

基于电热特性融合分析的 油浸式变压器匝间短路故障辨识方法

张立静, 盛戈皞, 侯慧娟, 江秀臣

(上海交通大学 电气工程系, 上海市 闵行区 200240)

Detection Method of Interturn Short-circuit Faults in Oil-immersed Transformers Based on Fusion Analysis of Electrothermal Characteristic

ZHANG Lijing, SHENG Gehao, HOU Huijuan, JIANG Xiuchen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The existing methods of interturn fault diagnosis of a power transformer depend on the single signal indicator such as the winding current, the impedance or the dissolved gases etc., so that they can not accurately detect the exact location of the faults, especially the short circuit with a few turns. Taking the winding current, winding hot spot temperature and oil temperature into consideration, a new approach based on the fusion analysis of electrothermal characteristics is proposed to detect the interturn faults in the winding of an oil-immersed transformer. The main idea of the proposed method is to establish the digital space model of the physical transformer with the digital twin technology. Then, multi-physics simulation is used to derive the changing law of the electrothermal characteristics of the transformers under different operation conditions and interturn fault types in the digital space. With the main electrothermal characteristics parameters including winding current and hot spot temperature as the features, a twin fault sample based data-driven model is presented for the interturn fault detection. A case study is carried out on the 31.5MVA/110kV power transformer. The results show that the proposed detection method based on the fusion analysis of the electrothermal characteristic can effectively identify the early latent interturn fault of the power transformer. The overall accuracy of the proposed method can reach 94%.

KEY WORDS: oil-immersed transformer; interturn short circuit; digital twin; fault detection; electrothermal characteristic

摘要: 已有的变压器匝间短路辨识方法主要依据绕组电流、阻抗或者油中溶解气体等单一类型信号,难以实现对故障位

置的准确诊断,特别对少量匝数短路的辨识效果较差。综合考虑绕组电流、绕组热点温度和油温等变压器电热特征参数,提出了基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法。该方法的主要思路为:运用数字孪生技术建立变压器物理实体的数字孪生体,应用多物理场仿真推演数字孪生体在不同运行断面、不同匝间故障条件下的电热特性参数变化规律,选取绕组电流、绕组热点温度等电热特征参数,建立基于孪生体故障样本数据驱动的匝间短路故障诊断模型。以31.5MVA/110kV变压器为例进行了仿真分析,结果表明本文提出的基于电热特性融合分析的匝间短路辨识方法可以实现对变压器早期潜伏性匝间故障的有效诊断,整体准确率达94%。

关键词: 油浸式变压器; 匝间短路; 数字孪生; 故障辨识; 电热特性

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2054

0 引言

油浸式电力变压器是保证电力系统可靠稳定运行的关键设备。统计表明,绕组匝间短路是变压器最为常见的初期故障类型之一^[1]。在实际运行中,变压器过负荷、绕组散热不良或油中进入水分等,都会引起绕组匝间绝缘性能降低,进而导致匝间短路故障^[2-3]。匝间短路会使得绕组端部电流升高,同时伴随绕组振动加剧和局部过热的现象^[4-6]。因此,对变压器匝间短路进行有效的监测和辨识具有重要的应用价值。

目前,已有的绕组匝间短路辨识方法主要依据绕组阻抗、电流或油中溶解气体等信号。文献[7-8]分别通过测量绕组直流电阻和阻抗角的变化来识别匝间短路故障。但是,绕组阻抗和阻抗角无法直接测量,操作分析较为复杂,无法满足实时在线监测的要求。电流是分析绕组匝间短路的常用信号之一。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477100)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51477100).

变压器差动保护基于差动回路电流值的变化来识别变压器内部故障^[9]。文献[10]采用小波变换来分析一次绕组电流以区分变压器内外部故障。文献[11]通过分析中性点电流来诊断匝间短路。文献[12]验证了电流派克变换诊断匝间短路的有效性。当少量匝数发生短路时，绕组端部电流变化不明显，使得基于电流信号辨识方法的灵敏度下降。此外，当变压器一次和二次绕组发生匝间短路时，变压器一次绕组电流均会增加^[4]，因而上述辨识方法也无法实现对匝间短路位置的识别。对于油浸式变压器而言，油中溶解气体也是进行故障诊断的重要依据。变压器瓦斯保护和油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)是通过分析油中气体产生速率或气体成分来发现变压器异常^[13-14]。然而，基于溶解气体信号的诊断结果较为模糊，不能确定故障原因和故障位置。

绕组发生匝间短路故障时，短路线圈上通过的电流很大，此处绕组发热量和温度都会升高。因此，故障处绕组温度是比绕组电流和油中溶解气体变化更为明显的信号。鉴于此，本文综合考虑绕组电流、绕组热点温度、顶层油温等电热特征参数，提出了基于电热特性融合分析的变压器匝间短路故障辨识方法。通过引入一次绕组和二次绕组的绕组热点温度信号，可以实现对匝间短路故障位置的准确诊断。本文所提方法的主要思路为借助于数字孪生(digital twin, DT)技术^[15]建立变压器物理实体的数字孪生体，通过准确传递变压器几何尺寸、材料物理属性和运行参数实现虚拟孪生体与物理实体的同步^[16-18]；利用数字孪生体进行匝间短路故障推演，并基于孪生数据建立变压器匝间短路故障辨识模型。

本文针对油浸式变压器匝间短路问题，建立了电磁、热-流体多物理场耦合模型用于分析匝间故障时变压器的电热特性。在此基础上，提出了基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法。首先，借助 COMSOL 有限元仿真软件建立变压器的数字空间模型；然后，根据变压器实际运行条件，在数字空间内模拟变压器不同运行断面、不同故障条件的电热特性；最后，建立了基于孪生数据驱动的变压器匝间短路辨识模型。通过 110kV 变压器的实例仿真分析，验证了选取电热特征参数进行变压器匝间短路故障辨识的合理性和有效性。

1 基于电磁、热-流体耦合的变压器匝间短路模型

1.1 变压器匝间绝缘等效模型

变压器匝间绝缘材料的电特性可通过一个并

联电路进行等效描述^[10]，如图 1 所示。图 1 中：电阻 R_{eq} 代表电介质材料的损耗部分； C_{eq} 表示电介质的电容； I_R 为电阻 R_{eq} 的电流； I_C 为电容 C_{eq} 的电流。

变压器匝间绝缘性能良好时，电阻 R_{eq} 很大而电流 I_R 几乎为零。随着绝缘性能下降，电阻 R_{eq} 越来越小，电流 I_R 和电阻上能量损耗将会显著增加。当匝间绝缘击穿发生短路时， R_{eq} 快速下降，此时等效并联的容抗支路可忽略不计^[8]。

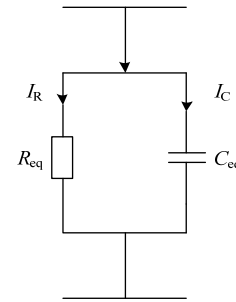
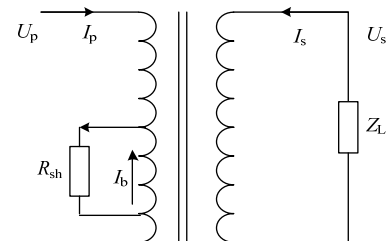


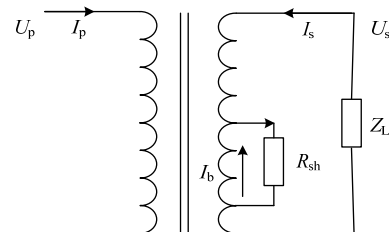
图 1 匝间绝缘材料的并联等效电路
Fig. 1 Parallel equivalent circuit of interturn insulation material

1.2 匝间短路的电磁耦合模型

本文以三相双绕组变压器的一相为例，分析绕组发生匝间短路时的电流变化情况。其故障等效电路如图 2 所示。图 2 中： U_p 、 I_p 为一次绕组相电压、相电流； U_s 、 I_s 为二次绕组相电压、相电流； I_b 为短路线圈上通过的电流； R_{sh} 为前文描述的匝间短路电阻； Z_L 为二次绕组的负荷阻抗。



(a) 一次绕组发生匝间短路故障



(b) 二次绕组发生匝间短路故障

图 2 变压器绕组匝间短路的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of interturn fault in the winding of power transformer

变压器发生匝间短路时，仍满足麦克斯韦方程的全电流定律。其电磁场微分方程为

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

式中： μ 为磁导率； A 为磁矢势； J 为电流密度； D 为电位移矢量。式(1)右侧第一项为传导电流，第二项为位移电流。考虑到故障时位移电流较小，因此式(1)可简化为

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J \quad (2)$$

本文采用 COMSOL 软件搭建变压器电路-磁场的耦合模型。在 COMSOL 中建立磁场和电路接口，在磁场中绕组线圈设置为电路(电流)激励方式，按照图 2(a)和(b)匝间短路等效电路引入电路元件，进而实现变压器匝间短路的场路耦合。调用 PARDISO 求解器求解控制方程(2)，从而得到匝间短路故障时磁场分布和绕组电流波形。

1.3 匝间短路的热-流体耦合模型

铁芯和绕组损耗是变压器内部热量的主要来源。当变压器发生匝间短路时，铁芯磁通分布、绕组电流都将发生变化，因而铁芯和绕组损耗应进行修正计算。

鉴于变压器铁芯损耗正比于最大磁通密度的平方^[19]，因此，匝间短路故障时铁芯损耗可表示为

$$P_{fe1} = P_{fe0} (B_1 / B_0)^2 \quad (3)$$

式中： B_0 、 B_1 为绕组短路前后的铁芯最大磁通密度； P_{fe1} 、 P_{fe0} 为故障前后铁芯单位体积损耗； P_{fe0} 与负载情况无关，可通过查阅变压器资料计算获得。

绕组损耗与绕组电流的平方成正比^[20]，对于故障绕组而言，其匝间短路线圈损耗除考虑电流变化外，还应加上等效故障电阻损耗。

$$P_{w1} = P_{wN} \left(\frac{I_b}{I_N}\right)^2 + \frac{(I_{sh})^2 R_{sh}}{nV} \quad (4)$$

式中： I_b 、 I_{sh} 、 I_N 分别为匝间短路线圈电流、等效故障电阻电流、绕组额定电流； P_{w1} 、 P_{wN} 为匝间短路线圈单位体积损耗、额定电流下绕组单位体积损耗； n 为匝间短路比例； V 为故障绕组体积。

油循环是传递变压器内部热量的主要途径。其流动与分布特性满足质量守恒、动量守恒、能量守恒 3 个控制方程^[21]。

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

$$\rho(\mathbf{u} \times \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \lambda \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\rho C_p \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (7)$$

式中： ρ 为油密度； \mathbf{u} 为油流动速度； p 、 \mathbf{F} 分别为压力和体积力； λ 、 C_p 为油动力粘度、油比热容； T 为油温度； k 为热导率； Q 为热源。

变压器油箱与外界空气主要通过对流交换热量^[22]，该过程满足以下控制方程：

$$q = h(T_b - T_o) \quad (8)$$

式中： q 为热流密度； h 为对流换热系数； T_b 、 T_o 分别为变压器油箱温度、外界空气温度。

本文通过 COMSOL “共轭传热”模块实现热-流体场耦合。根据前文的电磁耦合模型，求解匝间短路故障时的铁芯磁场和绕组电流时域波形，从而获得所需的铁芯最大磁通密度、绕组电流值和短路线圈电流值。基于式(3)(4)计算得到故障时铁芯与绕组损耗值，将其作为热源输入热-流体耦合模型。迭代求解控制方程式(5)–(8)，从而获得绕组、流油的温度分布。通过电流与磁通密度计算结果的传递，实现了变压器匝间短路电磁、热-流体多物理场的耦合。

2 基于电热特性融合分析的匝间短路故障辨识方法

基于电热特性融合分析的变压器匝间短路辨识方法的基本思路为：运用数字孪生技术建立变压器的虚拟实体，将变压器实体的运行参数映射到变压器数字孪生体，在数字孪生体中仿真获得不同运行断面、不同匝间故障下的变压器电热特征参量，并基于上述孪生数据指导变压器物理实体的匝间故障诊断。本文所提辨识方法的具体流程如图 3 所示，主要包括 4 个步骤：1) 建立变压器数字空间模型。2) 仿真变压器正常运行时的电热特性。

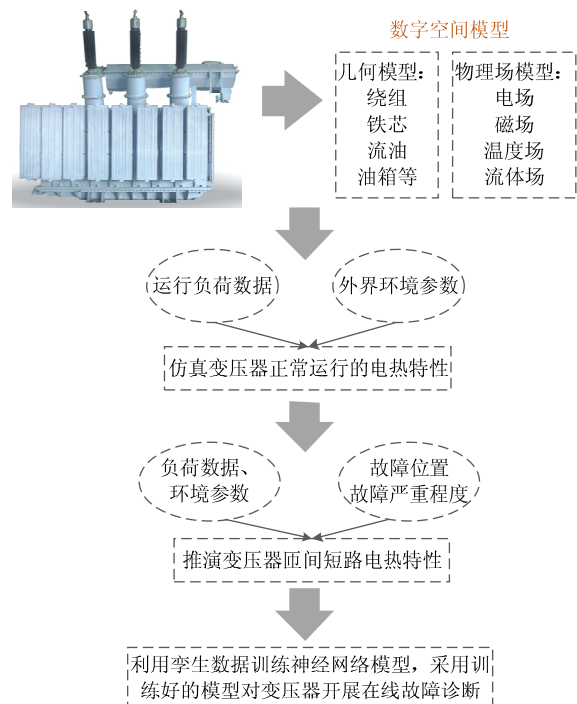


图 3 基于电热特性融合分析的变压器匝间短路辨识方法的流程图

Fig. 3 Flow chart of interturn fault detection in power transformer based on fusion analysis of electrothermal characteristics

3) 推演变压器匝间短路的电热特性。4) 基于孪生数据驱动的匝间短路故障辨识。

2.1 变压器数字空间建模

借助 COMSOL 仿真软件建立变压器数字空间模型，主要包括几何模型和物理场模型。变压器匝间短路电磁、热特性分析的研究对象与建模方式有所差异。电磁耦合模型的研究对象为铁芯和绕组，采用三维模型来进行描述，如图 4(a)所示。不同于电磁模型，热-流体耦合模型的研究对象还包括流油和外部油箱。考虑到变压器正常运行时三相绕组结构的相似性，匝间短路时重点关注故障绕组的热特性，因此可将三相绕组简化为单相绕组进行分析。此外，变压器绕组沿圆周方向呈几何对称分布，可进一步将三维模型简化为二维轴对称模型^[23]，如图 4(b)所示。采用二维模型可充分考虑绕组线圈、内部油道的复杂结构，更适合分析局部匝间短路线圈的热特性。

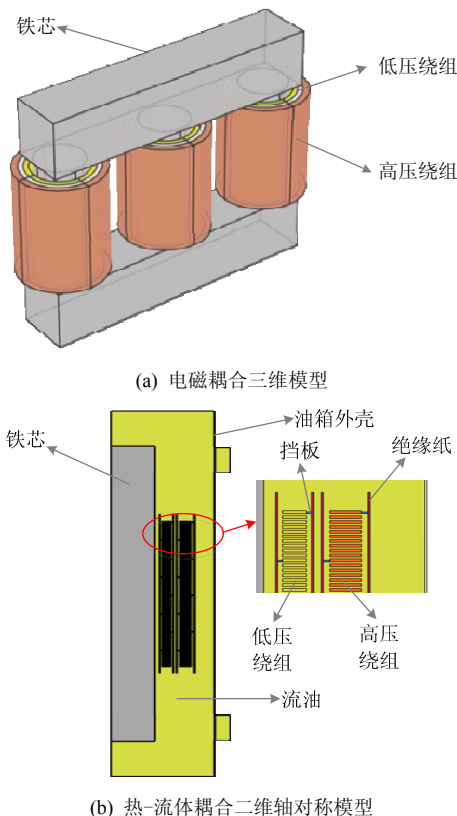


图 4 变压器电磁、热-流体耦合的数字空间模型
Fig. 4 Digital space model of electromagnetic and thermo-fluid coupling of power transformer

2.2 变压器正常运行电热特性的仿真

本文以 31.5MVA/110kV 三相双绕组油浸式电力变压器为研究对象，根据此变压器的历史负荷数据和环境参数确定需要仿真的运行断面。查阅历史量测数据，变压器负载系数 K 最大值为 1.2，最小值为 0.6；外界环境温度 T_a 最高值为 40℃，最低值

为-5℃。基于上述数据，确定的仿真负载系数 K 区间为[0.6, 1.2]，以 0.1 为步长，共产生 7 个负荷断面；温度 T_a 区间为[-5, 40]，以 5 为步长，共产生 10 个温度断面；风速主要影响变压器油箱的对流散热，设置了低风速与高风速 2 个风速断面，取值分别为 2m/s、10m/s，对应的对流换热系数分别为 $4W/(m^2 \cdot K)$ 、 $20W/(m^2 \cdot K)$ ^[24-25]。

随机抽样负荷、温度、风速断面，组合生成 100 个正常运行场景。基于抽取断面设置电磁、热-流体模型的边界条件，模拟不同运行场景下的绕组电流和绕组温度特性。

2.3 匝间短路故障电热特性的仿真推演

考虑到变压器发生匝间短路位置和严重程度的实际情况，本文共设置了 4 种故障位置：高压绕组首端、高压绕组中部和低压绕组首端、低压绕组中部；3 类故障严重程度：轻度故障、中度故障、严重故障，分别对应 1%、3%、5%短路匝数比例。

基于上述故障位置和故障严重程度，定义了 6 种故障类型：高压绕组轻度故障、中度故障、严重故障和低压绕组轻度故障、中度故障、严重故障。随机抽样运行断面、故障位置、故障严重程度生成 6 种故障类型，每种类型各包括 100 个故障场景(首端故障 70 个，中部故障 30 个)，进而根据故障场景设置边界条件进行仿真推演，具体流程如图 5 所示。

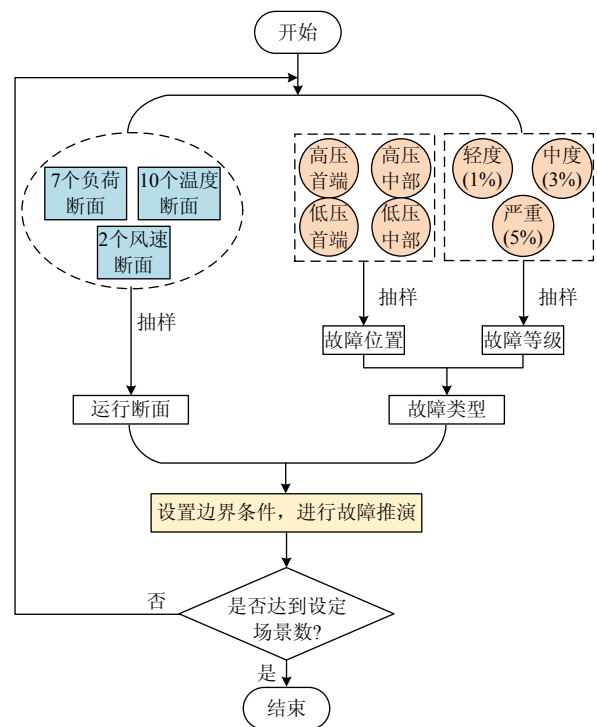


图 5 数字空间内的变压器匝间短路故障推演流程
Fig. 5 Simulation process of interturn fault of power transformer in digital space

2.4 基于数字孪生数据的匝间短路故障辨识

借助数字孪生技术，可以在数字空间中获​​得变压器绕组、流油的温度分布特性。传统的匝间短路诊断方法主要依据绕组电流变化，而忽略了故障时绕组的温度变化。因此，本文从变压器运行环境参数、电流、热特性的角度出发，提取了9个关键特征参量用于匝间短路故障辨识：1) 环境特征参量，包括环境温度、风速。2) 电流特征参量，包括绕组高压侧电流、低压侧电流、高低压侧电流比值。3) 热特征参量，包括顶层油温、底层油温、高压绕组热点温度、低压绕组热点温度。

为了降低9个特征参量绝对数值波动对训练过程的影响，采用式(9)中的归一化方法对每个孪生故障样本 $\mathbf{x}_n=(x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,9})$ 进行处理。

$$\bar{x}_{n,i} = \frac{x_{n,i} - x_{\min,i}}{x_{\max,i} - x_{\min,i}} \quad i=1, 2, \dots, 9 \quad (9)$$

式中： $x_{\max,i}$ 、 $x_{\min,i}$ 分别为第 i 个特征参量的最大值和最小值； $x_{n,i}$ 、 $\bar{x}_{n,i}$ 为孪生样本 \mathbf{x}_n 第 i 个特征参量的原始值和归一化值。

根据前文描述的故障类型，本文的匝间短路故障辨识结果分为7个类型：正常状态、高压严重故障、高压中度故障、高压轻度故障、低压严重故障、低压中度故障和低压轻度故障。相对应的状态编码分别为0、1、2、3、4、5、6。

采用反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)作为变压器匝间短路故障分类器。根据输入特征参量和故障类型的数量，确定BPNN的输入节点为9，输出节点为7。中间设置2个隐藏层，节点个数分别为15、10。隐藏层采用ReLU激活函数。输出层采用Sigmoid函数实现多类型概率计算，以概率最大的类别标签作为匝间短路的故障诊断类型。采用交叉熵损失函数和Adam优化算法计算更新BPNN网络权重，以准确建立输入特征参量与故障类型的映射关系。本文基于五次五折交叉验证法评估所建模型的故障辨识性能：将数字空间孪生的700个样本均分为5份，逐次采用其中的4份作为训练集，剩余的一份作为测试集，并计算在测试集上的平均辨识结果。采用的评价指标包括宏查全率(R_{macro})、宏查准率(P_{macro})、平均准确率(A_{mean})。

$$R_{\text{macro}} = \frac{1}{25} \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^5 R_{j,k} \quad (10)$$

$$P_{\text{macro}} = \frac{1}{25} \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^5 P_{j,k} \quad (11)$$

$$A_{\text{mean}} = \frac{1}{25} \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^5 A_{j,k} \quad (12)$$

式中 $R_{j,k}$ 、 $P_{j,k}$ 、 $A_{j,k}$ 分别为第 j 次第 k 折交叉验证的查全率、查准率和分类正确率。

3 实例仿真分析

3.1 变压器仿真关键参数

本文仿真所用31.5MVA/110kV三相双绕组油浸式电力变压器的具体参数如表1所示。该变压器绕组出线方式为端部出线，绕组为饼式结构。为便于模拟设置的匝间短路故障，本文将高低压绕组各分成100个线饼，即每个线饼对应1%匝数线圈；且沿轴向方向每10个线饼处设置油道挡板，均分为10个分区。基于变压器绕组热点温度的经验分布位置，本文定义绕组端部第5线饼处温度为绕组热点温度。

表1 油浸式电力变压器的参数
Table 1 Parameters of oil-immersed power transformer under simulation

参数及单位	数值	参数及单位	数值
额定容量/MVA	31.5	高压绕组内径/mm	870
额定电压/kV	110/35	高压绕组外径/mm	1020
联结组别	YNd11	低压绕组内径/mm	650
频率/Hz	50	低压绕组外径/mm	760
冷却方式	ONAF	高压绕组高度/mm	1200
高低压绕组匝数	725/400	高压绕组高度/mm	1200

变压器绕组、铁芯、挡板等材料参数如表2所示。考虑到变压器油密度、比热容、动力粘度等参数受温度影响显著，故将其设置为温度的函数^[20]。

匝间短路电阻值对仿真结果具有重要影响。当变压器匝间绝缘破坏后，电阻值会逐渐降低，同时引起绕组端部电流升高。参考文献[11, 26]中匝间短路电阻取值，本文将匝间短路接触电阻设置为1Ω，以此来量化匝间绝缘的破坏程度。电磁模型与热-流体耦合模型的边界条件，根据运行断面与故障类型进行相应设定。电磁模型绕组和铁芯分别采用扫描与自由四面体进行细化网格划分，求解器的相对容差与绝对容差分别设置为0.01和0.001。热-流体耦合模型采用自由三角形进行网格划分，最小网格

表2 变压器材料的物理属性参数
Table 2 Physical property parameters of materials in transformer

物性参数	密度/(kg/m ³)	比热/(J/(kg·K))	导热系数/(W/(m·K))	动力粘度/(Pa·s)
绕组	8770	385	400	—
铁芯	7550	446	5.19	—
绝缘纸	1400	243	0.454	—
挡板	1150	2093	0.25	—
油	1055.4-0.587-6.41×10 ⁻⁵ T ²	807.16+3.587T	0.12-8.05×10 ⁻⁵ T	11.71×e ^(-0.002T)

注：T为变压器油的温度。

尺寸为 2mm，求解器的相对容差设置为 0.001。

3.2 正常运行仿真结果

外界环境温度 $T_a=20^\circ\text{C}$ 、低风速、负载系数 $K=1$ 时，仿真所得的绕组电流和绕组温度分布如图 6 所示。当变压器三相负荷平衡时，三相绕组温度分布差异不大，因此用单相绕组进行仿真展示。由图 6 可知，高低压绕组均沿轴向方向呈逐渐上升的趋势，2 个油道挡板间绕组线圈温度呈先上升后下降的趋势；主要由于挡板附近的油流速较快，此处线

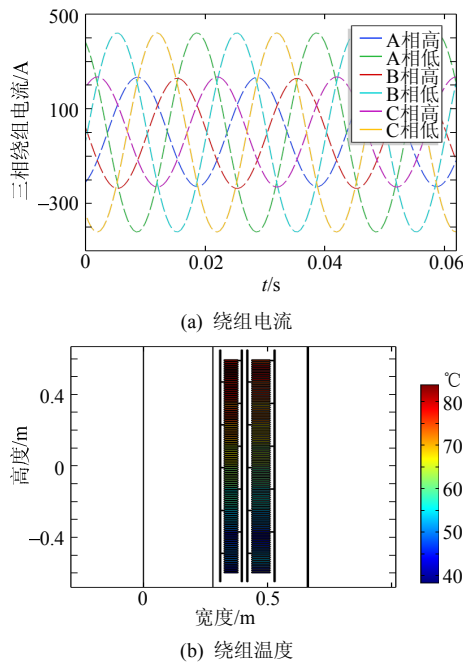


图 6 $T_a=20^\circ\text{C}$ 、低风速、 $K=1$ 条件下的绕组电流和温度
Fig. 6 Winding current and temperature under the condition of $T_a=20^\circ\text{C}$, low wind speed and $K=1$

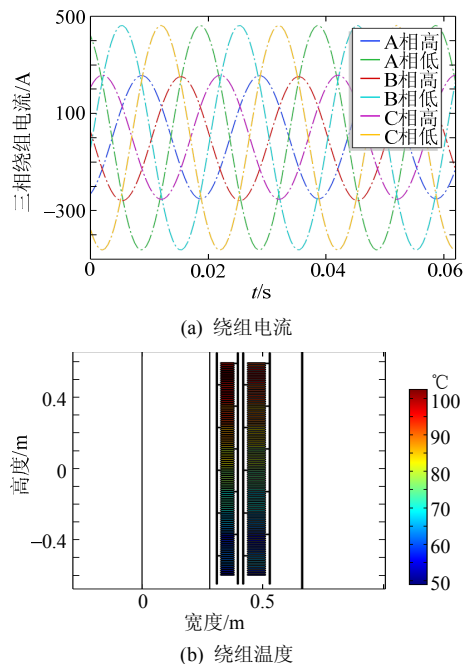


图 7 $T_a=30^\circ\text{C}$ 、低风速、 $K=1.1$ 条件下的绕组电流和温度
Fig. 7 Winding current and temperature under the condition of $T_a=30^\circ\text{C}$, low wind speed and $K=1.1$

圈的散热相对充分。高低压绕组热点温度分别为 79.3 、 83.4°C 。

$T_a=30^\circ\text{C}$ 、低风速、 $K=1.1$ 时，所得的绕组电流与绕组温度分布如图 7 所示。由图 7 可知，此时绕组温度分布特性与图 6 相似，但是绕组温度整体有所上升。主要原因为：1) 负载系数升高，导致高低压绕组电流升高、绕组消耗热量增加。2) 外界温度升高，进入油箱的油温度升高，油的散热能力降低，使得热稳态时绕组温度较高。

为了验证仿真结果的准确性，将绕组热点温度的仿真值与 GB/T 1094.7—2008 导则^[27]的计算值进行了对比分析。2 种运行断面下变压器绕组热点温度的仿真值与计算值见表 3。可知，热点温度的仿真值与导则计算值较为近似，相对误差不大于 5%。对比分析结果验证了数字空间仿真参数取值的有效性和合理性，本文所建数字孪生体能够真实反映变压器物理实体的电热特性。

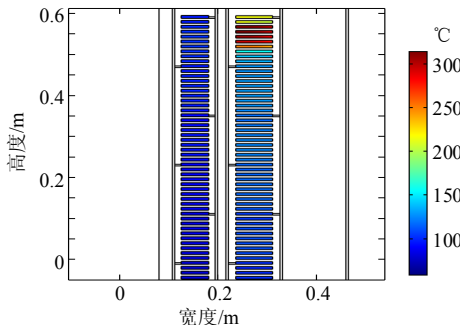
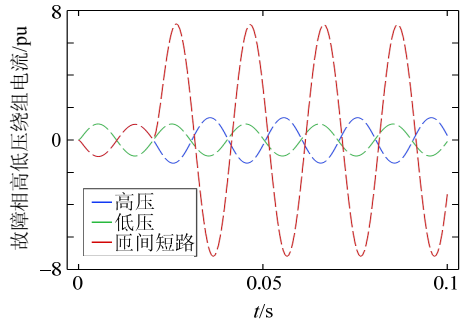
表 3 绕组热点温度仿真值与导则计算值的比较
Table 3 Comparison of the simulated value of hot spot temperature and the calculated value based on the guide

条件	仿真值/ $^\circ\text{C}$	计算值/ $^\circ\text{C}$	相对误差/%
$T_a=20^\circ\text{C}$, 高压绕组	79.3	75.6	4.9
$K=1$ 低压绕组	83.4	79.5	4.9
$T_a=30^\circ\text{C}$, 高压绕组	97.3	93.9	3.6
$K=1.1$ 低压绕组	102.0	97.8	4.3

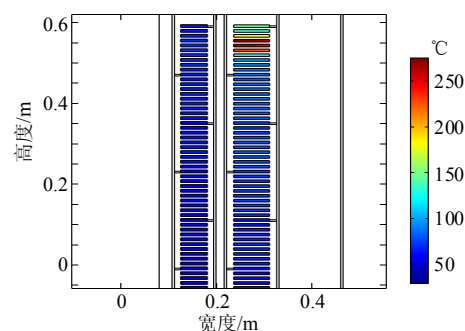
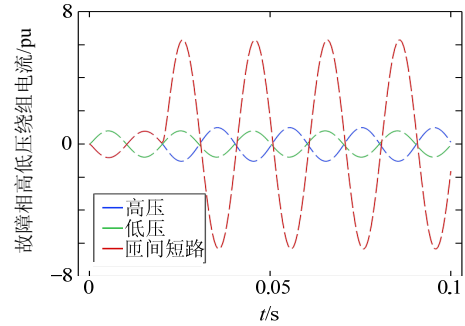
3.3 匝间短路仿真结果

本文以变压器 B 相绕组为例进行匝间短路仿真推演。 $T_a=40^\circ\text{C}$ 、低风速、 $K=1$ 运行断面下，变压器高压绕组首端发生 5%匝间短路的绕组电流与温度分布如图 8(a)所示。A、C 相绕组电流在故障前后无明显变化，故仅分析故障相电流与绕组温度变化。由图 8(a)可知，高压绕组发生故障后，短路线圈上产生反向电流，幅值由 1.0pu 增加至 7.2pu ；为抵消短路电流产生的反向磁通，高压绕组电流由 1.0pu 升高至 1.4pu ；故障前后低压侧绕组电流几乎未变化。发生匝间短路处的线圈温度显著升高，绕组热点温度为 300.8°C 。相同运行断面下，高压绕组中部发生 5%匝间短路的绕组电流与温度见图 8(b)。与图 8(a)对比可知，中部发生匝间短路时，高压侧电流变化更为明显，短路线圈电流上升至 7.8pu 。从图 8(b)可以看出，此时高压绕组故障处温度可升高至 320°C ；故障线圈距离绕组端部有一定距离，因而热点测量处温度有所降低为 238.1°C 。

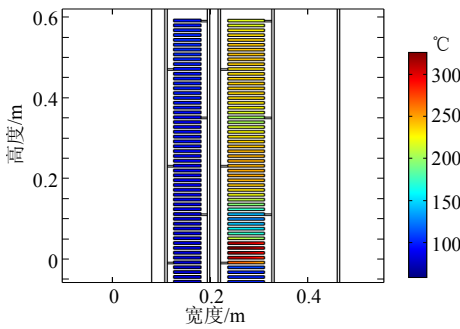
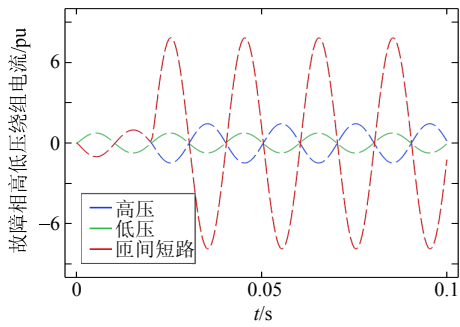
$T_a=10^\circ\text{C}$ 、高风速、 $K=0.8$ 运行断面下，变压器高压、低压绕组首端发生 3%匝间短路的电流与绕组温度分布如图 9(a)和 9(b)所示。高低压绕组发生



(a) 高压绕组首端故障(上图: 绕组电流, 下图: 绕组温度)



(a) 高压绕组首端故障(上图: 绕组电流, 下图: 绕组温度)

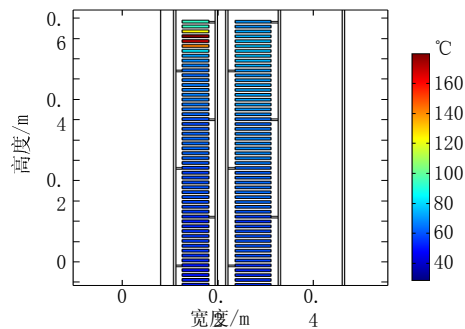
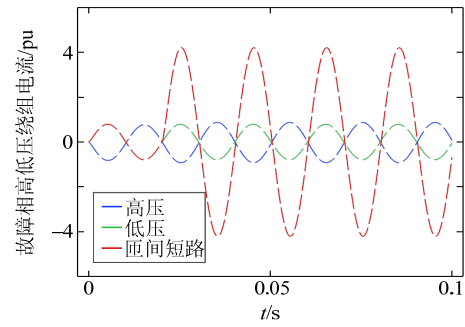


(b) 高压绕组中部故障(上图: 绕组电流, 下图: 绕组温度)

图8 $T_a=40^\circ\text{C}$ 、低风速、 $K=1$ 条件下绕组 5%匝间短路时的绕组电流和温度

Fig. 8 Winding current and temperature with 5% interturn fault in winding under the condition of $T_a=40^\circ\text{C}$, low wind speed and $K=1$

匝间短路时, 均会引起高压端电流增加, 分别由 0.8pu 增加至 1.0、0.9pu; 故障线圈上的电流增加显著, 分别为 6.3、4.3pu。由图 9 可知, 变压器故障线圈上温升较为明显, 由于高压侧发生故障时线圈上电流较高, 所以高压绕组故障时高压绕组热点温度稍高于低压绕组故障时低压绕组热点温度, 分别为 262.5°C 、 171.2°C 。分析可知, 高低压绕组匝间短路均使得高压绕组电流升高, 仅依据绕组电流信



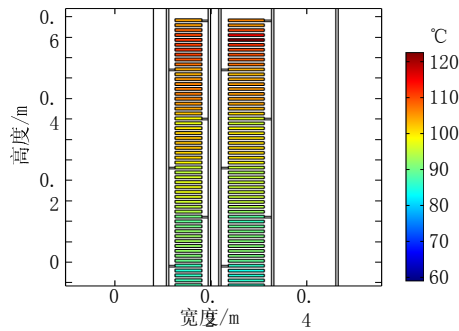
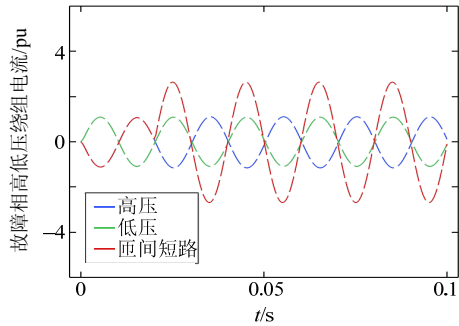
(b) 低压绕组首端故障(上图: 绕组电流, 下图: 绕组温度)

图9 $T_a=10^\circ\text{C}$ 、高风速、 $K=0.8$ 条件下绕组 3%匝间短路时的绕组电流和温度

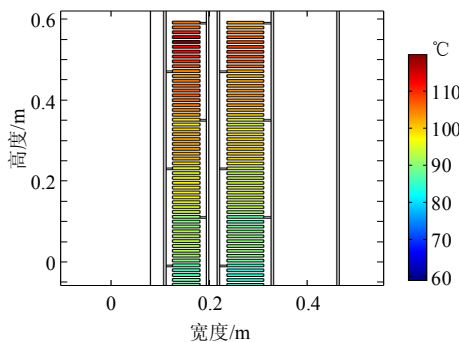
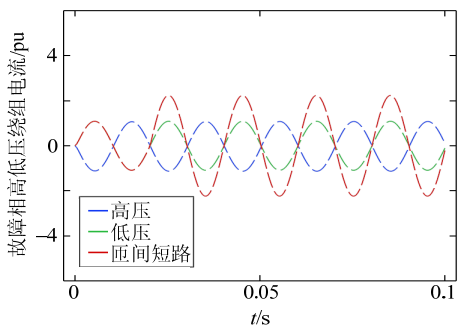
Fig. 9 Winding current and temperature with 3% interturn fault in winding under the condition of $T_a=10^\circ\text{C}$, high wind speed and $K=0.8$

号无法区分故障位置, 而依靠高低压绕组热点温度变化可诊断出匝间短路的位置信息。

$T_a=40^\circ\text{C}$ 、低风速、 $K=1.1$ 运行断面下, 变压器高压、低压绕组首端发生 1%匝间短路的绕组电流和绕组温度见图 10。2 种故障场景下, 高低侧电流均未发生明显变化, 仍然维持在 1.1pu 左右, 匝间短路线圈上的电流分别由 1.1pu 升高至 2.7、2.2pu。由于故障发生在绕组热点附近, 将引起绕组热点温



(a) 高压绕组首端故障(上图：绕组电流，下图：绕组温度)



(b) 低压绕组首端故障(上图：绕组电流，下图：绕组温度)

图 10 $T_a=40^\circ\text{C}$ 、低风速、 $K=1.1$ 条件下绕组 1%匝间短路时的绕组电流和温度

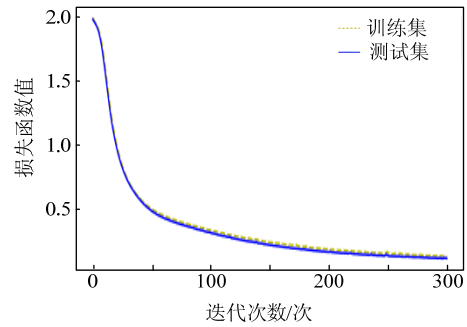
Fig. 10 Winding current and temperature with 1% interturn fault in winding under the condition of $T_a=40^\circ\text{C}$, low wind speed and $K=1.1$

度的升高，故障时测得的绕组热点温度分别为 122.3、119.8 $^\circ\text{C}$ 。分析可知，发生轻度匝间短路故障时，绕组电流变化不明显，仅借助于电流波形已不能实现故障辨识，此时引入绕组温度特征后将有助于识别轻度匝间短路故障。

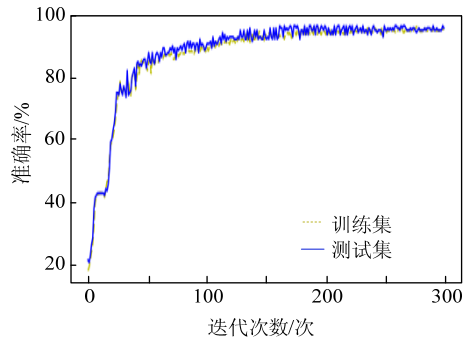
3.4 基于孪生数据的故障辨识结果分析

基于孪生数据训练、测试 BPNN 模型，五次五

折交叉验证的平均损失函数值收敛曲线和平均准确率收敛曲线如图 11(a)和(b)所示。由图 11(a)可知，随着迭代次数的增加，训练集与测试集的损失函数值曲线逐渐趋于平稳，且两者之间差距较小，表明所建 BPNN 网络具有较好的拟合能力。由图 11(b)可知，测试集的准确率曲线逐渐稳定在 94%左右，并在训练集曲线附近小幅波动，表明 BPNN 具有较为稳定的匝间短路故障辨识能力。



(a) 平均损失函数值迭代收敛曲线



(b) 平均准确率迭代收敛曲线

图 11 训练集与测试集的迭代收敛曲线对比

Fig. 11 Comparison of iterative convergence curves of training dataset and test dataset

本文所建 BPNN 模型的匝间短路故障辨识结果如表 4 所示。此外，表 4 也展示了采用环境参量和电流参量 5 个特性参量进行故障辨识的结果。

表 4 基于交叉验证的故障辨识结果

Table 4 Fault identification results based on cross-validation

故障类型	类型编码	电热特性融合分析		电流信号	
		$R_{macro}/\%$	$P_{macro}/\%$	$R_{macro}/\%$	$P_{macro}/\%$
正常状态	0	82.4	81.5	66.7	68.2
高压严重故障	1	100	98.6	100	100
高压中度故障	2	98.6	100	88.9	87.9
高压轻度故障	3	99.7	95.5	68.9	86.0
低压严重故障	4	100	100	87.8	89.5
低压中度故障	5	100	100	100	100
低压轻度故障	6	77.8	86.7	63.3	51.9
$A_{mean}/\%$		94.0		81.9	

对比可知，本文电热特性融合分析方法在高压严重故障、中度故障和低压严重故障、中度故障的 R_{macro} 、 P_{macro} 指标都比较高。主要是因为：发生严重匝间短路故障时，高压侧绕组电流和热点温度变化

都比较显著,同时绕组故障产生的热量还会引起顶层油温的升高,故借助于提取的电流和热特性指标可以很好地辨识严重故障。发生中度故障时,电流、绕组热点温度变化较严重故障时有所降低,但是仍可很好地区分中度故障与其他类型故障。仅采用绕组电流信号,发生高压中度故障与低压严重故障分类混淆,使两者正确分类率均低于90%。主要原因为高压中度故障和低压严重故障均使得高压绕组侧电流升高,且两者引起电流变化程度相似,故造成匝间短路故障位置的错误辨识,错误率为12.2%。

由表4可知,本文所提方法对1%少量匝数短路故障具有较好的辨识效果:高压轻度故障的分类正确率为99.7%,低压轻度故障的分类正确率为77.8%,两者平均准确率为88.8%。仅采用电流特征,正常状态、高压轻度故障、低压轻度故障发生分类混淆,三者的正确分类率均低于70%。由前文分析可知,1%绕组匝间短路故障前后绕组电流变化不显著,造成电流指标的辨识作用受限,因而发生正常状态样本与1%轻度匝间短路故障样本的分类混淆。

基于电热特性融合分析的匝间短路故障辨识方法的整体准确率为94%,比传统基于电流信号的辨识方法提高了12.1%。此外,本文方法对1%轻度故障的辨识准确率较电流信号方法提高了22.7%,因此,本文所提方法非常适用于发现变压器少量匝数的潜伏性早期故障。

4 结论

本文以油浸式电力变压器为研究对象,采用数字孪生技术模拟推演了匝间短路故障时变压器的电热特性,并选取关键电热参数建立了变压器匝间短路故障辨识模型,通过仿真分析初步验证了基于电热特性进行变压器故障辨识的有效性,主要结论有:

1) 基于数字孪生技术建立变压器物理实体的数字孪生体。对比分析了数字孪生体绕组热点温度的仿真值与经典导则计算值,两者误差在5%以内。结果表明所建的数字孪生体可以真实反映变压器实体的运行特性。

2) 仿真推演数字孪生体不同匝间短路故障的电热特性。当匝间短路比例为5%时,变压器绕组端部电流变化明显,绕组热点温度显著升高。匝间短路比例为1%时,端部电流变化不明显,绕组热点温度稍有增加。可知,变压器绕组匝间短路故障会体现在端部电流和绕组温度上,且后者更为敏感。

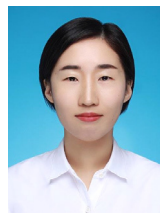
3) 基于绕组电流和绕组热点温度等电热特征参数建立了匝间短路故障辨识模型,其辨识准确率可达94%,明显优于基于电流信号的诊断方法;且对1%少量匝数短路故障具有较好的诊断效果,平均准确率为88.8%。

4) 本文主要采用数字孪生体的虚拟孪生数据验证了所提方法的可行性和有效性,后期将开展进一步的试验验证工作。

参考文献

- [1] BARZEGARAN M R, MIRZAIE M. Detecting the position of winding short circuit faults in transformer using high frequency analysis[J]. *European Journal of Scientific Research*, 2008, 23(4): 645-659.
- [2] BUTLER K L, KUFORJI A. Experimental results from short-circuit faults on a distribution transformer[C]// 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2001, 299-306.
- [3] FAIZ J, SOLEIMANI M. Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods a review[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(2): 1239-1248.
- [4] 潘超, 石文鑫, 孟涛. 单相变压器匝间短路电磁特性研究[J]. *高电压技术*, 2020, 46(5): 1839-1856.
PAN Chao, SHI Wenxin, MENG Tao. Study on electromagnetic characteristics of interturn short circuit of single-phase transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5): 1839-1856(in Chinese).
- [5] 钱国超, 王丰华, 王劲菁, 等. 大型变压器绕组振动频响特性的试验研究[J]. *高电压技术*, 2018, 44(3): 821-826.
QIAN Guochao, WANG Fenghua, WANG Shaojing, et al. Experimental research of vibration frequency response features of transformer winding[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(3): 821-826(in Chinese).
- [6] SOLEIMANI M, FAIZ J, NASAB P S, et al. Temperature measuring based decision making prognostic approach in electric power transformers winding failures[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020.
- [7] LIANG Z, ZHEN X, NIU S. DC resistance measurement for low voltage side winding of large-scale transformer[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2007, 27(6): 27-30.
- [8] ASADI N, KELK H M. Modeling, analysis, and detection of internal winding faults in power transformers[J]. *IEEE transactions on Power Delivery*, 2015, 30(6): 2419-2426.
- [9] 熊小伏, 王婧, 陈星田. 一种基于电流比变化量的变压器匝间短路保护方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(9): 112-115.
XIONG Xiaofu, WANG Qiang, CHEN Xingtian. A protection method of transformer inter-turn short circuit based on the variation of current ratio[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(9): 112-115(in Chinese).
- [10] BUTLER-PURRY K L, BAGRIYANIK M. Characterization of transients in transformers using discrete wavelet transforms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 648-656.
- [11] BALLAL M S, SURYAWANSHI H M, MISHRA M K, et al. Interturn faults detection of transformers by diagnosis of neutral current[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 31(3): 1096-1105.

- [12] OLIVEIRA L M R, CARDOSO A J M, CRUZ S M A. Power transformers winding fault diagnosis by the on-load exciting current extended park's vector approach[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(6): 1206-1214.
- [13] 代杰杰, 宋辉, 杨祎, 等. 基于油中气体分析的变压器故障诊断 ReLU-DBN 方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(2): 658-664.
DAI Jiejie, SONG Hui, YANG Yi, et al. Dissolved gas analysis of insulating oil for power transformer fault diagnosis based on ReLU-DBN[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(2): 658-664(in Chinese).
- [14] 崔宇, 侯慧娟, 苏磊, 等. 考虑不平衡案例样本的电力变压器故障诊断方法[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 33-41.
CUI Yu, HOU Huijuan, SU Lei, et al. Fault diagnosis method for power transformer considering imbalanced class distribution[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 33-41(in Chinese).
- [15] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017: 85-113.
- [16] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. *电网技术*, 2020, 44(6): 2009-2019.
HE Xing, AI Qian, ZHU Tianyi, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(6): 2009-2019(in Chinese).
- [17] ZHOU M, YAN J, FENG D. Digital twin framework and its application to power grid online analysis[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, 5(3): 391-398.
- [18] MILTON M, DE LA O C, GINN H L, et al. Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(9): 9852-9866.
- [19] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [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(in Chinese).
- [21] SANTISTEBAN A, DELGADO F, ORTIZ A, et al. Numerical analysis of the hot-spot temperature of a power transformer with alternative dielectric liquids[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(5): 3226-3235.
- [22] DAS A K, CHATTERJEE S. Finite element method-based modelling of flow rate and temperature distribution in an oil-filled disc-type winding transformer using COMSOL multiphysics[J]. *IET Electric Power Applications*, 2017, 11(4): 664-673.
- [23] 刘凤英, 郭振华, 景崇友, 等. 油浸式变压器绕组热点温度的计算与影响因素的研究[J]. *变压器*, 2014, 51(6): 22-26.
LIU Fengying, GUO Zhenhua, JING Chongyou, et al. Research on influence factors and calculation of winding hot spot temperature of oil-immersed transformer[J]. *Transformer*, 2014, 51(6): 22-26(in Chinese).
- [24] SHENG G, HOU H, JIANG X, et al. A novel association rule mining method of big data for power transformers state parameters based on probabilistic graph model[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 9(2): 695-702.
- [25] 骆小满, 阮江军, 邓永清, 等. 基于多物理场计算和模糊神经网络算法的变压器热点温度反演[J]. *高电压技术*, 2020, 46(3): 860-867.
LUO Xiaoman, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al. Transformer hot-spot temperature inversion based on multi-physics calculation and fuzzy neural network algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(3): 860-867(in Chinese).
- [26] ETUMI A A, ANAYI F. The application of correlation technique in detecting internal and external faults in three-phase transformer and saturation of current transformer[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(5): 2131-2139.
- [27] 电力变压器 第 7 部分: 油浸式电力变压器负载导则: GB/T 1094.7—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.



张立静

在线出版日期: 2021-01-15。

收稿日期: 2020-11-27。

作者简介:

张立静(1990), 女, 博士研究生, 研究方向为电力设备状态在线监测及故障诊断、数字孪生技术在电力设备健康管理中的应用, E-mail: lijingzhang1874@163.com;

盛戈皞(1974), 男, 博士, 教授, 通信作者, 研究方向为输变电设备状态监测及其智能化, E-mail: shenghe@sjtu.edu.cn。

(责任编辑 徐梅)