

ผลกระทบของกระแสชาวมอนิกที่มีต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงกำลัง

นายคมสันต์ คาโรจน์



สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974 - 639 - 444 - 4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**EFFECT OF HARMONICS CURRENT TO EXPECTANCY LIFE  
OF POWER TRANSFORMER**



**Mr. Komson Daroj**

**สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**  
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 1998**

**ISBN 974 - 639 - 444 - 4**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกที่มีต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงกำลัง  
โดย นายคมสันต์ ดาโรจน์  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ไชยะ แซ่ม้อย

---


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ ทิพย์พัฒน์ )

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ ไชยะ แซ่ม้อย )

  
..... กรรมการ  
( อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรภักดิ์ )

  
..... กรรมการ  
( นายวรา รุห์อง )

พิมพ์ตำแนบบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

คมสันต์ ดาโรจน์ : ผลกระทบของกระแสฮาร์โมนิกที่มีต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงกำลัง  
(EFFECT OF HARMONICS CURRENT TO EXPECTANCY LIFE OF POWER  
TRANSFORMER) อ. ที่ปรึกษา : อ. ไชยะ แซ่มซ้อย ; 163 หน้า. ISBN 974 - 639 - 444 - 4

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เน้นการศึกษาถึงผลกระทบของกระแสฮาร์โมนิก ที่มีต่ออายุการใช้งาน  
ทางความร้อนของหม้อแปลงกำลัง ทั้งชนิดจุ่มในน้ำมันและแบบฉนวนแห้งขณะจ่ายโหลดประเภทที่ไม่  
เป็นเชิงเส้น โดยเริ่มต้นจากการหาค่าอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง แล้วใช้ทฤษฎีการเสื่อม  
สภาพของฉนวนที่ขึ้นกับอุณหภูมิของ Arrhenius เพื่อแปลงจากค่าของอุณหภูมิเป็นอายุการใช้งาน โดยมี  
หลักการเบื้องต้นที่ใช้ในแบบจำลองจากมาตรฐาน IEC และ ANSI แต่ได้นำผลโครงสร้างของหม้อแปลงมา  
ร่วมคิดในแบบจำลองด้วย เพื่อให้มีความถูกต้องมากขึ้นในการคิดกำลังสูญเสียขณะที่หม้อแปลงต้องจ่าย  
โหลดที่มีฮาร์โมนิกปนอยู่

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาจะสามารถที่จะคำนวณหาอายุการใช้งานทางความร้อน ของหม้อแปลง  
ขณะจ่ายโหลดที่มีฮาร์โมนิกปนอยู่โดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงจากผู้ผลิต นอกจากนั้นยังสามารถที่จะนำผลที่  
ได้มาสร้างเป็นตารางแนวทางการจ่ายโหลดของหม้อแปลง อันจะเป็นแนวทางในการวางแผนการจ่ายโหลด  
ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา .....  
สาขาวิชา .....  
ปีการศึกษา .....

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ. 2541

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 3970200321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING  
KEY WORD: HARMONIC CURRENTS / EXPECTANCY LIFE / POWER TRANSFORMER  
KOMSON DAROJ : EFFECT OF HARMONICS CURRENT TO EXPECTANCY LIFE OF  
POWER TRANSFORMER. THESIS ADVISOR : CHAIYA CHAMCHOY 163 pp. ISBN 974 -  
639 - 444 - 4

This research emphasizes on the effects of harmonic currents to thermal expectancy life of power transformer : mineral - oil immersed transformer and dry type transformer , when supplying nonlinear loads . The procedure begins with predicting the hottest spot temperature in the transformer windings , then using the well known Arrhenius reaction rate theory , deterioration rate of insulation by thermal chemical process, to convert the relationship between temperature and life. The preliminary concepts of this model come from both IEC and ANSI standards , However by taking the structures of transformer into account can then calculate transformer losses when supplying harmonic loads with high accuracy .

Developed software can calculate thermal expectancy life of a transformer when supplying nonlinear loads by using the transformer data from manufacturers . Moreover , it can tabulate loading guide which is the useful information for load planning in the future.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา.....พ.ศ. 2541

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ อาจารย์ไชยะ แรมซ้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์ และคุณวรา จุห้อง ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นอกจากนี้ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณบริษัท ทัสโก้ ทราฟ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องการสร้างหม้อแปลงและบริษัท PRECISE ELECTRIC MFG. CO. LTD., ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ยืมใช้ตัวเก็บประจุในการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนในการวิจัย รวมทั้งทุนการศึกษาตลอดหลักสูตร

ขอขอบพระคุณบิดา - มารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนทุก ๆ คนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอให้ทุกๆ ท่านจงประสบแต่ความเจริญในชีวิต

คมสันต์ ดาโรจน์

กันยายน 2541

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	
1.1 แนวเหตุผล.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
2. อายุการใช้งานของหม้อแปลง.....	5
2.1 อายุการใช้งานของหม้อแปลง.....	5
2.1.1 ศึกษาโดยการเก็บสถิติ.....	5
2.1.2 ศึกษาโดยการวัดการเสื่อมสภาพของฉนวน.....	6
2.2 ฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลง.....	6
2.2.1 คุณสมบัติของฉนวนประเภทกระดาษ.....	7
2.2.2 คุณสมบัติของฉนวนประเภทน้ำมัน.....	8
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลง.....	10
2.3.1 อุณหภูมิ.....	10
2.3.2 ความชื้น.....	10
2.3.3 ออกซิเจน.....	10
2.4 อายุการใช้งานทางความร้อน.....	10

2.4.1	อุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด.....	10
2.4.2	ทฤษฎีที่ใช้ในการหาอายุการใช้งานที่ลดลงไป.....	11
2.4.3	การคำนวณหาอายุการใช้งานของหม้อแปลง.....	16
3.	ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง.....	19
3.1	กำลังสูญเสียในหม้อแปลง.....	19
3.1.1	กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด.....	19
3.1.2	กำลังสูญเสียขณะมีโหลด.....	23
3.2	การส่งผ่านความร้อนภายในหม้อแปลง.....	26
3.2.1	การส่งผ่านความร้อนโดยการนำ.....	26
3.2.2	การส่งผ่านความร้อนโดยการแผ่รังสี.....	27
3.2.3	การส่งผ่านความร้อนโดยการพา.....	28
3.3	การควบคุมความร้อนภายในหม้อแปลง.....	30
4.	ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อหม้อแปลง.....	32
4.1	ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อกำลังสูญเสีย.....	32
4.1.1	ผลกระทบต่อกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด.....	32
4.1.2	ผลกระทบต่อกำลังสูญเสียขณะมีโหลด.....	36
4.1.3	ผลกระทบต่อกำลังสูญเสียปลั๊กย่อย.....	42
4.2	การแก้ไขปัญหาของหม้อแปลงเนื่องจากผลของฮาร์มอนิก.....	43
4.2.1	การใช้ K factor.....	44
4.2.2	การลดขนาดพิกัดหม้อแปลง.....	45
5.	แบบจำลองอายุการใช้งานและแนวทางการจ่ายโหลด.....	49
5.1	หลักการที่ใช้ในแบบจำลองเพื่อหาอายุการใช้งาน.....	49
5.1.1	อุณหภูมิที่สูงที่สุดในหม้อแปลง.....	49
5.1.2	รอบที่ใช้ในการคำนวณ.....	55
5.1.3	อุณหภูมิห้องรอบ ๆ หม้อแปลง.....	56
5.1.4	การเปลี่ยนแปลงโหลด.....	56
5.1.5	การแบ่งช่วงเวลาในการคำนวณ.....	56
5.1.6	การปรับค่าตัวแปรในการคำนวณแต่ละรอบ.....	58
5.1.7	การแบ่งประเภทของหม้อแปลงตามพิกัด.....	64



5.1.8	ค่าคงที่ของ Arrhenius.....	65
5.1.9	แผนผังแสดงหลักการเบื้องต้น.....	66
5.2	ตารางแนวทางการจ่ายโหลดของหม้อแปลง.....	69
5.2.1	ตารางแนวทางการจ่ายโหลดตาม IEC.....	69
5.2.2	ตารางแนวทางการจ่ายโหลดตาม IEEE.....	70
5.3	แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมา.....	76
5.3.1	ส่วนของข้อมูลเบื้องต้น.....	77
5.3.2	ส่วนที่พิมพ์ออกมาได้.....	84
6.	การทดลอง.....	93
7.	การทดสอบและเปรียบเทียบ.....	127
7.1	การทดสอบและเปรียบเทียบอุณหภูมิที่สูงที่สุด.....	127
7.2	การทดสอบและเปรียบเทียบแนวทางการจ่ายโหลด.....	131
7.2.1	ผลของการปรับค่าความต้านทานและค่าคงตัวเวลาทางความร้อน.....	132
7.2.2	การทดสอบและเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลง.....	146
7.3	การทดสอบและเปรียบเทียบผลของฮาร์มอนิก.....	150
8.	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	155
	รายการอ้างอิง.....	157
	ภาคผนวก.....	159
	ก. ข้อมูลการทดสอบหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง.....	160
	ประวัติผู้เขียน.....	163

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าของอายุการใช้งานที่ลดลงของจำนวนทั้ง 3 ชนิดกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากระดับการใช้งานปกติของจำนวน.....	14
2.2 อายุการใช้งานสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ $\theta_x$ .....	16
4.1 ค่าของ $C_{75}$ ที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและชนิดของแกนเหล็ก.....	36
5.1 แสดงค่าไหลดที่ใช้ในการทดสอบ.....	57
5.2 ค่า $A_{10}$ และ $B_{10}$ ของหม้อแปลงแบบน้ำมันที่พิกัด และระดับอุณหภูมิของจำนวนต่างๆ.....	65
5.3 ค่า $A_{10}$ และ $B_{10}$ ของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่พิกัดอุณหภูมิฉนวน ของจุดที่มีค่าอุณหภูมิสูงที่สุดต่างๆ.....	65
6.1 ตัวแปรและค่าที่ควบคุมในการทดลองตอนที่ 1.....	95
6.2 ตัวแปรและค่าที่ควบคุมในการทดลองตอนที่ 2.....	96
6.3 ตัวแปรและค่าที่ควบคุมในการทดลองตอนที่ 3.....	97
7.1 ค่าตัวแปรของหม้อแปลงแบบน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบ.....	127
7.2 ค่าตัวแปรของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบ.....	128
7.3 ลักษณะของกระแสฮาร์มอนิกที่ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบ.....	130
7.4 ร้อยละของความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่สูงที่สุดจากการทดลอง.....	131
7.5 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบผล.....	132
7.6 ค่าของตัวแปรในสมการที่ (5.14) แสดงรูปแบบอุณหภูมิห้องที่ใช้ในการทดสอบ...	146

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ค่าของ Hazard Function ของหม้อแปลงชนิดหนึ่ง.....	5
2.2 ค่าของ Failure Probability & Reliability Functions .....	6
2.3 สูตรโครงสร้างของโมเดลเชลลูโลส. ....	7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับค่า $\Delta T$ ที่ค่า $E$ ต่าง ๆ กัน. ....	14
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับค่า $\Delta T$ ที่ค่า $T_2$ ต่าง ๆ กัน. ....	15
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H ที่ทำให้เกิดวงรอบฮิสเตอรีซิส.....	20
3.2 กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในวงรอบฮิสเตอรีซิส.....	21
3.3 การเกิดกระแสในแผ่นเหล็กบาง .....	22
3.4 การเกิดกระแสในขดลวด.....	23
3.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านส่วนประกอบต่างๆ ภายในหม้อแปลง.....	25
3.6 จุดหมุมน้ำมันเมื่อเทียบกับความสูงของขดลวด .....	28
4.1 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันที่มีค่ายอดหลายค่า .....	33
4.2 วงรอบฮิสเตอรีซิสเล็กที่ซ้อนอยู่ในวงรอบฮิสเตอรีซิสหลัก.....	33
4.3 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงโดยรวมผลของฮาร์มอนิก.....	37
4.4 ลักษณะของขดลวดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในหม้อแปลง .....	39
5.1 ตำแหน่งของจุดหมุมน้ำมันในส่วนต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง.....	50
5.2 การกระจายของฟลักซ์ในหม้อแปลงที่ตำแหน่งของจุดที่มีจุดหมุมน้ำมันสูงที่สุดต่างๆ.....	53
5.3 ความสัมพันธ์ของ $K_r$ และ $K_y$ ที่ปลายขดลวดกับค่าพิกัดของหม้อแปลง.....	54
5.4 อายุการใช้งานที่ลดลงกับค่าของช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ.....	57
5.5 จุดหมุมน้ำมันตอบนบนในขณะที่ย้ายโหลดแบบที่ 1 ในตารางที่ 5.1.....	60
5.6 จุดหมุมน้ำมันตอบนบนในขณะที่ย้ายโหลดแบบที่ 2 ในตารางที่ 5.1.....	60
5.7 อายุการใช้งานที่ลดลงไปโดยให้หลักการคิดค่าคงตัวทางความร้อนต่างกัน.....	61
5.8 แผนผังแบบจำลองที่ใช้ในการหาอายุการใช้งานของหม้อแปลง.....	66

5.9	แผนผังรายละเอียดการหาอุณหภูมิและอายุการใช้งาน ของหม้อแปลงแบบน้ำมัน.....	67
5.10	แผนผังรายละเอียดการหาอุณหภูมิและอายุการใช้งาน ของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง.....	68
5.11	ลักษณะของตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแบบ IEC.....	72
5.12	แผนผังวิธีการสร้างตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแบบ IEC.....	73
5.13	ลักษณะของตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแบบ IEEE.....	74
5.14	แผนผังวิธีการสร้างตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแบบ IEEE.....	75
5.15	ส่วนประกอบของแบบจำลอง.....	76
5.16	หน้าตาที่ใช้ป้อนค่าของโหลดในรอบปี.....	77
5.17	หน้าตาที่ใช้ป้อนค่าอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลงในรอบปี.....	78
5.18	หน้าตาที่ใช้ป้อนค่ากระแสฮาร์มอนิกเลขที่.....	79
5.19	หน้าตาที่ใช้ป้อนค่าแรงดันฮาร์มอนิกเลขที่.....	80
5.20	หน้าตาที่ใช้ป้อนมุมเฟสของแรงดันฮาร์มอนิก.....	80
5.21	หน้าตาที่ใช้ป้อนข้อมูลของหม้อแปลงน้ำมัน.....	81
5.22	หน้าตาที่ใช้ป้อนข้อมูลของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง.....	82
5.23	หน้าตาที่ใช้ป้อนข้อมูลของกำลังสูญเสีย.....	82
5.24	หน้าตาที่ใช้ป้อนข้อมูลของแกนเหล็ก.....	83
5.25	หน้าตาที่ใช้ป้อนข้อมูลของขดลวด.....	83
5.26	หน้าตาที่ใช้ป้อนข้อมูลการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็ก.....	84
5.27	ข้อมูลของโหลดประจำปีที่มีพ้อออกมาได้.....	85
5.28	ข้อมูลของอุณหภูมิห้องที่ร้อนที่สุดที่มีพ้อออกมาได้.....	86
5.29	ข้อมูลของฮาร์มอนิกที่มีพ้อออกมาได้.....	87
5.30	ข้อมูลของหม้อแปลงที่มีพ้อออกมาได้.....	88
5.31	อุณหภูมิที่สูงที่สุดในแต่ละวันที่มีพ้อออกมาได้.....	89
5.32	อายุการใช้งานที่ลดลงในแต่ละวันที่มีพ้อออกมาได้.....	90
5.33	ตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแบบ IEC ที่มีพ้อออกมาได้.....	91
5.34	ตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแบบ IEEE ที่มีพ้อออกมาได้.....	92
6.1	การต่อวงจรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 1.....	94

6.2	การต่อวงจรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2.....	95
6.3	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ตารางที่ 6.1.....	98
6.4	สเปคตรัมของกระแสในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ตารางที่ 6.1.....	98
6.5	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงในการทดลองครั้งที่ 3 ตารางที่ 6.1.....	99
6.6	สเปคตรัมของกระแสในการทดลองครั้งที่ 3 ตารางที่ 6.1.....	99
6.7	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงในการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 ตารางที่ 6.2.....	100
6.8	สเปคตรัมของกระแสในการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 ตารางที่ 6.2.....	100
6.9	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงในการทดลองครั้งที่ 2 และ 4 ตารางที่ 6.2.....	101
6.10	สเปคตรัมของกระแสในการทดลองครั้งที่ 2 และ 4 ตารางที่ 6.2.....	101
6.11	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงในการทดลองครั้งที่ 5 ตารางที่ 6.2.....	102
6.12	สเปคตรัมของกระแสในการทดลองครั้งที่ 5 ตารางที่ 6.2.....	102
6.13	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงในการทดลองครั้งที่ 6 ตารางที่ 6.2.....	103
6.14	สเปคตรัมของกระแสในการทดลองครั้งที่ 6 ตารางที่ 6.2.....	103
6.15	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงในการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 ตารางที่ 6.3.....	104
6.16	สเปคตรัมของกระแสในการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 ตารางที่ 6.3.....	104
6.17	กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงในการทดลองครั้งที่ 2 และ 4 ตารางที่ 6.3.....	105
6.18	สเปคตรัมของกระแสในการทดลองครั้งที่ 2 และ 4 ตารางที่ 6.3.....	105
6.19	อุณหภูมิขดลวดของหม้อแปลงน้ำมันที่เกินจากอุณหภูมิห้อง ในการทดลองครั้งที่ 1 ตารางที่ 6.1.....	106
6.20	อุณหภูมิขดลวดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่เกินจากอุณหภูมิห้อง ในการทดลองครั้งที่ 2 ตารางที่ 6.1.....	107
6.21	อุณหภูมิขดลวดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่เกินจากอุณหภูมิห้อง ในการทดลองครั้งที่ 3 ตารางที่ 6.1.....	108
6.22	อุณหภูมิขดลวดของหม้อแปลงน้ำมันที่เกินจากอุณหภูมิห้อง ในการทดลองครั้งที่ 1 ตารางที่ 6.2.....	109
6.23	อุณหภูมิขดลวดของหม้อแปลงน้ำมันที่เกินจากอุณหภูมิห้อง ในการทดลองครั้งที่ 2 ตารางที่ 6.2.....	110
6.24	อุณหภูมิขดลวดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่เกินจากอุณหภูมิห้อง ในการทดลองครั้งที่ 3 ตารางที่ 6.2.....	111

6.25	คุณภูมิตลวดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่เกินจากคุณภูมิตลวด ในการทดสอบครั้งที่ 4 ตารางที่ 6.2.....	112
6.26	คุณภูมิตลวดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่เกินจากคุณภูมิตลวด ในการทดสอบครั้งที่ 5 ตารางที่ 6.2.....	113
6.27	คุณภูมิตลวดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่เกินจากคุณภูมิตลวด ในการทดสอบครั้งที่ 6 ตารางที่ 6.2.....	114
6.28	คุณภูมิตลวดของหม้อแปลงน้ำมันที่เกินจากคุณภูมิตลวด ในการทดสอบครั้งที่ 1 ตารางที่ 6.3.....	115
6.29	คุณภูมิตลวดของหม้อแปลงน้ำมันที่เกินจากคุณภูมิตลวด ในการทดสอบครั้งที่ 2 ตารางที่ 6.3.....	116
6.30	คุณภูมิตลวดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่เกินจากคุณภูมิตลวด ในการทดสอบครั้งที่ 3 ตารางที่ 6.3.....	117
6.31	คุณภูมิตลวดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่เกินจากคุณภูมิตลวด ในการทดสอบครั้งที่ 4 ตารางที่ 6.3.....	118
6.32	คุณภูมิที่สภาวะคงตัวของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง และหม้อแปลงแบบน้ำมัน.....	119
6.33	ค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง และหม้อแปลงแบบน้ำมัน.....	119
6.34	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของหม้อแปลงน้ำมัน ขณะจ่ายโหลด 1 p.u. ที่ค่า THD ต่างกัน.....	120
6.35	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง ที่โหลด 1 p.u. ค่า THD ต่างกัน.....	121
6.36	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง ที่โหลด 0.5 p.u. ค่า THD ต่างกัน.....	121
6.37	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง ที่ค่าโหลดและ THD ต่างกัน.....	122
6.38	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง ขณะจ่ายโหลดที่ K factor ต่างกัน.....	123



6.39 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของหม้อแปลงน้ำมัน	
ระยะจ่ายโหลดที่ K factor ต่างกัน.....	123
6.40 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง	
ที่ค่าโหลดและ K factor ต่างกัน.....	124
6.41 อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง	
ที่ค่าโหลดและ K factor ต่างกัน.....	125
7.1 อุณหภูมิที่สูงที่สุดของหม้อแปลงแบบน้ำมันเมื่อหลักการคิดต่างกัน.....	130
7.2 อุณหภูมิที่สูงที่สุดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งเมื่อหลักการคิดต่างกัน.....	130
7.3 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 0.7 p.u.	
และ Peakload Duration = 1 ชั่วโมง.....	133
7.4 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354	
เมื่อ Preload = 0.7 p.u. และ Peakload Duration = 1 ชั่วโมง.....	133
7.5 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 1.0 p.u.	
และ Peakload Duration = 1 ชั่วโมง.....	134
7.6 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354	
เมื่อ Preload = 1.0 p.u. และ Peakload Duration = 1 ชั่วโมง.....	134
7.7 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 1.3 p.u.	
และ Peakload Duration = 1 ชั่วโมง.....	135
7.8 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354	
เมื่อ Preload = 1.3 p.u. และ Peakload Duration = 1 ชั่วโมง.....	135
7.9 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 0.7 p.u.	
และ Peakload Duration = 2 ชั่วโมง.....	136
7.10 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354	
เมื่อ Preload = 0.7 p.u. และ Peakload Duration = 2 ชั่วโมง.....	136
7.11 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 1.0 p.u.	
และ Peakload Duration = 2 ชั่วโมง.....	137
7.12 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354	
เมื่อ Preload = 1.0 p.u. และ Peakload Duration = 2 ชั่วโมง.....	137

7.13 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 1.3 p.u. และ Peakload Duration = 2 ชั่วโมง.....	138
7.14 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354 เมื่อ Preload = 1.3 p.u. และ Peakload Duration = 2 ชั่วโมง.....	138
7.15 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 0.7 p.u. และ Peakload Duration = 4 ชั่วโมง.....	139
7.16 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354 เมื่อ Preload = 0.7 p.u. และ Peakload Duration = 4 ชั่วโมง.....	139
7.17 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 1.0 p.u. และ Peakload Duration = 4 ชั่วโมง.....	140
7.18 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354 เมื่อ Preload = 1.0 p.u. และ Peakload Duration = 4 ชั่วโมง.....	140
7.19 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 1.3 p.u. และ Peakload Duration = 4 ชั่วโมง.....	141
7.20 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354 เมื่อ Preload = 1.3 p.u. และ Peakload Duration = 4 ชั่วโมง.....	141
7.21 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 0.7 p.u. และ Peakload Duration = 8 ชั่วโมง.....	142
7.22 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354 เมื่อ Preload = 0.7 p.u. และ Peakload Duration = 8 ชั่วโมง.....	142
7.23 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 1.0 p.u. และ Peakload Duration = 8 ชั่วโมง.....	143
7.24 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354 เมื่อ Preload = 1.0 p.u. และ Peakload Duration = 8 ชั่วโมง.....	143
7.25 อายุการใช้งานที่ลดลงเมื่อ Preload = 1.3 p.u. และ Peakload Duration = 8 ชั่วโมง.....	144
7.26 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับกรณี IEC 354 เมื่อ Preload = 1.3 p.u. และ Peakload Duration = 8 ชั่วโมง.....	144
7.27 ลักษณะอุณหภูมิห้องตาม Profile A , B , C และ D.....	146



7.28 ลักษณะอุณหภูมิห้องตาม Profile A , E , F และ G.....	147
7.29 ลักษณะอุณหภูมิห้องตาม Profile A , H , I และ J.....	147
7.30 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับ Profile A เมื่อ Preload = 0.7 p.u.....	148
7.31 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับ Profile A เมื่อ Preload = 1.0 p.u.....	148
7.32 อัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงเทียบกับ Profile A เมื่อ Preload = 1.3 p.u.....	149
7.33 อุณหภูมิห้องที่มีการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิเฉลี่ยประจำวัน.....	150
7.34 อุณหภูมิห้องที่มีการเปลี่ยนแปลงประจำปี.....	150
7.35 อัตราส่วนอายุการใช้งานที่ลดลงของหม้อแปลงแบบน้ำมันเทียบกับกรณี THD 0% โดยมีค่า Preload = 0.7 p.u. , Peak Load Duration 4 ชั่วโมง.....	151
7.36 อัตราส่วนอายุการใช้งานที่ลดลงของหม้อแปลงแบบน้ำมันเทียบกับกรณี THD 0% โดยมีค่า Preload = 1.0 p.u. , Peak Load Duration 4 ชั่วโมง.....	151
7.37 อัตราส่วนอายุการใช้งานที่ลดลงของหม้อแปลงแบบน้ำมันเทียบกับกรณี THD 0% โดยมีค่า Preload = 1.3 p.u. , Peak Load Duration 4 ชั่วโมง.....	152
7.38 อัตราส่วนอายุการใช้งานที่ลดลงของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งเทียบกับกรณี THD 0% โดยมีค่า Preload = 0.7 p.u. , Peak Load Duration 4 ชั่วโมง.....	152
7.39 อัตราส่วนอายุการใช้งานที่ลดลงของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งเทียบกับกรณี THD 0% โดยมีค่า Preload = 1.0 p.u. , Peak Load Duration 4 ชั่วโมง.....	153
7.40 อัตราส่วนอายุการใช้งานที่ลดลงของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งเทียบกับกรณี THD 0% โดยมีค่า Preload = 1.3 p.u. , Peak Load Duration 4 ชั่วโมง.....	153