สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

INSULATION TEST FOR INDUCTION MACHINE

T055601

โดย

นายพิษณุ มีระหันนอก

นายศราวุธ ม่วงประดับ

นายวรากร วงค์ไชยชนะ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.พิชิต ลำยอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 55601
วัน,เดือน,ปี 20 พ.ค. 2548

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

INSULATION TEST FOR INDUCTION MACHINE

ผู้จัดทำ

1. นายพิษณุ มีระหันนอก 44015117 3W/1
2. นายศราวุธ ม่วงประดับ 44015127 3W/1
3. นายวรากร วงค์ไชยชนะ 44015165 3W/2

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต ลำยอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

นาย พิษณุ มีระหันนอก 44015117
นาย ศราวุธ ม่วงประดับ 44015127
นาย วรากร วงค์ไชยชนะ 44015165
รศ.พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ในทางอุตสาหกรรมความล้มเหลวในการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้เกิดการหยุดชะงักของระบบไฟฟ้า หรือสายการผลิตได้ สาเหตุหลักประการหนึ่งคือ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนก่อนเวลาอันควรของฉนวนมอเตอร์ การใช้งานที่เกินพิกัดทางด้านไฟฟ้าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนมอเตอร์เสียสภาพ

การเลือกวัสดุชนิดหนึ่งมาทำเป็นฉนวนไฟฟ้า ควรมีการทดสอบหาค่าแรงดันที่วัสดุทนได้ หรือการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของวัสดุก่อนที่จะนำวัสดุไปใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานหรือผู้ปฏิบัติงานและเครื่องจักรกลไฟฟ้า ฉะนั้นโครงงานนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการทดสอบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การทดสอบเพื่อจัดระดับความร้อนของฉนวน และการทดสอบเพื่อหาข้อบกพร่องของฉนวนที่จะเป็นสาเหตุทำให้เครื่องจักกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดการเสียหายต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Insulation Test for Induction Machine

Pisanu Merahannok
Sarawut Muangpradab
Waragorn Wongchaichana
Assc.Prof.Pichit Lumyong Advisor

ABSTRACT

Industrially, the failure of an induction machine can cause the electrical system and the production line stop abruptly. Thermal is the main cause of the failure. Over-voltage in another cause. They cause the worse in quality of the insulation of an induction machine.

In selecting a material to make Electrical Insulation, the voltage and the breakdown of the material should be tested before use it as electrical insulation. This is to provide security to the user, the worker and the machine. This project present about induction machine test into 2 aspects: Insulation test for induction machine for determining the thermal classification of electrical insulation and the test to determine the failure of insulation that can cause damage to the induction machines .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ก็คือ รองศาสตราจารย์ พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก บุคคลที่สองที่ต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมากคือ คุณเปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ นักศึกษาปริญญาโทที่ช่วยแนะนำและช่วยเหลือด้านข้อมูลต่างๆ

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ท้ายสุดขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้วิชาความรู้ และให้คำปรึกษามาโดยตลอดจนกระทั่งประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

นายพิษณุ มีระหันนอก
นายศราวุธ ม่วงประดับ
นายวรากร วงค์ไชยชนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาไทย	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.2 จุดประสงค์ของโครงงาน	2
บทที่ 2 การหาค่าและคุณสมบัติทางไฟฟ้า	3
2.1 ประเภทของวัสดุฉนวน	3
2.2 การเร่งอายุ	4
2.3 การเตรียมวิธีการหาค่า	8
2.3.1วิธีการเบื้องต้นสำหรับการเตรียมวิธีการหาค่า	9
2.4 กระบวนการหาวิธีการหาค่าเพื่อจัดคุณสมบัติระบบฉนวนทางไฟฟ้า	9
2.4.1ข้อพิจารณา	9
2.4.2 ประเภทของโครงสร้างการหาค่า	10
2.4.3 ข้อพิจารณาในการปฏิบัติ	10
2.5 องค์ประกอบการทดสอบการเร่งอายุ	11
2.5.1วัตถุทดสอบ	11
2.5.2 เงื่อนไขการทดสอบ	12
2.5.3 การกำหนดอายุการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้า	13
2.6 การเร่งอายุ	14
2.6.1 ทั่วไป	14
2.6.2 การประเมินการเร่งอายุเครื่องจักร	14
2.6.3 การเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ	15
2.6.4 ระดับความเค้น	19
2.6.5 ระยะเวลาและจำนวนรอบย่อยการเร่งอายุ	19
2.6.6 รอบย่อยของการเร่งอายุ	19
2.7 การปรับสภาพก่อนการวินิจฉัย	20
2.8 การวินิจฉัย	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.1 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัย	21
2.8.2 การเพิ่มการทดสอบโดยเฉพาะ	21
2.9 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ	21
2.9.1 กล่าวโดยทั่วไป	21
2.9.2 ประสบการณ์การใช้งาน	21
2.9.3 ไฟฟ้า	22
2.9.4 ความร้อน	22
2.9.5 ทางกล	22
2.9.6 สภาพแวดล้อม	22
2.9.7 ผลที่เกิดขึ้นจากหลายๆปัจจัย	22
2.10 การรายงานการทดสอบ	23
บทที่ 3 ทฤษฎีเกี่ยวกับฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า	24
3.1 การฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า	24
3.2 กลไกเบรคดาวน์ของฉนวนแข็ง	26
3.2.1 เบรคดาวน์แบบแท้จริง	27
3.2.2 เบรคดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า	27
3.2.3 เบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์	28
3.2.4 เบรคดาวน์แบบเทอร์มัล	29
3.2.5 เบรคดาวน์เนื่องจากผลเคมีและเคมีไฟฟ้า	30
3.2.6 เบรคดาวน์เนื่องจากดีสชาร์จภายใน	32
3.2.7 เบรคดาวน์เนื่องจาก ร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว	34
3.3 การทดสอบสภาพฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า	34
3.3.1 การทดสอบความต้านทานฉนวน	34
3.3.2 การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก	35
3.3.3 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรง	35
3.3.4 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ	37
3.3.5 การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จ	37
บทที่ 4 การออกแบบการทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบ WIRE-WOUND WINDING โดยใช้แบบจำลองร่องสล๊อต(Motorette) เพื่อการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนไฟฟ้า	40
4.1 บทนำ	40
4.2 ขอบเขตของการทดสอบ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 จุดประสงค์ของการทดสอบ	40
4.4 การจัดประเภทของวัสดุฉนวนโดยแบ่งตามระดับความร้อน	41
4.5 วิธีการหาค่าระดับความร้อนของระบบฉนวน	41
4.6 แบบจำลองของชิ้นงานทดสอบ	41
4.6.1 ส่วนประกอบของชิ้นงานทดสอบ	42
4.6.2 โครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ	42
4.7 กระบวนการทดสอบ	42
4.7.1 ขอบเขตของกระบวนการทดสอบ	42
4.7.2 กระบวนการเร่งอายุโดยการให้ความร้อน	43
4.7.3 กระบวนการทดสอบทางกล	44
4.7.4 กระบวนการทดสอบทางความชื้น	44
4.7.5 กระบวนการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า	44
4.8 บรรทัดฐานของการเกิดการเสียหาย	45
4.9 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	46
4.9.1 การเปรียบเทียบ	46
4.9.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นหรือความไม่คล้ายคลึงกันของกราฟ	46
4.10 โครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อต	46
4.10.1คำแนะนำทั่วไป	46
4.10.2 รายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อต	47
4.10.3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อต	47
4.10.4 การประกอบแบบจำลองร่องสล็อต	48
4.11 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบทางความชื้น	50
4.11.1 ตู้อบไอน้ำ	50
4.11.2 ตู้อบไอน้ำสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง(ที่อุณหภูมิห้อง)	50
บทที่ 5 การออกแบบการทดสอบสภาพฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า	55
5.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	55
5.1.1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง	55
5.1.2 วงจรโมโนสเตเบิล	55
5.1.3 วงจรทริกเอสซีอาร์	56
5.1.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	57
5.2 วงจรทดสอบแรงดันกระแสตรง	58
5.3 วงจรทดสอบแรงดันกระแสสลับ	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง	60
6.1 การทดสอบเพื่อจัดระดับความร้อนของฉนวนไฟฟ้า	60
6.1.1 ขอบเขตการทดสอบ	60
6.1.2 จุดประสงค์การทดสอบ	60
6.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ	60
6.1.4 วิธีดำเนินการทดสอบ	60
6.1.5 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดของแบบจำลองร่องสล๊อต	68
6.16 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ของแบบจำลองร่องสล๊อต	69
6.1.7 ผลการทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดแบบจำลองร่องสล๊อต	70
6.1.8 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดของบาร์ทองแดง	71
6.1.9 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ของบาร์ทองแดง	72
6.1.10 สรุปผลการทดลอง	73
6.2 การทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนและการทดสอบการดูดกลืนไดอิเล็กตริก	74
6.3 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง	75
6.4 การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ	76
6.5 การทดสอบโดยวิธีแรงดันอิมพัลส์	77
6.5.1 การทดสอบลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์	77
6.5.2 การทดสอบการเกิดลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์	82
6.5.3 การทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์	85
6.5.4 การทดสอบสภาพฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส	89
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์การทดสอบ	93
ภาคผนวก	
บรรณานุกรม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 แสดงอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้า 5

รูปที่ 2-2 ตัวอย่างความเป็นไปได้ของการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกล โดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลา 6

รูปที่ 2-3 แสดงการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกล โดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลา ตามรูปที่ 2-2 7

รูปที่ 2-4 ตัวอย่างความเป็นไปได้ของการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกล โดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลา 7

รูปที่ 2-5 แสดงการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกล โดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลา ตามรูปที่ 2-4 8

รูปที่ 2-6 วิธีการเบื้องต้นของวิธีการหาค่า 8

รูปที่ 3-1 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า Eb แปรไปตามช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน 27

รูปที่ 3-2 ลักษณะดิสชาร์จเบรกดาวน์แบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโทรดปลายเหลมกับระนาบ (coopper) 29

รูปที่ 3-3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออายุการใช้งาน ทางกลของฉนวนกระดาษ 31

รูปที่ 3-4 ฉนวนมีโพรงและวงจรสมมูลย์ 33

รูปที่ 3-5 ดิสชาร์จภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ 34

รูปที่ 3-6 แสดงการพล็อตกราฟทดสอบโดยการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรงคงที่ โดยที่เฟส C สภาพฉนวนมีการอ่อนแอ ส่วนเฟส A และ เฟส B สภาพฉนวนยังดีอยู่ 37

รูปที่ 3-7 แสดงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 39

รูปที่ 4-1 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดสอยเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดัน 51

รูปที่ 4-2 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อตก่อนทำการประกอบ 52

รูปที่ 4-3 แบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบเสร็จแล้วและผ่านการชุบวาร์นิช 52

รูปที่ 4-4 แสดงการสร้างเฟรมของแบบจำลองร่องสล็อต 53

รูปที่ 4-5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการสร้างตู้อบไอน้ำ 54

รูปที่ 5-1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง 55

รูปที่ 5-2 วงจรโมโนสเตเบิล 56

รูปที่ 5-3 วงจรทริกเอสซีอาร์ 56

รูปที่ 5-4 วงจรป้องกันเอสซีอาร์ 57

รูปที่ 5-5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ 57

รูปที่ 5-6 วงจรทดสอบกระแสตรง 58

รูปที่ 5-7 วงจรควบคุมการทดสอบกระแสตรง 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-8 วงจรการทดสอบกระแสสลับ 59
รูปที่ 6-1 แสดงขั้นตอนของกระบวนการทดสอบ 61
รูปที่ 6-2 เตาอบ 62
รูปที่ 6-3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล๊อต 63
รูปที่ 6-4 แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ 64
รูปที่ 6-5 แบบจำลองร่องสล๊อตหลังชุบวาร์นิช 64
รูปที่ 6-6 แบบจำลองร่องสล๊อตหลังจากได้รับการเร่งอายุทางความร้อน 65
รูปที่ 6-7 การปรับสภาพทางกลต่อแบบจำลองร่องสล๊อตด้วยโต๊ะสั่น 65
รูปที่ 6-8 ตู้อบไอน้ำ 66
รูปที่ 6-9 การทดลองทางไฟฟ้าเพื่อวินิจฉัย 66
รูปที่ 6-10 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดของแบบจำลองร่องสล๊อต ฉนวนชนิดที่ 1 68
รูปที่ 6-11 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดของแบบจำลองร่องสล๊อต ฉนวนชนิดที่ 2 68
รูปที่ 6-12 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ของแบบจำลองร่องสล๊อต ฉนวนชนิดที่ 1 69
รูปที่ 6-13 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ของแบบจำลองร่องสล๊อต ฉนวนชนิดที่ 2 69
รูปที่ 6-14 ผลการทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของแบบจำลองร่องสล๊อต ฉนวนชนิดที่ 1 70
รูปที่ 6-15 ผลการทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของแบบจำลองร่องสล๊อต ฉนวนชนิดที่ 2 70
รูปที่ 6-16 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดของบาร์ทองแดง ฉนวนชนิดที่ 1 71
รูปที่ 6-17 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดของบาร์ทองแดง ฉนวนชนิดที่ 2 71
รูปที่ 6-18 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ของบาร์ทองแดง ฉนวนชนิดที่ 1 72
รูปที่ 6-19 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ของบาร์ทองแดง ฉนวนชนิดที่ 2 72
รูปที่ 6-20 การเกิดเบรคดาวน์ระหว่างขดลวดกับกราวด์ของแบบจำลองร่องสล๊อต 73
รูปที่ 6-21 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 6.5.2 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6-22 สัญญาณทริกเอสซีอาร์ 78

รูปที่ 6-23 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 1500 V 78

รูปที่ 6-24 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 2000 V 79

รูปที่ 6-25 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 3000 V 79

รูปที่ 6-26 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 4000 V 80

รูปที่ 6-27 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 5000 V 80

รูปที่ 6-28 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 6000 V 81

รูปที่ 6-29 วงจรที่ใช้ในการทดลอง 82

รูปที่ 6-30 แรงดันอิมพัลส์วัดคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และ แรงดันคร่อม เฟส B และค่าความต้านทาน R_M ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ 83

รูปที่ 6-31 แรงดันอิมพัลส์วัดคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และ แรงดันคร่อม เฟส C และค่าความต้านทาน R_M ซึ่งเฟส A สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ ส่วนเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด 83

รูปที่ 6-32 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 6.5.3 85

รูปที่ 6-33 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบขณะที่ขดลวดยังดีอยู่ 85

รูปที่ 6-34 ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราด์ใกล้กับต้นขดทดสอบ 86

รูปที่ 6-35 แสดงภาพขยายช่วงหัวคลื่น ขณะขดลวดทดสอบเบรคดาวน์ลงกราวด์ 86

รูปที่ 6-36 ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ ไกลจากต้นขดทดสอบ 87

รูปที่ 6-37 ขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ใกล้กับต้นขดทดสอบ 87

รูปที่ 6-38 ขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ไกลกับต้นขดทดสอบ 88

รูปที่ 6-39 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 6.5.4 89

รูปที่ 6-40 แรงดันอิมพัลส์คร่อมระหว่าง เฟส A และ เฟส B ซึ่งขดลวดทดสอบยังมีสภาพดีอยู่ 89

รูปที่ 6-41 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการเบรคดาวน์ระหว่างเฟสของขดลวด 89

รูปที่ 6-42 ขยายกราฟรูปที่ 6-41 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการเบรคดาวน์ระหว่างเฟสของขดลวดบริเวณหัวคลื่น 90

รูปที่ 6-43 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสของขดลวดใกล้กับต้นขดทดสอบ 91

รูปที่ 6-44 ขยายกราฟรูปที่ 6-43 91

รูปที่ 6-45 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสของขดลวดไกลจากต้นขดทดสอบ 92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด	3
ตารางที่ 2-2 อุณหภูมิในการเร่งอายุ	18
ตารางที่ 3-1 แสดงค่าความคงทนทางไฟฟ้าเมื่อป้อนแรงดันอย่างรวดเร็วของสารฉนวน	24
ตารางที่ 3-2 แสดงชั้นของฉนวนกับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน	25
ตารางที่ 3-3 แสดงสารเอนาเมลกับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานปกติ	26
ตารางที่ 3-4 ตารางแสดงค่าต่ำสุดของค่าโพลาไรเซชั่นอินเด็กซ์	35
ตารางที่ 4-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด	41
ตารางที่ 4-2 อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวน	43
ตารางที่ 4-3 แสดงขนาดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	45
ตารางที่ 6-1 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง	67
ตารางที่ 6-2 ค่าความต้านทานของขดลวดที่ 1 นาที และ 10 นาที	74
ตารางที่ 6-3 ผลการทดลองของการทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง	75
ตารางที่ 6-4 ผลการทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ฉนวนของมอเตอร์สมัยใหม่มีความน่าเชื่อถือสูงมาก ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ ไม่เกิดการใช้งานที่เกินพิกัดทางด้านไฟฟ้า ไม่เกิดการใช้งานในที่ผิดทางกลหรือทางเคมี เช่น มีไอของสารเคมีในพื้นที่ที่ติดตั้งใช้งาน ฉนวนของมอเตอร์อาจมีอายุยาวนานถึง 100,000 ชั่วโมงทำงาน นั่นคือ ใช้งานได้นานถึง 20 ปี หากใช้งานปีละ 5,000 ชั่วโมง

การเสื่อมสภาพของฉนวนจากความร้อน คือสาเหตุหลักของการเสียสภาพการเป็นฉนวนก่อนเวลาอันควรของฉนวนมอเตอร์ เราอาจกล่าวได้ว่าการให้มอเตอร์ทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ออกแบบไว้ 10 องศาเซลเซียสจะทำอายุของฉนวนลดลงครึ่งหนึ่ง นั่นคือถ้าอุณหภูมิสูงเกินค่าที่ออกแบบไว้ 10 องศาเซลเซียส อายุของฉนวนจะเป็น 50 เปอร์เซนต์ของอายุที่ควรจะเป็นและถ้าอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ 20 องศาเซลเซียส อายุของฉนวนจะเป็น 25 เปอร์เซนต์ของอายุที่ควรจะเป็นความชื้นจากบรรยากาศเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนมอเตอร์เสียสภาพอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนมอเตอร์เสียสภาพคือ การรบกวนจากระบบไฟฟ้า เช่น ถ้าเกิดแรงดันเสิร์จจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อระบบหรือจากฟ้าผ่า แรงดันเสิร์จค่าสูงๆ จะทำให้เกิดความเสียหายตรงจุดอ่อนของฉนวนโดยทำให้เสียสภาพโดยฉับพลัน

การเสียสภาพของฉนวนของชุดขดลวดมอเตอร์จะไม่แสดงผลของมันออกมา เมื่อมอเตอร์ถูกเก็บไว้ไม่ได้ใช้งาน เราจึงไม่สามารถจะรู้ได้เลยว่าเกิดความผิดปกติของสภาพของฉนวนของชุดมอเตอร์ ด้วยเหตุนี้มอเตอร์ที่ต้องทำงานในจุดที่สำคัญจึงต้องมีการทดสอบสภาพฉนวนเป็นประจำอย่างสม่ำเสมอ เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวน

การประเมินคุณภาพของฉนวนด้วยโปรแกรมการทดสอบในลักษณะนี้ฉนวนที่มีคุณภาพลดลงจะถูกตรวจพบและได้รับการแก้ไขล่วงหน้าเพื่อป้องกันการเสียสภาพในระหว่างใช้งาน และสำหรับโรงงานที่ผลิตมอเตอร์หลังจากกระบวนการผลิตแล้วก็ต้องมีการทดสอบฉนวนของมอเตอร์เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

การทดสอบสภาพฉนวนของมอเตอร์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทดสอบความต้านทานฉนวน(Insulation Resistance Test) การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก(Polarization Index Test) การทดสอบแรงสูงกระแสตรง(High Direct Voltage Test) การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ(High Alternating Voltage Test) การทดสอบทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมาเหมาะกับการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกราวด์ ไม่สามารถตรวจสอบความบกพร่องของฉนวนที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ระหว่างขดลวดต่อขดลวด และระหว่างเฟสกับเฟสได้ จึงต้องใช้การทดสอบด้วยแรงดันเสิร์จ(Surge Voltage Test) ซึ่งสามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดกับฉนวนของมอเตอร์ดังกล่าวได้

โดยในโครงงานนี้จะเน้นไปในการสร้างวิธีการทดสอบต่างๆ ตามที่มาตรฐานได้กำหนดเพื่อที่จะได้ทราบได้ว่าขบวนการและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบสามารถก่อให้เกิดผลตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ขอบเขตของโครงงาน

การทดสอบเพื่อจัดระดับความร้อนของฉนวนกระบวนการทดสอบนี้อยู่ในรูปแบบของการเปรียบเทียบอายุโดยรวมของระบบฉนวนตั้งแต่ 2 ระบบขึ้นไป ซึ่งรูปแบบกระบวนการทดสอบนี้จะถูกจำกัดอยู่ในขอบเขตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการพันแบบ Wire - Wound Winding โดยที่รูปแบบกระบวนการทดสอบนี้ใช้ในการหาค่าของระบบฉนวนที่มีระบบการทำความเย็นโดยอากาศภายใต้สิ่งแวดล้อมซึ่งนำไปสู่การเสื่อมโทรมของฉนวนแต่ไม่รวมถึงการใช้งานที่อยู่ในกรณีพิเศษ เช่นการใช้งานภายใต้ของเหลวบางชนิด ก๊าซบางอย่างหรือการใช้งานร่วมกับเคมีภัณฑ์บางประเภท

การทดสอบสภาพฉนวนเพื่อหาข้อบกพร่องของฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ซึ่งสามารถตรวจสอบความบกพร่องของฉนวนที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบ ระหว่างเฟสต่อเฟส และสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ โดยนำวิธีการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่างๆคือ การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบการดูดกลืนไดอิเล็กตริก การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ และการทดสอบโดยการเปรียบเทียบผลของเสิร์จ

1.2 จุดประสงค์ของโครงงาน

เพื่อที่จะจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการทดสอบสามารถนำไปสู่กระบวนการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ ก่อนที่จะได้รับการพิสูจน์จากการใช้งานโดยการเปรียบเทียบอายุโดยรวมของระบบฉนวน จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระหว่างระบบฉนวนที่นำมาทดสอบกับระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงตามระดับความร้อนที่ได้คาดไว้

เพื่อตรวจสอบสภาพฉนวนของขดลวดเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดระหว่างเฟสกับเฟส และสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
การหาค่าและคุณสมบัติทางไฟฟ้า

2.1 ประเภทของวัสดุฉนวน

วัสดุฉนวนแบ่งออกเป็นได้หลายประเภท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและระดับความร้อนที่วัสดุฉนวนนั้นทนได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะแบ่งประเภทวัสดุฉนวนออกเป็นดังตารางที่ 2-1

ฉนวนแต่ละประเภทอาจมีวัสดุซึ่งอยู่ในประเภทจำกัดที่ต่ำกว่าเข้ามาเป็นอัตราส่วนเพื่อจุดประสงค์ทางโครงสร้างเท่านั้นทั้งนี้ยังคงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลพอเพียงในระหว่างใช้งานที่อุณหภูมิที่ยอมให้สูงสุด

การนำไปใช้งานบางอย่างอาจใช้สารประกอบและเรซินที่ปราศจากตัวทำละลายแทนที่อากาศในช่องว่างระหว่างเส้นใย ฟิล์ม และช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนต่างๆในการใช้ประโยชน์อย่างอื่นอาจใช้วาร์นิชหรือวัสดุชนิดอื่นที่มีตัวทำละลาย ซึ่งทำให้เกิดฟิล์มที่มีผิวติดต่อกันและผนึกบางส่วนของช่องว่างและยึดชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้างของฉนวน

ประเภท	อุณหภูมิจำกัดองศาเซลเซียส
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

ตารางที่ 2-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด

ประเภท Y คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกฝ้าย ไหมและกระดาษอย่างเดียว หรือหลายอย่างรวมกันโดยปราศจากการแทรกซึม ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันได้ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท Y ได้

ประเภท A คือฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกฝ้าย ไหมและกระดาษประเภท A คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกซึ่งผ่านการแทรกซึม เคลือบหรือจุ่มด้วยไดอิเล็กตริคเหลว เช่นน้ำมัน ฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท A ได้

ประเภท E คือฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกัน ซึ่งจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท E ได้ (วัสดุที่มีระดับเสถียรภาพความร้อนที่ยอมให้วัสดุนั้นทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าของประเภท A อยู่ 15 °C)

ประเภท B คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกไมกา ใยแก้ว ใยหิน ฯลฯ อย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันโดยมีสารยึด (bonding substance) ที่เหมาะสม ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นอนินทรีย์อย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท B ได้

ประเภท F คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกไมกา ใยแก้ว ใยหิน อย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันโดยมีสารยึดที่เหมาะสม ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นอนินทรีย์อย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท F ได้ (วัสดุที่มีระดับเสถียรภาพความร้อนที่ยอมให้วัสดุนั้นทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าของประเภท F อยู่ 25 C)

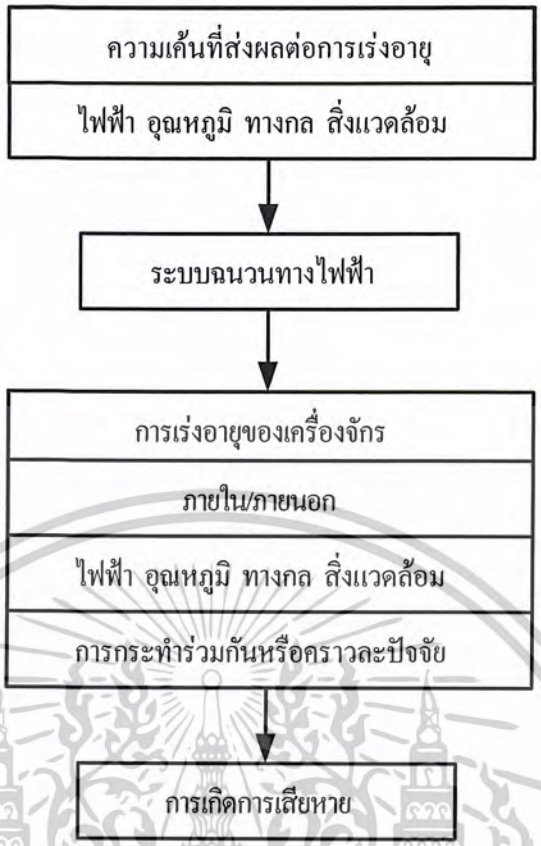
ประเภท H คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ (Silicon elastomer) และวัสดุจำพวกไมกา ใยแก้ว ใยหิน ฯลฯ รวมเข้าด้วยกันโดยมีสารยึดที่เหมาะสม เช่น ซิลโคนเรซิน ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นอนินทรีย์อย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท H ได้

ประเภท C (มากกว่า 180 C) คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกไมกา แก้ว และหินเขี้ยวหนุมานอย่างเดียว หรือหลายอย่างรวมกันโดยไม่มีสารยึดอนินทรีย์ (inorganic binder) ก็ได้ ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท H ได้ วัสดุหรือวัสดุที่รวมเข้าด้วยกันดังกล่าวในประเภทนี้ จะมีขีดจำกัดทางอุณหภูมิซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และไฟฟ้าของวัสดุนั้น

2.2 การเร่งอายุ

การเร่งอายุ หมายถึงการที่ระบบฉนวนไฟฟ้าหนึ่งถูกกระทำโดยปัจจัยการเร่งอายุปัจจัยเดียวหรือหลาย ๆ ปัจจัยร่วมกันกระทำจนทำให้คุณสมบัติฉนวนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร ซึ่งความเค้นที่ส่งผลต่อการเร่งอายุนั้นอาจเป็นผลที่เกิดจากทั้งภายในและภายนอกระบบก็ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วระบบฉนวนทางไฟฟ้ามักจะได้รับผลกระทบจากความเค้นที่ส่งผลต่อการเร่งอายุจากภายนอกมากกว่า ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นระบบฉนวนทางไฟฟ้าอาจได้รับสิ่งสกปรกหรือความไม่สมบูรณ์บางประการเข้าไปด้วยดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-1 แสดงอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

ชนิดและระดับของสิ่งสกปรกและหรือขนาดของความไม่สมบูรณ์ของระบบฉนวนทางไฟฟ้ามักจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรซึ่งการลดระดับของปัจจัยที่ได้กล่าวมาก็จะส่งผลให้คุณภาพการใช้งานของเครื่องจักรมีสภาพดีขึ้น ดังนั้น เพื่อที่จะให้ได้ผลจากการทดสอบมีค่าที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ ควรที่มีความเป็นไปได้ที่จะมีสิ่งสกปรกหรือความไม่สมบูรณ์ของระบบฉนวนทางไฟฟ้าตามที่เกิดขึ้นจริงในการใช้งาน

ปัจจัยการเร่งอายุที่เกิดจากอุณหภูมิ ความเค้นทางไฟฟ้าและทางกล หรือสภาพแวดล้อมซึ่งทำการเร่งอายุเครื่องจักรอยู่นั้น ท้ายสุดแล้วก็จะนำไปสู่ความเสียหายของเครื่องจักร แม้ความเค้นบางปัจจัยไม่อาจส่งผลกระทบต่อระบบฉนวนได้ในช่วงแรกแต่ก็อาจส่งผลกระทบได้ในภายหลังและทำให้ระดับการเกิด การเสื่อมสภาพของระบบฉนวนเปลี่ยนไป

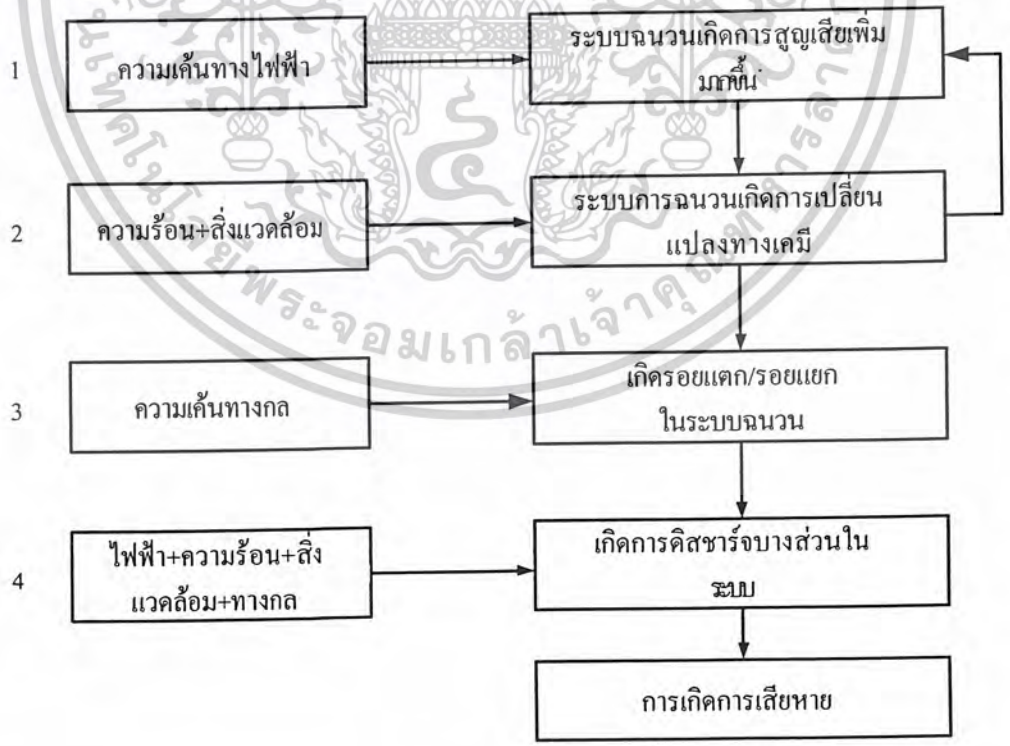
การเร่งอายุของระบบฉนวนนั้นอาจเกิดจากปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสภาพฉนวนหรืออาจเกิดจากปัจจัยหลาย ๆ ปัจจัยที่เป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อสภาพของระบบฉนวนพร้อมกันก็ได้ ซึ่งปัจจัยการเร่งอายุนั้นสามารถส่งผลกระทบร่วมกันซึ่งนี่อาจกล่าวได้ว่าเป็นการกระทำร่วมกันระหว่างความเค้น ซึ่งการกระทำร่วมกันนี้อาจเสริมหรือหักล้างผลที่จะเกิดต่อสภาพฉนวนก็ได้ การเร่งอายุในทางปฏิบัตินั้นอาจมีความซับซ้อนและบ่อยครั้งที่ความเสียหายของเครื่องจักรมักเกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมกันของปัจจัยต่าง ๆ กระทำอย่างสม่ำเสมอแม้ว่าความเสียหายนั้นอาจเกิดจากเพียงปัจจัยเดียวที่เป็นส่วนสำคัญก็ตาม

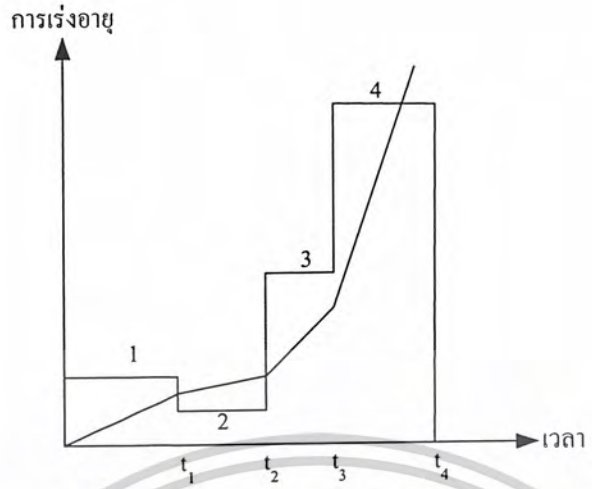
ในกระบวนการทดสอบเพื่อการหาค่านั้นแบบจำลองของการทดสอบนั้นควรประกอบไปด้วยปัจจัยการเร่งอายุเครื่องจักรตามที่เกิดขึ้นจริงในการใช้งาน แต่ในทางปฏิบัติแล้วมักเป็นการยากเสมอที่จะทำให้ได้ตามนั้นโดยเฉพาะเมื่อไม่สามารถเข้าใจถึงรายละเอียดของช่วงการกระทำของการเร่งอายุเครื่องจักรได้อย่างสมบูรณ์เนื่องมาจากปัจจัยการเร่งอายุนั้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบฉนวนพร้อมกันหรืออาจส่งผลในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น

ยกตัวอย่างเช่น สมมุติระบบฉนวนทางไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยความเค้นดังต่อไปนี้ คือ ความเค้นทางไฟฟ้าและทางกล ความร้อน และสภาพแวดล้อมดังรูปที่ 2-2 ในระหว่างขั้นตอนแรกความเค้นทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุของการสูญเสียทางฉนวนและด้วยเหตุนี้เป็นผลทำให้อุณหภูมิในฉนวนเพิ่มขึ้นมาก ในหนึ่งหรือหลายจุดของตัวฉนวน ในขอบเขตของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ ความเค้นจากสภาพแวดล้อมและความร้อนกลายเป็นปัจจัยการเร่งอายุและทำให้คุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป (ในขั้นตอนที่ 2) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้สามารถทำให้อัตราการเร่งอายุฉนวนโดยรวมเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2-3 เมื่อคุณสมบัติทางกลของฉนวนได้รับผลกระทบจนเสื่อมสภาพถึงจุดวิกฤติซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นทางกล นั้นก็จะเกิดการปริแตกที่บางจุด (ในขั้นตอนที่ 3) ต่อมาเมื่อขนาดของจุดที่ปริแตกนั้นมีขนาดมมากพอก็จะมีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น และในขั้นตอนสุดท้ายนี้ก็จะนำไปสู่การสูญเสียอย่างสมบูรณ์ (ในขั้นตอนที่ 4) ด้วยเหตุนี้การเร่งอายุจึงไม่แปรตามโดยตรงต่อเวลาดังที่แสดงในรูปที่ 2-3



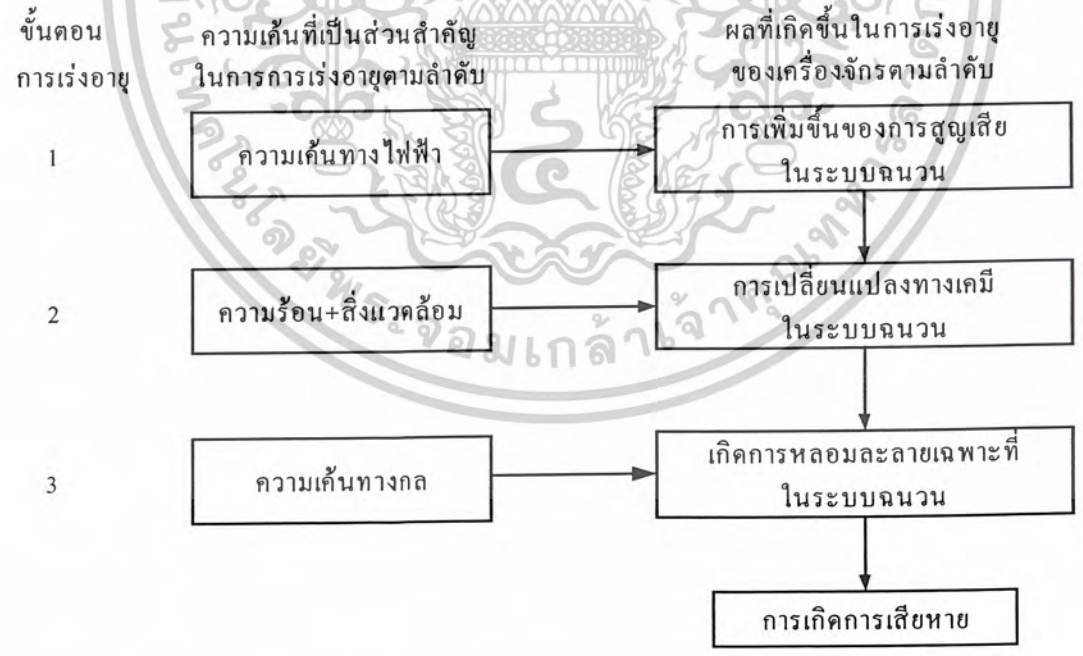
รูปที่ 2-2 ตัวอย่างของความเป็นไปได้ของการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่ง การทำงานตามลำดับของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



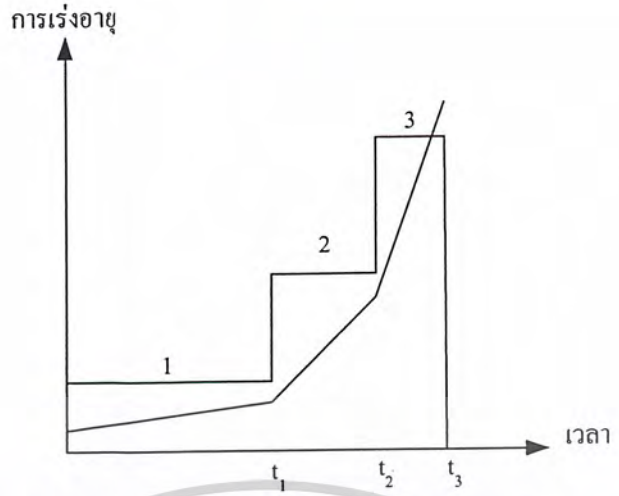
รูปที่ 2-3 แสดงการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลาตามรูปที่ 2-2

ยังมีอีกลักษณะหนึ่งดังที่แสดงในรูปที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดนานมากขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และผลนั้นทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ของอุณหภูมิทำให้เกิดการหลอมในบางที่ ซึ่งผลที่ตามมาภายหลังในขั้นตอนที่ 3 นั้นเกิดการสูญเสียความแข็งแรงทางกลก็พอที่จะเป็นสาเหตุของการเกิดความเสียหายได้ ซึ่งลักษณะ การเร่งอายุและเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-4 ตัวอย่างของความเป็นไปได้ของการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-5 แสดงการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลาตามรูปที่ 2-4

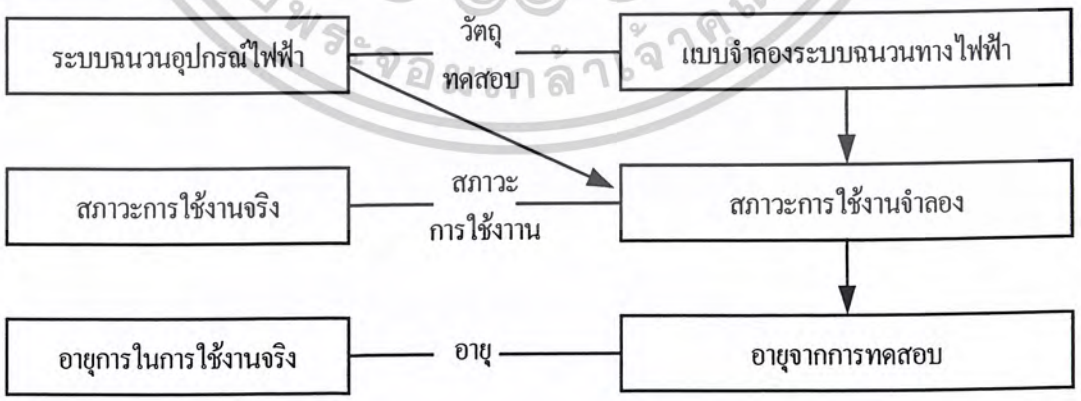
ดังจะเห็นได้จาก 2 ตัวอย่างที่ผ่านมาของการเร่งอายุที่เกิดจากหลายๆ ปัจจัยว่าเป็นการยากที่จะจำลองเข้าไปในกระบวนการทดสอบ

ด้วยเหตุนี้ การเลือกสภาวะการทดสอบก็จะไม่สามารถก่อให้เกิดสัดส่วนที่เท่ากันระหว่างการทำงานได้และในปลายสุดของกรณีก็สามารถนำไปสู่วิธีการเกิดการเสียหาย แบบอื่นตามการกระทำที่ไม่ปกติภายใต้สภาวะการทำงาน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าผลของการทดสอบอาจมีค่าความผิดพลาดในการทำการทำนายอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าจากกระบวนการทดสอบ

2.3 การเตรียมวิธีการหาค่า

2.3.1 วิธีการเบื้องต้นสำหรับการเตรียมวิธีการหาค่า

การเตรียมวิธีการหาค่าของระบบฉนวนควรพิจารณาอย่างรอบคอบตามแบบแผนวิธีการหาค่าเบื้องต้นดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 วิธีการเบื้องต้นของวิธีการหาค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.1 วัตถุ

วัตถุฉนวนทางไฟฟ้าควรเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีมาแต่เดิมหรือเหมือนเดิม หรือเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ หรือเป็นแบบจำลองของอุปกรณ์นั้น โดยทั่วไปควรหาข้อมูลทางเฉพาะของระบบฉนวนไฟฟ้าให้มากที่สุดเพื่อก่อให้เกิดผลที่ดีที่สุด เช่น เราอาจจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเฉพาะเมื่อต้องการสร้างแบบจำลอง

2.3.1.2 สภาวะการใช้งาน

ก่อนการออกแบบกระบวนการทดสอบควรที่จะทราบถึงลักษณะบางส่วนของสภาวะการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าของแต่ละระบบฉนวนทางไฟฟ้านั้นซึ่งอาจทราบได้จาก

1. การระบุถึงความเค้นที่ปรากฏ เมื่ออุปกรณ์และหรือระบบฉนวนใหม่นั้นถูกออกแบบสำหรับสภาวะการใช้งานในกรณีพิเศษรวมทั้งสภาพแวดล้อมและหน้าที่ของระบบฉนวนนั้น
2. บันทึกการใช้งานเมื่อการปรากฏของการทำงานได้ถูกนำมาใช้ในการหาค่าระบบฉนวน ระดับของความเค้นอาจถูกกำหนดโดยช่วงระยะเวลาของความเค้นที่กระทำต่อระบบฉนวน หรือโดยรายงานจากขีดระดับความเค้นสูงสุดที่เกี่ยวเนื่องกับหน้าที่ที่ปรากฏ ซึ่งแสดงตามลักษณะความสัมพันธ์ของความเค้นและเวลา
3. การรู้จักสภาวะการใช้งานของระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงที่รู้ถึงคุณสมบัติเรียบร้อยแล้วบนพื้นฐานของของบันทึกการใช้งาน และเพื่อที่จะนำระบบฉนวนที่นำมาทดสอบมาทำการเปรียบเทียบโดยการทดสอบภายใต้กระบวนการเดียวกัน ภายใต้ความคล้ายคลึงหรือความสม่ำเสมอที่เท่ากันของสภาวะการใช้งาน

2.3.1.3 จำนวนอายุ

จำนวนอายุมักเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากระบบฉนวนทางไฟฟ้าและสภาพวะการใช้งาน ซึ่งจำนวนอายุนี้เองที่เป็นเป้าหมายหลักในการหาค่า ซึ่งอาจเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งดังที่แสดงข้างล่าง

1. เวลาการใช้งานของระบบฉนวนตั้งแต่เริ่มการใช้งานจนถึงจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนที่เกิดการเสียหายของระบบฉนวนไฟฟ้า
2. ช่วงอายุหรือเวลาของการทำงานที่ปราศจากการเกิดการเสียหาย
3. ช่วงอายุหรือเวลาของกระบวนการทดสอบจนถึงจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนตามบรรทัดฐานที่กำหนด โดยอาจใช้หรือไม่ใช้การทดสอบโดยการเร่งอายุระบบฉนวนก็ได้

2.4 กระบวนการหาวิธีการหาค่าเพื่อจัดคุณสมบัติระบบฉนวนทางไฟฟ้า

2.4.1 ข้อพิจารณา

แนวทางของการทำการกำหนดรายละเอียดกระบวนการการหาวิธีการหาค่านี้จะเข้าไปเกี่ยวข้องกับการพิจารณาเทคนิคและการใช้งานที่เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยที่ใส่เข้าไป สู่ระบบฉนวนทางไฟฟ้า และอายุตามการตัดสินการเร่งอายุของเครื่องจักร การปฏิบัติที่เป็นไปได้ตามที่คาดไว้นั้น ย่อมขึ้นอยู่กับผู้ทดสอบ ซึ่งการกำหนดรายละเอียดของการดำเนินการนั้นควรง่ายที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยที่ต้องไม่ขาดส่วนที่สำคัญตามที่ต้องการในการทดสอบ ทั้งนี้ควรพิจารณาถึงความประหยัดตามความเหมาะสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ประเภทของโครงสร้างการหาค่า

ประเภทของการหาค่าจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับว่าเราได้มีข้อที่สำคัญของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบแบบใดซึ่งโครงสร้างนั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภทด้วยกันดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-7

2.4.2.1 การหาค่าจากข้อมูลที่ได้จากประสบการณ์การใช้งาน

บันทึกการใช้งานที่เกี่ยวกับสภาวะการใช้งาน ช่วงเวลาที่ใช้งานโดยปราศจากหรือจนกระทั่งเกิดการเสียหาย ผลของการซ่อมบำรุง ฯลฯ จะถูกใช้ในการหาค่าโดยวิธีนี้

บันทึกการทำงานที่จะบันทึกสภาวะการทำงานที่สัมพันธ์กันที่เกิดขึ้นทั้งหมด ในระบบฉนวนและข้อมูลนั้นควรที่จะบันทึกตามที่เกิดขึ้นจริงในระบบเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือแก่ข้อมูลในการปฏิบัติความถูกต้องและแน่นอนของข้อมูลอาจไม่ถูกต้องเสมอไปในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องพิจาณาภายใต้ข้อมูลที่จำกัดให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

คุณสมบัติพื้นฐานของบันทึกการทำงานของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบควรที่จะเป็นรูปแบบเดียวกันกับคุณสมบัติพื้นฐานของบันทึกการทำงานของระบบฉนวนที่ใช้นำมาอ้างอิงเพื่อใช้เปรียบเทียบกระบวนการทดสอบ

2.4.2.2 การเปรียบเทียบกระบวนการหาค่าของระบบฉนวนไฟฟ้าที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาอ้างอิง

เราจะใช้โครงสร้างนี้ก็ต่อเมื่อระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงนั้นมีคุณสมบัติที่ผ่านตามข้อกำหนดอยู่แล้วโดยอาจทราบได้จากกระบวนการหาค่าบนพื้นฐานของประสบการณ์การใช้งานหรือกระบวนการทดสอบ ระบบฉนวนไฟฟ้าที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนไฟฟ้าที่นำมาอ้างอิงนั้นต้องมีการปฏิบัติในการเร่งอายุและการตรวจสอบสภาพระบบฉนวนที่เป็นรูปแบบเดียวกัน

2.4.2.3 การเปรียบเทียบข้อมูลจากกระบวนการทดสอบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบกับข้อกำหนดการใช้งานของระบบฉนวน

เราจะใช้โครงสร้างนี้ เมื่อปราศจากระบบฉนวนที่นำมาอ้างอิง และปราศจากข้อมูลจากประสบการณ์การใช้งาน ดังนั้น ระบบฉนวนที่นำมาทดสอบจะถูกทดสอบตามข้อกำหนดว่าสามารถผ่านข้อกำหนดนั้น ๆ ได้หรือไม่

โดยมากโครงสร้างนี้จะใช้เมื่อเลือกใช้ระบบฉนวนชนิดใหม่ที่ยังไม่เป็นที่รู้จัก (ระบบฉนวนทางไฟฟ้าชนิดใหม่ อุปกรณ์หรือเครื่องจักรชนิดใหม่ รวมทั้งการนำไปใช้งานที่สภาวะใหม่) กระบวนการทดสอบควรที่จะเป็นไปตามข้อกำหนดและต้องสามารถพิสูจน์ได้ถึงความสามารถของระบบฉนวนที่จะมีอายุตามข้อกำหนดได้

2.4.3 ข้อพิจารณาในทางปฏิบัติ

2.4.3.1 การเลือกวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ

การเลือกวัตถุที่ใช้ในการทดสอบสามารถส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบและส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้จากสมการอีกด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุและข้อพิจารณาในทางปฏิบัติอื่นๆรูปแบบการทดสอบที่ใช้กับอุปกรณ์หรือแบบจำลองจะถูกนำมาใช้ ถ้าระบบฉนวนทางไฟฟ้าอย่างง่ายๆที่ประกอบด้วยวัสดุที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นฉนวนทางไฟฟ้าชนิดเดียวหรือประกอบด้วยการรวมกันอย่างง่ายๆของวัสดุหลายชนิดและความเค้นที่กระจัดกระจายจะไม่เหมาะสมจากการทดสอบความทนทานของวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า

2.4.3.2 การทดลองกระบวนการทดสอบ

ในการทดสอบหน้าที่ที่มีหรือไม่มีระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิง วัตถุทดสอบถูกกำหนดตารางการเร่งอายุโดยความเค้น ซึ่งมักอยู่ในรูปของความเค้น เพื่อแทนอายุที่เกิดจากการใช้งานจริง กระบวนการวินิจฉัยที่เป็นช่วงเวลาถูกนำมาใช้เพื่อสร้างความก้าวหน้าของกระบวนการการวินิจฉัย ความซับซ้อนของการทดสอบ กำหนดให้ต้องใช้ความพยายามและต้นทุนในการทดสอบ โดยบรรทัดฐานจะเป็นปัจจัยในการเร่งอายุวัตถุทดสอบ และผลกระทบร่วมกันที่อาจจะเป็นไปได้ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบ

2.4.3.3 ข้อสรุปสำหรับการปฏิบัติเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน

เพื่อจะช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับกรณีต่าง ๆ ที่จะต้องพิจารณาก่อนการพัฒนามาตรฐานสำหรับการหาค่าระบบฉนวนทางไฟฟ้า

1) ข้อมูลจากประสบการณ์การใช้งานมีประโยชน์สำหรับการหาค่าโดยตรง กรณีนี้ต้องการกฎพิเศษเกี่ยวกับคำแนะนำที่จำเป็นและวิธีการในการวิเคราะห์

2) การทดสอบอายุอย่างง่ายของวัสดุที่เป็นฉนวน อาจจะถูกนำมาใช้เมื่อกระบวนการทดสอนวัสดุที่มีอยู่มีประโยชน์ต่อระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ

3) การทดสอบเปรียบเทียบการทำงานโดยใช้แบบจำลองชิ้นส่วนอุปกรณ์เป็นวัตถุทดสอบต้องการการวิเคราะห์การเร่งอายุทางกลภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริงเพื่อตัดสินใจเลือกวิธีการทดสอบที่เหมาะสม

ในหลักการทดสอบเปรียบเทียบการทำงานอาจเป็นไปได้ที่จะไม่ใช้ความรู้ที่เป็นรายละเอียดของการเร่งอายุทางกล ความจำเป็นสำหรับการทดสอบการทำงานเป็นความรู้ของการแสดงความเค้นจากการใช้งาน การหาค่าที่ถูกต้องและรักษาความสมดุลของผลกระทบในการเร่งอายุ

2.5 องค์ประกอบการทดสอบการเร่งอายุ

2.5.1 วัตถุทดสอบ

2.5.1.1 โครงสร้างของวัตถุทดสอบ

วัตถุทดสอบอาจจะเป็นส่วนที่สมบูรณ์ซึ่งไม่ได้รวมอยู่ในระบบฉนวนทางไฟฟ้าหรืออาจจะถูกสร้างขึ้นมาอย่างเพียงพอที่จะแทนรูปร่างภายนอกที่มีส่วนประกอบสมบูรณ์เพื่อนำไปใช้ในการหาค่า วัตถุทดสอบทั้งหมดควรจะนำไปใช้โดยปกติอย่างเต็มที่หรือมุ่งสู่กระบวนการผลิตเท่าที่เป็นไปได้ในการปฏิบัติ เมื่อส่วนประกอบที่จะใช้ระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาทดสอบมีอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับทางกลในการใช้งาน จึงถูกคำนึงผลกระทบต่อกระบวนการเร่งอายุ ด้วยเหตุนี้จึงควรจะจำลองเป็นวัตถุทดสอบ วัตถุทดสอบควรจะถูกออกแบบขึ้นมาให้มีความคงทนต่อระดับของความเค้น ซึ่งสามารถนำไปใช้งานระหว่างการเร่งอายุและรอบย่อยของการวินิจฉัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุทดสอบที่รวมหลายๆ ส่วนประกอบที่นำไฟฟ้าจึงอาจจะมีความเค้นทางไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างส่วนประกอบเหล่านี้ อาจจะเกิดขึ้นระหว่างการเร่งอายุหรือรอบย่อยของการวินิจฉัย ควรจะถูกออกแบบหรือสร้างขึ้นมาให้สามารถเป็นจริงได้ตามผลกระทบในการเร่งอายุ

2.5.1.2 จำนวนของวัตถุทดสอบ

เมื่อสามารถทำได้ วัตถุทดสอบอย่างน้อยที่สุดจำนวน 5 ชิ้น จะถูกทำให้มีอายุ สำหรับปัจจัยทางไฟฟ้า ทางความร้อน ทางกล สิ่งแวดล้อม หรือการรวมหลายๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเค้นทำให้เกิดความเค้นจะถูกรวมอยู่ในแบบแผนที่ใช้ในการหาค่า

หมายเหตุ สำหรับสถิติของวัตถุทดสอบที่ยังคงใช้งานได้นั้นวัตถุตัวอย่างอย่างน้อยที่สุดจำนวน 5 ชิ้น ที่ต้องการให้สามารถเข้าสู่เกณฑ์ของจุดสิ้นสุดอายุได้

2.5.1.3 การทดสอบเพื่อรับรองคุณลักษณะ

ก่อนเริ่มต้นรอบย่อยแรกของการเร่งอายุ การตรวจตราด้วยสายตาและการทดสอบเพื่อรับรองคุณลักษณะปกติทั้งหมดของวัตถุทดสอบควรจะทำกับวัตถุทดสอบทั้งหมด

2.5.1.4 รอบย่อยของการปรับสภาพวัตถุทดสอบ

ถ้าให้มีความเหมาะสม วัตถุทดสอบควรถูกปรับสภาพเพื่อสร้างสภาวะที่ดีกว่าของระบบฉนวนทางไฟฟ้าในการใช้งาน

2.5.1.5 การทดสอบเพื่อวินิจฉัยเบื้องต้น

วัตถุทดสอบแต่ละชิ้นควรจะถูกนำมาทดสอบเพื่อวินิจฉัย ถูกเลือกมาสำหรับกระบวนการหาค่าก่อนเริ่มต้นรอบย่อยแรกของการเร่งอายุ

2.5.1.6 ระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิง

ระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิงควรที่จะถูกนำมาทดสอบโดยใช้กระบวนการทดสอบที่เหมือนกันกับระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ และอยู่ในห้องทดลองเดียวกันใช้อุปกรณ์ทดสอบชนิดเดียวกัน สภาพการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิงควรที่จะถูกสร้างขึ้น ซึ่งอาจจะสร้างจากประสบการณ์การใช้งานภายใต้เงื่อนไขการปฏิบัติแบบธรรมดาหรือโดยกระบวนการทดสอบที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขการปฏิบัติแบบอ้างอิง

2.5.2 เงื่อนไขการทดสอบ

2.5.2.1 การทดสอบแบบต่อเนื่องและแบบรอบการทดสอบ

กระบวนการทดสอบอาจจะเป็นการทดสอบแบบเร่งอายุอย่างต่อเนื่อง ถ้าเกณฑ์ของจุดสิ้นอายุถูกกำหนดโดยการเสียหาทางไฟฟ้าหรือทางกลหรือเบรคดาวน์ ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากระดับความเค้นของการเร่งอายุหรือจากการให้ความเค้นอย่างต่อเนื่อง อีกทางหนึ่งการทดสอบแบบกำหนดเวลาซึ่งจะเป็นแบบเบรคดาวน์หรือการทดสอบเพื่อวินิจฉัยแบบอื่นก็มีความเหมาะสม

นอกจากนั้น ยังมีกระบวนการทดสอบที่สามารถใช้ได้โดยทั่วไปคือการทดสอบรอบอายุซึ่งประกอบด้วยลำดับที่มีการทำซ้ำของการเร่งอายุต่างๆ และรอบย่อยของการวินิจฉัย ลำดับของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบนี้ยอมรับให้มีการใช้ปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวหรือใช้หลายปัจจัยในการทดสอบการเร่งอายุ โดยให้มีการรบกวนที่เกิดขึ้นอย่างไม่ได้ตั้งใจน้อยที่สุดระหว่างปัจจัยในการเร่งอายุต่างๆ กับปัจจัยทางกล

2.5.2.2 ระดับของความเค้นในการทดสอบ ปัจจัยการเร่งอายุ ปัจจัยในการวินิจฉัย

เงื่อนไขความเค้นในการทดสอบควรจะพิจารณาเงื่อนไขความเค้นทั้งหมดอย่างเข้มงวดมากที่สุด โดยใช้ประสบการณ์ในการใช้งานสำหรับออกแบบระบบฉนวนทางไฟฟ้า เงื่อนไขเหล่านี้ต้องการให้ไม่เกิดเหตุการณ์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่ค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละความเค้น เงื่อนไขการปฏิบัติการแบบอ้างอิงควรจะกำหนดอย่างชัดเจนสำหรับกระบวนการหาค่า และระดับ ชนิดของปัจจัยในการวินิจฉัยควรเกี่ยวกับเงื่อนไขการปฏิบัติการแบบอ้างอิง

ระดับความเค้นสำหรับรอบย่อยของการเร่งอายุควรจะถูกเลือก ดังนั้น เงื่อนไขทางกลของการเร่งอายุไม่ได้มีความสำคัญแตกต่างไปจากประสบการณ์ในการใช้งานปกติการเพิ่มขึ้นของระดับความเค้นอาจจะสามารถยอมรับได้เมื่อไม่ได้มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงการเร่งอายุทางกล

การทดสอบการเร่งอายุโดยอาศัยปัจจัยหลายปัจจัยจะนิยมใช้กันมากกว่าเมื่อมีการจำลองการทำงานปกติขึ้นมาอย่างดีที่สุด เมื่อกระบวนการทดสอบนี้ไม่ถูกนำมาใช้ ดังนั้นการทดสอบโดยลำดับรอบย่อยของการทดสอบหรือรอบย่อยการทดสอบด้วยความเค้นหนึ่งความเค้นควรจะถูกนำมาใช้

รอบย่อยการเร่งอายุต่อจากนี้ เงื่อนไขของรอบย่อยและการวินิจฉัยของรอบย่อยควรจะกระทำเมื่อมีความจำเป็น การเสียหายของส่วนต่างๆ ของวัตถุตัวอย่างที่ใช้ทดสอบระหว่างการทดสอบเพื่อวินิจฉัยประกอบขึ้นเป็นการเสียหายทั้งหมดของระบบควรจะมีการรายงานตามผลที่ได้ออกมานั้น ความเค้นทางไฟฟ้าควรจะนำมาใช้เป็นปัจจัยหลักในการวินิจฉัยเพื่อรับรองเงื่อนไขของการทำให้วัตถุทดสอบมีอายุ อุปกรณ์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำมักจะจำเป็นที่จะมีกระบวนการวินิจฉัยเบื้องต้นเพื่อที่จะทำให้แน่ใจได้ว่าความเค้นทางไฟฟ้าที่ใช้เป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยในการตรวจสอบความอ่อนแอที่ถูกทำให้เพิ่มขึ้นระหว่างรอบของการเร่งอายุ

2.5.3 การกำหนดอายุการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

อายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าถูกกำหนดจากรูปแบบการทดสอบวิเคราะห์เงื่อนไขการใช้งานแทนการประมาณค่าอายุการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้า การที่จะเร่งกระบวนการเร่งอายุเพื่อลดเวลาในการทดสอบความเค้นในการทดสอบจะถูกปรับระดับขึ้น

2.5.3.1 การตีความหมายผลการทดสอบอายุ

ผลจากการทดสอบที่ถูกกำหนดไว้อย่างถูกต้องเหมาะสม โดยกระทำที่จุดต่ำสุดของการเพิ่มระดับความเค้นขึ้น 3 ระดับอาจจะอนุญาติให้มีการประเมินฟังก์ชั่นของความเค้นกับอายุในขอบเขตของความเค้นใช้งานที่ได้กำหนดไว้ สำหรับการประเมินที่เหมาะสม จุดร่วมกันของกราฟที่เป็นฟังก์ชั่นของความเค้นกับอายุควรที่จะถูกเลือกเมื่อใดก็ตามที่มีความเป็นไปได้ เช่น ไดอะแกรมความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเค้นกับอายุบรรลุผลสำเร็จระดับของการประเมินควรไม่เกินสองอันดับของขนาดสเกลเวลาที่พล็อตเป็นค่าลอการิทึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเร่งอายุทางไฟฟ้าและทางกล กฎทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดไว้ของอายุได้แสดงไว้ในข้อ 2.6.3.1 และ 2.6.3.2 ตามลำดับ

2.5.3.2 การเปรียบเทียบข้อมูลการทดสอบอายุ

ค่าการเปรียบเทียบการทดสอบของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบกับระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิงต้องการให้ระบบฉนวนทางไฟฟ้าทั้งสองถูกทดสอบตามข้อ 2.5.3.1 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบระบบฉนวนที่ใช้ทดสอบอาจจะถูกพิจารณาความแตกต่างที่สามารถยอมรับได้ถ้าระบบฉนวนยังคงใช้งานได้ ที่ระดับความเค้นที่กำหนดไว้ ซึ่งไม่สำคัญน้อยกว่าการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิง

ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะแสดงให้เห็นว่าอายุการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบนั้น คาดว่าจะเท่ากันหรือมากกว่าอายุการใช้งานที่ได้จากประสบการณ์ที่ผ่านมาของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิงสำหรับเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้

2.6 การเร่งอายุ

2.6.1 ทั่วไป

ก่อนดำเนินการตามแบบแผนการทดสอบ ควรกำหนดการเร่งอายุเครื่องจักรและความสำคัญของเครื่องจักรสำหรับชนิดของอุปกรณ์หรือเครื่องมือซึ่งจะรวมกันเป็นระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ กระบวนการทดสอบโดยสรุปต่อจากนี้จะสามารถให้ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยสำคัญที่ถูกกำหนดไว้

2.6.2 การประเมินการเร่งอายุเครื่องจักร

ในภาคผนวก ก แสดงแผนผังลำดับการทำงาน 4 แผนผัง ดังรูป ก-1, ก-2, ก-3 และ ก-4 ซึ่งอธิบายตามลำดับในบางรายละเอียดของปัจจัยทั้งภายในและภายนอกในการเร่งอายุทางไฟฟ้า ทางความร้อน ทางกล และสิ่งแวดล้อมของระบบฉนวนทางไฟฟ้า ในแต่ละแผนผังจะถูกยึดเป็นหลักประสบการณ์การใช้งานของชนิดระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันและแสดงความเป็นไปได้ของเครื่องจักรที่จะเกิดการเสื่อมและการเสียสภาพซึ่งสามารถเกิดขึ้นกับชนิดการเร่งอายุที่ต่างกันและการเกิดผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัยในการเร่งอายุ แม้ว่าเครื่องจักรกลทั้งหลายที่เสียสภาพจะแสดงออกมา แผนผังไม่ได้เจตนาให้เกิดความชัดเจนกับเครื่องจักรที่อาจจะพบในขณะที่มีการใช้งานจริงของอุปกรณ์ทั้งหมด จึงมีความสำคัญที่ต้องบันทึกการเร่งอายุที่จะนำไปสู่การเสียสภาพในที่สุดเป็นสาเหตุที่มักเกิดขึ้นกับเครื่องจักรที่มากกว่า 1 เครื่อง

แผนผังลำดับการทำงานควรจะถูกนำมาใช้ในกรณีต่อไปนี้

1) เป็นบัญชีที่อธิบายการเร่งอายุของเครื่องจักรที่เป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือ เครื่องจักรสามารถเกิดขึ้นเป็นลำดับหรือพร้อมกัน
2) เพื่อพัฒนารูปแบบและการทดสอบโดยเพิ่มปัจจัยการเร่งอายุหรือการทดสอบเป็นรอบการทดสอบ ขนาดและชนิดของความเค้นที่ถูกนำมาใช้และระยะเวลาของการทดสอบจะขึ้นอยู่กับว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อการเร่งอายุของเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เพื่อพัฒนาการทดสอบเพื่อวินิจฉัยหรือรอบย่อยการทดสอบให้เหมาะสมเพื่อประเมินเงื่อนไขของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของความรู้จากประสบการณ์การใช้งาน เงื่อนไขในการปฏิบัติ และคุณสมบัติของส่วนประกอบของระบบฉนวนทางไฟฟ้าภายใต้การพิจารณา ควรเลือกหนึ่งแผนผังหรือมากกว่าที่แสดงปัจจัยหนึ่งเป็นปัจจัยหลักหรือหลายๆ ปัจจัย การเร่งอายุของเครื่องจักรด้วยวิธีต่างๆ ที่นำไปสู่การเสียสภาพควรที่จะพิจารณาอย่างระมัดระวัง กระทำในระดับที่ทำให้เกิดความเปรอะเปื้อนและความเสียหายในระบบฉนวนทางไฟฟ้า แผนผังที่ปรับปรุงใหม่ซึ่งรวมเพียงความสัมพันธ์ของการเร่งอายุของเครื่องจักร ควรจะสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นตัวช่วยในการปรับปรุงแบบการเร่งอายุและรอบการทดสอบเพื่อวินิจฉัยแผนผังตัวอย่างแสดงอยู่ในรูป ก-5 ถึง รูป ก-6

ถ้ามีการแสดงรายละเอียดไม่เพียงพอที่จะให้ประโยชน์เกี่ยวกับประสบการณ์การใช้งานหรือความเป็นไปได้ที่จะเร่งอายุของเครื่องจักร ดังนั้นเงื่อนไขการเร่งอายุควรตั้งอยู่บนพื้นฐานของความเค้นที่กำหนดไว้สำหรับระบบฉนวนที่ได้ออกแบบเอาไว้

2.6.3 การเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ

2.6.3.1 ทางไฟฟ้า (ดูรูป ก-1)

การเร่งอายุทางไฟฟ้า(แรงดันกระแสสลับ กระแสตรง หรือแรงดันอิมพัลส์)เกี่ยวข้องกับ

1) ผลกระทบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เมื่อความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าเฉพาะจุดเกินกว่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่เกิดการเบรคดาวน์ในฉนวนที่เป็นของเหลวหรือแก๊สที่อยู่ติดกัน หรือถูกรวมอยู่ในระบบฉนวนทางไฟฟ้า
2) ผลกระทบของการเกิดร่องรอย
3) ผลกระทบของการเกิดปรากฏการณ์ที่เกิดกับฉนวนแข็ง โดยมีลักษณะการเบรคดาวน์คล้ายรูปต้นไม้ (electrical treeing)
4) ผลกระทบของการแยกวัตถุเหลวโดยกระแสไฟฟ้า
5) ผลกระทบที่สัมพันธ์กับบริเวณที่อยู่เหนือพื้นผิวที่อยู่ติดกันของวัสดุ 2 ชิ้นที่มีการฉนวน เมื่อเส้นสัมผัสสนามไฟฟ้าที่มีค่าค่อนข้างสูงสามารถเกิดขึ้นได้
6) ผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ถูกสร้างขึ้นมาจากการสูญเสียอย่างรุนแรงภายในฉนวน
7) ผลกระทบของการอัดประจุในที่ว่าง

รูป ก-1 แสดงปัจจัยทั้งภายในและภายนอกในการเร่งอายุทางไฟฟ้า เมื่อความเค้นทางไฟฟ้าได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นปัจจัยหลักในการเร่งอายุ พิจารณาตัวอย่างจากระบบฉนวนทางไฟฟ้าอย่างง่ายที่ประกอบด้วยตัวนำระนาบที่ขนานกันสองแผ่นถูกตรึงอยู่ในวัสดุที่เป็นฉนวน ส่วนที่โผล่ออกมาซึ่งรู้ว่าเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวนำ และสิ่งที่ปะปนเข้ามา เช่น อนุภาคของฝุ่น เป็นต้น สามารถนำมารวมอยู่ภายในฉนวน รูป ก-1 สามารถทำให้ดูง่ายขึ้น โดยแสดงอยู่ในแผนผังรูป ก-5 ซึ่งแสดงการอัดประจุที่นำไปสู่การเกิด electrical treeing ซึ่งเป็นผลกระทบหลักของการเร่งอายุเครื่องจักร การเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นควรจะมีการทำให้บรรลุเป้าหมายโดยใช้ปัจจัยในการเร่งอายุซึ่งเป็นการเพิ่มการอัดประจุ เช่น การใช้แรงดันไฟฟ้าสูง การทดสอบเพื่อวินิจฉัยควรที่จะถูกออกแบบมาให้สามารถวัดผลกระทบจากการอัดประจุหรือเป็นลักษณะการดิสชาร์จเพียงบางส่วน

ในหลายๆ ระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการปฏิบัติ กระบวนการในการเร่งอายุทางไฟฟ้าที่นำไปสู่การเสียสภาพที่มีความซับซ้อนแสดงดังรูป ก-5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ทำนายว่าปัจจัยในการเร่งอายุมีผลกระทบอย่างไรต่อการมีอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้า กฎความสัมพันธ์อย่างหนึ่งที่เป็นสมการกำลังที่แปรผันตรงกันข้าม จะนำมาใช้ให้มีความสัมพันธ์อย่างหนึ่งที่เป็นสมการที่แปรผันตรงกันข้าม จะนำมาใช้ให้มีความสัมพันธ์ของความเค้นทางไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับการมีอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$L \propto V^{-n}$$

เมื่อ L คือ การมีอายุ

V คือ แรงดัน

n คือ เลขชี้กำลังของแรงดันไฟฟ้าในการมีอายุ

กฎของสมการกำลังที่แปรผันตรงกันข้ามใช้ทำนายความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างการมีอายุกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อพล็อตลงในกระดาษกราฟแบบลอการิทึม สมการอื่นๆ ที่อาจจะมีการนำมาใช้สามารถดูได้จาก IEC 60727-1

ระดับของความเค้นทางไฟฟ้าที่ถูกปรับเพื่อที่จะเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ ในรอบการทดสอบย่อย ตั้งอยู่บนพื้นฐานของช่วงระยะเวลาในการเร่งอายุที่เท่ากับอย่างน้อยที่สุด 2 ช่วงเวลา แบบแผนในการเร่งอายุควรที่จะนำมาใช้กับระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งจะนำไปสู่จุดเสียสภาพของวัตถุทดสอบหลังจากค่าต่ำสุด 5 เปอร์เซ็นต์ของการมีอายุที่ตั้งใจไว้ของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบระดับความเค้นถัดไปที่สูงกว่า ควรได้มาจากความชัน และลักษณะของเส้นโค้งการมีอายุ

หมายเหตุ ถ้าข้อมูลที่มีอยู่อย่างเพียงพอไม่สามารถนำมาใช้อนุญาตให้มีการสร้างระดับของความเค้นที่เพิ่มขึ้นต่ำสุด ดังนั้น ค่าต่างๆ อาจจะถูกกำหนดโดยเลือกการทดสอบที่เหมาะสม

การเร่งอายุทางไฟฟ้า อาจเพิ่มความเร็วได้โดยการทดสอบที่ความถี่ที่สูงกว่าประสบการณ์ในการใช้งานปกติความถี่ที่เพิ่มขึ้นควรจะแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เหมือนกันต่อระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ และระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิง

2.6.3.2 การเร่งอายุทางความร้อน (ดูรูป ก-2)

การเร่งอายุทางความร้อนประกอบด้วย

1) กระบวนการในการเปลี่ยนแปลงค่าทางเคมี และฟิสิกส์ ตัวอย่างผลของการเสื่อมสภาพทางเคมี เช่น โพลิเมอไรเซชั่น, ดีโพลีเมอไรเซชั่น, การแพร่ อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2) ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิทางกลที่เป็นสาเหตุมาจากแรงที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากการแผ่หรือการรวมตัวของความร้อน

ระดับที่เพิ่มขึ้นของกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ที่ดำเนินต่อไปสู่สภาวะสมดุลเทอร์โมไดนามิคเป็นสาเหตุใหญ่ของการเร่งอายุทางความร้อนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามสมการอาร์รีนีอุส(Arrhenius equation) เป็นไปตามสมการ

$$L = A \exp(-E/kT)$$

เมื่อ L คือ การมีอายุ

A คือ ค่าคงที่

E คือ พลังงานกระตุ้น

k คือ ค่าคงที่โบลท์มานน์ (Boktzmann constant)

T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (absolute temperature)

การมีอายุที่อุณหภูมิเฉพาะอุณหภูมิหนึ่งสามารถหาได้จากการตีความหมายข้อมูล ที่พล็อตจากการใช้ค่าลอกการิทึมของการมีอายุกับ 1/T สำหรับคำแนะนำที่มากกว่านี้สามารถดูได้จาก IEC 60216

อุณหภูมิสำหรับระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ต้องหาค่า ควรเลือกมาจากตารางที่ 2-1 เพื่อที่จะสร้างการเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดใน 3 อุณหภูมิทดสอบที่สูงกว่าควรถูกเลือกมาใช้ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดควรถูกเลือกมาซึ่งนำไปสู่จุดเสียสภาพหลังจากจุดต่ำสุด 5 เปอร์เซ็นต์ของการมีอายุที่ตั้งใจไว้ของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ อุณหภูมิ 2 อุณหภูมิที่สูงกว่าควรเลือกในช่วง 20 องศาเซลเซียส ถ้าต้องการอุณหภูมิทดสอบที่มากกว่า 3 อุณหภูมิ ดังนั้นช่วงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส อาจจะถูกนำมาใช้ อุณหภูมิในการเร่งอายุได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-2

หมายเหตุ การทดสอบได้รับการรับรองว่าการมีอายุจะถูกแบ่งครึ่งที่ทุกๆ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ X อุณหภูมิ สำหรับระบบฉนวนทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ X เปลี่ยนแปลงจาก 8 องศาเซลเซียสถึง 15 องศาเซลเซียส

สำหรับระบบฉนวนทางไฟฟ้าบางระบบอุณหภูมิในการทดสอบสูงสุดควรต่ำกว่าจุดเปลี่ยนสถานะของระบบ เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

55601

อุณหภูมิในการทำงาน°C	55	75	90	105	120	130	155	180	200	220	250
ระดับอุณหภูมิ			(Y)	(A)	(E)	(B)	(F)	(H)			
อุณหภูมิในการเร่งอายุ °C	135	155	170	185	200	210	235	260	280	300	330
	125	145	160	175	190	200	225	250	270	290	320
	115	135	150	165	180	190	215	240	260	280	310
	105	125	140	155	170	180	205	230	250	270	300
	95	115	130	145	160	170	195	220	240	260	290
	85	105	120	135	150	160	185	210	230	250	280
	75	95	110	125	140	150	175	200	220	240	270

ตารางที่ 2-2 อุณหภูมิในการเร่งอายุ

2.6.3.3 การเร่งอายุทางกล (ดูรูป ก-3)

การเร่งอายุทางกลประกอบด้วย

1) การเสียสภาพอย่างยากลำบากของส่วนประกอบที่เป็นฉนวนมีสาเหตุมาจากรอบของความเค้นที่ระดับต่ำๆจำนวนมาก
2) ผลกระทบจากอุณหภูมิทางกลที่เป็นสาเหตุมาจากแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่หรือการรวมตัวของความร้อน
3) การปริแตกของฉนวนเนื่องจากความเค้นทางกลที่ระดับสูง เช่น สาเหตุที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากแรงภายนอกหรือเงื่อนไขในการปฏิบัติของอุปกรณ์
4) การเกิดรอยสึกเนื่องจากการเคลื่อนไหวที่สัมพันธ์กันระหว่างส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์
5) การค่อยๆเสื่อมลงของฉนวนภายใต้ความเค้นทางไฟฟ้า,ทางความร้อนหรือทางกล

หมายเหตุ ปรากฏการณ์นี้ควรสามารถจำกัดอยู่ในบางจุดได้เพื่อที่จะได้ไม่ให้มีความกระจายออกไปสู่ส่วนต่างๆของฉนวน

ข้อมูลที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างจำกัดแสดงให้เห็นว่าความเค้นและการมีอายุทางกลมีความสัมพันธ์ตามกฎกำลังผกผัน ดังเช่น การพล็อตลงในกราฟลอการิทึมของความเค้นทางกลกับการมีอายุเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น นอกจากนั้นการมีความสัมพันธ์ร่วมกันพบว่ามีเหตุผล โดยเพิ่มความถี่ของประโยชน์จากความเค้น อย่างไรก็ตามการใช้ความถี่เป็นจำนวนมากๆจะนำไปสู่การเสียสภาพทางกลอื่นๆที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในทางปฏิบัติ เมื่อคำแนะนำที่ชัดเจนซึ่งสามารถยอมรับได้ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ควรที่จะนำมาใช้เพื่อเอาช่วงความเค้นที่จำเป็นต้องเท่ากันมาใช้ให้เกิดประโยชน์กับวัตถุทดสอบเมื่อเป็นไปได้การทดสอบควรที่จะกระทำที่ระดับต่ำสุดของระดับความเค้นทางกล 3 ระดับ ระดับความเค้นสูงสุดควรเป็นเงื่อนไขความเค้นทางกลที่มีการนำมาใช้งานอย่างเข้มงวดมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ข้อแนะนำนอกเหนือจากนี้สำหรับการเลือกระดับการทดสอบความเค้นทางกลนั้นยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ในขณะนี้

2.6.3.4 การเร่งอายุทางสิ่งแวดล้อม(ดูรูป ก- 4)

การเร่งอายุทางสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการเร่งอายุทางความร้อน ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมก็สามารถส่งผลกระทบได้เช่นกัน ในด้านอื่นๆ ชนิด และระดับการเสื่อมลงซึ่งมีสาเหตุมาจากความเค้นต่างๆที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าส่วนด้านอื่นๆที่สำคัญก็เป็นการแบ่งประเภทความเค้นจากการเปลี่ยนแปลงภายในสิ่งแวดล้อม และผลกระทบจากอนุภาคของฝุ่นละอองและสิ่งปนเปื้อนอื่นๆต่อพฤติกรรมทางไฟฟ้าจนกระทั่งได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้งานได้กระบวนการทดสอบที่ยอมรับได้เพียงอันเดียวคือเงื่อนไขทางสิ่งแวดล้อมในการใช้งานอย่างเข้มงวดมากที่สุดระหว่างรอบย่อยของการเร่งอายุ เช่น ใช้ระดับที่ตั้งไว้

หมายเหตุ ปัจจุบันยังไม่มีการยืนยันในหลักทั่วไปที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยในการเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุเกี่ยวกับการเร่งอายุทางสิ่งแวดล้อม

2.6.4 ระดับความเค้น

รอบย่อยอายุควรมีการจำลองความเค้นต่างๆ ที่จะนำมาใช้งาน เมื่อทำการหาค่าของระบบฉนวนทางไฟฟ้า ผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่างความเค้นที่สามารถให้ความสำคัญและจะส่งผลกับการมีอายุในการทำงาน เมื่อกำหนดตารางของความเค้นที่จะนำไปใช้ภายใต้เงื่อนไขการเพิ่มความเร็วการเร่งอายุ ผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันเหล่านี้สามารถทำให้กระบวนการหาค่าถูกยกเลิกได้ ก่อนที่จะกำหนดแบบแผนการเร่งอายุความเค้นที่ใช้ในการเพิ่มความเร็วการเร่งอายุเพียงความเค้นเดียวและความเค้นหลายๆความเค้นการเลือกการทดสอบอาจต้องการการดำเนินการเพื่อตัดสินใจเลือกความสำคัญของผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันโดยตรงได้รับการรับรอง หรือรู้ว่าเป็นจริงตามรูปแบบความสัมพันธ์ในการหาค่าอื่นๆ ดังนั้นรอบย่อยการประกอบด้วยความเค้นที่นำมาใช้พร้อมกัน

2.6.5 ระยะเวลาและจำนวนรอบย่อยการเร่งอายุ

เมื่อการทดสอบแบบรอบทดสอบได้ถูกนำมาใช้นั้นควรที่จะใช้ความสัมพันธ์ที่เป็นเหตุเป็นผลระหว่างระยะเวลาของรอบทดสอบ ความเค้นที่นำมาใช้และความเค้นในทางปฏิบัติที่คาดไว้มีข้อแนะนำอยู่ว่าระยะเวลาของรอบการเร่งอายุในแต่ละความเค้นที่นำมาใช้ควรเลือกมาโดยประมาณค่า 1 ใน 10 ของการมีอายุโดยเฉลี่ยของวัตถุทดสอบที่คาดไว้ ค่าของความเค้นในการเร่งอายุควรสร้างขึ้นสำหรับอุปกรณ์เฉพาะเวลาและขนาดของความเค้นควรพิจารณาจากการทดสอบที่นำมาใช้ได้ง่ายและเร็วที่สุด

2.6.6 รอบย่อยการเร่งอายุ

2.6.6.1 ปัจจัยทางความเค้นเพียงปัจจัยเดียว

ในรอบย่อยการเร่งอายุนี้ วัตถุทดสอบถูกทดสอบด้วยปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวที่เวลาหนึ่ง ปัจจัยการเร่งอายุในรอบย่อยการเร่งอายุนี้เป็นปัจจัยจากเงื่อนไขในการปฏิบัติที่ใช้อ้างอิง ซึ่งเกิดขึ้นในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงอย่างเดียวหรือในลักษณะที่เป็นลำดับ(ดูในข้อ2.6.6.2.1)และไม่มีปัจจัยในการเร่งอายุอื่นๆที่เกิดขึ้นพร้อมกันซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันโดยตรง ดังนั้นในแต่ละความเค้นเหล่านี้อาจจะถูกนำมาใช้ในรอบย่อยการเร่งอายุที่ใช้ปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว

2.6.6.2 ปัจจัยทางความเค้นหลายปัจจัย

เมื่อผลกระทบเกิดขึ้นร่วมกันระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นโดยทางตรง ปัจจัยในการเร่งอายุเหล่านี้ถ้าเป็นไปได้ควรที่จะนำมาใช้พร้อมกัน ในรอบย่อยการเร่งอายุนี้ ปัจจัยในการเร่งอายุ 2 ปัจจัย หรือมากกว่าควรนำมาใช้กับวัตถุทบสอบพร้อมกัน

หมายเหตุ ปัจจัยนี้ยังไม่มีการยืนยันในหลักทั่วไปที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยในการเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุเกี่ยวกับการเร่งด้วยปัจจัยทางความเค้นหลายปัจจัย

2.6.6.2.1 สภาวะในการปฏิบัติที่ใช้อ้างอิงที่มีลักษณะเป็นลำดับ

เมื่อผลกระทบร่วมกันระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นโดยทางอ้อม ความเค้นเหล่านี้อาจถูกนำมาใช้ในลักษณะที่เป็นลำดับมากกว่าลักษณะที่นำมาใช้พร้อมกัน เมื่อมีความเป็นไปได้ระดับความเค้นแต่ละปัจจัยการเร่งอายุอาจจะถูกเลือกมาเพื่อให้การเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุเหมือนกันและควรนำมาใช้กับช่วงระยะเวลาที่เหมือนกัน

2.6.6.2.2 เงื่อนไขในการปฏิบัติที่ใช้อ้างอิงที่มีลักษณะเป็นลำดับซับซ้อน

ในกรณีที่เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ นอกจากการเร่งอายุโดยมีสาเหตุมาจากรูปแบบในการเร่งอายุโดยมีสาเหตุมาจากรูปแบบในการเร่งอายุที่ใช้ความเค้นหนึ่งความเค้นหรือมากกว่าแล้ว สภาวะการใช้งานรวมช่วงเวลาสั้นๆของความเค้นที่เพิ่มขึ้นหรือระดับความเค้นเปลี่ยนแปลงตามเวลารอบการเร่งอายุที่ซับซ้อนควรมีการนำมาใช้ การเร่งอายุที่เป็นรอบการทดสอบนี้ควรรวมอัตราส่วนที่ถูกต้องความเค้นที่เพิ่มเข้าไป ตัวอย่างเช่น ทางไฟฟ้า (แรงดันพัลส์) ทางความร้อน (รอบการทดสอบด้วยความเย็น) ทางกล(แรงสะเทือนจากการลัดวงจร)

2.7 การปรับสภาพก่อนการวินิจฉัย

หลังจากในแต่ละรอบย่อยของการเร่งอายุแล้ว ควรที่จะมีช่วงสั้นๆ ของการปรับสภาพระบบฉนวนเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิผลและค่าความสามารถของช่วงการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย เช่น

1) การให้ความสั่นสะเทือนทางกลเพื่อที่จะให้ปรากฏผลของการปริแตกของฉนวนในระบบฉนวน
2) การให้ความชื้นเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิผลของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้าในภายหลัง
3) การให้ความเค้นทั้งจากทางไฟฟ้า ความร้อน หรือทางกลร่วมกันโดยให้เป็นช่วงเพื่อที่จำลองสภาวะของระบบฉนวนที่เกิดขึ้นเมื่อนำไปใช้งานโดยทั่วไปแล้วระดับความรุนแรงและช่วงระยะเวลาหรือจำนวนของการปรับสภาพควรถูกกำหนดตามลักษณะระบบฉนวนที่นำมาทดสอบจะถูกนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การวินิจฉัย

2.8.1 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัย-บรรทัดฐานของจุดสิ้นสุดอายุ

จุดประสงค์สำคัญในโครงสร้างของการทดสอบเพื่อกาวินิจฉัยนั้นก็เพื่อที่จะกำหนดรูปแบบของจุดสิ้นสุดอายุ ซึ่งในการหาจุดสิ้นสุดอายุนั้นจะกระทำในช่วงรอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยโดยทำหลังจากการทำให้เกิดการเสื่อมทางกายภาพต่อระบบฉนวนหรือการปรับสภาพระบบฉนวนก่อนแล้วนั่นเอง ดังนั้น การเกิดการเสียหายที่ชี้ถึงจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนก็จะได้มาโดยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยนี่เอง จุดสิ้นสุดอายุควรเป็นผลที่ได้มาจากลักษณะของแต่ละในสภาพนั้น (เช่น ระดับ X ของคุณสมบัติสภาวะของ A), หรือหนึ่งในสภาวะที่ทำสลับกัน (เช่น ระดับ X ของคุณสมบัติสภาวะของ A หรือ ระดับ Y ของคุณสมบัติสภาวะของ B), หรือการรวมร่วมกันของสภาวะ(เช่น ระดับ X ของคุณสมบัติ สภาวะของ A และ ระดับ Y ของคุณสมบัติของสภาวะ B)

ประเภทของบรรทัดฐาน

1) การตรวจสอบด้วยแรงดันสูง

2) การตรวจสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หรือเสิร์จ

3) เปอร์เซ็นต์ในการเพิ่มของ loss tangent ระดับของการดิสชาร์จบางส่วนเป็นต้น ซึ่งสูงกว่าค่าแรงดันหรือช่วงแรงดันที่กำหนดตั้งแต่เริ่มต้นซึ่งยังไม่มีการเร่งอายุ

4) เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วซึ่งสูงกว่าค่าที่ถูกกำหนดตั้งแต่ตอนแรก

4) เปอร์เซ็นต์การสูญเสียของคุณสมบัติที่ได้ทำการเลือกไว้

2.8.2 การเพิ่มการทดสอบโดยเฉพาะ

ในบางกรณีอาจต้องมีการเพิ่มการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเพื่อที่จะหาจุดสิ้นสุดของอายุของอุปกรณ์หรือเครื่องมือบางชนิด ซึ่งในการเพิ่มการทดสอบนั้นควรสัมพันธ์กับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบด้วย

2.9 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ

2.9.1 กล่าวโดยทั่วไป

การกำหนดหรือระบุกฎสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบถ้าการออกแบบค่าปัจจัยหรือตัวประกอบต่างๆสำหรับระบบฉนวนที่นำมาทดสอบได้ระบุถึงระดับความเค้นว่ามีระดับสูงกว่าค่าที่เกิดขึ้นในระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิง ดังนั้นต้องแน่ใจได้ว่ากระบวนการทดสอบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้นจะต้องได้ค่าข้อมูลหรืออายุของระบบฉนวน หรือการถึงจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวน ในลักษณะเดียวกันแม้ระดับความเค้นที่ใช้สำหรับระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงจะมีค่าต่ำกว่าก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 ประสบการณ์การใช้งาน

เมื่อการประเมินค่าระบบฉนวนจำเป็นต้องหาค่าจากการใช้ข้อมูลจากประสบการณ์การใช้งานจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการออกแบบระบบให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีคุณภาพและความน่าเชื่อถือโดยการออกแบบให้ใกล้เคียงกับลักษณะการใช้งานจริงมากที่สุด

2.9.3 ไฟฟ้า

เมื่อทำการประเมินค่าความคงทนทางไฟฟ้า ช่วงระยะเวลาจนถึงจุดที่เกิดการเสียหายของทั้งระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงควรที่จะพล็อตให้อยู่ในรูป log - log ด้วยผลอย่างใดอย่างหนึ่งของค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตหรือค่าที่จุดกึ่งกลางของแต่ละความเค้นในการอายุไฟฟ้า(สามารถดูรายละเอียดได้จาก IEC 60727-1และ IEC 60727-2 โดยทั่วไปรูปกราฟความคงทนทางไฟฟ้าที่ได้ควรมีลักษณะเป็นเส้นตรงเพื่อที่จะกำหนดขอบเขตของความเค้นทางไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จากช่วงเวลาที่ยอมรับได้นั้น ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.6.3.1

2.9.4 ความร้อน

เมื่อทำการประเมินค่าความคงทนทางความร้อนควรใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตามลักษณะความสัมพันธ์ของอาร์รีนีอุส (Arrhenius) (ค่าอายุเชิงลอการิทึมกับค่าอุณหภูมิสมบูรณ์) ตามข้อแนะนำใน IEC60216-3 โดยการเปรียบเทียบระหว่างระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบทดสอบที่ใช้อ้างอิงจากการแปรความหมายของกราฟที่ได้ตามขนาดอุณหภูมิและค่าอายุเชิงลอการิทึมที่ได้จากการทดสอบ ระบบฉนวนที่นำมาทดสอบควรที่จะได้รับการยอมรับ ถ้าระบบฉนวนนั้นมีค่าอายุเชิงลอการิทึมที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ หรือมากกว่าที่ได้จากระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงทั้งนี้ต้องคำนึงด้วยว่าในบางครั้งค่าอายุที่ต้องการในการใช้งานหรือค่าอุณหภูมิที่กำหนดของทั้งระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงมีความแตกต่างกัน

ถ้าลักษณะกราฟที่ได้แสดงลักษณะที่เด่นชัดของส่วนโค้งหรือการไม่เป็นเส้นตรง นี่เป็นการแสดงให้เห็นว่าได้มีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่เป็นส่วนสำคัญในการเร่งอายุของเครื่องจักรในกรณีที่เกิดพฤติกรรมนี้ขึ้นอาจเป็นไปได้ว่าประเภทของฉนวนมีระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่คาดไว้ ดังนั้น ควรที่จะทำการลดอุณหภูมิทดสอบลงเพื่อที่จะทำให้ลักษณะกราฟที่ได้มีความถูกต้อง

2.9.5 ทางกล

เมื่อทำการประเมินค่าความคงทนทางกล ข้อมูลควรที่จะถูกพล็อตในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นทางกลเชิงลอการิทึมซึ่งในการทดสอบนั้นควรกระทำคล้ายกับการทดสอโดยความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.6 สภาพแวดล้อม

ยังไม่ได้มีการกำหนดแนวทางในการทดสอบเพื่อการวิเคราะห์ผลที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม

2.9.7 ผลที่เกิดขึ้นจากหลายๆปัจจัย

เนื่องจากว่าเราไม่สามารถเข้าใจถึงรายละเอียดของช่วงการกระทำของการเร่งอายุเครื่องจักรได้อย่างสมบูรณ์เนื่องมาจากปัจจัยการเร่งอายุนั้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบฉนวนพร้อมกันหรืออาจส่งผลในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นการยากมากที่จะกำหนดรูปของกระบวนการทดสอบ ซึ่งก็ยังไม่ได้กำหนดแนวทางในการทดสอบพฤติกรรมนี้

2.10 การรายงานการทดสอบ

รายงานการทดสอบควรที่จะประกอบไปด้วย

1) คำอธิบายมาตรฐานการหาค่าที่ใช้ในการทดสอบ
2) ลักษณะของระบบฉนวนทางไฟฟ้า
3) ลักษณะของประสบการณ์ใช้งานที่เกี่ยวเนื่องกับระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงเช่นผลกระทบที่เกิดขึ้นเป็นต้น
4) ลักษณะและคำอธิบายของแบบจำลอง(ถ้าใช้)
5) สภาวะการทำงานที่ใช้อ้างอิง
6) รายละเอียดของการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยหรือก่อนการเร่งอายุ
7) ความเค้นในการเร่งอายุและระดับของความเค้นที่ใช้ในการทดสอบ
8) ลำดับการทดสอบและช่วงระยะเวลาพร้อมทั้งจำนวนวัตถุทดสอบ
9) ปัจจัยมีใช้สำหรับการวินิจฉัยพร้อมทั้งวิธีการตรวจสอบ การวัดและเครื่องมือวัด
10) บรรทัดฐานในการเกิดจุดสิ้นสุดของอายุ
11) กราฟตามลักษณะความสัมพันธ์(รายละเอียดอยู่ในIEC 60493-1)
12) ระยะเวลาจนถึงจุดสิ้นสุดอายุ, ค่าเฉพาะค่ากึ่งกลาง,สถิติของการปฏิบัติการทดสอบ
13) รายละเอียดในการเปรียบเทียบระหว่างระบบฉนวนใหม่กับระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง
14) ข้อกำหนดของคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.1 การฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ระบบการฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างหนึ่งซึ่งจะนำไปซึ่งผลของความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งมักจะถูกละเลยทำให้เกิดความเสียหายง่ายขณะจับถือหรือบำรุงรักษา การเสื่อมของฉนวนยังขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมด้วย วัสดุที่จะนำมาทำฉนวนต้องพิจารณาด้วย

1. คุณสมบัติของไดอิเล็คตริก (Dielectric Properties)
2. เสถียรภาพของอุณหภูมิ (Thermal Stability)
3. คุณลักษณะทางกล (Mechanical Characteristics)
4. กระบวนการทำงาน (Processability)
5. ความต้านทานทางเคมี (Chemical Resistance)
6. ความเข้ากันได้ (Compatibility)

ซึ่งข้อมูลของฉนวนเพื่อช่วยในการเข้าใจหลักการฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

1. คุณลักษณะฉนวน หมายถึง ค่าความคงทนทางไฟฟ้า (Electric Strength) ซึ่งเป็นค่าความสามารถในการทนได้ของความเครียดทางไฟฟ้าและค่าความคงทนของไดอิเล็คตริก (Dielectric Strength) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของคุณสมบัติฉนวน จะเป็นพื้นฐานที่ควรรู้ในการทดสอบฉนวนซึ่งค่าแรงดันที่ป้อนอย่างรวดเร็วในวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3-1

วัสดุสารฉนวน	ค่าความคงทนทางไฟฟ้า กิโลโวลต์/มิลลิเมตร
ฟิล์ม	
โพลิเอสเตอร์ฟิล์ม	80-120
โพลิไอไมด์ฟิล์ม	120-160
พลาสติก	
โพลิสไตรีน	20-28
โพลิเอทิลีน	16-18
โพลิไวนิล คลอไรด์	18-20
โพลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน	20-28

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าความคงทนทางไฟฟ้าเมื่อป้อนแรงดันอย่างรวดเร็วของสารฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อายุของฉนวน (Insulation Life) ฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีอายุการใช้งานถึง 20 ปีกับการบำรุงรักษาเล็กน้อย ในการทำงานของฉนวนจะมีผลกระทบที่ทำให้ฉนวนมีอายุน้อย

3. ชั้นของฉนวน(Insulation Class) เป็นค่าที่ใช้บอกอุณหภูมิที่ยอมรับได้ในการใช้งานจะแบ่งตามลำดับอักษร Y,A,B,E,F,H ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3-2

CLASS	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

ตารางที่ 3-2 แสดงชั้นของฉนวนกับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน

4. วัสดุที่ใช้เคลือบฉนวนตัวนำ ซึ่งตัวนำที่ถูกหุ้มโดยหมายถึงทองแดงซึ่งจะถูกเคลือบด้วยสายของฉนวนอาจเป็นแบบคลุมกลมหรือเหลี่ยม ทั้งด้านเดียวหรือ 2 ด้าน สิ่งที่ง่ายที่สุดในการฉนวนคือสารเอนาเมล (enamel) ในอดีตเราใช้โอเรชิเนียสในการฉนวนแต่มีปัญหาที่ความอ่อนแอทางกลและสามารถถลอกได้ง่าย ในการประยุกต์ใช้งานซึ่งมีปัญหาทางด้านการทำงานทางกล หรือมีปัญหาทางการถลอก เราสามารถเพิ่มการฉนวนโดย ฝ้าย เรยอน ไหม ใยหิน หรือไฟเบอร์แก้ว ประมาณ 30 ปี การพัฒนาประสบผลสำเร็จโดยการรวมโพลิไวนิล ฟอร์มัล (Polyvinly formal PF) กับ โพลิไวนิล อเซแทล (Polyvinly acetal PVA) ที่มีความเหนียวใช้เป็นสารเอนาเมลซึ่งมีความยืดหยุ่นและการป้องกันการถลอกได้ดี การเคลือบตัวนำโดยระบบเรซินนี้เป็นระบบที่ใช้อยู่ในระบบ;PVA-PF เป็นการเคลือบที่ใช้สำหรับฉนวน ชั้น E การพัฒนาด้านนี้สามารถขจัดปัญหาทางกลโดยการเคลือบด้วยเส้นใยได้ โดยค่าความหนาของฉนวนแต่ละค่าความคงทนทางไฟฟ้าแตกต่างกัน และการเคลือบด้วยสารโพลิเอสเตอร์เทอริไมด์(Polyesterimide) อย่างเดียวหรือการเคลือบด้วยสารโพลิเอสเตอร์เทอริไมด์และสารโพลิเอไมด์(Polyamide)บางๆ รวมกันจะเป็นการเคลือบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าใน ชั้น F ซึ่งสารที่นำมาเคลือบฉนวนมอเตอร์ได้แสดงดังตารางที่ 3-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเอนาเมล	ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน (องศาเซลเซียส)
ไอเรโอเรซิเนียส (Oleoresinous)	105
โพลิไวนิล อะซิเทล (Polyvinyl acetal)	105
โพลิไวนิลฟอร์มัล (Polyvinyl formal)	105
โพลิเอไมด์ (Polyamide nylon)	105
โพลิยูเรทิน (Polyurethene)	130
โพลิเอสเตอร์ (Polyester)	155
อีพอกซี (Epoxy)	155
โพลิไฮดาทิน (Polyhydantin)	155
โพลิเอสเตอร์ริไมด์ (Polyesterimide)	180
โพลิเอสเตอร์ริไมด์/เอไมด์(เคลือบ 2 ชั้น)	180
ซิลิโคน (Silicone)	180+
โพลิไอไมด์ (Polyimide)	200
โพลิเตตระฟลูออโรเอทิรีน (Polytetrafluoroethylene)	200

ตารางที่ 3-3 แสดงสารเอนาเมลกับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานปกติ

3.2 กลไกเบรกดาวน์ของของแข็ง

ผลของการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งจะต่างไปจากการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ และฉนวนเหลว คือ ฉนวนก๊าซสามารถกลับเข้าสู่สภาพการฉนวนได้ดังเดิมภายในเวลาอันรวดเร็วหลังจากการเบรกดาวน์นั้นได้ผ่านพ้นไปแล้ว ฉนวนเหลวก็ทำนองเดียวกันฉนวนสามารถกลับคืนสภาพการฉนวนได้แต่อาจช้ากว่าก๊าซ แต่ในฉนวนแข็งเมื่อเกิดการเบรกดาวน์แล้วฉนวนจะเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวรใช้งานอีกไม่ได้

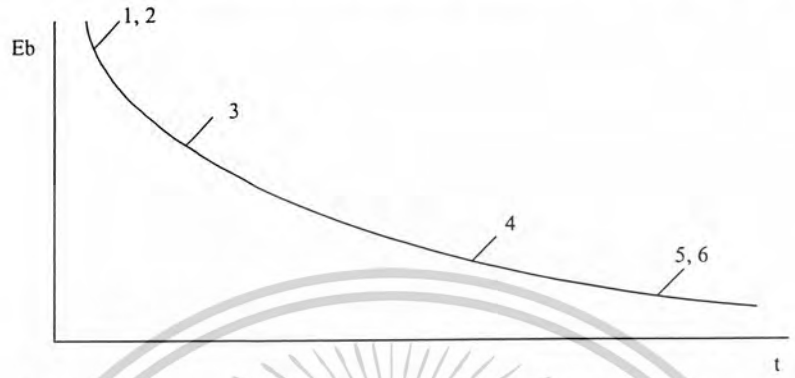
กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนแข็งค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและกระบวนการป้อนแรงดันที่สำคัญคือ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนแข็งอาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์ของการเกิดเบรกดาวน์ได้ คือ

1. เบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์หรือแบบไอออนิค
2. เบรกดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า
3. เบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์
4. เบรกดาวน์แบบเทอร์มัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เบรกดาวน์เนื่องจากผลทางเคมี
6. เบรกดาวน์เนื่องจากดีสชาร์จภายใน
7. เบรกดาวน์เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว

การเกิดเบรกดาวน์ตามลักษณะหรือสาเหตุต่างๆ เหล่านี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างกันตามรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แสดงความคงทนต่อแรงไฟฟ้า Eb แปรไปตามช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน

3.2.1 เบรกดาวน์แบบแท้จริง (intrinsic breakdown)

เบรกดาวน์แบบแท้จริง หมายถึงการเกิดเบรกดาวน์จากการป้อนแรงดันที่มีช่วงระยะเวลาอันสั้นมาก คือ ราว 0.01 ไมโครวินาที ต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก และถือเป็นความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนแบบบริสุทธิ์ การที่จะให้ได้เบรกดาวน์แบบแท้จริงซึ่งมีค่าความคงทนสูงนี้จะได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขดีพิเศษ โดยขจัดผลกระทบจากแฟคเตอร์อื่นๆ ออกให้หมดเพื่อให้เบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์นี้สูงกว่า 10 MV/cm ตัวอย่างเช่น โปลิวินิลแอลกอฮอร์ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ทนความเครียดสนามไฟฟ้าถึง 15 MV/cm โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 5-10 MV/cm อย่างไรก็ตามเป็นการทดลองค่อนข้างยากที่จะบอกได้ว่าเบรกดาวน์นั้นเป็นเบรกดาวน์แบบแท้จริงหรือไม่แท้จริง เกือบจะเรียกได้ว่าค่าเบรกดาวน์แบบแท้จริงนั้นเป็นค่าอุดมการณ์ ฉะนั้นในทางภาคปฏิบัติก็มักจะถือเอาค่าที่ทดลองได้สูงของสารฉนวนแต่ละชนิด โดยขจัดผลสืบเนื่องอื่นๆ ออกหมดความเครียดสนามไฟฟ้าของเบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์จะเกิดขึ้นเมื่ออิเลคตรอนอิสระจำนวนมากที่มีอยู่ตามธรรมชาติในไดอิเลคตริกได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนมากพอที่จะข้ามช่องแก๊ปพลังงานต้องห้ามจากวาเลนซ์ไปสู่แถบการนำไฟฟ้าจำนวนอิเล็คตรอนอิสระจะเพิ่มทวีคูณมากขึ้นในแถบการนำไฟฟ้านั้น และนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด

3.2.2 เบรกดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า

ฉนวนแข็งเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจากแรงดันที่ป้อน จะมีประจุอยู่ที่ผิวของฉนวนด้านสนามไฟฟ้าเข้าและสนามไฟฟ้าออก จึงเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างด้านผิวของฉนวนดังกล่าว ทำให้เนื้อฉนวนได้รับแรงอัดบิดเบี้ยวได้ และถ้าหากแรงกลไฟฟ้านี้เกินขีดจำกัดความคงทนต่อแรงอัดของฉนวนก็จะเกิดแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลาย โดยทั่วไปแรงอัดที่เกิดบนฉนวนจากสนามไฟฟ้ารวม 1 MV/cm จะมีค่าหลายกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เงื่อนไขของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงกลไฟฟ้าวิกฤตอาจคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้ แรงอัดที่เกิดจากสนามไฟฟ้ายังอยู่ในสภาพสมดุลได้ถ้า

$$(\varepsilon E^2/2) = y \ln(d_0/d) \qquad (3.1)$$

$$V^2 = d^2 (2y/\varepsilon)\ln(d_0/d) \qquad (3.2)$$

โดยที่ E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า V/d

V คือ แรงดันที่ป้อน

D คือ ความหนาของฉนวนขณะที่ได้รับแรงอัด

d_0 คือ ความหนาเริ่มต้นของฉนวน

ε คือ $\varepsilon_r\varepsilon_0$

y คือ ยังโมดูลัส

แรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น(แรงดันที่ป้อนสูงขึ้น) ความหนาจะลดลง ฉะนั้นหาค่าสูงสุด $d^2 \ln (d_0/d)$ โดยดิฟเฟอเรนชิเอท สมการ (3.1) เทียบกับ d ได้เมื่อ

$$d_0/d = e^{0.5} = 1.67 \qquad (3.3)$$

ซึ่งแสดงว่าจะเกิดความไม่สมดุลย์ระหว่างความคงทนต่อแรงอัดของฉนวนกับแรงกลทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าเมื่อ $d_0/d = 1.67$ เท่ากันหรือมากกว่า 1.67 นั่นคือฉนวนแข็งจะเริ่มแตกสลายเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะหาได้จากสมการ

$$E_{max} = V/d_0 = 0.6(Y/\varepsilon)^{1/2} \qquad (3.4)$$

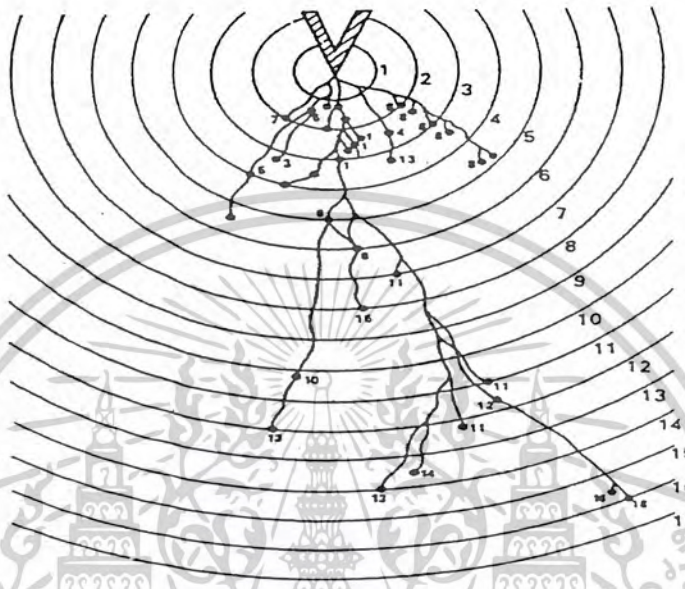
3.2.3 เบรกดาวน์แบบสตีมเมอร์

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็คโตรดฝังเข้าไปในเนื้อของฉนวนแข็ง เบรกดาวน์อาจเกิดขึ้นได้จากอะวานลานซ์เดี่ยวของอิเล็กตรอนที่ไปในลักษณะเดียวกับทฤษฎีสตีมเมอร์ที่อธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ อิเลคตรอนที่เข้าไปในแถบนำไฟฟ้าของฉนวนที่คาโถดจะเคลื่อนที่ไปหาอาโนด และรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าขณะเคลื่อนที่ไป ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้านี้เกิดพลังงานไอออไนเซชันของโครงสร้างผลึก (Lattice Ionizing Energy) จะทำให้อิเลคตรอนหลุดออกจากอะตอมโครงสร้างผลึก จำนวนอิเลคตรอนจะทวีเพิ่มขึ้นเป็นอะวานลานซ์และเบรคดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนอิเลคตรอนในอะวานลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤต

ในทางปฏิบัติเบรคดาวน์จะไม่เกิดการดิสชาร์จครั้งเดียวหรือในแนวเส้นทางเดียวแต่จะมีลักษณะเป็นหลายแนวเส้นทางการดีสชาร์จหลายครั้งดังรูป 3-2 ที่ได้จากการทดลองป้อนแรงดันอิมพัลส์ระหว่างปลายแหลมรัศมี 0.254 มิลลิเมตรกับแผ่นระนาบ โดยฝังปลายอิเลคโตรดเข้าไปในเนื้อฉนวนโปร่งใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนา 4.8 มิลลิเมตร แรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนมีรูปคลื่น 1/30 μsec จำนวน 190 ครั้ง สังเกตร่องรอยการดิสชาร์จแต่ละครั้งแต่ไม่เกิดแนวดิสชาร์จทุกครั้งที่ป้อนแรงดันร่องรอยจะเกิดขยายตัวออกไปเป็นขั้นๆจนกระทั่งรอยดิสชาร์จเชื่อมโยงระหว่างอิเล็คโตรดเบรคดาวน์ก็เกิดขึ้น ในกรณีของแรงดันกระแสสลับเบรคดาวน์จะเกิดขึ้นใช้เวลาของการป้อนแรงดันตั้งแต่หลายๆวินาทีไปจนถึงหลายนาที



รูปที่ 3-2 ลักษณะดิสชาร์จเบรคดาวน์แบบรากไม้ระหว่างอิเลคโตรดปลายแหลมกับระนาบ (coopper)

3.2.4 เบรคดาวน์แบบเทอร์มัล

ค่าเบรคดาวน์ของฉนวนแข็งจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฉนวนแต่ข้อนี้จะเป็นจริงเป็นจนถึงความหนาแน่นค่าหนึ่งเท่านั้นถ้าหากฉนวนแข็งหนามากกว่านั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในไดอิเลคตริกเนื่องจากกระแสผ่านจะเป็นให้เกิดเบรคดาวน์ได้ง่ายขึ้น นั่นคือ ค่าแรงดันเบรคดาวน์ไม่แปรเพิ่มขึ้นตามความหนา เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็ง สนามไฟฟ้าทำให้กระแสไหลผ่านฉนวนแต่มีค่าน้อยมาก กระแสนี้ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่จะเกิดจะถ่ายเทกระจายไปสู่ตัวกลางรอบๆ โดยการนำผ่านฉนวนและส่วนหนึ่งทำให้ฉนวนมีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ฉนวนแข็งจะคงสภาพอยู่ได้ถ้าหากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถระบายออกไปสู่ในตัวกลางรอบๆได้ทัน โดยไม่ทำอุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของฉนวนนั้น แต่อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นสูงกว่าที่ระบายออกไปก็จะทำให้เสียความสมดุลและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์แบบเทอร์มัลขึ้นได้ อาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานความสมดุลก็จะยังคงรักษาอยู่ได้เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันให้กับฉนวนจะต้องเท่ากับความร้อนที่แผ่กระจายออกไปรวมกับความร้อนที่ทำให้ปริมาตรของฉนวนร้อนขึ้นด้วยอุณหภูมิ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่เกิดขึ้นกรณีแรงดันกระแสตรง คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$W_g = \sigma E^2 \qquad (3.5)$$

โดยที่ W_g คือ สภาพนำไฟฟ้าของฉนวน

σ คือ สภาพนำไฟฟ้าของฉนวน

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

ในกรณีของแรงดันกระแสสลับความร้อนที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Wg = \omega\varepsilon\, tg\delta\, E^2 \qquad (3.6)$$

โดยที่ f คือ ความถี่เป็น Hz

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

$tg\delta$ คือ แฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก

ความร้อนที่ระบายออกไปคำนวณได้จากสมการ

$$W_d = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div}\,(k\,.\,\text{grad}T) \qquad (3.7)$$

โดยที่ Cv คือ ความร้อนจำเพาะต่อปริมาตรของฉนวน

T คือ อุณหภูมิฉนวน

k คือ สภาพนำความร้อนของฉนวน

ฉะนั้น เทอร์มัลเบรคดาวน์จะไม่เกิดขึ้นถ้า

$$W_d \geq W_g \qquad (3.8)$$

เนื่องจากพลังงานสูญเปล่าไดอิเลคตริกในสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่ามากกว่าในสนามไฟฟ้ากระแสตรง เพราะในสนามไฟฟ้ากระแสสลับมีพลังงานสูญเปล่าเนื่องจากโพลาไรเซชั่น ซึ่งโมเลกุลของไดอิเลคตริกจะกลับขั้วไปมาตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ดังนั้นค่าแรงดันเทอร์มัลเบรคดาวน์ของกระแสสลับจึงมีค่าต่ำกว่า และจะยิ่งลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

3.2.5 เบรคดาวน์เนื่องจากผลเคมีและเคมีไฟฟ้า

3.2.5.1 ผลเคมี

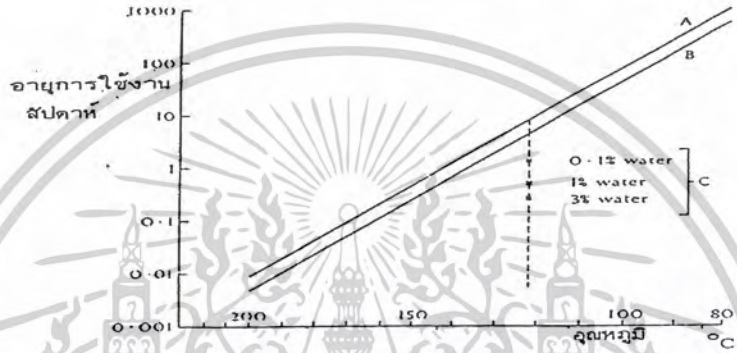
สารฉนวนอาจเสื่อมสภาพทางเคมีได้แม้ว่าจะไม่ได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าก็ตาม เสถียรภาพทางเคมีเสื่อม ฉนวนเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอินทรีย์สารสภาพทางเคมีจะเสื่อมสภาพลงมากในสภาวะใช้งานปกติได้ แต่จะขึ้นอยู่อย่างมากกับอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีอาจเป็นผลมาจากการแตกสลายของโครงสร้างเนื้อสาร เช่น คาร์บอนในเซลลูโลส หรือสารสังเคราะห์ เช่น กระดาษฉนวนจะเสียสภาพทางกลภายในสองสามวันที่อุณหภูมิ 150 °C ถึงแม้ว่าจะไม่มีอากาศหรือความชื้น กระบวนการเสื่อมสภาพนี้จะเป็นไปอย่างรวดเร็วมากถ้าหากมีออกซิเจนและความชื้น ดังในรูปที่ 3-3 อีกตัวอย่างหนึ่งก็คือ ไมก้า ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 °C จะเริ่มเสียสภาพอย่างช้าๆทางไฟฟ้าและทางกลฉะนั้นในมาตรฐานทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายเกี่ยวกับการใช้ฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ไฟฟ้าจะกำหนดแยกประเภทตามอุณหภูมิสูงสุดของการใช้งาน

ออกซิเจน เป็นผลทางเคมีอันหนึ่งที่ทำให้สภาพการฉนวนเสื่อมลง ถ้าสารนั้นมีอากาศหรือมีโอโซน เช่น ยาง และโปลิเทน จะเกิดออกซิเดชันทำให้ผิวแตกคราดเมื่อยืดและได้รับแสงแดด

ไฮโดรลิซีส สารฉนวนบางอย่างถ้าได้รับทั้งความชื้นและร้อนจะเกิดไฮโดรลิซีสขึ้น ทำให้เสียสภาพทางกลและไฟฟ้า เช่น โปลิทีลีน เทเลพธาเลท เซลลูโลสของเอสเตอร์และของโปลิเอสเตอร์



A : กระดาษอบแห้งในสุญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสกับ N_2

B :กระดาษอบแห้งในสุญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสกับ O_2

C :กระดาษชื้นจุ่มน้ำมันสัมผัสใน N_2

รูปที่ 3-3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออายุการใช้งานทางกลของฉนวนกระดาษ

3.2.5.2 ผลทางเคมีไฟฟ้า

ไม่มีสารฉนวนใดที่ปราศจากไอออน หรือ อีกนัยหนึ่งก็คือ ไม่มีสารฉนวนใดที่มีความต้านทานเป็นอนันต์ ฉะนั้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าจึงเป็นผลให้มีกระแสรั่ว (leakage current) ไอออนเหล่านี้อาจเกิดจากสารเจือปนหรือไอออไนเซชันภายในฉนวนเอง เมื่อไอออนมาถึงอิเลคโตรดอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาจเกิดก๊าซขึ้น หรือเกิดสารเกาะบนผิวอิเลคโตรดในลักษณะอิเลคโตรไลซีสนั่นเองกระบวนการนี้จะมีผลเร็วขึ้นถ้ามีอุณหภูมิสูงและเป็นผลให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของสนามไฟฟ้ากระแสตรง กล่าวโดยสรุปก็คือ อัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนเนื่องจากผลทางเคมีไฟฟ้ากำหนดด้วยกระแสรั่ว ซึ่งขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆประการแรกคือความหนาแน่นของไอออนในฉนวนอันเกิดจากสิ่งเจือปนในฉนวนจึงต้องระมัดระวังหรือป้องกันมิให้มีสิ่งเจือปนในกระบวนการผลิตและประกอบแฟคเตอร์ประการที่สองก็คือ อุณหภูมิที่ทำให้กระแสเพิ่มเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากเคมีไฟฟ้าเร็วขึ้น ยกเว้นเสียแต่ฉนวนมีความชื้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้แห้งเร็วขึ้น แฟคเตอร์ประการที่สามก็คือ สารที่เป็นโพลาร์ คือ โมเลกุลมีขั้วจะมีกระแสรั่วมากกว่าสารที่ไม่เป็นโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง ฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากผลของเคมีไฟฟ้าหุ้มฉนวนและใช้ในที่ความชื้นเมื่อมีความต่างศักย์ระหว่างขดลวดหรือระหว่างชั้นในขดเดียวกัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ปฏิกิริยากัดกร่อนสายไฟเกิดขึ้นได้ ถ้าฉนวนมีสิ่งเจือปนไอออน (เช่น น้ำมีสารละลาย) เช่น ผ้าฝ้ายหุ้มสายทองแดง ในที่ชื้นจะมีสีเขียว การฉนวนจะเสียสภาพถ้าผ้าฝ้ายนั้นดูดความชื้นได้

3.2.6 เบรคดาวน์เนื่องจากดีสชาร์จภายใน

ดีสชาร์จภายในไดอิเลคตริกเกิดขึ้นได้เพราะมีไดอิเลคตริกที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปนอยู่ เช่น มีฟองหรือโพรงก๊าซในเนื้อฉนวนหรือที่เขตต่อระหว่างฉนวนกับอิเลคโตรด สารเจือปนนี้จะเกิดเบรคดาวน์ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวนทั้งนี้เพราะว่าปกติสารเจือปนในฟองหรือโพรงจะมีค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่ำกว่าเนื้อฉนวน ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงนั้นจะมีค่าสูงกว่าในฉนวน จึงเกิดเบรคดาวน์ในโพรงก่อน

ในฉนวนมักมีโพรงหรือฟองก๊าซเกิดขึ้น เช่น การหล่อพลาสติก การเทหุ้มด้วยสารสังเคราะห์ หรือกระบวนการการชุบน้ำยาฉนวน ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิดหรือเบรคดาวน์ของการฉนวนจึงกำหนดด้วยความคงทนต่อแรงดันของก๊าซในโพรง ซึ่งในบางกรณีสามารถคำนวณได้ถ้าทราบชนิดของก๊าซ ความดัน มิติของโพรง

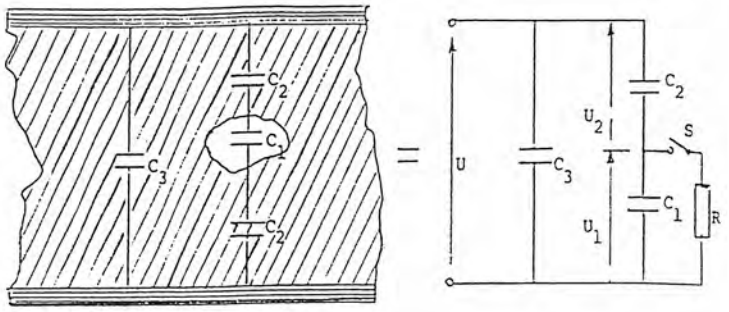
โพรงฉนวนเป็นสิ่งเจือปน

กระบวนการหล่อด้วยฉนวนอาจมีสิ่งเจือปน เช่น ผงฝุ่นกระดาษ เศษใยผ้า หรือเศษวัสดุอื่นใด ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวน หลังจากเกิดเบรคดาวน์ในโพรงสิ่งเจือปนจะเกิดก๊าซขึ้นภายในโพรง ค่าแรงดันเบรคดาวน์จะลดลงต่ำลงหลังจากที่ได้เกิดเบรคดาวน์จะลดต่ำลงหลังจากที่ได้เกิดเบรคดาวน์ครั้งแรกแล้ว

โพรงฉนวนในน้ำมัน

โพรงฉนวนเป็นฉนวนน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างชั้นของการฉนวนด้วยกระดาษหุ้มชุบน้ำมัน เช่น ในกรณีของขดลวดหม้อแปลงหรือเคเบิล เป็นต้น ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอาจคำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีของโพรงก๊าซ นั่นคือความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงน้ำมัน(ε_1) จะเป็น $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน ในกรณีที่โพรงตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า ถ้าเกิดเบรคดาวน์ในโพรงน้ำมันก็จะเกิดก๊าซขึ้นในโพรงและเกิดดีสชาร์จภายในเนื้อฉนวนที่มีโพรงก๊าซหรืออาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลย์ ดังในรูป 3-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-4 ฉนวนมีโพรงและวงจรสมมูลย์

ในรูป 3-4 C_1 แทนคาปาซิแต็นซ์ของโพรงก๊าซ C_2 แทนคาปาซิแตนซ์ของฉนวนส่วนที่ต่ออันดับกับโพรง C_3 แทนคาปาซิแตนซ์เนื้อฉนวนที่เหลือ เมื่อป้อนแรงดัน V ระหว่างอิเลคโตรดที่คั่นด้วยฉนวนนี้ทั้งหมด และ V_1 เป็นแรงดันคร่อมโพรงซึ่งอาจคำนวณในลักษณะของโวลเตจดิไวเดอร์จะได้

$$V_1 = V\varepsilon_r \frac{d1}{d2} \qquad (3.9)$$

โดยที่ ε_r คือ เปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวน

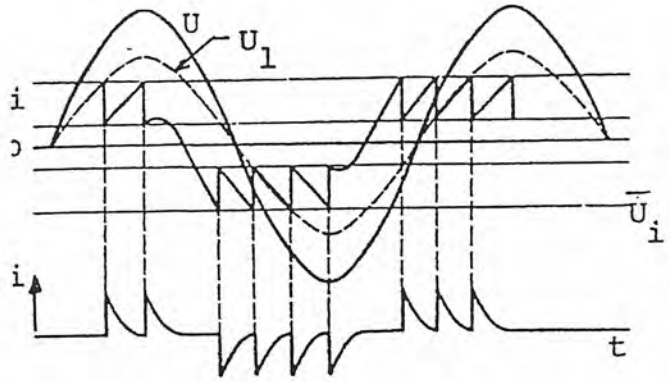
d_1, d_2 คือ ความหนาแน่นของโพรงและของฉนวนตามลำดับปกติ($d_1 << d_2$)

ถ้าแรงดันคร่อมโพรงถึงค่าความคงทนของก๊าซในโพรงเท่ากับ V_1 ก็จะเบรคดาวน์หรือดิสชาร์จในโพรง ค่าแรงดัน V_1 เรียกแรงดันเริ่มต้นดิสชาร์จ(discharge inception voltage) ในกรณีแรงดันที่ป้อนเป็นแรงดันกระแสสลับ เบรคดาวน์จะเกิดขึ้นที่ยอดทั้งสองของรูปคลื่น จำนวนครั้งดิสชาร์จขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนดังรูปที่ 3.5 เส้นประแสดงแรงดันคร่อมโพรงที่ควรจะเป็นถ้าหากไม่เกิดดิสชาร์จ เมื่อ V_1 มีค่าถึง V_1^+ หรือ V_1^- ดิสชาร์จจะเกิดขึ้นแรงดันคร่อมโพรงจะเป็นศูนย์ เมื่อหยุดดิสชาร์จแรงดันคร่อมโพรงก็เพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งถึง V_1 อีกก็ดิสชาร์จใหม่อีก เกิดซ้ำเช่นนี้ทั้งทางครึ่งบวกและครึ่งลบของรูปคลื่น ทุกครั้งที่เกิดดีสชาร์จก็จะมีกระแสพัลส์เกิดขึ้นทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบเช่นกัน

เมื่อก๊าซในโพรงเบรคดาวน์เกิดอิเลคตรอนและไอออนบวกในโพรงเมื่อเคลื่อนที่ไปถึงผนังของโพรงถ้าพลังงานมากพอก็จะทำให้บอนด์ทางเคมีแตกสลายและเกิดความร้อนขึ้นในโพรงสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

ความหนาของฉนวนลดน้อยลงและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในที่สุดอายุของฉนวนที่มีดีสชาร์จภายในขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนและจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จ เบรคดาวน์โดยกระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นใน 2-3 วัน หรือหลายปี อย่างไรก็ตามมีการดิสชาร์จภายในจะทำให้อายุใช้งานของฉนวนสั้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-5 ดิสชาร์จภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ

3.2.7 เบรคดาวน์เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว

เมื่อฉนวนแข็งได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นเวลานาน สภาพการนำฉนวนอาจเสียเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว(tracking) เนื่องจากมีร่องรอยการนำไฟฟ้าที่ผิวฉนวนอันอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนเอง และเพราะความชื้นในบรรยากาศประกอบกับความสกปรกบนผิวฉนวน เช่น ผงฝุ่นและเกลือ กระแสรั่วตามผิวนำไฟฟ้านี้ ทำให้ผิวฉนวนเสียหาย เช่น กระดาษเบคกะไลท์ การเกิดเสียสภาพร่องรอยการนำไฟฟ้านี้จะแตกต่างไปจากการเสียสภาพเพราะดิสชาร์จ ดิสชาร์จจะเกิดขึ้น (ในก๊าซรอบนอกฉนวน) อย่างน้อยแรงดันที่ป้อนต้องเท่ากันหรือมากกว่าแรงดันต่ำสุดตามกฎของพาสเชน แต่เบรคดาวน์ร่องรอยการนำไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่านั้นมากและไม่ขึ้นอยู่กับการเบรคดาวน์ของก๊าซรอบๆ

3.3 การทดสอบสภาพฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า

การทดสอบสภาพฉนวนสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

3.3.1 การทดสอบความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test)

การทดสอบความต้านทานฉนวนหรือที่เราเรียกว่า การวัดค่าเมกะโอห์มของฉนวนเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุดในการใช้กับการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษาแบบทำนายวิธีนี้มีการประยุกต์ใช้มาตั้งแต่เมื่อปี ค.ศ.1912 ถึงแม้ว่าจะปฏิบัติได้ง่ายและรวดเร็วแต่ผลการทดสอบจะใช้บ่งถึงสภาพของฉนวนเมื่อเทียบกับกราวด์เท่านั้นเช่นฉนวนของชุดขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเสียสภาพทำให้ชุดขดลวดต่อลงกราวด์ซึ่งการวัดค่าเมกะโอห์มของฉนวนทำได้โดยการป้อนแรงดันกระแสตรงเข้าไปที่ฉนวนแล้ววัดกระแสที่ไหลโดยมีตัวความต้านทานตัวหนึ่งที่เรารู้ค่ามาต่ออนุกรมกับฉนวน แล้วใช้หลักการแบ่งแรงดันก็สามารถรู้ค่าความต้านทานของฉนวนได้ ซึ่งเครื่องมือใช้วัดความต้านทานฉนวนในลักษณะนี้เรียกว่าเมกะโอห์มมิเตอร์

การทดสอบด้วยวิธีนี้จะต่อสายกราวด์ของเมกะโอห์มมิเตอร์เข้ากับกรอบ(frame)ของมอเตอร์แล้วป้อนแรงดันกระแสตรงขนาด 500 โวลต์ 1000 โวลต์หรือ 2500 โวลต์(ทั้งนี้ขึ้นกับเมกะโอห์มที่ใช้)เข้าที่ชุดขดลวดของมอเตอร์ ถ้าเป็นชุดขดลวดที่ดีไม่ชำรุดและแห้งจะอ่านค่าความต้านทานได้หลายร้อยหรือหลายพันเมกะโอห์ม แต่ถ้าฉนวนอยู่ในสภาพเสื่อม มีความชื้นหรือเปื้อนจารบี หรือสารเคมี จะอ่านค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานเพียงไม่กี่เมกะโอห์มเท่านั้น ถ้าหากได้ต่ำกว่า 1 เมกะโอห์ม จะเป็นสัญญาณชี้ให้เห็นว่าถึงจะอันตรายที่ฉนวน จะเสียสภาพเมื่อไรก็ได้ มาตรฐาน IEEE std 43-1974(R 1991) ได้กำหนดเกณฑ์ต่ำสุดของค่าที่ยอมรับได้ไว้ว่าต้องอ่านเมกะโอห์มได้ไม่ต่ำกว่า 1 เมกะโอห์มบวกกับอีก 1 เมกะโอห์มต่อ 1000 โวลต์ ของพิกัดแรงดันของมอเตอร์ ด้วยเกณฑ์นี้มอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 460 โวลต์ (เป็นมอเตอร์ที่ใช้งานในอเมริกา) จะต้องอ่านค่าความต้านทานได้ไม่ต่ำกว่า 1.46 เมกะโอห์ม เป็นต้น

เพื่อความถูกต้องของการวัดจะต้องปรับค่าที่อ่านได้ไปที่สภาวะอุณหภูมิแวดล้อม 40 องศาเซลเซียสด้วย โดยใช้ตารางปรับค่าที่ให้มาพร้อมกับเมกะโอห์มมิเตอร์

3.3.2 การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก (Polarization Index Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบขยายผลของการทดสอบความต้านทานฉนวนโดยการอ่านค่าความต้านทานฉนวนสองค่าคือ ค่าที่เวลา 1 นาที และ 10 นาที นับตั้งแต่เริ่มป้อนแรงดันให้กับฉนวนแล้วนำมาหาค่าดัชนีความต้านทานฉนวน(Polarization Index : PI) โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของค่าความต้านทานฉนวนที่ 10 นาที ต่อความต้านทานฉนวนที่ 1 นาที เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับฉนวนเป็นเวลานานๆ โมเลกุลของฉนวนจะมีสภาพเป็นขั้วบวกขั้วลบเกิดขึ้น มีผลทำให้อ่านค่าความต้านทานฉนวนได้สูงขึ้น ค่าดัชนีความต้านทานฉนวนเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพความสะอาดและแห้งของฉนวนได้ ถ้าดัชนีความต้านทานของฉนวนสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด แสดงว่าฉนวนสะอาดและแห้ง แต่ถ้าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดแสดงว่าฉนวนเปียกและสกปรกตามมาตรฐาน IEEE Std 43-1974(R 1991) ได้กำหนดค่าต่ำสุดของดัชนีความต้านทานฉนวน ของฉนวนชั้น(Class) ต่างๆ ไว้ดังตารางที่ 2.1 การทดสอบความต้านทานและการทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก จะทำก่อนการทดสอบแรงดันสูง เพื่อให้มั่นใจว่าฉนวนไม่เปียกหรือสกปรกจนเกินไป

ชั้นของฉนวน	ค่าต่ำสุดของโพลาไรเซชั่นอินเด็กซ์ (PI)
A	1.5
B	2.0
F	2.0
H	2.0

ตารางที่ 3-4 ตารางแสดงค่าต่ำสุดของค่าโพลาไรเซชั่นอินเด็กซ์

3.3.3 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง (High Direct Voltage Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวนเทียบกับกราวด์ เป็นการทดสอบเพื่อหาจุดอ่อนของฉนวนที่อาจจะตรวจหาไม่พบ จากการทดสอบด้วยแรงดันที่ค่อนข้างจะต่ำจากเมกะโอห์มมิเตอร์ ตัวอย่างเช่นมอเตอร์พิกัดแรงดัน 460 โวลต์ เมื่อถูกทดสอบด้วยเมกะโอห์มมิเตอร์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้แรงดัน 500 โวลต์ อาจจะอ่านค่าความต้านทานฉนวนได้สูงถึง 1,000 เมกะโอห์ม ซึ่งสูงกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมรับในกรณีนี้อาจมีจุดอ่อนที่ฉนวนของมอเตอร์ซึ่งจะเสียสภาวะฉับพลันเมื่อได้รับแรงดัน 800โวลต์ ซึ่งแรงดันระดับนี้มักจะพบได้เสมอในระบบไฟฟ้ากำลังของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งอาจจะเกิดมาจากการเหนี่ยวนำชั่วครู่จากการทำงานของอุปกรณ์ตัดตอนหรือจากฟ้าผ่า

การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงคงที่(Proof test)

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงว่าฉนวนสามารถทนต่อแรงดันทดสอบได้หรือไม่ ซึ่งจะมีผลทำให้ฉนวนที่อ่อนแอเกิดการเบรคดาวน์ขึ้นสามารถแบ่งการทดสอบได้เป็น 2 วิธีคือ

1.1 การทดสอบเพื่อการรับรอง(Acceptance Proof test)

เป็นการทดสอบในขดลวดที่มีการฉนวนใหม่ก่อนที่จะมีการนำไปใช้อาจจะทำการทดสอบที่โรงงานผลิตหรือภายหลังการติดตั้งเพื่อใช้งานหรืออาจจะทำทั้งคู่ซึ่งแรงดันที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977(R 1991) จะอยู่ที่ 1.7 เท่าของแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับเพื่อการรับรองซึ่งแรงดันที่ใช้คือ 2E+1 kV(E คือค่าแรงดันเฟสต่อเฟสที่พิกัดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น kV)

1.2 การทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา(Maintenance Proof test)

เป็นการทดสอบไปยังขดลวดอามาเจอร์ภายหลังการใช้เพื่อการตัดตอนว่าเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่อหรือไม่โดยปกติจะใช้ที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเพื่อการยอมรับซึ่งแรงดันที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977(R 1991) คือ 1.7 เท่าของแรงดันที่ใช้ทดสอบเพื่อการบำรุงรักษาในแรงดันสูงกระแสสลับ(ซึ่งแรงดันที่ใช้ทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับประมาณ 1.2 – 1.5 เท่าของแรงดันพิกัดเฟสต่อเฟส)

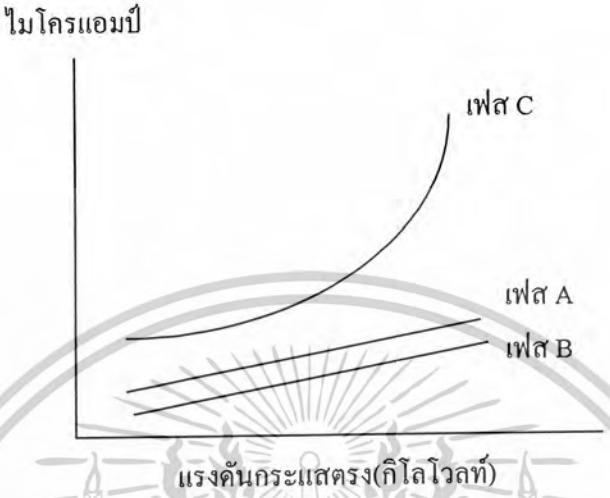
การทดสอบทั้ง 2 วิธีจะใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 1 นาทีต่อ 1 เฟส โดยผลการทดสอบเราสามารถดูได้จากความผิดปกติที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถสังเกตได้จากการดิสชาร์จอย่างรวดเร็ว(Sharp Capacitive Discharge) หรือความผิดปกติจากกระแสรั่วไหล(Leakage Current)หรือความผิดปกติจากการไหม้หรือความร้อนถ้าหากไม่ความผิดปกติเกิดขึ้นก็ถือว่าฉนวนนั้นใช้ไม่ได้

2. การทดสอบโดยการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรง(Control Over Voltage Test)

การทดสอบนี้นิยมใช้ในการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษาโดยสามารถที่จะคาดการณ์ระดับแรงดันเบรคดาวน์ได้ โดยฉนวนที่อ่อนแอยังไม่เกิดการเบรกดาวน์ขึ้น ตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977 (R 1991) กำหนดให้ป้อนแรงดันเริ่มต้นประมาณ 1/3 เท่าของแรงดันทดสอบสูงสุด(โดยแรงดันทดสอบสูงสุดเท่ากับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงคงที่) โดยคงที่แรงดันเอาไว้ 10 นาที เพื่อหาค่าดัชนีความต้านทานฉนวน ซึ่งค่าดัชนีความต้านทานฉนวน ต้องมากกว่าค่าที่กำหนดตามที่กล่าวมาแล้วถึงจะทำการทดสอบต่อ แต่ถ้าน้อยกว่าค่าที่กำหนดจะต้องหยุดทำการทดสอบหลังจากนั้นทำการเพิ่มแรงดันไม่เกิน 3% ของแรงดันทดสอบสูงสุดในทุกๆ 1 นาทีซึ่งในการปรับแรงดันควรเพิ่มภายใน 10 วินาที เมื่อครบ 1 นาที ก็ทำการบันทึกค่าแรงดันและกระแสเอาไว้ จากนั้นนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกราฟ ถ้ากราฟมีลักษณะของกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไม่เป็นเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็ให้หยุดทำการทดสอบทันที ซึ่งแสดงว่าฉนวนอ่อนแอ และจะเสียสภาพฉับพลันได้หากทำการทดสอบต่อไป แต่ถ้าลักษณะกราฟเป็นเส้นตรงก็ให้ทำการเพิ่มแรงดันไปจนถึงแรงดันทดสอบสูงสุด ถ้าลักษณะกราฟยังเป็นเส้นตรงอยู่แสดงว่าฉนวนของขดลวดยังมีสภาพดีอยู่ เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบแต่ละเฟสจะใช้ประมาณ 30-45 นาที



รูปที่ 3-6 แสดงการพล็อตกราฟทดสอบโดยการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรงคงที่ โดยที่เฟส C สภาพฉนวนมีการอ่อนแอ ส่วนเฟส A และ เฟส B สภาพฉนวนยังดีอยู่

3.3.4 การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ (High Alternating Voltage Test)

วัตถุประสงค์ของการทดสอบฉนวนด้วยการป้อนแรงดันสูงกระแสสลับก็เพื่อทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์ การทดสอบจะเป็นการจำลองการเกิดแรงดันขึ้นชั่วระยะเวลาหนึ่งแล้วหายไป เช่น การเปิดปิดวงจรขนาดใหญ่ของเมนเซอร์กิตเบรกเกอร์ การโอนย้ายโหลด เป็นต้น ระยะที่เกิดแรงดันเกินจะนานกว่าการเกิดจากแรงดันอิมพัลส์ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที

การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับนี้ใช้แรงดันไฟฟ้ากระสลับที่มีความถี่เท่ากับความถี่ที่พิกัดมอเตอร์ ซึ่งการทดสอบนี้บอกได้ว่าฉนวนสามารถทนต่อแรงดันทดสอบได้หรือไม่ ระยะเวลาที่กำหนดซึ่งตามมาตรฐาน IEC และ NEMA MGI กำหนดแรงดันที่ใช้ทดสอบเพื่อการรับรองไว้ที่ 2E+1kV (E คือค่าแรงดันเฟสต่อเฟสที่พิกัดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น kV) และมาตรฐาน IEEE Std 95-1977(R 1991) ได้กำหนดระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษาไว้ที่ 1.25 ถึง 1.5 เท่าของพิกัดแรงดันเฟสต่อเฟส โดยทำการทดสอบเป็นเวลา 60 วินาที การทดสอบนี้อาจจะเป็นการทำลายฉนวนของขดลวดได้ และอาจทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน(Partial Discharge) ซึ่งจะทำให้อายุของฉนวนสั้นลงได้

3.3.5 การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จ (Surge Comparison Test)

การทดสอบทั้ง 4 วิธี ที่กล่าวมาเหมาะกับการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ไม่สามารถตรวจความบกพร่องของฉนวนที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด และระหว่างเฟสกับเฟส ซึ่งความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บกพร่องเหล่านี้ จะนำไปสู่ความบกพร่องเทียบกับกราวด์ การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จจะช่วยให้ค้นพบความบกพร่องดังกล่าวก่อนที่จะลุกลามรุนแรงต่อไป

ถึงแม้ว่าการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จจะได้มีการประยุกต์ใช้งานในโรงงานผลิตมอเตอร์และโครงงานซ่อมมอเตอร์เพื่อประกันคุณภาพของมอเตอร์มาเป็นเวลานานแล้ว แต่เทคนิคดังกล่าวได้มีการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการบำรุงรักษาแบบทำนายในช่วงไม่กี่ปีมานี้เอง

การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จอาศัยหลักการที่ว่ามอเตอร์ที่มีชุดขดลวดที่ไม่บกพร่องชุดขดลวดทั้ง 3 เฟส(มอเตอร์เหนี่ยวนำ มอเตอร์ซิงโครนัส)จะมีลักษณะเหมือนกันทุกอย่าง การทดสอบจะทำการทดสอบเปรียบเทียบชุดขดลวดทีละคู่เปรียบเทียบกัน เช่น เฟส A กับ เฟส B , เฟส B กับ เฟส C และ เฟส A กับ เฟส C การทดสอบจะทำโดยป้อนด้วยพัลส์แรงดันตรงที่มีลักษณะเหมือนกันเข้าไปที่ขดลวดทั้ง 2 พร้อมกัน สิ่งที่จะเป็นตัววัดว่ามีความผิดปกติได้คือ รูปคลื่นที่เกิดการสั่น(100 kHz Ringing Wave ตามมาตรฐาน IEEE C2.41-1991) และผลรวมของรูปคลื่นแรงดันและกระแสซึ่งแรงดันมีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นคือ 1.2/50 ไมโครวินาที ส่วนกระแสจะมีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นคือ 8/20 ไมโครวินาที การทดสอบจะใช้แบบรูปคลื่นรวมแรงดันเปิดวงจร(Open Circuit Voltage) พัลส์ที่เกิดการสั่น(Ringing Pulse) จากชุดของขดลวดทั้ง 2 จะถูกตรวจจับด้วยออสซิลโลส-โคป ชนิด 2 เส้น(Dual trace) ถ้าชุดของขดลวดมีลักษณะเหมือนกันพัลส์ทั้งสองจะเหมือนกัน และซ้อนกันสนิท ปรากฏให้เห็นบนจอภาพเพียงเส้นเดียว ในกรณีที่มีการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด(turn-to-turn short circuit) คลื่นสะท้อน จะไม่เหมือนกันจึงไม่ซ้อนกัน และสภาพความเสียหายในลักษณะอื่นๆ เช่นกรณีที่เกิดจากชุดขดลวดชุดหนึ่งต่อลงกราวด์ หรือชุดขดลวดขาด ลัดวงจรระหว่างเฟส ก็สามารถตรวจสอบได้โดยเปรียบเทียบรูปคลื่นที่วัดได้กับรูปคลื่นตัวอย่างที่ผู้ผลิตเครื่องทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จให้ไว้การทดสอบวิธีนี้ทำได้โดยง่ายโดยไม่ต้องถอดสายไฟที่ต่อมอเตอร์ออกเพียงแต่ปลด(OFF) เซอร์กิตเบรกเกอร์หรือถอดฟิวส์ที่ใช้ป้องกันมอเตอร์ออกก็สามารถทดสอบได้เลย

จากสาเหตุและวิธีการทดสอบที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่าการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จสามารถระบุความบกพร่องต่างๆของฉนวนในมอเตอร์ได้ โดยเฉพาะการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดซึ่งการทดสอบลักษณะอื่นๆ ไม่สามารถตรวจสอบผลได้ โครงงานนี้จึงได้นำการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จมาประยุกต์ เพื่อทำการศึกษาการทดสอบสภาพของฉนวนของขดลวดสเตเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานซึ่งมีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นเป็น 1.2/50ไมโครวินาที ในการทดสอบ

การทดสอบสภาพฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในโครงงานนี้ ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะคือ

1. การทดสอบสภาพฉนวนเทียบกราวด์
2. การทดสอบการลัดวงจรระหว่างรอบต่อรอบ
3. การทดสอบการลัดวงจรระหว่างเฟสต่อเฟส

ตามมาตรฐาน IEEE Std 522-1992(R 1977) ได้กำหนดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบคร่อมขดลวดโดยสัมพันธ์กับช่วงเวลาหน้าคลื่นไว้ตามรูปที่ 3-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานนี้ได้ใช้แรงดันอิมพัลส์ทดสอบที่มีช่วงเวลาหน้าคลื่น 1.2 ไมโครวินาที จากรูปที่ 3-7 จะได้ระดับแรงดันอิมพัลส์ทดสอบเท่ากับ $5(\sqrt{2}/\sqrt{3})$VL โวลต์

ขนาดพิกัดสูงสุดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้มาจากมาตรฐาน IEEE C62.41.1991 ซึ่งแบ่งโซนต่างๆ ออกเป็น 3 โซนคือ

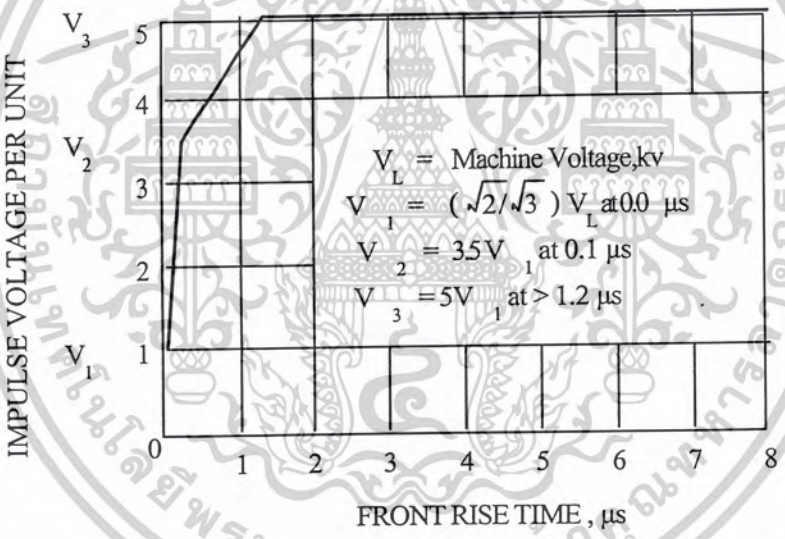
โซน A คือ โซนของเต้ารับ วงจรย่อยขนาดยาว เต้ารับจาก โซน B ซึ่งยาวกว่า 10 เมตร และเต้ารับจากโซน C ซึ่งยาวกว่า 20 เมตร

โซน B คือ โซนของสายป้อน บัสจ่ายโรงงาน วงจรย่อยขนาดสั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ ระบบฟ้าผ่าในตึกสูง

โซน C คือ โซนภายนอก แหล่งจ่ายป้อนเข้า ระบบสายดิน ระบบขนาดใหญ่

ซึ่งพิกัดแรงดันที่ใช้ทดสอบ ณ โซนต่างๆ คือ

A มีพิกัด 6 kV B มีพิกัด 6 kV C มีพิกัด 10 kV หรือมากกว่าในโครงงานนี้จะทำการทดสอบกับมอเตอร์ที่ใช้ในโซน A



รูปที่ 3-7 แสดงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบการทดสอบระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ WIRE-WOUND WINDINGS โดยใช้แบบจำลองร่องสล๊อต (Motorette) เพื่อการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนไฟฟ้า

4.1 บทนำ

ความทนทานของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความเค้นทางไฟฟ้า และทางกล การสั่นสะเทือน การเผยผึ่งต่อบรรยากาศและสารเคมีที่ทำให้เกิดความเสียหายความชื้นและสิ่งสกปรกโดยทั่วไปวัสดุฉนวนไฟฟ้าจะไม่สามารถทนทานต่ออุณหภูมิที่กำหนดให้โดยไม่จำกัดเวลาได้ แต่วัสดุฉนวนไฟฟ้าก็จะมีอายุการใช้งานที่พอเพียง ถ้าอุณหภูมิของบางคาบในช่วงเวลานั้นลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดเป็นครั้งคราว ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุฉนวนไฟฟ้าจะมีอายุการใช้งานที่นานพอถ้าให้ทำงานภาวะการใช้งานตามปกติตามมาตรฐานของขีดจำกัดทางอุณหภูมิ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบเพื่อหาค่าระดับความร้อนของวัสดุฉนวนไฟฟ้าก่อนที่จะนำเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นไปใช้งานภายใต้สภาวะนั้นๆ ได้จริง

4.2 ขอบเขตของการทดสอบ

กระบวนการทดสอบนี้อยู่ในรูปแบบของการเปรียบเทียบอายุโดยรวมของระบบฉนวนตั้งแต่ 2 ระบบขึ้นไป ซึ่งรูปแบบกระบวนการทดสอบนี้ถูกจำกัดอยู่ในขอบเขตของเครื่องจักรไฟฟ้าที่มีการพันแบบWire-wound winding โดยที่รูปแบบกระบวนการทดสอบนี้ใช้ในการหาค่าของระบบฉนวนที่มีระบบการทำความเย็นโดยอากาศภายใต้สภาพแวดล้อมซึ่งนำไปสู่การเสื่อมโทรมของระบบแต่ไม่รวมถึงการใช้งานที่อยู่ในกรณีพิเศษ เช่น การใช้งานภายใต้ของเหลวบางชนิด ก๊าซบางอย่าง หรือการใช้งานร่วมกับเคมีภัณฑ์บางประเภท

4.3 จุดประสงค์ของการทดสอบ

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อที่จะจัดระดับอุณหภูมิของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ โดยการทดสอบตามรูปแบบกระบวนการทดสอบภายใต้ขอบเขตที่ได้กล่าวข้างต้น โดยทดสอบตามระดับความร้อนของระบบฉนวน ซึ่งอาจเป็นการทดสอบเพิ่มเติมจากการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฉนวนก็ได้ ข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการทดสอบสามารถนำไปสู่การจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบก่อนที่จะได้รับการพิสูจน์จากการใช้งาน โดยการเปรียบเทียบอายุโดยรวมของระบบฉนวนจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระหว่างระบบฉนวนที่นำมาทดสอบกับระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงตามระดับความร้อนที่ได้คาดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การจัดประเภทของวัสดุฉนวนโดยแบ่งตามระดับความร้อน

ประเภท	อุณหภูมิจำกัดองศาเซลเซียส
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

ตารางที่ 4-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด

4.5 วิธีการหาค่าระดับความร้อนของระบบฉนวน

กระบวนการทดสอบนี้ได้ออกแบบรูปแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าระดับความร้อนของระบบฉนวน โดยการให้ความร้อนซึ่งเป็นปัจจัยหลักมีค่ามากเกินกว่าระดับความร้อนปกติ เพื่อที่จะเร่งอายุของระบบฉนวนให้เสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้น ตามลักษณะการสะสมของผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงหลังจากการใช้งานที่ยาวนานหลังจากนั้นจะเป็นการทดสอบด้วยความเค้นทางกลและความชื้นและแรงดันไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเป็นการตรวจสอบสภาพของระบบฉนวน

จำนวนของชิ้นงานทดสอบในแต่ละขนาดอุณหภูมิที่ทำการทดสอบควรมีจำนวนที่เพียงพอเพื่อที่จะกระจายความเป็นไปได้ของการเกิดความเสียหายต่อชิ้นงานเพื่อความเหมาะสมชิ้นงานควรมีจำนวนอย่างน้อย 10 ชิ้นงานในแต่ละขนาดอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ (ควรทดสอบอย่างน้อย 3 ขนาดอุณหภูมิ)

เมื่อทำการทดสอบจนกระทั่งระบบฉนวนเกิดความเสียหายแล้ว ข้อมูลหรือจำนวนชั่วโมงที่ได้จากการทดสอบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงก็จะถูกนำมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟเพื่อหาระดับความร้อนของระบบฉนวนซึ่งกระบวนการทดสอบนี้อาจเหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบเท่านั้น เนื่องจากในการใช้งานจริงนั้นมักจะเป็นปัจจัยหลายๆ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความทนทานของระบบฉนวนตามแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมกว่าถ้าจะทำการหาค่าระดับความร้อนโดยการหาข้อมูลจากประสบการณ์การใช้งานจริง

4.6 แบบจำลองของชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบนี้จะเป็นการจำลองระบบฉนวนที่ร่องสล๊อตของสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 ส่วนประกอบของชิ้นงานทดสอบ

- ส่วนที่เป็นโลหะ โดยใช้สแตนเลสในการทำ
- ตัวอินซูเลเตอร์หรือเทอมินอล โดยใช้เซรามิคเทอรินอล
- ขดลวดและวัสดุฉนวนไฟฟ้าซึ่งเลือกใช้ตามการใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

4.6.2 โครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ

แบบจำลองร่องสล๊อตที่เสร็จแล้วจะประกอบไปด้วยส่วนโลหะแข็งที่เป็นฐานซึ่งยึดไปพร้อมกับตัวเทอมินอลและตัวร่องสล๊อต ซึ่งประกอบไปด้วย แผ่นโลหะภายนอกและภายใน โดยเจาะรูปที่ฐานเพื่อแขวนขณะที่ทำการสั่น ในแต่ละร่องสล๊อตนั้นจะประกอบไปด้วยขดลวด 2 ขดด้วยกันซึ่งในแต่ละขดนั้นพันไว้จำนวน 20 รอบ โดยพันขนานกัน 2 เส้น ดังนั้นในแต่ละขดและในแต่ละด้านจะประกอบไปด้วยลวดจำนวน 40 เส้น หรือ 80 เส้น ในแต่ละด้านนั่นเอง ซึ่งในแต่ละด้านนั้นจะมีฉนวนคั่นระหว่างขดลวดกับกราวด์ (สล๊อตอินซูเลชั่น) และฉนวนคั่นระหว่างขดลวด (เฟสอินซูเลชั่น) ในกรณีที่เกิดการหลวมสามารถแก้ปัญหาได้โดยใส่สล๊อตเวดจ์ เพื่อทำให้แน่นขึ้นและในขั้นตอนสุดท้ายก็จะเป็นการชุบวาร์นิชเพื่อทำให้ขดลวดอยู่ตัวนั่นเอง

4.7 กระบวนการทดสอบ

4.7.1 ขอบเขตของกระบวนการทดสอบ

ในการให้ความร้อนที่เหมาะสมเพื่อที่จะเร่งอายุของระบบฉนวนให้เสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้นตามลักษณะการสะสมของผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงหลังจากการใช้งานที่ยาวนานและในการกระบวนการทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่นำไปสู่การทดสอบการวินิจฉัย (ความเค้นทางกล ความชื้น และการใช้แรงดันไฟฟ้าหลังจากการเร่งอายุทางอุณหภูมิเพื่อตรวจสอบสภาพของระบบฉนวน)ดังนั้นในแต่ละรอบของการทดสอบและในแต่ละชิ้นงานทดสอบก็จะได้รับการเร่งอายุทางอุณหภูมิโดยความร้อนการทดสอบทางกล การทดสอบทางความชื้น และการทดสอบด้วยแรงดันทางไฟฟ้าตามลำดับ จนกระทั่งเกิดความเสียหายที่ระบบฉนวนซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการทดสอบด้วยแรงดันทางไฟฟ้า

จากประสบการณ์ทำให้เราทราบว่าวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการหาค่าการเสื่อมสภาพจากความร้อนซึ่งนำไปสู่การแตกหักหรือเสื่อมสภาพของระบบฉนวนนั้น หลังจากระบบฉนวนได้รับการเร่งอายุโดยความร้อนแล้ว ควรเพิ่มความเค้นทางกลเข้าไปซึ่งจะนำไปสู่การแตกของฉนวนเนื่องจากความเค้นทางกลหลังจากนั้นก็เพิ่มปัจจัยทางความชื้นโดยการให้ความชื้นแก่ระบบฉนวน และทำการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นขั้นตอนการทดสอบสุดท้ายของกระบวนการทดสอบ

วิธีการให้ความร้อนโดยเตาอบเป็นวิธีแม้จะเป็นวิธีที่มีข้อเสียอยู่บ้างแต่จากประสบการณ์ทำให้ทราบว่าการให้ความร้อนโดยวิธีนี้ก็เป็นวิธีที่สะดวกเหมาะสมและประหยัดเมื่อต้องการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ในการทดสอบนี้จะให้ความร้อนที่เกินกว่าระดับอุณหภูมิปกติของระบบฉนวน แต่ในการใช้งานจริงระบบฉนวนจะถูกใช้งานที่ระดับต่ำกว่าระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ อย่างไรก็ตามผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้งานจริงข้างต้นก็ยังจะใกล้เคียงกับผลของการให้ความร้อนโดยตู้อบอยู่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับว่าการไหลเวียนของอากาศภายในตู้อบใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือไม่

4.7.2 กระบวนการเร่งอายุโดยการให้ความร้อน

ขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุฉนวนที่ใช้ในการทดสอบนั้น ควรขึ้นอยู่กับลักษณะหรือจำนวนของวัตถุที่ใช้ในการทดสอบและควรทำการทดสอบที่ขนาดอุณหภูมิที่ต่างกันอย่างน้อย 3 ระดับ การคาดหมายถึงระดับความร้อนของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้น ควรใช้ตามค่าที่ระบุในตารางที่ 4-1

อุณหภูมิจำกัด								จำนวนวัน/รอบ
Y	A	E	B	F	H	C	C	
90°C	105°C	120°C	130°C	155°C	180°C	200°C	220°C	
155-165	170-180	185-195	195-205	220-230	245-255	265-275	285-295	1-2
145-155	160-170	175-185	185-195	210-220	235-245	255-265	275-285	2-3
135-145	150-160	165-175	175-185	200-210	225-235	245-255	265-275	4-6
125-135	140-150	155-165	165-175	190-200	215-225	235-245	255-265	7-10
115-125	130-140	145-155	155-165	180-190	205-215	225-235	245-255	14-21
105-115	120-130	135-145	145-155	170-180	195-205	215-225	235-245	28-35
95-105	110-120	125-135	135-145	160-170	185-195	205-215	225-235	45-66

ตารางที่ 4-2 อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวน

อุณหภูมิที่เลือกใช้ในการให้ความร้อนขณะทำการทดสอบควรควบคุมให้คงที่โดยอยู่ในช่วง $\pm 2^{\circ}$ C (ที่อุณหภูมิ $\leq 180^{\circ}$C) หรือ $\pm 3^{\circ}$C (ที่อุณหภูมิ $> 180^{\circ}$C)

ในตารางที่ 4-2 เป็นการแนะนำถึงขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวน ขนาดอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการเร่งอายุฉนวนควรเป็นค่าที่ก่อให้เกิดอายุโดยรวมของฉนวน (log mean test life) ประมาณ 5,000 ชั่วโมงหรือมากกว่าและขนาดระดับอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ควรมีค่าห่างระหว่างกันประมาณ 20 °C หรือมากกว่า ส่วนค่าห่างระหว่าง 10 °C นั้นควรใช้เมื่อมีการทดสอบโดยใช้ขนาดอุณหภูมิมากกว่า 3 ระดับ และจำนวนชิ้นงานที่ใช้สำหรับการทดสอบอย่างน้อยที่สุดเป็นจำนวน 10 ชิ้น ซึ่งควรนำเข้าสู่รอบการทดสอบอย่างต่อเนื่องที่แต่ละอุรหภูมิของการทดสอบจนกระทั่งได้ข้อมูลที่พอใจหรือเกิดการเสียหายเกิดขึ้น อุณหภูมิที่ทำการทดสอบควรได้จากการนำชิ้นงานทดสอบเข้าสู่ตู้อบที่ปิดสนิทและปรับอัตราการไหลของอากาศเพื่อให้อุณหภูมิภายในตู้อบเท่ากันอย่างทั่วถึงชิ้นงานทดสอบควรนำเข้าสู่ตู้อบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบหลังจากที่อุณหภูมิความร้อนภายในตู้อบถึงระดับที่ต้องการแล้ว ในทำนองเดียวกัน ควรนำชิ้นงานทดสอบออกจากตู้โดยตรงสู่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิภายในตู้อบควรควบคุมให้คงที่และเท่ากันในแต่ละรอบการทดสอบเพื่อให้ได้ผลการเปรียบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง

ตามประสบการณ์การทดสอบที่ผ่านมาอายุโดยเฉลี่ยของระบบฉนวนที่ทดสอบในแต่ละขนาดอุณหภูมิจะมีค่าประมาณ 10 รอบการทดสอบ ดังนั้นในแต่ละขนาดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบก็จะให้ค่าอายุโดยเฉลี่ยประมาณ 10 รอบการทดสอบ

4.7.3 กระบวนการทดสอบทางกล

หลังจากการทำการเร่งอายุโดยความร้อนแล้วเมื่อชิ้นงานทดสอบเย็นลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง เราจะทำการให้ความเค้นทางกลในแต่ละชิ้นงานทดสอบโดยการแขวนไว้บนโต๊ะสั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากชิ้นงานทดสอบถูกแขวนจึงทำให้เกิดการเคลื่อนไหวจึงเกิดขึ้นที่มุมขวาไปสู่แผ่นรองของขดลวด ดังนั้นที่จุดสิ้นสุดของขดลวด จะถูกกระตุ้นให้เกิดการสั่น ดังที่มักจะเกิดขึ้นภายใต้แรงในแนวรัศมีที่จุดสิ้นสุดของการพันขดลวดตามที่เกิดขึ้นจริงในมอเตอร์

ช่วงความกว้างของการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการทดสอบ คือ 0.3 มิลลิเมตรจากยอดสู่ยอด ที่ความถี่ของการสั่นเป็น 50 Hz

4.7.4 กระบวนการทดสอบทางความชื้น

ความชื้นในหลายๆ กรณี เป็นส่วนหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฉนวน ซึ่งแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเนื่องจากแรงดันทางไฟฟ้า ผลของความชื้นอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Dielectric loss) และเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฉนวน และยังอาจส่งผลต่อความคงทนของฉนวน ซึ่งความชื้นบนฉนวนยังเป็นการช่วยการทดสอบด้วยแรงดันทางไฟฟ้า เพื่อแสดงถึงรอยแตกและรูรั่วซึมในฉนวน

หลักจากการให้ความเค้นทางกลแก่ชิ้นงานทดสอบแล้วชิ้นงานทดสอบต้องได้รับความชื้นที่ความชื้นบรรยากาศ 100 เปอร์เซ็นต์ นานต่อเนื่องประมาณ 48 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อยเพื่อที่จะทำให้ค่าความต้านทานของฉนวนถึงจุดที่เหมาะสมในระหว่างการทดสอบนี้ต้องไม่มีการจ่ายไฟให้กับวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ

4.7.5 กระบวนการทดสอบด้วยแรงดันทางไฟฟ้า

การทดสอบด้วยแรงดันทางไฟฟ้าหลังจากกระบวนการทดสอบความชื้นเสร็จสิ้น เพื่อตรวจสอบชิ้นงานทดสอบว่าชิ้นงานที่ทดสอบถึงจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนแล้วหรือไม่ ควรทำการทดสอบตามตารางที่ 4-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน	ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ($V_{r.m.s}$)		
	ระหว่าง ขดลวดกับกราวน์	ระหว่าง ขดลวดบนและล่าง	ระหว่าง เส้นลวดขดเดียวกัน*
110-400	400	400	110±10
401-660	660	660	110±10
661-1000	ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจ	ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจ	ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจ
* ระดับแรงดันนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม			

ตารางที่ 4-3 แสดงขนาดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

แรงดันไฟฟ้าที่ถูกใช้กับแต่ละส่วนของชิ้นงานทดสอบควรเป็นไปตามระดับแรงดันที่กำหนดตามตารางที่ 4-3 ตามแต่ละที่ระบบฉนวนนั้นได้ระบุไว้แรงดันไฟฟ้าที่นอกเหนือจากขนาด 660 โวลต์ สามารถนำมาใช้ในการทดสอบได้ เช่นการใช้ขนาดแรงดัน 600 โวลต์ ในการทดสอบ ซึ่งระดับแรงดันอื่นๆ อาจถูกใช้ตามความเหมาะสมเพื่อที่จะชี้จุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวน

ในการทดสอบในแต่ละรอบควรทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลา 10 นาที ในขณะที่ชิ้นงานทดสอบยังคงเปียก เนื่องจากผลของความชื้นอยู่ การทดสอบแรงดันควรเริ่มต้นที่ระหว่างเส้นลวดตัวนำในขดเดียวกัน (wire to wire) หลังจากนั้นทดสอบที่ระหว่างขดลวดกับขดลวด (phase to phase) และสุดท้ายทำการทดสอบที่ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (winding to ground)

แรงดันระหว่างเส้นลวดขดเดียวกันที่ใช้สำหรับการทดสอบนั้นอาจเป็นค่าที่มีขนาดเท่ากับแรงดันที่ใช้งานจริงก็ได้ ซึ่งหากทำการทดสอบตามเงื่อนไขนี้จำเป็นต้องมีการบันทึกในรายงานการทดสอบด้วย

4.8 บรรทัดฐานของการเกิดการเสียหาย

ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการตรวจสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าสามารถบอกได้โดยการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ การเกิดการกระเด็นเล็กน้อยหรือการเกิดประกายไฟที่ผิว ไม่ถือว่าเป็นการเกิดการเสียหายแต่ควรมีการบันทึกไว้ในรายงานการทดสอบ

การเกิดการเสียหายที่ส่วนประกอบใดๆ ของระบบฉนวนที่เกิดขึ้นตลอดทั่วทั้งขดลวดถือเป็นจุดสิ้นสุดของระบบฉนวน

เราสามารถประมาณเวลาการเกิดการเสียหายได้โดยถือว่าการเกิดการเสียหายนั้นเกิดที่จุดกึ่งกลางระหว่างช่วงรอบการทดสอบที่ยังไม่เกิดการเสียหายเกิดขึ้นกับรอบการทดสอบที่เกิดการเสียหายเกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การเกิดการเสียหายในรอบที่ 11 เราจะถือว่าจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนคือรอบที่ 10.5 และช่วงเวลาทั้งหมดก็คือตั้งแต่รอบแรกจนถึงรอบที่ 10.5 นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.9.1 การเปรียบเทียบ

การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้เพื่อที่จะกำหนดอุณหภูมิสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปกราฟที่ได้จากการทดสอบซึ่งจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของค่าอายุโดยรวมในรูปของลอการิทึมกับขนาดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งการเปรียบเทียบผลการทดสอบ ซึ่งการเปรียบเทียบผลการทดสอบนั้นสามารถดูได้จากมาตรฐาน IEC 34-18-21

4.9.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นหรือความไม่คล้ายคลึงกันของกราฟ

ความไม่เป็นเชิงเส้นหรือความไม่คล้ายกันของรูปกราฟอาจเกิดขึ้นเมื่อฉนวนถูกเร่งอายุโดยระดับอุณหภูมิที่สูงเกินไปซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะที่ชันหรือโก่งงอ ซึ่งแนวทางในการแก้ไขก็คือการลดอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการทดสอบลงไปอย่างน้อยประมาณ 10 °C

4.10 โครงสร้างแบบจำลองร่องสล๊อต

4.10.1 คำแนะนำทั่วไป

1.วัสดุที่นำมาใช้

- ส่วนประกอบที่เป็นโลหะ(นอกเหนือจากส่วนที่นำไฟฟ้า)โลหะสแตนเลส
- อินซูเลเตอร์หรือเทอมินอล เซรามิค หรือวัสดุอื่นๆที่ทนอุณหภูมิสูงๆได้
- ขดลวดหรือวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อนำมาใช้หรือพิจารณาเลือกทาใช้ให้ใช้ไปตามการใช้งานเครื่องจักรกล

2. ขนาดของวัสดุทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ

- ขนาดของวัสดุทดสอบที่ใช้ในการทดสอบควรประมาณขนาดที่ใช้ตามการใช้งานในเครื่องจักรกล ระยะครีพเอจ(creepage distance) ,ความหนาของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนและที่ว่างอากาศควรเหมือนหรือใกล้เคียงกับการใช้งานในเครื่องจักรกล

3. โครงสร้าง

ขดลวดสองขดถูกใส่เข้าไปในคู่ร่องสล๊อตที่เหมือนกันซึ่งเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นของแบบจำลองร่องสล๊อต ร่องสล๊อตถูกสร้างจากแผ่นสแตนเลสโดยประมาณและถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสล๊อต อินซูเลเตอร์หรือเทอร์มินอลทั้ง 4 ชิ้น จะถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสล๊อต ดูในรูปที่ 4-3 แสดงแบบจำลองร่องสล๊อตที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

ขดลวดทั้งสองขดนั้นได้จากการพันด้วยลวดตัวนำสองเส้นขนานกัน จำนวนรอบควรจะประมาณให้พอดีกับร่องสล๊อตโดยให้เหมือนกับการใช้งานในเครื่องจักรกลขดลวดทั้งสองขดถูกต่อเขากับอินซูเลเตอร์หรือเทอร์มินอล เพื่อให้ง่ายในการทดสอบแรงดันระหว่างขดลวดกับกราวน์,ระหว่างขดลวดกับขดลวดและระหว่างลวดตัวนำในขดเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองร่องสล๊อตไม่สามารถจำลองผลกระทบจากกระบวนการผลิตจริง เช่น เทคนิคในการพ้นขดลวด เนื่องจากผลกระทบจากกระบวนการผลิตนั้นมีค่าน้อยมาก แบบจำลองร่องสล๊อต อาจจะประกอบด้วยมือเพราะง่ายและสะดวก

แบบจำลองร่องสล๊อตมีประโยชน์ในการหาค่าการเปรียบเทียบของวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

4.10.2 รายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองร่องสล๊อต

ในห้องทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล๊อตที่กำหนดไว้ อาจจะสร้างขึ้นเพื่อปรับปรุงหรือเพื่อให้สะดวกมากยิ่งขึ้นที่จะสร้างเป็นวัตถุทดสอบ คำแนะนำที่แสดงรายละเอียดในภาคผนวกนี้อาจจะไม่มีความจำเป็น อย่างไรก็ตามถ้าประสบการณ์ที่ผ่านมาในการหาค่าฉนวนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หรือถ้าความพยายามทั้งหลายที่จะสร้างการเปรียบเทียบข้อมูลทดสอบระหว่างการทดสอบ โครงสร้างของแบบจำลองร่องสล๊อตที่ได้แสดงรายละเอียดในภาคผนวกนี้ควรปฏิบัติตามอย่างพิถีพิถัน ประสบการณ์ได้แสดงให้เห็นว่าเพียงการพิถีพิถันในการออกแบบและเตรียมแบบจำลองร่องสล๊อตจะมีผลต่อวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในห้องทดสอบที่ต่างกันด้วยผลกระทบที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

การออกแบบแบบจำลองล่องสล๊อตซึ่งมีการนำมาใช้และใช้กันเมื่อหลายปีมาแล้วในห้องทดสอบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลกระทบที่เปลี่ยนแปลงได้ง่าย

รูปที่แสดงแบบจำลองร่องสล๊อต

- รูปที่ 4-2 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของแบบจำลองร่องสล๊อตก่อนทำการประกอบรวมทั้งวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า,ขดลวด และส่วนประกอบที่เป็นโลหะ
- รูปที่ 4-3 แบบจำลองร่องสล๊อตที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว
- รูปที่ 4-4 ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของเฟรมและฐานของแบบจำลองร่องสล๊อตก่อนทำการประกอบ

แบบจำลองร่องสล๊อตที่เสร็จสมบูรณ์แล้วก็จะประกอบด้วยฐานโลหะรองรับที่มีความแข็งสำหรับยึดเทอมินอลที่ทำจากโพซีเลนหรือวัสดุอื่นๆที่เหมาะสม และยึดร่องสล๊อตทั้งสองที่ประกอบขึ้นมาจากแผ่นโลหะภายในและภายนอก ฐานรองรับมีรูไว้สำหรับแขวนแบบจำลองร่องสล๊อตขณะที่ทำการทดสอบการสั่นสะเทือน ร่องสล๊อตที่นำมาใช้ได้สะดวกจะทำมาจากแผ่นโลหะสแตนเลส ร่องสล๊อตที่ประกอบขึ้นภายในจะบรรจุขดลวด 2 ขด โดยมีฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้ง 2 กับเฟรม(slot insulation) ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง(phase insulation) จะยึดให้ติดอยู่กับที่ด้วยลิ่ม(slot wedges) ส่วนประกอบเหล่านี้เป็นสิ่งที่เหมือนกันกับที่ใช้ในมอเตอร์ ขดลวดแต่ละขดนั้นได้จากการพันลวดตัวนำสองเส้นขนานกันดังนั้นการทดสอบแรงดันระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำอาจสามารถทดสอบได้ การพันขดลวดของเครื่องจักรกลนั้นสามารถพันลงในแบบที่ต้องการได้ เมื่อมีความเหมาะสมแล้วโครงสร้างและกระบวนการในการสร้างอาจจะถูกปรับปรุงจำลองให้ตรงกับความตั้งใจในการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10.3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล๊อต

1) ลวดตัวนำขนาด 1.12 มิลลิเมตร หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มหนาเกรด 2
2) ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม (slot insulation) แผ่นฉนวนหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัด ออกมาเพื่อมาเป็นม้วน โดยมีความกว้างทั้งสี่ด้าน 70 มิลลิเมตรและพับของสองข้างเข้ามาด้านละ 3.2 มิลลิเมตร สุดท้ายด้านทั้งสองก็เหลือความยาว 64 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ยื่นออกมาจากขอบสล็อต 4.8 มิลลิเมตร
3) ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง (phase insulation) แผ่นฉนวนบาง 0.25 มิลลิเมตร ประกอบ ด้วยส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว 75 มิลลิเมตร กว้าง 64 มิลลิเมตร และมีช่องว่าง ตรงกลางซึ่งมีความกว้าง 38 มิลลิเมตร ซึ่งวัดจากจุดกึ่งกลาง ทำให้เหลือขอบกว้าง 13 มิลลิเมตร สำหรับส่วนที่เป็นส่วนโค้งที่ต่อกับด้านกว้างของสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งสองด้าน ตัดส่วนโค้ง โดยใช้ด้านกว้างทั้งสองด้านของสี่เหลี่ยมผืนผ้า 64 มิลลิเมตรเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของขอบนอก และตัดโค้งที่เป็นส่วนในซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร เมื่อวัดจากจุดกึ่งกลางของสี่เหลี่ยมผืนผ้า
4) ลิ่ม (slot wedge) ลิ่มสำหรับยึดขดลวดให้อยู่กับที่ ตัดออกมาจากชิ้นที่มีลักษณะเป็นรูปตัว U โดยควรตัดให้มีความกว้าง 9.5 มิลลิเมตร และยาว 76 มิลลิเมตร ส่วนปลายด้านหนึ่งของลิ่มควรทำให้กลมเล็กน้อยเพื่อทำให้มั่นใจ ได้ว่าใส่เข้าไปในสล๊อตได้ง่าย
5) ปลอกปลายสาย (sleeving) ปลอกปลายสายที่เป็นฉนวน มีขนาดและความยาวพอดีที่จะหุ้มปลายสายที่ยื่นออกมาจากจุดกึ่งกลางของสล๊อตเพื่อแบ่งขดลวดทั้งสองขดต่อเข้าเทอร์มินอล
6) เชือก (tie cord) มีความยาวพอดีที่จะใช้มัดขดลวดกับปลายสายของขดลวดเข้าด้วยกัน
7) เทปพันขดลวด เทปมีระดับทางไฟฟ้ากว้าง 13 มิลลิเมตร
8) วาร์นิชหรือเรซินที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า อธิบายอยู่ใน IEC 464

วัสดุทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้นเป็นส่วนประกอบของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบหรือระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิง

4.10.4 การประกอบแบบจำลองร่องสล๊อต

1) การพันขดลวด ขดลวดแต่ละขดควรมีการพันที่แน่น โดยรูปร่างคล้ายรูปไข่ ด้านที่ขนานกันมีความยาว 64 มิลลิเมตร และห่างกัน 44 มิลลิเมตร ขดลวดแต่ละขดประกอบด้วยการพันลวดตัวนำ 2 เส้นด้วยมือจำนวน 20 รอบ(40 เส้น) เมื่อใส่ขดลวดทั้งสองลงในร่องสล๊อต นั่นหมายความว่า ในแต่ละร่องสล๊อตจะมีลวดตัวนำ 80 เส้น และได้ส่วนปลายของขดลวดแต่ละขดออกมา 4 เส้น และปลายด้านใดด้านหนึ่งของขดลวดตัวนำเส้นเดียวกันจะถูกตัดออกโดยเหลือความยาวเส้นละ 5 มิลลิเมตร ออกมาจากขดลวดใกล้กับตรงกลางด้านหนึ่งของครึ่งวงกลม ส่วนที่เหลือ 5 มิลลิเมตร นี้จะถูกพันให้อยู่กับที่ด้วยเทปพันขดลวด ซึ่งเป็นปลายสายที่ไม่ได้นำไปต่อกับเทอร์มินอลโดยพันห่างกันอย่างน้อยที่สุด 5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และส่วนของปลายสาย 2 เส้นที่เหลือออกมาจากขดลวดจะมีการใส่ปลอกปลายสาย ปลายสายและปลอกปลายสายจะถูกมัดกันด้วยเชือก โดยแสดงในรูปที่ 4-3

2) การทำความสะอาดและประกอบชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ ก่อนที่จะทำการประกอบชิ้นส่วนที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสล็อตแต่ละชิ้นจะถูกจุ่มลงในตัวทำละลายที่ประกอบด้วยโทลูอีนและแอลกอฮอล์สังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เท่ากันเป็นเวลาอย่างน้อยที่สุด 30 นาที เมื่อนำแต่ละชิ้นส่วนออกจะตัวทำละลาย และล้างออกด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์แล้วเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสำลี ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสล็อตควรประกอบด้วย ความระมัดระวังเพื่อให้มั่นใจว่าตรงส่วนที่เป็นร่องสล็อตมีระยะห่างเท่ากันและด้านทั้งสองขนานกันเพื่อความง่ายในการประกอบให้ตัดชิ้นไม้ที่มีขนาดเท่ากับความกว้างของร่องสล็อตและเพื่อให้ร่องสล็อตอยู่ตรงกลางควรใส่ชิ้นไม้ในร่องสล็อตก่อนที่จะทำการอัดน็อตให้แน่น

3) การใส่ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกตัดออกมาแล้วม้วนให้พอดีกับร่องสล็อต และให้มีส่วนของฉนวนยื่นออกมาจากขอบร่องสล็อตด้านละ 5 มิลลิเมตร ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกใส่เข้าไปในร่องสล็อตอย่างระมัดระวังเพื่อให้ส่วนของฉนวนที่ยื่นออกมาจากขอบร่องสล็อตแต่ละด้านเท่ากัน

4) การใส่ขดลวดฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกม้วนออกมาเหนือส่วนที่มีลักษณะคล้ายฟันปลาตรงด้านบนของร่องสล็อตเพื่อให้มั่นใจว่าขดลวดจะไม่ถลอกเมื่อใส่ลงไปในร่องสล็อตใส่ขดลวดขดล่างลงในร่องสล็อตให้ปลายที่ไม่ต่อกับเทอร์มินอลอยู่ด้านส่วนล่างที่ใช้ต่อกับเทอร์มินอลอยู่ด้านบนหลังจากใส่ขดลวดขดล่างแล้วใส่ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง และระมัดระวังในการใส่เพื่อให้มั่นใจว่าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองปิดทับขดลวดขดล่างทั้งหมดถ้าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองมีขนาดใหญ่มากขอบของฉนวนจะถูกพับขึ้นไปทางด้านบนของร่องสล็อตฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองจะต้องมีขนาดและวางในตำแหน่งที่แน่ใจว่าปิดทับขดลวดขดล่างทั้งหมดปลายของขดลวดขดล่างจะต้องวางในแนวระนาบเพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้ขอบของฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองเสียหายการใส่ขดลวดขดบนก็ทำในลักษณะเดียวกันกับการใส่ขดลวดขดล่างแต่ปลายที่ไม่ได้ต่อกับเทอร์มินอลอยู่ด้านบนและส่วนที่ใช้ต่อกับเทอร์มินอลอยู่ด้านล่างจัดขอบของขดลวดให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับขดลวดขดล่างเพื่อให้แน่ใจว่าลวดตัวนำของขดลวดขดบนไม่เลื่อนออกมานอกฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง

5) การต่อปลายกับเทอร์มินอลปลายสายจะต้องวัดขนาดให้พอดีที่จะต่อเข้ากับเทอร์มินอลปอกส่วนปลายของขดลวดออก 13 มิลลิเมตร แล้วทำการบัดกรีก่อนที่จะต่อเข้ากับเทอร์มินอลปลายสายของขดลวดขดล่างต่อเข้ากับเทอร์มินอลที่อยู่ด้านในส่วนปลายสายของขดลวดขดบนต่อเข้ากับเทอร์มินอลที่อยู่ด้านนอก ถ้าขดลวดที่ใส่เข้าไปในฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมเกิดเลื่อนให้ใส่ลิ่มเข้าไปโดยให้อยู่บนฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) การทดสอบทางไฟฟ้า วัดความต้านทานของขดลวด ถ้าพบว่าขดลวดผ่านการทดสอบ ก็ทำการชุบวาร์นิชหรือเรซินที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า

7) การชุบวาร์นิชหรือเรซิน น้ำยาวาร์นิชหรือเรซินควรมีการนำมาใช้ในลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ในเครื่องจักรกลทั่วไป

8) การติดตั้งแบบจำลองร่องสล๊อต แบบจำลองร่องสล๊อตควรบรรจุในภาชนะ ซึ่งภาชนะนั้นจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักแบบจำลองร่องสลอตจำนวน 10 ชิ้นหรือ 20 ชิ้นในกรณีที่ทดสอบพร้อมกันโดยที่ภาชนะนั้นต้องมีระยะห่างระหว่างแบบจำลองร่องสล๊อตที่เพียงพอต่อการไหลเวียนของอากาศ และขนาดของภาชนะนั้นควรที่จะสามารถนำเข้าตู้อบ ตู้อบไอน้ำ และโต๊ะสั่นได้

4.11 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบทางความชื้น

4.11.1 ตู้อบไอน้ำ

สภาพบรรยากาศภายในตู้อบไอน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีไอน้ำมาเกาะบริเวณผนังของตู้อบไอน้ำ ถาดที่รองรับน้ำจะมีเครื่องทำความร้อนจุ่มอยู่เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5 - 10 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิห้อง ฝาครอบของตู้อบไอน้ำควรไม่มีการฉนวนและควรไม่มีความลาดเอียง เพื่อป้องกันการหยดของหยดน้ำลงบนวัตถุทดสอบ ภายในของตู้อบไอน้ำควรสร้างด้วยวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน ควรหลีกเลี่ยงจุดต่อที่ไม่ใช่โลหะ ฝาเปิดควรสร้างให้มีของยื่นออกมาเพื่อที่จะให้ความร้อนที่อยู่รอบๆฝาปิดถ่ายเทเข้าสู่ภายในตู้อบ

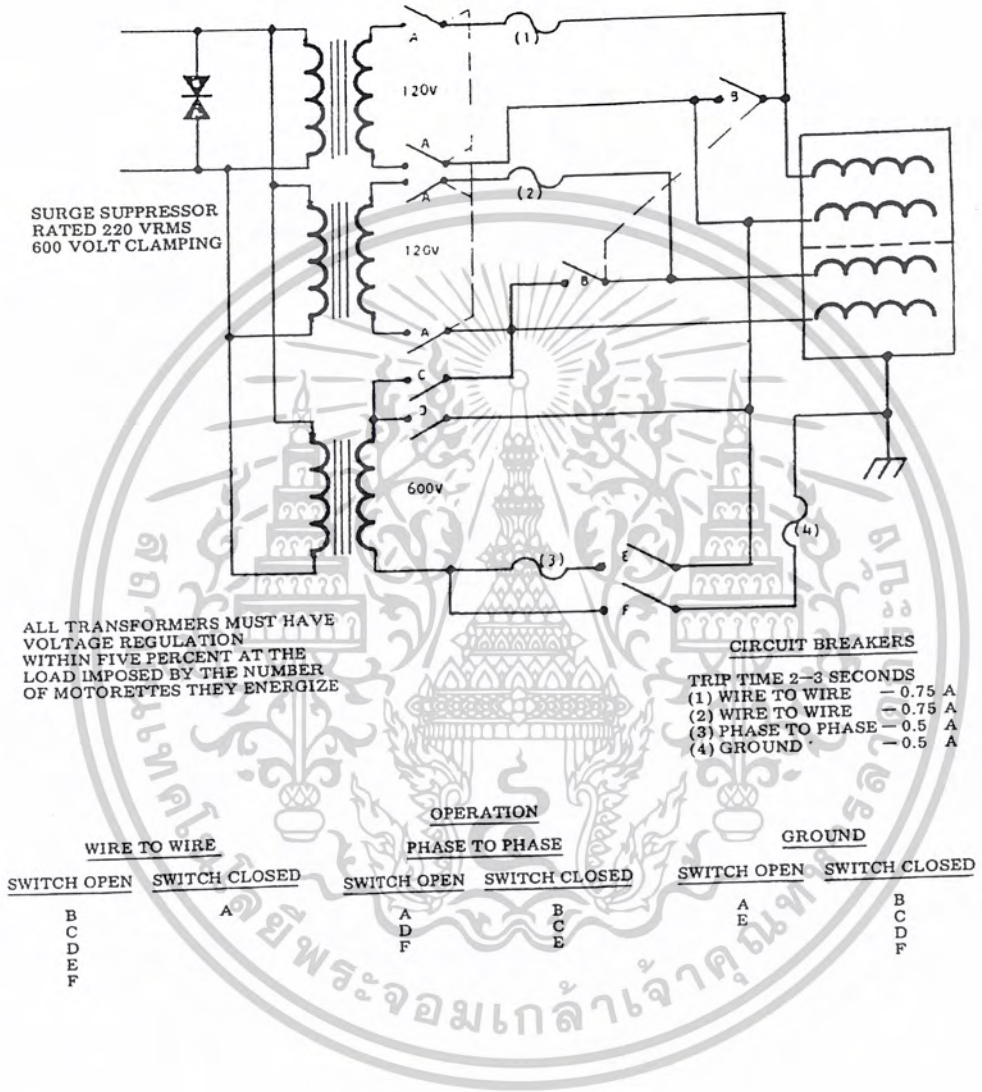
4.11.2 ตู้อบไอน้ำสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง(ที่อุณหภูมิห้อง)

ฐานของวัตถุทดสอบควรติดตั้งโดยให้ตัววัตถุทดสอบเย็นกว่าส่วนที่อยู่รอบๆเพื่อให้แน่ใจว่าระบบฉนวนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่ทำให้เกิดไอน้ำของอากาศ รูปที่ 4 - 5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการสร้างตู้อบไอน้ำโดยถูกทำให้เย็นโดยตัวทำความเย็น(น้ำ)ตัวทำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งได้กำหนดไว้โดยให้มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในตู้อบ ทำให้มีไอน้ำเกาะที่วัตถุทดสอบ ความแตกต่างนี้ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลง เมื่อถาดรองรับน้ำและตัวทำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในตู้อบนี้ถูกจำกัดด้วยปริมาตรของตู้อบไอน้ำ

การควบคุมอุณหภูมิต้องระวังเหตุการณ์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิห้องจนถึงระดับเดียวกันกับอุณหภูมิน้ำซึ่งความร้อนที่สูญเสียให้แก่ภาชนะที่ให้ความเย็นแก่วัตถุทดสอบสามารถทดแทนได้โดยการให้ความร้อนแก่น้ำซึ่งก็จะทำให้เกิดความสมดุลของอุณหภูมิทั่วทั้งตู้อบไอน้ำตามที่กำหนดถ้าอุณหภูมิห้องลดระดับลงจนต่ำกว่าภาชนะที่ให้ความเย็นแก่วัตถุทดสอบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยการให้ความร้อนแก่น้ำโดยเครื่องทำความเย็น เพื่อให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้นในการมีไอน้ำเกิดขึ้น ซึ่งนี่ก็คือการทำงานร่วมกันของการให้ความร้อนและความเย็นแก่ระบบเพื่อให้เกิดความสมดุลซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการควบคุมอุณหภูมิของตู้อบไอน้ำ ภายในตู้อบไอน้ำควรออกแบบให้มีระยะห่างของวัตถุทดสอบทั้งหมดกับน้ำและ

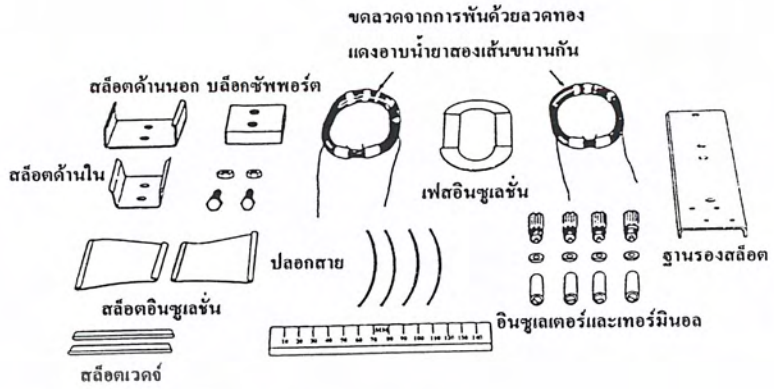
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุทดสอบกับตู้อบไอน้ำควรมีขนาดเท่ากัน ซึ่งก็จะทำให้แต่ละวัตถุทดสอบได้รับปัจจัยเช่น การเกาะของไอน้ำที่วัตถุทดสอบ อุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในระดับที่เท่ากัน

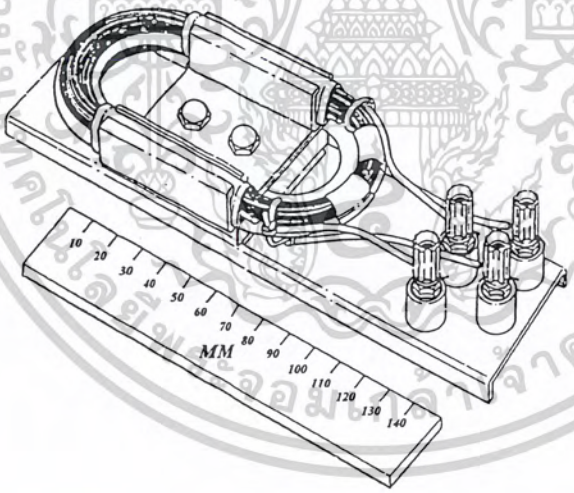


รูปที่ 4-1 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

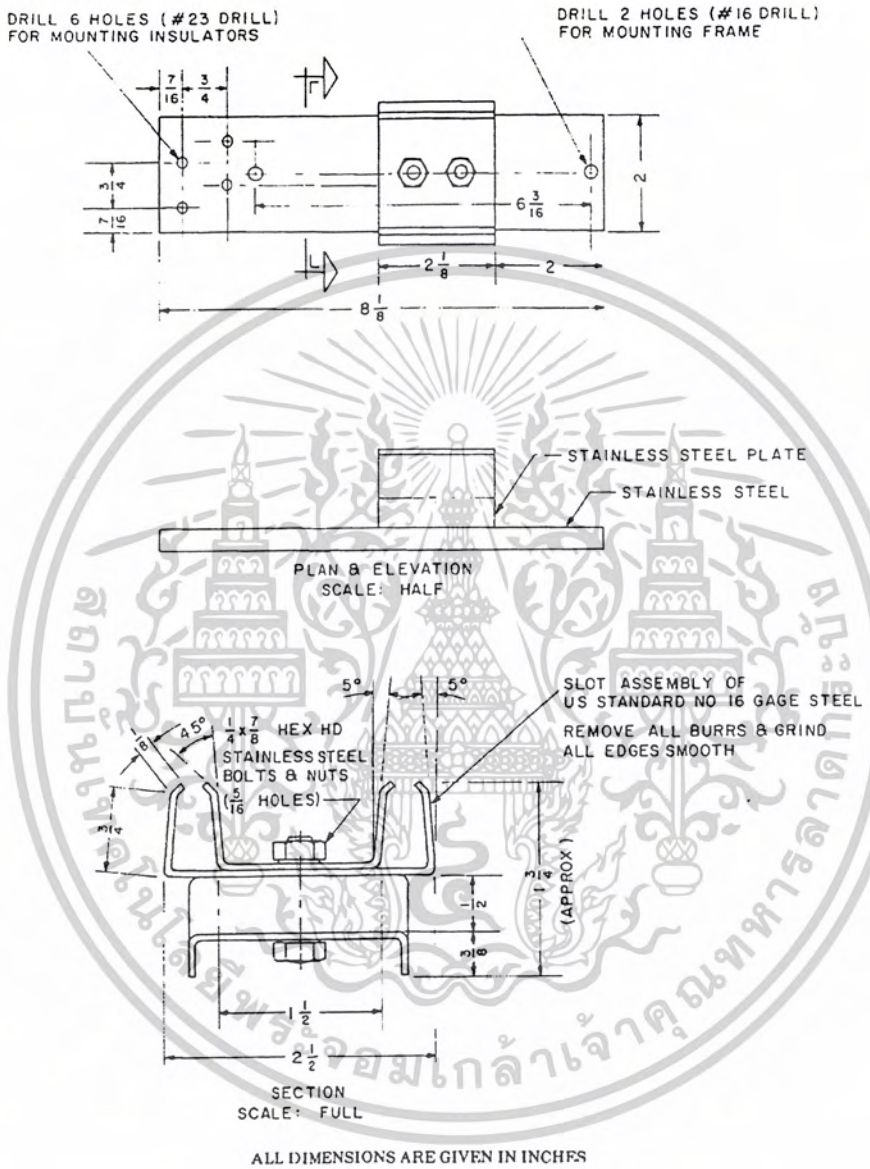


รูปที่ 4-2 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อตก่อนทำการประกอบ



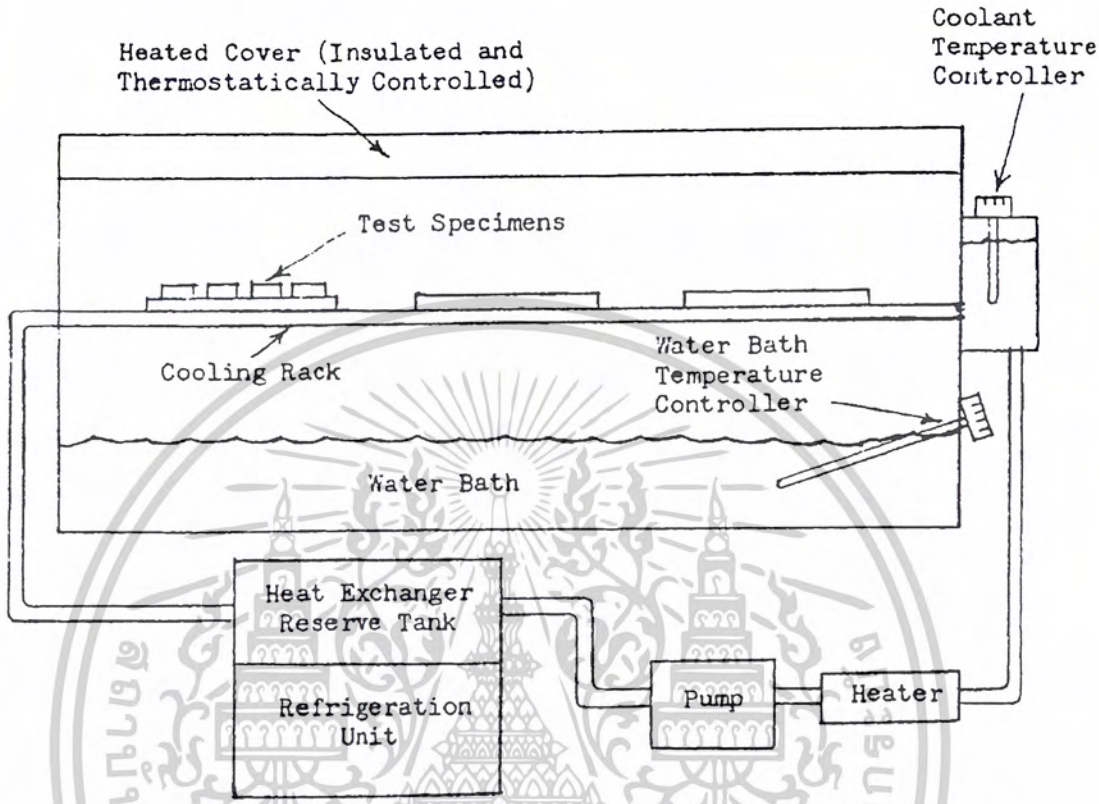
รูปที่ 4-3 แบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบเสร็จแล้วและผ่านการชุบวาร์นิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-4 แสดงการสร้างเฟรมของแบบจำลองร่องสล็อต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการสร้างตู้อบไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

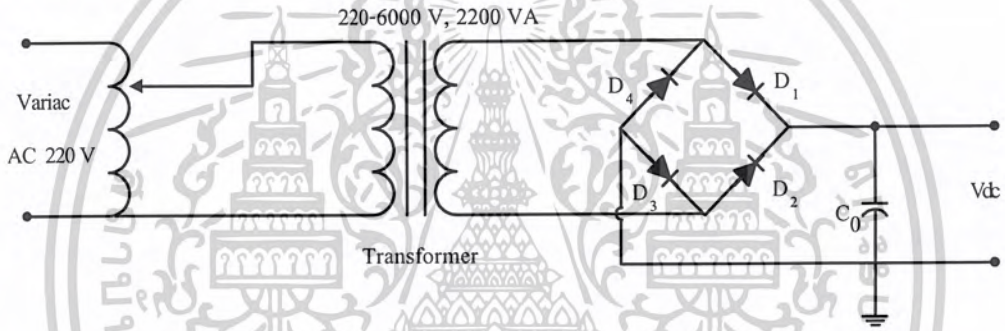
บทที่ 5
การออกแบบการทดสอบเพื่อหาข้อบกพร่องของฉนวน

การออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลองสำหรับการทดสอบสภาพของฉนวน

5.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

5.1.1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง

วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง จะใช้หม้อแปลงระดับแรงดันขึ้นจากนั้นก็ผ่านบริดส์ไดโอดเป็นตัวเรียงกระแสสลับเป็นกระแสตรง และมีตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองลดแรงดันกระเพื่อมซึ่งแรงดันกระแสตรงที่ออกมาสามารถปรับค่าได้และระดับแรงดันกระแสตรงที่ออกแบบไว้อยู่ที่ 8 kV โดยมีหม้อแปลงปรับแรงดัน (Variac) เป็นตัวปรับแรงดันเข้าดังรูปที่ 5-1

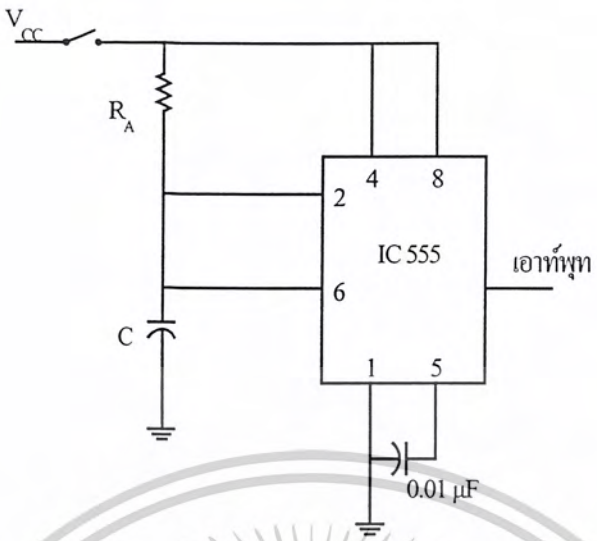


รูปที่ 5-1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง

5.1.2 วงจรโมโนสเตเบิล

เป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 1 ลูก เพื่อเป็นสัญญาณไปขับทรานซิสเตอร์ให้กำเนิดสัญญาณทริกเอสซีอาร์ โดยวงจรสร้างจากไอซี 555 ซึ่งสามารถปรับค่าความกว้างของพัลส์ได้ โดยการปรับค่า Ra และ C มีค่าเท่ากับ 0.1 ไมโครฟารัด และใช้ Ra เป็นตัวต้านทาน 10 กิโลโอห์ม เพื่อให้ได้ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่เหมาะสมในการทริกเอสซีอาร์และแรงดัน Vcc ที่ใช้ในวงจรเท่ากับ 9 โวลต์ วงจรโมโนสเตเบิลแสดงดังรูปที่ 5-2

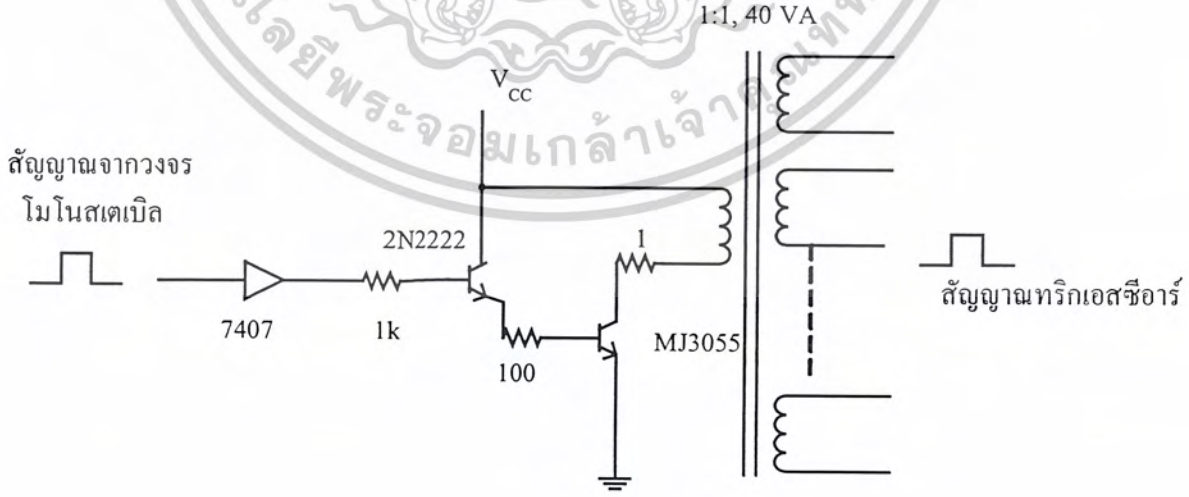
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-2 วงจรโมโนสเตเบิล

5.1.3 วงจรทริกเอสซีอาร์

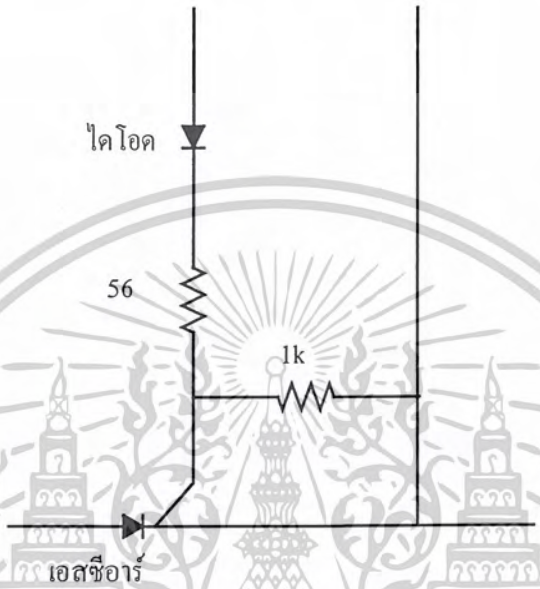
การควบคุมการทำงานของเอสซีอาร์ให้ทำงานพร้อมกันใน 1 ชุด สามารถทำได้โดยการใช้หม้อแปลงสัญญาณพัลส์ป้อนเข้าที่ขาเกตของเอสซีอาร์เพื่อที่ทริกให้เอสซีอาร์ทำงานโดยได้ออกแบบสร้างหม้อแปลงที่มีขดลวดด้านเข้า(primary) 1 ขด และมีขดลวดด้านออก(secondary) 8 ขด ซึ่งขดลวด 1 ขด ใช้ในการทริกเอสซีอาร์ 1ตัว ดังนั้นจึงสามารถทริกเอสซีอาร์ได้พร้อมกัน 8 ตัว โดยหม้อแปลงที่ใช้เป็นหม้อแปลงแบบ 1:1 ขนาด 40 VA โดยวงจรทริกเอสซีอาร์แสดงดังรูปที่ 5-3



รูปที่ 5-3 วงจรทริกเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

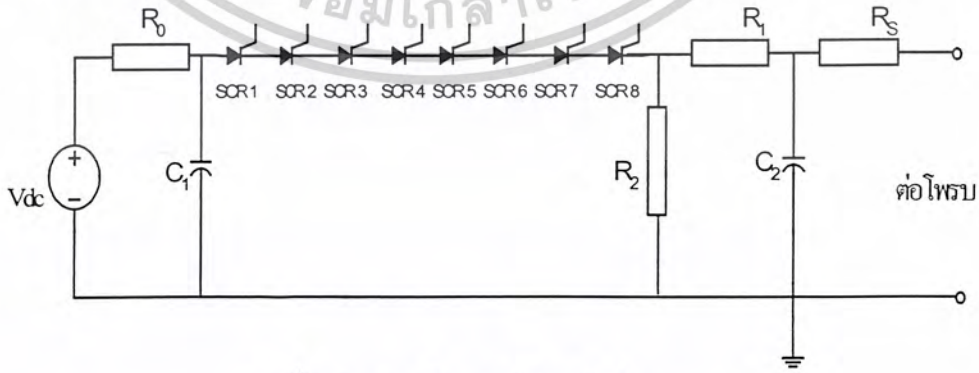
ในส่วนของวงจรป้องกันขาเกตของเอสซีอาร์ใช้ไดโอดทำหน้าที่กั้นกระแสไหลย้อนกลับที่ขาเกต มีตัวต้านทานขนาด 56 โอห์มเป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลเข้าขาเกต และยังใช้ความต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์ม ต่อคร่อมระหว่างขาเกตและขาคาโทดเอสซีอาร์ เพื่อดิสชาร์จประจุที่รอยต่อภายในของเอสซีอาร์ ช่วยให้เอสซีอาร์กลับคืนสู่สภาพปกติได้เร็วยิ่งขึ้นดังรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-4 วงจรป้องกันเอสซีอาร์

5.1.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ออกแบบระดับแรงดันได้ที่ 6 kV ซึ่งใช้เอสซีอาร์ 8 ตัว มาต่ออนุกรมกัน โดยเลือกใช้เอสซีอาร์เบอร์ 25RIA120 ซึ่งแต่ละตัวทนแรงดันได้ 1,200 โวลต์ ดังนั้นทั้งวงจรสามารถทนแรงดันได้ 9,600 โวลต์ ดังวงจรในรูปที่ 5-5

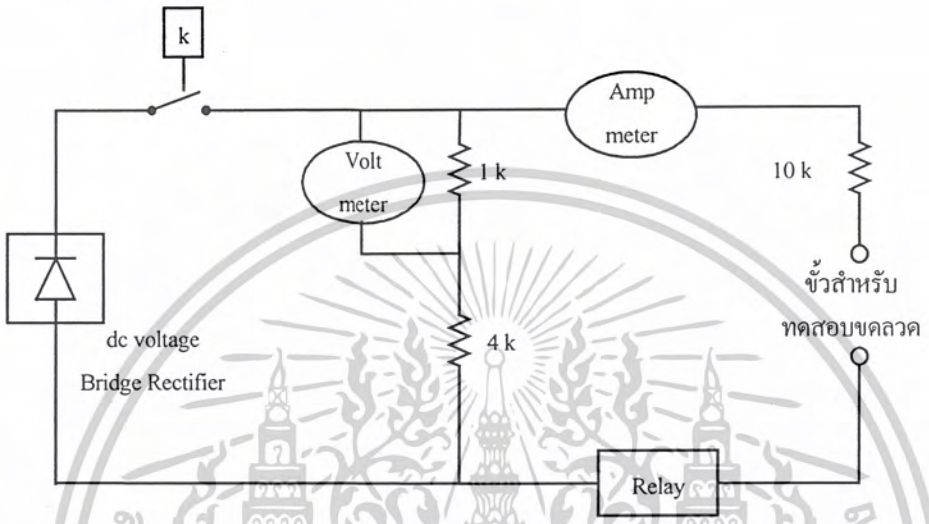


รูปที่ 5-5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

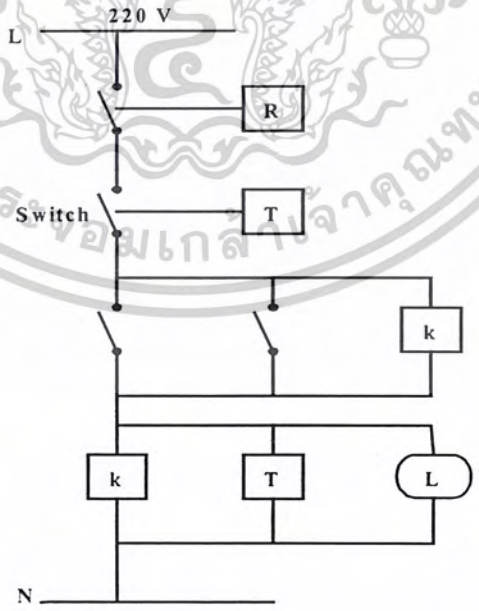
5.2 วงจรทดสอบแรงดันกระแสตรง

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบแรงดันกระแสตรงตามมาตราฐาน IEEE std 95-1977 (R1991) จะอยู่ที่ 1.7 เท่าของแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบแรงดันสูงสุดกระแสสลับ ซึ่งแรงดันที่ใช้ทดสอบจะออกแบบแรงดันทดสอบสูงสุดไว้ที่ 969 โวลต์ ซึ่งจะมีตัวต้านทานจำกัดกระแส ซึ่งแรงดันทดสอบกระแสตรงจะใช้ความต้านทานมีค่าเท่ากับ 10 เมกะโอห์ม ซึ่งจะให้กระแสออกมาเป็นค่าไมโครแอมป์เพื่อดูกระแสรั่ว วงจรทดสอบแรงดันกระแสตรงจะแสดงดังรูปที่ 5-6



รูปที่ 5-6 วงจรทดสอบแรงดันกระแสตรง

วงจรควบคุมการทดสอบกระแสตรงแสดงดังรูปที่ 5-7

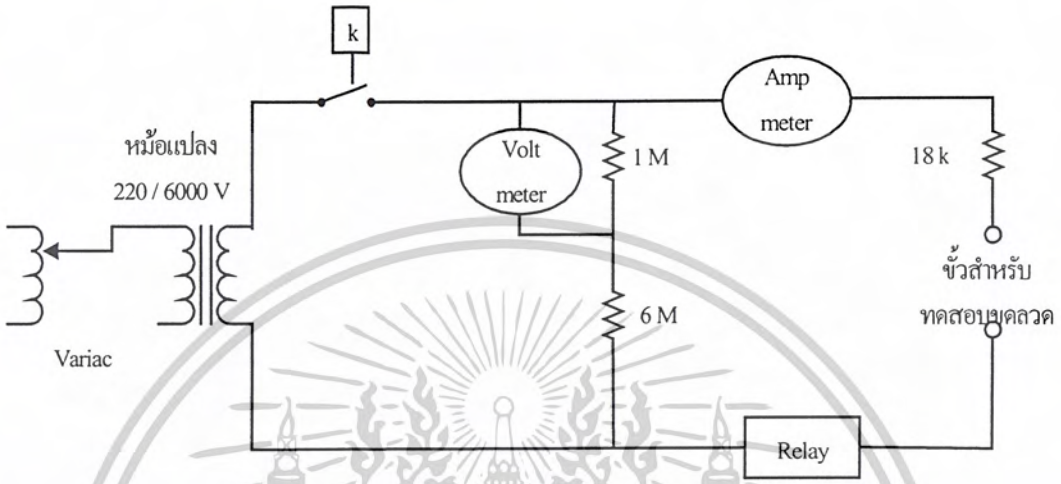


รูปที่ 5-7 วงจรควบคุมการทดสอบกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 วงจรทดสอบแรงดันกระแสสลับ

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบแรงดันกระแสสลับตามมาตราฐาน IEC และ NEMA MGI กำหนดไว้สูงสุดที่ 2E+1kV มีค่าเท่ากับ 1760 โวลต์ จะมีค่าความต้านทานฉนวนไว้เพื่อจำกัดกระแสไว้ที่ 18 กิโลโอห์ม วงจรทดสอบกระแสสลับแสดงดังรูปที่ 5-8 ซึ่งวงจรควบคุมจะเหมือนกับวงจรควบคุมกระแสตรง



รูปที่ 5-8 วงจรการทดสอบกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

6.1 การทดสอบเพื่อจัดระดับความร้อนของฉนวนไฟฟ้า

6.1.1 ขอบเขตการทดสอบ

กระบวนการทดสอบนี้เป็นการทดสอบระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบ Wire-wound windings โดยใช้แบบจำลองร่องสล๊อตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21

6.1.2 จุดประสงค์การทดสอบ

จุดประสงค์การทดสอบนี้ก็เพื่อที่จะสร้างวิธีการทดสอบให้มีความเหมาะสมตามที่มาตรฐานได้กำหนด เพื่อนำไปสู่การทดสอบระบบฉนวนทางไฟฟ้าเพื่อการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

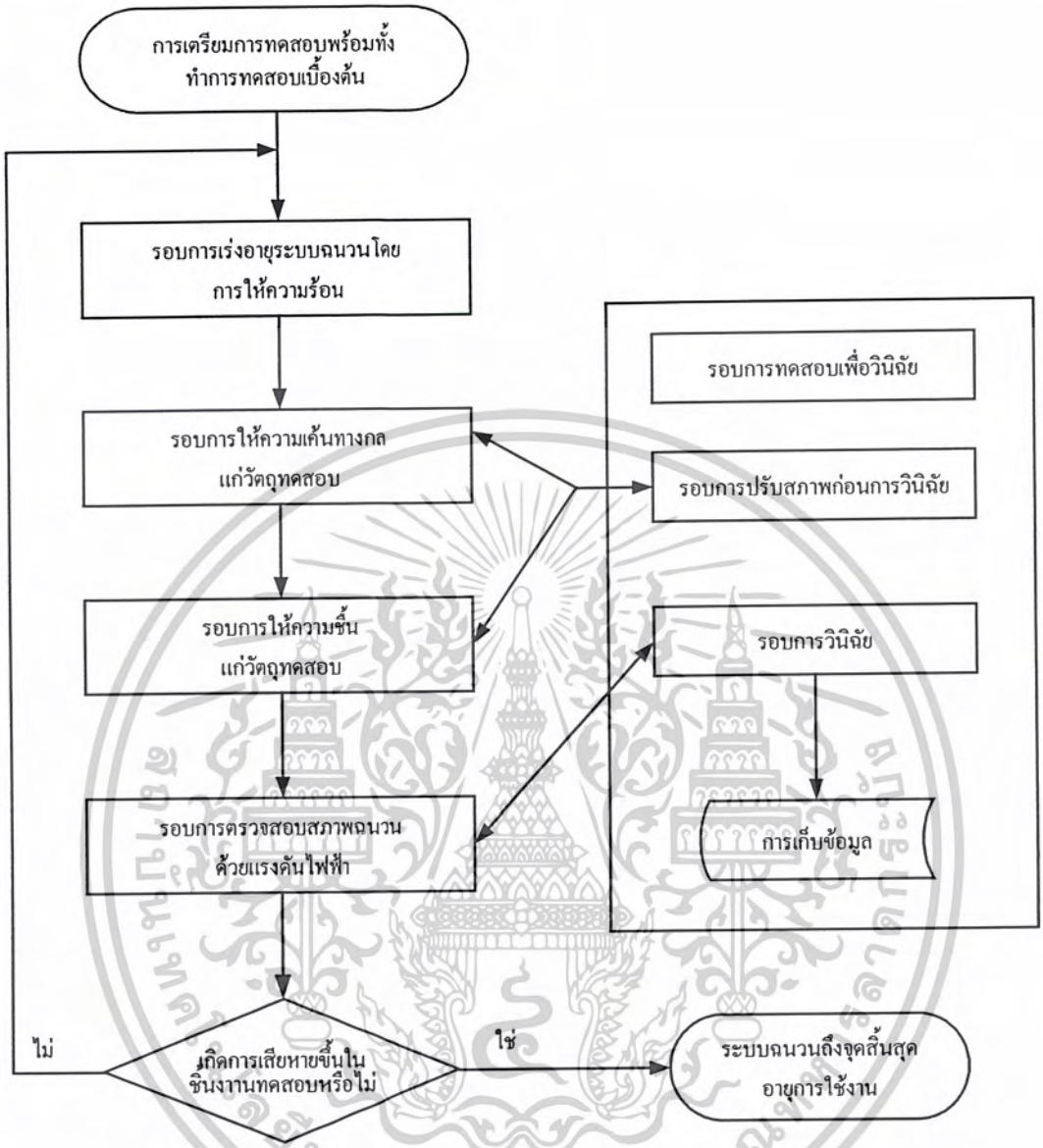
6.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ

1) แบบจำลองร่องสล๊อต
2) เตาอบ
3) โต๊ะสั่น
4) ตู้อบไอน้ำ
5) อุปกรณ์ทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

6.1.4 วิธีดำเนินการทดสอบ

การทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ระหว่างระบบฉนวน 2 ระบบภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกันทั้งหมด คือ ระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง หลังจากที่ทำการเตรียมวัตถุทดสอบและทำการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้นแล้วก็จะเข้าสู่รอบย่อยของการเร่งอายุโดยความร้อนตามขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ได้เลือกไว้ หลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ขั้นตอนรอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยซึ่งก็จะประกอบไปด้วย การปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยเพื่อเพิ่มประสิทธิผลของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย ซึ่งก็จะประกอบไปด้วยการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยโดยการให้ความเค้นทางกลและหลังจากนั้นก็จะเป็นการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยโดยการให้ความชื้น และการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยตามบรรทัดฐานการเกิดการเสียหายซึ่งในที่นี้ก็คือ การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้านั่นเองซึ่งในขั้นตอนนี้ก็จะมีการเก็บข้อมูลของกระแสรั่ว หลังจากนั้นก็จะทำการทดสอบวนรอบอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการเสียหายขึ้นจนครบทุกชิ้นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

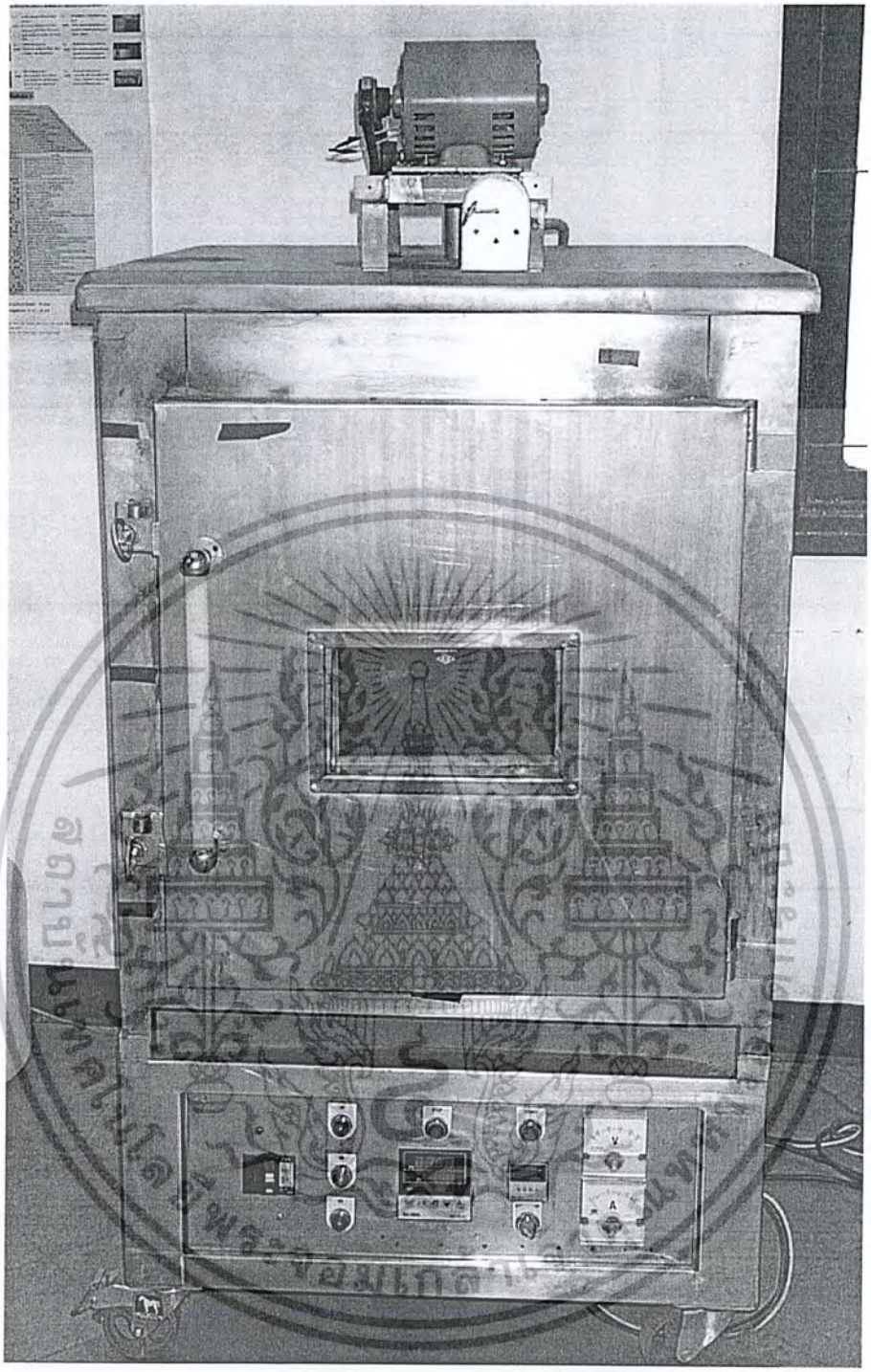


รูปที่ 6-1 แสดงขั้นตอนของกระบวนการทดสอบ

รายละเอียดเกี่ยวกับเตาอบที่ใช้ในการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน

- ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน	380 V_{ac}
- ขนาดของกระแส	30 A
- ขนาดกำลังของเครื่องทำความร้อน (Heater)	6000 w
- ขนาดของตู้อบภายใน	$60 \times 60 \times 60$ cm^3
- ขนาดของตู้อบภายนอก	$70 \times 70 \times 70$ cm^3
- น้ำหนักของตู้อบภายนอก	10 kg
- ช่วงอุณหภูมิที่สามารถปรับได้	0 – 500 $^{\circ}$C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

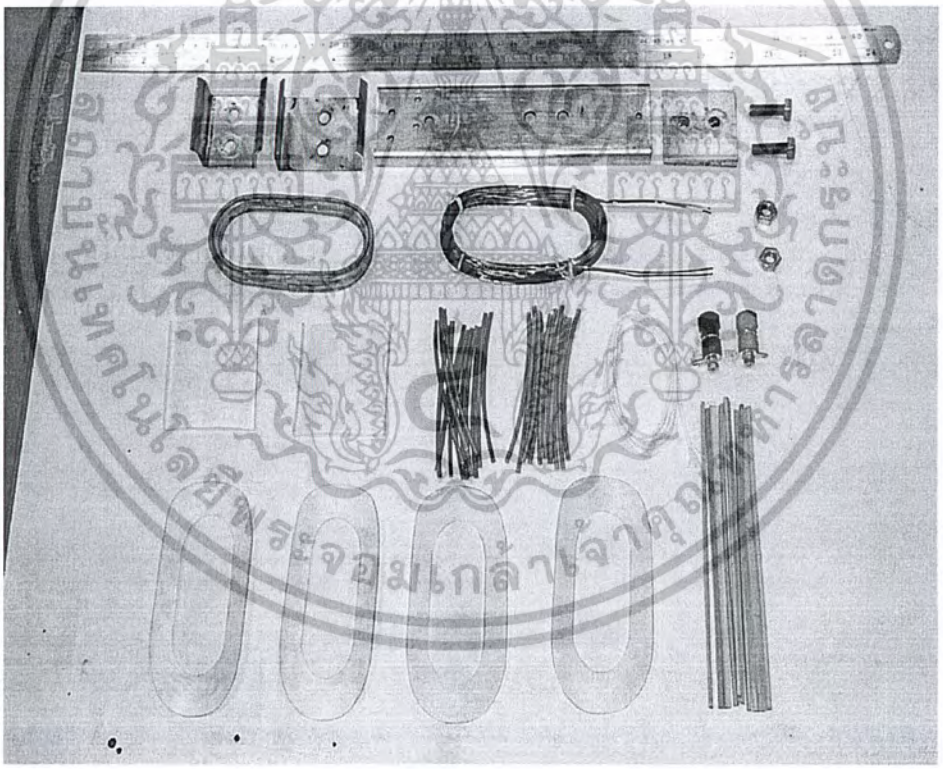


รูปที่ 6-2 เตาอบ

- ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control) ชนิด PID control type k 0 – 500 °C
- ช่วงอุณหภูมิที่สามารถปรับค่าได้ (Temperature spread) ± 0.1 °C
- ค่าความเที่ยงตรงของอุณหภูมิภายในตู้อบ ± 0.2 °C
- ตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple type k) วัดได้ 0 – 1200 °C
- ชุดตัดต่ออุณหภูมิ Solid state relay DC 4-32 V 40 A

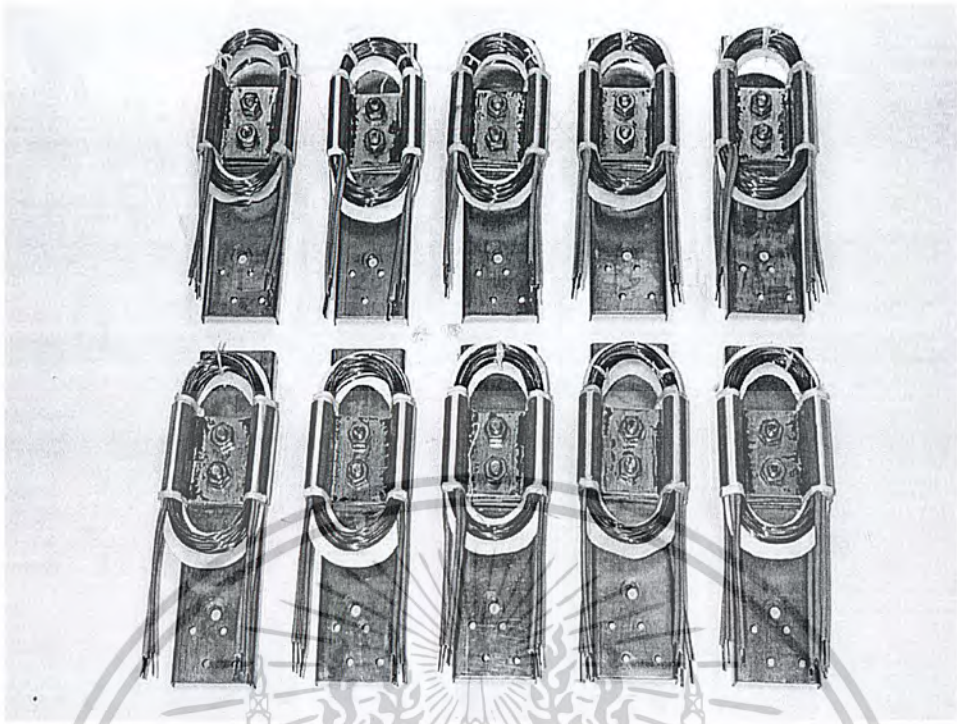
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชุดตั้งเวลา (Timer type AH5R-2) 0-999 ชั่วโมง
- ระบบการตั้งเวลาแบบอัตโนมัติ ตั้งได้ 0-999 ชั่วโมง
- หลอดไฟแสดงสัญญาณ
- สวิตช์กดติดปล่อยดับ 25 mm
- กระปุกฟิวส์
- มอเตอร์ 1 เฟส 1/2 แรงม้า
- โครงตู้ภายในภายนอกเป็นสแตนเลส
- ฉนวนกันความร้อน เซรามิคไฟเบอร์
- เซอร์กิตเบรคเกอร์ 3 เฟส 1 ตัว
- โวลต์มิเตอร์ 500 V
- แอมมิเตอร์ 30 A

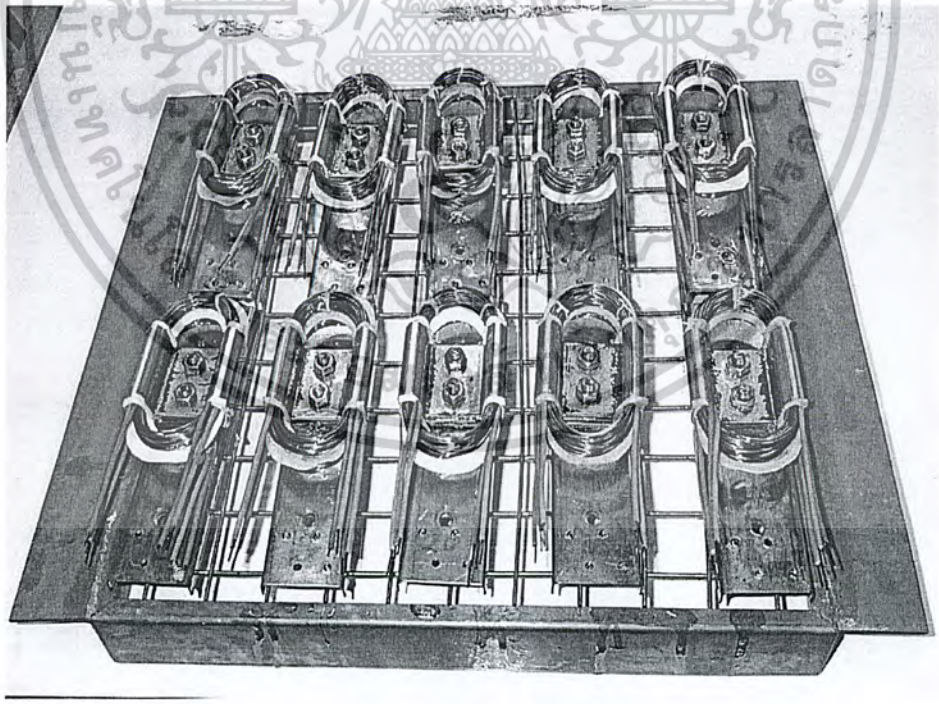


รูปที่ 6-3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลิ๊อต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

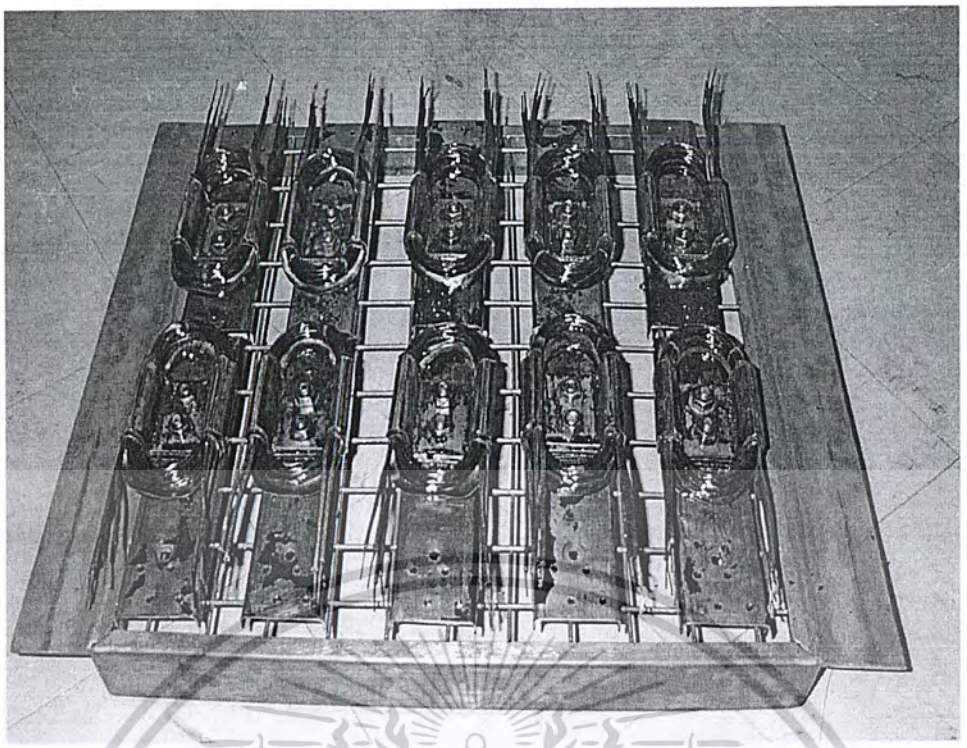


รูปที่ 6-4 แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ

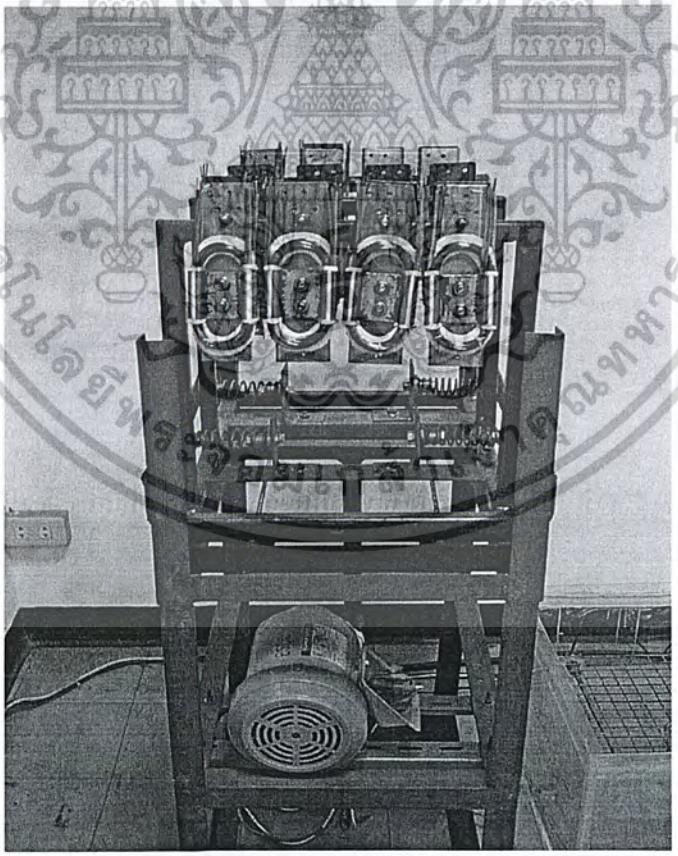


รูปที่ 6-5 แบบจำลองร่องสล็อตหลังชุบวาร์นิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

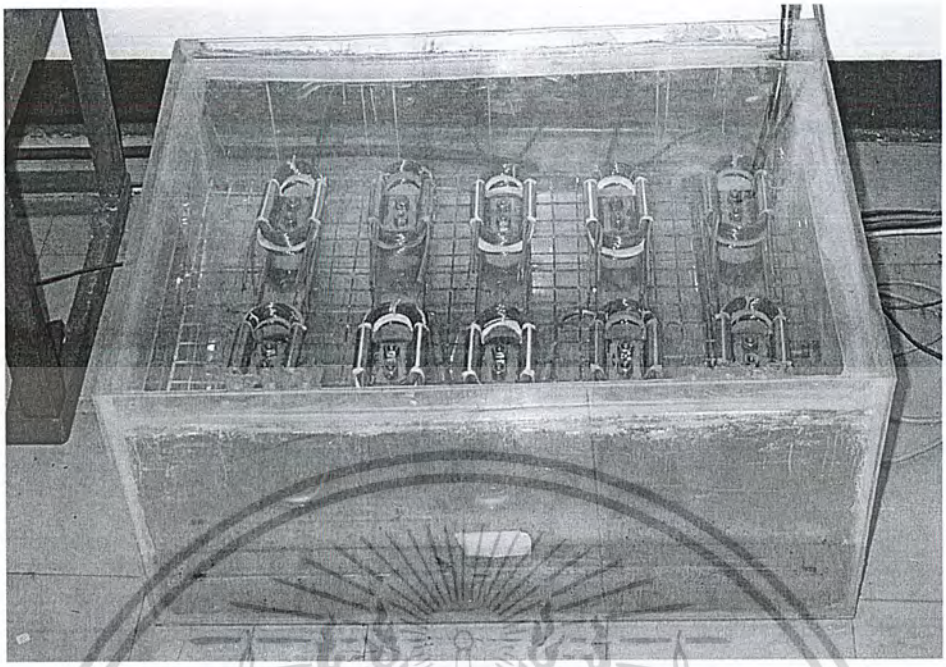


รูปที่ 6-6 แบบจำลองร่องสล๊อตหลังจากได้รับการเร่งอายุทางความร้อน



รูปที่ 6-7 การปรับสภาพทางกลต่อแบบจำลองร่องสล๊อตด้วยโต๊ะสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-8 ตู้อบไอน้ำ

รูปที่ 6-9 การทดลองทางไฟฟ้าเพื่อวินิจฉัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองร่องสล๊อตที่ 1

ระบบฉนวนระดับความร้อน F

อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 205°C

ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 96 ชั่วโมง

ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่งโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง

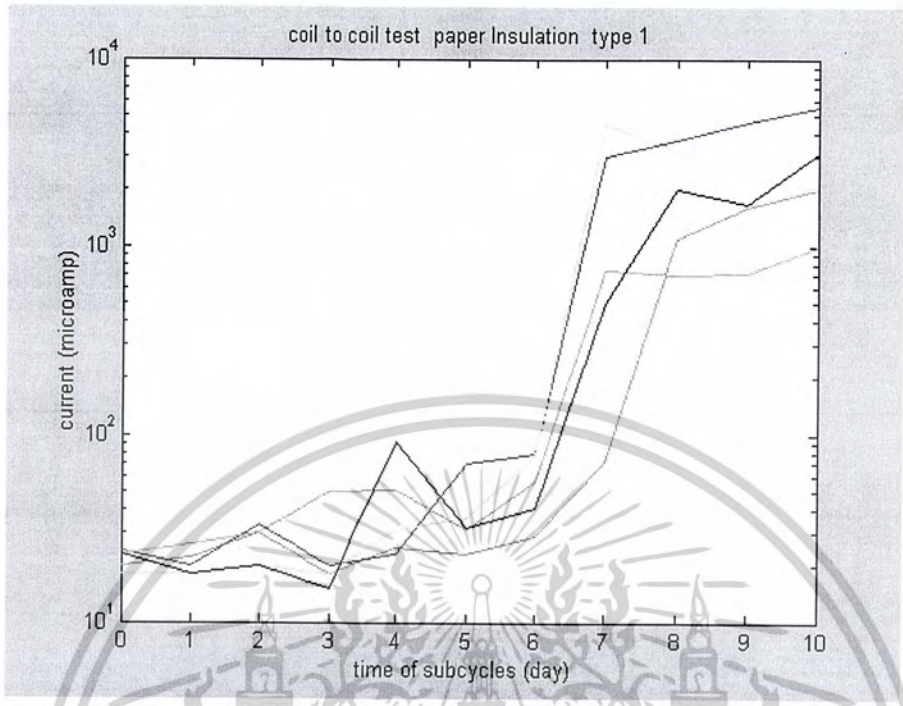
รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า	ก่อนเร่งอายุ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	หมายเหตุ
ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110 ±10 โวลต์)	90 µA / 75 µA	64 µA / 54µA	58 µA / 70 µA	62 µA / 143 µA	1.2mA / 660 µA	1.6 mA / 2.3 mA	1.8 mA / 1.5 mA	2.7 mA / 1.1 mA	215 mA / 193 mA	226 mA / 253 mA	258 mA / 235 mA	ขดบน / ขดล่าง
ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โลลต์)	20 µA	22 µA	30 µA	18 µA	25 µA	23 µA	29 µA	71 µA	1.1 mA	1.6 mA	2.0 mA	
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	25 µA	32 µA	35 µA	30 µA	43 µA	40 µA	148 µA	2.3 mA	4.0 mA	6.0 mA	8 mA	

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดไทยฮิตาชิ

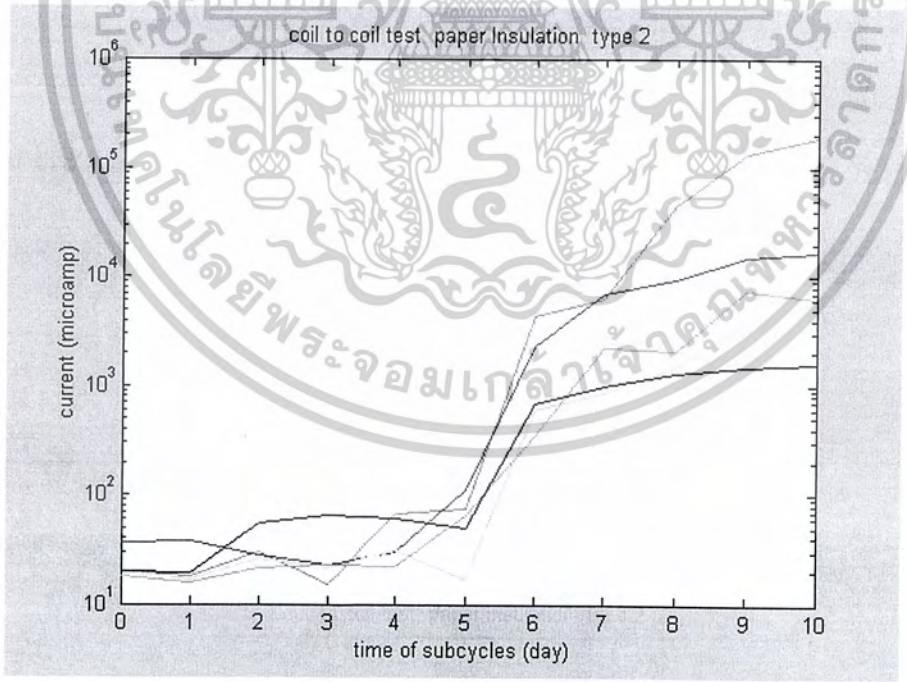
2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดบนกับขดล่างชนิดที่ 1

ตารางที่ 6-1 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

6.1.5 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดของแบบจำลองร่องสล๊อต



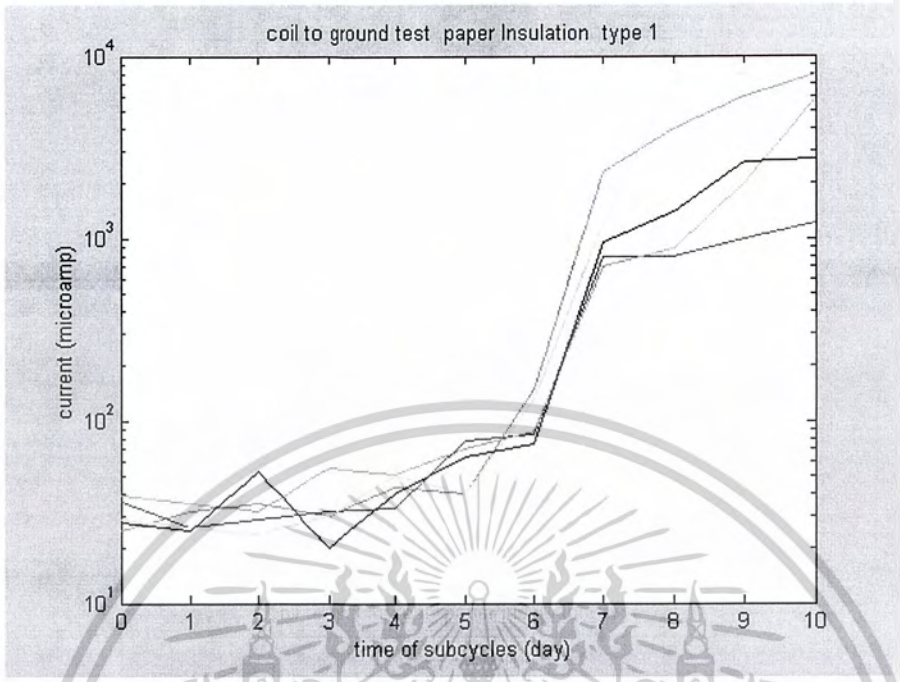
รูปที่ 6-10 ฉนวนชนิดที่ 1



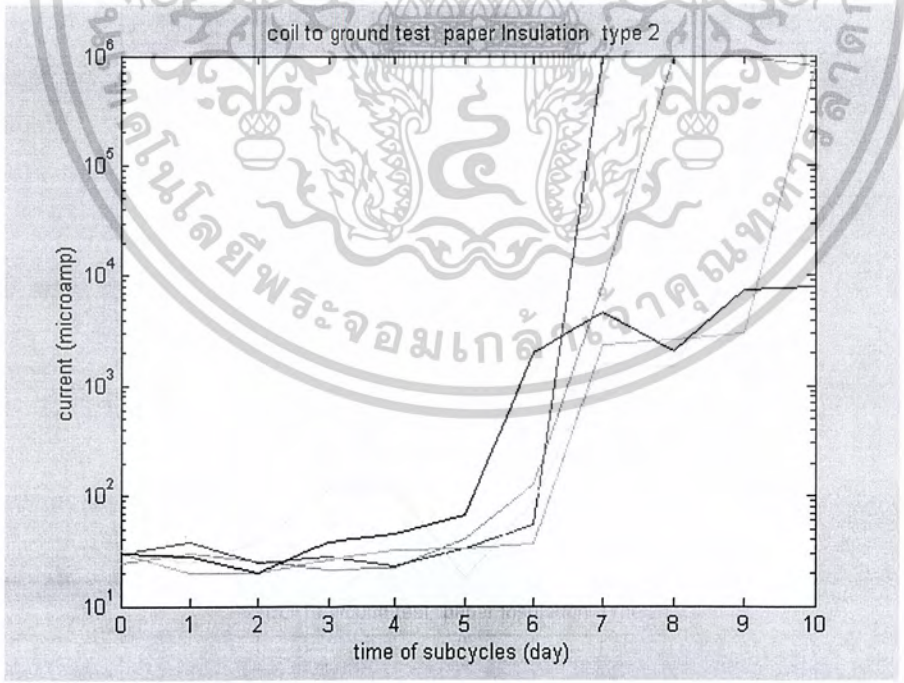
รูปที่ 6-11 ฉนวนชนิดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.6 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ของแบบจำลองร่องสล๊อต



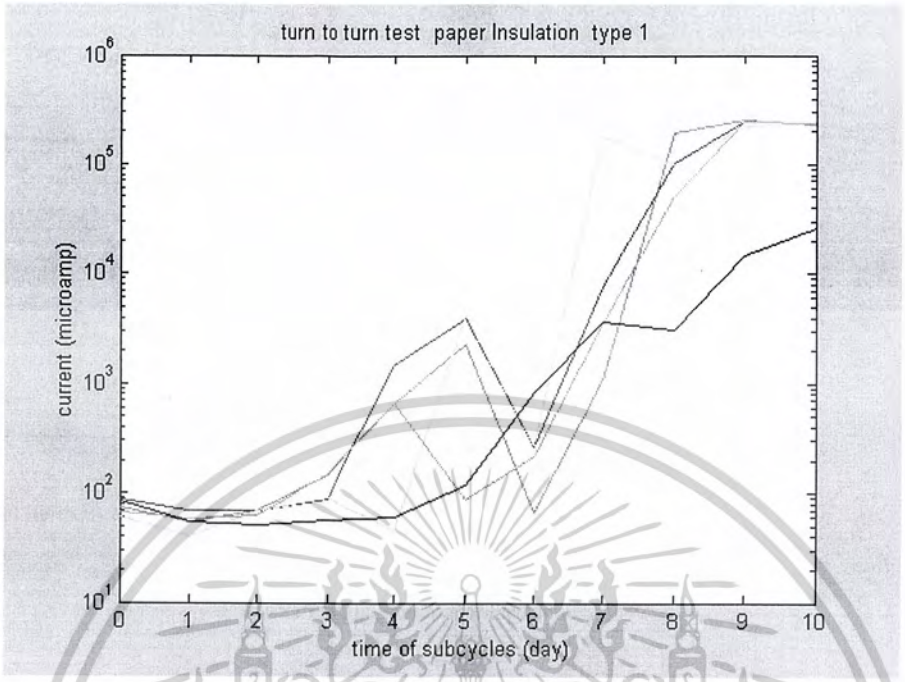
รูปที่ 6-12 ฉนวนชนิดที่ 1



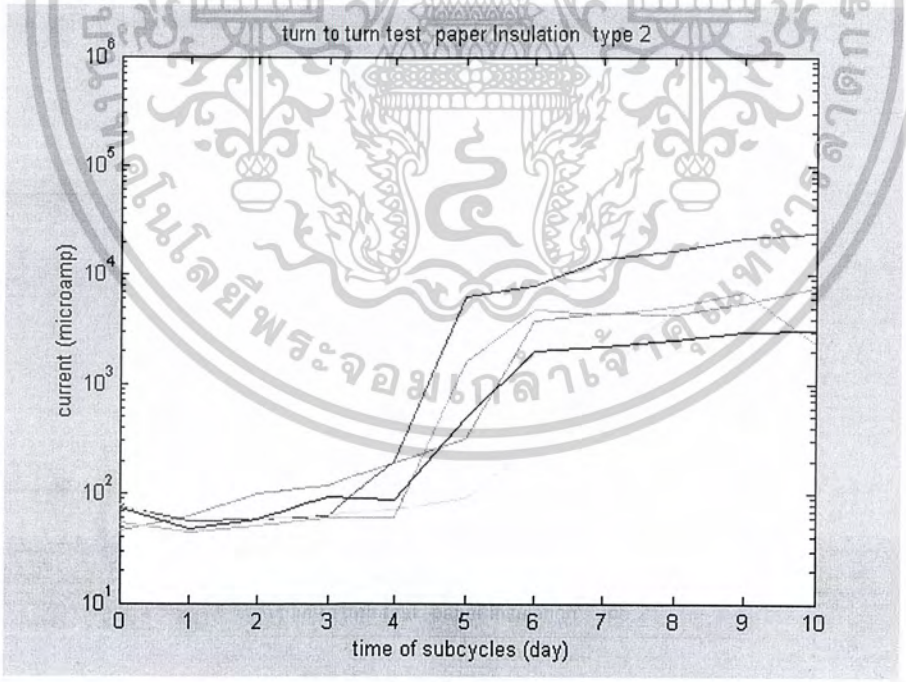
รูปที่ 6-13 ฉนวนชนิดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.7 ผลการทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดแบบจำลองร่องสล๊อต



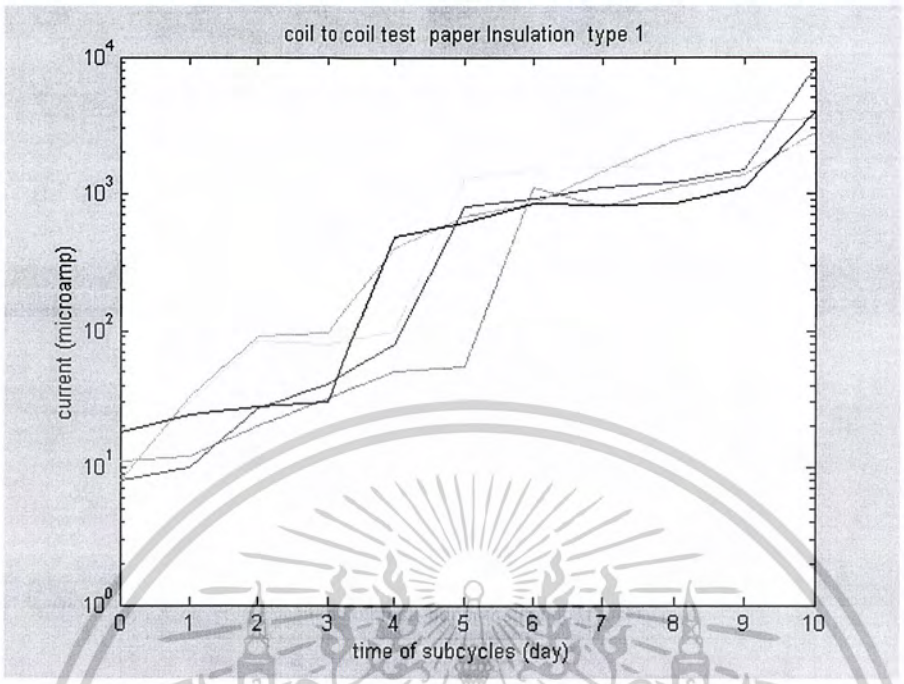
รูปที่ 6-14 ขดลวดอาบน้ำยาชนิดที่ 1



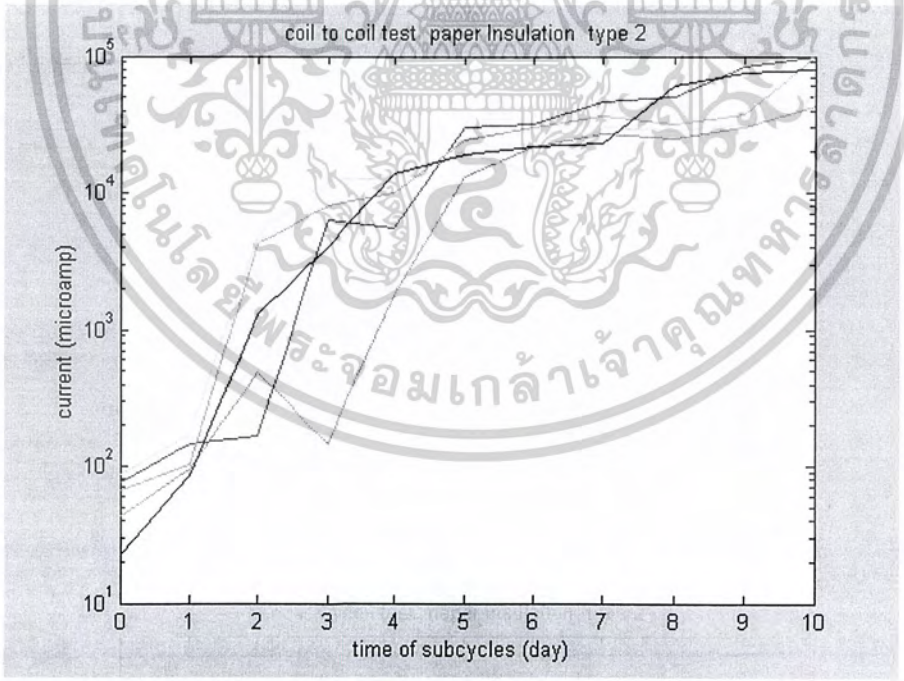
รูปที่ 6-15 ขดลวดอาบน้ำยาชนิดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.8 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดของบาร์ทองแดง



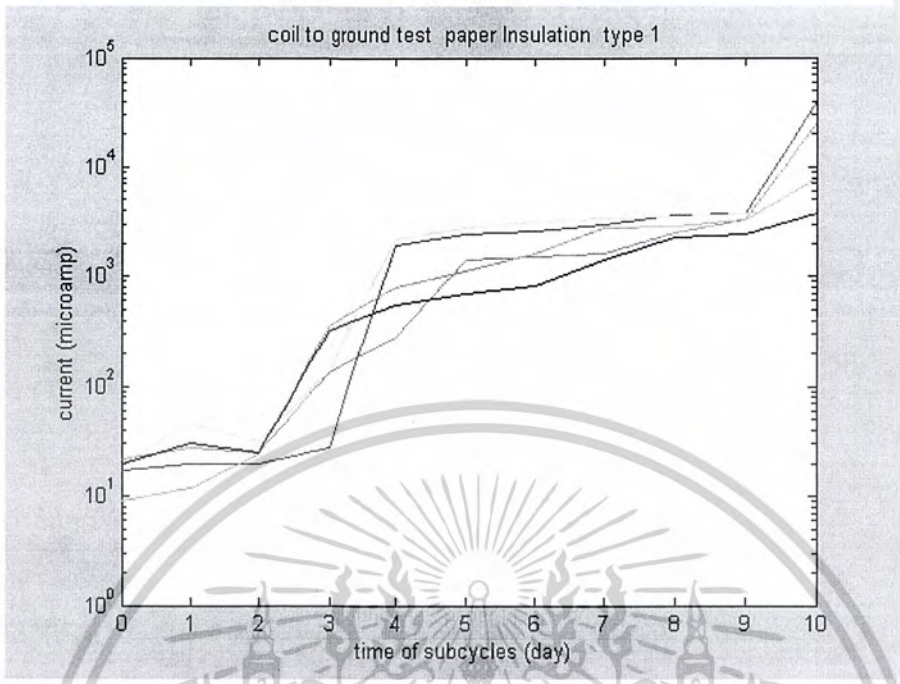
รูปที่ 6-16 ฉนวนชนิดที่ 1



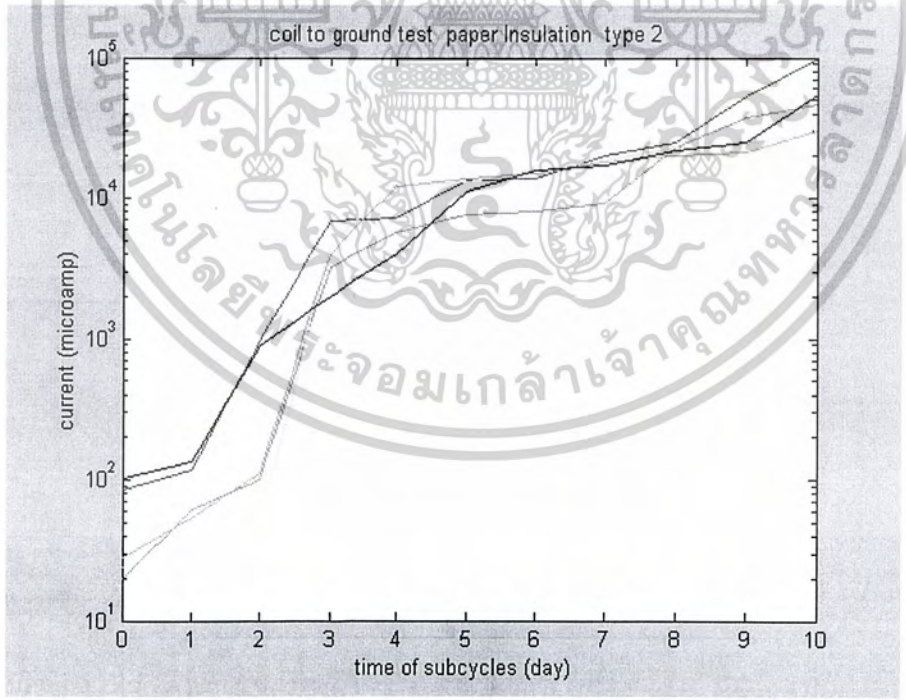
รูปที่ 6-17 ฉนวนชนิดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.9 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ของบาร์ทองแดง

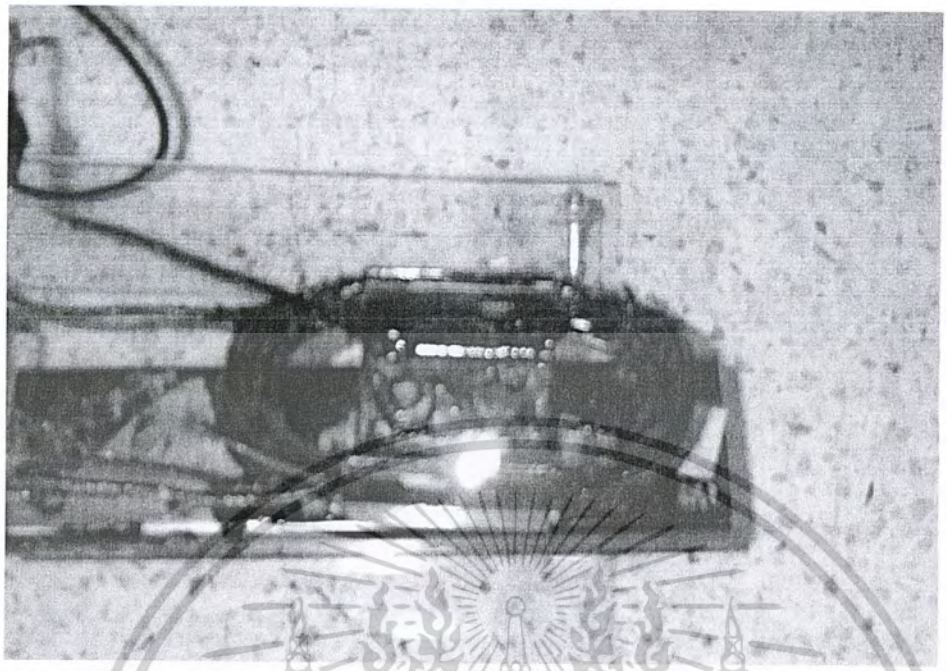


รูปที่ 6-18 ฉนวนชนิดที่ 1



รูปที่ 6-19 ฉนวนชนิดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-20 การเกิดเบรกดาวน์ระหว่างขดลวดกับกราวด์ของแบบจำลองร่องสล็อต

6.1.10 สรุปผลการทดลอง

การเร่งอายุฉนวนโดยความร้อน

จากกราฟผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ฉนวนชนิดที่ 1 จะอายุ 6 รอบย่อยการทดลอง แต่ฉนวนชนิดที่ 2 มีอายุแค่ 5 รอบย่อยการทดลอง นั้นหมายความว่าฉนวนชนิดที่ 1 มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าฉนวนชนิดที่ 2 ทั้งๆ ที่ฉนวนทั้ง 2 ระบุระดับชั้นความร้อนเดียวกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าการเร่งอายุฉนวนสามารถทำได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนและการทดสอบการดูดกลืนไดอิเล็กตริก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องเมกะโอห์มมิเตอร์ (Megger) 1 เครื่อง
2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส : 1 แรงม้า, 220/380 V, 50 Hz, 1,420 rpm, 3.5/2 A, 4 pole

จุดประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เพื่อทำการวัดค่าความต้านทานฉนวนของขดลวดที่ดีและขดลวดสกปรก
2. เพื่อทำการหาค่าโพลาไรเซชั่นอินเด็กซ์ (PI)ของฉนวน

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการป้อนแรงดัน ไปที่ขดลวดที่ฉนวนยังมีสภาพดี Class E อยู่โดยเครื่องเมกะโอห์มมิเตอร์ วัดค่าความต้านทานของขดลวดที่อ่านได้จากเครื่องเมกกะโอห์มมิเตอร์ ที่ 1 นาที และ 10 นาที ตามลำดับบันทึกผล
2. ทำการทดลองตามข้อที่ 1 แต่เปลี่ยนไปป้อนแรงดัน ไปที่ขดลวดที่ฉนวนเสื่อมสภาพมีการลัดวงจรลงกราวด์อยู่ บันทึกผล

ผลการทดลอง

ชนิดขดลวด	ค่าความต้านทานที่ 1 นาที MΩ	ค่าความต้านทานที่ 10 นาที MΩ
ขดลวดสภาพดี	258	276
ขดลวดลัดวงจรลงกราวด์	1.13	1.13

ตารางที่ 6-2 ค่าความต้านทานของขดลวดที่ 1 นาที และ 10 นาที

ค่าโพลาไรเซชั่นอินเด็กซ์(PI)ที่ได้

ขดลวดสภาพดี = ค่าความต้านทานที่ 10 นาที ÷ ค่าความต้านทานที่ 1 นาที

= 276/258 = 1.07

ขดลวดลัดวงจรลงกราวด์ = 1

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนพบว่าฉนวนที่มีสภาพดีจะสามารถวัดค่าความต้านทานได้หลายเมกะโอห์มแต่ขดลวดเสื่อมสภาพหรือลัดวงจรลงกราวด์จะวัดค่าความต้านทานได้น้อย ซึ่งก็เป็นไปตามที่มาตรฐานกล่าวไว้

การหาค่าค่าโพลาไรเซชั่นอินเด็กซ์(PI) ยังได้ค่าต่ำกว่าที่มาตราฐานกำหนด ทั้งที่ใช้ฉนวนใหม่ในการทดสอบ อาจเป็นเพราะเครื่องเมกะโอห์มมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นคนละชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจรการทดลองแรงดันสูงกระแสตรง
2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส : 1 แรงม้า, 220/380 V, 50 Hz, 1,420 rpm, 3.5/2 A, 4 pole

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อหาจุดที่สภาพของฉนวนเกิดการอ่อนแอเทียบกับกราวด์
2. เพื่อทดสอบความคงทนไดอิเลคตริกของฉนวน

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดสอบกับขดลวดที่สภาพฉนวนยังดีอยู่ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5-8 โดยที่ขดลวดด้านหนึ่งปล่อยลอยไว้ต่อเฟรมลงกราวด์
2. ป้อนแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 95-1977 ขนาดแรงดัน 1.7 เท่าของแรงดันทดสอบกระแสสลับเพื่อบำรุงรักษา(การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับใช้แรงดัน 1.5 เท่า ของ V_L = (380 V)1.5×1.7×380=969V 1 นาที บันทึกค่าแรงดันและกระแสรั่ว(Leakage Current)
3. ทำการทดสอบกับขดลวดที่เสื่อมสภาพเทียบกราวด์ ตามขั้นตอนข้อ 1,2

ผลการทดลอง

ชนิดของขดลวด	แรงดัน (V)	กระแสรั่ว(μA)
ขดลวดสภาพดี	969	5
ขดลวดเสื่อมสภาพ	969	180

ตารางที่ 6-3 ผลการทดลองของการทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง

สรุปผลการทดลอง

การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง เพื่อทดสอบความคงทนไดอิเล็คตริกของฉนวนเทียบกับกราวด์ จากการทดสอบฉนวนสภาพดีพบว่ามีกระแสไหลผ่านลงกรอบ(Frame)เพียงเล็กน้อยแต่ถ้าทดสอบกับฉนวนเสื่อมสภาพพบว่ามีกระแสไหลผ่านลงกรอบ(Frame) มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจรการทดลองแรงดันสูงกระแสสลับ
2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส : 1 แรงม้า, 220/380V, 50 Hz, 1,420 rpm, 3.5/2 A, 4 pole

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อทดสอบสภาพฉนวนเมื่อเกิดแรงดันสูงกระแสสลับชั่วขณะหนึ่ง

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5-8 โดยปล่อยขดลวดด้านหนึ่งลอยไว้แล้วต่อเฟรมลงกราวด์ทำการป้อนแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977 แรงดันทดสอบเท่ากับ 1.5 เท่าของ V_L เท่ากับ 570 V ทำการทดสอบเป็นเวลา 1 นาที เพื่อเป็นการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา บันทึกค่าแรงดันและกระแสรั่ว (Leakage Current)
2. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.8 โดยปล่อยขดลวดด้านหนึ่งลอยไว้แล้วต่อเฟรมต่อลงกราวด์ทำการป้อนแรงดันทดสอบมาตรฐาน NEMA MGI ขนาด 2E+ 1kV (E คือ แรงดันไลน์ของมอเตอร์ เท่ากับ 380 V) เท่ากับ 1760 V ทำการทดสอบเป็นเวลา 1 นาที เพื่อเป็นการทดสอบเพื่อการยอมรับ บันทึกค่าแรงดันและกระแส (Leakage Current)

ชนิดของขดลวด	แรงดัน (V)	กระแสรั่ว (mA)
ขดลวดสภาพดี	570	0
	1760	0
ขดลวดเสื่อมสภาพ	570	0
	1044	90

ตารางที่ 6-4 ผลการทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ

สรุปผลการทดลอง

การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ เป็นการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกราวด์ อาจจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนทำให้มีกระแสไหลลงกรอบ(Frame)สามารถเห็นได้จากกระแสรั่ว(leakage current) ที่แอมป์มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 การทดสอบโดยวิธีแรงดันอิมพัลส์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยอุปกรณ์โซลิดสเตท 1 ชุด
2. สตอเรจสโคป (Storage Scope) 1 เครื่อง
3. โพรบแรงสูง 1,000 : 1 ชุด
4. หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน 1 เฟส : 10 A, 0-260 V 1 ตัว
5. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส : 1 แรงม้า, 220/380V, 50 Hz, 1,420 rpm, 3.5/2 A, 4 pole
6. เครื่องวัด R, L, C 1 เครื่อง

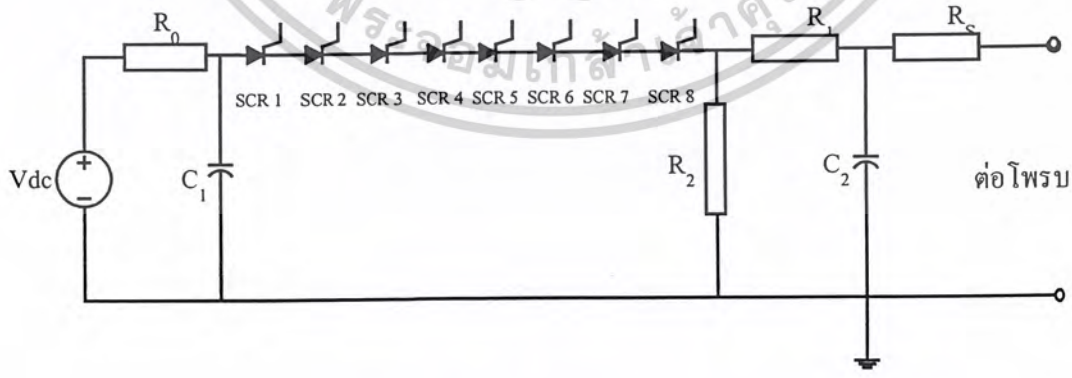
6.5.1 การทดสอบลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ด้วยอุปกรณ์โซลิดสเตท
2. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรทริกเอสซีอาร์ และหาความกว้างของสัญญาณทริกที่เหมาะสม

ขั้นตอนการทดลอง

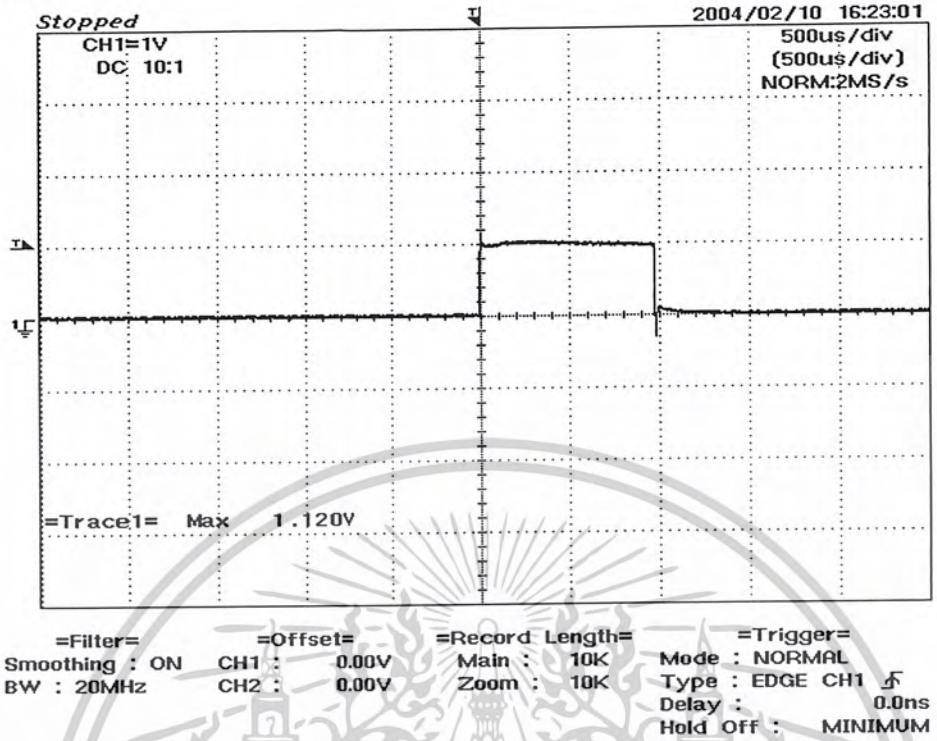
1. ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 6-21 โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ แล้วใช้โพรบ 1,000 : 1 จับที่จุด 1 เทียบกับกราวด์ดังรูป
2. ปรับแรงดันอินพุทให้ได้แรงดันอิมพัลส์เป็น 1,500 โวลต์ แล้วบันทึกรูปสัญญาณไว้
3. ปรับพารามิเตอร์ในวงจรเพื่อให้ได้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ใกล้เคียงมาตรฐานมากที่สุด แล้วทำการปรับระดับแรงดันอินพุท ให้ได้ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับ 3,000, 4,000, 5,000 และ 6,000 โวลต์
4. สังเกตลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากสตอเรจสโคป แล้วบันทึกรูปคลื่นแรงดัน อิมพัลส์



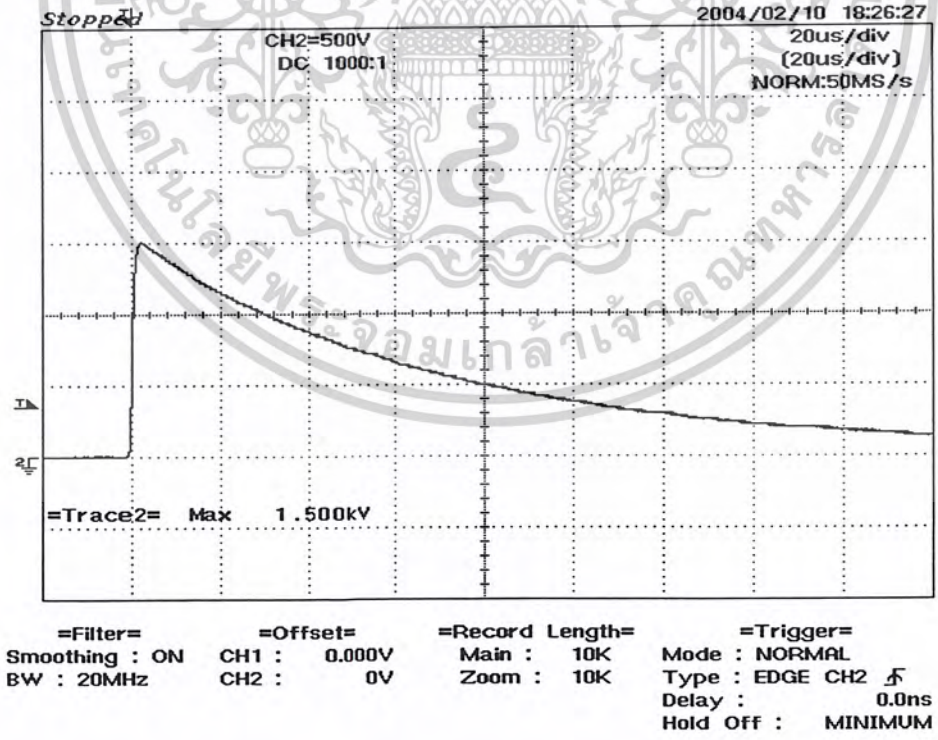
รูปที่ 6.21 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

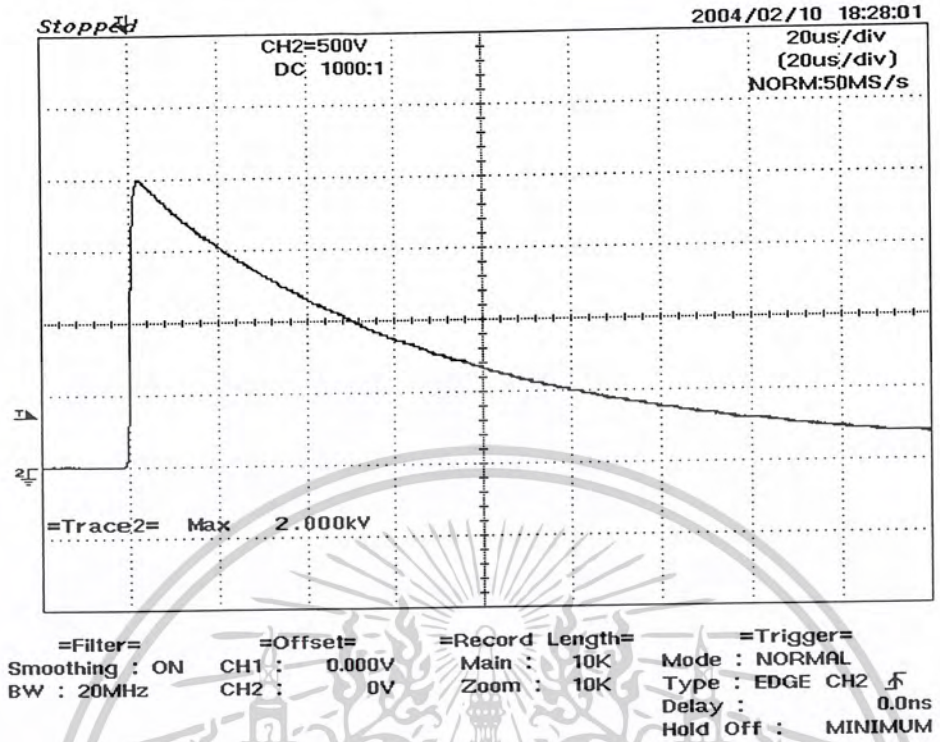


รูปที่ 6.22 สัญญาณทริกเอสซีอาร์

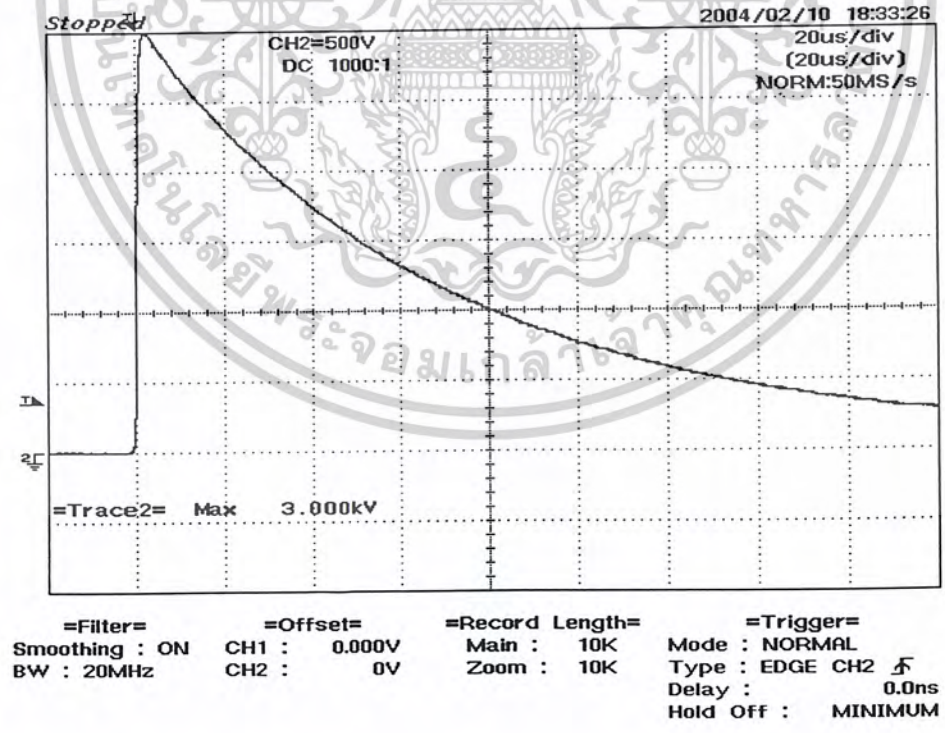


รูปที่ 6.23 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 1500 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

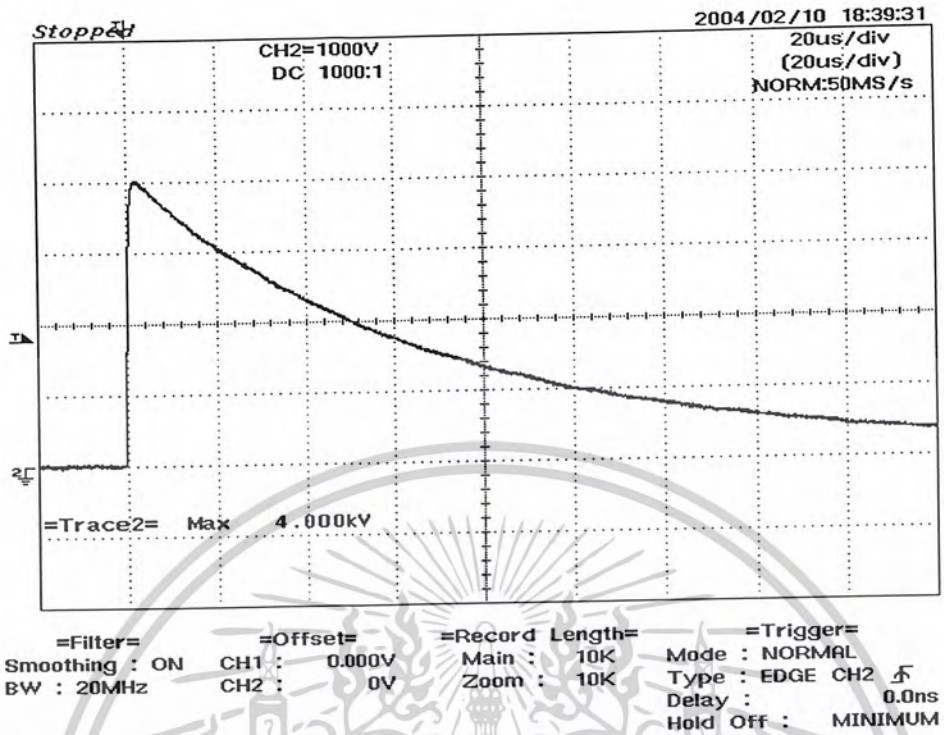


รูปที่ 6.24 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 2000 V

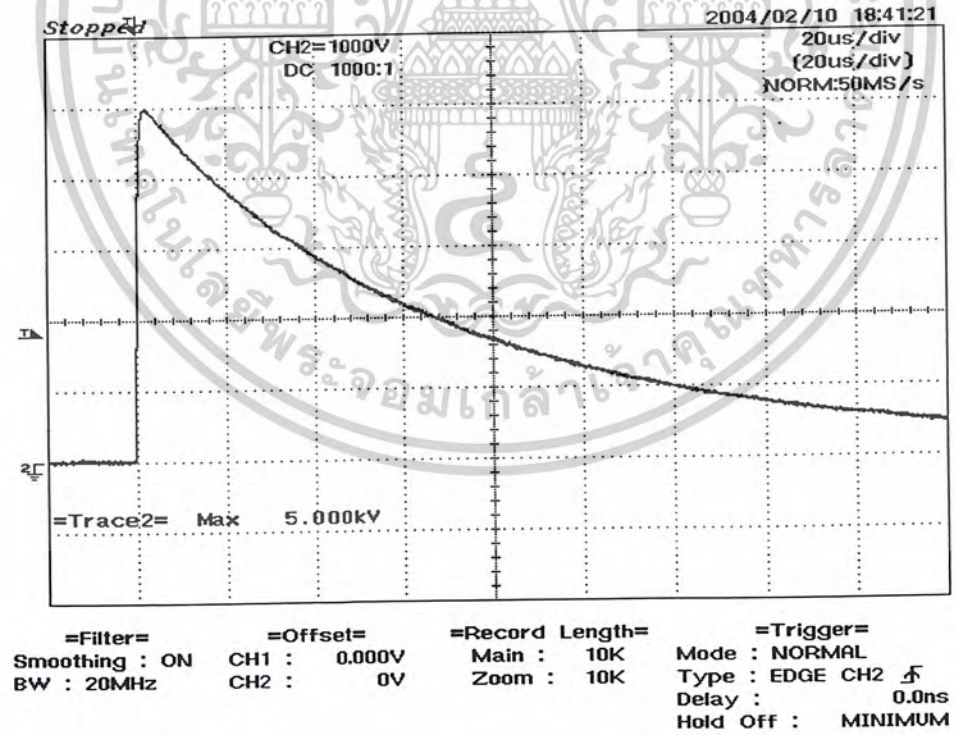


รูปที่ 6.25 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 3000V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

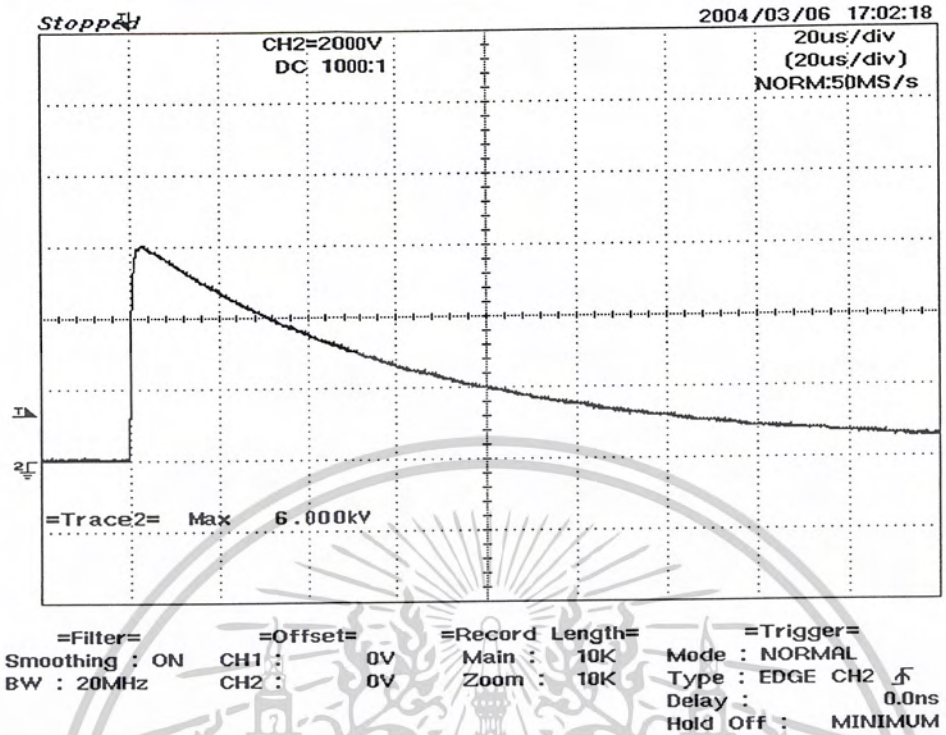


รูปที่ 6.26 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 4000 V



รูปที่ 6.27 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 5000 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.28 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 6000 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

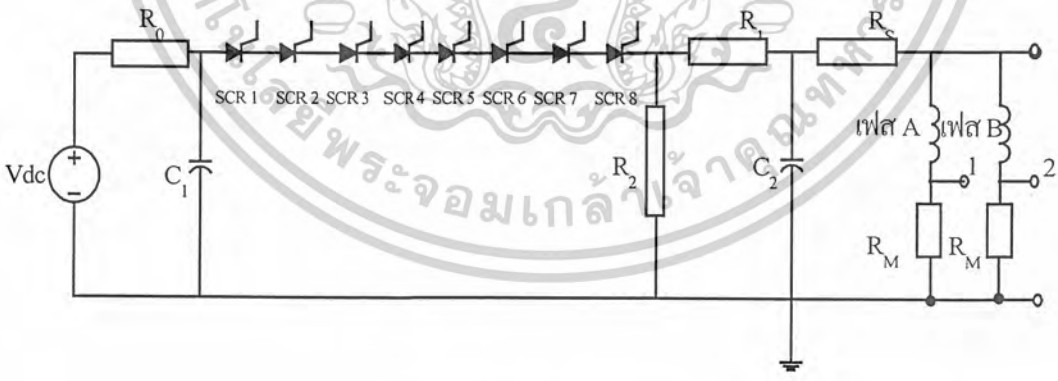
6.5.2 การทดสอบการเกิดลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาลักษณะของรูปคลื่นเมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด
2. เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดกับเฟรม

ขั้นตอนการทดลอง

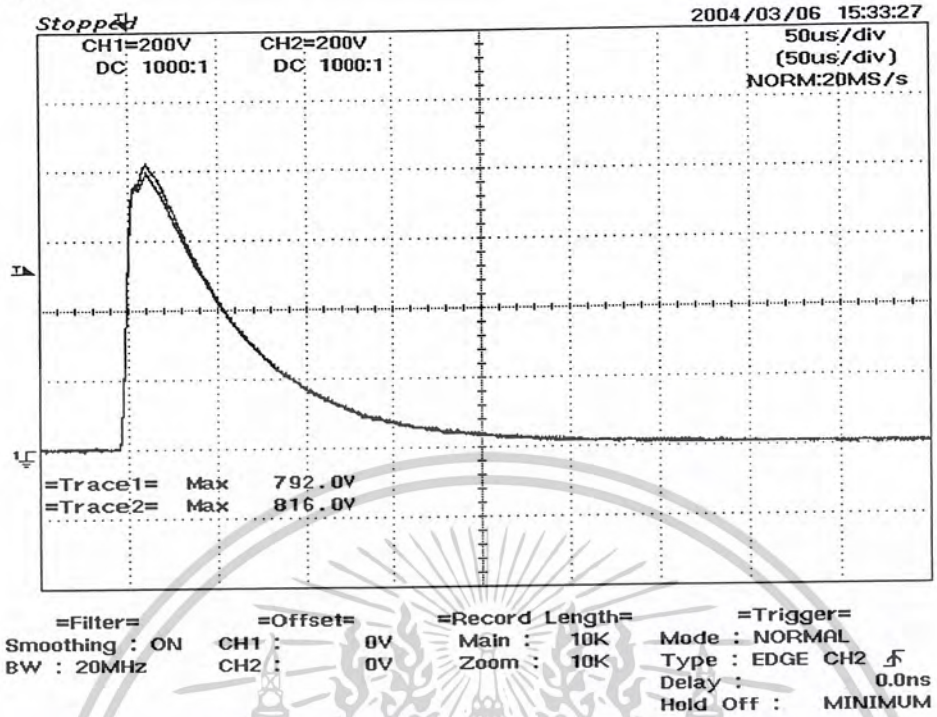
1. ต่อวงจรตามรูปที่ 6-29 และต่อขดลวดทดสอบทั้ง 2 ขด อนุกรมกับความต้านทาน R_M 1,500 โอห์ม โดยขดที่ไม่ได้ทำการทดสอบให้ต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วต่อลงกราวด์พร้อมทั้งต่อเฟรมลงกราวด์ด้วย
2. เตรียมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยขดลวดเฟส A และ B ยังมีสภาพฉนวนที่ดีอยู่ ส่วนขดลวดเฟส C ได้ทำการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดไว้
3. ป้อนแรงดันอิมพัลส์ทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 552-1992 (R1977) ซึ่งกำหนดแรงดันทดสอบไว้ที่ $5(\sqrt{2}/\sqrt{3})$VL มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบมีพิกัด V_L เท่ากับ 380 โวลต์ ดังนั้นแรงดันที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 1,500 โวลต์ เข้าสู่ขดลวดเฟส A และ B พร้อมกัน สังเกตลักษณะรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละขดเทียบกันโดย CH1 วัดแรงดันคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และ CH2 วัดแรงดันคร่อม เฟส B และค่าความต้านทาน R_M
4. เปลี่ยนขดลวดทดสอบจากเฟส A เป็นเฟส C ป้อนแรงดันทดสอบเข้าสู่ขดลวดทั้ง 2 เฟสทั้ง 2 พร้อมกัน สังเกตลักษณะรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละขดเทียบกัน โดย CH1 วัดแรงดันคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และ CH2 วัดแรงดันคร่อม เฟส C และค่าความต้านทาน R_M



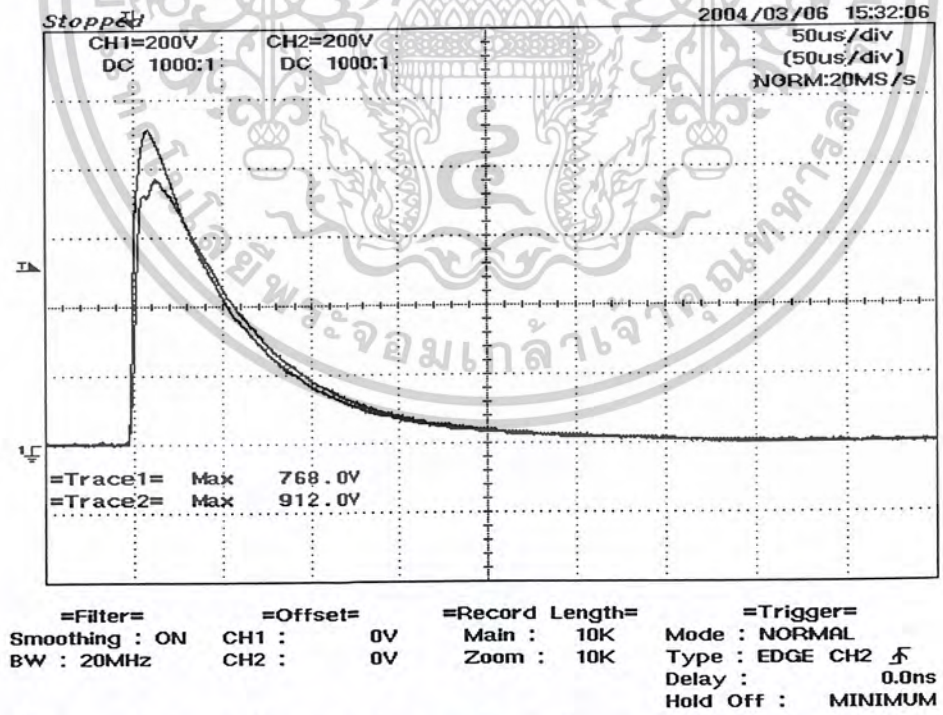
รูปที่ 6.29 วงจรการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง



รูปที่ 6.30 แรงดันอิมพัลส์วัดคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และแรงดันคร่อม เฟส B และค่าความต้านทาน R_M ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่



รูปที่ 6.31 แรงดันอิมพัลส์วัดคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และแรงดันคร่อม เฟส C และค่าความต้านทาน R_M ซึ่ง เฟส A สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ ส่วน เฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบการเกิดลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์ จะได้ว่าจากการเปรียบเทียบระหว่างขดลวด 2 ขดซึ่งสภาพฉนวนยังดีอยู่ เมื่อวัดแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานแมชชิ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกันหรือทับกันสนิท ส่วนในกรณีที่ขดลวดใดขดลวดหนึ่งเกิดลัดวงจรระหว่างรอบลักษณะรูปคลื่นที่วัดได้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแตกต่างและทับกันไม่สนิท โดยขดที่เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบจะมีค่ายอดแรงดันที่สูงดันที่สูงกว่า แสดงว่ากระแสที่ไหลผ่านสูงกว่าด้วยอันเป็นผลมาจากการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดทำให้จำนวนรอบลดลง ส่งผลให้มีค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดลดลงด้วยและหากจำนวนรอบของการลัดวงจรเพิ่มขึ้นก็จะทำให้กระแสไหลผ่านขดลวดมีค่ามากขึ้น และสามารถสังเกตความแตกต่างของรูปคลื่นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

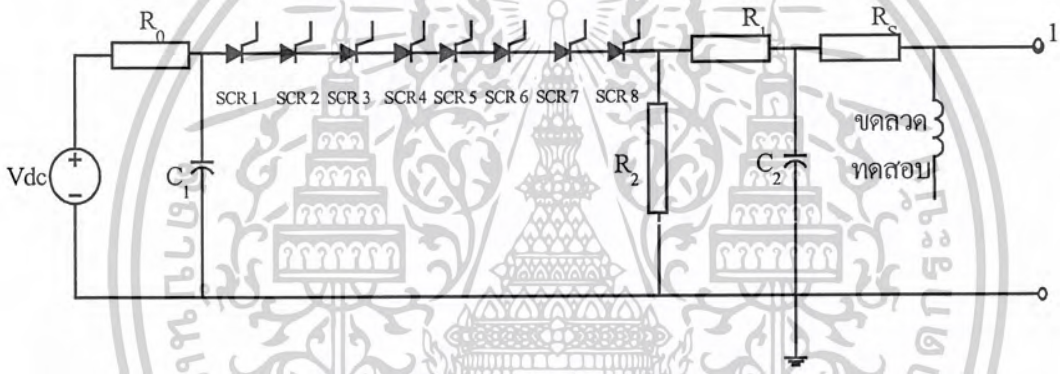
6.5.3 การทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์

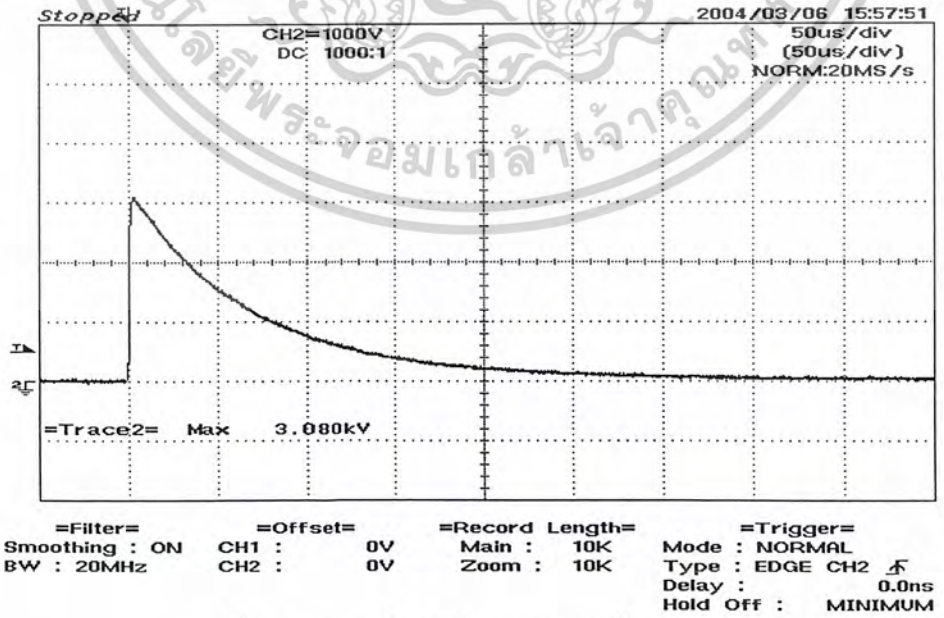
ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับแรงดันอินพุทให้ได้แรงอมพัลส์ทดสอบมาตรฐาน IEEE std 141-1986 ซึ่งกำหนดแรงดันทดสอบไว้ที่ $1.25\sqrt{2}(2V_L + 1,000)$ โวลต์ มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบมีพิกัด V_L เท่ากับ 380 โวลต์ ดังนั้น แรงดันที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 3,111 โวลต์ (ในขณะยังไม่ต่อขดลวดทดสอบ)
2. ต่อวงจรตามรูปที่ 6-32 โดยต่อต้นขดลวดทดสอบเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ส่วนปลายขดลวดปล่อยลอยไว้ ส่วนขดอื่นที่ไม่ได้ทดสอบปล่อยลอยไว้ และต่อเฟรมลงกราวด์แล้วสังเกตลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้โดยวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่จุด 1 เทียบกับกราวด์



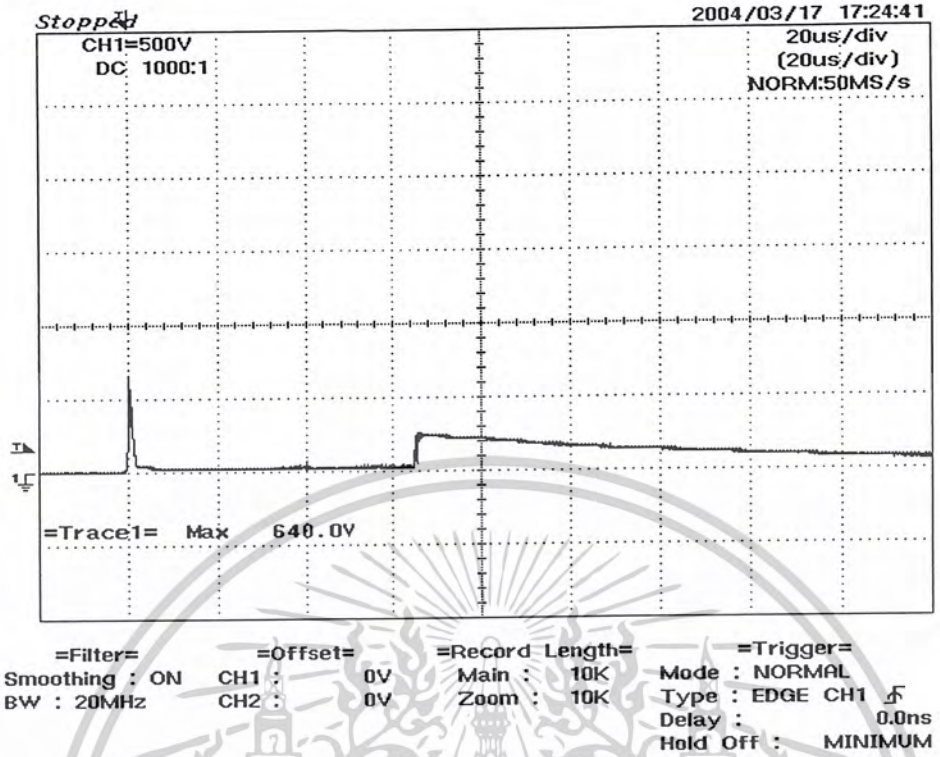
รูปที่ 6.32 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

ผลการทดลอง

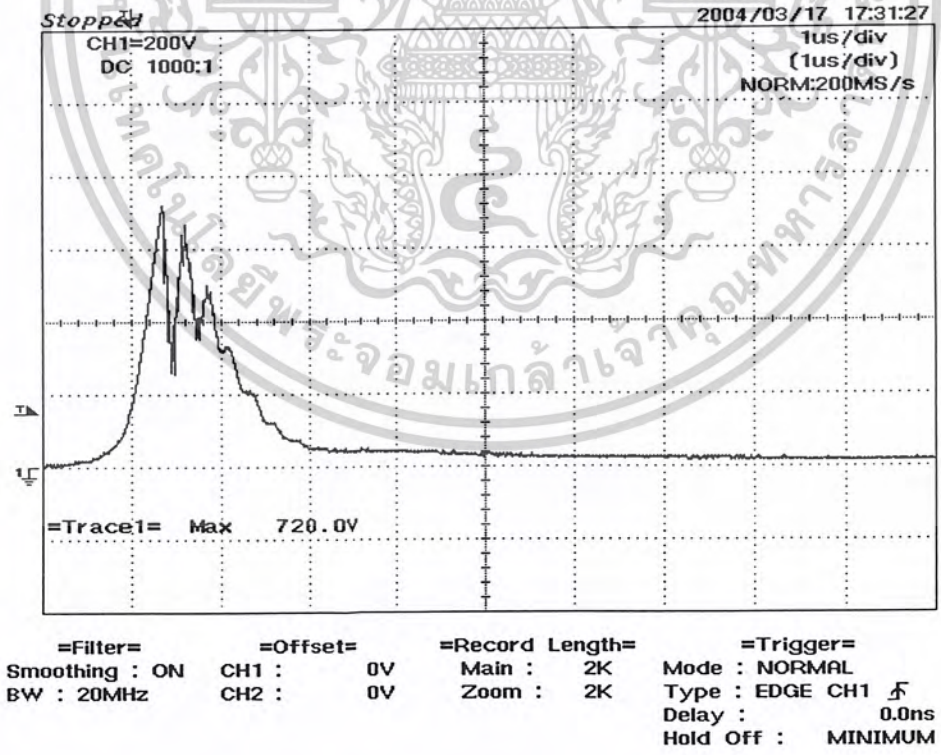


รูปที่ 6-33 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบขณะที่ขดลวดยังดีอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

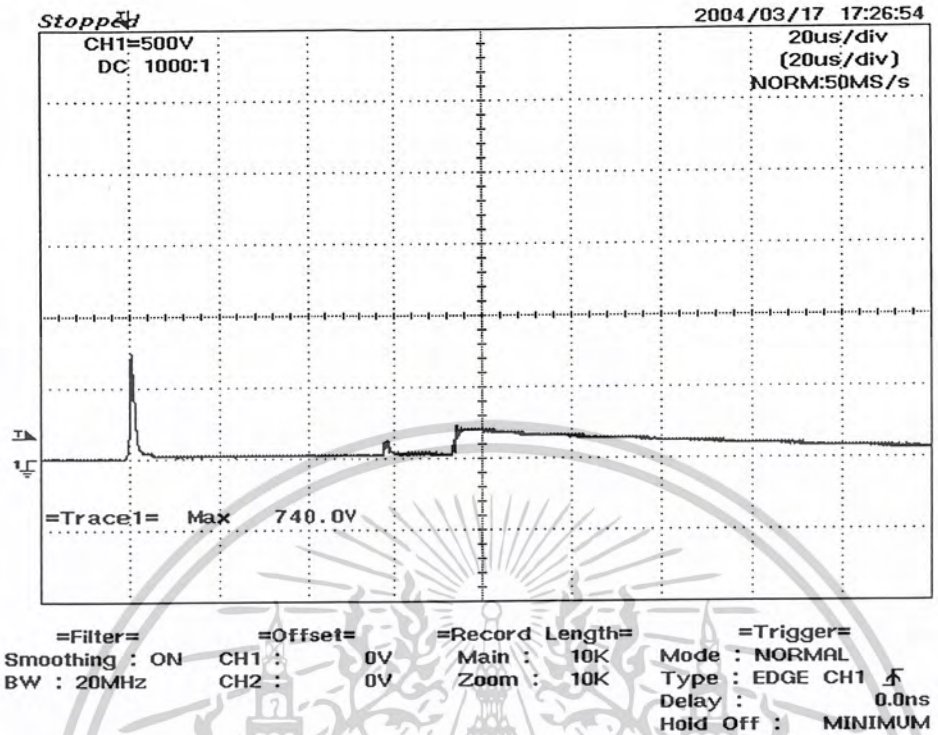


รูปที่ 6-34 ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ ใกล้กับต้นขดทดสอบ

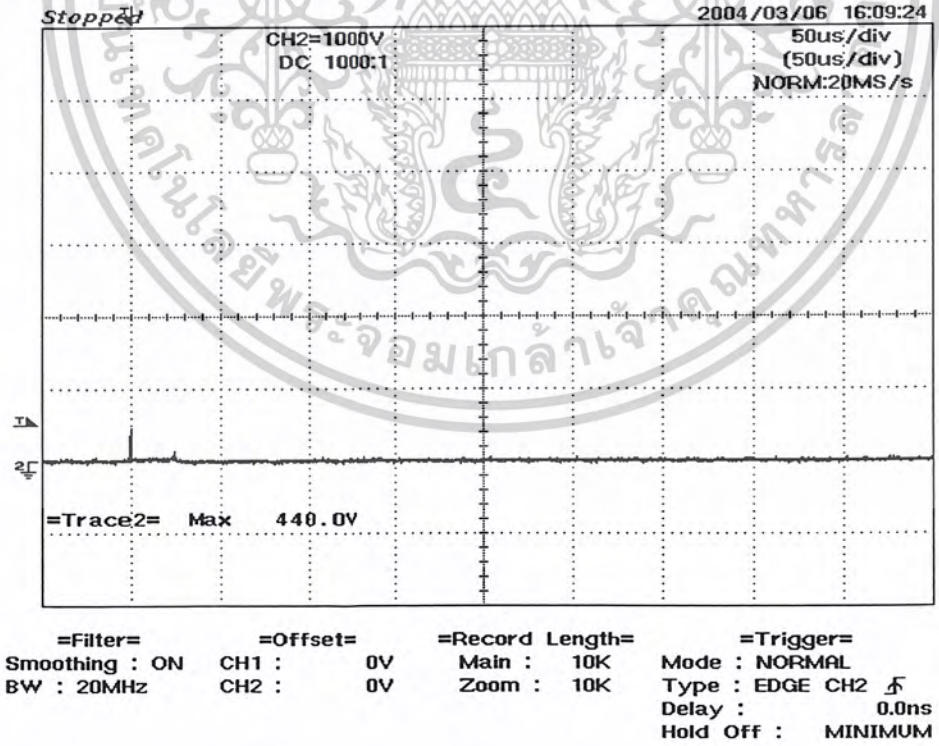


รูปที่ 6-35 แสดงภาพขยายช่วงหัวคลื่น ขณะขดลวดทดสอบเบรคดาวน์ลงกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

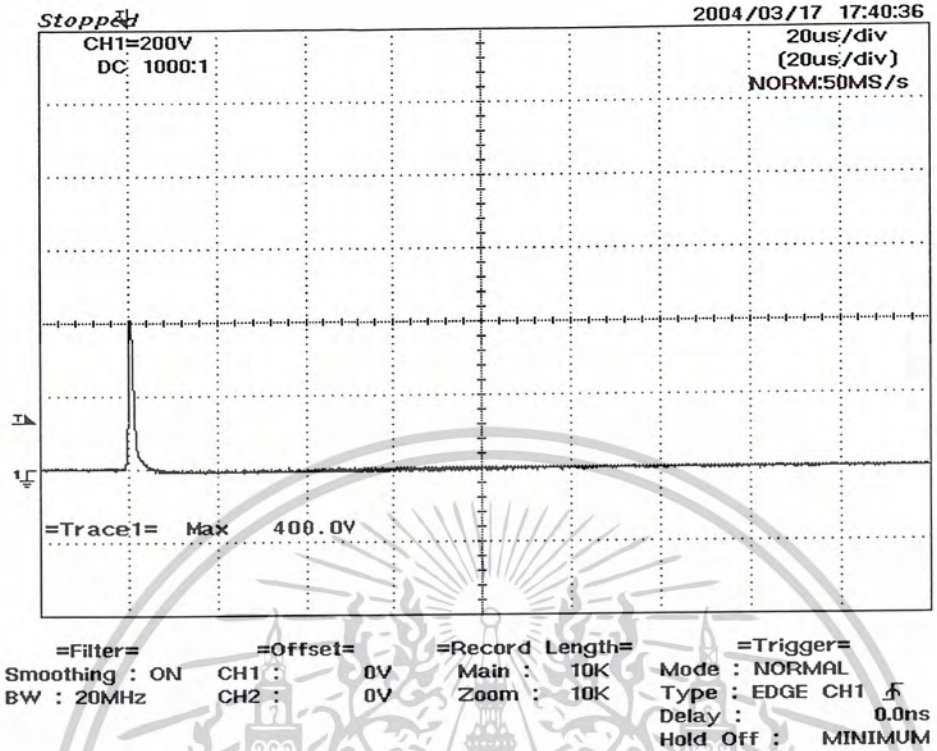


รูปที่ 6-36 ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ ไกลจากต้นขดทดสอบ



รูปที่ 6-37 ขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ใกล้กับต้นขดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-38 ขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ใกล้กับต้นขดทดสอบ

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกราวด์ จะเห็นว่าหากฉนวนขดลวดเทียบกราวด์มีสภาพดีอยู่ รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้ยังมีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์อยู่แต่ถ้าสภาพฉนวนเทียบกราวด์มีความอ่อนแอจนเกิดการเบรกดาวน์หรือมีการลัดวงจรลงกราวด์ รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้จะไม่มีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์และอาจเกิดการออสซิเลชั่นขึ้น โดยรูปคลื่นแรงดันที่วัดได้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรลงกราวด์ ยิ่งตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรลงกราวด์ใกล้กับต้นขดมากเท่าไร ก็จะทำให้เกิดการออสซิเลชั่นมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

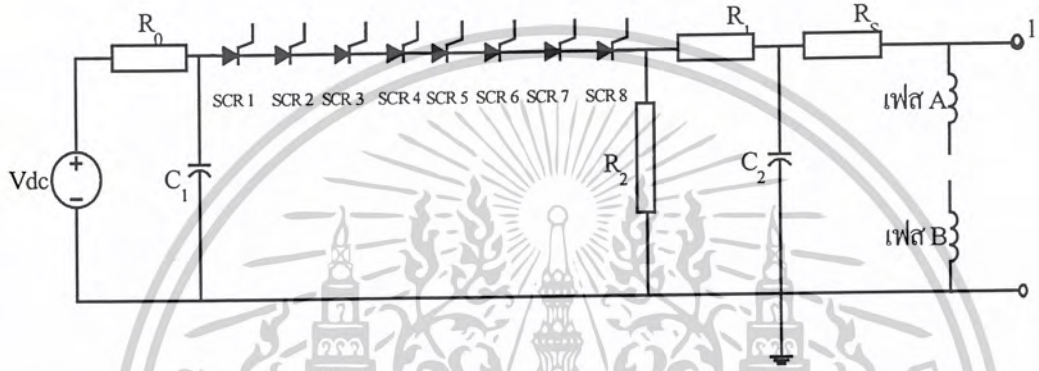
6.5.4 การทดสอบสภาพฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนระหว่างเฟสกับเฟสของมอเตอร์

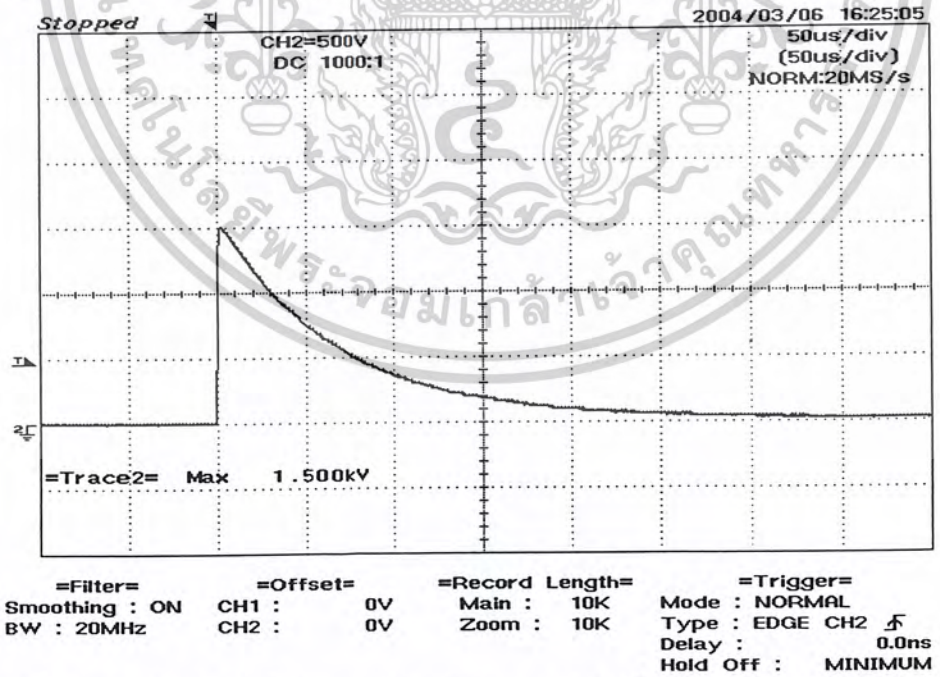
ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 6-39 โดยต่อต้นขดลวดทดสอบเฟส A เข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ส่วนปลายของขดลวดปล่อยลอยไว้ และต่อขดลวดทดสอบเฟส B ลงกราวด์
2. ป้อนแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 1,500 โวลต์ (ในขณะไม่ต่อกับขดลวดทดสอบ) แล้วสังเกตลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้โดยวัดรูปคลื่นแรงดันที่จุด 1 เทียบกับกราวด์



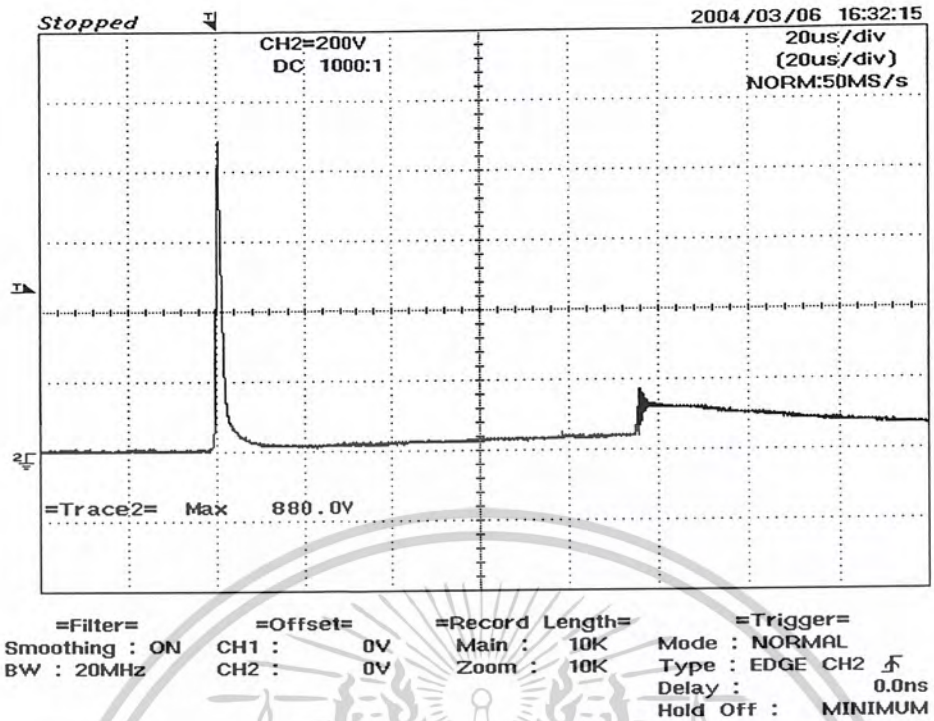
รูปที่ 6-39 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

ผลการทดลอง

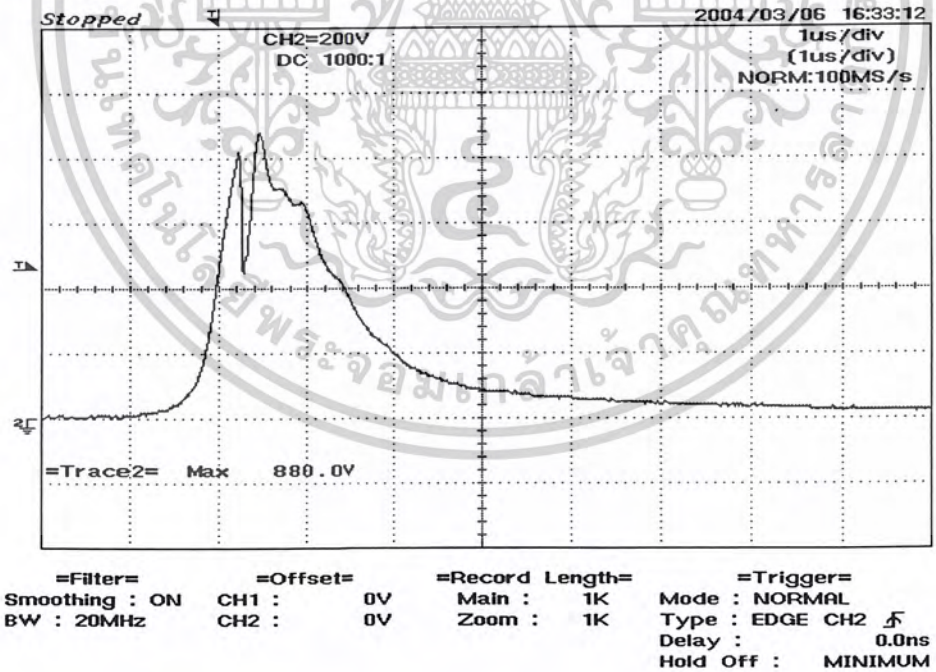


รูปที่ 6-40 แรงดันอิมพัลส์คร่อมระหว่าง เฟส A และ เฟส B ซึ่งขดลวดทดสอบยังมีสภาพดีอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

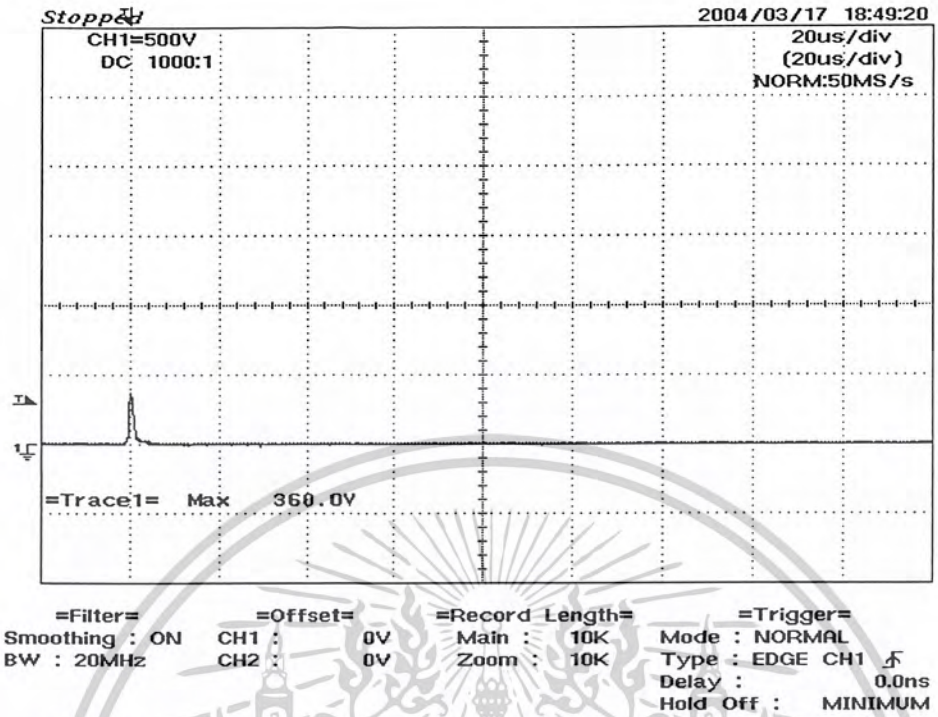


รูปที่ 6-41 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการเบรคดาวน์ระหว่างเฟสของขดลวด

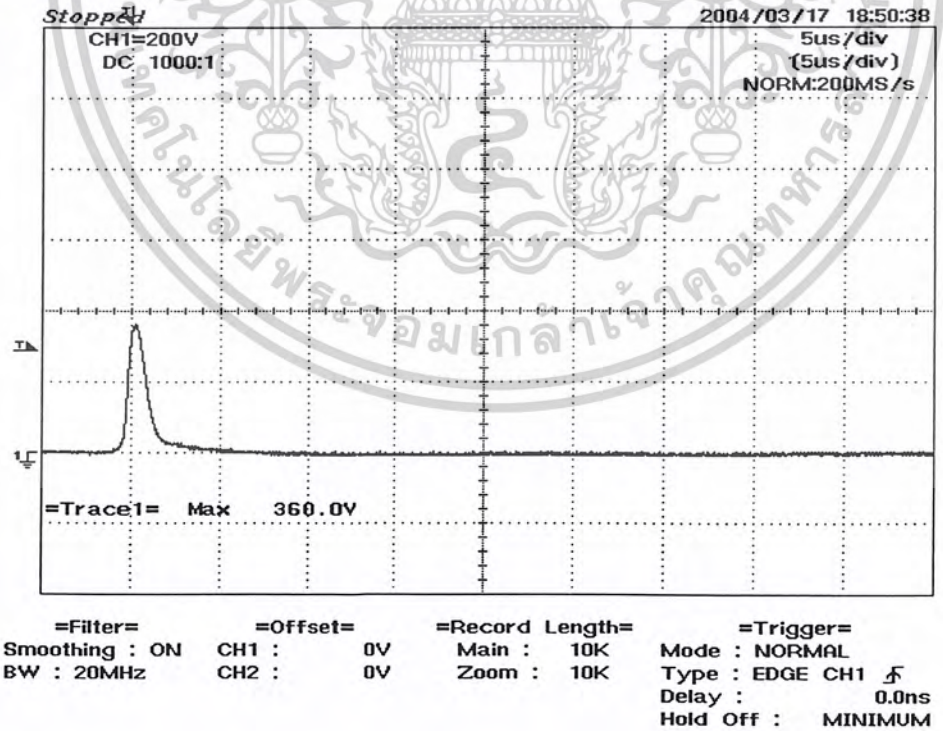


รูปที่ 6-42 ขยายกราฟรูปที่ 6-41 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการเบรคดาวน์ระหว่างเฟสของขดลวด บริเวณหัวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

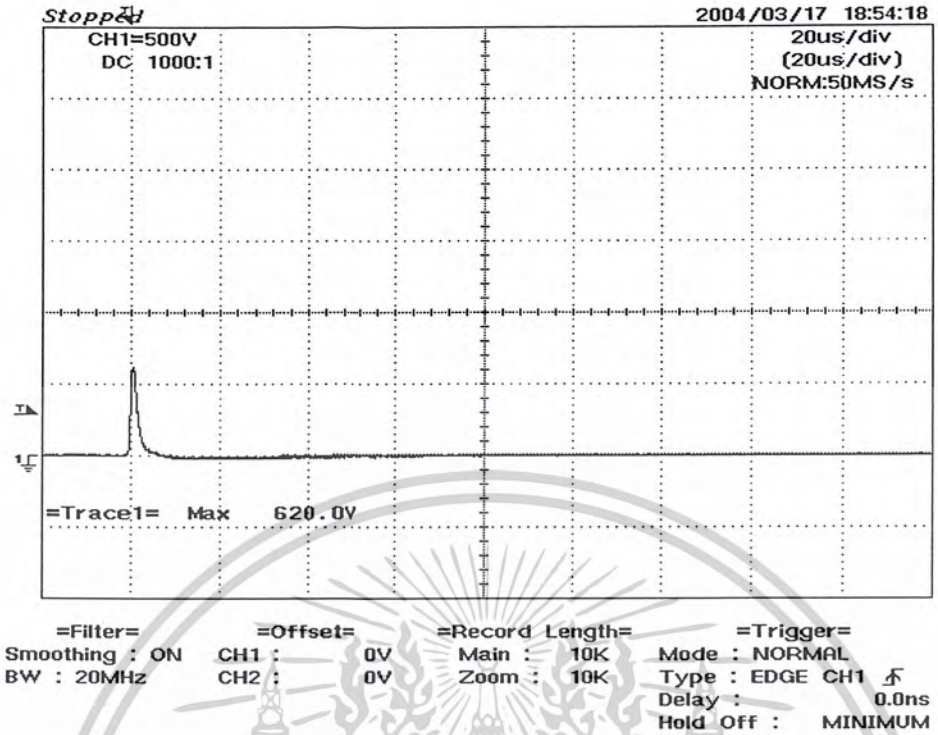


รูปที่ 6-43 ขดลวดเฟส A และเฟส B เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสของขดลวดใกล้กับต้นขดทดสอบ



รูปที่ 6-44 ขยายกราฟรูปที่ 6-43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-45 ขดลวดเฟส A และเฟส B เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสของขดลวดไกลจากต้นขดทดสอบ

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบสภาพฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส จะเห็นว่าหากฉนวนขดลวดระหว่างเฟสกับเฟสยังมีสภาพดีอยู่รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้ยังมีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์อยู่ แต่ถ้าสภาพฉนวนขดลวดระหว่างเฟสกับเฟสมีความบกพร่อง รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้จะมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นฉนวนลัดวงจรลงกราวด์ คือจะไม่มีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์และอาจเกิดการออสซิเลชั่นขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปและวิจารณ์การทดสอบ

จากการทดสอบที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองของวัตถุทดสอบสามารถแสดงการเกิดการเสียหายเนื่องมาจากกระบวนการการเร่งโดยความร้อนและการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยได้ โดยที่อุปกรณ์การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยนั้นไม่ได้แสดงให้เห็นว่าก่อให้เกิดการเสียหายแก่แบบจำลองของวัตถุทดสอบก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการทดสอบแต่อย่างใด และการลัดวงจรทางไฟฟ้าของวัตถุทดสอบที่เกิดขึ้นก็แสดงให้เห็นว่าบรรทัดฐานของการเกิดการเสียหายโดยการตรวจสอบด้วยความดันไฟฟ้านั้นสามารถเกิดขึ้นได้จริง

ในการออกแบบการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยควรเป็นการออกแบบเพื่อการตรวจสอบสภาพวัสดุฉนวนของระบบฉนวนตามหน้าที่ของวัสดุฉนวนนั้นโดยเฉพาะ เช่นในแบบจำลองร่องสล็อตจะเป็นการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งก็จะแบ่งการทดสอบเป็น 3 อย่างคือ การทดสอบระหว่างเส้นลวดในขดเดียวกันเพื่อที่จะตรวจสอบสภาพวัสดุฉนวนที่ทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างเส้นลวดหรือก็คือน้ำยาอาบขดลวดนั่นเอง ส่วนในระหว่างขดลวดกับขดลวดและระหว่างขดลวดกับกราวนด์ก็เป็นไปเพื่อตรวจสอบสภาพฉนวนคั่นระหว่างเฟส(Phase Insulation) ฉนวนคั่นช่องสล็อต(Slot Insulation) ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด ระหว่างเฟส และขดลวดกับช่องสล็อตตามลำดับ

ในการออกแบบวัตถุทดสอบนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงส่วนประกอบในการทำแบบจำลองร่องสล็อต เพราะมีผลต่อการทดสอบเป็นอย่างมาก เช่น ครั้งหนึ่งในการทดสอบ ได้ใช้ไม้ใส่เข้าไประหว่างร่องสล็อตกับฉนวน เพื่อให้ขดลวดแน่น เมื่อทำการทดสอบถึงรอบการให้ความชื้นส่งผลให้ไม้มีความชื้นมากกว่าส่วนอื่น เมื่อถึงรอบการทดสอบวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้า พบว่ามีกระแสรั่วไหลมากกว่าปกติ อันเนื่องมาจากความชื้นของไม้นั่นเอง

แม้วัสดุฉนวนบางชนิดซึ่งทางผู้ผลิตได้ระบุถึงระดับความร้อนของวัสดุฉนวนนั้นไว้ที่ค่าหนึ่ง แต่หลังจากที่เรานำมาทดสอบ โดยการเร่งอายุโดยความร้อนตามขนาดอุณหภูมิที่มาตรฐานได้กำหนดต่อระดับความร้อนของวัสดุฉนวนนั้น ปรากฏว่าวัสดุฉนวนหลายๆชนิดไม่สามารถนำเข้ามาใช้ในกระบวนการทดสอบได้เนื่องจากระดับความร้อนที่แท้จริงของวัสดุทดสอบนั้นอาจมีค่าต่ำกว่าที่ทางผู้ผลิตระบุไว้มาก ซึ่งจะเห็นได้จากการที่วัสดุฉนวนนั้นเกิดการปริแตกหักออกเป็นแผ่น หรือร่วนออกเป็นชิ้นๆหลังจากเข้าสู่รอบย่อยรอบแรกของการเร่งอายุรอบแรกเท่านั้น และเป็นที่น่าสังเกตอย่างหนึ่งว่า ค่ากระแสรั่วซึ่งอยู่ในขั้นตอนการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้าของวัตถุทดสอบก่อนการนำเข้าสู่รอบย่อยของการเร่งอายุโดยความร้อนเสียอีก ซึ่งนี่ก็แสดงให้เห็นว่าความร้อนก็สามารถเป็นส่วนหนึ่งของการเพิ่มสภาพความเป็นฉนวนของวัสดุฉนวนให้มีค่าความเป็นฉนวนมากขึ้นก็ได้ ซึ่งอาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า แม้ลักษณะความเป็นฉนวนของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ลักษณะทางกายภาพของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้าก็ยังจะมีค่าเสื่อมลงและลดค่าลงซึ่งอาจจะมีลักษณะเช่นนี้อีกในรอบการให้ความร้อนต่อไปหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจเป็นไปในทางที่ลักษณะความเป็นฉนวนของวัสดุทางไฟฟ้าจะมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงค่าเดิมแต่ลักษณะทางกายภาพของฉนวนทางไฟฟ้ามีค่าเสื่อมและลดค่าลงต่อไป

จากกราฟผลการทดสอบเมื่อนำขดลวดทดสอบชั้น F มาจาก 2 บริษัท พบว่าอายุการใช้งานของฉนวนชนิดที่ 1 นานกว่าฉนวนชนิดที่ 2 ทั้งๆที่ฉนวนชนิดที่ 2 ได้ระบุระดับชั้นของฉนวนชั้น F เหมือนกันแต่ผลิตคนละบริษัท ซึ่งก็เป็นดังที่คาดไว้ เพราะจากลักษณะทางกายภาพ ฉนวนชนิดที่ 1 มีความหนาและแข็งแรงกว่า ชนิดที่ 2 และเมื่อผ่านการเร่งอายุโดยความร้อนเพียงรอบแรกฉนวนชนิดที่ 2 จะหดตัวอย่างเห็นได้ชัด

จากการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จ สามารถตรวจหาการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดได้ โดยในการทดสอบต้องอาศัยขดลวดที่มีสภาพของฉนวนสมบูรณ์เป็นขดมาตรฐานของการทดสอบ แต่ในวิธีการทดสอบนี้ก็มีข้อจำกัดคือ จะตรวจหาความบกพร่องไม่พบในกรณีที่ขดลวดทดสอบมีสภาพฉนวนอ่อนแอแต่ยังไม่ถึงขั้นที่เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนหรือในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบแต่จำนวนรอบน้อยมากทำให้บางครั้งไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างรูปคลื่นของขดทดสอบกับขดมาตรฐานได้ และนอกจากนี้แรงดันเสิร์จยังสามารถนำไปตรวจสอบสภาพของฉนวนเทียบกับกราวด์และสภาพฉนวนระหว่างเฟสกับเฟสได้ โดยทำการทดสอบกับขดลวดทดสอบเพียงขดเดียวก็สามารถระบุได้ว่าเกิดความบกพร่องของฉนวนได้

แนวทางในการพัฒนาต่อ คือ การนำค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าระดับชั้นของฉนวนและทำนายอายุการใช้งานของฉนวน รวมถึงการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ เช่น เครื่องสั่นให้มีขนาดใหญ่ขึ้น อุปกรณ์ทดสอบทางความชื้นยังมีขนาดเล็กและเกิดหยดน้ำขึ้นที่ฝาปิดด้านบน ทำให้น้ำหยดลงวัตถุทดสอบ ส่งผลให้การทดสอบวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้าเกิดความคลาดเคลื่อนได้ อุปกรณ์ทดสอบอีกชุดหนึ่งที่ต้องพัฒนาคือ เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง,กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ยังมีขนาดพิกัดต่ำ ทำให้ไม่สามารถทดสอบกับวัตถุทดสอบที่ทนพิกัดได้สูง

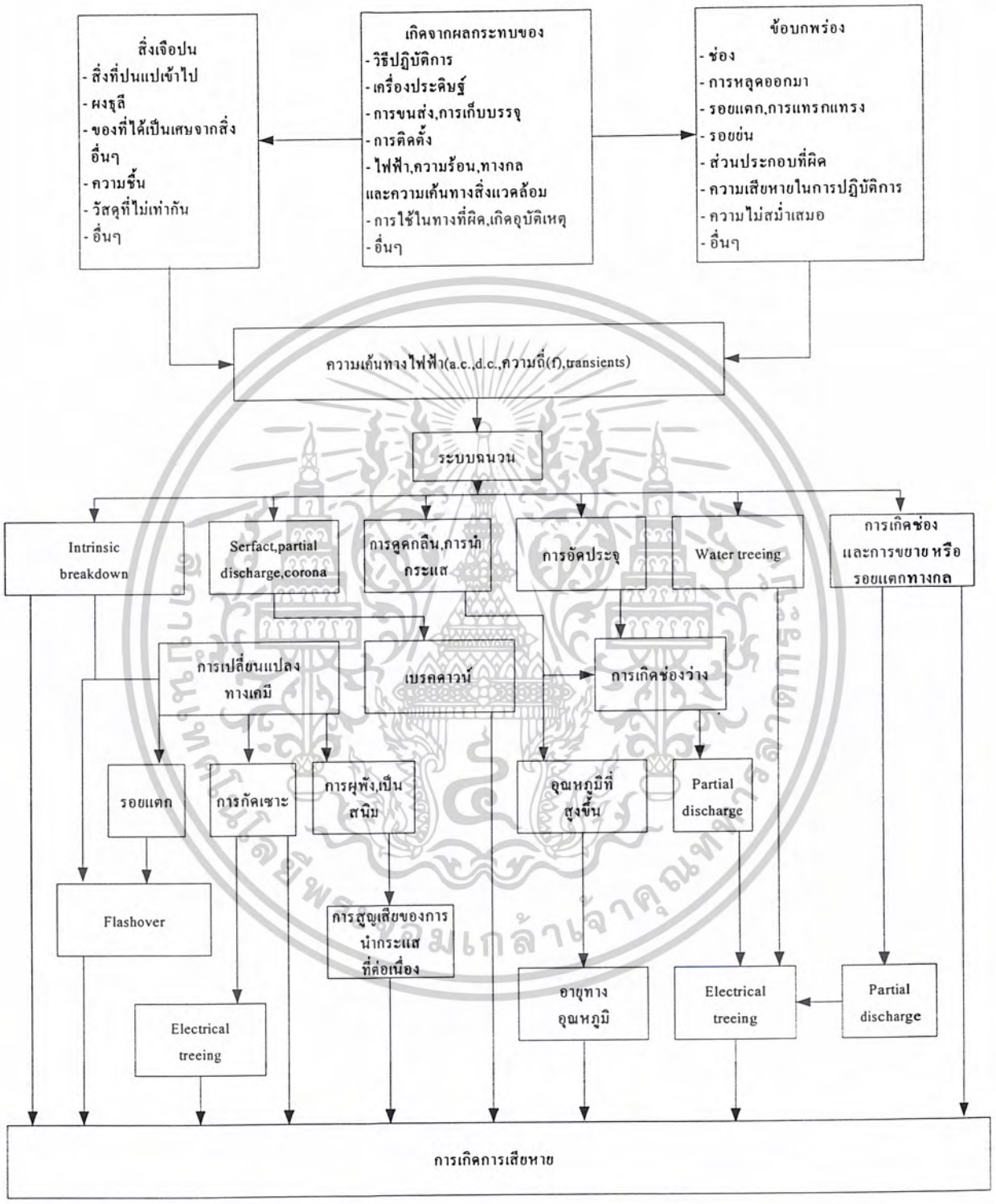
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

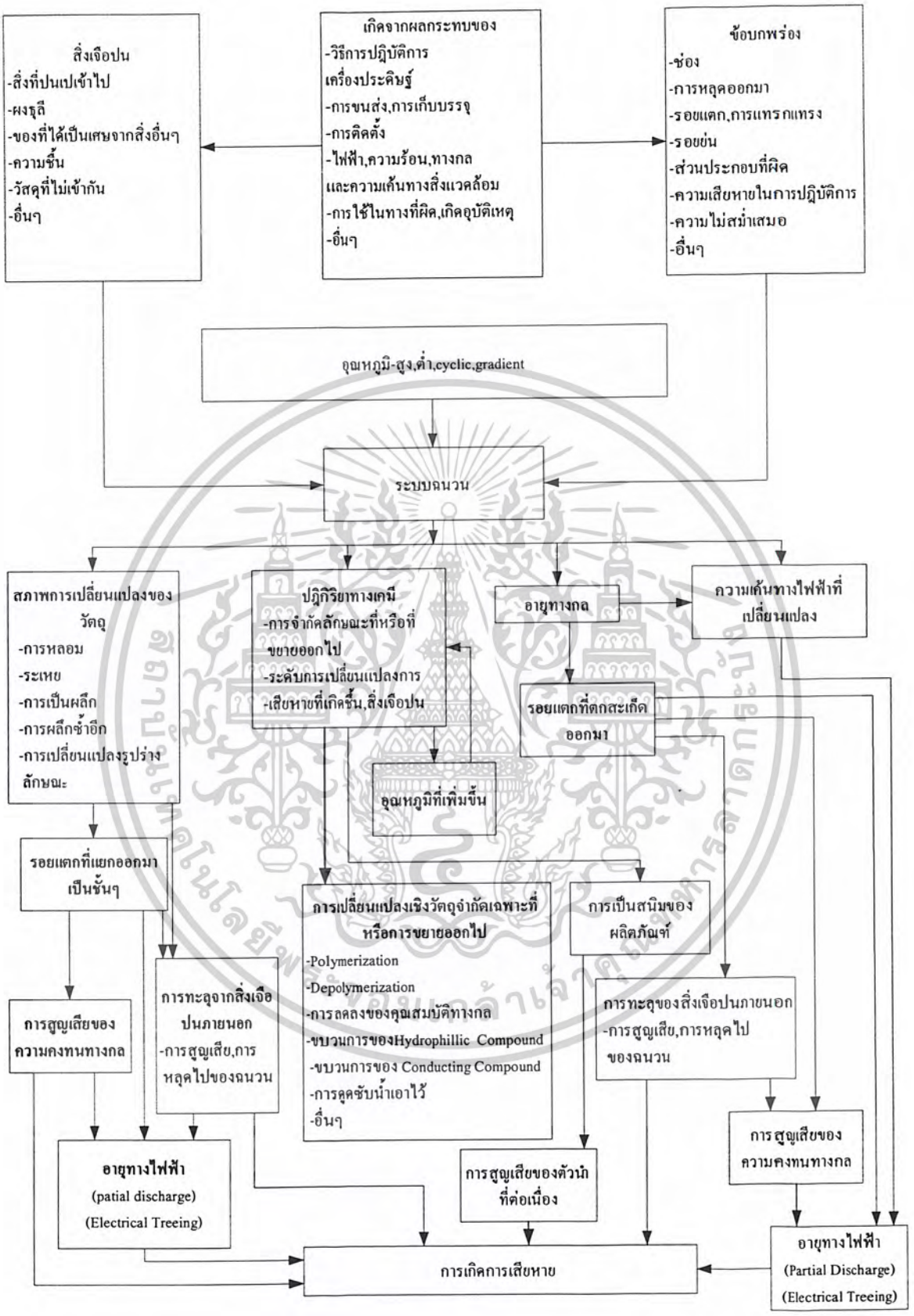
ภาคผนวก ก

ลำดับการทำงาน



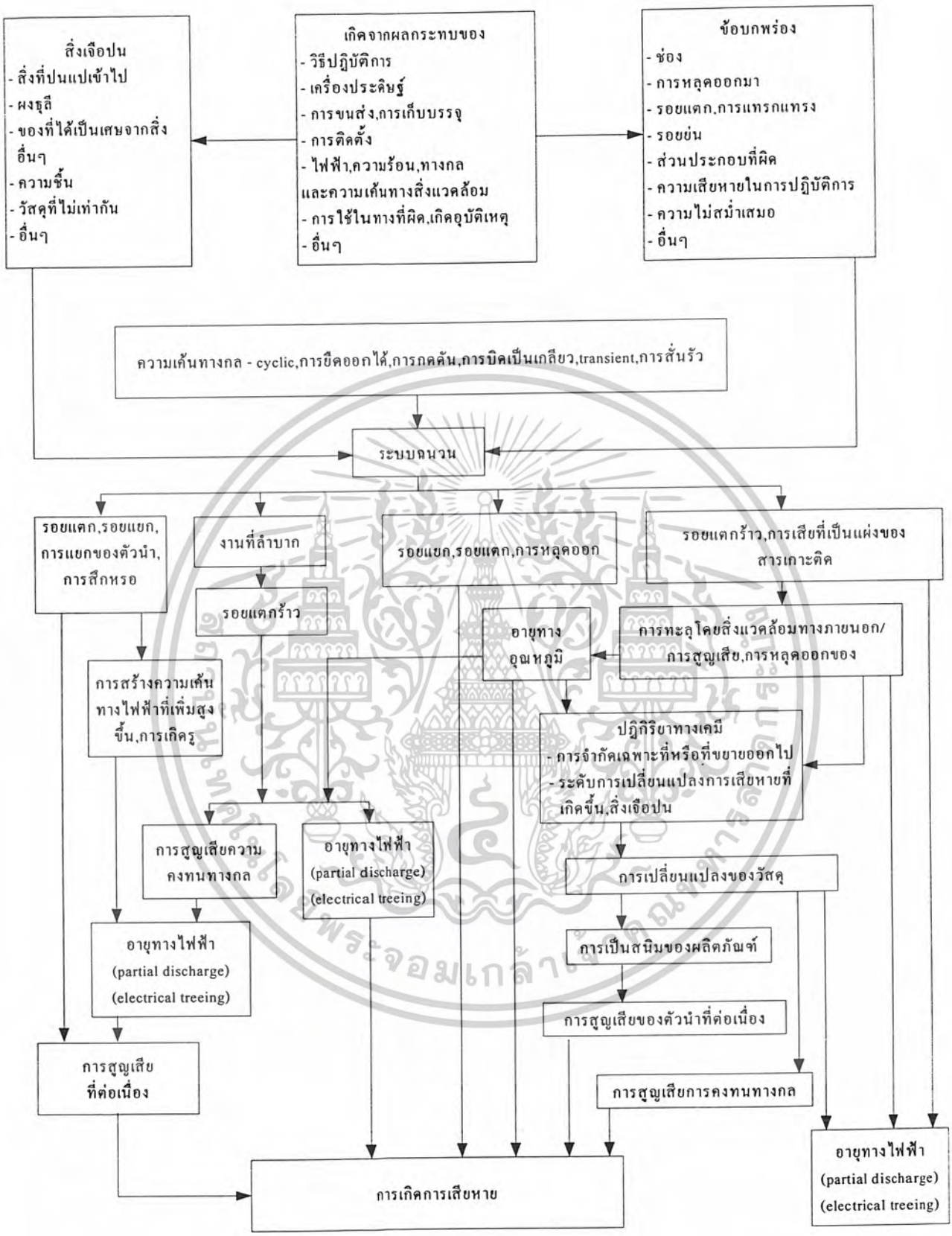
รูป ก-1 แสดงภายนอก/ภายใน ของอายุทางไฟฟ้าที่เหมาะสมกับระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



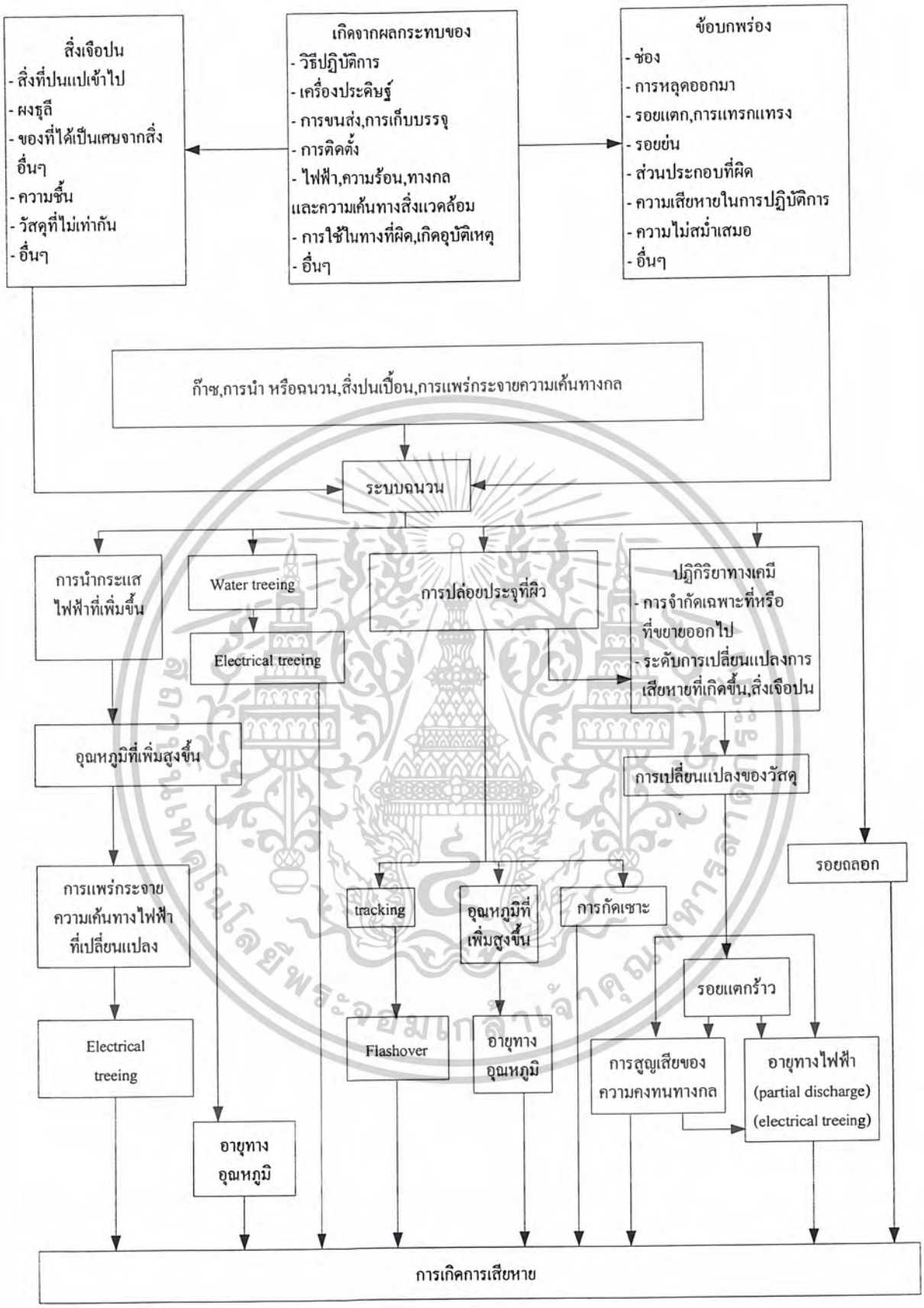
รูป ก-2 แสดงภายนอก/ภายใน ของอายุทางอุณหภูมิที่เหมาะสมกับระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



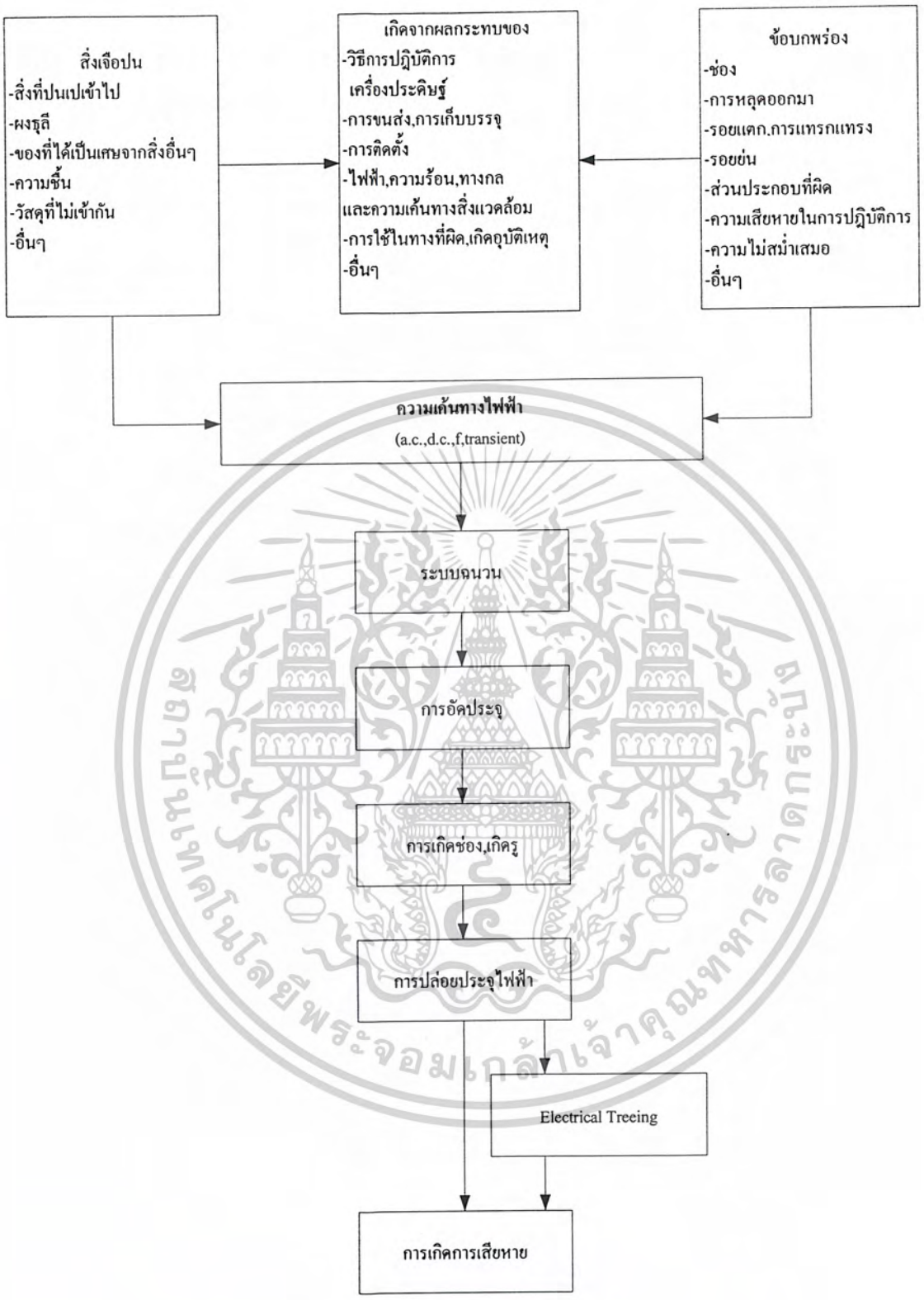
รูป ก-3 แสดง ภายใน/ภายนอก ของอายุทางกลที่เหมาะสมกับระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



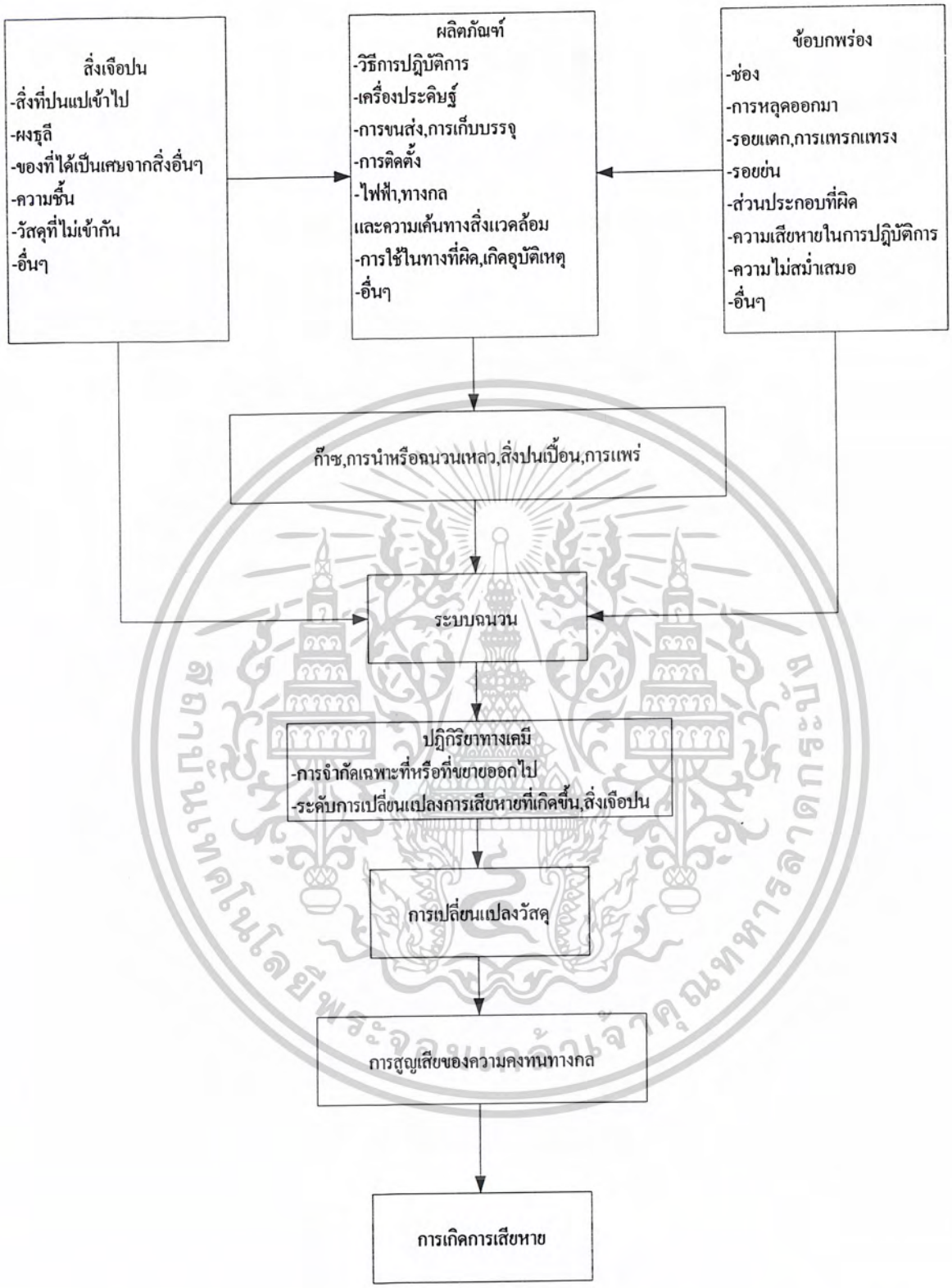
รูป ก-4 แสดง ภายใน/ภายนอก ของอายุทางสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมกับระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



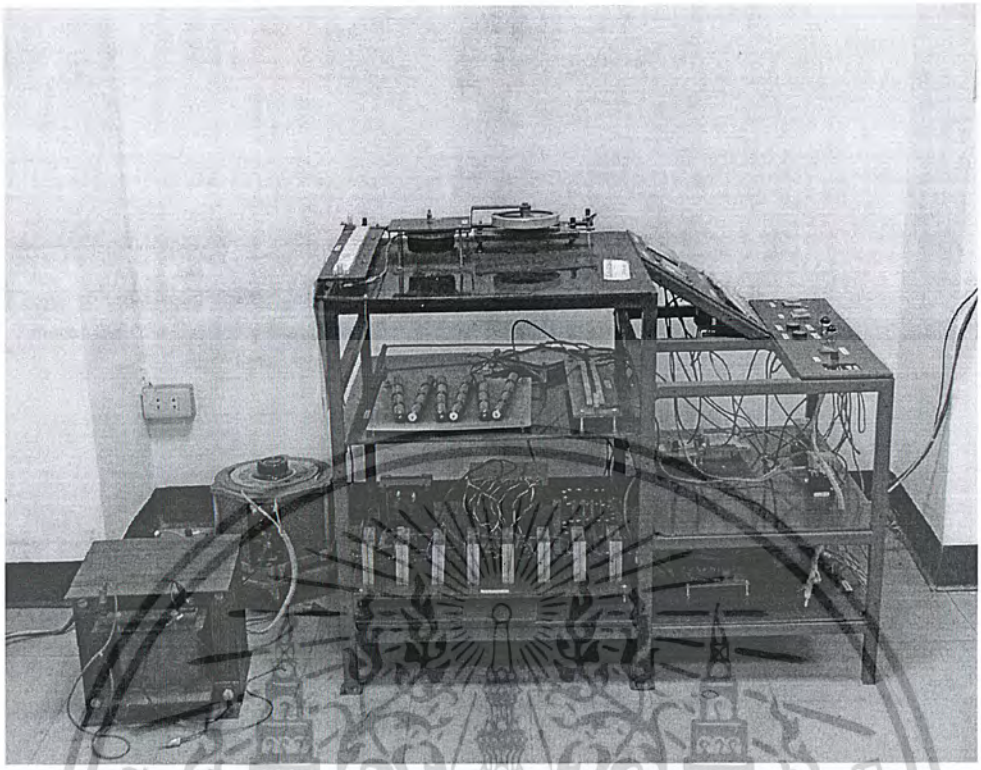
รูป ก-5 แสดงตัวอย่างของอายุที่เหมาะสมกับระบบฉนวนที่มีอายุทางไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

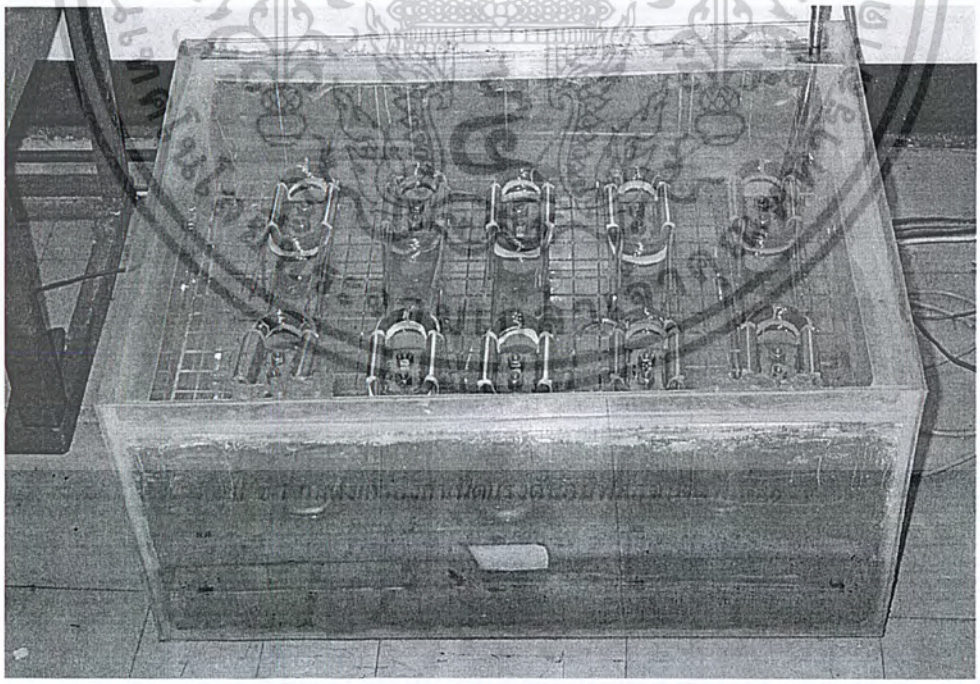


รูป ก-6 แสดงตัวอย่างของอายุที่เหมาะสมกับระบบฉนวนที่มีอายุทางสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

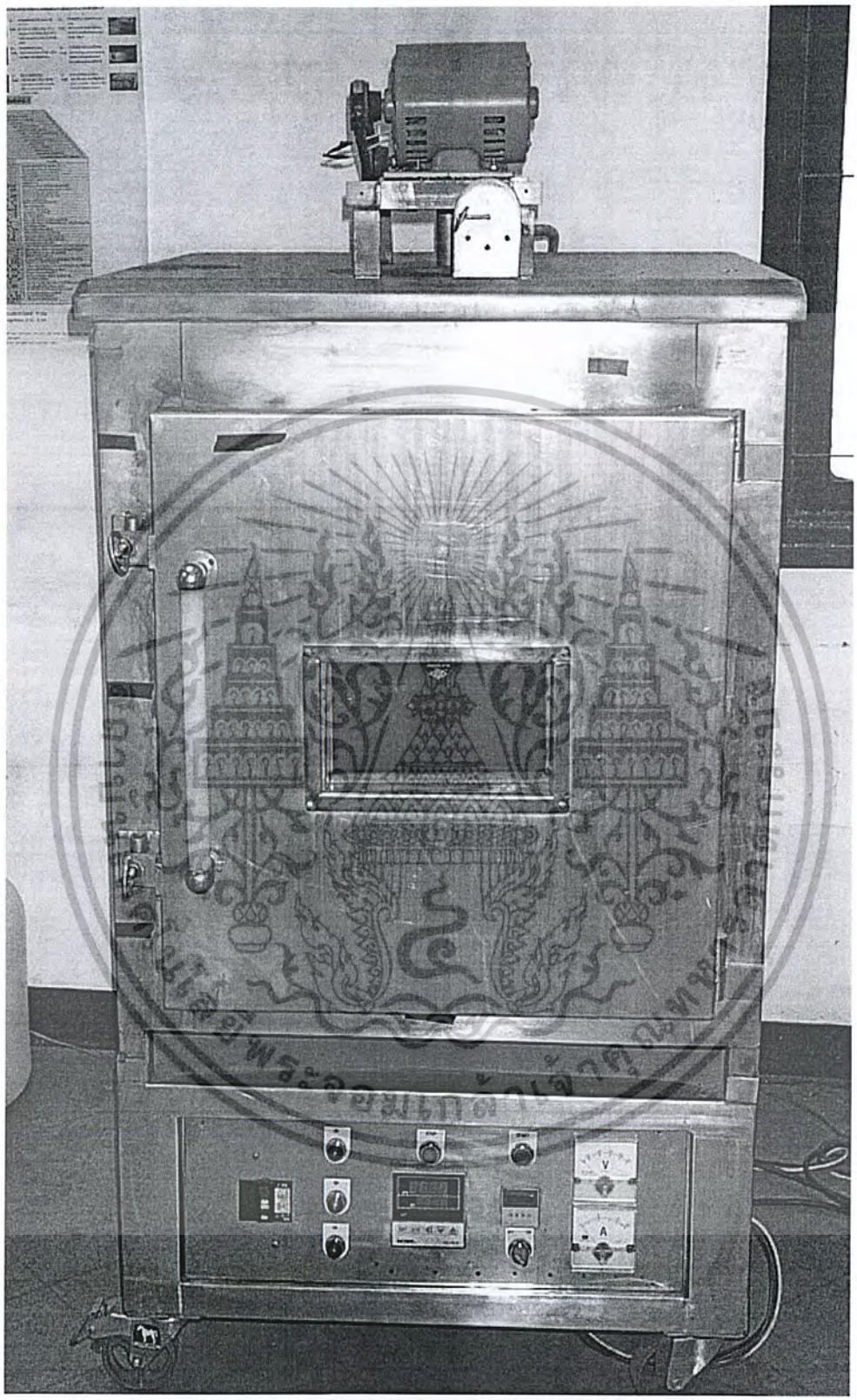


รูป ข-1 แสดงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาดพิกัด 6 kv



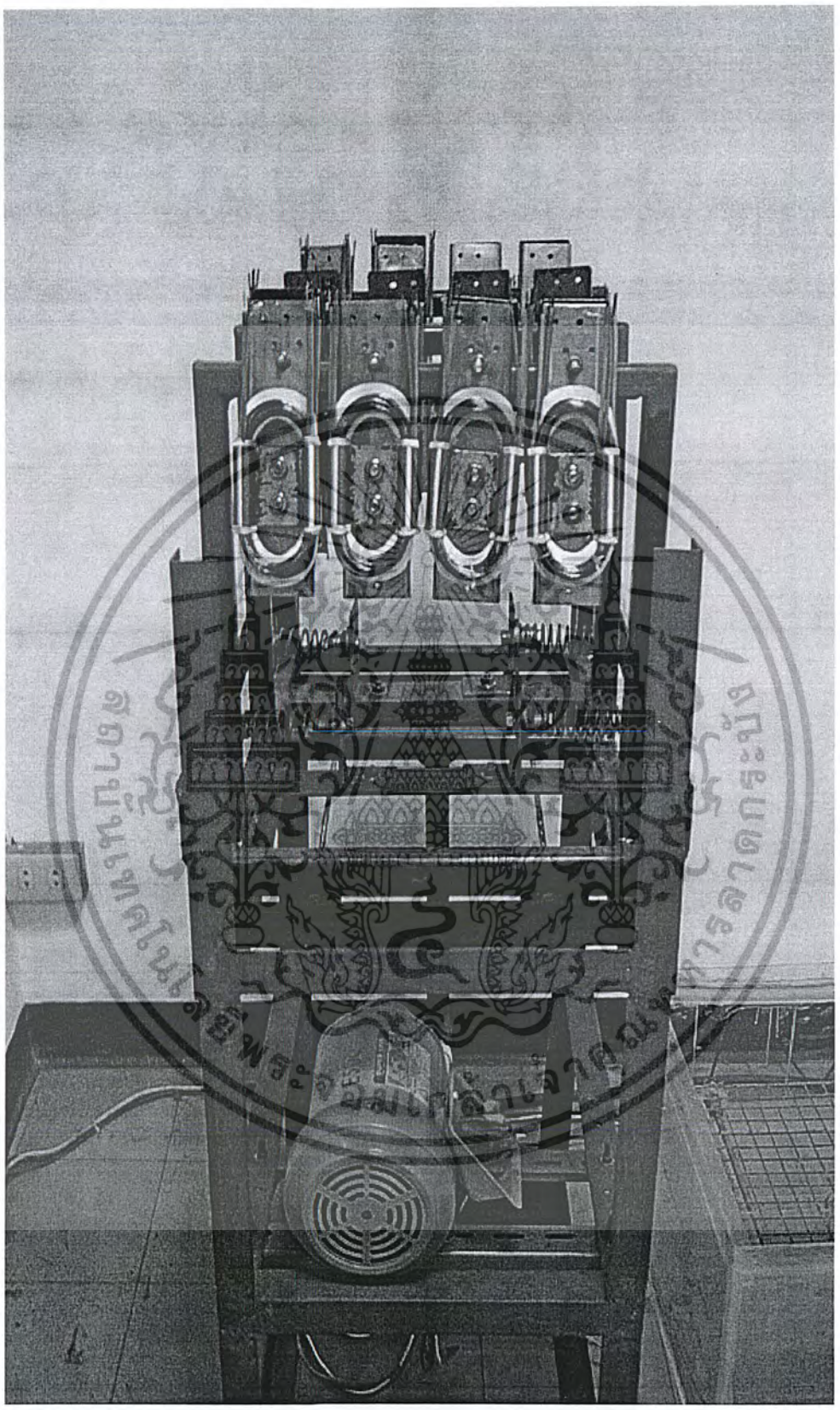
รูป ข-2 ตู้อบความชื้นขณะทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



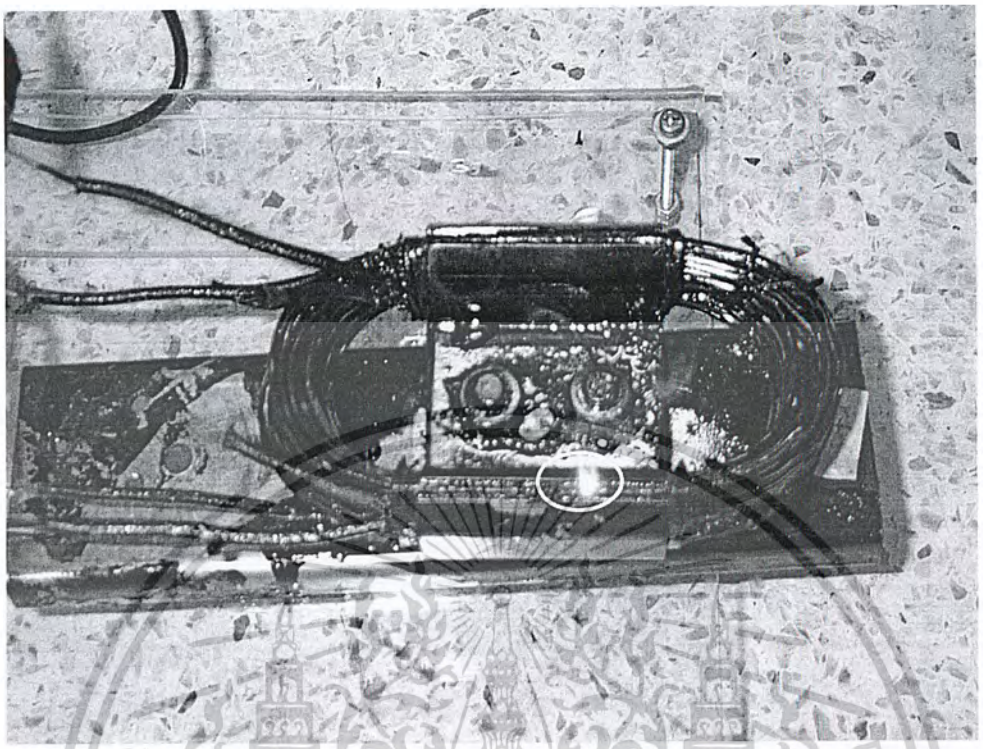
รูป ข-3 ตู้อบความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

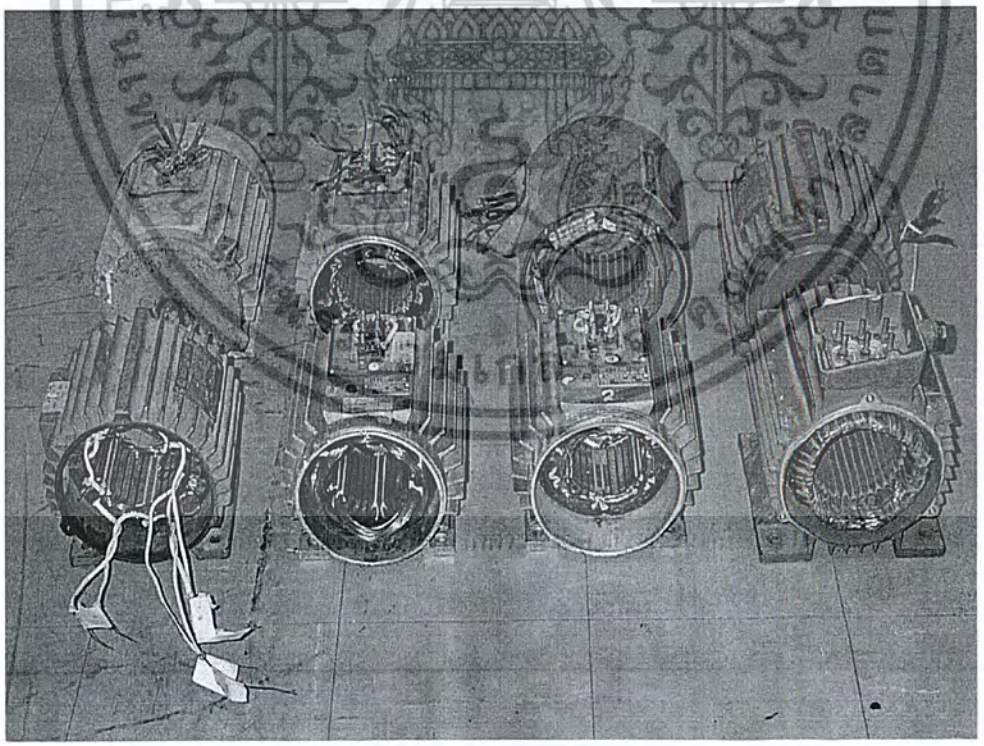


รูป ข-4 แสดงโต๊ะสั่นขณะทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

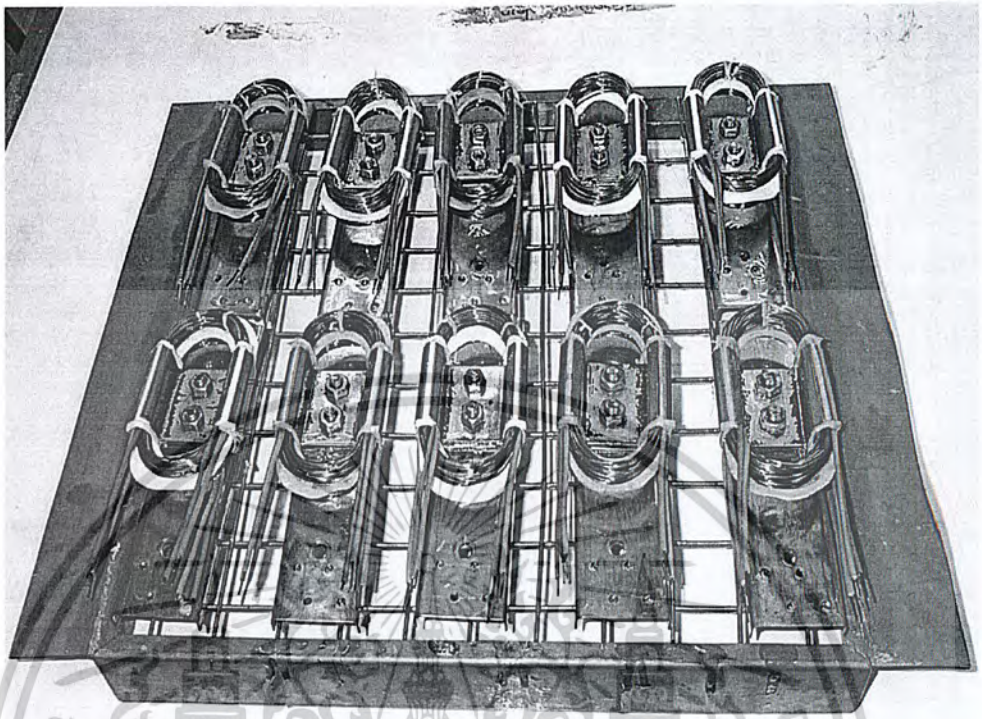


รูป ข-5 แสดงการเกิดเบรคดาวน์ระหว่างขดลวดกับกราวด์

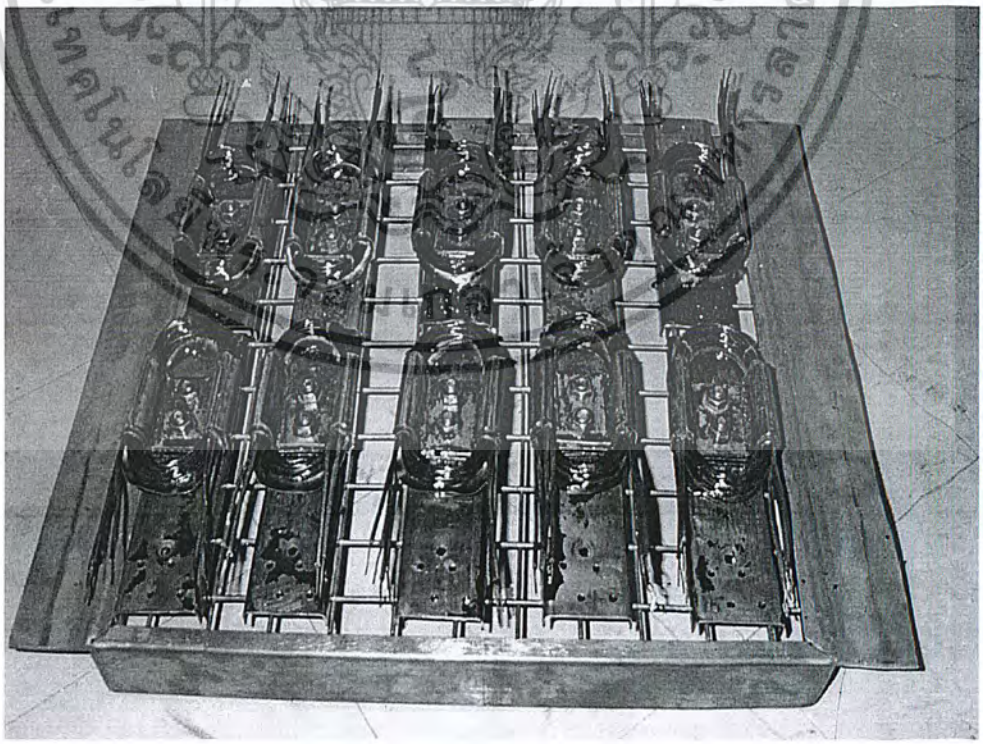


รูป ข-6 แสดงมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

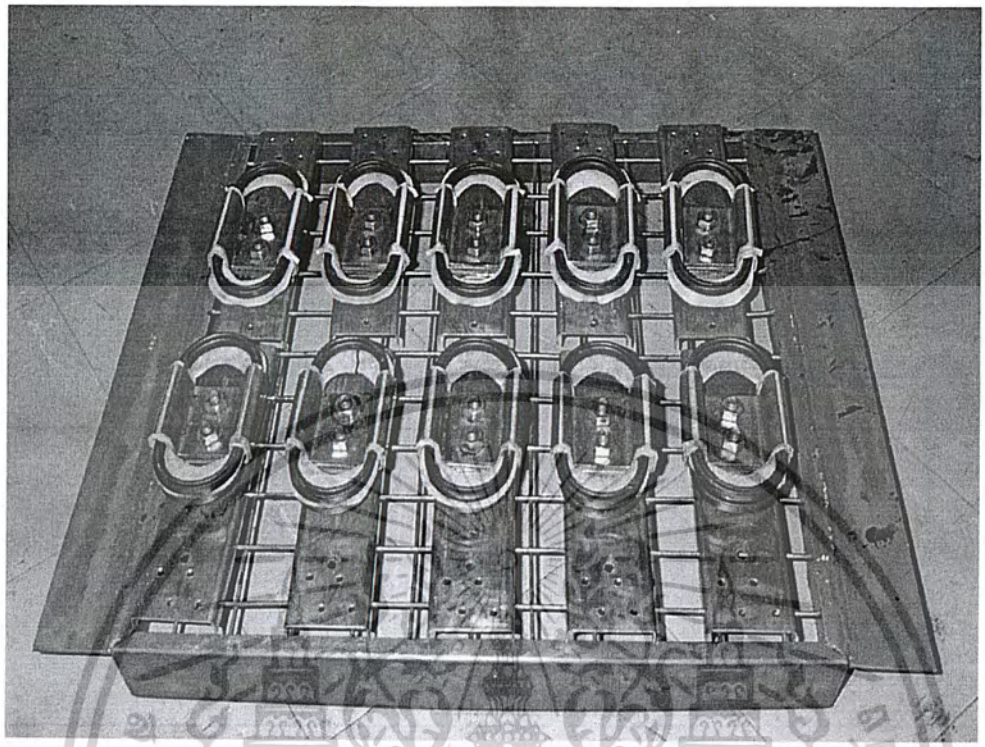


รูป ข-7 แสดงแบบจำลองร่องสล็อต(motorette) ก่อนเร่งอายุฉนวน



รูป ข-8 แสดงแบบจำลองร่องสล็อต(motorette) หลังเร่งอายุฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข-9 แสดงบาร์ทองแดง หลังเร่งอายุฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ และคณะ, การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2544

[2] พิชิต ลำยอง, เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540

[3] มีชัย พิจารณ์ และคณะ,การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการเปรียบเทียบผล ของเสิร์จ,ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2543

[4] ยุทธพงษ์ แซ่ฮา และคณะ,การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อจัดระดับความร้อนของระบบฉนวน, ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2545

[5] สำรวย สังข์สะอาด,วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2528

[6] ANSI/IEEE Std 95 - 1977(R 1992),**IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Direct Voltage**,1977

[7] IEC 34 - 18 - 21, Part 18 :**Function evaluation of insulation System, Section 21 Test procedure for wire - wound winding Thermal evaluation and classification**

[8] IEEE Std 43 - 2000(Revision of IEEE Std 43 - 1974),**IEEE Recommended practice for Test Insulation Resistance of Rotating Machinery**,2000

[9] IEEE Std 522 - 1922 (Revision of IEEE Std 522 - 1977),IEEE Guide for Testing Turn to Turn Insulation on Form - Wound Stator Coils for Alternating - Current Rotating Electric Machine,1992

[10] IEEE c62.1 - 1991,**IEEE Recommended practice on Surge Voltage In Low - Voltage AC Power Circuit**,1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้