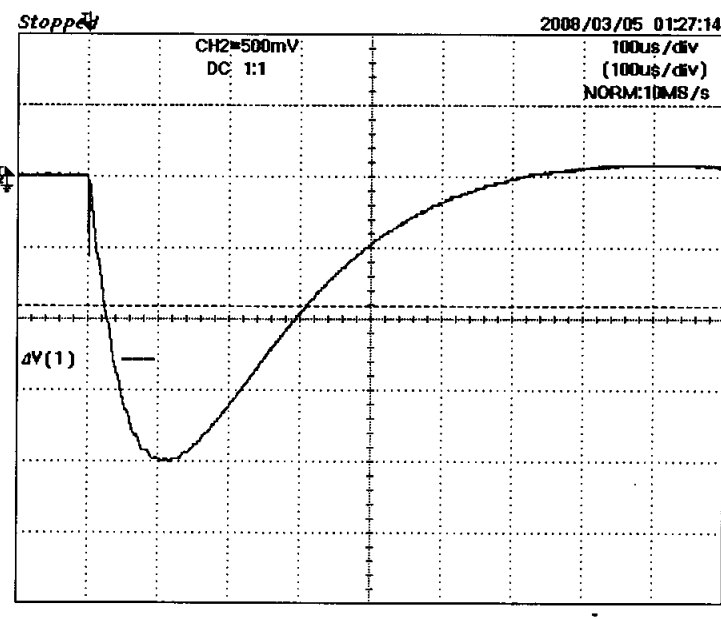
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



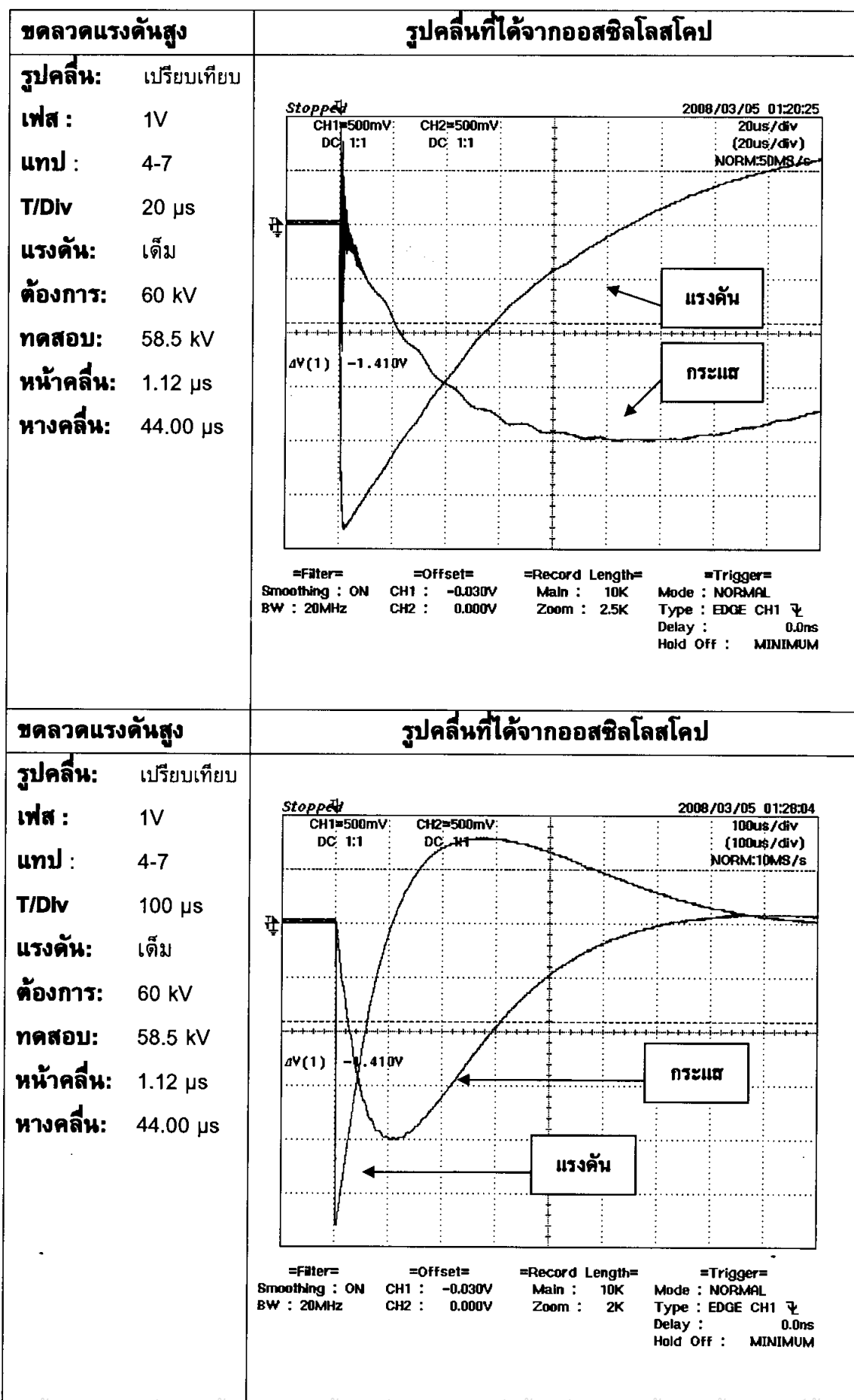
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส : 1V</p> <p>แทป : 4-7</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 58.5 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.12 μs</p> <p>หางคลื่น: 44.00 μs</p>	<p align="center">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p>Stopped 2008/03/05 01:21:03</p> <p>CH1=500mV: 20us/div DC 1:1 (20us/div) NORM:50MS/s</p> <p>$\Delta V(1)$ -1.410V</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 2.5K Type : EDGE CH1 \downarrow Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>
<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส : 1V</p> <p>แทป : 4-7</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 58.5 kV</p>	<p align="center">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p>Waiting for trigger 2008/03/05 01:31:05</p> <p>CH2=500mV: 20us/div DC 1:1 (20us/div) NORM:50MS/s</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 2.5K Type : EDGE CH1 \downarrow Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>

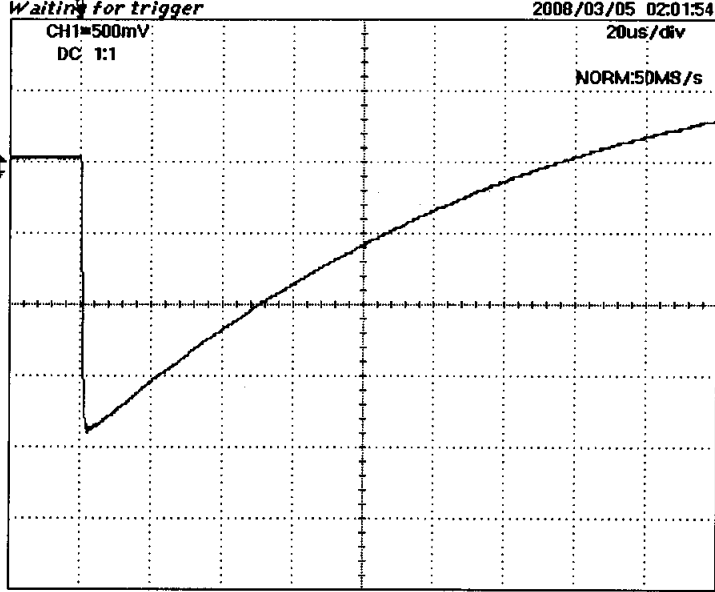
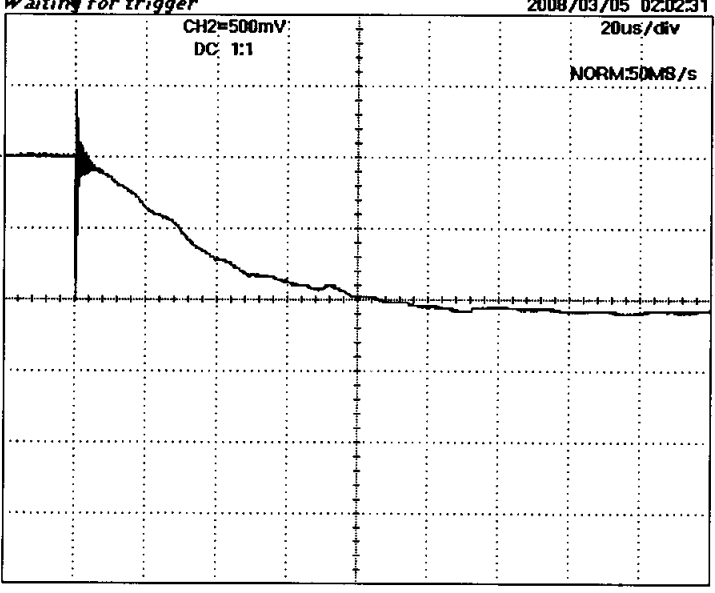
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
<p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส : 1V</p> <p>แทป : 4-7</p> <p>T/Div 100 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 58.5 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.12 μs</p> <p>หางคลื่น: 44.00 μs</p>	 <p>Stopped 2008/03/05 01:27:39</p> <p>CH1=500mV: 100μs/div (100μs/div) NORM:10MS/s</p> <p>DC 1:1</p> <p>$\Delta V(1)$ -1.410V</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 2K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>
ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
<p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส : 1V</p> <p>แทป : 4-7</p> <p>T/Div 100 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 58.5 kV</p>	 <p>Stopped 2008/03/05 01:27:14</p> <p>CH2=500mV: 100μs/div (100μs/div) NORM:10MS/s</p> <p>DC 1:1</p> <p>$\Delta V(1)$ -1.410V</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 2K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>

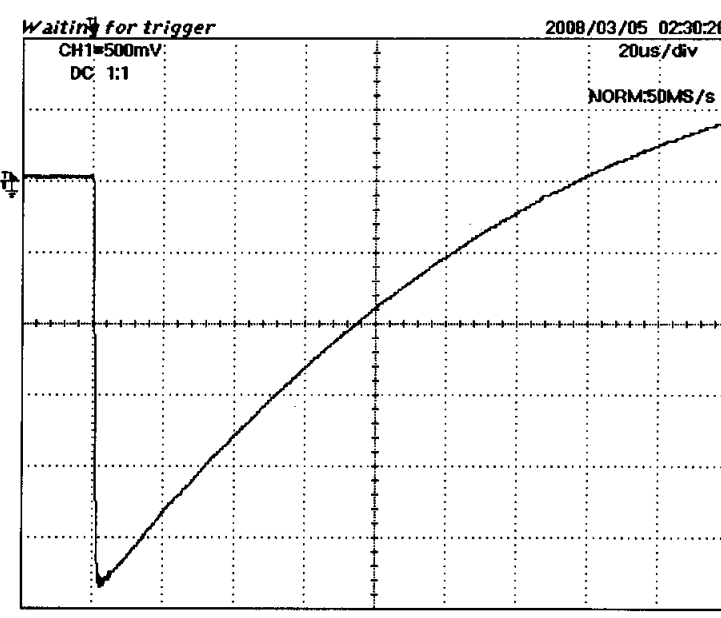
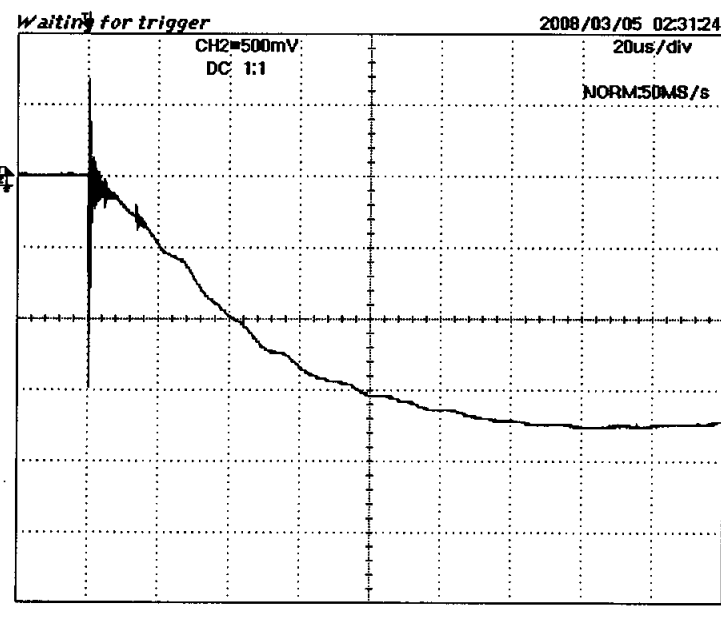
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



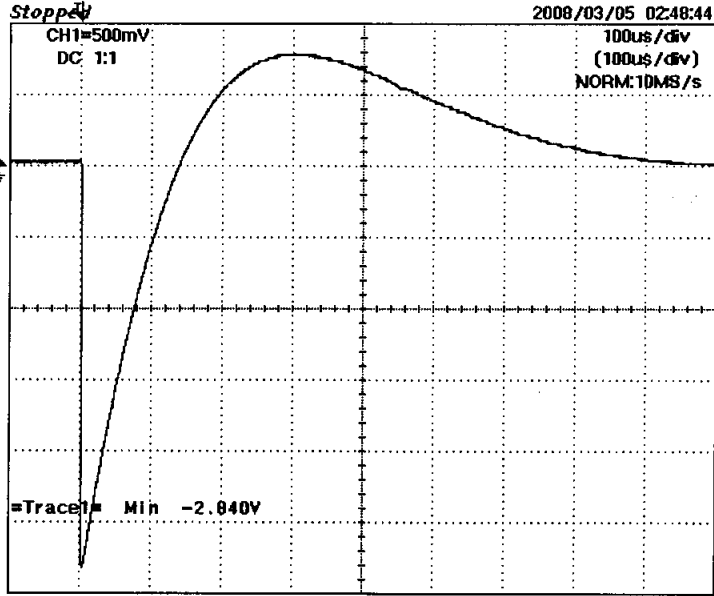
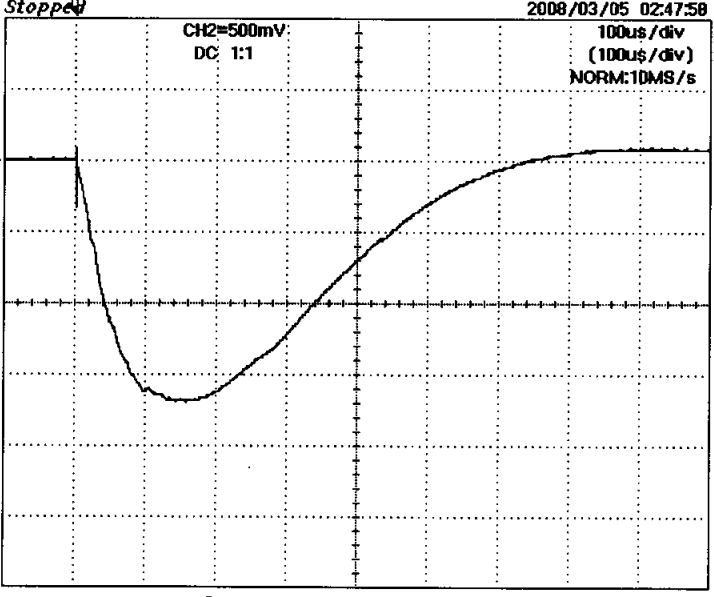
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : 1W แทป : 3-8 T/Div 20 μ s แรงดัน: ลดทอน ต้องการ: 40 kV ทดสอบ: 39.70 kV หน้าคลื่น: 1.25 μ s หางคลื่น: 53.00 μ s	 <p>Waiting for trigger 2008/03/05 02:01:54 CH1=500mV 20us/div DC 1:1 NORM:50MS/s</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 5K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>
ขดลวดแรงดันสูง	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
รูปคลื่น: กระแส เฟส : 1W แทป : 3-8 T/Div 20 μ s แรงดัน: ลดทอน ต้องการ: 40 kV ทดสอบ: 39.70 kV	 <p>Waiting for trigger 2008/03/05 02:02:31 CH2=500mV 20us/div DC 1:1 NORM:50MS/s</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 5K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>

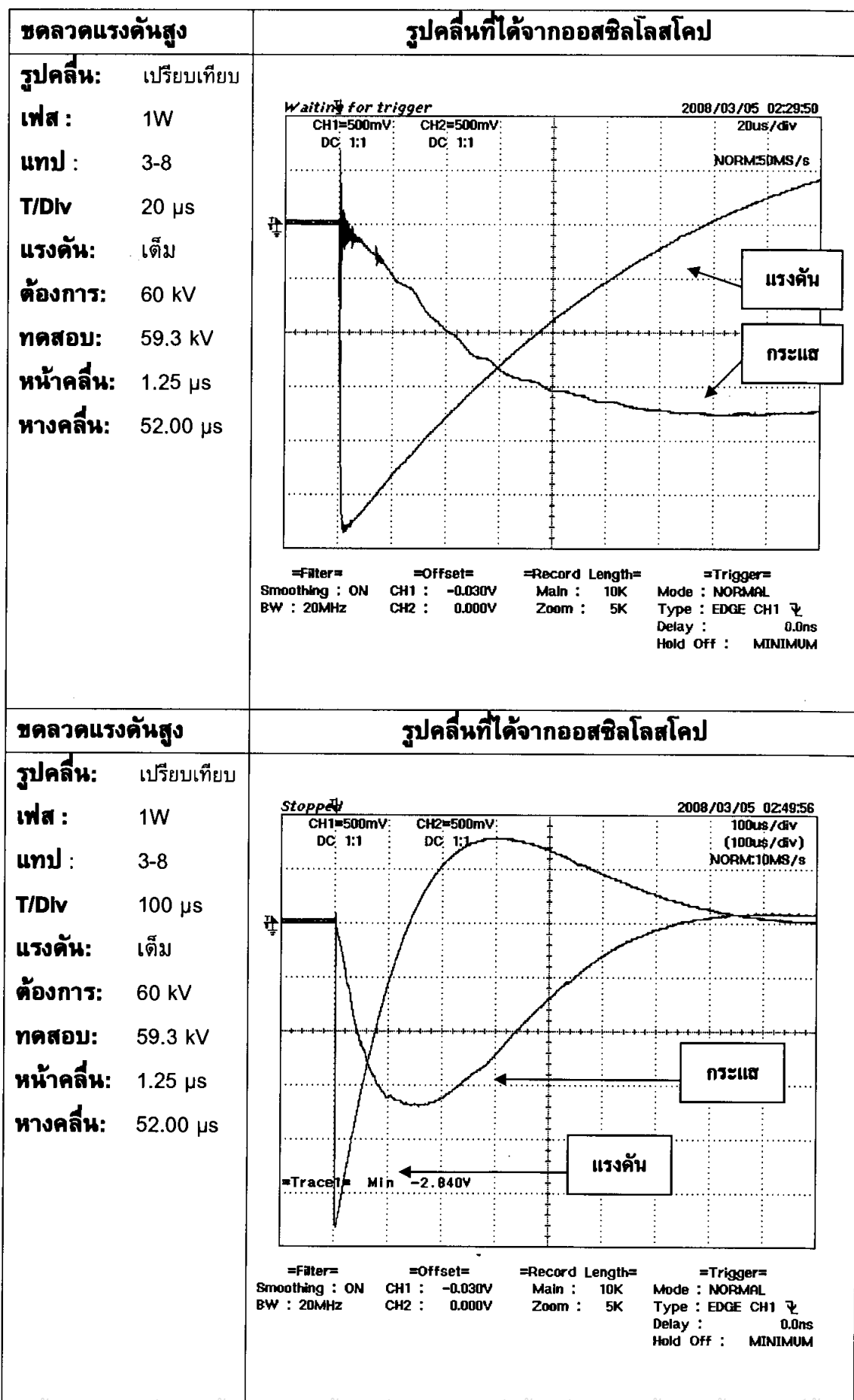
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส : 1W</p> <p>แทป : 3-8</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 59.3 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.25 μs</p> <p>หางคลื่น: 52.00 μs</p>	<p align="center">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p>Waiting for trigger 2008/03/05 02:30:26 CH1=500mV: 20us/div DC 1:1 NORM:50MS/s</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 5K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>
<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส : 1W</p> <p>แทป : 3-8</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 59.3 kV</p>	<p align="center">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p>Waiting for trigger 2008/03/05 02:31:24 CH2=500mV: 20us/div DC 1:1 NORM:50MS/s</p> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 5K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>

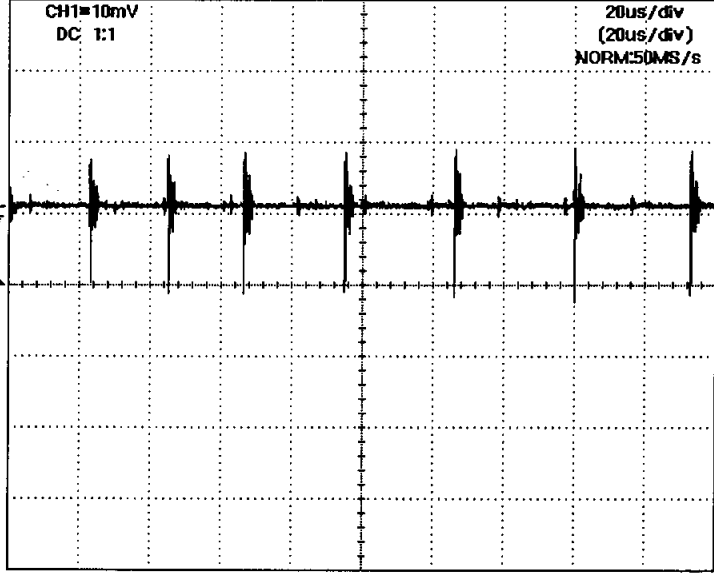
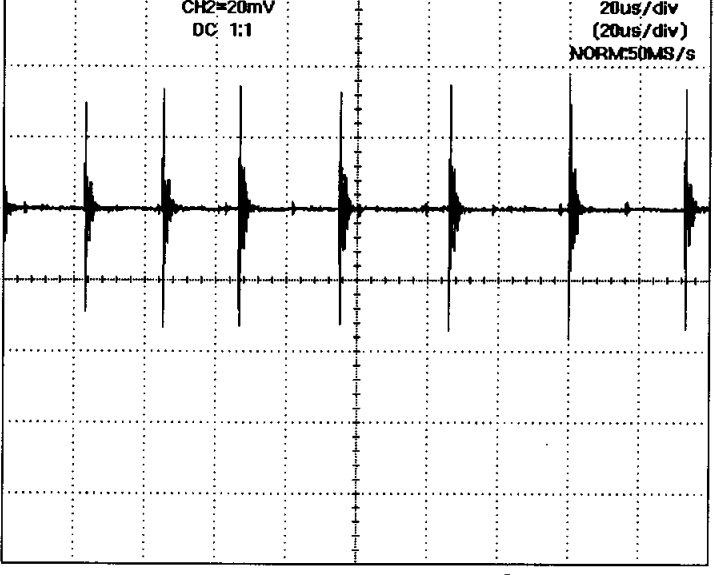
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส : 1W</p> <p>แทป : 3-8</p> <p>T/Div 100 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 59.3 kV</p> <p>หน้าคลื่น: 1.25 μs</p> <p>หางคลื่น: 52.00 μs</p>	<p style="text-align: center;">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p style="text-align: center;">=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 5K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>
<p>ขดลวดแรงดันสูง</p> <p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส : 1W</p> <p>แทป : 3-8</p> <p>T/Div 100 μs</p> <p>แรงดัน: เต็ม</p> <p>ต้องการ: 60 kV</p> <p>ทดสอบ: 59.3 kV</p>	<p style="text-align: center;">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p>  <p style="text-align: center;">=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : -0.030V Main : 10K Mode : NORMAL BW : 20MHz CH2 : 0.000V Zoom : 5K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>

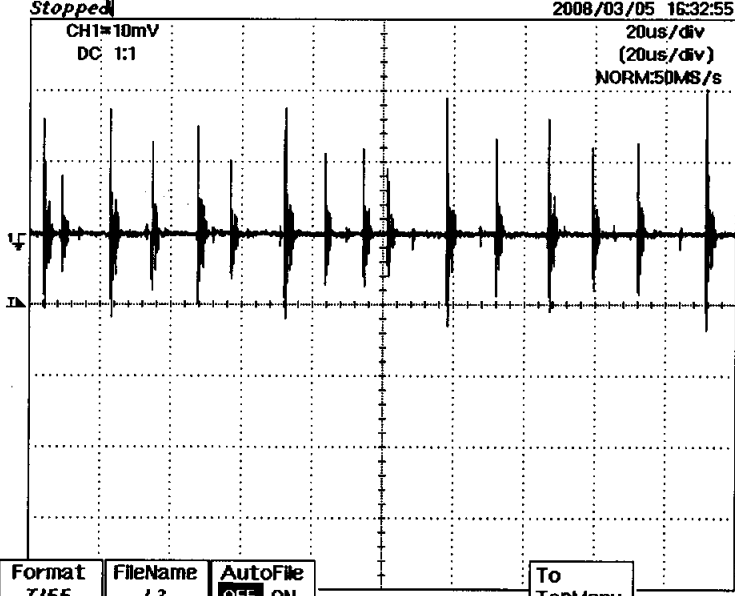
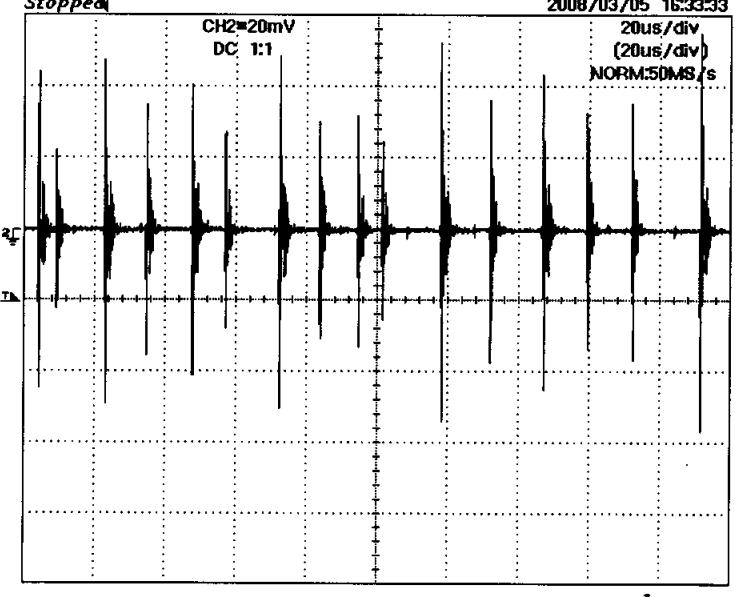
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



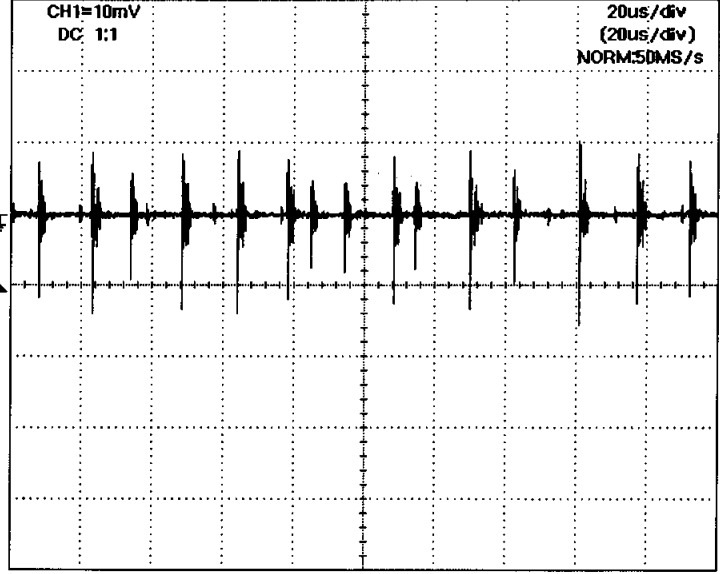
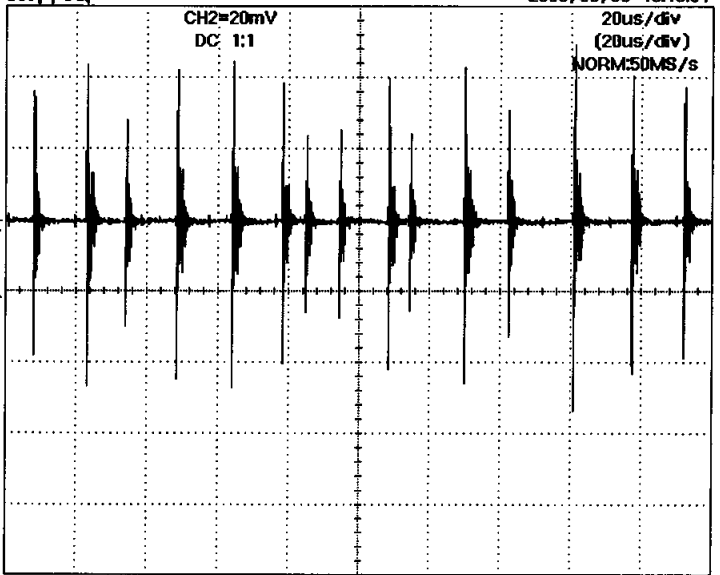
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นว่าเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์และขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงดันต่ำ	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : 2U T/Div 20 μ s ต้องการ: 1 kV	<div style="text-align: right;">2008/03/05 16:51:52</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Stopped</p> <p>CH1=10mV DC 1:1</p> <p style="text-align: right;">20us/div (20us/div) NORM:50MS/s</p>  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div> <p>=Filter=</p> <p>Smoothing : ON</p> <p>BW : 20MHz</p> </div> <div> <p>=Offset=</p> <p>CH1 : 0.0000V</p> <p>CH2 : 0.0000V</p> </div> <div> <p>=Record Length=</p> <p>Main : 10K</p> <p>Zoom : 5K</p> </div> <div> <p>=Trigger=</p> <p>Mode : SINGLE</p> <p>Type : EDGE CH1 ∇</p> <p>Delay : 0.0ns</p> <p>Hold Off : MINIMUM</p> </div> </div>
ขดลวดแรงดันต่ำ	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
รูปคลื่น: กระแส เฟส : 2U T/Div 20 μ s ต้องการ: 1 kV	<div style="text-align: right;">2008/03/05 16:52:19</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Stopped</p> <p>CH2=20mV DC 1:1</p> <p style="text-align: right;">20us/div (20us/div) NORM:50MS/s</p>  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div> <p>=Filter=</p> <p>Smoothing : ON</p> <p>BW : 20MHz</p> </div> <div> <p>=Offset=</p> <p>CH1 : 0.0000V</p> <p>CH2 : 0.0000V</p> </div> <div> <p>=Record Length=</p> <p>Main : 10K</p> <p>Zoom : 5K</p> </div> <div> <p>=Trigger=</p> <p>Mode : SINGLE</p> <p>Type : EDGE CH1 ∇</p> <p>Delay : 0.0ns</p> <p>Hold Off : MINIMUM</p> </div> </div>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>ขดลวดแรงดันต่ำ</p> <p>รูปคลื่น: แรงดัน</p> <p>เฟส : 2V</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>ต้องการ: 1 kV</p>	<p style="text-align: center;">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p> <div style="text-align: right;">2008/03/05 16:32:55</div>  <p>Stopped CH1=10mV DC 1:1 20us/div (20us/div) NORM:50MS/s</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Format TIFF</td> <td>FileName L3</td> <td>AutoFile OFF ON</td> <td>To TopMenu</td> </tr> </table> <p>=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= Smoothing : ON CH1 : 0.0000V Main : 10K Mode : SINGLE BW : 20MHz CH2 : 0.0000V Zoom : 5K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>	Format TIFF	FileName L3	AutoFile OFF ON	To TopMenu
Format TIFF	FileName L3	AutoFile OFF ON	To TopMenu		
<p>ขดลวดแรงดันต่ำ</p> <p>รูปคลื่น: กระแส</p> <p>เฟส : 2V</p> <p>T/Div 20 μs</p> <p>ต้องการ: 1 kV</p>	<p style="text-align: center;">รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป</p> <div style="text-align: right;">2008/03/05 16:33:33</div>  <p>Stopped CH2=20mV DC 1:1 20us/div (20us/div) NORM:50MS/s</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>=Filter=</td> <td>=Offset=</td> <td>=Record Length=</td> <td>=Trigger=</td> </tr> </table> <p>Smoothing : ON CH1 : 0.0000V Main : 10K Mode : SINGLE BW : 20MHz CH2 : 0.0000V Zoom : 5K Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM</p>	=Filter=	=Offset=	=Record Length=	=Trigger=
=Filter=	=Offset=	=Record Length=	=Trigger=		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงดันต่ำ	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
รูปคลื่น: แรงดัน เฟส : 2W T/Div 20 μ s ต้องการ: 1 kV	<div style="text-align: right;">2008/03/05 16:42:34</div> <div style="text-align: center;"> Stopped CH1=10mV DC 1:1 20us/div (20us/div) NORM:50MS/s </div>  <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div> =Filter= Smoothing : ON BW : 20MHz </div> <div> =Offset= CH1 : 0.0000V CH2 : 0.0000V </div> <div> =Record Length= Main : 10K Zoom : 5K </div> <div> =Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold OFF : MINIMUM </div> </div>
ขดลวดแรงดันต่ำ	รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป
รูปคลื่น: กระแส เฟส : 2W T/DIV 20 μ s ต้องการ: 1 kV	<div style="text-align: right;">2008/03/05 16:43:01</div> <div style="text-align: center;"> Stopped CH2=20mV DC 1:1 20us/div (20us/div) NORM:50MS/s </div>  <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div> =Filter= Smoothing : ON BW : 20MHz </div> <div> =Offset= CH1 : 0.0000V CH2 : 0.0000V </div> <div> =Record Length= Main : 10K Zoom : 5K </div> <div> =Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold OFF : MINIMUM </div> </div>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานโครงการ

จากการที่ได้ทำการศึกษาทฤษฎีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ามาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องพร้อมทั้งศึกษาจากการปฏิบัติงานจริง จึงได้ทำการทดลองออกแบบการทดสอบขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ทำการทดสอบนั้นเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 400 kVA มีพิกัดแรงดัน 24000/12000 : 416 V ความถี่ 50 Hz และมีกลุ่มของเวคเตอร์เป็นชนิด Dyn11 โดยการทดสอบในหัวข้อต่างๆ นั้น ได้รับความอนุเคราะห์ให้ในด้านสถานที่และอุปกรณ์การทดสอบจากบริษัทเอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าข้างต้น มีผลการทดสอบโดยรวมคือ ผลการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันและกลุ่มของเวคเตอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวดพบว่าบริเวณจุดเชื่อมต่อต่างๆ ของหม้อแปลงไม่มีจุดเสียหายใดๆ การวัดค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าและมีภาระทางไฟฟ้าพบว่า ณ แอปพิกัด หม้อแปลงไฟฟ้าลูกนี้มีค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า 0.9271 kW และมีค่ากระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าเป็น 0.8801% ของกระแสพิกัด ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าขณะมีภาระทางไฟฟ้าที่ระบบ 24 kV วัดได้ 4.751 kW และที่ระบบ 12 kV วัดได้ 4.7909 kW โดยมีค่าแรงดันขณะหม้อแปลงลัดวงจรที่ระบบ 24 kV เท่ากับ 1.087 kV และระบบ 12 kV มีค่า 0.539 kV ในส่วนของการทดสอบความคงทนของฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น ในทุกหัวข้อการทดสอบได้ผ่านการทดสอบทั้งหมด นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดค่าต่างๆ เช่น ค่าฮาร์โมนิกของกระแสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า ค่าความต้านทานของฉนวน และวัดค่าประกอบการกระจายตัวของค่าความเก็บประจุในระบบฉนวน เพื่อเก็บไว้ใช้ในการอ้างอิงสภาพของหม้อแปลงในภายหน้า

โดยผลต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบนั้น เมื่อนำมาเทียบกับผลการทดสอบของบริษัท เอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด จัดได้ว่ามีผลการทดสอบที่สอดคล้องกัน ซึ่งแสดงได้ว่ากระบวนการทดสอบที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมานั้นมีความถูกต้องตามมาตรฐาน

นอกจากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่บริษัทเอบีบี (ประเทศไทย) จำกัดแล้ว ยังได้ทำการออกแบบการทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบหม้อแปลงประเภทฉนวนแห้งในห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยได้ทำการทดสอบ 2 ประเภทการทดสอบ คือ การวัดค่าอัตราส่วนแรงดันและกลุ่มของเวคเตอร์ และการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยในการทดสอบทั้งสองหัวข้อสามารถผ่านการทดสอบไปได้ด้วยดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากทฤษฎีและตัวอย่างการทดสอบ ผู้ที่สนใจสามารถใช้เป็นตัวอย่างในทดสอบและการออกแบบการทดสอบได้
2. ในการทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้านั้น นอกจากจะต้องมีความรู้ทางทฤษฎีแล้ว จำเป็นจะต้องมีประสบการณ์ในการทดสอบหม้อแปลง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ
3. จากทฤษฎีต่างๆ ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ผู้ที่สนใจสามารถนำทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60076-1 Edition 2.1 2000-04, Power transformer – Part 1: General
- [2] IEC 60076-2 Second edition 1993-94, Power transformer – Part 2: Temperature Rise
- [3] IEC 60076-3 Second edition 2003-04, Power transformer – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearance in air
- [4] IEC 60076-4 First edition 2002-06, Power transformer – Part 4: Guide to lightning impulse and switching impulse testing - Power transformer and Reactor
- [5] IEC 60076-5 Second edition 2000-07, Power transformer – Part 5: Ability to withstand short circuit
- [6] IEC 60076-8 First edition 1997-10, Power transformer – Part 8: Application guide
- [7] IEC 60076-10 First edition 2001-05, Power transformer – Part 10: Determination of sound levels
- [8] IEC 60076-10-1 First edition 2005-10, Power transformer – Part 10-1: Determination of sound levels – Application guide
- [9] IEC 60076-11 First edition 2004-05, Power transformer – Part 11: Dry-type transformer
- [10] ABB – Testing of transformer book
- [11] ดร.สำราญ สัมผัสสะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” ; พิมพ์ครั้งที่ 3 มีนาคม 2549

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TEST REPORT

Asea Brown Boveri

Report No.
060833

Page 1 of 17

Customer:

KMITL

Customer Ref.:

Customer Specification:

Test Object:

Highest Rated Power:

Voltage:

Highest Rated Current:

BIL:

Connection:

Phase Displacement:

Frequency:

Cooling Condition(s):

Oil Temp. Rise:

Winding Temp. Rise:

Serial No.: 060833

3-Phase Transformer

0.4(0.4) / 0.4 MVA

24 +0-4 x 2.5%(12 +0-4 x 2.5%) / 0.416 kV

9.6225(19.245) / 555.14 A

125 / - kV

D / yo

Dyn 11

50 Hz

ONAN

60 °C

65 °C

ABB Reference:

Product Reference:

Order No.:

060833

Name Plate No.:

Inspection and Test Plan:

Performed and Approved Tests:

Voltage Ratio

Winding Resistance

No Load Losses

Harmonics

Load Losses

Applied Voltage

Induced Voltage

Insulation Resistance

Insulation Capacitance

Lightning Impulse

Applied Standards:

IEC 60076

Witnessed by:

Comments:

Factory:

Asea Brown Boveri

322 Moo 4 Bangpoo Industrial Estate.

Samutprakarn, Thailand

Test Department:

TD/TPT

Date of Issue:

15-Nov-2007

Issued by:

Pisit Sakjirarat

Signature:

Approved by:

การศึกษานี้ดำเนินการโดย ABB Thailand และ ABB Power Grids Thailand. การศึกษาเหล่านี้จัดทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการประเมินและตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ABB เท่านั้น และไม่ถือเป็นคำแนะนำหรือการรับประกันใดๆ จาก ABB. การศึกษาเหล่านี้จัดทำขึ้นโดย ABB Thailand และ ABB Power Grids Thailand. การศึกษาเหล่านี้จัดทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการประเมินและตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ABB เท่านั้น และไม่ถือเป็นคำแนะนำหรือการรับประกันใดๆ จาก ABB.



TEST REPORT
Table Of Contents

Report No.
060833

Page 2 of 17

Serial No.: 060833

Summary	3
Voltage Ratio	4
Winding Resistance.....	5
No Load Losses.....	6
Harmonics	7
Load Losses.....	8
Applied Voltage	9
Induced Voltage	10
Insulation Resistance.....	11
Insulation Capacitance	12
Lightning Impulse	13
Rating Plate	17



TEST REPORT

Summary

Report No.
060833

Page 3 of 17

Serial No.: 060833**No Load Losses**

Voltage (%)	Tap Position	Power Base (MVA)	No Load Losses (kW)		Current	
			Measured	Guaranteed	Measured	Guaranteed
100	1 / -	0.4	0.9271	-	0.8799 %	-

Load Losses

Terminals	Connection (kV)	Tap Position	Power Base (MVA)	Losses at Ref. Temp.		Impedance at Ref. Temp.	
				Measured (kW)	Guaranteed (kW)	Measured (%)	Guaranteed (%)
A-B-C(24) a-b-c-n	24 / 0.416	1 / -	0.4	4.7479	-	4.49	-
A-B-C(12) a-b-c-n	12 / 0.416	1 / -	0.4	4.7891	-	4.48	-

เอกสารนี้ Test Date: 15-Nov-2007 Test Engineer: Pisit Sakjirarat Test Department: TD/TPT



TEST REPORT

Voltage Ratio

Report No.
060833

Page 4 of 17

Serial No.: 060833

Test Condition: 24 kV
 First Terminals: A-B-C(24)
 Second Terminals: a-b-c-n
 Phase Displacement: Dyn11

Tap Position		Rated Voltage (kV)		Measured Ratio			Calculated Ratio (with Multiplier)	Maximum Difference (%)
First Terminals	Second Terminals	First Terminals	Second Terminals	A-C n-c	B-A n-a	C-B n-b		
1	-	24.000	0.41600	99.94	99.95	99.94	99.93	0.02
2	-	23.400	0.41600	97.48	97.48	97.48	97.43	0.06
3	-	22.800	0.41600	95.02	95.02	95.02	94.93	0.10
4	-	22.200	0.41600	92.56	92.56	92.56	92.43	0.14
5	-	21.600	0.41600	90.10	90.10	90.09	89.93	0.18

Test Condition: 12 kV
 First Terminals: A-B-C(12)
 Second Terminals: a-b-c-n
 Phase Displacement: Dyn11

Tap Position		Rated Voltage (kV)		Measured Ratio			Calculated Ratio (with Multiplier)	Maximum Difference (%)
First Terminals	Second Terminals	First Terminals	Second Terminals	A-C n-c	B-A n-a	C-B n-b		
1	-	12.000	0.41600	49.97	49.97	49.96	49.96	0.01
2	-	11.700	0.41600	48.73	48.73	48.73	48.71	0.04
3	-	11.400	0.41600	47.51	47.51	47.51	47.46	0.09
4	-	11.100	0.41600	46.27	46.27	46.27	46.22	0.13
5	-	10.800	0.41600	45.04	45.04	45.04	44.97	0.17

Test Date:
15-Nov-2007

Test Engineer:
Pisit Sakjirarat

Test Department:
TD/TPT

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของทางราชการ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายที่เกี่ยวข้อง



TEST REPORT

Winding Resistance

Report No.
060833

Page 5 of 17

Serial No.: 060833

Reference Temperature: 75.0 °C
 Tested Terminal Names: A-B-C(24)
 Average Oil Temperature: 30.3 °C

Tap Positions	Resistance Between Terminals (Ω)				Average Resistance (Ω/Phase)	Resistance at Reference Temp. (Ω/Phase)
	A-B	B-C	C-A			
1	13.942	13.932	13.953		20.913	24.442
2	13.560	13.547	13.572		20.340	23.771
3	13.176	13.162	13.182		19.760	23.094
4	12.792	12.781	12.801		19.187	22.424
5	12.405	12.386	12.413		18.602	21.740

Reference Temperature: 75.0 °C
 Tested Terminal Names: A-B-C(12)
 Average Oil Temperature: 30.3 °C

Tap Positions	Resistance Between Terminals (Ω)				Average Resistance (Ω/Phase)	Resistance at Reference Temp. (Ω/Phase)
	A-B	B-C	C-A			
1	3.4957	3.4909	3.4988		5.2427	6.1272
2	3.4016	3.3941	3.4041		5.0999	5.9603
3	3.3042	3.2640	3.3066		4.9374	5.7704
4	3.2079	3.2009	3.2102		4.8095	5.6209
5	3.1105	3.1028	3.1128		4.6631	5.4497

Reference Temperature: 75.0 °C
 Tested Terminal Names: a-b-c-n
 Average Oil Temperature: 30.0 °C

Tap Positions	Resistance Between Terminals (Ω)				Average Resistance (Ω/Phase)	Resistance at Reference Temp. (Ω/Phase)
	a-b	b-c	c-a	a-n		
-	0.0038360	0.0038650	0.0038730	0.0019730	0.0019290	0.0022570

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของทางบริษัทฯ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 Test Date: 15-Nov-2007 Test Engineer: Pisit Sakjirarat Test Department: TD/TPT



TEST REPORT

No Load Losses

Report No.
060833

Page 6 of 17

Serial No.: 060833

Supplied Terminals: A-B-C(24)
1st Open Terminals: a-b-c-n
2nd Open Terminals:
Power Base: 0.4 MVA
Average Oil Temperature: 30.0 °C

Tap: 1
Tap: -
Tap:
Rated Power: 0.4 MVA

V _{appl.}	Measured Values							Losses ¹ (kW)	Current	Guaranteed	
	$\frac{V_{rms}}{1.11 \times V_{mean}}$	1.11xV _{mean} (kV)	V _{rms} (kV)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	Losses (kW)			Losses (kW)	Current
110 %		26.38	26.59	0.8165	0.7076	0.6924	1.593	1.581	7.678 %	-	-
100 %		23.99	24.08	0.0998	0.0781	0.0761	0.9306	0.9271	0.8799 %	-	-
90 %		21.61	21.68	0.0301	0.0212	0.0218	0.6437	0.6416	0.2532 %	-	-

¹ Corrected to Sinusoidal Wave

Test Date:
16-Nov-2007

Test Engineer:
Pisit Sakjirarat

Test Department:
TD/TPT



TEST REPORT

Harmonics

Report No.
060833

Page 7 of 17

Serial No.: 060833

Test Condition: 24 kV
Supplied Terminals: A-B-C(24)
Power Supply Frequency: 50 Hz

Tap: 1
Applied Voltage: 100 %

Harmonics In Current

Harmonics Number	% of Fundamental / Φ (°) at Terminal					
	A		B		C	
1	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00
3	1.78	178.21	30.70	89.53	34.06	-7.47
5	50.59	-88.06	51.39	-172.37	54.73	-18.36
7	29.09	-44.00	29.68	-137.88	31.82	27.23
9	0.20	0.00	5.57	-40.22	6.03	20.72
11	7.33	-132.08	7.30	56.04	8.05	9.26

Test Date:
16-Nov-2007

Test Engineer:
Pisit Sakjirarat

Test Department:
TD/TPT

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของทางบริษัทฯ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ท่านอื่นใดทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหาใดๆ และต้องส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้



TEST REPORT

Load Losses

Report No.
060833

Page 8 of 17

Serial No.: 060833

Test Condition: 24 kV
Supplied Terminals: A-B-C(24)
1st Shorted Terminals: a-b-c-n
2nd Shorted Terminals:

Reference Temperature: 75.0 °C
Power Base: 0.4 MVA

Connection			Supplied Winding V_{rated} (kV)	Measured			Corrected ¹			Guaranteed	
Supplied	1 st Shorted	2 nd Shorted		Temp. (°C)	Voltage (kV)	Current (A)	Losses (kW)	Losses ² (kW)	Imp. (%)	Losses (kW)	Imp. (%)
1	-		24.000	30.0	1.0666	9.6057	4.7476	4.7479	4.49	-	-
3	-		22.800	30.0	0.99570	10.127	4.8632	4.8635	4.41	-	-
5	-		21.600	30.0	0.92383	10.677	4.9957	4.9958	4.32	-	-

Test Condition: 12 kV
Supplied Terminals: A-B-C(12)
1st Shorted Terminals: a-b-c-n
2nd Shorted Terminals:

Reference Temperature: 75.0 °C
Power Base: 0.4 MVA

Connection			Supplied Winding V_{rated} (kV)	Measured			Corrected ¹			Guaranteed	
Supplied	1 st Shorted	2 nd Shorted		Temp. (°C)	Voltage (kV)	Current (A)	Losses (kW)	Losses ² (kW)	Imp. (%)	Losses (kW)	Imp. (%)
1	-		12.000	30.0	0.53343	19.229	4.7896	4.7891	4.48	-	-
3	-		11.400	30.0	0.49953	20.292	4.9169	4.9179	4.41	-	-
5	-		10.800	30.0	0.46433	21.420	5.0469	5.0482	4.33	-	-

¹ Corrected to Reference Temperature

² Corrected to Instrument Error

Test Date:
16-Nov-2007

Test Engineer:
Pisit Sakjirarat

Test Department:
TD/TPT

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของทางบริษัทฯ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ควรกรณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา หรือข้อมูลไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต



TEST REPORT
Applied Voltage

Report No.
060833

Page 9 of 17

Serial No.: 060833

Frequency (Hz): 50 Hz

Supplied Terminals	Voltage (kV)	Duration (s)
A-B-C	35.0	60
a-b-c-n	2.1	60



TEST REPORT
Induced Voltage

Report No.
060833

Page 10 of 17

Serial No.: 060833

Tap Position For HV Terminals: 1
Supplied Terminals: A-B-C(24)
Frequency (Hz): 200 Hz

Tested Terminals	Grounded Terminals	Voltage (kV)	Duration (s)	P.D. Measured
A-B-C(24)	n	33.600	30	-

เอกสารนี้ใช้เพื่อพิสูจน์ว่าผลิตภัณฑ์ของ ABB เป็นไปตามข้อกำหนดที่กำหนดไว้ในใบสั่งซื้อเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
Test Date: 16-Nov-2007 Test Engineer: Pisit Sakjirarat Test Department: TD/TPT
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้



TEST REPORT
Insulation Resistance

Report No.
060833

Page 11 of 17

Serial No.: 060833

Test Condition: winding insulation (in MΩ)
Applied Voltage: 2.5 kV

Tested	Terminals		Temp. (°C)	Measured Ratio	Time		
	Grounded	Guard			1 m 0s		
A-B-C(24)	A-B-C(12) Tank		30.0		4500.0		
A-B-C(12)	A-B-C(24) Tank		30.0		6200.0		
A-B-C(24) A-B-C(12)	Tank		30.0		5000.0		

Test Date:
15-Nov-2007

Test Engineer:
Pisit Sakjirarat

Test Department:
TD/TPT



TEST REPORT

Capacitance and Dissipation Factor Measurement

Report No.
060833

Page 12 of 17

Serial No.: 060833

Applied Voltage: 10 kV for HV winding and 1 kV for LV winding

Correction Factor (K): 1.25

Measured	Capacitance (pF)	Dissipation Factor (%)	
		at 30.0 °C	at 20.0 °C
C_{HL}	1398	0.21	0.17
C_{HG}	858.8	0.24	0.19
C_{LG}	2870	0.31	0.25
$C_{HG}+C_{LG}$	3746	0.34	0.27

Test Date

15-Nov-07

Test Engineer

Pisit Sakjirarat

Test Department

TD / TPT



TEST REPORT

Lightning Impulse

Report No.
060833

Page 13 of 17

Serial No.: 060833

HV Winding

Test Type ¹	Tested Terminal	Required Voltage (kV)	Test Voltage (kV)	Tap Position	Impulse Shape (μs)	Oscillogram Number
RFI	A	36.000	35.747	1	1.29/54.66	10
FI	A	60.000	60.090	1	1.26/54.75	11
FI	A	60.000	60.138	1	1.27/54.67	12
FI	A	60.000	60.034	1	1.28/54.72	13
RFI	B	36.000	36.124	3	1.42/53.83	14
FI	B	60.000	60.067	3	1.44/53.78	17
FI	B	60.000	60.072	3	1.44/53.80	18
FI	B	60.000	60.101	3	1.46/53.72	20
RFI	C	36.000	35.912	5	1.36/52.96	21
FI	C	60.000	60.167	5	1.38/53.03	22
FI	C	60.000	60.197	5	1.34/52.99	23
FI	C	60.000	60.169	5	1.37/53.06	24

¹ Legend:

ANSI:	IEC:
Reduced Full-Wave	Reduced Full-Impulse
Full-Wave	Full-Impulse
Reduced Chopped Wave	Reduced Chopped Impulse
Chopped Wave	Chopped Impulse
Reduced Front-of-Wave	
Front-of-Wave	

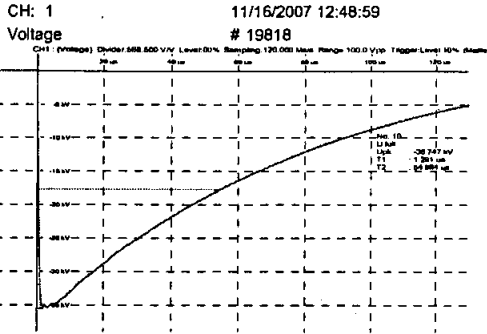
Test Date:
16-Nov-2007

Test Engineer:
Pisit Sakjirarat

Test Department:
TD/TPT

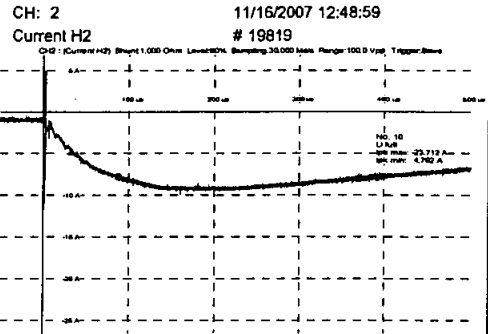
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของทางบริษัทฯ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางบริษัทฯ

PHASE A

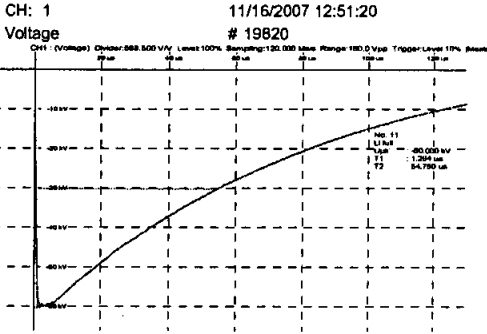


PHASE A

No. 10
LI full
lpk max: -23.712 A
lpk min: 4.762 A

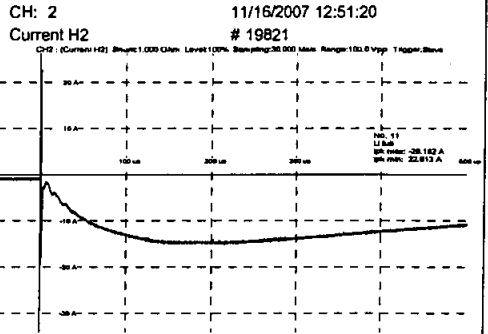


PHASE A

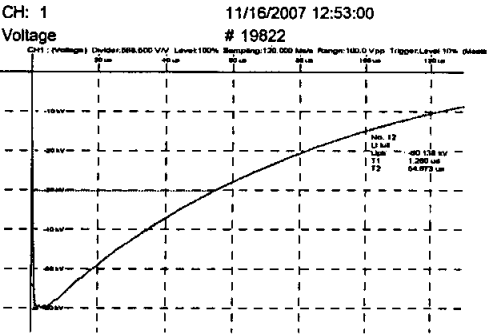


PHASE A

No. 11
LI full
lpk max: -29.182 A
lpk min: 22.613 A

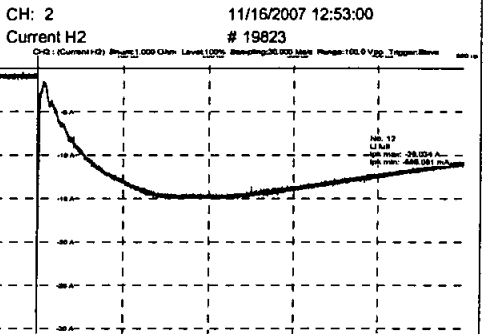


PHASE A

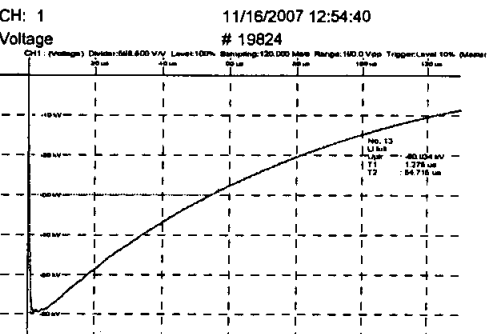


PHASE A

No. 12
LI full
lpk max: -28.034 A
lpk min: -586.081 mA

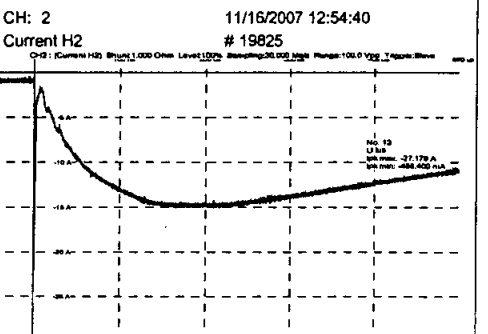


PHASE A



PHASE A

No. 13
LI full
lpk max: -27.179 A
lpk min: -488.400 mA

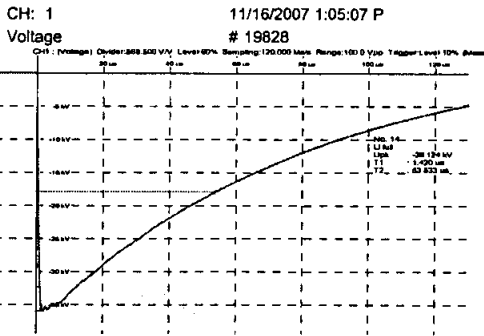


Test manager:

Test engineer:

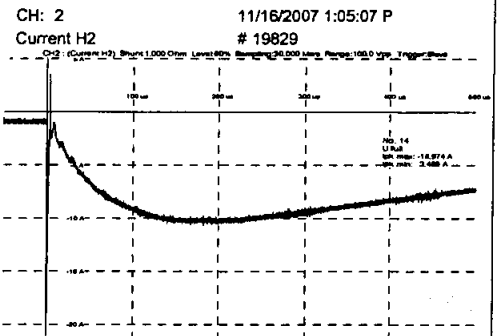
Inspector:

PHASE B

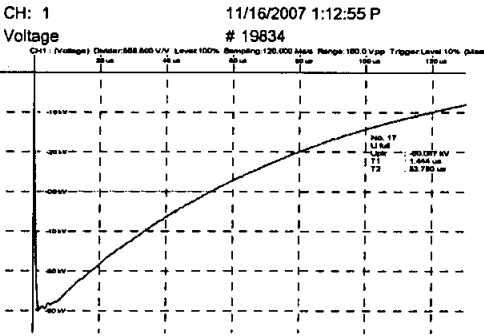


PHASE B

No. 14
LI full
Ipk max: -18.974 A
Ipk min: 3.468 A

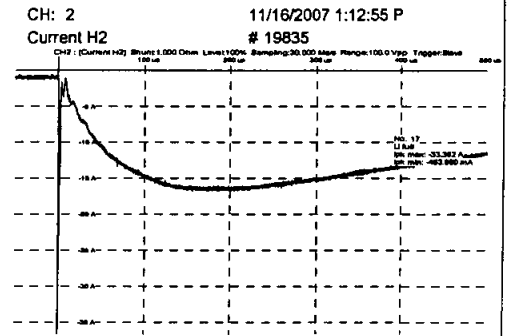


PHASE B

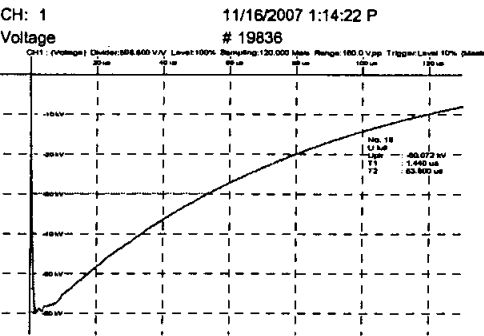


PHASE B

No. 17
LI full
Ipk max: -33.382 A
Ipk min: -463.980 mA

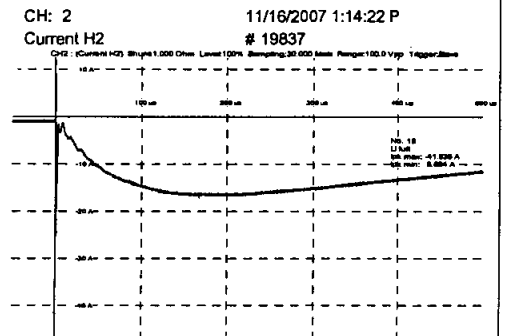


PHASE B

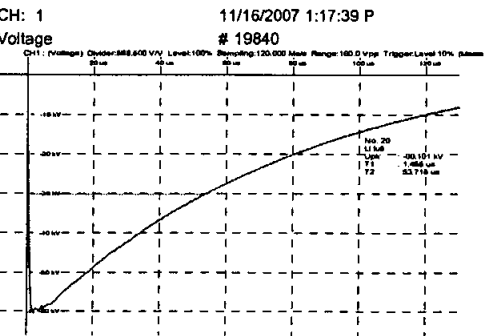


PHASE B

No. 18
LI full
Ipk max: -41.636 A
Ipk min: 8.694 A

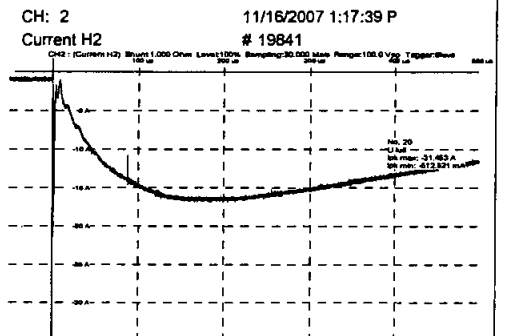


PHASE B



PHASE B

No. 20
LI full
Ipk max: -31.453 A
Ipk min: -512.821 mA



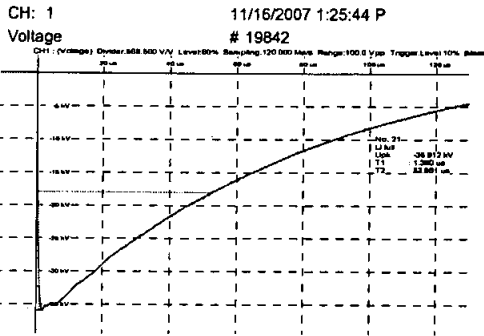
Test manager:

Test engineer:

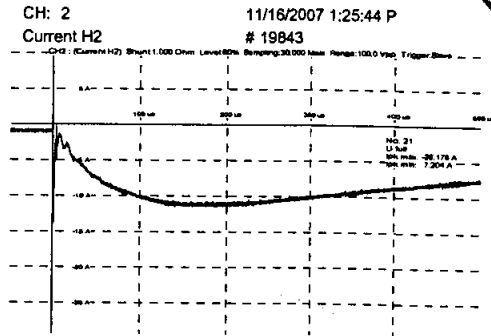
Inspector:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำมาใช้ประกอบในการตัดสินใจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

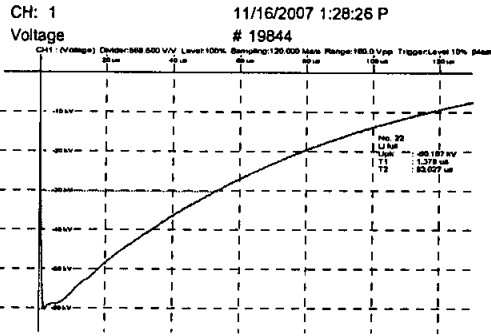
PHASE C



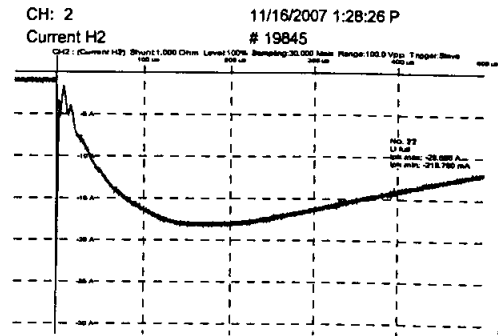
PHASE C



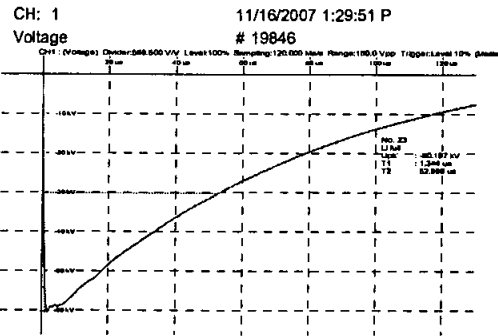
PHASE C



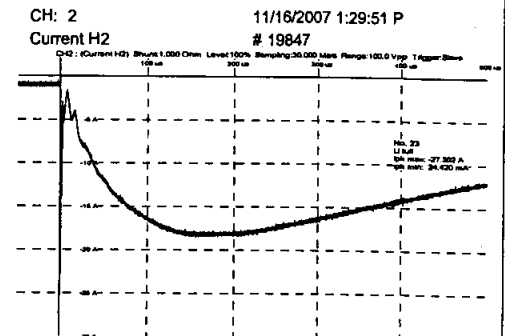
PHASE C



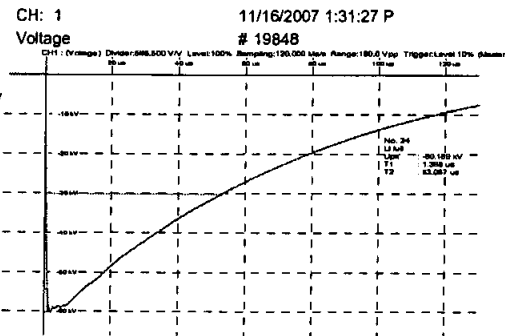
PHASE C



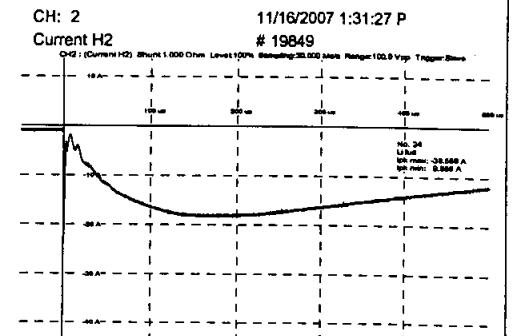
PHASE C



PHASE C



PHASE C



Test manager:

Test engineer:

Inspector:



TEST REPORT
Rating Plate

Report No.
060833

Page 17 of 17

Serial No.: 060833

เอกสารนี้ Test Date: ที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งาน Test Engineer: ภาณุ นิ่มอนุญาติไหนดำไป Test Department: ราคา
15-Nov-2007 Pisit Sakjirarat TD/TPT
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าอัตราส่วนแรงดันและกลุ่มของเวกเตอร์

จุดประสงค์

- 1) เพื่อหาค่าอัตราส่วนแรงดัน ซึ่งใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้ออกแบบมาไว้ และนำไปใช้ในการระบุคุณสมบัติของหม้อแปลง
- 2) เพื่อหากลุ่มของเวกเตอร์ หรือการระบุมุมเฟส ซึ่งใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้ ออกแบบมาไว้ และนำไปใช้ในการระบุคุณสมบัติของหม้อแปลง

มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

IEC 60076-1 Power Transformer Part1 – General

ทฤษฎีในการทดสอบ

- 1) การวัดอัตราส่วนแรงดัน
เมื่อทำการจ่ายแรงดันสลับไปที่ปฐมภูมิ ซึ่งค่านั้นอยู่ระหว่าง 100–250 โวลต์ ที่ ความถี่พิกัดของหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ แล้วทำการวัดค่าแรงดันทางด้านขดลวดปฐมภูมิกับ ค่าแรงดันทางด้านขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งเมื่อได้ค่าแรงดันที่วัดได้ แล้วสามารถหาอัตราส่วนแรงดัน โดยสมการ

$$r = \frac{N_p}{N_s} = \frac{E_p}{E_s}$$

โดยที่

- r คือ อัตราส่วนแรงดัน
- E คือ แรงดันขณะเปิดวงจร
- N คือ จำนวนรอบในการพัน
- p คือ ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ
- s คือ ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

ค่าผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดัน หาได้โดย

$$r_{decl} = \frac{U_{pN}}{U_{sN}}$$

$$r_{act} = \frac{U_p}{U_s}$$

$$f = \frac{r_{act} - r_{decl}}{r_{decl}} \cdot 100$$

โดยที่

- r_{decl} คือ ค่าอัตราส่วนที่ออกแบบ
- r_{act} คือ ค่าอัตราส่วนที่วัดได้จริง
- U_{pN} คือ แรงดันพิกัดทางด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

U_{sN} คือ แรงดันพิกัดทางด้านทุติยภูมิ

f คือ ค่าผิดพลาด ในหน่วย %

2) ลักษณะของกลุ่มของเวกเตอร์ และการระบุมุมเฟสทั่วไป

ขดลวดของหม้อแปลงสามเฟสสามารถทำการต่อได้ 3 แบบ คือ สตาร์, เดลต้า และ ซิกแซก และการระบุมุมเฟสจะอยู่ในช่วง 0° ถึง 360° ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการต่อ

ในการเรียกลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสจะมีรหัสที่เป็นมาตรฐานในการเรียกตามมุมเฟสของหม้อแปลง โดยใช้การอ้างอิงตามทิศของตัวเลขบนหน้าปัดนาฬิกา เช่น Dyn11, Ynd5, Yy6, Dd0 เป็นต้น

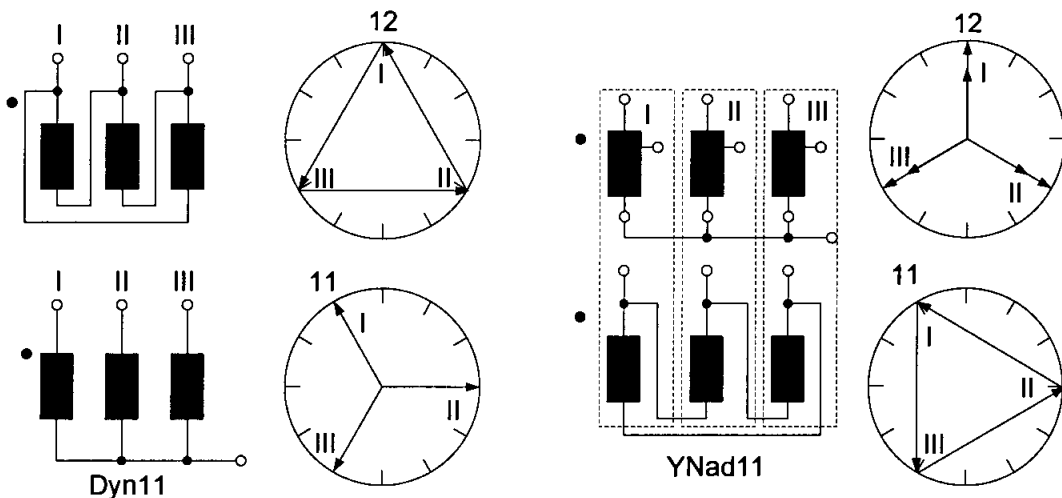
สัญลักษณ์ต่างๆ ของการต่อขดลวดแรงดัน

D, d คือ การต่อขดลวดแบบเดลต้า

Y, y คือ การต่อขดลวดแบบสตาร์

N, n คือ นิวตรอน

โดยที่อักษรตัวใหญ่แทนขดลวดด้านแรงดันสูง และอักษรตัวเล็กแทนขดลวดด้านแรงดันต่ำ และในสัญลักษณ์อักษรตัวแรกจะแทนแรงดันทางด้านแรงดันสูงเสมอ ในส่วนของตัวเลข คือ ทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่เวกเตอร์ของเฟสแรกของขดลวดทางด้านแรงดันต่ำชี้ไป ส่วนทิศทางของทางด้านแรงดันสูงจะอยู่ที่ 12 นาฬิกาเสมอ

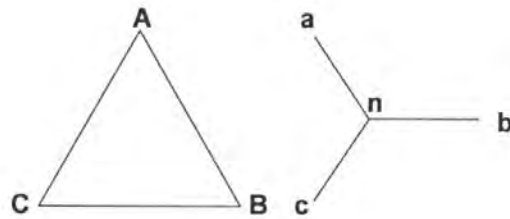


ตัวอย่างลักษณะการตั้งสัญลักษณ์ตามลักษณะการต่อของขดลวด

3) การวัดอัตราส่วนแรงดันสำหรับหม้อแปลงสามเฟส

โดยปกติอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงสามเฟสสามารถวัดได้โดยใช้แหล่งจ่ายหนึ่งเฟส การวัดจริงจะได้จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมของกลุ่มเวกเตอร์ของหม้อแปลงที่ถูกทดสอบ เช่น กรณีหม้อแปลงมีกลุ่มของเวกเตอร์เป็น Dyn11 จะมีการเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

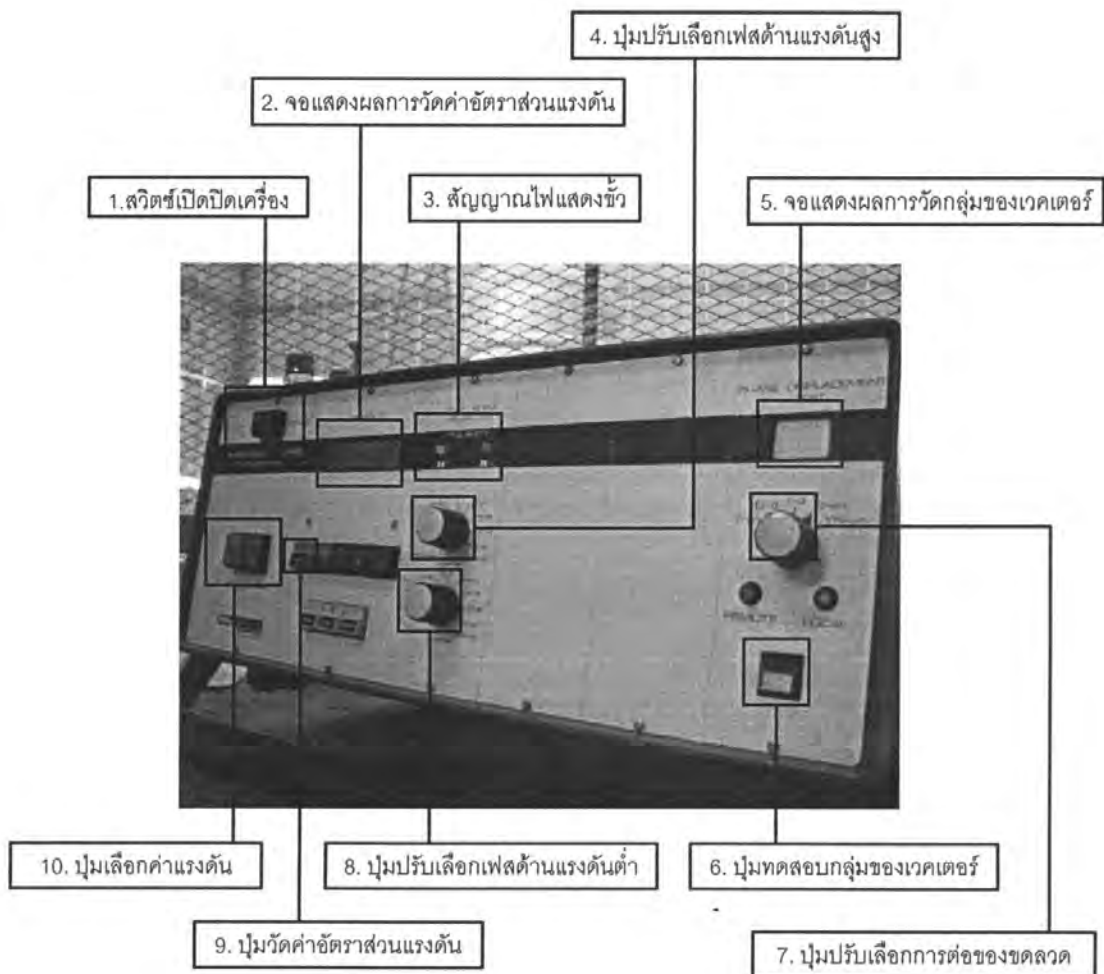


ดังนั้นในการวัดอัตราส่วนแรงดันจะต้องวัดเป็นคู่ดังนี้ A-B คู่กับ a-n, B-C คู่กับ b-n และ C-A คู่กับ c-n

4) เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันและกลุ่มของเวกเตอร์

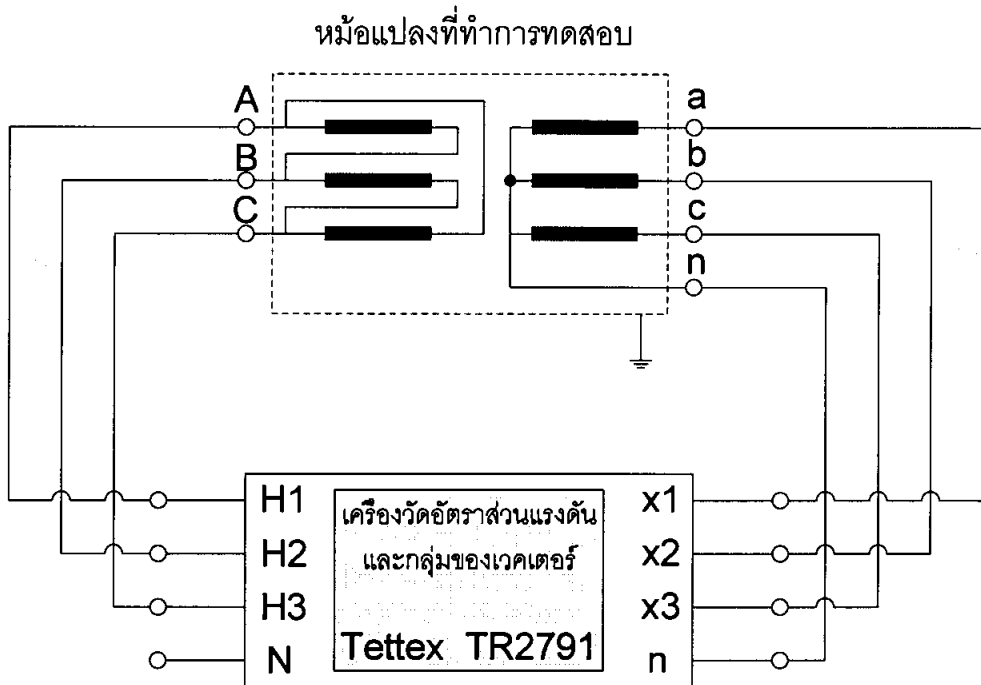
ในปัจจุบันนั้นได้มีการผลิตเครื่องมือที่ใช้การวัดค่าอัตราส่วนแรงดัน และกลุ่มของเวกเตอร์ที่สามารถใช้งานได้ง่าย จึงทำให้สามารถวัดค่าต่างๆ ได้อย่างสะดวกมากขึ้น

เครื่องวัดอัตราส่วนแรงดันและกลุ่มของเวกเตอร์ในห้องทดสอบนั้นเป็นเครื่องของบริษัท Tettex Instrument รุ่น 2791 สามารถจ่ายแรงดันได้ 115 V และ 230 V 50Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรทดสอบ



ตัวอย่างวงจรทดสอบกรณีที่หม้อแปลงทดสอบมีการต่อขดลวดแบบ Dyn

ขั้นตอนการทำการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรทดสอบดังตัวอย่างโดยสอดคล้องกับการต่อของขดลวด
2. กดปุ่มป้อนแรงดัน 50% จากเครื่องทดสอบ ทำการปรับตัวหมุนทางด้านขวามือ (หมายเลข 7) เพื่อเลือกลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลง กดปุ่ม Test (หมายเลข 6) เมื่อเครื่องแสดงผลการวัดจึงทำการบันทึกค่า
3. กดปุ่มป้อนแรงดัน 100% จากเครื่องทดสอบ ทำการปรับตัวหมุนตรงกลาง เพื่อเลือกขดลวดแรงดันสูง (หมายเลข 4) และขดลวดแรงดันต่ำ (หมายเลข 8) ที่จะทำการวัดอัตราส่วนแรงดัน โดยการหมุนปรับจะต้องสอดคล้องกับกลุ่มของเวคเตอร์ที่ได้ทำการวัดข้างต้น กดปุ่ม Test (หมายเลข 9) ทำการบันทึกค่าเมื่อเครื่องแสดงผล
4. ทำการหมุนปรับและวัดค่าให้ครบทุกขดลวด บันทึกผล
5. ทำการเปลี่ยนแทปหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ และทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 3 จนครบทุกแทปของหม้อแปลง

หมายเหตุ ในกรณีที่ปุ่มหมุนปรับขดลวดทดสอบไม่ตรงกับกลุ่มของเวคเตอร์จริง เช่น ต้องการวัดอัตราส่วนระหว่าง A-B คู่กับ n-a แต่ปุ่มปรับขดลวดจะเลือกได้เพียง A-B คู่กับ a-n นั้นค่าที่ได้จากการวัดจะมีค่าติดลบ แต่สัญญาณไฟแสดงขั้ว (หมายเลข 9) จะบ่งบอกว่ามีการสลับขั้วของขดลวดอยู่โดยแสดงเป็นไฟสัญญาณสีแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณผลการทดสอบ

ตำแหน่ง แทป	แรงดันพิกัด (kV)		อัตราส่วนแรงดัน			อัตราส่วน แรงดัน เฉลี่ย	ความคลาด เคลื่อน (%)
	ด้าน แรงดัน สูง	ด้าน แรงดัน ต่ำ	A-B n-b	B-C n-c	C-A n-a		
5-6	12.000	0.41600	50.11	50.11	50.10	50.107	0.294

- ตัวอย่างการหาค่าอัตราส่วนแรงดันเฉลี่ยของหม้อแปลงระบบ 12 kV แทป ๓

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราส่วนแรงดันเฉลี่ย} &= \frac{(A-B, n-b) + (B-C, n-c) + (C-A, n-a)}{3} \\
 &= \frac{50.11 + 50.11 + 50.10}{3} \\
 &= \frac{150.32}{3} \\
 &= 50.107
 \end{aligned}$$

- ตัวอย่างการหาค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงระบบ แทป 1

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าความคลาดเคลื่อน} &= \left| \frac{\text{Ratio}_{real} - \text{Ratio}_{avg}}{\text{Ratio}_{real}} \right| \times 100 \\
 &= \left| \frac{50.107 - 49.96}{50.107} \right| \times 100 \\
 &= 0.294\%
 \end{aligned}$$

การประเมินผลการทดสอบ

1. กลุ่มของเวกเตอร์ที่ได้จากการวัดจะต้องตรงกับการออกแบบ
2. ค่าอัตราส่วนของแรงดันที่วัดได้แตกต่างจากค่าที่ได้จากการคำนวณไม่เกิน 0.5%

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

ขดลวดด้านปฐมภูมิ.....

ขดลวดด้านทุติยภูมิ.....

กลุ่มของเวกเตอร์.....

ตำแหน่งแทป		แรงดันที่กัก (kV)		ค่าอัตราส่วนแรงดันที่วัดได้			ค่าอัตราส่วนแรงดันที่ได้จากการคำนวณ	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
ด้านปฐมภูมิ	ด้านทุติยภูมิ	ด้านปฐมภูมิ	ด้านทุติยภูมิ	คู่ขดลวดที่ทำการวัด				

สรุปผลการทดสอบ

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

การวัดความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์

จุดประสงค์

1. เพื่อทดสอบความคงทนของฉนวนว่าสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
2. เข้าใจหลักการและกระบวนการทดสอบ

มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

IEC 60076-4 (2002), "Guide to lightning impulse and switching impulse testing of power transformers and reactors"

ทฤษฎีในการทดสอบ

ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

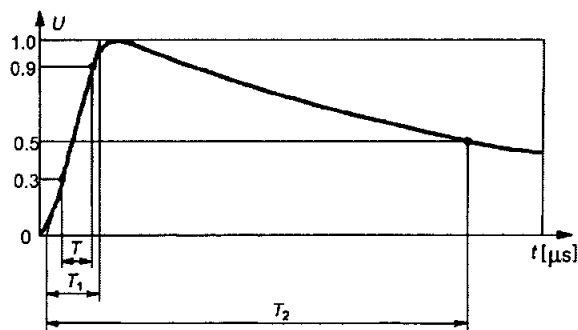
ตามมาตรฐาน IEC และ IEEE ได้บอกถึงลักษณะของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มไว้ดังรูปที่ 1

ระยะเวลาหน้าคลื่น (T_1) = 1.2 μ s โดยสามารถมีความคลาดเคลื่อนได้ประมาณ $\pm 30\%$ (0.84 - 1.56 μ s)

ระยะเวลาของหางคลื่น (T_2) = 50 μ s โดยสามารถมีความคลาดเคลื่อนได้ประมาณ $\pm 20\%$ (40 - 60 μ s)

แต่เนื่องจากวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่สมบูรณ์แบบได้ ดังนั้นการหาค่าของระยะเวลาหน้าคลื่น จึงต้องทำการสร้างเส้นตรงที่ลากผ่านจุดที่มีค่า 30% และ 90% ของค่ายอดของรูปคลื่น โดยมีระยะเวลาระหว่างจุดสองจุดเท่ากับ T แล้วเราสามารถหาระยะเวลาหน้าคลื่นได้จากสมการ

$$T_1 = 1.67T$$



รูปที่ 1 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

มาตรฐาน IEC มีลำดับดังนี้

1. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่มีขนาดแรงดันต่ำกว่าแรงดันทดสอบบีไอแอลหนึ่งครั้ง (มีค่าประมาณ 50%-75% ของแรงดันบีไอแอล) เพื่อใช้เป็นรูปคลื่นอ้างอิง
2. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่มีระดับแรงดันทดสอบบีไอแอลหนึ่งครั้ง (100% ของ BIL)
3. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสับที่มีขนาดต่ำกว่าแรงดันทดสอบบีไอแอลหนึ่งครั้ง หรือมากกว่า
4. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสับที่มีระดับแรงดันทดสอบบีไอแอลสองครั้ง
5. ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่มีระดับแรงดันทดสอบบีไอแอลสองครั้ง

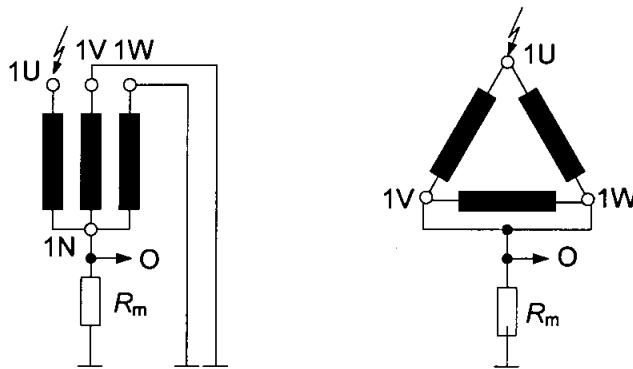
การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ลดทอน (60%) กับรูปคลื่นแรงดันและกระแสของระดับแรงดันเต็ม (100%) ว่าทั้งสองรูปมีความแตกต่างกันหรือไม่ หากรูปคลื่นไม่แตกต่างกัน แสดงว่าผ่านการทดสอบ นอกจากนี้จะต้องไม่มีการเกิดสไปค์ขึ้นรูปคลื่นแรงดันใดๆ

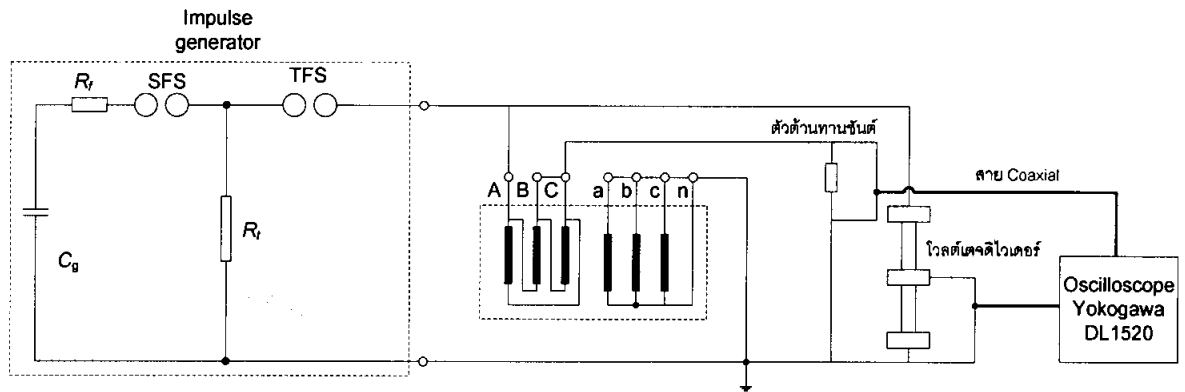
กระบวนการทดสอบ

ก่อนทำการทดสอบต้องทำการตรวจสอบดังนี้

1. ตรวจสอบว่าหม้อแปลงทำการเติมน้ำมันผ่านมาแล้วอย่างน้อย 3 วัน ในกรณีที่ เป็นหม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมัน
2. ทำการวัดค่าอัตราส่วนแรงดัน ทิศทางเฟส และค่าความต้านทานของขดลวดของหม้อแปลง
3. ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันของหม้อแปลง
4. ทำการลัดวงจรและต่อลงกราวด์ของหม้อแปลงกระแสที่อยู่ในหม้อแปลง
5. ทำการต่อตัวเก็บประจุในบรูซซึ่งลงกราวด์
6. ตรวจสอบระดับน้ำมันในเครื่องเปลี่ยนแทป และในหม้อแปลง
7. ตรวจสอบตำแหน่งของแทป



รูปที่ 2 ลักษณะต่อวงจรทดสอบเข้ากับขดลวดแรงดันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส
เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ มีลิขสิทธิ์และสงวนไว้เพื่อใช้ในการดำเนินงานการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 ลักษณะต่อวงจรทดสอบ

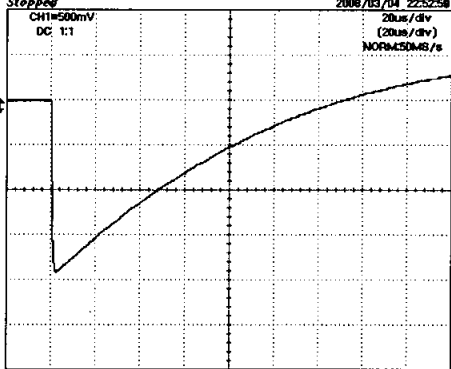
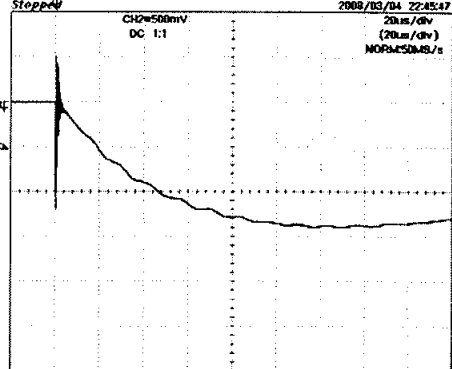
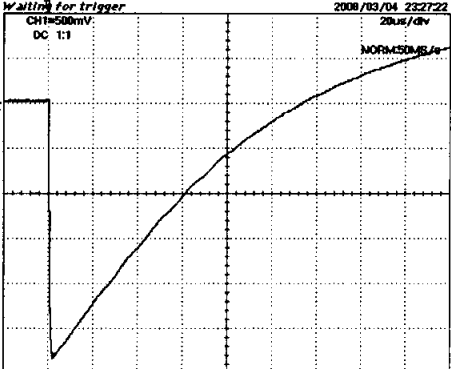
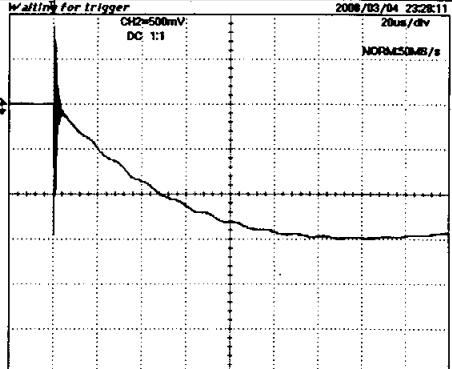
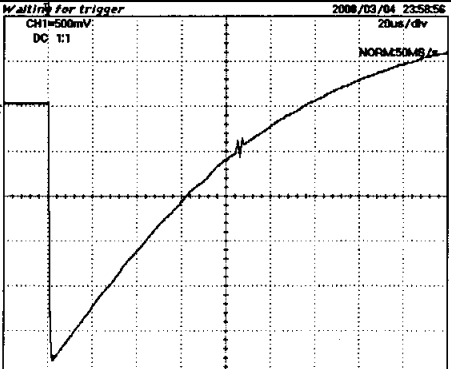
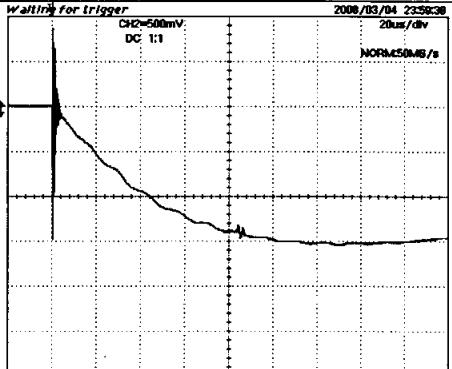
- C_g คือ ตัวเก็บประจุ
- R_f คือ ตัวต้านทานหน้าคลื่น
- R_r คือ ตัวต้านทานหางคลื่น

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 2 และ 3
2. ทำการปรับตั้ง oscilloscope
3. คำนวณค่าแรงดันที่จะป้อนเข้าไปในแต่ละชั้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
4. ตั้งระยะแกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ตามขนาดแรงดันที่คำนวณได้ โดยดูจากตาราง (ค่าที่ดูจากตารางเป็นเพียงค่าโดยประมาณ)
5. ตรวจสอบว่ามีผู้ใดอยู่ใกล้เคียงบริเวณทดสอบหรือไม่ หากไม่มีทำการยกไม้กราวด์ออก เปิดสัญญาณเตือน
6. ทำการขึ้นแรงดันสู่ระดับที่ต้องการ กดสวิตช์เพื่อทำการจุดชนวนให้เกิดการเบรกดาวระหว่างแกปเพื่อเป็นการป้อนแรงดันสู่หม้อแปลง ในกรณีที่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์มีการเบรกดาวระหว่างแกปก่อนที่จะขึ้นแรงดันถึงระดับที่ต้องการ ให้ทำการปรับระยะแกปให้เพิ่มขึ้น แล้วทำการทดลองซ้ำ
7. เมื่อทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับหม้อแปลง สังเกตรูปคลื่นที่ oscilloscope หากไม่ได้รูปคลื่นแรงดันที่มีขนาดตามมาตรฐาน จะต้องทำการปรับค่าความต้านทานที่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ ทำการทดสอบซ้ำ
8. เมื่อได้รูปคลื่นตามมาตรฐานจึงทำการทดสอบตามลำดับในทฤษฎี ทำการบันทึกรูปคลื่น
9. ทำการทดสอบตามลำดับของมาตรฐาน
10. ทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการประเมินผลการทดสอบ

รูปคลื่น	รูปคลื่นแรงดัน	รูปคลื่นกระแส
ลักษณะ รูปคลื่น แรงดัน ลดทอน	 <p>2008/03/04 22:52:58 CH1=500mV DC 1:1 20us/div (20us/div) NORM50MS/s</p> <p>#Filter# #Offset# #Record Length# #Trigger# Smoothing: ON CH1: -0.030V Main: 10K Mode: NORMAL BW: 20MHz CH2: 0.000V Zoom: 1K Type: EDGE CH1 <input type="checkbox"/> Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM</p>	 <p>2008/03/04 22:45:47 CH2=500mV DC 1:1 20us/div (20us/div) NORM50MS/s</p> <p>#Filter# #Offset# #Record Length# #Trigger# Smoothing: ON CH1: -0.030V Main: 10K Mode: NORMAL BW: 20MHz CH2: 0.000V Zoom: 1K Type: EDGE CH1 <input type="checkbox"/> Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM</p>
ลักษณะ รูปคลื่น แรงดันเต็ม ที่ผ่าน การทดสอบ	 <p>2008/03/04 23:27:22 CH1=500mV DC 1:1 20us/div NORM50MS/s</p> <p>#Filter# #Offset# #Record Length# #Trigger# Smoothing: ON CH1: -0.030V Main: 10K Mode: NORMAL BW: 20MHz CH2: 0.000V Zoom: 250 Type: EDGE CH1 <input type="checkbox"/> Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM</p>	 <p>2008/03/04 23:28:11 CH2=500mV DC 1:1 20us/div NORM50MS/s</p> <p>#Filter# #Offset# #Record Length# #Trigger# Smoothing: ON CH1: -0.030V Main: 10K Mode: NORMAL BW: 20MHz CH2: 0.000V Zoom: 250 Type: EDGE CH1 <input type="checkbox"/> Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM</p>
ลักษณะ รูปคลื่น แรงดันเต็มที่ ไม่ผ่านการ ทดสอบ	 <p>2008/03/04 23:58:56 CH1=500mV DC 1:1 20us/div NORM50MS/s</p> <p>#Filter# #Offset# #Record Length# #Trigger# Smoothing: ON CH1: -0.030V Main: 10K Mode: NORMAL BW: 20MHz CH2: 0.000V Zoom: 250 Type: EDGE CH1 <input type="checkbox"/> Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM</p>	 <p>2008/03/04 23:58:38 CH2=500mV DC 1:1 20us/div NORM50MS/s</p> <p>#Filter# #Offset# #Record Length# #Trigger# Smoothing: ON CH1: -0.030V Main: 10K Mode: NORMAL BW: 20MHz CH2: 0.000V Zoom: 250 Type: EDGE CH1 <input type="checkbox"/> Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายวิศรุต เล็กอุทัย เกิดวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2528
ที่อยู่ 59 ถ.เจริญราษฎร์ ต.ท่าอิฐ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์
สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
จากโรงเรียนอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์
หมายเลขโทรศัพท์ 08-4076-2345



นายวุฒิชัย นันตา เกิดวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2528
ที่อยู่ 328/4 ถ.สำราญรื่น ต.ท่าอิฐ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์
สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
จากโรงเรียนอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์
หมายเลขโทรศัพท์ 08-9439-5570



นายสิทธิา ขอบเขต เกิดวันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2528
ที่อยู่ 438 ม.2 ถ.ชมปรีดา ต.หาดเสี้ยว อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย
สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
จากโรงเรียนอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์
หมายเลขโทรศัพท์ 08-4033-3375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้