

9-15-2024

Carbon Footprint Analysis and Low-carbon Optimization Method Simulation Study of Power Transformer Based on Digital Twin Technology

Dongxue Li

*Economic and Technical Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang
110870, China*

Yan Liu

*Economic and Technical Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang
110870, China*

Boyao Shen

*Research Institute of Transmission and Transformation Technology, Shenyang University of Technology,
Shenyang 110016, China*

Yongteng Jing

*Economic and Technical Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang
110870, China*

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Carbon Footprint Analysis and Low-carbon Optimization Method Simulation Study of Power Transformer Based on Digital Twin Technology

Abstract

Abstract: Power transformers are the main energy-consuming equipment for substations. According to the goal of “carbon peak, carbon neutralization” in China, it is of great significance to accurately calculate the carbon footprint of transformers and seek low-carbon optimization methods. A method for constructing a digital twin model of power transformer magnetic characteristics is proposed. Based on the three-dimensional electromagnetic time-harmonic field finite element analysis method, a threedimensional model of SZ11-31.5MVA/66kV power transformer is established. The transformer loss map is obtained under fluctuating load condition, and the transformer digital twin model is constructed. The carbon footprint of the transformer is analyzed, the economic load coefficient of the transformer is determined, and the optimal economic operation mode of the substation is established. The low carbon optimization is carried out by installing magnetic shunt, and the carbon emission is reduced by 4.75% under rated condition. Through experimental calculation, the relative error between the model prediction and the actual simulation is less than 5%. This method can provide a scientific basis for the construction of substation with digital, low carbon and energy saving.

Keywords

power transformer, digital twin, loss, carbon footprint, load factor, low-carbon optimization

Authors

Dongxue Li, Yan Liu, Boyao Shen, Yongteng Jing, Qiang Ma, and Ran Liu

Recommended Citation

Li Dongxue, Liu Yan, Shen Boyao, et al. Carbon Footprint Analysis and Low-carbon Optimization Method Simulation Study of Power Transformer Based on Digital Twin Technology[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2075-2085.

基于数字孪生技术的电力变压器碳足迹分析及低碳优化方法仿真研究

李冬雪¹, 刘岩¹, 沈博焱^{2*}, 井永腾², 马强¹, 刘然¹

(1. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 沈阳工业大学 输变电技术研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 电力变压器是变电站内主要的耗能设备, 根据我国“碳达峰、碳中和”的目标, 准确计算变压器的碳足迹并寻求低碳优化方法具有重要意义。提出了一种电力变压器磁特性数字孪生模型的构建方法, 基于三维电磁时谐场有限元分析方法, 建立66 kV变电站用型号为SZ11-31.5MVA/66kV电力变压器三维数学模型, 在波动负荷工况下得出变压器损耗图谱, 构建出变压器数字孪生模型。分析变压器的碳足迹, 确定变压器的经济负载系数, 并确立变电站最优经济运行方式。提出加装磁分路进行低碳优化, 得到额定工况下碳排放降低了4.75%左右。通过实验推算, 模型预测与实际仿真的相对误差小于5%。该方法可为建设数字、低碳和节能型变电站提供科学依据。

关键词: 电力变压器; 数字孪生; 损耗; 碳足迹; 负载系数; 低碳优化

中图分类号: TM 41; TP 391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2024)09-2075-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0605

引用格式: 李冬雪, 刘岩, 沈博焱, 等. 基于数字孪生技术的电力变压器碳足迹分析及低碳优化方法仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(9): 2075-2085.

Reference format: Li Dongxue, Liu Yan, Shen Boyao, et al. Carbon Footprint Analysis and Low-carbon Optimization Method Simulation Study of Power Transformer Based on Digital Twin Technology[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2075-2085.

Carbon Footprint Analysis and Low-carbon Optimization Method Simulation Study of Power Transformer Based on Digital Twin Technology

Li Dongxue¹, Liu Yan¹, Shen Boyao^{2*}, Jing Yongteng², Ma Qiang¹, Liu Ran¹

(1. Economic and Technical Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110870, China; 2. Research Institute of Transmission and Transformation Technology, Shenyang University of Technology, Shenyang 110016, China)

Abstract: Power transformers are the main energy-consuming equipment for substations. According to the goal of “carbon peak, carbon neutralization” in China, it is of great significance to accurately calculate the carbon footprint of transformers and seek low-carbon optimization methods. A method for constructing a digital twin model of power transformer magnetic characteristics is proposed. Based on the three-dimensional electromagnetic time-harmonic field finite element analysis method, a three-dimensional model of SZ11-31.5MVA/66kV power transformer is established. The transformer loss map is obtained under fluctuating load condition, and the transformer digital twin model is constructed. The carbon footprint of the transformer is analyzed, the economic load coefficient of the transformer is

收稿日期: 2023-05-23 修回日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(U2166213); 国家电网科学技术(SGTYHT/21-JS-223, SGTYHT/21-JS-226)

第一作者: 李冬雪(1980-), 女, 高工, 博士, 研究方向为电力系统规划设计。

通信作者: 沈博焱(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为变压器多物理场仿真数字孪生技术和热寿命分析。

determined, and the optimal economic operation mode of the substation is established. The low carbon optimization is carried out by installing magnetic shunt, and the carbon emission is reduced by 4.75% under rated condition. Through experimental calculation, the relative error between the model prediction and the actual simulation is less than 5%. This method can provide a scientific basis for the construction of substation with digital, low carbon and energy saving.

Keywords: power transformer; digital twin; loss; carbon footprint; load factor; low-carbon optimization

0 引言

随着国家“双碳”计划的实施,减少高耗能设备的碳排放成为实现该计划的主要途径,变电站中变压器的电能损耗约占电网损耗的20%。中国第二十次全国代表大会提出,需要加速数字化发展、建设数字中国,电网数字化是电力行业未来发展的必然趋势。基于数字孪生技术,分析电力变压器的碳足迹并提出低碳优化方法,是建设数字、低碳和节能型变电站的科学依据^[1-2]。

火力发电是我国主要的发电形式,变压器在输配电时每度电的二氧化碳排放量约为0.87 kg,整体碳排放量不容忽视。文献[3]采用全生命周期碳足迹模型,对典型变电站方案中的碳排放量进行了量化研究。为实现低碳化设计方案,文献[4]进行了全生命周期的碳足迹分析,并提取了关键的碳排放因素。文献[5]采用生命周期评价方法对风力发电机全生命周期过程中的碳足迹和总能量需求进行了核算。目前,传统的变压器碳足迹检测方法普遍采用基于解析计算的方法,主要包括排放因子法^[6]和基于具体设施和工艺流程的碳质量平衡法^[7]。存在无法全面反映变压器真实状态、模型与实体交互不充分、数据滞后等问题,未考虑变压器本体结构参数、电磁原理和运行状态等因素,缺乏信息物理深度融合。

数字孪生技术已被用于变压器的状态监测、故障诊断,以及电力系统数字化探索^[8-9]。该技术为电力变压器的碳足迹分析与优化问题提供了新方法。文献[10]对电力变压器的电磁、换热、短路等通过多物理场建立了数字孪生模型,采用遗传

算法进行参数与结构的优化。文献[11]提出了数字孪生变电站应该如何实现数字化与智能化转型的方法,可以降低电力设备的运维成本。文献[12]建立了配电变压器低压侧数字孪生模型,在不对称负载下仍可辨识绝大部分故障。变压器数字孪生技术与碳足迹的分析和评估结合的研究开始相对较晚。目前,这个问题仍然缺乏系统化的分析方法,尚且处于初级研究阶段^[13-14]。

为实现电力变压器碳足迹分析及低碳优化技术数字化,本文以一座66 kV变电站用型号为SZ11-31.5MVA/66 kV主变压器为例,基于电磁学、有限元分析和数值分析理论,对其不同负载工况下空载损耗、负载损耗和杂散损耗进行计算,得出变压器损耗图谱,构建出变压器数字孪生模型;结合负荷曲线,得出变压器的碳足迹,确定变压器的经济负载系数,最终确立变电站最优经济运行方式;对变压器结构进行合理优化,构建出优化后的绿色低碳变压器数字孪生模型,通过该模型即可实现变压器碳足迹监测。

1 变压器基本结构及数字模型

1.1 变压器基本结构及参数

本文研究对象为三相油浸式变压器,其主要电气参数如表1所示,构成材料及属性如表2所示。变压器的核心部件是铁心和绕组,铁心由叠装在一起的冷轧硅钢片组成,绕组分为高压、低压绕组和调压绕组,同心绕在铁心柱上。油箱内充满着变压器油,将铁心和绕组浸没,起到绝缘和散热的作用。

表1 变压器基本参数

Table 1 Basic data of transformer

| 特征参数 | 数值 |
|----------|-------|
| 额定容量/MVA | 31.5 |
| 额定电压/kV | 66 |
| 联结组别 | YNd11 |
| 绕组结构 | 低-高-调 |

表2 模型部件材料属性

Table 2 Material properties of model component

| 部件 | 材料 | 电导率/(S/m) |
|----|---------|----------------------|
| 铁心 | 30ZH120 | 各向异性电导率 |
| 油箱 | Q345B | 7.692×10^6 |
| 拉板 | Q345B | 7.692×10^6 |
| 夹件 | Q345B | 7.692×10^6 |
| 绕组 | 电工铜 | 5.7143×10^7 |

1.2 变压器数字模型

根据变压器实际的结构参数, 利用仿真软件对变压器进行三维数字建模。变压器磁场三维有限元数学分析模型如图1所示, 绕组联结方式见图2。模型做如下简化:

- (1) 不考虑激励电流的高次谐波分量;
- (2) 忽略夹件加强筋、油箱导油盒等;
- (3) 忽略开关和引线对变压器磁场的影响;
- (4) 将绕组等效为完全对称的圆筒式。

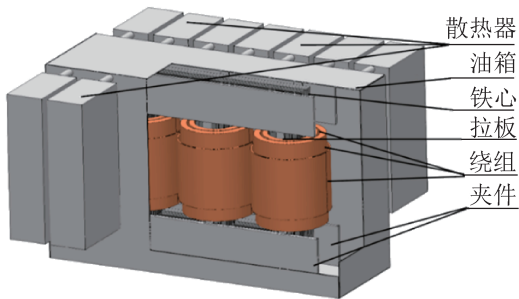


图1 变压器三维数字模型

Fig. 1 Transformer 3D digital model

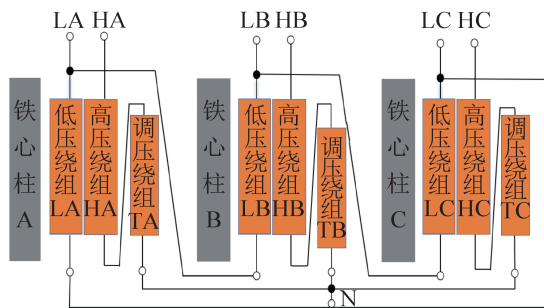


图2 绕组联结图

Fig. 2 Winding connection Diagram

2 变压器有限元仿真计算

由于变压器的损耗计算与磁场有关, 为准确计算变压器磁场, 本文采用基于 $T-\Omega$ 位组的三维求解法对电磁场进行计算与分析, 基于三相三芯柱变压器模型, 对变压器的漏磁场和结构件中的涡流损耗进行研究, 其计算程序流程如图3所示。

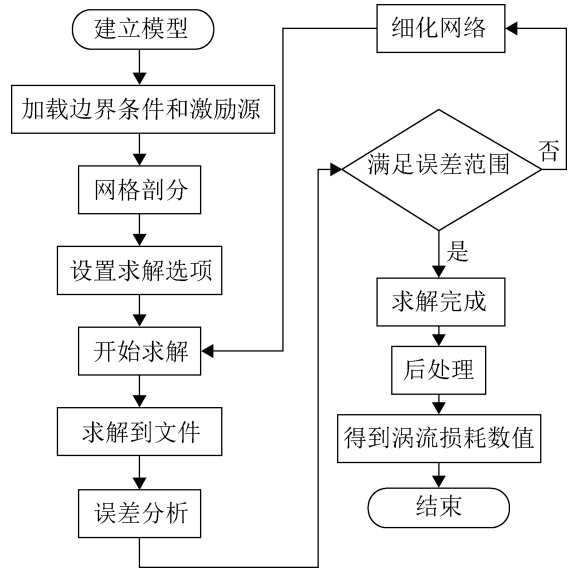


图3 有限元计算流程图

Fig. 3 Finite element calculation flow chart

2.1 磁场分析

磁场强度为标量位梯度和矢量棱单元的和, 其中, 矢量棱单元用于表示导体内的矢量场^[15]。

由于硅钢片单片厚度为0.3 mm, 铁心采用叠积的方式, 磁导率表现为各向异性, 假设 z 方向为硅钢片叠积方向, 由空气与硅钢片接触面上的磁感应强度 B 和磁场强度 H 的连续性边界条件可知, 硅钢叠片沿叠置方向的磁通密度 B_y 在空气-硅钢片交界面处是连续的。设空气磁场强度为 H_{air} , 硅钢片区域的磁场强度为 H , 磁导率为 μ , 则

$$B_z = \mu_{air} H_{air} = \mu H \quad (1)$$

式中: μ_{air} 为空气磁导率。

沿叠置方向的平均磁场强度为

$$H_z = cH + (1-c)H_{air} = [c\mu_{air}/\mu + (1-c)]H_{air} \quad (2)$$

式中: c 为叠片系数, 值为0.97。

由于空气的磁导率远远小于硅钢片的磁导率,因此,磁屏蔽在沿 z 方向上的磁导率会更大,得到磁屏蔽沿着 z 方向的磁导率为

$$\mu_z \approx \frac{\mu_{\text{air}} \mu}{(1-c)\mu} = \frac{\mu_{\text{air}}}{1-c} \quad (3)$$

式中: μ_z 为磁屏蔽沿 z 方向的磁导率。

磁屏蔽其他2个方向磁导率, μ_x 和 μ_y 由B-H曲线给出。因此,磁屏蔽有效磁导率为

$$\mu = \begin{bmatrix} c\mu_x & 0 & 0 \\ 0 & c\mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\text{air}}(1-c) \end{bmatrix} \quad (4)$$

在变压器铁心的三维涡流区域中,硅钢片的电导率也表现出各向异性的特点。假设硅钢片在轧制方向上的电导率为 σ ,则其电导率可以用电导率张量来表示:

$$s = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

麦克斯韦方程组是描述电磁场行为的基本方程,包括了电场和磁场的演化规律和它们之间的相互作用关系,是计算电磁场分布和演化的数学模型,可以用来模拟电磁波的传播、反射和折射等现象。通过求解麦克斯韦方程组,可以得到电磁场在空间和时间上的变化规律,从而预测电磁场在不同条件下的行为和特性。由 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$,引入矢量电位 \mathbf{T} :

$$\nabla \times \mathbf{T} = \mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_E \quad (6)$$

式中: \mathbf{J}_s 为源电流密度(在非导电部件和铁心中 $\mathbf{J}_s=0$); \mathbf{J}_E 为涡流密度。

在包括油箱、夹件和拉板等金属导体部件的涡流区域内,定义矢量位:

$$\mathbf{J}_E = \nabla \times \mathbf{T} \quad (7)$$

麦克斯韦方程组的第一方程可写为

$$\nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{T}) = 0 \quad (8)$$

因此:

$$\mathbf{H} = \mathbf{T} - \nabla \Omega \quad (9)$$

式中: Ω 为标量磁位。

由式(9)所表示的本构关系得

$$\mathbf{E} = \sigma \nabla \times \mathbf{T} \quad (10)$$

三维时谐场求解时考虑了导体中的位移电流,因此式(10)变为

$$\mathbf{E} = \left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right)^{-1} \nabla \times \mathbf{T} \quad (11)$$

在涡流区域的控制方程为

$$\nabla \times \left[\left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right)^{-1} \nabla \times \mathbf{T} \right] + \mu \frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{T} - \nabla \Omega] = 0 \quad (12)$$

对于节点元,采用库伦规范并引入罚函数项

$$\begin{aligned} & -\nabla \left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right)^{-1} \nabla \cdot \mathbf{T} \text{ 则} \\ & \nabla \times \left[\left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right)^{-1} \nabla \times \mathbf{T} \right] - \nabla \left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right)^{-1} \nabla \cdot \mathbf{T} + \\ & \mu \frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{T} - \nabla \Omega] = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

由 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 得

$$\nabla \cdot [\mu(\mathbf{T} - \nabla \Omega)] = 0 \quad (14)$$

在非涡流区域(源电流区域)麦克斯韦方程组的第一方程形式为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s \quad (15)$$

因此,在非涡流区域,无需引入矢量电位 \mathbf{T} ,磁场强度的计算式为

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_s - \nabla \Omega \quad (16)$$

式中: \mathbf{H}_s 为源电流在无限大空间中产生的磁场,需要按照比奥-萨伐定律进行计算:

$$\mathbf{H}_s = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_s} \frac{\mathbf{J}_s \times \mathbf{r}}{r^3} d\Omega \quad (17)$$

在非涡流区域的控制方程为

$$\nabla \cdot [\mu(-\nabla \Omega + \mathbf{H}_s)] = 0 \quad (18)$$

铁心具体的磁场分布如图4所示。铁心是变压器主磁流路径。

变压器主空道轴向磁密在时谐场求解的分布曲线如图5所示。

由图4~5可知,铁心心柱磁通密度最高,约为1.87 T,主空道漏磁密度分布呈现马鞍形,最大幅值约为1.42 T,出现在轴向高度600 mm和1 850 mm附近,上下端部磁通密度幅值最小,约为1.3 T。

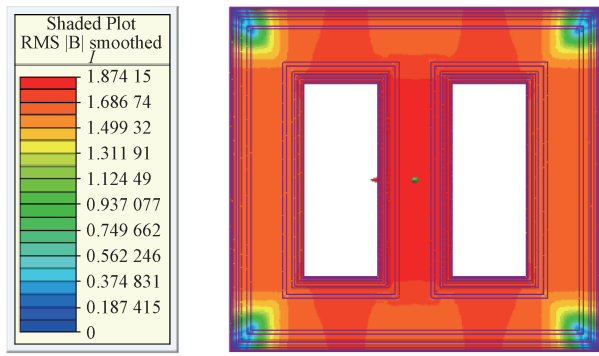


图4 铁心磁密分布

Fig. 4 Magnetic flux distribution of core

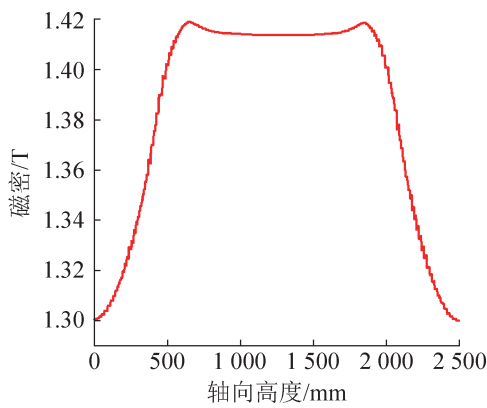


图5 主空道轴向磁密分布

Fig. 5 Axial magnetic density distribution of main spaceway

2.2 损耗计算

为获取额定负载下的损耗分布, 绕组线圈激励电流为额定电流, 高压和低压绕组的额定电流值分别为 306.2 A 和 1 000 A。

铁磁构件的涡流损耗可以通过式(19)在三维有限元分析的基础上进行计算:

$$p = \int_V \frac{\mathbf{J}_E \cdot \mathbf{J}_E}{\sigma} dV \quad (19)$$

式中: p 为欧姆损耗; \mathbf{J}_E 为涡流密度; V 为体积。

时谐场的涡流损耗为

$$P_c = \int_V \frac{\mathbf{J}_E \cdot \mathbf{J}_E^*}{\sigma} dV = \int_V \frac{\bar{\mathbf{J}}_{E0} \cdot \bar{\mathbf{J}}_{E0}^*}{\sigma} dV \quad (20)$$

式中: $\bar{\mathbf{J}}_{E0}$ 为与 \mathbf{J}_E 相关的向量。

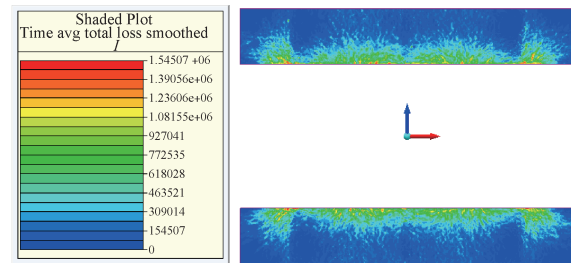
在漏磁场计算的基础上, 可以使用磁滞损耗-磁通密度峰值曲线引入磁滞损耗部分, 以计算杂散损耗。

$$P_h = \sum_{i=0}^N P_{h,i} B_{m,i} \rho V_i \quad (21)$$

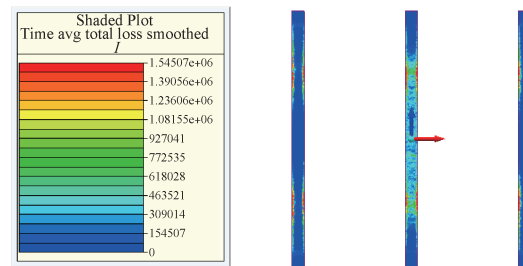
总损耗为

$$P = P_c + P_h \quad (22)$$

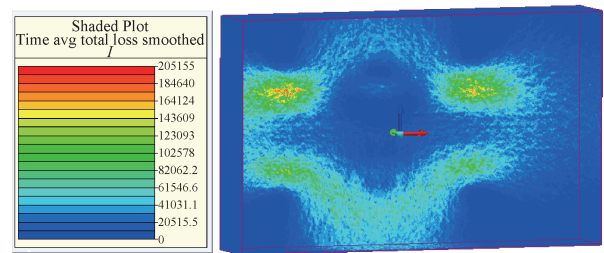
为了模拟变压器额定负载实验情况, 假设三相电流对称, 高、低、调压侧额定电流值分别为 306.2、1 000、306.2 A, 相位相差 180°。结构件具体的损耗分布如图 6 所示。



(a) 夹件损耗



(b) 拉板损耗



(c) 油箱损耗

图6 金属结构件中损耗分布

Fig. 6 Loss distribution of steel structure

由图 6 可以看出, 在夹件的高压和低压绕组端部对应的面上, 漏磁场强度相对较大, 因此, 夹件的涡流损耗幅值出现在绕组端部对应位置。变压器结构件的损耗无法通过实验直接测量, 但可以通过负载损耗、电阻损耗和杂散损耗推算得出, 如表 3 所示, 总损耗数据如表 4 所示, 可以看出误差均

在 5% 以内，证明本文的损耗计算结果具有较高的精度。

表 3 结构件损耗数据对比

| Table 3 Structure loss data comparison | | | |
|--|--------|----------|------|
| 损耗 | 实验推算/W | 仿真计算/W | 误差/% |
| 拉板 | — | 2 585.8 | — |
| 夹件 | — | 8 938.0 | — |
| 油箱 | — | 1 509.6 | — |
| 结构件 | 12 612 | 12 833.4 | 1.86 |

表 4 总损耗数据对比

| Table 4 Total loss data comparison | | | |
|------------------------------------|---------|-----------|------|
| 损耗 | 实验推算/W | 仿真计算/W | 误差/% |
| 空载 | 21 380 | 22 298.8 | 4.30 |
| 负载 | 115 500 | 117 924.3 | 2.10 |
| 结构件 | 12 612 | 12 833.4 | 1.86 |
| 总损耗 | 149 492 | 153 056.5 | 2.38 |

2.3 变压器损耗特性研究

本文采用生命周期评价方法和穷举法选取不同负载的工况进行分析。针对每种运行工况的漏磁场、涡流场和结构件损耗等进行计算，构建变压器数字孪生模型，对全生命周期内变压器的碳足迹进行计算与分析。结构件中涡流密度幅值曲线如图 7 所示，不同工况下的涡流分布规律相同。

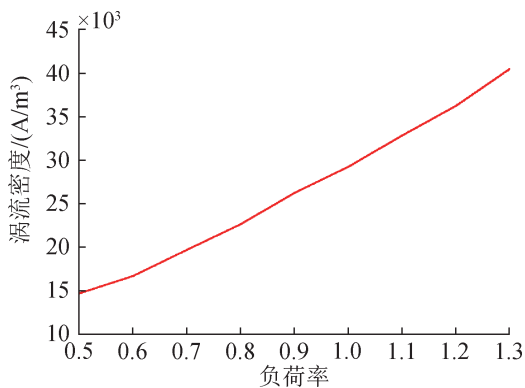
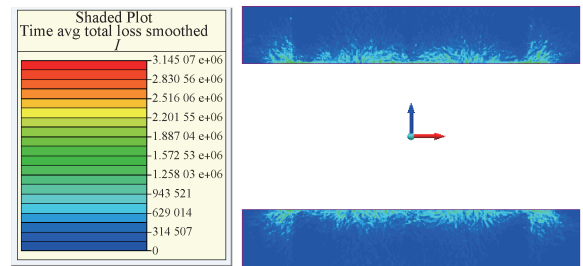


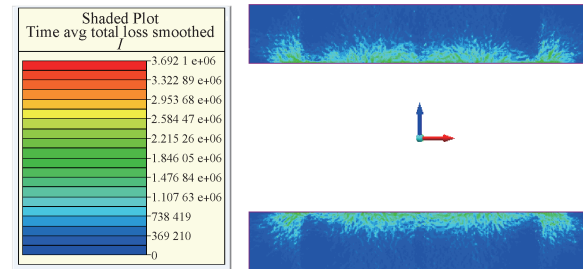
图 7 涡流密度幅值曲线

Fig. 7 Eddy current density amplitude curve

0.5 倍和 1.3 倍负荷工况下夹件的损耗分布如图 8 所示，损耗最大值为 1.3 倍负荷，在铁心窗口位置外侧位置，最大值为 $8.9 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ 。



(a) 0.5倍负荷



(b) 1.3倍负荷

图 8 夹件的损耗分布

Fig. 8 Loss distribution of clamps

变压器杂散损耗如图 9 所示，总杂散损耗包括夹件、拉板和油箱的杂散损耗。

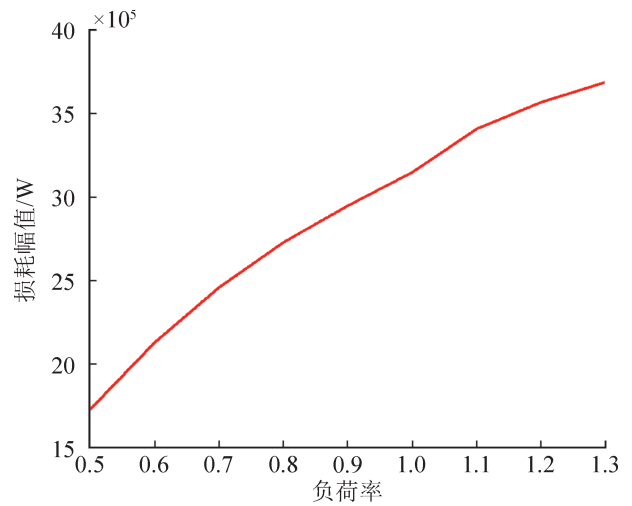


图 9 杂散损耗幅值曲线

Fig. 9 Stray loss amplitude curve

为更加清晰地看出不同工况下空载损耗、欧姆损耗、杂散损耗和总损耗值的变化，取不同工况下的总损耗，观察其情况变化。根据图 10 可知，随着负荷增大，变压器总损耗非线性增大，在负荷率为 1.3 时达到最大值。

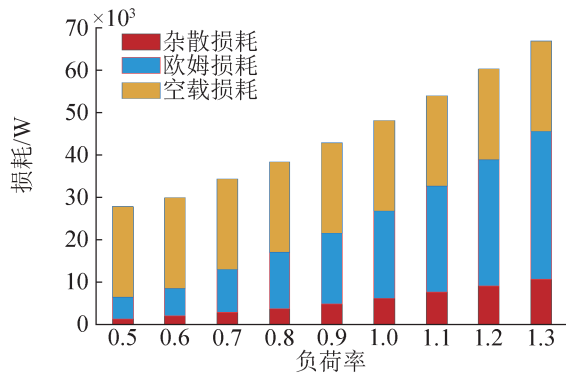


图 10 各工况下损耗柱状图

Fig. 10 Histogram of loss under each working condition

3 数字孪生模型构建及碳足迹分析

3.1 数字孪生模型构建

数字孪生变压器系统是基于数字孪生技术的应用系统, 可以实时监测变压器的状态参数, 提供碳足迹分析、故障诊断、预测维护等功能, 数字孪生系统结构如图 11 所示。

式通过 C# 平台构建数字孪生变压器系统的基本过程如下:

(1) 建立数字孪生模型。使用 C# 语言和相关开发工具, 建立数字孪生模型, 包括变压器的物理模型和数字模型。物理模型是对变压器实际形态和特性的描述, 数字模型是对物理模型进行数值化处理和仿真的描述。

(2) 采集实时数据。通过传感器等设备采集变压器电流、电压、温度等参数的实时数据, 用于更新数字模型。

(3) 数字模型更新。根据采集到的实时数据, 使用 C# 编程语言进行数字模型的更新, 包括状态参数的实时监测、数值计算和仿真模拟。

(4) 碳足迹分析。根据数字模型的分析结果, 进行变压器的碳足迹分析, 评估其碳排放情况, 并提供优化建议。

(5) 故障诊断和预测维护。根据数字模型的实时更新和分析, 进行变压器的故障诊断和预测维护, 提前发现和处理潜在的故障和问题, 保证变

压器的稳定性和安全性。

(6) 可视化展示。使用 C# 开发工具进行可视化展示, 将数字模型和实时数据转化为图形或图像, 方便用户对变压器的运行状态进行监测和分析。

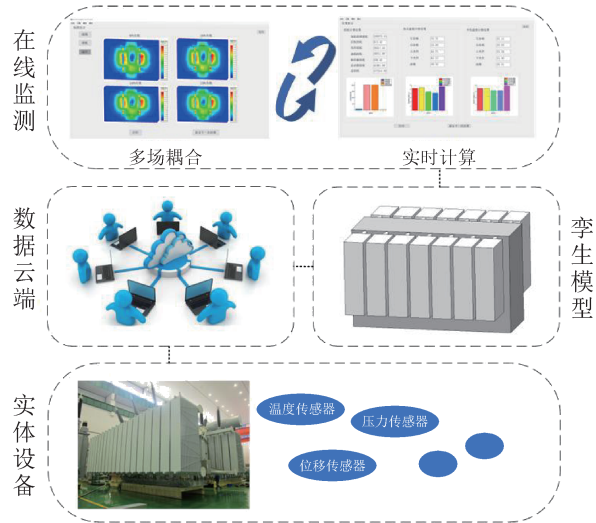


图 11 数字孪生系统结构

Fig. 11 Digital twin system structure

本文建立的数字孪生体模型是通过 0.5~1.3 倍负荷工况下的三维磁场计算的, 运用电磁学、有限元分析和数值分析理论计算, 分析不同工况下变压器工作数据, 包括不同负载下得到的变压器各部件漏磁场及空载损耗、负载损耗和杂散损耗等, 由于本文主要研究变压器碳排放, 因此, 反馈源主要以结构件损耗为主。构建得到变压器数字孪生系统, 如图 12 所示。

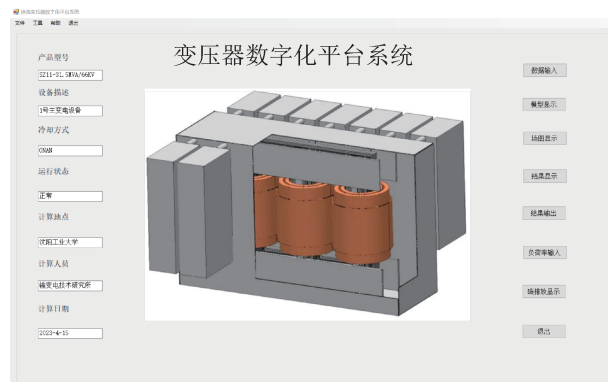


图 12 变压器数字孪生系统

Fig. 12 Transformer digital twin system

3.2 碳足迹分析

碳足迹分析以负荷率数据为驱动，结合数字孪生系统，对变压器使用阶段碳足迹进行分析。

使用阶段碳足迹主要考虑产品运行时电能消耗产生的碳排放。假设变压器运行过程中有 m 种不同负荷运行状态，电力变压器的碳足迹可以表示为

$$C_{\text{co}_2} = \sum_{k=1}^m p_k t_k \beta \quad (23)$$

式中： C_{co_2} 为电能损耗折合排放的 CO_2 质量； p_k 为第 k 种负荷运行状态下的损耗； t_k 为第 k 种负荷运行状态下的运行时间； β 为不同负荷运行状态下分别对应的碳排放因子。

通过电力变压器物理实体的日负荷曲线，结合电力变压器数字孪生模型，对变压器碳足迹分析问题进行数字化和模型化，得到如图 13 所示的变压器碳足迹分析系统，消除变压器实体模型的不确定性。

以火电厂附近的某变电站内同型号主变压器某日的运行数据为例，变压器的负荷率在每小时内的平均值如图 14 所示，结合本文的变压器碳足迹分析系统，分析得该台变压器在这天的碳足迹如表 5 所示。

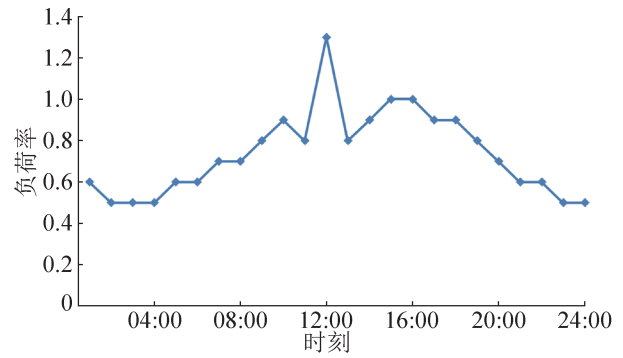


图 14 某日变压器负荷率曲线
Fig. 14 Load rate curve of transformer one day

由上述分析可知，变压器负荷率越低，碳排放越少，但是变压器的利用率也越低，分布趋势如图 15 所示。由图 15 可知，主变压器负荷率在 0.8 左右时，变压器的经济性和环保性最优。

4 电力变压器低碳优化设计

通过数字孪生变压器碳足迹分析系统，在所分析变压器的上夹件底部及下夹件上部对应处，添加与夹件长度相同的磁分路，对加装磁屏蔽后的变压器数字孪生模型磁场与损耗进行计算，进行变压器碳排放分析。

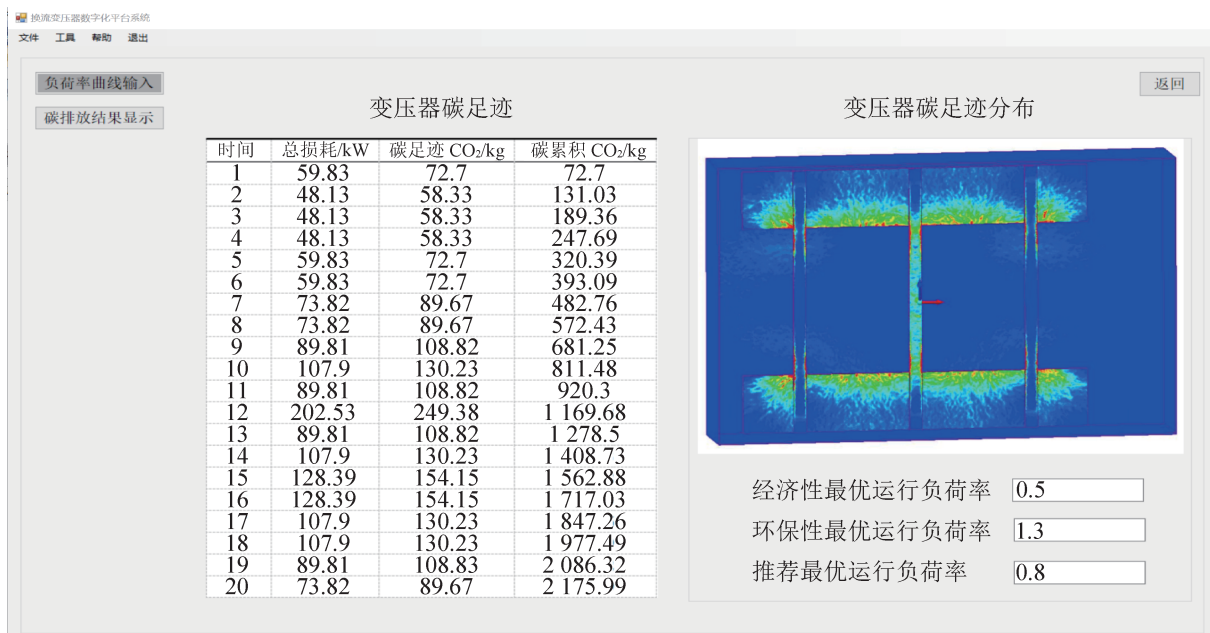


图 13 变压器碳足迹分析系统
Fig. 13 Transformer carbon footprint analysis system

<http://www.china-simulation.com>

• 2082 •

表 5 变压器碳足迹
Table 5 Transformer carbon footprint

| 时刻 | 总损耗/kW | 碳足迹 CO ₂ /kg | 碳累积 CO ₂ /kg |
|-------|--------|----------------------------|----------------------------|
| 01:00 | 59.83 | 72.70 | 72.70 |
| 02:00 | 48.13 | 58.33 | 131.03 |
| 03:00 | 48.13 | 58.33 | 189.36 |
| 04:00 | 48.13 | 58.33 | 247.69 |
| 05:00 | 59.83 | 72.70 | 320.39 |
| 06:00 | 59.83 | 72.70 | 393.09 |
| 07:00 | 73.82 | 89.67 | 482.76 |
| 08:00 | 73.82 | 89.67 | 572.43 |
| 09:00 | 89.81 | 108.82 | 681.25 |
| 10:00 | 107.90 | 130.23 | 811.48 |
| 11:00 | 89.81 | 108.82 | 920.30 |
| 12:00 | 202.53 | 249.38 | 1169.68 |
| 13:00 | 89.81 | 108.82 | 1278.50 |
| 14:00 | 107.90 | 130.23 | 1408.73 |
| 15:00 | 128.39 | 154.15 | 1562.88 |
| 16:00 | 128.39 | 154.15 | 1717.03 |
| 17:00 | 107.90 | 130.23 | 1847.26 |
| 18:00 | 107.90 | 130.23 | 1977.49 |
| 19:00 | 89.81 | 108.83 | 2086.32 |
| 20:00 | 73.82 | 89.67 | 2175.99 |
| 21:00 | 59.83 | 72.70 | 2248.69 |
| 22:00 | 59.83 | 72.70 | 2321.39 |
| 23:00 | 48.13 | 58.33 | 2379.72 |
| 24:00 | 48.13 | 58.33 | 2438.05 |

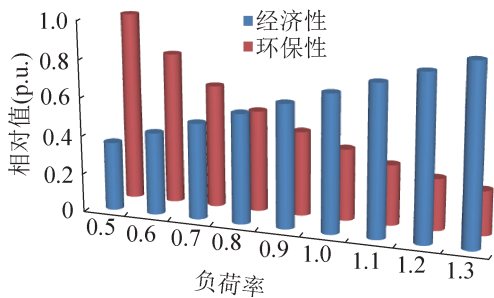


图 15 变压器工作点
Fig. 15 Transformer working point

本文以一台 SZ11-31500MVA/66kv 电力变压器为例, 变压器碳足迹分析系统加装与该变压器夹件等长(3 285 mm)的磁分路来降低结构件损耗, 降低电力变压器碳排放。图 16 为变压器磁分路式磁屏蔽模型图。

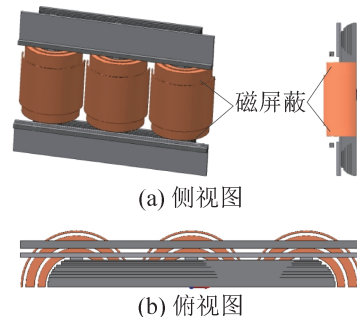


图 16 变压器磁分路式磁屏蔽模型
Fig. 16 Model of transformer magnetic shunt magnetic shielding

根据图 17 所示的变压器下夹件磁场分布情况, 变压器绕组产生的漏磁通过磁分路提供了导通路径。没有磁分路的情况下, 夹件的最大漏磁为 0.592 T。加装磁分路后, 夹件的最大漏磁降至 0.416 T。根据磁场和损耗公式可以推断出夹件的涡流损耗也将大幅降低, 磁分路的引入改善了夹件的损耗分布。考虑到变压器碳排放主要与结构件损耗相关, 而夹件的涡流损耗约占结构件总涡流损耗的 70%, 因此, 加装磁分路可以显著降低电力变压器的碳排放。

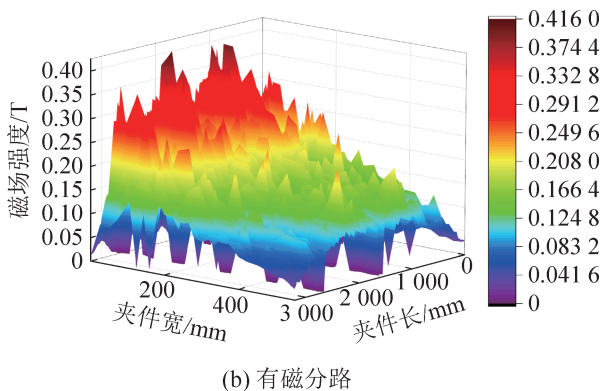
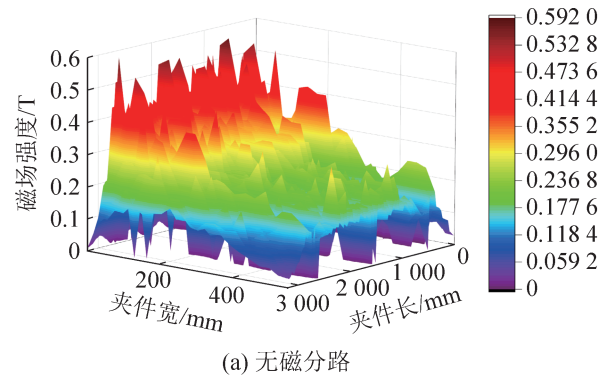


图 17 下夹件磁场分布
Fig. 17 Lower clamp magnetic field distribution

加装磁分路后, 变压器内铁件损耗(油箱、拉板、夹件、铁心及屏蔽)为22.2 kW, 夹件、拉板及油箱损耗结果如表6所示。

表6 杂散损耗结果对比
Table 6 Comparison of stray loss results

| 损耗 | 无磁屏蔽/W | 有磁屏蔽/W | 损耗降低/% |
|-----|--------|--------|--------|
| 拉板 | 1 694 | 1 376 | 18.9 |
| 夹件 | 6 682 | 3 000 | 55.1 |
| 油箱 | 1 758 | 867 | 50.2 |
| 总损耗 | 10 134 | 5 243 | 48.3 |

从表6可以看出, 磁分路可以有效地降低金属结构件的损耗。

5 结论

本文以某变电站内油浸式电力变压器为研究对象, 结合大量的电磁场有限元数值分析, 构建变压器数字孪生模型, 并搭建了基于数字孪生技术的变压器碳足迹分析系统, 得到结论如下:

(1) 提出了基于数据与模型双重驱动的融合变压器本体结构、电磁原理和运行状态等多源异构数据的变压器碳足迹数字孪生模型构建方法, 可计算全生命周期各阶段中碳足迹分布, 解决了变压器碳足迹分析与评估的行业难题。

(2) 提出了一种具有多领域、多物理和多尺度属性的变压器数字孪生模型, 全方位描述变压器构成、形态和运行状态等, 实现了变压器杂散损耗的可视化。突破了变压器数字化技术应用的瓶颈问题。通过变压器数字孪生体的损耗分析, 结合变压器的利用率, 建议变压器的经济负载系数约为0.8, 在该负载工况下变电站运行方式经济性、环保性最优。

(3) 提出了杂散损耗-碳排放分析方法, 搭建了融合变压器多源信息、变压器多维运行数据等的具有自主知识产权的变压器数字化碳足迹分析平台, 为变压器碳足迹分析提供了有效工具。

(4) 开发了磁分路式磁屏蔽, 通过对变压器结构改进, 降低金属结构件杂散损耗, 从而降低变

压器碳排放。

通过计算与分析初步证明了本文方法的可行性, 为建设数字、低碳和节能型变电站给出科学依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 高扬, 贺兴, 艾芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2483-2491.
Gao Yang, He Xing, Ai Qian. Multi Agent Coordinated Optimal Control Strategy for Smart Microgrid Based on Digital Twin Drive[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2483-2491.
- [3] 王卓. 基于全生命周期的110kV变电站降碳方案研究[J]. 电工电气, 2022(1): 66-69.
Wang Zhuo. Lifecycle-based Research on Carbon Reduction Measures of 110 kV Substation[J]. Electrotechnics Electric, 2022(1): 66-69.
- [4] 王玎. 基于碳足迹分析的变压器低碳优化设计[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
Wang Ding. Low Carbon Optimization Design of Transformer Based on Carbon Footprint Analysis[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.
- [5] 杨东, 刘晶茹, 杨建新, 等. 基于生命周期评价的风力发电机碳足迹分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3): 927-934.
Yang Dong, Liu Jingru, Yang Jianxin, et al. Carbon Footprint of Wind Turbine by Life Cycle Assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3): 927-934.
- [6] 樊立安, 张东明. 我国能源领域二氧化碳排放研究[J]. 低碳世界, 2022, 12(4): 99-101.
- [7] 张守明. 碳质量平衡法测算燃油消耗量的相关问题探讨[J]. 计量与测试技术, 2020, 47(8): 57-59, 63.
Zhang Shouming. Discussion on the Related Problems of the Calculation of Fuel Consumption by Carbon Mass Balance Method[J]. Metrology & Measurement Technique, 2020, 47(8): 57-59, 63.
- [8] 李猛, 聂铭, 和敬涵, 等. 基于数字孪生的柔性直流电网纵联保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1773-1782, 中插12.
Li Meng, Nie Ming, He Jinghan, et al. Pilot Protection of

- Flexible DC Grid Based on Digital Twin[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1773-1782, S12.
- [9] 张立静, 盛戈峰, 侯慧娟, 等. 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[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2473-2482.
Zhang Lijing, Sheng Gehao, Hou Huijuan, et al. Detection Method of Interturn Short-circuit Faults in Oil-immersed Transformers Based on Fusion Analysis of Electrothermal Characteristic[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2473-2482.
- [10] Alexey Stulov, Andrey Tikhonov, Irina Snitko. Fundamentals of Artificial Intelligence in Power Transformers Smart Design[C]//2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 34-38.
- [11] 潘博, 张弛, 张华, 等. 数字孪生变电站在电网企业数智化转型的探索与应用[J]. 电力与能源, 2020, 41(5): 558-560, 590.
Pan Bo, Zhang Chi, Zhang Hua, et al. Exploration and Application of Digital Twin Substation in Digital Intelligent Transformation of Power Grid Enterprises[J]. Power & Energy, 2020, 41(5): 558-560, 590.
- [12] Panayiotis Moutis, Omid Alizadeh-Mousavi. Digital Twin of Distribution Power Transformer for Real-time Monitoring of Medium Voltage from Low Voltage Measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 1952-1963.
- [13] 江友华, 易罡, 黄荣昌, 等. 基于多源信息融合的变压器检测与评估技术[J]. 上海电力大学学报, 2020, 36(5): 481-485.
Jiang Youhua, Yi Gang, Huang Rongchang, et al. Transformer State Detection and Evaluation Technology Based on Multi-source Information Fusion[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2020, 36(5): 481-485.
- [14] Ivan E Kolesnikov, Anton V Korzhov, Konstantin E Gorshkov. Digital Program for Diagnosing the Status of a Power Transformer[C]//2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 315-321.
- [15] 井永腾, 王宁, 李岩, 等. 电磁-热-流弱耦合的变压器绕组温升研究[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(10): 41-48.
Jing Yongteng, Wang Ning, Li Yan, et al. Research on Temperature Rise of Transformer Windings with Electromagnetic-thermal-flow Weak Coupling[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(10): 41-48.