

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าฉนวน
ด้วยก๊าซ SF₆ ขนาด 1600 kVA 12/24 kV 50 Hz

นายสาเรศ คีภาพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-703-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 1600 kVA 12/24 kV 50 Hz
SF₆ GAS INSULATED TRANSFORMER

Mr.Sarase Depaporn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic year 1997

ISBN 974-637-703-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าฉนวนด้วยก๊าซ SF₆
ขนาด 1600 kVA 12/24 kV 50 Hz

โดย

นายสารศ ดীগาพร

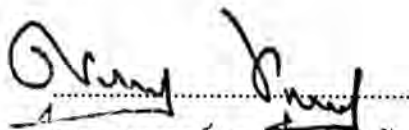
ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์.ดร.ตำรวจ สังข์สะอาด

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์



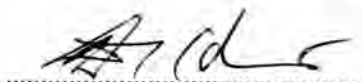
ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพฑูรย์ ไชยนิล)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ตำรวจ สังข์สะอาด)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

สารศ ดิภาพร : การออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ 1600 kVA 12/24 kV 50 Hz
(DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 1600 kVA 12/24 kV 50 Hz SF₆ GAS INSULATED
TRANSFORMER) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สำรวย สังข์สะอาด , 116 หน้า. ISBN 974-637-703-5

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวกับการออกแบบและสร้างหม้อแปลงฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ ขนาด 1600 kVA 3 เฟส ซึ่ง
เป็น 2 ระบบแรงดันคือ 12 และ 24 kV ฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำใช้โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม และก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน
แทรกซึมและช่วยในการระบายความร้อน อธิบายถึงคุณสมบัติของโพลีเอสเตอร์ฟิล์มและก๊าซ SF₆ ให้รายละเอียดของเกณฑ์
การออกแบบ และการประกอบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ ที่มีกระบวนการระบายความร้อนด้วยธรรมชาติ ผลการ
ทดสอบแสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงที่ออกแบบสร้างเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 76 ที่กำหนด

ภาควิชา.....*วิศวกรรมไฟฟ้า*.....
สาขาวิชา.....*วิศวกรรมไฟฟ้า*.....
ปีการศึกษา.....

ลายมือชื่อนิติ.....*สม อภิมา*.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*วิ.ศ. รศ.*.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: SF₆ GAS INSULATED TRANSFORMER

SARASE DEPAPORN : DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 1600 kVA 12/24 kV 50 Hz

SF₆ GAS INSULATED TRANSFORMER. THESIS ADVISOR : DR.SUMRUAY SANGKASAAD,

116 pp. ISBN 974-637-703-5

This thesis deals with the design and construction of a 3 phase 1600 kVA SF₆ gas insulated transformer which has 2 system voltages, 12 and 24 kV. The polyester film is used for insulation between high and low voltage windings, and SF₆ gas is used as spacing insulation and cooling. The properties of the polyester film and SF₆ gas are explained. The design criteria and the detailed construction of the SF₆ gas insulated transformer with natural cooling are given. The test was performed in accordance with IEC Publ. 76, and the results show that the designed and constructed transformer complies with the standard specification.

ภาควิชา.....*วิศวกรรมไฟฟ้า*.....

สาขาวิชา.....*วิศวกรรมไฟฟ้า*.....

ปีการศึกษา.....

ลายมือชื่อนิสิต.....*สรุย ดูป*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ดร.สุรอุย สังกษอาด*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.ถาวรยศ สังกัดคณะศึกษาศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จึงขอขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้ ขอขอบคุณอย่างยิ่งต่อโรงงาน บริษัทเจริญชัยหม้อแปลง-ไฟฟ้า ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการผลิตหม้อแปลงที่โรงงาน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณ คุณโชคิรต เทียนถาวร ที่ได้ให้กำลังใจและช่วยเหลือในการพิมพ์วิทยานิพนธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาของปัญหา	1
1.3 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย	2
1.4 ผลงานในอดีตที่เกี่ยวข้อง	2
บทที่ 2 ทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้า	3
2.1 หลักการทำงานและวงจรสมมูล	3
2.1.1 หลักการสร้างแรงดัน	3
2.1.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงและเฟสเซอร์ไดอะแกรม	4
2.1.3 ค่าแรงดันเรกูเรชัน	9
2.1.4 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง	10
2.1.5 แรงดันกระจายบนขดลวดเนื่องจากแรงดันเกิน	10
2.2 การฉนวน	11
2.2.1 ฉนวนแข็ง	12
2.2.2 ฉนวนก๊าซ SF ₆	13
2.3 การระบายความร้อนในหม้อแปลง SF ₆	17
2.3.1 การระบายความร้อนแบบธรรมชาติ	17
2.3.2 การคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด	20
2.4 วัสดุที่ใช้ในส่วนประกอบของหม้อแปลง	21
2.4.1 แกนเหล็ก	21
2.4.2 ขดลวด	22

สารบัญ (ต่อ)

	2.4.3 ตัวถัง	22
	2.4.4 ประเก็น	23
	2.4.5 ส่วนประกอบอื่นๆ ที่สำคัญ	23
	2.5 ข้อกำหนดของหม้อแปลง	23
บทที่ 3	การออกแบบ	24
	3.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงแปลง	24
	3.1.1 แกนเหล็ก	24
	3.1.2 ขดลวด	25
	3.2 พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก	25
	3.3 มิตិขดลวดแรงต่ำ	27
	3.4 ขดลวดแรงสูง	28
	3.5 มิติของแกนเหล็ก	32
	3.5.1 ขนาดแกนเหล็กและกำลังสูญเสีย	32
	3.5.2 กำลังสูญเสียขณะจ่ายโหลดแลอิมพีแดนซ์กั้ดวงจร	33
	3.6 ลักษณะการทำงานของหม้อแปลง	35
	3.6.1 ค่าแรงดันเรกูเรชัน	35
	3.6.2 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง	35
	3.7 ขนาดถังของหม้อแปลง	36
	3.8 การระบายความร้อนและอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด	37
บทที่ 4	การประกอบสร้างหม้อแปลง	44
	4.1 การพันขดลวดแรงต่ำ	44
	4.2 การพันขดลวดแรงสูง	49
	4.3 การเรียงแกนเหล็ก	52
	4.4 การประกอบขดลวดลงแกนเหล็ก	60
	4.5 การประกอบหม้อแปลงและตัวถัง	69
	4.6 การบวนาการบรรจุก๊าซ SF ₆	76

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 การทดสอบหม้อแปลง	78
5.1 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด	78
5.2 การวัดอัตราส่วนของแรงดัน	79
5.3 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด	80
5.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด	81
5.5 การวัดค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์และเรกูเรชัน	82
5.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดัน	83
5.6.1 การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำ	83
5.6.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ	84
5.7 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม	85
5.8 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์	87
5.9 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	97
5.9.1 ตัวเปลี่ยนจุดแยกระบบ	97
5.9.2 ฉนวนของขดลวดแรงสูง	99
5.9.3 ค่ากำลังสูญเสียและอุณหภูมิเพิ่ม	100
5.9.4 ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ 75°C	100
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	101
6.1 สรุปผลงาน	101
6.2 ข้อเสนอแนะ	102
รายการอ้างอิง	103
ภาคผนวก	105
ภาคผนวก ก.	106
ภาคผนวก ข.	108
ภาคผนวก ค.	110
ภาคผนวก ง.	114
ประวัติผู้วิจัย	116

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 เปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการระหว่างโพลีเอสเตอร์ฟิล์มกับกระดาษฉนวน	12
2-2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของก๊าซ SF ₆ , อากาศ, น้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันซิลิโคน	13
2-3 เปรียบเทียบคุณสมบัติการระบายความร้อน	16
3-1 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ = 1	35
4-1 แสดงขนาดและจำนวนแผ่นที่ใช้ของแผ่นเหล็กซิลิกอน	54
5-1 ค่าความต้านทานของขดลวด	79
5-2 อัตราส่วนแรงดัน	80
5-3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด	82
5-4 ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ = 1 ที่อุณหภูมิ 75°C	82
5-5 ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์และเรกูเรชันที่อุณหภูมิ 75°C	83
5-6 ผลการวัดค่าความต้านทานเทียบกับเวลา	85
5-7 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการออกแบบและทดสอบ	100

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแบบจำลองของหม้อแปลง 1 เฟส	3
2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลง	5
2.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลง	6
2.4 วงจรสมมูลและเฟสเซอร์ไดอะแกรมเมื่อไม่คิดผลของกระแสกระตุ้น	6
2.5 แสดงมิติต่างๆ ของขดลวดที่ใช้ในการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์	8
2.6 แบบจำลองของหม้อแปลงขณะเกิดแรงดันเกิน	10
2.7 แบบจำลองของหม้อแปลงขณะทำงานในสภาวะปกติ	11
2.8 เส้นกราฟความดันก๊าซอิมตัว	14
2.9 แรงดันเบรกคาว์น AC ของ ก๊าซ SF ₆ อากาศและน้ำมันหม้อแปลง	15
2.10 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การระบายความร้อน	16
2.11 การหมุนเวียนของก๊าซแบบธรรมชาติ และการกระจายของอุณหภูมิ	18
3.1 แสดงพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและร่องระบายความร้อน	26
3.2 ลักษณะภาคตัดขวางของขดลวดแรงต่ำ	28
3.3 การแบ่งตอนขดลวดแรงสูง	29
3.4 การจัดเรียงและการคั่นเบกไลท์ภายในขดลวดแรงสูง	31
3.5 แสดงการจัดเรียงในแต่ละส่วนของขดลวด	31
3.6 ขนาดของแกนเหล็ก	32
3.7 แสดงระยะภายในและขนาดถังของหม้อแปลง	36
3.8 แสดงรายละเอียดต่างๆของครีป	37
4.1 การพันขดลวดแรงต่ำ	45
4.2 การพันขดลวดแรงสูง	49
4.3 รายละเอียดของภาคตัดขวางของแกนเหล็ก	53
4.4 แบบแผ่นเหล็กฉลิกอนประกอบด้วยแบบ I, II และ III	53
4.5 ขนาดของแผ่นเหล็กฉลิกอน	55
4.6 การเรียงแกนเหล็ก	57
4.7 การประกอบขดลวด	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	
4.8	การจัดระยะขดลวด 65
4.9	การประกอบโยก 66
4.10	การต่อขดลวดแบบ Dyn1 68
4.11	การเชื่อมต่อขดลวดแรงต่ำเข้ากับบาร์ทองแดง 69
4.12	การต่อจุดแยกเข้ากับตัวเปลี่ยนจุดแยก 70
4.13	การอบหม้อแปลง 72
4.14	การคามเหล็กภายนอกถัง 73
4.15	การประกอบหม้อแปลงลงถัง 74
4.16	แสดงขนาดและอุปกรณ์ต่างๆ ของหม้อแปลงที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว 75
4.17	กระบวนการบรรจุก๊าซ SF ₆ 76
5.1	วงจรวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด 80
5.2	กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและวงจรทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ 81
5.3	วงจรทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำ 84
5.4	วงจรทดสอบความคงทนด้านแรงต่ำ 84
5.5	วงจรทดสอบความคงทนด้านแรงสูง 84
5.6	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม 87
5.7	วงจรทดสอบหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ 87
5.8	ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ระบบ 12 kV 89
5.9	ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ระบบ 24 kV 93
5.10	ตัวเปลี่ยนจุดแยกเปลี่ยนระบบ 98
5.11	การเกิดวาบไฟตามผิวบนตัวเปลี่ยนจุดแยก 98
5.12	การเกิดผิพว่องของฉนวน 99