

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.017

基于堆叠自编码器的雷电冲击下电抗器匝间短路预测

宗万里¹, 刘香江¹, 杨哲¹, 苏洋¹, 郭是凯华², 董西宏¹

(1. 国网浙江省电力有限公司超高压分公司, 杭州 310014; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 现有研究对干式空心电抗器匝间短路故障的成因分析主要聚焦于制造缺陷与长期老化,而对雷电冲击这一具体诱因缺乏定量分析与故障溯源手段。文中以 ± 800 kV 干式空心电抗器为研究对象,首先采用多导体传输线理论与高频分布参数模型,结合 Ansys 电磁仿真与 Simulink 波过程分析,揭示了雷电冲击下电抗器绕组的匝间电压分布规律;文中将堆叠自编码器与高斯过程相结合,应用于雷电冲击下干式空心电抗器匝间电压分布的快速预测;与现有基于主成分分析的线性降维方法及单层自编码器相比,SAE-GP 模型通过深度堆叠结构有效捕捉了匝间电压分布中的非线性空间特征,在小样本条件下实现了更高的预测精度与故障定位准确率。最后,以浙江某换流站电抗器雷击事故为例,利用故障录波数据验证了所提方法在故障溯源中的实用性,为干式空心电抗器的雷电冲击故障溯源及主动预警提供了理论依据与技术支撑。

关键词: 干式空心电抗器; 分布参数; 电压分布; 匝间短路; 雷电波形参数; 堆叠自编码器; 高斯过程; 正交试验

Inter-turn Short Circuit Prediction of Reactors Under Lightning Impulse Based on Stacked Autoencoder

ZONG Wanli¹, LIU Xiangjiang¹, YANG Zhe¹, SU Yang¹, GUO Shikaihua², DONG Xihong¹

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Ultra High Voltage Branch, Hangzhou 310014, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Existing research on the causes analysis of inter-turn short-circuit faults in dry-type air-core reactors primarily focuses on manufacturing defects and long-term aging, while lacking quantitative analysis and fault tracing methods specifically for the trigger of lightning impulse. In this paper the ± 800 kV dry-type air-core reactors are taken as the subject of study. First, the inter-turn voltage distribution of reactor winding under lightning impulse conditions is revealed by using the multi-conductor transmission line theory and high-frequency distributed parameter models, along with Ansys electromagnetic simulation and Simulink wave process analysis. The stacked autoencoder is combined with Gaussian processes (SAE-GP) in this paper for rapid prediction of inter-turn voltage distribution of dry type air-core reactor under lightning impulse condition. Compared with existing linear dimensionality reduction methods based on principal component analysis and single-layer autoencoders, the SAE-GP model can effectively capture nonlinear spatial features in inter-turn voltage distributions through its deep stacking structure, achieving higher prediction accuracy and fault localization precision even under small sample conditions. Finally, taking a lightning strike incident at a converter station in Zhejiang province as a case study, the fault recorder data is utilized to verify the practicality of the proposed method in fault tracing, which provides theoretical basis and technical support for lightning impulse fault tracing and active early warning of dry-type air-core reactors.

Key words: dry type air-core reactor; distribution parameters; voltage distribution; inter-turn short circuit; lightning waveform parameters; stacked autoencoder; Gaussian process; orthogonal experiment

0 引言

干式空心电抗器是电力系统中重要的一次设备,与并联电容器组配合使用,具有限制短路电流、补偿容性电流与滤波等作用,其运行可靠性直接关系到电网的稳定与电能质量^[1-5]。

干式空心电抗器长期处于户外复杂的电磁与气象环境中运行,大量现场数据与事故案例表明,匝间短路是引发电抗器烧毁乃至系统非计划停运的主要故障形式之一^[6-7]。当前关于干式空心电抗器匝间短路的成因研究,可归纳为两个方面:一是制造环节遗留的微观绝缘缺陷;二是长期运行中多物理场应力作用下的绝缘材料累积老化。现有研究大多聚焦于前者,且主要围绕故障发生后的检测与诊断展开,难以对故障成因进行量化分析,也无法实现故障溯源。

针对电抗器匝间短路故障的诊断方法,已有学者开展了较为系统的研究,包括电气量检测法、温度量检测法与漏磁场检测法等^[8-10],但均属于故障发生后的被动检测范畴,对于匝间短路故障发生前的预测与溯源,尚缺乏有效手段。

在可能引发电抗器绝缘加速劣化的暂态电气因素中,雷电冲击作为典型的短时强电磁应力,对匝间绝缘影响突出。然而,目前关于雷电冲击下电抗器绕组内部电压分布特性的研究尚不充分,雷电冲击波形参数与匝间绝缘薄弱点形成位置之间的关联机制尚未被系统揭示^[11],制约了该类故障的精准溯源与主动预警能力。

针对雷电冲击下电力设备的过电压与绝缘问题,现有研究主要聚焦于输电线路和变压器等设备。在变压器雷电冲击波过程方面,司马文霞等^[12]分析了多次雷电冲击下变压器油浸绝缘纸板的累积效应;张嘉祥^[12]系统阐述了变压器线圈中的波过程理论。上述研究虽为电抗器雷电冲击分析提供了可借鉴的理论基础和分析方法,但干式空心电抗器绕组内部的波过程及电压分布特性与其他电力设备存在差异,仍需开展针对性研究。

随着人工智能技术在电力设备状态评估领域的快速发展,已有学者将机器学习方法应用于电抗器故障诊断^[13-14],但主要集中于故障后的特征识别与分类,尚未见基于雷电波形参数对匝间电压分布进行预测的研究报道。

基于上述分析,文中聚焦于雷电冲击下干式空心电抗器匝间短路故障预测问题,研究内容主要包括以下3个方面:首先,通过Ansys电磁仿真计算电抗器的分布参数,结合多导体传输线模型建立高频等效

电路,分析雷电冲击下绕组的匝间电压分布规律;其次,采用正交试验设计筛选影响匝间电压峰值的关键雷电波形参数;最后,将堆叠自编码器与高斯过程相结合,应用于雷电冲击下干式空心电抗器匝间电压分布的快速预测,并通过仿真数据与一起浙江换流站电抗器实际雷击事故案例验证所提方法的有效性。

1 基于能量法的电抗器分布参数计算

电抗器绕组在雷电冲击等高频暂态激励下的电压响应,本质为电磁波沿多导体传输线传播的波过程,其传播特性由绕组的分布参数决定。因此,精确获取上述分布参数是准确分析雷电冲击下绕组内部电压分布规律的前提。能量法通过磁场能量与电场能量计算电感与电容,且不依赖于闭合区域的体积积分,在计算多导体系统的分布参数矩阵方面具有较大的便利。因此本章采用能量法对电抗器各匝线圈的分布参数矩阵进行计算,为后续多导体传输线建模与波过程分析提供基础数据。

1.1 分布参数计算能量法

现今电抗器分布参数计算方法有解析法、经验公式法等,但上述方法均进行了一定的等效或简化,在计算高维分布参数矩阵时可能会产生较大误差,为了避免准确性问题,文中采用能量法进行电抗器分布电阻、分布电感与分布电容的计算。

对于施加一定电磁激励的导体,可以通过求解扩散方程得到电流密度分布,进而计算导体焦耳热损耗,进而计算得到交流电阻

$$\begin{cases} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + j\omega\sigma\mathbf{A} = \mathbf{J}_s \\ P_{\text{loss}} = \iiint_V \frac{|\mathbf{J}_s|^2}{\sigma} dV \\ R_{\text{ac}} = \frac{P_{\text{loss}}}{I_{\text{rms}}^2} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{A}$ 为磁矢位; ω 为电磁激励频率; $\mathbf{J}_s$ 为源电流密度; V 为导体体积; P_{loss} 为导体中的总焦耳损耗; I_{rms} 为流过导体的电流有效值。

在线性媒质中,可以根据磁场能量 W_{mag} 与电场能量 W_{ele} 求得分布电感与分布电容值,可以采用能量法,分别通过磁场能量与电场能量求解。通过在每匝线圈上依次施加电磁激励,即可计算得到分布参数矩阵

$$\begin{cases} L_{ij} = \frac{\partial^2 W_{\text{mag}}}{\partial I_i \partial I_j} \\ C_{ij} = \frac{\partial^2 W_{\text{ele}}}{\partial U_i \partial U_j} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 电抗器分布参数计算结果

为计算电抗器在高频激励下的分布参数,以 PKK-800-5000-50G 型电抗器最外层包封为例进行研究,PKK-800-5000-50G 型电抗器实物图见图 1,电抗器基本设计参数见表 1。



图1 PKK-800-5000-50G 型电抗器实物图
Fig. 1 Photograph of a smoothing reactor
PKK-800-5000-50G

表1 PKK-800-5000-50G 型电抗器基本参数

Table 1 PKK-800-5000-50G type reactor basic parameters

参数	数值	参数	数值
额定电压/kV	800	额定电流/A	6 250
外径/m	5.1	内径/m	2.5
包封层数	25	高度/m	3.67
导线材质	铝	额定电感/mH	75

PKK-800-5000-50G 型电抗器最外层包封基本设计参数见表 2。

表2 PKK-800-5000-50G 型电抗器第 25 层包封基本参数

Table 2 Basic parameters of the 25th encapsulation layer
of PKK-800-5000-50G type reactor

参数	数值	参数	数值
额定电流/A	384.97	匝数	158
外径/mm	5 221.5	内径/mm	5 144.9

由于干式空心电抗器呈轴对称型结构,根据电抗器设计参数,建立干式空心电抗器第 25 层线圈绕组的二维轴对称有限元仿真模型,建立的模型见图 2。

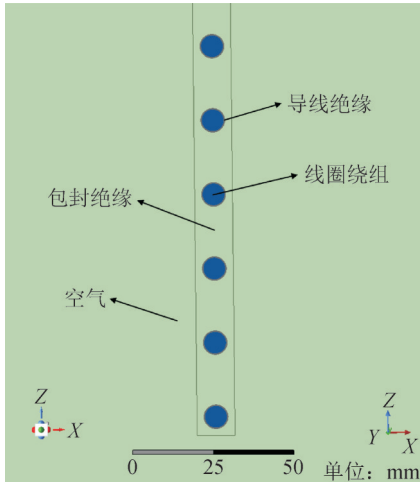


图2 电抗器有限元仿真模型

Fig. 2 Finite element simulation model of reactor

电抗器建模所采用的主要材料参数见表 3。

表3 干式空心电抗器材料参数

Table 3 Material parameters for dry-type hollow reactors

参数	线圈导体(铝)	包封绝缘(环氧树脂)	空气
相对介电常数	1.000 0	3.500 0	1.000 6
相对磁导率	1.000 022	1.000 000	1.000 000
电导率/(S·m ⁻¹)	3.774×10 ⁷	1.000×10 ⁻¹⁴	0.000
密度/(kg·m ⁻³)	2 700.000	1 200.000	1.225

在剖分网格后进行 Ansys 仿真,电抗器的部分分布参数见表 4-6(电阻,Ω/km;电感,mH/km;电容,pF/km)。

表4 电抗器部分分布电阻矩阵

Table 4 Reactor section distributed resistance matrix

匝数	1	2	3	4	5	6
1	0.698	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.698	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.698	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.698	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.698	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.698

表5 电抗器部分分布电感矩阵

Table 5 Reactor partial distributed inductance matrix

匝数	1	2	3	4	5	6
1	3.817	2.431	2.117	1.939	1.812	1.716
2	2.431	3.910	2.453	2.130	1.948	1.820
3	2.117	2.453	3.917	2.457	2.132	1.950
4	1.939	2.130	2.457	3.919	2.459	2.133
5	1.812	1.948	2.132	2.459	3.920	2.460
6	1.716	1.820	1.950	2.133	2.460	3.921

表6 电抗器部分分布电容矩阵

Table 6 Reactor section distributed capacitance matrix

匝数	1	2	3	4	5	6
1	19.39	-10.18	-2.27	-1.11	-0.69	-0.48
2	-10.18	24.79	-8.99	-1.69	-0.76	-0.44
3	-2.27	-8.99	25.06	-8.86	-1.61	-0.70
4	-1.11	-1.69	-8.86	25.11	-8.81	-1.58
5	-0.69	-0.76	-1.61	-8.81	25.14	-8.80
6	-0.48	-0.44	-0.70	-1.58	-8.80	25.16

由表 5 可知,分布电感矩阵具有对称性 ($L_{ij} = L_{ji}$),符合互易定理;自电感沿对角线呈现两端低、中间高的趋势,反映了绕组端部磁场扩散导致的端部效应。由表 6 可知,分布电容矩阵中自电容均为正值,互电容均为负值,且互电容绝对值随匝间距离增加而快速衰减,表明电场耦合主要集中在相邻匝之间。电抗器分布参数将直接影响雷电冲击下行波在绕组中的传播特性,是波过程分析的重要输入参数。

2 干式空心电抗器波过程与电压分布影响因素正交分析

2.1 干式空心电抗器波过程理论推导

在传统电抗器等效电路模型适用于低频激励下,各个支路可表示为电阻与电感相串联,各个支路之间为并联关系,见图3。

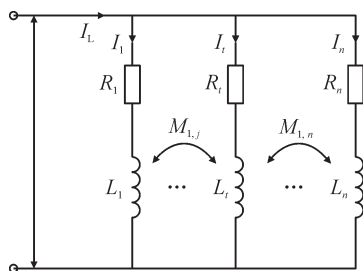


图3 低频激励下电抗器电路模型

Fig. 3 Circuit model of reactor under low-frequency excitation

图3中, R_i 与 L_i ($i=1, \dots, n$) 为电抗器中每层线圈的电阻与电感, $M_{i,j}$ 为电抗器中第 i 层与第 j 层之间的互感, I_L 与 U 为电抗器流过的电流与两端的电压。

在雷电冲击等高频激励作用下,传统的集总参数电路不能反映线圈绕组内的波过程,而应采用分布参数模型。基于分布参数的电抗器线圈绕组多导体传输线模型见图4。

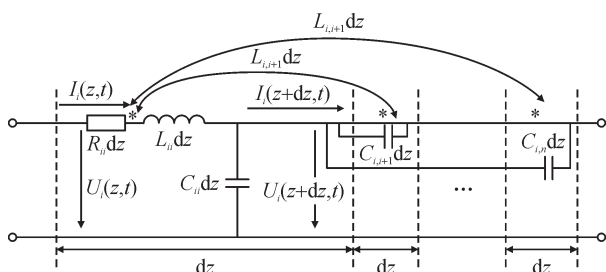


图4 高频激励下电抗器多导体传输线模型

Fig. 4 Multi-conductor transmission line model of reactor under high-frequency excitation

电抗器多导体传输线模型中,分布电阻、分布电感、分布电容矩阵可以用 R_0 、 L_0 、 C_0 表示。电抗器中某一长度为 dz 的计算单元的电磁响应为

$$\begin{cases} U_i(z) = (A_i^+ e^{-a_i z} + A_i^- e^{a_i z}) + \dots + (A_n^+ e^{-a_n z} + A_n^- e^{a_n z}) \\ I_i(z) = (B_i^+ e^{-b_i z} + B_i^- e^{b_i z}) + \dots + (B_n^+ e^{-b_n z} + B_n^- e^{b_n z}) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,指数项系数 A_i^+ 、 A_i^- 、 B_i^+ 、 B_i^- 为多导体传输线不同传播模式入射波与反射波的复振幅,可以用电抗器分布参数表示。

非标准正弦信号可以被分解为不同频率正弦信号的叠加形式,所以非标准正弦信号激励下电抗器中的波过程结果与正弦信号下同理。

2.2 电抗器电压分布影响因素选取与正交表设计

自然界中的雷电放电过程具有显著的随机性,为在保证研究普适性的同时兼顾计算效率,文中选定以二重雷击作为雷电冲击的典型案例进行研究。单次雷电冲击电流可以由式(4)中的双指数模型表示,多重雷击电流全波波波形见图5。

$$I(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ I_m k (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) & t \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $I(t)$ 为雷电冲击电流; I_m 为雷电冲击电流峰值; T_1 与 T_2 为雷电冲击电流的波前时间与波尾时间; k 为归一化系数。

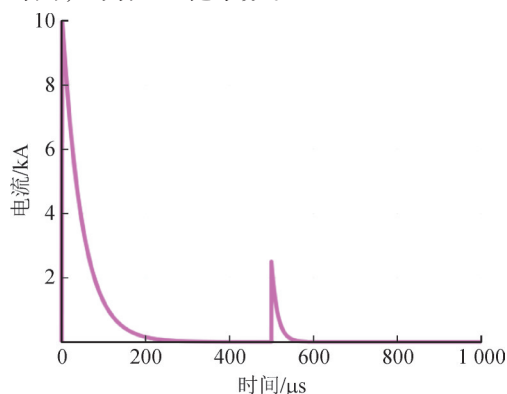


图5 多重雷电冲击电流波形

Fig. 5 Multiple lightning impulse current waveform

由式(3)可知,多导体传输线中电压与电流的传播特性由分布参数矩阵 R_0 、 L_0 、 C_0 决定。本章基于计算得到的分布参数,在Simulink中建立多导体传输线仿真模型:每一匝线圈对应一相传输线,相邻匝间及非相邻匝间的电磁耦合通过分布参数矩阵中的非对角元素予以表征。通过向模型首端注入不同波形参数的雷电冲击电流,可计算各匝在不同时刻的电压响应,进而获取匝间电压分布。干式空心电抗器MTL仿真模型见图6。

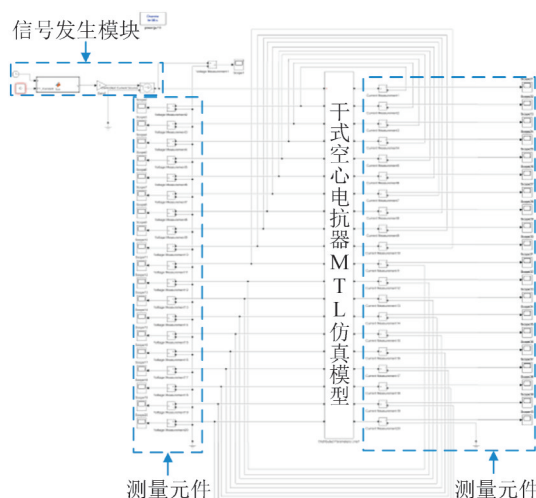


图6 干式空心电抗器MTL仿真模型

Fig. 6 MTL simulation model of dry-type hollow core reactor

为系统评估各因素对匝间电压峰值的作用规律及其显著性,本节引入正交试验设计方法,对各个关键影响因素进行正交试验设计与分析^[15-16]。正交试验设计是一种研究多因素、多水平试验问题的设计方法。正交表的基本符号记为 $L_n(m^k)$, 其中 L 为正交表代号; n 表示试验总次数; m 表示每个因素的水平数; k 表示最多可分析的因素数量,也为正交表的列数。

根据式(4)中双指数雷电冲击波形的表达式,影响电抗器电压响应的雷电参数主要包括雷电流幅值、波前时间和波尾时间。对于多重雷击,还需额外考虑后续雷击的各参数以及两次雷击的时间间隔。基于上述分析,文中选取首次雷击电流幅值 I_1 、首次雷击电流波前时间 T_{11} 、首次雷击电流波尾时间 T_{12} 、后续雷击电流幅值 I_2 、后续雷击电流波前时间 T_{21} 、后续雷击电流波尾时间 T_{22} 、雷击间隔时间 T_{delay} 共 7 个因素,分别记为因素 A-G。各因素取 3 个水平,以覆盖雷电参数的典型变化范围,同时兼顾各因素之间的均衡可比性。各因素的水平取值均基于 IEC 61312-1:1995 标准规定及雷电冲击实测统计数据确定^[17-26],见表 7。

表 7 电抗器电压分布影响因素水平表

Table 7 Level table of factors influencing voltage distribution of reactors

因素	参数	水平 1	水平 2	水平 3
A	首次雷击幅值/A	10 000	20 000	30 000
B	首次雷击波前时间/ μs	0.342	3.420	34.200
C	首次雷击波尾时间/ μs	47.284	472.840	2 364.200
D	后续雷击幅值/A	250	2 500	25 000
E	后续雷击波前时间/ μs	0.007 82	0.078 20	0.782 00
F	后续雷击波尾时间/ μs	14.324	143.240	1 432.400
G	雷击间隔/ms	0.5	5.0	10.0

为便于表述,文中定义首次雷击与后续雷击激发的匝间电压峰值为“首次匝间电压峰值”与“后续匝间电压峰值”。由于后续雷击参数不影响首次雷击引发的电抗器匝间电压峰值,所以选取同水平正交表 $L_9(3^4)$ 与 $L_{27}(3^{13})$, 分别对因素 A、B、C 对电抗器首次匝间电压峰值的影响与因素 A、B、C、D、E、F、G 对电抗器后续匝间电压峰值的影响进行分析。

通过 Simulink 电磁暂态仿真计算获取各试验方案下的电抗器各匝匝间电压峰值,并统计不同试验编号下电抗器各匝的首次与后续匝间电压峰值。以因素 A 取水平 1、因素 B-G 均取水平 2 的工况为例,电抗器部分匝匝间电压差波形见图 7。

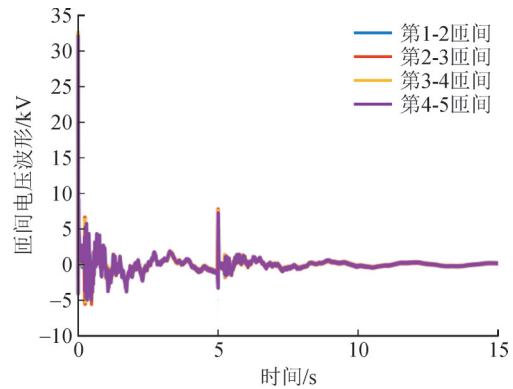
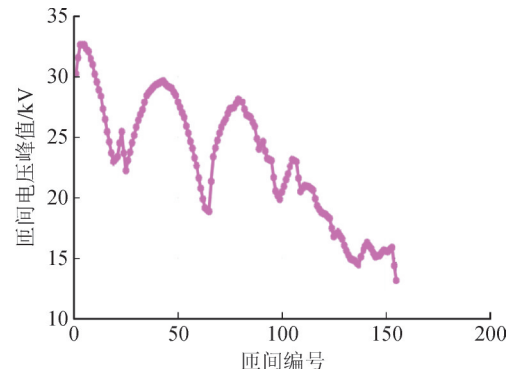


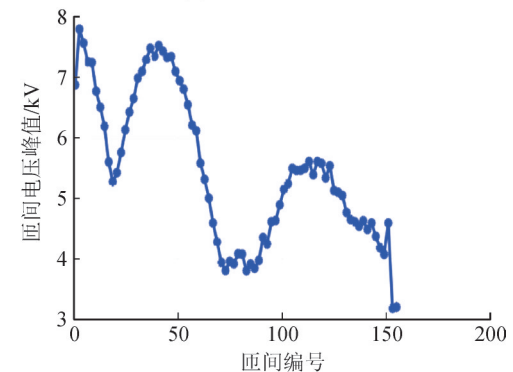
图 7 多重雷击下电抗器匝间电压波形

Fig. 7 Voltage waveform between turns of reactor under multiple lightning strikes

电抗器首次匝间电压峰值与后续匝间电压峰值在不同线匝的分布规律见图 8。



(a) 首次匝间电压峰值



(b) 后续匝间电压峰值

图 8 多重雷击下电抗器匝间电压峰值

Fig. 8 Peak inter turn voltage of reactor under multiple lightning strikes

根据第 2 章分布参数计算结果,电抗器绕组首端电感、电容参数随匝数变化剧烈,导致电抗器部分区域的特性阻抗发生突变,形成阻抗失配界面。当雷电冲击行波沿绕组传播至该界面时,入射波与反射波叠加,局部电压幅值抬升,形成较高的匝间电压峰值。

对于不同试验编号下电抗器各匝的首次与后续匝间电压峰值,采用极差与方差分析进行结果评价。评价指标见式(5)

$$\begin{cases} R_j = \max(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jn}) - \min(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jn}) \\ S_j^2 = \frac{m}{n} \sum_{i=1}^m K_{ji}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \\ f_j = m - 1 \\ MS_j = \frac{S_j^2}{f_j} \\ F_j = \frac{MS_j}{MS_e} = \frac{S_j^2 / f_j}{S_e^2 / f_e} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: R_j 为匝间电压峰值的极差; $\bar{K}_{jm}$ 为第 j 个因素在第 m 个水平下所有试验方案中匝间电压峰值的平均值; S_j^2 为第 j 个因素的偏差平方和; f_j 为第 j 个因素的自由度; MS_j 为第 j 个因素的均方; F_j 为第 j 个因素的 F 值; m 为因素水平数; K_{ji} 为因素 j 在水平 i 下的所有试验结果之和。

2.3 正交试验结果与分析

基于上述分析方法,对正交试验结果进行计算与评估,得到各因素对应的极差 R_j 、偏差平方和 S_j^2 、因素自由度 f_j 、均方值 MS_j 、 F 值,明确各因素对电抗器匝间电压峰值的影响程度。以多次雷击下电抗首次匝间电压峰值与后续匝间电压峰值为例,统计各影响因素下的正交试验分析结果,见表8、9。

表8 各因素对首次匝间电压峰值的正交试验分析结果

Table 8 Orthogonal experimental analysis results of various factors on the peak value of the first inter turn voltage

因素	R_j	S_j^2	MS_j	F_j
A	3.33×10^4	1.67×10^9	8.33×10^8	17.58
B	2.46×10^4	1.12×10^9	5.60×10^8	11.82
C	7.86×10^3	9.29×10^7	4.65×10^7	0.98

表9 各因素对后续匝间电压峰值的正交试验分析结果

Table 9 Orthogonal experimental analysis results of various factors on the peak value of subsequent inter turn voltage

因素	R_j	S_j^2	MS_j	F_j
A	2.99×10^3	4.08×10^7	2.04×10^7	8.58
B	1.73×10^3	1.48×10^7	7.38×10^6	3.11
C	1.24×10^2	6.88×10^4	3.44×10^4	0.01
D	8.99×10^3	3.64×10^8	1.82×10^8	76.71
E	2.74×10^3	3.88×10^7	1.69×10^7	7.12
F	4.16×10^2	9.79×10^5	4.89×10^5	0.21
G	7.80×10^3	3.34×10^8	1.67×10^8	70.23

由表8可知,对于首次匝间电压峰值,首次雷击电流幅值(因素A)和首次雷击电流波前时间(因素B)的 F 值分别为17.58和11.82,远高于首次雷击电流波尾时间(因素C)。这是由于雷电冲击的波前时间

决定了雷电冲击波的高频分量含量,波前时间越短,高频分量越丰富,因此对匝间电压峰值的影响更为显著;雷电流幅值则直接决定了激励的起始水平,是影响电压响应的基础因素。相比之下,波尾时间对匝间电压峰值的贡献较小。

由表9可知,对于后续匝间电压峰值,后续雷击电流幅值(因素D)、后续雷击电流波前时间(因素E)、雷击间隔时间(因素G)的 F 值分别为76.71、7.12、70.23,远高于其他因素。而两次雷击间的间隔时间则反映了首次雷击激发的电压分布对后续雷击的影响。在首次雷击后,后续雷击将在原有电压分布上产生叠加效应,导致其电压分布与首次雷击存在差异。综上所述,上述显著因素将作为后续预测模型的输入特征选取依据。

3 雷击致干式空心电抗器匝间短路故障预测模型

文中第2章通过正交试验筛选出了影响匝间电压峰值的关键雷电波形参数,但正交试验的筛选过程基于逐次电磁暂态仿真且仅限于定性判断各因素的相对重要性,无法实现从任意给定雷击参数组合到匝间电压分布的快速定量预测,难以满足工程实际中快速评估的需求。因此,文中需要引入一种基于数据驱动的代理模型(即替代模型),利用已有的仿真数据,在保证预测精度的前提下替代耗时的物理仿真,实现从雷击参数到匝间电压分布的快速预测。

为实现上述目标,需要克服两个核心难点:一是干式空心电抗器绕组匝数众多,在雷电冲击下各匝电压峰值数据构成的特征向量维度较高,且各匝之间存在强空间相关性;二是可用于训练的样本数量有限,选取的模型应当在小样本条件下具有良好的泛化性能。

针对上述问题,现有主流方法在此框架下存在难以兼顾的局限。主成分分析仅能提取线性结构,难以捕捉行波反射与驻波效应引起的非线性空间模式;传统神经网络虽可拟合非线性映射,但无法提供预测置信区间;若直接处理高维匝间电压输出,模型神经元数量随之增加,模型训练复杂度较高。

基于上述分析,文中选取堆叠自编码器(SAE)与高斯过程(GP)进行匝间短路故障预测,解决了上述矛盾。SAE无需额外的人工标注信息,仅通过无监督的逐层重构即可从原始数据中提取降维特征,将高维匝间电压峰值序列压缩至低维潜在特征空间,

同时保留原始分布的主要非线性结构;GP在此基础上建立输入雷击参数与16维特征之间的映射关系。因此,SAE-GP组合有效避免了直接对高维输出进行建模时协方差矩阵规模过大的计算瓶颈,同时发挥了SAE的非线性特征提取能力和GP在小样本下的泛化优势。

3.1 基于堆叠自编码器与高斯过程的雷击致空心电抗器匝间短路故障预测方法

电抗器匝间短路故障预测方法整体架构见图9,模型主要包括3个模块:高维电压数据的堆叠自编码器降维模块、影响参数与低维特征的高斯过程回归模块、解码重构与故障定位模块。

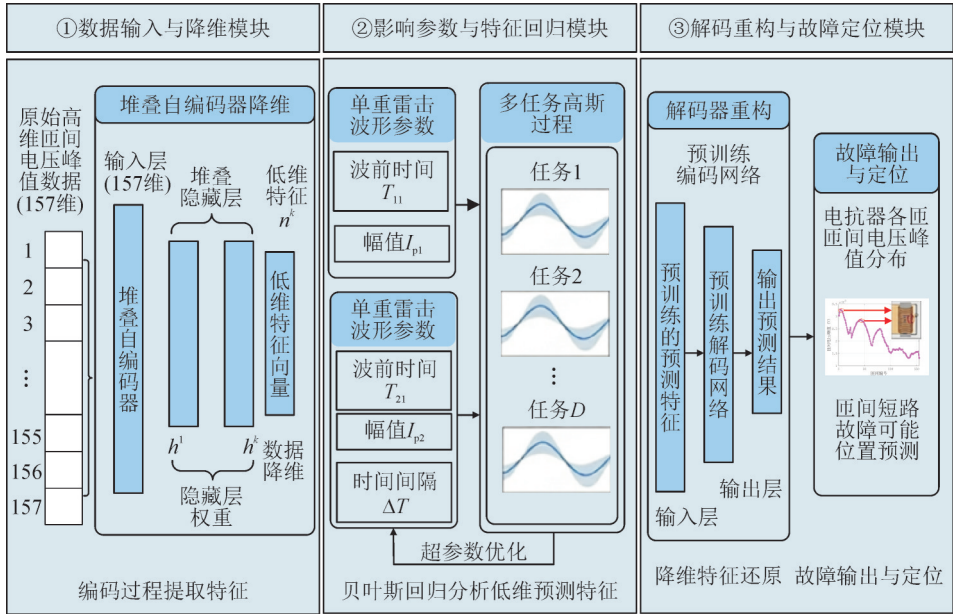


图9 电抗器匝间电压峰值预测模型整体架构

Fig. 9 Overall architecture of peak prediction model for inter turn voltage of reactor

1)模型输入。根据正交试验结果,首次雷击电流幅值 I_1 对匝间电压峰值具有显著影响,但其与匝间电压峰值的关系近似线性,因此在构建高斯过程模型时将其固定为10 kA的额定值,以降低输入空间维度。最终模型的输入向量定义为 $\mathbf{x}=[T_{11}, I_2, T_{21}, T_{\text{delay}}]^T$ 。对于首次匝间电压峰值预测,采用首次雷击电流波前时间 T_{11} 作为输入变量;对于后续匝间电压峰值预测,采用后续雷击电流幅值 I_2 、后续雷击电流波前时间 T_{21} 以及雷击间隔时间 T_{delay} 作为输入向量。

训练样本基于正交试验方案生成,并在此基础上对各参数取值空间进行均匀补充抽样,以保证训练集对输入空间的覆盖。首次雷击预测模型共生成10 000组样本,后续雷击预测模型共生成9 261组样本,按8:2比例划分训练集与测试集。

2)堆叠自编码器训练。堆叠自编码器的参数见表10。在训练完成后,将两个编码器串联构成完整的编码器,解码器与解码器分别进行电压特征降维与升维。

表10 堆叠自编码器参数设置

Table 10 Stacked autoencoder parameter settings

参数	数值
编码器激活函数	Satlin
解码器映射函数	Purelin
训练轮数 E	1 000
L_2 正则化系数 λ	0.001
稀疏性正则化系数 β	0.01
第一层稀疏比例 p_1	0.05
第二层稀疏比例 p_2	0.10

3)高斯过程回归建模。本节针对首次雷击和后续雷击两种场景,分别采用单任务高斯过程回归和多任务高斯过程回归进行建模。①首次匝间电压峰值预测模型。对于潜在特征空间的每个维度 $d=1, \dots, 16$, 分别建立一个独立的高斯过程回归模型。输入为一维波前时间 T_{11} , 输出为对应维度的潜在特征值 z_d 。协方差函数采用Matérn 3/2核,信号方差、长度尺度与噪声方差参数通过最大化对数边际似然估计。②后续匝间电压峰值预测模型。对于电抗器后续匝间电压峰值预测任务,输入为三维向量 $[I_2, T_{21}, T_{\text{delay}}]$, 输出为16维潜在特征。由于3个输入参数的物理意义不同且量纲差异较大,采

用各向异性平方指数核,为每个输入维度分配独立的长度尺度。对每个输出维度独立建模,即16个独立的三维高斯过程回归模型。

4)故障位置预测与诊断流程。对于雷电冲击参数组合 x_* ,模型首先对电压分布进行编码器降维,输出对应的16维潜在特征预测均值 $\hat{z}$,然后通过高斯过程对低维电压分布特征进行回归分析,最后通过SAE解码器重构完整的大电抗器匝间电压峰值分布

$$\hat{v} = f_{\text{dec}}(\hat{z}) \quad (6)$$

$\hat{v}_* \in R^{157}$ 表示电抗器匝间电压峰值预测值。对于电抗器不同线匝,输出匝间电压峰值极大值所在的线匝,其附近区域承受较大的匝间电压峰值,存在较严重的匝间短路风险。

5)模型诊断性能评估。为定量评估所提出模型的预测性能与诊断准确性,采用以下评价指标:①预测精度,对于电抗器首次匝间电压峰值与后续匝间电压峰值预测模型,计算预测重构电压向量与真实电压向量之间的均方根误差 e_{RMSE} 。②故障定位准确率,定义预测的匝间电压峰值最高线匝与实际匝间电压峰值最高线匝是否一致,取测试集中的平均值。

3.2 堆叠自编码器特征降维

文中采用的堆叠自编码器的结构见图10,由输入层、隐藏层和输出层3部分组成^[27]。

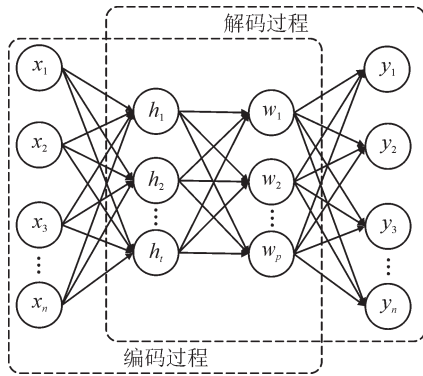


图10 堆叠自编码器结构

Fig. 10 Stacked autoencoder structure

设输入样本为 $x \in R^d$,编码器通过非线性映射将其压缩为低维特征向量 $h \in R^m$ ($m < d$);解码器则将隐层特征 h 映射回原始数据空间,重构输出

$$\begin{cases} h = f(W_1 x + b_1) \\ \hat{x} = g(W_2 h + b_2) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: $W_1 \in R^{m \times d}$ 为编码权重矩阵; $b_1 \in R^m$ 为编码偏置; $f(\cdot)$ 为编码激活函数; $W_2 \in R^{d \times m}$ 为解码权重矩阵; $b_2 \in R^d$ 为解码偏置; $g(\cdot)$ 为解码激活函数。

堆叠自编码器通过最小化重构误差进行训练,

损失函数采用均方差损失函数

$$L_{\text{AE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - \hat{x}_i\|_2^2 + \frac{\lambda}{2} (\|W_1\|_F^2 + \|W_2\|_F^2) \quad (8)$$

式(8)中:第一项为重构误差;第二项为权重衰减正则项,用于抑制过拟合。

堆叠自编码器中包含2个隐藏层:第一层自编码器将157维输入压缩至32维;第二层将32维进一步压缩至16维潜在特征空间。

3.3 高斯过程电压分布预测

在通过SAE提取电抗器匝间电压峰值分布特征后,通过高斯过程进行回归分析,进而构建电抗器匝间短路故障预测模型,并对其诊断性能进行分析。

高斯过程是高斯随机变量在连续域上的推广,其性质由均值函数 $m(x)$ 和协方差函数 $k(x, x')$ 决定。对于任意有限输入点 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,其对应的函数值 $f = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]^T$ 服从多元高斯分布^[28-29]

$$f \sim N[m(X), K(X, X)] \quad (9)$$

式(9)中, $K(X, X)$ 为由核函数 $k(\cdot, \cdot)$ 计算得到的协方差矩阵。

在回归任务中,通常考虑含噪声的观测模型 $y = f(x) + \epsilon$,其中 $\epsilon \sim N(0, \sigma_n^2)$ 为独立同分布的高斯白噪声。给定训练集 $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$,对于测试点 x_* ,其预测输出 f_* 的后验分布仍为高斯分布

$$f_* | X, y, x_* \sim N(\mu_*, \sigma_*^2) \quad (10)$$

式(10)中,预测均值 μ_* 与预测方差 σ_*^2 分别为:

$$\mu_* = k_*^T (K + \sigma_*^2 I)^{-1} y \quad (11)$$

$$\sigma_*^2 = k(x_*, x_*) - k_*^T (K + \sigma_*^2 I)^{-1} k_* \quad (12)$$

式(11)、(12)中, $k_* = K(X, x_*)$ 为协方差向量。

在电抗器匝间电压峰值预测中,经SAE降维后的输出为多维特征向量,需要将高斯过程推广至多输出情形。

4 模型性能评价

4.1 模型性能

对于电抗器首次匝间电压峰值与后续匝间电压峰值预测模型,其在测试集样本中的误差分布见图11。

分别统计电抗器首次匝间电压峰值与后续匝间电压峰值预测模型在测试集上的评估结果见表11。

结果表明,堆叠自编码器能够以较低误差保留原始电压分布的主要特征;高斯过程回归模型在有

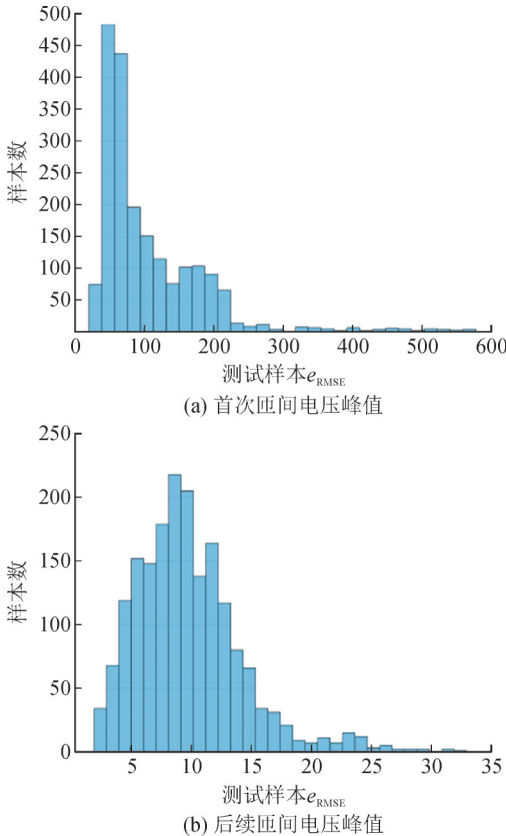


图 11 SAE-GP 架构下电抗器匝间电压峰值预测误差分布

Fig. 11 Distribution of prediction error for peak interturn voltage of reactor under SAE-GP architecture

表 11 SAE-GP 架构下匝间电压峰值预测模型性能
Table 11 Performance of peak prediction model for interturn voltage under SAE-GP architecture

评价指标	预测重构 e_{RMSE}/V	故障定位准确率/%
首次匝间电压峰值	91.36	99.21
后续匝间电压峰值	8.25	91.66

限样本下实现了对匝间电压峰值的准确预测,且电抗器首次匝间电压峰值预测模型因输入维度低,预测精度高于后续匝间电压峰值预测模型。电抗器首次匝间电压峰值与后续匝间电压峰值预测模型的故障定位准确率均超过 90%,验证了所提方法对匝间短路故障区域的辨识能力。

4.2 对比实验

为了验证堆叠自编码器与高斯过程联合架构(SAE-GP)在雷击致匝间短路故障预测中的有效性,并揭示深度非线性特征提取的优势,文中设计了对比实验将其与传统方法对比。其中,与单层 AE-GP 架构进行对比实验以验证深度数据降维的必要性;传统方法采用主成分分析—高斯过程(PCA-GP)架构,进行对比试验以验证非线性特征提取相对于线性降维的优越性。两种对比模型均在与主模型完全相同的训练集和测试集上进行训练与评估。经

过模型训练,单层 AE-GP 以及 PCA-GP 对于电抗器首次匝间电压峰值与后续匝间电压峰值预测模型在测试集上的误差分布见图 12、13。不同模型架构下匝间电压峰值预测模型性能见表 12。

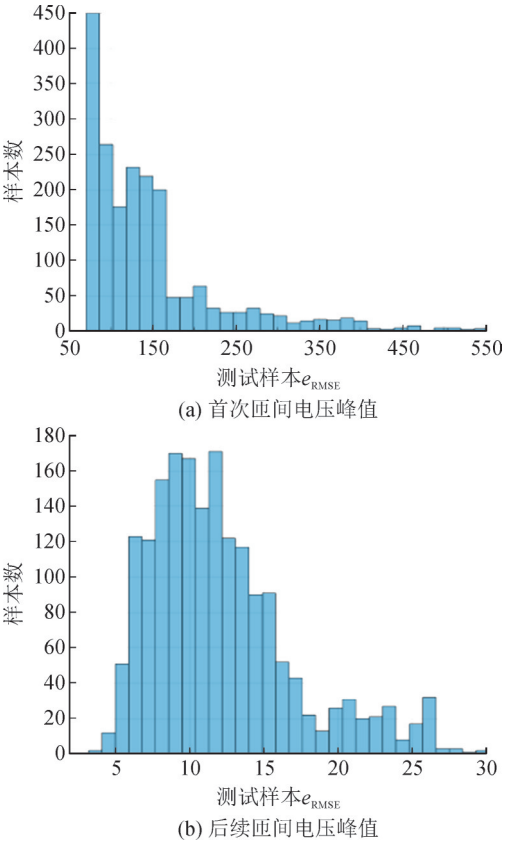
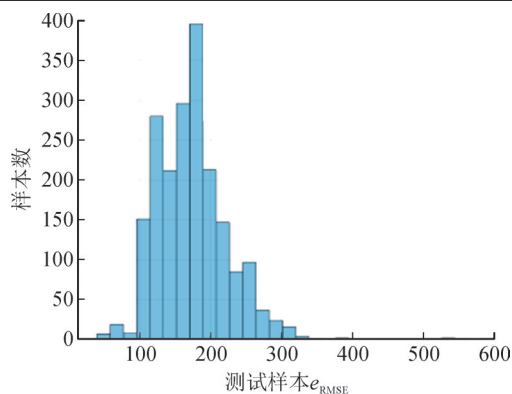


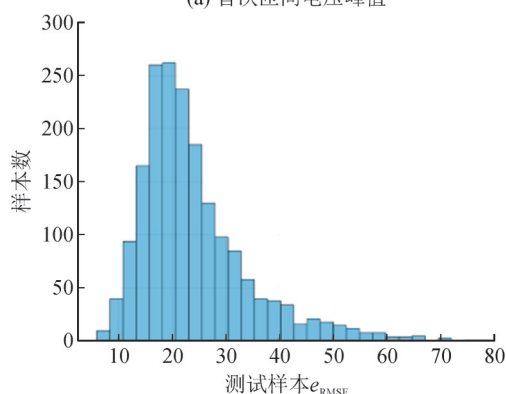
图 12 单层 AE-GP 架构下电抗器匝间电压峰值预测误差分布

Fig. 12 Distribution of prediction error for peak interturn voltage of reactor under single-layer AE-GP architecture

结果表明,SAE-GP 架构在整体上表现出最优的综合性能。在首次雷击预测中,SAE-GP 的预测重构 e_{RMSE} 低于单层 AE-GP 与 PCA-GP 架构约 16.1% 与 44.3%;在后续雷击预测任务中,SAE-GP 的预测重构 e_{RMSE} 低于单层 AE-GP 与 PCA-GP 架构约 31.9% 与 57.0%,证明深度堆叠结构能够更有效地捕获匝间电压峰值分布中的非线性空间特征,验证了深度特征提取的优势。在首次雷击预测与后续雷击任务中,SAE-GP 架构的故障定位准确率也高于单层 AE-GP 与 PCA-GP 架构。因此通过模型训练与测试结果可以看出,文中所构建的基于堆叠自编码器与高斯过程的雷电冲击导致电抗器匝间短路故障预测模型能够在有限仿真样本下,实现对不同雷电冲击波形参数下电压分布的准确预测,为干式空心电抗器匝间短路故障的早期预警与定位提供了一种有效的建模方法。



(a) 首次匝间电压峰值



(b) 后续匝间电压峰值

图13 PCA-GP架构下电抗器匝间电压峰值预测误差分布

Fig. 13 Distribution of prediction error for peak inter turn

voltage of reactor under PCA-GP architecture

表12 不同模型架构下匝间电压峰值预测模型性能

Table 12 Performance of peak prediction models for inter turn voltage under different model architectures

预测模型	预测 e_{RMSE}/V	定位准确率/%
首次匝间电压峰值(单层 AE-GP)	108.90	96.19
首次匝间电压峰值(PCA-GP)	164.01	94.29
后续匝间电压峰值(单层 AE-GP)	12.11	87.96
后续匝间电压峰值(PCA-GP)	19.17	86.97

5 故障实例分析

5.1 故障案例与录波数据

2024年3月,浙江某换流站在年度检修期间对直流滤波器电抗器进行试验时,发现极2直流滤波器P2-Z-Z1-L1电抗器出现直阻试验值偏差大于规定值。在换流站检修期间,电抗器生产厂家将试验电抗器进行返厂检查。

对故障线圈所在包封进行裂解,在最外层包封中发现多处烧蚀点,1号烧蚀区域位于上星臂下方47 cm处,2号烧蚀区域位于上星臂下方96 cm处。试验电抗器第3层包封的烧蚀情况见图14。

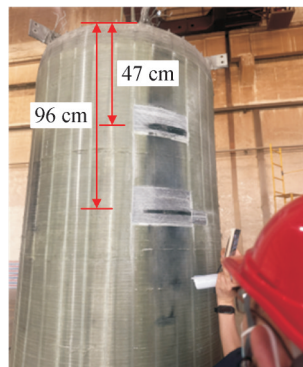


图14 故障电抗器烧蚀情况

Fig. 14 Erosion situation of faulty reactor

调取试验电抗器所在电力线路的电子式光CT的录波数据,故障录波数据见图15。

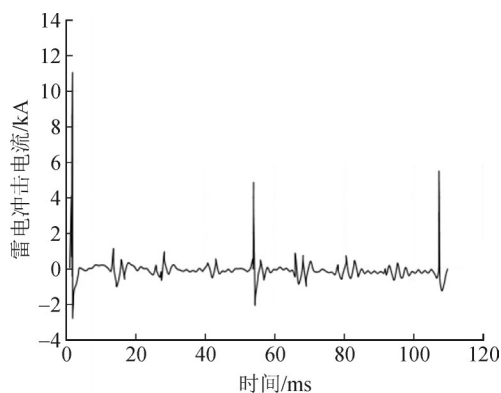


图15 故障电抗器雷电冲击录波数据

Fig. 15 Fault reactor lightning impulse recording data

根据故障现场录波数据,在试验电抗器开展年检试验前曾遭受过雷电冲击电流侵入,在雷电冲击过程中首次雷电冲击电流峰值达到11 kA,首次雷击波前时间约为36.7 μs ;后续雷电冲击电流峰值达到5.1 kA,后续雷击波前时间约为1.6 μs 。

5.2 匝间短路故障预测

结合录波数据与现场试验结果,厂家判断试验电抗器遭受落雷冲击后,在雷电冲击信号的行驻波的作用下,在特定位置发生了匝间短路,巨大的短路电流导致干式空心电抗器线圈绕组多处区域发生导线烧蚀。

根据干式空心电抗器线圈绕组波过程与电压分布仿真结果可知,在雷电冲击录波数据下,电抗器线圈绕组匝间电压差见图16。

从匝间电压差仿真数据可以看出,干式空心电抗器的首端与中部的匝间电压差较大,第21匝与第39匝附近区域承受较高的匝间电压,较容易发生匝间短路。从试验电抗器现场包封绝缘裂解结果看,发生匝间短路的导线位于干式空心电抗器的第20匝与第40匝附近,预测偏差约为1匝。根据电抗器几何参数,每匝轴向高度约2.36 cm,对应轴向距

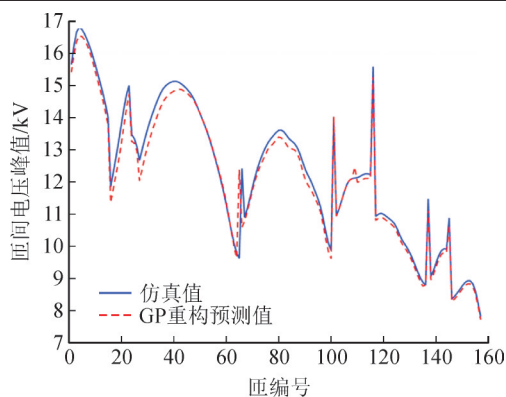


图 16 雷电冲击录波数据下电抗器匝间电压分布

Fig. 16 Distribution of inter turn voltage of reactor under lightning impulse waveform data

离偏差约 2.36 cm。事故案例结果与理论仿真和模型预测结果的误差在允许范围内,可以相互吻合。仿真结果和电抗器裂解试验结果与第 2 章的分析结论一致:电抗器部分区域因分布参数随匝数剧烈变化而发生特性阻抗突变,行波反射叠加使得这些区域产生较大的匝间电压峰值,证明了文中提出的基于堆叠自编码器与高斯过程的雷击致空心电抗器匝间短路故障预测方法的有效性。

6 结论

文中以干式空心电抗器为研究对象,围绕其在雷电冲击下的匝间短路故障预测问题,系统开展了干式空心电抗器分布参数计算、电抗器电压分布影响因素正交分析、电抗器匝间短路故障预测方法研究,并以一起浙江换流站电抗器事故案例验证了所提方法的有效性,结论如下:

1)在 Ansys 仿真平台上建立干式空心电抗器密封线圈有限元仿真模型,采用能量法对电抗器分布电阻、电感及电容进行计算,并在 Simulink 仿真平台上搭建干式空心电抗器 MTL 仿真模型,对不同雷电冲击工况下电抗器的电压分布进行计算。通过正交分析确定了首次雷击电流幅值、首次雷击波前时间、后续雷击电流幅值、后续雷击波前时间及雷击间隔时间为影响电抗器匝间电压峰值的关键波形参数。

2)提出了基于堆叠自编码器与高斯过程的雷击致空心电抗器匝间短路故障预测方法。采用堆叠自编码器对电抗器 157 维高维电压序列进行特征学习,压缩至 16 维潜在特征空间,有效降低了输入维度并保留了原始分布的主要非线性结构;采用高斯过程分别建立了首次匝间电压峰值与后续匝间电压峰值预测模型。

3)在模型测试结果中,首次匝间电压峰值预测模型的预测重构均方根误差为 91.36 V,故障定位准确率达 99.21%;后续匝间电压峰值预测模型的预测重构均方根误差为 8.25 V,故障定位准确率达 91.66%。相比于单层 AE-GP 与 PCA-GP 基线模型,SAE-GP 架构具有最低的预测重构误差与最高的故障定位准确率。在一起浙江换流站电抗器的实际事故案例中,模型预测的匝间电压峰值极大值位置与实际烧蚀点位置基本吻合,证明了所提方法在故障溯源与早期预警中的工程实用性。

参考文献:

- [1] 杨力. 特高压输电技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2011:141.
Yang Li. Ultra high voltage transmission technology[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2011: 141.
- [2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社, 2005.
Liu Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005.
- [3] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6.
Shu Yinbiao, Zhang Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(31): 1-6.
- [4] Sharp M R, Andrei R G, Werner J C. A novel air-core reactor design to limit the loading of a high voltage interconnection transformer bank[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002:494-499.
- [5] Matsuo H, Kurokawa F, Iida K, et al. An improved gate drive circuit using an air core reactor developed for high power GTO thyristors[J]. IEICE Transactions on Communications, 2006, E89-B(1): 196-202.
- [6] 李光茂, 李晓, 杜钢, 等. 湿热老化对电抗器匝间过电压耐受特性的影响[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 98-103.
Li Guangmao, Li Xiao, Du Gang, et al. Effects of damp heat aging on the interturn overvoltage tolerance characteristics of reactors[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 98-103.
- [7] Sun Yuxin, Zou Liang, Liu Qingsong, et al. Research on five-loop simplified scaling model for dry-type air-core reactors with inter-turn short circuit fault[J]. IEEE Access, 2021(9): 163707-163715.
- [8] 赵启承, 马文皓, 韩国文, 等. 考虑谐波电压的干式空心电抗器匝间短路早期故障诊断方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(8): 104-112.
Zhao Qicheng, Ma Wenhao, Han Guowen, et al. An early fault diagnosis method for inter-turn short circuits in dry-type air-core reactors considering harmonic voltages[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(8): 104-112.
- [9] 周延辉, 赵振刚, 李英娜, 等. 埋入 35 kV 干式空心电抗器的光纤布拉格光栅测温研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 142-146.
Zhou Yanhui, Zhao Zhengang, Li Yingna, et al. The study on the temperature measurement for the 35 kV dry-type air-core reactor with the embedded optical fiber bragg grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 142-146.
- [10] 白超环. 基于探测线圈法干式空心电抗器匝间短路故障监测方

- 法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- Bai Chaohuan. Research on the monitoring method of interturn short circuit fault in dry type hollow reactor based on detection coil method[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2023.
- [11] 司马文霞, 袁涛, 刘亚坤, 等. 多重雷击对电力系统雷电防护的影响与挑战[J]. 高电压技术, 2025, 51(8): 3992-4005.
- Sima Wenxia, Yuan Tao, Liu Yakun, et al. Effects of multiple lightning strokes on power system protection and associated challenges[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3992-4005.
- [12] 张嘉祥. 变压器线圈波过程[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- Zhang Jiaxiang. Transformer coil wave process[M]. Beijing: Water Resources and Electricity Publishing House, 1982.
- [13] 刘达, 彭敏放, 万勋, 等. 基于行波分析的变压器绕组匝间短路故障定位[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 2091-2096.
- Liu Da, Peng Minfang, Wan Xun, et al. Inter-turn short-circuit fault location for transformer winding based on traveling wave analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 2091-2096.
- [14] 温刚, 李楚, 程林, 等. 基于行波反射的干式空心电抗器匝间短路故障诊断方法研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(4): 77-84.
- Wen Gang, Li Chu, Cheng Lin, et al. Fault diagnosis method of inter-turn short circuit for dry-type air-core reactor based on traveling wave reflection[J]. Insulating Materials, 2023, 56(4): 77-84.
- [15] 胡丁炫. 高海拔地区升压站雷电侵入下变压器绝缘故障分析及保护配置[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- Hu Dingxuan. Analysis and protection configuration of transformer insulation faults under lightning intrusion in high-altitude boosting stations[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [16] 付铭, 朱明, 梅杰, 等. 基于多元振动序列共性特征的电抗器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 198-207.
- Fu Ming, Zhu Ming, Mei Jie, et al. Reactor fault diagnosis based on common feature of multivariate vibration sequences[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 198-207.
- [17] 杨雷, 韩永霞, 廖志铭, 等. 基于雷电定位系统的雷电多回击地闪参数统计及影响因素分析[J]. 广东电力, 2023, 36(7): 115-123.
- Yang Lei, Han Yongxia, Liao Zhiming, et al. Parameter statistics and influencing factor analysis of lightning multiple return ground flashover based on LLS[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(7): 115-123.
- [18] 胡杨, 赵淳, 雷梦飞, 等. 多回击地闪特征参数及其对直流线路故障的影响研究[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 404-412.
- Hu Yang, Zhao Chun, Lei Mengfei, et al. Characteristic parameters of cloud to ground lightning with multiple return strokes and their influence on DC transmission line fault[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 404-412.
- [19] 李德斌, 文凯, 赵雪琳, 等. 输电线路多脉冲雷电流响应探讨[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 88-94.
- Li Debin, Wen Kai, Zhao Xuelin, et al. Discussion on multi-impulse lightning response of transmission lines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 88-94.
- [20] 李特, 姜文东, 王少华, 等. ± 800 kV 宾金线浙江段线路走廊雷电地闪多重回击特征分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(3): 12-18.
- Li Te, Jiang Wendong, Wang Shaohua, et al. Analysis on lightning cloud-to-ground discharge multiple return-stroke characteristics of ± 800 kV binjin line corridor in Zhejiang province[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(3): 12-18.
- [21] 廖民传, 蔡汉生, 吴小可, 等. 多重雷击对线路避雷器的冲击影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 153-158.
- Liao Minchuan, Cai Hansheng, Wu Xiaoke, et al. Study on impact of multiple lightning strikes on transmission line arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 153-158.
- [22] 朱彪, 曾金全, 林彬彬. 基于ADTD资料的多回击闪电特征研究[C]//第35届中国气象学会年会, 2018: 641-650.
- Zhu Biao, Zeng Jinqian, Lin Binbin. Research on the characteristics of multi shot lightning based on ADTD data[C]//The 35th Annual Conference of the Chinese Meteorological Society, 2018: 641-650.
- [23] 何少敏, 韩永霞, 林昊君, 等. 多重雷击下 ± 500 kV直流架空线转海缆的雷电侵入波过电压防护[J]. 高电压技术, 2026, 52(3): 1080-1089.
- He Shaomin, Han Yongxia, Lin Haojun, et al. Lightning intruding overvoltage protection for the ± 500 kV DC overhead transmission line-submarine cable system under multiple lightning strikes[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(3): 1080-1089.
- [24] 王学良, 成勤, 谷山强, 等. 基于LLS的多回击地闪回击时间和回击间距的统计特征[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3914-3924.
- Wang Xueliang, Cheng Qin, Gu Shanqiang, et al. Statistical characteristics for return stroke time and distance of multi-return stroke about cloud-to-ground lightning based on LLS[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3914-3924.
- [25] Qie Xiushu, Liu Dongxia, Jiang Rubin, et al. Detection, mechanism, and forecasting of lightning and thunderstorms[J]. Journal of Meteorological Research, 2025, 39(3): 741-761.
- [26] IEC 61312-1: 1995 Protection against lightning electromagnetic impulse-part 1: general principles[S].
- [27] 刘锦伟, 周杰, 李川, 等. 基于深度稀疏自编码器的电抗器机械故障振动诊断方法[J]. 电气传动, 2024, 54(9): 83-89.
- Liu Jinwei, Zhou Jie, Li Chuan, et al. Vibration diagnosis method of reactor mechanical fault based on stacked auto-encoder[J]. Electric Drive, 2024, 54(9): 83-89.
- [28] 曹士铎. 基于高斯过程的燃气轮机健康运维方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2025.
- Cao Shiduo. Research on the health operation and maintenance method of gas turbine based on gaussian process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2025.
- [29] 侯万军. 集成稀疏高斯过程回归方法及其在风机轴承寿命预测上的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
- Hou Wanjun. Integrated sparse gaussian process regression method and its application in predicting the life of wind turbine bearings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2024.
- 宗万里(1992—), 男, 工学学士, 高级工程师, 主要从事特高压直流输电技术、换流站一次设备运检技术等研究工作(通信作者)(E-mail: zongwanli@vip. 163. com)。