

文章编号:1008-1534(2009)01-0012-03

浸油变压器油温升计算方法探讨

陈 磊

(武汉理工大学后勤集团,湖北武汉 430063)

摘 要:运用传热学基本原理和经典试验换热准则式,推导出浸油变压器平均油温升和顶油温升的计算式。并依此计算了一款三相油浸式变压器的平均油温升和顶油温升,计算结果与试验结果较为吻合,表明本计算方法在工程中应用可靠。

关键词:浸油变压器;平均油温升;顶油温升;计算方法

中图分类号: TM411 **文献标识码:** A

Calculation methods on oil temperature rise of oil-immersed power transformers

CHEN Lei

(Logistics Group, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: By utilizing the fundamental theory of heat transfer and the classical experiment heat transfer correlation equations, the calculation methods on the mean oil temperature rise and top oil temperature rise of the oil-immersed power transformers are obtained. The calculation results and the experimental results of the mean oil and top oil temperature rises of a three-phase oil-immersed power transformer are compared and analyzed, which shows they are in relatively good agreement, so that the calculation methods are reliable for engineering applications.

Key words: oil-immersed power transformer; mean oil temperature rise; top oil temperature rise; calculation methods

油浸式变压器具有散热好、损耗低、容量大、价格低等特点。目前电网上运行的电力变压器大部分为油浸式变压器,其中 80% 以上的油浸式变压器采用自然油循环冷却方式。按照 GB 1094. 2《电力变压器第 2 部分温升》的规定,大型变压器温升试验是在额定运行状态(严格讲应该是在模拟的额定运行状态)下进行的变压器的形式试验内容之一,对其绕组平均温升以及变压器油的温升的测量值是考核变压器热特性的重要指标,浸油变压器平均油温升和顶油温升是变压器出厂检验与运行检测的重要指标^[1-4]。

1 平均油温升计算

对于浸油变压器,由于变压器绕组和铁芯散出的热量传给变压器油,使变压器油温度上升,密度下降,向上流动,这样导致变压器箱体内部油温度并不均匀,总体来说,自下向上,油温逐渐升高。依据传热过程可以把平均油温升分为 3 部分:

- 1) 油对散热器内壁的温升(T_1);
- 2) 散热器内、外壁之间的温升(T_2);
- 3) 散热器外壁与空气之间的温升(T_3)。

变压器平均油温升即为以上 3 部分温升之和,即 $\bar{T} = T_1 + T_2 + T_3$ 。

1.1 油对散热器内壁的温升(T_1)

依据对流换热原理,油对散热器内壁的温升(T_1)可以为

$$T_1 = T_1 - T_2 = Q / (iF), \quad (1)$$

收稿日期:2008-07-01;修回日期:2008-10-03

责任编辑:张 军

作者简介:陈 磊(1971-),男,湖北武汉人,电气工程师,现为武汉理工大学后勤集团管理干部。

式中: Q 为传热量; $i = Nu \cdot \lambda / d_h$, 为油与散热器内壁的换热系数; F 为变压器箱体和散热器内侧总的散热面积。

对于浸油变压器, 油从散热器入口流入散热器油道。由于散热器内油流道直径 (d) 与其长度 (L) 的比值较小, 入口效应可忽略; 每一散热片由 2 片平行平板构成, 油在平板间竖直流动, 油流动表现为层流, 油流在热浮力的作用下作循环流动时, 其奴赛尔数 Nu 、雷诺数 Re 和格拉晓夫数分别为^[4]

$$Nu = 0.629 Re^{0.2} Gr^{0.1} Pr^{0.3}, \quad (2)$$

$$Re = ud_h / \nu, \quad (3)$$

$$Gr = g d_h^3 T_{\infty} / \nu^2, \quad (4)$$

式中: Pr 为定性温度下的油的普朗特数; λ 为定性温度下的油的导热系数; u 为油的流速, $u = Q / (c_p S T_{\infty})$ (ρ 为定性温度下的油的密度, c_p 为定性温度下的油的定压比热, S 为散热器的当量截面积); d_h 为散热器界面的当量直径; ν 为定性温度下的油的运动黏度; β 为定性温度下的油的膨胀系数; g 为重力加速度; T_{∞} 为油在散热器出入口之间的温差。

其定性温度为平均边界层温度, 定性温度 = (油平均温度 + 内壁表面平均温度) / 2。

由式(1) - 式(4)得

$$T_1 = T_1 - T_2 = \frac{(c_p T_{\infty})^{0.2} d_h^{0.5} Q^{0.8}}{0.629 (g)^{0.1} Pr^{0.3} S^{0.8}} \circ \quad (5)$$

1.2 散热器内、外壁之间的温升 (T_2)

根据导热 Fourier 定律可得

$$T_2 = q / \lambda, \quad (6)$$

式中: λ 为散热器壁面材料的导热系数; q 为通过散热器和箱体壁面的热流量; δ 为散热器的壁面厚度。

1.3 散热器外壁与空气之间的温升 (T_3)

散热器外壁与空气之间换热量是对流换热与辐射换热的综合结果, 因此其应该是辐射散热量与对流散热量之和。而对流换热有自然对流与强迫对流之分。

1) 散热器外部自然对流散热情况下 T_3 计算

依据对流换热原理, 散热器外壁的温升 (T_3) 为

$$T_3 = q / i, \quad (7)$$

根据变压器换热实际状况, 散热器外部自然对流时满足 $2.0 \times 10^7 < GrPr < 1.0 \times 10^{13}$, 其奴赛尔数 Nu 和格拉晓夫数分别为^[4]

$$Nu = 0.135 \sqrt[3]{GrPr}, \quad (8)$$

$$Gr = g d^3 T_3 / \nu^2, \quad (9)$$

其定性温度为平均边界层温度, 定性温度 = (空气温度 + 外壁表面温度) / 2。

以上几式联立可得

$$T_3 = q_0^{0.75} 0.5 / [0.2227 (g Pr)^{0.25} 0.75], \quad (10)$$

对于对流换热量, 依据传热学 Stefan-Boltzmann 定律可有

$$q_r = [\epsilon (T_a + T_3)^4 - T_a^4]. \quad (11)$$

散热器外壁与空气之间换热量是辐射散热量与对流散热量之和, 可有

$$Q = q_0 \times S_o + q_r \times S_r, \quad (12)$$

式中: q_0 , q_r 分别是散热器外侧面的对流热流量和辐射热流量; S_o , S_r 分别是散热器外侧对流换热面积和辐射换热面积; T_a 是绝对环境温度; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 通常取 $\sigma = 0.95$; ϵ 为散热器外侧表面黑度; 其他符号含义与上面类似, 值得指出的是这部分物性应该是空气在定性温度下的温性。

将式(10)、式(11)代入式(12)中, 式(12)即为 T_3 为未知量的一元四次方程, 通过迭代法可求得 T_3 。

2) 散热器外部强迫对流散热情况下 T_3 计算

对于外部使用风扇对散热器进行强制冷却的情况, 其奴赛尔数 Nu 、雷诺数 Re 分别为^[6]

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}, \quad (13)$$

$$Re = ud / \nu, \quad (14)$$

与上同样方法可得到

$$T_3 = q_0^{0.8} d^{0.2} / [0.023 Re^{0.4} Pr^{0.8} u^{0.8}]. \quad (15)$$

式中 d 为散热器外侧的当量直径。

对于对流换热量与散热器外壁与空气之间换热量的计算, 式(11)、式(12)仍然成立。其中修正系数 $\epsilon = -0.0046u^2 + 0.0887u - 0.154$, 空气流速 u 可由风扇风量与空气流通面积计算求得。

同上, 式(10)、式(11)代入式(15)中, 式(15)即为 T_3 为未知量的一元四次方程, 通过迭代法可求得 T_3 。

2 顶油温升计算

由于变压器箱体内油温不均匀, 自下向上油温逐渐升高。所以, 顶油温升 T_{top} 在变压器平均油温升的基础上还有一个额外温升量 T_E (T_E 是一个受发热中心和散热中心高度之比和油面最高温升 $1.2 \bar{T}$ 的修正温升), 即有^[5]

$$T_{top} = 1.2 \bar{T} + T_E, \quad (16)$$

$$T_E = \begin{cases} 0.2 + 0.1424 \bar{T} - 0.00247 \bar{T}^2 + 0.0000181 \bar{T}^3, & 0 < \bar{T} < 0.6, \\ 0.4 + 0.2665 \bar{T} - 0.00668 \bar{T}^2 + 0.000065 \bar{T}^3, & 0.6 < \bar{T} < 0.8, \\ 3.25 + 0.1424 \bar{T} + 0.0597 \bar{T}^2 + 0.00029 \bar{T}^3, & 0.8 < \bar{T}. \end{cases} \quad (17)$$

3 计算实例

运用上述计算方法,对中国沪光集团有限公司生产的35 kV S9系列三相浸油式变压器进行了平均油温升和顶油温升的计算,并与试验所测结果进行了比较见表1;该浸油式变压器主要技术参数如下。

额定容量:100 kVA;

额定电压:高压35 kV,低压:6.3 kV;

频率:50 Hz;

冷却方式:ONAN;

温升限值:绕组温升 65 K;顶油温升 60 K。

所遵循的标准:GB 1094 电力变压器;IEC 60076 电力变压器;GB/T 6451-1999 三相油浸式电力变压器技术参数和要求。

表1 平均油温升和顶油温升的计算与试验所测结果

Tab.1 Calculation results and experimental results of the mean oil temperature rise and the top oil temperature rise

比较项	平均油温升/ 顶油温升/	顶油温升/
计算值	31.2(其中 $T_2 = 0.85$ K)	45.8
测量值	26.6(其中 $T_2 = 0.9$ K)	40.2

由表1可知计算得到的平均油温升和顶油温升与测量值较为接近,测量值偏小,但其原因如下:

1) 计算与测量结果显示,平均油温升中散热器内、外壁之间的温升(T_2)所占比例均非常小,工程计算中这一部分温升可以忽略。

2) 由于变压器中油温分布不均匀,测点位置较少,在油温较低的位置有可能造成测量值较低。

3) 由于温度计通过温度计套管测量油的温度,

套管顶端向根部导热,油与套管外表面进行对流换热,所以温度计测得的温度一定低于油的真实温度。

4 结论

本文运用传热学基本原理和经典试验换热准则式,将平均油温升分为油对散热器内壁的温升、散热器内壁与外壁之间的温升、散热器外壁与空气之间的温升分别予以推导,得到平均油温升的计算方法;计算与测量结果显示,平均油温升中散热器内、外壁之间的温升所占比例均非常小,工程计算中这一部分温升可以忽略;对于顶油温升计算引进了文献公布的经验修正方法;并针对一款三相油浸式变压器进行了平均油温升和顶油温升的计算,进一步与试验所测结果进行了比较。关于浸油变压器平均油温升和顶油温升计算方法具有一定的工程可靠性。

参考文献:

- [1] LINDEN W P. An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3): 1347-1355.
- [2] 王秀春,俞昌铭. 强油导向冷却结构变压器中导向油流量和油温升计算[J]. 中国机电工程学报, 2000, 20(8): 14-17.
- [3] 杨增军,王秀春,毛一之,等. 高燃点油变压器散热器进出口油温差的计算方法[J]. 变压器, 2003, 40(9): 18-19.
- [4] KARSAI K, KEREN YI D, LISS L. Large Power Transformers[M]. The Nether Lands: Elsevier, 1987. 41-47.
- [5] INEROPERA F P, KONX A L, MAUGHAN J R. Mixed-convection flow and heat transfer in the entry region of a horizontal reetangular duct[J]. Transaction of the ASME, 1987, 109(5): 434-439.
- [6] 杨世民,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.

(上接第11页)

参考文献:

- [1] HADER H J. Design and application of reinforced concrete armoured doors[A]. Proceeding of the 2th Symposium on the Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures[C]. Panama City Beach: FL, 1985. 494-499.
- [2] IGRA O, WU X, FALCOVITZ J, et al. Experimental and theoretical study of shock wave propagation through ducts with abrupt changes in the flow direction[J]. Journal of Fluid

Mechanics, 2001, 255-282.

- [3] 杨科之,杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 37-40.
- [4] 王来,李延春. 直角拐角中空气冲击波的传播及数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4): 146-150.
- [5] 杨军,金乾坤,黄风雷. 岩石爆破理论模型及其数值计算[M]. 北京:科学出版社,1999.