

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.034

油浸式变压器热路模型的修正及实验验证

罗汉武¹, 来文清², 姜国义², 刘海波², 崔士刚¹,
李佳琦¹, 姜佳昕¹, 李梦齐³

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司检修分公司, 内蒙古 通辽 028000; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司, 呼和浩特 010000; 3. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430000)

摘要: 变压器绕组的热点温度是限制运行中变压器负载能力和影响变压器寿命的最大因素。快速准确地获取变压器绕组热点温度对变压器安全稳定运行具有重要意义。文中根据变压器不同的冷却方式,对变压器片式散热器的散热热阻进行了修正。并通过变压器温升实测数据与模型仿真计算数据的比较,验证了修正散热热阻后热路模型的有效性和准确性,从而得到了一个快速且较为准确的计算变压器热点温度的方法。

关键词: 油浸式变压器; 热路模型; 平均油温; 热点温度

Modification and Experimental Verification of Oil-immersed Transformer Thermal Circuit Model

LUO Hanwu¹, LAI Wenqing², JIANG Guoyi², LIU Haibo², CUI Shigang¹,
LI Jiaqi¹, JIANG Jiaxin¹, LI Mengqi³

(1. Maintenance Branch of Inner Mongolia Eastern Power Limited Liability Company of State Grid, Inner Mongolia Tongliao 028000, China; 2. Inner Mongolia Eastern Power Limited Liability Company of State Grid, Hohhot 010000, China; 3. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430000, China)

Abstract: The hot spot temperature of transformer winding is the biggest limiting factor in transformer load capacity and impact of the transformer life. Fast and accurate access to the transformer winding hot spot temperature is important to the safe and stable operation of the transformer. In this paper, the heat resistance of the radiator of the transformer is modified according to the different cooling methods. The validity and accuracy of the improved thermal circuit model are verified by comparing the measured data of the temperature rise of the transformer with the simulation data of the model. And a fast and accurate method for calculating the hot spot temperature of the transformer is obtained.

Key words: oil-immersed transformer; thermal model; average temperature; hot spot temperature

0 引言

油浸式变压器是电力系统中最重要设备之一。变压器绕组绝缘的热点温度是限制运行中变压器负载能力和影响变压器寿命的最大因素。快速准确地获取变压器绕组热点温度对变压器安全稳定运行具有重要意义^[1-2]。

目前对变压器热点温度的研究主要分为热路模型法^[3-9]和数值计算法^[10-13]。其中数值计算法计算精确,但是耗时长且占用计算机资源多,而热路模型法不但所需参数较少、计算实时性好,且计算准确度满足工程精度要求^[14]。G. Swift^[5-6]利用热点类

比法将变压器内部传热过程等效为集总参数电路模型,首次对集总热容和非线性热阻进行定义。D. Susa等^[15]在此基础上考虑油粘度和损耗随温度的变化,分析了变压器热阻热容的物理意义。Tang等人^[16]对变压器绕组、铁心、油和油箱4部分进行建模,运用热电类比法建立了具有物理意义的电力变压器等效热路模型。国内的江淘莎^[17],滕黎^[18],陈曦^[19]等人也对变压器的热路模型进行了改进和分析。

文中提出根据变压器不同的冷却方式,修正变压器片式散热器的散热热阻,建立基于平均油温的热路模型见图1,通过这种方式可以快速和较为准确地计算出变压器的油温和热点温度,为变压器的

负荷管理提供依据。

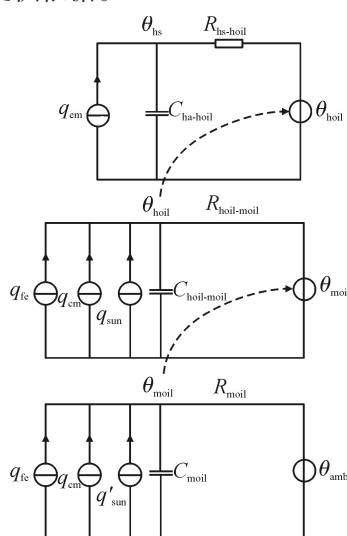


图1 变压器改进热路模型

Fig. 1 Improved thermal circuit model of transformer

通过上述3个热路分别计算平均油温,顶层油温和热点油温。

$$\begin{cases} q_{cu} = C_{hs} - h_{oil} \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{1}{R_{hs} - h_{oil}} (\theta_{hs} - \theta_{hoil}) \\ q_{fe} + q_{cu} + q_{sun} = C_{hoil-moil} \frac{d\theta_{hoil}}{dt} + \frac{1}{R_{hoil-moil}} (\theta_{hoil} - \theta_{moil}) \\ q_{fe} + q_{cu} + q_{sun} = C_{moil} \frac{d\theta_{moil}}{dt} + \frac{1}{R_{moil}} (\theta_{moil} - \theta_{amb}) \end{cases} \quad (1)$$

上述3个方程的统一解可以利用4阶龙格库塔法针对每个子模型求解微分方程,即可得到平均油温和顶层油温^[20]。IEEE、IEC及国内油浸式变压器负载导则^[21-23]对各类负载下的顶层油温和热点温度做了明确的规定,由此可以获得变压器的热点温度。

1 变压器片式散热器散热热阻的修正

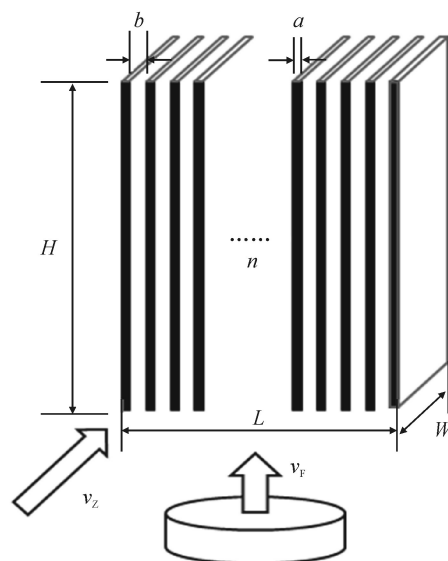
变压器在运行中主要通过箱体辐射对流和冷却装置对外散热,目前国内大部分变压器的冷却装置都为敞开型片式散热器结构,下面对变压器片式散热器散热热阻的求取进行分析。

变压器片式散热器的散热方式通常包括:自然对流热交换、自然风强迫对流热交换、冷却风扇强迫对流热交换及片式散热器对环境的热辐射。

1.1 片式散热器辐射散热热阻

油浸式电力变压器大多数片式散热器的结构见图2。

每片片式散热器同样会对外辐射散热,但由于各片片式散热器排列紧密,每片辐射散出的热量又会被相邻的片式散热器吸收,所以在计算每组片式散热器的对外辐射量时,仅需考虑最外层一片的辐射。由于得出的热阻较大,对于一般情况可忽略此



a—每片片式散热器厚度; b—片式散热器间隙厚度;
H—片式散热器高度; L—组片式散热器长度;
W—片式散热器宽度; v_z —自然风速; v_F —冷却风扇风速。

图2 变压器散热器结构示意图

Fig. 2 Transformer radiator structure diagram

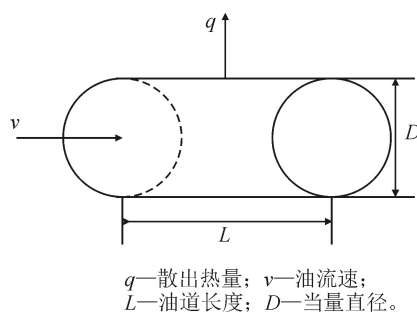
部分的影响。

1.2 片式散热器对流散热热阻

片式散热器整体对流散热热阻实际为油流散热热阻、油道传热热阻和片式散热器表面对流散热热阻三者的串联,现分别介绍各部分热阻的求取方法。

在ONAN或ONAF冷却方式变压器中,油道内油的流速由变压器内部油循环决定,取决于变压器内部的温度差和油路结构,对于油流散热热阻可分为水平油道和竖直油道分别求取。

对于水平油道,可将片式散热器上下水平油道进一步简化见图3。



q —散出热量; v —油流速;
 L —油道长度; D —当量直径。

图3 片式散热器外部水平油道简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of outside horizontal oil channel of chip radiator

流经水平油道油流的3个特征参数别分为

$$\begin{cases} Pr = \frac{C_p \mu}{k} \\ Gr = \frac{g \beta D^3 \Delta \theta}{\nu^2} \\ Re_H = \frac{u D}{\nu} \end{cases} \quad (2)$$

而当量直径与油道长度比 D/L 远小于1,认为油流在水平油道内部属于层流性质,此时层流性质的强迫对流平均努赛尔数满足齐德—泰特公式

$$Nu_F = 1.86 \left(\frac{RePr}{l/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\nu_f}{\nu_w} \right)^{0.14} \quad (3)$$

式(3)中: ν 为运动粘性系数; ν_f 为油温下运动粘性系数; ν_w 为壁温下运动粘性系数。

平均换热系数为

$$\bar{h} = \frac{Nu_F \cdot \lambda}{d} \quad (4)$$

则水平油道内油流散热热阻为

$$R_H = \frac{1}{\pi DL \bar{h}} \quad (5)$$

对于垂直油道,可分为 n 片竖直油道的并联,每片油道示意图见图4。

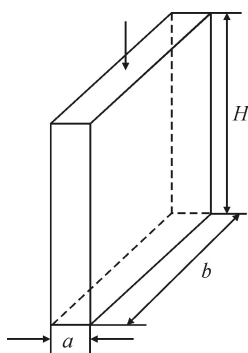


图4 片式散热器竖直油道简化示意图

Fig. 4 Simplified schematic diagram of vertical oil path of chip radiator

由图4所示,当量直径为

$$d = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (6)$$

自然对流的努赛尔数满足

$$Nu_N = 0.59(Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad (7)$$

片式散热器结构的强迫对流的努赛尔数满足参考努赛尔数 $Nu_r=8.23$ 。

在竖直油道内,自然对流方向与强迫对流方向相反,总的努赛尔数为

$$Nu = \sqrt[3]{Nu_F^3 - Nu_N^3} \quad (8)$$

竖直油道平均换热系数为

$$\bar{h} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (9)$$

所以竖直油道内油流散热热阻为

$$R_V = \frac{1}{2(a+b)H\bar{h}} \quad (10)$$

1.3 根据不同冷却方式修正散热热阻

1)ONAN 冷却方式。此时由于变压器片式散热器下放没有冷却风扇,所以片式散热器外部散热只

有自然对流和自然风强迫对流散热两种方式,类似于变压器箱体表面的散热过程。

如图4所示,ONAN 冷却方式相当于去掉片式散热器下方的冷却风扇,即 $V_f=0$ 。当量直径为

$$d = \frac{2Hb}{(H+b)} \quad (11)$$

空气特征参数如式(1)所示。

类似的,温差 $\Delta\theta$ 认为是环境温度与平均油温差值的一半。根据格拉斯霍夫数的大小,自然对流的努赛尔数满足

$$Nu_N = \begin{cases} 0.59(Gr \cdot Pr)^{1/4} & Gr < 3 \times 10^9 \\ 0.029(Gr \cdot Pr)^{0.39} & 3 \times 10^9 < Gr < 2 \times 10^{10} \\ 0.135(Gr \cdot Pr)^{1/3} & Gr > 2 \times 10^{10} \end{cases} \quad (12)$$

则自然对流换热系数为

$$h_N = \frac{Nu_N \cdot \lambda}{H} \quad (13)$$

自然风强迫对流时,需判断流体的性质,若流动方式为层流,已经达到充分发展阶段,努赛尔数与雷诺数无关,因此片式散热器结构的强迫对流的努赛尔数取参考努赛尔数

$$Nu_F = 4.36 \quad (14)$$

过渡区和湍流性质的强迫对流的平均努赛尔数仍满足 Gnielinski 公式,则强迫对流换热系数为

$$h_F = \frac{Nu_F \cdot \lambda}{d} \quad (15)$$

片式散热器外表面自然对流方向与强迫对流方向近似相同,总的努赛尔数为

$$h = \sqrt[3]{h_F^3 + h_N^3} \quad (16)$$

则 ONAN 冷却方式下片式散热器表面对流散热热阻为

$$R_{AN} = \frac{1}{(2n+1)WHh} \quad (17)$$

2)ONAF 冷却方式。当变压器外部片式散热器下方装有冷却风扇时,片式散热器表面对流散热方式在 ONAN 的基础上还叠加了冷却风扇强迫对流过程。

其中自然风造成的自然对流和强迫对流散热热阻的求取同上,而由于冷却风扇在风速、作用范围、路径等方面与自然风强迫对流不同,所以难以将两种风速进行矢量叠加计算,现假设两种风速互不影响,分别计算二者换热系数后再进行矢量叠加。

对于西门子变压器片式散热器冷却风扇,其各项参数指标见表1,其他变压器的冷却风扇参数,与之类似。

表1 风扇参数表
Table 1 Fan parameter

参数	数值
风量 $VFI/(m^3 \cdot h^{-1})$	7 000
风压 PFY/Pa	65
转数 $n/(r \cdot min^{-1})$	720
电机功率 P/kW	0.25
扇面直径 d/m	0.50

设风扇面积即为片式散热器受风面积, 流过其表面平均风速为

$$V_F = \frac{VFI}{d \cdot w} \quad (18)$$

根据图4, 片式散热器受风面水平当量直径为

$$d_x = \frac{2Hb}{(H+b)} \quad (19)$$

竖直当量直径为

$$d_y = \frac{2wb}{(w+b)} \quad (20)$$

同样的, 若流动方式为层流, 已经到达充分发展阶段, 努赛尔数与雷诺数无关, 因此片式散热器结构的强迫对流的努赛尔数满足参考努赛尔数。

强迫对流时自然风和风扇造成的片式散热器表面换热系数分别为:

自然风

$$h_{Fx} = \frac{Nu_{Fx} \cdot \lambda}{d} \quad (21)$$

风扇

$$h_{Fy} = \frac{Nu_{Fy} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \lambda}{d} \quad (22)$$

式(22)中, ε_1 、 ε_2 分别为片式散热器的风扇修正系数, 取经验公式为 $\varepsilon_1 = 0.999\,75 + 0.451\,09e^{(-x/1.405\,66)} + 0.453\,02e^{(-x/14.1877)}$; $\varepsilon_2 = -772.580\,43 + 774.461\,33e^{\frac{p/85}{983.267\,02}}$, 其中, $x = l/dh$, l 为片式散热器中心距(受风面积边缘到风扇的中心距离, 在该模型中可以用风扇半径代替); dh 为片式散热器的当量直径; p 为风扇风压。

自然对流方向与强迫对流方向近似相同, 风扇对应面积下的努赛尔数为

$$h_{AFF} = \sqrt[3]{(h_{Fx}^2 + h_{Fy}^2)^{3/2} + h_N^3} \quad (23)$$

非风扇对应面积下的努赛尔数为

$$h_{ANF} = \sqrt[3]{h_{Fx}^3 + h_N^3} \quad (24)$$

设风扇对应面积下的片式散热器数目为 n_F , 未受风扇作用的片式散热器数目为 n_N , 则在有冷却风扇影响下片式散热器表面对流散热的热阻为

$$R_{AF} = \frac{1}{n_F WHh_F + n_N WHh_N} \quad (25)$$

综上, 在忽略最外层片式散热器对外辐射的情况下, 变压器片式散热器对外散热热阻为

$$R_{ps} = R_{th-oil} + R_H + R_V + R_{AF/AN} \quad (26)$$

式(26)中: R_{th-oil} 为油流散热热阻; R_H 为水平油道传热热阻; R_V 为垂直油道传热热阻; $R_{AF/AN}$ 为散热片外表面对流散热热阻。

2 热路模型的实验验证

为验证所提模型的准确性和有效性, 以两台冷却方式不同的变压器温升试验数据作为算例进行分析。

第一台 810032 号(SZ9-40000/110)型变压器, 在初始温升段中此变压器并未关闭片式散热器, 而只是关闭了所有风扇, 相当于 AN 方式运行, 在一定时间后打开全部风扇, 相当于 AF 方式下运行, 对比结果见图 5。

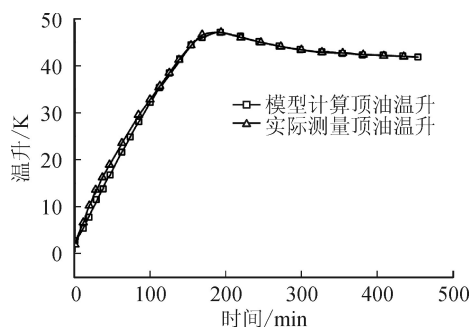


图5 810032号(SZ9-40000/110)温升数据比对

Fig. 5 No.810032(SZ9-40000/110)comparison of temperature rise data

图5中, 在160 min前关闭所有冷却风扇, 在此之后打开所有风扇。对比发现, 模型计算温升值与实测温升值相当接近, 最大的误差出现在预热过程, 误差约为2.8 K, 在160 min后, 计算结果与实测温升值几乎一致。在预热过程中, 变压器负荷为AN冷却条件负荷的两倍左右, 计算与实测的一致也验证了模型在变压器过负荷下温度计算具有很好的精度。

为进一步验证模型精确性, 再选取一台西门子公司95年产变压器进行数据比对, 509503号(SZ10-50000/110)是一台容量为40 MVA, 电压等级110 kV的三相双绕组变压器, 冷却方式为ONAN, 比对结果见图6。

从图6中可以看出, 虽然计算结果与实测温升值仍存在一定误差, 但仍在可接受范围内, 进一步验证了该热路模型计算温升方法的准确性。

将该热路模型法与其他热路模型法进行对比, 其中比较具有代表意义的是中国重庆大学的江洵

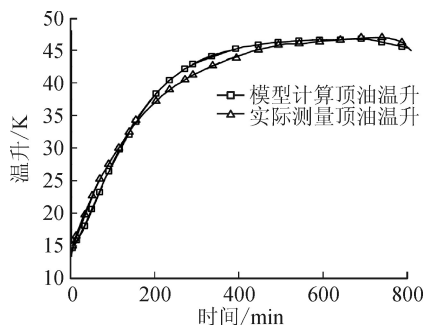


图6 509503号(SZ10-50000/110)温升数据比对

Fig. 6 No.509503(SZ10-50000/110)comparison of temperature rise data

沙等人提出的基于油底层温度求解热点温度的热路模型。

选取的810069号(DS-33330/ $\sqrt{220}$)变压器是一台额定容量为300 MVA,电压等级220 kV的三相三绕组变压器,由于该变压器为出口产品,所以其运行频率为60 Hz,冷却方式为OFAF。采用类似的方法,预热过程后试验数据比对见图7。

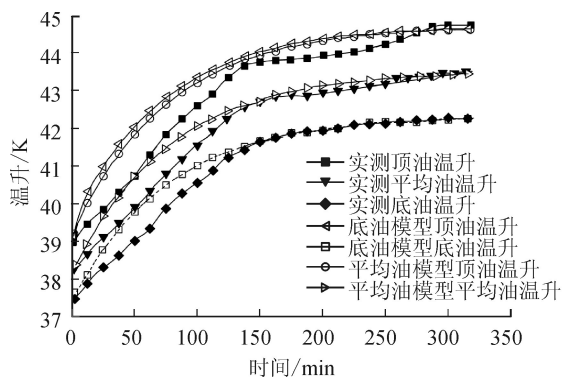


图7 与基于底层油温热路模型温升数据比对

Fig. 7 Comparison of temperature rise data based on thermal model of bottom oil temperature

在对比的过程中可以发现,实测顶油温升有一些较大的波动,为此,增加了平均油温升和底油温升的对比。从图7中可以看出,相较于底油热路模型,该热路模型(基于平均油温)的温度变化规律更接近于试验实测数据。

3 结语

不同于传统热路模型算法,文中根据变压器不同的冷却方式修正了片式变压器特殊的热阻,通过这种方式可以针对不同冷却方式的变压器建立不同的热路模型。该模型适用于需要快速和较为准确地计算变压器热点温度,而不关心最高热点温度出现的具体位置的情况。相比于传统试验条件下计算温升的方法,该模型算法更接近于实际变压器运行工况,具有更高的准确性。

参考文献:

- [1] WEI Bengang, LIN Jun, TAN Li, et al. A temperature prediction model for oil-immersed transformer based on thermal-circuit theory[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11):1-6.
- [2] 律方成,马伦,王柳,等.基于DGM的油浸式变压器热点温度计算[J].高压电器,2015,51(3):28-34.
LYU Fangcheng, MA Lun, WANG Liu, et al. Calculation of winding hot spot temperature of oil immersed transformer by the discontinuous galerkin method[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3):28-34.
- [3] GALDI V, IPPOLITO L, PICCOLO A, et al. Application of local memory-based techniques for power transformer thermal overload protection[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2001, 148(2):163-170.
- [4] SWIFT G, MOLINSKI T S, BRAY R, et al. A fundamental approach to transformer thermal modeling-Part II: Field verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2):176-180.
- [5] 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.
- [6] SWIFT G W, ZOCHOLL S E, BAJPAI M, et al. Adaptive transformer thermal overload protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4):516-521.
- [7] LESIEUTRE B, HAGMAN W, KIRTLEY J. An improved transformer top oil temperature model use in an on-line monitoring and diagnostic system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1):249-256.
- [8] TYLAUSKY D J, QING He, JENNIE S, et al. Transformer top-oil temperature modeling and simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(5):1219-1225.
- [9] 陈伟根,苏小平,陈曦,等.变压器顶层油温预测热模型影响因素分析及其改进[J].高电压技术,2011,37(6):1329-1335.
CHEN Weigen, SU Xiaoping, CHEN Xi, et al. Influence factor analysis and improvement of the thermal model for predicting transformer top oil temperature[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6):1329-1335.
- [10] SKILLEN A, REVELL A, IACOVIDES H, et al. Numerical prediction of local hot-spot phenomena in transformer windings[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 36(1):96-105.
- [11] EL WAKIL N, CHERECHES N C, PADET J. Numerical study of heat transfer and fluid flow in a power transformer[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(6):615-626.
- [12] 井永腾,李岩,额尔和木巴亚尔.高压自耦变压器的涡

- 流损耗计算与屏蔽措施[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1988-1990.
- JING Yongteng, LI Yan, Eerhemubayaer. Eddy current losses calculation and shields of high voltage auto-transformer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1988-1990.
- [13] 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 temperature in oil-immersed transformers using temperature estimation of tank wall[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2344-2349.
- [14] 滕 黎. 油浸式变压器热路计算及热点温度遗传支持向量机预测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- TENG Li. Thermal path calculation of oil-immersed transformer and prediction of hot spot temperature based on genetic support vector machine[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [15] SUSA D, LEHTONEN M, NORDMAN H. Dynamic thermal modelling of power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 197-204.
- [16] TANG W H, WU Q H, RICHARDSON Z J. Equivalent heat circuit based power transformer thermal model[J]. Electric Power Applications IEE Proceedings, 2002, 149(2): 87-92.
- [17] 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): 1635-1640.
- JIANG Taosha, LI Jian, CHEN Weigen, et al. Thermal model for hot spot temperature calculation in oil-immersed transformers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1635-1640.
- [18] 滕 黎, 陈伟根, 孙才新. 油浸式电力变压器动态热路改进模型[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 236-241.
- TENG Li, CHEN Weigen, SUN Caixin. An improved dynamic thermal circuit model of oil-immersed power transformer[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 236-241.
- [19] 陈 曦, 钱之银, 汲胜昌, 等. 基于热路模型的变压器内部温升计算方法研究[J]. 绝缘材料, 2015(4): 61-65.
- CHEN Xi, QIAN Zhiyin, JI Shengchang, et al. Study on calculation method for internal temperature rise of transformer based on thermal circuit model[J]. Insulating Materials, 2015(4): 61-65.
- [20] 张爱兰, 许志元, 李 琮, 等. 基于修正热路参数的变压器热点温度预测[J]. 国网技术学院学报, 2016, 19(2): 1-5.
- ZHANG Ailan, XU Zhiyuan, LI Zong, et al. The hot-spot temperature test of transformer based on corrected thermal circuit parameters[J]. Journal of State Grid Technology College, 2016, 19(2): 1-5.
- [21] Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7—2005 [S]. 2005.
- [22] IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers: C57.91—1995 [S]. 1995.
- [23] 油浸式电力变压器负载导则: GB/T 1094. 7—2008 [S]. 2008.
- Loading guide for oil immersed power transformer: GB/T 1094.7—2008 [S]. 2008.
- 罗汉武(1975—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事电力企业管理工作。

(上接第 219 页)

- [16] 魏福利, 邱孟通, 袁 媛, 等. 数字化线阵 CCD 扫描 X 射线成像系统[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(6): 958-962.
- WEI Fuli, QIU Mengtong, YUAN Yuan, et al. Digital linear CCD scanning X ray imaging system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(6): 958-962.
- [17] 金裕方. 浅谈 X 射线数字化实时成像检测技术[J]. 天然气技术, 2007(4): 2.
- JIN Yufang. Discussion on X ray digital real time imaging inspection technology[J]. Natural Gas Technology, 2007(4): 2.
- [18] 陆荣林, 费云鹏, 白宝泉. 微波检测原理及其在复合材料中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001(2): 40-41.
- LU Ronglin, FEI Yunpeng, BAI Baoquan. Principle of microwave detection and its application in composite materials[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2001(2): 40-41.
- [19] 戴 光. 压力容器安全工程学[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学出版社, 1995.
- DAI Guang. Pressure vessel safety engineering[M]. Harbin: Heilongjiang Science Press, 1995.
- [20] 曾祥照. X 射线实时成像系统分辨率及其影响因素[J]. 无损探伤, 2003, 27(6): 10-13.
- ZENG Xiangzhao. Resolution of X ray real-time imaging system and its influencing factors[J]. Non-Destructive Testing, 2003, 27(6): 10-13.
- 张子剑(1984—), 男, 工程师, 学士, 从事无损检测研究、局部放电监测产品的研究。
- 叶 瑞(1982—), 男, 工程师, 硕士, 从事 GIS 智能控制系统研发、放电定位产品的研发及工程应用工作。
- 张豪俊(1980—), 男, 工程师, 从事智能高压开关的在线监测, 专家诊断系统的研发及智能组件工程推广应用。
- 张永强(1984—), 男, 硕士, 研究方向为智能高压开关设备故障诊断与状态评估。
- 张 伟(1986—), 男, 博士, 从事 GIS 局部放电监测系统的研发和 GIS 局部放电缺陷数据库的研究。