

文章编号:1000-582X(2010)12-008-06

变压器绕组热点温度热电类比计算模型仿真分析

陈伟根¹,李孟励¹,孙才新¹,苏小平¹,胡金星²

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;

2. 重庆市城区供电局,重庆 400014)

摘要:变压器绕组的热点温度是决定变压器过载能力和油纸绝缘老化率的关键因素。在传统热理论基础上,考虑了温度对油粘度的影响,结合热电类比方法和 IEEE 推荐的热点温升模型提出一种预测变压器绕组热点温度的仿真模型。采用 Runge-Kutta 方法求解变压器实时的顶层油温和变压器绕组的热点温度,并与 100 kVA/5 kV(ONAN)试验变压器的实测温度数据进行对比,仿真结果与实测数据有较好的一致性。

关键词:变压器;绕组;热点温度;仿真模型;热电类比

中图分类号:TM411

文献标志码:A

Simulation analysis of the thermal-electric analogy calculation model of transformer winding hot-spot temperature

CHEN Wei-gen¹, LI Meng-li¹, SUN Cai-xin¹, SU Xiao-ping¹, HU Jin-xing²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chongqing City Electric Power Company, Chongqing 400014, P. R. China)

Abstract: The winding hot-spot temperature is one of the most critical parameters that determines the power transformer overloading capability and the aging rate of the oil-paper insulation. Based on the traditional thermal theory, the paper proposes a simulation model to predict transformer winding hot spot temperature taking into account oil viscosity changes with temperature, and combined with the thermal-electric analogy method and hot spot temperature rise model recommended by IEEE. The Runge-Kutta method is used to calculate top-oil temperature and winding hot-spot temperature of the transformer, and then compare them with the measured data obtained from the 100 kVA/5 kV (ONAN) experimental transformer. The simulation results are in good agreement with experimental data.

Key words: transformer; winding; hot-spot temperature; simulation model; thermal-electric analogy

电力变压器是电力系统中的重要设备,其稳定运行对系统的安全可靠性以及运行费用控制有着非常重要的影响。电力变压器的负载能力及其绝缘可用寿命某种程度上取决于能否及时地将其内部产生的热量传递到周围环境中,即热特性。国内外的变

压器运行部门和制造厂家都把确定变压器内部温度分布(主要确定变压器顶层油温和热点温度)作为状态检修的关键性问题提出。因此,有必要根据变压器的原始数据和实际负荷设计仿真模型跟踪变压器热行为。

收稿日期:2010-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50777069)

作者简介:陈伟根(1967-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电气设备在线监测及故障诊断技术研究,

(E-mail) weigench@cqu.edu.cn.

变压器绕组的热点温度是决定变压器过载能力和油纸绝缘老化率的最关键因素。为了提高变压器的运行效率和减少变压器可能的突发事故,国内外进行了很多关于变压器状态特征信息监测技术的研究,其主要特征信息有油中溶解气体分析(DGA)、绕组热点温度、局部放电(PD)等。近年来,大量学者对变压器顶层油温和绕组热点温度进行了试验研究。目前绕组热点温度监测普遍采用热模拟测量法^[1-2]、直接测量法^[3-7]、间接计算法,其中 GB/T 15164-94《油浸式电力变压器负载导则》推荐了变压器绕组热点温度计算的模型^[8],该模型假设绕组温度沿高度线性增加,并与同样线性增加的油温平行,给出了变压器顶层油温和绕组热点温度的计算公式;另外,Swift 首先提出通过传热理论、热电类比方法建立变压器顶层油温计算模型^[9,10],并定义了集总热容和非线性热阻的概念,得到了计算变压器顶层油温的微分方程。Susa、Lehtonen 等学者考虑了油粘度、损耗随温度的变化,利用热电类比方法提出基于顶层油温、底层油温的变压器绕组热点温度计算模型^[11-16],模型结果与实测值相比,取得了较好的结果。

笔者在热电类比模型基础上,提出一种仿真热模型,利用 Runge-Kutta 方法计算变压器实时的顶层油温和变压器绕组热点温度。该模型的有效性通过与实验室 100 kVA/5 kV 试验变压器的温升试验数据对比验证,结果显示出较好的一致性。

1 基于热电类比的变压器热模型

变压器绕组热点温度是绕组最热区域内达到的温度,是变压器负载最关键的限制因素。建立在热电类比和传热理论基础上的变压器热模型可以计算出变压器顶层油温和绕组热点温度。

1.1 顶层油温方程

IEEE Std C57.91 标准提出变压器顶层油温指数模型^[17],根据其指数方程推出其微分方程如下

$$\left(\frac{K^2\alpha+1}{\alpha+1}\right)^n \cdot \Delta\theta_{oil,R} = \tau_{oil,R} \cdot \frac{d\Delta\theta_{oil}}{dt} + \Delta\theta_{oil} \quad (1)$$

变压器顶层油温升模型采用一阶导数模型,但此模型方程未能准确反映环境温度变化对顶层油温变化的动态影响,存在局限性。因此,文献^[12]在考虑了油粘度和非线性热阻影响的条件下,提出一种由热路模型给出的顶层油温模型,如图 1 所示:

变压器负载和空载损耗由 1 个理想热源 q 表示,环境温度由理想的温度源 θ_a 表示。根据热电类

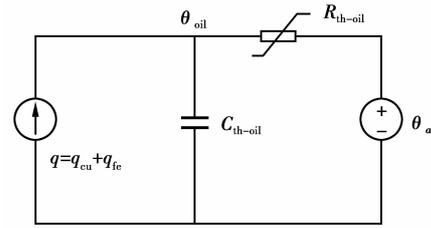


图 1 顶层油温模型

比,由图 1 可得顶层油温 θ_{oil} 的微分方程为

$$q_{cu} + q_{fe} = C_{th-oil} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{\theta_{oil} - \theta_a}{R_{th-oil}} \quad (2)$$

其中: C_{th-oil} 为油的热容; R_{th-oil} 为非线性热阻。非线性热阻计算如(3)所示,油热容取值为额定油热容,如(4)所示

$$R_{th-oil} = \frac{1}{h \cdot A} = \frac{\Delta\theta_{oil}}{q} \quad (3)$$

$$C_{th-oil,R} = \frac{\tau_{oil,R}}{R_{th-oil,R}} \quad (4)$$

另外,根据传热理论,在垂直、倾斜和水平盘状物及桶状物中自然对流的油流有下述经验公式

$$Nu = C \cdot [Gr \cdot Pr]^n \quad (5)$$

式中,努塞尔系数 Nu ;普朗特系数 Pr ;格拉晓夫系数 Gr 的计算分别如下

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (7)$$

$$Gr = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (\Delta\theta_{oil})}{\mu^2} \quad (8)$$

把(6)、(7)、(8)代入(5)可得传热系数 h

$$h = \frac{C \times k}{L} \cdot \left[\left(\frac{c_p \cdot \mu}{k} \right) \cdot \left(\frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (\Delta\theta_{oil})}{\mu^2} \right) \right]^n \quad (9)$$

其中: L 为传热面的特征尺寸; g 为重力常数; k 为油热传导率; ρ 为油密度; β 为油热膨胀系数; $\Delta\theta_{oil}$ 为油的温度梯度; μ 为油粘度。由于油粘度随温度的变化较其他物理参数(ρ 、 β 、 k)随温度的变化更为显著,因此除油粘度外,可把其他物理参数近似看作常数^[15]。

油粘度 μ 随温度而变化^[12],其值如(10)所示。如果定义 μ 为额定值 μ_r 与变化量 μ_{pu} 之积,则把式(3)、(4)、(9)、(11)代入(2)可得出简化的顶层油温模型方程,如(12)所示

$$\mu = 0.000\ 001\ 357\ 3 \times e^{\frac{2\ 797.3}{\theta_{oil}+273}} \quad (10)$$

$$\mu = \mu_{pu} \cdot \mu_r, \quad (11)$$

$$\frac{K^2 \alpha + 1}{\alpha + 1} \cdot \mu_{pu}^n \cdot \Delta \theta_{oil,R} = \mu_{pu}^n \cdot \tau_{oil,R} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_a)^{1+n}}{\Delta \theta_{oil,R}^n}. \quad (12)$$

其中: K 为负载因数, $\frac{I}{I_{rated}}$; $\tau_{oil,R}$ 为额定变压器油时间常数; $\Delta \theta_{oil,R}$ 为额定的顶层油温升值; α 为额定负载损耗与空载损耗之比, $\frac{q_{cu}}{q_{fe}}$; n 为常数, 取决于油循环是层流或湍流, 在不同的油循环情况下取值不同。

上述微分方程中已知量为: $n, \alpha, \Delta \theta_{oil,R}, \tau_{oil,R}$; 输入量为: K, θ_a ; 输出量为: θ_{oil} 。在不同的制冷方式和不同的油循环条件下, n 取值不同, 其值如表 1 所示。

表 1 顶层油温模型 n 取值

油循环	n	
	ONAF/OFAF	ONAN
初始油速 0	0.5	0
初始油速大于 0	0.25	

1.2 变压器绕组热点温升方程

负载的增加会加大变压器内部绕组损耗, 从而引起绕组热点温度升高, 热点温升方程可由如下微分方程表示^[17]

$$K^{2m} \cdot \Delta \theta_{hs,R} = \tau_w \cdot \frac{d\Delta \theta_{hs}}{dt} + \Delta \theta_{hs}. \quad (13)$$

其中: τ_w 为变压器绕组时间常数; $\Delta \theta_{hs}$ 为热点对顶层油温升; $\Delta \theta_{hs,R}$ 为额定热点对顶层油温升; m 为经验指数, 在不同冷却形式下取值不同, 表明电阻和油粘度变化的影响。

上述微分方程中已知量: $m, \tau_w, \Delta \theta_{hs,R}$; 输入量: K ; 输出量: $\Delta \theta_{hs}$ 。指数 m 的取值如表 2 所示。

表 2 不同冷却形式下 m 取值

冷却形式	IEEE 推荐指数 m
OA/ONAN	0.8
FA/ONAF	
NDFOA/OFAF	
DFOA/ODAF	1.0

2 变压器绕组热点温度计算仿真模型

笔者采用 Matlab 中的 Simulink 工具箱对变压器顶层油温和绕组热点温升微分方程搭建仿真模型, 利用变步长解法 ode45 (四阶 Runge-Kutta 方法) 计算变压器实时的顶层油温和绕组的热点温度。Runge-Kutta 方法是一种在工程上应用广泛的高精度单步算法, 其理论基础来源于泰勒公式, 利用斜率近似表达微分。它在积分区间多预算出几个点的斜率, 然后进行加权平均, 用做下一点的依据, 从而构造出精度更高的数值积分计算方法。

变压器绕组热点温度为顶层油温与热点温升之和, 其表达式如下

$$\theta_{hs} = \theta_{oil} + \Delta \theta_{hs}. \quad (14)$$

根据式(14)建立基于顶层油温和热点温升的绕组热点温度全局模型, 如图 2 所示。

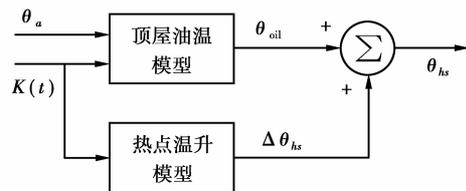


图 2 热点温度模型简图

其中, 顶层油温模型由考虑了油粘度和非线性热阻影响的微分方程(12)建立, 如图 3 所示。其输入量为负载因数和环境温度, 输出量为顶层油温。

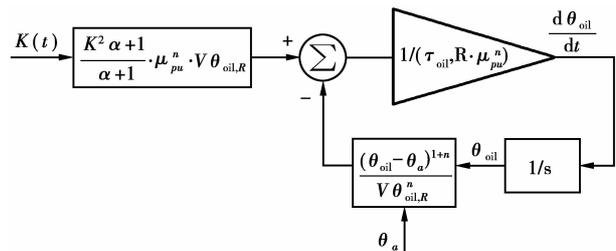


图 3 顶层油温模型简图

热点温升仿真模型由式(13)给出的微分方程建立, 如图 4 所示。其输入量为负载因数, 输出量为热点温升。

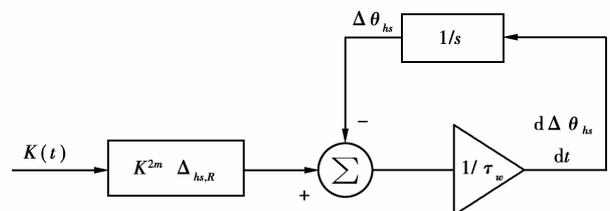


图 4 热点温升模型简图

热点温度全局模型的参数可以通过模块的输入参数直接输入,如图 6 所示。在每一步求解热点温度模型方程时,输入量除负载变量 $K(t)$ 和变压器的原始数据外,还用到经验常数 n, m 。在热点温度全局模型中,顶层油温模型(图 3)、热点温升模型(图 4)被定义为两个相对独立而又相互关联的系统,任何顶层油温的改变都将在热点温度的变化中得以体现。因此,在模型计算的每个间隔时间里,顶层油温模型的计算结果都应添加到热点温度全局模型中,用以计算变压器绕组的热点温度。

3 实验室验证及结果分析

3.1 试验平台

在搭建好的光纤光栅温度测量平台下对变压器绕组进行温升试验。通过反复试验和综合比较得出光纤光栅温度传感器和热电偶的布置方式,如图 5 所示。

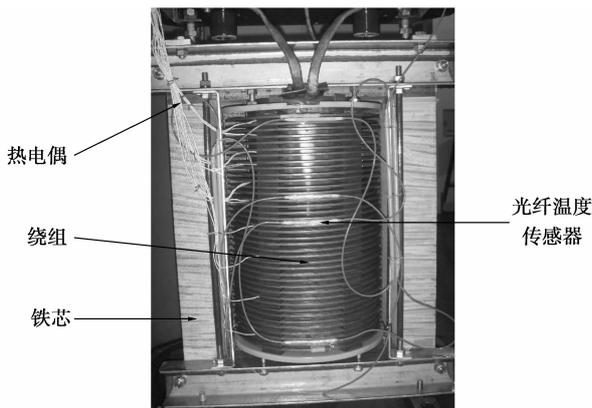


图 5 试验变压器模型

试验时在绕组的各层共放置 16 个热电偶,在变压器油的不同油层中放置 5 个热电偶。另外,除了在光纤传感器所在线饼油道布置热电偶外,在变压器顶部、底部、竖直油道、油箱外壁、散热器外壁、散热器进出油管外壁等位置均有布置。

试验变压器额定容量为 100 kVA,采用自然油循环,自然空气冷却方式(ONAN)。从变压器发热角度来看,绕组热点温度主要由变压器的负载损耗决定,因此试验采取短路法(变压器产生不同大小的短路电流)来模拟不同负载下变压器绕组的发热状况,几种试验方案如表 3 所示。

表 3 ONAN 变压器四种测试负载

稳定负载电流	$K=1.0$ pu,持续时间 10 h
	$K=0.9$ pu,持续时间 10 h
	$K=1.1$ pu,持续时间 10 h
变负载	$K=1.0$ pu/5.5 h+0.7 pu/3 h+ 1.1 pu/1.5 h

(pu—标注,表示每单位值, h—小时)

3.2 仿真结果及分析

通过 3.1 所述的试验平台测量不同负载条件下变压器绕组的温度分布,把每次试验时所有热电偶中读数的最大值取为变压器绕组的热点温度实测值。根据第 2 部分所述方法,利用 Simulink 对变压器顶层油温和绕组热点温升微分方程搭建仿真模型,得到变压器绕组热点温度的预测值。把实测结果、仿真预测值和 IEEE 负载导则推荐模型的计算值进行对比,其结果如图 7-10 所示。仿真模型所需输入参数如图 6 所示。



图 6 仿真参数

由图 7-10 可以看出,在升温初期,变压器绕组热点温度上升迅速。这是因为变压器油在升温初期有较低的温度和较高的油粘度,相应的油循环需要一段时间才能适应其速度,因此热点温度上升迅速,大约 50% 的温度变化发生在急速上升过程中。与此相反,图 10 中负载降低前的初始油循环速度快,温度将迅速下降,一旦达到约 50% 的最终降温,油速将远低于负载降低时的速度,温度开始缓慢下降。

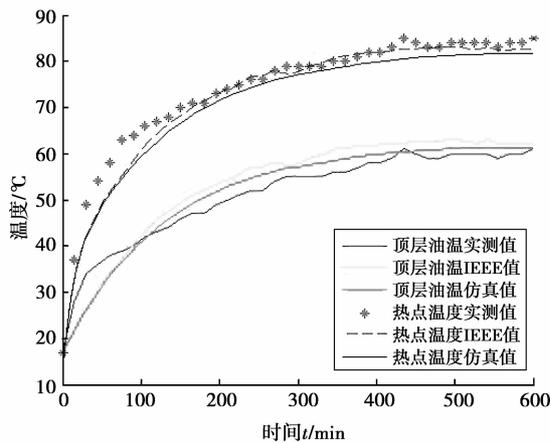


图 7 0.9 倍负载下温度值

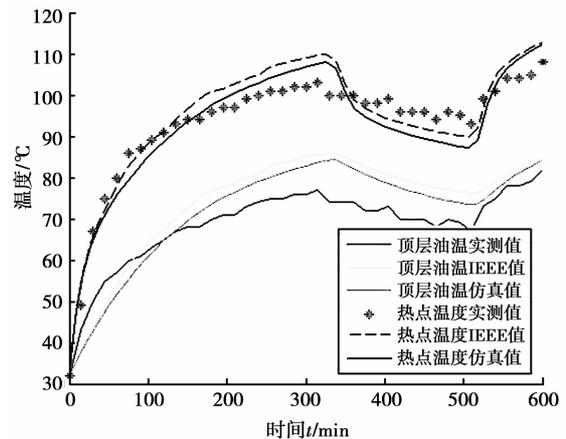


图 10 变负载下温度值

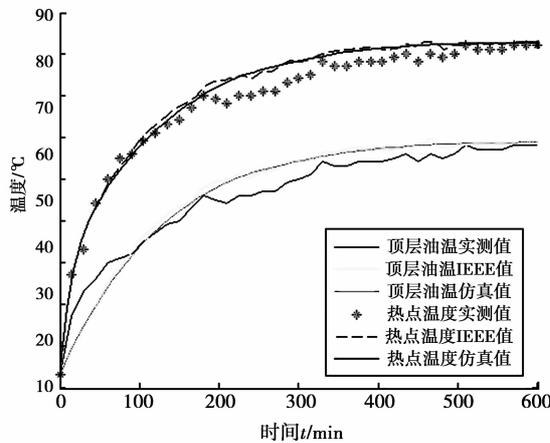


图 8 1.0 倍负载下温度值

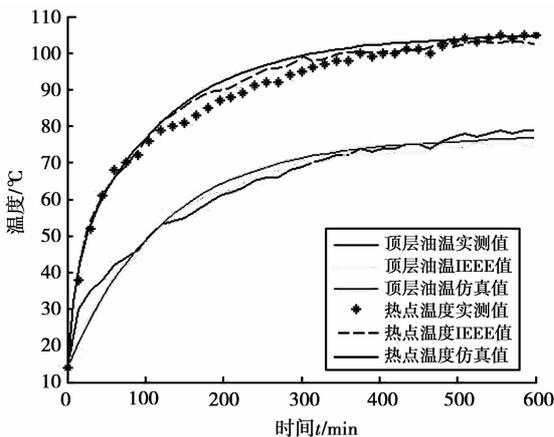


图 9 1.1 倍负载下温度值

由图 7-9 还可以看出,在 0.9 倍负载情况下变压器顶层油温仿真预测值较 IEEE 推荐指数模型值能更精确的预测变压器顶层油温,而在额定负载和过负载情况下仿真预测值和 IEEE 推荐值则都能较好的预测变压器顶层油温。另外,经对比,在各负载

情况下变压器绕组热点温度仿真预测值、IEEE 指数模型值和变压器实测值在图中都显示出较好的一致性,能正确反映热点温度随时间的变化,具有较高的预测精度。

4 结 论

1) 提出一种基于热电类比的变压器绕组热点温度仿真模型,利用 Runge-Kutta 方法求解微分方程。在恒定负载和变负载情况下仿真结果都与 IEEE 推荐指数模型有较好的一致性,能较准确的预测变压器的顶层油温和绕组热点温度,为变压器绕组热点温度的实时监测提供了新的思路。

2) 对自然油循环、自然空气冷却条件下的变压器绕组热点温度进行了计算及试验验证,取得了较好的结果。针对不同油循环和不同冷却形式下的电力变压器,论文提出的模型依然具有较强的适用性,可以通过改变经验常数 n, m 的值对绕组热点温度进行仿真预测。

参考文献:

- [1] 陆万烈,夏业勤. 变压器绕组温度测量的“热模拟”误差[J]. 变压器,1999,36(10): 15-17.
LU WAN-LIE, XIA YE-QIN. “Thermal Simulation” error in winding temperature measurement of transformer[J]. Transformer, 1999, 36(10): 15-17.
- [2] 毛一之,王秀春,韩鹏. 应用绕组测温装置测量变压器绕组温度的必要性和可行性分析[J]. 变压器,2004,41(9): 14-17.
MAO YI-ZHI, WANG XIU-CHUN, HAN PENG. Analysis of feasibility and necessity to measure transformer winding temperature by winding thermometric device[J]. Transformer, 2004, 41(9):

- 14-17.
- [3] 孙圣和, 王廷云, 徐颖. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- [4] LAMPE W, PETTERSON L, OVREN C, et al. Hot spot measurements in power transformers[C]. Paris: International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1984;1-10.
- [5] MCNUTT W J, MCIVER J C, LEIBINGER G E. Direct measurement of transformer winding hot spot temperature[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(6): 1155-1162.
- [6] 钱政, 孙焦德, 袁克道, 等. 电力变压器绕组热点状态的在线监测技术[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 26-28. QIAN ZHENG, SUN JIAO-DE, YUAN KE-DAO, et al. On-line monitoring of hot-spot temperature in transformer winding [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 26-28.
- [7] 刘军, 陈伟根, 赵建保. 基于光纤光栅传感器的变压器内部温度测量技术[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 539-543. LIU JUN, CHEN WEI-GEN, ZHAO JIAN-BAO. Measuring technology of transformer internal temperature based on FBG sensors[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 539-543.
- [8] 中华人民共和国国家标准. GB/T 15164 - 94 油浸式电力变压器负载导则[S]. 电力变压器.
- [9] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling-part I: theory and equivalent circuit [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 171-175.
- [10] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling-part II: field verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 176-180.
- [11] PIERCE L W. An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1347-1358.
- [12] SUSA D, LEHTONEN M, NORDMAN H. Dynamic thermal modelling of power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 197-204.
- [13] SUSA D, LEHTONEN M. Dynamic thermal modelling of power transformers; further development-part I[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1961-1969.
- [14] SUSA D, LEHTONEN M. Dynamic thermal modelling of power transformers; further development-Part II [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1971-1979.
- [15] 海瑛, 钱苏翔, 严拱标. 油浸式大型变压器热点温度的动态模型[J]. 机电工程, 2007, 24(1): 1-6. HAI YING, QIAN SU-XIANG, YAN GONG-BIAO. Dynamic modelling of hot-spot temperature in oil-immersed power transformers [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(1): 1-6.
- [16] 江淘莎, 李剑, 陈伟根, 等. 油浸式变压器绕组热点温度计算的热路模型[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1635-1639. JIANG TAO-SHA, LI JIAN, CHEN WEI-GEN, et al. Thermal model for hot spot temperature calculation in oil-immersed transformers [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1635-1639.
- [17] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Power Transformers[S]. IEEE standard C57.91, 1995.

(编辑 张小强)