

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของความดันและอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่าย
แบบแช่น้ำมันเมื่อเกิดฟอลท์

PHENOMENA ANALYSIS OF PRESSURE AND TEMPERATURE OF
OIL-IMMERSED DISTRIBUTION TRANSFORMER UNDER
FAULT CONDITIONS



เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์

JENSAK EAKBURANAWAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-662-427-1

เลขที่.....
เลขทะเบียน.....33313.....
วัน, เดือน, ปี.....22 ส.ค. 2542.....

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
มิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PHENOMENA ANALYSIS OF PRESSURE AND TEMPERATURE OF
OIL-IMMERSED DISTRIBUTION TRANSFORMER UNDER
FAULT CONDITIONS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1999

ISBN 974-662-427-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของความดันและอุณหภูมิของ หม้อแปลงจำหน่ายแบบแช่น้ำมันเมื่อเกิดฟอลต์
นักศึกษา	นาย เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์
รหัสประจำตัว	38061228
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศุติ บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการเสนอวิธีการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของความดันและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของหม้อแปลงจำหน่ายแบบแช่น้ำมันเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น เมื่อหม้อแปลงเกิดฟอลต์หรือเกิดลัดวงจรขึ้นจะทำให้ความดันภายในถังของหม้อแปลงมีค่าสูงขึ้นและทำให้อุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันสูงขึ้นด้วย ถ้าเกิดการลัดวงจรที่รุนแรงอาจเกิดการระเบิดได้และฉนวนของขดลวดอาจเกิดการชำรุดเสียหายได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาวิเคราะห์ผลดังกล่าว โดยทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย ซอฟต์แวร์ที่ใช้วิเคราะห์ความดันภายในถังของหม้อแปลงจำหน่ายแบบ 1 เฟส ที่มีถึงลักษณะเป็นทรงกลมหรือวงรี และซอฟต์แวร์ที่ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายแบบ 1 เฟสและ 3 เฟส ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะช่วยให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการวิเคราะห์ลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดจากการ วิเคราะห์และได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและแม่นยำ

จากการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ในการออกแบบตัวถังแกนเหล็ก ขดลวด ฉนวน และส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อให้สามารถทนต่อสถานะลัดวงจรที่อาจจะเกิดขึ้นได้รวมทั้งยังทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น เกิดความปลอดภัยต่อทรัพย์สินและทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดความมั่นคงมากยิ่งขึ้น

Thesis Title	Phenomena Analysis of Pressure and Temperature of Oil-Immersed Distribution Transformer under Fault Conditions
Student	Mr. Jensak Eakburanawat
Student ID.	38061228
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Sulee Bunjongjit

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to perform the analyse of the phenomena analysis of pressure and temperature of oil-immersed distribution transformer under fault conditions. When the transformer occurred fault or short circuit, pressure inside transformer tank and temperature of coil and oil are increased. If it short circuit, it may be explode and coil may be decay. In order to prevent of the accident, this thesis analyse the result by developing software to help this analysis. The developing software consists the programs uses for pressure in single-phase distribution transformer which has a cylindrical tank and the programs for temperature in single and three phase distribution transformers. This developing software will help to analyse rapidly, decrease some mistakes and the result accuracy.

The result from this analysis can use for design transformer tank, core, coil, insulator and other parts in order to make it endure short circuit including aging life, safety and security

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจากท่าน
รองศาสตราจารย์ศุติ บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความ
อนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บริษัทพงษ์พิมานการไฟฟ้า จำกัด ที่ได้กรุณาเอื้อเพื่อให้ข้อมูลต่างๆทั้งทาง
ด้านการผลิตและการทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้
นี้ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลด.....	3
2.1 อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE.....	3
2.2 อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC.....	11
2.3 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มน้ำมัน.....	12
บทที่ 3 อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร.....	14
3.1 ขั้นตอนการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE.....	14
3.2 ขั้นตอนการคำนวณตามมาตรฐาน IEC.....	16
บทที่ 4 ความดันภายในตัวถังของหม้อแปลงจำหน่ายขณะลัดวงจร.....	18
4.1 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังของหม้อแปลงที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในถัง.....	18
4.2 การคำนวณความดันของหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในถัง.....	19
บทที่ 5 การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้วิเคราะห์อุณหภูมิและความดันของหม้อแปลงจำหน่าย.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1 ซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE.....	22
5.2 ซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEC.....	25
5.3 ซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	26
5.4 ซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	27
5.5 ซอฟต์แวร์คำนวณความดันภายในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร.....	28
บทที่ 6 วิธีการใช้งานซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิและความดันของหม้อแปลงจำหน่าย.....	30
6.1 ข้อจำกัดของการใช้งาน.....	30
6.2 การเริ่มต้นและจบการทำงานของ TTPA.....	30
6.3 เมนูหลัก (Main Menu).....	32
6.4 การรับข้อมูลและการเริ่มคำนวณ.....	33
6.5 การใช้งาน, การแก้ไขและการบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูล.....	37
6.6 การแสดงผลของซอฟต์แวร์ TTPA.....	38
6.7 ซอฟต์แวร์แสดงภาพตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลง.....	38
6.8 โปรแกรมช่วยเหลือ.....	39
บทที่ 7 ตัวอย่างการใช้งาน.....	41
7.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE.....	41
7.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขนาดมากกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE.....	70
7.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEC.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	88
7.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	99
7.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความดันของน้ำมันที่เกิดขึ้นภายในถังของหม้อแปลงจำหน่าย ขณะเกิดการลัดวงจร.....	109
7.7 บทสรุปท้ายการทดลอง.....	117
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	118
บรรณานุกรม.....	120
ภาคผนวก.....	121
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	122
ประวัติผู้เขียน.....	135

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการจ่ายโหลดตามเกณฑ์ของอุณหภูมิแวดล้อมที่มากหรือน้อยกว่า 30 °C.....	4
2.2 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ยอมรับได้ของการระบายความร้อนด้วยอากาศขณะใช้งาน ที่พิกัด kVA ที่ความสูงต่างๆ.....	5
7.1 แสดงผลการทดสอบค่าสูญเสียและผลการคำนวณค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันและขดลวด ของหม้อแปลงจากโรงงานผู้ผลิต.....	41
7.2 แสดงน้ำหนักของตัวถังและส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงที่ทำการวิเคราะห์.....	42
7.3 แสดงปริมาณน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อนของหม้อแปลงที่ทำการวิเคราะห์.....	42
7.4 แสดงน้ำหนักขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงที่ทำการวิเคราะห์.....	42
7.5 อุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต.....	48
7.6 อุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต.....	57
7.7 อุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต.....	66
7.8 อุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต.....	74
7.9 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 100 kVA.....	88
7.10 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 160 kVA.....	92
7.11 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 250 kVA.....	95
7.12 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 100 kVA.....	99
7.13 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 160 kVA.....	102
7.14 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 250 kVA.....	105
7.15 ข้อมูลของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความดันของน้ำมันขณะเกิด การลัดวงจรภายในถังของหม้อแปลง.....	110
7.16 ความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการ ลัดวงจรที่ความลึกต่างๆตามจุดที่กำหนดเทียบกับเวลา (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว, ลัดวงจรในแนวระดับ).....	111
7.17 ความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการ ลัดวงจรที่ความยาวอาร์คต่างๆที่กำหนดเทียบกับความลึกของจุดลัดวงจร (เวลาใน การลัดวงจรเท่ากับ 20 ms,ลัดวงจรในแนวระดับ).....	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

7.18 ความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการ ลัดวงจรที่ความถี่ต่างๆตามจุดที่กำหนดเทียบกับเวลา (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว, ลัดวงจรในแนวตั้ง).....	113
7.19 ความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการ ลัดวงจรที่ความยาวอาร์คต่างๆที่กำหนดเทียบกับความถี่ของจุดลัดวงจร (เวลาใน การลัดวงจรเท่ากับ 20 ms, ลัดวงจรในแนวตั้ง).....	114



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงกราฟของอายุการใช้งานที่คาดหวังของหม้อแปลง.....	7
2.2 แสดงแผนผังของความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด.....	12
2.3 วงจรการทดสอบหาค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงโดยวิธีลัดวงจร.....	13
4.1 ลักษณะของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงแบบทรงกระบอกเมื่อเกิดการลัดวงจร.....	20
5.1 ผังงานของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดไม่เกิน 500 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE.....	23
5.2 ผังงานของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE.....	24
5.3 ผังงานของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEC.....	25
5.4 ผังงานของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	26
5.5 ผังงานของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	27
5.6 ผังงานของซอฟต์แวร์คำนวณความดันภายในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร.....	28
5.7 ผังงานแสดงการทำงานทั้งหมดของ TTPA.....	29
6.1 แสดงกลุ่มโปรแกรม "TTPA 1.0" และ ไอคอน "TTPA 1.0".....	31
6.2 แสดง TTPA ขณะเริ่มทำงาน.....	31
6.3 แสดงเมนู "อุณหภูมิ".....	32
6.4 แสดงเมนูย่อย "ขณะลัดวงจร".....	32
6.5 แสดงเมนู "วิธีใช้".....	33
6.6 ฟอรัมการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE.....	34
6.7 ฟอรัมการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE.....	34
6.8 ฟอรัมการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEC.....	35
6.9 ฟอรัมการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.10	ฟอร์มการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....36
6.11	ฟอร์มการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณความดันภายในถังของหม้อแปลง ขณะเกิดการลัดวงจร.....36
6.12	แสดงฟอร์มคาตาเบสวิวเวอร์.....37
6.13	แสดงฟอร์มคาตาเบสวิวเวอร์ที่มีข้อมูลเปิดอยู่.....38
6.14	ฟอร์มแสดงผลการคำนวณในรูปของตาราง.....39
6.15	ฟอร์มแสดงผลการคำนวณในรูปของกราฟ.....39
6.16	แสดงภาพตัวอย่างขั้นตอนการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลง.....40
6.17	โปรแกรมช่วยเหลือของTTPA.....40
7.1	แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....44
7.2	แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....44
7.3	แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....45
7.4	แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....46
7.5	แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....47
7.6	แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....47
7.7	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการ คำนวณและการทดสอบที่พิกัด.....48
7.8	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการคำนวณ ที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ที่พิกัด.....49
7.9	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.10 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	50
7.11 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	50
7.12 กราฟเปรียบเทียบอายุการใช้งานของฉนวนของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	51
7.13 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....	53
7.14 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....	54
7.15 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....	54
7.16 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....	55
7.17 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....	56
7.18 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....	56
7.19 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการ คำนวณและการทดสอบที่พิกัด.....	57
7.20 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการคำนวณ ที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ที่พิกัด.....	58
7.21 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	58
7.22 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	59
7.23 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.24 กราฟเปรียบเทียบอายุการใช้งานของฉนวนของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	60
7.25 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....	62
7.26 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....	63
7.27 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....	63
7.28 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....	64
7.29 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....	65
7.30 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....	65
7.31 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการ คำนวณและการทดสอบที่พิกัด.....	66
7.32 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการคำนวณ ที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ที่พิกัด.....	67
7.33 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	67
7.34 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	68
7.35 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	68
7.36 กราฟเปรียบเทียบอายุการใช้งานของฉนวนของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	69
7.37 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.38 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....	71
7.39 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C.....	72
7.40 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....	73
7.41 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....	73
7.42 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C.....	74
7.43 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการ คำนวณและการทดสอบที่พิกัด.....	75
7.44 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการคำนวณ ที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ที่พิกัด.....	75
7.45 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	76
7.46 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	76
7.47 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	77
7.48 กราฟเปรียบเทียบอายุการใช้งานของฉนวนของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการ คำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100 %, 120% และ 130%.....	77
7.49 แสดงโหลดที่หม้อแปลงจ่ายใน 24 ชั่วโมง แบบที่ 1.....	78
7.50 แสดงโหลดที่หม้อแปลงจ่ายใน 24 ชั่วโมง แบบที่ 2.....	78
7.51 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 1 ตามมาตรฐาน IEC.....	80
7.52 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 1 ตามมาตรฐาน IEC.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.53 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 1 ตามมาตรฐาน IEC.....	81
7.54 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 2 ตามมาตรฐาน IEC.....	82
7.55 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 2 ตามมาตรฐาน IEC.....	82
7.56 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 2 ตามมาตรฐาน IEC.....	83
7.57 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 1 ตามมาตรฐาน IEC.....	84
7.58 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 1 ตามมาตรฐาน IEC.....	85
7.59 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 1 ตามมาตรฐาน IEC.....	85
7.60 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 2 ตามมาตรฐาน IEC.....	86
7.61 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 2 ตามมาตรฐาน IEC.....	87
7.62 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลด แบบที่ 2 ตามมาตรฐาน IEC.....	87
7.63 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 100 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 เครื่อง.....	89
7.64 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิสุดท้ายของการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 100 kVA กับ ความหนาของฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำ.....	90
7.65 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	90
7.66 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.67 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	91
7.68 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 160 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 เครื่อง.....	93
7.69 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิสุดท้ายของการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 160 kVA กับ ความหนาของฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำ.....	93
7.70 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	94
7.71 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	94
7.72 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	96
7.73 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 250 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 เครื่อง.....	96
7.74 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิสุดท้ายของการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 250 kVA กับ ความหนาของฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำ.....	97
7.75 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	97
7.76 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	98
7.77 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE.....	98
7.78 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 100 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEC จำนวน 3 เครื่อง.....	100
7.79 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	101
7.80 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.81 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	102
7.82 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 160 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEC จำนวน 3 เครื่อง.....	103
7.83 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	104
7.84 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	104
7.85 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	105
7.86 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 250 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEC จำนวน 3 เครื่อง.....	106
7.87 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	107
7.88 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	107
7.89 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC.....	108
7.90 แสดงภาพตัดด้านบนและด้านข้างของหม้อแปลงขนาด 30 kVA.....	109
7.91 แสดงตำแหน่งของการลัดวงจรภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่ทำการวิเคราะห์..	110
7.92 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการ ลัดวงจรที่ความลึกต่างๆตามจุดที่กำหนดเทียบกับเวลา (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว, ลัดวงจรตามแนวระดับ).....	111
7.93 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการ ลัดวงจรที่ความยาวอาร์คต่างๆที่กำหนดเทียบกับความลึกของจุดลัดวงจร (เวลาในการ ลัดวงจรเท่ากับ 20 ms, ลัดวงจรแนวระดับ).....	112

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.94 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการ ลัดวงจรที่ความลึกต่างๆตามจุดที่กำหนดเทียบกับเวลา (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว, ลัดวงจรแนวตั้ง).....	113
7.95 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการ ลัดวงจรที่ความยาวอาร์คต่างๆที่กำหนดเทียบกับความลึกของจุดลัดวงจร (เวลาในการ ลัดวงจรเท่ากับ 20 ms, ลัดวงจรแนวตั้ง).....	114
7.96 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการ ลัดวงจรที่ความลึกต่างๆในแนวระดับเทียบกับแนวตั้ง (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว).....	115
7.97 แสดงผลการคำนวณความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร.....	115
7.98 แสดงตารางผลการคำนวณความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร.....	116
7.99 แสดงกราฟผลการคำนวณความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร.....	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะปัจจุบันธุรกิจภาคอุตสาหกรรมมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีผลทำให้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น หม้อแปลงไฟฟ้าจึงเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งซึ่งมีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม ถ้าหากเกิดการลัดวงจรขึ้นภายในตัวถังของหม้อแปลงจะทำให้เกิดความดันและความร้อนขึ้นอาจทำให้หม้อแปลงเกิดการระเบิดและขดลวดได้รับความเสียหายเนื่องจากความร้อนได้ การระเบิดนี้เกิดจากตัวถังของหม้อแปลงไม่สามารถทนความดันที่เกิดขึ้นได้ จึงอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สินและเป็นอันตรายต่อบุคคลเนื่องจากการระเบิดนี้ได้

ในการศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายเมื่อเกิดฟลทซ์ขึ้นนั้นทำโดยพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้นเพื่อให้ผู้ออกแบบหม้อแปลงสามารถใช้วิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลง เพื่อสามารถทนต่อสภาวะของการลัดวงจรได้ โดยสามารถใช้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ทำการวิเคราะห์ออกแบบและเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้องและแม่นยำ การวิเคราะห์นี้จะทำให้หม้อแปลงที่สร้างขึ้นมีความปลอดภัยในการใช้งานมากยิ่งขึ้นและช่วยลดค่าความสูญเสีย หม้อแปลงจึงมีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้นทำให้เกิดความมั่นคงต่อระบบไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. สร้างซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ผลิตสามารถใช้ทำการวิจัยและออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่มีความปลอดภัยสูงและอายุการใช้งานยาวนาน ได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องขึ้นมากกว่าเดิม

2. สร้างซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่จะช่วยในการทำนายและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงดังนี้

2.1 อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด

2.2 อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

2.3 ความดันภายในตัวถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

3. ช่วยสนับสนุนให้ผู้ผลิตหันมาทำการวิจัยและพัฒนาหม้อแปลงในด้านของความปลอดภัยในการใช้งานและอายุการใช้งานที่ยาวนาน

4. เป็นแหล่งข้อมูลและวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีทางด้านการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแก่นักวิจัยหรือนักศึกษาที่ต้องการพัฒนาและศึกษาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำหรับทำนายปรากฏการณ์ของความดันและอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายแบบแช่น้ำมันเมื่อเกิดฟอลต์ ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์และมีการติดต่อกับผู้ใช้ในรูปของกราฟฟิก(Graphical User Interface ; GUI) จึงทำให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถทำการคำนวณและทำนายปรากฏการณ์ต่างๆของหม้อแปลงจำหน่ายแบบแช่น้ำมันที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานได้ดังนี้

1. อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE
2. อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC
3. อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE
4. อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC
5. ความดันของน้ำมันในตัวถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผู้ผลิตหม้อแปลงภายในประเทศสามารถที่จะทำการวิจัยและพัฒนาการผลิตหม้อแปลงให้หม้อแปลงมีประสิทธิภาพที่ดี มีความปลอดภัยในการใช้งานสูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นกว่าเดิม
2. ถ้าหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้งานได้รับการออกแบบที่ถูกต้องจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาหม้อแปลงได้
3. หม้อแปลงที่ออกแบบได้ถูกต้องจะทำให้เกิดความมั่นคงต่อระบบไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น
4. ทำให้ผู้ผลิต, นักวิจัย, นักศึกษาและผู้ที่สนใจหันมาให้ความสนใจในการวิจัยและออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีความปลอดภัยในการใช้งานสูงเนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วบนซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์
5. ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สามารถนำไปใช้ในการค้นคว้าและวิจัยในวงการการศึกษาได้

อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายกระแสไฟฟ้า

ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบโดยปกติมันจะทำให้ภายในตัวถังของหม้อแปลงเกิดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิปกติก่อนการใช้งาน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลง เช่น ขดลวดตัวนำ, ฉนวนและส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงนั้นจะเกิดการเสื่อมสภาพลงโดยมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นสาเหตุหลัก การเสื่อมสภาพของวัสดุที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงนี้หมายถึงการทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงไปด้วย ในทางปฏิบัติผู้ผลิตหม้อแปลงจำเป็นต้องทำการทดสอบหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานของหม้อแปลงนี้ว่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้หรือไม่ และยังสามารถใช้อุณหภูมิที่ทดสอบได้นี้ทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้อีกด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและการทำนายอายุการใช้งานของฉนวนจาก 2 มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปคือ มาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC โดยจะกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของหม้อแปลงจำหน่ายแบบแช่น้ำมัน (Oil-Immersed Distribution Transformers) เท่านั้น

2.1 อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE

ตามมาตรฐาน IEEE การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายกระแสไฟฟ้านั้นมีรายละเอียดที่ต้องทราบดังนี้

2.1.1 พิกัดของหม้อแปลง (Transformer Rated Output)

2.1.1.1 พิกัดของหม้อแปลงหรือพิกัดโหลด (rate load) ที่ใช้หมายถึงพิกัดที่แสดงไว้บนแผ่นป้าย (nameplate rating) ของหม้อแปลง

2.1.1.2 อุณหภูมิขณะใช้งานของหม้อแปลงที่พิกัดส่งผลกระทบต่ออายุของฉนวน

2.1.1.3 การเสื่อมลงของฉนวนขึ้นอยู่กับเอาต์พุตจริงที่หม้อแปลงจ่าย ทั้งนี้อาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าพิกัดที่แสดงไว้บนแผ่นป้ายก็ได้ และยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแวดล้อมและเงื่อนไขในการใช้งานอีกด้วย

2.1.2 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลง (Transformer Temperature Rise) ในการหาคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงในขณะจ่ายโหลดนั้นมาตรฐาน IEEE แบ่งหม้อแปลงเป็น 2 แบบคือ

2.1.2.1 หม้อแปลงแบบอุณหภูมิเพิ่ม 65 °C คือหม้อแปลงที่มีอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดเกิน 65 °C และอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของขดลวด (hottest-spot winding rise) ไม่เกิน 80°C

2.1.2.2 หม้อแปลงแบบอุณหภูมิเพิ่ม 55 °C คือหม้อแปลงที่มีอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดเกิน 55 °C และอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของขดลวด (hottest-spot winding rise) ไม่เกิน 65 °C

2.1.3 องค์ประกอบที่มีผลกระทบต่อการระบายความร้อนของหม้อแปลง (Factor Affecting Transformer Cooling) ในการใช้งานตลอดวันของหม้อแปลงนั้น อุณหภูมิแวดล้อม, ระดับความสูงของการติดตั้งและลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงแต่ละเครื่องอาจจะมีความแตกต่างกันถึงเหล่านี้อาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของหม้อแปลงได้ดังนี้

2.1.3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิแวดล้อมขณะจ่ายโหลด อุณหภูมิแวดล้อมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการคำนวณหาความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง ดังนั้นในการคำนวณหาอุณหภูมิขณะใช้งานของหม้อแปลงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นจะเป็นค่าที่บวกเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแวดล้อมจริงนั้นเราสามารถทำการวัดได้และเราจะใช้อุณหภูมิแวดล้อมนี้ในการคำนวณหาอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดและความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง

ตารางที่ 2.1 แสดงการจ่ายโหลดตามเกณฑ์ของอุณหภูมิแวดล้อมที่มากหรือน้อยกว่า 30 °C

Loading on Basis of Ambient Temperature Other Than 30 °C (for Quick Approximation, 0°C-50°C)	
	% of Rate kVA
Decrease load for each °C the ambient temperature exceeds 30 °C	1.5
Increase load for each °C the ambient temperature below 30 °C	1.0

ในตารางที่ 2.1 แสดงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพิกัดโหลดสำหรับอุณหภูมิแวดล้อมของอากาศเฉลี่ยตลอดวันที่มากหรือน้อยกว่า 30 °C การคำนวณอายุการใช้งานของหม้อแปลงโดยใช้การจ่ายโหลดตามเกณฑ์ของอุณหภูมิแวดล้อมในตารางที่ 2.1 จะให้ค่าของอายุการใช้งานของหม้อแปลงโดยประมาณ ตารางที่ 2.1 จะครอบคลุมช่วงของอุณหภูมิแวดล้อมตั้งแต่ 0°C - 50°C สำหรับหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศ

ดังนั้นอุณหภูมิแวดล้อมจึงเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญในการคำนวณหาความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง และองค์ประกอบนี้สามารถควบคุมได้ถ้าหม้อแปลงติดตั้งภายในอาคารที่มีการระบายอากาศที่เพียงพอ

2.1.3.2 การประมาณค่าอุณหภูมิแวดล้อม เราจำเป็นต้องทำนายโหลดซึ่งหม้อแปลงสามารถจ่ายได้อย่างปลอดภัยในอนาคตโดยไม่ทราบค่าอุณหภูมิแวดล้อม ค่าของอุณหภูมิแวดล้อมที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือนอาจจะประมาณได้จากรายงานของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งผลที่ได้นั้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละภาคของประเทศ แต่สำหรับประเทศไทยนั้นอุณหภูมิแวดล้อมในแต่ละฤดูไม่แตกต่างกันมากเหมือนในต่างประเทศทำให้ไม่จำเป็นต้องมีการเฉลี่ยอุณหภูมิแวดล้อมที่ใช้ทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลง

2.1.3.3 ผลกระทบของระดับความสูงขณะจ่ายโหลด ความหนาแน่นของอากาศที่ลดลงเนื่องจากความสูงเพิ่มขึ้นนั้นทำให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลงมีค่ามากขึ้นดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับอากาศที่เป็นตัวแพร่กระจายความร้อน

2.1.3.3.1 การใช้งานที่พิกัด kVA หม้อแปลงที่ใช้งานที่พิกัด kVA ที่ระดับความสูงเกิน 1000 เมตร (3300 ฟุต) อุณหภูมิเพิ่มไม่เกินขอบเขตที่กำหนด ให้ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของการระบายความร้อนด้วยอากาศไม่เกินค่าที่ให้ไว้ในตารางที่ 2.2 ในแต่ละระดับความสูง

ตารางที่ 2.2 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ยอมรับได้ของการระบายความร้อนด้วยอากาศขณะใช้งานที่พิกัด kVA ที่ความสูงต่างๆ

1000 m (3300 ft)	2000 m (6600 ft)	3000 m (9900 ft)	4000 m (13200 ft)
30 °C	28 °C	25 °C	23 °C

2.1.3.3.2 การใช้งานน้อยกว่าพิกัด kVA หม้อแปลงที่ใช้งานที่ระดับความสูงมากกว่า 1000 เมตร (3300 ฟุต) โดยมีอุณหภูมิปกติไม่เกินขอบเขตที่กำหนด ให้โหลดที่จ่ายลดลงต่ำกว่าพิกัดที่แสดงไว้ที่แผ่นป้าย 0.4 % ในทุกๆ 100 เมตร (330 ฟุต) ในระดับความสูงที่เกิน 1000 เมตร จะต้องมีการประยุกต์ใช้พัดลมช่วยในการระบายความร้อน

2.1.3.4 ผลกระทบของลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงมีผลกระทบต่อคุณลักษณะของการกระจายความร้อนของหม้อแปลง เช่นการเลือกสี,มาตรฐานของตัวถังและครีประบายความร้อนของหม้อแปลงเป็นต้น

2.1.4 อายุการใช้งานของฉนวน (Aging of Insulation)

2.1.4.1 อายุการใช้งานหรือการเสื่อมสภาพของฉนวนนั้นเกิดจากอุณหภูมิและช่วงเวลาในการเกิดอุณหภูมินั้น การกระจายของอุณหภูมิในหม้อแปลงส่วนใหญ่จะไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หม้อแปลงที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะต้องเกิดการเสื่อมสภาพลง ในการศึกษาอายุการใช้งานนี้ต้องพิจารณาผลของอุณหภูมิจุดร้อนสุด (hottest-spot) ที่มีผลต่ออายุการใช้งาน

2.1.4.2 ข้อมูลพื้นฐานส่วนใหญ่ของอายุการใช้งานของฉนวนที่อุณหภูมิแตกต่างกันนั้น ได้มาจากการทดลองและการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงทางกลและทางไฟฟ้า ข้อมูลจากเอกสารเหล่านี้ใช้เพื่อทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงและเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงหม้อแปลงให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามมีให้คำแนะนำว่าหม้อแปลงที่ใช้งานมานานแล้วควรที่จะมีการนำใบเซอร์วิสไปใช้

การทดสอบและการพิจารณานี้แสดงอยู่ในรูปของกราฟของอายุการใช้งานที่คาดหวัง ดังรูปที่ 1 กราฟคำแนะนำนี้เป็นแบบอายุการใช้งานที่คาดหวังแบบปกติ (Normal life expectancy) สำหรับหม้อแปลงจำหน่ายที่มีอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดเฉลี่ย 65 °C และ 55 °C

2.1.4.3 ความสัมพันธ์ของการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและเวลาอยู่ในรูปของลอการิทึมของอายุฉนวนดังนี้

$$\text{Log}_{10}\text{life}(h) = A + \frac{B}{T} \quad (2.1)$$

เมื่อ

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยของสเคลวิน = $\theta_{hs} + 273$

เมื่อ θ_{hs} คือ อุณหภูมิสูงสุด (hottest-spot)

A และ B = ค่าคงที่ของกราฟอายุฉนวนที่คาดหวัง

สำหรับระบบฉนวน 65 °C

$$A = -11.269$$

$$B = 6328.8$$

สำหรับระบบฉนวน 55 °C

$$A = -11.968$$

$$B = 6328.8$$

2.1.5 อายุการใช้งานที่คาดหวังของหม้อแปลง (Transformer Life Expectancy)

อายุการใช้งานที่คาดหวังของหม้อแปลงที่อุณหภูมิขณะใช้งานต่าง ๆ นั้น ไม่ใช่ข้อมูลที่แน่นอน เพราะผลกระทบของการสะสมของอุณหภูมิและเวลาที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของฉนวนนั้นต้องอาศัยค่าที่มาจากการประมาณการ เพราะฉะนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะทำนายช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้อย่างแม่นยำ การเสื่อมสภาพของฉนวนเป็นคุณสมบัติปกติที่เกิดขึ้นจากการลดลงของความแข็งแรงทางกลและความแข็งแรงของฉนวน แต่ก็ไม่ได้เป็นปัจจัยเพียงอย่างเดียวที่ทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลง การขยายตัวของตัวนำที่เกิดจากความร้อนจากการโอเวอร์โหลดอย่างรุนแรงหรือแรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวนมากที่เกิดจากการลัดวงจรก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้ลายคุณสมบัติทางกลของฉนวนเป็นผลทำให้เกิดการลัดวงจรรอบต่อรอบหรือชั้นต่อชั้นของลวดตัวนำทำให้หม้อแปลงเกิดการเสียหายได้

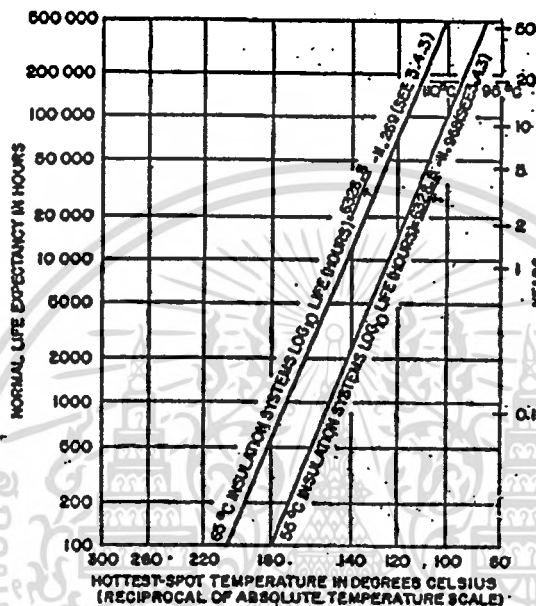
2.1.5.1 อายุการใช้งานปกติที่คาดหวังของหม้อแปลง อายุการใช้งานปกติที่คาดหวังของหม้อแปลงหาได้จากการจ่ายโหลดแบบต่อเนื่องที่พิกัดเอาต์พุตของหม้อแปลงเมื่อใช้งานตามปกติ อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ที่ 30 °C อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ 110 °C ในระบบฉนวน 65 °C และ 95 °C ในระบบฉนวน 55 °C

อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำเป็นตัวประกอบหลักที่ใช้ในการคำนวณหาอายุการใช้งานที่เกิดจากการจ่ายโหลด ในการออกแบบทางการค้าอุณหภูมินี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงเพราะจะเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรายในการติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิในตำแหน่งที่เหมาะสมเนื่องจากแรงดันสูงของหม้อแปลง สำหรับค่าที่ใช้ในการอ้างอิงนั้นได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

หม้อแปลงแบบจุ่มในน้ำมันที่ใช้งานอย่างต่อเนื่องตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาแล้วอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำมีขีดจำกัดอยู่ที่ 110°C ในระบบฉนวน 65°C และ 95°C ในระบบฉนวน 55°C อายุการใช้งานปกติที่คาดหวังที่อุณหภูมิดังกล่าวคือ 20 ปี แสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงกราฟของอายุการใช้งานที่คาดหวังของหม้อแปลง

2.1.6 ขีดจำกัดในการจ่ายโหลด (Limitation) เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเกินพิกัดที่ระบุไว้ในแผ่นป้ายหรือขีดจำกัดอื่นของหม้อแปลงอาจจะทำให้เกิดอันตรายขึ้นได้ ขีดจำกัดที่ว่าก็คือการขยายตัวของน้ำมัน, ความดันในถังและความสามารถในการทนความร้อนของบุหขึง, สายตัวนำ, แทปเทนเจอร์หรืออุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ร่วมกับหม้อแปลง เช่น เคเบิล, รีแอกเตอร์, เซอร์กิตเบรกเกอร์, ดิสคอนเน็คคิงสวิตช์และหม้อแปลงกระแส อุปกรณ์ต่างๆเหล่านี้เป็นข้อจำกัดในการจ่ายโหลดดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาถึงสิ่งต่างๆเหล่านี้ก่อนการใช้งานหม้อแปลงเกินพิกัดที่ระบุไว้ในแผ่นป้าย

2.1.7 การคำนวณหาอุณหภูมิและค่าการสูญเสียอายุการใช้งานของหม้อแปลงขนาดเล็กกว่า 500 kVA (ANSI/IEEE C57.91-1981)

2.1.7.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ (อุณหภูมิทุกค่าที่ใช้มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$)

a คือ อุณหภูมิแวดล้อม

g คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุดที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ด้านบ่นเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h_s	คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุด
i	คือ ค่าเริ่มต้น
o	คือ น้ำมัน
r	คือ พิกัด
u	คือ จุดสุดท้าย
w	คือ ขดลวด
θ_u	คือ อุณหภูมิแวดล้อม
θ_g	คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดสุดท้ายของเวลา t
θ_{gi}	คือ ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลาการจ่ายโหลด
θ_{gr}	คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัด โหลด
θ_{gu}	คือ ค่าสุดท้ายของอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่โหลด K ใดๆ
θ_{hs}	คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ
θ_o	คือ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดสุดท้ายของเวลา t
θ_{oi}	คือ ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลาการจ่ายโหลด
θ_{or}	คือ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัด โหลด
θ_{ou}	คือ ค่าสุดท้ายของอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่โหลด K ใดๆ
θ_{wr}	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัด โหลด
C	คือ ค่าความจุความร้อนของหม้อแปลง (Watt-hour/°C)
K	คือ โหลดที่หม้อแปลงจ่ายสูงสุดเป็นค่าเปอร์ยูนิต
P_r	คือ ค่าการสูญเสียทั้งหมด ที่พิกัด โหลด (watt)
R	คือ อัตราส่วนของการสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่พิกัดต่อการสูญเสียขณะไม่จ่ายโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

e	คือ base of natural logarithm = 2.71828
n	คือ exponential power ของการสูญเสียกับอุณหภูมิเพิ่ม
t	คือ ช่วงเวลาในการจ่ายโหลดสูงสุดเป็นชั่วโมง
T	คือ thermal time constant ของหม้อแปลง (ชั่วโมง)
T _{hs}	คือ thermal time constant ของอุณหภูมิจุดร้อนสุด (ชั่วโมง)
T _r	คือ thermal time constant ของโหลดที่พิกัดของหม้อแปลงที่เริ่ม ที่ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้น=0

2.1.7.2 สมการของอุณหภูมิจุดร้อนสุดและเปอร์เซ็นต์ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน

$$\theta_{ou} = \left[\frac{K^2 R + 1}{R + 1} \right]^n \theta_{or} \quad (2.2)$$

$$\theta_{gu} = K^{2n} \cdot \theta_{gr} \quad (2.3)$$

$$n = 0.8 \quad (2.4)$$

$$\theta_{gr} = \theta_{wr} - \theta_{or} + 15(10) \quad (2.5)$$

หมายเหตุ จากสมการที่ 2.5 ค่าที่อยู่ในวงเล็บหมายถึงค่าที่ใช้ในระบบบนวน 55 °C

$$T_r = C \frac{\theta_{or}}{P_r} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$C = 0.06(\text{น้ำหนักเป็นปอนด์ของแกนเหล็กและขดลวด}) \\ + 0.04(\text{น้ำหนักเป็นปอนด์ของตัวถังและข้อต่อต่างๆ}) \\ + 1.33(\text{ปริมาณของน้ำมันเป็นแกลลอน})$$

$$\theta_o = [\theta_{ou} - \theta_{oi}] [1 - e^{-t/T_r}] + \theta_{oi} \quad (2.7)$$

$$\theta_g = [\theta_{gu} - \theta_{gi}] [1 - e^{-t/T_{hs}}] + \theta_{gi} \quad (2.8)$$

$$\theta_{hs} = \theta_a + \theta_o + \theta_g \quad (2.9)$$

$$\% \text{ loss of life} = 100t \cdot 10^{-[A+(B/T)]} \quad (2.10)$$

$$T = \theta_{hs} + 273 \quad (2.11)$$

หมายเหตุ ค่า A และ B ในสมการที่ 2.10 เป็นค่าเดียวกับค่าในสมการที่ 2.1

2.1.8 การคำนวณหาอุณหภูมิและค่าการสูญเสียอายุการใช้งานของหม้อแปลงขนาดมาก
กว่า 500 kVA (ANSI/IEEE C57.92-1981)

2.1.8.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ (อุณหภูมิทุกค่าที่ใช้มีหน่วยเป็น °C)

θ_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม

θ_g คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำ

มันด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- θ_{gr} คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด
- θ_{hs} คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ
- θ_o คือ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อม
- θ_{or} คือ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด
- θ_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมันด้านบน
- θ_u คือ อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันด้านบน
- θ_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดตัวนำ
- θ_{wo} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวนำที่สูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน
- C คือ ค่าความจุความร้อนของหม้อแปลง (Watt-hour/°C)
- K คือ โหลดสูงสุดที่หม้อแปลงจ่ายเป็นค่าเปอร์เซ็นต์
- P_r คือ ค่าการสูญเสียทั้งหมด ที่พิกัดโหลด (watt)
- R คือ อัตราส่วนของการสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่พิกัดต่อการสูญเสียขณะไม่จ่ายโหลด
- e คือ base of natural logarithm = 2.71828
- n คือ Oil exponential = 0.8
- m คือ Winding exponent = 0.8
- t คือ เวลาในการจ่ายโหลดสูงสุดเป็นชั่วโมง
- T_{hs} คือ thermal time constant ของอุณหภูมิจุดร้อนสุด (ชั่วโมง)
- Tr คือ thermal time constant ของหม้อแปลงที่เริ่มที่ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้น=0
- A, B คือ ค่าคงที่สำหรับการทำนายอายุขณวนที่เหมาะสม
- แบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 55 °C
 - $A = -14.133 \quad B = 6972.15$
 - แบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 65 °C
 - $A = -13.391 \quad B = 6972.15$

2.1.8.2 สมการของอุณหภูมิจุดร้อนสุดและเปอร์เซ็นต์ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน

$$\theta_{gr} = \theta_{wo} - \theta_w \quad (2.12)$$

$$\theta_{ou} = \left[\frac{K^2 R + 1}{R + 1} \right]^n \theta_{or} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.14) การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_r = C \frac{\theta_{or}}{P_r} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$C = 0.06(\text{น้ำหนักเป็นปอนด์ของแกนเหล็กและขดลวด}) \\ + 0.06(\text{น้ำหนักเป็นปอนด์ของตัวถังและข้อต่อต่างๆ}) \\ + 1.93(\text{ปริมาณของน้ำมันเป็นแกลลอน})$$

$$\theta_o = [\theta_u - \theta_i][1 - e^{-t/\tau_o}] + \theta_i \quad (2.16)$$

$$\theta_{hs} = \theta_a + \theta_o + \theta_g \quad (2.17)$$

$$\% \text{ loss of life} = 100t \cdot 10^{-[A+(B/T)]} \quad (2.18)$$

$$T = \theta_{hs} + 273 \quad (2.19)$$

2.2 อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

การคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงในขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC นั้น มีหลักการที่คล้ายกับการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงในข้อที่ 1 ที่กล่าวมาแล้ว โดยจะแตกต่างกันที่ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการคำนวณเท่านั้น เพราะฉะนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเรื่องของการคำนวณเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

2.2.1 การคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงแบบจุ่มในน้ำมัน (IEC 354 (1991))

หม้อแปลงแบบที่ขดลวดจุ่มในน้ำมัน(Oil-Immersed)และอาศัยการระบายความร้อน โดยธรรมชาตินั้นเราสามารถหาค่าสุดท้ายของอุณหภูมิจุดร้อนสุดในสภาวะโหลดต่างๆได้จากผลรวมของอุณหภูมิแวดล้อม, อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่และผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับอุณหภูมิน้ำมันด้านบน

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{or} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + Hg_r K^y \quad (2.12)$$

เมื่อ

θ_h คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลง ($^{\circ}\text{C}$)

θ_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

$\Delta\theta_{or}$ คือ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)

Hg_r คือ อุณหภูมิเพิ่มที่เริ่มจากอุณหภูมิน้ำมันด้านบนถึงจุดร้อนสุด ($^{\circ}\text{C}$)

R คือ อัตราส่วนของความสูญเสียขณะจ่ายโหลดต่อการสูญเสียขณะไม่จ่ายโหลด

K คือ โหลดแฟกเตอร์(กระแสโหลด/กระแสที่พิกัด)

x คือ Oil exponent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

y คือ Winding exponent

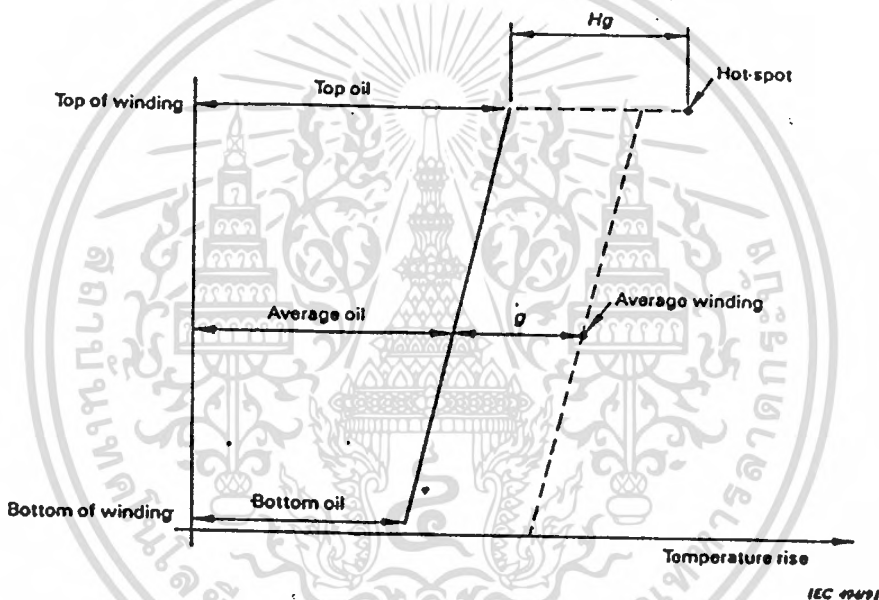
ในภาพที่ 2 จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ขดลวด, อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่น้ำมันและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลง

2.2.2 การคำนวณค่าการสูญเสียอาชุกการใช้งาน เราสามารถหาค่าการสูญเสียอาชุกการใช้งานได้จากสมการ

$$L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 2^{(\theta_n - \theta_{nr})/6} \quad (2.13)$$

เมื่อ N คือ number of each time interval

n คือ Total number of equal time interval



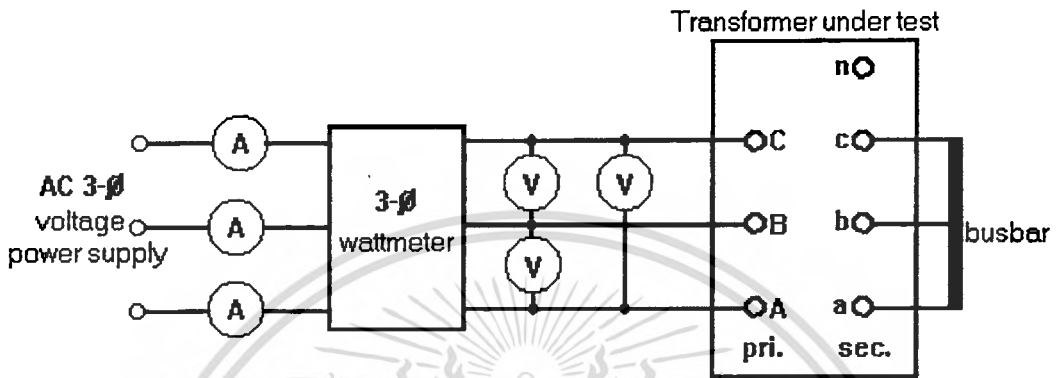
ภาพที่ 2.2 แสดงแผนผังของความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด

2.3 การทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มน้ำมัน

ในการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจำหน่ายนั้น จะทำการทดสอบเพื่อหาค่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน, อุณหภูมิของขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แล้วทำการคำนวณหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน, อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ โดยทำการทดสอบตามวงจรดังภาพที่ 3 เมื่อคํววงจรเรียบร้อยแล้วจะทำการจ่ายแรงดันเข้าทางปฐมภูมิของหม้อแปลงจนวัดคํมิเตอร์อ่านค่าได้เท่ากับค่าความสูญเสียรวม (Total Loss) ทำการบันทึกค่าของอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิของอากาศโดยรอบทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 1 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการลดแรงดันลงจนแอมป์มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่านค่าได้เท่ากับพิกัดกระแสของหม้อแปลง แล้วทำการตัดแหล่งจ่ายไฟออกทำการวัดค่าความต้านทานเปรียบเทียบกับเวลาทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิทันที แล้วนำค่าความต้านทานที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดไฟ นำค่าต่างๆไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้น, อุณหภูมิของตัวนำที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.3 วงจรการทดสอบหาค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงโดยวิธีลัดวงจร

บทที่ 3

อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร

ในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังนั้นผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงควมมีเสถียรภาพและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดความผิดปกติ เช่น เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบจะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรจำนวนมากไหลไปสู่จุดที่เกิดการลัดวงจรนั้นและมีผลทำให้อุปกรณ์ที่ต่อใช้งานอยู่ในระบบเกิดความเสียหาย หม้อแปลงก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มักจะได้รับความเสียหายที่เกิดจากการลัดวงจรนี้ด้วย เมื่อหม้อแปลงเกิดการลัดวงจรขึ้นจะทำให้กระแสในขดลวดสูงกว่ากระแสปกติหลายเท่าซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิของขดลวดสูงขึ้นตามไปด้วย ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้ฉนวนได้รับความเสียหาย แต่ถ้าหม้อแปลงได้รับการออกแบบที่เหมาะสมก็จะทำให้หม้อแปลงสามารถทนต่อสภาวะนี้ได้ตามข้อกำหนด

ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการคำนวณกระแสลัดวงจร, เวลาที่เกิดการลัดวงจร, และอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อแปลงหลังจากเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE และ IEC เพื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณนี้มาวิเคราะห์หาแนวทางในการออกแบบหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพที่ดีและมีสมรรถนะในการทนต่อกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

3.1 ขั้นตอนการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE (ANSI/IEEE C57.12.00-1980)

ในการวิเคราะห์สภาวะลัดวงจรของหม้อแปลงต้องทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

3.1.1 การคำนวณระยะเวลาการลัดวงจร (Short-Circuit Current Duration) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t = \frac{1250}{I^2} \quad (3.1)$$

โดยที่

t = ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)

$I = \frac{I_{sc}}{I_R}$ = กระแสลัดวงจรสมมาตรซึ่งเป็นค่าทวิคูณของกระแสปกติ

หมายเหตุ

สมการที่ 3.1 ใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดไม่เกิน 500 kVA ส่วนหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นระยะเวลาในการลัดวงจรจะไม่เกิน 2 วินาที ตามค่ามาตรฐาน

3.1.2 การคำนวณกระแสลัดวงจร (Short circuit current calculation) สามารถแบ่งการคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1 กระแสสมมาตร (Symmetrical Current) สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC} = \frac{I_R}{Z_T + Z_S} \quad (3.2)$$

โดยที่

- I_R = กระแสที่พิกัด(A)
 Z_T = อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็นค่าเปอร์ยูนิต
 Z_S = อิมพีแดนซ์ของระบบเป็นค่าเปอร์ยูนิต

หมายเหตุ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการลัดวงจรที่ขั้วของหม้อแปลงโดยไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ (กระแสลัดวงจรมีค่าสูงสุด)

3.1.2.2 กระแสไม่สมมาตร (Asymmetrical current) สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC(pkasym)} = KI_{SC} \quad (3.3)$$

โดยที่

$$K = \left[1 + \left(e^{-(\phi + \pi/2)r/x} \right) \sin \phi \right] \sqrt{2} \quad (3.4)$$

และ

- e = base of nature logarithm
 ϕ = $\arctan x/r$, in radian
 x/r = อัตราส่วนของผลของกระแสลัดต่อค่ารีแอคแตนซ์และค่าความต้านทาน

3.1.3 การคำนวณอุณหภูมิของขดลวดขณะลัดวงจร อุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะทำการลัดวงจรสิ้นสุด (T_f) สามารถหาได้จากสมการ

$$T_f = (T_k + T_s) \cdot m(1 + E + 0.6m) + T_s \quad (3.5)$$

โดยที่

$$m = \frac{(W_s)t}{C(T_k + T_s)}$$

สมการนี้จะเป็นสูตรโดยประมาณที่ใช้ในกรณีที่ค่า $m = 0.6$ และน้อยกว่า สำหรับค่า m ที่มีค่ามากกว่า 0.6 ค่า T_f สามารถหาได้จากสมการ

$$T_f = (T_k + T_s) \left[\sqrt{e^{2m} + E(e^{2m} - 1)} - 1 \right] + T_s \quad (3.6)$$

โดยที่

- t = ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)
 T_k = 234.5 สำหรับทองแดง
= 225 สำหรับอลูมิเนียม
 T_s = อุณหภูมิขณะเริ่มต้น($^{\circ}\text{C}$) โดยจะมีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) ค่าอุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temp.) 30 °C บวกกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดบวกกับอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่ยอมให้(จาก spec.ของโรงงาน) หรือ

(2) ค่าอุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temp.) 30 °C บวกกับค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่เพิ่มขึ้นของขดลวดตามข้อกำหนด (specification) ของหม้อแปลงแต่ละชนิด

e = base of natural logarithm ≈ 2.718

$$E = E_r \left[\frac{T_k + T_r}{T_k + T_s} \right]^2$$

E_r = per-unit eddy current loss ที่อุณหภูมิอ้างอิง

T_r = อุณหภูมิอ้างอิง

= อุณหภูมิแวดล้อม 20°C บวกกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่พิกัด

W_s = Short-Circuit resistance loss ของขดลวดที่อุณหภูมิเริ่มต้น ; วัตต์/ปอนด์ ของวัสดุตัวนำ

$$W_s = \frac{W_r N^2}{M} \times \left(\frac{T_k + T_s}{T_k + T_r} \right)$$

W_r = resistance loss ของขดลวดที่พิกัดกระแสและอุณหภูมิอ้างอิง ; วัตต์

N = ขนาดของกระแสลัดวงจรสมมาตร; แอมป์

M = น้ำหนักของขดลวดตัวนำ ; ปอนด์

C = ค่าความจุความร้อนเฉลี่ยต่อปอนด์ของวัสดุตัวนำสามารถหาได้จากสมการ

$$C = 174 + 0.0225(T_s + T_r) + 110(A_i/A_c) \text{ สำหรับทองแดง}$$

$$C = 405 + 0.1(T_s + T_r) + 360(A_i/A_c) \text{ สำหรับอลูมิเนียม}$$

A_i = พื้นที่หน้าตัดของฉนวน

A_c = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

3.2 ขั้นตอนการคำนวณตามมาตรฐาน IEC (IEC 76-5)

3.2.1 การคำนวณกระแสลัดวงจรสมมาตรของหม้อแปลง 3 เฟส สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I = \frac{U}{Z_i + Z_s} \quad (3.7)$$

เมื่อ I คือ กระแสลัดวงจร (kA)

U คือ แรงดันไฟฟ้า (kV)

Z_s คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ

Z_i คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้คิดที่สภาวะการลัดวงจรเกิดขึ้นสูงสุด คือ ลัดวงจรที่ขั้วของหม้อแปลง เพราะฉะนั้นจึงตัดค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบออก ทำให้สามารถคำนวณกระแสลัดวงจรได้จากสมการ

$$I = \frac{U}{Z_i} \quad (3.8)$$

3.2.2 การคำนวณอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Z_i = \frac{u_z U_N^2}{100 \cdot S_N} \quad (3.9)$$

เมื่อ u_z คือ อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่พิกัดกระแสและอุณหภูมิอ้างอิง
 U_N คือ แรงดันที่พิกัดของหม้อแปลง (kV)
 S_N คือ พิกัดของหม้อแปลง (kVA)

3.2.3 การคำนวณอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำหลังจากการลัดวงจร สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{\frac{101000}{J^2 t} - 1} \quad (\text{สำหรับทองแดง}) \quad (3.10)$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 225)}{\frac{43600}{J^2 t} - 1} \quad (\text{สำหรับอลูมิเนียม}) \quad (3.11)$$

เมื่อ θ_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)
 J คือ ความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (A/mm²)
 t คือ เวลาในการลัดวงจร (วินาที)

ความดันภายในตัวถังของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดฉนวน

จากบทที่ 3 เป็นที่ทราบกันแล้วว่าการเกิดการฉนวนของหม้อแปลงนั้นทำให้เกิดความร้อนขึ้นจำนวนมากเนื่องจากกระแสฉนวน และอาจทำให้เกิดความเสียหายกับหม้อแปลงได้ นอกจากปรากฏการณ์ดังกล่าวแล้วถ้าการฉนวนเกิดขึ้นภายในถังของหม้อแปลง จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ขึ้นอีกอย่างหนึ่งคือ ความดันของน้ำมันและอากาศเหนือน้ำมันของหม้อแปลงที่เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้อาจส่งผลให้หม้อแปลงเกิดการระเบิดได้ ในการพิจารณาความดันที่เกิดขึ้นนั้นจะแยกการพิจารณาตามลักษณะรูปร่างของถังหม้อแปลง 2 แบบคือ หม้อแปลงที่ถังมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (แบบ Overhead) และหม้อแปลงที่ถังมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมและผนังแบน (แบบ Pad mounted) จากลักษณะของถังของหม้อแปลงที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้ เมื่อเกิดการฉนวนขึ้นภายในถังของหม้อแปลงแล้ว หม้อแปลงที่มีลักษณะถังเป็นผนังแบนจะสามารถทนแรงดันได้ดีกว่าหม้อแปลงที่มีลักษณะถังเป็นทรงกระบอกคือ หม้อแปลงที่มีถังเป็นสี่เหลี่ยมและผนังแบนนั้นผนังเพียงแต่เสียรูปไปเท่านั้น อีกทั้งในการผลิตหม้อแปลงในปัจจุบันหม้อแปลงที่ใช้ถังเป็นแบบสี่เหลี่ยมผนังแบนจะเป็นหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่และมีการติดตั้งลิ้นปลดปล่อยความดัน(Relief valve)จึงทำให้โอกาสที่หม้อแปลงจะเกิดการระเบิดเป็นไปได้ยาก

ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความดันที่เกิดขึ้นในถังของหม้อแปลงเฉพาะในส่วนถังของหม้อแปลงที่มีถังเป็นทรงกระบอกหรือวงรีเท่านั้นเพราะหม้อแปลงที่ใช้ถังแบบนี้มีโอกาสเกิดการระเบิดขึ้นได้ถ้าเกิดการฉนวนภายในถังอย่างรุนแรง

4.1 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังของหม้อแปลงที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเมื่อเกิดการฉนวนภายในถัง

เมื่อเกิดการฉนวนขึ้นภายในถังของหม้อแปลง จะทำให้น้ำมันของหม้อแปลงเกิดปรากฏการณ์ขึ้น 4 แบบ ดังนี้

4.1.1 กระแทก (impact) เกิดจากตำแหน่งที่ฉนวนอยู่ลึกประมาณกึ่งกลางถังจากระดับผิวน้ำมันของหม้อแปลง การฉนวนที่ตำแหน่งนี้จะทำให้น้ำมันถูกดันโค้งขึ้น ถ้าหากเกิดการฉนวนที่รุนแรงมากอาจทำให้น้ำมันถูกดันขึ้นไปกระทบฝาถังทำให้ฝาถังหม้อแปลงหลุดกระเด็นออกได้ ดังภาพ 4.1 (ก)

4.1.2 เริ่มก่อ (incipient) เกิดจากตำแหน่งที่ฉนวนอยู่ลึกประมาณกึ่งกลางถังจากระดับผิวน้ำมันหม้อแปลงเช่นเดียวกับข้อ 1.1 แต่เกิดจากกระแสฉนวนที่มีค่าไม่สูงมากนักและระยะเวลา

เวลาที่เกิดเป็นระยะเวลานาน ซึ่งน้ำมันหม้อแปลงแทบจะไม่มีการเคลื่อนไหว แต่จะเกิดฟองก๊าซเล็กๆลอยขึ้นเรื่อยๆจนเต็มถัง ในที่สุดน้ำมันหม้อแปลงจะเดือดและเกิดฟองก๊าซจำนวนมากจนเต็มถัง ทำให้ความดันภายในถังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเกิดการระเบิดขึ้น

ขึ้นเนื่องจากการอาร์คและมีผลทำให้อากาศเหนือน้ำมันของหม้อแปลงมีปริมาตรมากขึ้นทำให้ความดันสูงขึ้นแต่ก็ยังมีความน้อยกว่าการลัดวงจรตามข้อ 1.1 แสดงดังภาพ 4.1 (ข)

4.1.3 ลูกสูบ (Piston) เกิดจากตำแหน่งลัดวงจรอยู่ลึกลงไปจากผิวน้ำมันหม้อแปลงใกล้บริเวณก้นถัง การลัดวงจรที่ตำแหน่งนี้จะทำให้เกิดความดันมากที่สุดและรุนแรงที่สุดซึ่งเป็นผลทำให้ผิวน้ำมันเคลื่อนไหวขึ้นลงเหมือนลูกสูบและรุนแรงกว่าในกรณีข้อ 1.1 (กรณีข้อ 1.1 ผิวน้ำมันเพียงแต่ถูกดันไต่ขึ้นไปเท่านั้น) แสดงดังภาพ 4.1 (ค)

4.1.4 ผิวแตก (Surface break thrown) เกิดจากตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรอยู่ใกล้ผิวของน้ำมันหม้อแปลง การเกิดลัดวงจรที่ตำแหน่งนี้จะทำให้เกิดความดันจากการลัดวงจรรุนแรงน้อยที่สุดเป็นผลทำให้ผิวของน้ำมันหม้อแปลงแตกขึ้นไปในอากาศเฉพาะตรงจุดที่ลัดวงจรเท่านั้น แสดงดังภาพ 4.1 (ง)

4.2 การคำนวณความดันของหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรภายในถัง

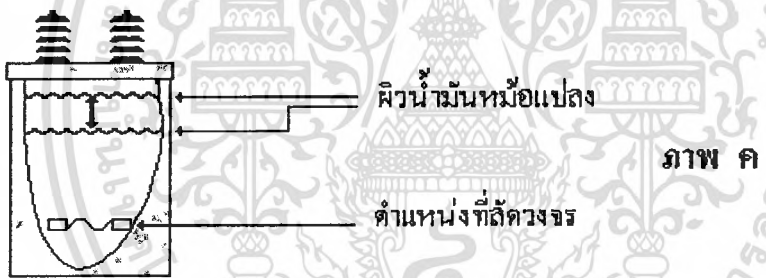
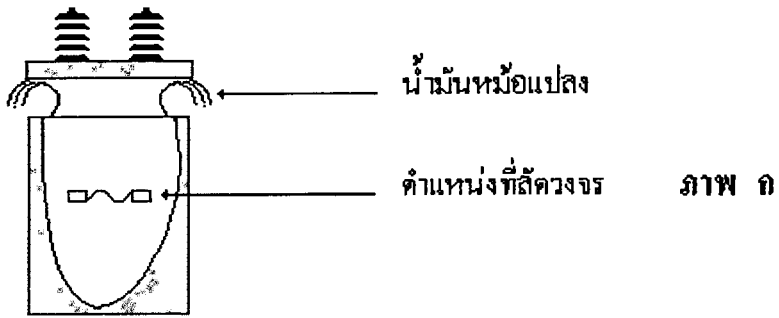
ความดันทางกลที่เกิดขึ้นภายในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรขึ้นภายในถังนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือความดันของน้ำมันหม้อแปลงและความดันของอากาศเหนือน้ำมันหม้อแปลง ในการผลิตหม้อแปลงโดยส่วนมากแล้วจะใช้ถังเป็นรูปทรงกระบอกหรือรูปวงรีกับหม้อแปลง 1 เฟส ที่มีขนาดเล็กและหม้อแปลงแบบนี้จะไม่มีการติดตั้งถังน้ำมันสำรอง (Conservator tank) เพราะฉะนั้นเมื่อเติมน้ำมันลงในถังจะทำให้เหลือช่องว่างของอากาศด้านบนเหนือน้ำมันหม้อแปลงจำนวนหนึ่งจึงจำเป็นต้องคำนวณความดันของอากาศในส่วนนี้ด้วย

การคำนวณความดันทางกลของน้ำมันและของอากาศเหนือน้ำมันนั้นแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 กรณี คือ

4.2.1 กรณีที่เกิดการลัดวงจรในแนวระดับ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_{oil} = 1.643 \left[\frac{H}{A} \times L \times kWS \right]^{\frac{1}{2}} - 0.046 \left[\frac{H}{A} \times L \times kWS \right]^{\frac{1}{2}} (r)^{0.98} \quad (4.1)$$

$$P_{air} = 0.122 \left[1 + 122.83 \frac{P_{oil}}{Vol_{air}} \right] \quad (4.2)$$



ภาพที่ 4.1 ลักษณะของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงแบบทรงกระบอกเมื่อเกิดการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กรณีที่เกิดลัดวงจรในแนวดิ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_{oil} = 1.480 \left[\frac{H}{A} \times L \times kWS \right]^{\frac{1}{2}} - 0.043 \left[\frac{H}{A} \times L \times kWS \right]^{\frac{1}{2}} (r)^{0.98} \quad (4.3)$$

$$P_{air} = 0.105 \left[1 + 105.280 \frac{[P_{oil}]^2}{Vol_{air}} \right] \quad (4.4)$$

โดยที่

P_{oil} และ P_{air}	คือ ความดันของน้ำมันและความดันของอากาศเหนือน้ำมัน
H	คือ ความลึกจากผิวน้ำมันถึงตำแหน่งที่ลัดวงจร
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของหม้อแปลง
L	คือ ความยาวของอาร์ค
Vol_{air}	คือ ปริมาตรของอากาศเหนือน้ำมัน
kWS	คือ พลังงานลัดวงจร

บทที่ 5

การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิและความดันของหม้อแปลงจำหน่าย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิและความดันของหม้อแปลงจำหน่าย โดยใช้โปรแกรม Delphi ของบริษัท Boland เป็นเครื่องมือในการสร้างและตั้งชื่อซอฟต์แวร์นี้ว่า “ซอฟต์แวร์วิเคราะห์อุณหภูมิและความดันของหม้อแปลง” (Transformer Temperature and Pressure Analysis Software) โดยเรียกย่อๆว่า TTPA

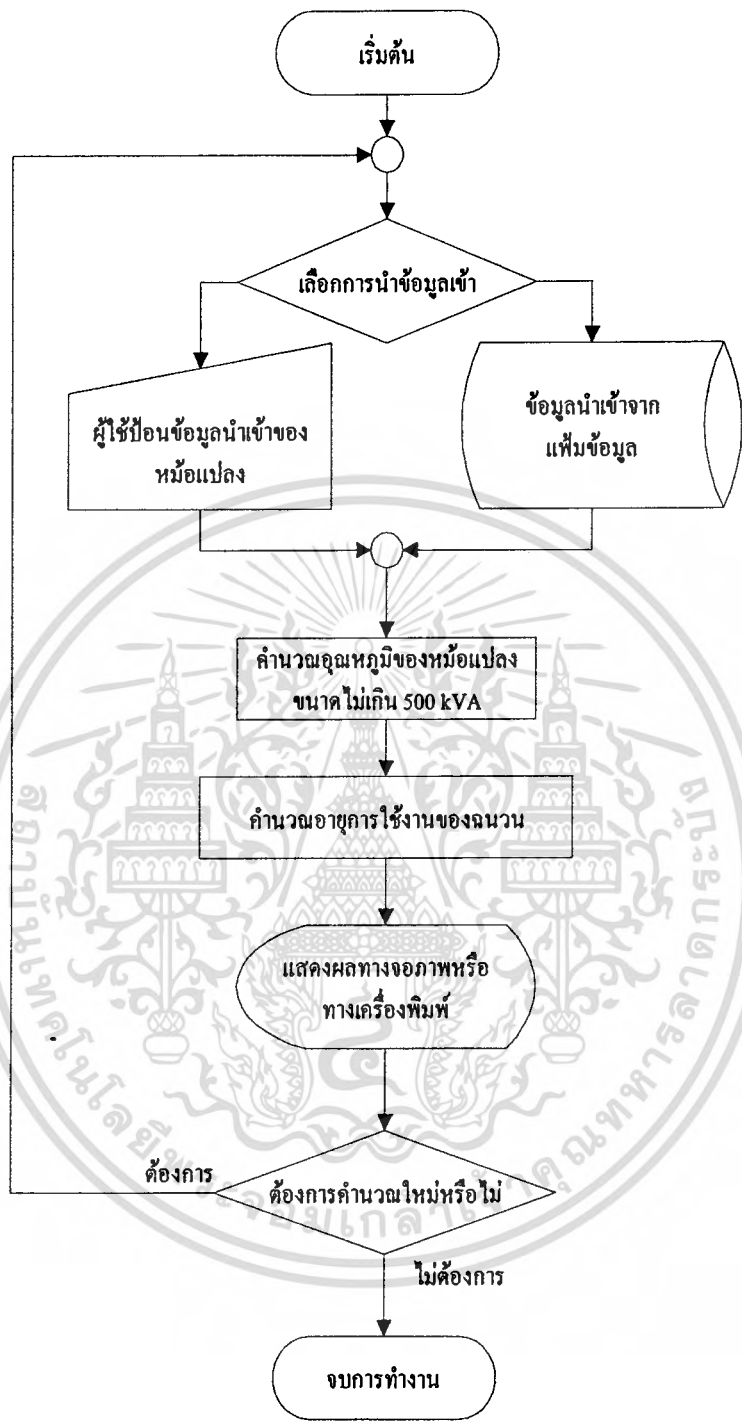
ในการออกแบบ TTPA นั้นได้ทำการแบ่งการทำงานของซอฟต์แวร์เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การคำนวณอุณหภูมิ ได้แก่

- การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE
- การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE
- การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC
- การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE
- การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

และส่วนที่ 2 การคำนวณความดันภายในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรภายในถัง

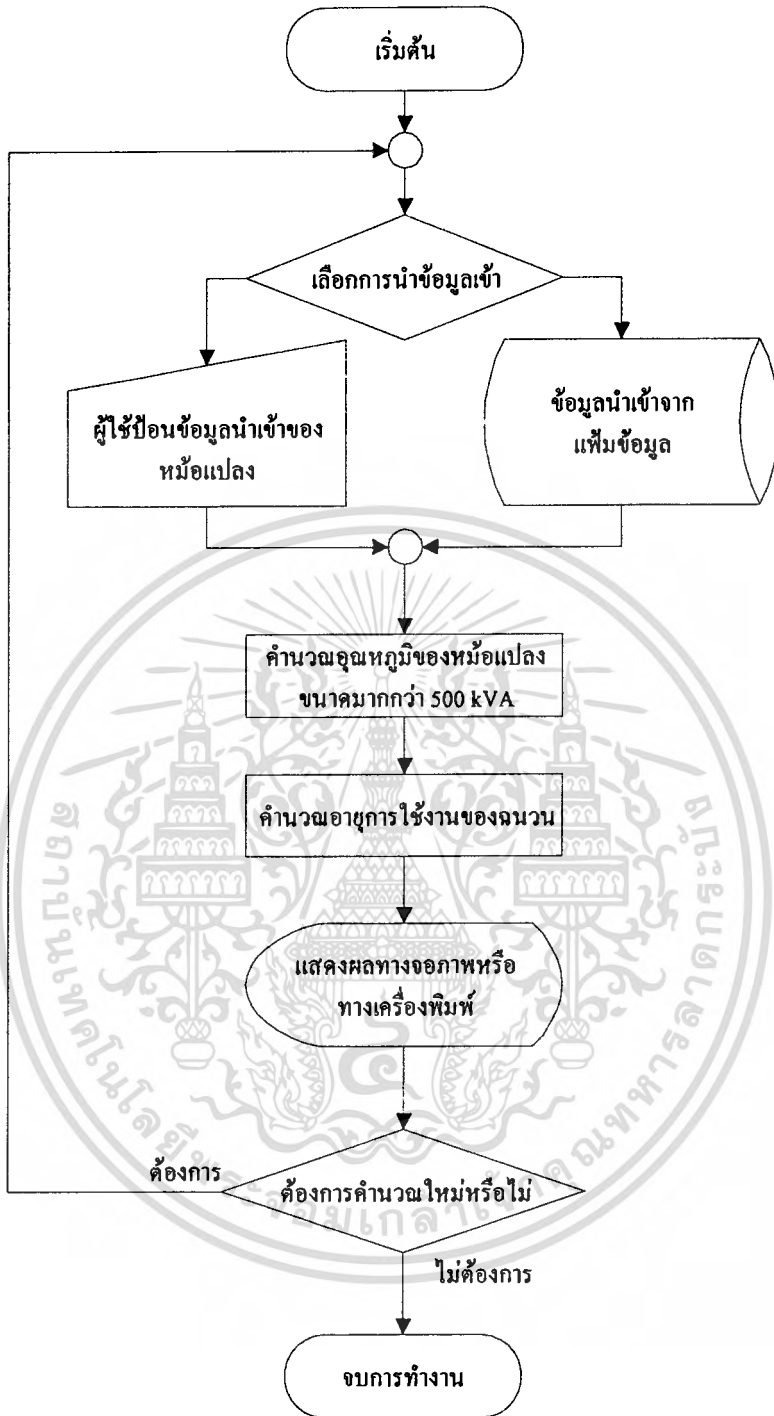
5.1 ซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE

ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิสูงสุดของหม้อแปลงขณะใช้งาน, อุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันและอายุการใช้งานของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพในรูปของกราฟและตาราง ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสามารถเลือกนำเข้าได้ 2 วิธี วิธีแรกคือการป้อนข้อมูลของหม้อแปลงเข้าโดยตรงทางแป้นพิมพ์ วิธีที่สองคือการเลือกข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามขนาดของหม้อแปลงคือ ซอฟต์แวร์ที่ใช้กับหม้อแปลงขนาดไม่เกิน 500 kVA และซอฟต์แวร์ที่ใช้กับหม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์แสดงดังภาพ 5.1 และ 5.2



ภาพที่ 5.1 ผังงานของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดไม่เกิน 500 kVA ขณะจ่าย
โหลดตามมาตรฐาน IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

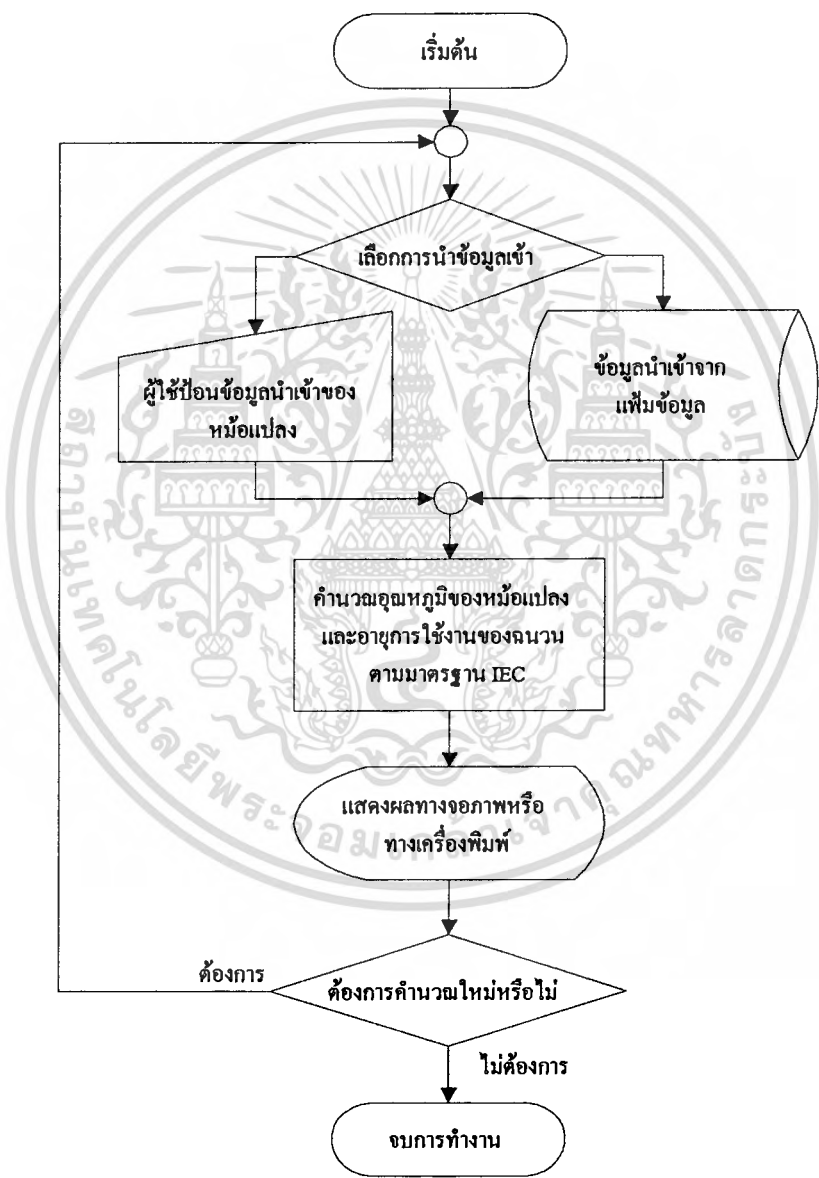


ภาพที่ 5.2 ฟังก์ชันของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงมากกว่า 500 kVA ขณะจ่าย
โหลดตามมาตรฐาน IEEE

5.2 ซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายโหลดตามมาตรฐาน

IEC

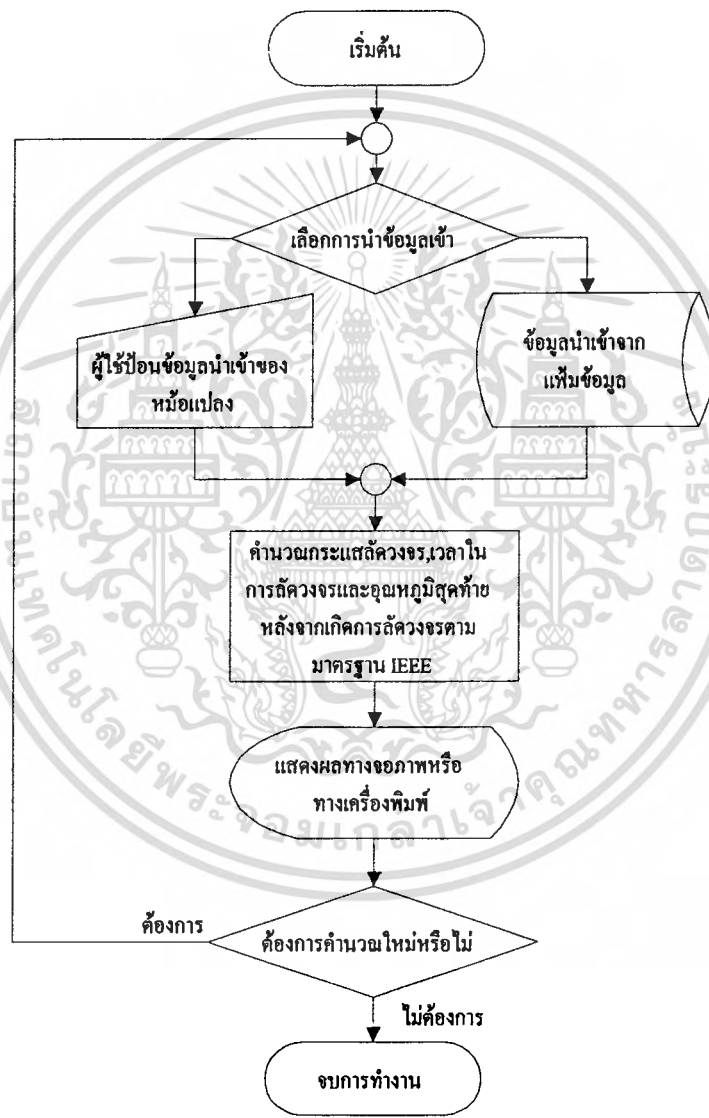
ทำการออกแบบซอฟต์แวร์เพื่อใช้คำนวณหาอุณหภูมิสูงสุดของหม้อแปลงขณะใช้งาน, อุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันและอายุการใช้งานของฉนวนตามมาตรฐาน IEC โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพในรูปของกราฟของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเวลา 24 ชั่วโมง และตารางแสดงผลการคำนวณข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสามารถเลือกนำเข้าได้ 2 วิธีเช่นเดียวกับข้อ 1 ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์แสดงดังภาพ 5.3



ภาพที่ 5.3 ฟังก์ชันของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

5.3 ซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

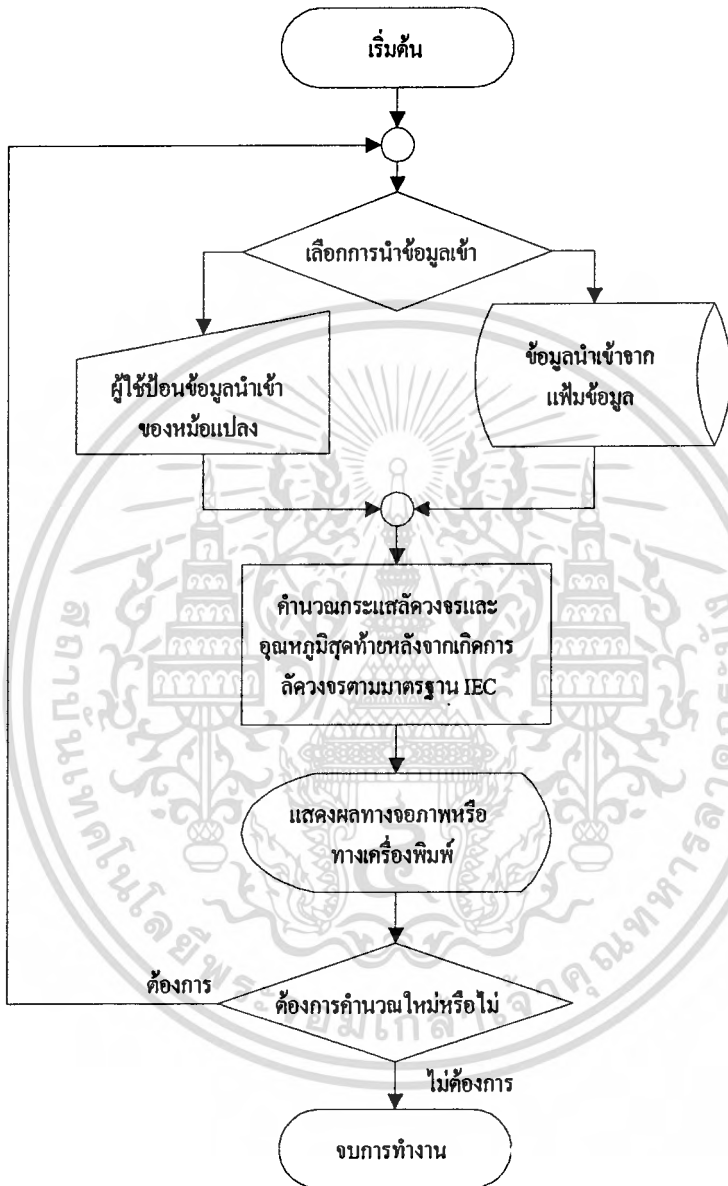
คือซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้นเพื่อคำนวณหาอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรและอุณหภูมิสุดท้ายหลังจากเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลง, กระแสลัดวงจรและระยะเวลาที่เกิดการลัดวงจร โดยทำการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE โดยกำหนดให้ใช้งานกับหม้อแปลงจำหน่ายที่มีการต่อขดลวดทางด้านแรงต่ำแบบสตาร์ (Y) ผลที่ได้จะแสดงในรูปของกราฟอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่เกิดการลัดวงจรและตารางแสดงผลการคำนวณ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสามารถเลือกนำเข้าได้ 2 วิธีเช่นเดียวกับข้อ 1 ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์แสดงดังภาพ 5.4



ภาพที่ 5.4 ผังงานของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

5.4 ซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

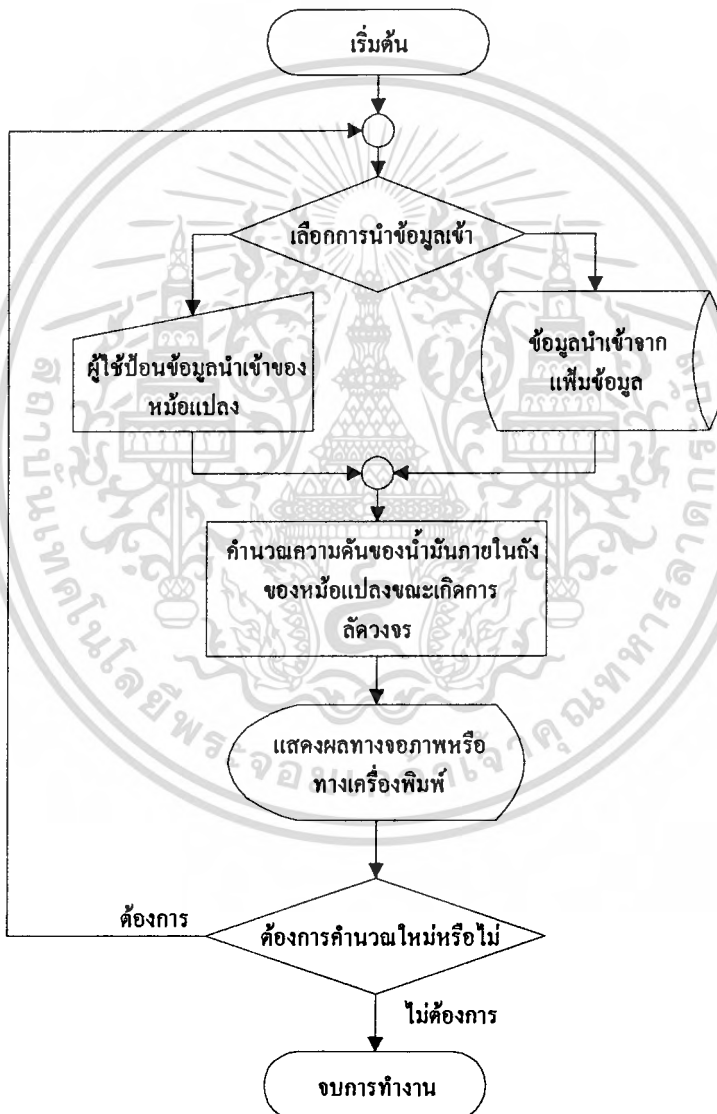
รูปแบบของซอฟต์แวร์และการทำงานมีลักษณะเดียวกับข้อ 3 แต่ใช้สมการในการคำนวณตามมาตรฐาน IEC ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์แสดงดังภาพ 5.5



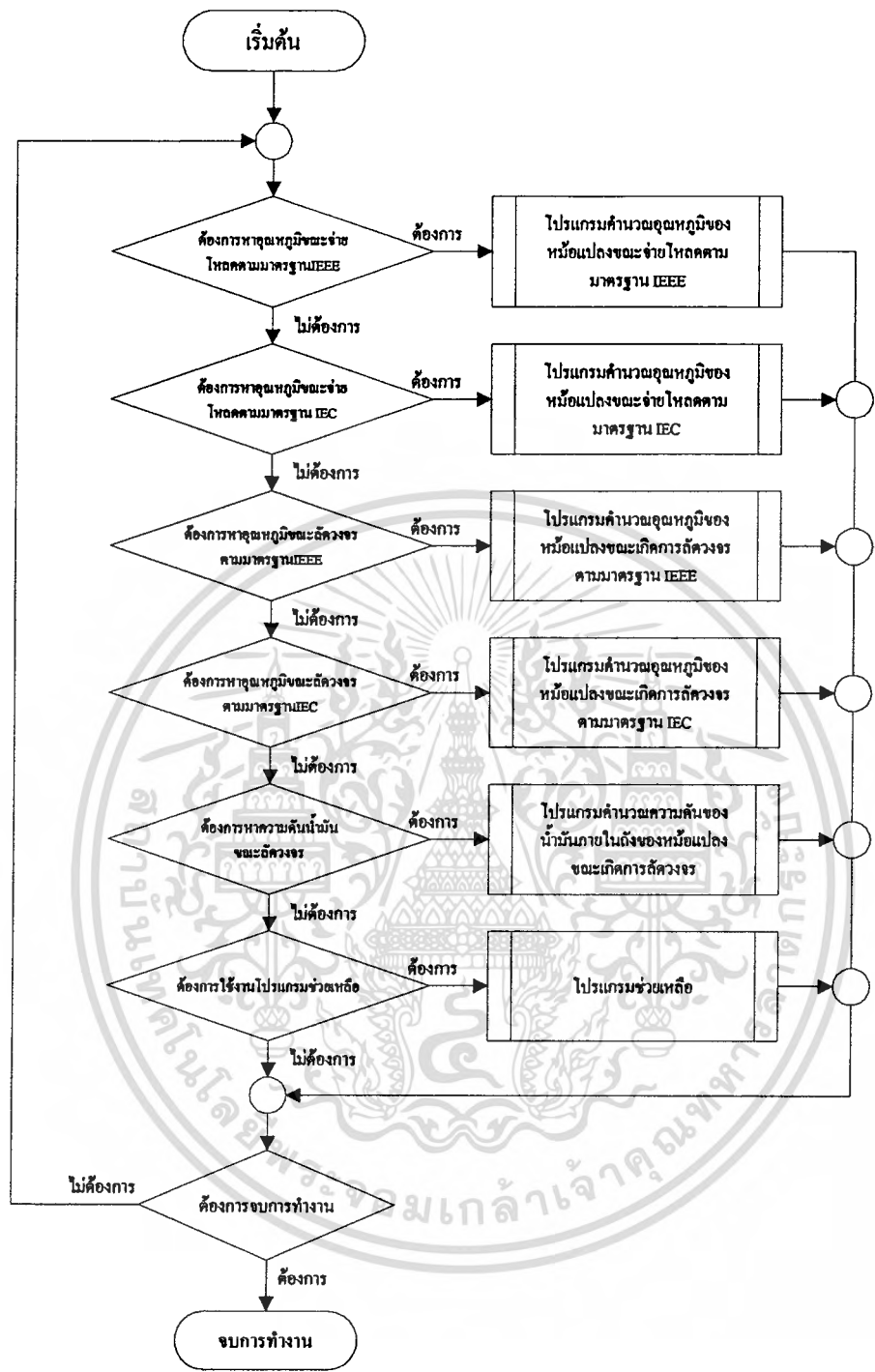
ภาพที่ 5.5 ฟังก์ชันของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

5.5 ซอฟต์แวร์คำนวณความดันภายในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

เป็นซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณหาความดันของน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อนของหม้อแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจร โดยมีข้อมูลนำเข้าเป็นขนาดของหม้อแปลง, แรงดันทางด้านทุติยภูมิ, อิมพีแดนซ์, พื้นที่หน้าตัดของถัง, ความลึกของตำแหน่งลัดวงจร, ระยะจากจุดลัดวงจรถึงแนวกลางถัง, ความยาวของอาร์คและเวลาในการลัดวงจรของฟิวส์ ผลที่ได้จะแสดงในรูปกราฟของความดันเปรียบเทียบกับเวลาในการลัดวงจรและตารางแสดงผลการคำนวณ ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์แสดงดังภาพที่ 5.6



ภาพที่ 5.6 ฟังก์ชันของซอฟต์แวร์คำนวณความดันภายในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร



ภาพที่ 5.7 ฟังงานแสดงการทำงานทั้งหมดของ TTPA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วิธีการใช้งานซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิและความดัน ของหม้อแปลงจำหน่าย

6.1 ข้อจำกัดของการใช้งาน

ซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิและความดันของหม้อแปลงจำหน่าย (Transformer Temperature and Pressure Analysis Software) หรือ TTPA เป็นชื่อของซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ Delphi และมีคุณสมบัติของซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows ตามที่อธิบายในบทที่ 5 ข้อจำกัดในการใช้งานมีดังนี้

6.1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ต้องมีชิป Pentium ขึ้นไป

6.1.2 หน่วยความจำหลัก 4 MB ขึ้นไป

6.1.3 จอภาพแบบ Super VGA ขึ้นไป

6.1.4 เมาส์ (Mouse)

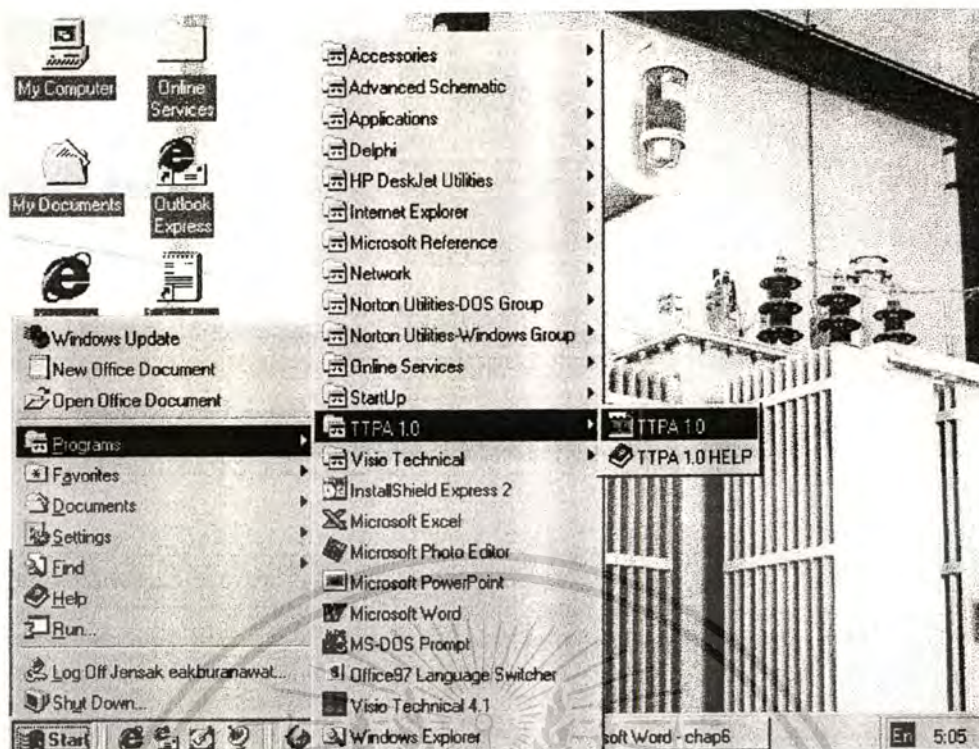
6.1.5 ติดตั้ง Microsoft Windows 95 ขึ้นไป

6.1.6 ผู้ใช้ต้องมีพื้นฐานการใช้งานซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows

6.2 การเริ่มต้นและจบการทำงานของ TTPA

การเริ่มการทำงานของ TTPA สามารถทำได้โดยการใช้เมาส์ดับเบิลคลิก (คลิกสองครั้งติดต่อกัน) ที่ไอคอนชื่อ "TTPA 1.0" ที่อยู่ในกลุ่มโปรแกรม TTPA 1.0 บนเมนูหลักของระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ดังภาพที่ 6.1

เมื่อ TTPA เริ่มทำงานจะปรากฏภาพบนจอ ดังภาพที่ 6.2 ซึ่งจะแสดงเมนูหลักของ TTPA ผู้ใช้สามารถที่จะเริ่มการใช้งานโดยการคลิกที่คำสั่งในเมนูหลักตามต้องการ โดยใช้เมาส์หรือโดยการพิมพ์อักษรตัวที่ถูกขีดเส้นใต้ในคำสั่งนั้น ส่วนการจบการทำงานนั้นสามารถทำได้โดยการเลือกที่คำสั่ง "จบการทำงาน" บนเมนูหลักของ TTPA



ภาพที่ 6.1 แสดงกลุ่มโปรแกรม "TPPA 1.0" และไอคอน "TPPA 1.0"



ภาพที่ 6.2 แสดง TPPA ขณะเริ่มทำงาน

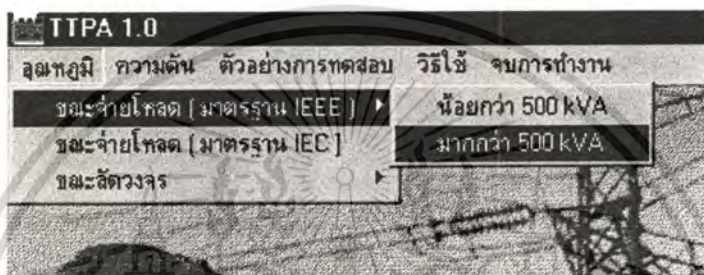
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 เมนูหลัก (Main Menu)

ในเมนูหลักของ TTPA ประกอบไปด้วยเมนูหลักทั้งหมด 5 รายการ ซึ่งจะมีเมนูย่อยและคำอธิบายดังต่อไปนี้

6.3.1 เมนู "อุณหภูมิ" เมนูนี้จะแบ่งออกเป็น 3 เมนูย่อย และสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

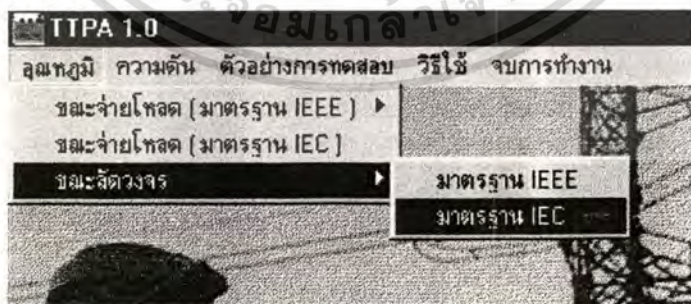
6.3.1.1 เมนูย่อย "ขณะจ่ายโหลด (ตามมาตรฐาน IEEE)" เริ่มต้นการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลดโดยสามารถเลือกการคำนวณได้ 2 แบบจากเมนูย่อยนี้ คือแบบน้อยกว่า 500 kVA และแบบมากกว่า 500 kVA แสดงดังภาพที่ 6.3



ภาพที่ 6.3 แสดงเมนู "อุณหภูมิ"

6.3.1.2 เมนูย่อย "ขณะจ่ายโหลด (ตามมาตรฐาน IEC)" เริ่มต้นการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

6.3.1.3 เมนูย่อย "ขณะลัดวงจร" เริ่มต้นการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจรโดยสามารถเลือกการคำนวณได้ 2 แบบจากเมนูย่อยนี้ คือการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE และการคำนวณตามมาตรฐาน IEC แสดงดังภาพที่ 6.4



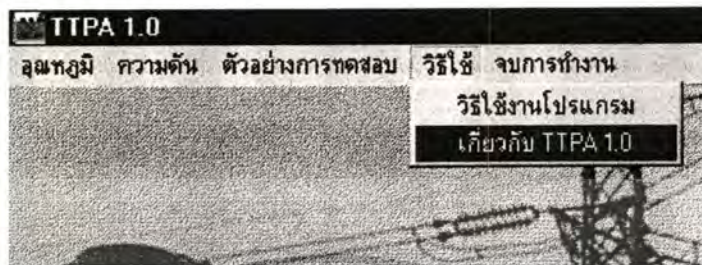
ภาพที่ 6.4 แสดงเมนูย่อย "ขณะลัดวงจร"

6.3.2 เมนู "ความดัน" ใช้เริ่มต้นการคำนวณความดันภายในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.3 เมนู "ตัวอย่างการทดสอบ" ใช้เริ่มแสดงภาพตัวอย่างการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงในทางอุตสาหกรรม

6.3.4 เมนู "วิธีใช้" เมนูนี้แบ่งออกเป็น 2 เมนูย่อย ดังแสดงในภาพ 6.5 และสามารถอธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 6.5 แสดงเมนู "วิธีใช้"

3.4.1 เมนูย่อย "วิธีการใช้งาน" แสดงคำอธิบายวิธีการใช้งาน TTPA

3.4.2 เมนูย่อย "เกี่ยวกับ TTPA" แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน TTPA

6.3.5 เมนู "จบการทำงาน" ใช้จบการทำงานของโปรแกรม

6.4 การรับข้อมูลและการเริ่มคำนวณ

การนำข้อมูลของหม้อแปลงเข้ามาวิเคราะห์โดย TTPA สามารถทำได้ 2 วิธี วิธีแรกคือผู้ใช้ป้อนข้อมูลเข้าทางอิดิตบ็อกซ์ (Edit Box) ที่อยู่ในฟอร์ม (Form) ที่ใช้ในการวิเคราะห์หรืออีกวิธีหนึ่งคือเลือกนำเข้าจากฐานข้อมูลที่มีอยู่แล้ว ฟอร์มการรับข้อมูลและการคำนวณของซอฟต์แวร์ TTPA ในเมนูต่างๆแสดงดังภาพที่ 6.6 - 6.9

หลังจากผู้ใช้ป้อนข้อมูลของหม้อแปลงลงในอิดิตบ็อกซ์เรียบร้อยแล้วสามารถเริ่มต้นทำการคำนวณได้โดยการคลิกที่ปุ่ม "ตกลง" ที่อยู่ด้านล่างของฟอร์ม ซอฟต์แวร์จะนำข้อมูลที่ผู้ใช้ป้อนเข้าไปนั้นไปทำการคำนวณและแสดงผลที่ได้ทันที และผู้ใช้สามารถลบข้อมูลที่อยู่ในอิดิตบ็อกซ์ ออกทั้งหมดเพื่อเริ่มต้นการคำนวณใหม่ได้โดยการคลิกที่ปุ่ม "ลบข้อมูล" ในด้านล่างของฟอร์มเช่นกัน

Less than 500 kVA

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE

X	Y	Z	Θ_{or}
Pr	K	R	Θ_{wr}
Θ_{gi}	t	T_{hs}	Θ_{oi}
Θ_a	$^{\circ}\text{C AT } 55^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C AT } 65^{\circ}\text{C}$	

$T_r =$
 $\Theta_{ou} =$
 $T_o =$
 $\Theta_{gr} =$
Hour of Life =

$\Theta_{gu} =$
 $\Theta_g =$
 $\Theta_o =$
 $\Theta_{hs} =$
% Loss of Life =

คำนวณ

ลบข้อมูล

ตาราง

รวมข้อมูล

กราฟ

ปิด

ภาพที่ 6.6 ฟอรั่มการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE

More than 500 kVA

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE

X	Y	Z	Θ_{or}
Pr	K	R	Θ_{wo}
t	Θ_i	Θ_a	
	$^{\circ}\text{C AT } 55^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C AT } 65^{\circ}\text{C}$	

$T_r =$
 $\Theta_u =$
 $T_o =$
 $\Theta_{gr} =$
Hours of life =

$\Theta_g =$
 $\Theta_o =$
 $\Theta_{hs} =$
% Loss of life =

คำนวณ

ลบข้อมูล

ตาราง

รวมข้อมูล

กราฟ

ปิด

ภาพที่ 6.7 ฟอรั่มการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEC Loading

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงภายใต้โหลดตามมาตรฐาน IEC

kVA ของหม้อแปลง Oil Temp. Exponent
 แรงดันเอาต์พุต Winding Temp. Exponent
 Top-Oil Temp. rise Ratio of load loss to no-load loss
 Hottest-spot to Top-oil Temp. rise Ambient Temp.

° 3 ๗๘ ° 1 ๗๘

Duration (h)	Load (A)		
		0.00	Top-oil Temperature
		0.00	Hottest-spot Temperature
		0.00	Relative ageing

ภาพที่ 6.8 φόρμαการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

Short Circuit Temperature

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงภายใต้กระแสเกินตามมาตรฐาน IEEE

kVA ของหม้อแปลง Average winding temp. rise
 แรงดันเอาต์พุต resistance loss
 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง น้ำหนักของลวดตัวนำ
 per-unit eddy current loss พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ [Ac]
 hottest-spot temp. พื้นที่หน้าตัดของฉนวน [Ai]
 อุณหภูมิแวดล้อม [°C] ° 3 ๗๘ ° 1 ๗๘

กระแสลัดวงจร [A]	เวลาในการลัดวงจร [sec]	อุณหภูมิสุดท้าย [°C]
00000.00	0.00	000.00

ภาพที่ 6.9 φόρμαการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEC_SCCT

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC

	kVA ของหม้อแปลง		อุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวด
	แรงดันเอาต์พุต		พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ [A.c]
	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง		

๔ 3 เฟส ๔ 1 เฟส

กระแสลัดวงจร [kA]	อุณหภูมิสุดท้าย [°C]
000.00	000.00

คำนวณ ลบข้อมูล ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 6.10 โปรแกรมรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC

Short Circuit Pressure

การคำนวณความดันของน้ำมันและอากาศในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

	kVA ของหม้อแปลง		ความลึกจากคาน้ำมันถึงตำแหน่งลัดวงจร
	แรงดันเอาต์พุต (๖)		ระยะจากจุดลัดวงจรถึงแนวกลางถัง
	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง		ความยาวอาร์ค
	พื้นที่หน้าตัดของตัวถังหม้อแปลง		เวลาในการลัดวงจรของฟิวส์ (ms)

ความดันของน้ำมัน (P๑)

ลักษณะการลัดวงจร

๔ ลัดวงจรแนวระหัด

๔ ลัดวงจรแนวตั้ง

0.00

แสดง ลบข้อมูล ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 6.11 โปรแกรมรับข้อมูลของซอฟต์แวร์คำนวณความดันภายในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 การใช้งาน, การแก้ไขและการบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูล

TTPA มีฐานข้อมูลซึ่งเก็บรวบรวมไฟล์ข้อมูลต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิและความดันภายในถังของหม้อแปลงซึ่งผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูลมาใช้ในการคำนวณได้โดยอาศัยฟอร์มดาตาเบสวิวเวอร์ (Database Viewer) เป็นตัวดำเนินการ ผู้ใช้งานสามารถเรียกใช้งานดาตาเบสวิวเวอร์ได้ด้วยการคลิกที่ปุ่ม "ฐานข้อมูล" ที่อยู่ด้านล่างของแต่ละฟอร์ม



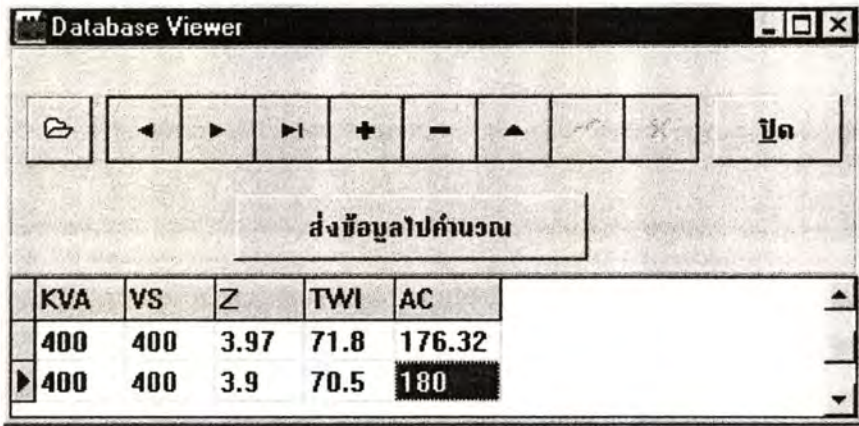
ภาพที่ 6.12 แสดงฟอร์มดาตาเบสวิวเวอร์

6.5.1 การใช้งานดาตาเบสวิวเวอร์

6.5.1.1 ปุ่ม "  " ใช้สำหรับเปิดไฟล์ฐานข้อมูลเมื่อคลิกเมาส์ที่ปุ่มนี้จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์ (Dialog Box) ชื่อ Open Database File บนจอภาพผู้ใช้งานสามารถดำเนินการค้นหาและเลือกใช้ไฟล์ฐานข้อมูลที่ต้องการได้จากไดอะล็อกบ็อกซ์นี้ และคลิกที่ปุ่ม "OK" เมื่อต้องการเปิดไฟล์ที่เลือกนั้น ภาพที่ 6.13 แสดงดาตาเบสวิวเวอร์ที่มีไฟล์ข้อมูลเปิดอยู่

6.5.1.2 ปุ่มดาตาเบสเนวิเกเตอร์ (Database Navigator) ใช้สำหรับจัดการกับข้อมูลที่อยู่ในไฟล์ข้อมูลโดยสามารถดำเนินการกับข้อมูลในแต่ละฟิลด์ (field) ได้ดังนี้

- ปุ่ม " ◀ " คือ ไปที่เรคคอร์ดที่แล้ว
- ปุ่ม " ▶ " คือ ไปที่เรคคอร์ดต่อไป
- ปุ่ม " ►► " คือ ไปที่เรคคอร์ดสุดท้าย
- ปุ่ม " + " คือ แทรกเรคคอร์ดใหม่
- ปุ่ม " - " คือ ลบเรคคอร์ด
- ปุ่ม " ▲ " คือ แก้ไขเรคคอร์ด
- ปุ่ม " ✓ " คือ ยืนยันการแก้ไข
- ปุ่ม " ✕ " คือ ยกเลิกการแก้ไข



KVA	VS	Z	TWI	AC
400	400	3.97	71.8	176.32
400	400	3.9	70.5	180

ภาพที่ 6.13 แสดงฟอร์มดาตาเบสวิวเวอร์ที่มีข้อมูลเปิดอยู่

6.5.1.3 ปุ่ม " ส่งข้อมูลไปคำนวณ "

ใช้สำหรับส่งข้อมูลจากฟอร์ม

ดาตาเบสวิวเวอร์กลับไปยังฟอร์มที่ใช้ในการคำนวณ

6.5.1.4 ปุ่ม " ปิด "

ใช้จบการทำงานของดาตาเบสวิวเวอร์

6.6 การแสดงผลของซอฟต์แวร์ TTPA

TTPA แบ่งการแสดงผลออกเป็น 2 ลักษณะคือ การแสดงผลในรูปแบบของตารางผลการคำนวณและการแสดงผลในรูปแบบของกราฟ ผู้ใช้สามารถดูผลของซอฟต์แวร์ได้ทั้งสองแบบโดยเลือกคลิกที่ปุ่มที่ต้องการในด้านล่างของฟอร์มที่ใช้ทำการคำนวณลักษณะการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้

6.6.1 ปุ่ม " ตาราง " ใช้แสดงผลที่คำนวณได้ในรูปแบบของตารางผลการคำนวณเทียบกับเวลาและแสดงข้อมูลต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังภาพ 6.14

6.6.2 ปุ่ม " กราฟ " ใช้แสดงผลที่คำนวณได้ในรูปแบบของกราฟ โดยด้านบนของกราฟมีกลุ่มของไอคอน (icon) ซึ่งใช้สำหรับควบคุมการแสดงผลของกราฟ แสดงดังภาพ 6.15

6.7 ซอฟต์แวร์แสดงภาพตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลง

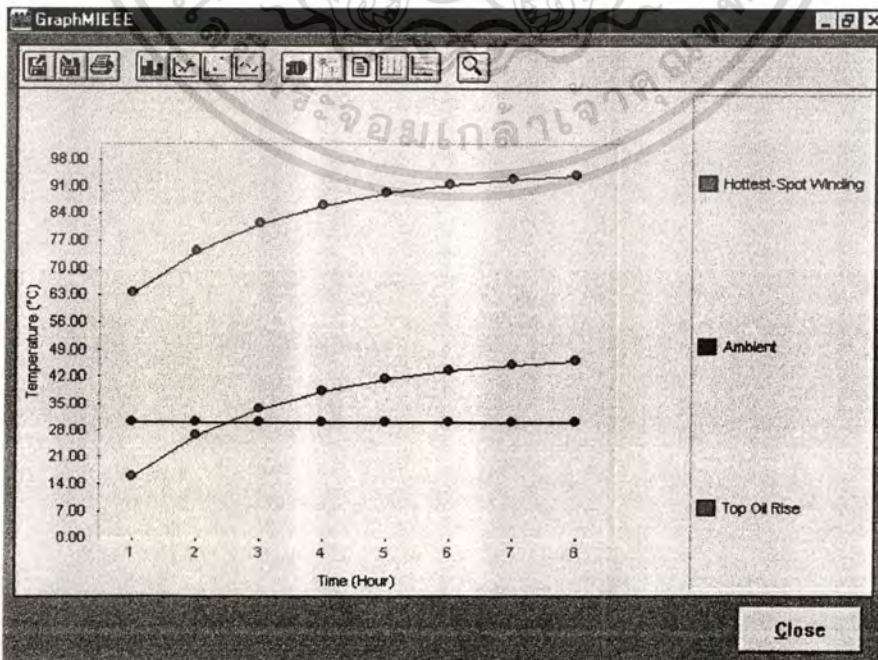
ใน TTPA มีส่วนของการแสดงภาพตัวอย่างขั้นตอนการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงจริงๆ ในทางอุตสาหกรรมรวมอยู่ด้วย โดยสามารถเรียกใช้งานได้จากการคลิกที่เมนู " ตัวอย่างการทดสอบ " ที่แสดงในเมนูหลัก แสดงดังภาพที่ 6.16

6.8 โปรแกรมช่วยเหลือ

ผู้ใช้งานสามารถเรียกใช้งานโปรแกรมช่วยเหลือ (Help Program) ของ TTPA ได้โดยการคลิกที่เมนู "วิธีใช้" ที่แสดงในเมนูหลัก โปรแกรมช่วยเหลือนี้จะอธิบายวิธีการใช้งาน TTPA และขั้นตอนการทำงานต่างๆ เพื่อช่วยแก้ปัญหาในเรื่องของการใช้งานให้กับผู้ใช้ซอฟต์แวร์

ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA ขณะ รำมโหลด			ข้อมูลของหม้อแปลง	
ตารางแสดงผลการคำนวณ			ข้อมูลของหม้อแปลง	
Hour	Hottest-spot temp.	Top oil rise	น้ำหนักของหม้อแปลงและขดลวด (lb)	3071.2
1	63.56	15.8	น้ำหนักตัวถังและขดลวด (lb)	1830.4
2	74.17	26.41	จำนวนน้ำมัน (gallon)	178.9
3	81.28	33.52	อุณหภูมิขั้วน้ำมันด้านบน (°C)	48.0
4	86.04	38.28	ค่าสูญเสียรวมทั้งหมด (w)	12257.0
5	89.24	41.48	ฉนวนที่แผ่นป้าย (pn.)	1.0
6	91.39	43.63	Load loss / No load loss	6.415
7	92.83	45.07	อุณหภูมิผิวของขดลวด (°C)	7.76
8	93.79	46.03	ช่วงเวลาที่เกิดโหลด (h)	8.0
			อุณหภูมิน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (°C)	0.0
			ค่าเวลาที่ทราบรอบของตัวนำขึ้นลงที่ (h)	2.5039
			ค่าเวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง	2.5039
			อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30.0
			อายุการใช้งานโดยประมาณ (ปี)	8.57

ภาพที่ 6.14 โปรแกรมแสดงผลการคำนวณในรูปแบบของตาราง

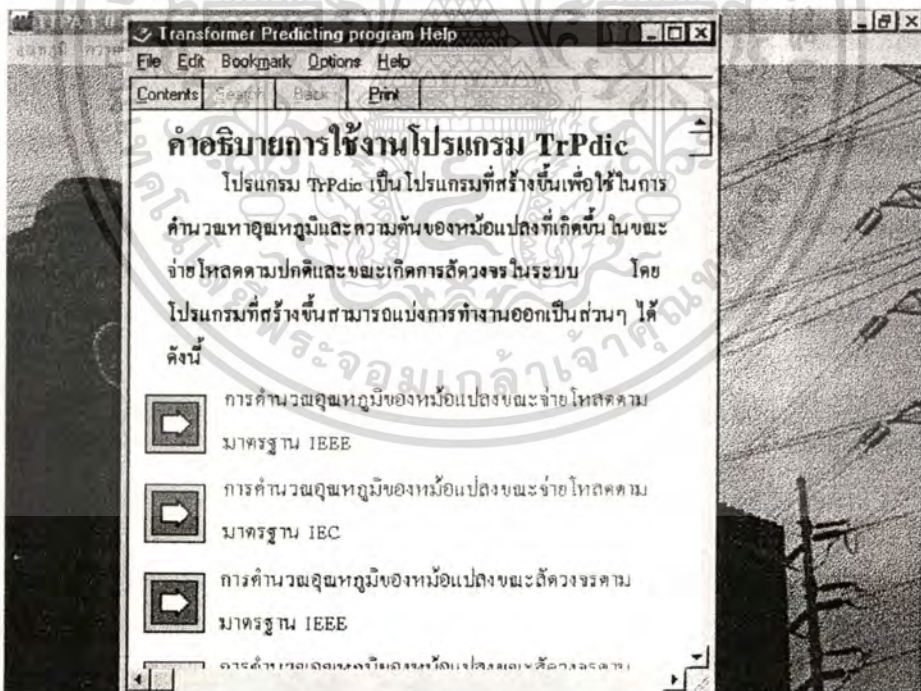


ภาพที่ 6.15 โปรแกรมแสดงผลการคำนวณในรูปแบบของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แจ้งมติและข้อควรระวังในการใช้งาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.16 แสดงภาพตัวอย่างการขึ้นคอนการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลง



ภาพที่ 6.17 โปรแกรมช่วยเหลือของ TTPA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการใช้งาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างการนำซอฟต์แวร์วิเคราะห์อุณหภูมิและความดันของหม้อแปลง (TTPA) ไปใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของอุณหภูมิและความดันที่เกิดในหม้อแปลงจำหน่าย ขณะจ่ายโหลดและขณะเกิดการลัดวงจร โดยแยกการวิเคราะห์ออกเป็นกรณีการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลด, การวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจรและการวิเคราะห์ความดันของน้ำมันของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจรภายในถัง

7.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE

ข้อมูลที่น่ามาทดสอบนี้เป็นข้อมูลของหม้อแปลงจำหน่าย ที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงรายหนึ่งซึ่งเป็นข้อมูลทางด้านเทคนิคและผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบจริง ในบทนี้แสดงตัวอย่างในการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ขนาด ซึ่งมีข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 7.1 แสดงผลการทดสอบค่าสูญเสียและผลการคำนวณค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันและของลวดของหม้อแปลงจากโรงงานผู้ผลิต

ขนาด	100 kVA	160 kVA	250 kVA
1. No Load Loss (w)	220	320	454
2. Load Loss (w)	1371	2035	2817
3. Total Loss (w)	1591	2355	3271
4. Hottest-spot of Top oil (°C)	68	69	70
5. Hottest-spot of HV. Wdg. (°C)	70.9	71.6	78.9
6. Hottest-spot of LV. Wdg. (°C)	72.4	73.1	80.3
7. Top oil rise (K)	36	41	40
8. Winding temp. rise HV. (°C)	40.9	44.6	49.9
9. Winding temp. rise LV. (°C)	41.4	46.1	51.3

ตารางที่ 7.2 แสดงน้ำหนักของตัวถังและส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงที่ทำการวิเคราะห์

ขนาด (kVA)	น้ำหนักฝา (lb.)	น้ำหนักถัง (lb.)	น้ำหนักกริป (lb.)	รวม
100	74.96	194.00	79.37	378.33
160	97.00	222.66	114.64	434.30
250	114.64	297.62	194.00	606.26

ตารางที่ 7.3 แสดงปริมาณน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อนของหม้อแปลงที่ทำการวิเคราะห์

ขนาด (kVA)	จำนวนน้ำมัน (gal)
100	42.9
160	55.0
250	70.4

ตารางที่ 7.4 แสดงน้ำหนักขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงที่ทำการวิเคราะห์

ขนาด (kVA)	น้ำหนักขด LV (lb.)	น้ำหนักขด HV (lb.)	น้ำหนักแกน เหล็ก (lb.)	น้ำหนักรวม (lb.)
100	108.58	192.62	383.84	685.04
160	162.81	245.83	549.92	958.56
250	219.51	326.79	776.35	1322.65

ตัวอย่างที่ 1

หม้อแปลงขนาด 100 kVA 3 ph 22 kV - 400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ใช้ฉนวน

Class A ข้อมูลที่ใช้ทำการวิเคราะห์มีดังนี้

X คือ น้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวด = 685.04 ปอนด์

Y คือ น้ำหนักของตัวถังและข้อต่อต่างๆ = 378.33 ปอนด์

Z คือ จำนวนน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อน = 42.9 แกลลอน

Θ_{cr} คือ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด = 36 °C

P_r คือ ค่าสูญเสียรวมทั้งหมดที่พิกัดโหลด = 1591 วัตต์

K คือ โหลดที่หม้อแปลงจ่าย = 1.0 pu.

R คือ อัตราส่วนของการสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่พิกัดต่อการสูญเสียขณะไม่จ่ายโหลด = 6.23

Θ_{wr} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด = 42.4 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Θ_{oi} คือ ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุด

เริ่มต้นของช่วงเวลาการจ่ายโหลด = $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$

t คือ ช่วงเวลาในการจ่ายโหลด = 12 ชั่วโมง

T_{hs} คือ ช่วงเวลาที่ความร้อนของตัวนำคงที่ที่จุดร้อนสุด = 3.0 ชั่วโมง

Θ_{oi} คือ ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดเริ่มต้นของ

ช่วงเวลาการจ่ายโหลด = $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Θ_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม = $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

นำข้อมูลของหม้อแปลงจำหน่ายมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยการป้อนข้อมูลของหม้อแปลงลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 500 kVA แล้วทำการคำนวณ โดยทำการคำนวณ 2 แบบคือแบบที่อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ และแบบที่อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน $65\text{ }^{\circ}\text{C}$

ผลการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน $55\text{ }^{\circ}\text{C}$

- เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ที่พิกัดโหลด (T_p) = 2.5634 ชั่วโมง

- อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่โหลดใดๆ (Θ_{su}) = $36\text{ }^{\circ}\text{C}$

- เวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง (T_o) = 2.5634 ชั่วโมง

- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด

(Θ_{su}) = $16.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

- อุณหภูมิสุดท้ายของจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆ

(Θ_{su}) = $16.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด (Θ_{su}) = $16.0996\text{ }^{\circ}\text{C}$

- อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด

(Θ_{su}) = $35.6664\text{ }^{\circ}\text{C}$

- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ (Θ_{su}) = $81.766\text{ }^{\circ}\text{C}$

- อายุการใช้งานของฉนวน = 743643.5959 ชั่วโมง หรือประมาณ 84.89 ปี

- ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน = 1.6137×10^3

Less than 500 kVA

ผลการคำนวณผลการคำนวณของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE

X Y Z Θ_{or}
 Pr K R Θ_{wt}
 Θ_{gi} t T_{hs} Θ_{oi}
 Θ_s ΔT 55 °C ΔT 65 °C

Tr = 2.5634 Θ_{gu} = 16.4
 Θ_{ou} = 36 Θ_g = 16.0996
 T_o = 2.5634 Θ_o = 35.6664
 Θ_{gr} = 16.4 Θ_{hs} = 81.766
 Hour of Life = 743643.5959 % Loss of Life = 1.6137E-3

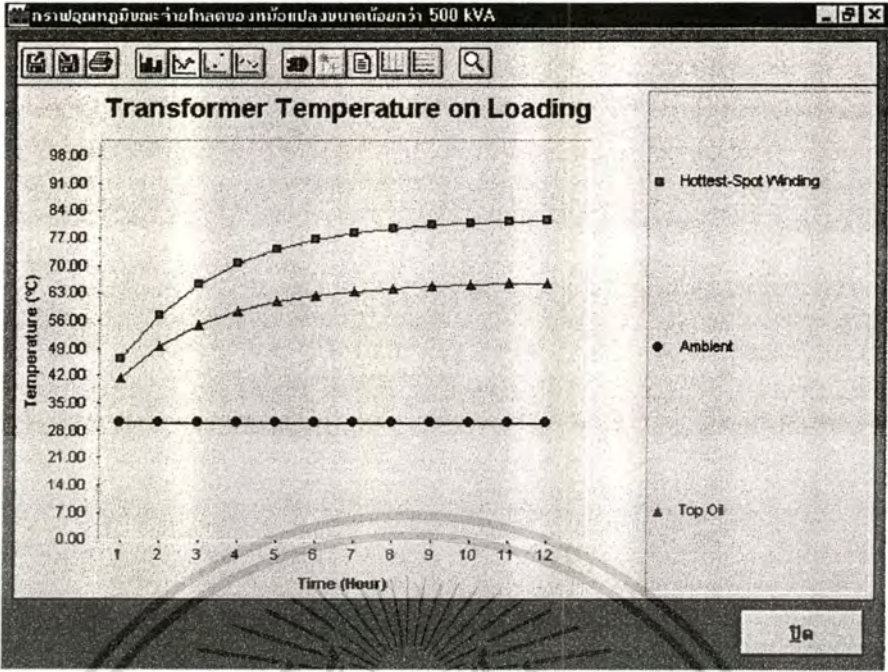
ภาพที่ 7.1 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C

ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด

ตารางแสดงผลการคำนวณ			ข้อมูลของหม้อแปลง	
Hour	Hottest-spot Temp.	Top oil Temp.		
1	46.28	41.63	น้ำหนักของแท่งเหล็กและขดลวด (lb)	685.0
2	57.48	49.50	น้ำหนักตัวถังและข้อต่อ (lb)	378.3
3	65.20	54.83	จำนวนน้ำมัน (gallon)	42.9
4	70.52	58.44	อุณหภูมิพื้นน้ำมันด้านบน (K)	36
5	74.18	60.88	ค่าสูญเสียรวมทั้งหมด (w)	1591
6	76.71	62.53	Peak Load (pu.)	1.0
7	78.46	63.65	Load loss / No load loss	6.23
8	79.67	64.41	อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (K)	42.4
9	80.51	64.92	อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำเริ่มต้น (K)	0.0
10	81.09	65.27	ช่วงเวลาที่เกิด Peak Load (h)	12
11	81.49	65.51	ค่าเวลาที่ความร้อนของตัวนำคงที่ (h)	3.0
12	81.77	65.67	อุณหภูมิน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (K)	0.0
			อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30
			อายุขัยโดยประมาณ (ปี)	84.89

ภาพที่ 7.2 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.3 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 65°C

- เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ที่พิกัดโหลด (T_r) = 2.5634 ชั่วโมง
- อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่โหลดใดๆ (Θ_{ou}) = 36°C
- เวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง (T_o) = 2.5634 ชั่วโมง
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด (Θ_{gr}) = 21.4°C
- อุณหภูมิสุดท้ายของจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆ (Θ_{gu}) = 21.4°C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด (Θ_g) = 21.008°C
- อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด (Θ_o) = 35.6664°C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ (Θ_{hs}) = 86.6744°C
- อายุการใช้งานของฉนวน = 2122822.8587 ชั่วโมง หรือประมาณ 84.89 ปี
- ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน = 5.6529×10^{-4}

Less than 500 kVA

X	685.0	Y	378.3	Z	42.9	Θ_{or}	36
Pr	1591	K	1.0	R	6.23	Θ_{wr}	42.4
Θ_{gi}	0.0	t	12	T_{hs}	3.0	Θ_{oi}	0.0
Θ_a	30	AT 55°C		AT 65°C			

T_r	= 2.5634	Θ_{gu}	= 21.4
Θ_{ou}	= 36	Θ_g	= 21.008
T_o	= 2.5634	Θ_o	= 35.6664
Θ_{gr}	= 21.4	Θ_{hs}	= 86.6744

Hour of Life = 2122822.8587 % Loss of Life = 5.6529E-4

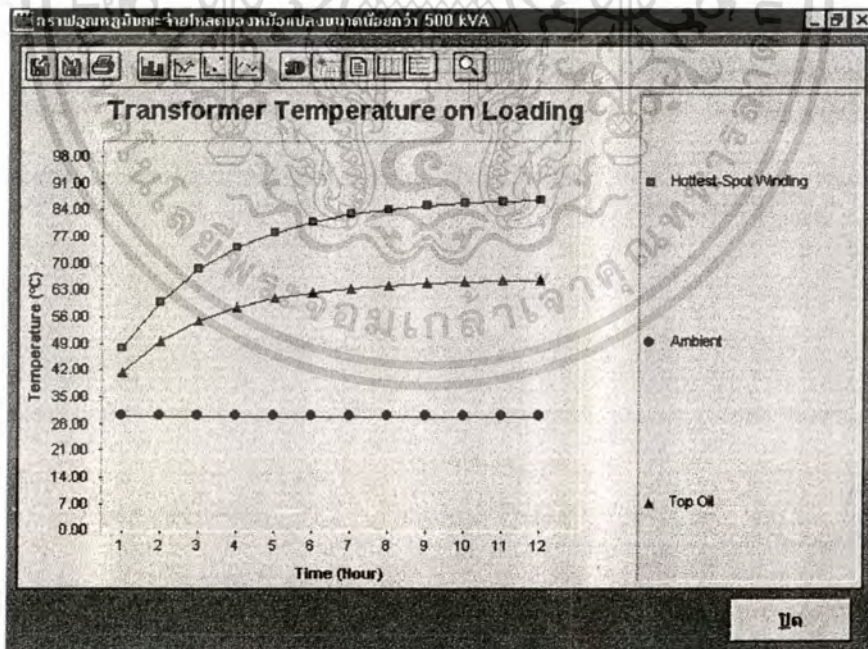
คำนวณ ลบข้อมูล ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.4 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลง ขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด			ข้อมูลของหม้อแปลง	
ตารางแสดงผลการคำนวณ				
Hour	Hottest-spot Temp.	Top oil Temp.		
1	47.69	41.63	น้ำหนักของหม้อแปลงเหล็กและขดลวด (lb)	685.0
2	59.91	49.50	น้ำหนักตัวถังและข้อต่อ (lb)	378.3
3	68.36	54.83	จำนวนน้ำมัน (gallon)	42.9
4	74.20	58.44	อุณหภูมิพื้นน้ำมันด้านบน (K)	36
5	78.24	60.88	ค่าสูญเสียรวมทั้งหมด [w]	1591
6	81.04	62.53	Peak Load (pu.)	1.0
7	82.98	63.65	Load loss / No load loss	6.23
8	84.32	64.41	อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (K)	42.4
9	85.26	64.92	อุณหภูมิขดลวดร้อนสุดของตัวนำเริ่มต้น (K)	0.0
10	85.91	65.27	ช่วงเวลาที่เกิด Peak Load (h)	12
11	86.36	65.51	ค่าเวลาที่การร้อนของตัวนำคงที่ (h)	3.0
12	86.67	65.67	อุณหภูมิน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (K)	0.0
			อุณหภูมิขดลวดร้อน (°C)	30
			อายุขัยโดยประมาณ (ปี)	242.33

ภาพที่ 7.5 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

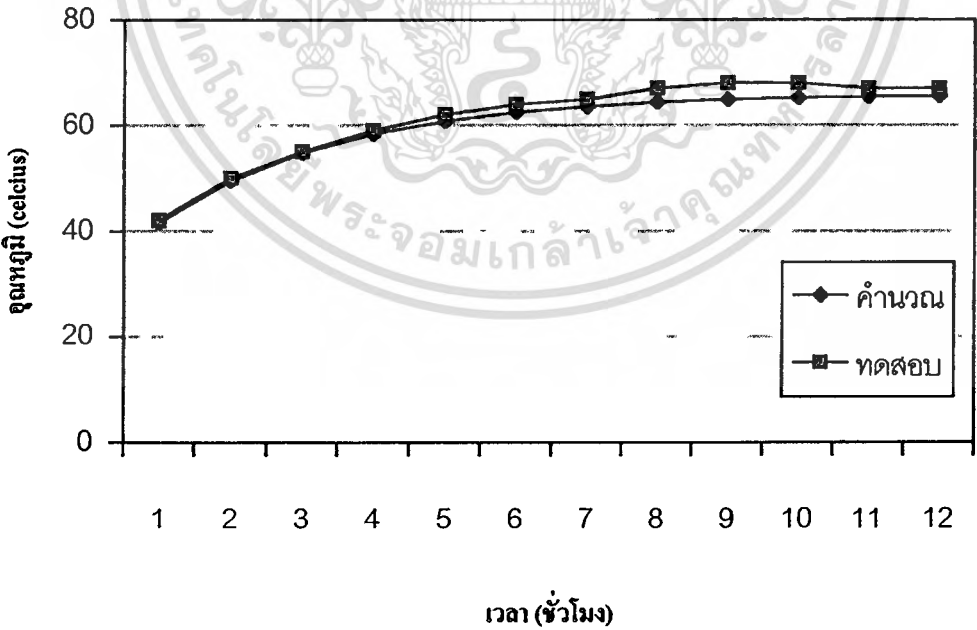


ภาพที่ 7.6 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

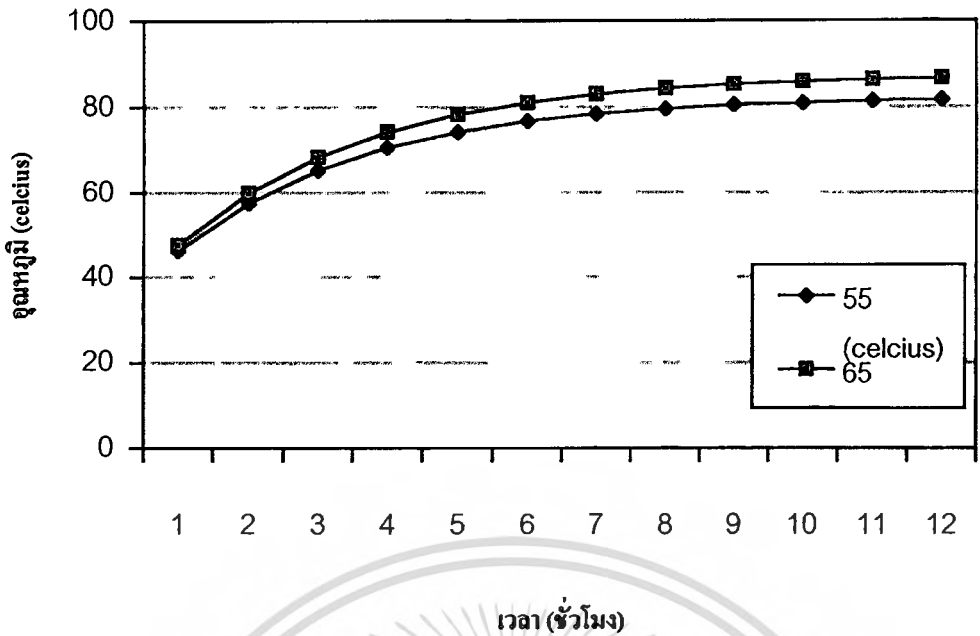
ตารางที่ 7.5 อุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต

Time(Hour)	Ambient Temp. (°C)	Top Oil Temp (°C)	Top Oil Rise (°C)
0	28	28	0
1	29	42	14
2	29	50	21
3	30	55	25
4	31	59	28
5	32	62	30
6	33	64	31
7	33	65	32
8	34	67	33
9	34	68	34
10	33	68	35
11	31	67	36
12	31	67	36

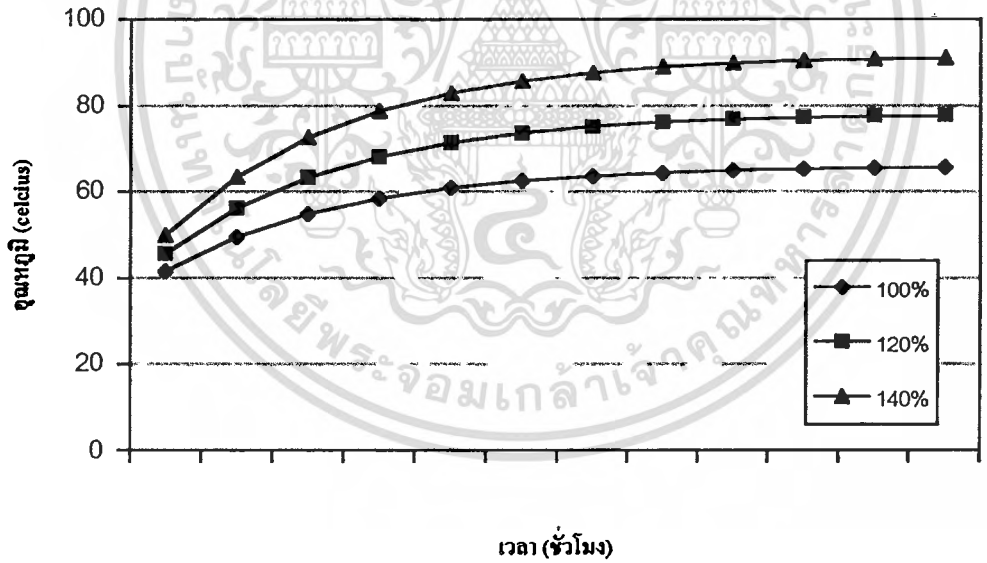


ภาพที่ 7.7 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

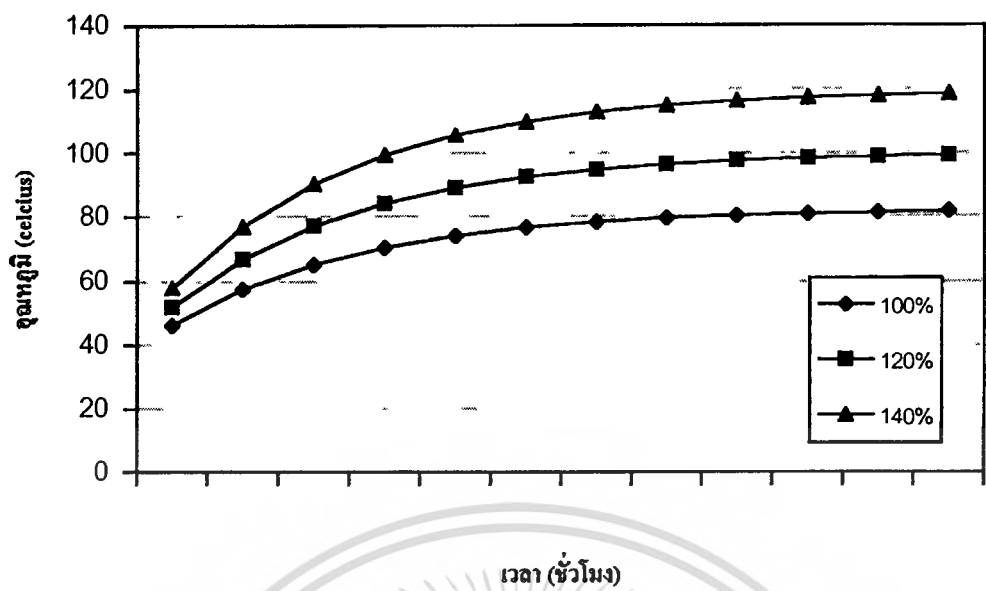


ภาพที่ 7.8 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ที่พิกัด

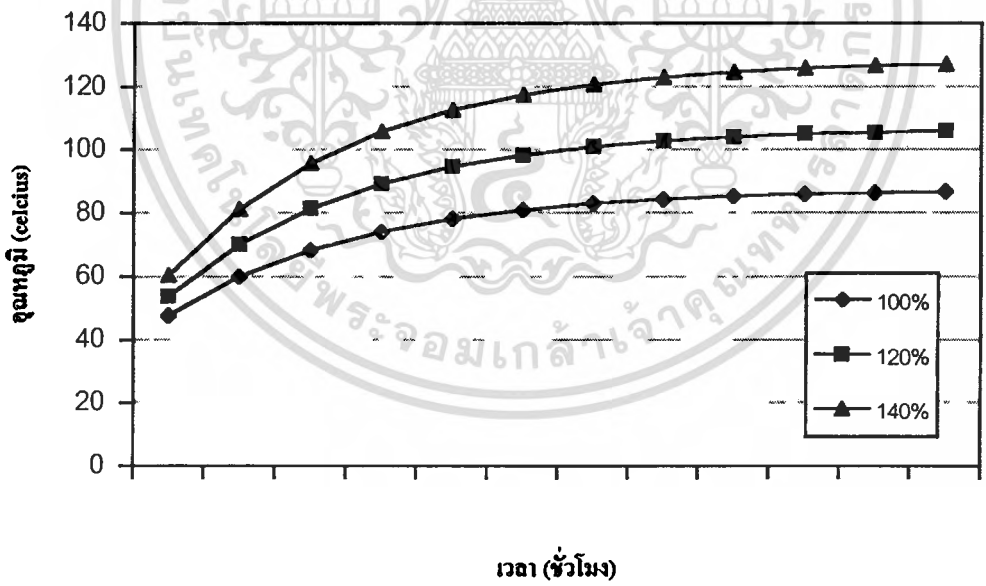


ภาพที่ 7.9 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%

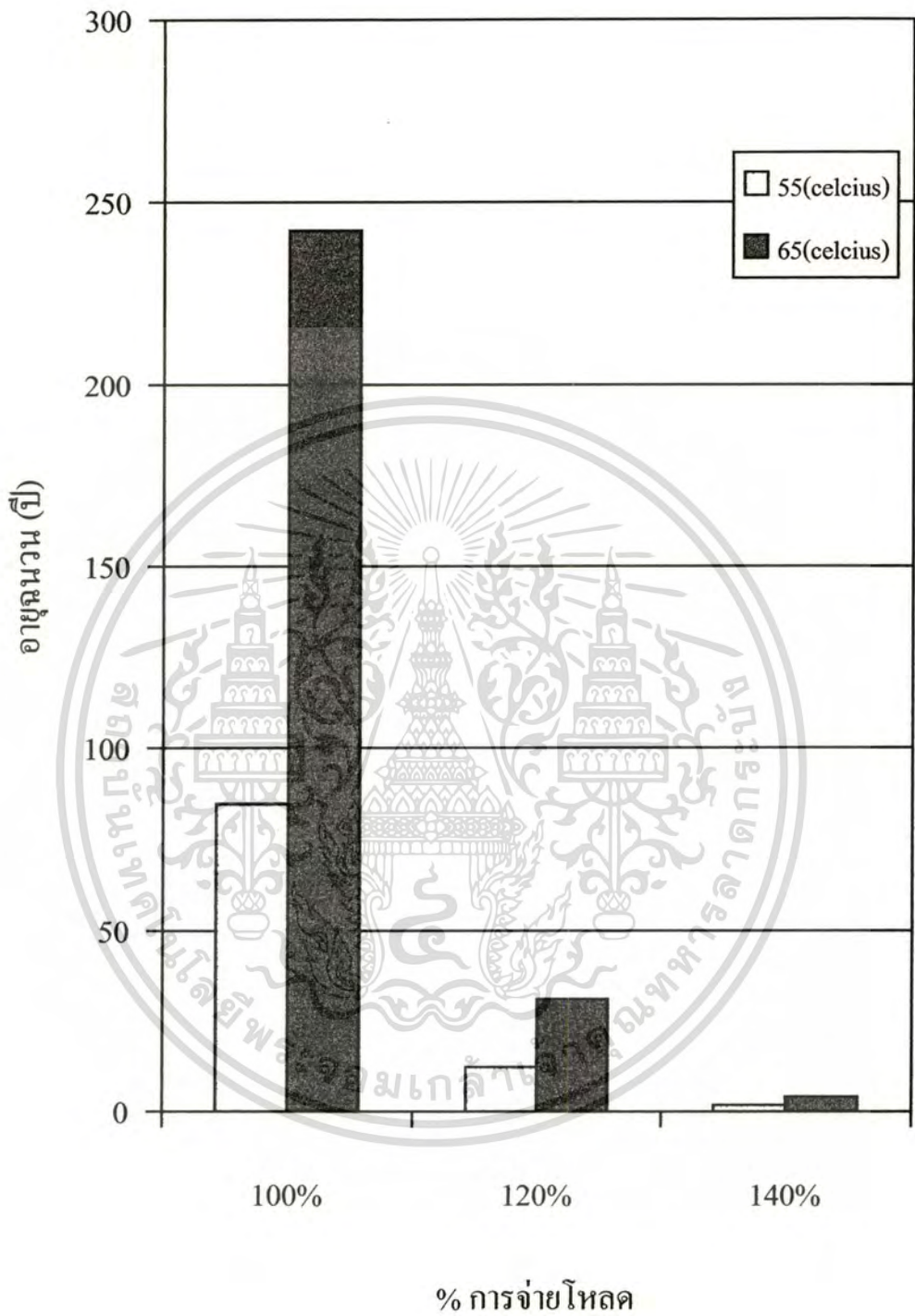
หมายเหตุ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนจากการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C จะเท่ากัน



ภาพที่ 7.10 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%



ภาพที่ 7.11 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%



ภาพที่ 7.12 กราฟเปรียบเทียบอายุการใช้งานของฉนวนของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2

หม้อแปลงขนาด 160 kVA 3 ph 22 kV - 400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ใช้ฉนวน Class A ข้อมูลที่ใช้ทำการวิเคราะห์หมีดังนี้

X คือ น้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวด = 958.56 ปอนด์

Y คือ น้ำหนักของตัวถังและข้อต่อต่างๆ = 434.30 ปอนด์

Z คือ จำนวนน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อน = 55.0 แกลลอน

Θ_{α} คือ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด = 41 °C

P_r คือ ค่าสูญเสียรวมทั้งหมดที่พิกัดโหลด = 2355 วัตต์

K คือ โหลดที่หม้อแปลงจ่าย = 1.0 pu.

R คือ อัตราส่วนของการสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่พิกัดต่อการสูญเสียขณะไม่จ่ายโหลด = 6.36

Θ_{w_r} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด = 43.1 °C

Θ_{gi} คือ ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลาการจ่ายโหลด = 0.0 °C

t คือ ช่วงเวลาในการจ่ายโหลด = 12 ชั่วโมง

T_{hs} คือ ช่วงเวลาที่ความร้อนของตัวนำคงที่ที่จุดร้อนสุด = 3.0 ชั่วโมง

Θ_{oi} คือ ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลาการจ่ายโหลด = 0.0 °C

Θ_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม = 30 °C

นำข้อมูลของหม้อแปลงจำหน่ายมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยการป้อนข้อมูลของหม้อแปลงลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 500 kVA แล้วทำการคำนวณ โดยทำการคำนวณ 2 แบบคือแบบที่อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 55 °C และแบบที่อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 65 °C

ผลการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 55 °C

- เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ที่พิกัดโหลด (T_r) = 2.5773 ชั่วโมง

- อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่โหลดใดๆ (Θ_{w_r}) = 41 °C

- เวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง (T_o) = 2.5773 ชั่วโมง

- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด

$$(\Theta_{gi}) = 12.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- อุณหภูมิสุดท้ายของจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\Theta_{gu}) = 12.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด $(\Theta_g) = 11.8784 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด $(\Theta_o) = 40.6104 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ $(\Theta_{hs}) = 82.4887 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- อายุการใช้งานของฉนวน = 684062.2302 ชั่วโมง หรือประมาณ 78.09 ปี

- ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน = 1.7542×10^{-3}

Less than 500 kVA

X	958.56	Y	434.3	Z	55.0	Θ_{or}	41
Pr	2355	K	1	R	6.36	Θ_{wr}	43.1
Θ_{gi}	0	t	12	T_{hs}	3	Θ_{oi}	0
Θ_a	30	ΔT 55 $^{\circ}\text{C}$		ΔT 65 $^{\circ}\text{C}$			

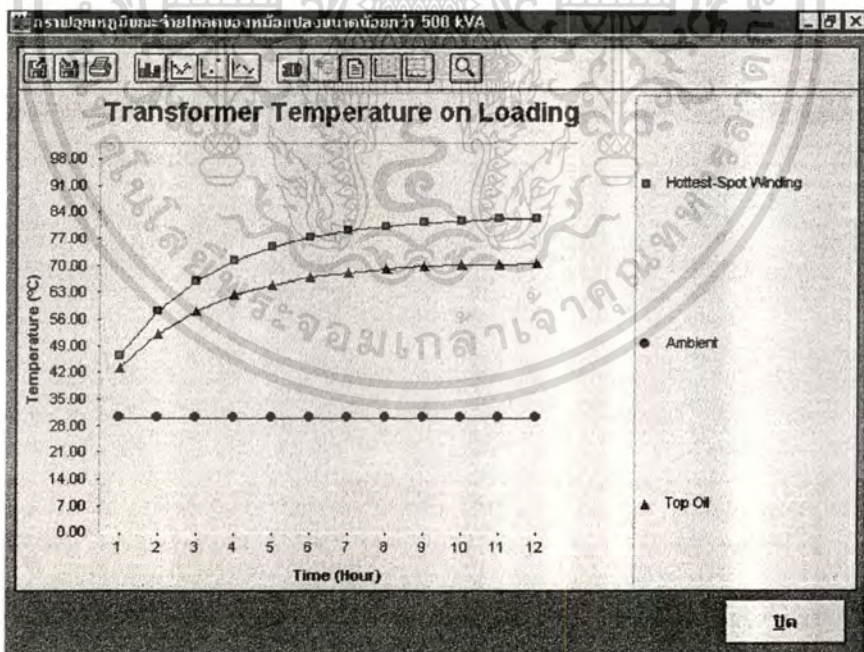
T_r	= 2.5773	Θ_{gu}	= 12.1
Θ_{ou}	= 41	Θ_g	= 11.8784
T_o	= 2.5773	Θ_o	= 40.6104
Θ_{gr}	= 12.1	Θ_{hs}	= 82.4887
Hour of Life	= 684062.2302	% Loss of Life	= 1.7542E-3

คำนวณ ดูข้อมูล ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.13 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 $^{\circ}\text{C}$

ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลง ขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด			ข้อมูลของหม้อแปลง	
ตารางแสดงผลการคำนวณ				
Hour	Hottest-spot Temp.	Top oil Temp.		
1	46.62	43.19	น้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวด (lb)	958.56
2	58.02	52.13	น้ำหนักตัวถังและข้อต่อ (lb)	434.3
3	65.85	58.20	จำนวนน้ำมัน (gallon)	55.0
4	71.23	62.32	อุณหภูมิพื้นน้ำมันด้านบน (K)	41
5	74.92	65.11	ค่าสูญเสียรวมทั้งหมด (w)	2355
6	77.47	67.00	Peak Load (pu.)	1
7	79.22	68.29	Load loss / No load loss	6.36
8	80.42	69.16	อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (K)	43.1
9	81.25	69.75	อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำเริ่มต้น (K)	0
10	81.82	70.15	ช่วงเวลาที่เกิด Peak Load (h)	12
11	82.22	70.43	ค่าเวลาที่ความร้อนของตัวนำคงที่ (h)	3
12	82.49	70.61	อุณหภูมิน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (K)	0
			อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30
			อายุขัยโดยประมาณ (ปี)	78.09

ภาพที่ 7.14 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C



ภาพที่ 7.15 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 65 °C

- เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ที่ฟักัดโหลด (T_r) = 2.5773 ชั่วโมง
- อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่โหลดใดๆ (Θ_{ou}) = 41 °C
- เวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง (T_o) = 2.5773 ชั่วโมง
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่ฟักัดโหลด (Θ_{gr}) = 17.1 °C
- อุณหภูมิสุดท้ายของจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆ (Θ_{gu}) = 17.1 °C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด (Θ_g) = 16.7868 °C
- อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด (Θ_o) = 40.6104 °C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ (Θ_{hs}) = 87.3972 °C
- อายุการใช้งานของฉนวน = 1957161.72 ชั่วโมง หรือประมาณ 223.42 ปี
- ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน = 6.1313×10^{-4}

Less than 500 kVA

การคำนวณแบบเพิ่มอุณหภูมิ IEEE

X	950.56	Y	434.3	Z	55.0	Θ_{or}	41
Pr	2355	K	1	R	6.36	Θ_{wr}	43.1
Θ_{gi}	0	t	12	T_{hs}	3	Θ_{ol}	0
Θ_a	30	°C AT 55 °C		°C AT 65 °C			

T_r	= 2.5773	Θ_{gu}	= 17.1
Θ_{ou}	= 41	Θ_g	= 16.7868
T_o	= 2.5773	Θ_o	= 40.6104
Θ_{gr}	= 17.1	Θ_{hs}	= 87.3972
Hour of Life	= 1957161.72	% Loss of Life	= 6.1313E-4

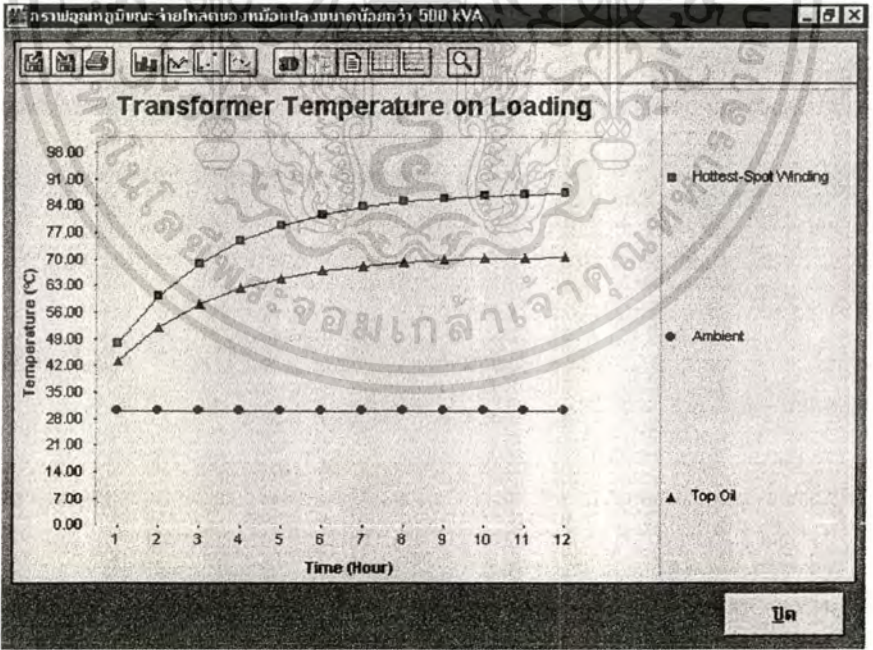
คำนวณ ดูข้อมูล **ตาราง** ดูข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.16 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด			ข้อมูลของหม้อแปลง	
ตารางแสดงผลการคำนวณ				
Hour	Hottest-spot Temp.	Top oil Temp.		
1	48.03	43.19	น้ำหนักของหม้อแปลงเหล็กและขดลวด (lb)	958.56
2	60.45	52.13	น้ำหนักตัวถังและข้อต่อ (lb)	434.3
3	69.01	58.20	จำนวนน้ำมัน (gallon)	55.0
4	74.91	62.32	อุณหภูมิพื้นน้ำมันด้านบน (K)	41
5	78.98	65.11	ค่าสูญเสียรวมทั้งหมด (w)	2355
6	81.79	67.00	Peak Load (pu.)	1
7	83.73	68.29	Load loss / No load loss	6.36
8	85.07	69.16	อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (K)	43.1
9	86.00	69.75	อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำเริ่มต้น (K)	0
10	86.64	70.15	ช่วงเวลาที่เกิด Peak Load (h)	12
11	87.09	70.43	ค่าเวลาที่ความร้อนของตัวนำคงที่ (h)	3
12	87.40	70.61	อุณหภูมิน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (K)	0
			อุณหภูมิขดลวด (°C)	30
			อายุขัยโดยประมาณ (ปี)	223.42
			พิมพ์	ปิด

ภาพที่ 7.17 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

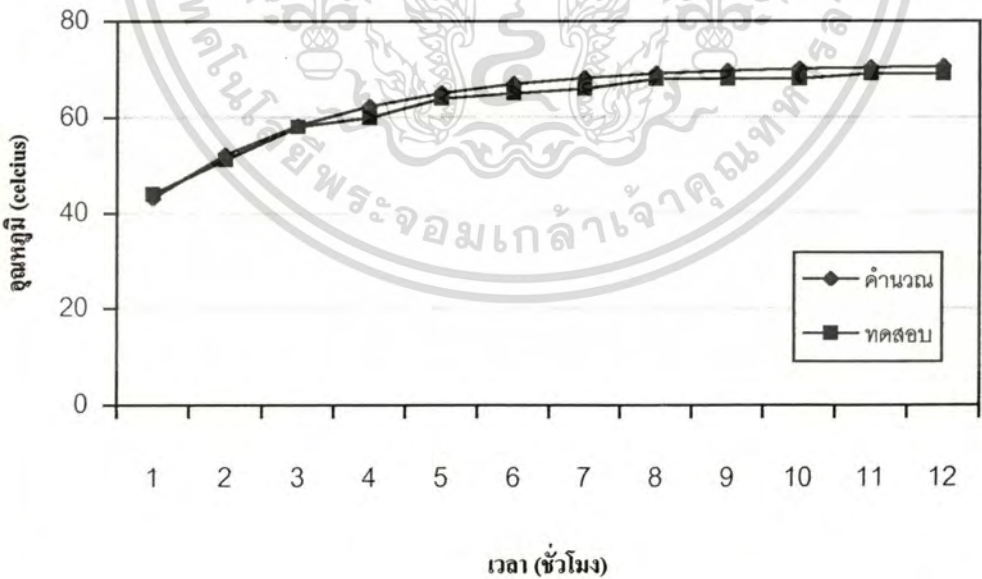


ภาพที่ 7.18 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 160 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

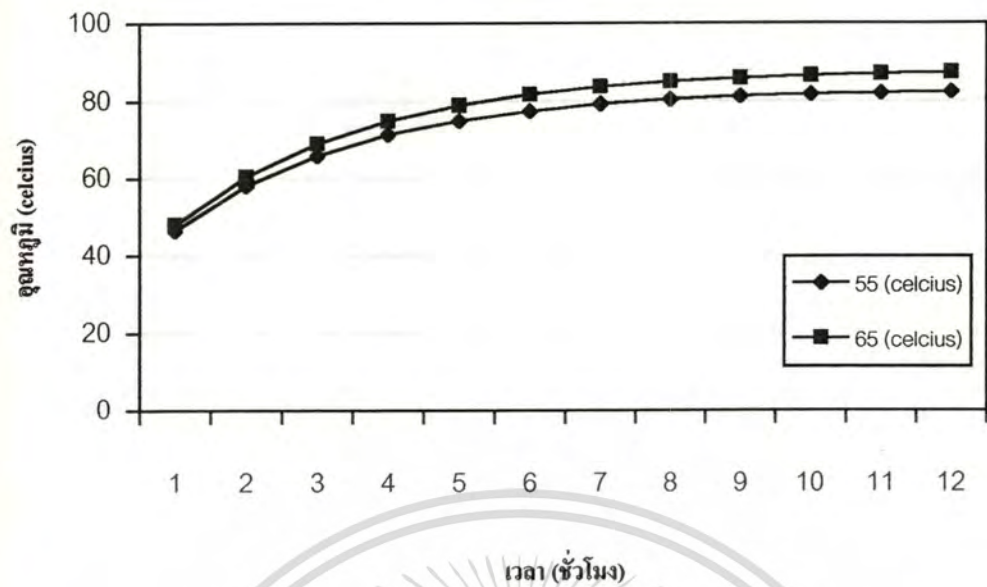
ตารางที่ 7.6 อุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต

Time(Hour)	Ambient Temp. (°C)	Top Oil Temp (°C)	Top Oil Rise (°C)
1	26	44	18
2	26	51	25
3	27	58	31
4	28	60	32
5	30	64	34
6	30	65	35
7	30	66	36
8	30	68	38
9	29	68	39
10	28	68	40
11	28	69	41
12	28	69	41

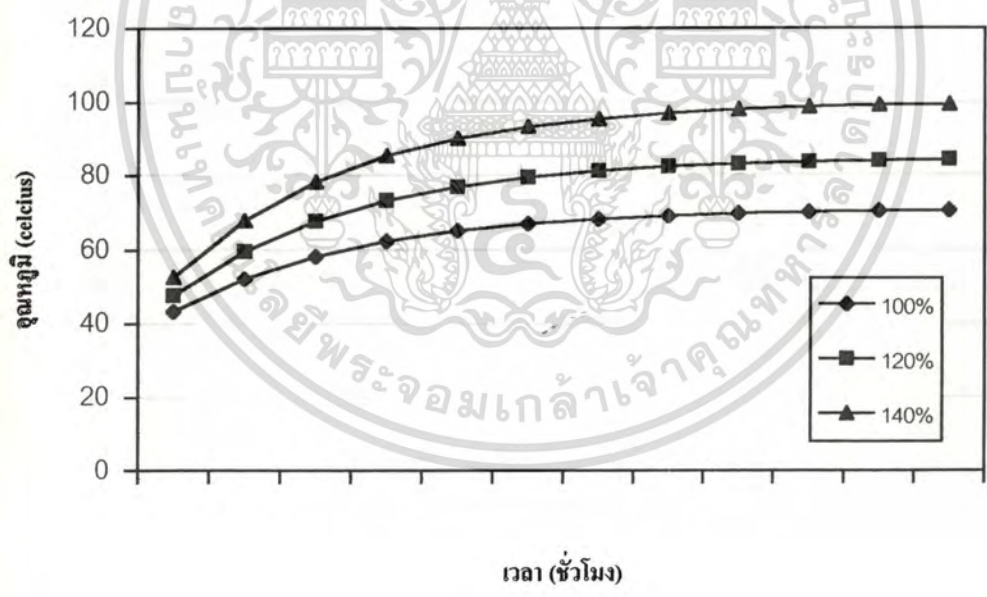


ภาพที่ 7.19 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

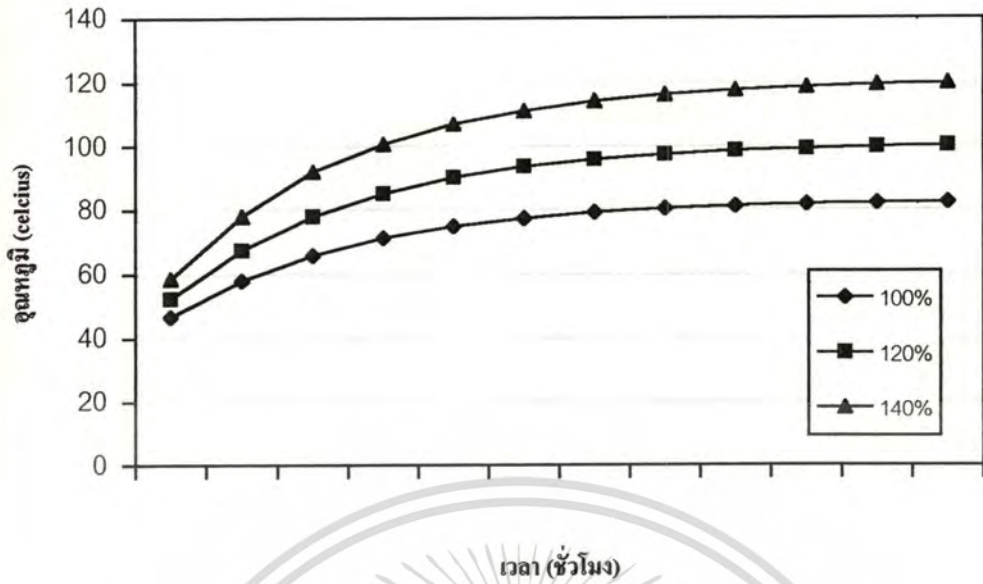


ภาพที่ 7.20 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ที่พิกัด

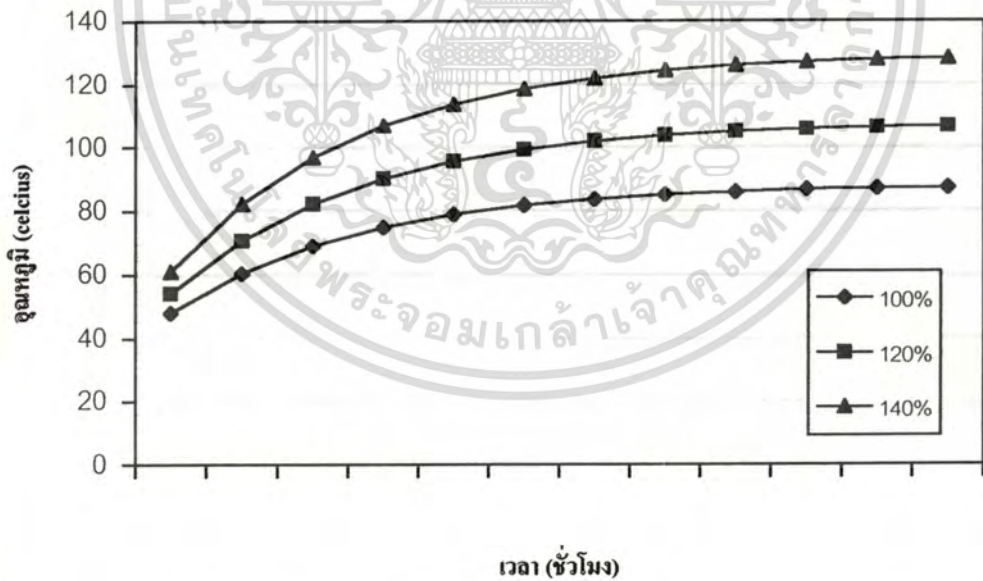


ภาพที่ 7.21 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%

หมายเหตุ ผลของอุณหภูมิน้ำมันด้านบนจากการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C จะเท่ากัน

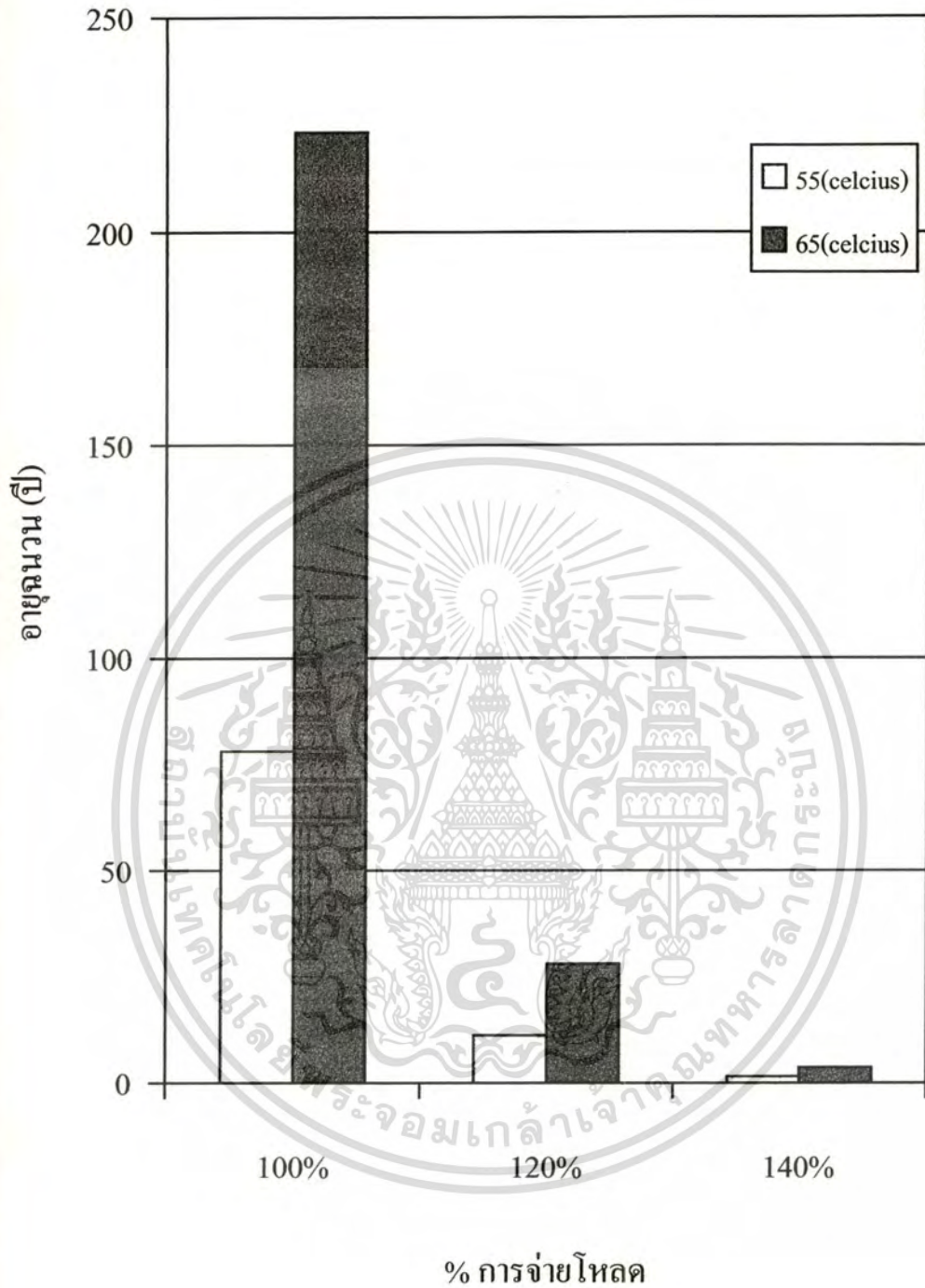


ภาพที่ 7.22 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%



ภาพที่ 7.23 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.24 กราฟเปรียบเทียบอายุการใช้งานของฉนวนของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 3

หม้อแปลงขนาด 250 kVA 3 ph 22 kV - 400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ใช้ฉนวน Class A ข้อมูลที่ใช้ทำการวิเคราะห์หมีดังนี้

X คือ น้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวด = 1322.65 ปอนด์

Y คือ น้ำหนักของตัวถังและข้อต่อต่างๆ = 606.26 ปอนด์

Z คือ จำนวนน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อน = 70.4 แกลลอน

Θ_{∞} คือ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด = 40 °C

P_r คือ ค่าสูญเสียรวมทั้งหมดที่พิกัดโหลด = 3271 วัตต์

K คือ โหลดที่หม้อแปลงจ่าย = 1.0 pu.

R คือ อัตราส่วนของการสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่พิกัดต่อการสูญเสียขณะไม่จ่ายโหลด = 6.20

Θ_{wr} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด = 50.3 °C

Θ_{gi} คือ ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลาการจ่ายโหลด = 0.0 °C

t คือ ช่วงเวลาในการจ่ายโหลด = 12 ชั่วโมง

T_{hs} คือ ช่วงเวลาที่ความร้อนของตัวนำคงที่ที่จุดร้อนสุด = 3.0 ชั่วโมง

Θ_{oi} คือ ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลาการจ่ายโหลด = 0.0 °C

Θ_{∞} คือ อุณหภูมิแวดล้อม = 30 °C

นำข้อมูลของหม้อแปลงจําหน่ายมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยการป้อนข้อมูลของหม้อแปลงลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 500 kVA แล้วทำการคำนวณ โดยทำการคำนวณ 2 แบบคือแบบที่อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 55 °C และแบบที่อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 65 °C

ผลการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 55 °C

- เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ที่พิกัดโหลด (T_p) = 2.412 ชั่วโมง

- อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่โหลดใดๆ (Θ_{∞}) = 40 °C

- เวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง (τ_o) = 2.412 ชั่วโมง

- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด (Θ_{gi}) = 20.3 °C

- อุณหภูมิสุดท้ายของจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\Theta_{gu}) = 20.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด $(\Theta_g) = 19.9282 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด $(\Theta_o) = 39.7237 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ $(\Theta_{hs}) = 89.6519 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- อายุการใช้งานของฉนวน = 304401.3425 ชั่วโมง หรือประมาณ 34.75 ปี

- ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน = 3.9422×10^{-3}

Less than 500 kVA

X	1322.65	Y	606.26	Z	70.4	Θ_{or}	40
Pr	3271	K	1	R	6.20	Θ_{wr}	50.3
Θ_{gi}	0	t	12	T_{hs}	3	Θ_{oi}	0
Θ_a	30	ΔT 55 $^{\circ}\text{C}$		ΔT 65 $^{\circ}\text{C}$			

T_r	= 2.412	Θ_{gu}	= 20.3
Θ_{ou}	= 40	Θ_g	= 19.9282
T_o	= 2.412	Θ_o	= 39.7237
Θ_{gr}	= 20.3	Θ_{hs}	= 89.6519
Hour of Life	= 304401.3425	% Loss of Life	= 3.9422E-3

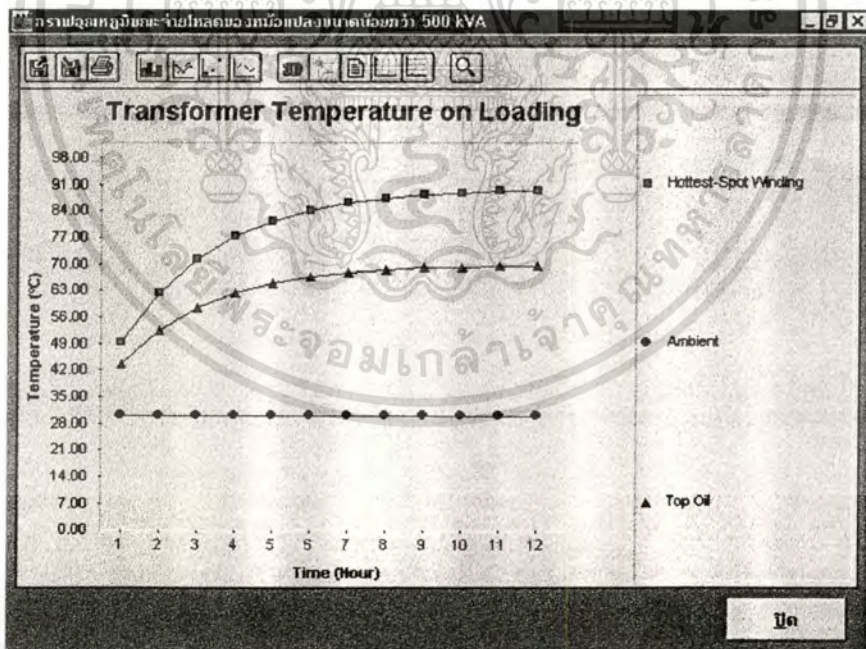
ปุ่มควบคุม: คำนวณ ลบข้อมูล ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.25 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 $^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการคำนวณ			ข้อมูลของหม้อแปลง	
Hour	Hottest-spot Temp.	Top oil Temp.		
1	49.33	43.58	น้ำหนักของเหล็กและขดลวด (lb)	1322.65
2	62.42	52.54	น้ำหนักตัวถังและข้อต่อ (lb)	606.26
3	71.30	58.47	จำนวนน้ำมัน (gallon)	70.4
4	77.33	62.38	อุณหภูมิพื้นน้ำมันด้านบน (K)	40
5	81.43	64.97	ค่าสูญเสียรวมทั้งหมด (w)	3271
6	84.23	66.68	Peak Load (pu.)	1
7	86.14	67.80	Load loss / No load loss	6.20
8	87.44	68.55	อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (K)	50.3
9	88.33	69.04	อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำเริ่มต้น (K)	0
10	88.94	69.37	ช่วงเวลาที่เกิด Peak Load (h)	12
11	89.36	69.58	ค่าเวลาที่คร่าวร้อนของตัวนำคงที่ (h)	3
12	89.65	69.72	อุณหภูมิน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (K)	0
			อุณหภูมิขดลวด (°C)	30
			อายุขัยโดยประมาณ (ปี)	34.75

ภาพที่ 7.26 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C



ภาพที่ 7.27 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 65 °C

- เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ที่พิกัดโหลด (T_r) = 2.412 ชั่วโมง
- อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่โหลดใดๆ (Θ_{ou}) = 40 °C
- เวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง (T_o) = 2.412 ชั่วโมง
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด (Θ_{gr}) = 25.3 °C
- อุณหภูมิสุดท้ายของจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆ (Θ_{gu}) = 25.3 °C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด (Θ_g) = 24.8366 °C
- อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่จุดสุดท้ายของเวลาในการจ่ายโหลด (Θ_o) = 39.7237 °C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ (Θ_{hs}) = 94.5603 °C
- อายุการใช้งานของฉนวน = 890018.2809 ชั่วโมง หรือประมาณ 101.60 ปี
- ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน = 1.3483×10^{-3}

Less than 500 kVA

X: 1322.65 Y: 606.26 Z: 70.4 Θ_{or} : 40
 Pr: 3271 K: 1 R: 6.20 Θ_{wr} : 50.3
 Θ_{gl} : 0 I: 12 T_{hs} : 3 Θ_{oi} : 0
 Θ_a : 30 CAT 55 °C CAT 65 °C

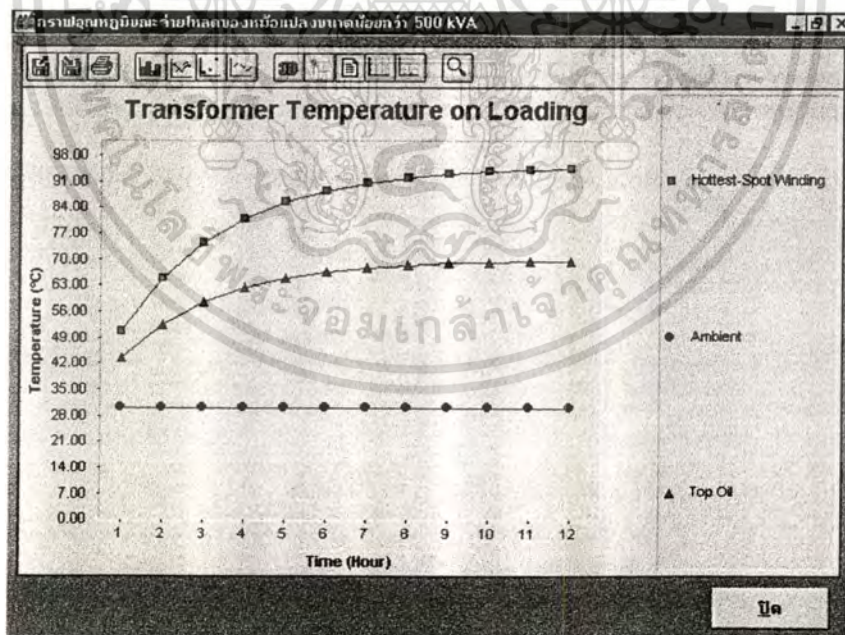
T_r = 2.412	Θ_{gu} = 25.3
Θ_{ou} = 40	Θ_g = 24.8366
T_o = 2.412	Θ_o = 39.7237
Θ_{gr} = 25.3	Θ_{hs} = 94.5603
Hour of Life = 890018.2809	% Loss of Life = 1.3483E-3

ภาพที่ 7.28 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด			ข้อมูลของหม้อแปลง	
ตารางแสดงผลการคำนวณ			ข้อมูลของหม้อแปลง	
Hour	Hottest-spot Temp.	Top oil Temp.	น้ำหนักของหม้อแปลงและขดลวด (lb)	1322.65
1	50.75	43.58	น้ำหนักตัวถังและข้อต่อ (lb)	606.26
2	64.85	52.54	จำนวนน้ำมัน (gallon)	70.4
3	74.46	58.47	อุณหภูมิพื้นน้ำมันด้านบน (K)	40
4	81.01	62.38	ค่าสูญเสียรวมทั้งหมด (w)	3271
5	85.49	64.97	Peak Load (pu.)	1
6	88.55	66.68	Load loss / No load loss	6.20
7	90.65	67.80	อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (K)	50.3
8	92.09	68.55	อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำเริ่มต้น (K)	0
9	93.08	69.04	ช่วงเวลาที่เกิด Peak Load (h)	12
10	93.76	69.37	ค่าเวลาที่ความร้อนของตัวนำคงที่ (h)	3
11	94.24	69.58	อุณหภูมิน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (K)	0
12	94.56	69.72	อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30
			อายุงานโดยประมาณ (ปี)	101.6

ภาพที่ 7.29 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

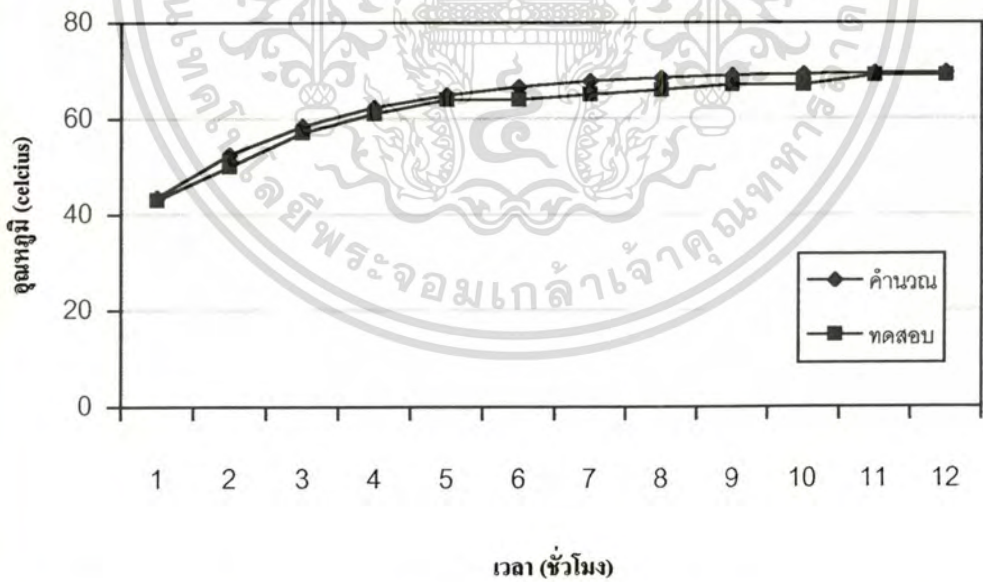


ภาพที่ 7.30 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดน้อยกว่า 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

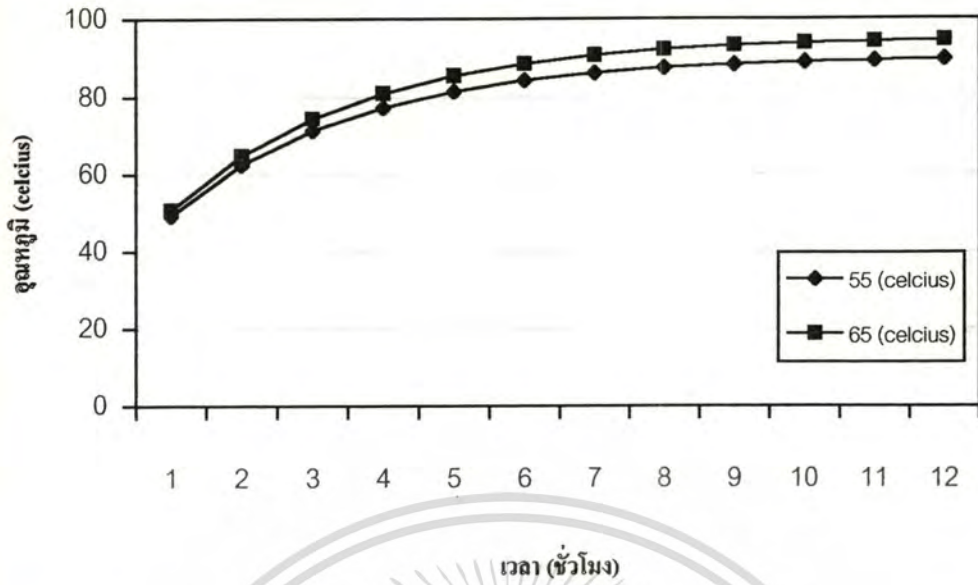
ตารางที่ 7.7 อุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต

Time(Hour)	Ambient Temp. (°C)	Top Oil Temp (°C)	Top Oil Rise (°C)
1	27	43	16
2	27	50	23
3	27	57	30
4	27	61	34
5	27	64	37
6	27	64	37
7	27	65	38
8	28	66	38
9	28	67	39
10	28	67	39
11	29	69	40
12	29	69	40

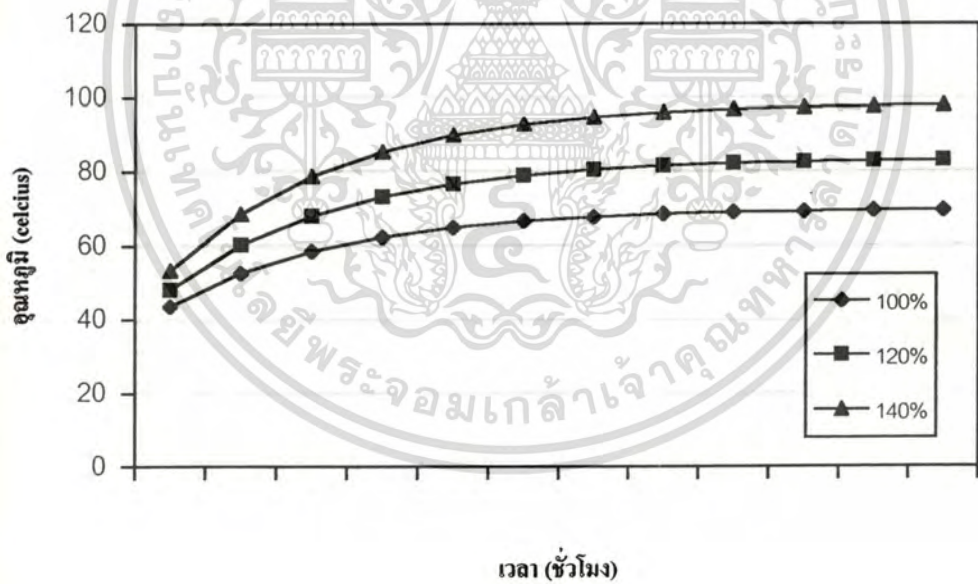


ภาพที่ 7.31 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



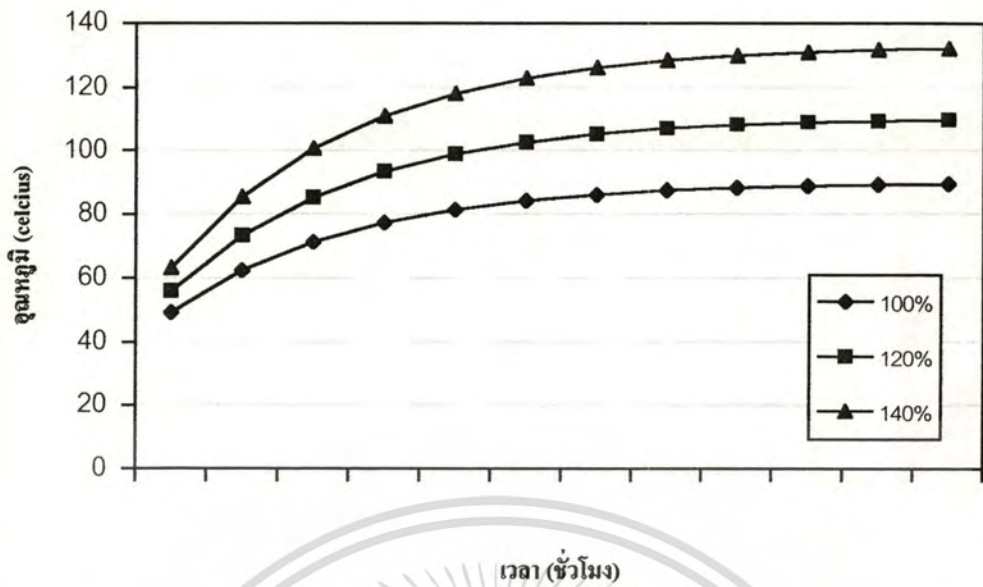
ภาพที่ 7.32 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ที่พิกัด



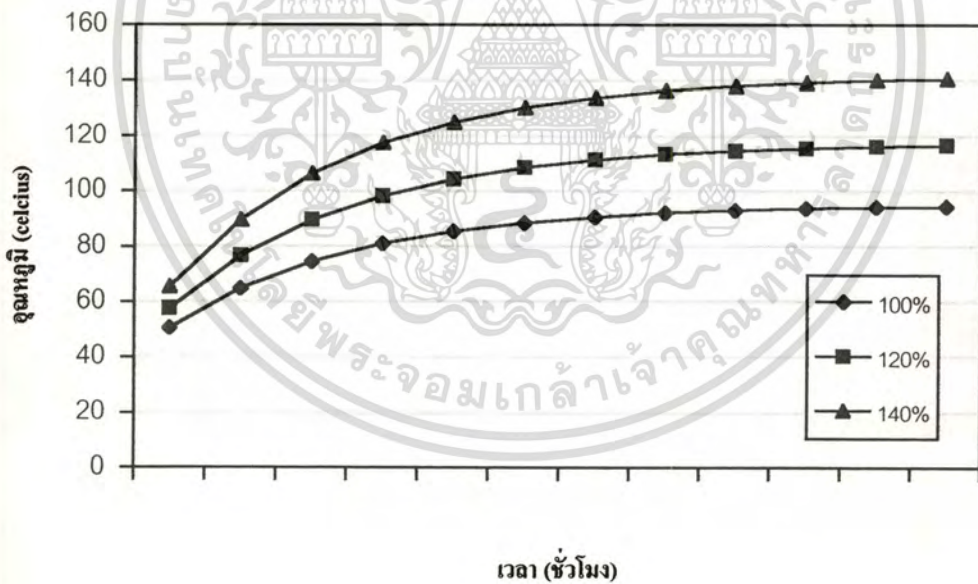
ภาพที่ 7.33 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%

หมายเหตุ ผลของอุณหภูมิน้ำมันด้านบนจากการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C จะเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

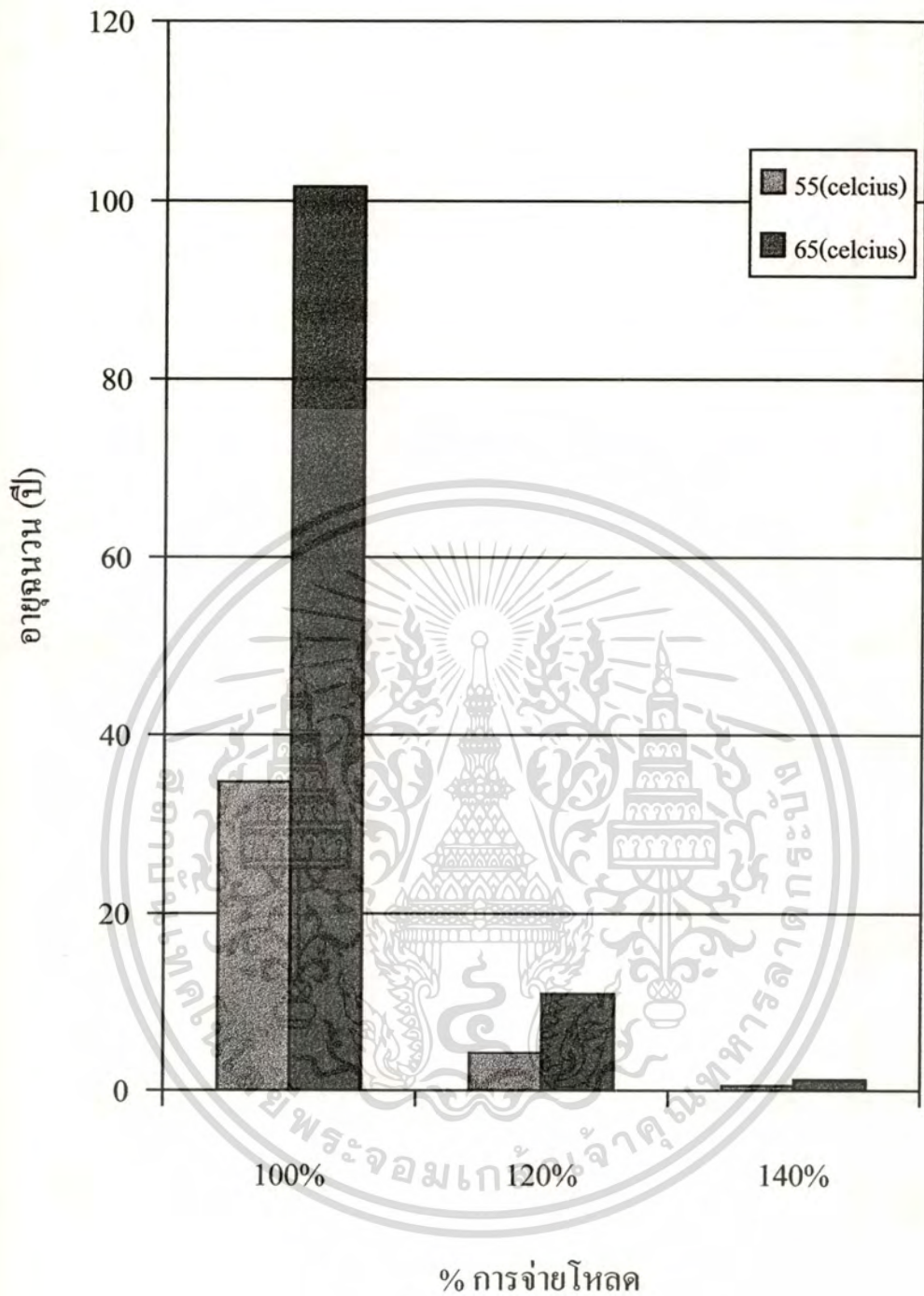


ภาพที่ 7.34 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%



ภาพที่ 7.35 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.36 กราฟเปรียบเทียบอายุการใช้งานของฉนวนของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 120% และ 140%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขนาดมากกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE

ข้อมูลที่นำมาทดสอบนี้เป็นข้อมูลของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1000 kVA 3 ph 33 kV-400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ใช้ฉนวน Class A ข้อมูลที่ใช้ทำการวิเคราะห์มีดังนี้

- X คือ น้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวด = 3071.2 ปอนด์
- Y คือ น้ำหนักของตัวถังและข้อต่อต่างๆ = 1830.4 ปอนด์
- Z คือ จำนวนน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อน = 178.9 แกลลอน
- Θ_{α} คือ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด = 48 °C
- P_r คือ ค่าสูญเสียรวมทั้งหมดที่พิกัดโหลด = 12257 วัตต์
- K คือ โหลดที่หม้อแปลงจ่าย = 1.0 pu.
- R คือ อัตราส่วนของการสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่พิกัดต่อการสูญเสียขณะไม่จ่ายโหลด = 6.415
- Θ_{wo} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด = 7.76 °C
- t คือ ช่วงเวลาในการเกิดโหลดสูงสุด = 12 ชั่วโมง
- Θ_i คือ ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิน้ำมันด้านบน = 0.0 °C
- Θ_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม = 30 °C

นำข้อมูลของหม้อแปลงจำหน่ายมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยการป้อนข้อมูลของหม้อแปลงลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA แล้วทำการคำนวณ โดยทำการคำนวณ 2 แบบคือแบบที่อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 55 °C และแบบที่อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 65 °C

ผลการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 55 °C

- เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ที่พิกัดโหลด (T_r) = 2.5039 ชั่วโมง
- อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่โหลดใดๆ (Θ_{α}) = 48 °C
- เวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง (T_o) = 2.503 ชั่วโมง
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด (Θ_{α}) = 17.76 °C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน (Θ_{α}) = 17.76 °C
- อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อม (Θ_{α}) = 47.602 °C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ (Θ_{hs}) = 95.362 °C

- อายุการใช้งานของฉนวน = 62293.0038 ชั่วโมง หรือประมาณ 84.89 ปี
- ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน = 1.9264×10^{-2}

More than 500 kVA

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE

X	3071.2	Y	1830.4	Z	178.9	Θ_{or}	48.0
Pr	12257.0	K	1.0	R	6.415	Θ_{wo}	7.76
t	12.0	Θ_i	0.0	Θ_a	30.0		

AT 55 °C AT 65 °C

Tr = 2.5039 Θ_g = 17.76
 Θ_u = 48 Θ_o = 47.602
 τ_o = 2.5039 Θ_{hs} = 95.362
 Θ_{gr} = 17.76
Hours of life = 62293.0038 % Loss of life = 1.9264E-2

คำนวณ ดูข้อมูล **ตาราง** ดูข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.37 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C

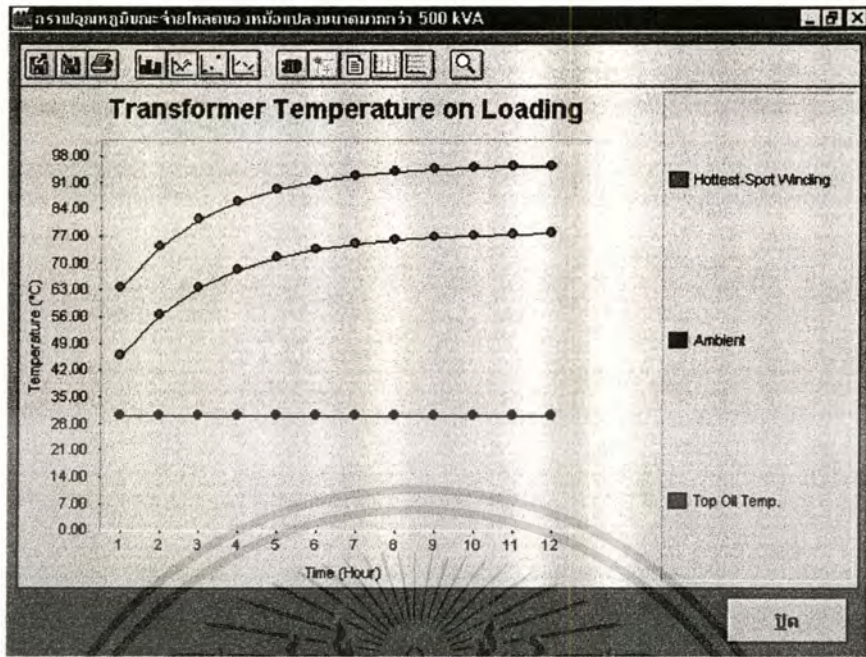
ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด

ตารางแสดงผลการคำนวณ			ข้อมูลของหม้อแปลง	
Hour	Hottest-spot temp.	Top oil temp.		
1	63.56	45.8	น้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวด (lb)	3071.2
2	74.17	56.41	น้ำหนักตัวถังและหม้อฉนวน (lb)	1830.4
3	81.28	63.52	จำนวนน้ำมัน (gallon)	178.9
4	86.04	68.28	อุณหภูมิพื้นน้ำมันด้านบน (K)	48.0
5	89.24	71.48	ค่าสูญเสียรวมทั้งหมด (w)	12257.0
6	91.39	73.63	Peak Load (pu)	1.0
7	92.83	75.07	Load loss / No load loss	6.415
8	93.79	76.03	อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (K)	7.76
9	94.44	76.68	ช่วงเวลาที่เกิด Peak Load (h)	12
10	94.88	77.12	อุณหภูมิน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (K)	0.0
11	95.17	77.41	ค่าเวลาที่ความร้อนของตัวน้ำมันคงที่ (h)	2.5039
12	95.36	77.6	ค่าเวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง	2.5039
			อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30.0
			อายุฉนวนโดยประมาณ (ปี)	7.11

พิมพ์ ปิด

ภาพที่ 7.38 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.39 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C

ผลการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 65 °C

- เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ที่พิกัดโหลด (T_r) = 2.5039 ชั่วโมง
- อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่โหลดใดๆ (Θ_{ou}) = 48 °C
- เวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง (T_o) = 2.5039 ชั่วโมง
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด (Θ_{br}) = 22.76 °C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน (Θ_b) = 22.76 °C
- อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิแวดล้อม (Θ_o) = 47.602 °C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ (Θ_{hs}) = 100.362 °C
- อายุการใช้งานของฉนวน = 191851.9722 ชั่วโมง หรือประมาณ 21.9 ปี
- ค่าการสูญเสียอายุการใช้งาน = 6.2548×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

More than 500 kVA

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE

X 3071.2 Y 1830.4 Z 178.9 Θ_{or} 48.0

Pr 12257.0 K 1.0 R 6.415 Θ_{wo} 7.76

t 12 Θ_i 0.0 Θ_a 30.0

ΔT 55 °C ΔT 65 °C

Tr = 2.5039 Θ_g = 22.76

Θ_u = 48 Θ_o = 47.602

τ_o = 2.5039 Θ_{hs} = 100.362

Θ_{gr} = 22.76

Hours of life = 191851.9722 % Loss of life = 6.2548E-3

คำนวณ ฐานข้อมูล ตาราง งานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.40 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

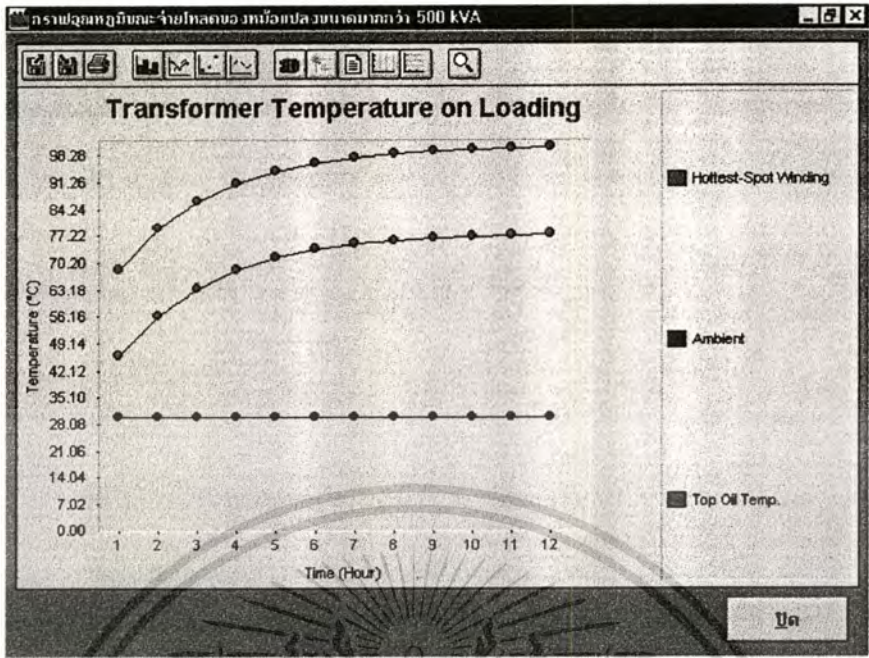
ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA ขณะจ่ายโหลด

ตารางแสดงผลการคำนวณ			ข้อมูลของหม้อแปลง	
Hour	Hottest-spot temp.	Top oil temp.	น้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวด (lb)	3071.2
1	68.56	45.8	น้ำหนักตัวถังและข้อต่อ (lb)	1830.4
2	79.17	56.41	จำนวนน้ำมัน (gallon)	178.9
3	86.28	63.52	อุณหภูมิขั้วน้ำมันด้านบน (K)	48.0
4	91.04	68.28	ค่าสูญเสียรวมทั้งหมด (w)	12257.0
5	94.24	71.48	Peak Load (pu.)	1.0
6	96.39	73.63	Load loss / No load loss	6.415
7	97.83	75.07	อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (K)	7.76
8	98.79	76.03	ช่วงเวลาที่เกิด Peak Load (h)	12
9	99.44	76.68	อุณหภูมิขั้วน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (K)	0.0
10	99.88	77.12	ค่าเวลาที่ความร้อนของตัวน้ำมันคงที่ (h)	2.5039
11	100.17	77.41	ค่าเวลาคงตัวของความร้อนในหม้อแปลง	2.5039
12	100.36	77.6	อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30.0
			อายุขัยโดยประมาณ (ปี)	21.9

พิมพ์ ปิด

ภาพที่ 7.41 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

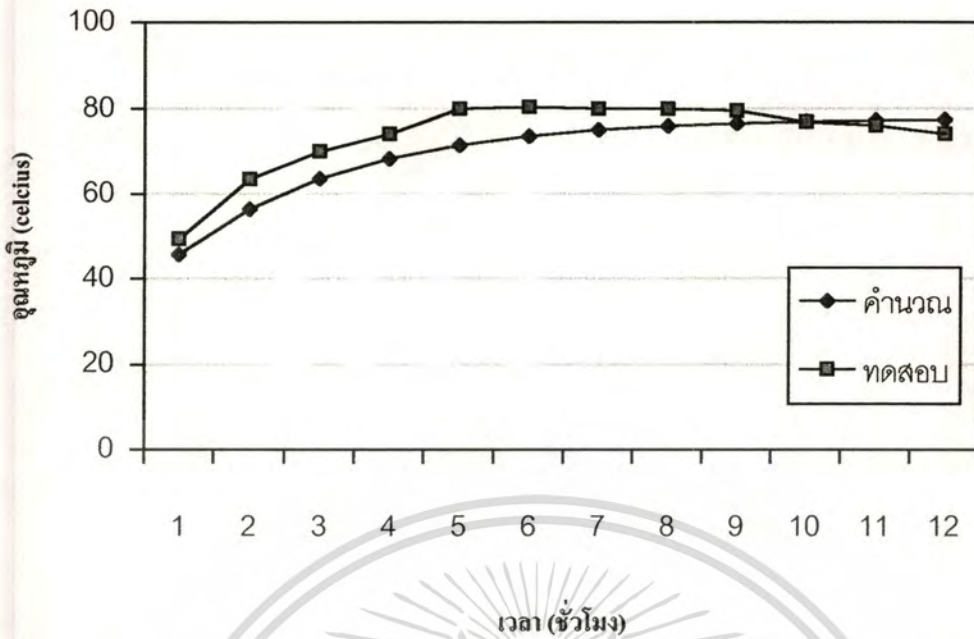


ภาพที่ 7.42 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEEE อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C

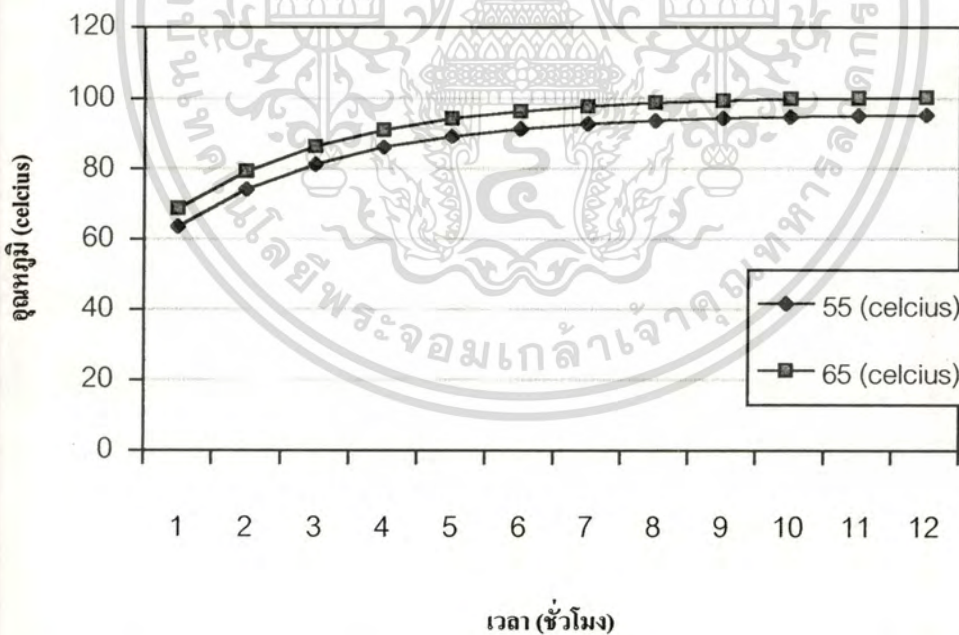
ตารางที่ 7.8 อุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต

Time(Hour)	Ambient Temp. (°C)	Top Oil Temp (°C)	Top Oil Rise (°C)
1	34	49.5	15.5
2	34	63.5	29.5
3	35	70	35
4	35	74	39
5	35	80	45
6	35	80.5	45.5
7	32	80	48
8	32	80	48
9	32	79.5	47.5
10	31	77	46
11	31	76	45
12	31	74	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

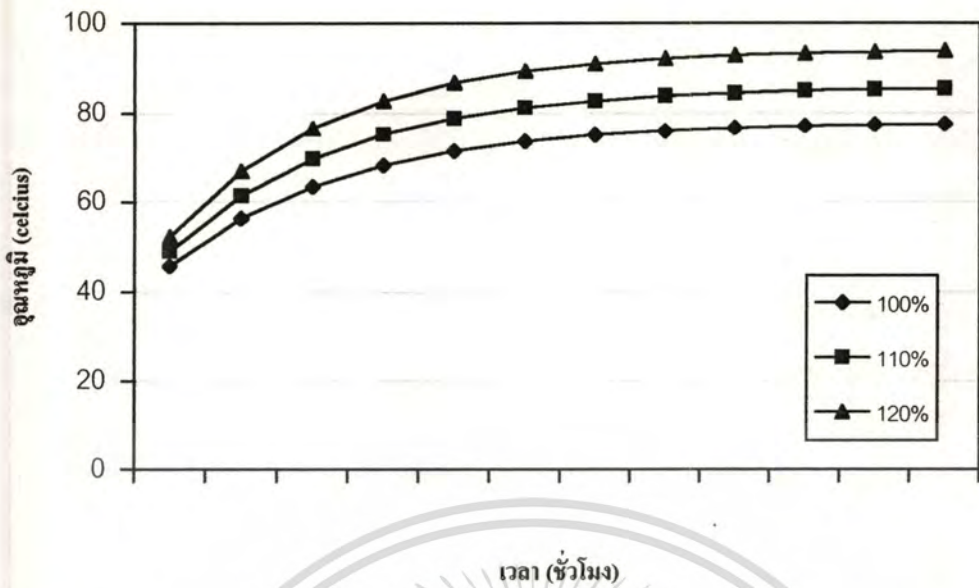


ภาพที่ 7.43 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบที่พิกัด



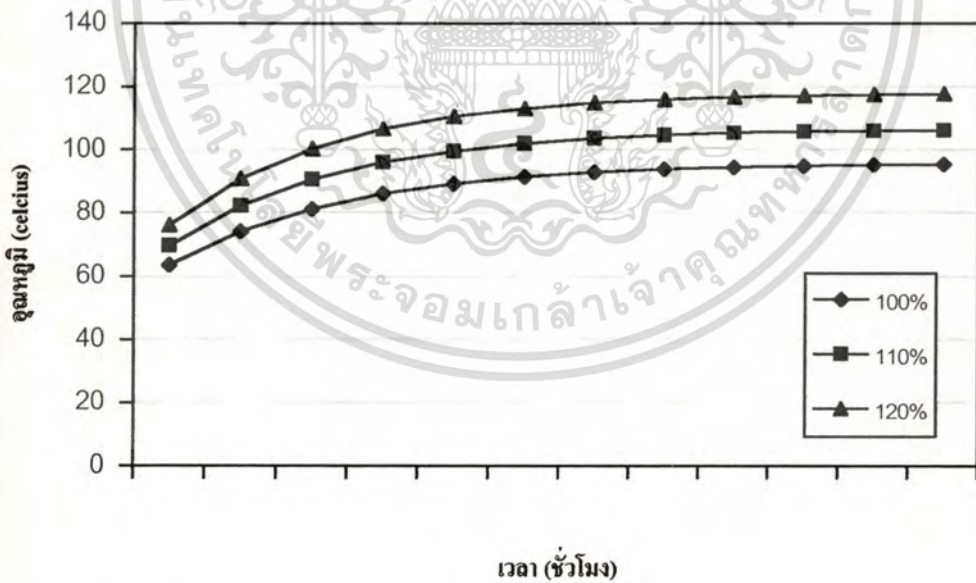
ภาพที่ 7.44 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



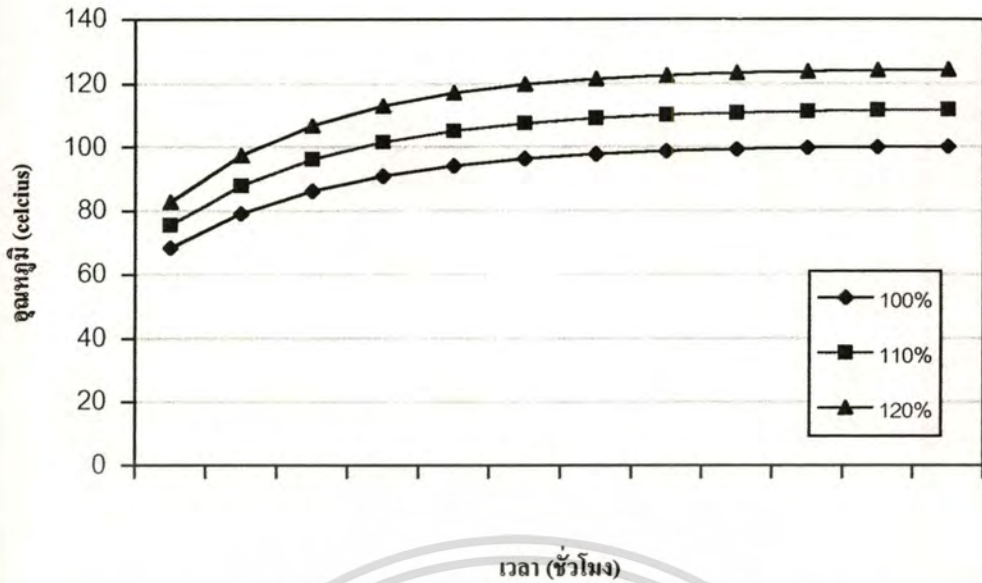
ภาพที่ 7.45 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 110% และ 120%

หมายเหตุ อุณหภูมิน้ำมันด้านบนจากการคำนวณแบบอุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C จะเท่ากัน

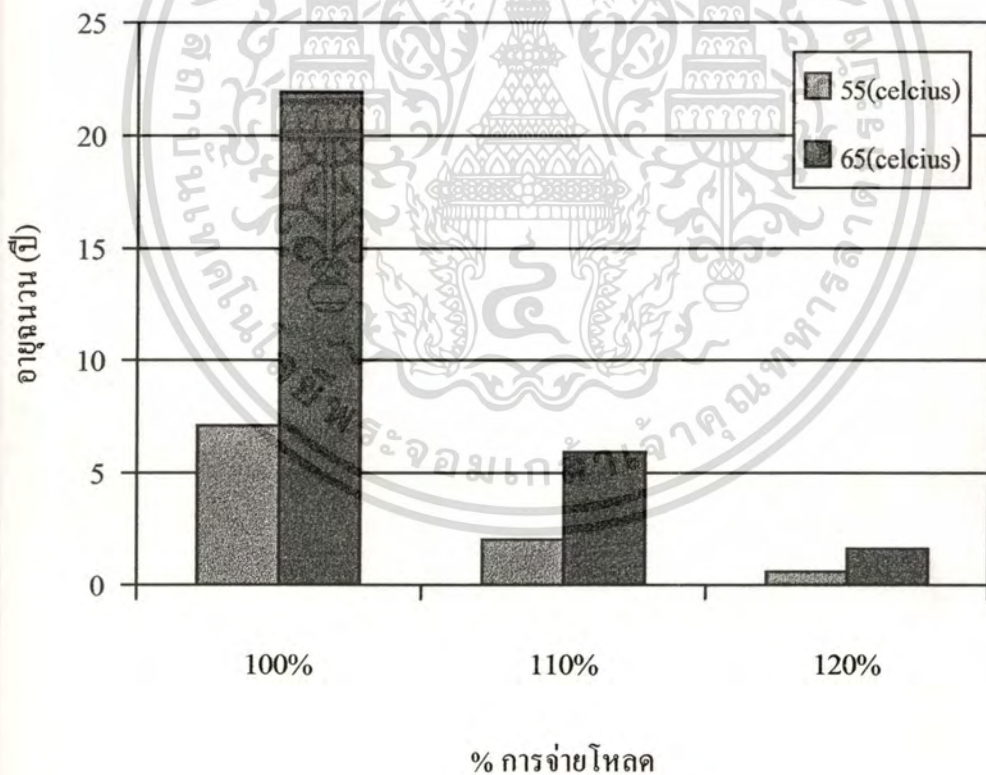


ภาพที่ 7.46 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 110% และ 120%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.47 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 110% และ 120%



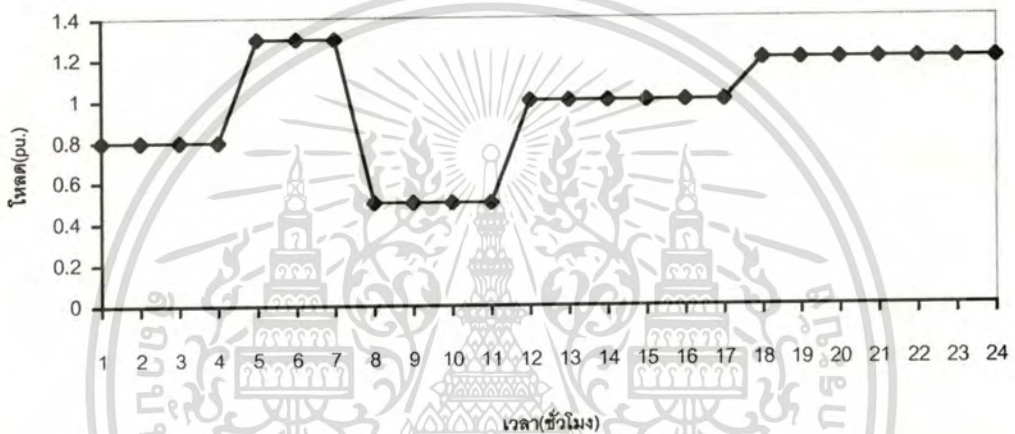
ภาพที่ 7.48 กราฟเปรียบเทียบอายุการใช้งานของฉนวนของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA ที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิเพิ่ม 55 °C และ 65 °C ขณะจ่ายโหลด 100%, 110% และ 120%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

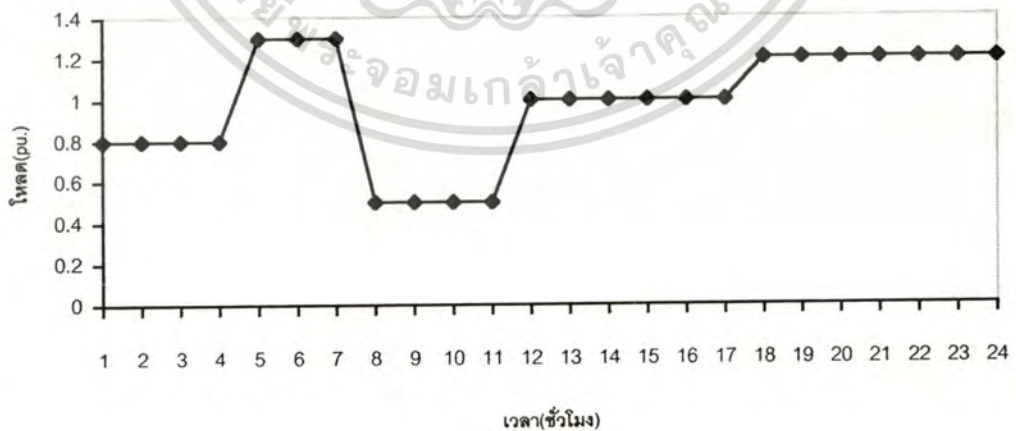
7.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายโหลด ตามมาตรฐาน

IEC

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายโหลดโดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA และ 250 kVA อย่างละ 1 เครื่องทำการวิเคราะห์หาอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆของการจ่ายโหลดใน 24 ชั่วโมง โดยกำหนดให้โหลดที่หม้อแปลงจ่ายมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามลักษณะการใช้งานจริงดังภาพที่ 7.49 และ 7.50



ภาพที่ 7.49 แสดงโหลดที่หม้อแปลงจ่ายใน 24 ชั่วโมง แบบที่ 1



ภาพที่ 7.50 แสดงโหลดที่หม้อแปลงจ่ายใน 24 ชั่วโมง แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 1

หม้อแปลงขนาด 100 kVA 3 ph 22kV-400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ข้อมูลที่ใช้ทำการวิเคราะห์มีดังนี้

ขนาดของหม้อแปลง	: 100 kVA
แรงดันเอาต์พุต	: 400 V
อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน	: 36 °C
Load loss/No load loss	: 6.23
ช่วงของอุณหภูมิจุดร้อนสุดถึงอุณหภูมิน้ำมันด้านบน	: 6.4 °C
Oil Temperature Exponent	: 0.8
Winding Temperature Exponent	: 0.8
อุณหภูมิแวดล้อม	: 30 °C

กรณีที่ 1 จ่ายโหลดตามภาพที่ 7.49

ชั่วโมงที่	ช่วงเวลา (ชั่วโมง)	โหลด (pu.)
1-12	12	1.0
13-16	4	1.2
17-24	8	0.5

นำข้อมูลทั้งหมดของหม้อแปลงมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยป้อนข้อมูลลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC แล้วเริ่มทำการคำนวณ

ผลการคำนวณ

อุณหภูมิน้ำมันด้านบน	: 85.36 °C
อุณหภูมิจุดร้อนสุด	: 93.92 °C
ค่าสูญเสียอายุการใช้งาน	: 0.008 pu.

ชั่วโมงที่	อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (°C)	อุณหภูมิจุดร้อนสุด (°C)
1-12	66.0	72.40
13-16	85.36	93.92
17-24	38.11	40.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Loading IEC

100 kVA ของหม้อแปลง 0.8 Oil Temp. Exponent

400 แรงดันเอาต์พุต 1.6 Winding Temp. Exponent

36 Top-Oil Temp. rise 6.23 Ratio of load loss to no-load loss

6.4 Hottest-spot to Top-oil Temp. rise 30 อุณหภูมิแวดล้อม

3 mla 1 mla

Duration (h)	Load (pu)		
12	1.0	85.36	Top-oil Temperature
4	1.2		
8	0.5	93.92	Hottest-spot Temperature
		0.008	Relative ageing

แสดง ลบบัญชี ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.51 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

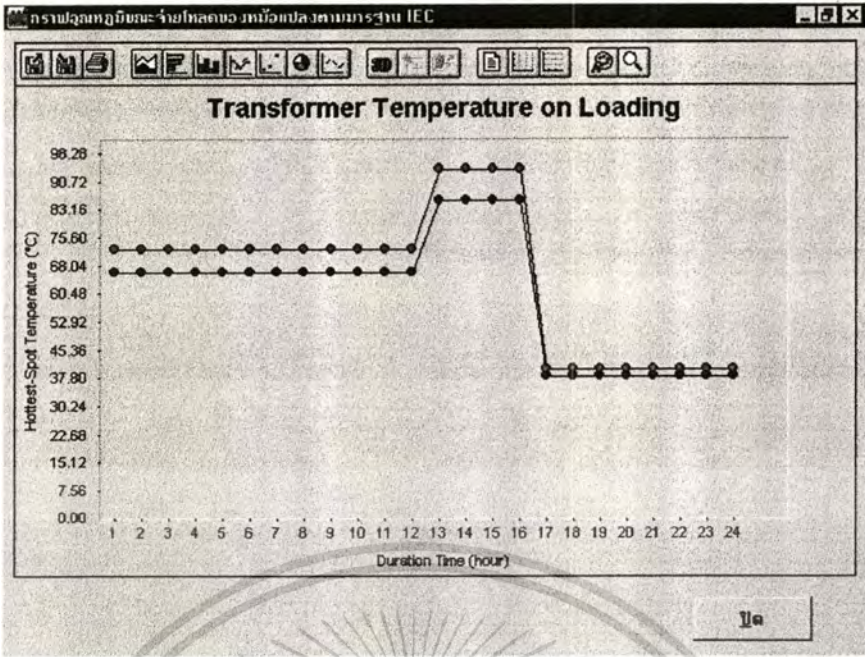
ตารางแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ตามมาตรฐาน IEC

ผลการคำนวณ				ข้อมูลของหม้อแปลง	
ช่วงเวลา	จำนวนชั่วโมง	Top oil temp.	Hottest spot temp.	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	100
1	12	66.00	72.40	แรงดันเอาต์พุต (V)	400
2	4	85.36	93.92	อุณหภูมิที่ขึ้นกับน้ำหนักขดลวด (K)	36
3	8	38.11	40.22	Load Loss/No Load Loss	6.23
4	0	0.00	0.00	ช่วงของอุณหภูมิวัดรอบสุดถึง	
5	0	0.00	0.00	อุณหภูมิที่ขึ้นกับน้ำหนักขดลวด (K)	6.4
6	0	0.00	0.00	Oil Temp. exponent	0.8
				Winding Temp. exponent	1.6
				อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30
				อายุขัยโดยประมาณ (pu.)	0.008

พิมพ์ ปิด

ภาพที่ 7.52 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.53 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

กรณีที่ 2 จ่ายโหลดตามภาพที่ 7.50

ชั่วโมงที่	ช่วงเวลา (ชั่วโมง)	โหลด (pu.)
1-4	4	0.8
5-7	3	1.3
8-11	4	0.5
12-17	6	1.0
18-24	7	1.2

ผลการคำนวณ

- อุณหภูมิน้ำมันด้านบน : 79.63 °C
- อุณหภูมิจุดร้อนสุด : 89.37 °C
- ค่าสูญเสียอาชุกรใช้งาน : 0.005 pu.

ชั่วโมงที่	อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (°C)	อุณหภูมิจุดร้อนสุด (°C)
1-4	56.75	61.23
5-7	79.63	89.37
8-11	36.13	38.24
12-17	31.84	38.24
18-24	41.18	49.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Loading IEC

การคำนวณผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

100

kVA ของหม้อแปลง

0.8

Oil Temp. Exponent

400

แรงดันเอาต์พุต

1.6

Winding Temp. Exponent

36

Top-Oil Temp. rise

6.23

Ratio of load loss to no-load loss

6.4

Hottest-spot to Top-oil Temp. rise

30

อุณหภูมิแวดล้อม

C 3 ฝส

C 1 ฝส

Duration (h)

4

3

4

6

7

Load (pu.)

0.8

1.3

0.5

1.0

1.2

79.63

Top-oil Temperature

89.37

Hottest-spot Temperature

0.005

Relative ageing

ตกลง

ลบข้อมูล

ตาราง

งานข้อมูล

กราฟ

ปิด

ภาพที่ 7.54 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

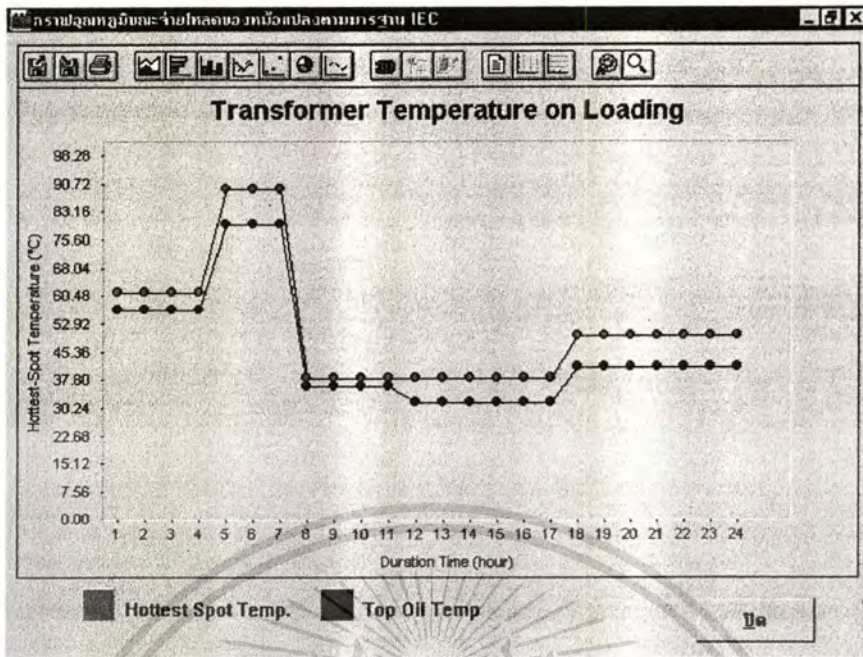
ผลการคำนวณ				ข้อมูลของหม้อแปลง	
ช่วงเวลา	จำนวนชั่วโมง	Top oil temp.	Hottest spot temp.	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	100
1	4	56.75	61.23	แรงดันเอาต์พุต (V)	400
2	3	79.63	89.37	อุณหภูมิพื้นน้ำกับด้านบน (K)	36
3	4	36.13	38.24	Load Loss/No Load Loss	6.23
4	6	31.84	38.24	ช่วงของอุณหภูมิจุดร้อนสุดถึง	
5	7	41.18	49.75	อุณหภูมิกับด้านบน (K)	6.4
6	0	0.00	0.00	Oil Temp. exponent	0.8
				Winding Temp. exponent	1.6
				อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30
				อายุฉนวนโดยประมาณ (pu.)	0.005

พิมพ์

ปิด

ภาพที่ 7.55 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.56 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

ตัวอย่างที่ 2

หม้อแปลงขนาด 250 kVA 3 ph 22kV-400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ข้อมูลที่ใช้ทำการ

วิเคราะห์มีดังนี้

ขนาดของหม้อแปลง : 250 kVA

แรงดันเอาต์พุต : 400 V

อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน : 40 °C

Load loss/No load loss : 6.2

ช่วงของอุณหภูมิจุดร้อนสุดถึงอุณหภูมิน้ำมันด้านบน : 10.3 °C

Oil Temperature Exponent : 0.8

Winding Temperature Exponent : 1.6

อุณหภูมิแวดล้อม : 30 °C

กรณีที่ 1 จ่ายโหลดตามภาพที่ 7.49

ชั่วโมงที่	ช่วงเวลา (ชั่วโมง)	โหลด (pu.)
1-12	12	1.0
13-16	4	1.2
17-24	8	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำข้อมูลทั้งหมดของหม้อแปลงมาทำการวิเคราะห์ด้วย TPA โดยป้อนข้อมูลลงในฟอร์ม การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC แล้วเริ่มทำการคำนวณ

ผลการคำนวณ

อุณหภูมิน้ำมันด้านบน : 90.52 °C
 อุณหภูมิจุดร้อนสุด : 104.30 °C
 ค่าสูญเสียอายุการใช้งาน : 0.026 pu.

ชั่วโมงที่	อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (°C)	อุณหภูมิจุดร้อนสุด (°C)
1-12	70.0	80.30
13-16	90.52	104.30
17-24	40.97	44.37

The screenshot shows the 'Loading IEC' software interface. It contains input fields for transformer parameters and calculated results. The input fields are: kVA ของหม้อแปลง (250), แรงดันเลาท์ท (400), Top-Oil Temp. rise (40), Hottest-spot to Top-oil Temp. rise (10.3), Oil Temp. Exponent (0.8), Winding Temp. Exponent (1.6), Ratio of load loss to no-load loss (6.2), and อุณหภูมิแวดล้อม (30). The calculated results are: Top-oil Temperature (90.52), Hottest-spot Temperature (104.30), and Relative ageing (0.026). The interface also includes a table for Duration (h) and Load (pu.) with values 12, 4, 8, 1.0, 1.2, 0.5. At the bottom, there are buttons for 'ตกลง' (OK), 'ลบข้อมูล' (Clear data), 'ตาราง' (Table), 'ฐานข้อมูล' (Database), 'กราฟ' (Graph), and 'ปิด' (Close).

ภาพที่ 7.57 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

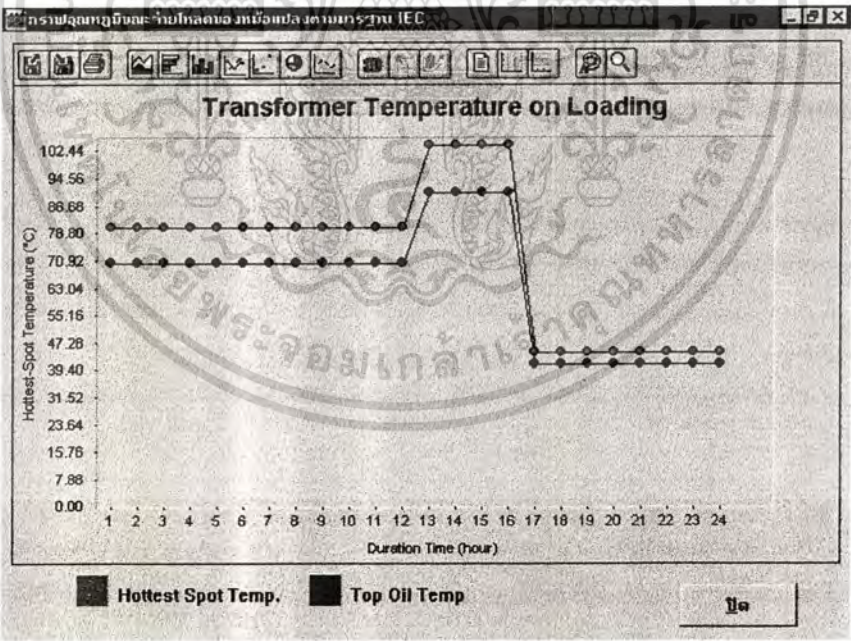
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณ				ข้อมูลของหม้อแปลง	
ช่วงเวลา	จำนวนชั่วโมง	Top oil temp.	Hottest spot temp.	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	250
1	12	70.00	80.30	แรงดันเอาท์พุท (V)	400
2	4	90.52	104.30	อุณหภูมิที่ขึ้นกับด้านบน (K)	40
3	8	40.97	44.37	Load Loss/No Load Loss	6.2
4	0	0.00	0.00	ช่วงของอุณหภูมิจุดร้อนสุดถึง	
5	0	0.00	0.00	อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (K)	10.3
6	0	0.00	0.00	Oil Temp. exponent	0.8
				Winding Temp. exponent	1.6
				อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30
				อายุฉนวนโดยประมาณ (pu.)	0.026

พิมพ์

ปิด

ภาพที่ 7.58 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC



ภาพที่ 7.59 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2 จ่ายโหลดตามภาพที่ 7.50

ชั่วโมงที่	ช่วงเวลา (ชั่วโมง)	โหลด (pu.)
1-4	4	0.8
5-7	3	1.3
8-11	4	0.5
12-17	6	1.0
18-24	7	1.2

ผลการคำนวณ

อุณหภูมิน้ำมันด้านบน : 82.24 °C

อุณหภูมิจุดร้อนสุด : 97.92 °C

ค่าสูญเสียอายุการใช้งาน : 0.012 pu.

ชั่วโมงที่	อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (°C)	อุณหภูมิจุดร้อนสุด (°C)
1-4	59.73	66.93
5-7	82.24	97.92
8-11	38.19	41.59
12-17	31.29	41.59
18-24	40.46	54.25

The screenshot shows the 'Loading IEC' software interface. It includes input fields for transformer parameters and a table for load duration. The calculated results are displayed on the right side of the interface.

Duration (h)	Load (pu.)	Top-oil Temperature	Hottest-spot Temperature	Relative ageing
4	0.8	82.24	97.92	0.012
3	1.3			
4	0.5			
6	1.0			
7	1.2			

ภาพที่ 7.60 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตาม

มาตรฐาน IEC

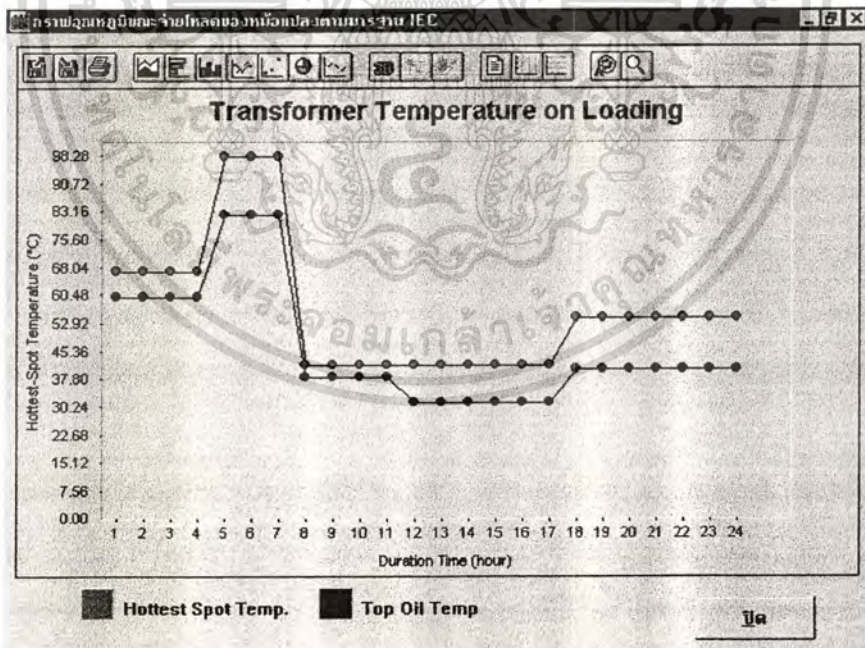
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณ				ข้อมูลของหม้อแปลง	
ช่วงเวลา	จำนวนชั่วโมง	Top oil temp.	Hottest spot temp.	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	250
1	4	59.73	66.93	แรงดันเอาต์พุต (V)	400
2	3	82.24	97.92	อุณหภูมิชั้นน้ำมันด้านบน (K)	40
3	4	38.19	41.59	Load Loss/No Load Loss	6.2
4	6	31.29	41.59	ช่วงของอุณหภูมิจุดร้อนสุดถึง	
5	7	40.46	54.25	อุณหภูมิชั้นน้ำมันด้านบน (K)	10.3
6	0	0.00	0.00	Oil Temp. exponent	0.8
				Winding Temp. exponent	1.6
				อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	30
				อายุฉนวนโดยประมาณ (pu.)	0.012

พิมพ์

ปิด

ภาพที่ 7.61 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC



ภาพที่ 7.62 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร ตาม
มาตรฐาน IEEE

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร โดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA, 160 kVA และ 250 kVA อย่างละ 3 เครื่อง ที่ได้ทำการออกแบบ, ผลิตและทำการทดสอบแล้วจริงในพิกัดเดียวกันแต่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบต่างกัน ตัวอย่างการวิเคราะห์มีดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 หม้อแปลงขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 22kV-400/230V เวกเตอร์รูป Dyn11 ใช้ฉนวน Class A

ตารางที่ 7.9 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 100 kVA

ข้อมูลของหม้อแปลง	เครื่องที่		
	1	2	3
Capacity (kVA)	100	100	100
Impedance(pu.)	0.0377	0.0387	0.0395
Eddy current loss (pu.)	0.00771	0.00725	0.00816
Hottest-spot Temp. (°C)	68	70	66
Average wdg. Temp. rise (°C)	41.4	44.1	40.2
Resistance (Ω)	0.01601	0.01783	0.01367
Weight of copper (lb.)	110.2	92.568	145.46
Weight of core (lb.)	440.8	445.2	473.86
Cross-section area of conductor (mm ²)	31.98	27.71	40.7
Cross-section area of insulator (mm ²)	7.02	6.83	8.47

นำข้อมูลทั้งหมดของหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่องมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยป้อนข้อมูลลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE แล้วเริ่มทำการคำนวณเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ได้จากหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่อง

ผลการคำนวณ

- หม้อแปลงเครื่องที่ 1

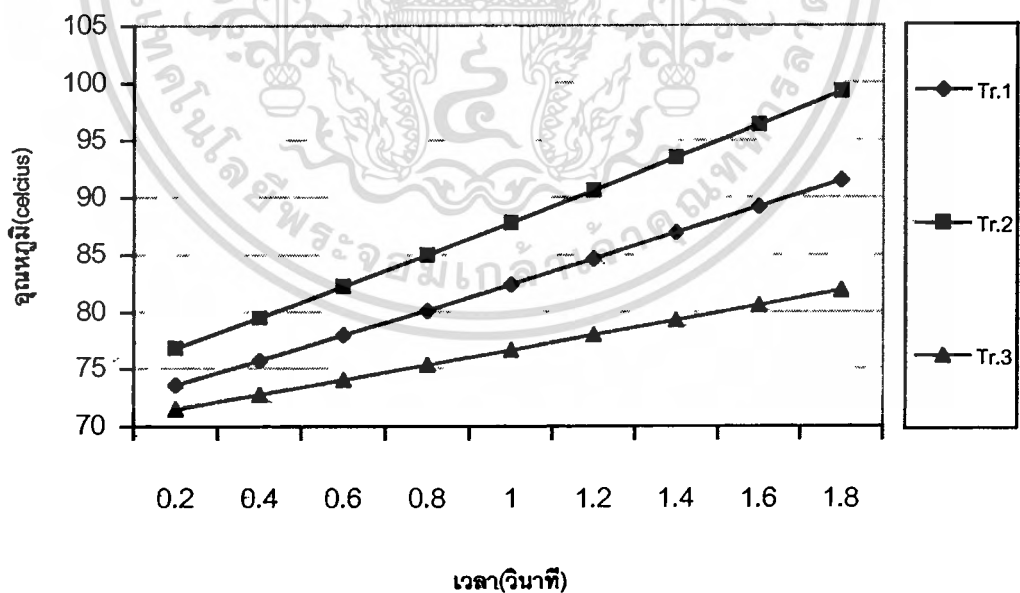
กระแสลัดวงจร : 3.83 kA
 เวลาในการลัดวงจร : 1.78 sec.
 อุณหภูมิสุดท้าย : 91.28 °C

- หม้อแปลงเครื่องที่ 2

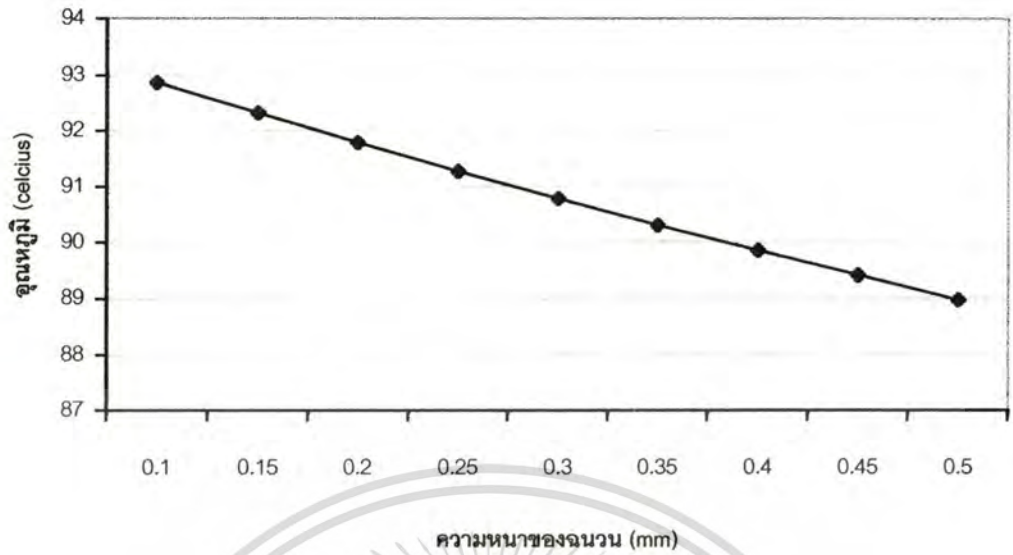
กระแสลัดวงจร : 3.73 kA
 เวลาในการลัดวงจร : 1.87 sec.
 อุณหภูมิสุดท้าย : 100.3 °C

- หม้อแปลงเครื่องที่ 3

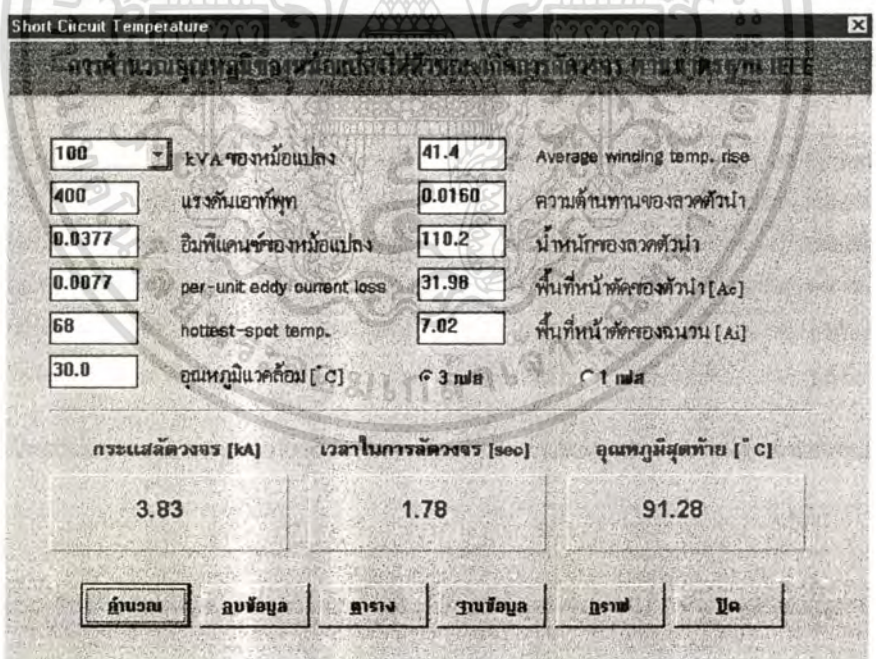
กระแสลัดวงจร : 3.65 kA
 เวลาในการลัดวงจร : 1.95 sec.
 อุณหภูมิสุดท้าย : 82.93 °C



ภาพที่ 7.63 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 เครื่อง



ภาพที่ 7.64 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิสุดท้ายของการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 100 kVA กับความหนาของฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำ

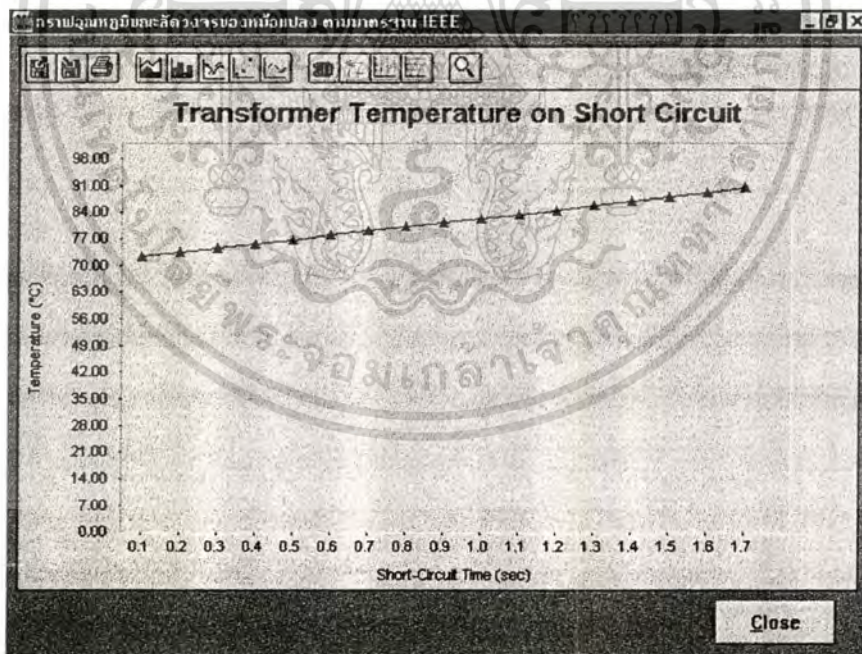


ภาพที่ 7.65 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE		ข้อมูลของหม้อแปลง	
Time	Final Temperature		
0.3	74.66	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	100
0.4	75.75	แรงดันอาร์ก (V)	400
0.5	76.85	อินทิเกรตของหม้อแปลง	0.0377
0.6	77.96	per-unit eddy current loss	0.0077
0.7	79.06	อุณหภูมิความร้อนสุดของหม้อแปลง	68
0.8	80.18	อุณหภูมิแวดล้อม	30.0
0.9	81.29	อุณหภูมิพื้นผิวของขดลวด	41.4
1.0	82.42	resistance loss	0.0160
1.1	83.54	น้ำหนักของลวดตัวนำ	110.2
1.2	84.67	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ	31.98
1.3	85.81	พื้นที่หน้าตัดของฉนวน	7.02
1.4	86.95	กระแสลัดวงจร (kA)	3.83
1.5	88.09	เวลาในการลัดวงจร (sec.)	1.78
1.6	89.24		
1.7	90.39		

ภาพที่ 7.66 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE



ภาพที่ 7.67 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2 หม้อแปลงขนาด 160 kVA 3 ph 50 Hz 22kV-400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn11 ใช้
ฉนวน Class A

ตารางที่ 7.10 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 160 kVA

ข้อมูลของหม้อแปลง	เครื่องที่		
	1	2	3
Capacity (kVA)	160	160	160
Impedance(pu.)	0.0376	0.0405	0.0391
Eddy current loss (pu.)	0.00907	0.0113	0.0816
Hottest-spot Temp. (°C)	69	70	68
Average wdg. Temp. rise (°C)	46.1	47.8	47
Resistance (Ω)	0.00868	0.007839	0.00864
Weight of copper (lb.)	163.096	152.076	169.708
Weight of core (lb.)	551	581.856	634.752
Cross-section area of conductor (mm ²)	27.13	54.26	27.62
Cross-section area of insulator (mm ²)	5.816	8.97	6.3

นำข้อมูลทั้งหมดของหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่องมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยป้อนข้อมูลลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE แล้วเริ่มทำการคำนวณเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ได้จากหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่อง

ผลการคำนวณ

- หม้อแปลงเครื่องที่ 1

กระแสลัดวงจร : 6.14 kA

เวลาในการลัดวงจร : 1.77 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 94.81 °C

- หม้อแปลงเครื่องที่ 2

กระแสลัดวงจร : 5.7 kA

เวลาในการลัดวงจร : 2.05 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 96.29 °C

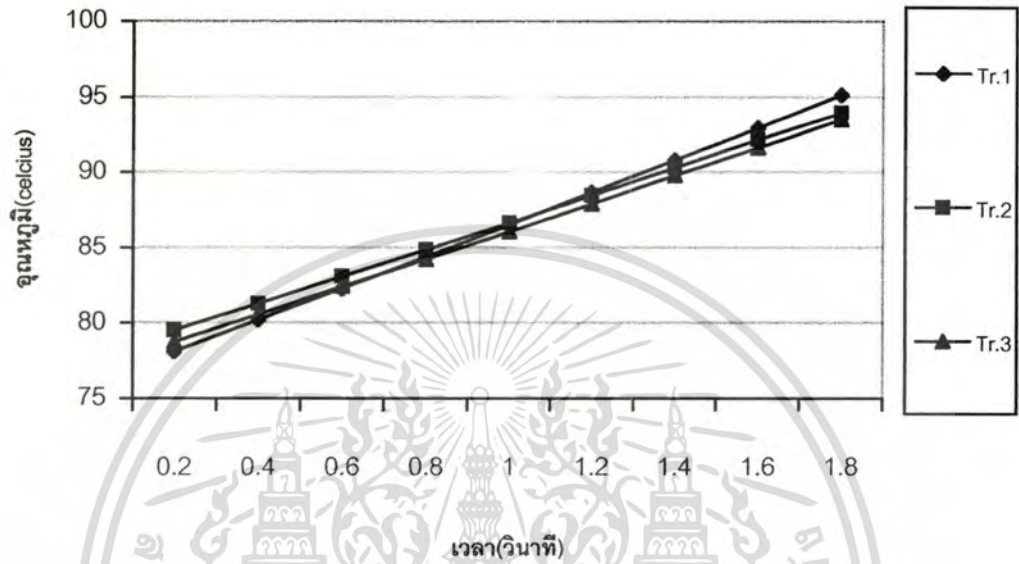
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หม้อแปลงเครื่องที่ 3

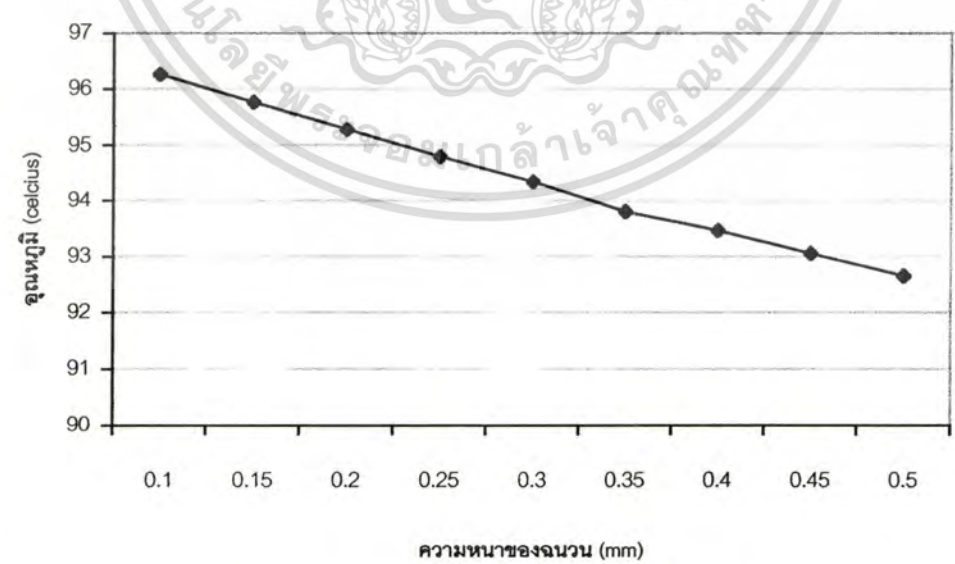
กระแสลัดวงจร : 5.91 kA

เวลาในการลัดวงจร : 1.91 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 94.59 °C



ภาพที่ 7.68 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 เครื่อง



ภาพที่ 7.69 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิสุดท้ายของการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 160 kVA กับความหนาของฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Short Circuit Temperature

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE

160	kVA ของหม้อแปลง	46.1	Average winding temp. rise
400	แรงดันเอาต์พุต	0.0087	ความต้านทานของลวดตัวนำ
0.0376	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	163.10	น้ำหนักของลวดตัวนำ
0.0091	per-unit eddy current loss	27.13	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ [Ac]
69	hottest-spot temp.	5.816	พื้นที่หน้าตัดของฉนวน [Ai]
30.0	อุณหภูมิแวดล้อม [°C]	๓ เฟส	๑ เฟส

กระแสลัดวงจร [kA]	เวลาในการลัดวงจร [sec]	อุณหภูมิสุดท้าย [°C]
6.14	1.77	94.81

คำนวณ ดูข้อมูล ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.70 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

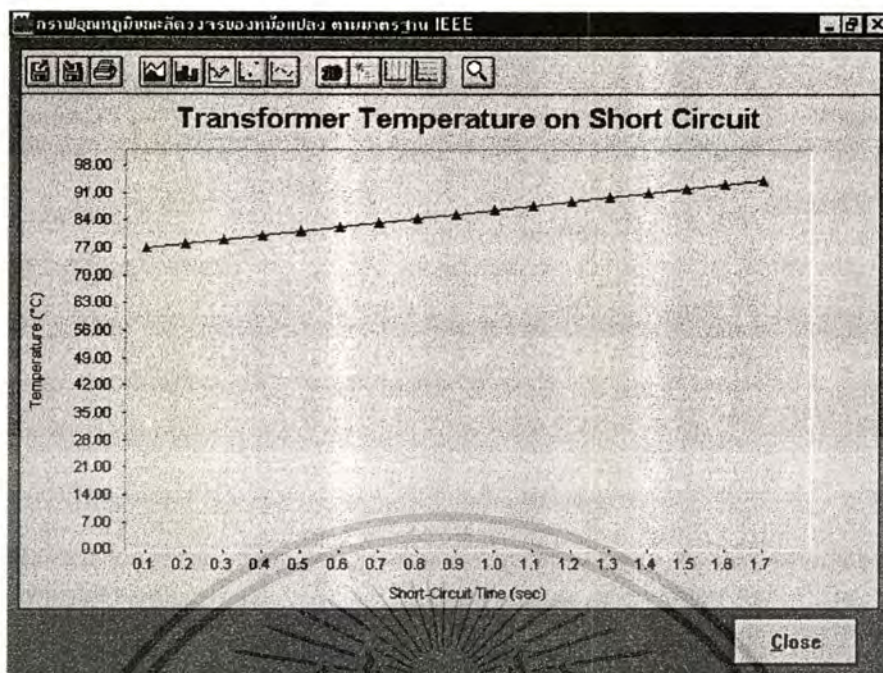
ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

ตารางแสดงผลการคำนวณ		ข้อมูลของหม้อแปลง	
Time	Final Temperature		
0.3	79.19	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	160
0.4	80.23	แรงดันเอาต์พุต (V)	400
0.5	81.27	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	0.0376
0.6	82.31	per-unit eddy current loss	0.0091
0.7	83.36	อุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลง	69
0.8	84.41	อุณหภูมิแวดล้อม	30.0
0.9	85.47	อุณหภูมิพื้นผิวร้อนที่สุดของขดลวด	46.1
1.0	86.53	resistance loss	0.0087
1.1	87.6	น้ำหนักของลวดตัวนำ	163.10
1.2	88.67	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ	27.13
1.3	89.74	พื้นที่หน้าตัดของฉนวน	5.816
1.4	90.82	กระแสลัดวงจร (kA)	6.14
1.5	91.9	เวลาในการลัดวงจร (sec.)	1.77
1.6	92.98		
1.7	94.07		

พิมพ์ ปิด

ภาพที่ 7.71 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.72 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

ตัวอย่างที่ 3 หม้อแปลงขนาด 250 kVA 3 ph 50 Hz 22kV-400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn11 ใช้ฉนวน Class A

ตารางที่ 7.11 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 250 kVA

ข้อมูลของหม้อแปลง	เครื่องที่		
	1	2	3
Capacity (kVA)	250	250	250
Impedance(pu.)	0.0373	0.037	0.0425
Eddy current loss (pu.)	0.00862	0.00907	0.00635
Hottest-spot Temp. (°C)	70	72.3	67
Average wdg. Temp. rise (°C)	51.3	52.1	42.3
Resistance (Ω)	0.00463	0.00533	0.00414
Weight of copper (lb.)	220.4	180.73	264.48
Weight of core (lb.)	837.52	815.48	934.5
Cross-section area of conductor(mm ²)	42.64	36.24	40.7
Cross-section area of insulator (mm ²)	7.51	7.22	8.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำข้อมูลทั้งหมดของหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่องมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยป้อนข้อมูลลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEEE แล้วเริ่มทำการคำนวณเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ได้จากหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่อง

ผลการคำนวณ

- หม้อแปลงเครื่องที่ 1

กระแสลัดวงจร : 9.67 kA

เวลาในการลัดวงจร : 1.74 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 99.49 °C

- หม้อแปลงเครื่องที่ 2

กระแสลัดวงจร : 9.75 kA

เวลาในการลัดวงจร : 1.71 sec.

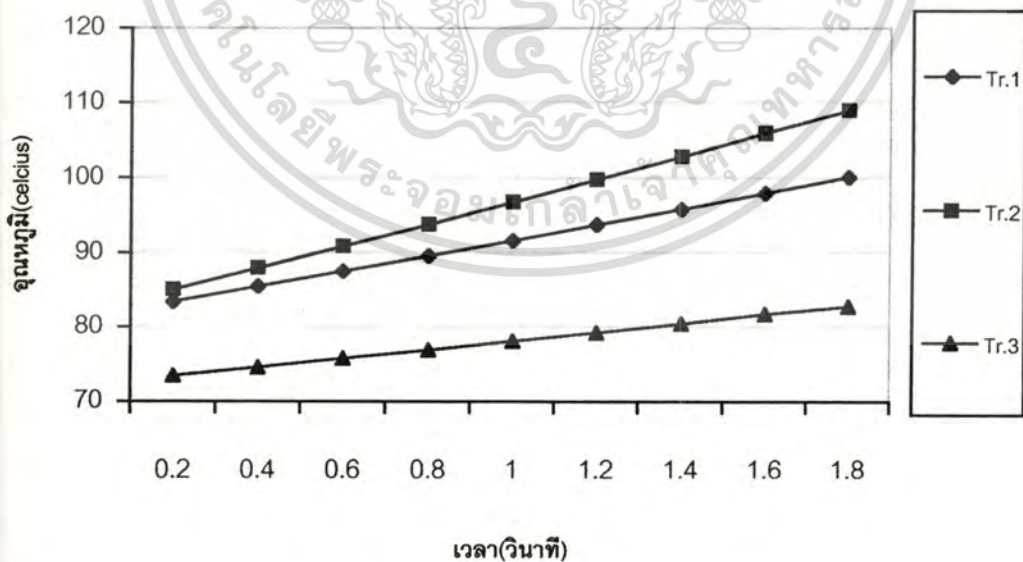
อุณหภูมิสุดท้าย : 107.65 °C

- หม้อแปลงเครื่องที่ 3

กระแสลัดวงจร : 8.49 kA

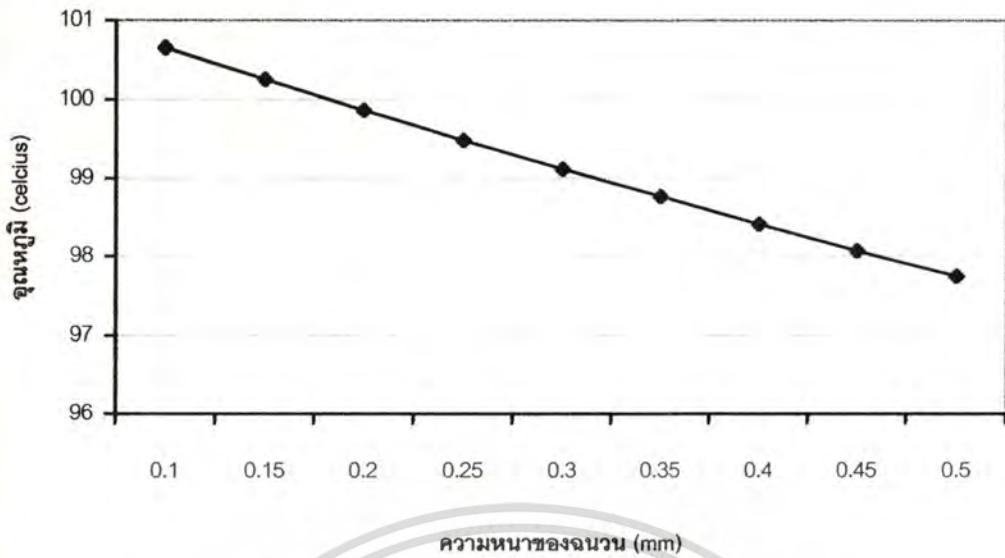
เวลาในการลัดวงจร : 2.26 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 85.47 °C



ภาพที่ 7.73 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.74 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิสุดท้ายของการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 250 kVA กับความหนาของฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำ

Short Circuit Temperature

การคำนวณอุณหภูมิของฉนวนเมื่อป้อนค่าตามองค์การมาตรฐาน IEEE

250	kVA ของหม้อแปลง	51.3	Average winding temp. rise
400	แรงดันเอาต์พุต	0.0046	ความต้านทานของลวดตัวนำ
0.0373	อินพีแดนซ์ของหม้อแปลง	220.4	น้ำหนักของลวดตัวนำ
0.0086	per-unit eddy current loss	42.64	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ [A _c]
70	hottest-spot temp.	7.51	พื้นที่หน้าตัดของฉนวน [A _i]
30.0	อุณหภูมิแวดล้อม [°C]	3 m/s	1 m/s

กระแสลัดวงจร [kA]	เวลาในการลัดวงจร [sec]	อุณหภูมิสุดท้าย [°C]
9.67	1.74	99.49

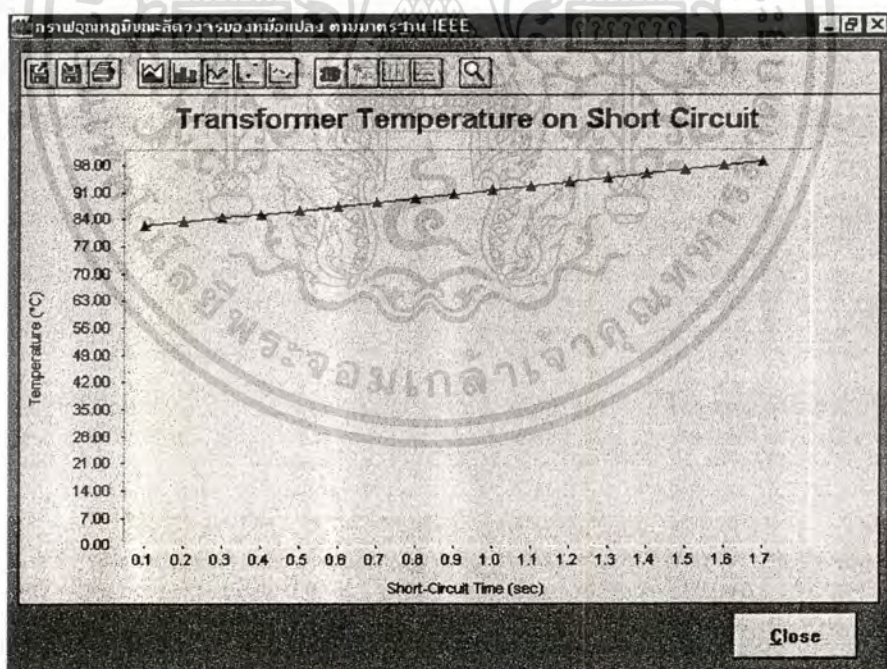
คำนวณ ดูข้อมูล ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.75 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการคำนวณ		ข้อมูลของหม้อแปลง	
Time	Final Temperature	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	250
0.3	84.36	แรงดันเอาต์พุต (V)	400
0.4	85.38	อินดัคแตนซ์ของหม้อแปลง	0.0373
0.5	86.41	per-unit eddy current loss	0.0086
0.6	87.44	อุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลง	70
0.7	88.48	อุณหภูมิแวดล้อม	30.0
0.8	89.52	อุณหภูมิชั้นฉนวนของขดลวด	51.3
0.9	90.57	resistance loss	0.0046
1.0	91.62	น้ำหนักของลวดตัวนำ	220.4
1.1	92.67	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ	42.64
1.2	93.73	พื้นที่หน้าตัดของฉนวน	7.51
1.3	94.79		
1.4	95.85	กระแสลัดวงจร (kA)	9.67
1.5	96.92	เวลาในการลัดวงจร (sec.)	1.74
1.6	97.99		
1.7	99.07		

ภาพที่ 7.76 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE



ภาพที่ 7.77 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC ซึ่งตามมาตรฐาน IEC นี้ผลของอุณหภูมิสุดท้ายที่วิเคราะห์ได้นั้นจะเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่คิดเฉพาะที่ลวดตัวนำเท่านั้นจะไม่รวมการสะสมความร้อนที่วัสดุอื่นๆเช่น น้ำมัน, ฉนวนและแกนเหล็กของหม้อแปลง การวิเคราะห์ใช้ข้อมูลของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA, 160 kVA และ 250 kVA อย่างละ 3 เครื่อง ตัวอย่างการวิเคราะห์มีดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 หม้อแปลงขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 22kV-400/230V เวคเตอร์กรุป Dyn11 ใช้ฉนวน Class A

ตารางที่ 7.12 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 100 kVA

ข้อมูลของหม้อแปลง	เครื่องที่		
	1	2	3
Capacity (kVA)	100	100	100
Impedance (%)	3.77	3.87	3.95
Hottest-spot Temp. (°C)	68	70	66
Cross-section area of conductor (mm ²)	63.96	55.42	81.4

นำข้อมูลทั้งหมดของหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่องมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยป้อนข้อมูลลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC แล้วเริ่มทำการคำนวณเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ได้จากหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่อง

ผลการคำนวณ

- หม้อแปลงเครื่องที่ 1
- กระแสลัดวงจร : 3.83 kA
- เวลาในการลัดวงจร : 2 sec.
- อุณหภูมิสุดท้าย : 110.99 °C

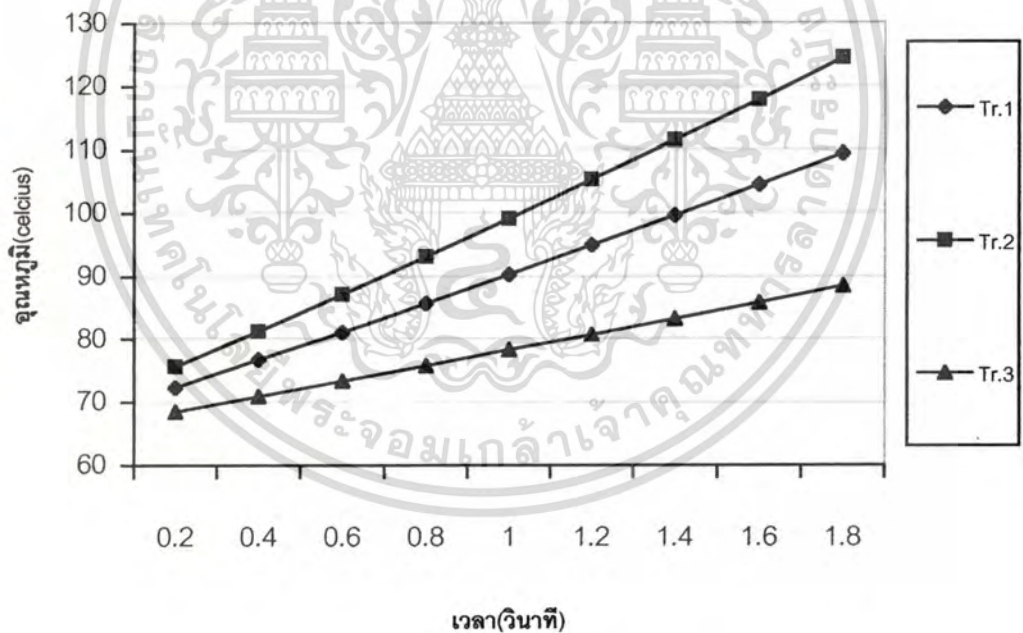
- หม้อแปลงเครื่องที่ 2

กระแสลัดวงจร : 3.76 kA
 เวลาในการลัดวงจร : 2 sec.
 อุณหภูมิสุดท้าย : 125.56 °C

- หม้อแปลงเครื่องที่ 3

กระแสลัดวงจร : 3.65 kA
 เวลาในการลัดวงจร : 2 sec.
 อุณหภูมิสุดท้าย : 90.02 °C

หมายเหตุ มาตรฐาน IEC กำหนดระยะเวลาที่ใช้คำนวณอุณหภูมิระหว่างการลัดวงจรของหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟสไว้เท่ากับ 2 วินาที



ภาพที่ 7.78 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 100 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEC จำนวน 3 เครื่อง

IEC_SCCT

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC

100 kVA ของหม้อแปลง 68 อุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวด
 400 แรงดันเอาต์พุต 63.96 พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (A_c)
 3.77 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

3 เฟส 1 เฟส

กระแสลัดวงจร (kA) อุณหภูมิสุดท้าย (°C)

3.83 110.99

คำนวณ ลบข้อมูล ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.79 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

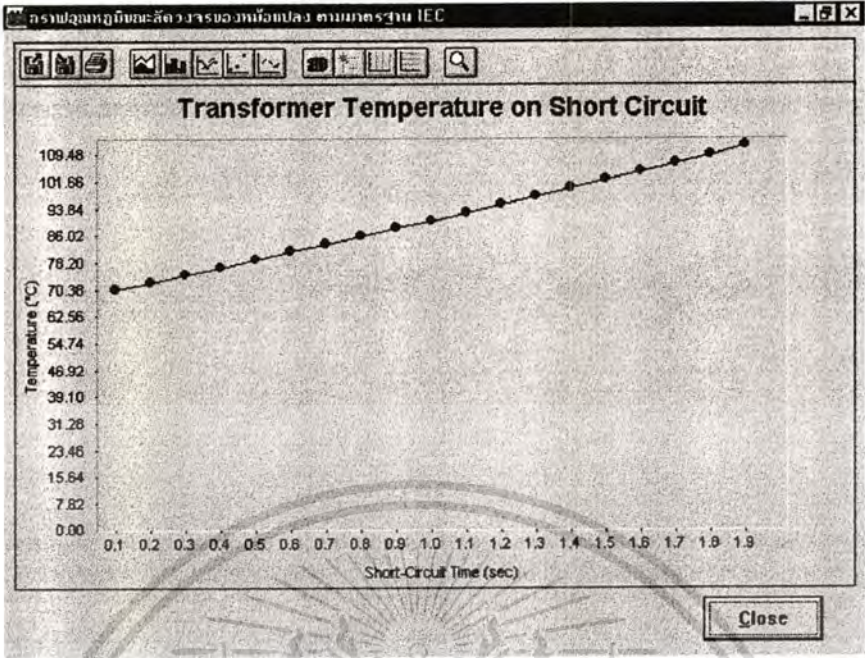
ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

ตารางแสดงผลการคำนวณ		ข้อมูลของหม้อแปลง	
Time	Final Temperature		
0.5	78.94	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	100
0.6	81.18	แรงดันเอาต์พุต (V)	400
0.7	83.43	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	3.77
0.8	85.7	อุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวด	68
0.9	87.99	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ	63.96
1.0	90.29	กระแสลัดวงจร (kA)	3.83
1.1	92.61		
1.2	94.95		
1.3	97.3		
1.4	99.67		
1.5	102.06		
1.6	104.47		
1.7	106.9		
1.8	109.34		
1.9	111.8		

พิมพ์ ปิด

ภาพที่ 7.80 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.81 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 100 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

ตัวอย่างที่ 2 หม้อแปลงขนาด 160 kVA 3 ph 50 Hz 22kV-400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn11 ใช้ฉนวน Class A

ตารางที่ 7.13 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 160 kVA

ข้อมูลของหม้อแปลง	เครื่องที่		
	1	2	3
Capacity (kVA)	160	160	160
Impedance (%)	3.76	4.05	3.91
Hottest-spot Temp. (°C)	69	70	68
Cross-section area of conductor (mm ²)	108.52	108.52	110.48

นำข้อมูลทั้งหมดของหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่องมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยป้อนข้อมูลลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC แล้วเริ่มทำการคำนวณเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ได้จากหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่อง

ผลการคำนวณ

- หม้อแปลงเครื่องที่ 1

กระแสลัดวงจร : 6.14 kA

เวลาในการลัดวงจร : 2 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 107.56 °C

- หม้อแปลงเครื่องที่ 2

กระแสลัดวงจร : 5.7 kA

เวลาในการลัดวงจร : 2 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 103.35 °C

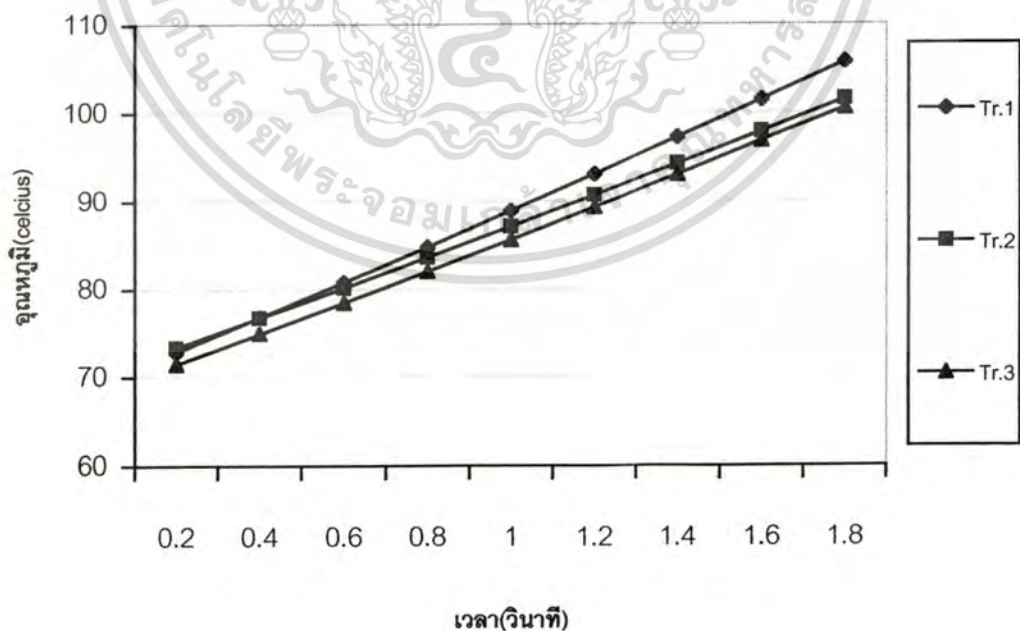
- หม้อแปลงเครื่องที่ 3

กระแสลัดวงจร : 5.91 kA

เวลาในการลัดวงจร : 2 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 102.29 °C

หมายเหตุ มาตรฐาน IEC กำหนดระยะเวลาที่ใช้คำนวณอุณหภูมิระหว่างการลัดวงจรของหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟสไว้เท่ากับ 2 วินาที



ภาพที่ 7.82 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลง

ขนาด 160 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEC จำนวน 3 เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEC_SCC1

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC

160

kVA ของหม้อแปลง

69

อุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวด

400

แรงดันเอาต์พุต

108.52

พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ [A²]

3.76

อุณหภูมิแกนของหม้อแปลง

3 เฟส

C1 เฟส

กระแสลัดวงจร [kA]

อุณหภูมิสุดท้าย [°C]

6.14

107.56

คำนวณ

ลบข้อมูล

ตาราง

รวมข้อมูล

กราฟ

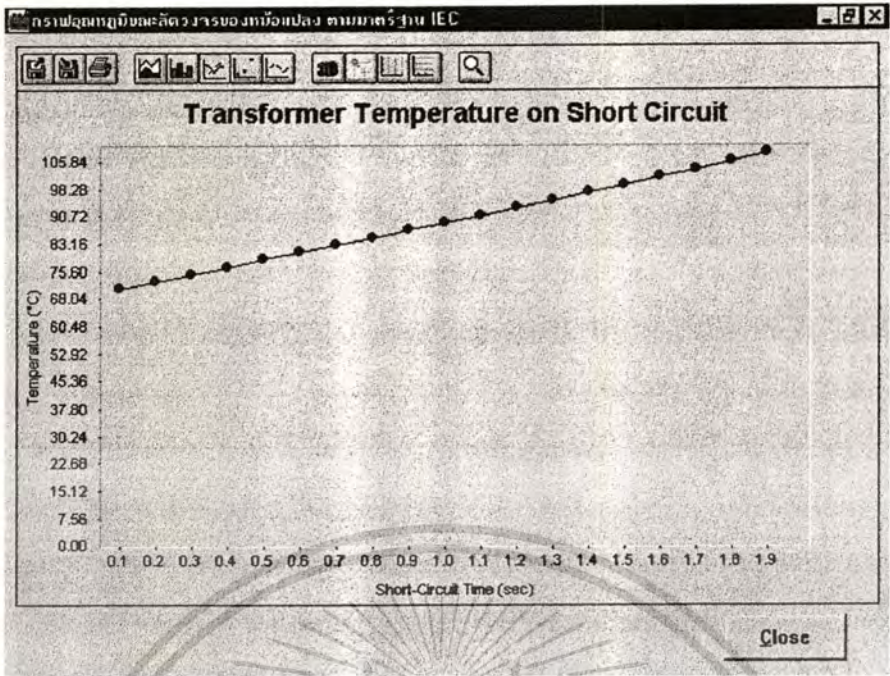
ปิด

ภาพที่ 7.83 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

ตารางแสดงผลการคำนวณ		ข้อมูลของหม้อแปลง	
Time	Final Temperature	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	160
0.5	78.8	แรงดันเอาต์พุต (V)	400
0.6	80.8	อุณหภูมิแกนของหม้อแปลง	3.76
0.7	82.81	อุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวด	69
0.8	84.83	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ	108.52
0.9	86.87	กระแสลัดวงจร (kA)	6.14
1.0	88.92		
1.1	90.98		
1.2	93.06		
1.3	95.15		
1.4	97.25		
1.5	99.37		
1.6	101.5		
1.7	103.65		
1.8	105.81		
1.9	107.99		

ภาพที่ 7.84 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.85 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

ตัวอย่างที่ 3 หม้อแปลงขนาด 250 kVA 3 ph 50 Hz 22kV-400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn11 ใช้ฉนวน Class A

ตารางที่ 7.14 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 250 kVA

ข้อมูลของหม้อแปลง	เครื่องที่		
	1	2	3
Capacity (kVA)	250	250	250
Impedance (%)	3.76	4.05	3.91
Hottest-spot Temp. (°C)	69	70	68
Cross-section area of conductor (mm ²)	170.56	144.96	244.2

นำข้อมูลทั้งหมดของหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่องมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยป้อนข้อมูลลงในฟอร์มการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC แล้วเริ่มทำการคำนวณเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ได้จากหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณ

- หม้อแปลงเครื่องที่ 1

กระแสลัดวงจร : 6.14 kA

เวลาในการลัดวงจร : 2 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 108.86 °C

- หม้อแปลงเครื่องที่ 2

กระแสลัดวงจร : 5.7 Ka

เวลาในการลัดวงจร : 2 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 127.38 °C

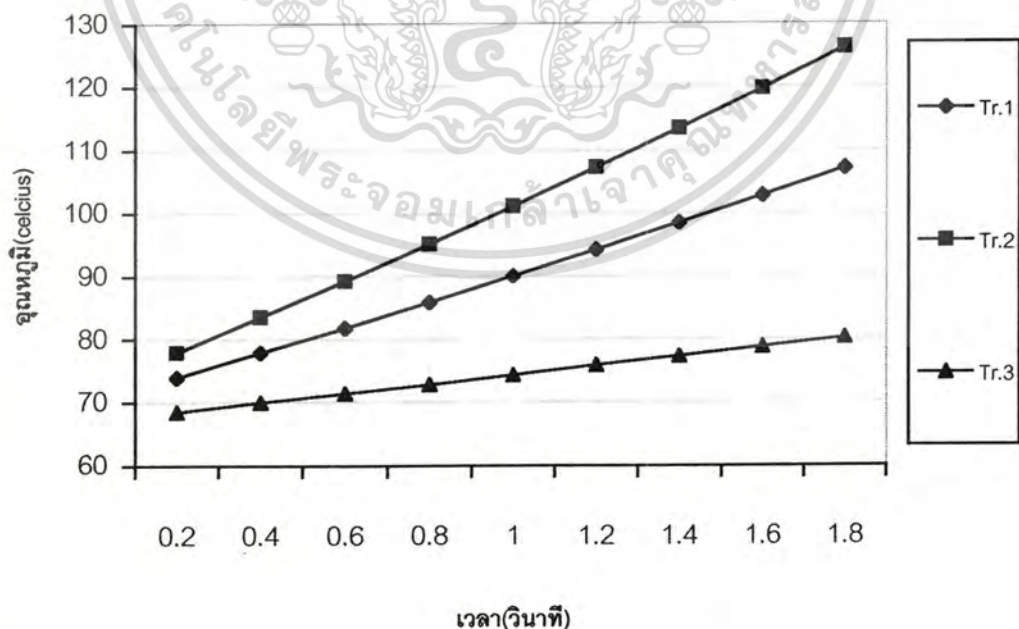
- หม้อแปลงเครื่องที่ 3

กระแสลัดวงจร : 5.91 kA

เวลาในการลัดวงจร : 2 sec.

อุณหภูมิสุดท้าย : 81.45 °C

หมายเหตุ มาตรฐาน IEC กำหนดระยะเวลาที่ใช้คำนวณอุณหภูมิระหว่างการลัดวงจรของหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟสไว้เท่ากับ 2 วินาที



ภาพที่ 7.86 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรกับเวลาในการลัดวงจรของหม้อแปลง

ขนาด 250 kVA ที่ใช้ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEC จำนวน 3 เครื่อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 250 kVA ไม่สามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการตัดสินใจใดๆ ได้โดยไม่ได้รับความเห็นชอบจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEC_SCCT

การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC

250 kVA ของหม้อแปลง 70 อุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวด
 400 แรงดันเอาต์พุต 170.56 พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ [Ae]
 3.73 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

3 เฟส C 1 เฟส

กระแสลัดวงจร [kA] อุณหภูมิสุดท้าย [°C]
 9.67 108.86

คำนวณ ดูข้อมูล ตาราง ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.87 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

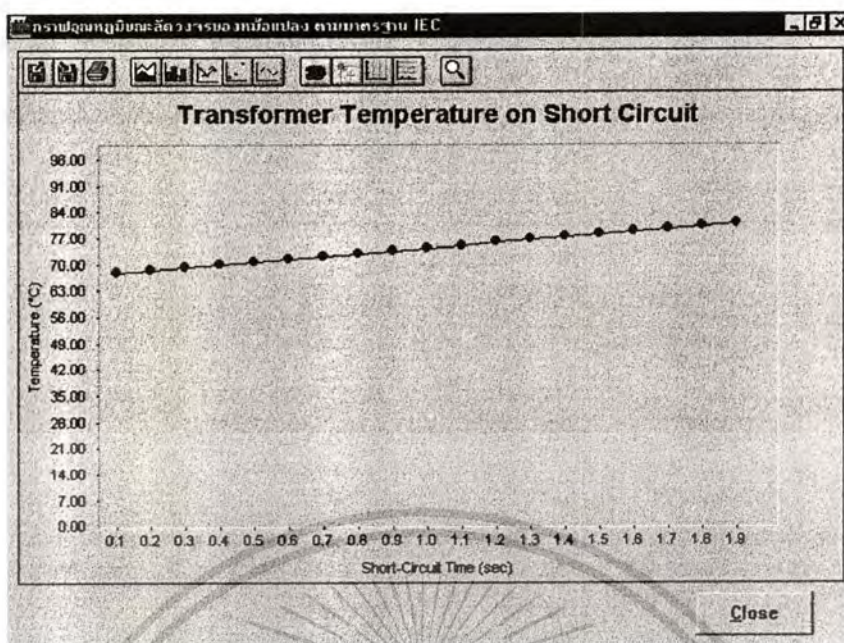
ผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

ตารางแสดงผลการคำนวณ		ข้อมูลของหม้อแปลง	
Time	Final Temperature	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	250
0.5	79.87	แรงดันเอาต์พุต (V)	400
0.6	81.89	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	3.73
0.7	83.91	อุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวด	70
0.8	85.95	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ	170.56
0.9	88	กระแสลัดวงจร (kA)	9.67
1.0	90.07		
1.1	92.15		
1.2	94.24		
1.3	96.35		
1.4	98.47		
1.5	100.61		
1.6	102.76		
1.7	104.92		
1.8	107.1		
1.9	109.3		

พิมพ์ ปิด

ภาพที่ 7.88 แสดงตารางผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



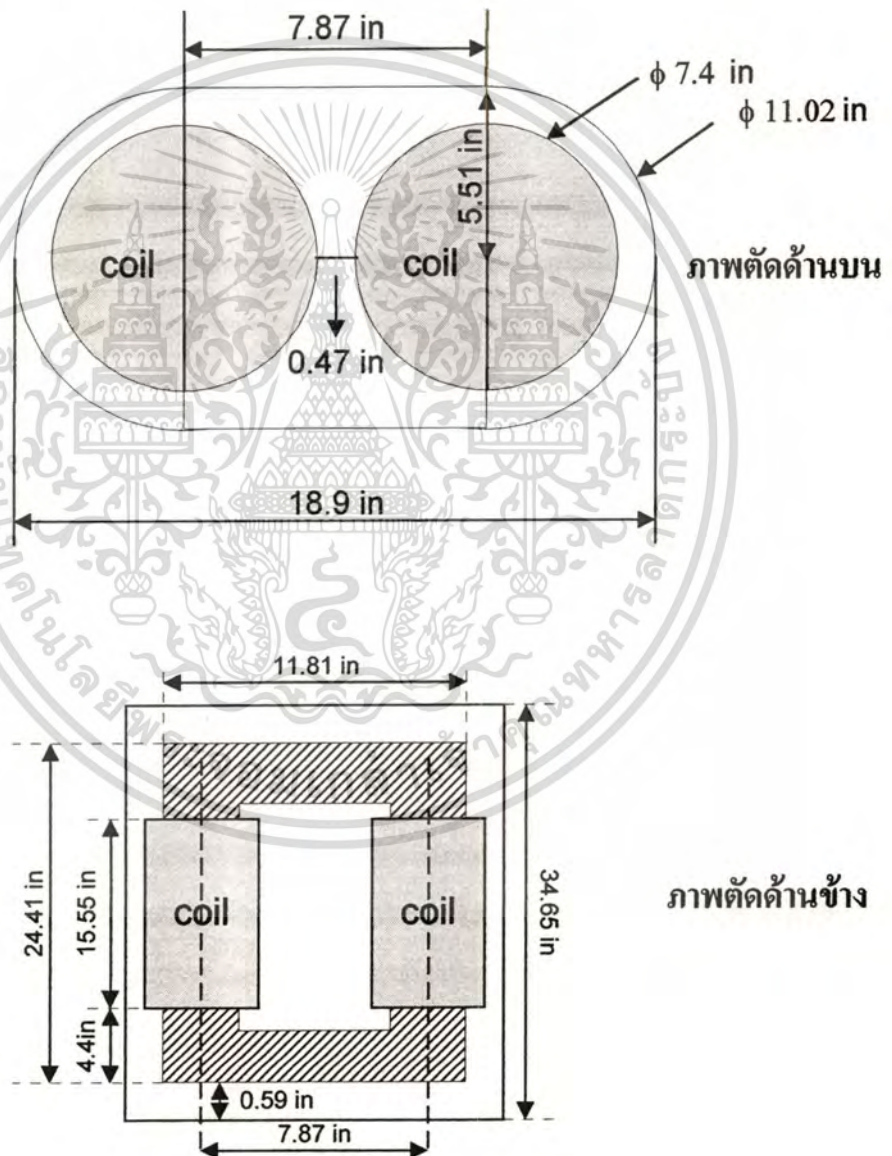
ภาพที่ 7.89 แสดงกราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ขณะเกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความดันของน้ำมันที่เกิดขึ้นในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

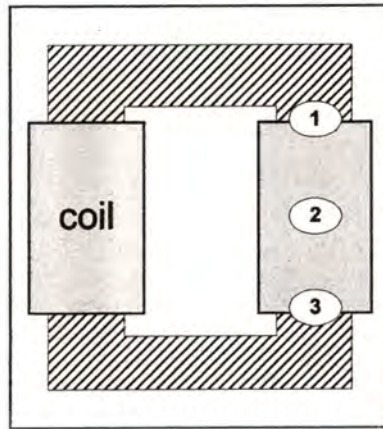
ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ความดันของน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อนของหม้อแปลงที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรภายในตัวถังที่ระดับความลึกต่างๆ โดยใช้ข้อมูลของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA และ 50 kVA แบบ 1 เฟส ที่มีลักษณะของถังเป็นรูปวงรี ตัวอย่างการวิเคราะห์มีดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 หม้อแปลงขนาด 30 kVA 1 ph 50 Hz 22kV-460/230V



ภาพที่ 7.90 แสดงภาพตัดด้านบนและด้านข้างของหม้อแปลงขนาด 30 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.91 แสดงตำแหน่งของการัดวงจรภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่ทำการวิเคราะห์

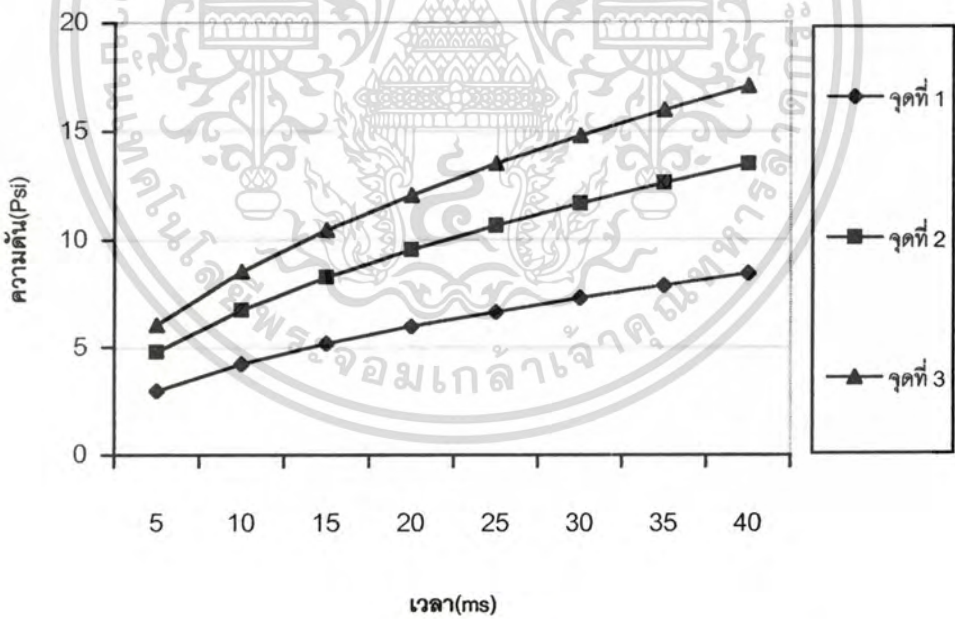
ตารางที่ 7.15 ข้อมูลของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความดันของน้ำมันขณะเกิด
การัดวงจรภายในถังของหม้อแปลง

ขนาดของหม้อแปลง	: 30 kVA
แรงดันเอาต์พุต	: 400 V
% อิมพีแดนซ์	: 2.1
พื้นที่หน้าตัดของตัวถัง	: 138.25 ตร.นิ้ว
ความลึกจากผิวน้ำมันถึงตำแหน่งัดวงจร จุดที่ 1	: 4.99 นิ้ว
ความลึกจากผิวน้ำมันถึงตำแหน่งัดวงจร จุดที่ 2	: 12.8 นิ้ว
ความลึกจากผิวน้ำมันถึงตำแหน่งัดวงจร จุดที่ 3	: 20.5 นิ้ว
ระยะจากจุดัดวงจรถึงแนวกลางถัง	: 3.7 นิ้ว

นำข้อมูลของหม้อแปลงมาทำการวิเคราะห์ด้วย TTPA โดยป้อนข้อมูลลงในฟอร์มการ
คำนวณความดันของหม้อแปลงขณะเกิดการัดวงจรแล้วเริ่มทำการคำนวณผลในรูปแบบต่างๆ ผล
ที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7.16 ความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจร ที่ความลึกต่างๆตามจุดที่กำหนดเทียบกับเวลา (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว,ลัดวงจร แนวระดับ)

เวลา (ms)	ความดันน้ำมัน (Psi)		
	ลัดวงจรที่จุดที่ 1	ลัดวงจรที่จุดที่ 2	ลัดวงจรที่จุดที่ 3
5	2.98	4.77	6.04
10	4.21	6.75	8.54
15	5.16	8.27	10.46
20	5.96	9.55	12.08
25	6.66	10.67	13.51
30	7.30	11.69	14.80
35	7.89	12.63	15.98
40	8.43	13.50	17.09

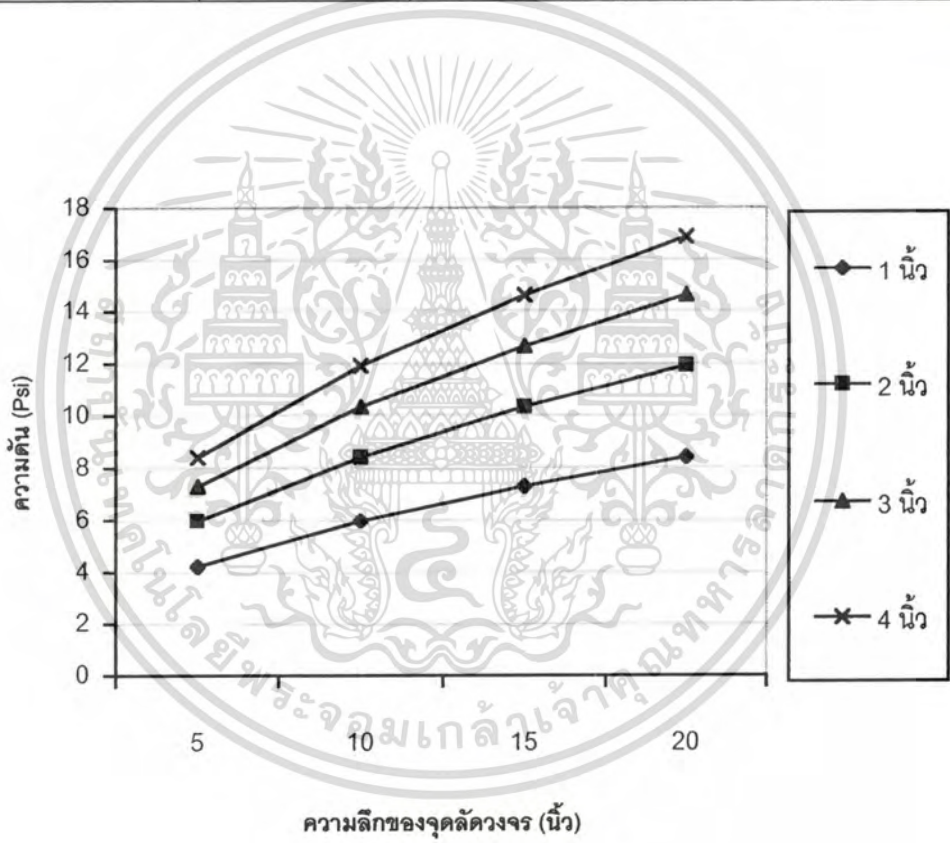


ภาพที่ 7.92 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจร ที่ความลึกต่างๆตามจุดที่กำหนดเทียบกับเวลา (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว, ลัดวงจรแนวระดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.17 ความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรที่ความยาวอาร์คต่างๆที่กำหนดเทียบกับความลึกของจุดลัดวงจร (เวลาในการลัดวงจรเท่ากับ 20 ms, ลัดวงจรแนวระดับ)

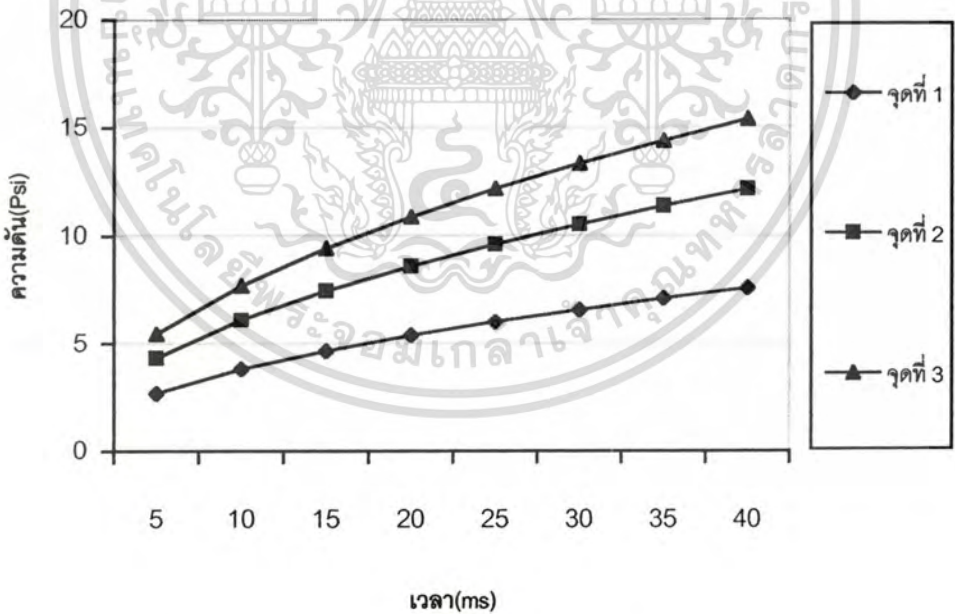
ความลึกของจุดลัดวงจร (นิ้ว)	ความดันน้ำมัน (Psi)			
	อาร์คยาว 1 นิ้ว	อาร์คยาว 2 นิ้ว	อาร์คยาว 3 นิ้ว	อาร์คยาว 4 นิ้ว
5	4.22	5.97	7.31	8.44
10	5.97	8.44	10.33	11.93
15	7.31	10.33	12.66	14.62
20	8.44	11.93	14.62	16.88



ภาพที่ 7.93 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรที่ความยาวอาร์คต่างๆที่กำหนดเทียบกับความลึกของจุดลัดวงจร (เวลาในการลัดวงจรเท่ากับ 20 ms, ลัดวงจรแนวระดับ)

ตารางที่ 7.18 ความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจร ที่ความลึกต่างๆตามจุดที่กำหนดเทียบกับเวลา (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว,ลัดวงจร แนวตั้ง)

เวลา (ms)	ความดันน้ำมัน (Psi)		
	ลัดวงจรที่จุดที่ 1	ลัดวงจรที่จุดที่ 2	ลัดวงจรจุดที่ 3
5	2.68	4.30	5.44
10	3.80	6.08	7.69
15	4.65	7.45	9.42
20	5.37	8.60	10.88
25	6.0	9.61	12.17
30	6.58	10.53	13.33
35	7.10	11.37	14.39
40	7.59	12.16	15.39

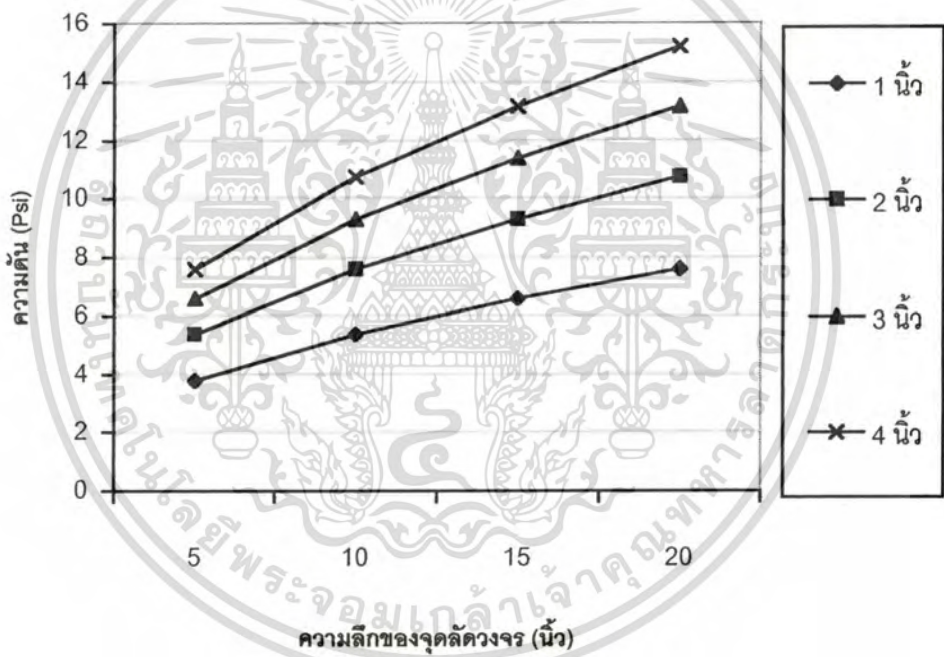


ภาพที่ 7.94 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรที่ความลึกต่างๆตามจุดที่กำหนดเทียบกับเวลา (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว, ลัดวงจรแนวตั้ง)

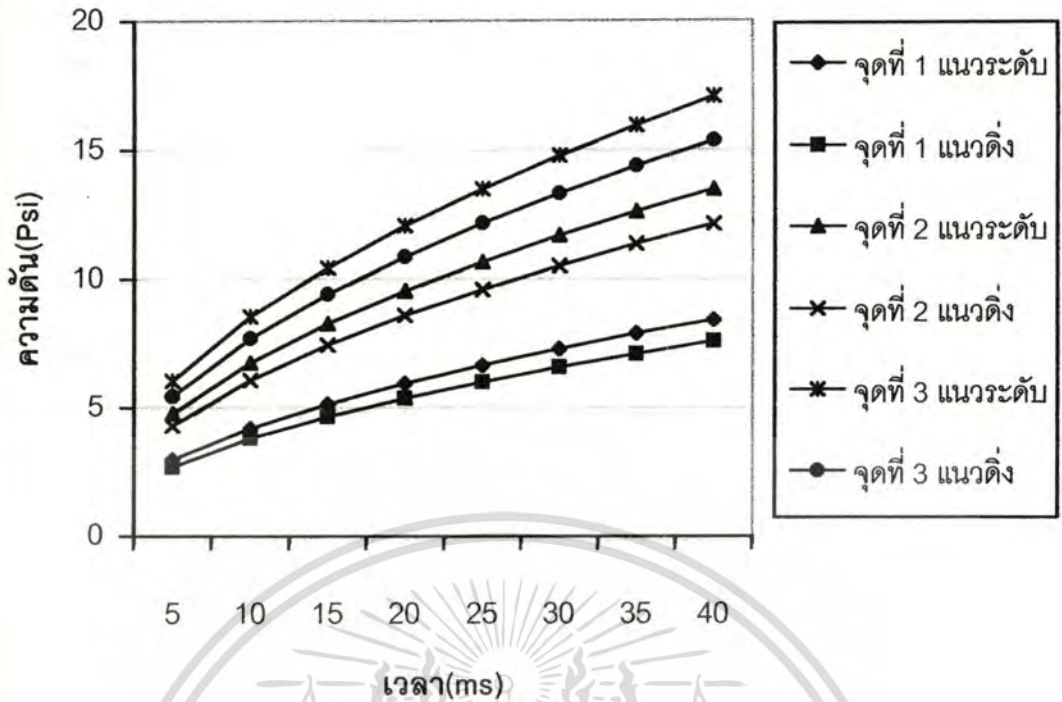
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.19 ความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรที่ความยาวอาร์คต่างๆที่กำหนดเทียบกับความลึกของจุดลัดวงจร (เวลาในการลัดวงจรเท่ากับ 20 ms, ลัดวงจรแนวตั้ง)

ความลึกของจุดลัดวงจร (นิ้ว)	ความดันน้ำมัน (Psi)			
	อาร์คยาว 1 นิ้ว	อาร์คยาว 2 นิ้ว	อาร์คยาว 3 นิ้ว	อาร์คยาว 4 นิ้ว
5	3.8	5.37	6.58	7.6
10	5.37	7.60	9.31	10.75
15	6.58	9.31	11.40	13.16
20	7.60	10.75	13.16	15.20



ภาพที่ 7.95 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรที่ความยาวอาร์คต่างๆที่กำหนดเทียบกับความลึกของจุดลัดวงจร (เวลาในการลัดวงจรเท่ากับ 20 ms, ลัดวงจรแนวตั้ง)



ภาพที่ 7.96 กราฟความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขนาด 30 kVA ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรที่ความลึกต่างๆในแนวระดับเทียบกับแนวตั้ง (ความยาวอาร์คเท่ากับ 2 นิ้ว)

Short Circuit Pressure

พารามิเตอร์ความดันของน้ำมันภายในถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

30	kVA ของหม้อแปลง	4.99	ความลึกจากผิวน้ำมันถึงตำแหน่งลัดวงจร
400	แรงดันเบสที่ทุก (จ)	5.51	ระยะจากจุดลัดวงจรถึงแนวกลางถัง
0.021	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	2.0	ความยาวอาร์ค
138.25	พื้นที่หน้าตัดของตัวถังหม้อแปลง	38	เวลาในการลัดวงจรของฟิวส์ (ms)

ความดันของน้ำมัน (Psi)

ลักษณะการลัดวงจร

☒ ลัดวงจรแนวระดับ

☐ ลัดวงจรแนวตั้ง

8.22

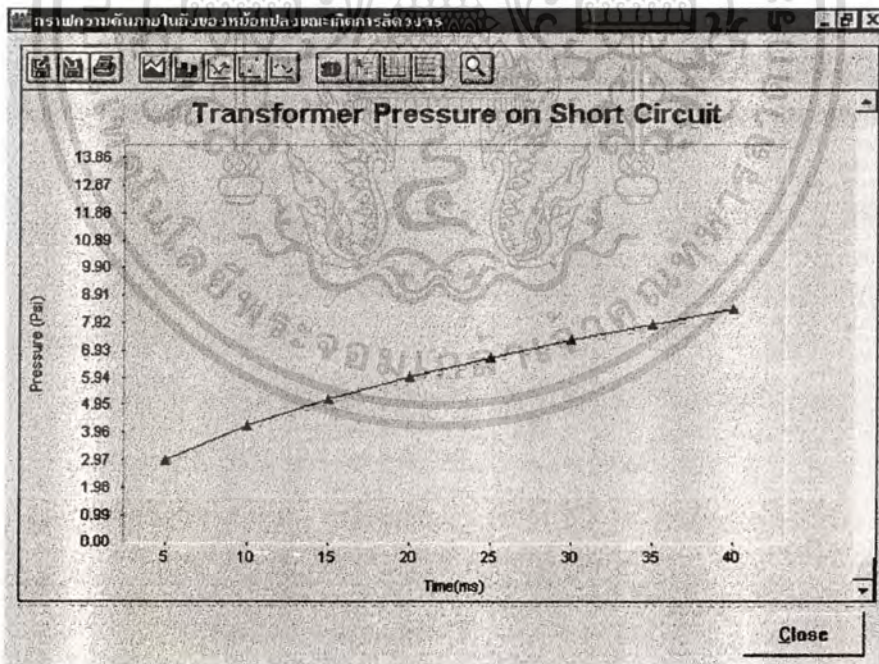
ตกลง ลบข้อมูล ย้อนกลับ ฐานข้อมูล กราฟ ปิด

ภาพที่ 7.97 แสดงผลการคำนวณความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ขณะเกิดการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณความดันภายในถังหม้อแปลง ขณะเกิดลัดวงจร		ข้อมูลของหม้อแปลง	
ตารางแสดงผลการคำนวณ			
Time(ms)	Pressure	ขนาดของหม้อแปลง (kVA)	30
5	2.98	แรงดันเอาท์พุท (V)	400
10	4.21	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	0.021
15	5.16	พื้นที่กักน้ำดีของถังหม้อแปลง (ตร.นิ้ว)	138.25
20	5.96	ความลึกของน้ำมันถึงตำแหน่งลัดวงจร (นิ้ว)	4.99
25	6.66	ระยะจากจุดลัดวงจรถึงแนวกลางถัง (นิ้ว)	5.51
30	7.30	ความยาวอาร์ค (นิ้ว)	2.0
35	7.89	เวลาในการตัดวงจรของฟิวส์ (มส)	38
40	8.43	ความดันของน้ำมัน (Psi)	8.22

ภาพที่ 7.98 แสดงตารางผลการคำนวณความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ขณะเกิดลัดวงจร



ภาพที่ 7.99 แสดงกราฟผลการคำนวณความดันของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงขนาด 30 kVA ขณะเกิดลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.7 บทสรุปท้ายการทดลอง

7.7.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะจ่ายโหลด จากหัวข้อ 7.1, 7.2 และ 7.3 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

- ความเสื่อมสภาพของฉนวนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา
- อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำเป็นตัวประกอบสำคัญในการกำหนดอายุของฉนวนของหม้อแปลง
- การจ่ายโหลดเกินพิกัดของหม้อแปลงนั้นจะต้องพิจารณาปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น เฟอร์-เรนต์การขยายตัวของน้ำมัน ความสามารถในการทนความร้อนของบุหรีงหรืออุปกรณ์ที่ใช้ต่อร่วม
- พฤติกรรมในการจ่ายโหลดเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อายุของฉนวนของหม้อแปลงลดลง
- อายุการใช้งานที่ได้จากการทำนายนั้นอาจไม่เป็นไปตามความเป็นจริงเนื่องจากในการใช้งานจริงของหม้อแปลงนั้นมีปัจจัยหลายอย่าง que เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

7.7.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร จากหัวข้อ 7.4 , 7.5 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

- อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำกับพื้นที่หน้าตัดของฉนวนมีผลต่อปริมาณของอุณหภูมิหลังจากการลัดวงจร
- อุณหภูมิของหม้อแปลงหลังจากการลัดวงจรลดลงเมื่อ eddy current loss ลดลง การลดค่า eddy current loss ลง ทำได้โดยการลดค่า Flux density ของหม้อแปลงลงด้วยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
- หม้อแปลงที่ใช้ในการวิเคราะห์ใช้ฉนวน Class A ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ 105 °C ถ้าสามารถออกแบบให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิหลังจากการลัดวงจรไม่เกินไปกว่า 105 °C แล้วจะทำให้หม้อแปลงสามารถทนต่อสภาวะการลัดวงจรได้ดียิ่งขึ้น
- ความเสียหายของหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรนั้น ไม่ได้มาจากอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว แต่มีสาเหตุมาจากแรงทางกลที่เกิดขึ้นในขณะที่ลัดวงจรด้วย

7.7.3 การวิเคราะห์ความดันของน้ำมันที่เกิดขึ้นภายในถังของหม้อแปลงจำหน่ายขณะเกิดการลัดวงจร จากหัวข้อ 7.6 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

- ความดันของน้ำมันจะแปรผันตามค่าของพลังงานลัดวงจร
- ความดันของน้ำมันจะแปรผันตามความลึกจากผิวน้ำมันของตำแหน่งที่เกิดอาร์ค
- ความดันของน้ำมันจะแปรผันตามความยาวอาร์ค
- ความดันของน้ำมันจะแปรผันตามระยะห่างจากด้านข้างของถังของตำแหน่งที่เกิดอาร์ค
- การควบคุมกระแสลัดวงจรเป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการเกิดความดันสูงในหม้อ

แปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ซอฟต์แวร์วิเคราะห์อุณหภูมิและความดันของหม้อแปลง (Transformer Temperature and Pressure Analysis Software; TTPA) ที่พัฒนาขึ้น สามารถช่วยวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของอุณหภูมิและความดันของหม้อแปลงที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการลัดวงจรและวิเคราะห์อุณหภูมิและทำนายอายุการใช้งานของฉนวนในขณะหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดได้ โดย TTPA ได้นำเอาวิธีการวิเคราะห์จากมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป 2 มาตรฐานคือ IEEE และ IEC มาทำการพัฒนาขึ้นเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้งานได้ง่ายในรูปแบบของกราฟฟิคและ TTPA ยังมีฐานข้อมูลที่ประกอบไปด้วยข้อมูลพื้นฐานของหม้อแปลงที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ได้จากผู้ผลิตในทางอุตสาหกรรมจริงๆ ในปัจจุบันจึงทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือและความเป็นไปได้สูง

ในส่วนของการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะทำการจ่ายโหลดนั้น TTPA สามารถวิเคราะห์อุณหภูมิของน้ำมันและขดลวดตัวนำที่เกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดในสถานะต่างๆได้ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถทำนายอุณหภูมิและอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกซื้อหม้อแปลงมาใช้งานให้เหมาะสมกับโหลดที่เกิดขึ้นหรือจัดการกับโหลดที่หม้อแปลงต้องจ่ายให้อยู่ในปริมาณและช่วงเวลาที่เหมาะสมทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดคุ้มค่ากับการลงทุน ในด้านการออกแบบและการผลิตนั้นผู้ผลิตสามารถใช้ TTPA เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะหม้อแปลงจ่ายโหลดเพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง ทำให้เกิดความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

การเกิดการลัดวงจรก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หม้อแปลงเกิดการชำรุดเสียหาย เนื่องจากในสถานะการลัดวงจรนั้นจะเกิดกระแสจำนวนมากไหลในระบบทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิที่ใช้งานตามปกติส่งผลให้ฉนวนของหม้อแปลงที่มีขีดจำกัดในการทนต่ออุณหภูมินั้นได้รับความเสียหายและอาจทำให้หม้อแปลงไม่สามารถใช้งานต่อไปได้หลังจากแก้ไขสถานะลัดวงจรแล้ว ผู้ผลิตสามารถใช้ TTPA เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวัสดุที่ใช้ในการผลิตเช่น ขนาดของขดลวดตัวนำ, ความหนาของฉนวนที่หุ้มขดลวดตัวนำ, พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ใช้ ทำให้สามารถพัฒนาหม้อแปลงที่สามารถทนต่อสถานะการลัดวงจรได้ดีขึ้น

นอกจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในขณะเกิดการลัดวงจรแล้วถ้าการลัดวงจรเกิดขึ้นที่ขดลวดตัวนำภายในถังของหม้อแปลงจะส่งผลให้ความดันของน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อนเพิ่มมากขึ้นจนอาจทำให้เกิดการระเบิดของหม้อแปลงขึ้นได้ ส่งผลให้หม้อแปลงเกิดการชำรุดเสียหายและอาจเกิดอันตรายต่อทรัพย์สินและผู้ปฏิบัติงานในบริเวณใกล้เคียง ในขั้นตอนของการออกแบบผู้ผลิตสามารถใช้ TTPA เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์หาความดันที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการลัดวงจร

ภายในตัวถังของหม้อแปลงเพื่อนำข้อมูลที่ได้นั้นมาพิจารณาออกแบบตัวถังและฝาถังของหม้อแปลงให้มีลักษณะการติดตั้งที่เหมาะสมสามารถทนต่อความดันของน้ำมันที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการลัดวงจรได้

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นค่าที่ได้จากข้อมูล 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นข้อมูลจริงคือค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงและส่วนที่เป็นข้อมูลที่กำหนดขึ้นเอง เช่น ค่าของอุณหภูมิแวดล้อม ค่าของกระแสลัดวงจร เป็นต้น เพราะฉะนั้นผลการวิเคราะห์ต่างๆที่ได้นี้จะเป็ค่าโดยประมาณ ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นทั้งนี้เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาหลายค่าเช่น อุณหภูมิแวดล้อมจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลหรือสถานที่ โหลดที่หม้อแปลงจ่ายอาจมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงไม่สม่ำเสมอเท่ากันในทุกวัน และการเสื่อมสภาพลงเนื่องจากขาดการบำรุงรักษาที่เหมาะสม

TTPA เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้วิเคราะห์ปรากฏการณ์ของอุณหภูมิและความดันที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงได้ดี, ใช้งานง่ายและรวดเร็วในระดับหนึ่ง ซึ่งในอนาคตแล้วจำเป็นต้องมีการพัฒนาให้มีขีดความสามารถมากขึ้นต่อไป ซึ่งมีอยู่หลายแนวทางดังนี้

- 1.พัฒนาให้เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ทำการออกแบบและวิเคราะห์หม้อแปลงได้ในตัวเดียวกัน
- 2.พัฒนาให้สามารถใช้กับหม้อแปลงหม้อแปลงขนาดใหญ่ (Power Transformer) ได้
- 3.เพิ่มเติมข้อมูลของวัสดุที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงที่มีจำหน่ายจริงในท้องตลาดลงในฐานข้อมูล เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์อาจไม่ตรงกับความเป็นจริง
4. อาจพัฒนาให้สามารถวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิเนื่องจากสภาวะอื่นๆได้อีก เช่น โหลดที่ทำการจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

บรรณานุกรม

- [1] An American National Standard IEEE Standard General Requirement for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, ANSI/IEEE, C57.12.00-1980
- [2] An American National Standard IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Pad-Mounted Distribution Transformers Rated 500 kVA and Less with 65 °C or 55 °C Average Winding Rise, ANSI/IEEE, C57.91-1981
- [3] Loading Guide for Oil-Immerse Power Transformers, IEC 354, 1991
- [4] Power Transformer Part 5 : Ability to withstand short circuit, IEC 76-5, 1976
- [5] Barken, P. and others. "Overpressure Phenomena in Distribution Transformers with Low Impedance Fault." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95, no.1 (January/February 1976) : 37-48.
- [6] Mahieu, W.R. "Prevention of High-Fault Rupture of Pole Type Distribution Transformers." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-94, no.5 (September/October 1975) : 1698-1707
- [7] Bharat Heavy Electrical Limited. Transformer. New Delhi: McGraw-Hill, 1987.
- [8] สิริวิช ทัดสวน, บุญเลิศ สือเฉย และศุภลี บรรจงจิตร. "การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงจำหน่ายชนิดแช่น้ำมันขณะทำการต่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ซึ่งเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC" วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 14, ฉบับที่ 1 (เมษายน 2541) : 52-60.
- [9] เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และคณะ. "การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะลัดวงจร" วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 15, ฉบับที่ 2 (ธันวาคม 2541): 64-69.
- [10] ถาวร อมตกิตติ์, "ฟอลต์ที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำในหม้อแปลงของระบบจำหน่าย." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2527
- [11] บุญเลิศ เขียมทัศน. Delphi. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2539



ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ผลงานวิจัยเรื่อง "การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงชนิดวงจรร"
ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 (ธันวาคม 2541)
2. ผลงานวิจัยเรื่อง "การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมันเวคเตอร์กรุป Yzn 11" ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 (ธันวาคม 2541)



การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลง ขณะลัดวงจร

Development of Calculation Software for Transformer Temperature on Short Circuit

เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ บุญเลิศ สือเจย สุทธิ บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นงานนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิด การลัดวงจรอุณหภูมิของหม้อแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงจ่ายกระแสซึ่งในกรณีการจ่ายกระแสโอเวอร์โหลดจะสามารถพิจารณา ได้[5] ในกรณีของการเกิดลัดวงจรกระแสจะสูงมากอุณหภูมิของหม้อแปลงจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแส โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนา ขึ้นนี้สามารถคำนวณและวิเคราะห์หาอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดหลังจากการลัดวงจร, กระแสลัดวงจรและเวลาในการลัดวงจรได้ การพัฒนาซอฟต์แวร์นี้ได้นำข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 และ 400 kVA 3 ph 50 Hz 22kV- 400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ที่ได้ทำการออกแบบและทำการผลิตแล้วมาวิเคราะห์และบันทึกผลที่ได้ลงในฐานข้อมูลและข้อมูล นี้จะถูกเลือกนำมาใช้ ทำให้ผู้ออกแบบสามารถค้นหาจุดบกพร่องในการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ในการผลิต เช่น ขนาด ของลวดตัวนำ, ความหนาของฉนวนและคุณสมบัติของแกนเหล็กที่ใช้ในการผลิตได้อย่างเหมาะสม อันจะทำให้หม้อแปลงที่ได้ทำ การวิเคราะห์ออกแบบด้วยซอฟต์แวร์นี้มีประสิทธิภาพที่ดีและความน่าเชื่อถือมากขึ้น ผลที่ได้จากซอฟต์แวร์จะแสดงเป็นรูปกราฟ ของอุณหภูมิของขดลวดที่เกิดขึ้นหลังจากการลัดวงจรเปรียบเทียบกับเวลาในการลัดวงจร ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถบันทึกลงในฐานข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์และออกแบบต่อไปในอนาคต

Abstract

This paper describes the research and development of calculation software for transformer temperature on short circuit. The temperature generated when supplied load. In case of over load consideration[5] if short circuit have high current and temperature increase follow to current. Software was developed to calculate and analyse final winding temperature at the end of short circuit, short circuit current and short circuit duration. The software developed employed the database from design and produce transformer 100 and 400 kVA, 3 ph, 50 Hz, 22kV- 400/230V vector group Dyn 11 in order to record in database of software and selected use. The designer can find the faults for design and suitable material selection according to the conductor size, insulation thick and property of core steel. Transformer analysed and designed by this software was able to increase stability and efficiency. The result from the developed software showed display of graph final winding temperature at the end of short

circuit and the short circuit duration. The data from analysis were recorded in database in order to be used for analysis and design in the future.

1. บทนำ

ในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังนั้นผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงควมมีเสถียรภาพและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าคั้งนั้นถ้าผู้ผลิตสามารถออกแบบและผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติที่ดีทนต่อสภาวะการใช้งานตามมาตรฐานที่กำหนดก็จะสามารถช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและเกิดความมั่นคงต่อระบบไฟฟ้ามากขึ้น

คั้งนั้นบทความนี้จะนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณหากระแสลัดวงจร,เวลาที่เกิดการลัดวงจรและอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรเมื่อหม้อแปลงเกิดการลัดวงจรขึ้นจะทำให้กระแสในขดลวดสูงกว่ากระแสปกติหลายเท่าซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิของขดลวดสูงขึ้นตามไปด้วย ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้ฉนวนได้รับความเสียหาย ถ้าหม้อแปลงได้รับการออกแบบที่เหมาะสมก็จะทำให้หม้อแปลงสามารถทนต่อสภาวะนี้ได้ตามข้อกำหนด

2. ขั้นตอนการคำนวณ

ในการวิเคราะห์สภาวะลัดวงจรของหม้อแปลงต้องทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังสมการต่อไปนี้

2.1 การคำนวณระยะเวลาการลัดวงจร (Short-Circuit Current Duration) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t = \frac{1250}{I^2} \quad (1)$$

โดยที่

t = ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)

$I = \frac{I_{sc}}{I_R}$ = กระแสลัดวงจรสมมาตรซึ่งเป็นค่าที่วิกฤตของกระแสปกติ

หมายเหตุ

สมการที่ (1) ใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดไม่เกิน 500 kVA ส่วนหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นระยะเวลาในการลัดวงจรจะไม่เกิน 2 วินาที ตามค่ามาตรฐาน

2.2 การคำนวณกระแสลัดวงจร (Short circuit current calculation) สามารถแบ่งการคำนวณได้คั้งนี้

2.2.1 กระแสสมมาตร (Symmetrical Current)

สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC} = \frac{I_R}{Z_T + Z_S} \quad (2)$$

โดยที่

I_R = กระแสที่พิกัด(A)

Z_T = อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์

Z_S = อิมพีแดนซ์ของระบบเป็นค่าเปอร์เซ็นต์

หมายเหตุ

ในบทความนี้จะกล่าวถึงการลัดวงจรที่ขั้วของหม้อแปลงโดยไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ (กระแสลัดวงจรมีค่าสูงสุด)

2.2.2 กระแสไม่สมมาตร (Asymmetrical current)

สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC(pkasym)} = K I_{SC} \quad (3)$$

โดยที่

$$K = [1 + (e^{-(\phi + \pi/2)r/x}) \sin \phi] \sqrt{2}$$

และ

e = base of nature logarithm

ϕ = $\arctan x/r$, in radian

x/r = อัตราส่วนของผลของกระแสลัดต่อค่ารีแอคแตนซ์และค่าความต้านทาน

2.3 การคำนวณอุณหภูมิของขดลวดขณะลัดวงจร

อุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะทำการลัดวงจรสั้น

สุด (T_f) สามารถหาได้จากสมการ

$$T_f = (T_k + T_s) \cdot m(1 + E + 0.6m) + T_s \quad (4)$$

โดยที่

$$m = \frac{(w_s)t}{C(T_k + T_s)}$$

สมการนี้จะเป็นสูตร โดยประมาณที่ใช้ในกรณีที่ค่า

$m = 0.6$ และน้อยกว่า สำหรับค่า m ที่มีค่ามากกว่า 0.6 ค่า T_f สามารถหาได้จากสมการ

$$T_f = (T_k + T_s) \left[\sqrt{e^{2m} + E(e^{2m} - 1)} - 1 \right] + T_s \quad (5)$$

โดยที่

t = ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)

$T_k = 234.5$ สำหรับทองแดง

= 225 สำหรับอลูมิเนียม

T_s = อุณหภูมิขณะเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$) โดยจะมีค่าดังนี้

(1) 30°C ค่าอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temp.)

บวกกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดบวกกับอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่ยอมรับ (จาก spec. ของ โรงงาน) หรือ

(2) 30°C ค่าอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temp.)

บวกกับค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่เพิ่มขึ้นของขดลวดตามข้อกำหนด (specification) ของหม้อแปลงแต่ละชนิด

e = base of natural logarithm ≈ 2.718

$$E = E_r \left[\frac{T_k + T_r}{T_k + T_s} \right]^2$$

E_r = per-unit eddy current loss ที่อุณหภูมิอ้างอิง

T_r = อุณหภูมิอ้างอิง

= อุณหภูมิแวดล้อม 20°C บวกกับอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่พิกัด

W_s = Short-Circuit resistance loss ของขดลวดที่อุณหภูมิเริ่มต้น; วัตต์/ปอนด์ ของวัสดุตัวนำ

$$W_s = \frac{w_r N^2}{M} \times \left(\frac{T_k + T_s}{T_k + T_r} \right)$$

W_r = resistance loss ของขดลวดที่พิกัดกระแสและอุณหภูมิอ้างอิง; วัตต์

N = ขนาดของกระแสลัดวงจรสมมาตร; แอมป์

M = น้ำหนักของขดลวดตัวนำ; ปอนด์

C = ค่าความจุความร้อนเฉลี่ยต่อปอนด์ของวัสดุตัวนำ สามารถหาได้จากสมการ

$C = 174 + 0.0225(T_s + T_f) + 110(A_i/A_c)$ สำหรับทองแดง

$C = 405 + 0.1(T_s + T_f) + 360(A_i/A_c)$ สำหรับอลูมิเนียม

A_i = พื้นที่หน้าตัดของฉนวน

A_c = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

3. ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์

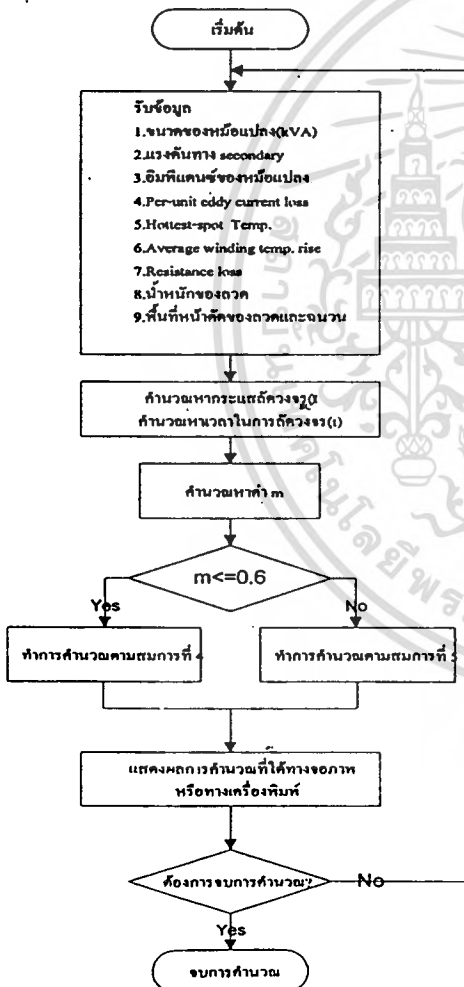
ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ชื่อว่า Transformer

Temperature on Short circuit Calculation (TTSC) ถูกพัฒนาขึ้นด้วย Boland Delphi 1.0 ซึ่งจะทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 3.11 หรือ Windows 95 ก็ได้ จึงทำให้สามารถใช้งานได้ง่ายเพราะการติดต่อกับผู้ใช้โปรแกรมจะอยู่ในรูปของกราฟฟิค (Graphic User Interface ; GUI)

ผังงานแสดงขั้นตอนการทำงานของทั้งหมดของ TTSC แสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 แสดงรูปแบบของ TTSC จากผังงานเมื่อป้อนอินพุตเป็นข้อมูลต่างๆของหม้อแปลงที่จะทำการวิเคราะห์อุณหภูมิแล้ว TTSC จะทำการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นแล้วนำค่ากระแสลัดวงจรที่ได้นั้นคำนวณหาเวลาที่เกิดการลัดวงจรและค่า m จากนั้นพิจารณาค่า m ที่คำนวณได้ว่ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 0.6 เพื่อเลือกสมการที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายหลังการลัดวงจรได้ถูกต้องหลังจากการคำนวณวิเคราะห์เรียบร้อยแล้วจะแสดงผลที่ได้ทางจอภาพเป็นค่ากระแสลัดวงจร, เวลาที่เกิดการลัดวงจรและอุณหภูมิสุดท้ายหลังเกิดการลัดวงจร และยังสามารถบันทึกผลลงในฐานข้อมูลเพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ที่พารามิเตอร์ต่างๆกันมาพล็อตเป็นกราฟเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบให้เกิดความเหมาะสมอีกด้วย

4. ผลการวิเคราะห์

หม้อแปลงตัวอย่างที่นำผลของการออกแบบมาวิเคราะห์ด้วย TTSC ได้เลือกใช้หม้อแปลงขนาดพิกัดดังนี้ 100 และ 400 kVA 3 ph 50 Hz 22kV 400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 โดยการสุ่มตัวอย่างจากหม้อแปลงที่ได้ทำการออกแบบผลิตและทำการทดสอบแล้วจริงในพิกัดเดียวกันแต่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบแตกต่างกัน จำนวน 5 เครื่อง แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงแต่ละตัวทำการวิเคราะห์ด้วย TTSC โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดสอบเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์และตัวอย่างผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 1, 2 และรูปที่ 3, 4



รูปที่ 1 ฟังก์การทำงานของ TTSC

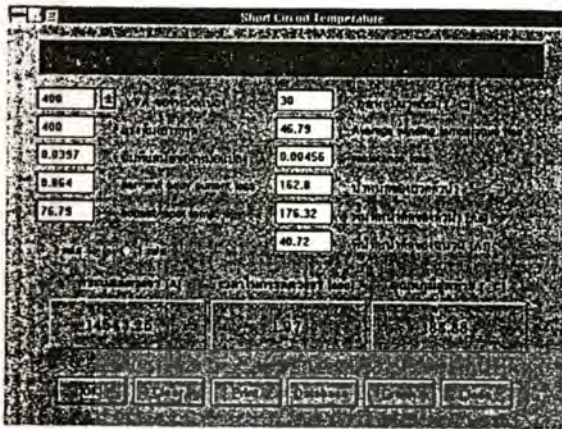
หม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ใช้ฉนวน Class A ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ 105 °C ตามมาตรฐาน จากรูปที่ 5 ถ้าเราสามารถเลือกขนาดของลวดให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำกับพื้นที่หน้าตัดของฉนวนได้เหมาะสมแล้วจะทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรมีค่าลดลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของฉนวนยาวนานขึ้น รูปที่ 6 แสดงถึงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิขณะลัดวงจรของหม้อแปลงกับค่า eddy current loss อุณหภูมิขณะลัดวงจรของหม้อแปลงมีค่าลดลงเมื่อ eddy current loss ลดลง การลดค่า eddy current loss ลงทำได้โดยการลดค่า flux density ของหม้อแปลงลงด้วยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กส่งผลให้อุณหภูมิขณะลัดวงจรลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้การเลือกขนาดของขดลวดและพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กนั้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในเรื่องของขนาดและต้นทุนที่ใช้ในการผลิตที่อาจจะสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้จาก การทดสอบ

Capacity (kVA)	100	400
Impedance (pu.)	0.0385	0.0397
eddy current loss	0.864	0.864
hottest-spot temp. (°C)	72.89	76.79
average wdg. temp rise. (°C)	42.89	46.79
resistance(mΩ)	8.915	4.56
Weight of copper (lb)	92.17	162.8
cross-section area of turn insulation	13.66	40.72
cross-section area of conductor	55.42	176.32

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการคำนวณของ TTSC

Capacity (kVA)	100	400
Rate current (A)	144.34	577.37
Short circuit current (A)	3749.14	14543.25
m	0.0368	0.2063
Short circuit current duration (sec.)	1.85	1.97
Final winding temperature (°C)	95.79	188.88



รูปที่ 2 รูปแบบการใช้งานของ TTSC

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาระแวลิตวงจร, เวลาในการลัดวงจรและอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจร ซึ่งใช้งานง่ายสะดวกรวดเร็วและมีความน่าเชื่อถือ โดยผลของการวิเคราะห์ตามตัวอย่างข้างต้นจะเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์ออกแบบและตัดสินใจเลือกวัตถุดิบที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลง เช่น ขนาดของลวดตัวนำ, ความหนาของฉนวน, ชนิดและความหนาของเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กของหม้อแปลงเพราะปัจจัยต่างๆที่กล่าวมานี้เป็นผลโดยตรงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลง จากผลของ TTSC ทำให้มั่นใจได้ว่าถ้าข้อมูลของหม้อแปลงที่ป้อนค่าถึงไฟฟ้าต่างๆ มาทำการวิเคราะห์โดย TTSC แล้วนำผลที่ได้ไปใช้ในการผลิตจริงก็จะได้หม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพดี สามารถทนต่อสภาวะการใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งเอาไว้

และจากการบรรลุมิติวัตถุประสงค์ในการพัฒนา TTSC นี้เอง จึงคาดหมายว่าในอนาคตจะได้เห็นผลการวิจัยและพัฒนาการออกแบบและวิเคราะห์หม้อแปลงโดยใช้ TTSC ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น(ในแง่ของการวิเคราะห์ความดันที่เกิดขึ้นในตัวถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร)ต่อไปซึ่งก็เป็นวัตถุประสงค์ต่อไปในงานวิจัยที่มุ่งพัฒนาการผลิตอุปกรณ์

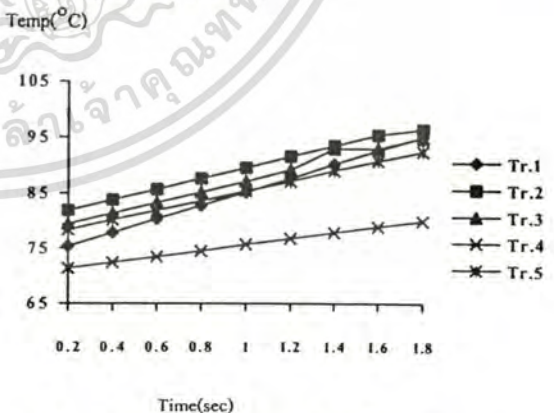
ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพที่ดีและมีความปลอดภัยในการใช้งานสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

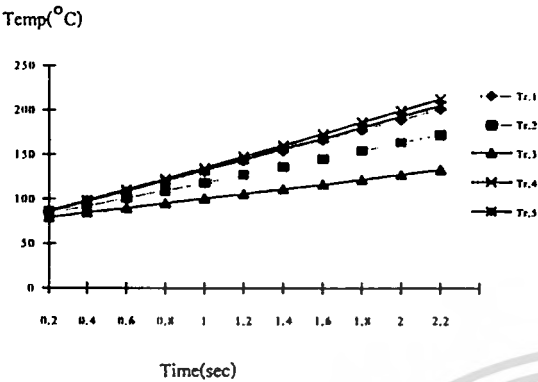
ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทพหุภัณฑ์ไฟฟ้าจำกัด และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่สนับสนุนผลการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

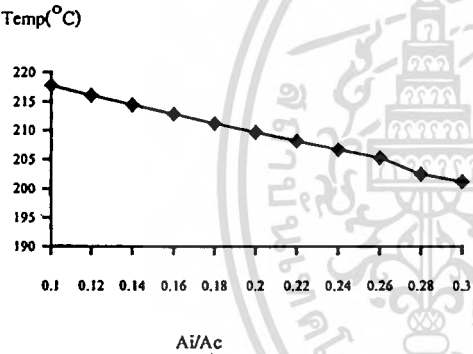
- [1] An American National Standard IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, ANSI/IEEE, C57.12.00-1980
- [2] Power Transformer Part 5 : Ability to withstand Short circuit, IEC 76-5, 1976
- [3] Bharat Heavy Electrical Limited, "Transformer" Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1987
- [4] บุญเลิศ เอี่ยมทัศนาก, "Delphi", ซีอีเคยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, 2539
- [5] ศิริวิช ทัดสวน, บุญเลิศ สือเฉยและ รศ.สุลี บรรจงจิตร, "การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงจำหน่ายชนิดแช่น้ำมันขณะทำการค่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ซึ่งเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 52-60, เมษายน, 2541



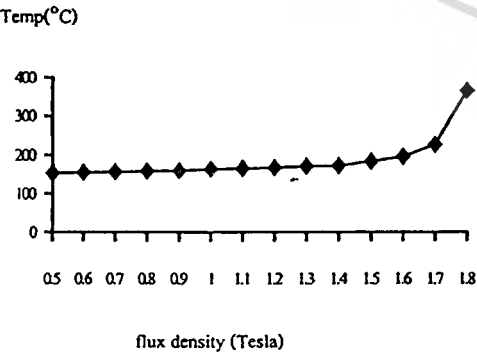
รูปที่ 3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 100 kVA กับเวลาในการลัดวงจร ที่วิเคราะห์จำนวน 5 เครื่องได้จาก TTSC



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 400 kVA กับเวลาในการลัดวงจรที่วิเคราะห์จำนวน 5 เครื่องได้จาก TTSC



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 400 kVA กับอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำและพื้นที่หน้าตัดของฉนวน



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิขณะลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 400 kVA กับค่า flux density ที่ใช้ออกแบบ

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่ม ในน้ำมันเวคเตอร์กรุป Yzn 11

Development of Design Software for Oil Immersed Distribution Transformer with Vector Group Yzn 11

บุญเลิศ สือเดช เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ ศุทธิ บรรจงจิตร
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นงานนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมันที่มีเวคเตอร์กรุป Yzn 11 ตามข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้ในพื้นที่บริการของ กฟภ. ขั้นตอนการออกแบบโดยซอฟต์แวร์มีดังนี้ ออกแบบแกนเหล็ก, ออกแบบขดลวด, ออกแบบระบบฉนวน, ออกแบบขนาดตัวถังและคำนวณราคาต้นทุนวัสดุหลัก จากการออกแบบโดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ ได้ทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA 3 เฟส 50 Hz 22kV-400/230 V แล้วนำผลที่ได้จากการออกแบบไปทำการทดลองสร้างจริง แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากซอฟต์แวร์กับผลทดสอบในทางปฏิบัติ เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถใช้ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Abstract

This paper describes the research and development of design software for oil immersed distribution transformer with vector group Yzn 11 according to the new specifications of Provincial Electricity Authority(PEA). Software was developed and was applied for distribution transformer design for PEA area. The design software include core design, coil design, insulation system design, dimension tank design and cost calculation of main materials. The distribution transformer is 50kVA, 3phase, 50Hz, 22kV-400/230V. The results from the design were compared with the test results and it was determined that the software works effectively.

1. บทนำ

ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนั้นผู้ออกแบบจะต้องอาศัยความรู้ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติในการออกแบบและผลิตหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของการออกแบบเป็นไปตามข้อกำหนดรายละเอียด

(Specification) และสามารถออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีคุณภาพดี และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ปัญหาในการออกแบบและผลิตหม้อแปลงจำหน่ายที่พบบ่อยๆคือ การเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสม ความคลาดเคลื่อน

จากการคำนวณ ความคลาดเคลื่อนในการผลิตและรวมถึงคุณสมบัติของวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตด้วย

ดังนั้นบทความนี้จึงขอนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์ เพื่อช่วยในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมัน (Oil Immersed Distribution Transformer) หรือ OIDT ให้เป็นไปตามข้อกำหนดใหม่ของ กฟผ. และมีเวกเตอร์รูป Yzn 11 โดยซอฟต์แวร์นี้จะเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถทำการวิเคราะห์และออกแบบ OIDT ได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และแม่นยำ ลดการเสียเวลาและข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นจากการคำนวณได้ การออกแบบที่ถูกต้องจะทำให้ OIDT ใช้งานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น เพิ่มความมีเสถียรภาพให้กับระบบจำหน่าย และซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถคำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการสร้าง OIDT ซึ่งทำให้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบให้มีต้นทุนวัสดุต่ำ

2. ทฤษฎีและขั้นตอนการคำนวณออกแบบ

ขั้นตอนในการออกแบบ OIDT สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลักได้ดังนี้คือ ออกแบบแกนเหล็ก, ออกแบบขดลวด, ออกแบบระบบฉนวน และออกแบบขนาดตัวถังหม้อแปลง

2.1 การออกแบบแกนเหล็ก

เป็นการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก โดยปารามิเตอร์ของแกนเหล็กในแต่ละชั้น(Step)มาจัดเรียงลงในวงกลมดังรูปที่ 1 จำนวนชั้นของแกนเหล็กนั้นขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนดเพื่อให้ได้พื้นที่หน้าตัดตามที่ต้องการ แกนเหล็กที่นำมาใช้นี้เป็นแผ่นเหล็กซิลิคอนเกรด M-4 ความหนา 0.27 มม. การคำนวณหาแกนเหล็กที่นำมาจัดเรียงในแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

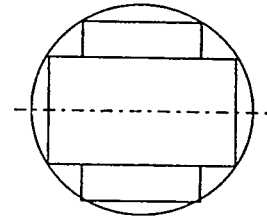
$$F(Y) = 2 \left(\sqrt{\left(\frac{D}{2} \right)^2 - Y^2} \right) \quad (1)$$

โดยที่

$F(Y)$ คือ ความกว้างของหน้าเหล็กในแต่ละชั้น(มม.)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็ก(มม.)

Y คือ ความหนาของแกนเหล็กในแต่ละชั้น(มม.)



รูปที่ 1 การจัดเรียงแกนเหล็กในแต่ละชั้น

2.2 การออกแบบขดลวด

เป็นการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดที่พันขนาดของลวดทองแดงที่ใช้ และขนาด(Dimension)ต่างๆ ของขดลวดที่พันเสร็จแล้วทั้งด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ โดยขดลวดด้านแรงต่ำจะมี 2 ชุดต่อหนึ่งเฟส สมการพื้นฐานของแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดของหม้อแปลงเป็นดังนี้

$$E = 4.44fNAB_m \quad (2)$$

2.3 การออกแบบระบบฉนวน

เป็นการออกแบบเพื่อหาความหนาฉนวนของขดลวดกับส่วนต่างๆ ฉนวนที่ใช้คือกระดาษและกระดาษอัด (paper and pressboard) ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อโคอีเล็กตริกสูง(Dielectric Strength) ทนต่อความชื้น(Moisture) ความร้อนและปฏิกิริยาเคมี ฉนวนของขดลวดแบ่งได้ดังนี้

2.3.1 ฉนวนหลัก(Major Insulation) ประกอบด้วยฉนวนของขดลวดแรงต่ำกับแกนเหล็ก ฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ

2.3.2 ฉนวนรอง(Minor Insulation) ประกอบด้วยฉนวนระหว่างรอบและระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ

2.4 การคำนวณหาระยะต่างๆ ของแกนเหล็ก

เป็นการคำนวณหาขนาด (Dimension) ต่างๆ ของแกนเหล็ก จำนวนแผ่นแกนเหล็กที่ใช้รวมทั้งคำนวณน้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ทั้งหมด ค่าความหนาแน่นของแผ่นแกนเหล็กที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 7.65 kg/dm^3

2.5 คำนวณคุณสมบัติต่างๆ ของ OI DT

เป็นการคำนวณหาคุณสมบัติต่างๆ ของ OIDT โดยแบ่งเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

2.5.1 คำนวณหาค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด โดยคำนวณได้จากสมการ

$$W_C = K_3 W_i W_m \quad (3)$$

โดยที่

W_C = กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (วัตต์)

K_3 = แฟกเตอร์ที่ทำให้การสูญเสียขณะไม่มี

โหลดเพิ่มขึ้น

W_i = น้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ทั้งหมด (กก.)

W_m = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก

แกนเหล็ก 1 กก.

2.5.2 คำนวณหาค่าความสูญเสียขณะมีโหลด

โดยคำนวณได้จากสมการ

$$P_C = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (4)$$

โดยที่

P_C คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากขดลวด (วัตต์)

R_1, R_2 คือ ความต้านทานต้านแรงสูงและแรงต่ำ

(โอห์ม) ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$R = \rho L N / A \quad (5)$$

โดยที่

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ (Specific

Resistive of Conductor) ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$)

ส่วนค่าความสูญเสียของกระแสไหลวน (Eddy

Current Loss) และค่าความสูญเสียปลิกย่อย (Stray Loss)

นั้นสามารถหาได้จากผลการทดสอบในทางปฏิบัติ ซึ่งจะมี

ค่าโดยประมาณ 8 % ของค่าความสูญเสียเนื่องจากขดลวด

ทองแดง (Copper Loss) โดยค่าความสูญเสียทั้งหมดนี้จะต้อง

คำนวณที่อุณหภูมิอ้างอิง 75 องศาเซลเซียส

2.5.3 คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short

Circuit Impedance) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\%Z = \sqrt{\%R^2 + \%X^2} \quad (6)$$

โดยที่

$\%R$ คือ Percentage Resistance

$\%X$ คือ Percentage Reactance โดยสามารถ

คำนวณได้จากสมการ

$$X = [2\pi f \mu_0 L_m AT / (L_C E_i)] \times [a + (b_1 + b_2)/3] \times 100 \quad (7)$$

โดยที่

L_m คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ (เมตร)

AT คือ แอมแปร์ - รอบ (Ampere-Turn) ของขดลวดแรงสูงหรือแรงต่ำ

L_C คือ ความยาวตามแนวแกน (axial) ขดลวด (เมตร)

E_i คือ แรงดันต่อรอบ

a คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ

(เมตร)

b_1 คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงต่ำ

(เมตร)

b_2 คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงสูง

(เมตร)

2.5.4 คำนวณค่าโวลท์เตจเรกูเลชัน (Voltage Regulation) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{ Reg.} = (R \cos \theta + X \sin \theta) + [(X \cos \theta - R \sin \theta)^2 / 200] \quad (8)$$

โดยที่

R คือ Percentage Resistive Drop

X คือ Percentage Reactive Drop

2.5.5 คำนวณหาประสิทธิภาพ (Efficiency) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\% \eta = [1 - (\text{Total Loss} / \text{Input Power})] \times 100 \quad (9)$$

2.6 การออกแบบตัวถังและครีบบระบายความร้อน

เป็นการหาขนาดของตัวถังและจำนวนครีบบระบายความร้อนเพื่อให้ OIDT มีพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนเพียงพอ ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของ OIDT ขณะใช้งานมีค่าเป็นไปตามข้อกำหนด (Specification)

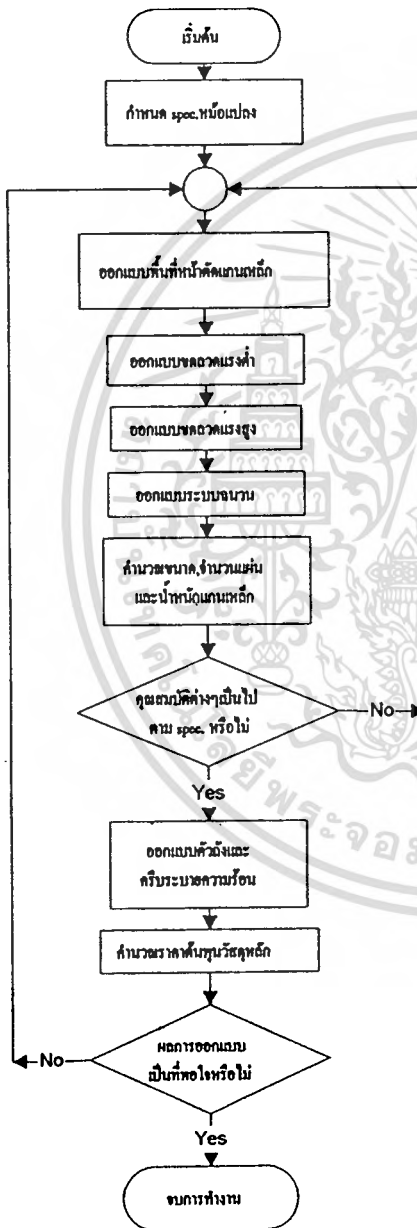
2.7 คำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิต

เป็นการคำนวณหาจำนวนและปริมาณของวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิต OIDT โดยพิจารณาวัสดุหลักคือ

แกนเหล็ก, ขดลวดทองแดงทางด้านแรงสูงและแรงต่ำและน้ำมันหม้อแปลง

8. ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์

ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์

รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น โดยผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงทางหน้าจอคอมพิวเตอร์หรือเครื่องพิมพ์ โดยผู้ออกแบบจะต้องทำการพิจารณาผลที่ได้จากการออกแบบว่าเป็นไปตามข้อกำหนด (Specification) หรือไม่ ถ้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนดผู้ออกแบบก็สามารถที่จะกลับไปแก้ไขพารามิเตอร์ต่างๆ ได้โดยง่าย และยังสามารถเช็คราคาคำนวณวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตได้ โดยถ้ายังไม่เป็นที่พอใจผู้ออกแบบก็จะสามารถทำการแก้ไขพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ การคำนวณออกแบบก็จะเริ่มใหม่อีกครั้ง เป็นลักษณะการวนรอบของการทำงานไปเรื่อยๆ จนกว่าผู้ออกแบบจะพอใจผลที่ได้จากการวิเคราะห์ออกแบบ

4. ผลการออกแบบ และผลการทดสอบในทางปฏิบัติ

ปฏิบัติ

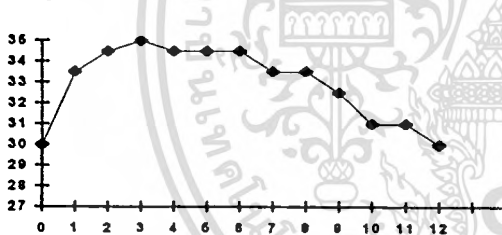
ตัวอย่างผลของ OIDT ที่ได้ออกแบบโดยซอฟต์แวร์มีพิกัดดังนี้คือ ขนาด 50 kVA 3 phase 50Hz 22kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Yzn 11 โดยนำผลที่ได้จากการออกแบบมาทำการสร้าง OIDT ตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วนำ OIDT ที่สร้างขึ้นนี้มาทำการทดสอบได้ผลดังตารางที่ 1

จากการพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบกับผลที่ได้จากการสร้างจริงดังตารางที่ 1 และ 2 จะเห็นว่าค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อยจากตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาที่ค่า Voltage Regulation จะเห็นว่าค่าคลาดเคลื่อน -9.31% ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนจากการออกแบบสูง แต่ในความเป็นจริงนั้น Voltage Regulation ดังๆจะทำให้มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นผลทดสอบจริงมีค่าต่ำกว่าค่าจากการออกแบบจึงถือว่าเป็นผลดี และจากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาขดลวดแรงต่ำและแรงสูงมีค่าคลาดเคลื่อน 1.76% และ -0.98% ตามลำดับ และแกนเหล็กมีค่าคลาดเคลื่อน 1.85% ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดได้จากค่าตัวประกอบในการผลิต (Building Factor) หรืออาจเกิดจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตมีคุณสมบัติคลาดเคลื่อนจากข้อกำหนด (Specification)

จากตารางที่ 3 และรูปกราฟที่ 3,4 และ 5 แสดงผลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันหม้อแปลง จะเห็นว่ามิก้าต่ำกว่าคุณสมบัติตามข้อกำหนด (Specification) ค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันหม้อแปลงมีค่าต่ำจะทำให้จำนวนของหม้อแปลงมีอายุยาวนานขึ้นซึ่งทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบระดับฉนวนสำหรับขดลวดและส่วนต่างๆ ที่ต้องกับขดลวดและทดสอบความทนต่อแรงดันเกินตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 384-2525 ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

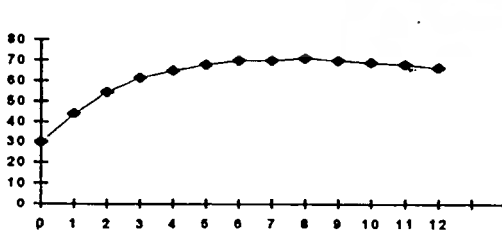
จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลดังกล่าวมาแล้วย่อมแสดงให้เห็นว่า ผลที่ได้จากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริง โดยสามารถทำการวิเคราะห์ออกแบบ OIDT ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าต่างๆ ได้ตามข้อกำหนด (Specification) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Temp. (°C)



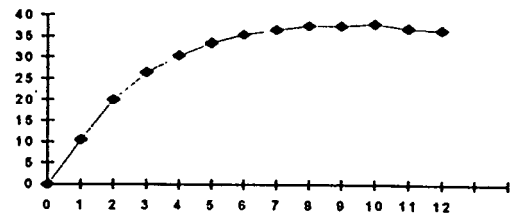
รูปที่ 3 อุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temp.) ขณะทำการทดสอบ

Temp. (°C)



รูปที่ 4 ผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp.)

Temp (°C)



รูปที่ 5 ผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp. Rise)

5. สรุป

จากผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อช่วยในการออกแบบ OIDT นี้จะเห็นว่าซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้งานง่าย มีความแม่นยำ ผลที่ได้เป็นที่น่าเชื่อถือ ซึ่งผลจากการทดลองดังกล่าวข้างต้น เป็นเครื่องยืนยันให้เห็นว่าสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและนำผลที่ได้จากการออกแบบไปใช้งานได้จริง ทำให้ผู้ออกแบบสามารถใช้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ทำการวิเคราะห์ออกแบบ OIDT ให้มีค่าความสูญเสียต่ำ และมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น และยังเป็นเครื่องมือสำหรับช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถปฏิบัติงานได้รวดเร็วขึ้น ลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นจากการคำนวณ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย มีต้นทุนในการผลิตต่ำลง และยังเป็นการสนองนโยบายการประหยัดพลังงานของรัฐบาล นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำซอฟต์แวร์นี้ไปทำการพัฒนาต่อเพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์ออกแบบ OIDT ที่มีเวกเตอร์รูป Dyn 11 และวิเคราะห์ออกแบบ OIDT ที่ใช้ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง(แรงดันสูง 12/24 kV แรงดันต่ำ 416/240 V) ได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท พงษ์นิมานการไฟฟ้า จำกัด และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับทุกท่านที่สนับสนุนผลการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] เอกสารข้อกำหนดรายละเอียด(Specification)ของหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส 50 Hz, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.)
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง” มอก.384-2525 กรุงเทพมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2538
- [3] บุญเลิศ เอี่ยมทัศนาศนา “Delphi”, ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ, 2539
- [4] Bharat Heavy Electricals Limited “Transformer” Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1987
- [5] William M. Flanagan “Hand Book of Transformer Design and Application”, McGraw-Hill, New York, Second Edition, 1993
- [6] Power Transformer Part 1: General, IEC76-1, 1993
- [7] Power Transformer Part 2 : Temperature Rise,

IEC76-2, 1993

- [8] Power Transformer Part 3: Insulation Level and Dielectric Tests, IEC76-3, 1980
- [9] Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer, IEC 354-1991

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบกับผลที่ได้จากการทดสอบ

คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	ผลจากการออกแบบ	ผลจากการทดสอบ
OIDT	กฟภ.		
No load loss	160	155.2	150.1
Load loss	950	917.6	904.2
Short cct. imp.	4(± 10%)	3.91	3.78
% reg.	-	2.04	1.85
Efficiency	-	97.76	97.88

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบวัสดุหลักที่ได้จากการออกแบบกับการสร้างจริง

วัตถุดิบหลัก	ผลจากการออกแบบ	ผลจากการสร้างจริง
แกนเหล็ก (กก.)	145.60	148.30
ขดลวดแรงต่ำ (กก.)	27.81	28.30
ขดลวดแรงสูง (กก.)	33.63	33.30
น้ำมันหม้อแปลง (ลิตร)	126.70	120.00

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันและขดลวดของหม้อแปลงที่สร้าง

	Guarantee	Test Result
HV. Winding Temp. Rise (°C)	65	40.49
LV. Winding Temp. Rise (°C)	65	44.90
Top Oil Temp. Rise (°C)	60	38.00

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์
เกิดวันที่	10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2513
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม
การศึกษา	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2537
ผลงานทางวิชาการ	1." การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะ ลัดวงจร " วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 2."การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มใน น้ำมันเวคเตอร์กรุป Yzn 11" วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2
ประสบการณ์การทำงาน 2535-2537	ครูปฏิบัติการ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ 2538-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้