

出口短路故障对配电变压器绕组电热特性的影响

张伟¹, 咸日常¹, 刘焕国², 咸日明², 郑春旭³, 刘兴华³, 耿凯²

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 山东汇能电气有限公司, 山东 淄博 255000; 3. 国网淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 变压器的电热特性决定了其负载能力和可用寿命, 过高热点温度加速绝缘系统热老化, 造成其可用寿命减少。以一台油浸式变压器为例进行研究, 通过在其绕组内部植入光纤测温探头, 测量分析在额定工况下高、低压绕组热点温度的分布特征。根据变压器技术参数, 建立其仿真计算模型, 结合实际温升试验, 研究不同短路故障在 2 s 时间内高、低压绕组热点温度随时间和环境温度变化规律。研究结果表明: 变压器出口短路故障与温升试验条件下的绕组热点温度分布规律不同, 在出口短路故障的短时间内, 高、低压绕组最高温度随短路时间呈线性升高, 而顶层油温几乎保持不变。随着环境温度升高, 变压器绕组热点温度呈线性增长, 对变压器安全运行构成严重威胁。

关键词: 出口短路; 短路电流; 变压器; 热点温度; 顶层油温

Impact of Outlet Short-Circuit Fault on the Electrical-Thermal Characteristics of Distribution Transformer Windings

ZHANG Wei¹, XIAN Richang¹, LIU Huanguo², XIAN Riming², ZHENG Chunxu³, LIU Xinghua³,
GENG Kai²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China;
2. Shandong Huineng Electric Co., Ltd., Zibo, Shandong 255000, China; 3. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: The electrical and thermal characteristics of a transformer determine its load capacity and usable life, and excessive hot spot temperature accelerates the thermal aging of the insulation system, resulting in a reduction of its usable life. Taking an oil-immersed transformer as an example for research, by implanting fiber-optic temperature measurement probes inside the windings, the distribution characteristics of hot spot temperatures of high and low-voltage windings are measured and analyzed under rated operating conditions. According to the technical parameters of the transformer, the simulation calculation model is established, combined with the actual temperature rise test, to study the hot spot temperature of high and low voltage winding with time and ambient temperature change rule during different short-circuit faults within 2 Seconds. The results show that: transformer outlet short circuit fault and temperature rise test conditions of the winding hot spot temperature distribution law are different, in the outlet short circuit fault within a short period of time, high, low-voltage winding temperature with the short-circuit time of the highest temperature are a linear increase, while the top layer of the oil temperature is almost unchanged. With the rise of ambient temperature, the transformer winding hot spot temperature increases linearly, posing a serious threat to the safe operation of the transformer.

Key words: outlet short circuit; short-circuit current; transformers; hot spot temperature; top oil temperature

0 引言

变压器是电力系统中不可缺少的重要设备, 承

担着电压变换、电能分配和传输的重要任务, 对保障电力系统安全稳定运行具有重要作用^[1-3]。据相关统计发现供电系统中变压器引起的事故率极高, 约占总事故的 90%, 而变压器短路故障约占总故障的 70%~80%^[4]。造成短路故障的原因大多为突发短路工况下变压器本体过热或绕组变形引起绕组绝缘加速老化, 累积效应不断加深, 进而导致绝缘

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51907109)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51907109).

破坏或无法继续承受较大短路电流的冲击引起^[5-6]。在变压器运行过程中,热点温度是影响其内部油纸绝缘热老化速率的重要因素,热点温度过高会导致油纸绝缘寿命快速流失,对设备的安全可靠运行产生严重影响^[7-8]。变压器一旦发生出口短路故障,通常靠继电保护装置和断路器动作快速隔离故障点,使变压器退出运行,若保护装置正常动作,故障电流通过时间一般在 50~100 ms,若继电保护装置拒动引起越级跳闸,故障电流通过的时间延长,变压器会产生大量热量,使本体过热,热点温度升高,加速绝缘系统老化^[9]。因此,研究变压器出口短路故障下绕组热点温度对保证电力系统安全可靠运行具有重要意义。

目前,获得变压器绕组热点温度的方法主要分为直接测量法和间接计算法。直接测量法是在变压器制造过程中将光纤植入绕组内部,直接获得绕组温度,由于光纤测温需要在变压器制造过程中完成,价格昂贵且只适应于新制造的变压器,因此少有学者利用直接测量法研究变压器绕组热点温度。间接获得变压器绕组热点温度的方法有热路模型法^[10-13]和经验公式法^[14-17],但是两种方法都简化了变压器内部的复杂传热过程,对变压器特殊工况下热点温度计算存在较大误差。随着计算机技术的发展,基于有限元法和有限体积法的数值计算方法逐渐应用到变压器温度场计算当中,数值计算方法能够考虑到变压器的结构特性,根据变压器内部传热特点,正确分析变压器的温度分布。文献[18]利用有限元法和有限体积法分析了不同流速和不同负荷情况下变压器内部热点位置和温度。文献[19]基于参数热等效原理建立了配电变压器温度流体场三维仿真模型,有效还原了额定工况下绕组的轴向温度分布。文献[20]建立了一大型电力变压器二维有限元模型,在考虑绕组内部油道和油纸绝缘的情况下分析了变压器额定工况下温度分布特点。文献[21]通过对互感器小模型的温度流体场计算确定了瞬态数值求解的参数,进而对变压器进行三维瞬态温度场计算。文献[22]通过建立变压器热路模型,分析不同类型不同程度的三相不平衡工况下顶层油温及绕组热点温度变化规律,研究了三相不平衡对绝缘寿命的影响。

综上所述,国内外学者对变压器内部温度场研究已经较为深入,但是利用直接测量法对绕组热点

温度研究相对较少。此外,研究多集中于正常工况,对于出口短路瞬间绕组温度随短路时间和环境温度变化特征研究也就更少。根据 GB1094.5-2008《电力变压器 第 5 部分:承受短路的能力》用于计算承受短路耐热能力的电流持续时间为 2 s^[23]。本文以一台三相油浸式配电变压器为研究对象,通过在其高、低压绕组内部植入光纤测温探头,测量其额定运行工况下高、低压绕组内部热点温度。基于变压器实际技术参数,建立其三维仿真模型,通过施加不同热源模拟变压器三相、两相和单相出口短路故障,研究其 2 s 内高、低压绕组温度随短路时间和环境温度变化特征,为变压器短路故障防护和绝缘优化提供参考。

1 变压器温升试验和绕组温度测量

1.1 光纤测温探头的布置

变压器绕组内部温度采用荧光式光纤测温系统进行测量。该测温系统主要由光纤连接线、测温探头、荧光式光纤测温仪和电脑光纤温度采集系统四部分组成。为了防止测温探头及光纤连接线受损,利用绝缘纸、支撑条和酚醛胶等绕组组成材料制作一个保护固定装置,如图 1(a)所示。根据多物理场仿真结果和已有经验,推测该变压器绕组的最高温度大致位于绕组高度的 95 % 附近,故将测温探头布置在绕组高度 95 % 位置。

本文以一台容量为 400 kVA 的 10 kV 油浸式变压器为例开展研究,低压绕组为箔式线圈,在制作过程中将测温探头放置于由内而外第一层线圈,如图 1(b)所示。高压线圈采用 1 根漆包圆铜线绕制而成,将测温探头放置于由内而外第三层线圈。每相高压绕组和低压绕组分别安装一支测温探头,三相绕组总共 6 只,安装示意图如图 2 所示。在高、低压绕组绕线完成之后,采用温度检测设备校核光纤连接线和测温探头正常可用。

1.2 变压器温升试验

为确保温度测量的准确性,在进行温升试验之前,使用恒温水浴箱和标准水银温度计对热电阻和光纤温度传感器进行校准,校准结果与标准水银温度计的测量结果相差不超过 0.5 °C,误差在合理范围内。

对变压器低压侧进行短接负载试验,测得负载损耗为 4 409 W,通过空载试验测得空载损耗为

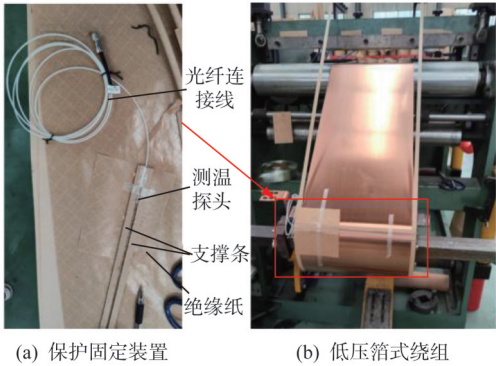


图 1 安装光纤测温探头

Fig. 1 Installation of fiber optic temperature probes

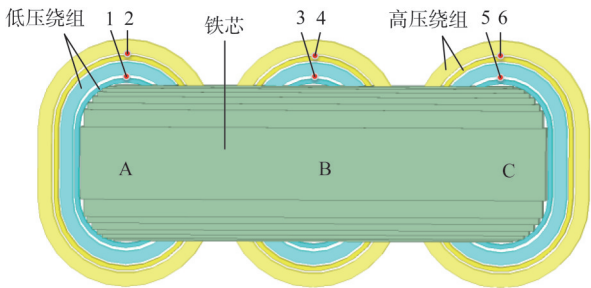


图 2 光纤安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fiber optic installation

401 W。采用标准 GB/T 1094. 2—2013《液浸式变压器的温升》中推荐的短路法进行温升试验^[24], 变压器温升试验示意图, 如图 3 所示。通过在变压器高压侧输入电流来施加总损耗, 其电流计算公式如下。

$$I = \sqrt{\frac{P_k + P_0}{P_k}} \times I_N \quad (1)$$

式中: I 为总损耗电流, A; P_k 为负载损耗, W; P_0 为空载损耗, W; I_N 为额定电流, A。

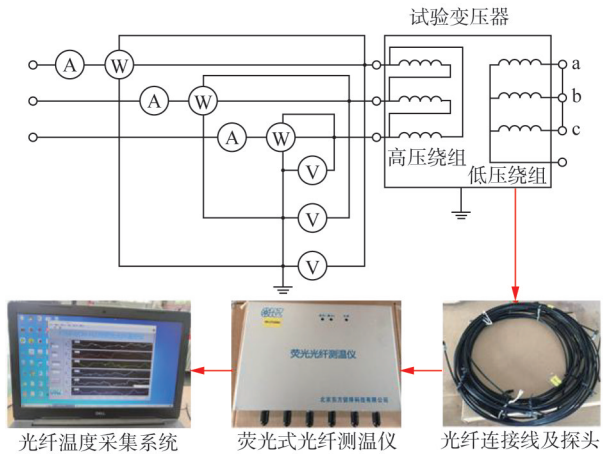


图 3 变压器温升试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of transformer temperature rise test

1.3 试验结果分析

试验过程中通过光纤测温系统获取绕组内部温度, 利用热电阻温度传感器测量顶部油温和环境温度。温升试验结束后, 测得部分试验数据如图 4 所示。温升试验结果如表 1 所示。

由图 4 和表 1 分析可知, 高、低压绕组温度和变压器顶层油温随时间呈非线性升高, 绕组热点温度与顶层油温存在明显的相关性。三相高压绕组最高温度明显小于低压绕组。三相低压绕组的温度几乎相同, 热点温度约为 89.5 °C, 位于 b 相低压绕组, 温升约为 56.7 °C。三相高压绕组温度相差较小, 高压 C 相绕组最高温度约为 84.8 °C, 温升约为 52.0 °C。顶层油温明显低于高、低压绕组温度, 最高温度约为 71.3 °C, 温升约为 38.5 °C。

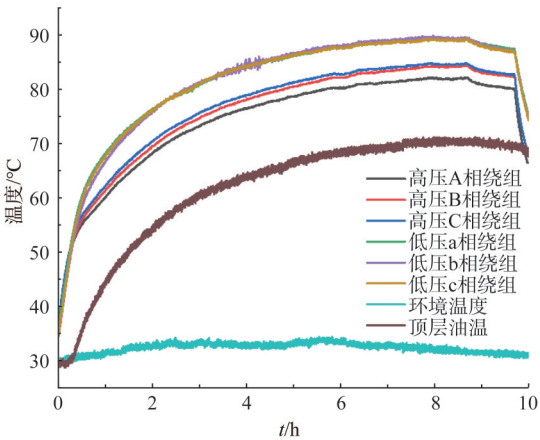


图 4 变压器温升试验数据

Fig. 4 Test data of transformer temperature rise

表 1 变压器温升试验结果

Tab. 1 Test results of transformer temperature rise °C

位置	温度	位置	温度
环境温度	32.8	顶层油温	71.3
高压 A 相绕组	82.1	低压 a 相绕组	89.4
高压 B 相绕组	84.4	低压 b 相绕组	89.5
高压 C 相绕组	84.8	低压 c 相绕组	89.3

2 变压器仿真模型建立及温度验证

2.1 建立几何模型

根据出厂试验数据和变压器几何结构, 利用专业绘图软件建立变压器原尺寸三维模型, 随后将几何模型导入仿真软件进行仿真计算。主要技术参数如表 2 所示。变压器模型内外结构如图 5 所示。

表 2 变压器主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of the transformer

参数	数值	参数	数值
额定容量/kVA	400	中心距/mm	280
额定电压/kV	10/0.4	铁扼/mm	135
额定电流/A	13.33/577.4	高压绕组高度/mm	295
频率/Hz	50	低压绕组高度/mm	290

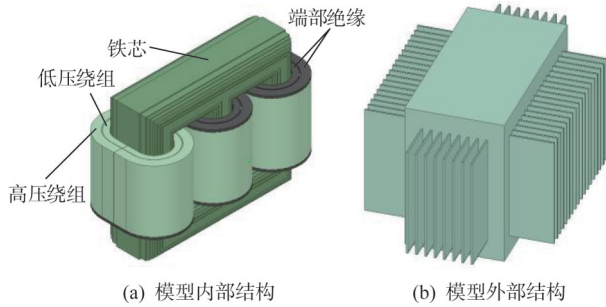


图 5 变压器几何模型

Fig. 5 Geometric model of transformer

2.2 设置材料属性

变压器油是变压器内部主要的绝缘和冷却介质^[24-25]，由于变压器油的物理参数会随着温度的变化而改变，为减少计算误差，需要考虑温度对材料属性的影响，具体参数如表 3 所示。

变压器绕组为铜绝缘导线，铁心为硅钢材料，端部绝缘采用绝缘纸板，油箱则采用冷轧钢板。各部位的材料参数见表 4。

表 3 变压器油热力学参数

Tab. 3 Thermodynamic parameters of transformer oil

物理参数	拟合公式
密度/(kg·m ⁻³)	1 098.72-0.712T
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	807.163+3.58T
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.1509-7.101×10 ⁻⁵ T
粘度/(Pa·S)	0.08467-4×10 ⁻⁴ T+5×10 ⁻⁷ T ²

注：T 为热力学温度。

表 4 各个材料物理参数

Tab. 4 Individual material physical parameters

材料	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/(kg·m ³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
铜	401	8 933	385
冷轧钢	60.5	7 854	434
硅钢	51.9	7 550	446
绝缘纸板	0.19	930	1 340

2.3 设置计算条件

利用瑞利数 R_a 可以判断自然对流过程中流体的

流动方式，通过计算可以发现该模型中瑞利数 $R_a \ll 1 \times 10^9$ ，因此在仿真软件中设置层流计算模型。

由于变压器内部为自然对流散热，整体油流流速较慢，变压器油箱内壁的油流速度几乎为 0，因此在变压器内壁面采用无滑移边界条件。变压器内各部件间不考虑辐射散热，与变压器油接触的壁面设置为耦合边界条件，由仿真软件自动计算流固耦合面的散热系数。计算时考虑重力的影响，设置重力加速度为 9.8 m/s^2 ，方向沿 Z 轴负方向。

变压器油箱外壳与空气进行对流散热，利用对流散热系数等效表达变压器与空气的对流换热过程。使用以下公式计算对流散热系数。

$$N_u = \frac{h_d L}{k} \quad (2)$$

式中： N_u 为努尔系数； h_d 为对流散热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； L 为特征尺寸， m ； k 为流体热导率， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

根据传热学基本原理，水平板的努尔谢数 N_{uh} 和竖直板的努尔谢数 N_{uv} 通过式 (3) — (7) 表示^[25]。

$$P_r = \frac{\varphi c}{k} \quad (3)$$

$$G_r = \frac{g \beta \theta L^3}{\gamma^2} \quad (4)$$

$$R_a = P_r \cdot G_r \quad (5)$$

$$N_{uh} = 0.27 R_a^{1/4} \quad (6)$$

$$N_{uv} = 0.825 + \frac{0.387 R_a^{1/6}}{[1 + (0.492/P_r^{9/16})]^{8/27}} \quad (7)$$

式中： P_r 为普朗特数； G_r 为格拉晓夫数； R_a 为瑞利数； φ 为粘性系数， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ； c 为比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； g 为重力加速度， m/s^2 ； β 为膨胀系数， K^{-1} ； θ 为温度差， K ； γ 为运动粘度， m^2/s 。

变压器实际运行中会通过辐射不断地向周围环境传递能量，这种能量传递的强度可以用等效辐射换热系数进行量化，其表达式为^[23]：

$$h_{\text{rad}} = \frac{\chi O (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \quad (8)$$

式中： h_{rad} 为等效辐射换热系数； T_1 、 T_2 分别为固体和流体的温度， K ； χ 为物体表面发射率； O 为波尔茨曼常数， $O=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

变压器外壳的传热过程可以用散热系数 h 等效，即：

$$h = h_d + h_{\text{rad}} \quad (9)$$

根据式 (2) — (9) 计算可得环境温度为 32.8°C ，无风条件下变压器外壳散热系数如表 5 所示。

表 5 变压器外壳散热系数

Tab. 5 Heat dissipation factors of transformer shell

W/(m ² K)			
上表面	下表面	侧面	散热片
11.23	9.00	10.12	9.86

2.4 变压器模型验证

利用 Fluent 仿真软件模拟变压器温升试验, 设置模型环境条件与温升试验相同。在环境温度为 32.80 ℃ 且无风时, 变压器额定运行状态下, 仿真得到高、低压绕组温度和外壳温度分布如图 6—8 所示。由图可知, 变压器高压绕组最大温度为 84.92 ℃, 温升为 52.12 ℃, 与变压器温升试验测得高压温升 52.0 ℃ 相差 0.12 ℃, 低压绕组最高温度为 89.86 ℃, 与变压器温升试验测得低压绕组温升 56.7 ℃ 相差 0.36 ℃, 误差范围在 5 % 以内。通过对比仿真结果和光纤测温数据, 证明了仿真模型的有效性。

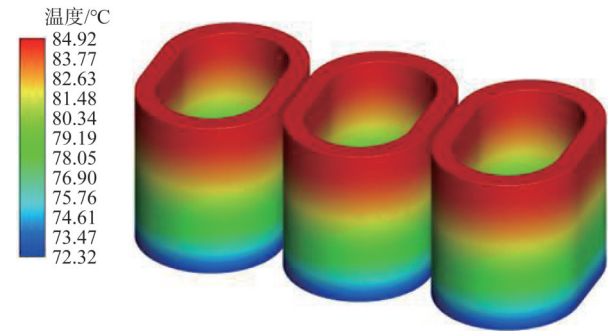


图 6 高压绕组温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of high voltage winding

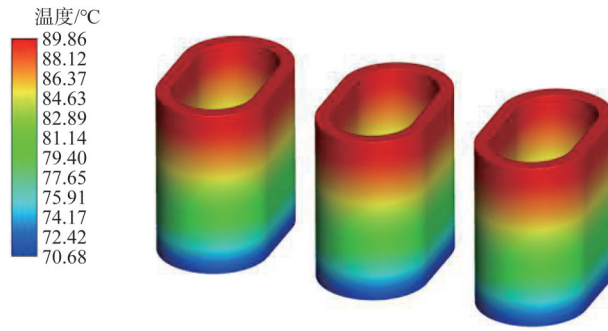


图 7 低压绕组温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of low voltage winding

3 变压器绕组热点温度

3.1 三相短路故障时绕组温升特性

由于变压器短路时会产生强大的电磁力和大量

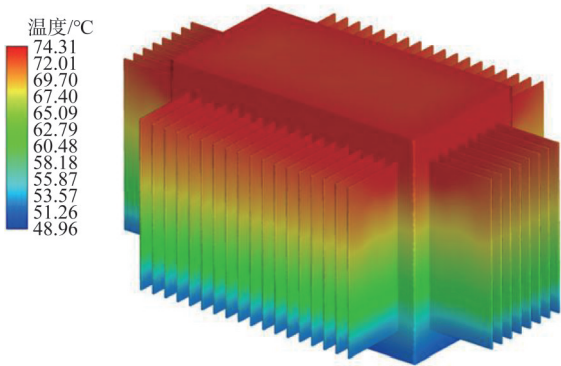


图 8 油箱外壳温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of fuel tank shell

热量, 可能引起绕组变形和绝缘损坏, 对设备造成不可逆的损伤, 且短路时间相对较短, 难以通过试验对变压器短路时绕组温度进行分析。因此, 利用建立的变压器仿真模型来研究不同短路条件下的温度特征。

在变压器运行于额定状态且环境温度为 32.8 ℃, 风速为 0 m/s 时, 低压绕组发生三相短路故障, 短路电流如图 9 所示, 短路瞬间高、低压绕组电流迅速攀升, 随后逐渐趋于稳定, 低压绕组电流明显大于高压绕组。短路持续 2 s 内高、低压绕组最高温度、变压器油最高温度及顶层油温随时间变化如图 10 所示。从图 10 可以看出, 低压绕组温度最高, 变压器油最高温度次之, 顶层油温最低。在短时间内, 高、低压绕组温度随短路时间呈线性升高, 其中高压绕组从额定温度 84.92 ℃ 升高到 109.77 ℃, 温度增长了 29.26 %。低压绕组温度从 89.86 ℃ 升高到 132.67 ℃, 温度增长了 47.64 %。变压器油最高温度呈非线性升高, 由 89.41 ℃ 升高到 122.51 ℃, 温度增长了 37.02 %。相比之下, 变压器顶层油温几乎保持不变。由于变压器油直接与温度最高的低压绕组接触, 短路故障产生的热量可迅速传递至与绕组表面相接触的变压器油, 同时油流速度相对缓慢, 短时间内热量传递受到限制, 从而导致变压器油最高温度大于高压绕组温度, 而顶层油温几乎无明显变化。

3.2 两相接地短路故障时绕组温升特性

在发生 ab 两相接地短路故障时, 短路故障电流如图 11 所示, 其中 ab 两相绕组短路电流显著增大, 且 a 相绕组短路电流略微大于 b 相绕组, 非故障相绕组电流增加较小。绕组温度、变压器油最高温度

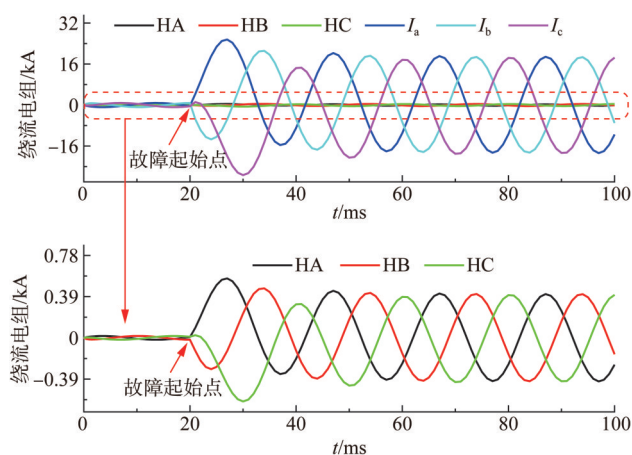


图9 三相短路电流

Fig. 9 Three-phase short-circuit current

和顶层油温随短路时间变化如图 12 所示。由图 12 可知，在两相接地短路故障下高、低压绕组温度的变化规律与三相短路故障相似，故障相绕组温度随短路时间呈线性升高，而非故障相绕组和顶层油温几乎不变。具体而言，A 相高压绕组温度由 84.84°C 升高到 99.33°C ，温度增长了 17.08% ，低压绕组温度由 89.78°C 升高到 117.78°C ，温度增长了 31.19% 。同时，变压器油最高温度由 89.41°C 升高到 110.81°C ，温度增长了 23.93% 。由于在 A 相高压绕组电压过 0 时发生短路故障，其短路电流要略微大于 B 相绕组短路电流，在绕组电阻相同时，电流越大产生的热量越多，所以 A 相高、低压绕组温升要略微高于 B 相绕组。

3.3 单相短路故障时绕组温升特性

变压器发生低压绕组 b 相接地短路时，短路电

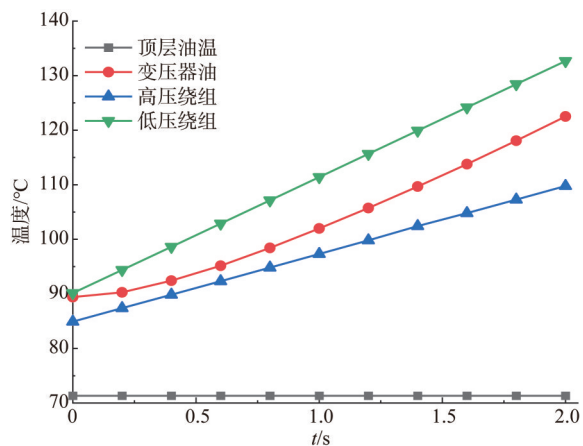


图 10 三相短路故障时绕组温度

Fig. 10 Winding temperature of three-phase short-circuit fault

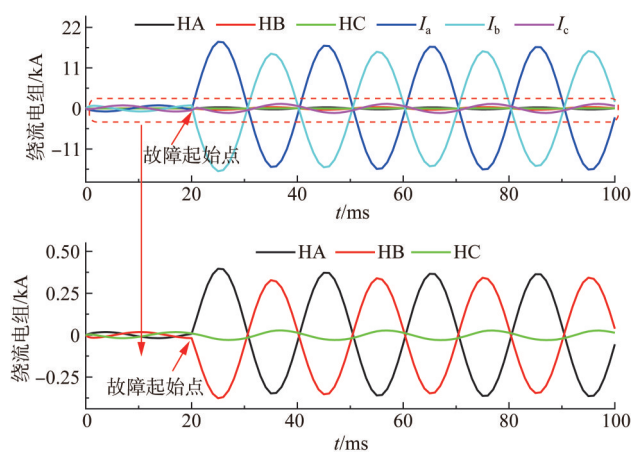


图 11 两相接地短路电流

Fig. 11 Short-circuit current with two-phase grounded

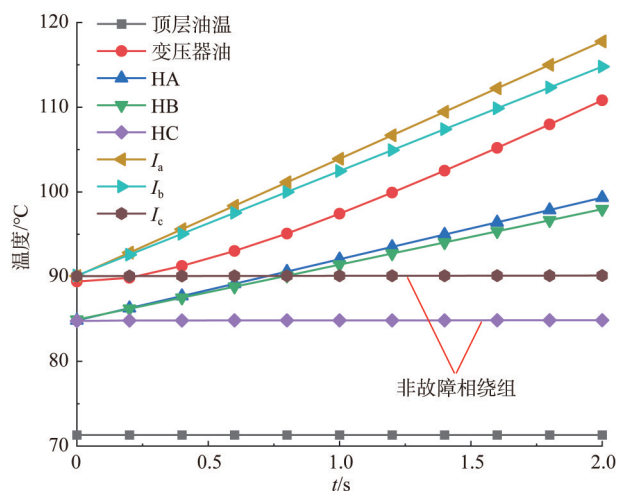


图 12 两相接地短路故障时绕组温度

Fig. 12 Winding temperature of two-phase grounded short circuit fault

流如图 13 所示，三相绕组电流均有所增大，其中 b 相绕组峰值电流最大，约为 2.4 kA 。绕组温度、变压器油最高温度和顶层油温随短路时间变化如下图 14 所示。由图 14 可知，故障相高、低压绕组温度略微升高，非故障相绕组和顶层油温几乎不变。其中故障相高压绕组由 84.84°C 升高到 85.40°C ，升高 0.56°C ，故障相低压绕组由 89.86°C 升高到 90.56°C ，升高 0.70°C 。变压器油最高温度由 89.41°C 升高到 89.69°C ，温度升高 0.28°C 。由于单相短路电流相对其他短路故障较小，因此短时间内故障绕组温度变化不明显。

通过对图 9—14 中不同短路工况下短路电流及绕组温度的对比分析可知，短路故障持续时间相对较短，热量传递受时间影响，故障相绕组温度明显

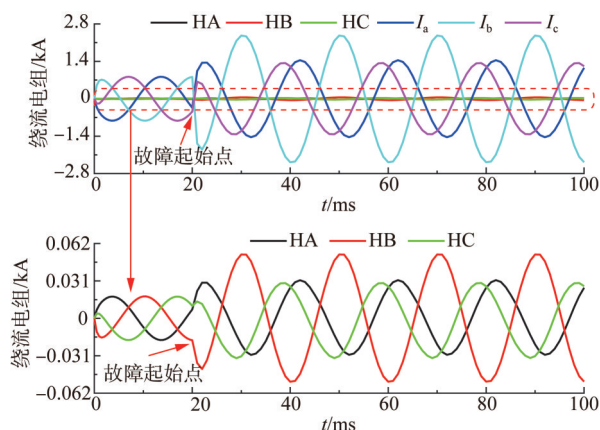


图 13 单相短路电流

Fig. 13 Single-phase short-circuit currents

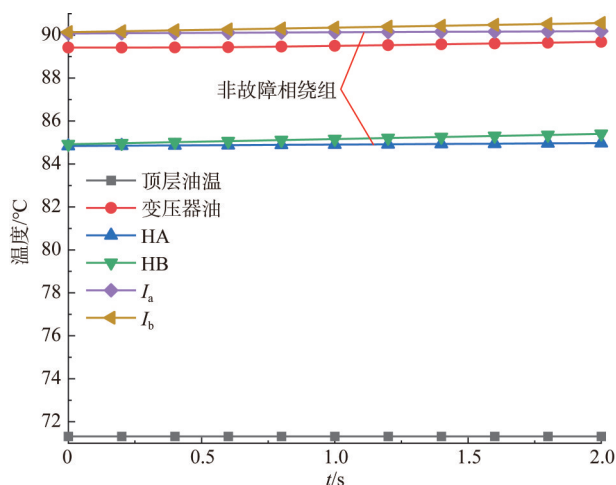


图 14 单相短路故障时绕组温度

Fig. 14 Winding temperatures of single-phase short-circuit fault

升高,非故障相绕组温度变化不大。同时,变压器顶层油温几乎保持不变,不能利用顶层油温反演得到故障时绕组热点温度。不同短路工况下,变压器绕组温升幅值不同,与短路电流密切相关。低压绕组的短路电流变化大于高压绕组,导致低压绕组温升要明显高于高压绕组。三相出口短路故障导致绕组温升最大,2 s内温度增长速率为47.64%,最高温度可达132.67℃。两相短路故障次之,温度增长速率为31.19%,最高温度可达117.78℃。单相短路故障引起的温升相对较小。为降低短路故障对变压器绕组绝缘损伤程度,继电保护定值应尽量缩短故障的持续时间,减少三相出口短路故障发生概率。

4 不同环境下绕组热点温度

环境温度作为变压器运行过程中的外部因素之

一,对其内部温度分布和热特性产生着重要的影响。在环境温度分别为0℃、10℃、20℃、30℃、40℃时,变压器发生三相、两相、单相出口短路故障,其热点温度随短路时间变化如图15所示。

由图15可知,变压器绕组的热点温度与故障严重程度、运行环境温度和短路故障持续时间呈正相关。高温环境会降低变压器的散热效率,使得变压器内部的热量更难以排出,尤其在三相、两相、单相出口短路故障时,热点温度随环境温度上升明显,可能导致设备的损坏程度加剧。当变压器运行在正常工况,如图15中0 s时温度所示,绕组热点温度随环境温度呈线性升高。然而,长时间运行在高温环境下,会加快绕组绝缘热老化速率,增大发生内部短路故障的潜在风险。因此,在变压器的设计和运行中,应重视环境温度的影响,并采取有效措施来提高散热效率,降低运行环境温度,尽量减少短路故障的发生次数或缩短其持续时间。

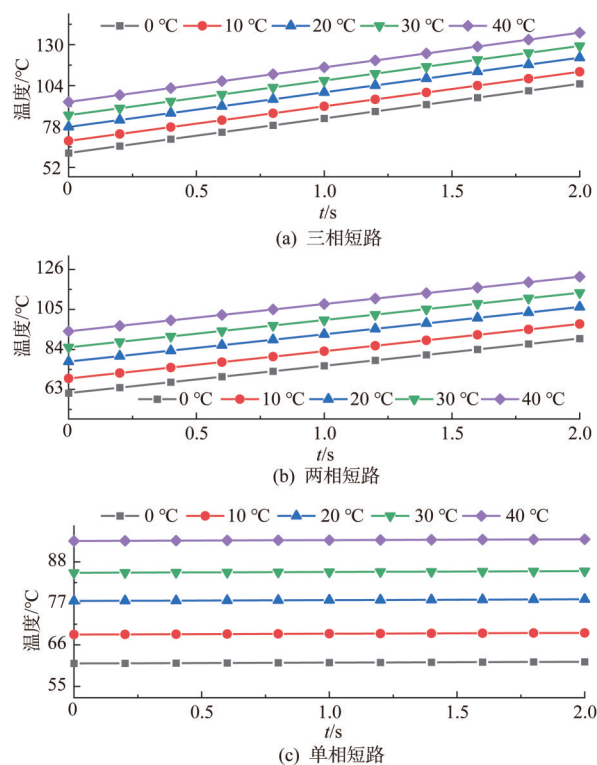


图 15 不同环境温度下出口短路故障时绕组热点温度

Fig. 15 Winding hot spot temperatures during outlet short circuit fault at different ambient temperatures

5 结论

本文通过在变压器生产过程中嵌入光纤测温探

头,测量不同绕组的实际温度,基于实际温升试验数据,建立变压器电热特性仿真分析模型并验证其有效性,研究了不同短路类型和不同环境温度下,变压器高、低压绕组和变压器油的温度分布特征。得出以下结论。

1)在配电变压器温升试验过程中,高、低压绕组热点温度和顶层油温呈非线性升高,可以通过测量顶层油温反演绕组热点温度,但受出口短路时间限制,绕组热点温度反演方法不适用于配电变压器短路运行工况。

2)配电变压器发生三相、两相出口短路故障时,故障相绕组温度明显升高,对变压器绕组绝缘影响较大。单相短路故障电流相对于其他类型短路的故障电流变化小,绕组热点温度变化不明显,对变压器绕组绝缘影响较小。

3)配电变压器绕组的热点温度与故障严重程度、运行环境温度和短路故障持续时间呈正相关。为降低短路故障对变压器绕组绝缘损伤程度,在提高散热效率、降低运行环境温度的前提下,还应尽量减少短路故障的发生次数并缩短持续时间。

参考文献

- [1] 王熙文,井永腾,张永超,等.变压器近区短路绕组形变动态过程计算与分析[J].变压器,2021,58(12):1-6,77.
WANG Xiwen, JING Yongteng, ZHANG Yongchao, et al. Analysis of dynamic process of transformer short-circuit deformation in near area [J]. Transformer, 2021, 58(12): 1-6, 77.
- [2] 邓永清,牛曙,晋涛,等.66 kV油浸式变压器瞬态热点温度计算[J].变压器,2020,57(7):7-11.
DENG Yongqing, NIU Shu, JIN Tao, et al. Calculation of transient hot spot temperature of 66 kV oil-immersed transformer[J]. Transformer, 2020, 57(7): 7-11.
- [3] 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):5957-5965,6040.
XIE Yuting, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi-physics field coupling method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965, 6040.
- [4] 蔡伟,顾然,李穆,等.基于 $\Delta U-I$ 曲线分析法的配电变压器故障在线检测[J].高压电器,2016,52(11):169-175.
CAI Wei, GU Ran, LI Mu, et al. Online fault detection technology of distribution transformer based on $\Delta U-I$ locus method [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 169-175.
- [5] 郝艳,咸日常,胡玉耀,等.基于场-路耦合有限元法的干式变压器匝间短路暂态特性研究[J].南方电网技术,2023,17(6):90-98.
HAO Yan, XIAN Richang, HU Yuyao, et al. Research on transient characteristics of interturn short circuit of dry-type transformer based on field-circuit coupled finite element method [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 90-98.
- [6] LIN X, LIU J, WANG F, et al. Magnetic-structural coupled simulation of power transformer winding cumulative effect[C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), June 6-9, 2022, Nanjing, China. New York: IEEE, 2022: 2860-2865.
- [7] 邓永清,10 kV油浸式变压器热点温度反演监测及异常发热识别方法研究[D].武汉:武汉大学,2021.
- [8] 龚若涵,油浸式变压器热点温度计算及反演检测方法研究[D].武汉:武汉大学,2018.
- [9] 欧小波,周丹,林春耀,等.油浸式电力变压器老化及寿命评估研究综述[J].南方电网技术,2015,9(9):58-70.
OU Xiaobo, ZHOU Dan, LIN Chunyao, et al. Review of aging and life assessment of oil-immersed power transformers [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 58-70.
- [10] 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.
- [11] 刘兴鹏.基于基于热电类比理论的油浸式电力变压器热点温度计算模型[D].重庆:重庆大学,2011.
- [12] 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 of hot spot temperature in oil-immersed transformers based on heat distribution of winding [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 895-901.
- [13] 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.
- [14] IEEE Standard. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators: C57.91-2011 [S]. New York, IEEE, 2011.
- [15] AMODA O A, TYLAVSKY D J, MCCULLA G A. Acceptability of three transformer hottest-spot temperature models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 27(1): 13-22.
- [16] 陈伟根,苏小平,周渠,等.基于顶层油温的变压器绕组热点温度计算改进模型[J].重庆大学学报,2012,35(5):69-75.
CHEN Weigen, SU Xiaoping, ZHOU Qu, et al. An improved dynamic model of transformer hot spot temperature based on top oil temperature [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(5): 69-75.
- [17] ZHANG X, WANG Z D, LIU Q. Interpretation of hot spot factor for transformers in OD cooling modes [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1071-1080.
- [18] 刘刚,靳艳娇,马永强,等.油浸式变压器流体场和温度场的数值分析[J].变压器,2017,54(5):22-26.
LIU Gang, JIN Yanjiao, MA Yongqiang, et al. Numerical analysis of fluid field and temperature field of oil-immersed

- transformer[J]. Transformer, 2017, 54(5): 22–26.
- [19] 邓永清, 阮江军, 龚宇佳, 等. 基于参数热等效的10 kV变压器温度流体场三维仿真计算[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 212–218.
- DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, GONG Yujia, et al. Three-dimensional thermal fluid field simulation of 10 kV transformer based on parameter thermal equivalence [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 212–218.
- [20] 刘弘景, 张丹丹, 李伟, 等. 大型油浸式变压器绕组温度场的有限元分析[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 83–89.
- LIU Hongjing, ZHANG Dandan, LI Wei, et al. Finite element analysis for temperature field of winding in large oil-immersed transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 83–89.
- [21] 张健, 胡玉耀, 宋士瞻, 等. 基于数值求解的油浸式变压器瞬态热点温度计算[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 103–110, 127.
- ZHANG Jian, HU Yuyao, SONG Shizhan, et al. Transient hot spot temperature calculation of oil immersed transformer based on numerical solution[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 103–110, 127.
- [22] 赵飞龙, 咸日常, 荣庆玉, 等. 三相不平衡工况下配电变压器温升特性及绝缘损失分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4364–4372.
- ZHAO Feilong, XIAN Richang, RONG Qingyu, et al. Analysis of temperature rise characteristics and insulation loss of distribution transformer under three-phase unbalanced condition [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4364–4372.
- [23] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器第5部分: 承受短路的能力: GB/T 1094. 5—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [24] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器第2部分: 液浸式变压器的温升: GB/T 1094. 2—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [25] LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. 3-D coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of oil-immersed triangularwound core transformer [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 1–4.
- [26] 汤健, 侯慧娟, 王劲菁, 等. 基于策略梯度优化的变压器油中溶解气体预测模型[J]. 高压电器, 2025, 61(7): 91–100.
- TANG Jian, HOU Huijuan, WANG Shaojing, et al. Prediction model for dissolved gas in transformer oil based on policy gradient optimization [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(7): 91–100.
- [27] 何宁辉, 吴旭涛, 沙伟燕, 等. 电力变压器油中溶解气体在线监测数据修复方法[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 37–48.
- HE Ninghui, WU Xutao, SHA Weiyan, et al. On-line monitoring data repair method for dissolved gas in power transformer oil[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 37–48.

收稿日期: 2024-02-23; 网络首发日期: 2024-07-20

作者简介:

张伟(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线检测与故障诊断技术, 2281563825@qq.com;

咸日常(1966), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 硕士, 研究方向为电气设备在线检测与故障诊断技术, xianrc@163.com;

刘焕国(1987), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为电气设备绝缘配合和智能化。

(上接第130页 Continued from Page 130)

- LI Shu, ZHAO Peipei, YU Jingang, et al. Research and design of data trading platform based on blockchain [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2021, 42(5): 1109–1114.
- [58] 胡泽春, 邵成成, 何方, 等. 电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 3–19.
- HU Zechun, SHAO Chengcheng, HE Fang, et al. Review and prospect of research on facility planning and optimal operation for coupled power and transportation networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 3–19.
- [59] 马钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931–6945.
- MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6931–6945.
- [60] BRAGATTO T, CARERE F, CRESTA M, et al. Location and sizing of hydrogen based systems in distribution network for renewable energy integration [J]. Electric Power Systems Research, 2022(205): 107741–107752.

收稿日期: 2023-12-04; 网络首发日期: 2024-06-25

作者简介:

张勇军(1973), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为智能电网与能源互联网的规划、运行与控制, zhangjun@scut.edu.cn;

秦绍基(1999), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能电网与能源互联网的规划, 2496760896@qq.com;

孙健(1994), 男, 研究员, 博士, 研究方向为智能配电设备与中低压台区透明化。