

10 kV 配电变压器匝间短路电磁特性的 分析与故障识别

辛 锋¹, 桂 媛², 马光耀¹, 徐兴全², 姚晓菁^{3*}, 胡国亭³,
张 雷³, 唐志国³

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100051;
2. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075;
3. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

Analysis of Electromagnetic Characteristics and Fault Identification of Inter-Turn Short Circuits in 10 kV Distribution Transformers

XIN Feng¹, GUI Yuan^{1,2}, MA Guangyao¹, XU Xingquan², YAO Xiaojing^{3*},
HU Guoting³, ZHANG Lei³, TANG Zhiguo³

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100051, China;
2. State Grid Beijing Electric Power Company Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China;
3. Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Objective] Inter-turn short circuit is the most frequent type of fault in distribution transformers, and if a minor inter-turn short circuit is not dealt with in time, it may evolve into a serious inter-turn short circuit, endangering the stable operation of the transformer. This study aims to explore a high-precision diagnostic method capable of effectively identifying incipient faults to achieve early warning.

[Methods] Firstly, for the early short-circuit condition, a method using nonlinear arc characteristics to replace the impedance at the short-circuit point was proposed. A high-impedance, low-energy arc was used to simulate an incipient inter-turn short circuit in the transformer. The winding current signals before and after the fault were extracted, and the distortion characteristics of magnetic flux variation was analyzed. Subsequently, a multi-scale residual network model based on the attention mechanism was proposed, achieved efficient identification of interturn short-circuit faults.

[Results] Simulation and experimental results indicated that the fault current obtained through nonlinear arc impedance simulation was significantly smaller than that from linear impedance simulation. The inter-turn short circuit led to an increase in the leakage flux density within the air gap between the core and the windings, resulted in an overall rise in electromagnetic losses. The method proposed in this paper was effectively able to distinguish between the three states:

normal operation, minor inter-turn short circuit, and severe inter-turn short circuit, achieving a test accuracy of 0.975.

[Conclusion] The research can effectively reveal the electromagnetic response characteristics of the transformer's early inter-turn short circuit, and lay a theoretical reference for the early fault detection.

Key words: inter-turn short circuit; nonlinear arc; attention mechanism; multi-scale residual network model

摘 要:【目的】匝间短路是配电变压器最为频发的故障类型,轻微匝间短路未及时处置,则可能演化为严重匝间短路,危及变压器的稳定运行。本研究旨在探索一种能够有效识别轻微故障的高精度诊断方法,以实现早期预警。【方法】首先,针对早期短路工况,提出一种用非线性电弧特性替代短路点阻抗的方法,并通过高阻抗小电弧模拟变压器匝间早期短路,提取故障前后绕组电流的信号并分析磁通变化等。其次,提出了基于注意力机制的多尺度残差网络模型,实现了对匝间短路的高效识别。【结果】仿真与试验结果表明,采用非线性电弧阻抗仿真得到的故障电流远小于线性阻抗,匝间短路导致铁心与绕组间气隙的漏磁通密度增大,造成电磁损耗总体上升。本文所提方法能够有效区分正常运行、轻微匝间短路和严重匝间短路三种状态,测试准确率高达 0.975。【结论】本研究可有效揭示变压器早期匝间短路的电磁响应特性,为故障早期检测提供了理论参考。

关键词: 匝间短路;非线性电弧;注意力机制;多尺度残差网络模型

0 引言

配电变压器的运行状态关系到配电网的安全稳定运行,匝间短路是变压器最常见的绕组故障^[1]。变压器在运行过程中其线圈可能会出现绝缘损坏的情况,导致变压器出现匝间短路故障。变压器匝间短路时产生的短路电流会形成磁场,继而产生强大的电动力,从而使得线圈和绕组发生形变,短路产生的热量可能会引起局部过热、绝缘老化^[2]。因此对变压器匝间短路前后电气性能的对比研究至关重要。

在变压器匝间短路分析领域,主要采用数值法与解析法两种研究手段^[3]。目前,国内外学者已取得一系列成果。例如,冯婷娜等^[4]通过有限元软件仿真,分析了不同绕组短路故障类型对变压器内部电场分布的影响;郝艳等^[5]通过仿真计算,探讨了一次侧绕组在不同匝间短路故障状态下的磁场分布及两侧绕组电流变化;王蕴皓^[6]构建了变压器三维温度场模型,并对比分析了变压器在正常运行状态与不同匝间短路故障状态下的温度场分布及差异;尚虎军等^[7]建立了变压器绕组匝间短路试验平台,模拟了在不同负载工况下的早期绕组匝间短路故障,并测量了相关电流与温度参数,进而提出了一种基于电热特征的变压器绕组早期匝间短路预警技术。

本研究首先对变压器发生匝间短路前后一次侧与二次侧电流的变化规律进行了探究。其次,通过数值分析法构建了变压器匝间短路的仿真模型,进而获得了短路状态下变压器线圈电流、电磁损耗以及磁通分布的变动情况。最后,搭建了基于注意力机制的多尺度残差网络模型,对变压器匝间短路进行预警。

1 解析法分析变压器匝间短路

变压器正常运行时的等效电路图如图 1 所示。图中, Z_1 为一次侧阻抗; Z'_L 和 Z'_2 为二次侧负载和阻抗归算到一次侧的阻抗值。

可得变压器一、二次侧电流计算式为

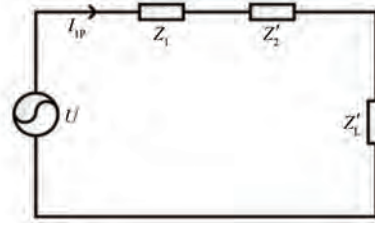


图 1 变压器正常工作时的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of a transformer under normal operating conditions

$$\begin{cases} I_{1P} = \frac{U}{Z_1 + k^2(Z'_2 + Z'_L)} \\ I_{2P} = \frac{Uk}{Z_1 + k^2(Z'_2 + Z'_L)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{1P} 、 I_{2P} 分别为正常运行时变压器的一、二次侧电流值; U 为电源电压; k 为变压器一、二次侧的匝数比。

设变压器绕组总匝数为 N ,若匝间短路的匝数占比为 m ,则短路部分的匝数为 Nm ,未发生匝间短路部分匝数为 $N(1-m)$,变压器发生二次侧匝间短路时的等效电路如图 2 所示。

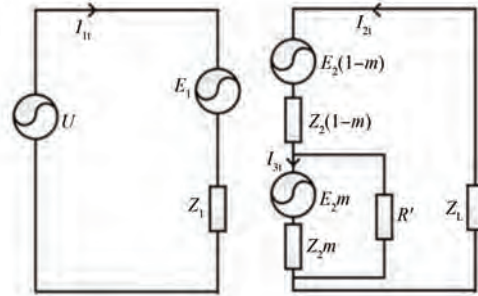


图 2 变压器二次侧发生匝间短路时的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of a transformer with secondary-side interturn short circuit

图 2 中, I_{1n} 为一次侧回路的电流; I_{2n} 为二次侧回路的电流; Z'_L 为二次侧负载阻抗; E_1 为变压器一次绕组未短路部分的感应电动势; E_2m 为二次侧短路匝数对应的感应电动势; $Z_2(1-m)$ 为与一次侧未短路部分关联的阻抗; Z_2m 为二次侧短路匝数对应的阻抗,限制短路电流; R' 为二次侧短路回路中额外的电阻,该电阻用于表征变压器早期匝间短路中阻抗较大、电弧强度较低的特征,用以模拟实际工况下早期短路呈现的间歇性短路现象^[8]。

由 E_2m 可知未短路部分的感应电动势为 $E_2(1-m)$,采用叠加原理,计算出这两部分电压源

单独作用时二次侧的电流,再对其进行叠加。一次侧电压与二次侧短路部分和未短路部分的比值为

$$\begin{cases} \frac{E_1}{E_2(1-m)} = \frac{N_1}{N_2(1-m)} = \frac{k}{1-m} \\ \frac{E_1}{E_2m} = \frac{N_1}{N_2m} = \frac{k}{m} \end{cases} \quad (2)$$

二次侧 $E_2(1-m)$ 单独作用时:

$$kE_2(1-m) = E_1 \quad (3)$$

$$\begin{cases} I'_{2t} = \frac{E_1(1-m)/k}{Z_L + Z_2(1-m) + R' \parallel Z_2m} \\ I'_{3t} = I'_{2t} \cdot \frac{R'}{R' + Z_2m} \end{cases} \quad (4)$$

式中: I'_{2t} 、 I'_{3t} 分别为绕组短路部分、非短路部分的电流; $\parallel$ 为并联。

二次侧 E_2m 单独作用时,绕组短路部分和非短路部分的电流 I''_{2t} 和 I''_{3t} 的计算式为

$$kE_2(1-m) = E_1 \quad (5)$$

$$\begin{cases} I''_{2t} = I''_{3t} \cdot \frac{R'}{Z_L + Z_2(1-m) + R'} \\ I''_{3t} = \frac{E_1m/k}{R' \parallel [Z_L + (1-m)Z_2] + Z_2m} \end{cases} \quad (6)$$

将式(5)、式(6)计算得到的短路电流叠加,可得二次侧短路匝和非短路匝的电流 I_{2t} 和 I_{3t} ,如式(7)所示:

$$\begin{cases} I_{2t} = I'_{2t} + I''_{2t} \\ I_{3t} = I'_{3t} + I''_{3t} \end{cases} \quad (7)$$

令 $R'=0$,模拟匝间短路,再将二次侧电流折算到一次侧,可得:

$$\begin{cases} I_{2t} \frac{1-m}{k} = \frac{E_1(1-m)^2}{k^2} \cdot \frac{1}{Z_1 + Z_2(1-m)} \\ I_{3t} \frac{m}{k} = \frac{E_1}{k^2} \cdot \frac{1}{Z_2m} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} I_{1t} = \frac{U}{Z_1 + k^2Z_2 + \frac{k^2Z_L}{1 + \frac{Z_Lm}{Z_2(1-m)}}} > I_{1P} \\ I_{2t} = \frac{U}{Z_1 + k^2Z_2 + \frac{k^2Z_L}{1-m} + \frac{nZ_1Z_L}{Z_2(1-m)}} < I_{2P} \end{cases} \quad (9)$$

对应的等效电路如图3所示。

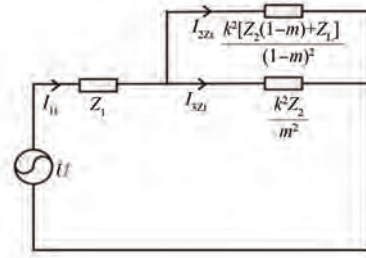


图3 归算到一次侧的等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram referred to the primary side

由式(9)可知,变压器二次侧发生匝间短路时,一次侧电流较正常运行时会上升,二次侧电流较正常运行时会下降。

2 数值法分析变压器匝间短路

2.1 变压器三维仿真模型构建

在 COMSOL 软件中构建的三维模型和变压器网络剖分图如图4和5所示,输入模型的参数如表1所示,参数基于上海厂家定制版 BS20-M-100/10-N 变压器。二次侧额定电流为

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times U} = 144.34 \text{ A} \quad (10)$$

式中: $S=100 \text{ kVA}$ 为变压器容量; $U=0.4 \text{ kV}$ 为低压侧额定电压。

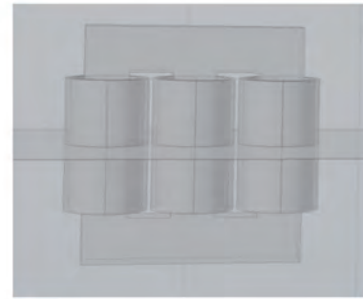


图4 变压器三维模型

Fig. 4 3D model of transformer

表1 输入模型的参数

Tab. 1 Input parameters for the model

参数名称	参数值
一次侧电压/kV	10
一、二次侧匝数比	1 100/105
频率/Hz	50
一次侧、二次侧每相电阻/ Ω	10、10

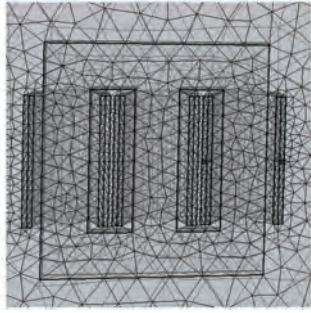


图 5 变压器网格剖分示意图

Fig. 5 Mesh generation diagram of a transformer

变压器一次侧、二次侧电路结构如图 6、7 所示,构建变压器的场-路耦合模型。图中, R_1 、 R_2 分别为变压器一、二次侧绕组的电阻。

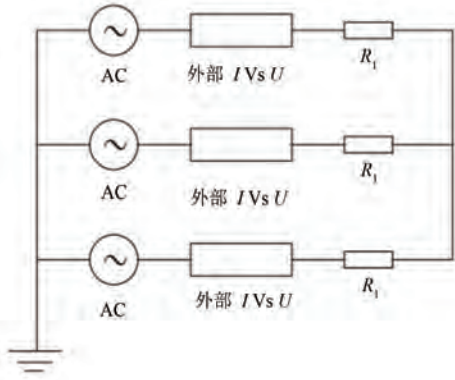


图 6 变压器一次侧电路结构

Fig. 6 Primary side circuit structure of a transformer

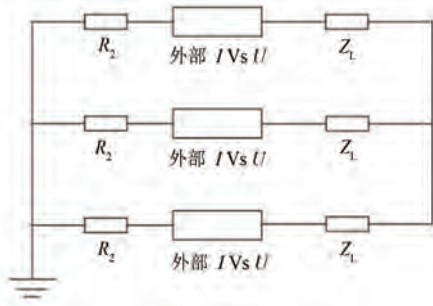


图 7 变压器二次侧电路结构

Fig. 7 Secondary side circuit structure of a transformer

场-路耦合模型通过麦克斯韦方程组描述电磁场,通过电路接口描述外部电路,两者通过安培定律和法拉第电磁感应定律进行耦合^[9],如式(11)所示:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e \quad (11)$$

式中: μ 为磁导率; $\mathbf{A}$ 为磁矢位; $\mathbf{J}_e$ 为外加电流密度矢量。

$$U_{\text{total}} = IR + L \frac{dI}{dt} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (12)$$

式中: U_{total} 为电路中的总电压; IR 为电阻上的压降; $L \frac{dI}{dt}$ 为电感上的感生电动势; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; S 为磁通量穿过的闭合曲面。

2.2 匝间短路前后电流变化规律

2.2.1 采用传统的线性阻抗模型模拟匝间短路

正常运行时一次侧、二次侧三相电流波形如图 8、9 所示。

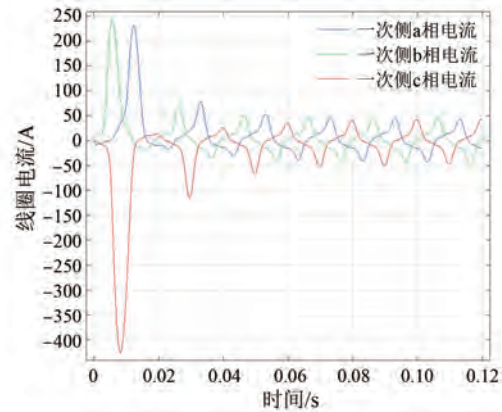


图 8 正常运行时一次侧三相电流波形

Fig. 8 Three phase current waveforms on the primary side under normal operating conditions

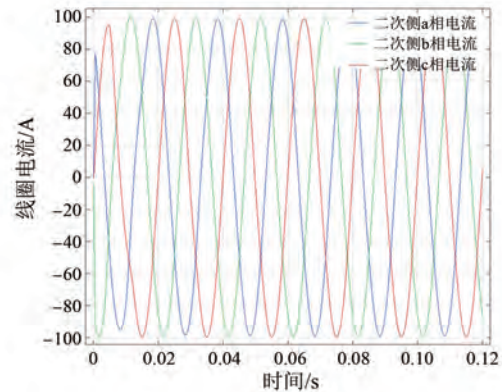


图 9 正常运行时二次侧三相电流波形

Fig. 9 Three phase current waveforms on the secondary side under normal operating conditions

由图 8、9 可知,变压器正常工作条件下,一次侧电流的幅值为 76 A,二次侧电流的幅值则为 100 A。

设置变压器二次侧 C 相绕组匝间短路电阻为 $R' = 0.03 \Omega$ 。采用线性阻抗模拟二次侧匝间短路,短路匝数为 5 时,一次侧三相电流波形如图

10 所示,二次侧故障相非故障匝电流波形如图 11 所示,二次侧故障相故障匝电流波形如图 12 所示。

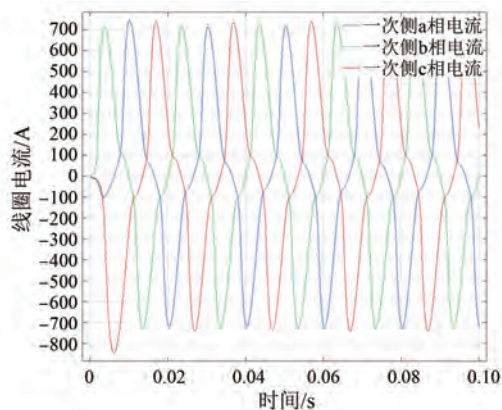


图 10 匝间短路时一次侧三相电流波形

Fig. 10 Primary side three phase current waveforms during an inter-turn short circuit fault

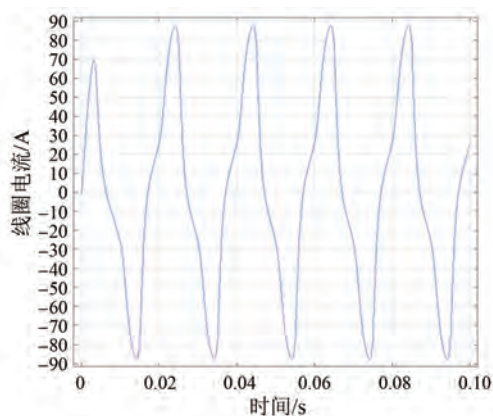


图 11 匝间短路时二次侧故障相非故障匝电流波形
Fig. 11 Current waveform of the non-faulted turns in the faulty phase on the secondary side during an inter-turn short circuit fault

由图 10 可知,发生匝间短路故障后,一次侧绕组电流幅值从 76 A 显著上升至 748 A,上升幅度为 884.21%,同时验证了采用解析法所得推导结果 $I_{1i} > I_{1p}$ 的正确性。由图 11 可知,二次侧故障相非故障匝电流幅值由 100 A 降至 87 A,下降幅度为 13%,同时验证了解析法推导结果 $I_{2i} < I_{2p}$ 的正确性。由图 12 可知,变压器二次侧短路匝部分的短路电流达 4 422 A,对比二次侧额定电流 144.34 A,上升幅度高达 2 963.60%。匝间短路故障导致绝缘遭到破坏,致使接触电阻显著降低所致,短路匝电流急剧增大。

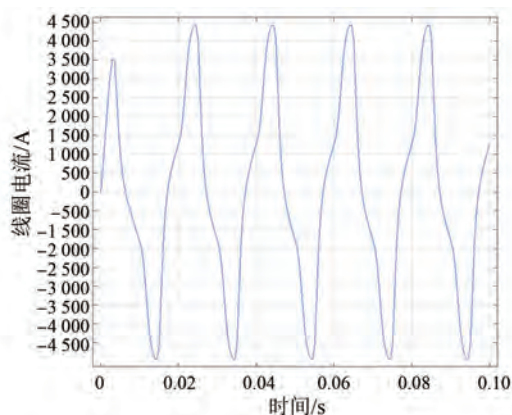


图 12 匝间短路时二次侧故障相故障匝电流波形

Fig. 12 Current waveform of the faulted turns in the faulty phase on the secondary side during an inter-turn short circuit fault

2.2.2 采用非线性电弧阻抗模型模拟匝间短路

传统的线性阻抗模型 $U = R_0 I$ 无法描述电弧电阻随电流增大而减小的关键物理现象,不适用于早期故障分析。在构建二次侧绕组间短路模型的过程中,通过非线性电弧电阻模型模拟了电弧电阻随电流变化的负阻效应,适用于模拟早期、轻微的电弧性匝间短路。该模型能准确捕捉这种状态下微小但非线性的电流变化。

在 COMSOL 中建立变压器匝间短路故障相电路-磁路耦合模型,原理图如图 13 所示。图中, L_2 等效为二次侧发生匝间短路的绕组; L_1 和 L_3 等效为未发生匝间短路的绕组; R_L 为二次侧负载电阻; R' 为二次侧短路回路电阻。

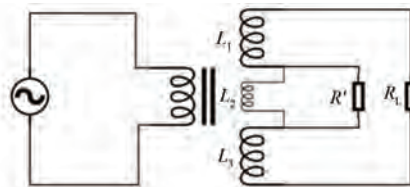


图 13 匝间短路非线性阻抗等效电路图

Fig. 13 Equivalent circuit diagram of interturn short-circuit with nonlinear impedance

定义 R' 两端的电压表达式为

$$U_{\text{down}} = R_0 I + a I^2 \quad (13)$$

式中: U_{down} 为短路点压降; I 为短路回路的电流; R_0 为考虑短路时导线接触电阻,取 0.03; a 为系数,取 -6.5×10^{-6} 。

采用非线性电弧模型模拟匝间短路后的一次侧、二次侧三相电流如图 14、15 所示,采用非线性

电弧模型模拟匝间短路后的二次侧故障相故障匝电流如图 16 所示。

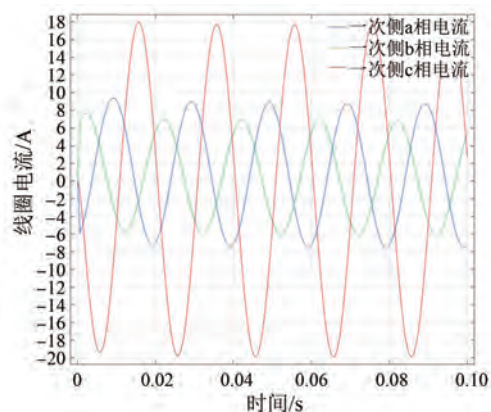


图 14 采用非线性电弧模型模拟匝间短路后的一次侧三相电流

Fig. 14 Primary side three-phase currents simulated using a nonlinear arc model for interturn short-circuit faults

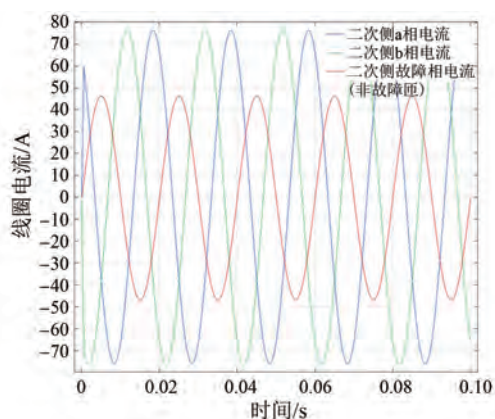


图 15 采用非线性电弧模型模拟匝间短路后的二次侧三相电流

Fig. 15 Secondary side three-phase currents simulated using a nonlinear arc model for interturn short-circuit faults

由图 14 可知,故障相 C 相的电流比其余两相升高了 10 A。由图 15 可知,故障相 C 相的电流对比其余两相降低了 40 A。由图 16 可知,变压器二次侧短路匝部分产生了 380 A 的短路电流,相比二次侧额定电流 144.34 A,上升幅度为 163%。和采用线性阻抗对比,采用非线性电弧模拟匝间短路仿真得到的一二次侧故障电流上升幅度明显减小,该仿真方法能够捕捉变压器匝间短路故障早期更为微弱的电流变化,为后续基于波形特征的故障诊断算法提供更高质量、更可靠的

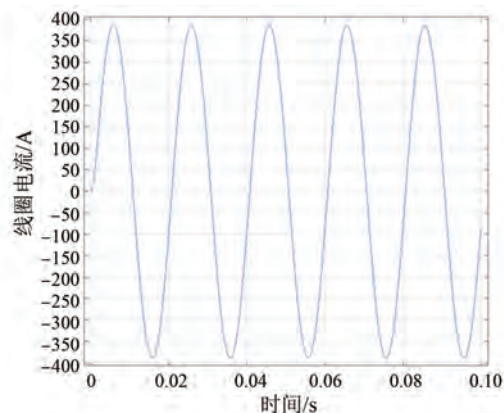


图 16 采用非线性电弧模型模拟匝间短路后的二次侧故障相故障匝电流

Fig. 16 Faulted turn current in the secondary side faulty phase simulated using a nonlinear arc model for interturn short-circuit faults

数据基础。

2.3 短路前后的磁通分布变化

变压器的磁通主要受一次侧电源电压及频率的影响,其整体变化幅度相对较小^[10]。短路匝形成一个低阻抗回路,产生大电流 I_k ,其磁势 $I_k N_k$ 与一次侧磁势相互作用,进而引起漏磁通的增加^[11]。短路环周围的漏磁通可能会绕过铁心,通过空气或其他非理想路径闭合,这将导致局部漏磁密度的升高,特别是在短路点附近。为了补偿短路环的磁势,一次侧电流会相应增大,以保持主磁通的稳定性^[12]。

本研究通过三维建模,在铁心与绕组间气隙中定义截面线如图 17 红色标识所示,定量分析磁通密度分布特性。正常运行时铁心与绕组间气隙

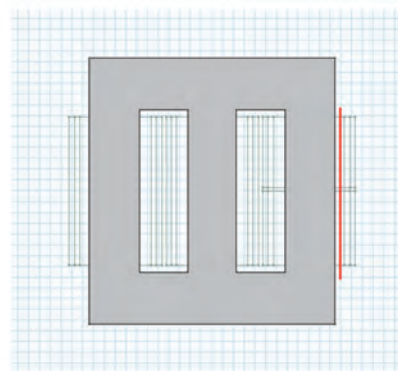


图 17 铁心与绕组之间定义的截面线

Fig. 17 Defined cross-section line between the core and winding

的磁通如图 18 所示,匝间短路后铁心与绕组间气隙的磁通分布如图 19 所示。

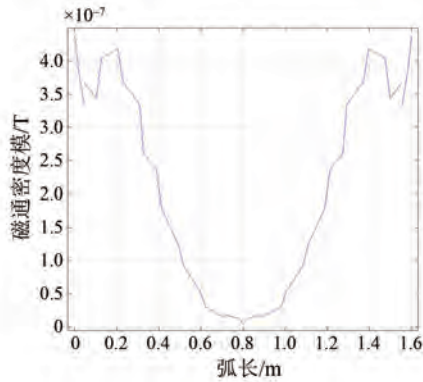


图 18 正常运行时铁心与绕组间气隙的磁通分布

Fig. 18 Magnetic flux distribution in the core and winding under normal operation

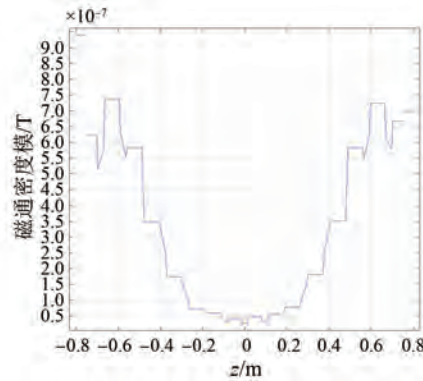


图 19 匝间短路后铁心与绕组间气隙的磁通分布

Fig. 19 Magnetic flux distribution in the core-winding air gap after inter-turn short circuit

由图 17 可知,匝间短路前后,气隙磁通沿截面线均呈现对称分布规律^[13]。由图 18 可知,正常运行时,铁心与绕组之间空气隙的磁通密度呈现先递减后递增的趋势,在绕组中心位置达到最小值。由图 19 可知,匝间短路发生后,铁心与绕组间气隙的漏磁通密度增大,造成电磁损耗总体上升^[14]。

3 基于注意力机制的多尺度残差网络模型

本文采用的非线性电弧模型模拟的早期故障特征非常微弱,因此需要建立可靠的识别模型对变压器匝间短路进行诊断。而传统的多层感知机(Multilayer Perceptron, MLP)、卷积神经网络

(Convolutional Neural Network, CNN)和长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)网络容易将这些微弱变化淹没在噪声中^[15],存在时序特征捕捉不足、长程依赖建模差及计算效率低等缺陷^[16-17]。因此需要建立更加可靠精确的识别模型对这些关键的、微小的变化进行聚焦^[18]。

基于此,本文提出了基于注意力机制的多尺度残差网络模型,通过试验采集了大量变压器正常运行时和发生匝间短路之后的特征量。一共采集 6 000 个样本,每个样本有 7 个特征,分别为一次侧电流、二次侧电流、一次侧电压、二次侧电压、变压器损耗、温度和功率因数。样本分为三类:第一类为正常运行情况,标记为 0;第二类为发生轻微匝间短路的情形,标记为 1;第三类为发生严重匝间短路的情形,标记为 2。构建多层注意力机制残差网络模型,并进行训练,该模型的数学机制如下。

(1)样本数据以矩阵形式输入模型,如式(14)所示:

$$X \in \mathbf{R}^{7 \times L} \quad (14)$$

式中: X 为输入矩阵,包含 7 个特征; L 为采样点数。

(2)为同时捕获故障特征的局部细节与全局趋势,模型采用并行的一维卷积结构生成三路特征图,如式(15)所示:

$$H_s = f(W_s * X + b_s), s = 1, 2, 3 \quad (15)$$

式中: H_s 为第 s 路输出的特征图; W_s 为第 s 路卷积核; b 为偏置向量。

(3)将三路特征进行拼接,线性映射为查询、键、值矩阵^[19],如式(16)~(17)所示:

$$\bar{H} = [\bar{H}^{(1)}; \bar{H}^{(2)}; \bar{H}^{(3)}] \in \mathbf{R}^{192 \times L'} \quad (16)$$

$$\begin{cases} Q = W_Q \bar{H} \\ K = W_K \bar{H}, & W_Q, W_K, W_V \in \mathbf{R}^{d \times 192} \\ V = W_V \bar{H} \end{cases} \quad (17)$$

式中: W_Q 、 W_K 、 W_V 为查询、键、值可学习投影矩阵^[20]。

(4)自注意力机制通过计算序列中所有时间步之间的相关性,动态赋予不同特征以重要性权重^[21]。单头注意力权重计算式为

$$A = \text{softmax}\left(\frac{Q^T K}{\sqrt{64}}\right) \in \mathbf{R}^{L' \times L'} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为注意力权重矩阵^[22]。

(5) 为增强模型容量, 采用多头注意力机制。将所有头的输出拼接后再次投影, 得到最终的多头注意力输出, 如式 (20) 所示:

$$\text{head}_i = \text{Attention}(HW_i^Q, HW_i^K, HW_i^V) \quad (19)$$

$$\text{MultiHead}(H_{\text{multi}}) = [\text{head}_1 | \text{head}_2 | \dots | \text{head}_h] \mathbf{W}^0 \quad (20)$$

式中: h 为头数, 本文取 2; $\mathbf{W}^0$ 为输出投影。

(6) 在构建深度网络时, 引入残差连接以缓解梯度消失问题^[23]。把子层输入原封不动跳转到输出端^[24], 如式 (21) 所示:

$$\mathbf{O} = \mathcal{N}(H_{\text{multi}}) + H_{\text{multi}} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{O}$ 为输出特征; $\mathcal{N}$ 为残差块的最终输出; H_{multi} 为拼接后的注意力头^[25]。

(7) 模型最终通过一个全局平均池化层和 Softmax 分类器输出预测概率, 如式 (22) 所示:

$$P(y = j | \mathbf{X}) = \frac{\exp(z_j)}{\sum_{c=1}^C \exp(z_c)} \quad (22)$$

式中: z_j, z_c 为网络最后一层的输出向量^[26]。

本文所提模型训练流程如图 20 所示。

将总样本划分为训练集 3 840 个, 验证集 960 个, 测试集 1 200 个。加载数据到模型中进行训练, 采用正则化策略引入 Dropout 随机失活神经元防过拟合^[27]; 加入 L2 正则化, 通过权重衰减控制模型复杂度, 根据模型训练的情形对学习率进行衰减, 精细调优^[28]。最终模型在测试集上的准确率达到 0.975, 实现了对变压器匝间短路的有效识别。

本文模型训练过程的准确率曲线、损失函数曲线、学习率衰减曲线如图 21~23 所示。模型输出的混淆矩阵如图 24 所示, 将其整理成表格, 如表 2 所示。

由图 21~24 和表 2 可知, 本文模型在测试样本中表现优异, 整体准确率达到 0.975。其中, 对严重匝间短路的识别最为精准, 精确率和 F1 分数均为 1, 实现了零漏诊; 轻微匝间短路的 F1 分数为 0.96, 较传统模型有显著提升; 正常情况的识别也相当稳定, F1 分数为 0.97。所有类别的召回率均超过 0.96, 证明了模型的强鲁棒性和强抗噪声能力, 完全满足工程应用中对故障诊断的精度要求。

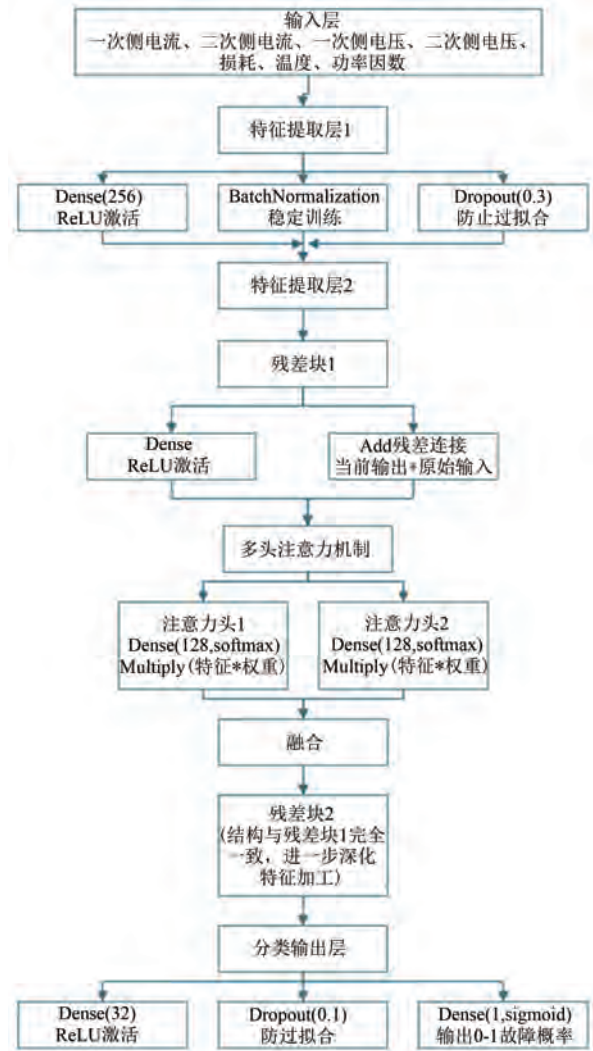


图 20 变压器匝间段故障识别程序流程

Fig. 20 Flowchart of interturn short-circuit fault identification procedure for transformers

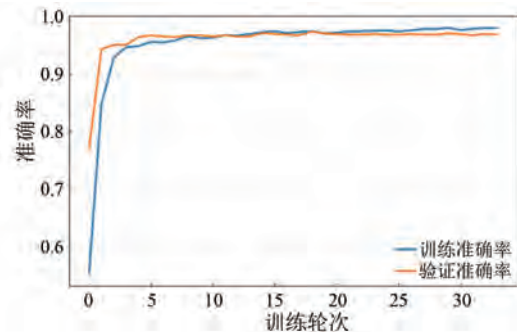


图 21 本文模型训练过程的准确率曲线

Fig. 21 Accuracy curves during the proposed model training

本文还采用传统的 MLP、CNN 及 LSTM 模型进行训练, 各模型性能对比如表 3 所示。

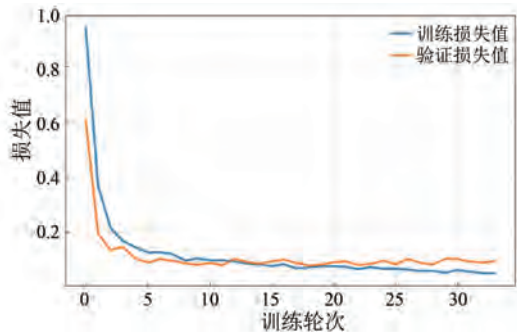


图 22 本文模型训练过程中的损失函数曲线

Fig. 22 Loss function curves during the proposed model training

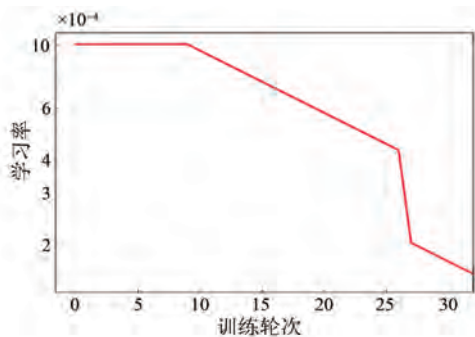


图 23 本文模型训练过程中的学习率衰减曲线

Fig. 23 Learning rate decay curve during the proposed model training

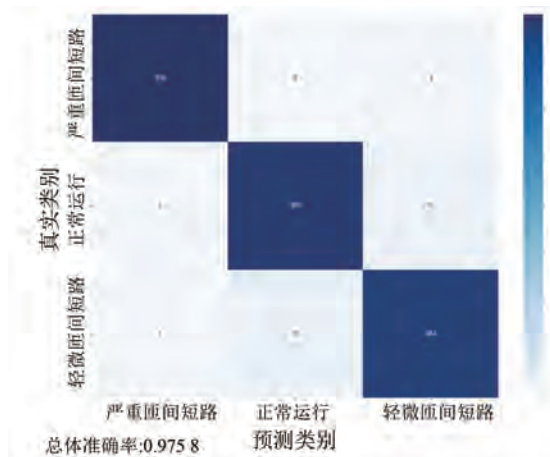


图 24 本文模型输出的混淆矩阵

Fig. 24 Confusion matrix of the proposed model output

表 2 本文模型的性能

Tab. 2 Performance for the proposed model				
样本类型	精确率	召回率	F1 分数	样本数
正常情况	0.96	0.97	0.97	400
轻微匝间短路	0.97	0.96	0.96	400
严重匝间短路	1	0.99	1	400

表 3 各模型性能对比

Tab. 3 Model performance comparison				
模型	准确率	精确率	召回率	F1 分数
本文模型	0.975 6	0.973 6	0.973 6	0.973 3
MLP	0.832 3	0.826 3	0.831 4	0.821 9
CNN	0.901 2	0.912 4	0.902 8	0.899 2
LSTM	0.864 5	0.876 7	0.873 7	0.865 5

由表 3 可知,本文提出的模型在准确率、精确率、召回率和 F1 分数上均显著优于 MLP、CNN 和 LSTM。具体来说,本文模型准确率比 MLP 高 14.33 个百分点,比 LSTM 高 11.11 个百分点;F1 分数比 CNN 高 7.41 个百分点,比 LSTM 高 10.78 个百分点。这表明本文模型在故障识别任务中具有更强的综合性能。

4 结语

针对变压器早期匝间短路,本研究构建了 10 kV 模拟平台,采用非线性电弧模型模拟小阻抗故障,提取电流波形和磁密畸变特征。基于注意力残差网络搭建识别模型,测试准确率达 0.975。COMSOL 仿真表明:一次侧电流增大,二次侧非故障匝电流减小;非线性模型故障电流更小;匝间短路导致铁心与绕组间气隙的漏磁通密度增大,造成电磁损耗总体上升。

采用非线性电弧特性替代短路点阻抗能够有效模拟配电变压器早期匝间短路故障工况,捕捉到故障早期微小的电流变化,而基于注意力机制的多尺度残差网络模型能够实现对正常情况和匝间短路情况的有效识别,对于配电变压器早期匝间短路的状态监测与故障预警具有重要价值。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

辛锋、姚晓菁进行了方案设计、内容总结与论文撰写,桂媛、马光耀、徐兴全进行了试验研究,胡国亭、张雷、唐志国参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summarization and paper writing were conducted by Xin Feng and Yao Xiaojing. The experimental research was performed by Gui Yuan, Ma Guangyao and Xu Xingquan. The paper review and revision were participated by Hu Guoting, Zhang Lei and Tang Zhiguo. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 谷国瑞. 变压器匝间短路的常见原因和判断方法[J]. 农村电工, 2024, 32(10): 47.
GU G R. Common causes and judgment methods of inter turn short circuit in transformers [J]. Rural Electrician, 2024, 32(10): 47.
- [2] 咸日常, 郑小刚, 李嘉洋, 等. 变压器绕组匝间短路与低压侧出口短路的电磁力特征对比分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 160-168.
XIAN R C, ZHENG X G, LI J Y, et al. Comparative analysis of the electromagnetic force characteristics of inter-turn short circuits and low-voltage side outlet short circuits in transformer windings [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(8): 160-168.
- [3] 王蕴皓, 阎秀恪, 张殿海, 等. 三相变压器两侧绕组匝间短路电磁特性研究[J]. 东北电力技术, 2024, 45(1): 30-36.
WANG Y H, YAN X K, ZHANG D H, et al. Research on electromagnetic characteristics of three-phase transformer with inter-turn short circuit of double windings [J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(1): 30-36.
- [4] 冯婷娜, 王涛, 王碧霞, 等. 油浸式变压器绕组匝间短路故障对其内部电场分布的影响分析[J]. 电器工业, 2024, (1): 22-27.
FENG T N, WANG T, WANG B X, et al. Analysis of the impact of interturn short circuit fault in oil immersed transformer winding on its internal electric field distribution [J]. China Electrical Equipment Industry, 2024, (1): 22-27.
- [5] 郝艳, 咸日常, 胡玉耀, 等. 干式变压器绕组匝间短路故障的电磁特征及电动力分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(8): 214-218.
HAO Y, XIAN R C, HU Y Y, et al. Electromagnetic characteristics and electrodynamic analysis of dry-type transformer winding interturn short circuit fault [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(8): 214-218.
- [6] 王蕴皓. 变压器绕组匝间短路的建模与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
WANG Y H. Modeling and analysis of transformer winding inter-turn short circuit [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [7] 尚虎军. 电力变压器绕组变形及匝间短路缺陷下漏磁分布畸变规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
SHANG H J. Study on the distortion law of leakage distribution under winding deformation and turn-to-turn defects in power transformers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023.
- [8] 李航博. 三相变压器匝间短路故障特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
LI H B. study on the characteristics of three-phase transformer inter-turn short circuit fault [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [9] 杨存祥, 曹炳锦, 安然, 等. 变压器匝间短路故障电-磁-热多物理场协同分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1984-1990.
YANG C X, CAO B J, AN R, et al. Multi-physical field cooperative analysis of electric-magnetic-thermal for the transformer inter-turn short circuit fault [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(5): 1984-1990.
- [10] 郝艳, 咸日常, 胡玉耀, 等. 基于场-路耦合有限元法的干式变压器匝间短路暂态特性研究[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 90-98.
HAO Y, XIAN R C, HU Y Y, et al. Research on transient characteristics of interturn short circuit of dry-type transformer based on field-circuit coupled finite element method [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 90-98.
- [11] 咸日常, 张冰倩, 刘兴华, 等. 应用有限元分析电力变压器绕组匝间短路的暂态特征[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(10): 130-138.
XIAN R C, ZHANG B Q, LIU X H, et al. Application of finite element analysis to transient characteristics of interturn short circuit in power transformer windings [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(10): 130-138.
- [12] 苏国强, 毛志强, 刘合金, 等. 一起 10 kV 油浸式配电变压器匝间短路故障诊断与分析[J]. 变

- 器, 2021, 58(3): 84-87.
- SU G Q, MAO Z Q, LIU H J, et al. Diagnosis and analysis of an interturn short circuit fault for 10 kV oil-immersed distribution transformer [J]. Transformer, 2021, 58(3): 84-87.
- [13] 张冰倩, 咸日常, 于洋, 等. 匝间短路故障下电力变压器绕组的物理特征分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2177-2185.
- ZHANG B Q, XIAN R C, YU Y, et al. Analysis of physical characteristics of power transformer windings under inter-turn short circuit fault [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2177-2185.
- [14] 孙西宁, 鲍超凡. 基于改进支持向量机的变压器绕组匝间短路故障诊断方法[J]. 机电技术, 2025, (2): 36-40.
- SUN X N, BAO C F. Fault diagnosis method of interturn short circuit in transformer winding based on improved support vector machine [J]. Mechanical & Electrical Technology, 2025, (2): 36-40.
- [15] 韦金国. 基于 QPSO-LSSVM 模型的变压器匝间短路故障诊断[J]. 黑龙江科学, 2025, 16(8): 34-37.
- WEI J G. Diagnosis of transformer inter-turn short circuit fault based on QPSO-LSSVM model [J]. Heilongjiang Science, 2025, 16(8): 34-37.
- [16] 刘真. 基于改进小波包分解的电缆绕组变压器短路故障自动检测方法[J]. 自动化应用, 2025, 66(8): 170-172.
- LIU Z. Automatic detection method of short circuit fault of cable winding transformer based on improved wavelet packet decomposition [J]. Automation Applications, 2025, 66(8): 170-172.
- [17] 许华荣. 配电变压器故障分析及排除实例[J]. 农村电气化, 2025, (4): 50-56.
- XU H R. Failure analysis and troubleshooting cases of distribution transformers [J]. Rural Electrification, 2025, (4): 50-56.
- [18] 刘建锋, 范一凡, 宋伊宁, 等. 基于改进连续变分模态分解和深度残差网络及漏磁信号的变压器绕组故障诊断[J]. 电网技术, 2025, 49(10): 4428-4437.
- LIU J F, FAN Y F, SONG Y N, et al. Fault diagnosis of transformer windings based on improved sequential variational mode decomposition, deep residual network and magnetic leakage signals [J]. Power System Technology, 2025, 49(10): 4428-4437.
- [19] 袁发庭, 杨毅, 钟浩, 等. 短路工况下配电变压器绕组磁场-结构力场耦合特性及累积效应形变特性[J]. 高电压技术, 2025, 51(10): 5238-5252.
- YUAN F T, YANG Y, ZHONG H, et al. Magnetic-structural force coupling characteristics and cumulative deformation characteristics of distribution transformer windings under short-circuit conditions [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10): 5238-5252.
- [20] 卢应强, 胡忠忠, 尚虎军, 等. 变压器绕组典型缺陷下漏磁特性及辨识方法研究[J]. 浙江电力, 2025, 44(2): 110-123.
- LU Y Q, HU Z Z, SHANG H J, et al. Research on magnetic flux leakage characteristics and identification methods under typical transformer winding defects [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(2): 110-123.
- [21] 杨思源, 吴边际, 成明亮. 110 kV 变压器内部线圈短路故障分析[J]. 大众用电, 2025, 40(2): 52-53.
- YANG S Y, WU B J, CHENG M L. Analysis of internal coil short circuit fault of 110 kV transformer [J]. Popular Electricity, 2025, 40(2): 52-53.
- [22] 李耀华, 种国臣, 郭伟超, 等. 永磁同步电机两步模型预测电流控制精简控制集研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(5): 540-551.
- LI Y H, CHONG G C, GUO W C, et al. Research on streamlined control sets for two-step model predictive current control in permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 540-551.
- [23] 王震, 安辉, 邓文宇, 等. 永磁同步电机低复杂度三矢量模型预测电流控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(5): 572-584.
- WANG Z, AN H, DENG W Y, et al. Low-complexity three-vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 572-584.
- [24] 刘力卿, 么军, 贺春, 等. 内置式永磁同步电机全速域无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(4): 356-366.
- LIU L Q, YAO J, HE C, et al. Full-speed-range position sensorless control of interior permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines &

- Control Application, 2025, 52(4): 356-366.
- [25] 戚国阳, 刘畅, 王寅, 等. 定子齿轭部附加气隙对轮辐式永磁同步电机声学性能的影响[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(4): 389-401.
- QI G Y, LIU C, WANG Y, et al. Influence of additional air gap in stator tooth-yoke on the acoustic performance of spoke-type permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(4): 389-401.
- [26] 赵卓群, 赵辉, 吴频, 等. 潜油永磁同步电机的自抗扰控制技术研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(4): 402-411.
- ZHAO Z Q, ZHAO H, WU P, et al. Research on active disturbance rejection control technology for submersible permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(4): 402-411.
- [27] 张灵. 干式变压器振动特性研究及其故障诊断[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2022.
- ZHANG L. Research on vibration characteristics of dry-type transformers and their fault diagnosis [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2022.
- [28] 李璞. 基于深度学习的电力变压器匝间短路故障辨识方法[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- LI P. Fault identification method for inter-turn short circuit of power transformer based on deep learning [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.

收稿日期:2025-07-20

收到修改稿日期:2025-09-16

作者简介:

辛 锋(1980-),男,硕士,副高级工程师,研究方向为配电网设备运行与保护,xinfeng@bj.sgcc.com.cn;

* 通信作者:姚晓菁(2002-),女,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术、电气设备智能感知与故障诊断,3105809138qq.com。