

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.02.012

基于改进热路模型和 PINN 的变压器直流偏磁温升预测及绝缘寿命评估

郑玉周, 杜金龙, 武永强, 明明, 裴晓东, 郝秀平

(内蒙古电力(集团)有限责任公司锡林郭勒供电分公司, 内蒙古 锡林郭勒 026099)

摘要: 变压器直流偏磁导致铁心半波饱和与谐波等效应, 造成变压器铁心、绕组及金属构件损耗增大及温升异常, 折损变压器绝缘寿命, 对直流偏磁造成绕组热点温升的准确评估能够为电力部门有效评估变压器绝缘寿命提供重要参考, 然而实际工程中往往存在难以获得准确的变压器内部电气特性参数的问题。为此, 提出一种基于改进热路模型和内嵌物理信息神经网络(physics-informed neural network, PINN)的变压器直流偏磁温升预测方法, 首先, 分析变压器直流偏磁温升机理, 在此基础上构建考虑直流偏磁热量增生效应的改进热路模型; 其次, 为了解决直流偏磁影响下传热系数未知以及受温升影响存在的不确定问题, 先利用物理信息神经网络反演方法对改进热路模型参数进行估计, 再利用 PINN 对热路模型求解进而对变压器直流偏磁绕组温升进行预测, 最后, 利用实测数据对所提模型进行了验证。结果表明, 采用本文方法所预测的变压器直流偏磁温升误差不超过 15%。基于该模型, 对直流偏磁影响下的绝缘寿命进行了评估, 结果显示变压器偏磁直流水平超过 50 A 会对其变压器热寿命造成的损耗不容忽视, 采用变压器隔值措施能够有效避免变压器温升异常及其带来的热寿命损失。本文所提出的基于 PINN 的温升计算模型在变压器直流偏磁温升实时监测、负载能力评估等方面提供了一种有效方法。

关键词: 变压器; 直流偏磁; 改进热路模型; PINN; 反演; 预测

Prediction of DC-bias Temperature Rise in Transformer and Insulation Life Assessment Based on an Improved Thermal Circuit Model and PINN

ZHENG Yuzhou, DU Jinlong, WU Yongqiang, MING Ming, PEI Xiaodong, HAO Xiuping

(Xilingol Power Supply Branch of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Inner Mongolia Xilinguole 026099, China)

Abstract: DC-bias of transformer leads to such effects as half wave saturation and harmonis of iron core, resulting in increased loss and abnormal temperature rise of iron core, winding and metal components of transformer and damage of insulation life of transformer. The accurate assessment of temperature rise of winding hot spot due to DC-bias can provide important reference for effective assessment of insulation life of transformer for power sector. However, it is often difficult to obtain accurate internal electrical characteristic parameters of transformer in practical engineering. For this reason, a prediction method of transformer DC-bias temperature rise based on improved thermal circuit model and embedded physical information neural network (PINN) is proposed. Firstly, the transformer DC-bias temperature rise mechanism is analyzed and, on this basis, an improved thermal circuit model considering DC-bias heat accretion effect is constructed. Then, in order to solve the problem that the heat transfer coefficient under the influence of DC-bias is unknown and the temperature rise is uncertain, the parameters of the improved thermal circuit model are estimated by using the inversion method of physical information neural network (PINN), and then the thermal circuit model is solved by using pinn to predict the temperature rise of the DC-bias

收稿日期: 2025-12-15; 修回日期: 2025-12-26

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司 2025 年度科技项目 (2025-4-6)。

Project Supported by Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd. 2025 Science and Technology Projects (2025-4-6)。

winding of the transformer. Finally, the proposed model is verified by using the measured data. The results show that the error of the predicted DC-bias temperature rise of the transformer is less than 15% by using the method proposed in this paper. Based on this model, the insulation life under the influence of convective magnetic bias is assessed. The results show that the loss of thermal life caused by transformer bias DC-level exceeding 50 A cannot be ignored, and the abnormal temperature rise of transformer and the loss of thermal life can be effectively avoided by using transformer isolation measures. The proposed temperature rise calculation model based on PINN has provided an effective method for real-time monitoring of transformer DC-bias temperature rise and load capacity assessment.

Keywords: transformer; DC-bias; improved the heat circuit model; PINN; inversion; prediction

0 引言

高压直流输电、地磁暴或者高空核爆会造成中性点直接接地系统中交流变压器铁心绕组中流过准直流,进而造成铁心半波饱和和发生直流偏磁现象。此时大量磁通泄漏到铁心之外,通过绕组、连接板和油箱壁构件部分和空气间隙或绝缘油等闭合,从而产生额外的涡流^[1-2],造成损耗的同时增加这些部位的温升,对变压器造成不利影响,如温升造成变压器油中产生气体,或者由于热降解而加速绝缘材料的老化;如涡流对油箱壁的温升效应也会导致内部油漆剥落,污染物释放到油中,降低绝缘油的绝缘性能和介电强度;再如涡流及谐波流经绕组后造成温升损坏甚至会击穿绕组间绝缘使变压器本体损坏,引发系统故障风险,等等。其中,变压器绕组温升在一定程度上决定着变压器的绝缘老化水平,对变压器的安全稳定运行具有重大意义,准确预测变压器直流偏磁下绕组温升能够为电力运维部门预警提供必要的参考。

总体来说,获取变压器直流偏磁绕组温升的方法有实测法和计算法两大类。文献[3]基于定制的单相四柱式变压器试验模型,进行直流偏磁下的温升试验,计算得到直流偏磁下结构件的温度分布,为变压器直流偏磁分布计算方面的研究奠定了重要的基础与参考。不过,由于变压器运行期间对其内部绕组温度测量方法常常受限于现场实施条件而具有难度^[4-7],而且直流偏磁现象主要发生在超高压和特高压大容量输电系统,所涉及的变压器电压等级高、体积大、成本高,现场试验开展难度较大,为此相关研究成果偏少。Marti 等人利用仿真的方法模拟出了两台不同容量和电压单相变压器在不同偏磁直流水平下,绕组热点和金属构件温升的响应^[8],并指出由于特定的设计和构造差异,具有相同铁心结构的变压器也可能对 GIC 事件表现出不同的热响应。文献[9]则分析了 500 kV 变压器在负载电流

和直流偏磁同时作用下的温升效应,指出环境温度对变压器温升的影响。IEEE Std C57.163™—2023 提供了变压器直流偏磁的耐受阈值标准,规范了变压器直流偏磁热效应计算流程,提出了电力变压器耐受 GIC 能力的评估方法,给出了部分变压器的直流偏磁温升计算结果,指出对直流偏磁情况下的变压器温升幅度是变压器设计、绕组布置、绕组热容量等因素的函数,可为检验变压器计算模型及其结果的准确性提供依据。

变压器直流偏磁下温升计算的关键与难点在于准确建立损耗计算模型与温度计算模型。目前,对直流偏磁下变压器绕组热点温度的计算研究偏少,不过变压器正常运行时绕组温升测量和计算方面的研究已经有一定的进展,可为本文提供研究基础。正常运行时变压器绕组温升计算方法主要分为 4 类:多物理场建模计算方法、人工智能算法、经验公式法和热路模型法。多物理场建模计算变压器温升时常常采用有限元和有限体积法结合的方法,构建变压器内部电磁场-流体-温度场的耦合模型,分析变压器不同工况下的温度特性^[10]。这种方法需要建立变压器内部流体场精细模型,模型与机理复杂且工作计算量大、耗时长,虽然文献[11-12]对此法加以改进,但若获得较高精度计算结果,仍需要较为精细的剖分。文献[13]基于磁场-电路耦合的方法计算直流偏磁时变压器构件温升分布,建立了换流变压器三维温度场模型,但磁热流耦合计算需要建立较精细的流场模型,在液-固交界面液体侧的边界层内划分多层网格,模型设置复杂,计算量大。随着人工智能算法的发展,将其用于变压器温度方面的预测成果也日渐丰富。文献[14]将支持向量回归应用于 10 kV 变压器温升反演。文献[15]则将支持向量机加以改进并应用于变压器实时温升的预测。文献[16-17]将广义神经网络和支持向量机等方法应用在变压器热点温度预测,取得了较好的效果。文献[18-19]将多物理场仿真和神经网络相结合应用于变压器热点

温升预测,充分利用了二者的优点,取得了较好的预测精度。IEEE Std 57.91—2011 和 GB/T 1094.7—2008 (对应于 IEC 60076-7:2005)等标准给出了变压器绕组热点温度计算的公式,并提供了关于运行变压器绕组或构件热点温升限值,为计算变压器温升提供了理论依据^[20]。文献[21]在考虑温度对油动力黏度、绕组损耗的影响情况下,分别针对顶油对环境的温升和热点对顶油的温升建立热路模型。文献[22]则增加了变压器油箱壁的热传导、油箱外侧的对流和辐射等热传递过程的影响,进一步完善了热路等值模型。文献[23]则考虑变压器三相不平衡运行对绕组产热和散热的影响,提出了另一种改进的三相热路模型。上述经验热模型和热路等值模型对应的微分方程可采用离散差分方程进行快速计算,能够满足实时在线监测的要求,因此两模型在实际中得到广泛应用,可为变压器直流偏磁下的绕组温升计算与预测提供参考。

鉴于热路等值模型在线估算变压器温升的适应性,考虑变压器直流偏磁铁心饱和和漏磁增多、损耗增大及其导致绕组热点温度增升的效应,对现有的变压器温升热路模型加以改进。同时,为了解决直流偏磁时采用常数导热系数计算温度场的方法不能反映温度等对导热系数的影响、计算误差较大的问题,再者,直流偏磁时,热路模型中的热传导参数往往存在非线性,与变压器额定负荷条件下存在不同,而且有些变压器内部电气特性参数难以获得,为此引入物理信息神经网络(physics-informed neural network, PINN)进行处理。PINN 的核心思想是将物理定律(以偏微分方程的形式呈现)作为约束融入到神经网络的训练过程中,通过将控制方程、边界条件等物理参数先验嵌入神经网络,特别是用于解决与偏微分方程(partial differential equation, PDE)相关的各种问题,包括方程求解、参数反演、模型发现、控制与优化等,大大减少传统数据驱动模型对样本规模及样本质量的依赖程度,可以提升求解复杂模型的效率和精度。PINN 在正、逆两种问题的解决方面都取得了较好的应用,其中 PINN 对正向问题的求解是通过已知的初始条件和边界条件,利用内嵌于神经网络中的物理参数求解系统的输出;PINN 对逆向问题的求解则是通过观测到的结果或数据,对物理模型中的未知输入或参数进行估计。在流体力学、结构科学、能源系统等领域已经得到了广泛应用^[24-32]。

为此,提出一种结合改进热路模型和物理信息神经网络的变压器直流偏磁绕组温升预测模型,在

考虑变压器直流偏磁谐波增生和涡流效应的基础上,改进热路模型还将环境温度、不同负载的影响也纳入绕组温升模型中,为解决变压器热路模型参数的不确定问题,利用 PINN 对变压器热路模型中的导热系数进行反演,在获得参数估计的基础上再利用 PINN 对变压器绕组温升加以预测,最后再加以验证,以期预测变压器寿命和输电能力提供重要依据。

1 框架和思路

1.1 变压器直流偏磁温升热路模型

变压器直流偏磁时造成的温升异常原因主要与铁心磁通不对称性、谐波分量增加及损耗增加有关。当变压器运行时,上述温升效应与变压器负载时的损耗造成的温升叠加一同促成变压器的发热,这一过程的影响因素分析如图 1 所示。

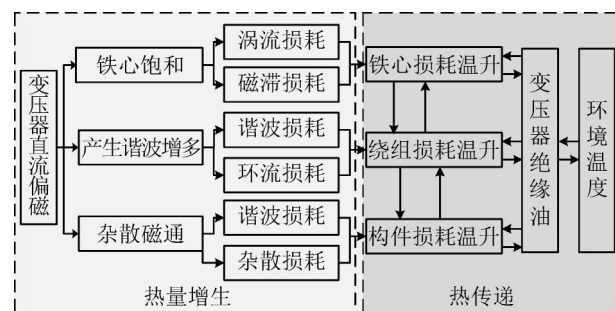


图1 变压器直流偏磁机理及温升影响因素

Fig. 1 DC-bias mechanism in transformers and factors affecting temperature rise

变压器半波饱和后,铁心磁通曲线整体上移,导致与直流磁通方向相同的半周波磁感应强度增大,方向相反的半周波磁感应强度减小,形成半波饱和状态。直流偏磁程度越深,磁化电流越大,铁心磁畴在交变磁场中反复排列摩擦生热以及铁心内感应的环流通过电阻产生焦耳热也就越多,从而造成铁心温升异常。采用半波平均法可以计算直流偏磁下的电力变压器的铁心损耗,公式为

$$P'_0 = \frac{1}{2} K_{p_0} G_{Fe} (P_+ + P_-) \quad (1)$$

式中: P'_0 为空载损耗; $K_{p_0} = 1.15$, 为空载损耗附加系数; G_{Fe} 为铁心总质量; P_+ 与 P_- 分别为变压器正、负半周期内单质量铁心损耗。

负载时,铁心半波饱和后还会有因谐波引起的杂散损耗,计算公式为

$$P_{EC} = F_{HL-EC} P_{EC-N} \quad (2)$$

式中: F_{HL-EC} 为杂散谐波损耗因子,可以根据 IEEE Std C57.110:2008 标准确定; P_{EC-N} 为变压器正常运行时的铁心损耗。因此变压器直流偏磁时铁心损

耗总量为

$$P_{\text{Core}} = P_{\text{EC}} + P_0' \quad (3)$$

从式(3)可知,变压器铁心损耗除了考虑负载外,还受到变压器直流偏磁程度以及衍生造成的谐波频率的影响。

变压器直流偏磁伴随的谐波通过变压器一次侧和二次绕组后,会在导体电阻中产生损耗^[33-35],考虑到变压器绕组在 h 次谐波电流作用下的电阻值会发生改变,为此将其定义为绕组基频电流电阻值的 h 倍,直流偏磁时变压器绕组总损耗可记为

$$P_{\text{Wnd}} = I_{\text{DC}}^2 R_{\text{DC}} + F_{\text{HL_wnd}} \left[P_{\text{Wnd0}} + \sum_{h=1}^{h_{\text{max}}} h(I_h)^2 R_{\text{aco}} \right] \quad (4)$$

式中: I_{DC} 、 R_{DC} 分别为流经绕组的直流及绕组直流电阻值; $F_{\text{HL_wnd}}$ 为谐波损耗因子,可以根据 IEEE Std C57.110—2008 标准确定; P_{Wnd0} 为负载损耗; $h(I_h)$ 为各次谐波幅值; R_{aco} 为基频交流电阻值,可以利用变压器铭牌参数估算出来。可见随着偏磁直流水平的增高和铁心饱和的深入,谐波增多时,绕组损耗增大越多。

铁心饱和后,漏磁通会在油箱以及金属结构件中形成闭合回路,进而产生杂散损耗,同时谐波造成的杂散磁通也会引起结构件趋肤效应损耗,这些损耗全部转换为热量,可以表示为

$$P_{\text{str}} = K_{\text{str_DC}} + K_{\text{str_H}} F_{\text{HL_str}} \quad (5)$$

式中: $K_{\text{str_DC}}$ 为因磁通偏置流经构件而产生的损耗; $K_{\text{str_H}}$ 为谐波造成的杂散损耗。随着铁心饱和的深入,漏磁增多时变压器金属性各部位结构件损耗增大^[36-37],结构件损耗增大且不同位置出的增大幅度不一,这很可能导致变压器金属结构件上出现局部热点。

1.2 变压器直流偏磁温升改进热路模型

根据上述分析,变压器直流偏磁包括线圈、铁心以及金属结构件等部件的损耗,这些损耗会产生热量;当变压器负载运行时各部件也产生损耗及热量,根据热电类比理论,上述两部分热量共同在各部件内循环并通过表面与绝缘油外部环境进行热传递,最终促成各部件温升效应。本文在变压器正常运行的基础上,增加考虑直流偏磁损耗温升效应,并考虑外环境的影响后的温升效应,基于传热学和热电类比理论构建改进热路模型如图2所示。图2中受控电压源 q 为变压器各部分内部生热源, W 由各部分损耗转化而来,包括负载、直流偏磁两部分影响;热电阻 R ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)以及热电容 C ($\text{J} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)均为集总参数,由变压器铁心、绕组及构件的物理性质及其在直流偏磁下的特性参数决定, $\theta(^{\circ}\text{C})$ 为待求取温

度,可利用基尔霍夫电压、电流定律求得。

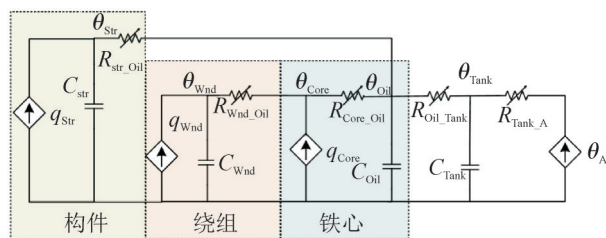


图2 变压器直流偏磁改进热路模型
Fig. 2 Improved thermal circuit model for transformer DC-bias

图2所示的改进热路模型各模块的热传递公式为

$$\begin{cases} q_{\text{str}}(I_{\text{DC}}) = C_{\text{str}} \frac{d\theta_{\text{str}}}{dt} + \frac{\theta_{\text{str}} - \theta_{\text{oil}}}{R_{\text{str_oil}}} \\ q_{\text{wnd}}(I_{\text{DC}}) = C_{\text{wnd}} \frac{d\theta_{\text{wnd}}}{dt} + \frac{\theta_{\text{wnd}} - \theta_{\text{core}}}{R_{\text{wnd_oil}}} \\ q_{\text{core}}(I_{\text{DC}}) = \frac{\theta_{\text{core}} - \theta_{\text{oil}}}{R_{\text{core_oil}}} - \frac{\theta_{\text{wnd}} - \theta_{\text{core}}}{R_{\text{wnd_oil}}} \\ 0 = C_{\text{oil}} \frac{d\theta_{\text{oil}}}{dt} + \frac{\theta_{\text{oil}} - \theta_{\text{core}}}{R_{\text{oil_tank}}} - \frac{\theta_{\text{core}} - \theta_{\text{oil}}}{R_{\text{core_oil}}} - \frac{\theta_{\text{str}} - \theta_{\text{oil}}}{R_{\text{str_oil}}} \\ 0 = C_{\text{tank}} \frac{d\theta_{\text{tank}}}{dt} + \frac{\theta_{\text{tank}} - \theta_{\text{a}}}{R_{\text{tank_a}}} - \frac{\theta_{\text{oil}} - \theta_{\text{tank}}}{R_{\text{oil_tank}}} - \frac{\theta_{\text{str}} - \theta_{\text{oil}}}{R_{\text{str_oil}}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $q_{\text{str}}(I_{\text{DC}})$ 、 $q_{\text{wnd}}(I_{\text{DC}})$ 、 $q_{\text{core}}(I_{\text{DC}})$ 分别为变压器构件发热量、绕组发热量、铁心发热量, q/W ,分别由变压器的金属构件部分、绕组和铁心的损耗转化而来,是关于偏磁直流的函数; θ_{a} 为变压器周围环境热量, $^{\circ}\text{C}$; $R_{\text{str_oil}}$ 、 $R_{\text{wnd_oil}}$ 、 $R_{\text{core_oil}}$ 、 $R_{\text{oil_tank}}$ 、 $R_{\text{tank_a}}$ 分别为直流偏磁时变压器构件对绝缘油、绕组对绝缘油、铁心对绝缘油、绝缘油对油箱内壁和油箱箱体对周围空气之间的传导热电阻, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$; C_{str} 、 C_{core} 、 C_{wnd} 、 C_{TOP} 、 C_{tank} 分别为直流偏磁时变压器构件、铁心、绕组、绝缘油及油箱壁的热容, $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ 。

2 基于PINN的改进热路模型参数估计与求解

变压器在直流偏磁状态下衍生谐波会造成传导热电阻的非线性,因而改进热路模型中等效热电阻阻值会因谐波的影响而存在波动,不同的谐波含量下热电阻等效值也不同,采用常数求解式(6)存在较大误差,为此需要在确定不同直流偏磁水平下的模型参数基础上再进行求解,借助PINN对温升方程组进行正反演求解^[38-42]。可准确预测各部位温升。

2.1 基于PINN的改进热路模型参数反演

文献[41]指出,变压器铁心发热所产生的热量会对油温产生直接的影响,而对绕组热点温度则不

会产生直接影响,同样,日照辐射也不会对热点温度产生直接影响,因此在式(6)中,绕组的热源仅有变压器的负载损耗和直流偏磁谐波损耗。再考虑到直流偏磁影响下构件温升主要由于漏磁通环流损耗,和绕组损耗没有关系,为此可对式(6)中方程解耦。据此可构建方程误差,在此基础利用PINN反演网络对参数进行反向求解,见图3。

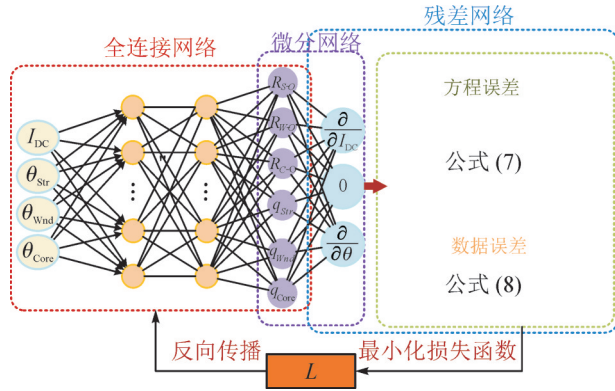


图3 基于PINN的热路模型参数反演
Fig. 3 Parameter inversion of thermal circuit model based on PINN

图3中,PINN的输入分别为直流样本序列 I_{DC} 和对应的变压器各部位温升序列 θ_{Str} 、 θ_{Wnd} 、 θ_{Core} ,输出为改进热路模型参数 R_{S-O} 、 R_{W-O} 、 R_{C-O} 、 q_{Str} 、 q_{Wnd} 、 q_{Core} 。残差网络中的方程误差公式为

$$\begin{cases} e_{Str} = q_{Str} - C_{Str} \frac{d\theta_{Str}}{dt} - \frac{\theta_{Str} - \theta_{Oil}}{R_{Str_Oil}} \\ e_{Wnd} = q_{Wnd} - C_{Wnd} \frac{d\theta_{Wnd}}{dt} - \frac{\theta_{Wnd} - \theta_{Core}}{R_{Wnd_Oil}} \\ e_{Core} = q_{Core} - \frac{\theta_{Core} - \theta_{Oil}}{R_{Core_Oil}} + \frac{\theta_{Wnd} - \theta_{Core}}{R_{Wnd_Oil}} \\ e_{Oil} = C_{Oil} \frac{d\theta_{Oil}}{dt} + \frac{\theta_{Oil} - \theta_{Core}}{R_{Oil_Tank}} - \frac{\theta_{Core} - \theta_{Oil}}{R_{Core_Oil}} - \frac{\theta_{Str} - \theta_{Oil}}{R_{Str_Oil}} \\ e_{Tank} = C_{Tank} \frac{d\theta_{Tank}}{dt} + \frac{\theta_{Tank} - \theta_{Core}}{R_{Tank_A}} - \frac{\theta_{Oil} - \theta_{Tank}}{R_{Oil_Tank}} - \frac{\theta_{Str} - \theta_{Oil}}{R_{Str_Oil}} \end{cases} \quad (7)$$

数据误差公式为

$$L_e = |\hat{\theta}_{Str} - \theta_{Str}|^2 + |\hat{\theta}_{Wnd} - \theta_{Wnd}|^2 + |\hat{\theta}_{Core} - \theta_{Core}|^2 \quad (8)$$

式中, $\hat{\theta}_{Str}$ 、 $\hat{\theta}_{Wnd}$ 、 $\hat{\theta}_{Core}$ 分别为变压器金属构件、绕组和铁心温度的估计值。最小损失函数由方程误差和数据误差构成,公式为

$$L = \min (\lambda_e L_e + \lambda_E L_E) \quad (9)$$

式中: λ_e 、 λ_E 分别为方程误差和数据误差系数; $L_E = |\sum e_*|$,其中 e_* 为式(7)中方程误差,下标*代表了不同的误差来源。本文选用双曲正切函数作为PINN激活函数,结合变压器具体参数和已有直流

水平下的构件、绕组等部分的温升实测数据,利用PINN对改进热路模型参数进行估计。

2.2 基于PINN的变压器绕组温升预测

在得到热路模型参数的基础上,利用PINN对热路模型进行正演求解,从而预测变压器的温升。以式(6)为基础构建关于偏磁直流水平的偏微分方程、初始条件和边界条件,具体如下:

$$\begin{cases} u(0, T) = \varphi(0, T) \\ u(I_{DC}, 0) = g(I_{DC}, 0) \\ \lambda_i \frac{\partial u(I_{DC}, T)}{\partial I_{DC}} + f_i(I_{DC}, T) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\varphi(0, T)$ 为热路模型在偏磁直流水平 $I_{DC}=0$ 时的初始条件; $g(I_{DC}, 0)$ 为边界条件; $f_i(I_{DC}, T)$ 为式(6)中方程组,下标为方程序号; λ_i 为对应方程的系数。将上述条件嵌入PINN网络,对温升进行求解,构建预测模型,见图4。

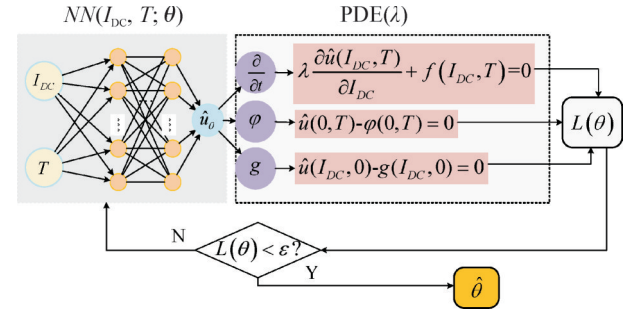


图4 基于PINN的变压器直流偏磁温升预测模型
Fig. 4 Transformer DC-bias and temperature rise prediction model based on PINN

预测模型主要由神经网络 $NN(I_{DC}, T; \theta)$ 和自动微分网络PDE构成。图中, $L(\theta)$ 为预测模型损失函数,定义如下:

$$L(\theta) = \alpha \text{MSE}_i + \beta \text{MSE}_b + \gamma \text{MSE}_f + \sum_{i=1}^5 \frac{1}{\lambda_i} R |f_{\theta}(I_{DC}, T)| \quad (11)$$

式中:第1部分为模型误差,由3部分构成, α 、 β 、 γ 为各部分权重系数,目的是为了平衡各损失项的比重。

$$\begin{cases} \text{MSE}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} |\hat{\mu}_i(0, T; \theta) - \varphi(I_{DCi}, T)|^2 \\ \text{MSE}_b = \frac{1}{N_b} \sum_{b=1}^{N_b} |\hat{\mu}_b(I_{DCb}, 0; \theta) - g(I_{DCb}, 0)|^2 \\ \text{MSE}_f = \frac{1}{N_f} \sum_{f=1}^{N_f} \left| \lambda_i - \frac{\partial \mu_i(I_{DCi}^f, T_i^f; \theta)}{\partial I_{DC}} + f_{\theta}(I_{DCi}^f, T_i^f) \right|^2 \end{cases} \quad (12)$$

损失函数 $L(\theta)$ 第2部分为控制方程温升误差,设置最小正数误差 ϵ ,当满足预期的误差精度时,模型可以预测出指定条件下的变压器温升。模型工

作流程如下:

第1步,随机生成 PINN 模型输入的初始化参数,参数由3部分构成,初始条件下的采样点 $(I_{DG}^{initial},0)$ 、边界条件下的采样点 (I_{DG}^b,T^b) 和方程中的配点 (I_{DG}^f,T^f) 。

第2步,上述输入经过预测模型中的神经网络部分迭代后,生成一组接近准确解的 $\mu(I_{DG},T;\theta)$,再送入自动微分网络对数据进行处理并带入初始条件、边界条件和控制方程。

第3步,利用第2步计算结果,计算模型误差和方程控制误差之和 $L(\theta)$,并与所设置的误差精度加以对比,如果精度满足,则对变压器温升加以预测,否则,将迭代值带入到控制方程,返回第2步继续求解,直至满足精度要求,结束并预测温升。

3 基于涡流自驱技术的直流偏磁温升抑制方法

偏磁直流水平和作用时间会影响到变压器温升及其造成的热寿命,降低直流水平和缩短其作用时间能够避免变压器温升过热及其带来的负面效果。在变压器中性点与大地之间串接电容隔直装置可以有效隔离偏磁直流。不过考虑到隔直电容串接于中性点会改变变压器零序参数,系统发生接地故障时流过变压器中性点电流急剧增大,不仅会损坏隔直装置还有可能造成系统的不稳定,为此装置加装了旁路开关。旁路开关借助涡流自驱技术,能够快速在系统故障时将隔直电容旁路,并同时 will 将变压器中性点直接接地,保护隔直装置的同时也不影响系统的接地保护装置的正常工作。装置基本原理如图5所示。图中PL涡流自驱旁路系统为整个涡流自驱型直流偏磁抑制装置的核心部件。

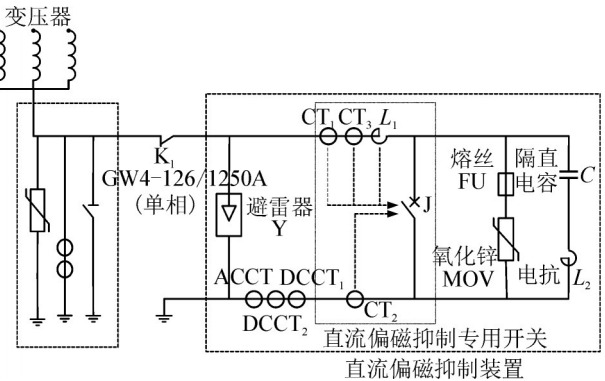


图5 直流偏磁抑制装置一次系统图
Fig. 5 Primary system diagram of DC-bias suppression device

图5中虚线框内为基于涡流驱动旁路的直流

偏磁隔值装置,其中J为基于涡流自驱技术的快速涡流断路器,在正常状态下断路器保持分闸状态。 L_1 为断路器的合闸驱动线圈,与断路器灭弧室串联接入一次系统。避雷器Y可以预防雷击对设备的伤害。熔丝FU和高能氧化锌MOV串联后与电容器组C并联,利用氧化锌的非线性特性,实现在短路故障期间对电容器组C两端电压的钳制。 K_1 合闸后直流偏磁抑制装置投入系统,系统发生短路时,短路故障电流流经 L_1 、C和 L_2 , L_1 作为合闸驱动线圈,利用短路故障电流在J操作机构中的金属盘上产生涡流斥力效应,再通过连杆直接作用于直流偏磁专用开关J的真空灭弧室动触头上,快速闭合直流偏磁专用开关J,旁路隔直电容器组,承载系统短路故障电流,合闸时间小于20ms,设计短路动作电流2.5kA。当系统对短路故障完成处置后,流经驱动线圈(L_1)的电流回到正常幅值,合闸的涡流斥力相应的消失,J重新自动恢复至分闸状态,装置再次进入隔直状态。

采用图5的隔直装置,能够避免偏磁直流流经变压器绕组,进而减小偏磁造成的变压器温升异常极其不利后果。

4 算例分析

4.1 模型验证

选取文献[8]中的变压器模型A验证论文方法。模型A为单相组式变压器,额定电压为345/24.5kV,容量为750MVA,取模型A绕组的时间常数为2.5min,构件的时间常数为12min,取时长30min时,因此直流偏磁造成的温升数据如表1所示。

表1 模型A各部分随偏磁直流的温升数据
Table 1 Temperature rise data of each part of model A with DC-bias

I_{DG}/A	0	20	30	50
I_{DG}/A	0	20	30	50
构件温升/ $^{\circ}C$	0	10	18	30

为了获取更多的输入数据,将表1所示的温升与偏磁直流数据进行线性插值,构建图2所示的热路模型。各部分的热容参数按照 $C=\rho cV$ 计算,其中 c 为材料的比热容, $J/(kg\cdot^{\circ}C)$, ρ 为材料的密度, kg/m^3 ; V 为材料的单位长度体积, m^3 。变压器绝缘油的特性会受温度的影响,具体见表2。

表2 变压器绝缘油特性
Table 2 Insulating oil characteristics of transformer

温度/ $^{\circ}C$	5	25	45	65	85	100
$\rho_{oil}/(kg/m^3)$	902	890	867	855	844	835
$c/[J/(kg\cdot^{\circ}C)]$	1785	1870	1995	2040	2120	2180

模型 A 其他部分的密度分别为 $\rho_{\text{Str}}=25\,000\text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_{\text{Wnd}}=19\,310\text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_{\text{Core}}=19\,310\text{ kg/m}^3$ 。取变压器模型 A 的各部分温升系数 $\Delta\theta_{\text{Str}}=26.5/^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta\theta_{\text{Wnd}}=43.9/^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta\theta_{\text{Oil}}=2.5/^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta\theta_{\text{Tank}}=42.5/^{\circ}\text{C}$ 。

假定模型 A 的冷却方式为强迫油循环风冷,油流量不会因温度变化发生实质性影响,忽略油粘度增加会导致较低的散热效率及其对导热电阻阻值的影响,将模型 A 的各部分传导热电阻 $R_{\text{Str_Oil}}$ 、 $R_{\text{Wnd_Oil}}$ 、 $R_{\text{Core_Oil}}$ 、 $R_{\text{Oil_Tank}}$ 、 $R_{\text{Tank_A}}$ 设为待求参数。基于上述数据,展开验证。

取 $K_{p_0}=0.33$ 、 $F_{\text{HL-EC}}=4$ 、 $F_{\text{HL_wnd}}=0.6$ 、 $K_{\text{str_H}}=0.12$ 、 $K_{\text{str_DC}}=0.14$,利用插值数据,计算变压器在不同偏磁直流水平下的损耗,结果如图 6 所示。

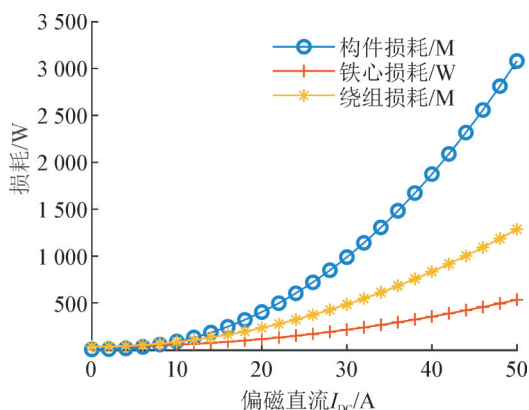


图6 变压器直流偏磁各部分损耗计算结果
Fig. 6 Calculation results of losses in various parts of transformer DC-bias

按照 2.1 小节所述搭建的 PINN 反演参数模型,将上述温升参数、变压器偏磁直流以及热路模型中的各参数输入反演模型,求解热路模型中的热电阻参数,反复迭代多次得到 $R_{\text{Str_Oil}}$ 、 $R_{\text{Wnd_Oil}}$ 、 $R_{\text{Core_Oil}}$ 、 $R_{\text{Oil_Tank}}$ 、 $R_{\text{Tank_A}}$,结果见图 7 所示。

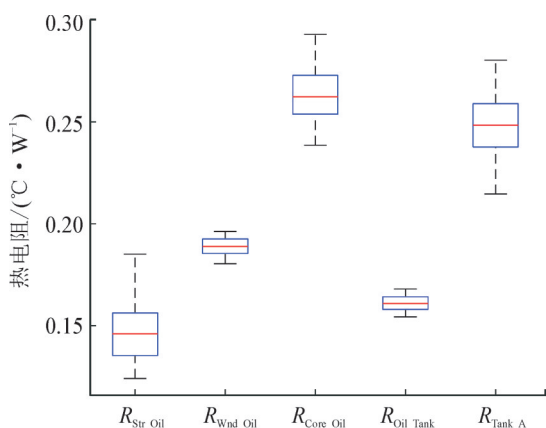


图7 改进热路模型参数估计结果
Fig. 7 Prediction results of improved thermal circuit model parameters

在上述热电阻参数估计的基础上,利用 2.2 节搭建的 PINN 正演模型,预测构件和绕组相对油温的温升数据,并将预测结果与表 1 插值结果加以对比,结果如图 8 所示。

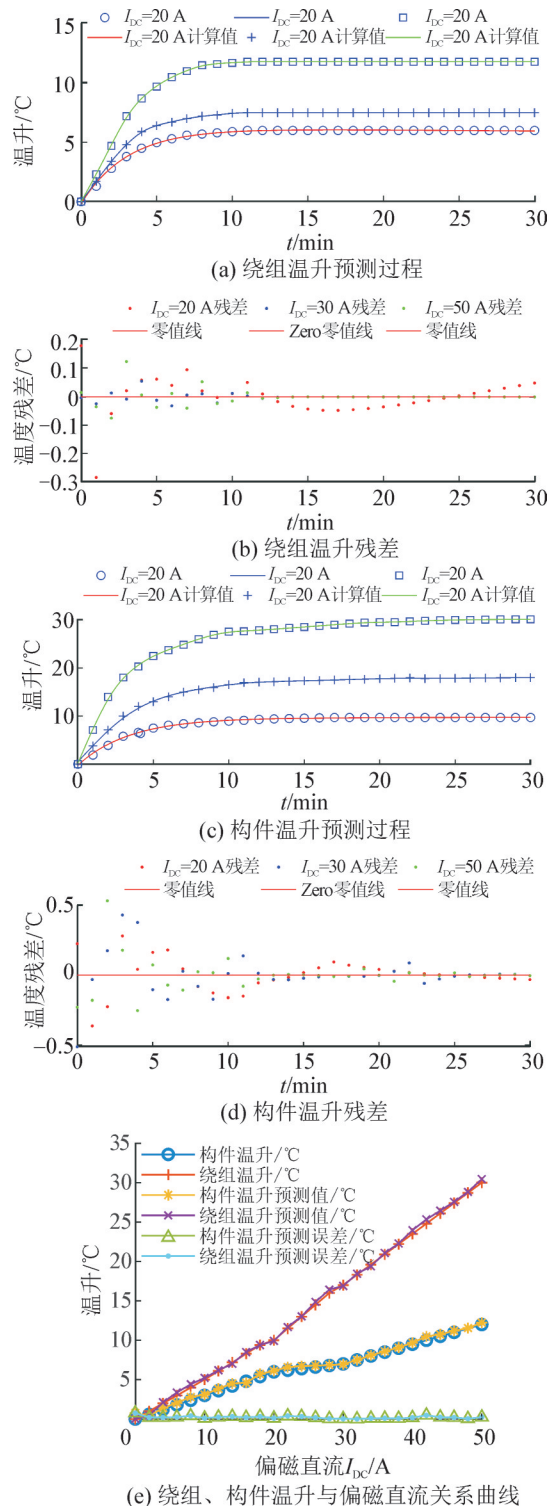


图8 变压器直流偏磁温升预测结果
Fig. 8 Transformer DC-bias temperature rise prediction results

图 8 可见,采用 PINN 对热路模型参数进行反演并在此基础上可以较为精确的预测出变压器构

件和绕组的温升,与文献[8]对比,绕组温升预测结果的残差不超过 0.3℃,相对误差不超过 12%,构件温升预测结果的残差不超过 0.5℃,相对误差不超过 15%,结果表明,采用论文方法对改进热路模型参数进行估计、并进而预测得到了验证。

4.2 模型应用

考虑不同负载率影响作用,取环境温度为 40℃ 时,不通偏磁直流、不通负载时变压器绕组温升预测结果如图 9 所示。

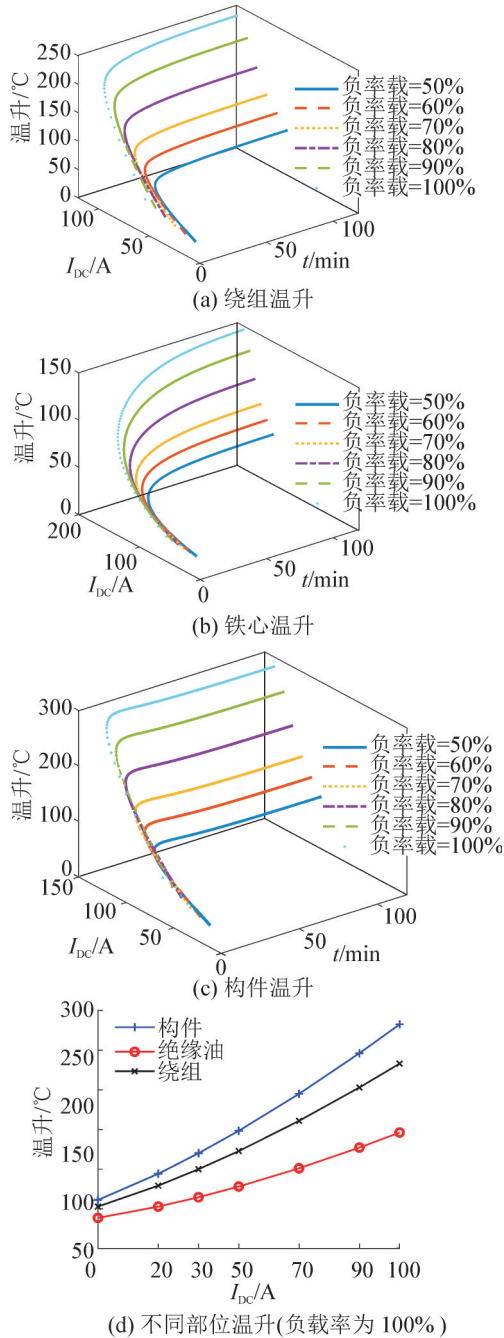


图9 不同负载时直流偏磁温升预测结果
Fig. 9 Temperature rise prediction results of DC-bias at different loads

图 9 可见偏磁直流和变压器负载共同的作用下,

变压器不同部位温升预测结果。绕组温升在负载率为 80%、偏磁直流不超过 50 A 时,变压器温升已经超过了 150℃。

图 10 给出了负载率为 50% 时,受环境和偏磁直流的影响,变压器各部分温升的预测结果。

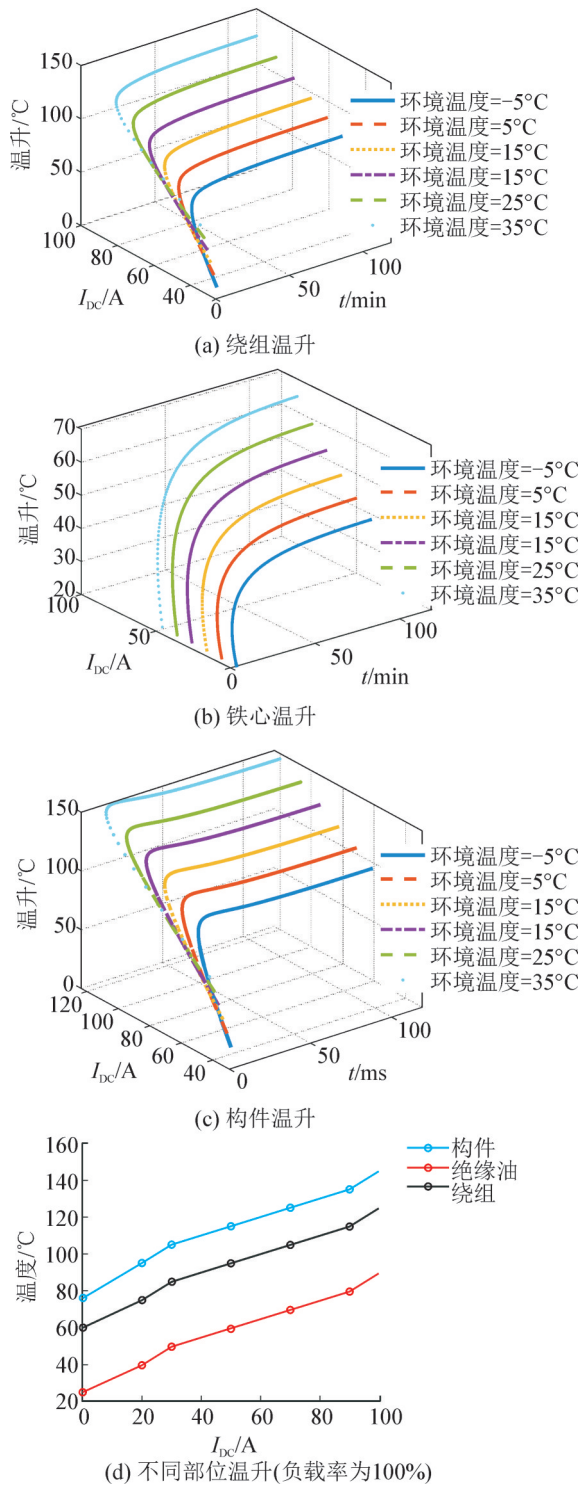


图10 不同环境温度时直流偏磁温升预测结果
Fig. 10 Temperature rise prediction results of DC-bias at different ambient temperatures

图 10 可见,半载情况下,偏磁直流 100 A 时,环

环境温度 35℃是,变压器绕组温升接近 120℃,超过了 A 级绝缘的油浸式变压器绕组限值。

满载情况下,取环境温度 20℃时,不同水平偏磁直流造成的温升异常预测结果对变压器模型 A 的寿命损耗进行预测,多次迭代评估后结果如图 11 所示。

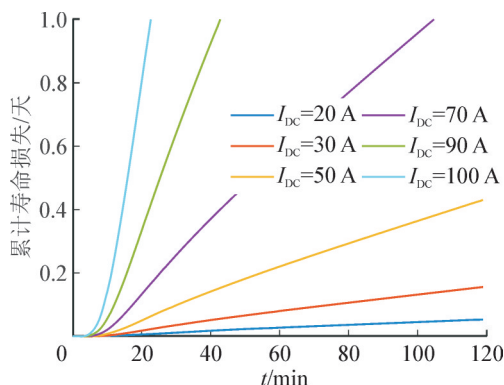


图 11 变压器直流偏磁影响下的寿命损耗评估结果
Fig. 11 Lifetime loss assessment results under the influence of DC-bias in transformers

图 11 给出变压器直流偏磁后对模型 A 的寿命损耗估计的结果,从图 11 可以看出,偏磁直流水平越高对模型 A 造成的热寿命损失越大,70 A 水平直流且持续作用时间为 105 min 后对模型 A 寿命损失可达一天,而 90 A 和 100 A 的偏磁持续作用分别为 45 min 和 23 min 后,就对变压器模型 A 的寿命损失高达一天。可见偏磁直流对变压器寿命影响不容忽视。

采用第 3 节的直流偏磁隔直装置,对直流输电单极运行造成的交流变压器直流偏磁进行抑制,可以完全消除偏磁造成的不利影响。

5 结语

提出了一种变压器直流偏磁温升预测方法,考虑变压器直流偏磁造成的绕组、构件和铁心部分的损耗,并将环境温度纳入后,构建了变压器直流偏磁改进热路模型;为了解决变压器内部特性参数信息不全、且存在温升影响后参数不确定的问题,利用 PINN 反演功能对改进热路模型参数进行反演,在此基础上后再对改进热路模型加以求解。利用变压器温升数据对所提方法进行了验证,结果表明,论文方法在变压器内部参数特性不确定的情况下,仍然能够可以准确预测不同偏磁直流作用下的各部分温升,并能够为估计变压器寿命折损提供重要的理论基础。

参考文献

[1] 韩雪峰,刘磊,杨定乾,等. 串联助磁直流电阻测试接线下载换变铁心磁通分析[J]. 变压器,2025,62(3):1-4.

HAN Xuefeng, LIU Lei, YANG Dingqian, et al. Magnetic flux analysis of iron core in converter transformer which under serial magnetization DC resistance test[J]. Transformer, 2025, 62(3):1-12.

[2] 王新兵,刘冬迪,燕蕾,等. 天然酯油纸绝缘混油特性试验分析研究[J]. 变压器,2025,62(8):45-50.

WANG Xinbing, LIU Dongdi, YAN Lei, et al. Experimental analysis of oil mixing characteristics of natural ester oil paper insulation[J]. Transformer, 2025, 62(8):45-50.

[3] 王泽忠,李明洋,宣梦真,等. 单相四柱式变压器直流偏磁下的温升试验及仿真分析[J]. 电工技术学报,2021,36(5):1006-1013.

WANG Zezhong, LI Mingyang, XUAN Mengzhen, et al. Temperature rise test and simulation of single-phase four-column transformer under DC-Bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5):1006-1013.

[4] MCNUTT W J, MCIVER J C, LEIBINGER G E, et al. Direct measurement of transformer winding hot spot temperature[J]. IEEE Power Engineering Review, 1984, 4(6):26-27.

[5] 梁书原,王泽忠,李宇妍. 直流偏磁对特高压交流变压器漏电感影响的分析[J]. 变压器,2024,61(10):26-34.

LIANG Shuyuan, WANG Zezhong, LI Yuyan. Influence of DC bias on leakage inductance of UHV transformer[J]. Transformer, 2024, 61(10):26-34.

[6] NORTON E T, WICKERSHEIM K A, SUN Meih. Improved fiberoptic temperature measurement system for monitoring winding temperatures in medium and large transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(3):831-835.

[7] 李飞,江航龙. 矿用隔爆型干式变压器温升的计算流体动力学仿真分析[J]. 变压器,2024,61(6):12-15.

LI Fei, JIANG Hanglong. Computational fluid dynamics simulation analysis of temperature rise of mine explosion-proof dry type transformer [J]. Transformer, 2024, 61(6):12-15.

[8] MARTI L. Afshin rezaei-zare and arun narang. simulation of transformer hotspot heating due to geomagnetically induced currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1):320-327.

[9] 朱文兵,张述铭,张欢. 考虑负载电流影响的 500 kV 变压器直流偏磁涡流损耗及温升效应研究[J]. 电工技术,2019(15):4-7.

ZHU Wenbing, ZHANG Shuming, ZHANG Huan. Study on DC bias eddy current loss and temperature rise effect of 500 kV transformer considering load current influence[J]. Electric Engineering, 2019(15):4-7.

[10] 闵英杰,吴广宁,周利军,等. 变压器热点温度和等值老化热特征参数的研究[J]. 高压电器,2012,48(2):50-54.

- MIN Yingjie, WU Guangning, ZHOU Lijun, et al. Influences of thermal characteristic parameters on power transformer's hot-spot temperature and equivalent aging[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2):50-54.
- [11]陈彬,梁旭,万妮娜,等.中频变压器瞬态电磁场-温度场耦合求解分析[J].高电压技术,2020,46(12):4400-4409.
- CHEN Bin, LIANG Xu, WAN Nina, et al. Coupled transient electromagnetic-thermal fields analysis of medium-frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12):4400-4409.
- [12]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 hot spot temperature of oil-immersed transformers based on DGM [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3):28-34
- [13]全好,阮江军,龚若涵,等.基于流线和SVR的变压器热点温度反演方法[J].电工电能新技术,2018,37(11):23-31.
- QUAN Yu, RUAN Jiangjun, GONG Ruohan, et al. Transformer hot-spot temperature inversion method based on streamline and support vector regression[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(11):23-31.
- [14]廖才波,阮江军,蔚超,等.基于改进支持向量机的变压器实时热点温度预测方法研究[J].高压电器,2018,54(12):174-179.
- LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, WEI Chao, et al. Research on real-time hot-spot temperature prediction method for transformer based on improved support vector machine[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12):174-179.
- [15]陈伟根,奚红娟,苏小平,等.广义回归神经网络在变压器绕组热点温度预测中的应用[J].高电压技术,2012,38(1):16-21.
- CHEN Weigen, XI Hongjuan, SU Xiaoping, et al. Application of generalized regression neural network to transformer winding hot spot temperature forecasting[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1):16-21.
- [16]张文新.基于神经网络算法的电力变压器温升推进预测[D].福州:福建工程学院,2019.
- [17]倪子瞻,盛戈皞,张立静,等.基于多物理场仿真和神经网络算法相结合的油浸式变压器热点温度动态反演方法[J].高电压技术,2023,49(6):2466-2477.
- NI Zizhan, SHENG Gehao, ZHANG Lijing, et al. Dynamic inversion method of hot spot temperature of oil-immersed transformer based on combination of multiphysics simulation and neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6):2466-2477.
- [18]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):860-866.
- 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):860-866.
- [19]Power transformers—Part 7:Loading guide for oil-immersed power transformers:IEC 60076—7[S]. 2005.
- [20]SUSA D, LEHTONEN M, NORDMAN H. Dynamic thermal modelling of power transformers[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. [S.l.]:IEEE, 2004:1421.
- [21]SUSA D, LEHTONEN M. Dynamic thermal modeling of power transformers; further development-part I[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4):1961-1970.
- [22]KONG Lingming, MO Wenxiong, LUO Simin. The modified thermal circuit model for three-phase unbalanced operation of distribution transformers[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). [S.l.]:IEEE, 2020:3868-3872.
- [23]CAI Shengze, MAO Zhiping, WANG Zhicheng, et al. Physics-informed neural networks (PINNs) for fluid mechanics: a review[J]. Acta Mechanica Sinica, 2021, 37(12):1727-1738.
- [24]翟常冬,刘贺,柴孟东,等.大容量高阻抗自耦变压器绕组热点温升的计算与验证[J].变压器,2024,61(11):29-35.
- ZHAI Changdong, LIU He, CHAI Mengdong, et al. Calculation and verification of hot spot temperature rise in large capacity and high impedance autotransformer winding[J]. Transformer, 2024, 61(11):29-35.
- [25]MISYRIS G S, VENZKE A, CHATZIVASILEIADIS S. Physics-informed neural networks for power systems[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). [S.l.]:IEEE, 2020:1-5.
- [26]李飞,江航龙.采用强迫风冷的风力发电用机舱干式变压器流体动力学温升仿真计算[J].变压器,2024,61(12):16-21.
- LI Fei, JIANG Hanglong. Simulation calculation of fluid dynamics temperature rise of dry-type transformer in the nacelle of wind power generation with forced air cooling [J]. Transformer, 2024, 61(12):16-21.
- [27]MAO Zhiping, JAGTAP A D, KARNIADAKIS G E. Physics-informed neural networks for high-speed flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 360:112789.
- [28]CAI S, WANG Z, WANG S, et al. Physics-informed neural networks for heat transfer problems[J]. Journal of Heat Transfer, 2021, 143(6):060801.

- [29]黄锦,廉彦超.一种新型电力变压器温升试验方法[J]. 变压器, 2024, 61(11):44-50.
HUANG Jin, LIAN Yanchao. New temperature rise test method for power transformer [J]. Transformer, 2024, 61(11):44-50.
- [30]EIVAZI H, TAHANI M, SCHLATTER P, et al. Physics-informed neural networks for solving reynolds-averaged navier-stokes equations[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(7): 075117.
- [31]张橙,李雪,叶茂,等.物理信息神经网络在两相流中的应用[J]. 化工学报, 2024, 75(11):3835-3856.
ZHANG Cheng, LI Xue, YE Mao, et al. Application of physics-informed neural network in two-phase flow[J]. CIESC Journal, 2024, 75(11):3835-3856.
- [32]李琼林,陈栋新,余晓鹏,等.电力变压器谐波损耗仿真计算与实验研究[C]//第七届电能质量研讨会. 2014.
- [33]冯政松,赵莉华,周卫华,等.谐波电流下干式变压器温升及带负载能力的研究[J]. 电力系统及其自动化, 2017, 29(2):69-75.
FENG Zhengsong, ZHAO Lihua, ZHOU Weihua, et al. Study on temperature rise and load capacity of dry type transformers under harmonic current[J]. Power Systems and Automation, 2017, 29(2):69-75.
- [34]普子恒,冯子灏,王耀强,等.雷电冲击下变压器绕组电压分布求解模型算法优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2024(2): 80-89.
PU Ziheng, FENG Zihao, WANG Yaoqiang, et al. Optimization design of transformer winding voltage distribution solving model algorithm under lightning impulse[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(2):81-89.
- [35]党艳阳,张欣宜,马婧,等.直流偏磁条件下变压器励磁电流及铁心损耗计算[J]. 变压器, 2019, 56(10):1-6.
DANG Yanyang, ZHANG Xinyi, MA Qiang, et al. Calculation of excitation current and core loss of transformer under DC bias[J]. Transformer, 2019, 56(10):1-6.
- [36]宋彦君,李英,詹诗语,等.高速动车组牵引变压器绝缘老化特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2025(3):103-111.
SONG Yanjun, LI Ying, ZHAN Shiyu, et al. Aging insulation performance of traction transformer for high-speed emu[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(3):103-111.
- [37]张贤,胡春,崔永赫,等.基于低阶导数物理信息神经网络的流动和传热反演问题研究[J]. 空气动力学学报, 2025, 43(1):34-43.
ZHANG Xian, HU Chun, CUI Yonghe, et al. Study on inverse problems of flow and heat transfer using low-order derivative physics-informed neural network[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2025, 43(1):34-43.
- [38]李国友,施勇,邹德旭,等.换流变压器网侧套管典型电连接结构振动失效特性试验及分析[J]. 电瓷避雷器, 2025(1):133-142.
LI Guoyou, SHI Yong, ZOU Dexu, et al. Vibration failure characteristics test of typical electric connection structure of converter transformer grid-side bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(1):133-142.
- [39]陈伟根,赵涛,江淘莎,等.改进的变压器绕组热点温度估算方法[J]. 高压电器, 2009, 45(1):53-56.
CHEN Weigen, ZHAO Tao, JIANG Taosha, et al. Improved method for calculation of hot-spot temperature in power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 53-56.
- [40]王华云,安义,蔡木良,等.10 kV配电变压器雷击过电压仿真计算研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(5):94-97.
WANG Huayun, AN Yi, CAI Muliang, et al. Simulation Research on the lightning striking overvoltage of 10 kV distribution transformer[J]. Insulators and Surge Arresters 2016(5): 94-97.
- [41]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, 48(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, 48(4):61-65.
- [42]LAHTINEN M, ELOVAARA J. GIC occurrences and CIC tests for 400 KV system transformer[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(3):63-63.

作者简介:

郑玉周(1983—),男,高级工程师,从事电网稳定运行、电力电子在电力系统中应用工作。E-mail:wwllxm2015@163.com。

杜金龙(1974—),男,高级工程师,从事电力系统输变配设备管理等工作。

武永强(1971—),男,正高级工程师,从事电网新能源接入、输配电工作。

明明(1989—),女,高级工程师,从事大数据挖掘技术在输变电故障诊断中的应用、电力系统变电设备运维管理等工作。

裴晓东(1971—),男,正高级工程师,从事电力系统稳定性分析与控制工作。

郝秀平(1985—),女,高级工程师,从事电力系统变电设备运维管理等工作。