

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.030

# 一种油浸式电力变压器绕组温升工程计算方法

夏彦卫<sup>1</sup>, 张建涛<sup>2</sup>, 谢 庆<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力科学研究院, 石家庄 050021;

2. 华北电力大学河北省输变电设备安全防护重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:** 油浸式电力变压器的绕组温升直接影响变压器的负载能力,而变压器绕组温升实验效率低、费用高,因此对变压器绕组温升进行工程计算研究具有十分重要的意义。目前大部分变压器厂用的工程计算方法没有统一的标准,造成计算结果不统一,误差较大。鉴于此,本论文在建立变压器绕组模型、分析绕组内油流特性的基础上提出一种变压器绕组温升工程计算方法,从工程实际出发对采用冷却器作为冷却装置的变压器在强油导向冷却方式下进行绕组温升工程计算,计算结果与变压器厂测得结果作对比,结果表明:该方法误差较小,可以满足工程实际需要。

**关键词:** 变压器; 绕组; 温升; 工程算法

## Engineering Calculation Method for Winding Temperature Rise of Oil Immersed Power Transformer

XIA Yanwei<sup>1</sup>, ZHANG Jiantao<sup>2</sup>, XIE Qing<sup>2</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

**Abstract:** The winding temperature rise of oil immersed power transformer directly affects the load capacity of the transformer, because the winding temperature rise test of transformer is of low efficiency and high cost, engineering calculation methods are important for winding temperature rise of transformer. The existing engineering calculation methods are different without a common standard, resulting in different calculation results or large error. In this paper, a transformer winding model is established, the distribution of oil flow in the winding is analyzed and an engineering calculation method for winding temperature rise of transformer is proposed. According to practical condition, the winding temperature rise of a transformer with cooler is calculated with the proposed method under the strong oil guide cooling mode, the results of engineering calculation are compared with the measured results of transformer factory and it shows that the method has less error and can meet the actual needs of the project.

**Key words:** transformer; winding; temperature rise; engineering algorithm

## 0 引言

油浸式电力变压器是电网中能量转换、传输的关键设备<sup>[1]</sup>。绕组作为变压器主要组成部分,其温升直接影响变压器负载能力,因此对变压器绕组温升的计算方法进行研究尤为重要。目前国内外研究获

得变压器绕组温升数据的方法主要为以下 4 种。

第 1 种方法是直接测量法,在变压器靠近导线部分或者导线线饼中预埋温度传感器,直接获得变压器绕组热点温度。以 Therm Asset2 为例,该变压器绕组热点光纤温控器是通过测量磷光体单独的固有参数而确定的,不会因为光纤的物理变化而改变,所以该系统是一个无需校验的系统<sup>[2]</sup>。直接测量法

收稿日期:2017-03-14; 修回日期:2017-05-21

基金项目:河北省自然科学基金(E2015502081)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of Hebei Province(E2015502081)。

是世界范围内的变压器厂商和电力部门一致认为的确定变压器绕组热点温度的可靠方法,其缺点是传感器和光纤不能长时间浸泡在变压器油中,绕组热点位置主要靠设计经验确定且光纤传感器造价成本较高<sup>[3]</sup>。基于以上原因,电网中只有少数变压器安装了光纤测温传感器,直接测量法在实际生产中并没有得到广泛应用。

第2种方法是热电类比法。文[4-5]在热传递和电荷转移类比基础上,应用热回路来模拟变压器内部温度分布模型;文[6-8]利用热传输理论推导了热路模型参数(如热阻热容以及时间常数等)并分析了变压器油粘滞度对热阻及时间常数的影响。文[9]给出了一种热路模型,用两套参数代表顶层油温和底层油温,简化了热路图。该方法计算过程简单,预测结果也能较好的反映变压器温升,但是所得结果的精度不高。

第3种方法是根据变压器发热散热过程,建立变压器绕组模型进行仿真计算,根据环境温度、变压器油性质以及变压器绕组结构来计算变压器绕组温度,通过绕组温度来推算其温升值。该方法计算精度较高但是建模仿真过程比较复杂<sup>[2]</sup>。

第4种方法是经验公式法。目前大部分变压器厂家都在使用经验公式计算变压器绕组温度,该方法的优点是简化了计算量,提高了计算效率,因此经验公式法被广泛的应用在日常生产实际当中<sup>[10]</sup>。

目前大部分变压器厂用的工程计算方法都没有统一的标准,绕组温升计算误差较大<sup>[2]</sup>。因此文中通过建立一种变压器绕组模型,分析变压器内的油流分布情况,提出了一种油浸式电力变压器绕组温升的工程计算方法,该方法适用于采用冷却器作为冷却装置的变压器在强油导向冷却方式下的绕组温升计算,计算误差小、成本低,可满足工程需要。

## 1 变压器绕组模型及耐热性能

在电力变压器内部,绕组结构最为复杂,其油路结构见图1(a)。绕组内部主要包括线饼、挡板、围屏等。冷向油道包括由绕组和围屏之间组成的垂直油道和绕组线饼与垫块组成的水平油道两种。由于导向挡板用来交替闭塞内外垂直油道,由此形成了导向区,各区的油流分布不受其他区的影响<sup>[11-12]</sup>,每区的油流分布见图1(b)。

变压器的绝缘材料在热的作用下都会发生分解老化,甚至丧失其机械性能和绝缘能力<sup>[13]</sup>。绝缘材料有一定的耐热等级,不同绝缘的耐热等级见表1<sup>[14-15]</sup>。

油浸式电力变压器绝缘类型为A级绝缘,其绕

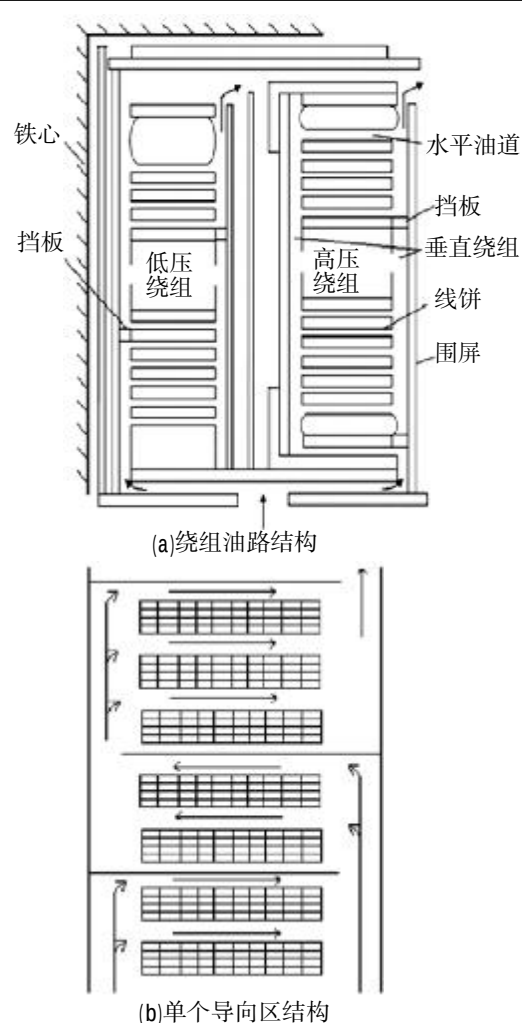


图1 油浸式电力变压器绕组结构

Fig. 1 Oil immersed power transformer winding structure

表1 绝缘材料的耐热等级

Table 1 Heat resistance grade of insulating material

| Y  | A   | E   | B   | F   | H   | C    |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | >180 |

组的长期平均工作温度不应超过105℃。根据GB 1094.2—2013《电力变压器 第2部分 温升》中对油浸式电力变压器的温升规定:变压器绕组平均温升(用电阻法测量)不超过65K。如果环境温度为40℃,绕组平均温升为65K,则绕组的平均温度为(40+65)℃=105℃,这一数值对应A类绝缘的长期工作温度。

## 2 绕组温度工程计算

采用水冷却器或风冷却器做冷却装置的油浸式电力变压器其冷却方式有强迫导向油循环风冷却(ODAF)/强迫导向油循环水冷却(ODWF)、强迫非导向油循环风冷却(OFAF)/强迫非导向油循环水冷却(OFWF),文中方法只适合以冷却器做冷却设备采用强油导向冷却方式的油浸式电力变压器绕组温升

计算<sup>[16-18]</sup>。变压器的绕组温升  $T_w(K)$  等于绕组对油的平均温升(铜油温升)  $T_c$  加上变压器油的平均温升  $T_{0av}$  即

$$T_w = T_c + T_{0av} \quad (1)$$

使用式(1)进行计算时,需要首先计算出绕组对油的平均温升和变压器油的平均温升,基于文[4-5,12]提出的计算模型结合变压器实际绕组情况,文中提出一种计算变压器绕组温升的经验公式。

## 2.1 绕组对油的平均温升(铜油温差)工程计算

线饼表面单位面积的热负荷  $q_w(K)$  以匝数最多的线饼按式(2)计算。

$$q_w = 1.05 \times 10^{-7} j^2 \times \frac{ab}{a+\delta} \times \frac{B}{A+B} \times \frac{MLT}{MLT - W_s} \times (1+e) \quad (2)$$

式(2)中:  $1.05 \times 10^{-7}$  为与铜导线电阻系数有关的常数。如果铜导线在参考温度  $75^\circ C$  时的电阻系数为  $0.02135 \Omega \cdot mm^2/m$  时,该系数应为  $1.07 \times 10^{-7}$ ;  $j$  为导线中的电流密度,  $A/cm^2$ ;  $a$  为一根纸包导线中裸导线的幅向厚度,  $mm$ ; 对于组合导线  $a$  为一根组合导线中的组合根数  $\times$  每根裸导线的厚度; 对于换位导线,  $a$  为换位导线的线芯幅向厚度;  $b$  为裸导线的宽度(轴向高度),  $mm$ ; 对于换位导线,  $b$  为换位导线的线芯轴向高度;  $a+\delta$  为一根纸包导线(含组合导线及换位导线)的幅向厚度,  $mm$ ;  $A$  为线饼中绝缘导线的轴向高度,  $mm$ ,  $A=b+\delta$ ;  $B$  为线饼的幅向宽度,  $mm$ ;  $MLT$  为线饼中导线的平均匝长,  $mm$ ;  $W_s$  为垫块宽度  $\times$  撑条数,  $mm$ ;  $e$  为整个绕组涡流损耗占电阻损耗的平均百分数。

变压器绕组导线对油的平均温升(铜油温差)  $T_c(K)$  等于导线绝缘表面对油的平均温升  $T_{w0}$  加上导线绝缘层的温度降  $T_{wi}$ , 即

$$T_c = T_{w0} + T_{wi} \quad (3)$$

式(3)中,  $T_{w0}$  为导线绝缘层表面对油的平均温升,  $K$ , 按式(4)计算

$$T_{w0} = 0.045 + (q_w \times 10^4)^{0.84} \times V_R^{-0.335} + 0.5 \quad (4)$$

式(4)中:  $V_R$  为水平油道中油的平均流速,  $cm/s$ 。  $T_{wi}$  为导线绝缘层的温度降,  $K$ , 按式(5)计算

$$T_{wi} = 30.5 \times (\delta - 0.48) q_{w0} \quad (5)$$

式(5)中,  $\delta$  为导线绝缘的(双面)厚度,  $mm$ 。

当一个相绕组分为两个及以上绕组或者一个相绕组由几种线饼段组成时,则整个绕组的平均温升根据各绕组(或各种线饼)的直流电阻值按式(6)进行折算。  $T_c(K)$  为

$$T_c = \frac{R_1}{R} T_{c1} + \frac{R_2}{R} T_{c2} + \dots \quad (6)$$

式(6)中:  $R_1, R_2, \dots$  为组成该相绕组的各绕组(或各

种线饼)的直流电阻,  $\Omega$ ;  $R$  为该相绕组的总直流电阻,  $\Omega$ ,  $R = R_1 + R_2 + \dots$ ;  $T_{ci}$  分别为组成该相绕组的各绕组(或各种线饼)的平均温升,按式(3)计算。

## 2.2 变压器油平均温升工程计算

变压器油的平均温升决定于变压器的总损耗和冷却器特性<sup>[19-20]</sup>,《电力变压器手册》中指出油平均温升  $T_{0av}(K)$  等于油顶层温升减去上下油温差的一半<sup>[12]</sup>,即按式(7)计算

$$T_{0av} = T_\theta - \frac{\Delta T_\theta}{2} \quad (7)$$

对于强油导向冷却变压器,油顶层温升  $T_\theta(K)$  按式(8)计算。

$$T_\theta = 40 \times \frac{\sum P}{\sum P_{c0}} \quad (8)$$

式(8)中:  $\sum P$  为变压器的总损耗,  $kW$ , 要选取变压器运行中可能的最大损耗进行计算。通常,最小分接(最大电流分接)时的损耗最大,如果需要,还应考虑太阳的日照损耗<sup>[21-24]</sup>;  $\sum P_{c0}$  为额定工作冷却器在入口油温升为  $40 K$  时的总冷却容量,  $kW$ 。

如果冷却器制造厂家提供的冷却器是在入口油的温升低于  $40 K$  时的总冷却容量,则应折算到  $40 K$  时的冷却容量。另一个等效的方法是用冷却器制造厂家提供的冷却器入口油温升代替公式中的  $40 K$ ,  $\sum P_{c0}$  为此入口油温升下的工作冷却器的总冷却容量。当式(8)计算中使用的冷却容量对应的冷却器入口油温升不是  $40 K$  时,应该用冷却容量对应的冷却器入口油温升代替公式中的  $40 K$ 。变压器的上、下部油温差  $\Delta T_\theta(K)$  按式(9)计算。

$$\Delta T_\theta = 40 \times \frac{\sum P}{\sum Q} \quad (9)$$

式(9)中,  $\sum Q$  为额定工作冷却器的额定总油流量,  $L/min$ ; 如果流入同一铁心柱上各绕组的油流量分别为  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$ , 在对每个绕组按上述过程计算中应反复调整流入各绕组的油流量,使各绕组的压力损失基本相等时的油流量即为最终的每个绕组中的油流量。同一铁心柱上各绕组压力损失间的相互偏差,应控制在  $0.1 cm$  以下。流入变压器各绕组的总油流量  $\sum Q(L/min)$  为流经各绕组油流量之和。

$$\sum Q = n(Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots) \quad (10)$$

式(10)中,  $n$  为变压器的相数(或相同结构尺寸线圈的个数)。通常,当为了降低绕组中油的最大流速而在冷却油路中设有分流回路时,  $\sum Q$  取工作冷却器总油流量的  $75\%$  左右; 当冷却油路中没有分流回路时,  $\sum Q$  取工作冷却器总油流量的  $90\%$  以上。

### 3 变压器油温升工程计算

下面以一台型号 SFP-150000/500ODAF 冷却方式的变压器为例进行理论计算。

该变压器采用 ODAF 冷却方式, 三柱式铁心, 每柱 2 个套线圈; 总损耗为 545.10 kW, 3 台冷却器, 额定冷却容量为 200 kW; 流量为 30 m<sup>3</sup>/h, 入口油温升为 40 K, 进入每柱线圈的油流量为 75%, 其基本数据见表 2。

经计算得高压绕组对油的平均温升为 16.2 K, 油的平均温升为 33.6 K, 低压绕组对油的平均温升为 19.9 K, 因此可以得到高压绕组平均温升为 49.8 K, 低压绕组平均温升为 53.5 K。而变压器温升实验测得高压绕组的平均温升为 46.1 K, 低压绕组的平均温升为 50.3 K, 与实测值比较可知该工程计算方法误差较小。

### 4 结语

文中提出了一种以冷却器作为冷却装置的大型油浸式电力变压器在强油导向冷却方式下的绕组温升工程计算方法, 并对一台型号 SFP-150000/500 ODAF 的变压器为例进行了绕组温升工程计算, 将工程计算结果与变压器厂测得结果作对比, 结果表明: 该方法误差较小, 可以满足工程实际需要。

### 参考文献:

- [1] 单东雷. 大型变压器绕组温度场的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.  
SHAN Donglei. Winding temperature field of large transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [2] 俞潺潺. 大型油浸式自冷变压器温升的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.  
YU Chanchan. Study on temperature rise of large oil immersed self cooled transformer[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [3] 岳国良. 油浸式电力变压器负载能力在线评估及冷却控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
YUE Guoliang. Study on load capacity on line assessment and cooling control strategy of oil-immersed power transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [4] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. Theory and equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 171-175.
- [5] SWIFT G, MOLINSKI T S, BRAY R, et al. A fundamental

表 2 变压器基本数据

Table 2 Basic data of transformer winding

| 项目                         | 高压    | 低压      |
|----------------------------|-------|---------|
| 首末端线饼高/mm                  | 2 370 | 2 370   |
| 裸导线总高/mm                   | 530.4 | 1 864.5 |
| 匝绝缘总高/mm                   | 289.4 | 109.2   |
| 线圈垫块数                      | 32    | 32      |
| 垫块宽/mm                     | 50    | 30      |
| 匝绝缘/mm                     | 2.450 | 0.950   |
| 每根导线中的导体数                  | 1     | 1       |
| 单根导体厚/mm                   | 2.0   | 1.5     |
| 单根导体宽/mm                   | 12.5  | 8.5     |
| 电流密度/(A·mm <sup>-2</sup> ) | 3.523 | 3.534   |
| 平均匝长/m                     | 4.697 | 3.547   |
| 线圈内半径/mm                   | 697   | 537     |
| 线圈外半径/mm                   | 798   | 592     |
| 涡流损耗百分数/%                  | 25    | 25      |
| 线圈内径侧油道/mm                 | 7     | 8       |
| 线圈外径侧油道/mm                 | 10    | 7       |
| 线圈上端部油道/mm                 | 6     | 6       |
| 线圈下端部油道/mm                 | 6     | 6       |
| 线圈导向分区数                    | 9     | 8       |
| 内导向拟制点数                    | 4     | 4       |
| 内导向拟制点数                    | 4     | 4       |
| 外导向拟制点数                    | 5     | 4       |

approach to transformer thermal modeling-Part II: Field verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 176-180.

- [6] SUSAN D. Dynamic thermal modelling of power transformers[D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2005.
- [7] SUSAN D, LEHTONEN M, NORDMAN H. Dynamic thermal modelling of power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 197-204.
- [8] 谢裕清, 李 琳, 宋雅吾, 等. 油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5957-5965.  
XIE Yuqing, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi-physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965.
- [9] TYLAVSKY D J, QING H, JENNIE S, et al. Transformer top-oil temperature modeling and simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(5): 1219-1225.
- [10] 李 猛. 变压器结构件温升计算[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.  
LI Meng. Calculation of temperature rise of transformer structural parts[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007.

- [11] 苏小平.油浸式变压器绕组热点温度计算模型及预测方法研究[D].重庆:重庆大学,2012.  
SU Xiaoping. Study on calculation model and prediction method of oil immersed transformer winding hot spot temperature[D]. Chongqing:Chongqing University,2012.
- [12] SUSA D,LEHTONEN M.Dynamic thermal modelling of power transformers:Further de-velopment-Part II [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(4): 1971-1980.
- [13] 谢毓城.电力变压器手册[M].北京:机械工业出版社,2013.  
XIE Yucheng. Handbook of power transformer[M]. Beijing: China Machine Press,2013.
- [14] 王丰华,周翔,高沛,等.基于绕组热分布的改进油浸式变压器绕组热点温度计算模型[J].高电压技术,2015,41(3):895-901.  
WANG Fenghua,ZHOU Xiang,GAO Pei,et al. Improved thermal circuit model hotspot temperature oil-immersed-transformers based heatdistribution winding[J]. High Voltage Engineering,2015,41(3):895-901.
- [15] 李剑,刘兴鹏,王有元,等.以箱壁温度为判据的油浸式变压器绕组热点温度计算模型及试验分析[J].高电压技术,2011,37(10):2344-2349.  
LI Jian,LIU Xingpeng,WANG Youyuan,et al. Model of hot spot temperaturein oil immersed transformers using temperature estimation of tank wall[J]. High Voltage Engineering,2011,37(10):2344-2349.
- [16] 于海波,帅志飞,姜益民.上海地区地下变电站变压器冷却方式的运行分析[J].变压器,2014,51(11):57-61.  
YU Haibo,SHUAI Zhifei,JIANG Yimin. Analysis of transformer cooling mode in underground transformer sub-station in Shanghai[J]. Transformer,2014,51(11):57-61.
- [17] 苏小平,陈伟根,奚红娟,等.采用 Kalman 滤波算法预测变压器绕组热点温度[J].高电压技术,2012,38(8):1909-1916.  
SU Xiaoping,CHEN Weigen,XI Hongjuan,et al. Winding hot-spot temperature prediction for oil-immersed power transformer based on kalman filter algorithm[J]. High Voltage Engineering,2012,38(8): 1909-1916.
- [18] IEEE Standard 1538—2000 Guide for determination of maximum winding temperature rise in liquid-filled transformers[S].2000.
- [19] 刘国坚,王丰华.树脂浇注干式变压器温度场分布的计算分析[J].高压电器,2016,52(8):83-89.  
LIU Guojian,WANG Fenghua. Calculation and analysis of temperature field distribution of resin cast dry-type transformer[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(8): 83-89.
- [20] TANG W H,WU Q H. Condition monitoring and assessment of power transformers using computational intelligence[M]. New York,USA: Springer London,2011:203-206.
- [21] 兰贞波,文武,阮江军,等.基于有限元法的干式变压器多物理场分析计算[J].高压电器,2015,52(8):107-113.  
LAN Zhenbo,WEN Wu,RUAN Jiangjun,et al. Analysis and calculation of multi physics field of dry-type transformer based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus,2015,52(8): 107-113.
- [22] 汪德华,杨春,王革鹏,等.基于 Fluent 的超高压变压器二维温度场分析[J].高压电器,2015,52(6):161-165.  
WANG Dehua,YANG Chun,WANG Gepeng,et al. Analysis of two dimensional temperature field of ultra high voltage transformer based on fluent[J]. High Voltage Apparatus,2015,52(6): 161-165.
- [23] 周凯,吴云飞,金雷.核电厂大型主变压器现场过电流试验[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(2):105-109.  
ZHOU Kai,WU Yunfei,JIN Lei.Over current site test of main transformer at nuclear power plant[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensatio,2016,37(2):105-109.
- [24] 常鹏,阿里木江·卡德尔,王海云.火花间隙对保护换流变压器中性点接地电容的研究[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(1):56-60.  
CHANG Peng,Alimjan·Kader,WANG Haiyun.Study on protection of neutral point earthing capacitance of converter transformer by spark gap[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensatio,2016,37(1):56-60.

夏彦卫(1966—),男,高级工程师,主要从事输变电设备检修技术研究。