

浅谈干式变压器温升的工程计算

罗顺祥

(广州番禺骏发电力设备有限公司, 广东 广州 511400)

摘要:介绍了干式变压器的温升计算的一般方法,提出了较为详细的工程计算程序。

关键词:干式变压器;温升;计算

中图分类号:TM402

文献标识码:B

文章编号:1001-8425(2006)05-0027-04

1 前言

干式变压器的温升计算与油浸式的差异较大,因为它没有油的影响,而且各发热体之间存在相互影响的可能性不大。一般温升计算的经验公式为:

$$\tau = Kq^n \quad (1)$$

式中 τ ——绕组或铁心对周围环境的温升

K ——经验系数

q ——绕组或铁心有效表面热流密度

n ——经验系数

由于干式变压器的结构型式不同,铁心、绕组的相对位置的不同,经验系统的取值也不同。例如同样为树脂浇注干式变压器,对于带填料或不带填料的产品,其绕组的温升计算也不尽相同,但计算原理一致。在实际进行工程计算的时候应根据干式变压器的结构进行选择计算。

2 原理

干式变压器的损耗转换为热量,这些热量一部分由表面向周围冷却介质散发出去,另一部分则提高了变压器本身的温度;当在一定时间内,干式变压器本身温度不再升高时,变压器进入稳定状态,其最后温升为 τ 时,则

$$P = aS\tau \quad (2)$$

$$\text{或 } \tau = P/aS \quad (3)$$

式中 P ——干式变压器的总损耗, W

S ——冷却面积, m^2

a ——散热系数,即干式变压器的温升为 1°C 时,每秒从单位面积上所发散的热量

另外,假设干式变压器的损耗全部用来提高变压器本身的温度,整个过程中没有任何热量损失或发散于周围的冷却介质中,该过程为绝热过程,则有

$$PT = CG\tau \quad (4)$$

$$\text{或 } \tau = PT/CG \quad (5)$$

式中 T ——时间常数

C ——比热

G ——质量, kg

假设干式变压器处于理想的稳定状态,此时干式变压器的温度升高将为最大,即温升最大,称其为稳态温升。由式(3)与式(5)可知,干式变压器的稳态温升可以等效为一条直线。由工程实践可证明,此法可行。笔者曾对一台 F 级绝缘树脂浇注干式变压器进行过计算,该变压器高压绕组为线绕,低压绕组为箔绕,容量为 1 000kVA,电压比为 $10 \pm 2 \times 2.5\% / 0.4\text{kV}$ 。温升计算值为:高压绕组 98.3K,低压绕组 98.5K,铁心没有计算。温升试验值为:高压绕组 97.9K,低压绕组 98.2K。从两者数值比较可知,用此法计算稳态温升时,试验值为负偏差,比较可靠,有利于成本的控制。

实际上,由式(1)可知干式变压器的温升是一条指数曲线,在计算干式变压器的暂态温升时,将其等效为直线是不准确的。将式(3)代入式(5),可得

$$T = CG/aS \quad (6)$$

由此可知,干式变压器的 T 为一固定数值,即时间常数。在此时间内,当无散热时, a 为常数,当 $t=0$ 时, $\tau_i = \tau_0$, 则

$$\tau = \tau_i(1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T} \quad (7)$$

式(7)表明,当 $\tau_i > \tau_0$ 时,表示 t 时刻温升大于初始温升,故式(7)代表干式变压器的发热过程;反之,当 $\tau_i < \tau_0$ 时,表示 t 时刻温升小于初始温升,式(7)代表干式变压器的冷却过程。

式(7)在工程上常用来计算干式变压器的短时温升。此时可以先按理想条件下的绝热过程计算变压器的稳态温升,再计算 t 时间的干式变压器的短

时温升。

3 工程计算

3.1 铁心温升计算

铁心对空气的温升为:

$$\tau=0.33q_{0.8}=0.33(P/S)^{0.8} \quad (8)$$

式中 P ——铁心损耗, W

S ——铁心的有效散热面积, m^2

q ——铁心散热表面的单位热负荷, W/m^2

注意: 0.33 与 0.8 为经验系数, 因变压器铁心的结构、材料不同而有变化。

干式变压器铁心的散热表面主要包括以下几个部分:

(1) 上铁轭顶表面积

$$S_1=2M_0L_B \times 10^{-6} + A_z \times 10^{-4} / K_f \quad (9)$$

式中 S_1 ——表面积, m^2

M_0 ——铁心柱中心距, mm

L_B ——铁心叠片总厚度, mm

A_z ——铁心柱有效面积, cm^2

K_f ——叠片系数

(2) 上下铁轭旁表面积

$$S_2=2(B_{max}L_B \times 10^{-6} + A_z \times 10^{-4} / K_f) \quad (10)$$

式中 S_2 ——表面积, m^2

B_{max} ——最大片宽, mm

L_B ——铁心叠片总厚度, mm

A_z ——铁心柱有效面积, cm^2

K_f ——叠片系数

(3) 铁心柱裸露表面积

$$S_3=6H_A(B_{max}+L_B) \times 10^{-6} \quad (11)$$

式中 S_3 ——表面积, m^2

H_A ——心柱裸露部分的总高度, mm

B_{max} ——最大片宽, mm

L_B ——铁心叠片总厚度, mm

(4) 心柱被遮盖表面积

$$S_4=6(H_W-H_A)(B_{max}+L_B) \times 10^{-6} \quad (12)$$

式中 S_4 ——表面积, m^2

H_W ——窗高, mm

H_A ——心柱裸露部分的总高度, mm

B_{max} ——最大片宽, mm

L_B ——铁心叠片总厚度, mm

需注意的是, 以上计算中没有考虑铁心中含有气道时的情况, 而在大铁心直径(大容量产品)下, 往往会加气道, 此时也应将气道的表面积当作散热面积参与温升计算。

由于铁心被遮盖时, 空气的散热条件有所变差,

计算时需要乘一个小于 1 的系数。另外, 铁心加气道时, 由于气道位于铁心内部, 计算时也需要乘一个小于 1 的系数。计算方法可参照下式:

$$k_a=0.56(a^{1.6}/H)^{0.25} \quad (13)$$

式中 k_a ——散热系数

a ——空气气道宽度, mm

H ——空气气道高度, mm

根据式(9)~式(13)可以计算出铁心有效散热面积为:

$$S=S_1+S_2+S_3+k_a S_4 \quad (14)$$

代入式(8)即计算出铁心温升。

需要说明的是, 对容量小于 2 500kVA 的干式配电变压器, 一般铁心温升较低, 不需要进行精细的计算。但对容量较大的干式变压器, 进行铁心的温升计算还是有必要的。笔者曾对一台 5 000kVA(10kV 等级)F 级的树脂浇注干式变压器进行了计算, 铁心没有设置气道, 铁心计算温升为 96K, 试验温升约 98K。

3.2 绕组温升计算

正如前面所述, 干式变压器的绕组温升计算方法同铁心一样也可以采用式(1), 其经验系数 k 因内、外绕组及绕组是否包封而有差异, 一般取值为 0.26~0.66。其经验系数 n 的取值为 0.75~0.95。在进行工程计算时, 可以通过模拟温升试验绘出温升曲线, 推算出系数。

在经验系数确定后, 要计算出绕组的温升, 就只需计算出绕组的有效表面热流密度, 亦即绕组散热表面的单位热负荷, 再代入式(1)即可。一般可采用下式计算:

$$q=P/S \quad (15)$$

式中 q ——绕组散热表面的单位热负荷, W/m^2

P ——绕组损耗, W

S ——绕组的有效散热面积, m^2

需要说明的是, 由于包封绕组的包封厚度一般为 2mm~3mm(此为环氧树脂浇注结构厚度, 浸渍式干式变压器的绕组包封厚度小于此值), 其对变压器绕组的散热有一定影响, 但影响较小。在工程计算时常忽略其对变压器绕组的散热影响(在计算时, 最后的温升计算值留有一定的裕度, 故可以略去), 而将其铜或铝导线的散热表面作为绕组的有效散热面积。

计算时, 如果 P 为所有内或外绕组的总的损耗之和, 则 S 也应为所有内或外绕组的总的有效散热面积之和。其计算主要包括以下几部分:

(1) 绕组外表面积

$$S_w=3 \times 2 \pi R_w H \times 10^{-6} \quad (16)$$

式中 S_w ——表面积, m^2

R_w ——绕组外半径, mm

H ——绕组导线总高度, mm

(2) 绕组内表面积

$$S_n=3 \times (2 \pi R_n - N B_t) H \times 10^{-6} \quad (17)$$

式中 S_n ——表面积, m^2

R_n ——绕组内半径, mm

N ——撑条数

B_t ——撑条宽度, mm

H ——绕组导线总高度, mm

注意:如果绕组没有使用撑条,如箔式绕组,此时令 N 为 0 进行计算。

(3) 绕组水平气道表面积(有水平气道时有此项)

$$S_p=3 \times 2 B_t (2 \pi R_p - N B_t) N_t \times 10^{-6} \quad (18)$$

式中 S_p ——表面积, m^2

B_t ——绕组的辐向尺寸, mm

R_p ——绕组平均半径, mm

N ——撑条数

B_t ——垫块宽度, mm

N_t ——段数或饼数

(4) 绕组表面散热系数

$$k_a=0.56(a^{1.6}/H)^{0.25} \quad (19)$$

式中 k_a ——散热系数

a ——绕组散热表面接触空气气道宽度, mm

H ——绕组有效接触空气气道高度, mm

(5) 水平气道表面散热系数

$$k_p=k\{1+H_p/B_t[1+(H_p/B_t)^2]^{0.5}\} \quad (20)$$

式中 k_p ——散热系数

k ——经验系数,一般内绕组取 1.1,外绕组取 1.73

H_p ——水平气道高度, mm

B_t ——绕组的辐向尺寸, mm

根据式(16)~式(20)可以计算出绕组的有效散热面积为:

$$S=S_w k_{aw}+S_n k_{nw}+S_p k_p \quad (21)$$

4 计算实例

一台 SCB8-1000/10, $10 \pm 2 \times 2.5\%/0.4kV$, Dyn11 的环氧树脂浇注产品。其铁心直径为 240mm。低压绕组置内,用 1.0mm×820mm 的铜箔绕制而成,并在绕组中间两匝使用厚为 15mm 的气道条,气道条遮盖面积约 10%。其由内至外的绝缘半径为 140mm、150.5mm、165.5mm、177mm。三个低压绕组的总损耗

的计算值为 3 193W。高压绕组采用 2.24mm×8.5mm 的铜扁漆包线绕制成多层圆筒式,其由内至外的绝缘半径为 217mm、242mm。三个高压绕组的总损耗的计算值为 4 619W。因变压器容量较小,无需进行铁心的温升计算。绕组的温升计算过程大致如下:

(1) 高压绕组的计算

导线高度为:766.26mm(铜线绕制的轴向净高度,与电抗高度略有差异)

绕组散热表面系数为:

$$k_1=0.56 \times (40^{1.6}/766.26)^{0.25}=0.465 5$$

$k_2=1$ (因为高压绕组的外表面完全暴露在开阔的空气中,所以散热系数取 1)。

绕组散热面积为:

$$S_1=3 \times 2 \pi \times 217 \times 766.26 \times 10^{-6}=3.134 3mm$$

$$S_2=3 \times 2 \pi \times 242 \times 766.26 \times 10^{-6}=3.495 4mm$$

$$S=0.465 5 \times 3.134 3+1 \times 3.495 4=4.954 4mm$$

单位热负荷为:

$$q=4 619/4.954 4=932.3W/m^2$$

高压绕组温升为:

$$\tau=0.34 \times 932.3^{0.8}=80.7K$$

(2) 低压绕组的计算

导线高度:820mm

绕组散热表面系数为:

$$k_1=0.56 \times (20^{1.6}/820)^{0.25}=0.346 9$$

$$k_2=0.56 \times (15^{1.6}/820)^{0.25}=0.309 2$$

$$k_3=0.56 \times (40^{1.6}/820)^{0.25}=0.457 7$$

绕组散热面积为:

$$S_1=3 \times 2 \pi \times 140 \times 820 \times 10^{-6}=2.163 9mm$$

$$S_2=3 \times 2 \pi \times (150.5+165.5) \times 0.9 \times 820 \times 10^{-6}=4.395 9mm$$

$$S_3=3 \times 2 \pi \times 177 \times 820 \times 10^{-6}=2.735 8mm$$

$$S=0.346 9 \times 2.163 9+0.309 2 \times 4.395 9+0.457 7 \times 2.735 8=3.362mm$$

单位热负荷为:

$$q=3193/3.362=949.7W/m^2$$

低压绕组温升为:

$$\tau=0.38 \times 949.7^{0.8}=91.6K$$

(3) 计算误差(见表 1)

表 1 计算误差

Table 1 Calculation errors

| 部位 | 计算值/K | 试验值/K | 误差绝对值/K | 误差/% |
|------|-------|-------|---------|------|
| 高压绕组 | 80.7 | 79.6 | 1.1 | 1.36 |
| 低压绕组 | 91.6 | 88.6 | 3.0 | 3.28 |

矿用隔爆变压器箱体设计及优化*

黄向明¹, 周志雄¹, 毛 聪¹, 黄海军²

(1. 湖南大学机械与汽车工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙顺特变压器厂, 湖南 长沙 410014)

摘要:采用三维有限元法对矿用隔爆型变压器箱体结构进行了分析, 完成了箱体结构的优化设计。**关键词:**隔爆变压器; 箱体; 三维有限元; 优化设计**中图分类号:** TM402**文献标识码:** B**文章编号:** 1001-8425(2006)05-0030-04

1 前言

矿用隔爆型干式变压器直接在煤矿井下运行, 其箱体结构复杂, 设计与制造质量要求高。由于运行

的安全性、可靠性直接影响到整个煤矿的安全, 因此, 要求箱体有很好的隔爆性能, 可承受 1MPa 的试验压力, 所以箱体必须要有足够的强度和刚性。由于箱体结构复杂, 很难寻求一种简化方法对其进行准

* 全国变压器节材技术研讨会获奖论文。

5 结论

首先, 干式变压器的损耗产生的热量是通过热传导, 对流和辐射等散于周围冷却介质中。由于绕组、铁心结构型式不同, 绕组、铁心的温升计算也不尽相同, 而且在很大程度上依赖于试验和经验, 通常采用式(1)可以计算干式变压器的稳态和暂态温升。其次, 当干式变压器处于稳态时, 温升的指数曲线将趋向于一条直线, 此时按等效直线来进行工程计算, 计算方法比较简单, 计算结果比较可靠(按最

小斜率计算, 试验只会出现负偏差)。第三, 就树脂浇注绝缘干式变压器而言, 计算的温升值是绕组的平均温升。干式变压器在运行时, 其内部温升将呈一个“梯形”分布, 分布曲线应为一个倒抛物线。其最热点温升应为平均温升的 1.1~1.6 倍, 所以计算时应留有一定的裕度。

参考文献:

- [1] 路长柏, 郭振岩, 刘文里, 等. 干式电力变压器理论与计算[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2003.

Discussion on Calculation of Temperature Rise of Dry-Type Transformer

LUO Shun-xiang

(Panyu Junfa Electric Equipment Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: The method to calculate temperature rise of dry-type transformer is introduced. The detail calculation process is presented.

Key words: Dry-type transformer; Temperature rise; Calculation

收稿日期: 2005-09-26; 修稿日期: 2006-03-27

作者简介: 罗顺祥(1980-), 男, 江西进贤人, 广州番禺骏发电力设备有限公司, 从事变压器类产品设计工作。