การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบขั้นบันได ชนิดน้ำมันบรรจุในถังฉนวน ขนาด 200 เควี 50 เฮิรตซ์ 10 เควีเอ

นายปริพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2531

ISBN 974-569-542-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016127

I10301185

Design and Construction of an Oil Immersed 200 kV 50 Hz 10 kVA Cascade Testing Transformer

Mr. PARIPON PATTANASATTAYAVONG

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
1988

ISBN 974-569-542-4

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบขั้นบันได ชนิดน้ำมันบรรจุในถังฉนวน ขนาด 200 เควี 50 เฮิรตซ์ 10 เควีเอ

โดย นายบริพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด

รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ สัณห์ ศิวารัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประโมทย์ อุณหไวทยะ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริพนธ์ พัฒนสัตยวงค์ : การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบฉนวนน้ำมันชนิดอัดความดันได 200 เคว 50 เฮิรตซ์ 10 เคว่เอ (DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN OIL IMMERSED 200 kV 50 Hz 10 kVA CASCADE TESTING TRANSFORMER) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สำรวย สังข์ศ์อาด, รศ.ไพบูลย์ ไชยนิล, 131 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานผลการศึกษาค้นคว้าวิจัย และออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบต่อขั้นปันได 2 ขั้น ขนาด 200 kV 50 Hz 10 kVA ประกอบด้วยหม้อแปลงเฟสเดียว 2 ตัว แต่ละตัวมีขนาด 100 kV 5 kVA ตัวถังหม้อแปลงเป็นท่อฉนวน พีวีซี โครงสร้างภายในของหม้อแปลงแต่ละตัว ประกอบด้วยแกนเหล็กแบบคอร์ซึ่งเป็นเหล็กซิลิคอนชนิด Z7H มีขดลวด 3 ชุด คือ ขดลวดแรงดันต่ำ ขดลวดแรงดันสูง และขดลวดต่อควบ ใช้กระดาษคราฟท์เป็นฉนวนไฟฟ้าระหว่างขั้นขดลวด น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน ทำการทดสอบหาคุณลักษณะของหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC No,76 ซึ่งกำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกิน 55°C และอุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันส่วนบนของตัวถังไม่เกิน 70°C เปรียบเทียบผลของทดสอบวัดคุณลักษณะกับค่าที่คำนวณออกแบบไว้ ทดสอบสมรรถนะการใช้งาน โดยเป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับลูกถ้วยฉนวน เพื่อหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้ง ซึ่งมีค่าแรงดันวาบไฟตามผิวเท่ากับ 135 kV

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ปริพนธ์ พัฒนสัตยวงค์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PARIPON PATTANASATTAYAVONG : DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN OIL IMMERSED 200 kV 50 Hz 10 kVA CASCADE TESTING TRANSFORMER.
THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. SUMRUAY SANGKASAAD, DR.SC.TECH.,
ASSO. PROF. PAIBUL CHAIYANIL., M. Phil, 131 pp.

This thesis is dealt with the design and construction of a two stage cascade testing transformer rated at 200 kV, 50 Hz, 10 kVA, consisting of two single-phase testing transformer. Each testing transformer has rating 100 kV 5 kVA. The transformer is oil-immersed in a PVC tank and has three windings, viz, a high voltage winding, a low voltage winding, and a coupling winding, all wound on a core-type-Z7H silicon steel core, Kraft paper is used as an insulation between layers of the windings. The transformer was tested according to IEC Standard Publ. No.76. Maximum temperature rise allowance in the windings is 55°C and maximum temperature allowance of the top oil is 70°C. The measured results and the designed values are compared. Performance test of the transformer was carried out by performing a power-frequency flash-over test on an pin insulator under dry condition at 135 kV.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา Electrical Engineering ..... ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา Electrical Engineering .....
ปีการศึกษา 2531 ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณ คณะจารย์สอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำวิจารณ์และข้อคิดเห็นในการแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ มูลนิธิมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนให้ได้รับทุนการศึกษาด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณ คุณสุนทร ฉัตรวชิระกุล และเจ้าหน้าที่ของบริษัทเจริญชัยหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบนี้ และขอขอบคุณฐิติมา อนุสรณ์นรการที่ได้กรุณาพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จเรียบร้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช-ฎ
สารบัญตาราง ..... ฏ
สารบัญรูป ..... ฑ-ค
บทที่
1 บทนำ 1-4
1.1 บทนำทั่วไป 1
1.2 ผลงานหม้อแปลงทดสอบในอดีต (ในประเทศไทย) 2
1.3 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย 3
2 ทฤษฎีของหม้อแปลงทดสอบ 5-32
2.1 หลักการทำงานและวงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบ 5
2.2 การฉนวนและโครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบ 7
2.3 การต่อขั้นบันได 10
2.4 พฤติกรรมของหม้อแปลงทดสอบต่อแรงดันยุบตัวและแรงดันอิมพัลส์ 11
2.4.1 แรงดันกระจายในขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงในสภาวะทรานเซี้ยนต์
2.4.2 การจัดวางขดลวดแบบเกรดดิ้ง
2.4.3 การชีลด์ปลายขั้วแรงดันสูง
2.5 การฉนวนหม้อแปลงทดสอบด้วยน้ำมันหม้อแปลง 17
2.5.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์
2.5.2 คุณสมบัติทางเคมี
2.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า
2.5.4 ตัวอย่างน้ำมันของคาลเทกซ์

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 ชนิดขดลวดทองแดงที่ใช้กับหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนน้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม .. 20
2.7 กระดาษฉนวน 20
2.7.1 กระดาษคร๊าฟท์ (Kraftpaper)
2.7.2 กระดาษอัดแรง (Press Board)
2.8 ถังฉนวนหม้อแปลงทดสอบ 22
2.9 แกนเหล็ก 23
2.10 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไป 27
2.10.1 ขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ
2.10.2 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ
2.10.3 ขนาดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ
2.10.4 กำลังและแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร
2.10.5 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือ Insulation class

3 การออกแบบหม้อแปลงทดสอบ 33-56
3.1 เลือกค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบ 33
3.2 การออกแบบแกนเหล็กและขดลวดโดยการคำนวณ 34
3.2.1 การคำนวณค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก
3.2.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด
3.2.3 การคำนวณขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางของขดลวด
3.3 การออกแบบขดลวดและแกนเหล็ก 37
3.3.1 ขดลวดแรงดันต่ำ
3.3.2 ขดลวดแรงดันสูง
3.3.3 ขดลวดต่อควบ
3.3.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด
3.3.5 เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ขณะลัดวงจร
3.3.6 แกนเหล็ก

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การออกแบบตัวถัง 56

4 การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 58-75

4.1 การประกอบแกนเหล็ก 58

4.2 ขดลวดและการฉนวน 63

4.3 การติดตั้งส่วนประกอบภายในตัวถังและการอบ 71

4.4 ตัวถังและการติดตั้งส่วนประกอบภายนอก 73

4.5 การบรรจุน้ำมันหม้อแปลง 75

5 การทดสอบและการประเมินผล 76-109/1

5.1 การวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด 76

5.2 การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว 77

5.3 การวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและกระแสไม่มีโหลด 79

5.3.1 ทดสอบหม้อแปลงแต่ละตัว

5.3.2 ทดสอบเมื่อหม้อแปลงทดสอบต่อขั้นบันได

5.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์ 85

5.4.1 ทดสอบหม้อแปลงแต่ละตัว

5.4.2 ทดสอบหม้อแปลงต่อขั้นบันได

5.5 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน 97

5.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่น 98

5.7 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม 99

5.8 การตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน 106

5.9 การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge = PD) 106

5.10 ทดสอบการใช้งาน 109

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6 สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ 110-115

6.1 สรุปผลงาน 110

6.1.1 ค่ากำหนดของหม้อแปลง

6.1.2 รายละเอียดของขดลวดและการฉนวนของหม้อแปลงแต่ละตัว

6.1.3 ผลของการทดสอบ

6.1.4 รายละเอียดของแกนเหล็ก

6.1.5 ตัวถัง

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 114

เอกสารอ้างอิง 116-117

ภาคผนวก ก. ตัวอย่างขนาดขดลวดทองแดงและกระดาษฉนวน 118-119

ก.1 ตัวอย่างขนาดขดลวดทองแดงและกระดาษฉนวน มอก. 82- 2527

ก.2 ตัวอย่างคุณสมบัติของกระดาษคร๊าฟท์และกระดาษอัดแรงมาตรฐาน JIS

ภาคผนวก ข. การหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและของน้ำมันหม้อแปลง ..... 120-126 เพื่อกำหนดค่าความหนาแน่นกระแสสำหรับออกแบบขดลวด

ข.1 คำนวณปริมาณความร้อนสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในถังหม้อแปลงทดสอบ

ข.2 ขดลวดแรงดันต่ำ

ข.3 ขดลวดแรงดันสูง

ข.3.1 การคำนวณอุณหภูมิเดกต่างระหว่าง T_{ci} กับ T_{co}

ข.3.2 การคำนวณอุณหภูมิเดกต่างระหว่าง T_{co} กับ T_{pa}

ข.3.3 การคำนวณอุณหภูมิเดกต่างระหว่าง T_{pa} กับ T_{oil}

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. การคำนวณขนาดการฉนวนของขดลวดแรงดันสูง 127-130

ค.1 หาความเครียดสนามไฟฟ้าของขดลวดที่อยู่ใกล้โย้ก ด้านข้างของแกนเหล็ก

ค.2 หาความเครียดสนามไฟฟ้าที่ของของชีลด์ทองแดงกับแกนเหล็ก

ค.3 หาความเครียดสนามไฟฟ้าของขดลวดที่อยู่ใกล้โย้กด้านล่างของแกนเหล็ก

ค.4 สรุปผล

ประวัติผู้เขียน 131

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

1.1 แรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่กำลังระยะสั้น 1 นาที ตามมาตรฐาน IEC 3
1.2 ค่าคะแปซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบ 4
2.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของท่อ PVC 22
2.2 แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบระหว่าง ORIENTCORE กับ ORIENTCORE HI-B.. 23
3.1 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ 33
4.1 จำนวนแผ่นเหล็กแต่ละขนาด 60
5.1 ค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด 77
5.2 ค่าอัตราส่วนแรงดันของขดลวด 78
5.3 ผลการทดสอบไม่มีโหลดของหม้อแปลงทดสอบแต่ละตัว 80
5.4 ผลการทดสอบไม่มีโหลดเมื่อต่อขั้นบันได 83
5.5 ข้อมูลลัดวงจรขดลวดแรงดันสูง 87
5.6 สรุปค่าต่าง ๆ ที่ 75 °C 88
5.7 ข้อมูลลัดวงจรขดลวดต่อควบ 89
5.8 สรุปค่าต่าง ๆ ที่ 75 °C 91
5.9 ข้อมูลลัดวงจรขดลวดแรงดันสูง ขดลวดแรงดันต่ำเปิดวงจร 92
5.10 สรุปค่าต่าง ๆ ที่ 75 °C 94
5.11 ข้อมูลลัดวงจรขดลวดแรงดันสูง เมื่อหม้อแปลงต่อขั้นบันได 95
5.12 ข้อมูลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจากอุณหภูมิน้ำมันหอนบนตัวถัง 100
5.13 ค่าความต้านทานของขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำ หลังจากตัดกำลังไฟฟ้าออก 101
5.14 ข้อมูลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันหอนบนตัวถัง จากอุณหภูมิห้อง... 102
ก.1 ตัวอย่างขนาดลวดทองแดงและชั้นการเคลือบของฉนวน 118
ก.2.1 คุณสมบัติของกระดาษคร๊าฟท์มาตรฐาน JIS 119
ก.2.1 คุณสมบัติของกระดาษอัดแรงมาตรฐาน JIS 119

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ขดลวด 5

2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงคิดเทียบทางด้านปฐมภูมิ 6

2.3 เพสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงทดสอบมีโหลดเป็นคะแปซิตีฟโหลด 7

2.4 สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของฉนวนต่าง ๆ 8

2.5 การฉนวนในหม้อแปลงทดสอบที่แกนเหล็กต่อลงดิน 9

2.6 โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบแกนเหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมัน 9

2.7 การต่อหม้อแปลงแบบขั้นบันได 2 ขั้น 10

2.8 วงจรสมมูลของหม้อแปลงในสภาวะทรานเซี้ยนต์ 12

2.9 การตอบสนองต่อแรงดันทรานเซี้ยนต์ของขดลวดหม้อแปลง 12

2.10 วงจรคะแปซิแตนซ์สมมูลของขดลวด 13

2.11 แรงดันกระจายบนขดลวดขึ้นกับค่า $\alpha = \sqrt{C_g/C_s}$ 13

2.12 การจัดวางและการต่อขดลวด 15

2.13 แรงดันอิมพัลส์กระจายในขดลวดแบบขั้น โดยไม่มีชีลด์ 15

2.14 แสดงการกระจายของแรงดันอิมพัลส์ เมื่อชีลด์ที่ขั้วแรงดันสูงแห่งเดียว และชีลด์ที่ขั้วแรงดันสูงกับขั้วนิวตรัล 16

2.15 กราฟแสดงค่าแรงกระตุ้นเส้นแรงแม่เหล็กกระแสตรงและเปอร์มีบิลิตี้กระแสตรงของเหล็กซิลิคอนชนิด Z7H 24

2.16 กราฟแสดงค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในเหล็กซิลิคอนชนิด Z7H 25

2.17 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้ากระตุ้นในเหล็กซิลิคอนชนิด Z7H 26

2.18 กระแสที่ป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบ 28

2.19 วงจรสมมูลของหม้อแปลง เมื่อไม่คิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก 29

2.20 การคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงทรงกระบอกแกนร่วม 31

3.1 พื้นที่ภาคตัดแกนเหล็กแบบขั้น 3 ขั้น 34

3.2 มิติขดลวดและการฉนวนของการออกแบบในหัวข้อ 3.3 39

3.3 รูปการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูงโดยคิดเทียบทางด้านแรงดันสูง 48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

3.4 รูปการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดต่อควบ 50
3.5 รูปการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างขดลวดต่อควบกับขดลวดแรงดันสูง 51
3.6 รูปร่างและขนาดของแกนเหล็ก 53
3.7 เป็นลักษณะรูปร่างหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ 57
4.1 รูปร่างและขนาดของแผ่นเหล็กซิลิคอนที่ประกอบสร้างเป็นแกนเหล็ก 59
4.2 อุปกรณ์เคลัมป์แกนเหล็ก 61
4.3 ภาพถ่ายแกนเหล็กหม้อแปลงพร้อมอุปกรณ์เคลัมป์ 62
4.4 ภาพตัดขวางของขดลวดตามแนวขวางแกนเหล็ก 64
4.5 ภาพตัดของขดลวดตามแนวแกนเหล็ก 65
4.6 ชีลด์ทองแดงของขดลวดแรงดันสูง 66
4.7 เครื่องพันขดลวดแรงดันสูง 66
4.8 เครื่องพันขดลวดแรงดันต่ำ 67
4.9 ขดลวดแรงดนต่ำที่พันเสร็จแล้ว 67
4.10 การพันขดลวดชั้นแรงดันสูง 68
4.11 การพันขดลวดต่อควบ 69
4.12 การใส่ชีลด์ขั้วแรงดันสูง 69
4.13 ฉนวนกระดาษหุ้มรัดจากชั้นแรงดันสูง 70
4.14 ผ้าฉนวนหุ้มรัดขดลวดแรงดันสูงและขดลวดต่อควบ 70
4.15 ประกอบขดลวดหม้อแปลงเข้ากับแกนเหล็กและแกนเหล็กยึดติดกับฝาถังล่าง ... 72
4.16 สวมถัง พีวีซี 72
4.17 แสดงขั้วต่อแรงดันสูง 73
4.18 แสดงส่วนประกอบส่วนบนตัวถัง 74
4.19 หม้อแปลงทดสอบที่ประกอบเสร็จ 74
5.1 วงจรการตรวจสอบขั้ว 78
5.2 วงจรทดสอบไม่มีโหลดของหม้อแปลงทดสอบแต่ละตัว 79
5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_1, W_1, กับ U_1 ขณะไม่มีโหลด 81