

บทที่ 5

แบบจำลองอายุการใช้งานและแนวทางการจ่ายไหล

5.1 หลักการที่ใช้ในแบบจำลองเพื่อหาอายุการใช้งาน

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของหลักการ ที่ใช้ในการคำนวณหาอายุการใช้งานของหม้อแปลง จะขอกล่าวนำโดยคร่าวๆ เพื่อให้ทราบถึงหลักการที่ใช้ในแบบจำลองดังนี้ หัวข้อที่ 5.1.1 จะกล่าวถึงการคำนวณค่าอุณหภูมิที่สูงที่สุดในหม้อแปลงตามวิธีการที่เสนอใน [5,13,14,15,16,17] และเมื่อรวมผลของฮาร์มอนิกจะใช้ผลลงตามทีเสนอใน[10] เป็นหลัก ดังที่กล่าวถึงแล้วในบทที่ 4 และจะกล่าวเพิ่มเติมอีกเพื่อให้ครบถ้วน หัวข้อที่ 5.1.2 จะกล่าวถึงเหตุผลที่ใช้ในการคิดอายุการใช้งานที่ลดลงเป็นรอบปีแทนที่จะคิดเป็นรอบวัน หัวข้อที่ 5.1.3 จะกล่าวถึงข้อดีของการประมาณอุณหภูมิห้องตามที่เสนอใน[5] หัวข้อที่ 5.1.4 กล่าวถึงแบบจำลองของไหล หัวข้อที่ 5.1.5 กล่าวถึงความสำคัญของช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณแต่ละรอบ โดยแสดงให้เห็นถึงผลที่มีต่ออายุการใช้งานที่ลดลง หัวข้อที่ 5.1.6 กล่าวถึงความสำคัญของการปรับค่าของตัวแปรในการคำนวณแต่ละรอบตามที่เสนอใน[5,11,13,14,15] หัวข้อที่ 5.1.7 กล่าวถึงการแบ่งประเภทของหม้อแปลงตามค่าพิกัดกำลังตามที่เสนออยู่ใน[13,14,15] หัวข้อที่ 5.1.8 กล่าวถึงการแบ่งประเภทของฉนวนหม้อแปลง ตามค่าพิกัดกำลังและอุณหภูมิของหม้อแปลงเพื่อให้ทราบถึงค่าคงที่ของ Arrhenius ตามที่เสนออยู่ใน[13,14,15,16] หัวข้อที่ 5.1.9 จะได้แสดงถึงแผนผังการทำงานของแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นตามหลักการที่ใช้ในหัวข้อที่ 5.1.1 - 5.1.8

5.1.1 อุณหภูมิที่สูงที่สุดในหม้อแปลง

ตำแหน่งของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด และขนาดของอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงจะแตกต่างกันตามประเภทของหม้อแปลง ว่าเป็นหม้อแปลงแบบน้ำมันหรือแบบฉนวนแห้ง ซึ่งทำให้มีหลักการที่ใช้ในการหาค่าอุณหภูมิที่สูงที่สุดต่างกันดังนี้

5.1.1.1 อุณหภูมิที่สูงที่สุดของหม้อแปลงแบบน้ำมัน

เนื่องจากในหม้อแปลงแบบน้ำมัน อุณหภูมิของน้ำมันตอนบนจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำมันตอนล่าง ทำให้จุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณขดลวดตอนบน ซึ่งจากลักษณะเช่นนี้ ทำให้อุณหภูมิสูงที่สุดเกิดขึ้นในหม้อแปลงแบบน้ำมันแยกได้เป็น 3 ส่วน ดังสมการ

$$\theta_{hs} = \theta_a + \theta_o + \theta_g \quad (5.1)$$

โดยที่

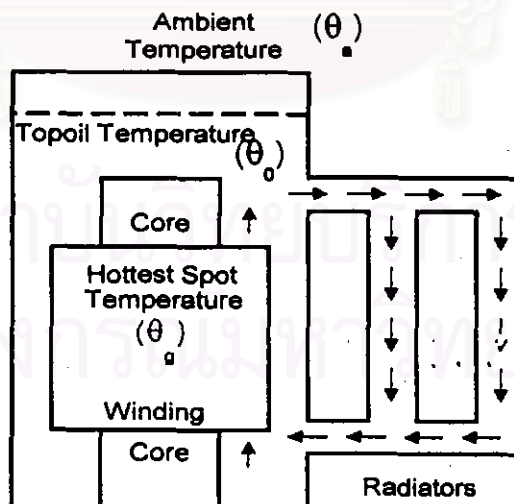
θ_{hs} คืออุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง ($^{\circ}\text{C}$)

θ_o คืออุณหภูมิบริเวณรอบๆ หม้อแปลง หาได้จากสมการ (5.14) ($^{\circ}\text{C}$)

θ_g คืออุณหภูมิของน้ำมันตอนบนที่เกิดจากอุณหภูมิห้อง หาจากสมการ (5.20) ($^{\circ}\text{C}$)

θ_r คืออุณหภูมิที่สูงที่สุดของขดลวดที่เกิดจากอุณหภูมิของน้ำมันที่อยู่ตอนบน หาได้จากสมการ (5.4) ($^{\circ}\text{C}$)

ลักษณะของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งของอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง

จากสมการที่(3.6) เมื่อเรามาประยุกต์ใช้ในการหาอุณหภูมิของน้ำมันตอนบนในหม้อแปลงเราสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\theta_c = kP_C^n \quad (5.2)$$

โดยที่

θ_c คือผลต่างของอุณหภูมิน้ำมันตอนบนกับอุณหภูมิห้อง ($^{\circ}\text{C}$)

P_C คือค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น (w.)

k คือค่าคงที่

n คือเลขยกกำลัง มีค่าระหว่าง 0.8 - 1 ขึ้นกับวิธีการระบายความร้อนในหม้อแปลง
จากสมการที่ (5.2) เราสามารถเปรียบเทียบได้ค่าของ θ_c ที่ 2 สภาวะได้ดังสมการ

$$\theta_{ou} = \theta_{of} \left(\frac{P_K}{P_R} \right)^n \quad (5.3)$$

โดยที่

θ_{ou} คืออุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันตอนบนขณะจ่ายโหลดใดๆ ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{of} คืออุณหภูมิของน้ำมันตอนบนขณะจ่ายโหลดที่พิกัดหม้อแปลง ($^{\circ}\text{C}$)

P_R คือกำลังสูญเสียรวมที่ความถี่มูลฐานที่พิกัดโหลด (w.)

P_K คือกำลังสูญเสียรวมที่เกิดจากผลของฮาร์มอนิก (w.)

สมการที่(5.3)นี้เป็นสมการทั่วไปในการหาค่าอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันตอนบน โดยค่าของกำลังสูญเสียรวมที่เกิดจากผลของฮาร์มอนิก P_K นั้นเราสามารถหาค่าได้จากการรวมผลของสมการ(4.2) , (4.3) , (4.30) และ (4.33) ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4

ส่วนในกรณี θ_g ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุดของขดลวด ที่เกิดจากอุณหภูมิของน้ำมันตอนบน จาก[10]เราสามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$\theta_g = \theta_{gf} K^{2m} (F(p, h))^m \quad (5.4)$$

โดยที่

θ_{gf} คืออุณหภูมิที่สูงที่สุดของขดลวด ที่เกิดจากอุณหภูมิของน้ำมันตอนบนขณะจ่ายโหลดที่พิกัดหม้อแปลง ($^{\circ}\text{C}$)

K คืออัตราส่วนพิภคขณะใช้งานหม้อแปลงต่อพิภคของหม้อแปลง

$F(p, h)$ คือฟังก์ชันที่ใช้ปรับค่าเนื่องจากผลของฮาร์มอนิก

m คือเลขยกกำลังมีค่าระหว่าง 0.8 - 1 ขึ้นกับวิธีการระบายความร้อนในหม้อแปลง ฟังก์ชัน $F(p, h)$ ในสมการที่ (5.4) สามารถหาได้จากสมการ

$$F(p, h) = F_{p1} F_{p2} / (1 + \chi) \quad (5.5)$$

โดยค่า F_{p1} หาได้จากสมการที่ (4.25) ส่วน F_{p2} หาได้จากสมการ

$$F_{p2} = 1 + \chi (1 + p^2 \sum_{h=1}^{\infty} h^2 F_h^2 C_h / C_1) / F_{p1} \quad (5.6)$$

โดยที่ C_h หาค่าได้จากสมการ

$$C_h = \frac{6 \sinh \xi - \sin \xi}{\xi^3 \cosh \xi + \cos \xi} \quad (5.7)$$

โดยค่าของ ξ หาค่าได้จากสมการ

$$\xi = H \sqrt{\pi \mu_0 \gamma h f} \quad (5.8)$$

โดยที่

H คือความสูงของขดลวดตัวนำ (mm.)

γ คือค่าความนำไฟฟ้าของขดลวด (w./m °C)

h คืออันดับฮาร์มอนิก

f คือความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz.)

และค่า χ จากสมการที่ (5.6) หาค่าได้จากสมการ

$$\chi = (mf\gamma)^2 C_1 \quad (5.9)$$

โดยค่าของ m หาได้จากสมการ

$$m = \pi N N_x K_x \delta_{bh} H^3 \sqrt{(1 + \delta_{bh}^2 \beta_{xy})} / 3 \quad (5.10)$$

โดยที่

N คือจำนวนขดลวดตัวนำ

N_x คือจำนวนขดลวดตัวนำที่ต่อขนานกัน

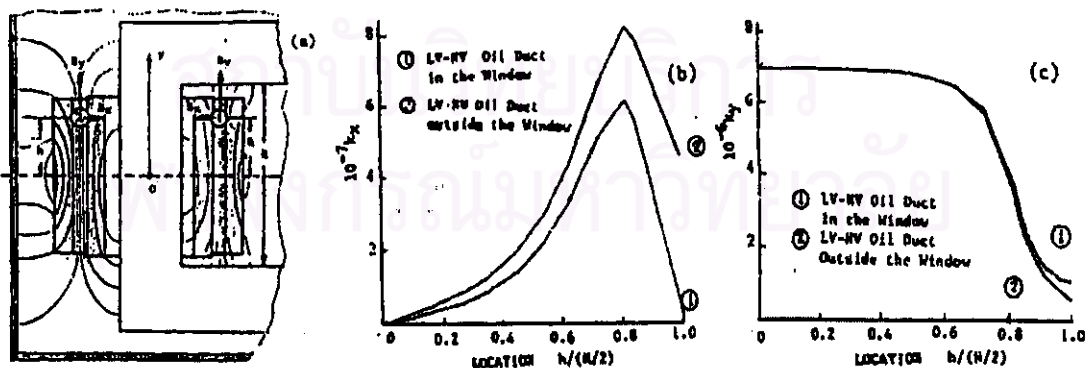
H คือความสูงของขดลวดตัวนำ (mm.)

K_x คือฟังก์ชันการกระจายสนามแม่เหล็กในแนวขวาง

δ_{bh} คืออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของขดลวดตัวนำ b/h

β_{xy} คืออัตราส่วนของสนามแม่เหล็กในแนวขวางต่อแนวยาว K_x / K_y

ค่าของ δ_{bh} และ β_{xy} เป็นค่าที่คิดที่จุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด ส่วนค่าของ N และ N_x จะคิดที่ด้านที่ทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นขดลวดที่อยู่ด้านใน ซึ่งเป็นขดลวดแรงดันต่ำ และค่าของ K_x และ K_y จะมีลักษณะสัมพันธ์กับ ขดลวด , แกนเหล็ก และ ตัวถังของหม้อแปลง โดยในรูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของ K_x และ K_y กับลักษณะโครงสร้างของหม้อแปลง และรูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสูงสุดของ K_x และ K_y กับพิกัดของหม้อแปลง

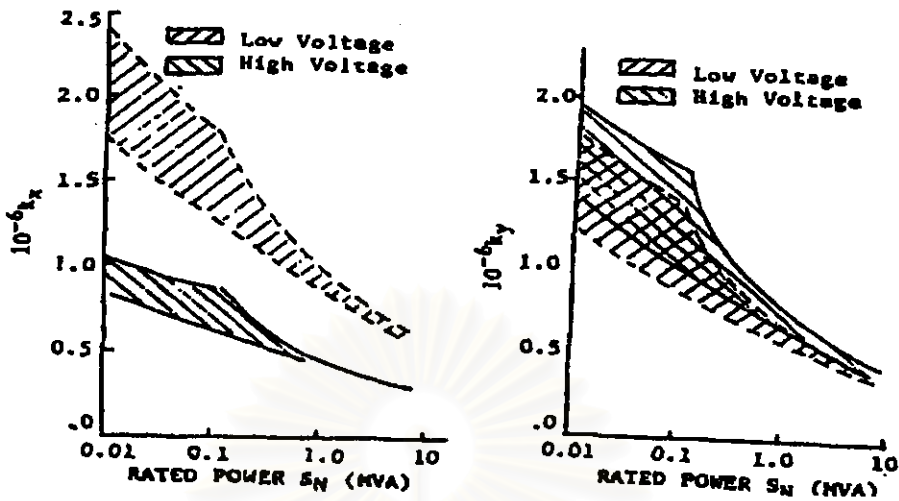


(a) ลักษณะทั่วไป

(b) การกระจายของฟลักซ์ในแนวขวาง K_x

(c) การกระจายของฟลักซ์ในแนวแกน K_y

รูปที่ 5.2 การกระจายของฟลักซ์ในหม้อแปลงที่ตำแหน่งของจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดต่างๆ



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของ K_x และ K_y ที่ปลายขดลวดกับค่าที่กีดของหม้อแปลง

5.1.1.2 อุณหภูมิที่สูงที่สุดของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง

ในหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งนั้น ตำแหน่งของจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดจะไม่คงที่ แตกต่างออกไปตามลักษณะของการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น ทำให้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิที่สูงที่สุดเป็นดังนี้

$$\theta_{hs} = \theta_a + \theta_{avgw} + \theta_w \quad (5.11)$$

โดยที่

θ_{hs} คืออุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง ($^{\circ}\text{C}$)

θ_a คืออุณหภูมิบริเวณรอบๆ หม้อแปลง หาได้จากสมการ (5.14) ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{avgw} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เกินจากอุณหภูมิห้อง หาได้จากสมการ(5.22) ($^{\circ}\text{C}$)

θ_w คืออุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกินจากอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด จากสมการ(5.13) ($^{\circ}\text{C}$)

สมการที่(5.11)เป็นสมการทั่วไปของอุณหภูมิที่เวลาใดเวลาหนึ่ง โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เกินจากอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกินจากอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่สภาวะคงตัวสามารถหาค่าได้ดังสมการ (5.12) และ (5.13) ตามลำดับ

$$\theta_{wv} = \theta_{avgv} K^2 \frac{G}{G_N} \quad (5.12)$$

โดยที่

θ_{wv} คืออุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยของขดลวดที่เกินจากอุณหภูมิห้องที่ไหลได้ๆ

θ_{avgv} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เกินจากอุณหภูมิห้อง ที่พิกัดหม้อแปลงที่ความถี่มูลฐาน

K คืออัตราส่วนพิกัดขณะใช้งานหม้อแปลงต่อพิกัดของหม้อแปลง

G, G_N คือฟังก์ชันที่หาได้จากสมการที่ (4.24) และ (4.9) ตามลำดับ

และ

$$\theta_w = \theta_{wv} K^{2m} F(p, h)^m \quad (5.13)$$

โดยที่

θ_w คืออุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกินจากอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด

θ_{wv} คืออุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกินจากอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด ที่พิกัดหม้อแปลงที่ความถี่มูลฐาน

อุณหภูมิประเภทต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.1.1 จะพบว่าเป็นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในตัวของหม้อแปลงเอง แต่อุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงจะต้องรวมผลของอุณหภูมิห้องที่อยู่รอบๆ หม้อแปลงเข้าไปด้วย ดังจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 5.1.3

5.1.2 รอบที่ใช้ในการคำนวณ

การพิจารณาค่าโหลดที่จะใช้ในแบบจำลองจะเป็นการคิดค่าโหลดในรอบปี ทั้งนี้เพราะโหลดจริงในระบบไฟฟ้า จะมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบปีมากกว่าการคิดโหลดประจำวัน ดังที่เสนอในมาตรฐานต่างๆ [5,13,14,15,16,17] ตัวอย่างเช่น โหลดจริงในระบบไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามฤดู โดยในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็นโหลดของหม้อแปลงจะมีค่าสูงที่สุดในช่วงฤดูหนาว แต่ในประเทศที่มีอากาศร้อนโหลดของหม้อแปลงจะมีค่าสูงที่สุดในช่วงฤดูร้อน

หรือโหลดที่ใช้ในโรงงาน ซึ่งเป็นระบบที่ขอยกลงมาที่กักของโหลดที่ใช้งานจะขึ้นอยู่กับฤดูผลิต หรือจะผลิตก็ต่อเมื่อมีลูกค้าสั่งสินค้า เป็นต้น

5.1.3 อุณหภูมิห้องรอบ ๆ หม้อแปลง

แบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์จะคิดอุณหภูมิห้อง เป็นฟังก์ชันรูป Sinusoidal ขึ้นสองชั้นดังสมการ

$$\theta_a = \theta_{ay} + A \cos \frac{2\pi}{365} (\text{day} - DX) + B \cos \frac{2\pi}{24} (\text{hour} - TX) \quad (5.14)$$

โดยที่

θ_{ay} คืออุณหภูมิเฉลี่ยประจำปีในหน่วยองศาเซลเซียส

A คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันจากอุณหภูมิเฉลี่ยประจำปีหน่วยเคลวิน

B คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมงจากอุณหภูมิเฉลี่ยประจำวันหน่วยเคลวิน

DX คือวันที่ร้อนที่สุดของปี

TX คือชั่วโมงที่ร้อนที่สุดของวัน

day คือตัวเลขประจำวัน ตัวอย่างเช่น วันที่ 1 กุมภาพันธ์ = 32

$hour$ คือตัวเลขประจำชั่วโมง ตัวอย่างเช่น 1:15 p.m. = 13.25

5.1.4 การเปลี่ยนแปลงโหลด

แบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ สามารถเปลี่ยนแปลงโหลดได้ในแต่ละชั่วโมงของวัน และเปลี่ยนแปลงโหลดได้ในแต่ละเดือนของปี

5.1.5 การแบ่งช่วงเวลาในการคำนวณ

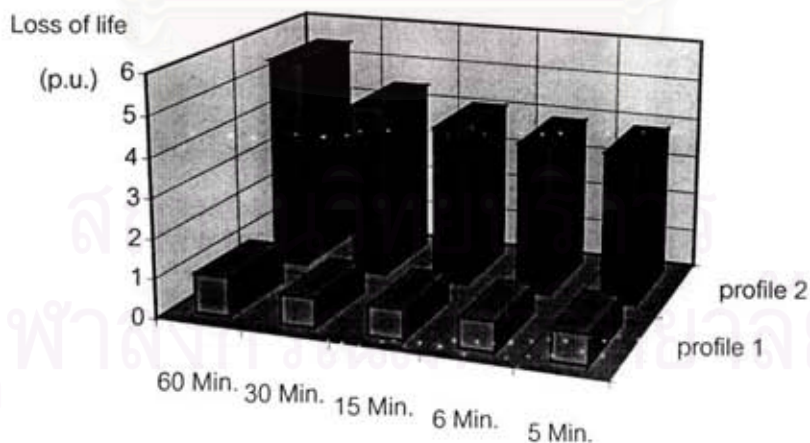
ช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นตัวกำหนดความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้ แต่ถ้านำมาแบ่งช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณสั้นเกินไป จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณนานเกินความ

จำเป็นซึ่งไม่เหมาะสม จากการทดลองโดยใช้โปรแกรม Excel 7 เพื่อหาค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการคำนวณ โดยใช้ค่าของตัวแปรต่างๆ ในแถวแรกตารางที่ 2 หน้า 33 ของ[5] โดยกำหนดโหลดให้มีค่าคงที่ในแต่ละชั่วโมงเป็นโหลดแบบที่ 1 และโหลดแบบที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และใช้หลักการปรับค่าคงตัวเวลาทางความร้อน ในแต่ละรอบที่คำนวณดังที่เสนอใน[13,14,15,16] ผลการทดลองที่ได้สามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าโหลดที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดของโหลด	โหลด (p.u.) ที่ชั่วโมง											
	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
แบบที่ 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
แบบที่ 2	0.8	0.8	0.8	1	1	1	0.8	1	1	1	1	1.2

ชนิดของโหลด	โหลด (p.u.) ที่ชั่วโมง											
	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
แบบที่ 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
แบบที่ 2	1.4	1.4	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8



รูปที่ 5.4 อายุการใช้งานที่ลดลงกับค่าของช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

จากรูปที่ 5.4 จะได้ว่าอายุการใช้งานที่ลดลงจะเริ่มมีค่าคงที่ เมื่อช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณมีค่าประมาณ 5 นาที และจากการทดลองเปรียบเทียบกับตารางการจ่ายโหลด

มาตรฐานต่างๆ ดังที่เสนออยู่ใน[5,13,14,15,16] พบว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละรอบ 5 นาที ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในแบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้ช่วงเวลาในการคำนวณในแต่ละรอบเป็น 5 นาที

5.1.6 การปรับค่าตัวแปรในการคำนวณแต่ละรอบ

เป็นธรรมชาติของการคำนวณแบบที่มีการคิดวนเป็นรอบๆ จะต้องมีค่าตัวแปรบางตัวที่ต้องมีการปรับค่าเพื่อให้เหมาะสมในการคำนวณ โดยแบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตัวแปรที่จะต้องปรับค่าในการคำนวณแต่ละรอบมีดังนี้

5.1.6.1 ค่าคงตัวเวลาทางความร้อน

ในที่นี้หมายถึงค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของน้ำมันในหม้อแปลงแบบน้ำมัน และค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของขดลวดในหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง ที่ต้องมีการปรับค่าเพราะว่าในแต่ละรอบของการคำนวณ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นกับอุณหภูมิสุดท้ายในแต่ละรอบมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นหากมีการคิดให้ค่าคงตัวเวลาทางความร้อนมีค่าคงที่ทุกรอบที่ใช้ในการคำนวณ จะทำให้ลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิมียุ่ค่าแตกต่างออกไปจากการคิดแบบมีการปรับค่า และทำให้การคำนวณหาอายุการใช้งานผิดพลาดไป โดยใน[13,14,15,16] ได้เสนอสมการที่ใช้ในการปรับค่าคงตัวเวลาทางความร้อนดังนี้

$$\tau_o = \tau_{or} \frac{\left(\frac{\theta_{om}}{\theta_{of}}\right) - \left(\frac{\theta_{ol}}{\theta_{of}}\right)}{\left(\frac{\theta_{om}}{\theta_{of}}\right)^{1/n} - \left(\frac{\theta_{ol}}{\theta_{of}}\right)^{1/n}} \quad (5.15)$$

โดยที่

- τ_o คือค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของน้ำมันที่โหลดใดๆ (ชั่วโมง)
- τ_{or} คือค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของน้ำมันที่พิกัดหม้อแปลง (ชั่วโมง)
- θ_{om} คืออุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันตอนบนที่ค่าโหลดใดๆ คำนวณจาก(5.3) ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_{ol} คืออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมันตอนบนในแต่ละรอบ ($^{\circ}\text{C}$)

- θ_{opt} คืออุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันคอนกรีตที่พิกัดโหลด ($^{\circ}\text{C}$)
 m คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับการระบายความร้อนภายในหม้อแปลง

และสำหรับหม้อแปลงแบบขนวนแห้งค่าคงตัวเวลาทางความร้อนหาได้จากสมการ

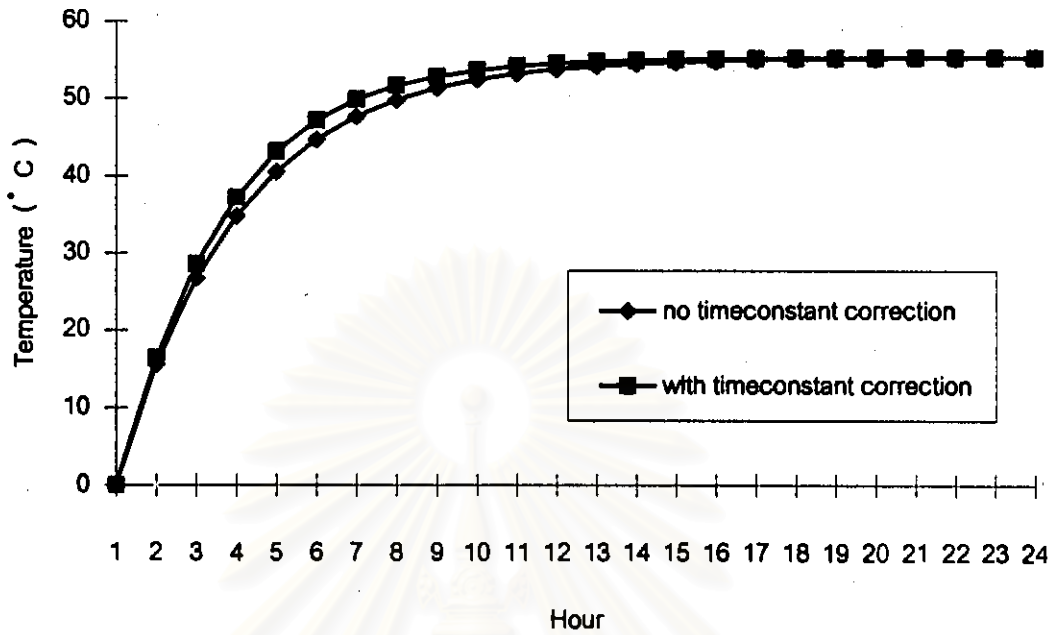
$$\tau_w = \tau_{wr} \frac{\left(\frac{\theta_{avgw}}{\theta_{avgpl}}\right) - \left(\frac{\theta_{wt}}{\theta_{avgpl}}\right)}{\left(\frac{\theta_{avgw}}{\theta_{avgpl}}\right)^{1/m} - \left(\frac{\theta_{wt}}{\theta_{avgpl}}\right)^{1/m}} \quad (5.16)$$

โดยที่

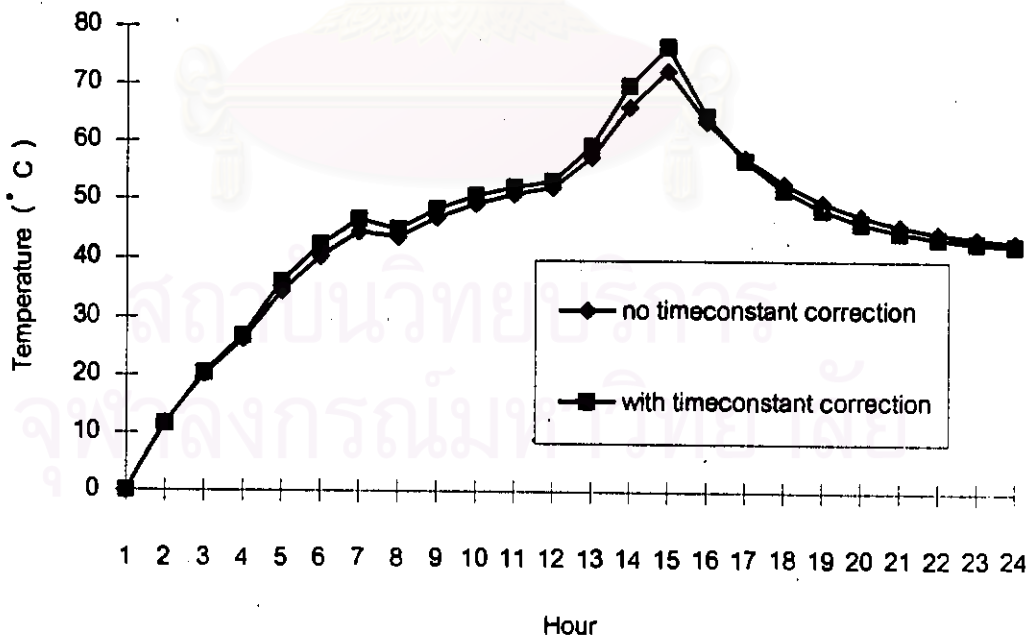
- τ_w คือค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของขดลวดที่โหลดใดๆ (ชั่วโมง)
 τ_{wr} คือค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของขดลวดที่พิกัดหม้อแปลง (ชั่วโมง)
 θ_{avgw} คืออุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดที่ค่าโหลดใดๆ คำนวณจาก(5.12) ($^{\circ}\text{C}$)
 θ_{wt} คืออุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวดในแต่ละรอบ ($^{\circ}\text{C}$)
 θ_{avgpl} คืออุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดที่พิกัดโหลด ($^{\circ}\text{C}$)
 m คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับการระบายความร้อนภายในหม้อแปลง

จากการทดลองหาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และอายุการใช้งานที่ลดลงไป โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจาก[5] เหมือนในข้อที่ 5.1.5 และใช้การปรับค่าคงตัวเวลาทางความร้อนดังสมการที่ 5.15 โดยมีค่าอุณหภูมิต่างๆ เริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.5 - 5.7

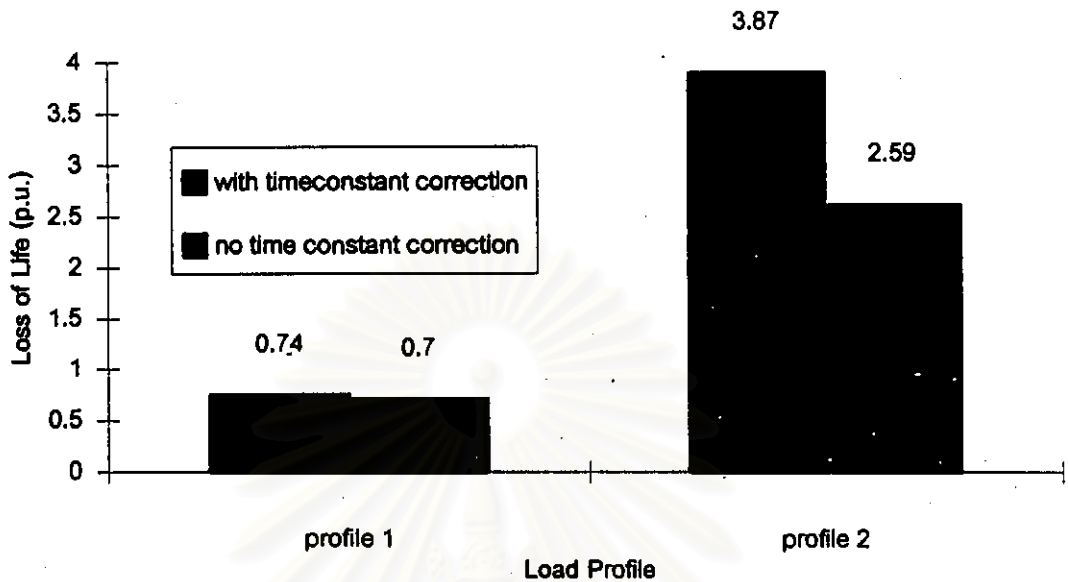
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 อุณหภูมิของน้ำมันตอนบนในกรณีที่จ่ายโหลดแบบที่ 1 ในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.6 อุณหภูมิของน้ำมันตอนบนในกรณีที่จ่ายโหลดแบบที่ 2 ในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.7 อายุการใช้งานที่ลดลงไปโดยใช้หลักการคิดค่าคงตัวทางความร้อนต่างกัน

จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 จะสังเกตได้ว่า ในกรณีที่ไม่นำหลักการปรับค่าคงตัวเวลาทางความร้อนมาคิด จะมีผลทำให้อุณหภูมิของน้ำมันตอบนบนที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงและทำให้อายุการใช้งานที่ลดลงต่ำกว่าความเป็นจริงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.7

5.1.6.2 ค่ากำลังสูญเสียตอบนมีโหลด

ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดกำลังสูญเสียหลักที่เกิดขึ้นคือ กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวด ซึ่งเราทราบกันโดยทั่วไปว่าความต้านทานของขดลวดแปรผันโดยตรงกับค่าอุณหภูมิของขดลวด ดังนั้นกำลังสูญเสียในส่วนนี้จึงแปรผันตรงกับค่าของอุณหภูมิ ดังสมการ

$$P_{Cu2} = P_{Cu1} \left(\frac{\theta_1 + \theta_{w2}}{\theta_1 + \theta_{w1}} \right) \quad (5.17)$$

โดยที่

P_{Cu1} คือค่าของกำลังสูญเสียความต้านทานที่เวลา t_1 (w.)

P_{Cu2} คือค่าของกำลังสูญเสียความต้านทานที่เวลา t_2 (w.)

- θ_{w1} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เวลา t_1 ($^{\circ}\text{C}$)
 θ_{w2} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เวลา t_2 ($^{\circ}\text{C}$)
 θ_1 คือค่าคงที่มีค่า 234.5°C สำหรับทองแดง และ 225°C สำหรับอลูมิเนียม ($^{\circ}\text{C}$)

ในหม้อแปลงแบบน้ำมัน ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวหม้อแปลง จะมีผลทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันลดลง ทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำมันได้ดีขึ้นซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิลดลงได้ จาก[5,13,14,15]คิดผลของความต้านทานขดลวดที่เพิ่มขึ้นกับผลของการไหลเวียนของน้ำมันที่เพิ่มขึ้นนี้หักล้างกัน แต่ในหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งจะยังคงคิดผลของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินี้อยู่[16,17] นอกจากนั้นจาก[11]กำลังสูญเสียปลีกย่อยที่เกิดขึ้นในขดลวดจะแปรผกผันกับค่าของอุณหภูมิในขดลวด ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$P_{S2} = P_{S1} \left(\frac{\theta_1 + \theta_{w1}}{\theta_1 + \theta_{w2}} \right) \quad (5.18)$$

โดยที่

P_{S1} คือค่าของกำลังสูญเสียปลีกย่อยที่เวลา t_1 (w.)

P_{S2} คือค่าของกำลังสูญเสียปลีกย่อยที่เวลา t_2 (w.)

5.1.6.3 อุณหภูมิเริ่มต้นของหม้อแปลงน้ำมัน

ในที่นี้หมายถึงอุณหภูมิของน้ำมันตอนบนที่เกินกว่าอุณหภูมิห้อง ในการคำนวณเราจะกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของรอบที่กำลังคิด เท่ากับค่าอุณหภูมิสุดท้ายของรอบที่แล้วดังสมการ

$$\theta_{oi_t} = \theta_{oi_{t-1}} \quad (5.19)$$

โดยที่

$\theta_{oi_{t-1}}$ คืออุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันในรอบที่ $t-1$ ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{oi_t} คืออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมันในรอบที่ t ($^{\circ}\text{C}$)

และอุณหภูมิสุดท้ายในการคิดแต่ละรอบสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\theta_o = \theta_{oi} + (\theta_{ou} - \theta_{oi})(1 - e^{-t/\tau_o}) \quad (5.20)$$

โดยที่

θ_o คืออุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันที่คำนวณได้ในแต่ละรอบ ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{oi} คืออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมันในการคำนวณแต่ละรอบ คำนวณจาก(5.19) ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{ou} คืออุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันที่ไหลดโตๆ คำนวณจาก(5.3) ($^{\circ}\text{C}$)

t คือช่วงเวลาที่ใช้คำนวณในแต่ละรอบ(5 นาที)

τ_o คือค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของน้ำมัน คำนวณจาก(5.15) (ชั่วโมง)

5.1.6.4 อุณหภูมิเริ่มต้นของหม้อแปลงแบบจนวนแห้ง

ในที่นี้หมายถึงอุณหภูมิของขดลวดที่เกินกว่าอุณหภูมิห้อง โดยในการคำนวณเราจะกำหนดให้อุณหภูมิสุดท้ายของรอบที่แล้ว เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของรอบที่กำลังคิดดังสมการ

$$\theta_{wi_t} = \theta_{wu_{t-1}} \quad (5.21)$$

โดยที่

$\theta_{wu_{t-1}}$ คืออุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดในรอบที่ $t-1$ ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{wi_t} คืออุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวดในรอบที่ t ($^{\circ}\text{C}$)

และอุณหภูมิสุดท้ายในการคิดแต่ละรอบสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\theta_{avgw} = \theta_{wi} + (\theta_{wu} - \theta_{wi})(1 - e^{-t/\tau_w}) \quad (5.22)$$

โดยที่

θ_{avgw} คืออุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดที่คำนวณได้ในแต่ละรอบ ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{wi} คืออุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวดในการคำนวณแต่ละรอบ คำนวณจาก(5.21) ($^{\circ}\text{C}$)

- θ_{max} คืออุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดที่โหลดใดๆ จำนวนจาก(5.12) ($^{\circ}\text{C}$)
 t คือเวลาที่ใช้จำนวนในแต่ละรอบ(5 นาที)
 τ_w คือค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของน้ำมัน จำนวนจาก(5.16) (ชั่วโมง)

5.1.7 การแบ่งประเภทของหม้อแปลงตามพิกัด

พิกัดของหม้อแปลงแบบน้ำมันแบ่งออกเป็น 3 ระดับดังนี้

1. หม้อแปลงส่งกำลังที่มีพิกัดไม่เกิน 500 KVA. ซึ่งรวมทั้งแบบที่ติดตั้งบนเสาและแบบที่ติดตั้งบนพื้น [13]
2. หม้อแปลงส่งกำลังและหม้อแปลงกำลังที่มีพิกัดตั้งแต่ 501 KVA. - 100 MVA. [14]
3. หม้อแปลงกำลังที่มีพิกัดเกินกว่า 100 MVA. [15]

หม้อแปลงส่งกำลังและหม้อแปลงกำลังแบบน้ำมัน ที่มีพิกัดไม่เกิน 100 MVA. ซึ่งหมายถึงหม้อแปลงใน 1. และ 2. จะแบ่งพิกัดการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดเป็น 2 ระดับดังนี้

- 1) หม้อแปลงที่มีพิกัดการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดไม่เกิน 65°C เหนืออุณหภูมิห้องปกติ และมีค่าของอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดไม่เกินกว่า 80°C
- 2) หม้อแปลงที่มีพิกัดการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดไม่เกิน 55°C เหนืออุณหภูมิห้องปกติ และมีค่าของอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดไม่เกินกว่า 65°C

ส่วนหม้อแปลงกำลังแบบน้ำมันที่มีพิกัดเกินกว่า 100 MVA. ในข้อ 3. จะมีพิกัดการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดอยู่ระดับเดียวที่ 65°C

สำหรับหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งที่อยู่ใน[16] มีการแบ่งประเภทของหม้อแปลงตามค่าพิกัดของอุณหภูมิสูงสุดของขดลวด ได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. พิกัดอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 140°C ที่อุณหภูมิห้อง 30°C และที่อุณหภูมิห้องมากกว่า 30°C ยอมให้มีอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดได้ 150°C
2. พิกัดอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 175°C ที่อุณหภูมิห้อง 30°C และที่อุณหภูมิห้องมากกว่า 30°C ยอมให้มีอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดได้ 185°C
3. พิกัดอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 210°C ที่อุณหภูมิห้อง 30°C และที่อุณหภูมิห้องมากกว่า 30°C ยอมให้มีอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดได้ 220°C

5.1.8 ค่าคงที่ของ Arrhenius

ค่าคงที่ในที่นี้หมายถึงค่า A_{10} และ B_{10} ในสมการที่ (2.3) ใน [13,14,15,16] จะแบ่งค่าคงที่ Arrhenius ตามค่าพิกัดของจนวนหม้อแปลง โดยในหม้อแปลงแบบน้ำมันมีค่าดังตารางที่ 5.2 และในหม้อแปลงแบบจนวนแห้งมีค่าดัง ตารางที่ 5.3

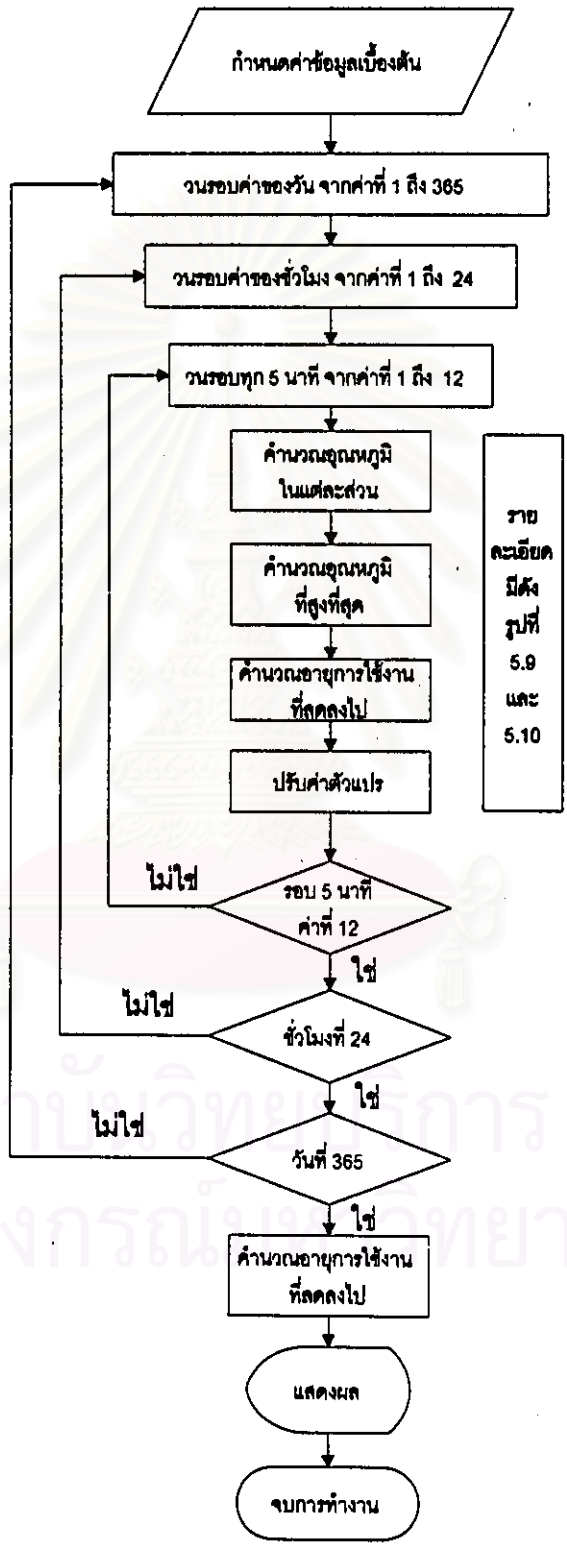
ตารางที่ 5.2 ค่า A_{10} และ B_{10} ของหม้อแปลงแบบน้ำมันที่พิกัดและระดับอุณหภูมิของจนวนต่างๆ

ระดับอุณหภูมิของจนวน		พิกัดของหม้อแปลง		
		ไม่เกิน 500 KVA.	501KVA. - 100MVA.	เกิน 100MVA.
พิกัดอุณหภูมิเฉลี่ย ของขดลวด 65 °C	A_{10}	11.269	13.391	13.391
	B_{10}	-6328.8	-6972.15	-6972.15
พิกัดอุณหภูมิเฉลี่ย ของขดลวด 55 °C	A_{10}	11.968	14.133	-
	B_{10}	-6328.8	-6972.15	-

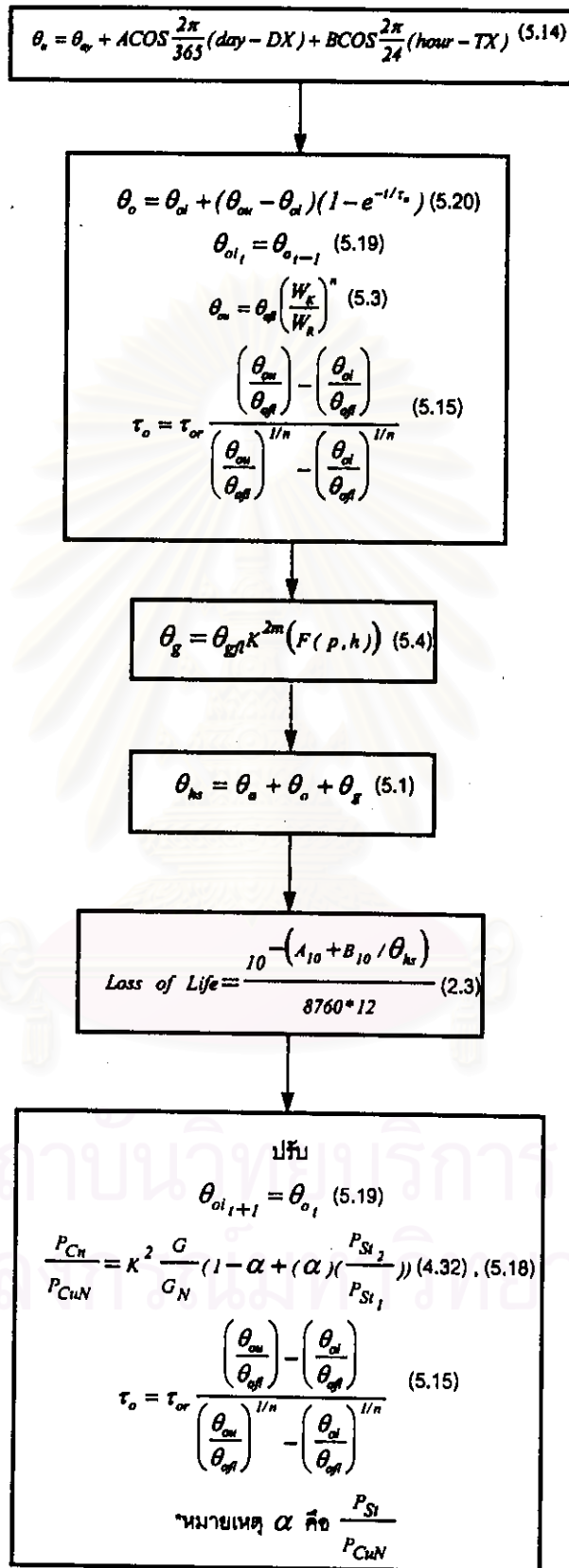
ตารางที่ 5.3 ค่า A_{10} และ B_{10} ของหม้อแปลงแบบจนวนแห้ง ที่พิกัดอุณหภูมิของจนวนของจุดที่มีค่าอุณหภูมิสูงที่สุดต่างๆ

ค่าคงที่	ระดับอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของจนวน		
	150 °C	185 °C	220 °C
A_{10}	8.270	7.914	10.453
B_{10}	-5581	-5907	-7582

5.1.9 แผนผังแสดงหลักการเบื้องต้น



รูปที่ 5.8 แผนผังแบบจำลองที่ใช้ในการหาอายุการใช้งานของหม้อแปลง



รูปที่ 5.9 แผนผังรายละเอียดการหาอุณหภูมิและอายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบน้ำมัน

$$\theta_a = \theta_w + ACOS \frac{2\pi}{365}(\text{day} - DX) + BCOS \frac{2\pi}{24}(\text{hour} - TX) \quad (5.14)$$

$$\theta_{avg} = \theta_w + (\theta_w - \theta_w)(1 - e^{-t/\tau_w}) \quad (5.22)$$

$$\theta_{w,t} = \theta_{w,t-1} \quad (5.21)$$

$$\theta_w = \theta_{avg} K^2 \frac{G}{G_N} \quad (5.12)$$

$$\tau_w = \tau_w \frac{\left(\frac{\theta_{avg}}{\theta_{avg}}\right) - \left(\frac{\theta_w}{\theta_{avg}}\right)}{\left(\frac{\theta_{avg}}{\theta_{avg}}\right)^{1/m} - \left(\frac{\theta_w}{\theta_{avg}}\right)^{1/m}} \quad (5.16)$$

$$\Delta\theta_g = \Delta\theta_{gr} F(p, h) \quad (5.13)$$

$$\theta_{hs} = \theta_a + \theta_{avg} + \Delta\theta_g \quad (5.11)$$

$$\text{Loss of Life} = \frac{10^{-(A_{10} + B_{10}/\theta_{hs})}}{8760 \cdot 12} \quad (2.3)$$

ปรับ

$$\theta_{w,t} = \theta_{w,t-1} \quad (5.21)$$

$$\frac{P_{CtN}}{P_{CtN}} = K^2 \frac{G}{G_N} \left((1-\alpha) \left(\frac{P_{Ct2}}{P_{Ct1}} \right) + (\alpha) \left(\frac{P_{St_2}}{P_{St_1}} \right) \right) \quad (4.32), (5.17), (5.18)$$

$$\tau_w = \tau_w \frac{\left(\frac{\theta_{avg}}{\theta_{avg}}\right) - \left(\frac{\theta_w}{\theta_{avg}}\right)}{\left(\frac{\theta_{avg}}{\theta_{avg}}\right)^{1/m} - \left(\frac{\theta_w}{\theta_{avg}}\right)^{1/m}} \quad (5.16)$$

หมายเหตุ α คือ $\frac{P_{St}}{P_{CtN}}$

รูปที่ 5.10 แผนผังรายละเอียดการหาจุดหนุมิและอายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบอนวนแห้ง

5.2 ตารางแนวทางการจ่ายโหลดของหม้อแปลง

ตารางแนวทางการจ่ายโหลดของหม้อแปลงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเสนออยู่ 2 รูปแบบตามแนวทางของ IEC[5]และ IEEE[13] โดยมีรายละเอียดที่แสดงดังนี้

5.2.1 ตารางแนวทางการจ่ายโหลดตาม IEC

ใน[5] ตารางแนวทางการจ่ายโหลดจะมีรูปแบบดังในรูปที่ 5.11 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

ส่วนหัวตารางจะแสดงรายละเอียดดังนี้

1. ชนิดของหม้อแปลงและการระบายความร้อน (ONAN ในมาตรฐานของ IEC เป็นหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมันที่มีการระบายความร้อนโดยธรรมชาติ)
 2. เวลาที่ใช้ในการจ่ายโหลดค่าสูง
 3. รอบที่ใช้ในการคำนวณคือวัน
 4. ตัวคูณปรับค่าของอายุการใช้งานที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิห้องเปลี่ยนแปลง
- ส่วนของตารางจะแสดงรายละเอียดดังนี้
5. พิกัดของโหลดพื้นฐานที่หม้อแปลงต้องจ่ายก่อนที่จะทำการจ่ายโหลดสูงสุด K_1
 6. พิกัดของโหลดสูงสุดที่หม้อแปลงต้องจ่าย K_2
 7. อายุการใช้งานที่ลดลง(หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)
 8. อุณหภูมิของน้ำมันตอบนบนที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในการจ่ายโหลด

ตารางแนวทางการจ่ายโหลดที่เสนออยู่ใน IEC จะแสดงผลของอายุการใช้งานที่ลดลงไปและค่าของอุณหภูมิที่สูงที่สุดของน้ำมันตอบนบน พบว่าหลักการในการสร้างตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแนวทางของ IEC ยังมีความไม่เหมาะสมและไม่สะดวกในการใช้งานดังนี้

1. รอบที่ใช้ในการคำนวณเป็นรอบวัน
2. ใช้ค่าอุณหภูมิห้องคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของวัน
3. ต้องใช้ตัวคูณเพื่อปรับค่าอายุการใช้งานที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิห้องไม่เป็น 20°C
4. ไม่ให้การปรับค่าตัวแปรในการคำนวณแต่ละรอบ
5. แสดงค่าอายุการใช้งานที่ลดลง ทำให้ต้องแปลงเป็นค่าอายุการใช้งานที่คาดการณ์
6. ไม่สามารถหาอายุการใช้งานจริงในหน่วยของเวลาได้

ดังนั้นในแบบจำลองแนวทางการจ่ายโหลดตามแนวทางของ IEC ที่ทำขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการปรับปรุงจากเดิมเพื่อให้มีความถูกต้องและสะดวกในการใช้งานดังนี้

1. ใช้การคำนวณเป็นรอบปี ทำให้สามารถรวมผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิห้องไปตามฤดูกาลได้
2. ใช้ฟังก์ชันไซน์สองชั้นในการประมาณค่าอุณหภูมิแทนการใช้ค่าอุณหภูมิห้องที่คงที่ ทำให้อายุการใช้งานที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง
3. ใช้หลักการคิดโหลดเปลี่ยนแปลงทุกชั่วโมง โดยไม่ใช้หลักการโหลดสมมูลย์ทำให้ผลที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง
4. หน่วยของอายุการใช้งานที่ใช้ในแบบจำลองมีหน่วยเป็นปี ทำให้ง่ายต่อการใช้งาน การคำนวณค่าต่างๆ ในตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแนวทางของ IEC สามารถที่จะแสดงขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 5.12

5.2.2 ตารางแนวทางการจ่ายโหลดตาม IEEE

ใน [13] ตารางแนวทางการจ่ายโหลดจะมีรูปแบบดังในรูปที่ 5.13 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

ส่วนหัวตารางจะแสดงรายละเอียดดังนี้

1. พิกัดอุณหภูมิของฉนวน
2. พิกัดของโหลดพื้นฐานที่หม้อแปลงต้องจ่าย ก่อนที่จะทำการจ่ายโหลดสูงสุดโดยที่อายุการใช้งานที่ลดลงยังอยู่ในพิกัดที่กำหนด
3. ใช้หลักการของโหลดสมมูลย์ในการแปลงโหลด ส่วนของตารางจะแสดงรายละเอียดดังนี้
4. อุณหภูมิห้อง
5. ระยะเวลาของการจ่ายโหลดค่าสูง
6. อายุการใช้งานที่ลดลงจากอายุการใช้งานปกติ
7. พิกัดโหลดที่สูงที่สุดที่สามารถจ่ายได้โดยที่อายุการใช้งานที่ลดลงยังอยู่ในพิกัดที่กำหนด
8. อุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในขณะจ่ายโหลด
9. อุณหภูมิของน้ำมันตอบนบนที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในขณะจ่ายโหลด

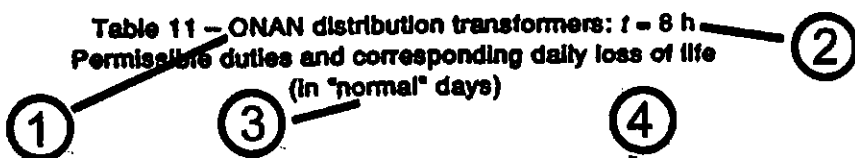
โดยภาพรวมแล้วตารางแนวทางการจ่ายโหลดที่เสนออยู่ใน IEEE จะแสดงผลของพิกัดโหลดสูงสุดที่หม้อแปลงสามารถจ่ายได้หลังจากที่จ่ายโหลดพื้นฐานแล้ว , จุดโหลดที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นระหว่างการจ่ายโหลด และค่าของจุดโหลดที่สูงที่สุดของน้ำมันคอนบน พบว่าหลักการในการสร้างตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแนวทางของ IEEE ยังมีความไม่เหมาะสมและไม่สะดวกในการใช้งานดังนี้

1. รอบที่ใช้ในการคำนวณเป็นรอบวัน
2. ใช้ค่าจุดโหลดหึ่งคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของวัน
3. ไม่ใช้การปรับค่าตัวแปรในการคำนวณแต่ละรอบ
4. ค่าอายุการใช้งานที่ลดลงแสดงในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของค่าเปอร์ยูนิต ทำให้ต้องแปลงเป็นค่าอายุการใช้งานที่คาดการณ์

ในแบบจำลองแนวทางการจ่ายโหลดตามแนวทางของ IEEE ที่ทำขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการปรับปรุงจากเดิมดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 5.2.1 โดยในการคำนวณค่าต่างๆ ในตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแนวทางของ IEEE สามารถที่จะแสดงขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 5.14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Table 11 – ONAN distribution transformers: $t = 8$ h
Permissible duties and corresponding daily loss of life
(in "normal" days)

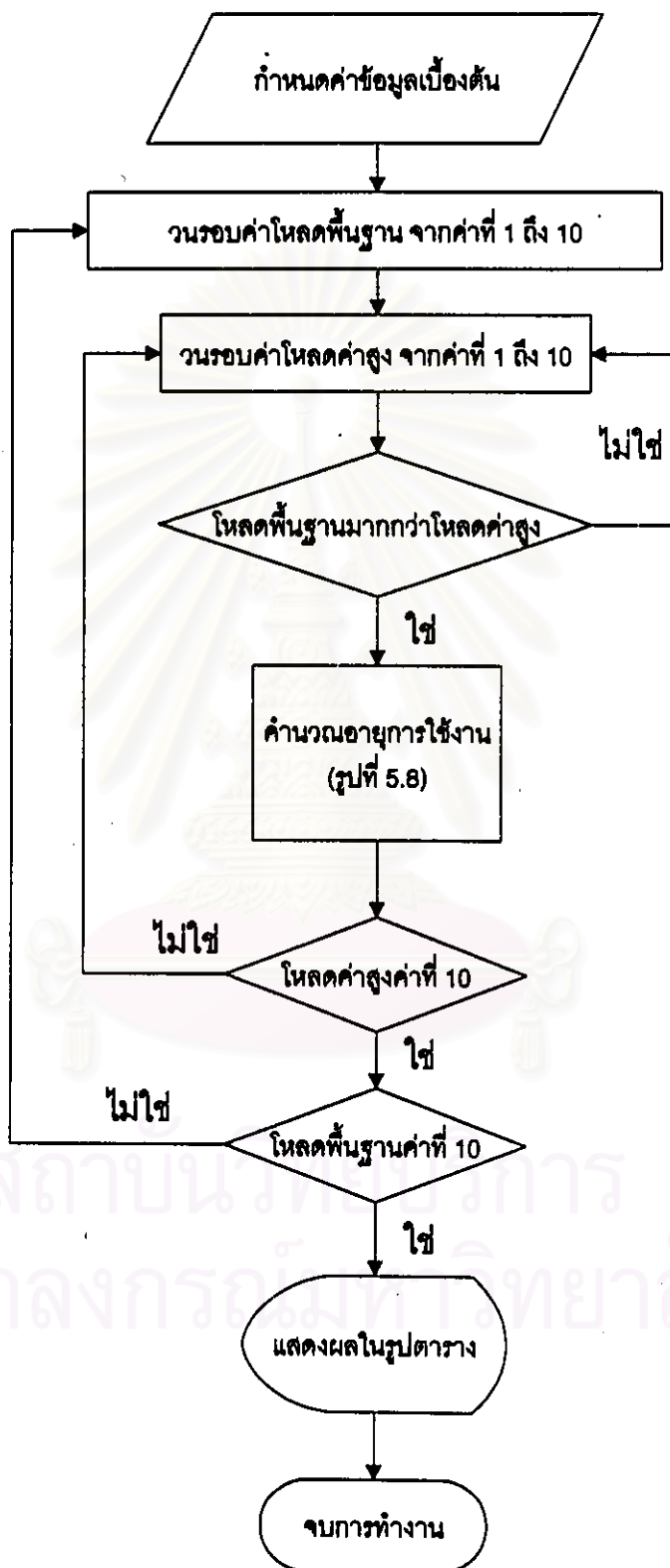


To determine whether a daily load diagram characterized by particular values of K_1 and K_2 is permissible and to evaluate the daily loss of life entailed, proceed as follows:

Ambient temperature	40 °C	30 °C	20 °C	10 °C	0 °C	-10 °C	-20 °C	-25 °C
Daily loss of life: Multiply the value given in the table below by the factor given here, then round off the result	10	3,2	1	0,32	0,1	0,032	0,01	0,0065
Hot-spot temperature: Add the hot-spot temperature rise given in the table to the ambient temperature. If the resulting hot-spot temperature exceeds the limit stated in table 1, the duty is not permissible.								

K_2	K_1	0,25	0,50	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
0,7		0,007 47	0,012 48	0,032 48								
0,8		0,018 58	0,023 58	0,049 57	0,093 57							
0,9		0,040 65	0,054 68	0,092 68	0,148 67	0,292 67						
1,0		0,114 75	0,144 76	0,212 77	0,295 77	0,485 78	1,00 78					
1,1		0,358 86	0,436 87	0,684 87	0,735 88	1,03 88	1,73 89	3,72 89				
1,2		1,22 98	1,48 98	1,85 99	2,20 99	2,78 100	3,92 100	6,68 101	14,9 101			
1,3		4,53 110	5,33 110	6,57 111	7,55 111	9,01 112	11,4 112	16,2 113	27,9 114	64,7 114		
1,4		18,1 122	21,1 123	25,5 124	28,8 124	33,3 125	39,9 125	50,7 126	71,9 126	128 127	302 127	
1,5		78,1 138	90,0 138	107 137	120 137	138 138	158 138	190 139	242 140	345 140	609 141	1 510 141
1,6		360 150	412 150	486 151	538 151	604 152	690 152	807 153	974 153	1 240 154	1 770 155	3 160 155
1,7		770 164	2 020 165	2 360 165	2 600 166	2 890 166	3 270 167	3 760 167	4 410 168	5 350 169	6 840 169	9 770 170
1,8		9 320 179	+ 160	+ 180	+ 181	+ 181	+ 182	+ 182	+ 183	+ 183	+ 184	+ 184

รูปที่ 5.11 ลักษณะของตารางแนวทางการจ่ายโหลดตาม IEC

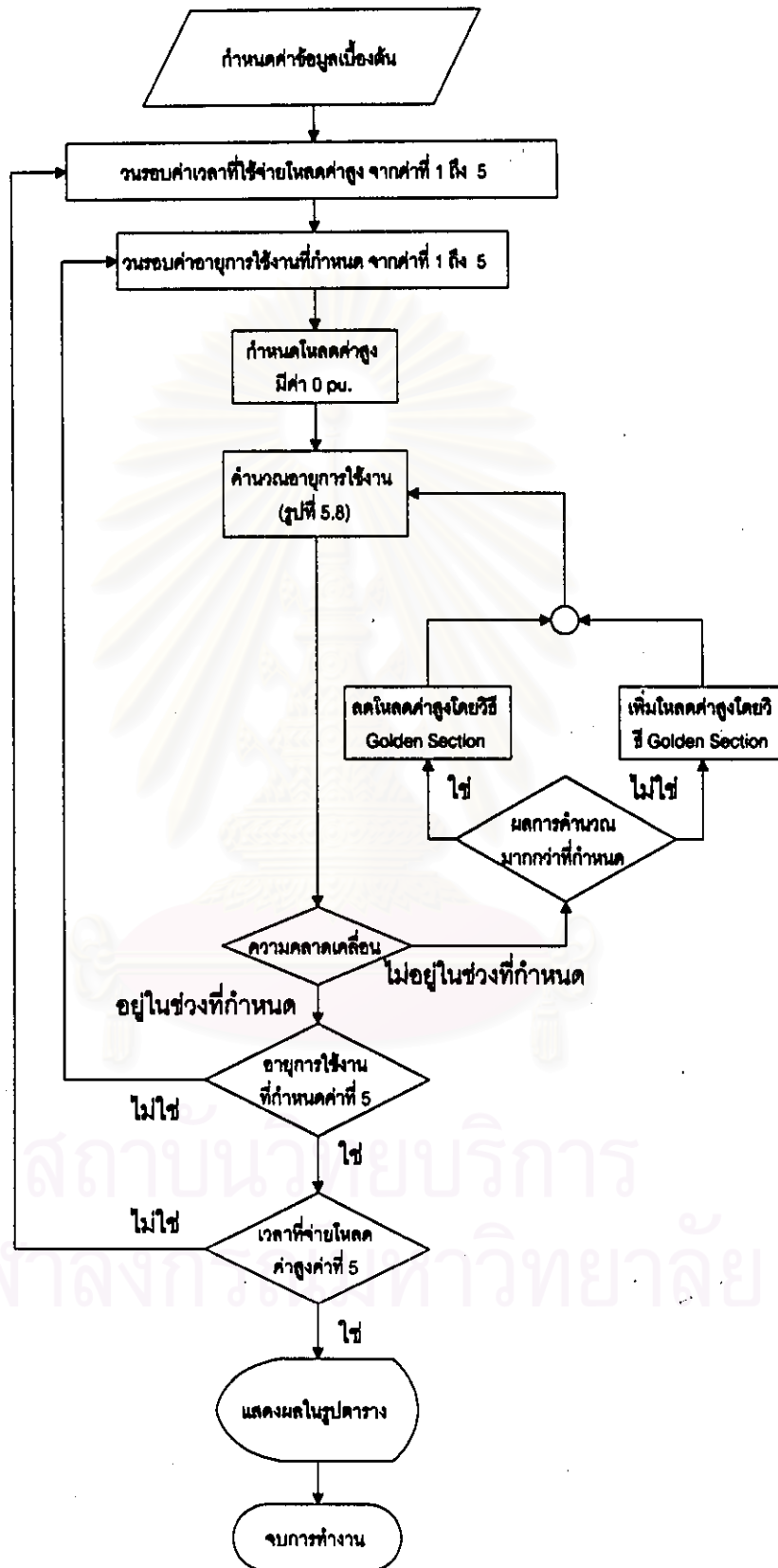


รูปที่ 5.12 แผนผังวิธีการสร้างตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแบบ IEC

① **Table 5**
Loading Capability Table for 65 °C Rise Transformers for Normal and Moderate
Sacrifice of Life Expectancy (Based on 65 °C Rise Transformer Characteristics, Table 3)
Continuous Equivalent Load Exclusive of Peak Load = 50% of Nameplate Rating
 (Use Method Described in 5.3 for Converting Actual Load Cycle to Equivalent Load Cycle)

Peak Load Duration (h)	Extr. Loss of Life (%)	Ambient Temperature (°C)																
		10			20			30			40			50				
		Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	Max. Hot-Test Top-Oil Temp. (°C)	
1	Normal	2.52	168	70	2.39	157	77	2.26	149	83	2.12	136	89	1.96	124	95	1.79	101
	0.05	2.77	180	78	2.64	176	84	2.51	177	90	2.38	176	96	2.25	176	102	2.11	175
	0.10	2.85	187	80	2.73	187	87	2.61	186	93	2.49	186	99	2.36	185	106	2.23	184
2	Normal	2.15	151	83	2.03	150	88	1.91	149	98	1.79	148	97	1.65	146	102	1.50	106
	0.05	2.34	171	93	2.25	171	88	2.13	169	102	2.02	169	107	1.89	168	112	1.77	168
	0.10	2.43	179	97	2.33	179	102	2.22	178	106	2.10	177	111	1.99	176	116	1.87	175
4	Normal	1.82	144	91	1.73	143	95	1.61	141	108	1.50	140	102	1.38	139	105	1.25	108
	0.05	1.99	163	103	1.90	162	106	1.80	162	117	1.70	161	114	1.60	160	117	1.48	158
	0.10	2.00	171	108	1.96	170	111	1.87	169	115	1.77	168	118	1.67	167	122	-	-
8	Normal	1.57	133	91	1.48	132	94	1.39	131	107	1.28	130	100	1.16	129	103	1.05	106
	0.05	1.73	152	104	1.64	151	106	1.56	150	109	1.46	149	113	1.36	148	115	1.25	148
	0.10	1.78	159	108	1.70	159	111	1.61	157	114	1.53	157	118	1.43	156	120	1.33	155
24	Normal	1.26	124	91	1.18	123	94	1.10	122	103	1.00	121	97	0.90	120	100	0.80	112
	0.05	1.50	130	92	1.41	130	96	1.33	129	98	1.24	129	101	1.16	129	104	1.04	128
	0.10	1.56	137	97	1.47	136	99	1.39	137	103	1.30	136	105	1.21	136	109	1.11	135

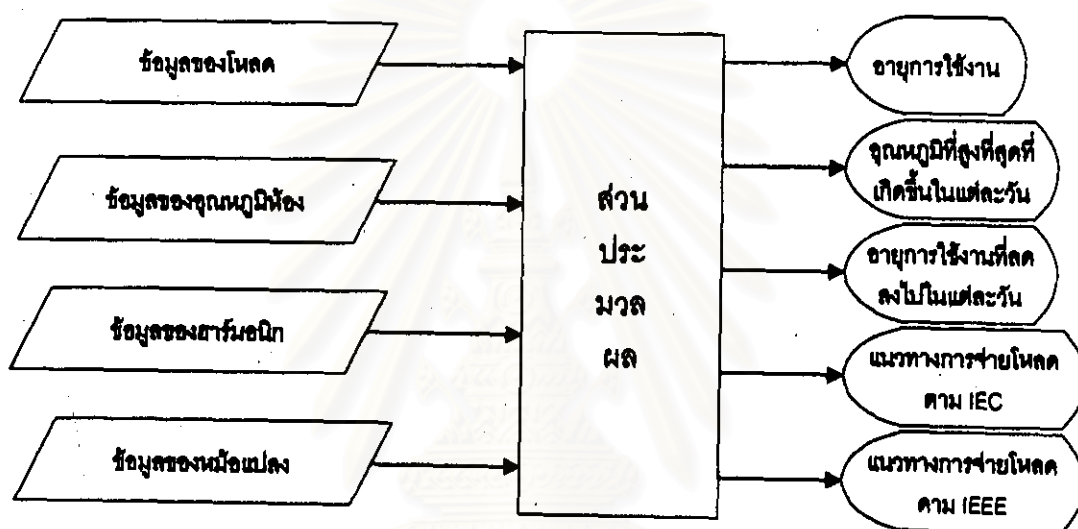
รูปที่ 5.13 ลักษณะของตารางการจ่ายโหลดตามแบบ IEEE



รูปที่ 5.14 แผนผังวิธีการสร้างตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแบบ IEEE

5.3 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมา

แบบจำลองที่ใช้ในการหาอายุการใช้งานของหม้อแปลง รวมทั้งตารางแนวทางการจ่ายโหลดที่พัฒนาขึ้นมาในในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีหลักการต่างๆ ที่ใช้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และในหัวข้อนี้จะได้แสดงถึงรูปแบบของแบบจำลองว่ามีลักษณะอย่างไร เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขอให้อภิปรายนาดูรูปที่ 5.15 ซึ่งแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของแบบจำลอง



รูปที่ 5.15 ส่วนประกอบของแบบจำลอง

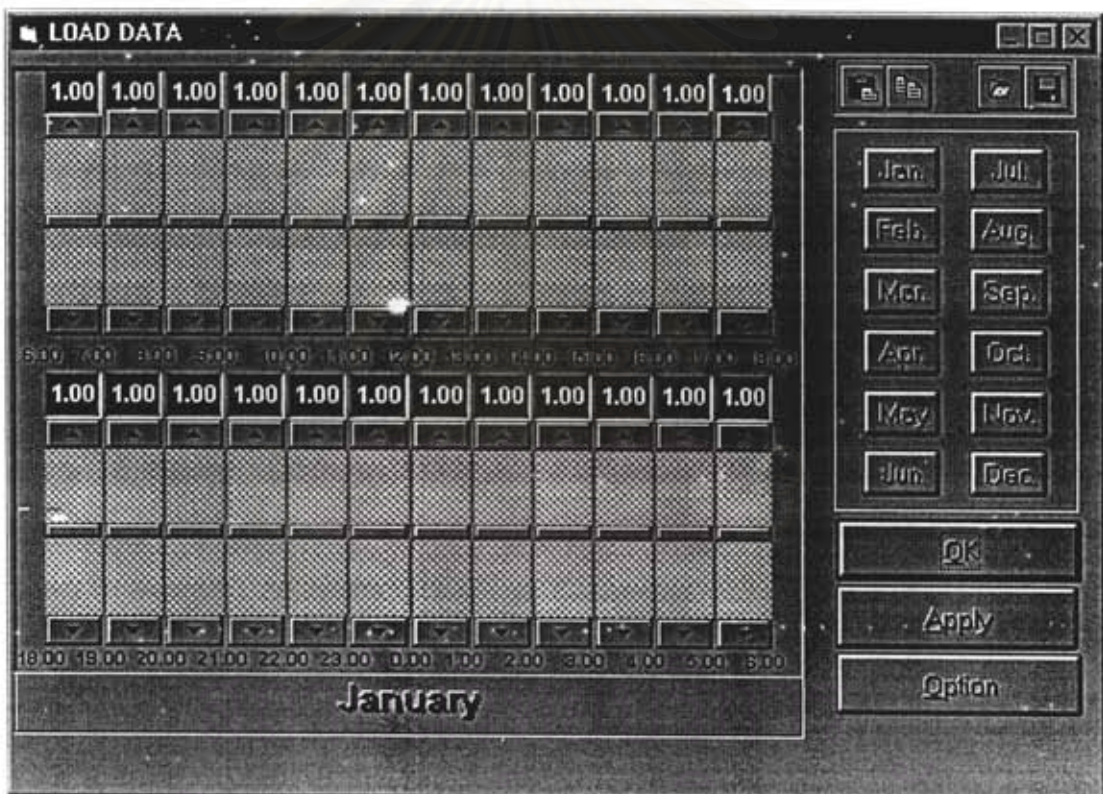
จากรูปที่ 5.15 สามารถแยกส่วนประกอบต่างๆ ออกเป็นส่วนประกอบหลักได้ 3 ส่วนคือ ส่วนข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณ , ส่วนประมวลผล และส่วนที่พิมพ์ออกมาได้ ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำเสนอเฉพาะในส่วนของข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณและส่วนที่พิมพ์ออกมาได้เท่านั้น โดยจะได้นำเสนอในลักษณะคร่าวๆ เพื่อให้ทราบถึงหน้าตาของข้อมูลที่จะต้องใส่ค่า และลักษณะผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง โดยข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองจะเป็นข้อมูลของหม้อแปลง ที่ใช้ในการทดลองในบทที่ 6 สำหรับส่วนประมวลผลที่เป็นภาษาของโปรแกรม (Source Code) สามารถที่จะดูได้จากคู่มือการใช้โปรแกรมที่สร้างขึ้นต่างหากไม่รวมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยในบทที่ 7 จะได้กล่าวถึงการนำผลที่ได้จากแบบจำลอง มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองในบทที่ 6 และเปรียบเทียบกับแนวทางการจ่ายโหลดตามมาตรฐาน IEC และ IEEE

5.3.1 ส่วนของข้อมูลเบื้องต้น

ข้อมูลเบื้องต้นที่ต้องใช้ในแบบจำลองสามารถแยกได้เป็น 4 ประเภท คือ

5.3.1.1 ข้อมูลของโหลด

สามารถเปลี่ยนแปลงโหลดได้ในแต่ละชั่วโมงของวัน และเปลี่ยนแปลงโหลดได้ในแต่ละเดือนของปี ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 หน้าต่างที่ใช้ป้อนค่าของโหลดในรอบปี

5.3.1.2 ข้อมูลของอุณหภูมิห้อง

อุณหภูมิห้องใน 1 ปี สามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันไซน์สองชั้น โดยมีลักษณะหน้าตาต่างในการป้อนข้อมูลดังรูปที่ 5.17

AMBIENT TEMPERATURE

Ambient Temperature Function

$$T_a = T_{a0} + A \cos\left(\frac{2\pi}{365}(\text{day} - D)X\right) + B \cos\left(\frac{2\pi}{24}(\text{hour} - H)X\right)$$

Yearly Average Ambient Temperature	30
Amplitude of Yearly Variation	6
Amplitude of Daily Variation	3
Hottest Day of a Year	112
Hottest Hour of a Day	18

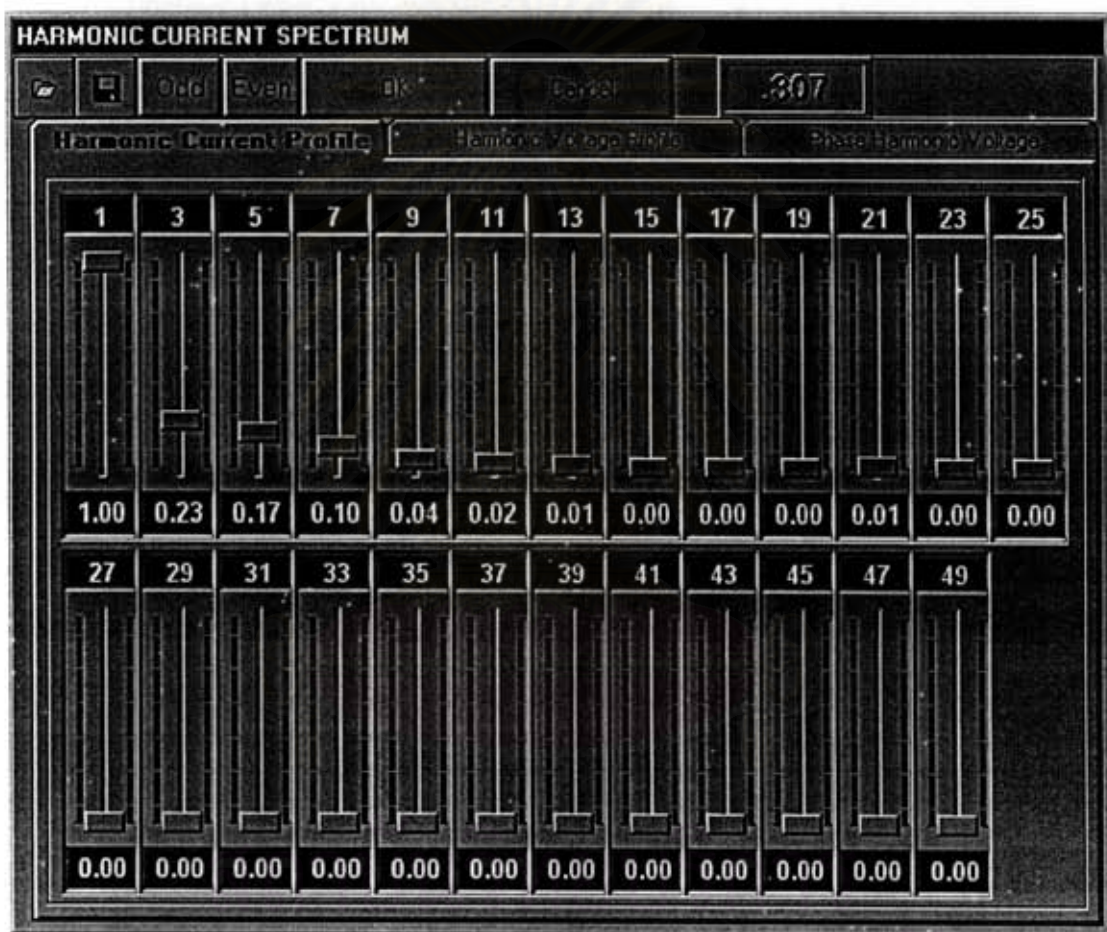
OK Cancel REVIEW

รูปที่ 5.17 หน้าต่างที่ใช้ป้อนค่าอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลงในรอบปี

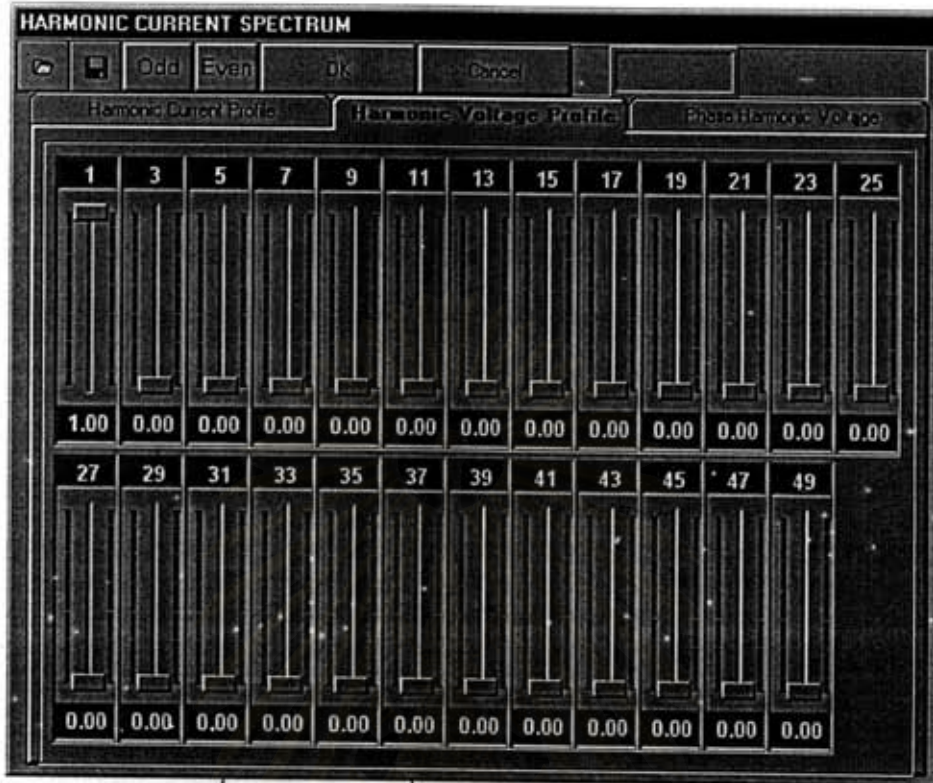
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.1.3 ข้อมูลของฮาร์มอนิก

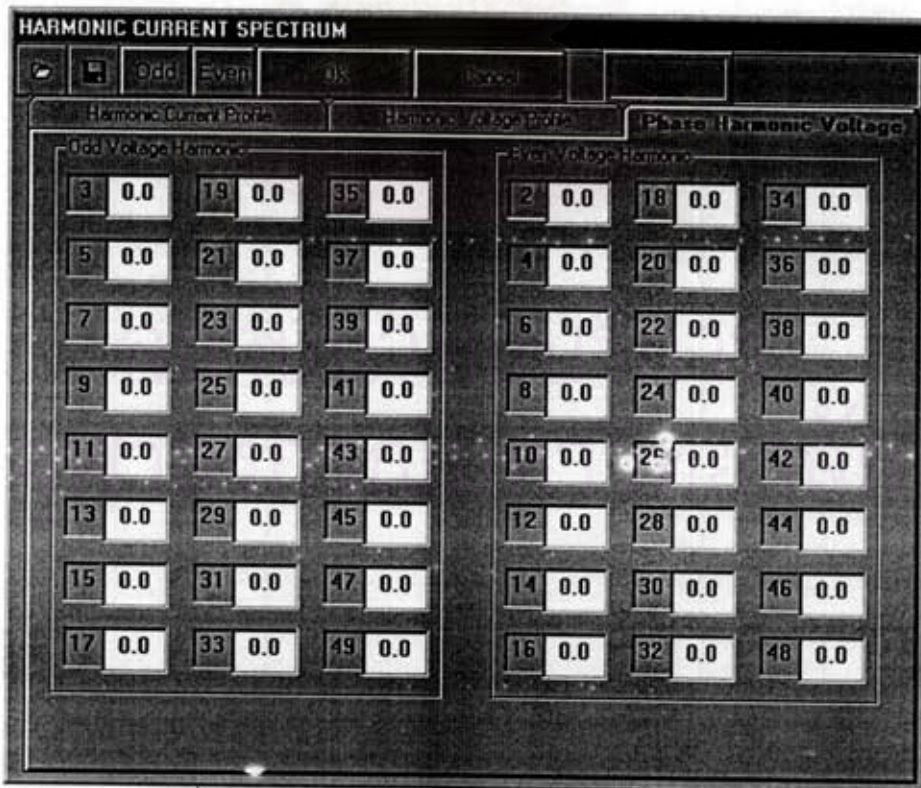
ในแบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้อมูลของฮาร์มอนิกจะใช้ทั้งข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกถึงอันดับที่ 49 โดยที่มีการป้อนค่ามุมเฟสของแรงดันฮาร์มอนิกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.18 - 5.20



รูปที่ 5.18 หน้าต่างที่ใช้ป้อนค่ากระแสฮาร์มอนิกเลขที่



รูปที่ 5.19 หน้าต่างที่ใช้ป้อนค่าแรงดันฮาร์มอนิกเลขคี่

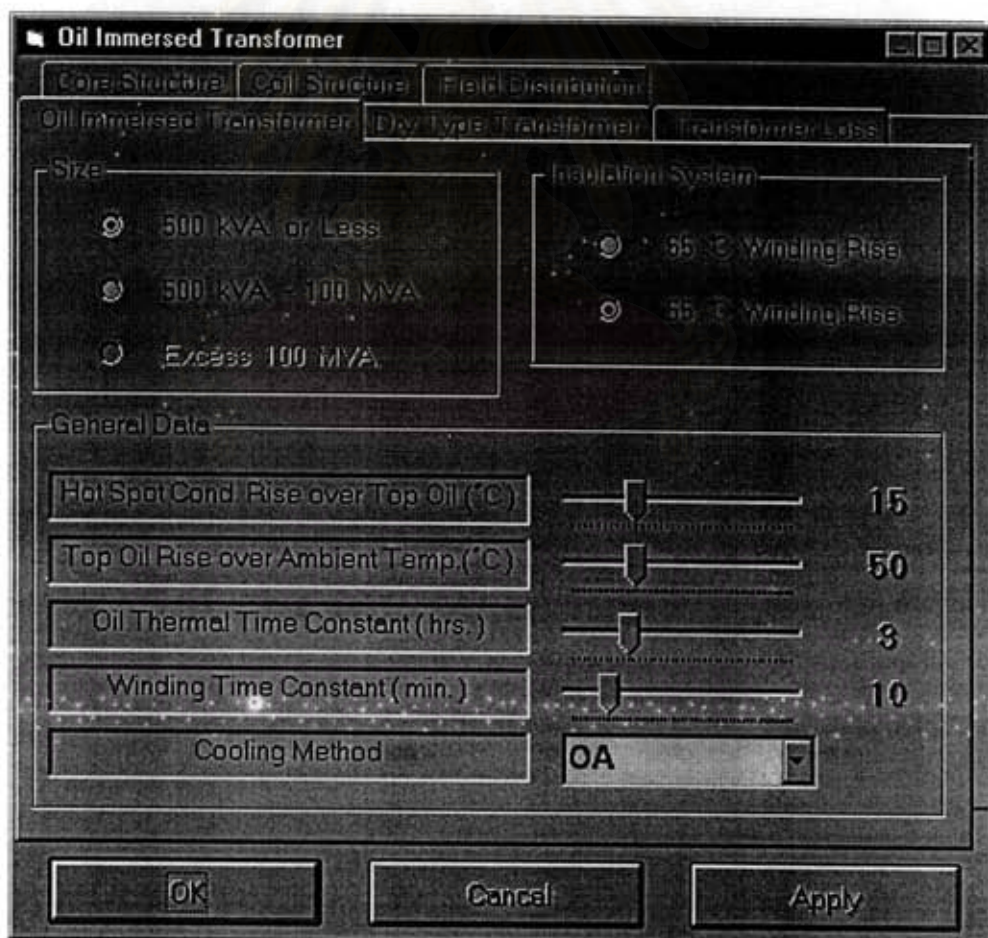


รูปที่ 5.20 หน้าต่างที่ใช้ป้อนมุมเฟสของแรงดันฮาร์มอนิก

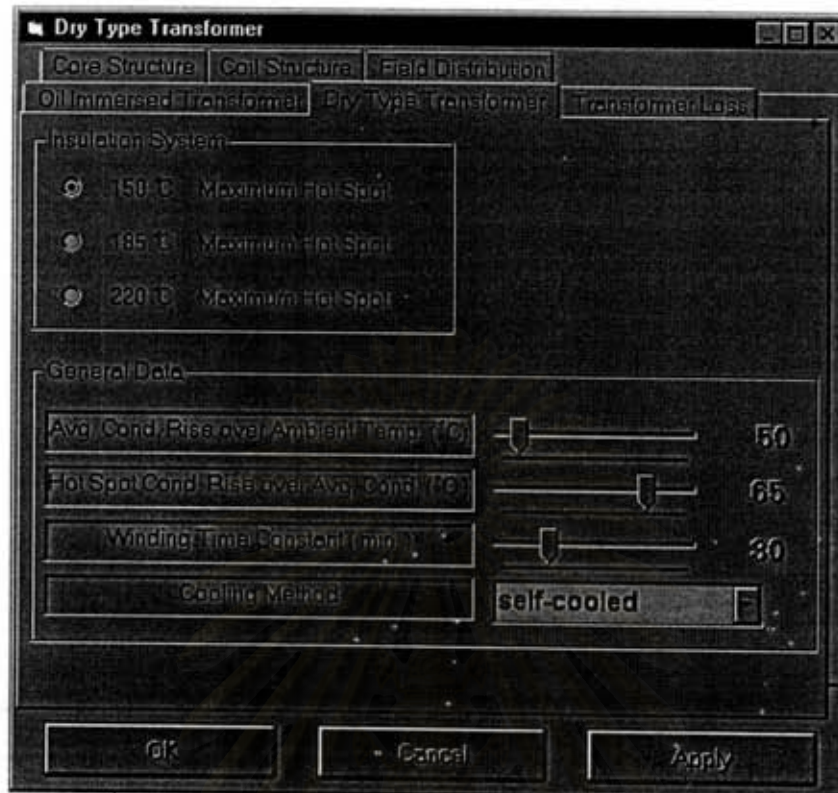
5.3.1.4 ข้อมูลของหม้อแปลง

ข้อมูลของหม้อแปลงเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญที่สุดในการคำนวณ โดยในแบบจำลอง ข้อมูลของหม้อแปลงยังแยกออกได้เป็นหลายประเภท ดังนี้

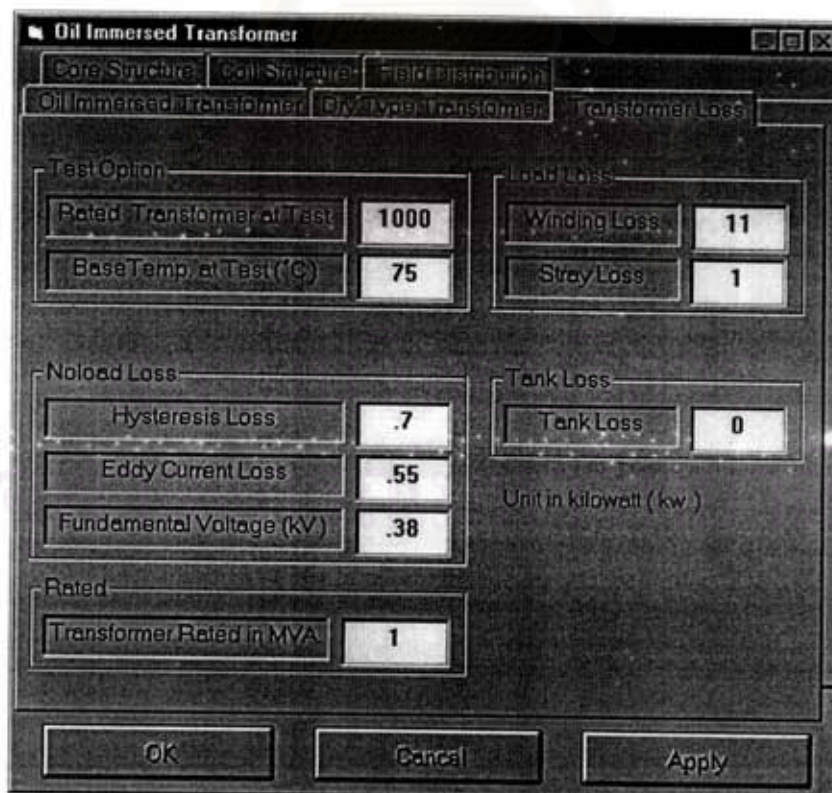
1. ข้อมูลของหม้อแปลงน้ำมัน มีรายละเอียดดังรูปที่ 5.21
2. ข้อมูลของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง มีรายละเอียดดังรูปที่ 5.22
3. ข้อมูลของกำลังสูญเสีย มีรายละเอียดดังรูปที่ 5.23
4. ข้อมูลของแกนเหล็ก มีรายละเอียดดังรูปที่ 5.24
5. ข้อมูลของขดลวด มีรายละเอียดดังรูปที่ 5.25
6. ข้อมูลการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็ก มีรายละเอียดดังรูปที่ 5.26



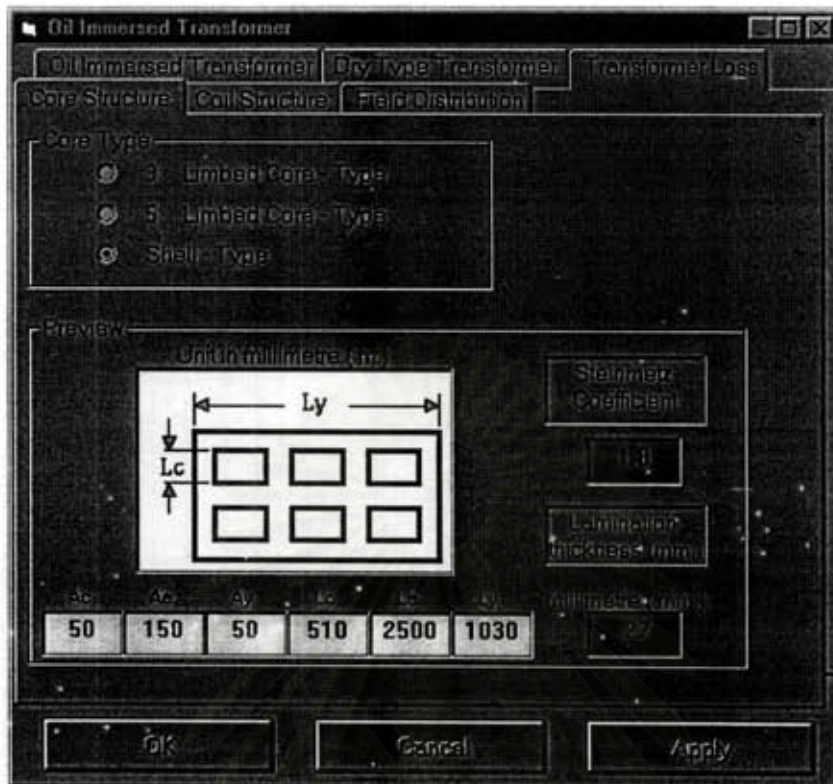
รูปที่ 5.21 หน้าต่างที่ใช้ป้อนข้อมูลของหม้อแปลงน้ำมัน



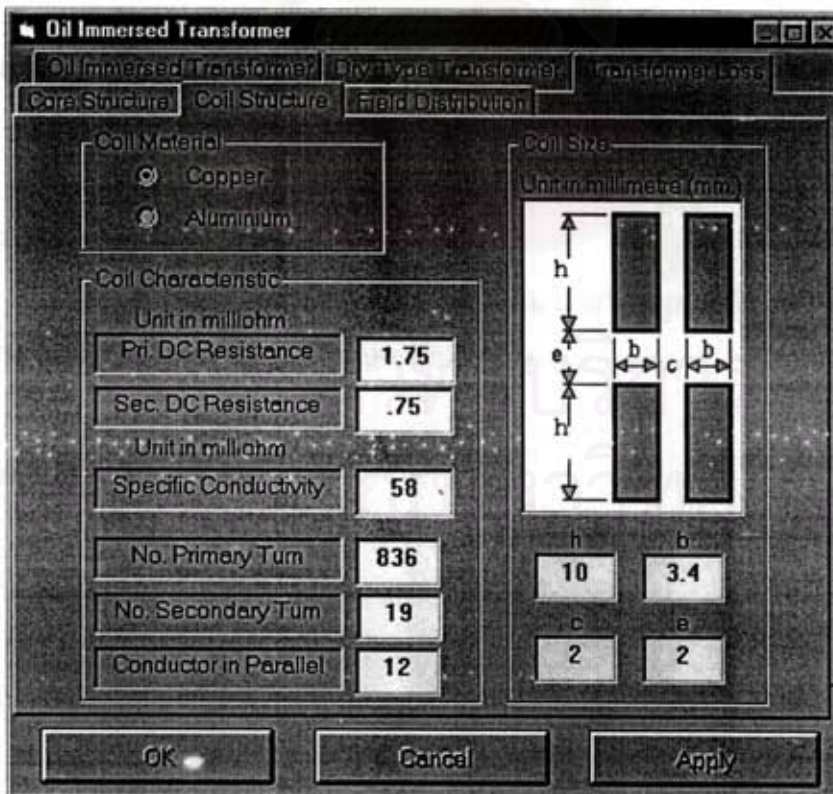
รูปที่ 5.22 หน้าต่างที่ใช้ป้อนข้อมูลของหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง



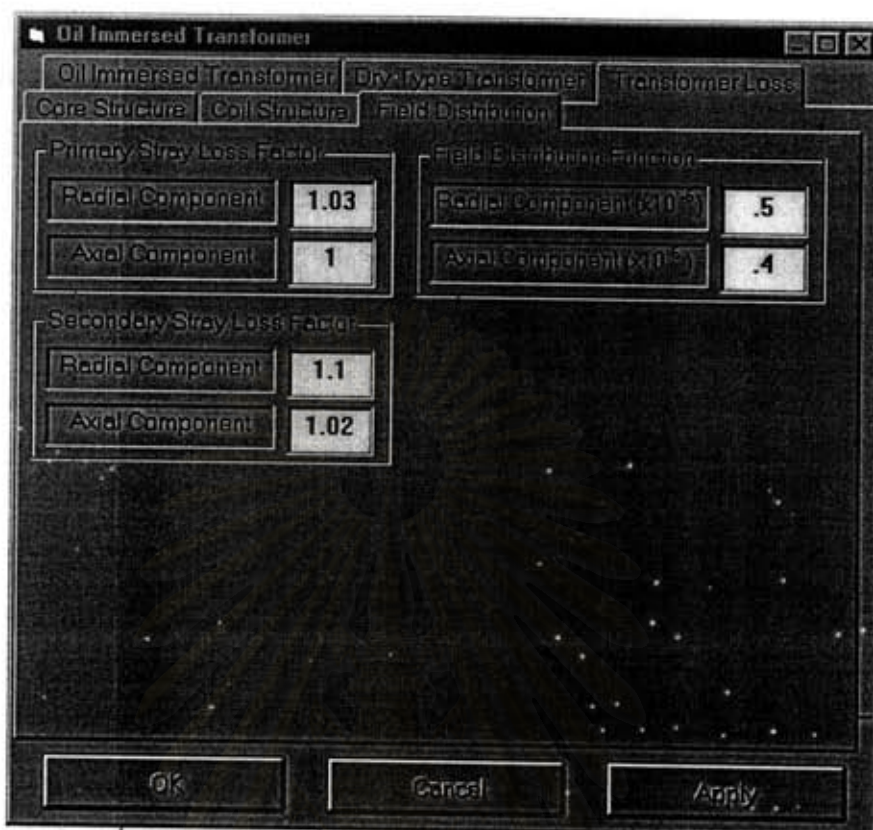
รูปที่ 5.23 หน้าต่างที่ใช้ป้อนข้อมูลของกำลังสูญเสีย



รูปที่ 5.24 หน้าต่างที่ใช้ป้อนข้อมูลของแกนเหล็ก



รูปที่ 5.25 หน้าต่างที่ใช้ป้อนข้อมูลของขดลวด



รูปที่ 5.26 หน้าต่างที่ใช้ป้อนข้อมูลการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็ก

5.3.2 ส่วนที่พิมพ์ออกมาได้

ส่วนที่พิมพ์ออกมาได้จากแบบจำลองสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน คือ

5.3.2.1 ส่วนของข้อมูลเบื้องต้น

หมายถึงข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ ข้อมูลของโหลด , ข้อมูลของจุดหม้อหึ่ง , ข้อมูลของฮาร์มอนิก , ข้อมูลของหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 5.27 - 5.30

5.3.2.2 ส่วนของอายุการใช้งาน

ค่าที่สนใจได้แก่ จุดหม้อหึ่งที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน , อายุการใช้งานที่ลดลงไปในแต่ละวัน , และอายุการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 5.31 และ 5.32

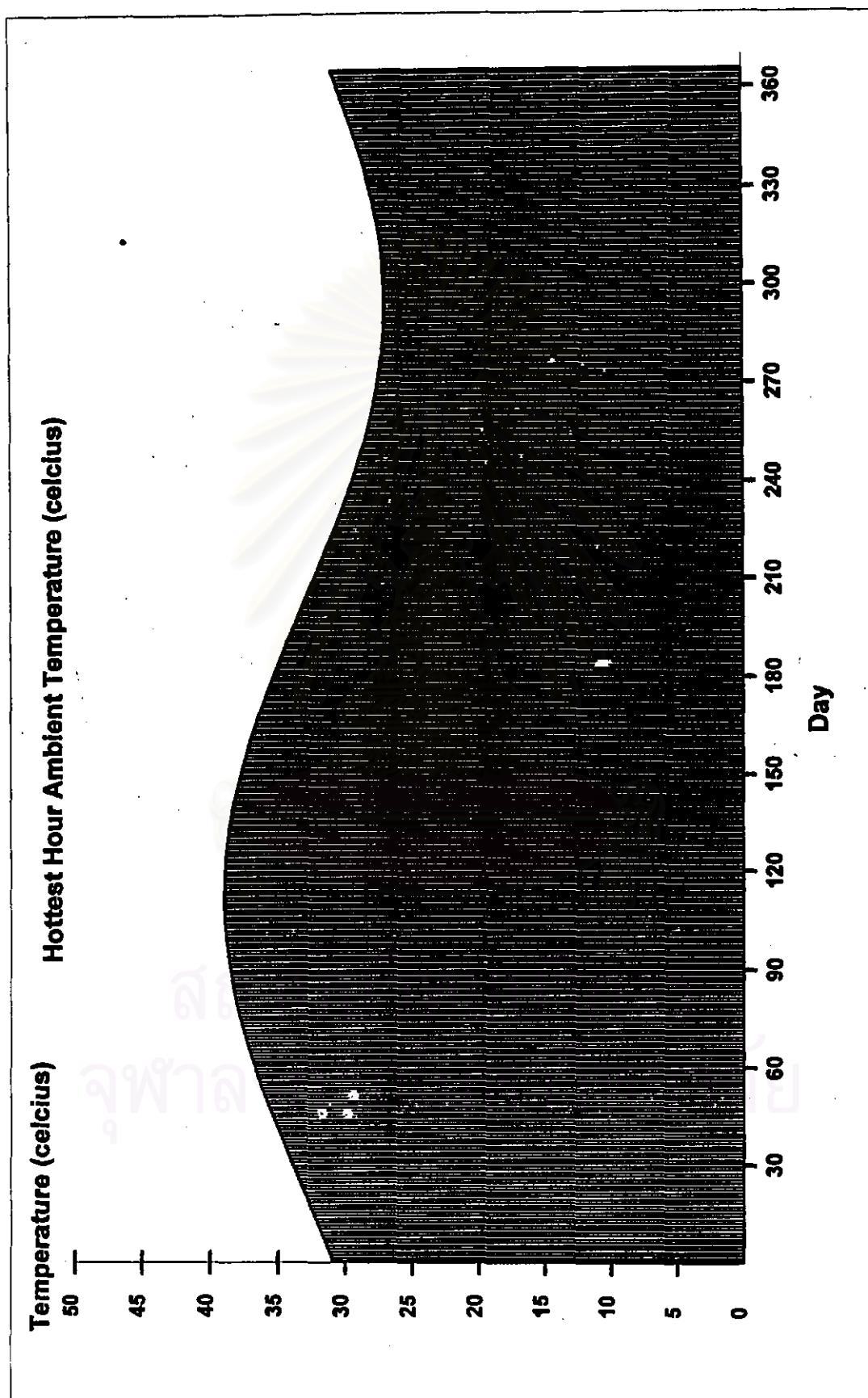
5.3.2.3 ส่วนของตารางแนวทางการจ่ายโหลด

ได้นำเสนอตารางตามวัตถุประสงค์ของ IEC และ IEEE ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.33 และ 5.34

Yearly Load Data

Time	Monthly Load (p.u.)					
	January	February	March	April	May	June
6:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
12:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
13:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
14:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
16:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
17:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
18:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
19:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
21:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
22:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
23:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	July	August	September	October	November	December
6:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
12:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
13:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
14:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
16:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
17:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
18:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
19:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
21:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
22:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
23:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5:00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

รูปที่ 5.27 ข้อมูลของโหลดประจำปีที่มีพิกัดออกมาได้



รูปที่ 5.28 ข้อมูลของอุณหภูมิห้องที่ชั่วโมงที่ร้อนที่สุดที่พิมพ์ออกมาได้

Harmonics Data

Harmonics Order	Harmonics Current (p.u.)	Harmonics Voltage (p.u.)	Harmonics Voltage Phase Angle (Degree)
1	1.000	1.000	0.0
2	0.000	0.000	0.0
3	0.230	0.000	0.0
4	0.000	0.000	0.0
5	0.170	0.000	0.0
6	0.000	0.000	0.0
7	0.100	0.000	0.0
8	0.000	0.000	0.0
9	0.040	0.000	0.0
10	0.000	0.000	0.0
11	0.020	0.000	0.0
12	0.000	0.000	0.0
13	0.010	0.000	0.0
14	0.000	0.000	0.0
15	0.000	0.000	0.0
16	0.000	0.000	0.0
17	0.000	0.000	0.0
18	0.000	0.000	0.0
19	0.000	0.000	0.0
20	0.000	0.000	0.0
21	0.010	0.000	0.0
22	0.000	0.000	0.0
23	0.000	0.000	0.0
24	0.000	0.000	0.0
25	0.000	0.000	0.0
26	0.000	0.000	0.0
27	0.000	0.000	0.0
28	0.000	0.000	0.0
29	0.000	0.000	0.0
30	0.000	0.000	0.0
31	0.000	0.000	0.0
32	0.000	0.000	0.0
33	0.000	0.000	0.0
34	0.000	0.000	0.0
35	0.000	0.000	0.0
36	0.000	0.000	0.0
37	0.000	0.000	0.0
38	0.000	0.000	0.0
39	0.000	0.000	0.0
40	0.000	0.000	0.0
41	0.000	0.000	0.0
42	0.000	0.000	0.0
43	0.000	0.000	0.0
44	0.000	0.000	0.0
45	0.000	0.000	0.0
46	0.000	0.000	0.0
47	0.000	0.000	0.0
48	0.000	0.000	0.0
49	0.000	0.000	0.0

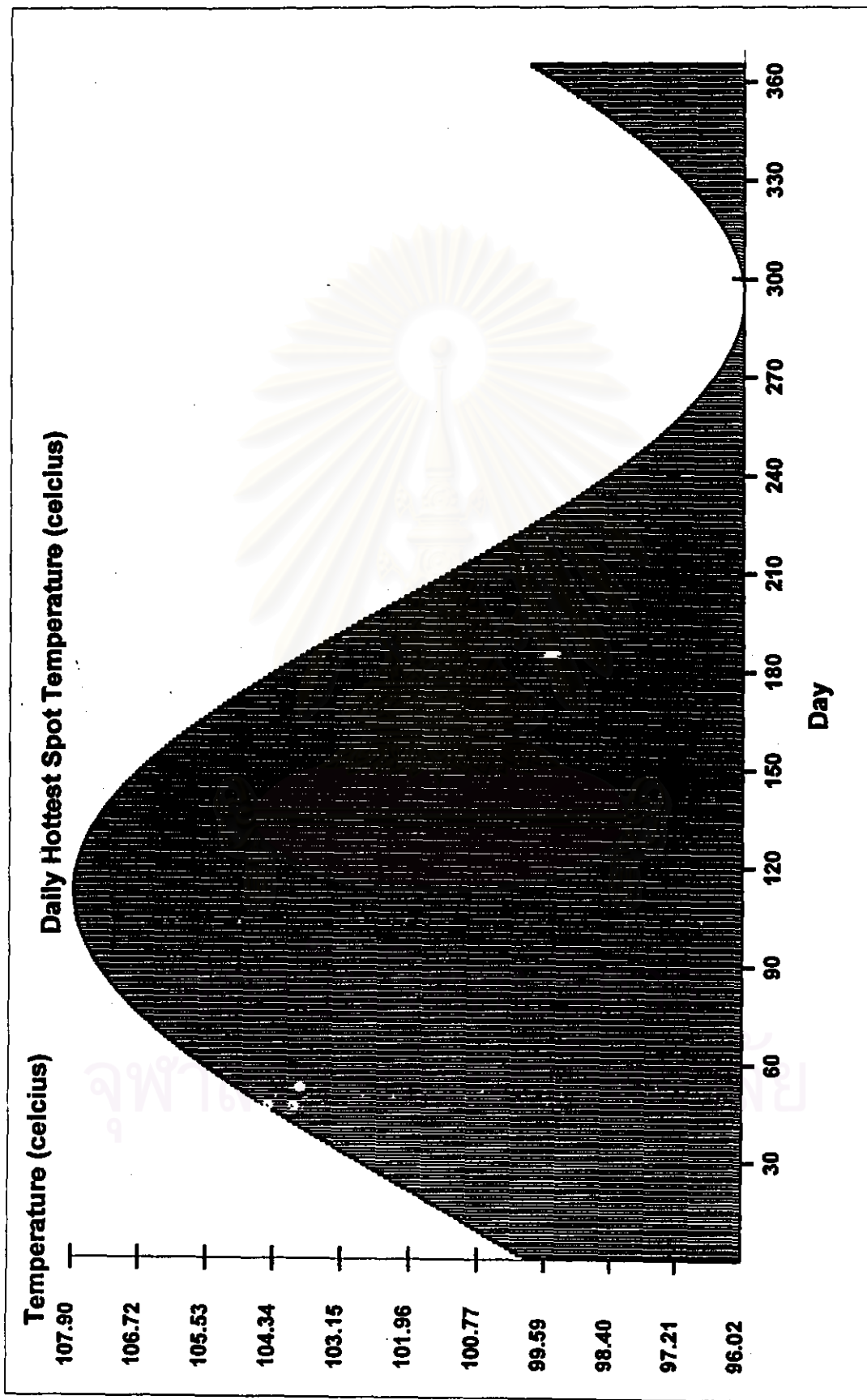
รูปที่ 5.29 ข้อมูลของฮาร์มอนิกที่พิมพ์ออกมาได้

Transformer Data

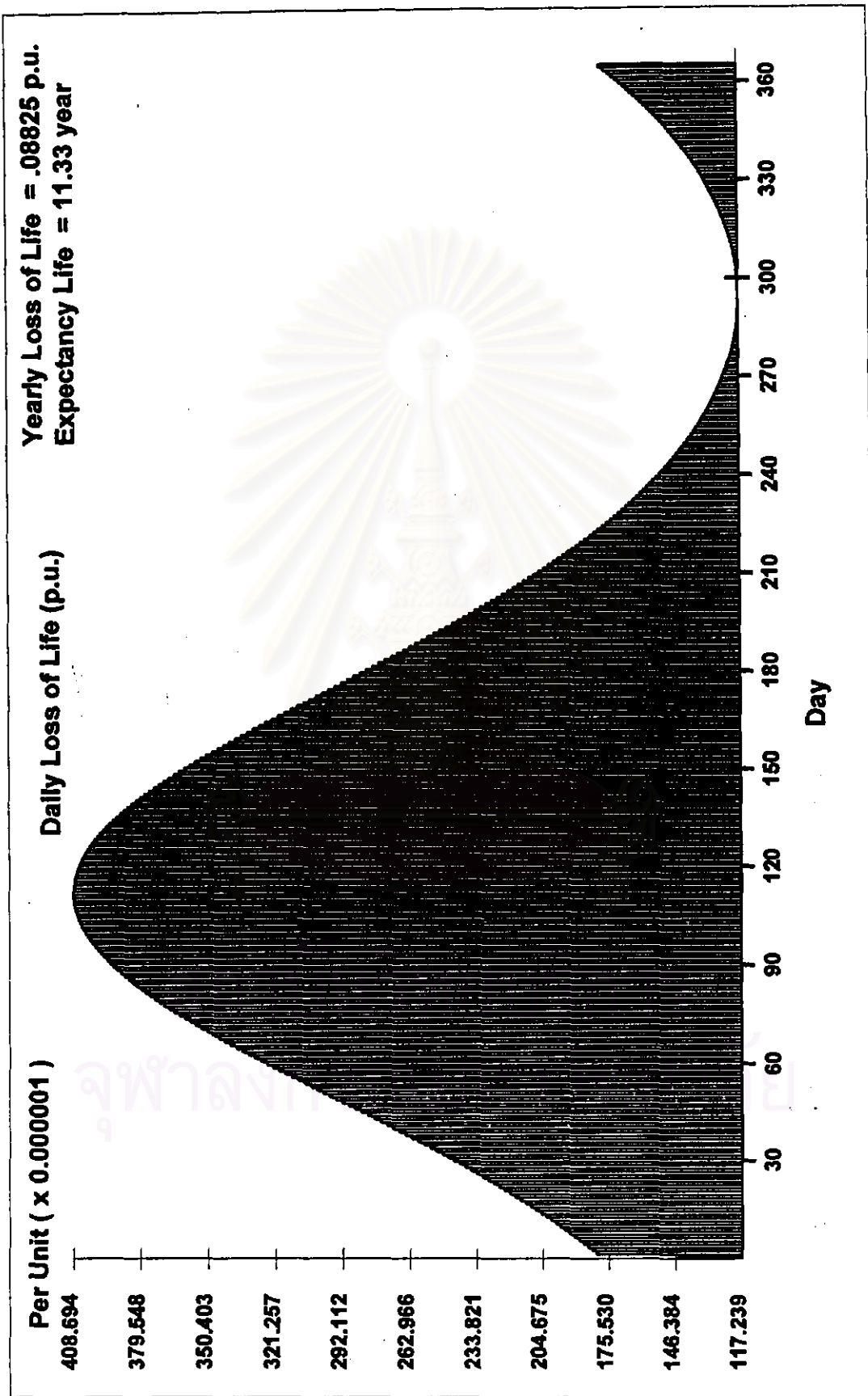
Transformer Type : Oil Immersed Transformer
Transformer Rated : 1 MVA.
Transformer Cooling Method : OA
Transformer Insulation : 55 celcius Winding Rise
Hot Spot Conductor Rise over Top Oil : 15 celcius
Top Oil Rise over Ambient Temperature : 50 celcius
Oil Thermal Time Constant : 3 hrs.
Winding Time Constant : 10 Min.
Transformer Rated at Test : 1 MVA
Winding Temperature at Test : 75 celcius
Transformer Load Loss : 12 kW.
Transformer Core Loss : 1.25 kW.
Transformer Tank Loss : 0 kW.
Transformer Core Type : Shell Type
Primary Coil Resistance : 1.75 ohm
Secondary Coil Resistance : .75 ohm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.30 ข้อมูลของหม้อแปลงที่พิมพ์ออกมาได้



รูปที่ 5.31 ข้อมูลของอุณหภูมิที่สูงที่สุดภายในหม้อแปลงที่พิมพ์ออกมาได้



รูปที่ 5.32 อายุการใช้งานของหม้อแปลงที่ลดลงในแต่ละวันที่หม้อแปลงออกมาได้

Loading Guide for Peakload Value = 4hour

Preload Value

	Preload Value										
	0.30	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	
K1 K2											
0.70	2630.5	1057.7	551.4	253.8	253.8						
0.80	72.7	74.7	76.1	80.3	80.3						
0.90	1481.8	709.4	409.7	206.8	92.3	140.1	92.3				
1.00	80.1	82.0	83.2	84.6	88.8	85.8	88.8				
1.10	734.1	411.0	265.3	150.6	74.5	32.6	74.5	49.9	32.6		
1.20	88.2	90.1	91.2	92.4	93.8	98.1	93.8	95.0	98.1		
1.30	328.9	207.8	148.0	94.9	53.4	26.1	11.3	38.0	26.1	11.3	
1.40	97.0	98.8	99.9	101.1	102.3	103.7	108.0	103.0	103.7	108.0	
1.50	137.4	94.5	72.5	51.6	33.1	18.6	9.0	3.9	18.6	9.0	
1.60	106.5	108.2	109.3	110.4	111.6	112.8	114.2	118.5	112.8	114.2	
1.70	54.8	40.0	32.3	24.8	17.7	11.4	6.4	3.1	1.3	6.4	
1.80	116.6	118.3	119.2	120.3	121.5	122.7	124.0	125.3	129.6	124.0	
1.90	21.3	16.2	13.6	10.9	8.4	6.0	3.9	2.2	1.1	0.5	
2.00	127.4	128.9	129.9	130.9	132.0	133.2	134.4	135.7	137.0	141.3	
2.10	8.1	6.4	5.5	4.6	3.7	2.9	2.1	1.3	0.8	0.4	
2.20	138.7	140.1	141.1	142.0	143.1	144.2	145.4	146.6	147.9	149.2	
2.30	3.1	2.5	2.2	1.9	1.6	1.3	1.0	0.7	0.5	0.3	
2.40	150.5	152.0	152.8	153.8	154.8	155.9	157.0	158.2	159.4	160.7	
2.50	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2	
2.60	163.0	164.3	165.2	166.1	167.1	168.1	169.2	170.3	171.5	172.7	

Loading Guide for Baseload Value = .7 p.u.

Peak load Duration (hrs)	Expectancy Life (yrs)	Peak load Per Unit	Maximum Hottest Spot Temperature (celcius)	Maximum Top-Oil Temperature (celcius)
1	10	1.26	109.40	70.40
	20	1.15	102.80	63.80
	30	1.09	99.00	60.00
	40	1.04	96.40	57.40
	50	1.00	94.40	55.40
2	10	1.14	109.40	70.40
	20	1.05	102.70	63.70
	30	1.00	99.00	60.00
	40	0.96	96.40	57.40
	50	0.93	94.40	55.40
3	10	1.09	109.30	70.30
	20	1.01	102.80	63.80
	30	0.96	99.00	60.00
	40	0.93	96.30	57.30
	50	0.90	94.30	55.30
4	10	1.06	109.40	70.40
	20	0.99	102.80	63.80
	30	0.94	99.00	60.00
	40	0.91	96.40	57.40
	50	0.89	94.40	55.40
5	10	1.04	109.40	70.40
	20	0.97	102.70	63.80
	30	0.93	99.00	60.00
	40	0.90	96.40	57.40
	50	0.88	94.30	55.30

รูปที่ 5.34 ตารางแนวทางการจ่ายโหลดตามแบบ IEEE ที่พิมพ์ออกมาได้