สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA
DESIGN AND CONSTUCTION OF AC CONTROL UNIT 20 kVA

T144321

โดย

นางสาว ภารวี เจริญศักดิ์
นางสาว มินาวรรณ สัตยานนท์
นาย เมธา เงางาม
นาย รัชพงศ์ จันทร์ศิรินุสรณ์

วพ.
ส 4677
2558
สชพม. 144321
เลขทะเบียน.
วัน.เดือน.ปี 09 พ.ย. 2559

b.12817334
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTUCTION OF AC CONTROL UNIT 20 kVA

MISS PHARAWI CHAROENSAK

MISS MINAWAN SATTAYANON

MR. METHA NGAONGAM

MR. RATCHAPONG CHANSIRINUSORN

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BECHELER DEGREE IN ELETRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2558

การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA
DESIGN AND CONSTUCTION OF AC CONTROL UNIT 20 kVA

โดย

นางสาว	ภารวี	เจริญศักดิ์
นางสาว	มินาวรรณ	สัตยานนท์
นาย	เมธา	เงางาม
นาย	รัชพงศ์	จันทร์ศิรินุสรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท
ผศ.วรกัลป์ ลิ้มเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับ พิกัด 20 kA

ผู้จัดทำ

1. นางสาว ภารวี เจริญศักดิ์
2. นางสาว มินาวรรณ สัตยานนท์
3. นาย เมธา เงางาม
4. นาย รัชพงศ์ จันทร์ศิรินุสรณ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรกัลป์ ลิ้มเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA

นางสาวภารวี	เจริญศักดิ์	
นางสาวมินาวรรณ	สัตยานนท์	
นายเมธา	เงางาม	
นายรัชพงศ์	จันทร์ศิรินุสรณ์	
ผศ.ดร.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.วรกัลป์	ลิ้มเจริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 20 kVA, 220 V ซึ่งชุดควบคุมประกอบด้วยส่วนวัดค่าทางไฟฟ้า ส่วนป้องกันทางไฟฟ้า และส่วนควบคุมแรงดัน โดยได้มีการพัฒนาชุดควบคุมให้สามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมอัตราการปรับเพิ่มระดับแรงดัน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นสูงสุด และต่ำสุดคือ 4 V/s และ 1.3 V/s ตามลำดับ ในส่วนของการป้องกัน มีรีเลย์กระแสเกินและสวิตช์ฉุกเฉินสำหรับตัดวงจรทดสอบในกรณีที่วงจรทดสอบมีกระแสเกินและเกิดเหตุฉุกเฉิน ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกออกแบบเพื่อใช้ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบพิกัด 20 kVA 220V/200kV เพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับ และการทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std 4 (2013), IEC 60060-1 (2010), ANSI C29.1-1988 และ มอก.354-1980 นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่าสามารถทำงานร่วมกับหม้อแปลงทดสอบโดยไม่เกิดความเสียหาย จากการทดลองทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่าตู้ควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับสามารถใช้ทำการทดสอบได้ตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTUCTION OF AC CONTROL UNIT 20 kVA

PHARAWI	CHAROENSAK	
MINAWAN	SATTAYANON	
METHA	NGAONGAM	
RATCHAPONG	CHANSIRINUSORN	
Asst.Prof.Dr.Peerawut	Yutthagowith	Advisor
Asst.Prof.Worrakan	Limcharoen	Advisor

Abstract

This project presents a design and construction of AC voltage control unit with the power rating of 20 kVA and the rating voltage of 220 V. The control unit is composed of electrical measurement part, electrical protection part, and voltage control part. The developed control unit can adjust voltage with controlled rate of rise. The maximum and minimum rate of rise is 4 V/s and 1.3 V/s, respectively. In the protection part, the over current relay and emergency switch were used to turn off the testing circuit in cases of overcurrent detection and emergency. The AC voltage control unit was designed for use together with testing transformer rated 20 kVA 220V/200kV that apply for AC withstand test and flashover test of insulator on the certificated IEEE Std 4 (2013), IEC 60060-1 (2010), ANSI C29.1-1988 and TIS.354-1980. Moreover, from the experimental result, The AC voltage control unit can work together with testing transformer well without damage. It can be conclude that the AC voltage control unit can employ well in AC voltage withstand test and flashover test according to the standard requirement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, ผศ.วรกัลป์ ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำโครงงานด้วยดีมาโดยตลอด นอกจากนี้ยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงงานอีกด้วย

ขอขอบคุณ คุณปุณยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ รวมไปถึงการตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนายบัญญัติ ลีลาจริยกุล ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในด้านการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน และนายธนริทธิ์ ตรีวรรณกุล ที่เป็นผู้ควบคุมการทดสอบและให้คำแนะนำในการจัดทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ช่วยกันดูแลห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และเป็นกำลังใจในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	2
1.4 ขั้นตอนที่ใช้ในโครงงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 หลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้า	4
2.2 แรงดันทดสอบ	7
2.2.1 ชนิดของแรงดันทดสอบ	7
2.3 ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า	8
2.3.1 ชนิดของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า	8
2.3.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน	9
2.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน	10
2.4.1 การติดตั้งลูกถ้วยแบบแขวนเพื่อทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน	11
2.4.2 การปรับแก้ค่าเนื่องจากผลของความดันอากาศ, อุณหภูมิและความชื้น	11
2.4.3 การควบคุมแรงดันในการทดสอบ	14
2.5 หลักการสร้างชุดควบคุม	14
2.5.1 หลักการออกแบบชุดควบคุม	15
2.5.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในชุดควบคุม	15
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	20
3.1 แนวคิดพื้นฐาน	20
3.2 การออกแบบชุดควบคุมแรงดัน	20
3.2.1 การกำหนดคุณสมบัติของตู้ควบคุม	20
3.2.2 การออกแบบวงจรควบคุมสำหรับชุดควบคุมแรงดันทดสอบ	21
3.2.3 โครงสร้างภายนอก	24
3.2.4 การออกแบบแผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ	30
3.3 การประกอบสร้างตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ	31
3.3.1 การหาค่าพิกัดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในชุดควบคุม	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบชุดควบคุม 31
3.3.3 ขั้นตอนการทำงานของตู้ควบคุม 32
3.3.4 การติดตั้งอุปกรณ์และการประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับ 32

บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ 35
4.1 วงจรทดสอบ 35
4.2 การติดตั้งวงจรทดสอบและวัตถุทดสอบ 35
4.3 ขั้นตอนการทดสอบ 38
4.4 ผลการทดสอบ 39

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ 40
5.1 สรุป 40
5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข 40

เอกสารอ้างอิง 41

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก บทความวิชาการ 42
ภาคผนวก ข มาตรฐาน IEEE Std 4™-2013 47
ภาคผนวก ค มาตรฐาน IEC 60060-1, Edition 3.0 – 2010 56
ภาคผนวก ง มาตรฐาน ANSI C29.1-1988 65
ภาคผนวก จ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 83

ประวัติผู้เขียน 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	Auto Transformer	5
2.2	Step-up voltage auto transformer	7
2.3	การติดตั้งลูกถ้วยแบบแขวน	11
2.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมบูรณ์ (g/m^3) อุณหภูมิแวดล้อม (^oC) และความชื้นสัมพัทธ์ (%)	13
2.5	แมกเนติคอนแทกเตอร์ (Magnetic Contactor)	15
2.6	รีเลย์ช่วยหรือรีเลย์ควบคุม (Control Relay)	17
2.7	หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน	17
2.8	รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay)	18
2.9	หม้อแปลงกระแส (Current Transformer; CT)	18
2.10	สวิตช์จำกัดระยะ (Limit Switch)	19
2.11	สปีดคอนโทรล หรือ ESC (Electronic Speed Control)	19
3.1	วงจรกำลังสำหรับตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ	21
3.2	วงจรควบคุมสำหรับตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ	22
3.3	วงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ	23
3.4	โครงสร้างของตู้ควบคุมแรงดันทดสอบที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	24
3.5	การออกแบบตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ	24
3.6	ภาพฉายของโครงตู้	27
3.7	ภาพตัดของโครงตู้	28
3.8	ตู้ควบคุมแบบสมบูรณ์จากการออกแบบ	29
3.9	แผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุม	30
3.10	ฐานรองรับน้ำหนักหม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน	33
3.11	การติดตั้งอุปกรณ์วงจรกำลัง	33
3.12	การติดตั้งอุปกรณ์วงจรควบคุม	34
3.13	ตู้ควบคุมแบบสมบูรณ์จากการประกอบสร้าง	34
4.1	วงจรทดสอบการวาบไฟตามผิวสภาวะแห้ง	35
4.2	อุปกรณ์ด้านแรงต่ำ	36
4.3	หม้อแปลงทดสอบ	36
4.4	การติดตั้งวงจรทดสอบ	37
4.5	การติดตั้งลูกถ้วย 52-1	37
4.6	บ่อสายดิน	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน	3
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า g ค่า m และค่า w ในการหาค่าแก้	13
4.1	ค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	35
4.2	ผลการทดสอบการวาบไฟตามผิวลูกถ้วย 52-1	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากการปรับระดับแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน (Variac) ในการปรับระดับแรงดันทดสอบกระแสสลับ โดยใช้บุคคลในการปรับระดับแรงดันทดสอบ ซึ่งไม่สะดวกต่อการใช้งานในการทดสอบ และมักมีปัญหาในการควบคุมการปรับระดับแรงดันทดสอบคือไม่มีความแม่นยำในการปรับระดับแรงดันทดสอบ เนื่องจากอัตราการปรับเพิ่มระดับแรงดันหรือลดระดับแรงดันของผู้ปฏิบัติงาน ทำให้ได้แรงดันตามที่ต้องการได้ยาก เป็นผลให้การจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์ทดสอบมีความผิดพลาด โดยในบางครั้งอุปกรณ์ทดสอบอาจได้รับแรงดันน้อยกว่าหรือมากกว่าแรงดันทดสอบที่ต้องการ แต่หากอุปกรณ์ทดสอบได้รับแรงดันมากกว่าที่ต้องการ ส่งผลให้อุปกรณ์ทดสอบมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้ จากปัญหาดังกล่าวคณะผู้จัดทำและห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังจึงออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับใช้งานร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงทดสอบพิกัด 20 kVA 220V/200kV เพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับและการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEEE Std 4 (2013) [1], IEC 60060-1 (2010) [2], ANSI C29.1-1988 [3] และมอก.354-2523 [4] โดยพัฒนาและปรับปรุงระบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและระบบความปลอดภัยให้ดียิ่งขึ้น เพื่อใช้ควบคุมแรงดันของหม้อแปลงทดสอบให้มีความสะดวกและแม่นยำในการใช้งาน สร้างความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานและสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ รวมไปถึงเพิ่มขีดความสามารถในการทดสอบอุปกรณ์ และงานวิจัย ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของวงจรควบคุมการปรับแรงดันของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA
2. เพื่อออกแบบชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA ที่มีความแม่นยำและปลอดภัยในการใช้งาน รวมทั้งสามารถปรับความเร็วในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า ในงานวิจัยและทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงดันสูง
3. เพื่อประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA ในงานวิจัยและทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงดันสูง
4. เพื่อรองรับงานทดสอบทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงดันสูง
5. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับและการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

2. ออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA ที่สามารถใช้ร่วมกับหม้อแปลงทดสอบพิกัด 200 kV 20 kVA

3. ทำการทดสอบชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA ใช้ร่วมกับหม้อแปลงทดสอบพิกัด 20 kVA 200 kV เพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับและการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนที่ใช้ในโครงงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA

2. ออกแบบและจำลองรูปแบบของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA เพื่อใช้ในการปรับระดับแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ

3. ทำการประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA

4. ทำการทดสอบชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA

5. ปรับปรุงและแก้ไขชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA

6. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงงาน

แผนการทำงาน	ปีการศึกษา 2558									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA	←- - - ←───	- - -→ ───→								
2. ออกแบบและจำลองรูปแบบของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA			←- - - ←───	- - - - ────	- - -→ ───→					
3. ทำการประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA					←- - - ←───	- - - - ────	- - -→ ────	 ───→		
4. ทำการทดสอบชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA								←- -→ ←──→		
5. ปรับปรุงและแก้ไขชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA								←- -→ ←──→		
6. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									←- - - ←──→	- - -→

หมายเหตุ ←- - - - - -→ คือ ระยะเวลาปฏิบัติงานที่วางแผนไว้

←──────→ คือ ระยะเวลาปฏิบัติงานจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

1. มีความรู้และเข้าใจในหลักการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันสูงฝไกระแสสลับ

2. มีความรู้ในการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับ

3. เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA ได้ตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้

4. ชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA ที่พัฒนาและปรับปรุงขึ้น สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อรองรับงานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบและการวิจัยในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ไฟฟ้าแรงสูง คือไฟฟ้าที่มีแรงดันตั้งแต่ 1000 V ขึ้นไป ซึ่งไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการทดสอบและศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปแบ่งเป็น 3 แบบคือ [5]

1. แรงดันสูงกระแสสลับ (AC high-voltage)
2. แรงดันสูงกระแสตรง (DC high-voltage)
3. แรงดันสูงอิมพัลส์ (Impulse high-voltage)

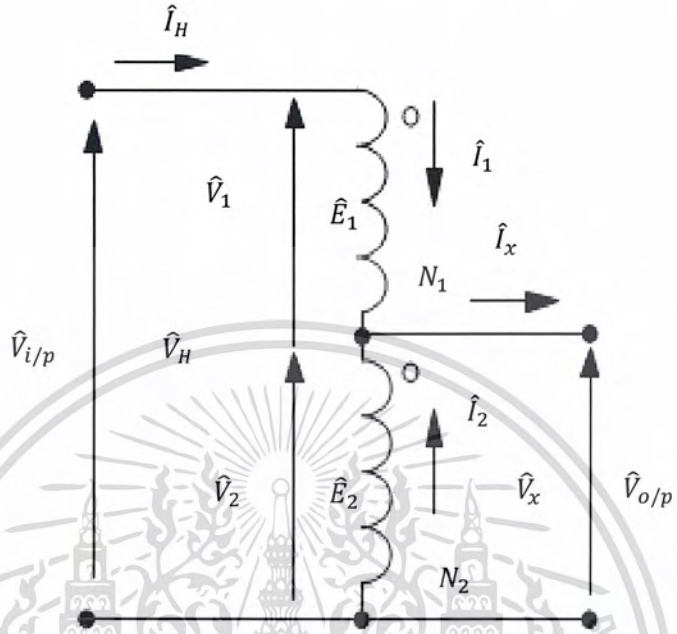
โดยระบบไฟฟ้าแรงสูงสามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปได้ในระยะทางไกล และมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าระบบไฟฟ้าแรงต่ำ ดังนั้นการส่งกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ จึงต้องส่งด้วยระบบไฟฟ้าแรงสูงแทบทั้งสิ้น เนื่องจากไฟฟ้าแรงสูงมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากเมื่อเทียบกับไฟฟ้าแรงต่ำที่ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าตามบ้านทั่วไป (220 V) และไฟฟ้าแรงสูงสามารถที่จะผ่านอากาศ หรือฉนวนไฟฟ้าเข้าหาวัตถุหรือสิ่งมีชีวิตได้โดยไม่ต้องสัมผัสหรือแตะสายไฟ ดังนั้นการฉนวนทางไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยฉนวนไฟฟ้าที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป คือ ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ซึ่งใช้สำหรับยึดโยงหรือรองรับภาระทางกลจากตัวนำไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าให้กับตัวนำไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงสูง เพื่อป้องกันการลัดวงจรลงดินเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของตัวนำมีค่ามากกว่าศักย์ดิน โดยจะยึดสายไฟฟ้าด้วยลูกถ้วยเป็นชั้น ๆเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนไหวเข้าหากันจนอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ ซึ่งจำนวนชั้นของลูกถ้วยจะบ่งบอกถึงระดับแรงดันไฟฟ้าของไฟฟ้าแรงสูง โดยความเป็นจริงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ยึดหรือรองรับตัวนำสายไฟฟ้า ที่มีศักย์ไฟฟ้าอยู่ในบรรยากาศ อากาศที่อยู่โดยรอบลูกถ้วยนั้น จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่าผิวลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าถึงแม้ว่าผิวลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจะสะอาดก็ตาม ยิ่งถ้าลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเปรอะเปื้อนเพราะฝุ่นละออง หรือไอทะเลหรือสารเคมีด้วยแล้ว ยิ่งมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าอากาศ และถ้ามีความชื้นผิวลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่เปรอะเปื้อนนั้นก็จะมีสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เกิดกระแสรั่วตามผิว ดังนั้นก่อนนำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ามาใช้งานจะต้องมีการทดสอบว่า สามารถทนแรงดันของระบบจำหน่ายได้หรือไม่ โดยการทดสอบจะทำในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้ชุดควบคุมแรงดันทดสอบเป็นตัวปรับระดับแรงดันทดสอบให้แก่ลูกถ้วย โดยแรงดันทดสอบที่ใช้จะต้องมีความถูกต้องและเหมาะสมทั้งในเรื่องของขนาดแรงดัน และระยะเวลาในการทดสอบ

2.1 หลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้า [6]

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งจ่ายพลังงานจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกวงจรโดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปกติจะใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าแรงดันสูง และไฟฟ้าแรงดันต่ำ ซึ่งต้องสามรถแปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดลดหรือเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยมีความถี่ไฟฟ้าคงเดิม ซึ่งก็คือหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในโครงงานนี้จะเลือกใช้ หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน (Auto transformer) ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทดสอบซึ่งมีลักษณะดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงแบบออโต้ (Auto transformer) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่วงจรทางด้านปฐมภูมิต่อถึงกันทางด้านไฟฟ้ากับวงจรทางด้านทุติยภูมิ จากวงจรในรูปที่ 1 เรียกขดลวด 1 ว่าเป็น Series Coil และขดลวด 2 ว่าเป็น Common coil ซึ่งเป็นการต่อแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-down voltage)



ภาพที่ 2.1 Auto Transformer

จุดต่อระหว่าง Series coil กับ Common coil จะต้องต่อขั้วไฟฟ้าที่มีตำแหน่งเครื่องหมายจุดตรงข้ามกันนั้นหมายความว่าต้องต่อระหว่างเครื่องหมายจุด (Dot mark) กับไม่มีเครื่องหมายจุด (Undot mark)

จากหม้อแปลงในอุดมคติ ที่ไม่มีค่าความต้านทานของขดลวดทองแดง ไม่มีสนามแม่เหล็กรั่ว ค่าซึมซาบทางแม่เหล็กสูงมากจนทำให้ไม่มีกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และแกนเหล็กไม่มีความสูญเสียดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทาน

สมการแรงดันไฟฟ้า

$$\hat{V}_x = \hat{V}_2 \tag{2.1}$$

$$\hat{V}_H = \hat{V}_1 + \hat{V} \tag{2.2}$$

จากแรงดันไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_H กับ V_X

$$\frac{V_H}{V_X} = \frac{E_1 + E_2}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} + 1 = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = a \qquad (2.4)$$

สมการของกระแสไฟฟ้า

$$\hat{I}_H = \hat{I}_1 \qquad (2.5)$$

$$\hat{I}_X = \hat{I}_1 + \hat{I}_2 \qquad (2.6)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง $\hat{I}_H$ กับ $\hat{I}_X$ จะเป็น

$$\frac{\hat{I}_H}{\hat{I}_X} = \frac{I_1 + I_2}{I_2} = \frac{1}{1 + \frac{N_1}{N_2}} = \frac{N_2}{N_1 + N_2} = \frac{1}{a} \qquad (2.7)$$

ในทางด้านของอิมพีแดนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของภาระสามารถหาได้จากอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหารด้วยกระแส

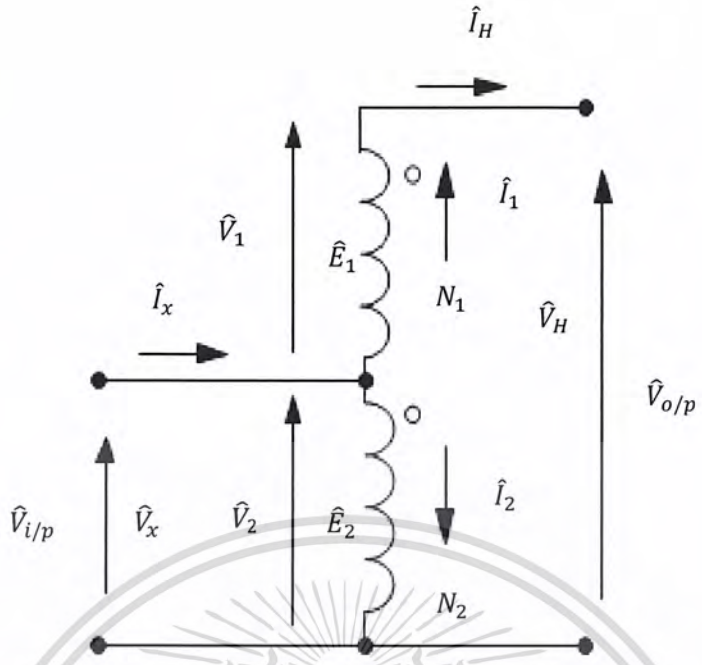
$$Z_L = \frac{\hat{V}_x}{\hat{I}_x} \qquad (2.8)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง Z_H กับ Z_X จะเป็น

$$Z_H = \frac{\hat{V}_H}{\hat{I}_H} = a^2 \frac{\hat{V}_x}{\hat{I}_x} = a^2 Z_x = a^2 Z_L \qquad (2.9)$$

ในกรณีที่ต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Step-up voltage) สามารถต่อวงจรตามรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 Step-up voltage auto transformer

2.2 แรงดันทดสอบ [7]

แรงดันทดสอบ (Tested Voltage) คือแรงดันที่ใช้ทดสอบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงต้องสามารถทนต่อแรงดัน รวมถึงแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังต้องทนต่อสภาวะแวดล้อมบริเวณที่ติดตั้ง และต้องมีอายุการใช้งานยืนยาว

2.2.1 ชนิดของแรงดันทดสอบ

1. แรงดันทดสอบแตกสลาย (disruptive test voltage) หมายถึง แรงดันทดสอบที่ทำให้ไดอิเลคตริกเสียสภาพการฉนวนเนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันที่ป้อนทดสอบเมื่อเกิดดีสชาร์จแตกสลายจะทำให้แรงดันระหว่างอิเลคโตรดจะลดต่ำลงเป็นศูนย์หรือเกือบศูนย์ และมีกระแสไหลผ่านเพิ่มขึ้นมาก การเกิดดีสชาร์จแตกสลายอาจอยู่ในลักษณะดังต่อไปนี้

ก. วาบไฟตามผิว (flashover) เป็นการเกิดดิสชาร์จบนผิวฉนวนแข็งที่ล้อมรอบด้วยฉนวนก๊าซหรือฉนวนเหลวจะทำให้เสียสภาพการฉนวนชั่ววูบ

ข. สปาร์คผ่าน (sparkover) เป็นการเกิดเบรคดาวน์ผ่านฉนวนก๊าซหรือฉนวนเหลวที่คั่นระหว่างอิเลคโตรด ทำให้เสียสภาพการฉนวนชั่วครู่

ค. เจาะผ่าน (puncture) เป็นการเกิดเบรคดาวน์ผ่านฉนวนแข็ง ทำให้เสียสภาพการฉนวนถาวร

2. แรงดันทดสอบที่ฉนวนทนอยู่ได้ (withstand test voltage) หมายถึง แรงดันทดสอบที่กำหนดใช้ทดสอบความคงทนอยู่ได้ของฉนวนที่สภาวะกำหนด ซึ่งวัสดุหรืออุปกรณ์จะต้องทนต่อแรงดันทดสอบนี้ได้ โดยหลังจากทดสอบแล้ววัตถุทดสอบนั้นจะไม่เกิดร่องรอยแตกสลายใด ๆ ซึ่งการทดสอบความคงทนอยู่ได้ประกอบด้วย ความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับโดยการป้อนแรงดันที่แรงดันทดสอบนาน 1 นาที ความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าเรียกว่า BIL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Basic Impulse Insulation Level) และคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งเรียกว่า SIL (Switching impulse insulation level)

3. แรงดันทดสอบแบบไม่ทำลาย (non-disruptive test voltage) แรงดันทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นลักษณะการทดสอบที่ป้อนแรงดันโดยไม่ทำให้วัสดุตัวอย่างการทดสอบนั้นเกิดความเสียหายเป็นการวัดหาผลที่ชี้บอกถึงคุณภาพและอายุการใช้งานของฉนวนในวัสดุทดสอบ การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับ

2.3 ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า [8]

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (Insulators) คืออุปกรณ์ฉนวนที่ใช้สำหรับยึดโยงหรือรองรับภาระทางกลจากตัวนำไฟฟ้าและทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าให้กับตัวนำในระบบไฟฟ้าแรงสูง เพื่อป้องกันการลัดวงจรลงดินเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของตัวนำมีค่ามากกว่าศักย์ดิน และใช้ยึดตัวนำไฟฟ้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ติดตั้งอย่างมั่นคงไม่แกว่งหรือเคลื่อนไหวเข้าหากันจนอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ ทั้งนี้ลูกถ้วนฉนวนไฟฟ้ายังถูกใช้อย่างแพร่หลายในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงและระบบจำหน่ายไฟฟ้าอีกด้วย

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าสามารถแบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิตได้สามประเภท คือ ลูกถ้วยพอร์ซเลน (Porcelain), ลูกถ้วยแก้ว (Toughened glass), และลูกถ้วยจากสารสังเคราะห์ เช่น ยาง อีพอกซีเสริมใยแก้ว และคาสท์เรซิน เป็นต้น โดยลูกถ้วยแต่ละชนิดจะมีพื้นที่ในการติดตั้งและใช้งานแตกต่างกัน เช่น ติดตั้งภายในอาคารหรือในพื้นที่ที่ความชื้นต่ำจะนิยมใช้ลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ ติดตั้งภายนอกอาคารหรือกลางแจ้ง ใช้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน เนื่องจากมีความคงทนต่อสภาพอากาศเป็นต้น

2.3.1 ชนิดของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

นอกจากการแบ่งประเภทของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าตามวัสดุที่นำมาผลิตขึ้นแล้ว ยังสามารถแบ่งชนิดของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้านี้ตามการใช้งานได้อีกด้วย เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแต่ละชนิดมีการใช้งาน การติดตั้ง ระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งานแตกต่างกัน จึงมีการแบ่งชนิดลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) [4] ซึ่งร่างตามมาตรฐาน American National Standard Institute (ANSI) [3] ได้ดังนี้

1. ลูกถ้วยก้านตรง (Pin Insulator) ใช้ยึดสายไฟฟ้าให้ตรึงอยู่กับที่โดยการวางพาดสายไฟฟ้าลงที่ร่องสายไฟที่อยู่ส่วนบนของลูกถ้วย ตัวลูกถ้วยมีส่วนประกอบเป็นปีกหลายชั้นซ้อนกัน ในส่วนของร่องพาดสายไฟนี้จะมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำไว้เพื่อป้องกันคลื่นวิทยุที่อาจไปก่อกวนระบบสื่อสารภายในระบบ

2. ลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อก (Fox type pin insulator) ถูกใช้มากในพื้นที่ที่มีมลภาวะและการเปรอะเปื้อนเกิดขึ้นสูง เนื่องจากลูกถ้วยแบบนี้มีลักษณะโดยพื้นฐานเหมือนกับลูกถ้วยก้านตรงทุกประการ หากแต่มีการเพิ่มระยะรั่วและระยะป้องกันให้มากขึ้น

3. ลูกถ้วยแท่ง (Line post insulator) ลักษณะคล้ายลูกถ้วยก้านตรง ต่างที่บริเวณคอจะมีความตันและยาวกว่า ส่วนรองรับสายด้านบนทำจากพอร์ซเลน ส่วนฐานล่างมีแท่นโลหะยึดเป็นก้านตรง ทำให้เกิดการเจาะทะลุเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ลูกถ้วยแท่งก้านตรง (Pin post insulator) มีคุณสมบัติในการป้องกันการเจาะทะลุทางไฟฟ้าได้ดีกว่าลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อก การใช้งานเหมือนกันคือใช้ในบริเวณที่มีมลภาวะและการเปรอะเปื้อนสูง

5. ลูกถ้วยหลัก (Post insulator) ส่วนยอดบนและฐานล่างมีการใช้หัวครอบโลหะเพื่อใช้เป็นจุดยึดตัวเองกับฐานหรือยึดต่อกับลูกถ้วยอันถัดไป โดยทั่วไปแล้วใช้สำหรับยึดบัสบาร์หรือสวิตช์ตัดตอน

6. ลูกถ้วยแขวน (Suspension insulator) เป็นลูกถ้วยแรงสูง ที่สามารถแขวนต่อกันหลายลูกเป็นพวงเพื่อเพิ่มความสามารถในการทนแรงดันสูงได้ ลูกถ้วยชนิดนี้มีฝาครอบโลหะที่มีรูเพื่อใช้ในการห้อยเกี่ยวกับลูกถ้วยอันต่อไป

7. ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน (Solid core suspension insulator) มีลักษณะเหมือนการนำลูกถ้วยแขวนธรรมดามาต่อกันโดยส่วนที่ต่อกันนั้นมีฉนวนพอร์ซเลนเป็นแท่งคอตัน จุดเด่นคือลดการเกิดการเจาะทะลุบริเวณหัวลูกถ้วย

8. ลูกถ้วยคอตันยาว (Long rod insulator) เป็นลูกถ้วยแรงสูงซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งตันและปีกมีลักษณะเหมือนปีกของลูกถ้วยก้านตรง ลูกถ้วยชนิดนี้สามารถทนแรงดันได้สูงมาก ฉะนั้นความยาวของลูกถ้วยแต่ละท่อนอาจมีความยาวถึง 100 เซนติเมตร ในประเทศไทยยังไม่นิยมใช้ลูกถ้วยชนิดนี้เนื่องจากมีราคาสูง

ในโครงงานนี้จะขอกล่าวถึงในส่วนของลูกถ้วยแขวน (Suspension insulator) เป็นหลักเพราะเป็นลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ

2.3.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน

ลูกถ้วยฉนวนจำเป็นที่จะต้องทนทานต่อสภาพอากาศได้ทุกรูปแบบ ลูกถ้วยฉนวนนี้จะต้องทนทานต่อ แรงทางกล อุณหภูมิ ปฏิกิริยาทางเคมี และแรงดันไฟฟ้า ที่กระทำต่อตัวลูกถ้วยฉนวนได้ ซึ่งลักษณะสมบัติที่สำคัญต่อลูกถ้วยเหล่านี้เป็นผลมาจาก วัสดุที่นำมาผลิตและการออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า จึงต้องมีการอธิบายคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับรูปทรงของลูกถ้วยฉนวนที่สำคัญดังนี้

1. ระยะรั่ว (leakage distance) คือ ระยะที่ได้จากการวัดตั้งแต่จุดที่ยึดสายตัวนำไปยังจุดที่ยึดลูกถ้วย โดยการวัดไปตามผิวของลูกถ้วยระหว่างสองจุดนั้น

2. ระยะรั่วป้องกัน (Protective leakage distance) คือระยะที่ไม่เปียกฝนซึ่งโดยปกติแล้วเป็นระยะภายในภายของลูกถ้วย

3. ระยะอาร์ก (Arcing distance) คือ ระยะที่สั้นที่สุดโดยวัดจากอิเล็กโตรดหนึ่งถึงอิเล็กโตรดหนึ่งผ่านตัวกลางหรืออากาศ ระยะอาร์กนี้แบ่งเป็น

1) ระยะอาร์กแห้ง (Dry arcing distance) ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบลูกถ้วยฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดในการทดสอบการวาบไฟตามผิวแห้ง

2) ระยะอาร์กเปียก (Wet arcing distance) ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบลูกถ้วยฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดในการทดสอบการวาบไฟตามผิวเปียก

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน ที่นำมาพิจารณาเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนให้เหมาะสม มีดังนี้

1. แรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ (Low frequency dry flashover voltage) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ ที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวลูกถ้วยในสภาวะแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แรงดันวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ (Low frequency wet flashover voltage) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ ที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวลูกถ้วยในสภาวะเปียก

3. แรงดันไฟฟ้าวาบตามผิวอิมพัลส์วิกฤติ (Critical impulse flashover voltage) หมายถึง ค่าวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วย 50% เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 ไมโครวินาที แบ่งเป็นขั้วบวกและขั้วลบ

4. ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse withstand voltage) อาจทำได้โดยการป้อนแรงดันตามที่กำหนด 15 ครั้งในแต่ละขั้ว และยอมให้เกิดการวาบไฟตามผิวได้ไม่เกิน 2 ครั้ง หรือหาได้จากค่าวาบไฟตามผิว 50% คือหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์โดยอาศัยสถิติ ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$U_{w90\%} = U_{50\%}(1 - 3\sigma) = 0.96U_{50\%} \qquad (2.10)$$

เมื่อ σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 0.03 เมื่อการกระจายเป็นปกติ

5. แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน (Puncture voltage) แรงดันที่ทำให้เกินการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนของลูกถ้วย โดยเฉพาะลูกถ้วยที่มีเนื้อฉนวน (พอร์ซเลนหรือแก้ว) มีความหนาระหว่างอิเล็กโตรดน้อยกว่าระยะอาร์ก เช่น ลูกถ้วยแขวน ลูกถ้วยก้านตรง เป็นต้น

6. แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (Radio influence voltage - RIV) คือ ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดโคโรน่าบนลูกถ้วยฉนวน โคโรน่าจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนระบบวิทยุ ระบบสื่อสาร หรือระบบควบคุม ขึ้นได้ โดยส่วนมากแล้วจะเกิดขึ้นในบริเวณจุดต่อสายไฟหรือพาดสายไฟเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในกรณีนี้จะมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำบริเวณร่องพาดสายไฟหรือจุดต่อสายเอาไว้เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น การเคลือบสารตัวนำนี้จะทำให้ค่าแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด (U_i) มีค่าสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้แรงดันเบรกดาวน์ (U_b) มีค่าลดลง มาตรฐานจึงมีการกำหนดให้ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณชุมชนต้องมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำเพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวนจากโคโรน่าที่เกิดขึ้น

นอกจากลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีลักษณะทางไฟฟ้าอื่นๆ อีกมากมายซึ่งสามารถดูได้จากมาตรฐานของลูกถ้วยชนิดนั้นๆ

2.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน

เพื่อให้การทดสอบและผลจากการทดสอบมีความถูกต้องและยอมรับได้จึงใช้มาตรฐานในการกำหนดเงื่อนไขต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ โดยมาตรฐานที่ใช้ในกำหนดนั้นจะมีด้วยกัน 4 มาตรฐานด้วยกันคือ IEEE Std.4 [1], IEC 60060-1 [2], ANSI C29.1 [3] และ มอก. [4] โดยหัวข้อที่มาตรฐานเหล่านี้กำหนดได้แก่

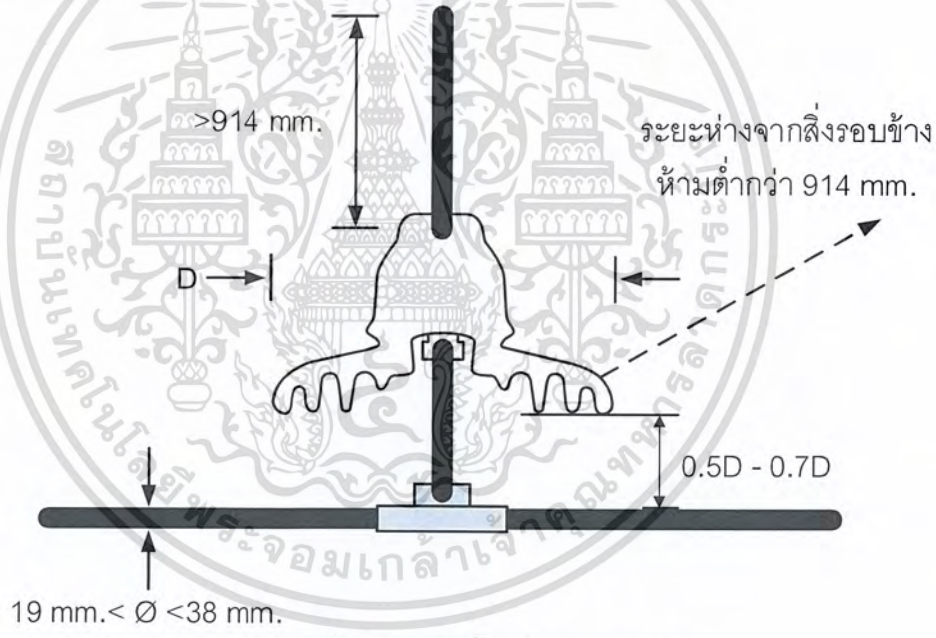
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การติดตั้งลูกถ้วยแบบแขวนเพื่อทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน [3-4]

ในการทดสอบหากไม่มีข้อกำหนดจากผู้ทดสอบลูกถ้วย (ชิ้นเดียวหรือต่อเป็นพวง) จะถูกแขวนในแนวตั้งโดยที่ปลายจะต่อลงดิน ดังนั้นระยะในแนวตั้งจากจุดสูงสุดของวัตถุทดสอบไปจนถึงโครงสร้างช่วยรับแรงจะต้องไม่ต่ำกว่าระยะ 3 ฟุต (914 มิลลิเมตร)

อิเล็กโตรดด้านบนหรือด้านล่างและตัวนำจะมีลักษณะเป็นแท่งผิวเนียนเหยียดตรงเป็นแท่งตันหรือเป็นท่อกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกไม่ต่ำกว่า ¾ นิ้ว (19 มิลลิเมตร) แต่ต้องไม่เกิน 1-1.5นิ้ว (38 มิลลิเมตร) ซึ่งต้องเชื่อมต่อกับข้อต่อของวัตถุทดสอบ ดังนั้นระยะห่างต่ำสุดของเปลือกฉนวนส่วนล่างสุดของลูกถ้วยไปยังผิวบนของอิเล็กโตรดจะอยู่ที่ 0.5 ถึง 0.7 เท่าของระยะเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกถ้วยลูกล่างสุด ตัวนำจะต้องวางตัวในแนวระนาบและทำมุมที่เหมาะสมกับแกนของวัตถุทดสอบ โดยตัวนำต้องมีระยะที่ไม่นำการวาบไฟตามผิวมาที่อิเล็กโตรด

วัตถุอื่นๆ ที่นอกเหนือวัตถุที่ใช้ในการทดสอบไม่ควรเข้าใกล้วัตถุทดสอบหรืออิเล็กโตรดกว่าระยะ 1- 1.5 เท่าของระยะที่วัตถุทดสอบจะเกิดการอาร์กแห้ง หรือระยะ 3 ฟุต (914 มิลลิเมตร) แล้วแต่ค่าใดจะมากกว่า



ภาพที่ 2.3 การติดตั้งลูกถ้วยแบบแขวน

2.4.2 การปรับแก้ค่าเนื่องจากผลของความดันอากาศ, อุณหภูมิและความชื้น [1-3]

เพื่อให้การทดสอบและค่าจากการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานจึงควรมีการปรับแก้ค่าการปรับแก้ค่าโดยจะต้องแก้ผลของความดันอากาศ, อุณหภูมิและความชื้น โดยการปรับแก้ค่าจะถูกระบุในมาตรฐานทั้ง 3 มาตรฐาน ได้แก่ IEEE Std.4 [1], IEC 60060-1 [2] และANSI C29.1 [3] ซึ่งทั้ง 3 มาตรฐานนี้จะระบุวิธีปรับแก้ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะแบ่งตัวแปรที่ใช้ปรับแก้ออกเป็น 2 อย่างคือ ตัวปรับแก้ผลของความดันอากาศและตัวปรับแก้ผลของความชื้น ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขของสภาวะมาตรฐานของ IEEE Std.4 [1], IEC 60060-1 [2] จะระบุให้

อุณหภูมิ (t_0) = 20°C

ความชื้นสัมบูรณ์ (h_0) = 11 g/m^3

ความดันบรรยากาศ (b_0) = 101.3 kPa (1013 mbar)

โดยที่ความดันบรรยากาศ 101.3kPaจะเท่ากับ 760 mm.Hg จึงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$b = 0.1333H \tag{2.11}$$

โดย b คือ ความดันบรรยากาศในหน่วย kPa

H คือ ความดันบรรยากาศในหน่วย mm.Hg

การแก้ค่าแรงดันในสภาวะห้องทดสอบเพื่อเทียบหาแรงดันมาตรฐานโดย

$$V = V_0 K \tag{2.12}$$

เมื่อ V คือ แรงดันในสภาวะห้องทดสอบ

V_0 คือ แรงดันมาตรฐาน

K คือ ค่าแก้โดยสามารถหาได้จาก

$$K = k_d k_h \tag{2.13}$$

เมื่อ k_d คือ ค่าแก้เนื่องจากผลของความดันบรรยากาศ

k_h คือ ค่าแก้เนื่องจากผลของความชื้น

ค่า k_d สามารถหาได้จาก

$$k_d = \delta^m \tag{2.14}$$

เมื่อ δ คือค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%) ซึ่งหาได้จาก

$$\delta = \left(\frac{b}{b_0}\right)\left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right) \tag{2.15}$$

ค่า k_d ที่เชื่อถือได้จะมีค่าอยู่ในช่วง $0.8 < k_d < 1.05$

ค่า k_h สามารถหาได้จาก

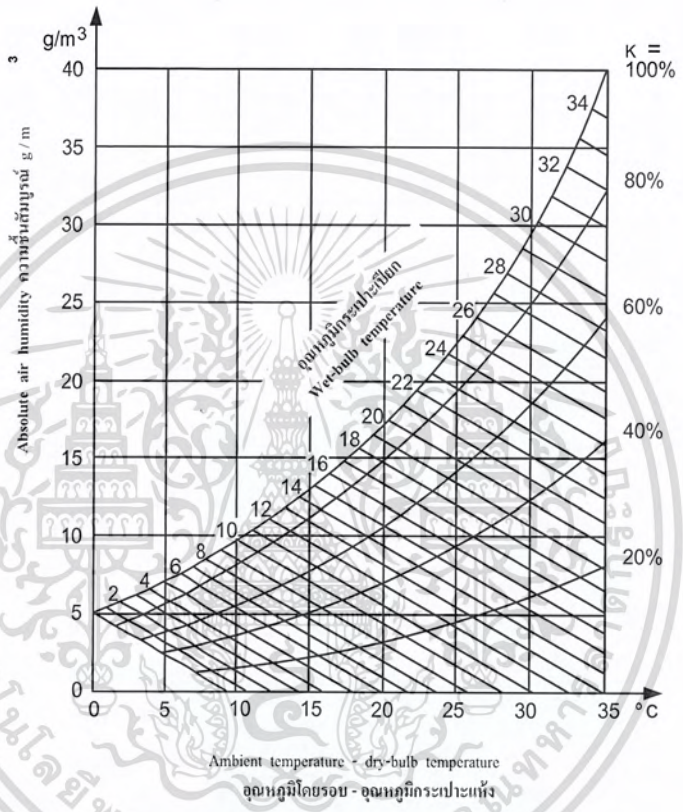
$$k_d = k^w \tag{2.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่า k หาได้จาก

$$k = 1 + 0.012(\frac{h}{\delta} - 11) \quad (2.17)$$

เมื่อ h คือค่าความชื้นสัมบูรณ์ (g/m^3) ซึ่งสามารถหาได้จาก รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมบูรณ์ (g/m^3) อุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}C$) และความชื้นสัมพัทธ์ (%)

และหาค่า m และ w ได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า g ค่า m และค่า w ในการหาค่าแก้

g	m	w
<0.2	0	0
0.2 – 1.0	g(g-0.2)/0.8	g(g-0.2)/0.8
1.0 – 1.2	1.0	1.0
1.2 – 2.0	1.0	(2.2-g)(2.0-g/0.8)
>2.0	1.0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า g หาได้จาก

$$g = \frac{V_B}{500L\delta k} \tag{2.18}$$

เมื่อ V_B คือ ค่าร้อยละ 50 ของแรงดัน (ในหน่วย kV peak) ที่ทำให้เกิดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีของกระแสที่ไหลผ่านตัวกลางที่เป็นฉนวน (เช่น การเกิดเบรกดาวน์ การวาบไฟตามผิว) แต่ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะให้ใช้ค่าเท่ากับ 1.1

L คือ ระยะการเกิดดิสชาร์จต่ำสุด (m)

δ คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%)

ค่า k และค่า h หาได้จาก สมการ (2.17) และ รูปที่ 2.4 ตามลำดับ

สำหรับสมการ (2.17) ค่าควรอยู่ในช่วง $1\ g/m^3 < \frac{h}{\delta} < 15\ g/m^3$.ds

แต่เงื่อนไขของสภาวะมาตรฐานของ ANSI c29.1 [3] จะระบุให้

อุณหภูมิ = $25^{\circ}C$

ความชื้นสมบูรณ์ = $11\ g/m^3$

ความดันบรรยากาศ = 100.86 kPa (29.92 inch.Hg)

และ K_d หาได้จาก

$$k_d = 0.392\left(\frac{P}{273 + T}\right) \tag{2.19}$$

เมื่อ P คือ ความดันบรรยากาศ (mm.Hg)

T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

2.4.3 การควบคุมแรงดันในการทดสอบ

1. การทดสอบวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำในสภาวะแห้ง (Low-Frequency Dry Flashover Voltage test)

1) การขึ้นแรงดัน

เมื่อเริ่มจ่ายแรงดันอาจจะขึ้นแรงดันอย่างรวดเร็วไปที่ค่าประมาณ 75% ของค่าแรงดันที่คาดว่าจะเกิดการวาบไฟตามผิวในสภาวะแห้ง ในช่วงหลังจาก 75 % อัตราการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้าจนถึงค่าที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวจะต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 5 วินาที และไม่เกิน 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวในสภาวะแห้ง

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวในสภาวะแห้งของอุปกรณ์ทดสอบจะต้องเกิดอย่างต่อเนื่องกันไม่ต่ำกว่า 5 ครั้ง และระยะเวลาของการเกิดวาบไฟตามผิวอย่างต่อเนื่องไม่ควรน้อยกว่า 15 วินาที และไม่เกิน 5 นาที

2. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันความถี่ต่ำในสภาวะแห้ง (Low frequency Dry withstand voltage test)

1) การขึ้นแรงดัน

การขึ้นแรงดันจะขึ้นทันทีไปที่ 75 % ของแรงดันไฟฟ้าทดสอบคงทนในสภาวะแห้ง จากนั้นค่อยๆขึ้นไปที่ค่าแรงดันไฟฟ้าทดสอบโดยจะต้องใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 5 วินาทีและไม่เกิน 30 วินาที

2) ค่าแรงดันทดสอบและเวลาทดสอบ

ค่าแรงดันไฟฟ้าทดสอบได้จากกราฟแรงดันไฟฟ้าคงทนในสภาวะแห้งร่วมกับการคำนวณด้วยการแก้ไขสภาพอากาศ และเวลาในการทำการทดสอบคงแรงดันทดสอบไว้เป็นเวลา 1 นาที

2.5 หลักการสร้างชุดควบคุม

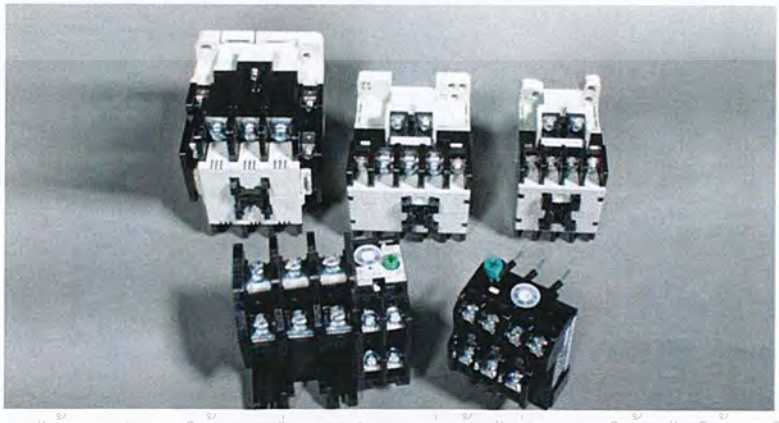
2.5.1 หลักการออกแบบชุดควบคุม [9]

ในการออกแบบระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการกระแสไฟฟ้ามากๆนั้น นิยมออกแบบให้ประกอบเป็นสองส่วนหลักๆ ส่วนแรกคือวงจรกำลังเป็นวงจรหลักเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า และอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์วัดเข้าไปในส่วนนี้ ส่วนที่สองคือวงจรควบคุมเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรกำลังให้ทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยวงจรควบคุมนั้นจะทำการสั่งตัด-ต่อวงจรกำลังผ่านแมกเนติกคอนแทกเตอร์

2.5.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในชุดควบคุม

1. แมกเนติกคอนแทกเตอร์ (Magnetic Contactor)

คือสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้า ทำงานโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยในการเปิด-ปิดหน้าสัมผัสในการตัดต่อวงจรกำลังที่ใช้กระแสสูง (30-300A) เช่น ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 แมกเนติคอนแทกเตอร์ (Magnetic Contactor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกเนติกคอนแทกเตอร์ที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งเป็น 4 ชนิดตามลักษณะของโหลดและการนำไปใช้งานมีดังนี้

1) AC 1: เป็นแมกเนติกคอนแทกเตอร์ ที่เหมาะสำหรับโหลดที่เป็นความต้านทานหรือในวงจรที่มีอินดักทีฟน้อยๆ

2) AC 2: เป็นแมกเนติกคอนแทกเตอร์ ที่เหมาะสำหรับใช้กับโหลดที่เป็นสปริงมอเตอร์

3) AC 3: เป็นแมกเนติกคอนแทกเตอร์ ที่เหมาะสำหรับการสตาร์ทและหยุดโหลดที่เป็นมอเตอร์กรงกระรอก

4) AC 4: เป็นแมกเนติกคอนแทกเตอร์ ที่เหมาะสำหรับการสตาร์ท - หยุดมอเตอร์วงจร jogging และการกลับทางหมุนมอเตอร์แบบกรงกระรอก

ในการเลือกแมกเนติกคอนแทกเตอร์ในการใช้งานให้เหมาะสมกับมอเตอร์นั้น จะพิจารณาที่กระแสสูงสุดในการใช้งาน (Rated Current) และแรงดันของมอเตอร์ ต้องเลือกแมกเนติกคอนแทกเตอร์ที่มีกระแสสูงกว่ากระแสที่ใช้งานของมอเตอร์ ที่มีแรงดันเท่ากัน ในการพิจารณาเลือกแมกเนติกคอนแทกเตอร์ใช้งานพิจารณาดังนี้

ก. ลักษณะของโหลดและการใช้งาน

ข. แรงดันและความถี่

ค. สถานที่ใช้งาน

ง. ความบ่อยครั้งในการใช้งาน

จ. การป้องกันจากการสัมผัสและการป้องกันน้ำ

ฉ. ความคงทนทางกลและทางไฟฟ้า

ข้อดีของการใช้รีเลย์และคอนแทกเตอร์เมื่อเทียบกับสวิตช์กำลังอื่นๆ

1) สามารถต่อควบคุมไปอยู่ในตำแหน่งที่ปลอดภัยและห่างจากวงจรกำลังแทนการสับสวิตช์ด้วยมือโดยตรง ทำให้ผู้ควบคุมปลอดภัยจากอันตรายจากการตัด-ต่อวงจรกำลังที่มีกระแสสูง

2) ให้ความสะดวกในการควบคุม เพราะสามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น สวิตช์ปุ่มกด, สวิตช์ความดัน, สวิตช์การไหล, สวิตช์จำกัดระยะ ฯลฯ ในการควบคุมวงจรต่างๆ เช่น วงจรลิฟต์ ซึ่งจะสามารถควบคุมให้หยุดได้เองเมื่อลิฟต์วิ่งถึงชั้นที่ต้องการ

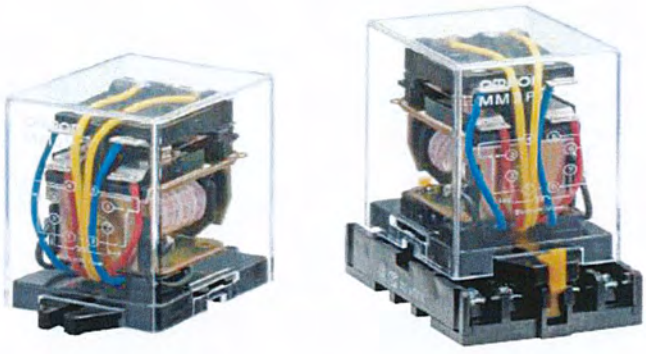
3) ประหยัดสายไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยมือ (Manual Control) ในบางกรณีภาระทางไฟฟ้า ที่ต้องการควบคุม จำเป็นต้องอยู่ห่างจากแหล่งจ่ายไฟและจุดควบคุม ถ้าใช้การควบคุมมือสายไฟฟ้าของวงจรกำลังจะต้องเดินจากแหล่งจ่ายไฟไปยังจุดควบคุมจากนั้นจึงเดินไปที่ภาระทางไฟฟ้า แต่เมื่อใช้การควบคุมด้วยคอนแทกเตอร์จะช่วยประหยัดสายไฟฟ้า เพราะสายไฟฟ้าของวงจรกำลังสามารถเดินจากแหล่งจ่ายไฟไปยังภาระทางไฟฟ้าได้โดยตรง ส่วนสายไฟฟ้าที่เดินไปยังจุดควบคุมจะเป็นสายไฟฟ้าของวงจรควบคุม ซึ่งมีขนาดเล็ก

2. รีเลย์ช่วยหรือรีเลย์ควบคุม (Control Relay)

การทำงานอาศัยอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าในการเปิด-ปิดหน้าสัมผัส เหมือนกับหลักการของแมกเนติกคอนแทกเตอร์ แต่รีเลย์ช่วยทนกระแสได้ต่ำกว่า หน้าสัมผัสของรีเลย์ช่วยเล็กกว่าหน้าสัมผัสของแมกเนติกคอนแทกเตอร์ ลักษณะหน้าสัมผัสของรีเลย์ช่วยมีสองชนิด ได้แก่ หน้าสัมผัสปกติเปิด (Normally Open : N.O.) และหน้าสัมผัสปกติปิด (Normally Close : N.C.) จำนวนหน้าสัมผัสและชนิดของหน้าสัมผัสขึ้นอยู่กับบริษัทผลิตและการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็น[illegible]ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

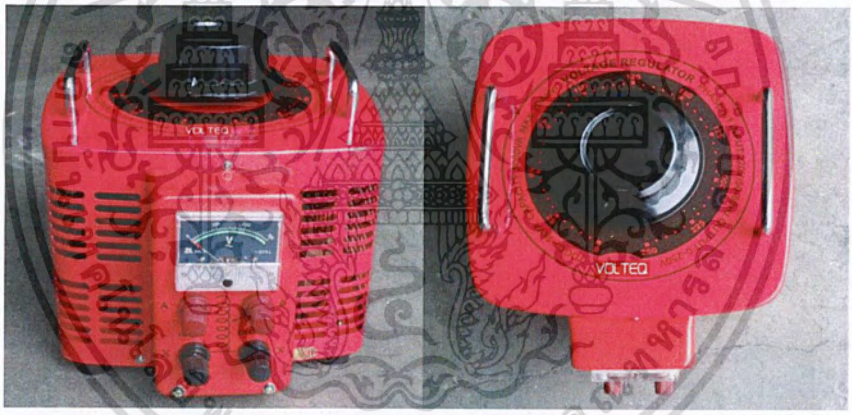
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ภาพที่ 2.4 รีเลย์ช่วยหรือรีเลย์ควบคุม (Control Relay)

3. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน (Variac)

เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีลักษณะการพันขดลวดทุกขดบนแกนเดียวกันมีขดลวดพันออกมาใช้งานเพียงขดเดียว มักใช้กับการปรับขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้กับวงจรไฟฟ้าตามที่ต้องการ



ภาพที่ 2.5 หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน (Variac)

4. รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay)

เป็นรีเลย์ที่ทำหน้าที่ในการป้องกันกระแสเกิน โดยตรวจจับกระแสผ่านทางหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า และภายในตัวรีเลย์จะมีหน้าสัมผัสเมื่อตรวจพบว่ามีกระแสเกินค่าที่ตั้งไว้ รีเลย์จะทำงานเพื่อสั่งตัดกำลังไฟฟ้าในระบบที่ต้องการป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

144321

ภาพที่ 2.6 รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay)

5. หม้อแปลงกระแส (Current Transformer; CT)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการวัดกระแสไฟฟ้าโดยต่อร่วมกับเครื่องวัดกระแส โดยทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ให้เหมาะกับพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดกระแสของเครื่องวัด โดยจะมีอัตราส่วนของการแปลงกระแสจากด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิ เช่น อัตราส่วนของ CT 300:5 มีความหมายว่า CT มีค่าของกระแสด้านปฐมภูมิสูงสุดเท่ากับ 300 A และค่ากระแสด้านทุติยภูมิสูงสุดเท่ากับ 5 A เป็นต้น

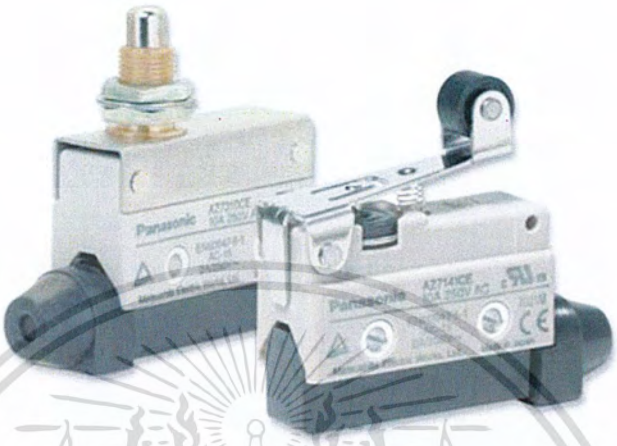
เบอร์เดน หมายถึงกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกตัวต่ออนุกรมกับขดทุติยภูมิ มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในเครื่องมือวัดรวมกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายวัดมีค่าภายใต้เบอร์เดนของหม้อแปลงแล้ว ความผิดพลาดจากการวัดจะเป็นไฟตามคลาสของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าเท่านั้น [9]

ภาพที่ 2.7 หม้อแปลงกระแส (Current Transformer; CT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สวิตช์จำกัดระยะ (Limit Switch)

เป็นสวิตช์ที่จำกัดระยะทาง การทำงานอาศัยแรงกดภายนอกมากระทำเช่น วางของทับที่ปุ่มกดหรือลูกเบี้ยวมาชนที่ปุ่มกด และเป็นผลทำให้หน้าสัมผัสที่ต่ออยู่กับก้านชน เปิด-ปิด ตามจังหวะของการชน



ภาพที่ 2.9 สวิตช์จำกัดระยะ (Limit Switch)

7. สปีดคอนโทรล หรือ ESC (Electronic Speed Control)

ทำหน้าที่ ควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้หมุนช้า-เร็ว เดินหน้า-ถอยหลัง หรือเบรก ตามสัญญาณควบคุมที่ได้รับจาก กล่องภาครับ (Receiver)

ภาพที่ 2.10 สปีดคอนโทรล หรือ ESC (Electronic Speed Control)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 แนวคิดพื้นฐาน

ในการออกแบบชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับจะประกอบด้วย 2 วงจรหลัก คือ วงจรกำลังเป็นส่วนของวงจรที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์ และเป็นวงจรหลักที่ใช้ในการทำงานของระบบชุดควบคุม และวงจรควบคุมใช้สำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ภายในชุดควบคุม

โดยชุดควบคุมทดสอบแรงดันกระแสสลับ จะใช้ในการปรับแรงดันทดสอบให้เป็นไปตามที่ต้องการ เพื่อนำไปใช้กับการทดสอบตัวอุปกรณ์ต่างๆ โดยอุปกรณ์ทดสอบแต่ละชนิดจะใช้ระดับแรงดันที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ของผู้ที่ต้องการทดสอบ ชุดควบคุมแรงดันทดสอบนี้ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติต่างๆ ที่จำเป็นต่อการใช้งานและการทดสอบ

3.2 การออกแบบชุดควบคุมแรงดัน

3.2.1 การกำหนดคุณสมบัติของตู้ควบคุม

ในขั้นต้นเรากำหนดคุณสมบัติของตู้ควบคุมเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบวงจรควบคุมของตู้ควบคุม ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) สามารถเปิด-ปิดได้โดยกดสวิตช์

2) เมื่อทำการกดปุ่มเปิดสวิตช์ หลอดไฟบอกสถานะของตู้ควบคุมจะติด

3) เมื่อทำการกดปุ่มเปิดสวิตช์จะไม่สามารถทำการเปิดได้ ถ้าหม้อแปลงปรับระดับแรงดันไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

4) สามารถปรับอัตราความเร็วการเพิ่ม / ลดระดับแรงดันได้

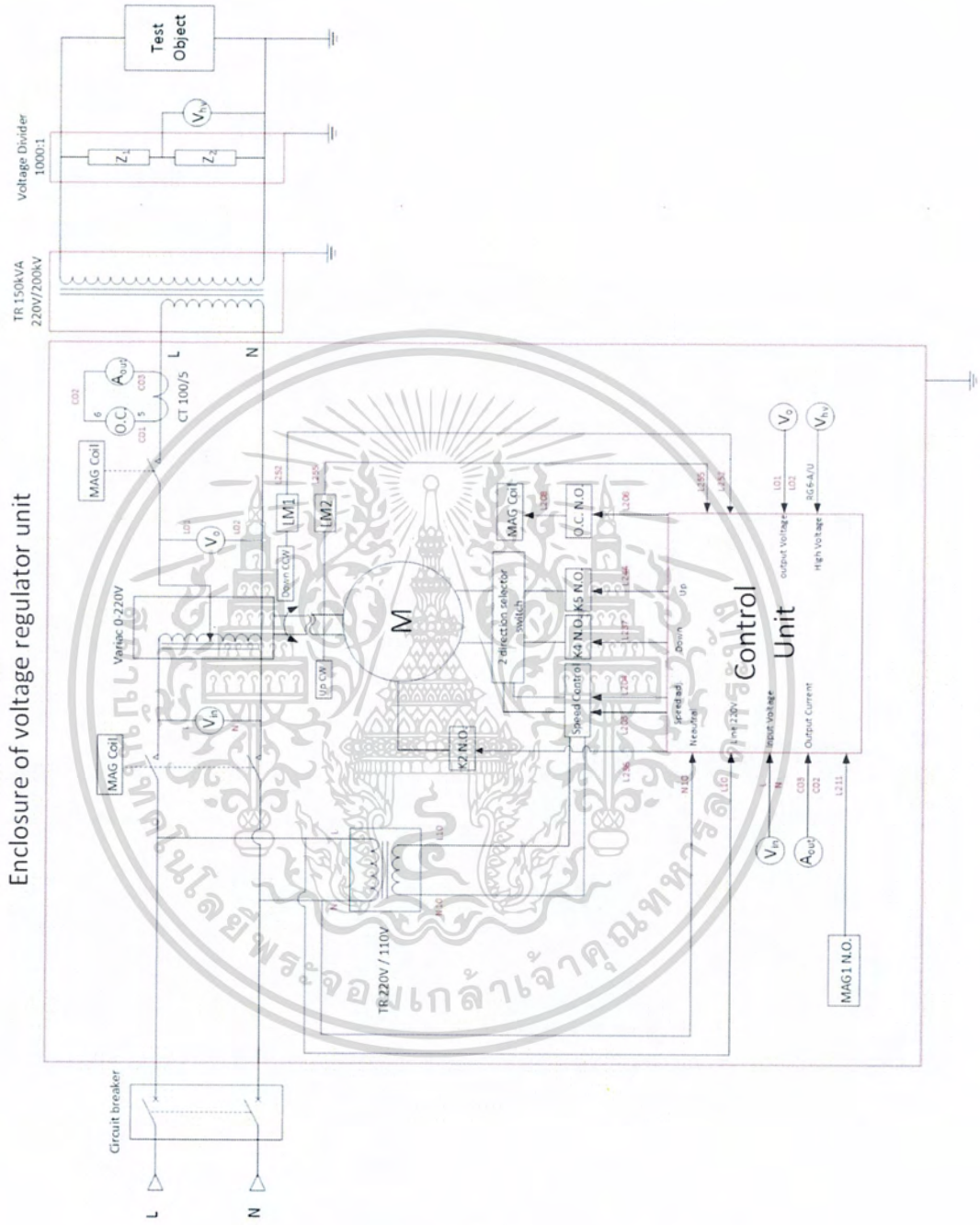
5) มีระบบหยุดมอเตอร์อัตโนมัติเมื่อแรงดันอยู่ที่ 0 โวลต์ หรือ 220 โวลต์ เพื่อป้องกันมอเตอร์เสียหายจากการรับภาระทางไฟฟ้าที่มากเกิน

6) เมื่อมีการกดปุ่ม Emergency จะต้องมีการตัดวงจรการทำงานของชุดควบคุมและไฟที่ป้อนเข้าวงจรทดสอบทั้งหมด โดยมีไฟแสดงสถานะปรากฏขึ้น

7) มีการติดตั้ง Over Current Relay ไว้เพื่อขณะที่ทำการทดสอบหากเกิดการวาบไฟตามผิวหรือการทะลุของฉนวนจนมีกระแสเกินที่ตั้งไว้ Over Current Relay จะสับสวิตช์ออกไฟจะหยุดไหลเข้าระบบ

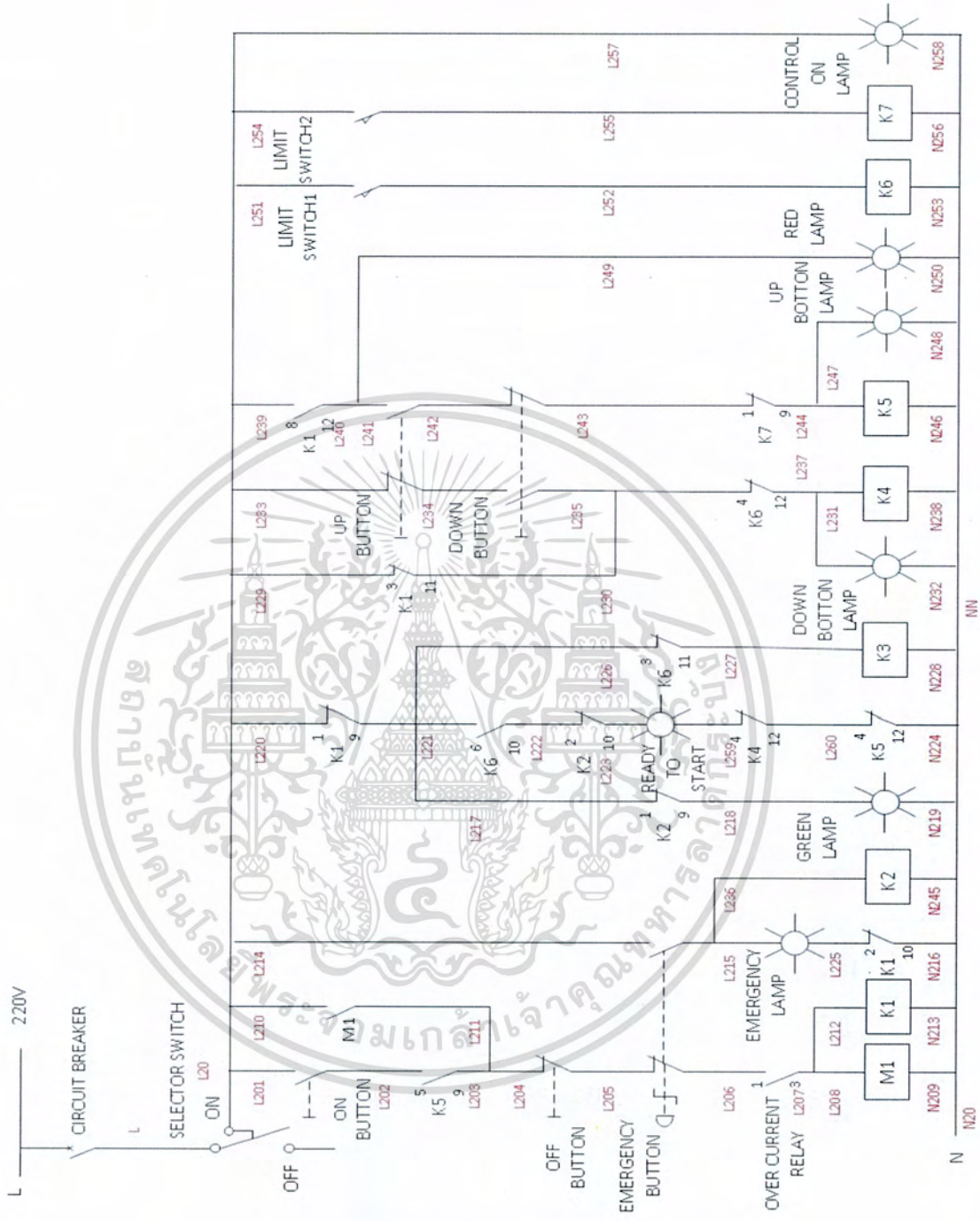
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การออกแบบวงจรควบคุมสำหรับชุดควบคุมแรงดันทดสอบ



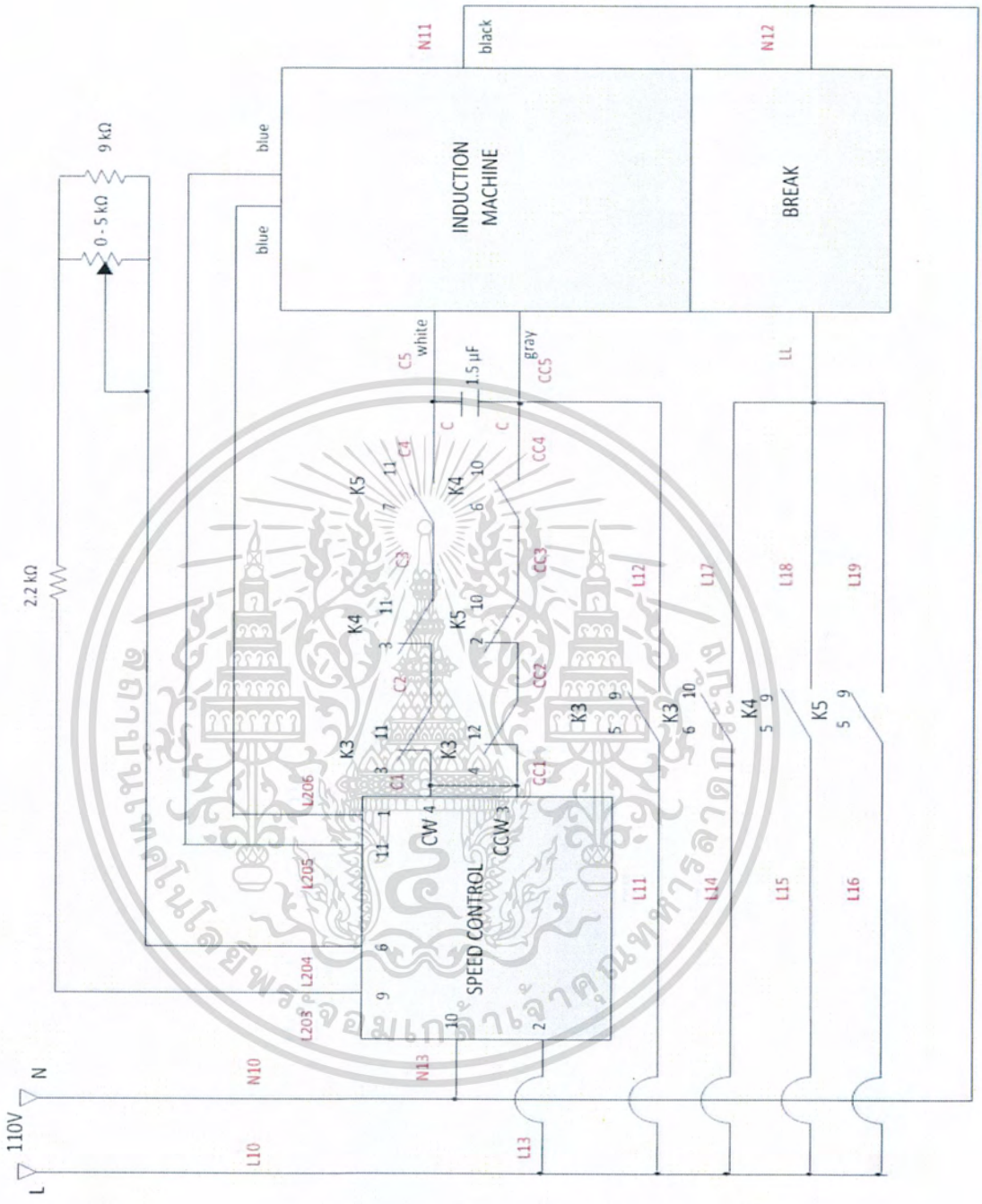
รูปที่ 3.1 วงจรกำลังสำหรับตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรควบคุมสำหรับตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

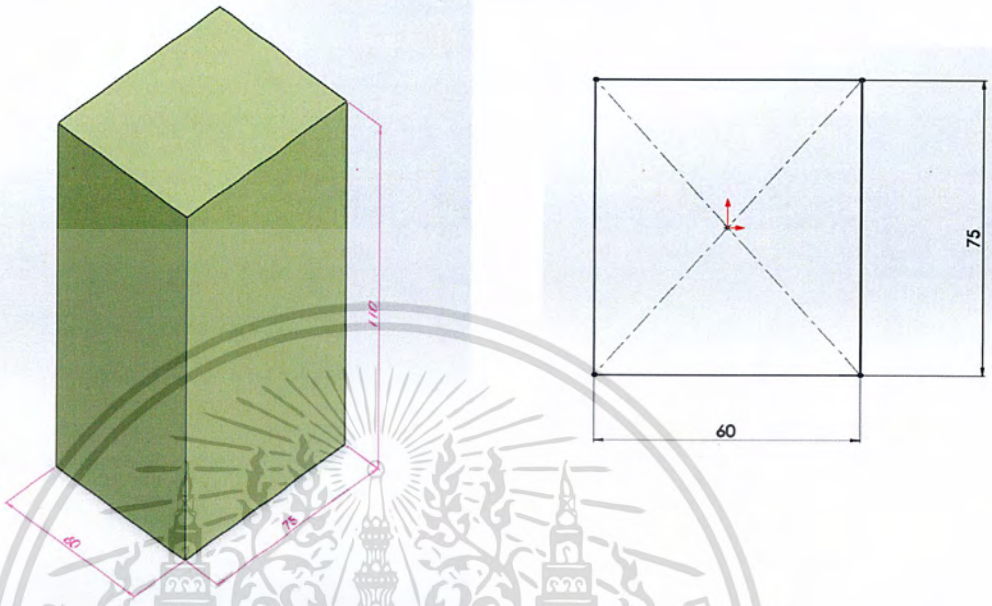


รูปที่ 3.3 วงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

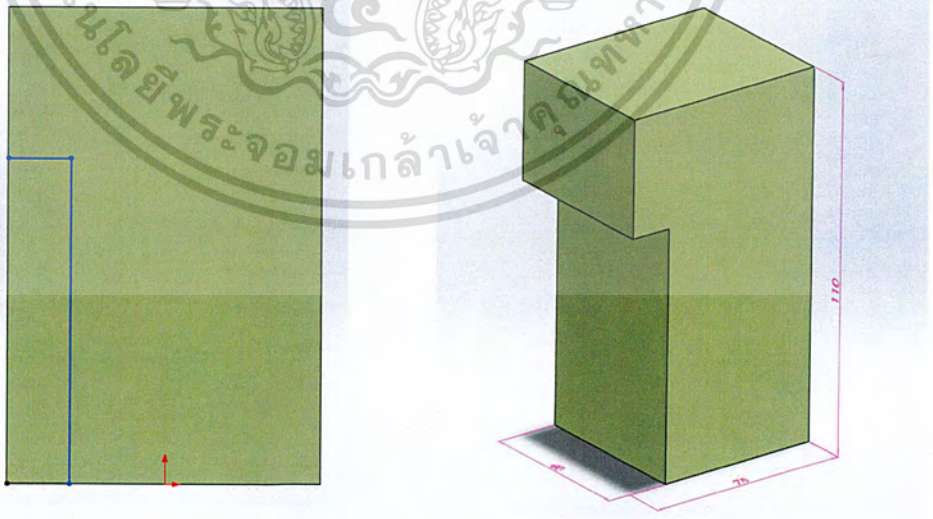
3.2.3 โครงสร้างภายนอก

โครงสร้างภายนอกของตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ ได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Work โดยเราจะเริ่มใช้โครงสร้างของตู้ที่เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของตู้ควบคุมแรงดันทดสอบที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

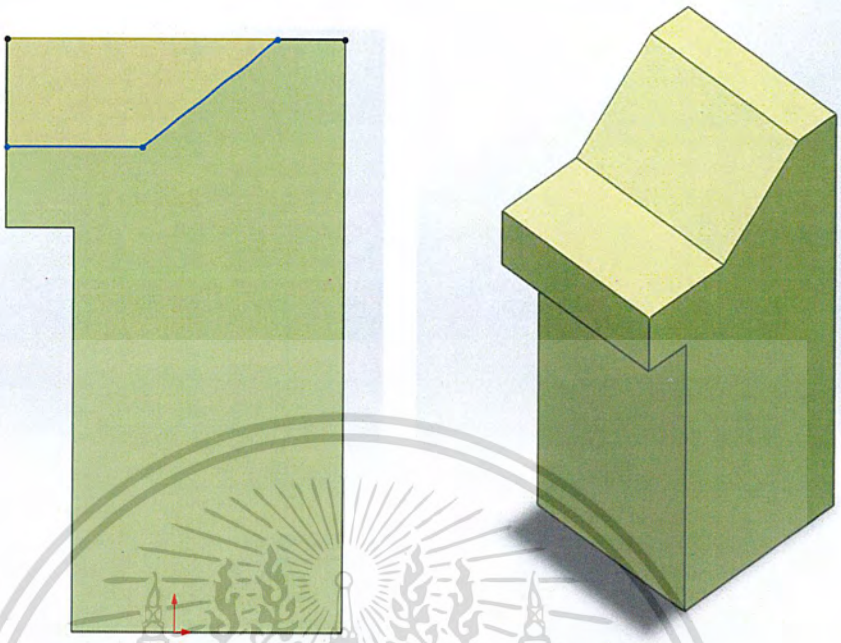
จากนั่นเราจะทำการตัดโครงกล่องที่ได้ทำการเลือกไว้ดังรูปที่ 3.4 ให้มีลักษณะตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.5



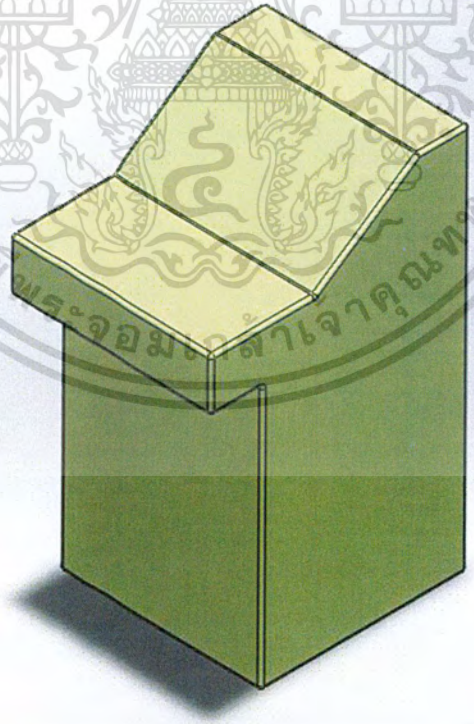
ก) ทำการตัดส่วนล่างของโครงตู้ออกบางส่วน

รูปที่ 3.5 การออกแบบตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



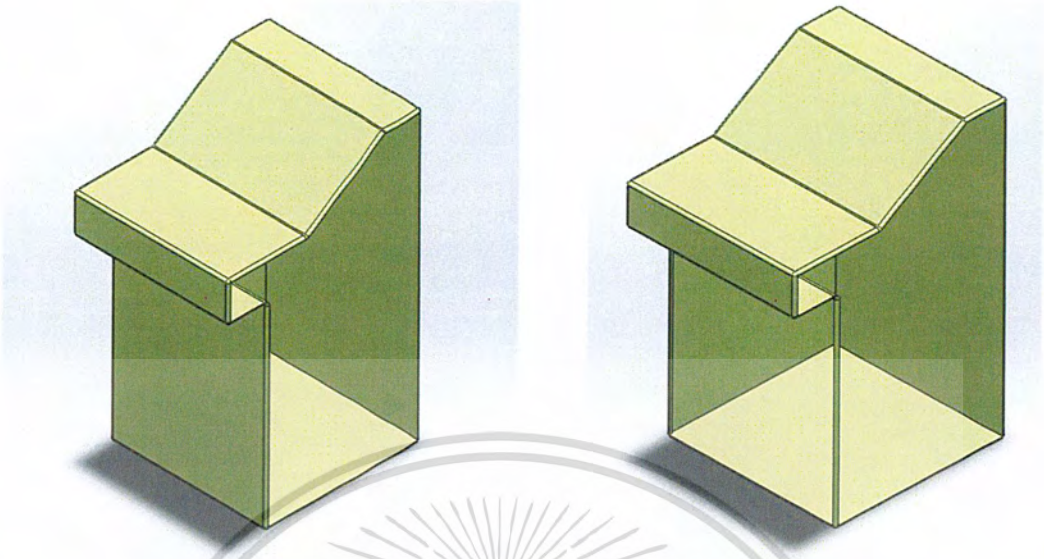
ข) ทำการตัดส่วนบนของโครงตู้ออกบางส่วนเพื่อทำเป็นแผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงาน



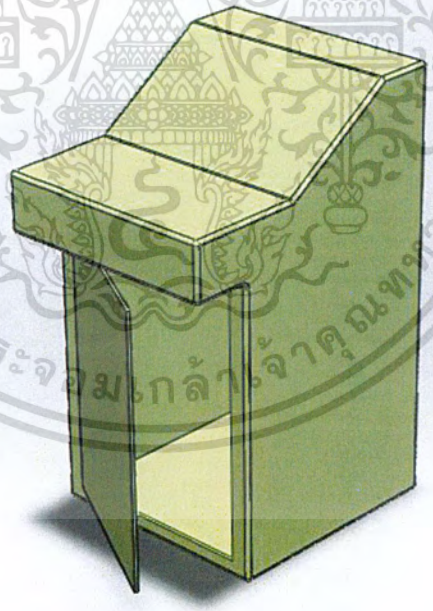
ค) ทำการลบขอบของโครงตู้

รูปที่ 3.5 (ต่อ) การออกแบบตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



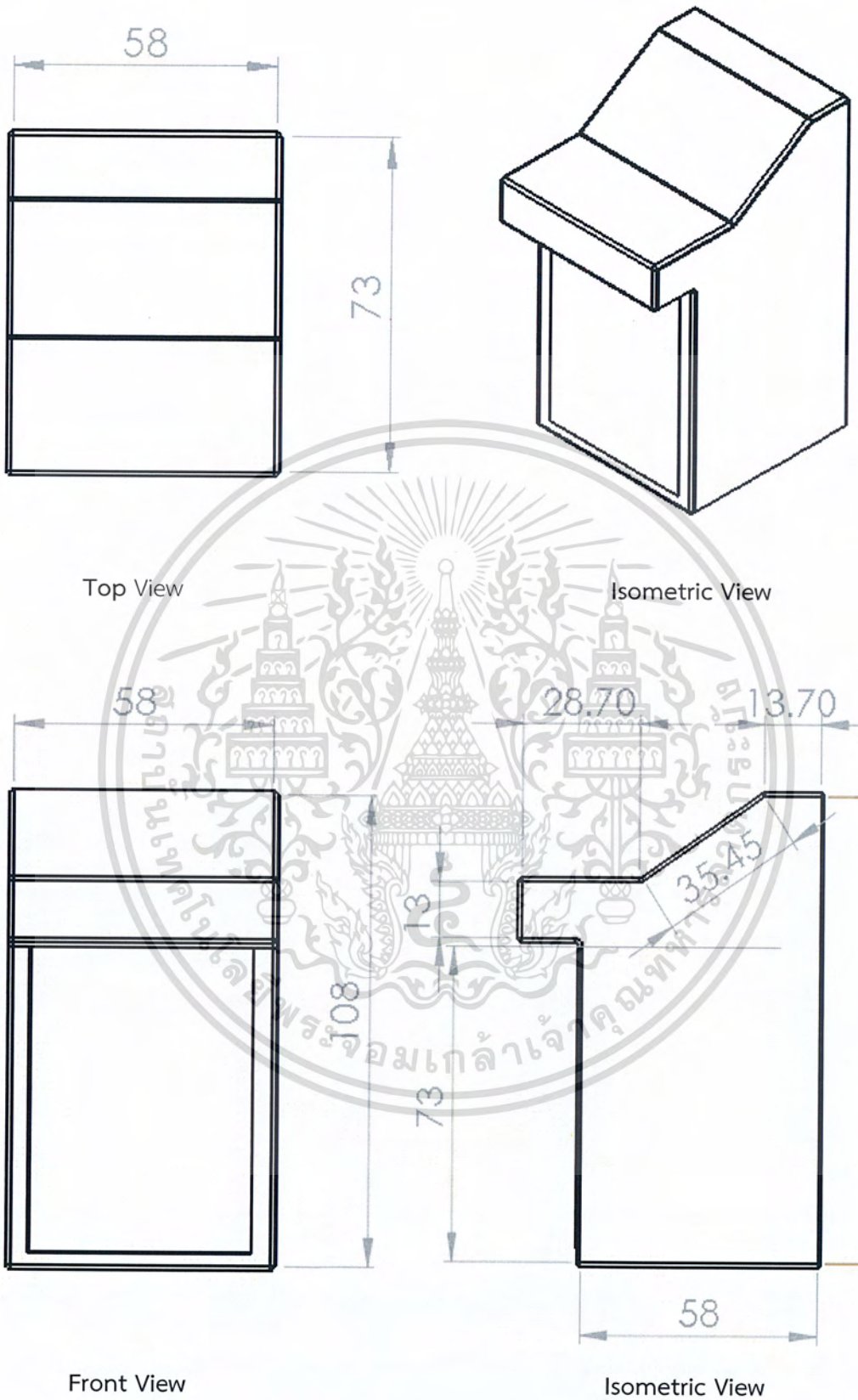
ง) ทำที่ว่างข้างในโครงตู้



ง) โครงตู้ที่มีประตูแล้ว

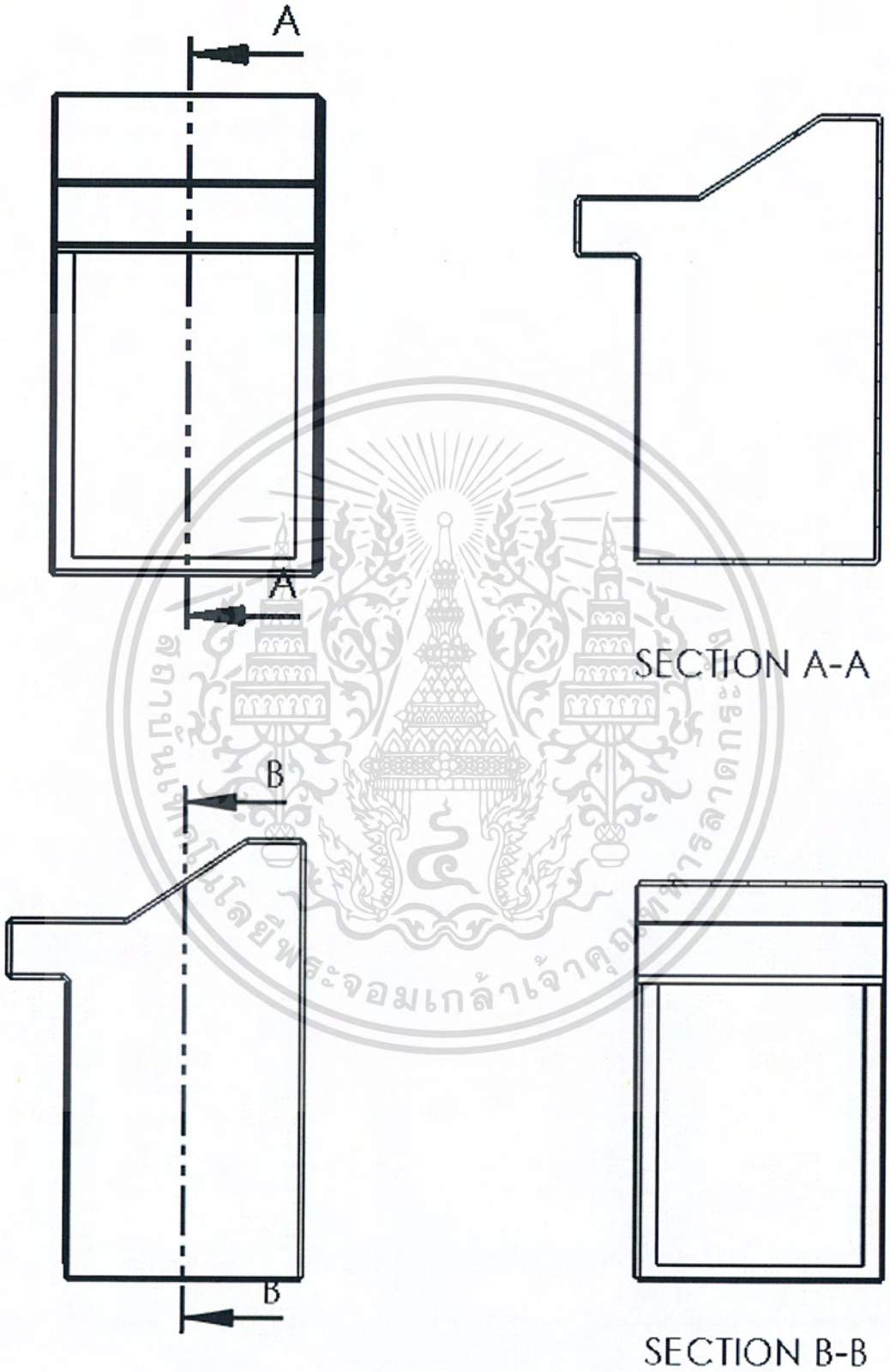
รูปที่ 3.5 (ต่อ) การออกแบบตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



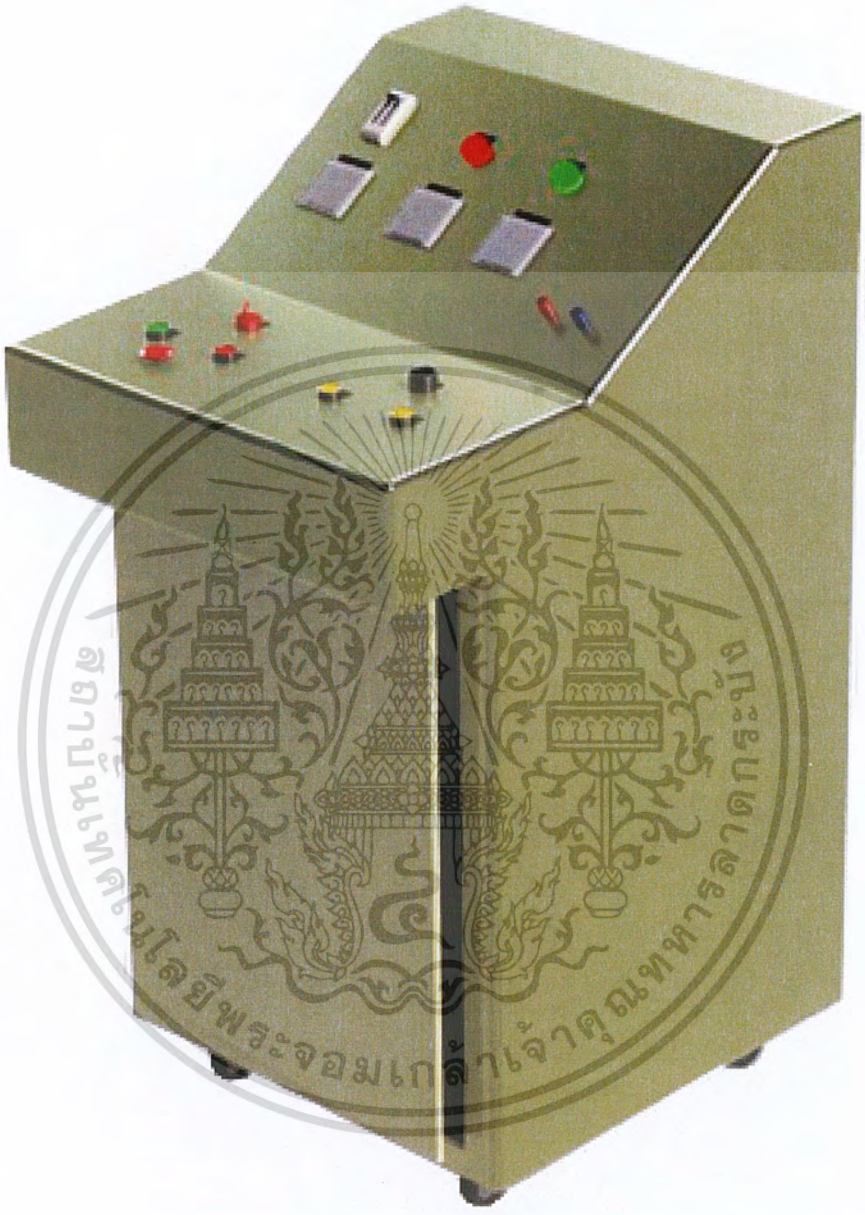
รูปที่ 3.6 ภาพฉายของโครงตู้ (อัตราส่วน 1 หน่วย: 1 เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ภาพตัดของโครงตู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

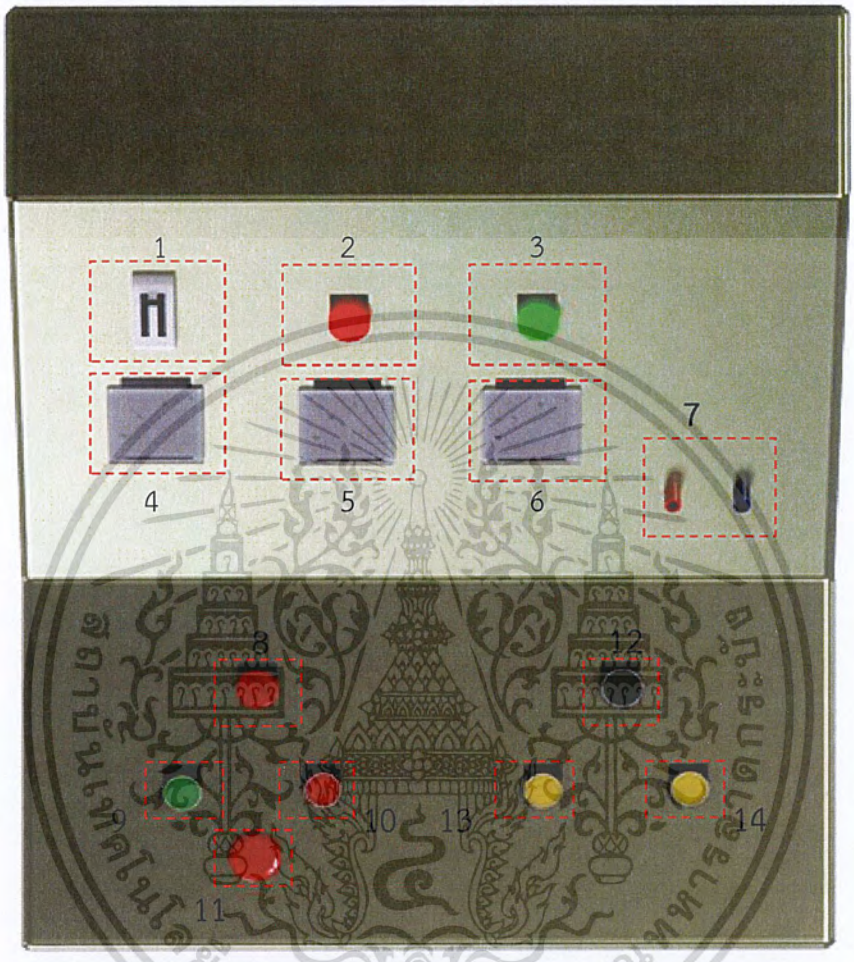


รูปที่ 3.8 ตู้ควบคุมแบบสมบูรณ์จากการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การออกแบบแผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

แผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ ได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Work แบ่งเป็นส่วนต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.9 แผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุม

หมายเลขที่ 1 คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์
หมายเลขที่ 2 คือ หลอดไฟ Emergency
หมายเลขที่ 3 คือ หลอดไฟ Ready to start
หมายเลขที่ 4 คือ มิเตอร์แสดงแรงดันขาเข้า
หมายเลขที่ 5 คือ มิเตอร์แสดงกระแสขาออก
หมายเลขที่ 6 คือ มิเตอร์แสดงแรงดันขาออก
หมายเลขที่ 7 คือ จุดวัดแรงดันสูงจากโวลเตจดิไวเดอร์
หมายเลขที่ 8 คือ Selector switch ON-OFF วงจรควบคุม
หมายเลขที่ 9 คือ ปุ่ม ON button
หมายเลขที่ 10 คือ ปุ่ม OFF button
หมายเลขที่ 11 คือ Emergency button
หมายเลขที่ 12 คือ Speed Selector switch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขที่ 13 คือ ปุ่ม DOWN button
หมายเลขที่ 14 คือ ปุ่ม UP button

3.3 การประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับ

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบโครงสร้างตู้ และวงจรของตู้ควบคุมเพื่อกำหนัดคุณสมบัติและฟังก์ชันการทำงานแล้ว ต่อไปก็จะเป็นขั้นตอนการประกอบสร้างตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

3.3.1 การหาค่าพิกัดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในชุดควบคุม

1. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน (Variac) เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบมีพิกัดกำลังที่ 20 kVA จึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน ที่มีพิกัดที่มากกว่าหรือเท่ากับพิกัดของหม้อแปลง และเพื่อเป็นการรองรับการใช้งานชุดควบคุมกับหม้อแปลงอื่นที่มีพิกัดสูงกว่า
ดังนั้น จึงเลือก หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน พิกัดกำลัง 15 kVA จำนวน 2 ตัว

2. แมกเนติกคอนแทกเตอร์ (Magnetic Contactor) ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรด้านอินพุทของหม้อแปลงซึ่งมีค่ากระแสเท่ากับ 90.91 A จึงเลือกใช้ แมกเนติกคอนแทกเตอร์ ที่มีพิกัดกระแสมากกว่าหรือเท่ากับพิกัดกระแสด้านอินพุทของหม้อแปลง เพื่อป้องกันสภาวะการเกินกระแสเกินในระบบ
ดังนั้น จึงเลือกใช้ แมกเนติกคอนแทกเตอร์ พิกัดกระแส 125 A

3. มอเตอร์ (Motor) ทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนให้ Variac หมุนเพื่อเป็นการปรับระดับแรงดัน
ดังนั้น จึงเลือกใช้ Motor AC single phase 40 W

4. สปีดคอนโทรล (Speed Control) เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์มีพิกัดกำลัง 40 W ดังนั้น สปีดคอนโทรล ควรมีพิกัดกำลังที่มากกว่าหรือเท่ากับพิกัดกำลังของมอเตอร์
ดังนั้น จึงเลือกใช้ สปีดคอนโทรล ที่พิกัดกำลัง 40 W

5. รีเลย์ (Relay) และหลอดไฟ LED เนื่องจากชุดควบคุมถูกจ่ายไฟที่ระดับแรงดัน 220 V
ดังนั้น จึงเลือกใช้ รีเลย์และหลอดไฟ LED พิกัดแรงดัน 220 V

6. โวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์ (Volt meter, Ampere meter) เป็นตัวแสดงค่าแรงดันและกระแสที่ทำการป้อนเข้าไป
ดังนั้น จึงเลือกใช้ โวลต์มิเตอร์ (range 0-220V) และแอมมิเตอร์ (range 0-150A)

7. เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตัด-ต่อวงจร และทำหน้าที่ในการป้องกันการใช้กระแสเกินพิกัด รวมไปถึงป้องกันกระแสลัดวงจร จึงจำเป็นต้องเลือกขนาดให้มากกว่าหรือเท่ากับกระแสขาเข้าของหม้อแปลง และเลือกพิกัดแรงดันเท่ากับขนาดแรงดันของแหล่งจ่าย
ดังนั้น จึงเลือกใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ขนาด (220V, 125 AT)

3.3.2 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบชุดควบคุม

1. สปีดคอนโทรล 40 W	1 ตัว
2. มอเตอร์ 40 W	1 ตัว
3. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน 15 kVA	2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. รีเลย์กระแสเกิน 125 A	1 ตัว
5. แอมป์มิเตอร์ (range 0-150A)	1 ตัว
6. โวลต์มิเตอร์ (range 0-300V)	1 ตัว
7. โวลต์มิเตอร์ (range 0-500V)	1 ตัว
7. รีเลย์ 220 V 5A (4 N.O. 4 N.C.)	4 ตัว
8. รีเลย์ 220 V 10A (4 N.O. 4 N.C.)	3 ตัว
9. สวิตซ์ปุ่มกดและหลอดไฟ LED 220 V	4 ตัว
10. ปุ่มกดฉุกเฉิน 220 V	1 ตัว
11. ไฟแสดงสถานะ 220 V	2 หลอด
12. ลิมิตสวิตซ์ 220 V	2 ตัว
13. ซีเลคเตอร์สวิตซ์	1 ตัว
14. แมกเนติกคอนแทกเตอร์ (125 A)	1 ตัว
15. เซอกิตเบรกเกอร์ (220V, 125 AT)	1 ตัว
16. หม้อแปลงกระแส (100/5)	1 ตัว

3.3.3 ขั้นตอนการทำงานของตู้ควบคุม

1. เปิด (On) เซอร์กิตเบรกเกอร์

2. เลือก Selector switch ไปที่ตำแหน่ง ON วงจรควบคุมจะเริ่มการทำงานและหลอดไฟของปุ่มกด ON (สีเขียว) จะสว่าง ถ้า Variac มีแรงดันไม่เป็นศูนย์ มอเตอร์จะหมุนเพื่อลดระดับแรงดันให้เป็นศูนย์อัตโนมัติ เมื่อแรงดันมีค่าเป็นศูนย์หลอดไฟ Ready to start จะสว่าง

3. เมื่อหลอดไฟ Ready to start สว่างจะสามารถกดปุ่ม On เพื่อเริ่มต้นการทำงานทางด้านแรงสูงได้

4. เมื่อกดปุ่ม ON หลอดไฟของปุ่มกด OFF (สีแดง) จะสว่าง หลอดไฟ Ready to start จะดับ และ Magnetic contactor จะเริ่มทำงาน

5. เมื่อกดปุ่ม ON แล้วจะสามารถ กดปุ่ม UP หรือปุ่ม DOWN เพื่อทำให้มอเตอร์หมุน โรเตอร์ของมอเตอร์จะต่อแกนร่วมกับแกนบิดของ Variac ดังนั้นเมื่อมอเตอร์หมุนจะเป็นการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

6. ทำการทดสอบ โดยปรับระดับแรงดันไฟฟ้าไปยังค่าที่ต้องการและสามารถปรับความเร็วของอัตราการขึ้นแรงดันได้ที่ Speed selector switch

7. สามารถดูค่าตัวแปรต่างๆผ่านทาง Monitor ของตู้ควบคุมขณะทำการทดสอบ

8. เมื่อสิ้นสุดการทดสอบกดปุ่ม OFF มอเตอร์จะหมุนลดระดับแรงดันไปที่ศูนย์อัตโนมัติ หลอดไฟปุ่มกด OFF (สีแดง) จะดับ และ หลอดไฟปุ่มกด ON (สีเขียว) จะสว่าง เมื่อ Variac มีแรงดันเป็นศูนย์หลอดไฟ Ready to start จะสว่าง

9. เลือก Selector switch ไปที่ตำแหน่ง Off หยุดการทำงานของวงจรควบคุม

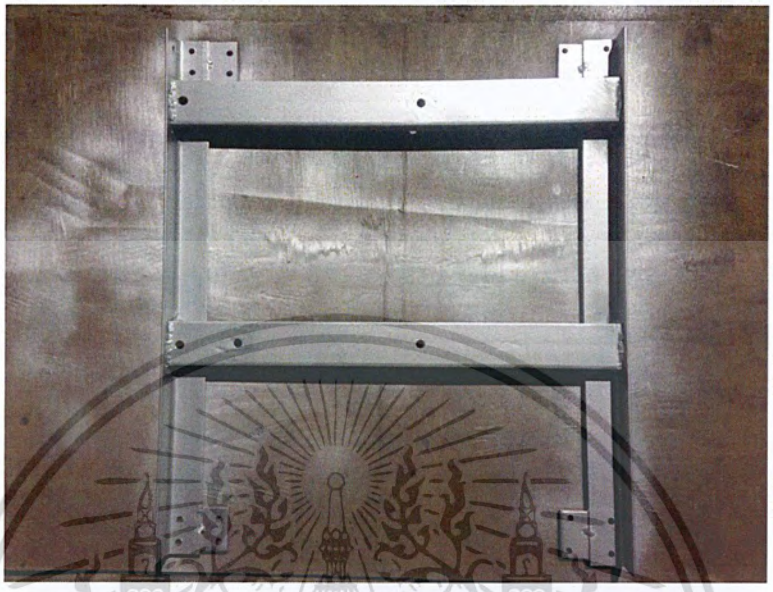
10. ปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

3.3.4 การติดตั้งอุปกรณ์และการประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับ

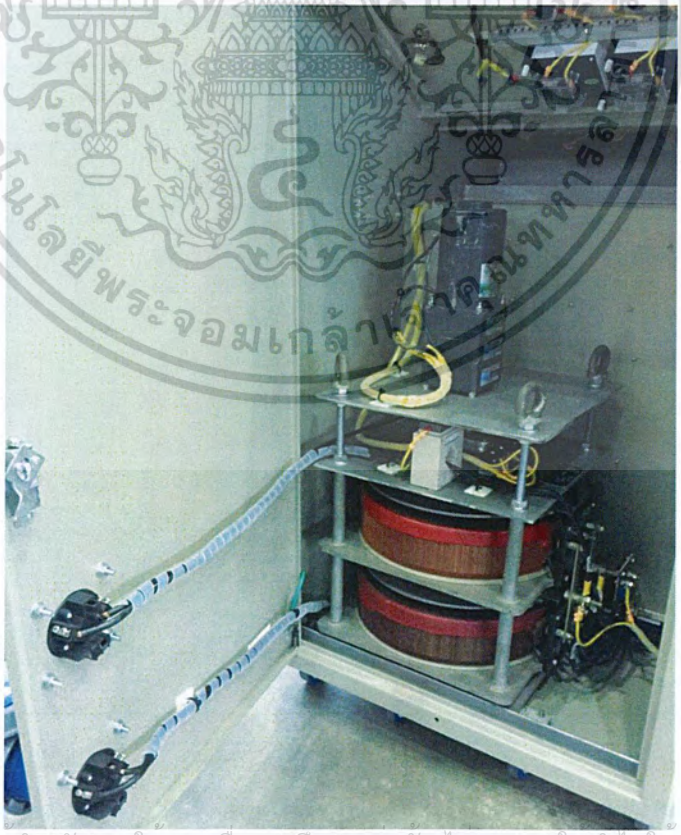
ในชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ วงจรกำลังและวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบวงจรกำลัง (รูปที่ 3.1) ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆตามที่ออกแบบไว้ แต่มีการออกแบบเพิ่มเติมจากแบบที่ออกแบบไว้คือ เพิ่มส่วนฐานของตู้เพื่อรองรับน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน (Variac) ที่มีน้ำหนักมากอาจทำให้บริเวณฐานของตู้เกินการโค้งงอ



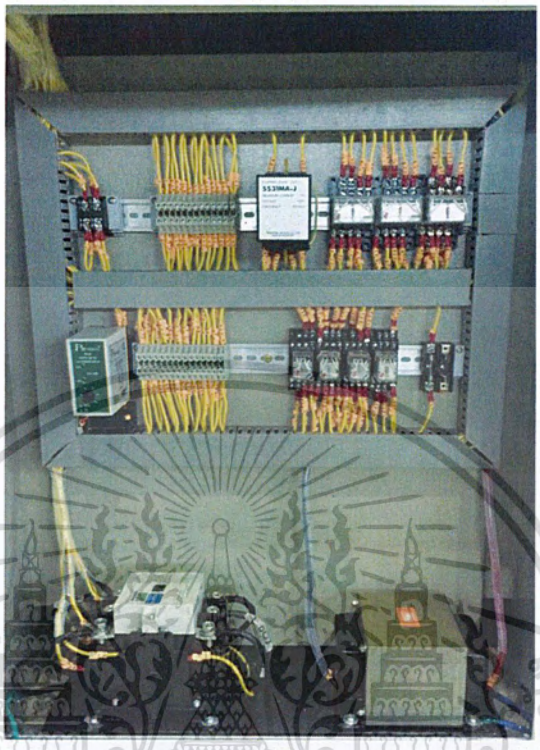
รูปที่ 3.10 ฐานรองรับน้ำหนักหม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน



รูปที่ 3.11 การติดตั้งอุปกรณ์วงจรกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบวงจรควบคุม (รูปที่ 3.2) ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์วงจรควบคุม

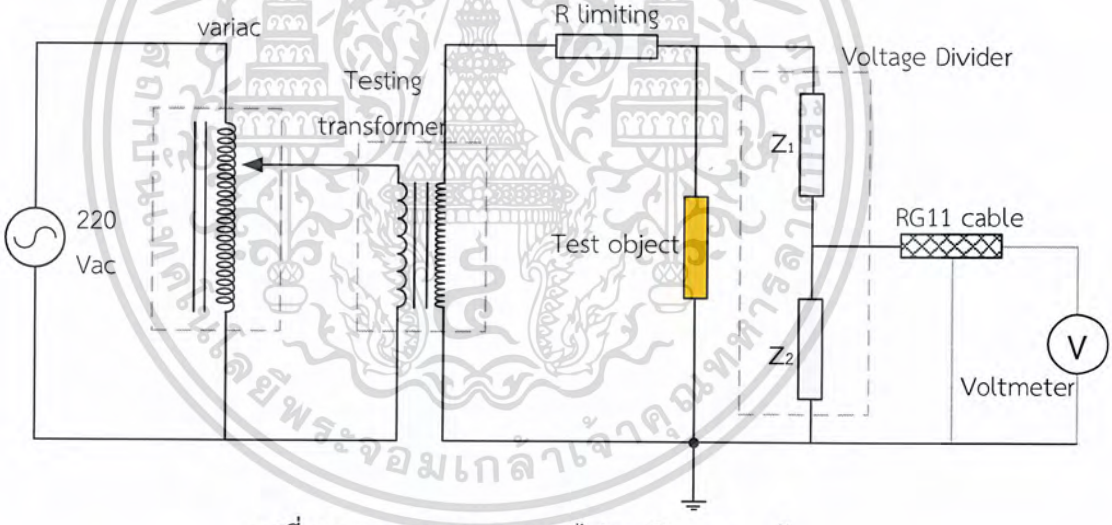
รูปที่ 3.13 ตู้ควบคุมแบบสมบูรณ์จากการประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 วงจรทดสอบ

จากการที่มาตรฐานกำหนดขนาดของแรงดันทดสอบเป็นแรงดันสูง ทำให้ต้องมีการออกแบบวงจรทดสอบที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อผู้ทดสอบ และอุปกรณ์ โดยวงจรที่ทำการออกแบบจะให้มีลักษณะเป็นไปตามรูปที่ 3.13 โดยวงจรรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 V จากระบบไฟฟ้าแรงต่ำ จากนั้นผ่านชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับเพื่อให้สามารถปรับขนาดแรงดันได้ตั้งแต่ 0 ถึง 220 V แล้วจึงต่อเข้ากับหม้อแปลงแรงดันสูงเพื่อแปลงแรงดันต่ำเป็นแรงดันสูงให้ขนาดแรงดันเหมาะสมกับการทดสอบและสามารถปรับค่าได้ ซึ่งก่อนที่จะเข้าวัสดุทดสอบจะต่อผ่านความต้านทานหน่วงกระแสก่อนเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรหรือเบรคดาวน์ ส่วนอุปกรณ์การวัดจะนำมาต่อคร่อมกับวัสดุทดสอบเพื่อวัดแรงดันที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบโดยประกอบไปด้วยโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ต่อเข้ากับโวลต์มิเตอร์ผ่านสายโคแอกเชียลซึ่งตลอดสายมีชีลด์เป็นโลหะต่อลงดินป้องกันสัญญาณรบกวนตลอดแนวสาย



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบการวาบไฟตามผิวสภาวะแห้ง

4.2 การติดตั้งวงจรทดสอบและวัตถุทดสอบ

เพื่อความถูกต้อง และความปลอดภัยในการทดสอบ การติดตั้งวงจรการทดสอบและวัสดุทดสอบควรคำนึงถึงมาตรการความปลอดภัยต่างๆ (หัวข้อที่ 2.4.1) โดยอุปกรณ์ต่างๆมีพิกัดดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

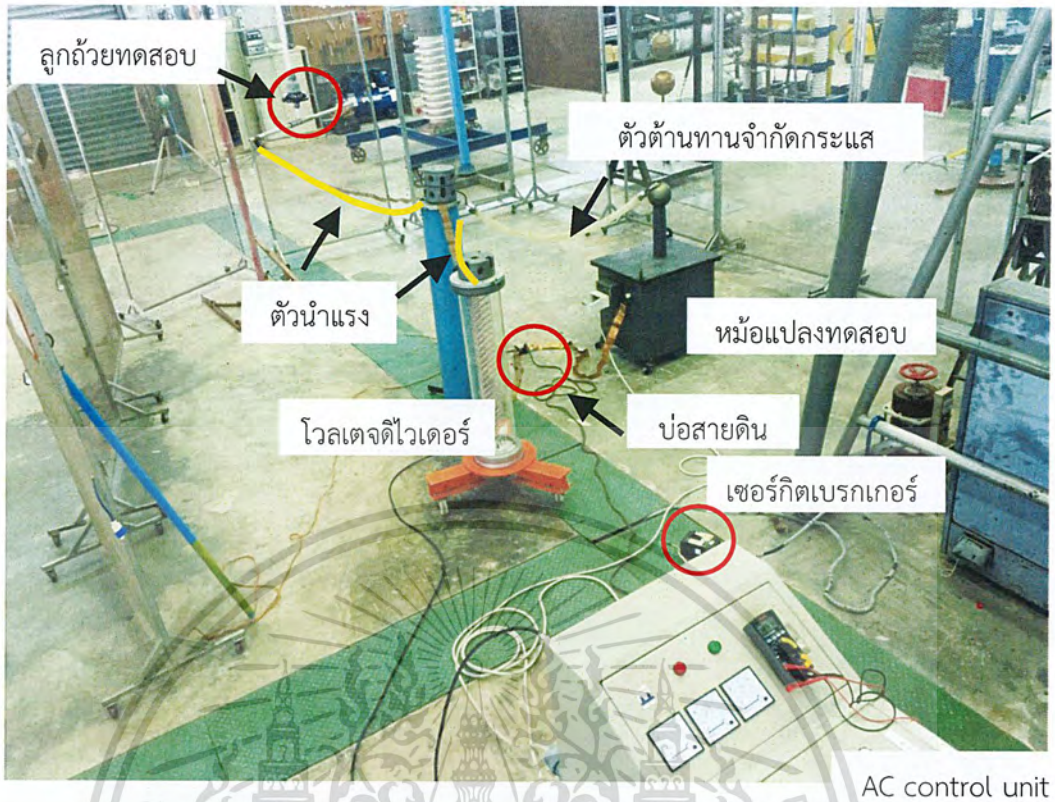
	หม้อแปลงทดสอบ	ชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับ
พิกัดกำลัง	5 kVA	20 kVA
พิกัดแรงดัน	220 V / 100 kV 50 Hz	220 V / 0-220 V 50 Hz
พิกัดกระแส	23 A / 50 mA	90 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

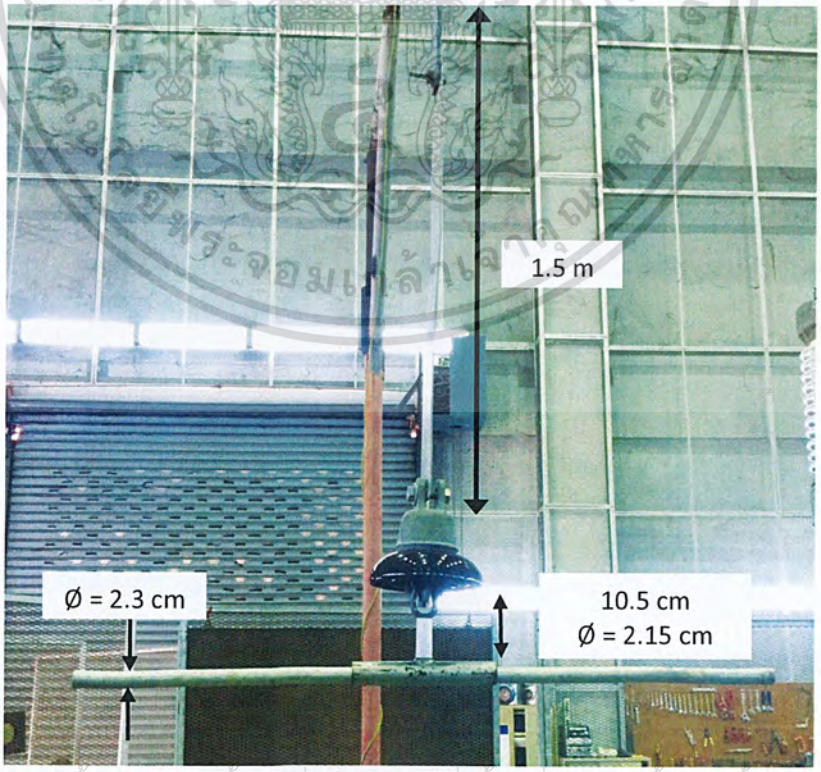
รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ด้านแรงต่ำ

รูปที่ 4.3 หม้อแปลงทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

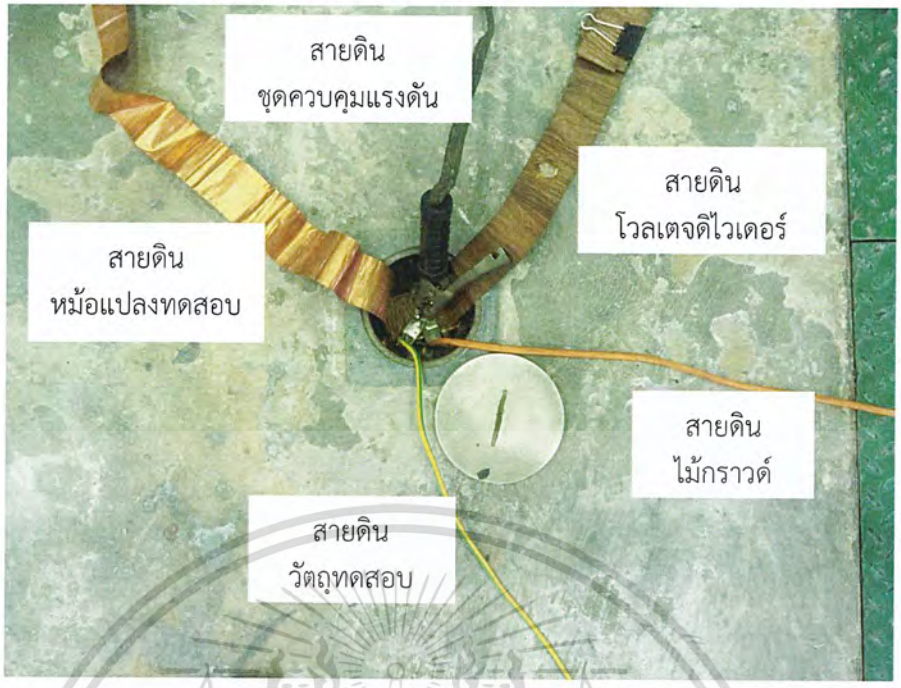


รูปที่ 4.4 การติดตั้งวงจรทดสอบ
หมายเหตุ ระยะปลอดภัยจากตัวนำแรงสูงไม่ต่ำกว่า 1 เมตร



รูปที่ 4.5 การติดตั้งลูกถ้วย 52-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 บ่อสายดิน

4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

เมื่อทำการติดตั้งวงจรทดสอบและวัตถุทดสอบ (หัวข้อ 4.1) เรียบร้อยแล้วสามารถเริ่มการทดสอบได้ทันที โดยปฏิบัติดังนี้

1. ควรมีผู้ทดสอบมากกว่า 2 คนขึ้นไป เพื่อความปลอดภัยในการทดสอบโดยแบ่งหน้าที่ในการตัดวงจรไฟฟ้าในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุให้ชัดเจน
2. ให้สัญญาณเสียงและแสงก่อนการเริ่มขึ้นแรงดัน
3. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักและย่อย กดปุ่มสวิตช์เริ่มการทำงานของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับ
4. ใช้แรงดันทดสอบตามมาตรฐาน มอก.354-2523 [4] โดยลูกถ้วย 52-1 ทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ 60 kV ส่วนการควบคุมแรงดันทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI C29.1-1988 [3] โดยหมุนสปีดคอนโทรลไปที่ค่าสูงสุดและกดปุ่มอัพ (UP) เพื่อขึ้นแรงดันอย่างรวดเร็วไปที่ค่าประมาณ 75% ของค่าแรงดันที่คาดว่าจะเกิดการวาบไฟตามผิวในสภาวะแห้ง ในช่วงหลังจาก 75 % หมุนสปีดคอนโทรลไปที่ค่าต่ำสุด โดยอัตราการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้าจนถึงค่าที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวจะต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า5 วินาที และไม่เกิน 30 วินาที
5. ทำการตัดวงจรไฟฟ้าทันทีเมื่อเกิดการวาบไฟตามผิว โดยชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับจะทำการลดระดับแรงดันจนมีค่าเป็น 0 อย่างอัตโนมัติ
6. สังเกตและบันทึกผลค่าแรงดันที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิว
7. ปิดการทำงานของวงจรไฟฟ้าทั้งหมด และใช้ไม้กราวด์สัมผัสบริเวณตัวนำแรงสูง

หมายเหตุ ในระหว่างการขึ้นแรงดันไฟฟ้า หากเกิดการวาบไฟตามผิวหรือแรงดันไฟฟ้าตกลงอย่างเห็นได้ชัด ให้ทำการตัดวงจรไฟฟ้าทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวาบไฟตามผิวลูกถ้วย 52-1

ครั้งที่	แรงดันทดสอบ (kV)	การเกิดวาบไฟตามผิว
1	57.0	เกิด
2	59.8	เกิด
3	61.3	เกิด
4	61.2	เกิด
5	62.8	เกิด
ค่าเฉลี่ย	60.42	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ในโครงงานนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับ 20 kVA เพื่อนำใช้งานร่วมกับหม้อแปลงทดสอบพิกัดแรงดัน 20 kVA 220V/200 kV ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับ และการทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std.4 (2013), IEC 60060-1 (2010), ANSI C29.1-1988 และมอก.354-1980 ซึ่งจากการทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าด้วยชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับ 20 kVA พบว่า ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า 52-1 ในสภาวะแห้งจะเกิดการวาบไฟตามผิวเมื่อขึ้นแรงดันให้มีขนาดใกล้เคียง 60 kV โดยมีค่าเฉลี่ยคือ 60.42 kV ซึ่งตรงตามที่มาตรฐานกำหนด ในส่วนของการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพบว่าการควบคุมแรงดันสามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมอัตราการปรับเพิ่มระดับแรงดัน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นสูงสุด และต่ำสุดคือ 4 V/s และ 1.3 V/s ตามลำดับ ในส่วนของการป้องกัน รีเลย์กระแสเกินจะทำการตัดวงจรทดสอบทันทีเมื่อเกิดกระแสเกิน และสวิตช์ปุ่มกดฉุกเฉินจะตัดวงจรเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ทดสอบ นอกจากนี้ระบบการลดระดับแรงดันลงสู่ตำแหน่ง 0 โวลต์ อย่างอัตโนมัติ และระบบการหยุดมอเตอร์อัตโนมัติเมื่อแรงดันอยู่ที่ 0 โวลต์ หรือ 220 โวลต์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ได้ออกแบบไว้

5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข

1. เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดันแรงดัน (Variac) ที่มีน้ำหนักมากอาจทำให้บริเวณฐานของตู้เกินการโค้งงอ ดังนั้นจึงเพิ่มส่วนฐานของตู้และเสริมล้อของตู้ เพื่อรองรับน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน (Variac)

2. การติดตั้งวัตถุทดสอบส่งผลต่อสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณวัตถุ ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ต้องติดตั้งวัตถุทดสอบให้ถูกต้องตามมาตรฐาน [3] คือ ระยะปลอดภัย ขนาดของตัวนำ ระยะของตัวนำ ความยาวของตัวนำ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Std 4™-2013, **"Standard for High-Voltage Testing Techniques".**

[2] IEC 60060-1, Edition 3.0 – 2010, **"High-Voltage test techniques"**, Part 1: General definition and test requirement, 2010.

[3] ANSI C29.1-1988, **"for electrical power insulators – test methods".**

[4] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **"ลูกถ้วยแขวน : ปอร์ซเลน"**, มาตรฐานเลขที่ มอก. 354 - 2523.

[5] ไฟฟ้าแรงสูง. (ออนไลน์).
แหล่งที่มา : http://www.mea.or.th/profile/index.php?l=th&tid=5&mid=311&pid=123. 7 กันยายน 2558

[6] พิชิต ลำยอง, **"เครื่องจักรกลไฟฟ้า"**, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, 2556.

[7] การทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า. (ออนไลน์).
แหล่งที่มา : eestaff.kku.ac.th/~amnart/HVLectureNote/HVT.doc. 7 กันยายน 2558

[8] ธนพัฒน์ อ่ำแจ่ม และคณะ, **"การออกแบบชุดทดลองสร้างความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียก"**, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.

[9] อำนาจ ทองผาสุก, **"การควบคุมมอเตอร์"**, ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพิกัด 20 kVA

Design and Construction of AC Control Unit 20 kVA

ภารวี เจริญศักดิ์ มินาวรรณ สัตยานนท์ เมธา เงางาม และ รัชพงศ์ จันทร์ศิรินุสรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: prasopchok_ho@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 20 kVA, 220 V ซึ่งชุดควบคุมประกอบด้วยส่วนวัดค่าทางไฟฟ้า ส่วนป้องกันทางไฟฟ้า และส่วนควบคุมแรงดัน โดยได้มีการพัฒนาชุดควบคุมให้สามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมอัตราการปรับเพิ่มระดับแรงดัน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นสูงสุด และต่ำสุดคือ 4 V/s และ 1.3 V/s ตามลำดับ ในส่วนของการป้องกัน มีรีเลย์กระแสเกินและสวิตช์ฉุกเฉินสำหรับตัดวงจรทดสอบในกรณีที่วงจรทดสอบมีกระแสเกินและเกิดเหตุฉุกเฉิน ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกออกแบบเพื่อใช้ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบพิกัด 20 kVA 220V/200kV เพื่อใช้ในในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับ และการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std 4 (2013), IEC 60060-1 (2010), ANSI C29.1-1988 และ มอก.354-1980 นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่าสามารถทำงานร่วมกับหม้อแปลงทดสอบโดยไม่เกิดความเสียหาย จากการทดลองทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่าตู้ควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับสามารถใช้ทำการทดสอบได้ตามมาตรฐาน

คำสำคัญ การทดสอบลูกถ้วย, การปรับแรงดันไฟฟ้า, 200 kV 20 kVA, การควบคุมแรงดันไฟฟ้า, ชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับ

Abstract

This project presents a design and construction of AC voltage control unit with the power rating of 20 kVA and the rating voltage of 220 V. The control unit is composed of electrical measurement part, electrical protection part, and voltage control part. The developed control unit can adjust voltage with controlled rate of rise. The maximum and minimum rate of rise is 4 V/s and 1.3 V/s, respectively. In the protection part, the over current relay and emergency switch were used to switch of the testing circuit in cases of overcurrent detection and emergency. The AC voltage control unit was designed for use together with testing transformer rated 20 kVA 220V/200kV that apply for AC withstand test and flashover test of insulator on the certificated IEEE Std 4 (2013), IEC 60060-1 (2010), ANSI C29.1-1988 and TIS.354-1980. Moreover, from the experimental result, The AC voltage control unit can work together with testing transformer well without damage. It can be conclude that The AC voltage control unit can employ well in AC voltage withstand test and flashover test according to the standard requirement.

Keyword Insulator test, Adjust voltage, 200 kV 20 kVA, Voltage control, AC control unit

1. บทนำ

เนื่องจากการปรับระดับแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดัน (Variac) ในการปรับระดับแรงดันทดสอบกระแสสลับ โดยใช้บุคคลในการปรับระดับแรงดันทดสอบ ซึ่งไม่สะดวกต่อการใช้งานในการทดสอบ และมักมีปัญหาในการควบคุมการปรับระดับแรงดันทดสอบคือไม่มีความแม่นยำในการปรับระดับแรงดันทดสอบ เนื่องจากอัตราการปรับเพิ่มระดับแรงดันหรือลดระดับแรงดันของผู้ปฏิบัติงาน ทำให้ได้แรงดันตามที่ต้องการได้ยาก เป็นผลให้การจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์ทดสอบมีความผิดพลาด ส่งผลให้อุปกรณ์ทดสอบมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้ จากปัญหาดังกล่าวคณะผู้จัดทำและห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังจึงออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับ ใช้งานร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงทดสอบพิกัด 20 kVA 220V/200kV เพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับและการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า โดยพัฒนาและปรับปรุงระบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและระบบความปลอดภัยให้ดียิ่งขึ้น เพื่อใช้ควบคุมแรงดันของหม้อแปลงทดสอบให้มีความสะดวกและแม่นยำในการใช้งาน สร้างความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานและสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ รวมไปถึงเพิ่มขีดความสามารถในการทดสอบอุปกรณ์ และงานวิจัย ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

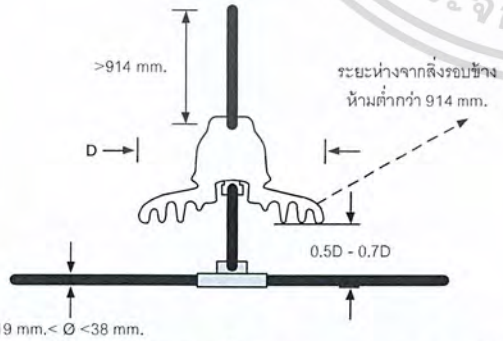
2.1 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้การทดสอบและผลจากการทดสอบมีความถูกต้องและยอมรับได้จึงใช้มาตรฐานในการกำหนดเงื่อนไขต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ โดยมาตรฐานที่ใช้ในกำหนดนั้นจะมีด้วยกัน 4 มาตรฐานด้วยกัน คือ IEEE Std.4 [1], IEC 60060-1 [2], ANSI C29.1 [3] และ มอก. [4] โดยหัวข้อที่มาตรฐานเหล่านี้กำหนดได้แก่ การควบคุมแรงดันในการทดสอบ

2.1.1 การทดสอบวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำในสภาวะแห้ง (Low-Frequency Dry Flashover Voltage Test) จะขึ้นแรงดันอย่างรวดเร็วไปที่ค่าประมาณ 75 % ของค่าแรงดันที่คาดว่าจะเกิดการวาบไฟตามผิวในสภาวะแห้ง ในช่วงหลังจาก 75 % อัตราการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้าจนถึงค่าที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวจะต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 5 วินาที และไม่เกิน 30 วินาที ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวในสภาวะแห้งของอุปกรณ์ทดสอบจะต้องเกิดอย่างต่อเนื่องกันไม่ต่ำกว่า 5 ครั้ง และระยะเวลาของการเกิดวาบไฟตามผิวอย่างต่อเนื่องไม่ควรน้อยกว่า 15 วินาที และไม่เกิน 5 นาที

2.1.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันความถี่ต่ำในสภาวะแห้ง (Low frequency Dry withstand voltage test) การขึ้นแรงดันจะขึ้นทันทีไปที่ 75 % ของแรงดันไฟฟ้าทดสอบคงทนในสภาวะแห้ง จากนั้นค่อยๆขึ้นไปที่ค่าแรงดันไฟฟ้าทดสอบโดยจะต้องใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 5 วินาทีและไม่เกิน 30 วินาที ค่าแรงดันไฟฟ้าทดสอบได้จากกราฟแรงดันไฟฟ้าคงทนในสภาวะแห้งร่วมกับการคำนวณด้วยการแก้ไขสภาพอากาศ และเวลาในการทำการทดสอบคงแรงดันทดสอบไว้เป็นเวลา 1 นาที

นอกจากนี้มาตรฐานยังได้กำหนดการติดตั้งลูกถ้วยเพื่อทำการทดสอบให้มีระยะต่างๆ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การติดตั้งลูกถ้วยเพื่อทำการทดสอบตามมาตรฐานข้างต้น

2.2 หลักการออกแบบชุดควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการกระแสไฟฟ้ามากๆนั้น นิยมออกแบบให้ประกอบเป็นสองส่วนหลักๆ ส่วนแรกคือวงจรกำลังเป็นวงจรหลักเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า และอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์วัดเข้าไปในส่วนนี้ ส่วนที่สองคือวงจรควบคุมเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรกำลังให้ทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยวงจรควบคุมนั้นจะทำการสั่งตัด-ต่อวงจรกำลังผ่านแมกเนติกคอนแทกเตอร์

3. การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 การออกแบบชุดควบคุม

3.1.1 การกำหนดคุณสมบัติของตู้ควบคุม มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) สามารถเปิด-ปิดได้โดยกดสวิตช์

2) เมื่อทำการกดปุ่มเปิดสวิตช์ หลอดไฟบอกสถานะของตู้ควบคุมจะติด

3) เมื่อทำการกดปุ่มเปิดสวิตช์จะไม่สามารถทำการเปิดได้ ถ้าหม้อแปลงปรับระดับแรงดันไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

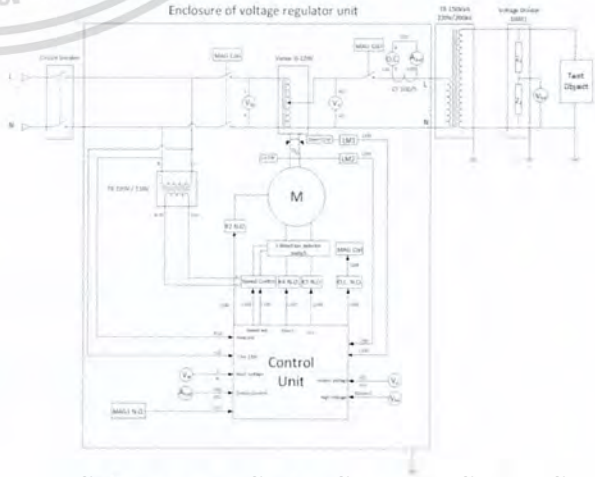
4) สามารถปรับอัตราความเร็วการเพิ่ม / ลดระดับแรงดันได้

5) มีระบบหยุดมอเตอร์อัตโนมัติเมื่อแรงดันอยู่ที่ 0 โวลต์ หรือ 220 โวลต์ เพื่อป้องกันมอเตอร์เสียหายจากการรับภาระทางไฟฟ้าที่มากเกิน

6) เมื่อมีการกดปุ่ม Emergency จะต้องมีการตัดวงจรการทำงานของชุดควบคุมและไฟที่ป้อนเข้าวงจรทดสอบทั้งหมด โดยมีไฟแสดงสถานะปรากฏขึ้น

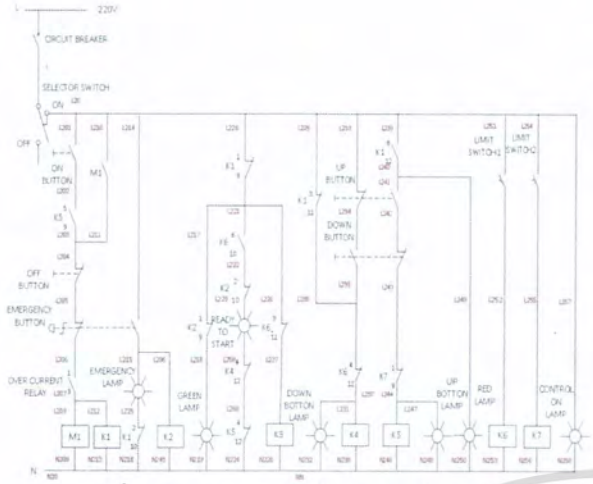
7) มีการติดตั้ง Over Current Relay ไว้เพื่อขณะที่ทำการทดสอบหากเกิดการวาบไฟตามผิวหรือการทะลุของฉนวนจนมีกระแสเกินที่ตั้งไว้ Over Current Relay จะสับสวิตช์ออกไฟจะหยุดไหลเข้าระบบ

3.1.2 การออกแบบวงจรควบคุมสำหรับชุดควบคุมแรงดันทดสอบ



รูปที่ 2 วงจรกำลังสำหรับตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 วงจรควบคุมสำหรับตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

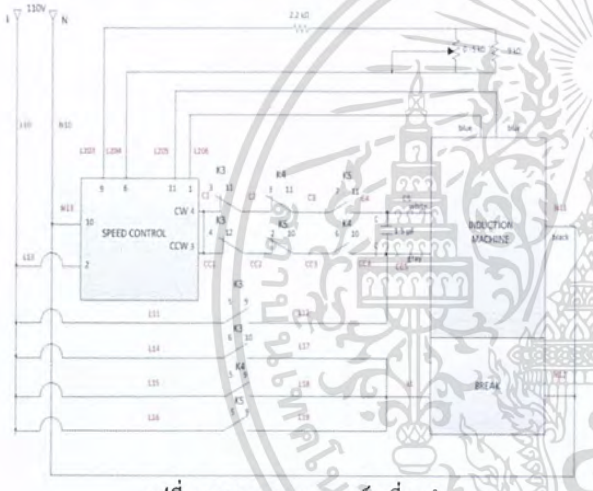
4. การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การติดตั้งวงจรทดสอบและวัตถุทดสอบ

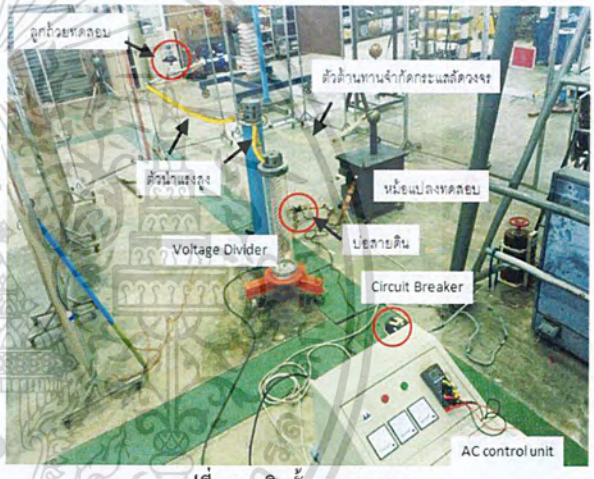
เพื่อความถูกต้อง และความปลอดภัยในการทดสอบ การติดตั้งวงจรทดสอบและวัตถุทดสอบควรคำนึงถึงมาตรการความปลอดภัยต่างๆ โดยอุปกรณ์ต่างๆ มีพิกัดดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

	หม้อแปลงทดสอบ	ชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับ
พิกัดกำลัง	5 kVA	20 kVA
พิกัดแรงดัน	220 V / 100 kV 50 Hz	220 V / 0-220 V 50 Hz
พิกัดกระแส	23 A / 50 mA	90 A



รูปที่ 4 วงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

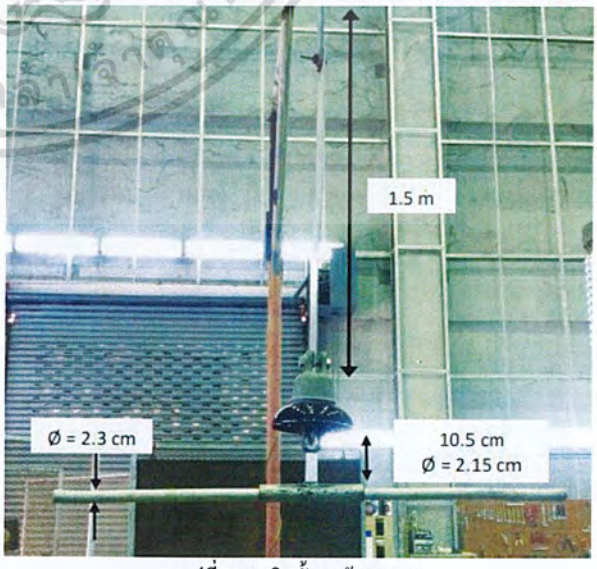


รูปที่ 6 การติดตั้งวงจรทดสอบ

3.2 การประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับ

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบ ต่อไปก็จะเป็นขั้นตอนการประกอบสร้างตู้ควบคุมแรงดันทดสอบ

รูปที่ 5 การประกอบสร้างชุดควบคุม



รูปที่ 7 การติดตั้งลูกถ้วย 52-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

เมื่อทำการติดตั้งวงจรทดสอบและวัตถุทดสอบ เรียบร้อยแล้ว สามารถเริ่มการทดสอบได้ทันที โดยปฏิบัติดังนี้

1. ให้สัญญาณเสียงและแสงก่อนการเริ่มขึ้นแรงดัน

2. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักและย่อย กดปุ่มสวิตช์เริ่มการทำงานของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับ

3. ใช้แรงดันทดสอบตามมาตรฐาน มอก.354-2523 [4] โดยลูกถ้วย 52-1 ทดสอบที่ แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ 60 kV ส่วนการควบคุมแรงดันทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI C29.1-1988 [3] โดยหมุนสปีดคอนโทรลไปที่ค่าสูงสุด และกดปุ่มอัพ (UP) เพื่อขึ้นแรงดันอย่างรวดเร็วไปที่ค่าประมาณ 75% ของค่าแรงดันที่คาดว่าจะเกิดการวาบไฟตามผิวในสภาวะแห้ง ในช่วงหลังจาก 75 % หมุนสปีดคอนโทรลไปที่ค่าต่ำสุด โดยอัตราการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้าจนถึงค่าที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวจะต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 5 วินาที และไม่เกิน 30 วินาที

4. ทำการตัดวงจรไฟฟ้าทันทีเมื่อเกิดการวาบไฟตามผิว โดยชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับ จะทำการลดระดับแรงดันจนมีค่าเป็น 0 อย่างอัตโนมัติ

5. สังเกตและบันทึกผลค่าแรงดันที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิว

6. ปิดการทำงานของวงจรไฟฟ้าทั้งหมด และใช้ไม้กราวด์สัมผัสบริเวณตัวนำแรงสูง

หมายเหตุ ในระหว่างการขึ้นแรงดันไฟฟ้า หากเกิดการวาบไฟตามผิวหรือแรงดันไฟฟ้าตกลงอย่างเห็นได้ชัด ให้ทำการตัดวงจรไฟฟ้าทันที

4.3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการวาบไฟตามผิวลูกถ้วย 52-1

ครั้งที่	แรงดันทดสอบ (kV)	การเกิดวาบไฟตามผิว
1	57.0	เกิด
2	59.8	เกิด
3	61.3	เกิด
4	61.2	เกิด
5	62.8	เกิด

5. สรุปผลการทดสอบ

ในโครงงานนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับ 20 kVA เพื่อนำใช้งานร่วมกับหม้อแปลงทดสอบพิกัดแรงดัน 20 kVA 220V/200 kV ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับ และการทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std.4 (2013), IEC 60060-1 (2010), ANSI C29.1-1988 และมอก.354-1980 ซึ่งจากการทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าด้วยชุดควบคุมแรงดันทดสอบกระแสสลับ 20 kVA พบว่า ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า 52-1 ในสภาวะแห้งจะเกิดการวาบไฟตามผิวเมื่อขึ้นแรงดันให้มีขนาดใกล้เคียง 60 kV มีค่าเฉลี่ยคือ 60.42 kV ซึ่งตรงตามที่มาตรฐานกำหนด ในส่วนของการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับพบว่าการควบคุมแรงดันสามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมอัตราการปรับเพิ่มระดับแรงดัน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นสูงสุด และต่ำสุดคือ 4 V/s และ 1.3 V/s ตามลำดับ ในส่วนของการป้องกัน รีเลย์กระแสเกินจะทำการตัดวงจรทดสอบทันทีเมื่อเกิดกระแสเกินและสวิตช์ปุ่มกดฉุกเฉินจะตัดวงจรเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ทดสอบ นอกจากนี้ระบบการลดระดับแรงดันลงสู่ตำแหน่ง 0 โวลต์ อย่างอัตโนมัติ และระบบการหยุดมอเตอร์อัตโนมัติเมื่อแรงดันอยู่ที่ 0 โวลต์ หรือ 220 โวลต์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ได้ออกแบบไว้

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, ผศ.วรกัลป์ ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำโครงงานด้วยดีมาโดยตลอด นอกจากนี้ยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงงานอีกด้วย

ขอขอบคุณ คุณปุณยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ รวมไปถึงการตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนายบัญญัติ ลีลาจริยกุล ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในด้านการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน และนายธนริทธิ์ ตรีวรรณกุล ที่เป็นผู้ควบคุมการทดสอบและให้คำแนะนำในการจัดทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ช่วยกันดูแลห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และเป็นกำลังใจในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Std 4™-2013, Standard for High-Voltage Testing Techniques

[2] IEC 60060-1, Edition 3.0 - 2010, High-voltage test techniques

[3] ANSI C29.1-1988, for electrical power insulators – test methods

[4] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, "ลูกถ้วยแขวน : ปอร์ซเลน," มาตรฐานเลขที่ มอก. 354 – 2523

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

มาตรฐาน IEEE Std 4™ – 2013

Standard for High-Voltage Testing Techniques

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE STANDARDS ASSOCIATION IEEE

IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques

IEEE Power and Energy Society

Sponsored by the
Power System Instrumentation and Measurements Committee

IEEE
3 Park Avenue
New York, NY 10016-5997
USA

IEEE Std 4™-2013
(Revision of
IEEE Std 4-1995)

10 May 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

orized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on April 07,2016 at 08:30:22 UTC from IEEE Xplore. Restrictio

The nozzles shall be supplied with filtered, oil-free air at a relative pressure of $(7.0 \pm 0.35) \times 10^5$ Pa. The flow of solution to each nozzle shall be 0.5 L/min ± 0.05 L/min for the period of the test, and the tolerance on the total flow to all nozzles shall be ± 5% of the nominal value.

12.6.4 Conditions before starting the test

The test shall start while the insulator, cleaned according to 12.5.2, is still completely wet. At the start of the test, the insulator shall be in thermal equilibrium with the air in the test chamber. In addition, the ambient temperature shall be not less than 5 °C or greater than 40 °C and its difference from the temperature of the water solution shall not exceed 15 °C.

The insulator is energized, the salt-solution pump and air compressor are switched on, and the test is deemed to have started as soon as the compressed air has reached the normal operating pressure at the nozzles.

12.6.5 Preconditioning process

The insulator, prepared in the normal way, is subjected to the test voltage at the reference salinity for 20 minutes or until the insulator flashes over; if the insulator does not flash over, the voltage is raised in steps of 10% of the test voltage every 5 minutes until flashover.

After flashover, the voltage is reapplied and raised as quickly as possible to 90% of the previously obtained flashover voltage and thereafter increased in steps of 5% of the flashover voltage every 5 minutes until flashover. The last process is repeated six more times; in each of them, the voltage is raised rapidly to 90% of the last obtained flashover voltage and then in steps of 5% every 5 minutes until flashover. After eight flashovers, the fog shall be cleared, the insulator shall be washed with tap water, and then the withstand test (see 12.6.6.1) shall start as soon as possible afterwards.

The characteristics of the voltage source used in the preconditioning process are to be not lower than the reference ones in the withstand test (see 12.3 and 12.4).

If the preconditioning process performed at the reference salinity requires excessively high voltages, the use of higher values of salinity is permitted for the preconditioning. Also, if even with this expedient the required voltage remains excessively high, separate preconditionings of shorter sections of the insulator, using adequate procedures to avoid over-stressing of the internal insulation, if any (e.g., in the case of arresters or bushings), are permitted.

12.6.6 Test procedure

12.6.6.1 Withstand test

The objective of this test is to confirm the specified withstand salinity of the insulator at the specified test voltage. The test shall start when the test insulator and the chamber conditions fulfill the requirements given in 12.6.4 and after the preconditioning of the insulator according to 12.6.5.

A series of tests are performed on the insulator at the specified test voltage, using a salt solution having the specified test salinity that shall be in accordance with 12.6.2. The duration of each test shall be 1 hour if no flashover occurs before that time has elapsed. The insulator shall be carefully washed with tap water before each subsequent test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2013 IEEE. All rights reserved.

Authorized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on April 07,2016 at 08:30:22 UTC from IEEE Xplore. Rest

12.6.6.2 Acceptance criterion for the withstand test

The insulator complies with this standard if no flashover occurs during a series of three consecutive tests in accordance to the procedure in 12.6.6.1. If only one flashover occurs, a fourth test shall be performed and the insulator then passes the test if no flashover occurs.

If four individual tests result in withstands at, for example, 224 kg/m^3 salinity, the maximum withstand salinity shall be assumed to be equal or greater than 224 kg/m^3. If one individual test ends in flashover and three individual tests result in withstands at 224 kg/m^3 salinity, this salinity shall be considered as the maximum withstand salinity.

13. Atmospheric corrections

13.1 Atmospheric conditions

The standard reference atmosphere is:

a) Temperature $t_0 = 20$ °C

b) Pressure $b_0 = 101.3$ kPa (1013 mbar)

c) Absolute humidity $h_0 = 11$ g/m^3

A pressure of 101.3 kPa corresponds to the height of 760 mm in a mercury barometer at 0 °C. The atmospheric pressure in kilopascals is approximately:

$$b = 0.1333H \tag{53}$$

where

b is the barometric pressure (in kPa)

H is the barometric height (in mm of mercury)

Correction for temperature is considered to be negligible with respect to the height of the mercury column.

13.2 Atmospheric correction factors

The disruptive discharge of external insulation depends upon the atmospheric conditions. Usually, the disruptive discharge voltage for a given path in air is increased by an increase in either air density or humidity. However, when the relative humidity exceeds about 80%, the disruptive discharge voltage becomes irregular, especially when the disruptive discharge occurs over an insulating surface.

By applying correction factors, a disruptive discharge voltage measured in given test conditions (temperature t, pressure b, humidity h) may be converted to the value that would have been obtained under the standard reference atmospheric conditions (t_0, b_0, h_0). Conversely, a test voltage specified for given reference conditions can be converted into the equivalent value under the test conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2013 IEEE. All rights reserved.

ized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on April 07,2016 at 08:30:22 UTC from IEEE Xplore. Res

Two methods have been widely used for correction of test voltages due to atmospheric conditions:

a) *Method 1:* Atmospheric corrections using factor K (recommended method for new equipment).

b) *Method 2:* Atmospheric correction using factors k_d and k_h (alternate method for air gaps < 1 m and comparisons against historic data).

NOTE—Method 1, above, is a more recent method and is a more internationally accepted method of correcting voltages. However, Method 2, above, has been a common method for historical testing and has value for tests on existing equipment designs.

13.2.1 Atmospheric corrections using Method 1

The disruptive discharge voltage is proportional to the atmospheric correction factor, K, defined by Equation (54):

$$K = k_1 k_2 \tag{54}$$

where

k_1 is the air density correction factor given in 13.2.1.1

k_2 is the humidity correction factor given in 13.2.1.2

If not otherwise specified by the relevant apparatus standard, the voltage, V, to be applied during a test on external insulation is determined by:

$$V = V_0 K \tag{55}$$

where

V_0 is the voltage at standard reference atmosphere

Similarly, measured disruptive discharge voltages, V, are corrected to V_0 corresponding to standard reference atmosphere by dividing by K:

$$V_0 = \frac{V}{K} \tag{56}$$

The test report shall always contain the actual atmospheric conditions during the test and the correction factors applied.

13.2.1.1 Air density correction factor (k_1)

The air density correction factor, k_1, depends on the relative air density, δ, and can be generally expressed as:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2013 IEEE. All rights reserved.

rized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on April 07,2016 at 08:30:22 UTC from IEEE Xplore. Res

$$k_1 = \delta^m \tag{57}$$

where

m is an exponent defined in 13.2.1.3

When the temperatures t and t_0 are expressed in degrees Celsius and the atmospheric pressures b and b_0 are expressed in the same units (kilopascals or millibars), the relative air density is:

$$\delta = \left(\frac{b}{b_0}\right)\left(\frac{273+t_0}{273+t}\right) \tag{58}$$

The correction is considered reliable for $0.8 < k_1 < 1.05$.

13.2.1.2 Humidity correction factor (k_2)

The humidity correction factor may be expressed as:

$$k_2 = k^w \tag{59}$$

where

w is an exponent defined in 13.2.1.3

k is a parameter that depends on the type of test voltage and may be obtained as a function of the ratio of absolute humidity, h, to the relative air density, δ, using the following equations (see Figure 32):

Direct voltage:

$$k = 1 + 0.014(h/\delta - 11) - 0.00022(h/\delta - 11)^2 \qquad \text{for } 1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3 \tag{60}$$

Alternating voltage:

$$k = 1 + 0.012(h/\delta - 11) \qquad \text{for } 1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3 \tag{61}$$

Impulse voltage:

$$k = 1 + 0.010(h/\delta - 11) \qquad \text{for } 1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 20 \text{ g/m}^3 \tag{62}$$

NOTE—The impulse equation is based on experimental results for positive lightning impulse waveforms. This equation also applies to negative lightning impulse and switching impulse voltages.

For system voltages below 72.5 kV (or approximately gap lengths $l < 0.5$ m), no humidity correction shall be applied (i.e., w = 0).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2013 IEEE. All rights reserved.

ized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on April 07,2016 at 08:30:22 UTC from IEEE Xplore. Res

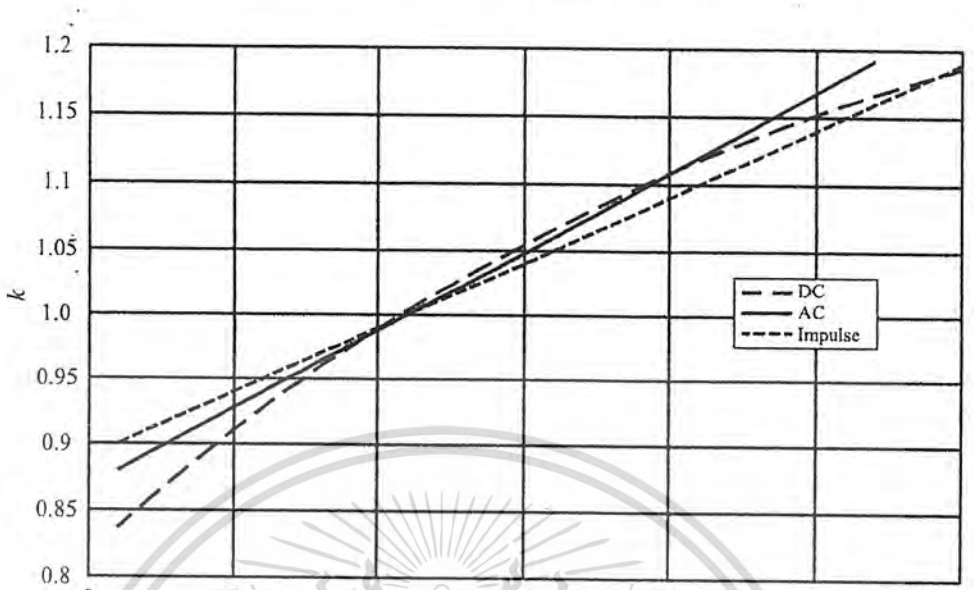


Figure 32 —Parameter *k* as a function of *h/δ*

13.2.1.3 Exponents *m* and *w*

Since the correction factors depend on the type of pre-discharges, this fact can be taken into account by considering the parameter *g* defined in Equation (63).

$$g = \frac{V_B}{500 L \delta k} \tag{63}$$

where

V_B is the (measured or estimated) 50% disruptive discharge voltage at the actual atmospheric conditions (in kV peak). In the case of a withstand test where an estimate of the 50% disruptive discharge voltage is not available, V_B can be assumed to be 1.1 times the test voltage.

L is the minimum discharge path (in meters).

δ is the relative air density.

k is the dimensionless parameter defined in 13.2.1.2.

The exponents *m* and *w* are obtained from Table 9 for the specified values of *g*, and are plotted in Figure 33 and Figure 34.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2013 IEEE. All rights reserved.

rized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on April 07,2016 at 08:30:22 UTC from IEEE Xplore. Res

Table 9—Values of exponents *m* for air density correction and *w* for humidity correction as a function of the parameter *g*

g	*m*	*w*
< 0.2	0	0
0.2 to 1.0	$g(g-0.2)/0.8$	$g(g-0.2)/0.8$
1.0 to 1.2	1.0	1.0
1.2 to 2.0	1.0	$(2.2-g)(2.0-g)/0.8$
> 2.0	1.0	0

NOTE—The values of exponents *m* and *w* have been deduced from experimental values obtained in different conditions, however these are limited to altitudes between sea level and 2000 m. Values for use above 2000 m are under consideration, especially for ac and switching impulse voltages. In the absence of specifications for altitude correction above 2000 m by the relevant apparatus standard, the correction factors in this standard should be used. Significant differences in the correction factors may arise at stresses close to breakdown.

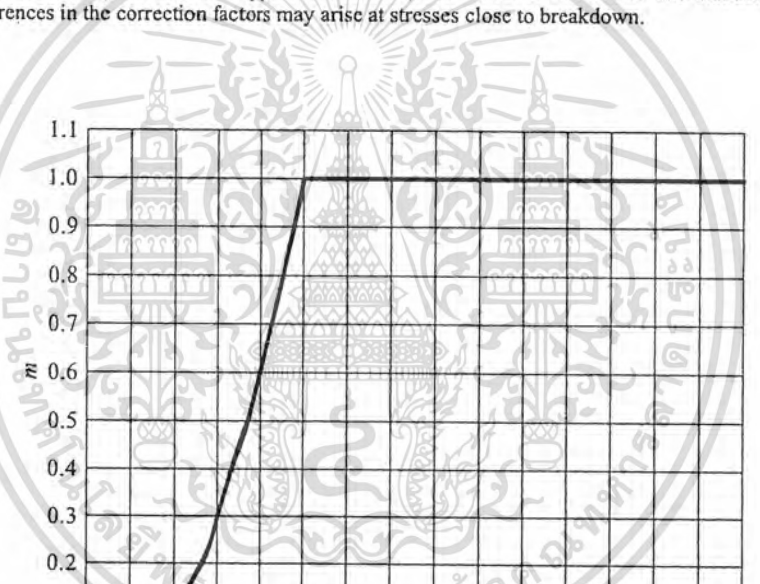


Figure 33 —Value of exponent *m* for air density correction as a function of the parameter *g*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2013 IEEE. All rights reserved.

nzed licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on April 07,2016 at 08:30:22 UTC from IEEE Xplore. Res

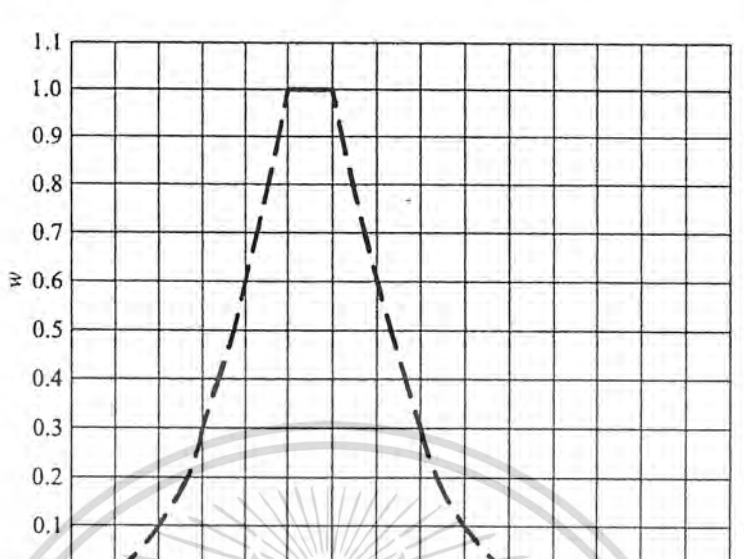


Figure 34 — Value of exponent w for air density correction as a function of the parameter g

13.2.1.4 Wet tests, tests under artificial contamination, and combined tests

No humidity correction shall be applied for wet tests or for tests with artificial pollution. The question of density correction during such tests is under consideration. For combined tests, the atmospheric correction factors relative to the component of highest value shall be applied to the test voltage value.

13.2.2 Atmospheric correction using Method 2

There are two factors:

a) The air density correction factor k_d (see 13.2.2.1)

b) The humidity correction factor k_h (see 13.2.2.1)

The disruptive discharge voltage is proportional to k_d/k_h.

If not otherwise specified by the relevant apparatus standard, the voltage to be applied during a withstand test on external insulation is determined by multiplying the specified withstand voltage by k_d/k_h. Similarly, measured disruptive discharge voltages are corrected to those applicable for standard reference atmosphere by dividing by k_d/k_h.

It is left to the relevant apparatus standard to specify whether or not corrections have to be applied to the voltage values in those cases in which both external and internal insulations are involved. The test report should always contain the actual atmospheric conditions during the test and it must be indicated whether corrections have been applied or not.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2013 IEEE. All rights reserved.

orized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on April 07,2016 at 08:30:22 UTC from IEEE Xplore. Re

ภาคผนวก ค

มาตรฐาน IEC 60060-1, Edition 3.0 - 2010

High-Voltage testing techniques---Part 1:General definitions and test requirement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THAI INDUSTRIAL STANDARDS INSTITUTE

IEC 60060-1

Edition 3.0 2010-09

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

เอกสารมีลิขสิทธิ์ ใช้เฉพาะงานของ สมอ. เท่านั้น
ห้ามคัดถ่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต

High-voltage test techniques –
Part 1: General definitions and test requirements

Technique des essais à haute tension –
Partie 1: Définitions et exigences générales

TISI Library
ห้องสมุดมาตรฐาน

S0105960

Thai Industrial Standards Institute , TISI
Rama VI Rd., Rajathevee Bangkok 10400 Tel 202-3510

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PRICE CODE XB
CODE PRIX

ICS 17.220.20

ISBN 978-2-88912-185-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission
Marque déposée de la Commission Electrotechnique Internationale

cases. However, an experimental adaptation or a field calculation, taking into account a voltage dependent maximum field strength as described in the literature [1, 2][1], is recommended.

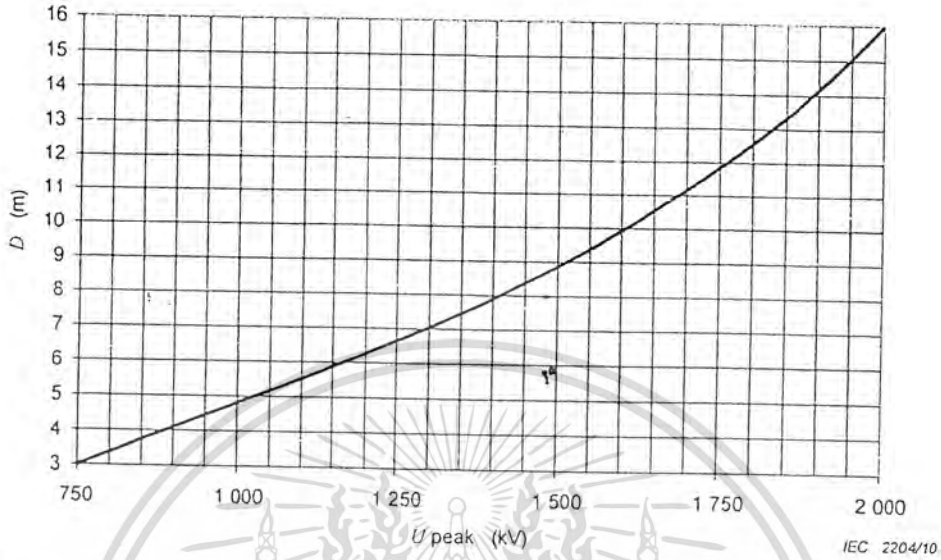


Figure 1 – Recommended minimum clearance D of extraneous live or earthed objects to the energized electrode of a test object, during an a.c. or positive switching impulse test at the maximum voltage U applied during test

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the test should be made at ambient atmospheric conditions in the test area without extraneous precipitation or pollution. The procedure for voltage application shall be as specified in the relevant clauses of this standard.

4.3 Atmospheric corrections in dry tests

4.3.1 Standard reference atmosphere

The standard reference atmosphere is:

– temperature $t_0 = 20$ °C ;

– absolute pressure $p_0 = 1\,013$ hPa (1 013 mbar) ;

– absolute humidity $h_0 = 11$ g/m^3.

NOTE 1 An absolute pressure of 1 013 hPa corresponds to the height of 760 mm of the mercury column in a mercury barometer at 0 °C. If the barometer height is H mm of mercury, the atmospheric pressure in hectopascal is approximately:

$$p = 1{,}333\ H \text{ hPa}$$

Correction for temperature with respect to the height of the mercury column is considered to be negligible.

NOTE 2 Instruments automatically correcting pressure to sea level are not suitable and should not be used.

4.3.2 Atmospheric correction factors for air gaps

The disruptive discharge of external insulation depends upon the atmospheric conditions. Usually, the disruptive-discharge voltage for a given path in air is increased by an increase in either air density or humidity. However, when the relative humidity exceeds about 80 %, the disruptive-discharge voltage becomes irregular, especially when the disruptive discharge occurs over an insulating surface.

เอกสารนี้ได้รับการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. ๒๕๓๗ ห้ามมิให้ผู้ใดทำซ้ำ ดัดแปลง หรือนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[1] Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

LIBRARY 59
THAI INDUSTRIAL STANDARDS INSTITUTE

NOTE Atmospheric corrections do not apply to flashover, only to sparkover.

The disruptive-discharge voltage is proportional to the atmospheric correction factor K_t that results from the product of two correction factors:

- the air density correction factor k_1 (see 4.3.4.1);
- the humidity correction factor k_2 (see 4.3.4.2).

$$K_t = k_1 k_2$$

4.3.3 Application of correction factors

4.3.3.1 Standard procedure

By applying correction factors, a disruptive-discharge voltage measured in given test conditions (temperature t, pressure p, humidity h) may be converted to the value, which would have been obtained under the standard reference atmospheric conditions (t_0, p_0, h_0).

Disruptive-discharge voltages, U, measured at given test conditions are corrected to U_0 corresponding to standard reference atmosphere by dividing by K_t:

$$U_0 = U / K_t$$

The test report shall always contain the actual atmospheric conditions during the test and the correction factors applied.

4.3.3.2 Converse procedure

Conversely, where a test voltage is specified for standard reference conditions, it shall be converted into the equivalent value under the test conditions and this may require an iterative procedure.

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the voltage U to be applied during a test on external insulation is determined by multiplying the specified test voltage U_0 by K_t:

$$U = U_0 K_t$$

However, as U enters into the calculation of K_t, an iterative procedure might have to be used (see Annex E).

NOTE 1 The test for the correct choice of U for the calculation of K_t is to divide U by K_t. If the result is the specified test voltage, U_0, then a correct choice of U has been made. If U_0 is too high, U has to be reduced but if it is too low, it has to be increased.

NOTE 2 When K_t is close to unity, iterative calculation is not necessary.

NOTE 3 In correcting power-frequency voltage the peak value has to be used, because the discharge behaviour is based on the peak value.

4.3.4 Correction factor components

4.3.4.1 Air density correction factor, k_1

The air density correction factor k_1 depends on the relative air density δ and can be generally expressed as:

$$k_1 = \delta^m$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ สมอ.
ห้ามคัดถ่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต

where m is an exponent given in 4.3.4.3.

When the temperatures t and t_0 are expressed in degrees Celsius and the atmospheric pressures p and p_0 are expressed in the same units, the relative air density is:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \times \frac{273+t_0}{273+t}$$

The correction is considered reliable for $0,8 < k_1 < 1,05$.

4.3.4.2 Humidity correction factor, k_2

The humidity correction factor may be expressed as:

$$k_2 = k^w$$

where w is an exponent given in 4.3.4.3 and k is a parameter that depends on the type of test voltage and may be obtained as a function of the ratio of absolute humidity, h, to the relative air density, δ, using the following equations (Figure 2):

DC $\quad k = 1 + 0,014(h/\delta - 11) - 0,00022(h/\delta - 11)^2$ for $1\ g/m^3 < h/\delta < 15\ g/m^3$

AC $\quad k = 1 + 0,012(h/\delta - 11)$ for $1\ g/m^3 < h/\delta < 15\ g/m^3$

Impulse $\quad k = 1 + 0,010(h/\delta - 11)$ for $1\ g/m^3 < h/\delta < 20\ g/m^3$

NOTE The impulse equation is based on experimental results for positive lightning-impulse waveforms. This equation also applies to negative lightning-impulse voltages and switching-impulse voltages.

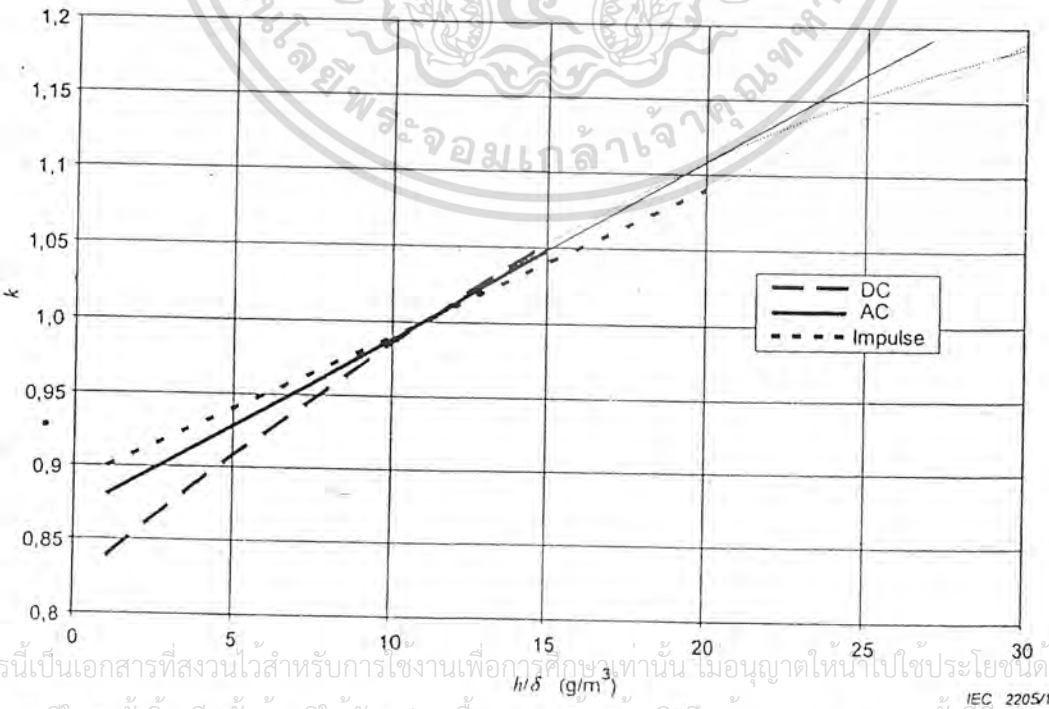


Figure 2 – k as a function of the ratio of the absolute humidity h to the relative air density δ (see 4.3.4.2 for limits of applicability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

For U_m below 72,5 kV (or approximately gap lengths l < 0,5 m) no humidity correction can at present be specified.

NOTE For specific apparatus, the relevant Technical Committee has specified other procedures (e.g. IEC 62271-1).

4.3.4.3 Exponents m and w

As the correction factors depend on the type of pre-discharges, this fact can be taken into account by considering the parameter:

$$g = \frac{U_{50}}{500\, L\, \delta\, k}$$

where U_{50} is the 50 % disruptive-discharge voltage (measured or estimated) at the actual atmospheric conditions, in kilovolt peak,

L is the minimum discharge path in m,

δ is the relative air density and

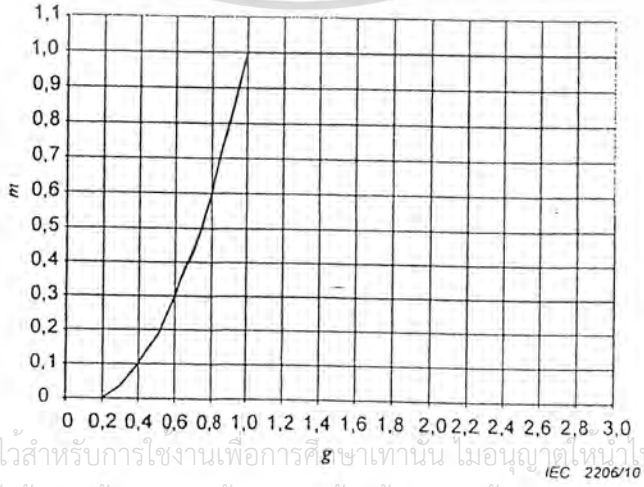
k is the dimension less parameter defined in 4.3.4.2.

In the case of a withstand test where an estimate of the 50 % disruptive-discharge voltage is not available, U_{50} can be assumed to be 1,1 times the test voltage, U_0.

The exponents, m and w, are obtained from Table 1 for the specified ranges of g (Figure 3).

Table 1 – Values of exponents, m for air density correction and w for humidity correction, as a function of the parameter g

g	m	w
<0,2	0	0
0,2 to 1,0	$g(g\text{-}0,2)/0,8$	$g(g\text{-}0,2)/0,8$
1,0 to 1,2	1,0	1,0
1,2 to 2,0	1,0	$(2,2\text{-}g)(2,0\text{-}g)/0,8$
>2,0	1,0	0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3a – Values of exponent m for air density correction as a function of parameter g

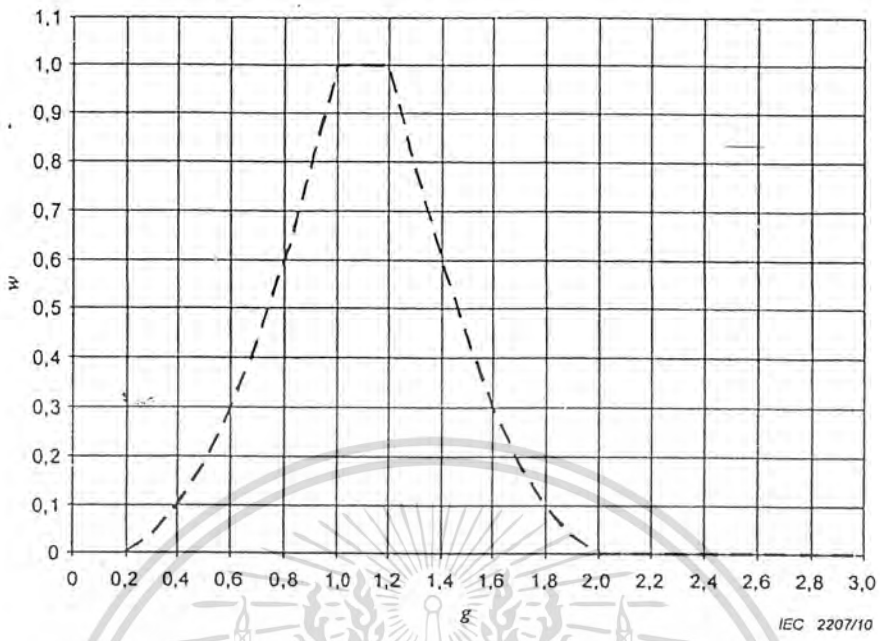


Figure 3b – Values of exponent w for humidity correction as a function of parameter g

Figure 3 – Values of exponents m and w

4.3.5 Measurement of atmospheric parameters

4.3.5.1 Humidity

The humidity should preferably be determined with an instrument measuring directly the absolute humidity with an expanded uncertainty not larger than 1 g/m^3.

Measurement of relative humidity and the ambient temperature can also be used for the determination of the absolute humidity, using the formula below, provided that the accuracy of the absolute humidity determination in this case is the same as required above.

$$h = \frac{6{,}11 \times R \times e^{\frac{17{,}6 \times t}{243+t}}}{0{,}4615 \times (273+t)}$$

where

h is the absolute humidity in g/m^3,

R is the relative humidity in percent and

t is the ambient temperature in °C.

NOTE This measurement may also be made by means of a ventilated wet and dry bulb hygrometer. The absolute humidity as a function of the thermometer readings is determined from Figure 4, which also permits determination of the relative humidity. It is important to provide adequate airflow so as to reach a steady state and to read the thermometers carefully in order to avoid excessive errors in the determination of the humidity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

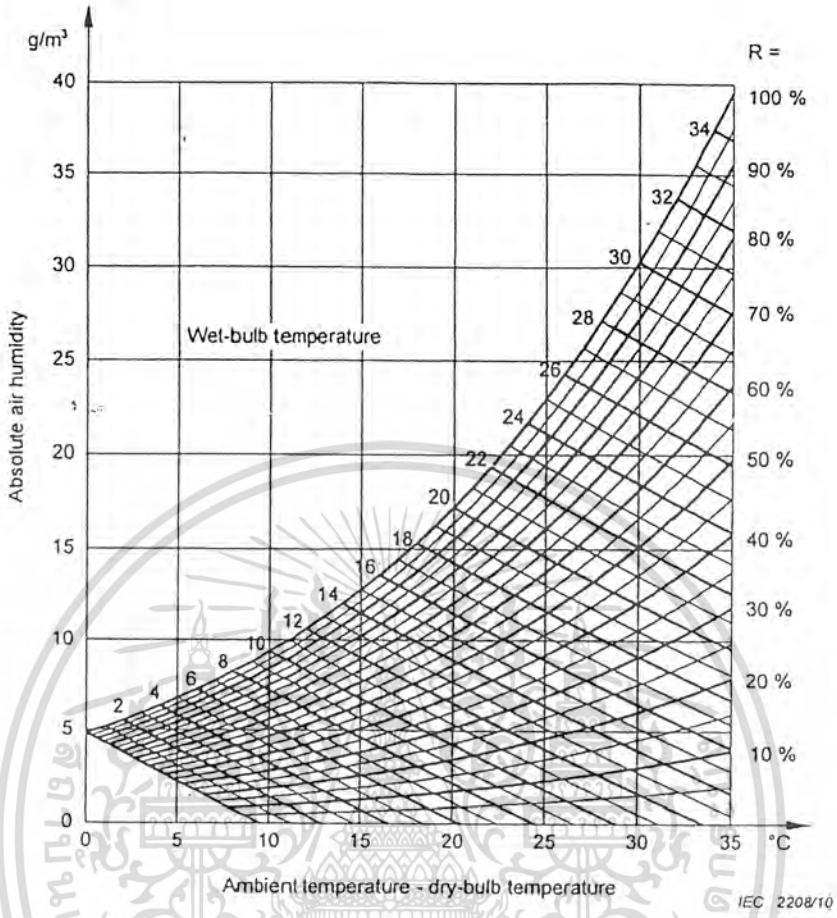


Figure 4 – Absolute humidity of air as a function of dry- and wet-bulb thermometer readings

4.3.5.2 Temperature

The ambient temperature should be measured with an expanded uncertainty of not larger than 1 °C.

4.3.5.3 Absolute pressure

The ambient absolute pressure should be measured with an expanded uncertainty of not larger than 2 hPa.

4.3.6 Conflicting requirements for testing internal and external insulation

While withstand levels are specified under standard reference atmospheric conditions, cases will arise where the application of atmospheric corrections (due to atmospheric conditions differing from the standard reference ones) results in the withstand level for internal insulation appreciably in excess of that for the associated external insulation. In such cases measures to enhance the withstand level of the external insulation shall be adopted to permit application of the correct test voltage to the internal insulation. These measures should be specified by the relevant Technical Committee with reference to the requirements of particular classes of apparatus and could include immersion of the external insulation in liquids or compressed gases.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

For those cases where the test voltage of the external insulation is higher than that of the internal insulation, the external insulation can only be correctly tested when the internal

insulation is especially designed with increased strength. If not, the internal insulation should be tested with the rated value and the external insulation be tested by means of test fixtures unless the relevant Technical Committee states otherwise, in which case it shall specify the test procedure to be used.

4.4 Wet tests

4.4.1 Wet test procedure

This wet test procedure is intended to simulate the effect of natural rain on external insulation. It is recommended for tests with all types of test voltages and on all types of apparatus.

The relevant Technical Committee should specify the arrangement of the test object during the test.

The test object shall be sprayed with water of prescribed resistivity and temperature (see Table 2) falling on it as droplets (avoiding fog and mist) and directed so that the vertical and horizontal components of the spray intensity are approximately equal. These intensities are measured with a divided collecting vessel having openings of 100 cm^2 to 750 cm^2, one horizontal and one vertical with the vertical opening facing the spray.

The position of the test object relative to the vertical and horizontal rain components shall be specified by the relevant Technical Committee.

In general, the reproducibility of wet test results is less than that for other high-voltage discharge or withstand tests. To minimize the dispersion, the following precautions shall be taken:

- The collecting vessel shall be placed close to the test object, but avoiding the collection of drops or splashes from it. During the measuring period, it should be moved slowly over a sufficient area to average the effect of non-uniformities of the spray from individual nozzles. This measuring zone shall have a width equal to that of the test object and a maximum height of 1 m.
- For test objects between 1 m and 3 m in height, the individual measurements shall be made at the top, centre and bottom of the test object. Each measuring zone shall cover only one third of the height of the test object.
- For test objects exceeding 3 m in height, the number of measuring zones shall be increased to cover the full height of the test object without overlapping.
- The above procedures shall be suitably adapted for test objects having large horizontal dimensions.
- The spread of results may be reduced if the test object is cleaned with a surface-active detergent, which has to be removed before the beginning of wetting.
- The spread of results may also be affected by local anomalous (high or low) precipitation rates. It is recommended to detect these by localized measurements and to improve the uniformity of the spray, if necessary.

The spray apparatus shall be adjusted to produce, within the specified tolerances, precipitation conditions at the test object given in Table 2.

Any type and arrangement of nozzles meeting the requirements given in Table 2 may be used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

มาตรฐาน ANSI C29.1-1988

for electrical power insulators – test methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANSI C29.1 88 ■ 0724150 0029820 7 ■

Reproduced By GLOBAL ENGINEERING DOCUMENTS With The Permission Of ANSI Under Royalty Agreement

American National Standard

for electrical power insulators – test methods

LIBRARY
THAI INDUSTRIAL STANDARDS INSTITUTE

american national standards institute, inc.
1430 broadway, new york, new york 10018

Obtained From
GLOBAL ENGINEERING DOCUMENTS
2805 McGaw Ave., Irvine, CA 92714
(714) 261-1455 (800) 854-7179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

02137
23 ก.ย. 2537

Provided by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
Mon Nov 21 10:41:13 1994

ANSI®
C29.1-1988
Revision of
ANSI C29.1-1982

American National Standard

for Electrical Power Insulators – Test Methods

Secretariat
National Electrical Manufacturers Association

Approved August 23, 1988
American National Standards Institute, Inc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
10:41:12 1991

American National Standard

Approval of an American National Standard requires verification by ANSI that the requirements for due process, consensus, and other criteria for approval have been met by the standards developer.

Consensus is established when, in the judgment of the ANSI Board of Standards Review, substantial agreement has been reached by directly and materially affected interests. Substantial agreement means much more than a simple majority, but not necessarily unanimity. Consensus requires that all views and objections be considered, and that a concerted effort be made toward their resolution.

The use of American National Standards is completely voluntary; their existence does not in any respect preclude anyone, whether he has approved the standards or not, from manufacturing, marketing, purchasing, or using products, processes, or procedures not conforming to the standards.

The American National Standards Institute does not develop standards and will in no circumstances give an interpretation of any American National Standard. Moreover, no person shall have the right or authority to issue an interpretation of an American National Standard in the name of the American National Standards Institute. Requests for interpretations should be addressed to the secretariat or sponsor whose name appears on the title page of this standard.

CAUTION NOTICE: This American National Standard may be revised or withdrawn at any time. The procedures of the American National Standards Institute require that action be taken periodically to reaffirm, revise, or withdraw this standard. Purchasers of American National Standards may receive current information on all standards by calling or writing the American National Standards Institute.

Published by

American National Standards Institute
1430 Broadway, New York, New York 10018

Copyright © 1989 by American National Standards Institute, Inc
All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced in any form,
in an electronic retrieval system or otherwise, without
the prior written permission of the publisher.

Printed in the United States of America

A1C189/12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

y the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
10:41:13 1994

Foreword

(This Foreword is not part of American National Standard C29.1-1988.)

This standard comprises a manual of procedures to be followed in making tests to determine the characteristics of insulators used on electric power systems. This standard is not an insulator specification, but rather a test method to be used in conjunction with insulator specifications.

American National Standard C29.1-1988 is a revision of American National Standard Test Methods for Electrical Power Insulators, ANSI C29.1-1972. The present revision was prepared by Accredited Standards Committee on Insulators for Electric Power Lines, C29, which is in charge of this work.

Suggestions for improvement of this standard will be welcome. They should be sent to The Manager of Engineering, National Electrical Manufacturers Association, 2101 L St, NW, Washington, DC 20037, Attn: Secretary, ASC C-29.

This standard was processed and approved for submittal to ANSI by Accredited Standards Committee C29. Committee approval does not necessarily imply that all committee members voted for its approval. At the time it approved this standard, the C29 Committee had the following members:

J. L. Nicholls, Chairman
C. White, Secretary

Organization Represented	*Name of Representative*
Association of American Railroads	(Representation Vacant)
Bonneville Power Administration	R. L. Brown
Electric Light and Power Group	G. A. Cook
	A. S. Jagtiani
	J. F. Karcher
	E. F. Marchbank
	D. Soffrin (Alt)
	J. Weber
Institute of Electrical and Electronics Engineers	K. Labbe
	T. A. Pinkham
	N. E. Spaulding (Alt)
National Electrical Manufacturers Association	A. C. Baker
	R. Harap
	J. D. Sakich (Alt)
	J. W. Carter
	B. E. Kingsbury (Alt)
	J. L. Nicholls
	R. Harmon (Alt)
	A. E. Schwalm (Alt)
	H. Van Herk (Alt)
Salisbury Co	R. Bridewesson
Stone & Webster Engineering Corporation	G. Davidson
U.S. Department of the Army (Liaison, with Vote)	W. M. Juno

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)

Contents

SECTION PAGE

1. Scope 5

2. Definitions 5
   - 2.1 Insulators and Parts 5
   - 2.2 Low-Frequency Voltages 5
   - 2.3 Impulse Voltages 6
   - 2.4 Mechanical Strength 6
   - 2.5 Miscellaneous 6

3. Test-Specimen Mounting for Electrical Tests 6
   - 3.1 Suspension Insulators 6
   - 3.2 Line Insulators (Pin, Post) 7
   - 3.3 Apparatus Insulators (Cap and Pin, Post) 7
   - 3.4 Strain Insulators 7
   - 3.5 Spool Insulators 7

4. Electrical Tests 8
   - 4.1 General 8
   - 4.2 Low-Frequency Dry Flashover Voltage Tests 8
   - 4.3 Low-Frequency Wet Flashover Voltage Tests 9
   - 4.4 Low-Frequency Dry Withstand Voltage Tests 9
   - 4.5 Low-Frequency Wet Withstand Voltage Tests 10
   - 4.6 Low-Frequency Dew Withstand Voltage Tests 10
   - 4.7 Impulse Flashover Voltage Tests 10
   - 4.8 Impulse Withstand Voltage Tests 10
   - 4.9 Radio-Influence Voltage Tests 11
   - 4.10 Visual Corona Test 11
   - 4.11 Puncture Tests 12

5. Mechanical Tests 12
   - 5.1 Ultimate Mechanical-Strength Tests 12
   - 5.2 Combined Mechanical- and Electrical-Strength Test (Suspension Insulators) 13
   - 5.3 Time-Load-Withstand-Strength Test 13
   - 5.4 Porosity Test 13
   - 5.5 Thermal Test 14
   - 5.6 Pinhole-Gaging Test 14

6. Galvanizing Test 14

7. Routine Tests 14
   - 7.1 Electrical Tests 14
   - 7.2 Mechanical Tests 14

8. Revision of American National Standards Referred to in This Document 15

Table 1 Rate of Increase of Load 12

Figures

Figure 1 Low-Frequency Humidity Correction Factors 9

Figure 2 Impulse Humidity Correction Factors 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

American National Standard

for Electrical Power Insulators – Test Methods

THAI INDUSTRIAL STANDARDS INSTITUTE

1. Scope

This standard comprises a manual of test methods to be followed in making tests to determine the characteristics of electrical power insulators, as defined herein. Individual tests shall be made only when specified.

2. Definitions

NOTE: Definitions as given herein apply specifically to the subject treated in this standard. For additional definitions see American National Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, ANSI/IEEE 100-1988.

2.1 Insulators and Parts

2.1.1 Insulator. An insulator is a device intended to give flexible or rigid support to electric conductors or equipment and to insulate these conductors or equipment from ground or from other conductors or equipment.

An insulator comprises one or more insulating parts to which connecting devices (metal fittings) are often permanently attached.

2.1.2 Shell. A shell is a single insulating member, having a skirt or skirts without cement or other connecting devices, intended to form a part of an insulator or an insulator assembly.

2.1.3 Pin Insulator. A pin insulator is an insulator having means for rigid mounting on a separable pin.

2.1.4 Post Insulator. A post insulator is an insulator of generally columnar shape, having means for direct and rigid mounting.

2.1.5 Cap and Pin Insulator. A cap and pin insulator is an assembly of one or more shells with metallic cap and pin, having means for direct and rigid mounting.

2.1.6 Line Insulator (Pin, Post). A line insulator is an assembly of one or more shells, having means for semirigidly supporting line conductors.

2.1.7 Apparatus Insulator (Cap and Pin, Post). An apparatus insulator is an assembly of one or more apparatus-insulator units, having means for rigidly supporting electric equipment.

2.1.7.1 Unit. An apparatus-insulator unit is an assembly of one or more shells with attached metal parts, the function of which is to support rigidly a conductor, bus, or other conducting elements on a structure or base member.

2.1.7.2 Stack. An apparatus-insulator stack is a rigid assembly of two or more apparatus-insulator units.

2.1.8 Suspension Insulator. A suspension insulator is an insulator with attached metal parts having means for nonrigidly supporting electric conductors.

2.1.8.1 Unit. A suspension-insulator unit is an assembly of a shell and hardware, having means for nonrigid coupling to other units or terminal hardware.

2.1.8.2 String. A suspension-insulator string is an assembly of two or more suspension insulators in tandem.

2.1.9 Strain Insulator. A strain insulator is an insulator generally of elongated shape, with two transverse holes or slots.

2.1.10 Spool Insulator. A spool insulator is an insulator of generally cylindrical form having an axial mounting hole and a circumferential groove or grooves for the attachment of a conductor.

2.1.11 Wire Holder. A wire holder is an insulator of generally cylindrical or pear shape, having a hole for securing the conductor and a screw or bolt for mounting.

2.2 Low-Frequency Voltages

2.2.1 Low Frequency. Low frequency, as used in this standard, means any frequency between 15 and 100 hertz.

2.2.2 Low-Frequency Flashover Voltage. A low-frequency flashover voltage of an insulator is the root-mean-square value of the low-frequency voltage that, under specified conditions, causes a sustained disruptive discharge through the surrounding medium.

2.2.2.1 Dry flashover voltage tests are tests as described in 4.2.

2.2.2.2 Wet flashover voltage tests are tests as described in 4.3.

2.2.3 Low-Frequency Withstand Voltage. A low-frequency withstand voltage of an insulator is the root-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
10:91:13 1994

mean-square value of the low-frequency voltage that, under specified conditions, can be applied without causing flashover or puncture.

2.2.3.1 Dry withstand voltage tests are tests as described in 4.4.

2.2.3.2 Wet withstand voltage tests are tests as described in 4.5.

2.2.3.3 Dew withstand voltage tests are tests as described in 4.6.

2.2.4 Low-Frequency Puncture Voltage. A low-frequency puncture voltage of an insulator is the root-mean-square value of the low-frequency voltage that, under specified conditions, causes disruptive discharge through any part of the insulator.

Puncture tests are tests as described in 4.11.

2.3 Impulse Voltages

2.3.1 Impulse Wave. An impulse wave is a unidirectional surge generated by the release of electrical energy into an impedance network.

2.3.2 Impulse Flashover Voltage. An impulse flashover voltage of an insulator is the crest value of the impulse wave that, under specified conditions, causes flashover through the surrounding medium.

2.3.3 Critical Impulse Flashover Voltage. The critical impulse flashover voltage of an insulator is the crest value of the impulse wave that, under specified conditions, causes flashover through the surrounding medium on 50% of the applications.

Impulse flashover voltage tests are tests as described in 4.7.

2.3.4 Impulse Withstand Voltage. The impulse withstand voltage of an insulator is the crest value of an applied impulse voltage that, under specified conditions, does not cause a flashover, puncture, or disruptive discharge on the test specimen.

Impulse withstand voltage tests are tests as described in 4.8.

2.4 Mechanical Strength

2.4.1 Ultimate Mechanical Strength. The ultimate mechanical strength of an insulator is the load at which any part of the insulator fails to perform its function of providing a mechanical support without regard to electrical failure.

Ultimate mechanical-strength tests are tests as described in 5.1.

2.4.2 Combined Mechanical and Electrical Strength (Suspension Insulator). The combined mechanical and electrical strength of a suspension insulator is the mechanical load at which the insulator fails to perform its function either electrically or mechanically, when voltage and mechanical stress are applied simultaneously.

A combined mechanical- and electrical-strength test is a test as described in 5.2.

2.4.3 Time-Load Withstand Strength. The time-load withstand strength of an insulator is the mechanical load that, under specified conditions, can be continuously applied without mechanical or electrical failure.

A time-load withstand test is a test as described in 5.3.

2.4.4 Mechanical-Impact Strength. The mechanical-impact strength of an insulator is the impact which, under specified conditions, the insulator can withstand without damage.

A mechanical-impact strength test is a test as described in 5.1.2.2.

2.5 Miscellaneous

2.5.1 Test Specimen. A test specimen is an insulator which is representative of the product being tested; it is a specimen that is undamaged in any way which would influence the result of the test.

2.5.2 Leakage Distance. The leakage distance of an insulator is the sum of the shortest distances measured along the insulating surfaces between the conductive parts, as arranged for dry flashover test. (Surfaces coated with semiconducting glaze shall be considered as effective leakage surfaces, and leakage distance over such surfaces shall be included in the leakage distance.)

2.5.3 Dry-Arcing Distance. The dry-arcing distance of an insulator is the shortest distance through the surrounding medium between terminal electrodes, or the sum of the distances between intermediate electrodes, whichever is the shorter, with the insulator mounted for dry flashover test.

2.5.4 Radio-Influence Voltage. The radio-influence voltage of an insulator is the radio-frequency voltage measured under specified conditions.

Radio-influence voltage tests are tests as described in 4.9.

3. Test-Specimen Mounting for Electrical Tests

3.1 Suspension Insulators

3.1.1 Mounting Arrangement. Unless otherwise specified, the test specimen (unit or string) shall be suspended vertically at the end of a grounded conductor so that the vertical distance from the uppermost point of the insulator hardware to the supporting structure shall be not less than 3 feet (914 mm).

3.1.2 Energized Electrode. The energized or bottom electrode or conductor shall be a straight, smooth rod or tube having an outside diameter not less than 3/4 inch (19 mm) nor more than 1-1/2 inches (38 mm). It shall be coupled to the lower integral fitting of the test specimen so that the distance from the lowest edge of the insulator shell to the upper surface of the electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
0:41:13 1994

shall be between 0.5 and 0.7 of the diameter of the lowest insulator. The conductor shall be horizontal and at right angles to the axis of the test specimen. The conductor shall be of such length that flashover will not be initiated at the electrode ends.

3.1.3 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer the test specimen or energized electrodes than 1-1/2 times the test-specimen dry-arcing distance, with a minimum allowable distance of 3 feet (914 mm).

3.2 Line Insulators (Pin, Post)

3.2.1 Mounting Arrangement (Crossarm). Unless otherwise specified, the supporting crossarm shall be a horizontal, straight, smooth, grounded, metallic tube or structural member having a horizontal width not less than 3 inches (76 mm) nor more than 6 inches (152 mm). It shall be of such length that flashover will not be initiated at its ends.

3.2.2 Mounting Pin (If Required). When a separable pin is required, the test specimen shall be mounted vertically on a 1-inch (25-mm) diameter metal pin of such length that the shortest dry-arcing distance from the upper electrode and connected metallic parts to the supporting crossarm shall be 25% greater than the similar distance to the pin. The pin shall be coaxial with the test specimen. Insulators having integrally assembled means for mounting on a crossarm shall be mounted vertically and directly on the test crossarm.

3.2.3 Energized Electrode. The energized or top electrode or conductor shall be a horizontal round rod or tube placed at right angles to the supporting crossarm, and of a diameter not less than 1/2 inch (13 mm). It shall be of such length that flashover will not be initiated at its ends. The conductor shall be placed in the top conductor groove of the test specimen. When there is no top conductor groove, the conductor shall be placed in the other means provided for the conductor support. If a tie wire is to be used, the conductor shall be secured by means of at least two turns of wire not smaller than No. 8 AWG (American Wire Gage), the ends being closely wrapped around the conductor on each side of the insulator.

3.2.4 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer the test specimen or energized electrodes than 1-1/2 times the test-specimen dry-arcing distance, with a minimum allowable distance of 3 feet (914 mm).

3.3 Apparatus Insulators (Cap and Pin, Post)

3.3.1 Mounting Arrangement. Unless otherwise specified, the test specimen shall be mounted vertically upright on a horizontal, grounded 10-inch (254-mm) channel, with the channel flanges projecting down. A subbase shall be used if the insulator characteristics are predicated on its use. The supporting channel shall be of such length that flashover will not be initiated at its ends, and its top surface shall be not less than 3 feet (914 mm) above the ground.

3.3.2 Energized Electrode. The energized or top electrode or conductor shall be a horizontal round rod or tube at right angles to the supporting channel, and of a diameter approximately 5% of the test-specimen dry-arcing distance within the limits of 4-1/2 inches (114 mm) maximum and 1/2 inch (13 mm) minimum. The length of the conductor shall be such that flashover will not be initiated at its ends. It shall be mounted directly in contact with the top integral fitting of the test specimen, and with its horizontal axis in the same vertical plane as the vertical axis of the test specimen.

3.3.3 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer the test specimen or energized electrodes than 1-1/2 times the test-specimen dry-arcing distance, with a minimum allowable distance of 3 feet (914 mm).

3.4 Strain Insulators

3.4.1 Mounting Arrangement. Unless otherwise specified, the test specimen shall be mounted in a position with its major axis at 45 degrees from the vertical (for wet flashover test, the major axis shall be at right angles to the spray direction, and the axis of the upper conductor hole or slot shall be horizontal), using flexible metal conductors of approximately 50% of the hole diameter. The conductors shall be clamped with guy clamps, spaced from the test specimen at a distance not less than the test-specimen length. Mechanical tension sufficient to avoid appreciable sag in the setup shall be applied to the test specimen. The lower conductor shall be grounded.

3.4.2 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer the test specimen or energized electrodes than 1-1/2 times the dry-arcing distance of the test specimen, with a minimum allowable distance of 1 foot (305 mm).

3.5 Spool Insulators

3.5.1 Mounting Arrangement. The test specimen shall be mounted horizontally or vertically [as specified in Fig. 1 through 5 of American National Standard for Wet-Process Porcelain Insulators (Spool Type), ANSI C29.3-1986], and in contact with two smooth metallic straps 1-1/2 inches (38 mm) wide and of any suitable thickness. A rod of suitable diameter shall pass through the axial hole of the test specimen and one end of each of the straps. The straps shall extend horizontally in one direction from the rod and remain parallel to each other for a distance from the test specimen of not less than the height of the test specimen. The other ends of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
10:41:13 1994

the straps shall be suitably connected to a grounded support.

3.5.2 Energized Electrode. The energized electrode shall consist of one turn of No. 8 AWG conductor placed around the wire groove and served back on itself. This conductor shall be carried away from the test specimen parallel to and in a direction opposite to the supporting straps.

3.5.3 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer to the test specimen or energized electrodes than 1 foot (305 mm).

4. Electrical Tests

4.1 General. Test specimens used for the tests in this section shall have clean insulating surfaces.

4.2 Low-Frequency Dry Flashover Voltage Tests

4.2.1 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting for dry flashover voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.2.2 Voltage Application. The initial applied voltage may be quickly raised to approximately 75% of the expected average dry flashover voltage value. The continued rate of voltage increase shall be such that the time to flashover will be not less than 5 seconds nor more than 30 seconds after 75% of the flashover value is reached.

4.2.3 Dry Flashover Voltage Value.[1] The dry flashover voltage value of a test specimen shall be the arithmetical mean of not less than five individual flashovers taken consecutively. The period between consecutive flashovers shall be not less than 15 seconds nor more than 5 minutes.

4.2.4 Corrections

4.2.4.1 Standard Conditions. Dry flashover voltage values shall be corrected in accordance with American National Standard Techniques for High-Voltage Testing, ANSI/IEEE 4-1978, except the following standard conditions shall apply:

Barometric pressure:	29.92 inches of mercury (10.086×10^4 pascals)
Temperature:	77°F (25°C)
Vapor pressure:	0.6085 inch of mercury (2.051×10^3 pascals)

[1] Probable variation: Due to inaccuracies of correction methods, difficulties of precise calibrations, and other uncontrollable conditions, a variation of ± 5% from the probable true average dry flashover voltage value may occur in tests conducted in one laboratory. Values obtained by tests conducted in different laboratories may vary by ± 8%.

Humidity and relative air density corrections shall be calculated in accordance with 4.2.4.2 and 4.2.4.3.

4.2.4.2 Humidity. The dry flashover voltage value shall be corrected to standard humidity conditions in accordance with the curves in Fig. 1. (Humidity correction curves are not available for spool and strain insulators.)

The vapor pressure shall be determined by the following procedure:

Humidity shall be measured with wet- and dry-bulb thermometers, the air being circulated past the thermometers at a velocity of 3 meters (9.84 feet), or more, per second, or with the sling psychrometer. The measurements shall be reduced to vapor pressure with the assistance of the Smithsonian Meteorological Tables or by the following formulas:

For U.S. customary units:

$$P_h = P_s - 0.000367b(t - t')\left(1 + \frac{t' - 32}{1571}\right)$$

where

P_h = vapor pressure, in inches of mercury
P_s = pressure, in inches of mercury, of saturated aqueous vapor at temperature t'
b = barometric pressure, in inches of mercury
t = temperature of air, in degrees Fahrenheit
t' = wet-bulb temperature of air, in degrees Fahrenheit

For SI units:

$$P_h = P_s - 0.0876b(t - t')(1 + 0.00115t')$$

where

P_h = vapor pressure, in pascals
P_s = pressure, in pascals, of saturated aqueous vapor at temperature t'
b = barometric pressure, in pascals
t = temperature of air, in degrees Celsius
t' = wet-bulb temperature of air, in degrees Celsius

4.2.4.3 Air Density. The dry flashover voltage value shall be corrected to standard atmospheric temperature and pressure conditions. To do so, divide the measured voltage value by the relative air density correction factor, K_d, calculated in one of the following ways:

For U.S. customary units:

$$K_d = 17.95\frac{P}{(460 + {}^\circ T)}$$

where

P = barometric pressure in inches of mercury
T = air temperature in degrees Fahrenheit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
41:13 1994

For SI units:

$$K_d = 0.002955 \frac{P}{(273 + T)}$$

where

P = barometric pressure in pascals
T = air temperature in degrees Celsius

or

$$K_d = 0.392 \frac{P}{(273 + T)}$$

where

P = barometric pressure in millimeters of mercury
T = air temperature in degrees Celsius

4.3 Low-Frequency Wet Flashover Voltage Tests

4.3.1 Mounting Arrangement. The test specimen mounting for wet flashover voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.3.2 Precipitation. The precipitation shall be applied in accordance with subsection 1.3.3.2 and Table 1.2 (Practice in USA) of ANSI/IEEE 4-1978.

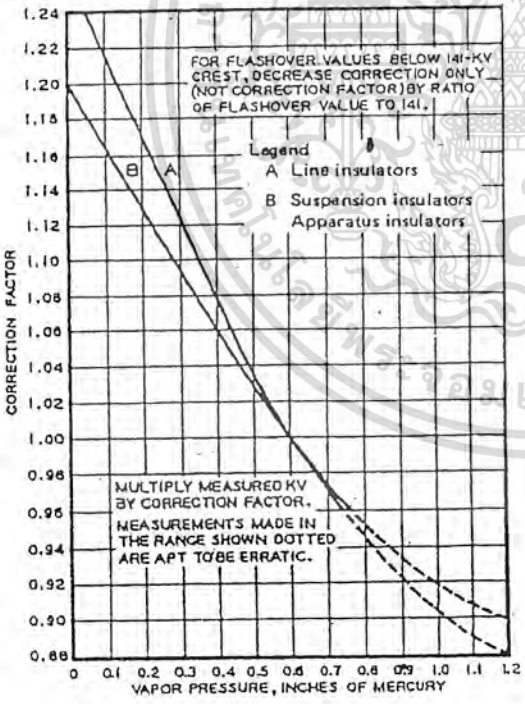


Fig. 1
Low-Frequency Humidity Correction Factors

4.3.3 Preparation of Test Specimen. The preparation of the test specimen shall be in accordance with subsection 1.3.3.2 of ANSI/IEEE 4-1978.

4.3.4 Voltage Application. At not less than 1 minute after the final adjustment of the spray, the applied voltage may be raised quickly to approximately 75% of the expected average wet flashover voltage value. The continued rate of voltage increase shall be such that the time to flashover will be not less than 5 seconds nor more than 30 seconds after 75% of the wet flashover voltage value is reached.

4.3.5 Wet Flashover Voltage Value.[3] The wet flashover voltage value of a test specimen shall be the arithmetical mean of not less than five individual flashovers taken consecutively. The period between consecutive flashovers shall be not less than 15 seconds nor more than 5 minutes.

4.3.6 Corrections. Corrections shall be made in accordance with 4.2.4, except that no correction for humidity shall be made.

4.4 Low-Frequency Dry Withstand Voltage Tests

4.4.1 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting for dry withstand voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.4.2 Voltage Application. 75% of the rated dry withstand voltage may be applied in one step and gradually raised to the required value in not less than 5 nor more than 30 seconds.

4.4.3 Test Voltage and Time. The test voltage, which is the rated dry withstand voltage with appropriate atmospheric corrections applied, shall be held on the test specimen for 1 minute.

4.4.4 Corrections. Corrections shall be made in accordance with 4.2.4. The test voltage applicable to existing atmospheric conditions is obtained from the rated withstand voltage, as given for standard atmospheric conditions, by use of the following equation:

$$V = V_s \times \frac{\delta}{H}$$

where

V = test voltage, in kilovolts, applied to test specimen
V_s = rated withstand voltage, in kilovolts
δ = relative air density
H = humidity correction factor applicable for the particular test specimen

[3] Probable variation: Due to variations in water spray, inaccuracies of correction methods, difficulties of precise calibrations, and other uncontrollable conditions, a variation of ± 8% from the probable true average wet flashover voltage value may be expected in tests conducted in one laboratory. Values obtained by tests conducted in different laboratories may vary by ± 12%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)

4.5 Low-Frequency Wet Withstand Voltage Tests

4.5.1 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting for wet withstand voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.5.2 Precipitation. The precipitation shall be applied in accordance with subsection 1.3.3.2 and Table 1.2 (Practice in USA) of ANSI/IEEE 4-1978.

4.5.3 Preparation of Test Specimen. The preparation of the test specimen shall be in accordance with subsection 1.3.3.2 of ANSI/IEEE 4-1978.

4.5.4 Voltage Application. 75% of the rated wet withstand voltage may be applied in one step and gradually raised to the required value in not less than 5 nor more than 30 seconds.

4.5.5 Test Voltage and Time. The test voltage, which is the rated wet withstand voltage, with appropriate atmospheric corrections applied, shall be held on the test specimen for 10 seconds.

4.5.6 Corrections. Corrections shall be in accordance with 4.2.4, except that no correction shall be made for humidity. The test voltage applicable to existing atmospheric conditions is obtained from the rated withstand voltage, as given for standard atmospheric conditions, by use of the following equation:

$$V = V_s \times \delta$$

where

V = test voltage, in kilovolts, applied to test specimen

V_s = rated withstand voltage, in kilovolts

δ = relative air density

4.6 Low-Frequency Dew Withstand Voltage Tests

4.6.1 Preparation of Test Specimen. The test specimen shall be placed in a chamber having a temperature of from -10°C to -15°C (14°F to 5°F) until the specimen is thoroughly cooled. (Cooling may take 10 to 12 hours.)

4.6.2 Mounting Arrangement. The test specimen shall be mounted in accordance with Section 3 in a test chamber having a temperature of approximately 77°F (25°C). The relative humidity in the test chamber shall be approximately 100%. This may be obtained by passing live steam at atmospheric pressure into the chamber.

4.6.3 Voltage Application. The voltage shall be raised rapidly to dew withstand test voltage, while the test specimen is completely covered with dew. The time to raise the voltage shall be not more than 20 seconds.

4.6.4 Test Voltage and Time. The test voltage, which is the rated dew withstand voltage with appropriate atmospheric corrections applied, shall be held on the test specimen for 10 seconds.

4.6.5 Corrections. Corrections shall be made in accordance with 4.5.6.

4.7 Impulse Flashover Voltage Tests

4.7.1 General. Impulse flashover voltage tests are made under dry conditions only.

4.7.2 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting for impulse flashover voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.7.3 Impulse Voltage Wave. All tests shall be made with a 1.2 X 50-microsecond wave, in accordance with ANSI/IEEE 4-1978.

4.7.4 Critical Impulse Flashover Voltage Value.[3] The critical impulse flashover voltage shall be determined in accordance with ANSI/IEEE 4-1978.

4.7.5 Volt-Time Flashover Curves.[3] The volt-time flashover curves shall be determined in accordance with ANSI/IEEE 4-1978.

4.7.6 Corrections

4.7.6.1 Critical Impulse Flashover Voltage. The critical impulse flashover voltage value shall be corrected to standard conditions in accordance with 4.2.4, except that the curves in Fig. 2 shall be used.

4.7.6.2 Volt-Time Curves. The full air-density corrections shall be applicable. The humidity correction shall be made as follows:

(1) When the critical flashover voltage value occurs at more than 10 microseconds, full corrections shall be applied to all values with time lags of 10 microseconds or more. When flashover above critical voltage occurs at less than 10 microseconds, the correction shall be reduced in the direct ratio that the time to flashover bears to 10 microseconds.

(2) When the critical flashover voltage value occurs at less than 10 microseconds, the correction shall be reduced in the direct ratio that the time to flashover bears to the time at the critical flashover.

4.8 Impulse Withstand Voltage Tests

4.8.1 General. Impulse withstand voltage tests are made to determine that the test specimen is capable of withstanding a specified impulse voltage.

4.8.2 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting for impulse withstand voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.8.3 Corrections. Corrections shall be made in accordance with 4.4.4, except that the curves in Fig. 2 shall be used.

---

[3] Probable variation: Due to inaccuracies of correction methods, difficulties of precise calibrations, and other uncontrollable conditions, a variation of ± 5% from the probable true average impulse critical flashover voltage value may be expected in tests conducted in one laboratory. Values obtained by tests conducted in different laboratories may vary by ± 8%. In volt-time curves, similar variations are to be expected at points near the impulse critical flashover voltage value, with considerably larger variations involved as the time to breakdown decreases.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

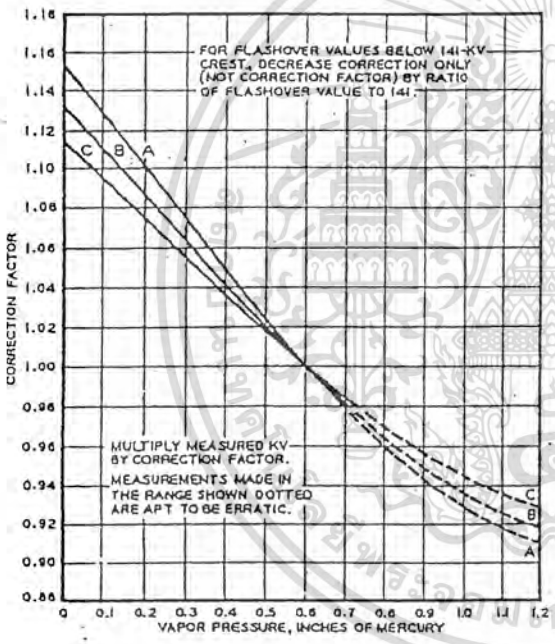
by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)

4.8.4 Voltage Application. Impulse withstand voltage tests shall be made with an impulse of that polarity which produces the lower flashover voltage on the test specimen. Three consecutive impulses shall be applied to the test specimen. The crest voltage of each shall be not less than the specified impulse withstand voltage, with appropriate atmospheric corrections.

4.9 Radio-Influence Voltage Tests

4.9.1 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting shall be in accordance with Section 3, except that the clearance to objects, other than parts of the test assembly, shall in no case be less than 3 feet (914 mm) per 100 kilovolts of test voltage.

All hardware associated with the test circuit shall be relatively free of radio influence at a voltage 10% higher than the voltage at which the tests are to be performed.



Legend

A Suspension insulators, positive wave

B Line insulators, positive wave
Suspension insulators, negative wave
Apparatus insulators, positive wave

C Line insulators, negative wave
Apparatus insulators, negative wave

Fig. 2
Impulse Humidity Correction Factors

4.9.2 Equipment. The equipment used in making the radio-influence voltage tests shall be in accordance with NEMA 107-1964 (R1987), Methods of Measuring Radio Noise.[4]

4.9.2.1 Wave Shape. The wave shape of the applied voltage shall be a sine wave of acceptable commercial standards in accordance with ANSI/IEEE 4-1978.

4.9.2.2 Supply-Voltage Frequency. The frequency of the supply voltage shall be 60 hertz ± 5%.

4.9.3 Atmospheric Conditions. Tests shall be conducted under atmospheric conditions prevailing at the time and place of test, but it is recommended that tests be avoided when the vapor pressure exceeds 0.6 inch of mercury (2.02×10^3 pascals). Since the effects of humidity and air density upon the radio-influence voltage are not definitely known, no correction factors are recommended for either at the present time. However, it is recommended that barometric pressure and dry- and wet-bulb thermometer readings be recorded so that if suitable correction factors should be determined, they could be applied to previous measurements.

4.9.4 Precautions in Making Radio-Influence Voltage Tests. The following precautions should be observed when making a radio-influence voltage test on a test specimen:

(1) The test specimen should be at approximately the same temperature as the room in which the test is made

(2) The test specimen should be clean.

(3) In some cases it may be found that the radio-influence voltage falls off rapidly after the 60-hertz voltage has been applied for a short time. In such cases it is permissible to stabilize conditions by preexciting the test specimen at normal operating voltage for a period not to exceed 5 minutes before proceeding with the tests.

4.9.5 Methods of Making Tests

4.9.5.1 Radio-Influence Voltage. The specified voltage shall be applied to the test specimen, and the radio-influence voltage shall be measured in microvolts at the specified radio frequency. It is considered impractical to read radio-influence test voltages that are less than 10 microvolts.

4.9.5.2 Radio-Influence Characteristics. The radio-influence characteristics are determined by plotting the test voltage against the corresponding radio-influence voltage.

4.10 Visual Corona Test

4.10.1 General. To assist in locating a source of

[4] Available from National Electrical Manufacturers Association, 2101 L Street, N.W., Washington, D.C. 20037.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)

radio-influence voltage, a corona test may be performed. The test shall be made in a thoroughly darkened room.

4.10.2 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting shall be in accordance with 4.9.1.

4.10.3 Procedure. A voltage well above the corona point shall be applied and slowly lowered until all discharges disappear from the test specimen. The point of disappearance shall be the corona voltage. The observer's eyes shall be thoroughly accustomed to the darkened room before making visual observations.

4.11 Puncture Tests

4.11.1 Mounting Arrangement. Puncture tests shall be performed on fully assembled insulators only. The test specimen shall be inverted and immersed in insulating oil having a sufficient dielectric strength to prevent external flashover of the specimen. The oil shall be at least 6 inches (152 mm) deep over all parts of the test specimen.

Voltage shall be applied between the integrally assembled electrode (cap and pin) on all units having these parts. In the case of pin insulators having no conducting electrodes at one or both terminals, electrodes shall be provided as follows:

An electrode in the pinhole shall be provided by setting a metallic thimble, with suitable conducting material, such as cement or alloy. The thimble shall be provided with a close-fitting pin for attaching the conductor. The top of the test specimen shall be coated with conducting material to a diameter of approximately 1 inch (25 mm) larger than the test-specimen head.

4.11.2 Voltage Application. Voltage shall be applied between the electrodes, as described in 4.11.1. The initial applied voltage may be raised quickly to the rated dry flashover voltage of the test specimen. The voltage shall then be raised at the rate of approximately 10 000 volts every 15 seconds to the value at which puncture occurs.

4.11.3 Percent Average Variation of Puncture Voltage.[5] The percent average variation of the puncture voltage is determined as follows:

Let

$V_1, V_2, V_3, \ldots, V_n$ = individual puncture voltage values, in kilovolts

V = average puncture voltage, in kilovolts

then

$$V = \frac{(V_1 + V_2 + V_3 + \ldots + V_n)}{n}$$

Let

$$a_1 = V - V_1$$
$$a_2 = V - V_2$$
$$a_3 = V - V_3$$
$$A_n = V - V_n$$

NOTE: Consider all these values of a as positive; that is, neglect the signs.

Let

a = average variation, in kilovolts

A = percent average variation

then

$$a = \frac{(a_1 + a_2 + a_3 + \ldots + a_n)}{n}$$

$$A = \frac{100a}{V}$$

5. Mechanical Tests

5.1 Ultimate Mechanical-Strength Tests

5.1.1 General. Mechanical load shall be applied to the test specimen in the manner prescribed in 5.1.1 through 5.3.2. The load shall be started at zero and smoothly brought up in a practically stepless variation to the failure point. The load may be increased rapidly to approximately 75% of rated strength of the insulator. The rate of increase of load from 75% of rating to failure is given in Table 1.

5.1.2 Suspension Insulators

5.1.2.1 Tensile Strength. Mechanical-tensile load shall be applied between terminal fittings in line with the axis of the test specimen.

Table 1
Rate of Increase of Load

Class of Insulator	Type of Test	Increase in Load per Minute in Percentage of Rated Strength	
		Min	Max
Suspension Line	Tensile	15	30
	Cantilever	30	60
Apparatus	Cantilever	30	60
Apparatus	Torsion	30	60
Apparatus	Tensile	15	30
Apparatus	Compression	15	30

[5] If test-equipment limitations are such that the test specimen cannot be punctured, the puncture value shall be considered to be the maximum available applied test voltage, provided this value exceeds 150% of the puncture rating.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
10:41:13 1994

5.1.2.2 Mechanical-Impact Strength. The test specimen shall be mounted in the specified test machine in the specified manner under a tensile load of approximately 2000 pounds-force (8896 N). The bearing point of the pendulum shall be so adjusted that, when released, the copper nose will strike the outer rim of the shell squarely in a direction parallel to the axis of the unit and towards the cap. The test specimen shall receive an impact of the specified severity by releasing the pendulum when its shaft is opposite the corresponding mark on the indicating scale. The pendulum shall be released with no imparted acceleration. After receiving the specified impact, the test specimen shall be tested for soundness by momentary flashover.

5.1.3 Line Insulators (Pin, Post) (Cantilever Strength). Mechanical load shall be applied in line with the side groove of the test specimen and normal to the axis of the pinhole. The load at the tie-wire groove may be applied by means of a loop of flexible stranded cable or the equivalent. The mounting pin, connecting hardware, and linkages between the test specimen and the testing machine shall be such that no appreciable deflection takes place at values up to the failure point of the test specimen. Insulators whose design incorporates self-contained metal caps, mounting bases, pins, or conductor clamps, shall be tested with this hardware, using a suitable rigid support.

5.1.4 Apparatus Insulators (Cap and Pin, Post)

5.1.4.1 Cantilever Strength. Cantilever-strength tests shall be made with the test specimen adequately secured to the testing machine. The load shall be applied normal to the axis of the test specimen at the specified point of application. In demonstrating stack ratings, one insulator unit may be used. The equivalent lever arm may be obtained by bolting a bar or pipe of proper length and stiffness to the test specimen.

5.1.4.2 Torsional Strength. Torsional-strength tests shall be made with the test specimen adequately secured to the testing machine. The torsional load shall be applied to the test specimen through a torque member so constructed that the test specimen is not subjected to any cantilever stress.

5.1.4.3 Tensile Strength. Tensile-strength tests shall be made with the test specimen adequately secured to the testing machine. The load shall be applied in line with the axis of the test specimen.

5.1.4.4 Compression Strength. Compression-strength tests shall be made by applying load in compression in line with the axis of the test specimen.

5.1.5 Strain Insulators (Tensile Strength). Mechanical load shall be applied in line with the main axis of the test specimen, using flexible, stranded, steel cable. Each cable loop shall be secured with clamps so positioned that the distance between the edge of the nearest clamp and the end of the test specimen is the same as the length of the test specimen. The diameter of the cable used should not exceed 50% of the diameter of the hole in the test specimen.

5.1.6 Spool Insulators (Transverse Strength). The test specimen shall be mounted between close-fitting parallel straps, using a through bolt of the same diameter as that for which the test specimen is designed. The straps and connecting linkage shall be such that no appreciable deflection will take place. Mechanical load shall be applied in the plane of the external wire groove. The load shall be applied by means of a loop of flexible, stranded, steel cable. The diameter of the cable shall not exceed the radius of the wire grooves.

5.1.7 Wire Holders

5.1.7.1 Tensile Strength. The mounting screw or bolt shall be installed in such a manner that the mounting surface of the test specimen does not touch the support. Load shall be applied in line with the axis of the mounting screw or bolt, using a loop of flexible, stranded, steel cable, the diameter of which shall not exceed the radius of the wire hole in the insulator. The loop shall be clamped, with the inside edge of the nearest clamp placed 9 inches (229 mm) from the end of the insulator.

5.1.7.2 Cantilever Strength. The mounting screw or bolt shall be held rigidly in such a manner that the mounting base of the test specimen seats squarely against the face of the plate. Load shall be applied in a plane parallel to the mounting surface, passing through the center of the wire groove, using the flexible loop arrangement described in 5.1.7.1.

5.2 Combined Mechanical- and Electrical-Strength Test (Suspension Insulators). Load shall be applied as described in 5.1.1 and 5.1.2.1. Simultaneously, a low-frequency voltage of not less than 75% of the rated dry flashover voltage shall be applied to the test specimen.

5.3 Time-Load-Withstand-Strength Test

5.3.1 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting shall be in accordance with the pertinent provisions in 5.1.

5.3.2 Loading. The specified load shall be applied smoothly, without undue vibration or shock, and maintained for the specified period. After the load has been removed, the test specimen shall be checked for electrical soundness by being subjected to momentary flashover. Test specimens having more than one shell shall have each shell checked individually for electrical soundness.

5.4 Porosity Test

5.4.1 Preparation of Test Specimens. Freshly broken fragments of the insulator, having clean surfaces ex-

LIBRARY
THAI INDUSTRIAL STANDARDS INSTITUTE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
Mon Feb 14 10:41:13 1994

posed, shall be used for this test. At least 75% of the surface area shall be free from glaze or other treatment. Fragments approximately 1/4 inch (6 mm) in the smallest dimension up to 3/4 inch (19 mm) in the largest dimension are recommended.

5.4.2 Testing Solution. For this test, a solution consisting of 1 gram of basic fuchsine dye dissolved in 1 liter of 50% alcohol shall be used. If a denatured alcohol is used, one should be selected which does not react with the dye to cause fading of the color.

5.4.3 Procedure. The test specimens shall be completely immersed in the testing solution within a pressure chamber. A minimum pressure of 4000 pounds-force per square inch (27 600 kN/m^2) shall be applied for not less than 5 hours, or an optional test at minimum 10 000 pounds-force per square inch (68 900 kN/m^2) for not less than 2 hours may be used. At the conclusion of the pressure application, the test specimens shall be thoroughly dried and broken for examination.

5.4.4 Interpretation of Results. Penetration into small fissures formed in preparing the test specimens shall be disregarded. Porosity is indicated by penetration of the dye into the test specimen to an extent visible to the unaided eye.

5.5 Thermal Test

5.5.1 General. The thermal test shall consist of alternate immersions of the test specimen in hot and cold water.

5.5.2 Testing Arrangement. The test specimens shall be arranged so that they are not in contact with each other and so that air shall not be entrapped during immersion. Free circulation of water shall be provided. Test specimens shall be at least 2 inches (51 mm) from the walls of the tank.

5.5.3 Equipment. Each bath shall have a weight of water at least 10 times the weight of the test specimen immersed. Either natural or forced circulation may be used to maintain the temperature of all parts of the bath within ± 4°F (2°C) of the specified value. The recorded temperature shall be measured at least 4 inches (102 mm) from the heating or cooling elements.

5.5.4 Method of Making Test. The test specimen shall first be immersed in a hot water bath for 10 minutes. It shall then be withdrawn and immersed in a cold water bath for 10 minutes. Not more than 5 seconds shall elapse in transferring the test specimen from one bath to another. After the specified number of hot and cold cycles, the test specimen shall be tested for electrical soundness by momentary flashover.

5.6 Pinhole-Gaging Test

5.6.1 General. When the threaded pinholes of pin insulators are gaged, the specified pinhole gage shall be used.

5.6.2 Test Procedure. The gage shall be screwed into the test specimen until the gage is tight. The distance from the bottom of the pinhole to the point where the gage stops, as indicated by the plunger and scale on the gage, shall be read.

The gage shall be removed from the test specimen, and the number of revolutions of the gage required to release it from the pinhole shall be counted.

6. Galvanizing Test

Test for thickness of coating shall be in accordance with Standard Measurement of Coating Thickness by the Magnetic Method: Nonmagnetic Coatings of Magnetic Base Metals, ASTM B 499-75 (1987).

7. Routine Tests

7.1 Electrical Tests. Flashover tests on shells or insulators may be made in accordance with either the procedure in 7.1.1 or in 7.1.2.

7.1.1 High-Frequency Test

7.1.1.1 Method 1. The shells or insulators shall be subjected to a damped high-frequency voltage sufficient to cause flashover for from 3 to 5 seconds. The frequency shall be approximately 200 kilohertz in damped trains.

7.1.1.2 Method 2. The shells or insulators shall be subjected to a high-frequency discharge from a transformer adjusted to a no-load voltage of not less than 115% of the low-frequency dry flashover of the shells or insulators, this test to be continued for a period of from 3 to 5 seconds. The frequency superimposed upon the low-frequency voltage shall be higher than 100 kilohertz.

7.1.2 Low-Frequency Test. The shells or insulators shall be subjected to vigorous dry flashover for from 3 to 5 minutes. The voltage control shall be such that a continual flashover occurs and divides uniformly over the shells or insulators under test.

7.2 Mechanical Tests

7.2.1 Suspension Insulators. Prior to or simultaneous with the final electrical test, the assembled suspension insulators shall be given a tensile-strength test 3 seconds in duration, at the specified value, applied in line with the axis of the insulator.

7.2.2 Apparatus Insulators. Prior to or simultaneous with the final electrical test, the assembled apparatus insulators shall be given a tensile-strength test 3 seconds in duration, at the specified value, applied in line with the axis of the insulator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
4 10:41:13 1994

8. Revision of American National Standards Referred to in This Document

When the following American National Standards referred to in this document are superseded by a revision approved by the American National Standards Institute, Inc, the revision shall apply:

ANSI C29.3-1986, Wet-Process Porcelain Insulators (Spool-Type)

ANSI/IEEE 4-1978, Techniques for High-Voltage Testing

ANSI/IEEE 100-1988, Dictionary of Electrical and Electronics Terms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
ul 10:41:12 1994

American National Standards

The standard in this booklet is one of 8000 standards approved to date by the American National Standards Institute.

The Standards Institute provides the machinery for creating voluntary standards. It serves to eliminate duplication of standards activities and to weld conflicting standards into single, nationally accepted standards under the designation "American National Standards."

Each standard represents general agreement among maker, seller, and user groups as to the best current practice with regard to some specific problem. Thus the completed standards cut across the whole fabric of production, distribution, and consumption of goods and services. American National Standards, by reason of Institute procedures, reflect a national consensus of manufacturers, consumers, and scientific, technical, and professional organizations, and governmental agencies. The completed standards are used widely by industry and commerce and often by municipal, state, and federal governments.

The Standards Institute, under whose auspices this work is being done, is the United States clearinghouse and coordinating body for voluntary standards activity on the national level. It is a federation of trade associations, technical societies, professional groups, and consumer organizations. Some 1000 companies are affiliated with the Institute as company members.

The American National Standards Institute is the United States member of the International Organization for Standardization (ISO) and the International Electrotechnical Commission (IEC). Through these channels U.S. standards interests make their positions felt on the international level. American National Standards are on file in the libraries of the national standards bodies of more than 60 countries.

American National Standards Institute, Inc
1430 Broadway
New York, N.Y. 10018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by the AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)
4 10:41:13 1994

ภาคผนวก จ
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ลูกถ้วยแขวน : ปอร์ซเลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ลูกถ้วยแขวน : ปอร์ซเลน

มอก. ๓๕๔ -๒๕๒๓

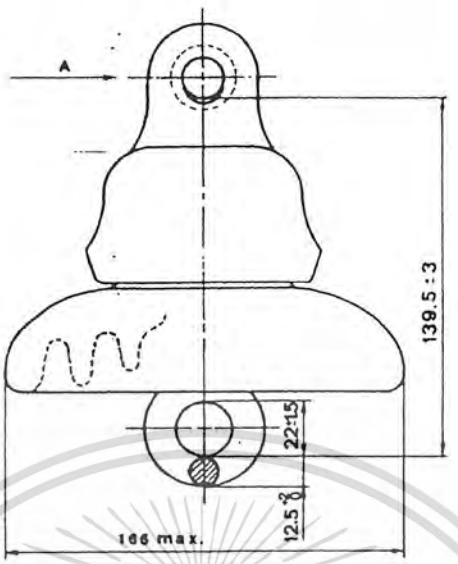
พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 3 พ.ศ.2543 จำนวน 200 เล่ม

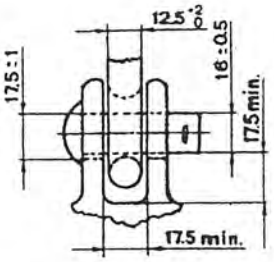
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 2023300

ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับพิเศษ เล่ม ๙๘ ตอนที่ ๑๒
วันที่ ๒๑ มกราคม พุทธศักราช ๒๕๒๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอก.๓๕๔-๒๕๒๓





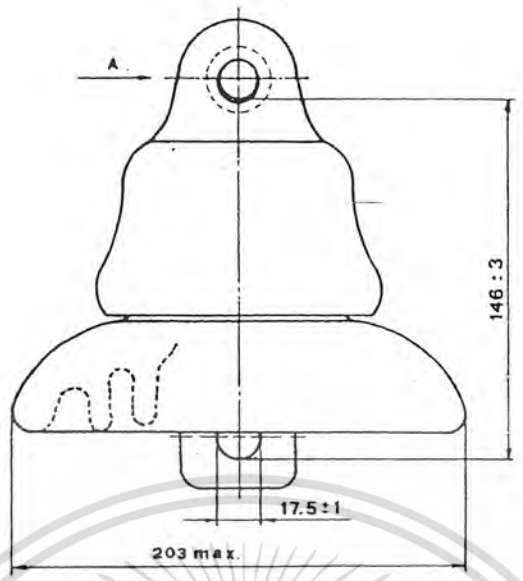
ภาพตามพิศทาง A

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ลักษณะทางกลต่ำสุด	
ระยะรั่ว มิลลิเมตร	178
ลักษณะทางกล	
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลนิวตัน	44.48
ความแข็งแรงต่อการกระแทกทางกล เซนติเมตรกิโลนิวตัน	507.37
ความทนแรงดึง (tension proof) กิโลนิวตัน	22.24
โลดเวลา กิโลนิวตัน	26.69
ลักษณะทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	60
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	30
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวขั้วลักษณะวิกฤตทางบวก กิโลโวลต์	100
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวขั้วลักษณะวิกฤตทางลบ กิโลโวลต์	100
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	80
ลักษณะทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่าวูลเทียนแกวร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	7.5
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮอร์ตซ์ ไมโครโวลต์	50

รูปที่ 1 ลูกถ้วยแขวนแบบ ก (แบบ 52-1)
(ข้อ 3.1.1 และข้อ 3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



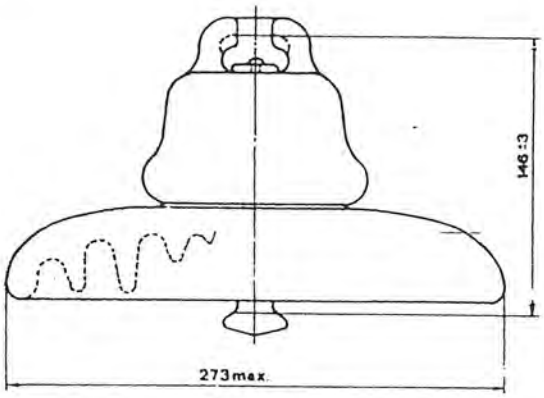
ภาพตามพิศทาง A

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ลักษณะทางมิติต่ำสุด	
ระยะรั่ว มิลลิเมตร	209.5
ลักษณะทางกล	
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลนิวตัน	66.72
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล เซนติเมตรนิวตัน	564.85
ความทนแรงดึง กิโลนิวตัน	33.36
โลหะวิทยา กิโลนิวตัน	44.48
ลักษณะทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	65
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	35
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก กิโลโวลต์	115
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กิโลโวลต์	115
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	90
ลักษณะทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่ารูดมีนสแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	7.5
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิรตซ์ ไมโครโวลต์	50

รูปที่ 2 ลูกถ้วยแขวนแบบ ข (แบบ 52-2)
(ข้อ 3.1.2 และข้อ 3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

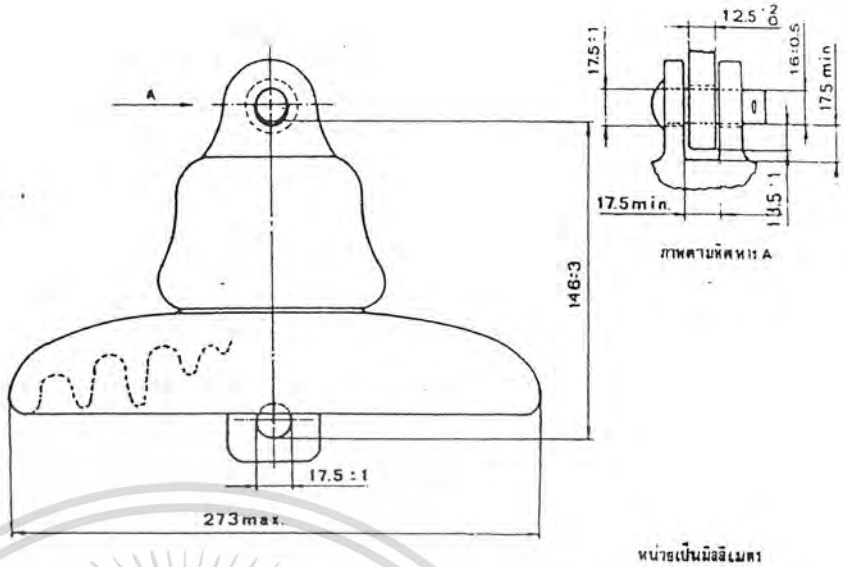


หน่วยเป็นมิลลิเมตร

พิกัดทางกลไฟฟ้าต่ำสุด	
ระยะรั่ว มิลลิเมตร	292
พิกัดทางกล	
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลนิวตัน	66.72
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล เซนติเมตรนิวตัน	621.34
ความทนแรงดึง กิโลนิวตัน	33.36
โลดเวลา กิโลนิวตัน	44.48
พิกัดทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	80
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	50
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก กิโลโวลต์	125
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กิโลโวลต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	110
พิกัดทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่ารูตมีนสแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลแฮร์ตซ์ ไมโครโวลต์	50

รูปที่ 3 ลูกถ้วยแขวนแบบ ค (แบบ 52-3)
(ข้อ 3.1.3 และข้อ 3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพตามหัวหน่า A

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ลักษณะทางมิติต่ำสุด	
ระยะรั่ว มิลลิเมตร	292
ลักษณะทางกล	
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลนิวตัน	66.72
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล เซนติเมตรนิวตัน	621.34
ความทนแรงดึง กิโลนิวตัน	33.36
โลดเวลา กิโลนิวตัน	44.48
ลักษณะทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	80
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	50
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก กิโลโวลต์	125
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กิโลโวลต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	110
ลักษณะทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่ารูตมีนสแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลแฮร์ตซ์ ไมโครโวลต์	50

รูปที่ 4 ลูกถ้วยแขวนแบบ ง (แบบ 52-4)
(ข้อ 3.1.4 และข้อ 3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2.5.2 ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวน 3 ลูก จากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้ว มาทดสอบตามวิธีที่กำหนดในผนวก ค. ถ้าไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ 5.6.2 ตั้งแต่ 1 ลูกให้สุ่มตัวอย่างมาทดสอบใหม่อีกจำนวน 3 ลูก

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.5.3 ความทนแรงดึง ให้ทดสอบลูกถ้วยแขวนทุกลูกตามวิธีที่กำหนดในผนวก ง.

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.5.4 โลดเวลา สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวน 5 ลูกจากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้ว มาทดสอบตามวิธีที่กำหนดในผนวก จ. ถ้าไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ 5.6.4 ตั้งแต่ 1 ลูก ให้สุ่มตัวอย่างมาทดสอบใหม่อีกจำนวน 5 ลูก

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.5.5 ความแข็งแรงส่วนที่เหลือ สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวน 25 ลูก จากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้ว มาทดสอบตามวิธีที่กำหนดในผนวก ฉ.

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

9.2.6.1 แรงดันไฟฟ้าวาบไฟสามผิวแห้งความถี่ต่ำ สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวน 3 ลูกจากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้ว มาทดสอบตามวิธีที่กำหนดในมอก.227ผนวก ค. โดยใช้การเตรียมตัวอย่างและการแปลงเป็นค่าที่วัดได้เพื่อเทียบกับค่าในภาวะมาตรฐานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) แขวนตัวอย่างลูกถ้วยหรือพวงลูกถ้วยในแนวดิ่งที่ปลายของตัวนำซึ่งต่อลงดิน โดยให้ระยะในแนวดิ่งจากส่วนบนสุดของขั้นส่วนโลหะ ประกอบลูกถ้วยไปถึงโครงสร้างที่รองรับไม่น้อยกว่า 914 มิลลิเมตร ติดตั้งอิเล็กโตรดที่ส่วนล่างของลูกถ้วยในแนวนอน และได้ฉากกับแกนของตัวอย่าง โดยมีระยะห่าง จากส่วนล่างสุดของขั้นของลูกถ้วย ถึงผิวบนของอิเล็กโตรดระหว่าง 0.5 กับ 0.7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกถ้วยลูกล่างสุด อิเล็กโตรดนั้นต้องตรง เรียบ เป็นแท่งตันหรือท่อกลมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกไม่น้อยกว่า 19 มิลลิเมตร และไม่เกิน 38 มิลลิเมตร ยาวพอที่จะไม่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวที่ปลายทั้งสอง ระยะห่างระหว่างตัวอย่างทดสอบและอิเล็กโตรดกับส่วนอื่น ๆ ต้องไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของความยาวของระยะอาร์กแห้งหรือ 914 มิลลิเมตร แล้วแต่ค่าใดจะมากกว่า

(2) ในกรณีที่ภาวะบรรยากาศในระหว่างการทดสอบไม่เท่ากับภาวะมาตรฐาน ให้แปลงผันค่าที่วัดได้เพื่อเทียบกับค่ามาตรฐานโดยใช้วิธีการตามที่กำหนดในมอก.279 ผนวก ช.

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่างและค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดันไฟฟ้า 1.1 เท่าของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ ถ้าไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ 5.7.4 ตั้งแต่ 1 ลูก ให้สุ่มตัวอย่างมาทดสอบใหม่อีกจำนวน 5 ลูก

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.6.5 แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวน 5 ลูก จากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้ว มาทดสอบตามวิธีที่กำหนดใน มอก.279 ผนวก ฉ. เว้นแต่การประกอบอิเล็กโตรดให้ใช้ชิ้นส่วนโลหะที่ติดอยู่กับลูกถ้วยเป็นอิเล็กโตรด

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่างด้วย

9.2.7 หมุด

สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวนแบบ ค และแบบ จ แบบละ 3 ลูก ทดสอบหาแรงที่ใช้ถอดหมุดออกจากลูกถ้วย จากตำแหน่งล็อกไปยังถอดล็อก ลูกละ 3 ครั้ง

9.2.8 การวาบไฟตามผิว

ให้ทดสอบลูกถ้วยแขวนทุกลูกตามวิธีที่กำหนดในผนวก ช.

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ช.

การวาบไฟตามผิว

(ข้อ 9.2.8)

ช.1 วิธีทดสอบ ให้ทดสอบการวาบไฟตามผิวโดยการทดสอบใดการทดสอบหนึ่ง ดังนี้

ช.1.1 การทดสอบความถี่สูง

ช.1.1.1 วิธีที่ 1 ป้อนแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงแบบหน่วง (damped high-frequency voltage) ให้เกิดการวาบไฟตามผิวต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาที ความถี่ของขบวนคลื่นหน่วงจะต้องมีค่าประมาณ 200 กิโลเฮิร์ตซ์

ช.1.1.2 วิธีที่ 2 ปล่อยประจุความถี่สูงจากหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าไว้โดยไว้ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 15 ของแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำ ของลูกถ้วยแขวนให้เกิดการวาบไฟตามผิวต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาที ความถี่ซึ่งมีคลื่นซ้อน (superimpose) อยู่เหนือแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำต้องสูงกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์

ช.1.2 การทดสอบความถี่ต่ำ

ป้อนแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งให้เกิดการวาบไฟตามผิวหลาย ๆ ครั้งต่อเนื่องกัน เป็นเวลา 3 ถึง 5 นาที การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ต้องเป็นไปในลักษณะที่จะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวกระจายอย่างสม่ำเสมอบนลูกถ้วยที่ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายเมธา เงางาม
เกิดเมื่อวันที่ 13 เมษายน พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจาก โรงเรียนพรตพิทยพยัต
สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่: บริษัทเทอร์โมเทรเซอร์ จำกัด

นายรัชพงศ์ จันทร์ศิรินุสรณ์
เกิดเมื่อวันที่ 21 เมษายน พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจาก โรงเรียนบางปะกอกวิทยาคม
สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่: บริษัทเอสซี แอสเสท คอร์ปอเรชั่นจำกัด(มหาชน)

นางสาวภารวี เจริญศักดิ์
เกิดเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดชลบุรี
สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจาก โรงเรียนชลกันยานุกูล
สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

นางสาวมินาวรรณ สัตยานนท์
เกิดเมื่อวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจาก โรงเรียนหอวัง
สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่: บริษัท MECT จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้