

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 10 kVA

ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน



นาย มนตรี ไทยมานะ

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2529

ISBN 974-567-061-8

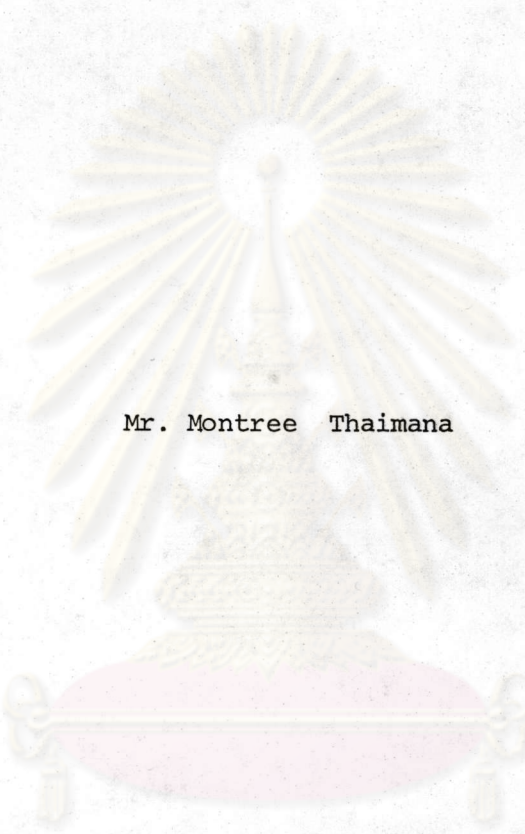
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

012026

i 16981546

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 100 kV, 10 kVA,

SF₆ GAS INSULATED TEST TRANSFORMER



Mr. Montree Thaimana

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of The Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1986

ISBN 974-567-061-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 10 kVA

ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน

โดย

นาย มนตรี ไทยมานะ

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรภักย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ สัมภ์ ศิวารัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบุลย์ ไชยนิล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 10 kVA ใช้ก๊าซ SF ₆ เป็นฉนวน
ชื่อนิสิต	นายมนตรี ไทยมานะ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2529



บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รายงานผลของการศึกษาการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบ ขนาด 100 kV 10 kVA ความถี่ 50 Hz เฟสเดียว มีขดลวด 3 ชุด คือ ขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง และขดลวดต่อควบสำหรับต่อชั้นบันได ใช้ฟิล์มโพลีเอสเตอร์เมลิเนกซ์ เป็นฉนวนหุ้มขดลวดแรงสูงและขดลวดต่อควบ และใช้ก๊าซ SF₆ อัดความดัน 2.35 kg/cm² abs เป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน โดยบรรจุในถังเหล็กมีปลอกฉนวนนำสายแรงสูงแบบคอน-เดนเซอร์ การออกแบบแกนแม่เหล็กและขดลวด กำหนดด้วยอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกิน 80°C และอุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ SF₆ ตอนบนของตัวถังไม่เกิน 55°C การทดสอบประสิทธิภาพได้กระทำ โดยใช้หม้อแปลงที่ออกแบบเป็นตัวจ่ายกำลังให้กับการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันวายุไฟตามผิวของลูก-ถ้วยฉนวนไฟฟ้าทั้งในสภาพเปียกและสภาพแห้ง

Thesis Title Design and Construction of A 100 kV, 10 kVA,
 SF₆ Gas Insulated Test Transformer

Name Mr. Montree Thaimana

Thesis Advisor Dr. Samruay Sangkasaad

Department Electrical Engineering

Academic Year 1986



ABSTRACT

This thesis deals with a study, design and construction of a single phase test transformer rated at 100 kV, 10 kVA, 50 Hz. The test transformer has three windings, namely low voltage winding, high voltage winding and coupling winding, which are connected in cascade. Melinex Polyester Film is used as insulation of high voltage winding and coupling winding. SF₆ gas compressed of 2.35 kg/cm²abs is used for insulation and heat circulation in a metallic tank. A high voltage bushing of condensor type is mounted to bring high voltage leads out of the tank. Magnetic core and windings are designed so that the temperature rise of the windings will not exceed 80°C and that of the SF₆ gas in the upper part of the tank will not exceed 55°C. The performance of the designed transformer has been carried out by using the transformer as a power supply for power frequency flashover test on insulators under dry and wet conditions.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวัย สังข์สะอาด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ได้รับมาจากทุน Unit Cell ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา ขอขอบคุณ คุณสัมพันธ์ วงษ์ปาน และเจ้าหน้าที่ของ บริษัท ศิริวิวัฒน์ (2515) จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบนี้ และขอขอบคุณ คุณวิมล ประทักษ์นุกูล และ คุณนภาพร วัญญุสกุล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำทั่วไป.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย.....	3
2. ภาคนิยามของหม้อแปลงทดสอบและการฉนวนด้วยก๊าซ SF ₆	5
2.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงทดสอบ.....	5
2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลง.....	7
2.3 โครงสร้างและการฉนวนของหม้อแปลงทดสอบ.....	9
2.3.1 หม้อแปลงแบบแห้งและแบบหุ้มด้วยฉนวนแข็ง.....	12
2.3.2 หม้อแปลงแบบน้ำมัน.....	13
2.3.3 หม้อแปลงแบบฉนวนด้วยก๊าซ SF ₆	13
2.4 การต่อชั้นบันได.....	13
2.5 พฤติกรรมของหม้อแปลงทดสอบคือแรงดันขั้วและแรงดันอิมพัลส์	15
2.5.1 วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลง.....	15
2.5.2 แรงดันเกินทรานเซียนต์	18
2.6 การฉนวนหม้อแปลงทดสอบด้วยก๊าซ SF ₆	19
2.6.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF ₆	20
2.6.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆	20
2.6.3 คุณสมบัติการระบายความร้อนของก๊าซ SF ₆	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.4 วัสดุฉนวนในก๊าซ SF ₆	23
2.6.4.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างฟิล์มโพลีเอสเตอร์ กับก๊าซ SF ₆	24
2.6.4.2 ลักษณะสมบัติของคิซซาร์จบางส่วนของฟิล์ม โพลีเอสเตอร์ในก๊าซ SF ₆	26
2.7 คำกำหนดของหม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไป	27
2.7.1 ขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ	28
2.7.2 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ	28
2.7.3 ขนาดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ	29
2.7.4 กำลังและแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร	30
2.8 ปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์	31
3. การออกแบบหม้อแปลงทดสอบ	34
3.1 การเลือกคำกำหนดของหม้อแปลงทดสอบ	34
3.2 การออกแบบแกนแม่เหล็กและขดลวดโดยการคำนวณ	34
3.3 การออกแบบขดลวดและแกนแม่เหล็ก	40
3.3.1 ขดลวดแรงต่ำ	40
3.3.2 ขดลวดแรงสูง	43
3.3.3 ขดลวดค่อควบ	52
3.3.4 แกนแม่เหล็ก	54
3.4 การออกแบบตัวถัง	58
3.5 การออกแบบปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์	60
4. วัสดุและการประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ	72
4.1 แกนแม่เหล็ก	72
4.2 ขดลวดและการฉนวน	79
4.2.1 ขดลวดแรงต่ำ	79
4.2.2 ขดลวดแรงสูงและขดลวดค่อควบ	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 ขดลวดแรงสูงและขดลวดค่อควบ	83
4.3 หัวถังและการติดตั้งส่วนประกอบภายนอกหัวถัง	88
4.4 การติดตั้งส่วนประกอบภายในหัวถัง	91
4.5 ปลอกฉนวนนำสายแรงสูง	95
4.6 กระบวนการบรรจุก๊าซ SF ₆	100
4.6.1 การอบและกระบวนการสุญญากาศ	100
4.6.2 กระบวนการเติมก๊าซ SF ₆	101
5. การทดสอบและการประเมินผล	103
5.1 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด	103
5.2 การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว	105
5.3 การวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์	107
5.4 การวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและกระแสเมื่อไม่มีโหลด	112
5.5 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน	116
5.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่น	117
5.7 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม	118
5.8 การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharges = PD)	127
5.9 การตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน	128
5.10 การใช้งาน	130
5.10.1 ทดลองใช้ทดสอบวาวไฟคามคิวแห้งบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า	130
5.10.2 ทดลองใช้ทดสอบวาวไฟคามคิวเปียบบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า	131
6. สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ	132
6.1 สรุปผลงาน	132
6.2 ข้อเสนอแนะ	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่กำลังระยะสั้น 1 นาที	1
2.1 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF ₆	20
2.2 คุณสมบัติทั่วไปของฟิล์ม เมลิ เนกซ์ 226	24
2.3 กระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง.....	29
3.1 ความยาวของ เปลวโลหะทรงกระบอกแต่ละชั้นของปลอกฉนวนนำสายแบบ คอน เคน เซอร์ที่ออกแบบสร้าง	66
4.1 ค่าระบุของ เหล็กชนิดคอนชนิด Z 7H	72
5.1 ค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด	104
5.2 ค่าอัตราส่วนแรงดันของขดลวด	105
5.3 กระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าเมื่อไม่มีโหลดเมื่อเปลี่ยนแรงดันป้อนเข้า	114
5.4 ข้อมูลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ SF ₆ คอนบนของค้ำตั้งจากอุณหภูมิห้อง	123
5.5 ข้อมูลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจากอุณหภูมิของก๊าซ SF ₆ คอนบน ของค้ำตั้ง	124

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการทำงานของหม้อแปลง	5
2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลง	8
2.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลง	9
2.4 การฉนวนในหม้อแปลงทดสอบ	10
2.5 โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบแกนเหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมัน	11
2.6 หม้อแปลงทดสอบแบบหุ้มด้วยฉนวนแข็ง	12
2.7 หม้อแปลงทดสอบสำหรับค้อแบบชั้นบันได	14
2.8 ตัวอย่างการค้อแบบชั้นบันได 2 ชั้น	14
2.9 วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลง	15
2.10 แรงดันแบ่งกระจายบนขดลวดหม้อแปลง	17
2.11 ภาพตัดแสดงการจัดวางขดลวด	18
2.12 แรงดันเกินทรานเซียนต์	19
2.13 แรงดันเบรกคาวนักระแสสลับของก๊าซ SF ₆	21
2.14 สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของก๊าซ SF ₆ เปรียบเทียบกับสารฉนวนอื่น .	22
2.15 ลักษณะแรงดันเบรกคาวนัของฉนวนต่างๆ ในก๊าซ SF ₆	23
2.16 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	25
2.17 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย	25
2.18 ลักษณะสมบัติของดิสชาร์จบางส่วนของฟิล์มโพลีเอสเตอร์ระหว่างลวดตัวนำใน ก๊าซ SF ₆	26
2.19 ปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์	32
3.1 รูปร่างและขนาดภาคตัดขวางแกนแม่เหล็ก	37
3.2 ภาพตัดขวางของขดลวด	48
3.3 การจัดวางขดลวดในเทอมแรงดันสูง	49
3.4 รูปร่างและขนาดของแกนแม่เหล็ก	55
3.5 รูปร่างและขนาดของตัวถัง	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ภาพตัดไม้คอนกรีต เซอร์คิของปลอกฉนวนนำสายที่ออกแบบสร้าง	68
3.7 ภาพถ่ายปลอกหุ้มเปอร์ชเลนที่ออกแบบสร้าง	69
3.8 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์แรงสูง	71
4.1 กราฟแสดงค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในเหล็กซิลิคอนชนิด Z7H	73
4.2 กราฟแสดงค่าแรงกระตุ้นเส้นแรงแม่เหล็กคิซีและเปอร์มีบิลิตีซีของเหล็ก ซิลิคอนชนิด Z7H	74
4.3 รูปร่างและขนาดของแผ่นเหล็กซิลิคอนที่ใช้ประกอบสร้างเป็นแกนแม่เหล็ก ...	75
4.4 อุปกรณ์เคลือบแม่เหล็ก	77
4.5 ภาพถ่ายแกนแม่เหล็กพร้อมอุปกรณ์เคลือบ	78
4.6 ภาพตัดขดลวดที่ตัดตามภาคตัดขวางของแกนแม่เหล็ก	80
4.7 ภาพถ่าย เครื่องพันขดลวดแรงต่ำ	81
4.8 ภาพถ่ายขดลวดแรงต่ำ	82
4.9 ภาพถ่าย เครื่องพันขดลวดแรงสูงและขดลวดค่อควย	85
4.10 ภาพถ่ายซิลค์ทองแดงวงในและวงนอก	85
4.11 ภาพถ่ายการประกอบสร้างขดลวดแรงสูงและขดลวดค่อควย	86
4.12 ภาพถ่ายขดลวดแรงสูงและขดลวดค่อควยที่ประกอบสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ..	87
4.13 ภาพถ่ายตัวถังที่กำลังประกอบสร้าง	89
4.14 ภาพถ่ายตัวถังที่ประกอบสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว	90
4.15 ภาพถ่ายกระบวนการติดตั้งแกนแม่เหล็กพร้อมขดลวดภายในตัวถัง (รูป ก-ฅ) .	92
4.16 ภาพถ่าย เครื่องพันไม้คอนกรีต เซอร์คิของปลอกฉนวนนำสาย	97
4.17 ภาพถ่ายปลอกฉนวนนำสายแบบคอนกรีต เซอร์คิที่ประกอบสร้าง (รูป ก-ค).....	98
4.18 ภาพถ่าย เตาอบสุญญากาศ	100
4.19 อุปกรณ์การบรรจุอัดก๊าซ SF ₆	102
5.1 วงจรการตรวจสอบขั้ว	106
5.2 วงจรการทดสอบลัดวงจร	109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 วงจรการทดสอบเปิดวงจร	113
5.4 กราฟแสดงค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดกับแรงดันบ่อน้ำเข้า ..	115
5.5 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน	116
5.6 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่นสำหรับทดสอบขดลวดแรงต่ำ	117
5.7 วงจรการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม	119
5.8 การหาค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงสูงที่จุดตัดจ่ายกำลังไฟฟ้า ..	125
5.9 การหาค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงต่ำที่จุดตัดจ่ายกำลังไฟฟ้า ..	126
5.10 วงจรการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน (PD)	127
5.11 วงจรการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน	128
5.12 ภาพถ่ายรูปคลื่นแรงดันของขดลวดแรงสูง	129
5.13 วงจรการทดลองใช้หม้อแปลงที่ประกอบสร้างทดสอบวาวไฟตามผิวบนลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า	130
ก.1 ภาพตัดขวางของขดลวดที่ประกอบใส่แกนแม่เหล็ก.....	143
ก.2 อิเล็กโทรดที่ใช้คำนวณหาขนาดการฉนวนบริเวณขอบของขดลวดกับแกนแม่เหล็ก	144
ก.3 ผลของซิลิโคนแดงที่มีต่อขดลวดชั้นทรงกระบอกที่มีการจัดลำดับของขดลวด....	148
ข.1 การหาอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดของขดลวดแรงสูงจากอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซ SF ₆	155
ข.2 การคำนวณอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของขดลวดด้านใน T _{ci} กับอุณหภูมิของขดลวดด้านนอก T _{co}	156
ข.3 การคำนวณหาพื้นที่ผิวโดยประมาณของฉนวนหุ้มขดลวดแรงสูง	158