

基于温升效应的变压器绕组短路强度分析

刘 夏¹ 白兆玉² 井永腾² 王 宁³ 韩芳旭⁴

(1. 中车新型基础设施投资开发有限公司 2. 沈阳工业大学国家稀土永磁电机研究中心

3. 沈阳变压器研究院有限公司 4. 沈阳工程学院电力学院)

摘要: 变压器短路故障时, 绕组温度会由于短路电流激增而升高, 进而引起绕组材料性能退化, 显著降低抗短路能力, 对变压器安全运行构成威胁。本文基于温升效应对变压器绕组抗短路强度进行分析, 通过电磁、流体和结构场仿真, 对比分析短路工况与正常工况下的电磁特性、油流分布以及绕组结构动力学响应。研究表明, 发生短路故障时磁密峰值和电动力显著增加, 绕组热点温升明显, 且油流速度加快。此外, 随着温度升高, 绕组固有频率有所下降, 而在不均匀温度条件下, 绕组的位移和形变也呈现出增大趋势。

关键词: 变压器; 短路故障; 温升效应; 短路强度

0 引言

变压器作为电力系统中的关键设备, 其运行稳定性和可靠性对电力系统的整体性能具有重要影响。在变压器的运行过程中, 短路故障是一种常见的故障类型, 发生时会产生巨大的短路电流, 对变压器造成严重的冲击。由于电流的快速变化和能量的释放, 会导致变压器绕组产生显著的温升效应, 这种温升不仅会影响变压器承载负荷的能力, 还会加速绕组绝缘材料的老化, 降低变压器的使用寿命, 甚至可能引发严重的故障, 对电力系统的稳定运行构成威胁。

目前对变压器绕组短路稳定性的研究多采用数值分析和多物理场耦合方法, 但考虑条件不够全面。文献[2-4]采用理论计算、实验测试和数值模拟等方法, 研究变压器绕组在短路情况下的承受能力和力学性能。文献[5]通过电场计算、数值模拟和综合分

析, 对电力变压器绕组短路强度、温升、电场进行详细的计算与分析。文献[6-7]通过多物理场耦合计算等方法对变压器绕组的温升问题进行分析。文献[8-9]在分析变压器绕组短路情况时考虑了温升效应以及结构件的热老化程度对绕组短路强度的影响。综上所述, 现有文献在进行短路强度分析时往往忽略温升对绕组带来的影响或仅考虑均匀温度分布, 而实际情况下, 变压器在运行过程中会受到各种复杂因素的影响, 导致温度分布不均。

因此, 本文基于温升效应对变压器绕组短路强度进行分析。通过建立电磁、流体和结构场多物理仿真分析模型, 对变压器在短路工况下的电磁特性、流体场特性和结构稳定性进行分析。探究温升对绕组固有频率、位移和形变的影响, 以及不同温度条件下绕组材料的机械性能变化。

基金项目: 辽宁省教育厅资助项目(LJKZ1111)。

1 电磁场仿真计算

本文选用 1000kVA 变压器作为研究对象，建立了包含电磁、流体及结构场仿真分析的多物理场仿真分析模型，并根据计算的要求对不同场的模型进行不同的优化。表 1 列出变压器模型的具体参数。

表 1 变压器基本参数

项目	参数
变压器型号	SB11-M-1000/10
冷却方式	油浸自冷
额定容量	1000kVA
额定电压	(10±2×2.5%) /0.4kV
额定电流	57.7/1443A
联结方式	Yd11
阻抗电压百分数	4.66%

在进行电磁场分析时，为了增加计算的效率，对该变压器模型进行简化，忽略油箱、垫块、撑条等结构件，只保留铁心、高低压绕组等结构件，如图 1 所示。

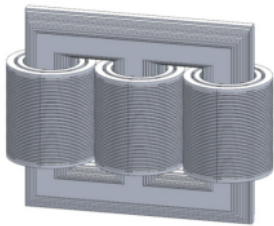


图 1 变压器电磁模型

由于在流体场的分析中，必须全面而细致地考虑变压器内部各个部件之间的相互作用，以及油流在复杂结构中的分布和流动特性，因此，建立完整的 1000kVA 变压器全模型，旨在精确模拟流体场中的动态变化，如图 2 所示。

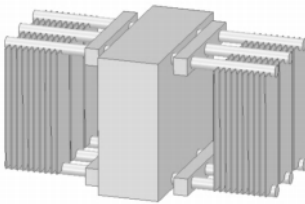


图 2 变压器流体场模型

当变压器发生短路时，产生的短路电流由持续存在的周期电流分量与迅速衰减的非周期分量组成，其三相短路电流计算公式如下：

$$i_a = -\sqrt{2}I_k (\cos(\omega t) - e^{-\frac{R_k}{L_k}t}) \quad (1)$$

$$i_b = -\sqrt{2}I_k (\cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) - \cos(\frac{2}{3}\pi)e^{-\frac{R_k}{L_k}t}) \quad (2)$$

$$i_c = -\sqrt{2}I_k (\cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) - \cos(-\frac{2}{3}\pi)e^{-\frac{R_k}{L_k}t}) \quad (3)$$

在进行电磁场分析时，选取对变压器短路冲击最大的三相短路作为研究对象，通过仿真分析得到短路工况下变压器的电磁特性。以下对短路工况与正常工况下的电磁特性进行对比，分析变压器在不同工况下的电磁响应差异。

如图 3 与图 4 所示，在三相短路故障条件下，变压器绕组窗内的径向磁密分布规律与正常工况一致，具体表现为两端磁密较高而中间较低的趋势。然而，短路工况下的径向磁密峰值相较于正常工况提升了 0.006T。同时，轴向磁密亦遵循两端小、中间大的分布规律，但其峰值却显著增加了 0.28T。这表明短路故障未改变磁密分布的基本规律，但会显著增大磁密的峰值。

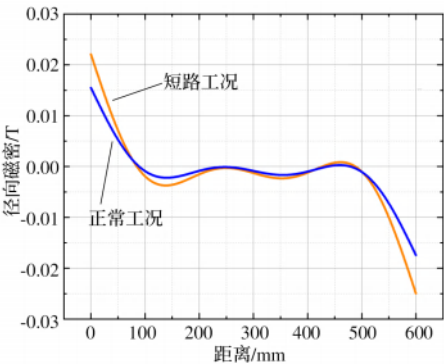


图 3 变压器窗内径向磁密

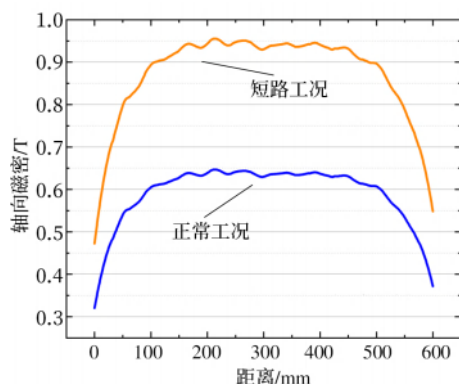


图4 变压器窗内轴向磁密

图5与图6为绕组在短路工况与正常工况下的电力分布规律。通过对比分析,发现短路前后轴向力与径向力的分布规律保持一致。轴向力呈现出锯齿形的波形分布特征,而径向力则表现为中间大、两端小的分布趋势,说明绕组两端,轴向力达到最大值,而在绕组中间部位,径向力达到峰值。且短路后绕组的轴向力增加了200%,径向力增加了300%,这体现了短路冲击对绕组的巨大影响。因此,在变压器结构优化设计中,可以考虑通过在绕组端部增加预紧力来增强紧固效果,预防轴向力的危害,同时,增加撑条中间宽度,以优化中部绕组的径向力传递,从而更好地保护绕组。

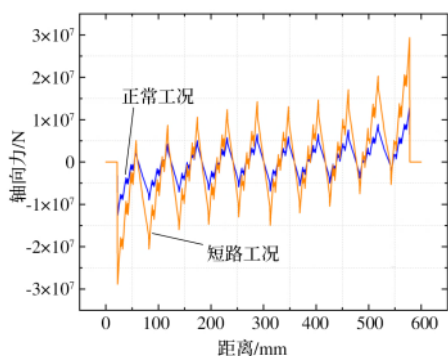


图5 绕组轴向力分布

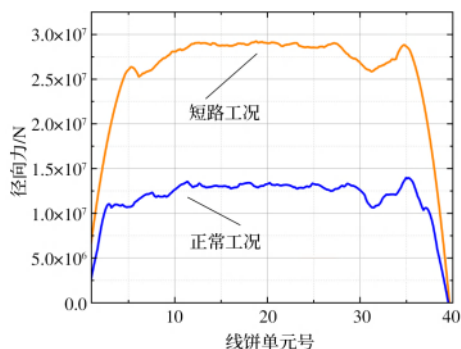


图6 绕组径向力分布

2 流体场仿真分析

在变压器的运行过程中,变压器油与各个结构组件紧密接触,共同形成一个复杂的流固耦合区域。由于流体域内部不存在直接的热源,因此,引入了损耗密度这一概念,将其视为等效热源。图7为油浸式自冷变压器的油循环示意图。

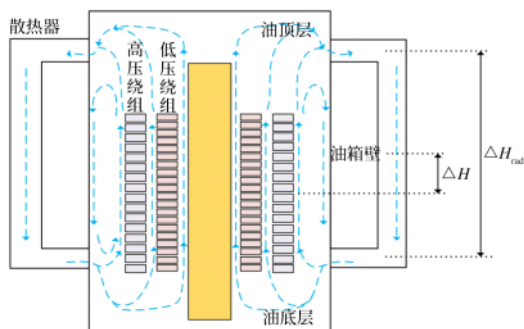


图7 变压器油循环分布

在发热区域,变压器油与产生热量的固体壁面发生热交换,油受热后密度减小,从而上浮至油箱的顶部,导致油顶层温度显著升高。随后,这些热油会循环流入散热片区域,与箱壁及散热器表面进行充分的热交换,其温度逐渐降低,密度相应增大。在重力的作用下,冷却后的油会通过进油口重新流入油箱内部,形成一个完整的油循环过程。高压绕组温升云图如图8所示。

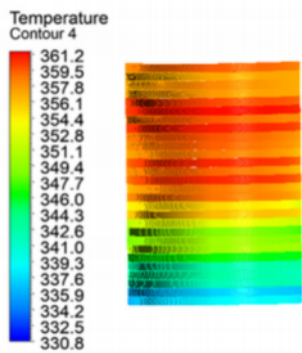


图 8 高压绕组温升云图

根据流体力学 Boussinesq 假设，压力差公式为：

$$\Delta p_{buo} = \rho_{oil}(T) \cdot \alpha_T \cdot S \cdot g \tag{4}$$

式中， Δp_{buo} 为上浮力压差； $\rho_{oil}(T)$ 为不同温度条件变压器油密度； S 为温度相关的整体油流回路中空间位置形成的面积； g 为重力加速度。其中 S 的计算公式如下：

$$S = (\Delta H - 0.5)(T_{top} - T_{bot}) + \Delta H_{rad}(T_{top} - T_{abm}) - \Delta H_{rad} \frac{T_{top} - T_{bot}}{\ln(T_{top} - T_{abm}) - \ln(T_{bot} - T_{abm})} \tag{5}$$

式中， T_{top} 、 T_{bot} 、 T_{abm} 分别为油顶层温升、油底层温升、油平均温升； ΔH 为散热器平均高度与绕组平均高度差值； ΔH_{rad} 为进出油口高度差值。

油粘度与粗糙的固体表面摩擦力相互作用下，热油流动过程形成沿程阻力，基于 Darcy-Weisbach 理论，阻力损失可以表示为：

$$\Delta p_{fr} = \sum_{i=1}^N \left(f \frac{L}{D} + \xi \right) \frac{G_i^2}{2 \rho A_i^3} \tag{6}$$

$$f = a R_e^{-b} \tag{7}$$

式中， f 为变压器油的沿程阻力系数； a 、 b 分别为油道系数； R_e 为油的流动状态； D 为与变压器竖直油管道相关的直径； L 、 ξ 、 G_i 、 A 分别为变压器油流动的特征长度、阻力系数、体积流量以及截面积。

根据图 9 轴向温升曲线的分析结果，高压绕组的热点温升最高出现在第 21 饼处，热点温升值高达

65.4K，平均温升也达到了 53.6K。这表明在短路情况下，高压绕组存在局部过热现象，可能对材料的结构属性产生不利影响，进而降低其抗短路能力。

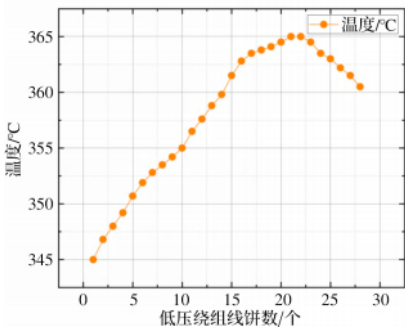


图 9 高压绕组饼温度分布

在发生该现象时，变压器油受热后密度降低，逐渐上浮至绕组区域。随着持续加热，油流速度逐渐加快，最大流速出现在绕组上端部，达到 0.226m/s。油流在脱离绕组部位后，继续上浮至油箱顶部，形成回流，并最终流至出油口，进入散热片进行散热。从散热片的油流矢量图可见，油流速度从内片至外片逐渐减小，完成了整个的油循环散热过程。图 10 为整体油流分布的侧视图。

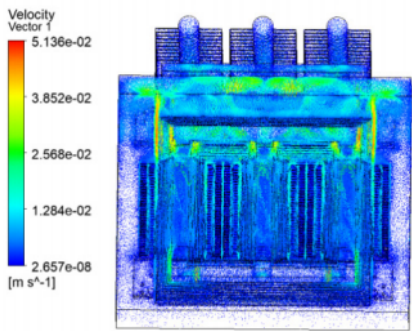


图 10 变压器短路油流分布

在绕组部位的油流分析中，鉴于三维模型的整体运算量庞大，模型构建时未纳入挡油板的影响，故变压器油在主空道内整体上呈现上浮趋势。然而，分饼结构的饼间绝缘处仍有少量油进行径向流动，这一细

节在模型中得到了体现。

3 考虑温升效应的绕组短路强度分析

在结构场分析中,为了探究温升对变压器绝缘结构的具体影响,引入撑条与垫块这两个关键的绝缘构件。通过对它们在不同温度环境下的性能变化进行分析,更精确地评估变压器绝缘结构的整体稳定性和可靠性。

根据绕组的动力学模型可得系统的运动方程为:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} - Kx = F + Mg \quad (8)$$

式中, M 为线饼的质量矩阵; x 为线饼的轴向位移距离; C 为阻尼系数矩阵; K 为各线饼间的等效弹性系数矩阵; F 为承受的电磁力大小。

在油浸式变压器中,绕组的阻尼系数 C 很小,忽略轴向振动过程中的阻尼与外力影响,系统无阻尼特性的固有频率计算式如下:

$$\omega_n = \lambda_n \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (9)$$

式中, λ_n 为与第 n 阶模态相关的特征值。

为探究不同温度条件对绕组固有频率的影响,在绝缘纸板处于未老化状态的前提下,选取 20~100℃ 温度区间内的五个特定温度值,对绕组的固有频率进行详细分析。在保持绕组预紧力恒定的基础上,对比 20℃ 与 100℃ 条件下绕组的一阶振型及其固有频率云图(见图 11),发现中压绕组的一阶振型主要表现为轴向两端向中间的压缩形态。

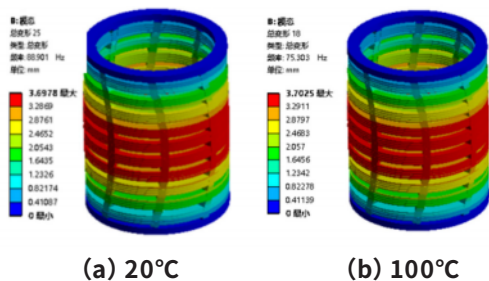


图 11 不同温度条件下绕组一阶模态云图

在 20℃ 时,绕组的一阶固有频率为 88.901Hz。

然而,当温度升高至 100℃ 时,绕组整体的固有频率降低至 75.256Hz,下降幅度达到了 15.34%。尽管温度升高,但在边界条件保持不变的条件下,绕组的一阶固有频率振型并未观察到明显的变化。这说明温度的变化对绕组的固有频率有显著影响,但在边界条件不变的基础上,温度变化并不会引起绕组的振动特性变化。

由于变压器发生短路故障时处于运行的高温环境中,而之前对变压器绕组抗短路能力的分析不考虑温度影响或只考虑均匀温度的条件,因此有必要进行不均匀的温度条件对绕组稳定性影响的分析。

如图 12 所示,在均匀温度条件下,绕组的最大位移出现在两端,位移量为 0.372mm。当考虑变压器运行中的不均匀温度分布条件时,绕组的最大位移增加至 0.378mm。相较于均匀温度条件,绕组最大位移的增量为 0.006mm,位移增加比例达到 1.60%。

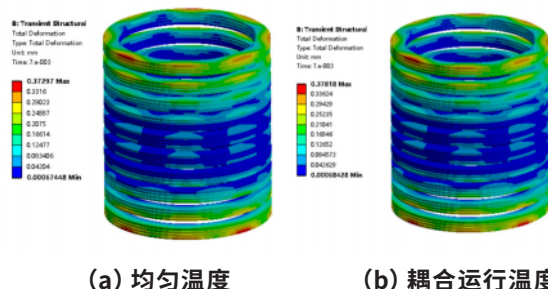


图 12 不同温度条件下高压绕组最大位移云图

为评估此时绕组的稳定性,接下来对位移量最大的绕组饼进行屈曲分析,深入探究该绕组饼在短路故障情况下的稳定性。

如图 13 所示,在三相短路条件下,绕组的一阶屈曲模态载荷因子已高达 0.97644,这一数值极为接近临界值 1。这表明绕组虽尚未进入完全失稳状态,但已处于失稳的边缘,其内部可能已存在潜在的损伤或暗伤。

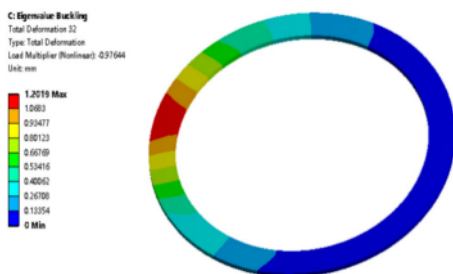
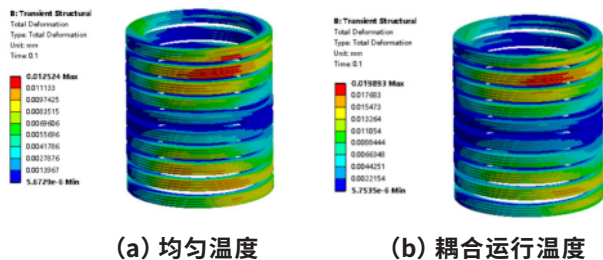


图 13 绕组一阶屈曲模式

图 14 为短路冲击后绕组残余位移的分布情况。在均匀温度条件下，绕组残余形变量为 0.0125mm。然而，当考虑不均匀温度与短路冲击的耦合影响时，形变显著增加至 0.0198mm，形变差值达到 0.0073mm，形变增加比例高达 58.4%，这体现了温度分布对绕组形变的重要影响。



(a) 均匀温度 (b) 耦合运行温度

图 14 绕组残余形变云图

4 导线强度试验

研究选取自粘性换位导线HQQNBV-1.35 1.50×6.90/25 共 4 组样本，每组包含 5 根导线，每根导线长度约为 200mm，且其屈服强度 $R_{p0.2}$ 介于 110~130MPa 之间。对这些导线在 20℃、60℃、105℃、120℃四种不同温度条件下进行弯曲试验，并记录下不同力值下的形变情况，选取 3 条有效曲线用于进行数据分析。

首先对导线进行预处理：将导线置于 120℃的干燥箱中干燥 20h，随后取出并自然冷却 6h。然后将导线分别置于设定好的不同温度条件的恒温箱中，进行 1h 的加热恒温处理。在弯曲试验中，设置支撑间距为 100mm，以 5mm/min 的恒定速度对放置在弯曲

试验工作架上的导线中部施加压力，直至导线变形达到 5mm 时停止。通过测试仪记录力与形变的关系曲线，并测量最终抗弯力、抗弯强度及弯曲模量，计算各参数的平均值以获得最终结果。

分别对在 20℃和 60℃恒温箱处理 1h 后的导线进行弯曲试验，试样导线的有效力-变形曲线如图 15 所示。

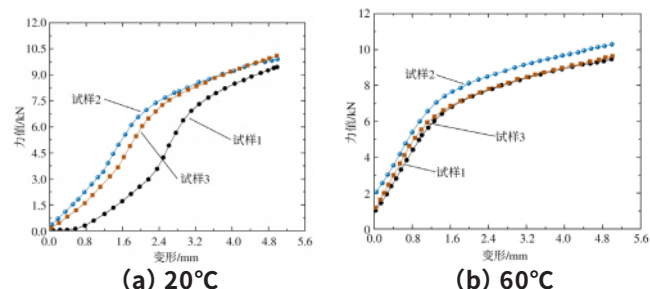


图 15 20℃与 60℃下试样导线力值变形曲线

分别对在 105℃和 120℃恒温箱处理 1h 后的导线进行弯曲试验，试样导线的有效力-变形曲线如图 16 所示。

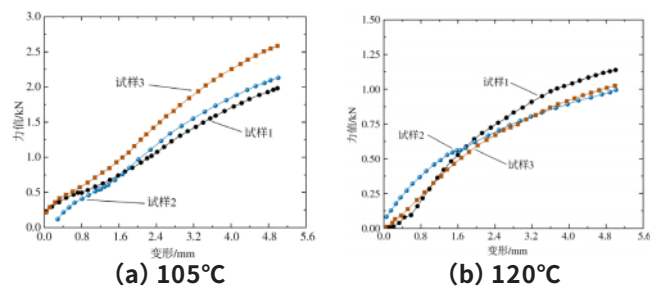


图 16 105℃与 120℃下试样导线力值变形曲线

导线的抗弯力、抗弯强度及弯曲模量三个关键参数均基于三次有效测量的平均值计算得出。将数据进行归纳处理得到抗弯强度与弯曲模量随温度的变化情况，如图 17 所示。

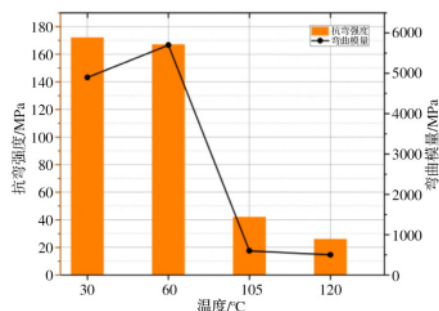


图 17 抗弯力随温度变化曲线

对不同温度条件下导线的机械强度进行试验分析。结果显示,随着温度的升高,导线的抗弯力与弯曲强度均呈现出逐渐降低的趋势。具体而言,在温度升高的过程中,导线的抗弯性能逐渐减弱。同时,弯曲模量在 20~60℃区间内呈现增加的趋势,这可能与导线材料的热膨胀效应有关。然而当温度继续升高时,弯曲模量则出现快速衰减的现象,表明高温对导线机械性能产生了显著影响。

5 结束语

本文对变压器在三相短路情况下的电磁特性、流场特性及其抗短路能力进行了分析,得到以下结论:

1) 在短路工况下,电磁分布的基本规律与正常工况保持一致,但磁密峰值发生显著变化。具体而言,径向磁密峰值增加了 0.006T,增幅达到 36.5%;轴向磁密峰值则增加了 0.28T,增幅为 41.5%。这一变化导致绕组所受的径向力增加了 300%,轴向力增加了 200%。

2) 高压绕组的热点温升主要集中在第 21 饼处,其热点温升值高达 65.4K,平均温升为 53.6K。在温升现象发生时,油流速度明显增大,最大流速出现在绕组上端部位置,达到 0.226m/s。

3) 随着温度的升高,导致绕组的固有频率下降了 15.34%,但振型保持不变。在不均匀温度条件下,绕组的最大位移增加了 1.60%,残余形变更是增加了 58.4%。这表明温度分布对绕组的稳定性具有显著影响,且在短路工况下,绕组已接近失稳的边缘。

4) 针对自粘换位导线,在不同温度条件下进行弯曲试验。试验结果表明,随着温度的升高,导线的抗弯力与弯曲强度逐渐降低。而导线的弯曲模量则在 20~60℃范围内呈现缓慢增加的趋势,但当温度高于 60℃后,弯曲模量开始快速衰减。

参考文献

- [1] 王世山,汲胜昌,李彦明.电缆绕组变压器短路时线圈轴向稳定性的研究[J].中国电机工程学报,2004(2).
- [2] 陈晨.大型电力变压器绕组短路强度、损耗和温升计算分析[J].科技风,2013(2):20.
- [3] 邹德旭,钱国超,井永腾,等.多次短路工况下变压器内绕组辐向强度计算[J].电器工业,2021(6):69-73,78.
- [4] 李岩,李洪奎,孙昕,等.电力变压器绕组短路强度、温升、电场计算与分析[J].变压器,2009,46(5):8-11.
- [5] 熊汉武,张书琦,赵志刚,等.电力变压器绕组幅向弯曲应力分析方法[J].高电压技术,2020,46(3):931-938.
- [6] 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.
- [7] 武祥中,周启峰.干式短路试验变压器绕组温升计算研究[J].今日制造与升级,2023(12):63-66,108.
- [8] 张凡,李秀广,朱筱瑜,等.计及热老化程度的变压器绕组内线圈短路承受能力评估方法[J].中国电机工程学报,2022,42(10):3836-3846.
- [9] 罗汉武,来文青,姜国义,等.不同温度下变压器绕组材料弹性模量及短路轴向力学性能研究[J].绝缘材料,2017,50(9):46-51.

(收稿日期:2024-10-22)