

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.009

基于流固耦合的环氧绝缘电力电子变压器温度分布研究

赵玉顺¹, 卫 龙¹, 戴义贤¹, 王丽洋¹, 庄加才², 蔡国庆²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 阳光电源股份有限公司, 合肥 230088)

摘要: 热点温度是直接影响电力电子变压器绝缘寿命的重要参数, 为了合理指导电力电子变压器的环氧绝缘封装设计, 文中构建了220 kW/30 kHz的电力电子变压器等效模型, 基于流固耦合计算方法研究了环氧绝缘材料导热性能对变压器不同运行工况下的温度分布特性影响。研究表明, 高、低压绕组同轴分布的电力电子变压器的热点温度主要位于距绕组底部约56%的高度处, 且随负载系数的增大而逐渐升高; 在短路情况下, 高、低压绕组的热点温度分别以8、22 °C/s速度上升; 变压器的热点温度随环氧绝缘材料导热系数增大而显著降低, 当环氧绝缘材料导热系数大于1.1 W/(m·K)时, 热点温度变化趋于平缓, 此时变压器的温度分布满足GB/T 1094.11—2022的规范要求, 且具有30%的负载裕度。该研究工作可为电力电子变压器环氧绝缘封装设计提供理论参考依据。

关键词: 电力电子变压器; 有限元分析; 流固耦合; 温度场分析

Study on Temperature Distribution of Epoxy Insulated Power Electronic Transformer Based on Fluid-solid-structure Coupling

ZHAO Yushun¹, WEI Long¹, DAI Yixian¹, WANG Liyang¹, ZHUANG Jiakai², CAI Guoqing²

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Sungrow Power Supply Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: Hot spot temperature is an important parameter which directly affects insulation life of power electronic transformer. For guiding reasonably insulation epoxy encapsulation design of the power electronic transformer, the equivalent model of 220 kW/30 kHz power electronic transformer is constructed, and the influence of the thermal conductivity of epoxy insulating material on temperature distribution characteristic of transformer at different operation conditions. The results show that the hot spot temperature of power electronic transformer with coaxial distribution of high and low voltage windings is mainly located at the height which is 56% from the bottom of winding, and it gradually increases with the increase of load coefficient. In the case of short circuit, the hot spot temperature of high and low voltage windings rises at the speed of 8 °C/s and 22 °C/s respectively. The hot spot temperature of the transformer decreases significantly with the increase of the thermal conductivity of the epoxy insulating material. When the thermal conductivity of the epoxy insulating material is higher than 1.1 W/(m·K), the hot spot temperature variation tends to be gentle. At this time, the temperature distribution of the transformer meets the requirements of China national standard GB/T 1094.11—2022 specification and has a load margin of 30%. The research work can provide theoretical reference for the design of epoxy insulation encapsulation of power electronic transformer.

Key words: power electronic transformer; finite element analysis; fluid-solid-structure coupling; temperature field analysis

收稿日期: 2024-07-09; 修回日期: 2024-09-18

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1500700)。

Project Supported by National Key R&D Plan of China(2018YFB1500700).

0 引言

电力电子变压器(power electronic transformer, PET)具有体积小、质量轻、环境友好等特点,在海上风电中压直流汇集^[1]、电力机车牵引^[2]、柔性变电站^[3]等场合有广泛的应用前景,得到了学术界和产业界的广泛关注^[4-11]。随着PET向高功率密度方向发展^[12],绕组发热问题逐渐凸显,过热引发的故障愈加频繁^[13-17],掌握PET的温度分布特性及其影响因素,成为PET环氧绝缘封装设计的关键。PET由输入变换器、高频变压器以及输出变换器组成,发热问题主要集中在高频变压器上。与普通高频变压器相比,PET具有高压、高容量、高功率密度的特点,其绝缘方式与普通高频变压器有很大差异。PET绝缘方式主要有油式绝缘和环氧绝缘,环氧绝缘具有重量轻、环境友好、安全系数高的优势^[18],是未来PET发展的趋势。

目前对于PET已有较多研究,文[19]对PET的开关管损耗、电路拓扑和调制进行了研究,提出了变压器的高效拓扑结构,降低了变压器的开关损耗。文[20]提出了适用于中高压智能配电网PET的一种新型拓扑,分析了电路拓扑的工作原理,并进行了仿真和试验验证。文[21]提出了一种基于LLC谐振变换器的三级型降压式PET拓扑结构,可有效避免系统与负载之间因不平衡或畸变而对彼此产生的影响。这些文献主要研究了PET中变换装置的电路拓扑优化方法,未涉及高频变压器的研究。

文[22]提出了PET多参数设计方法,在效率、绝缘、热和漏感都满足要求的前提下,获得了较高的功率密度。文[23]提出了变压器的4种设计方案,并通过仿真及试验对比分析了各个方案的优缺点。文[24]利用自由参数扫描法建立了变压器设计流程,依据综合评价系数得到了兼顾变压器损耗、漏感与质量的最优方案,并通过试验验证了该设计方案的正确性与有效性。这些文献主要对高频变压器进行优化设计,降低变压器整体损耗,但也未涉及变压器温度场分布情况研究。文[25]对10 kW/5 kHz的PET不同结构的温度分布情况进行了计算分析,提出了高频变压器的散热设计方法。文[26]对10 kHz高频变压器温度分布进行了仿真计算,得到损耗对温度分布的影响规律。文[27]研究了利兹线绕组与普通导线绕组对高频变压器温度分布影响的差异,通过仿真以及试验对比了两种模型下36 W/61 kHz变压器的温度分布情况,证实了使用利兹线可以降低变压器损耗。上述文献从不同方

面研究了高频变压器的温度分布情况,但研究涉及的高频变压器功率较低。大功率、高功率密度是PET未来发展的方向^[12],因此,掌握这类PET的温度分布特性对其绝缘封装设计至关重要。

文中建立了220 kW/30 kHz的PET的高频变压器模型,基于流固耦合的分析方法,研究了环境温度、环氧绝缘材料导热系数、负载系数以及短路故障对PET的温度分布特性影响,并根据仿真得到的变压器热点温度和温度分布规律,对PET的运行环境、环氧绝缘封装材料参数选取提出了建议。

1 热流耦合模型

1.1 几何模型

文中以一台220 kW/30 kHz的PET为研究对象,构建了PET中高频变压器的仿真模型,模型包括高、低压绕组、铁心和环氧绝缘介质,以及外部散热室。在模型构建过程中,为减小损耗,PET采用高、低压绕组同轴布置^[28],铁心采用铁氧体^[5]。变压器上方设置有两个相同的风扇,对变压器进行强制风冷散热^[29-30]。仿真模型见图1,其内部结构见图2。

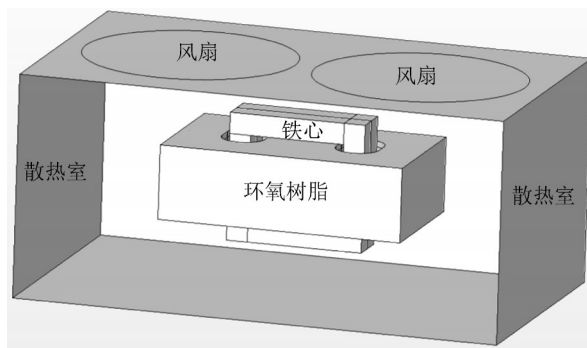


图1 电力电子变压器仿真模型

Fig. 1 Simulation model of power electronic transformer

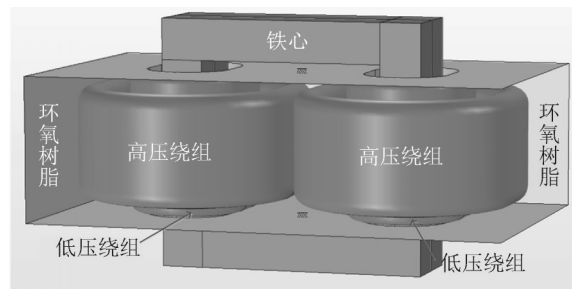


图2 电力电子变压器绕组和铁心几何模型

Fig. 2 Power electronic transformer structure model

1.2 数学模型

PET运行过程中主要是绕组铁心产生的损耗转化为热量,热量经过环氧绝缘传递到变压器表面,表面通过风扇快速冷却,这一过程是热场、流场的耦合过程^[31]。

1.2.1 流场方程

变压器内工作时, 风扇气体流动较复杂, 先采用雷诺数 Re [32] 对空气的流动状态进行判定。雷诺数 Re 的计算公式为

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为流体的密度; v 为流体流速; L 为变压器的特征长度; η 为流体的动力粘度。

一般认为雷诺数 $Re < 2300$ 为层流状态, $Re > 4000$ 为湍流状态, $Re = 2300 \sim 4000$ 为过渡状态。取变压器的特征长度 L 其高度 0.14 m , 空气流速为 3 m/s , 空气的密度为 1.29 kg/m^3 , 空气在 20°C 下的动力粘度为 $17.9 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 计算得到其雷诺数 Re 为 30268 , 所以此模型下空气的流动状态为湍流, 故采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型传热和散热进行描述。为简化计算, 认为此模型中的空气为不可压缩气体。流场模型包括了流体的质量守恒, 动量守恒以及能量守恒, 下面分别从这几方面表述。

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式(2)中, $\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}$ 为质量流密度的散度, 可用矢量表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3)$$

对于不可压缩流体, 其流体密度为常数, 方程简化为

$$\text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (4)$$

式(2)–(4)中, v_x 、 v_y 、 v_z 是流速矢量 $\mathbf{v}$ 在 x 、 y 、 z 轴上的分量。

2) 动量守恒方程。流体中动量的增加率等于作用在流体上各种力之和, 对于粘性为常数的不可压缩流体, 方程简化为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho v_x \mathbf{v}) = \text{div}(\eta \text{grad} v_x) + \\ \left[-\frac{\partial(\rho v'_x v'_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v'_x v'_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v'_x v'_z)}{\partial z} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial t} + \text{div}(\rho v_y \mathbf{v}) = \text{div}(\eta \text{grad} v_y) + \\ \left[-\frac{\partial(\rho v'_y v'_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v'_y v'_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v'_y v'_z)}{\partial z} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \text{div}(\rho v_z \mathbf{v}) = \text{div}(\eta \text{grad} v_z) + \\ \left[-\frac{\partial(\rho v'_z v'_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v'_z v'_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v'_z v'_z)}{\partial z} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, p 为流体微元上的压强。

假设空气为理想气体, 其状态方程为

$$\begin{cases} p = \rho R T \\ R = \frac{R^*}{M} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: R 为摩尔气体常数; T 为空气温度; R^* 为普适气体常数; M 为摩尔质量。

3) 湍流动能方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{v}) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中: k 为湍流动能; η_t 为 t 时刻的流体动力粘度; σ_k 为湍流动能 k 对应的 Prandtl 数; G_k 是由于平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项; ε 为耗散率。其中经验常数值为 $\sigma_k = 1.0$ 。

4) 湍能耗散率方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{v}) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \\ \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中: σ_ε 为耗散率 ε 对应的 Prandtl 数; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数。其中经验常数值为 $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{1\varepsilon} = 1.4$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$ [31]。

1.2.2 温度场方程

变压器运行过程中, 内部主要通过热传导将绕组、铁心的热量传递到变压器表面, 变压器表面进行对流换热。有限元软件通过对流体传热和固体传热进行耦合并考虑粘性发热和压力功的影响得到的传热学方程为

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + \rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T &= Q + \\ Q_s + \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} + \mathbf{v} \cdot \nabla p \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中: C_p 为比热容; Q 为热源; Q_s 为粘性发热量。其中 $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ 为积聚项, 表示储存的热量; $\nabla \cdot (-\lambda \nabla T)$ 为传导项, 表示热量的传导; $\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T$ 为流体对流项; $\frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} + \mathbf{v} \cdot \nabla p \right)$ 项表示压力做的功。

2 物理场设置

2.1 初始条件及边界条件

变压器散热方式为强迫风冷, 初始温度为 20°C , 空气的流动状态为湍流, 风扇型号为 R4D400-AB04-05, 风量为 $2405 \text{ m}^3/\text{h}$, 平均风速大概

设为3 m/s, 风扇流入空气温度设为20 ℃, 散热室室温可调。

变压器损耗主要有两部分: 一是绕组铜线通过电流会产生的电流损耗; 二是因为铁心的磁滞损耗和涡流损耗。在频率较高的变压器中, 导线上的集肤效应与邻近效应不可忽视, 对此使用Dowell模型进行交流损耗的计算, 使用斯坦麦斯方程进行磁芯损耗的计算。

2.1.1 绕组损耗

高频变压器通常使用利兹线作为其绕组, 因趋肤效应与邻近效应的影响, 绕组等效交流电阻大于直流电阻。在实际应用中, 流经高频变压器的电流常常非标准正弦, 精度要求高的场合应计算绕组在各谐波频率下的交流电阻, 现使用Dowell模型对绕组的交流损耗进行计算, 其具体计算公式为^[33-34]

$$\left\{ \begin{aligned} \delta &= \frac{1}{\sqrt{\pi \gamma u f}} \\ a &= \frac{N \cdot \sqrt{k} d_s}{b} \\ A_p &= \left(\frac{\pi}{4} \right)^{0.75} \cdot \frac{d_s}{\delta} \cdot \sqrt{a} \\ F_\gamma &= A_p \left[\frac{\sinh(2A_p) + \sin(2A_p)}{\cosh(2A_p) - \cos(2A_p)} + \right. \\ &\quad \left. 2 \frac{(n^2 K - 1) \cdot \sinh(A_p) - \sin(A_p)}{3 \cosh(A_p) + \cos(A_p)} \right] \\ I_{ac} &= \sqrt{I^2 - I_{dc}^2} \\ P_{ac} &= F_\gamma R_{dc} I_{ac}^2 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式(10)中: δ 为集肤深度; γ 为电导率; μ 为导体的磁导率; f 为工作频率; a 为孔隙率因子; N 为绕组匝数; k 为Litz线股数; b 为绕组在铁磁线圈上的高度; d_s 为Litz线单股线圈的线径; A_p 为相对尺寸; n 为绕组的内外圈层数; F_γ 为交流电阻与直流电阻之比; I_{ac} 为交流分量有效值; I 为电流有效值; P_{ac} 为交流损耗。

2.1.2 铁心损耗

高频变压器中多使用铁氧体作为铁心材料, 铁氧体的主要材料为MnZn。目前多使用斯坦麦斯(Steinmetz)方程计算高频变压器中的磁芯损耗, 其具体公式为

$$P_{cv} = C_m \cdot f^\alpha \cdot B_m^\beta \quad (11)$$

式(11)中: P_{cv} 为磁芯损耗; C_m 、 α 、 β 为与材料相关的系数; B_m 为磁通密度峰值。

考虑到励磁电流的波形为方波, 使用传统斯坦麦斯会产生较大误差所以使用文[30]中提到的修正的斯坦麦斯方程进行计算, 其具体公式为

$$\left\{ \begin{aligned} f_{\sin-eq} &= \frac{2}{\Delta B^2 \cdot \pi^2} \int_0^{T_{on}+T_{off}} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \\ P_{cv} &= C_m \cdot f_{\sin-eq}^{\alpha-1} \cdot B_m^\beta \cdot f \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式(12)中: $f_{\sin-eq}$ 为等效正弦波频率; ΔB 为磁通密度峰峰值。

2.2 材料参数设置

变压器绕组由铜线、绝缘纸、橡胶套等构件交叠组成。将它们分开建模, 会产生大量边界条件, 不利于计算, 并且此模型主要研究绕组与环氧绝缘部分的温度分布, 所以将其忽略不计^[34]。

根据PET各部分的材料设置, 得到的相关材料参数见表1。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料名称	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/ [J·(kg·K) ⁻¹]	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]
铜	8 960	385	400.0
环氧树脂	1 900	1 369	0.8
铁氧体	4 900	600	5.0

2.3 网格剖分

文中采用有限元软件对PET的温度场仿真模型进行网格划分, 使用四面体精细剖分变压器的绕组、铁心、环氧绝缘和散热室, 绕组与环氧绝缘界面以及环氧绝缘与空气交界面的温度梯度较大, 该处应进行更加密集的网格设置。网格剖分完成后, 整个模型共包含9 323 670个域单元、660 031个面单元和17 118个边单元。网格剖分结果见图3。

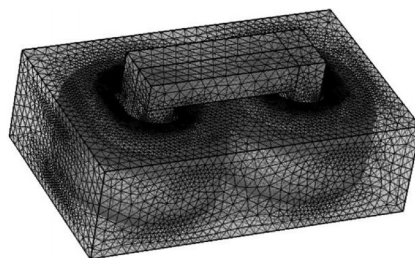


图3 模型部分四面体网格

Fig. 3 Model partially tetrahedral meshes

3 结果与分析

3.1 标准工况条件下电力电子变压器温度分布

在工况条件下, 对环氧导热系数为0.8 W/(m·K)的PET进行了温度场仿真分析。

PET散热示意图见图4, 图4中变压器左侧绕组见图5、6, 显示了负载系数为1时的变压器高、低压绕组温度分布情况。可以看出, 变压器高压绕组温度最高, 达到了78 ℃, 且绕组上右侧温度比左侧

高。这是由于变压器采用双绕组同轴结构,且高压绕组被环氧树脂包裹,散热受环氧树脂热传导的影响较大,故高压绕组温度较高,而右侧为两高压绕组较近处,热量较高,因此右侧较左侧温度高。低压绕组最高温度为 54℃,下部分绕组比上部分绕组高 2℃。这是由于低压绕组靠近散热气道,变压器附近冷空气在风扇的带动下向下运动,周围又不断有冷气流过来补充,使得上端绕组的温度较下端绕组温度低。

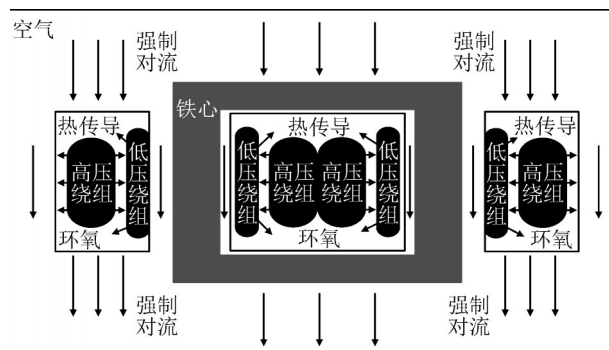


图4 变压器散热示意图

Fig. 4 Heat dissipation of transformer

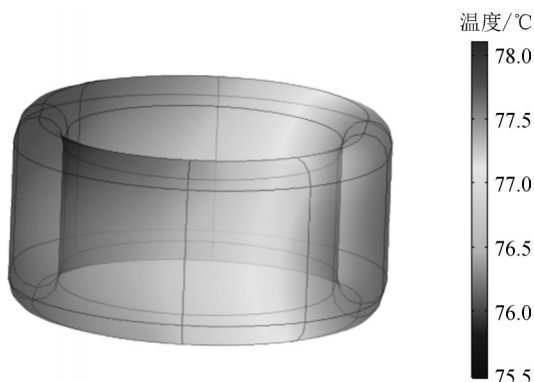


图5 高压绕组温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of high voltage winding

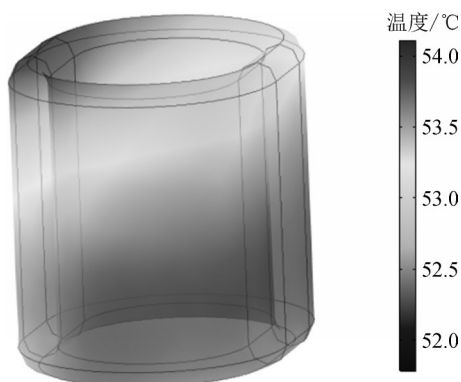


图6 低压绕组的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of low voltage winding

高低压绕组轴向高度温度分布图见图7、8,可以看出热点温度不是出现在最顶部,而是分别出现在高、低压绕组距离底端56%、71%高度处。这是由

于端口效应的影响,端口处与空气接触范围大,和绕组中部相比对流换热量大,使得温度最大值位置在中部。

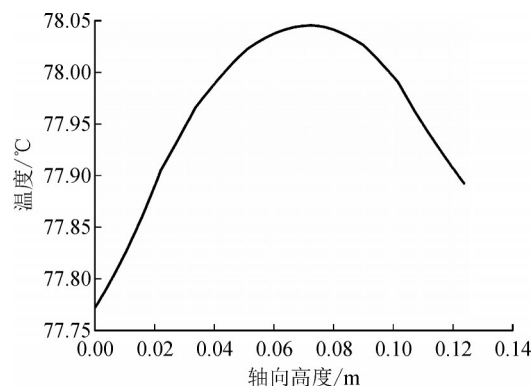


图7 高压绕组的轴向温度分布

Fig. 7 Axial temperature distribution of high voltage winding

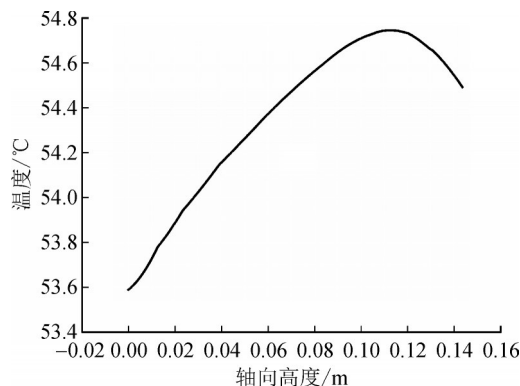


图8 低压绕组的轴向温度分布

Fig. 8 Axial temperature distribution of low voltage winding

在额定运行情况下,变压器绝缘部分在正常年限规定下使用一般温度处于正常状态。但当变压器在过载运行时,其电流就会变得很大,相应的绕组损耗就会进一步增大,导致绕组绝缘附近温度升高,对绝缘产生很大的影响,因此当过载运行时,需要对绕组附近绝缘的温度要重点考察。

变压器的热点温度主要与其工作时的负载系数和散热条件有关。文中分析了PET在负载系数为0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4情况下的温度场分布,得到变压器热点温度与负载系数的关系曲线,见图9。

从图9可以看出,随着负载系数的增大,热点温度不断升高,尤其是当变压器超载运行时,变压器内部温度上升很快。当变压器超载30%时,变压器温度为117.8℃,超过了标准GB/T 1094.11—2022中A级绝缘的要求(105℃),会使得材料性能下降以及加速老化,影响变压器使用寿命^[35-36]。

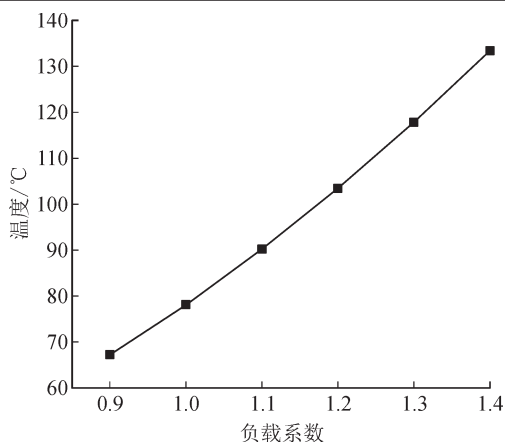


图9 变压器最热点温度随负载系数变化曲线

Fig. 9 The curve of transformer's hottest spot temperature as a function of load factor

3.2 短路故障工况对电力电子变压器的热点温度的影响

电力变压器不仅需要满足正常工作的需要,还需要满足在外部短路引起的过电流条件下无损伤的要求,而这需要考察电力变压器在承受短路时的耐热能力。

为了检验电力变压器在短路情况下的热稳定性,在导热系数为 $0.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的情况下,分别计算了高低压绕组在短路时的电流以及损耗,并假定绕组在工作状态突然短路,即绕组温度保持工作时温度情况下计算短路时的温度分布以及温升情况。

根据标准 GB/T 1094.5—2008^[37],用于计算电力变压器承受短路耐热能力的电流的持续时间为 2 s 。变压器高低压绕组在承受短路 2 s 时的温度分布见图10、11。

可以看出,高压绕组最高温度为 71.8°C ,低压绕组最高为 83°C ,在短路时电流会比正常工作状态时大很多,导致低压绕组损耗较高压绕组大很多,而此时 2 s 的强制对流散热的作用对低压绕组散热效果不再明显,使得低压绕组温度比高压绕组高。根据标准 GB/T 1094.5—2008 规定变压器短路时绕组温度不超过 180°C ,结果显示,使用导热为 $1.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的环氧树脂作为绝缘时符合变压器设计的要求,但温度已超过A级绝缘的要求,工作过程中应尽量避免短路发生。

3.3 环氧树脂导热系数对变压器温度场的影响

PET 由于结构紧凑,环氧绝缘材料不仅起了绝缘作用,对于变压器传热也至关重要,因此有必要研究环氧参数对变压器温度场分布的影响。环氧树脂的热导率对变压器内部的热传导起到很重要的作用,是影响变压器温度分布关键。

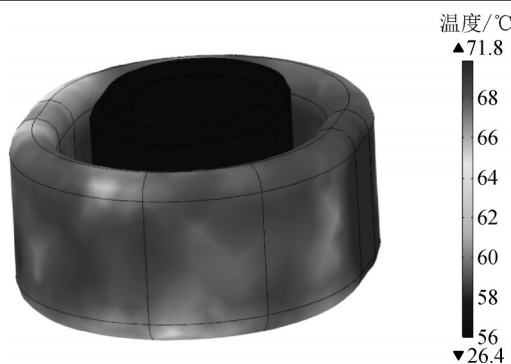


图10 高压绕组短路时的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of high voltage winding short circuit

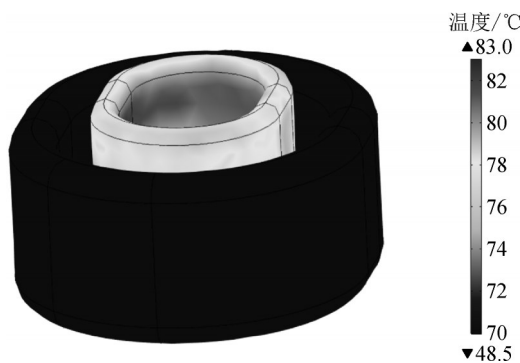


图11 低压绕组短路时的温度分布

Fig. 11 Temperature distribution of low voltage winding short circuit

3.3.1 环氧树脂导热系数对标准工况下变压器温度场影响

不同导热系数下,铁心和绕组的温度场分布见图12。从图12中可以看出,变压器温度主要集中在高、低压绕组附近,而高低压绕组中高压绕组温度明显较高,且提高环氧树脂的导热系数,高、低压绕组上温度明显下降,有利于改善变压器的散热情况。

不同导热系数下高压绕组平均温升见表2。变压器最热点温度随导热系数变化曲线见图13。可以看出变压器热点的温度随着导热系数的增加而先剧烈降低,最后逐渐趋于平缓。当导热系数为 $0.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,变压器热点温度下降到了 76.71°C ,温升为 56.71 K ,满足变压器绝缘最低等级A级绝缘热点温度低于 105°C 、平均温升小于 60 K 的要求。

PET 最热点温度随导负载系数变化趋势见图13,可以看出,变压器超载将使得温度快速升高,对于环氧绝缘的要求也越来越高。当变压器超载30%时,环氧绝缘导热系数为 $1.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 才符合标准 GB/T 1094.11—2022 中对于温升的要求。

当导热系数为 $1.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,最热点的稳态温度为 61.7°C ,这时导热系数增加 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,温度下降不超过5%,导热系数的提高可能还会使得材料抗

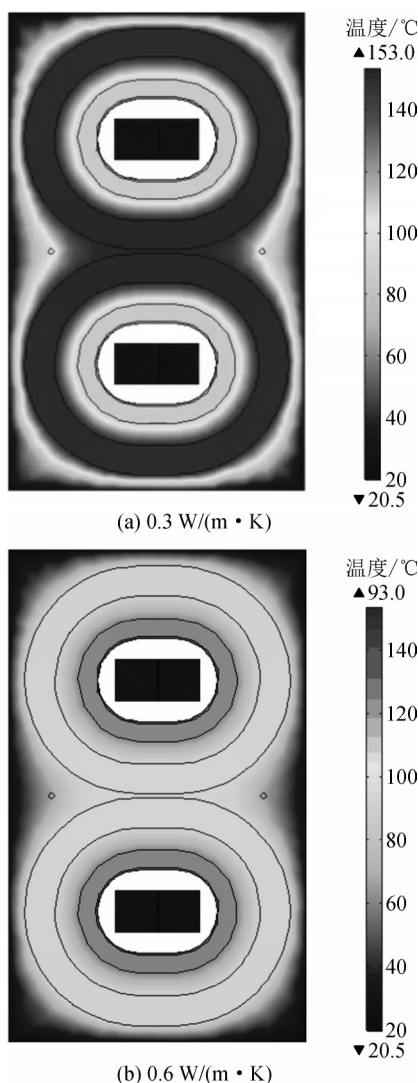


图12 变压器截面温度分布

Fig. 12 Temperature distribution of transformer cross section

表2 高压绕组热点温度

导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	高压绕组热 点温度/°C	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	高压绕组热 点温度/°C
0.3	151.86	0.8	76.71
0.4	121.99	0.9	71.64
0.5	103.94	1.0	67.57
0.6	91.87	1.1	64.23
0.7	83.22	1.2	61.44

拉强度降低^[38]。综合来看,导热系数为1.1 W/(m·K)时,较符合变压器正常运行的要求且留有一定的裕度。

3.3.2 环氧树脂导热系数对短路工况下变压器温度场影响

变压器高低压绕组短路时,导热系数对于温度分布的影响见图14、15。可以看出,当绕组短路时,高低压绕组温度每秒平均上升8、22 °C,需及时处理;变压器环氧绝缘的导热系数对于热点温度影响

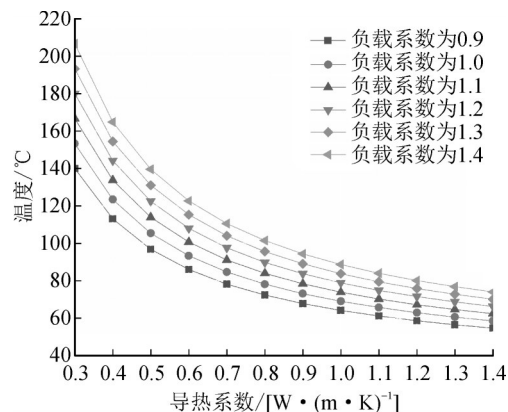


图13 最热点温度随导热系数、负载系数变化规律

Fig. 13 The change law of the hottest temperature with thermal conductivity coefficient and load coefficient

较小,这是由于短路时变压器绕组在较短的时间内释放较大热量,而由于时间较短(1~3 s),对流以及传导散热的效果较差,温度主要取决于其损耗密度,因此环氧绝缘的导热系数影响较小。

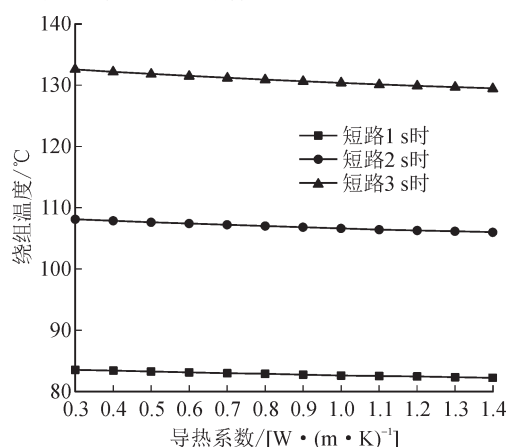


图14 低压绕组短路时热点温度随导热系数变化曲线

Fig. 14 Variation curve of hot spot temperature with thermal conductivity when low voltage winding is short-circuited

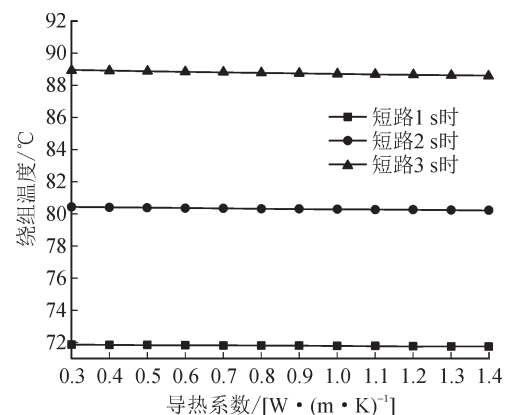


图15 高压绕组短路时热点温度随导热系数变化曲线

Fig. 15 Variation curve of hot spot temperature with thermal conductivity when high voltage winding is short-circuited

3.4 环境温度对变压器温度分布影响

变压器最热点温度不仅受变压器本身的影响,还和外界环境温度有较大的关系。将文中风扇的输入参数流入空气的温度值设为环境温度,研究其对变压器温度分布影响。变压器绝缘导热系数为 $1.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时环境温度对变压器最热点温度的影响见图16。

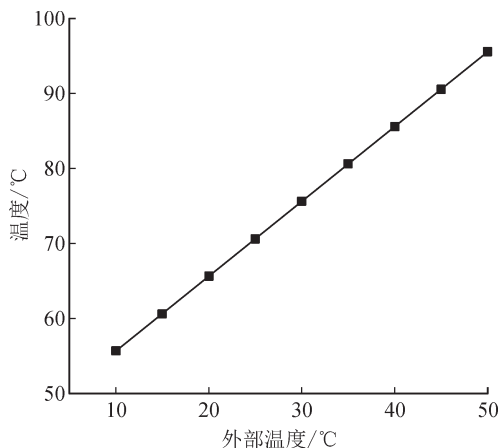


图16 变压器最热点温度随环境温度变化曲线

Fig. 16 Curve of the hottest point temperature of the transformer versus the ambient temperature

通过比较发现,最热点温度和环境温度成正比。外界环境温度增加,变压器风扇的散热效果明显下降。国家标准GB/T 1094.1—2013规定变压器外界环境最高温度为 40°C 。当外界温度上升到 45°C 时,变压器热点温度由 67.1°C 上升到 87.4°C ,提高了30.2%,继续提高就很可能超出了变压器正常运行的范围。可以看出在实际工作过程中,环境温度对于变压器热点温度有较大的影响,在炎热情况下工作,若变压器过载运行就可能出现过热现象,影响变压器稳定运行。

4 结论

文中构建了大功率环氧绝缘PET仿真模型,采用流固耦合计算方法研究了环氧绝缘材料导热系数、负载系数以及故障对变压器内部温度分布特性的影响,研究结果如下:

1)PET正常工作时,热量主要集中在内部的高压绕组上,变压器内部热点温度位于高压绕组距底端56%高度的位置,高、低压绕组热点温度分别为 78.54°C 。

2)变压器热点温度与环境温度成线性变化关系,高、低压绕组短路时,热点温度分别以 $8.22^\circ\text{C}/\text{s}$ 速度上升,需及时处理,以防止对变压器造成永久性损伤;环境温度过高、变压器过载以及短路故障

都会使得变压器温度异常升高,影响变压器的安全稳定运行和使用寿命。

3)增加环氧树脂导热系数能够有效提升变压器正常运行时的散热能力,降低变压器热点温度,当环氧绝缘材料导热系数大于 $1.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,变压器热点温度变化趋于平缓,此时变压器温度满足设计要求,且具有30%的负载裕度。

参考文献:

- [1] 王锡凡,卫晓辉,宁联辉,等.海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5459-5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31):5459-5466.
- [2] TAUFIQ J. Power electronics technologies for railway vehicles[C]//2007 Power Conversion Conference - Nagoya. Japan:IEEE,2007:1388-1393.
- [3] 吴盛军,王益鑫,李强,等.低压直流供电技术研究综述[J]. 电力工程技术,2018,37(4):1-8.
WU Shengjun, WANG Yixin, LI Qiang, et al. Review of low voltage DC power supply technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):1-8.
- [4] 李子欣,高范强,赵聪,等.电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5):1274-1289.
- [5] 王威望,刘莹,何杰峰,等.高压大容量电力电子变压器中高频变压器研究现状和发展趋势[J]. 高电压技术,2020,46(10):3362-3373.
WANG Weiwan, LIU Ying, HE Jiefeng, et al. Research status and development of high frequency transformer used in high voltage and large capacity power electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10):3362-3373.
- [6] 苗宇,袁旭峰,邹晓松,等.双电源输入环境下的电力电子变压器运行研究[J]. 电测与仪表,2022,59(4):84-90.
MIAO Yu, YUAN Xufeng, ZOU Xiaosong, et al. Research on power electronic transformers operation in dual-power-input environment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4):84-90.
- [7] 牟杰,杨依睿,徐永海,等.接入电力电子变压器的光伏及混合储能协调控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(3):143-152.
MOU Jie, YANG Yirui, XU Yonghai, et al. Research on coordinated control strategy of photovoltaic and hybrid energy storage system connected to power electronic transformer [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,

- 2022,43(3):143-152.
- [8] 林 林, 黄 梅, 杨 波, 等. 适用于直流配网的故障自清除型电力电子变压器[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6):188-195.
LIN Lin, HUANG Mei, YANG Bo, et al. Power electronics transformer with fault self-clearing ability for DC distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6):188-195.
- [9] 刘志良, 邱庆华. 电力变压器稳定绕组的抗短路设计[J]. 变压器, 2022, 59(7):1-7.
LIU Zhiliang, QIU Qinghua. Short-circuit resistant design of power transformer stabilizing winding[J]. Transformer, 2022, 59(7):1-7.
- [10] 何东升, 苗本健, 罗海凹, 等. 新形势下电力变压器的检测新要求和发展建议[J]. 变压器, 2022, 59(8):46-50.
HE Dongsheng, MIAO Benjian, LUO Hai'ao, et al. Analysis of typical quality problems in power transformer sampling inspection and industry development suggestions [J]. Transformer, 2022, 59(8):46-50.
- [11] 都兴双, 李洪春, 苏晓龙. 浅析新能效电力变压器的推广对实现碳达峰、碳中和的意义[J]. 变压器, 2022, 59(2):1-5.
DU Xingshuang, LI Hongchun, SU Xiaolong. Promoted significance of new energy efficiency power transformer for achieving carbon peak and carbon neutralization[J]. Transformer, 2022, 59(2):1-5.
- [12] SARKER P C, ISLAM M R, GUO Youguang, et al. State-of-the-art technologies for development of high frequency transformers with advanced magnetic materials[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2):1-11.
- [13] 李庆民, 刘伟杰, 韩 帅, 等. 环氧树脂绝缘高频电热联合老化中局部放电特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(2):389-395.
LI Qingmin, LIU Weijie, HAN Shuai, et al. Analysis on partial discharge characteristics of epoxy resin insulation during high-frequency electrical-thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2):389-395.
- [14] 邓 莉. 环氧浇注高压电子变压器的绝缘设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(6):152-154.
DENG Li. Insulation design of epoxy cast electronic transformer[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(6):152-154.
- [15] 咸日常, 范慧芳, 李 飞, 等. 基于改进GSA-SVM模型的电力变压器故障诊断[J]. 智慧电力, 2022, 50(6):50-56.
XIAN Richang, FAN Huifang, LI Fei, et al. Power transformer fault diagnosis based on improved GSA-SVM model[J]. Smart Power, 2022, 50(6):50-56.
- [16] 邱海枫, 苏 宁, 田松林. 改进支持向量机在电力变压器故障诊断中的应用研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11):48-53.
QIU Haifeng, SU Ning, TIAN Songlin. Research on the application of improved support vector machine in power transformer fault diagnosis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11):48-53.
- [17] 李远松, 丁津津, 李圆智, 等. 基于瞬态油流量测量的电力变压器故障油流涌动特性[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1):211-216.
LI Yuansong, DING Jinjin, LI Yuanzhi, et al. Research on fault oil flow in power transformer based on transient oil flow measurement[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1):211-216.
- [18] KJELLQVIST T, NORRGA S, OSTLUND S. Design considerations for a medium frequency transformer in a line side power conversion system[C]//2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551). Germany:IEEE, 2004:704-710.
- [19] ORTIZ G, BIELA J, BORTIS D, et al. 1 Megawatt, 20 kHz, isolated, bidirectional 12 kV to 1.2 kV DC-DC converter for renewable energy applications[C]//The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA. Japan:IEEE, 2010:3212-3219.
- [20] 李子欣, 王 平, 楚遵方, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9):2592-2601.
LI Zixin, WANG Ping, CHU Zunfang, et al. Research on medium- and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(9):2592-2601.
- [21] 陈启超, 王建赅, 纪延超. 基于 LLC 谐振变换器的电力电子变压器[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3):41-46.
CHEN Qichao, WANG Jianze, JI Yanchao. Power electronic transformer based on LLC resonant converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3):41-46.
- [22] BAHMANI M A, THIRINGER T, RABIEI A, et al. Design methodology and optimization of a medium frequency transformer for high power DC-DC applications[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2016, 52(5):4225-4233.
- [23] LEUNG C, DUTTA S, BAEK S, et al. Design considerations of high voltage and high frequency three phase transformer for solid state transformer application[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. USA:IEEE, 2010:1551-1558.
- [24] 律方成, 郭云翔, 李 鹏. 大功率中频变压器多目标参数优化设计[J]. 高电压技术, 2017, 43(1):210-217.
LYU Fangcheng, GUO Yunxiang, LI Peng. Optimization design for multiple target parameters of high power medium frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1):210-217.
- [25] 刘洁苇, 吕运强, 李 琳, 等. 高频变压器磁场和温度场的瞬态特性分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(4):1191-1200.

- LIU Jiewei, LYU Yunqiang, LI Lin, et al. Transient simulation analysis of electromagnetic field and temperature field of high-frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1191-1200.
- [26] TOMCZUK B Z, KOTERAS D, WAINDOK A. Electromagnetic and temperature 3-D fields for the modular transformers heating under high-frequency operation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 317-320.
- [27] SUZUKI Y, HASEGAWA I, SAKABE S, et al. Effective electromagnetic field analysis using finite element method for high frequency transformers with Litz - wire[C]// International Conference on Electrical Machines & Systems. China: IEEE, 2008: 4388-4393.
- [28] DU Y, BAEK S, BHATTACHARYA S, et al. High-voltage high-frequency transformer design for a 7.2 kV to 120 V/240 V 20 kVA solid state transformer[J]. IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. USA: IEEE, 2010: 493-498.
- [29] 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. Temperature field calculation and analysis of cast-resin dry-type transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 83-89.
- [30] 段 涵, 阮江军, 邓永清, 等. 变压器温度场计算边界辐射一对流复合换热等效方法研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 120-129.
- DUAN Han, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al. Research on the equivalent method for calculating boundary radiation-convection combined heat transfer of transformer temperature field[J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2020, 24(10): 120-129.
- [31] 蒋惠中, 魏本刚, 文 杰, 等. 分体式油浸自冷变压器三维温度场和流场仿真与分析[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 63-69.
- JIANG Huizhong, WEI Bengang, WEN Jie, et al. Numerical simulation of 3D temperature and flow fields in separated oil-immersed cooling transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 63-69.
- [32] 王 垒, 袁端鹏, 郝留成, 等. 烘箱结构对绝缘子固化过程温度场分布的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2748-2757.
- WANG Lei, YUAN Duanpeng, HAO Liucheng, et al. Effect of oven structure on insulator temperature field distribution during curing process[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2748-2757.
- [33] 柳百毅, 陈 为. 改进的磁元件圆导线绕组高频损耗模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2795-2802.
- LIU Baiyi, CHEN Wei. Improved high-frequency winding loss model for round conductors of magnetic components[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2795-2802.
- [34] KAZIMIERCZUK M. High-frequency magnetic components [M]. USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [35] 电力变压器 第11部分: 干式变压器: GB/T 1094.11—2022[S]. 2022.
- Power transformers - part 11: Dry-type transformers: GB/T 1094.11—2022[S]. 2022.
- [36] 马 宁, 钟 博, 王培侨, 等. 氮化硼/环氧树脂绝缘导热材料的制备及性能表征[J]. 材料导报, 2016, 30(12): 65-69.
- MA Ning, ZHONG Bo, WANG Peiqiao, et al. Preparation and properties study of Boron nitride/epoxy resin insulating thermoconductive composite[J]. Mater Review, 2016, 30(12): 65-69.
- [37] 电力变压器 第5部分: 承受短路的能力: GB/T 1094.5—2008[S]. 2008.
- Power transformers - part 5: Ability to withstand short circuit: GB/T 1094.5—2008[S]. 2008.
- [38] 郑襄丹, 魏 毅, 刘卫平, 等. 不同尺度片状氮化硼改性环氧树脂复合材料性能研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(18): 65-73.
- ZHENG Xiangdan, WEI Yi, LIU Weiping, et al. Properties of epoxy composites modified by Boron nitride sheets with different sizes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(18): 65-73.
- 赵玉顺(1980—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为高压电气绝缘、电力设备检测与故障诊断等(E-mail: yushunzhao@126.com)。
- 卫 龙(1996—), 男, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 1983810360@qq.com)。