DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221116002

文章编号:1672-9331(2024)06-0111-09

引用格式:李毓洋,王媛媛,罗晓敏.基于卷积神经网络算法的高压发电机保护研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(6):111-119. **Citation:** LI Yuyang, WANG Yuanyuan, LUO Xiaomin. Research on protection for Powerformers based on CNN algorithm[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci),2024,21(6):111-119.

基于卷积神经网络算法的高压发电机保护研究

李毓洋,王媛媛,罗晓敏

(长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙410114)

摘 要:【目的】研究一种基于卷积神经网络算法的定子单相接地故障保护方法,以提高高压发电机定子单相接地保护的可靠性。【方法】首先,采用改进变分模态分解(variational mode decomposition,VMD)方法处理故障时序数据;接着,针对分解后的多个本征模态函数(intrinsic mode function,IMF)分量提取组合峭度、综合能量熵、综合凹凸系数,并将其构成融合特征向量;然后,采用放射性填充策略将融合特征向量升维,并将其输入卷积神经网络(convolutional neural network,CNN)算法以获得高压发电机故障判别结果;最后,为了验证该保护方法在不同运行方式下的适用性,利用电力系统仿真软件PSCAD/EMTDC,搭建了由三台高压发电机构成的系统仿真模型。【结果】本文所提保护方法可以提高判别准确率,显著减少不同中性点接地方式、故障初始角、故障位置、过渡电阻的影响,且抗噪声能力更强。【结论】本文所提保护方法判别精度高,可靠性强,适用于多种运行方式下的高压发电机定子单相接地故障保护。
 关键词:电力系统继电保护;高压发电机;定子接地故障保护;变分模态分解;卷积神经网络中图分类号:TM77

Research on protection for Powerformers based on CNN algorithm

LI Yuyang, WANG Yuanyuan, LUO Xiaoming

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to study a stator single-phase ground fault protection method based on a convolutional neural network (CNN) algorithm, so as to improve the reliability of stator single-phase ground fault protection for Powerformers. [Methods] First, an improved variational mode decomposition (VMD) method was used to process fault time-series data. Next, combined kurtosis, comprehensive energy entropy, and comprehensive concavity coefficients were extracted from the decomposed intrinsic mode function (IMF) components to form a fused feature vector. Then, a radiative padding strategy was applied to enhance the feature vector dimensionality, which was input into the CNN algorithm to determine the fault identification results of the Powerformer. Finally, to verify the method's applicability under different operating conditions, a system simulation model consisting of three Powerformers was built by using the PSCAD/EMTDC power system simulation software. [Findings] The proposed protection method enhances identification accuracy, significantly reduces the impact of different neutral point

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177069);湖南省研究生科研创新项目(CX20240077、CX20210795) 通信作者:王媛媛(1980—)(ORCID:0000-0002-9575-3712),女,教授,主要从事电力系统保护方面的研究。 E-mail:wyy_1202@163.com

收稿日期:2022-11-16;修回日期:2023-02-15;接受日期:2023-02-15

grounding methods, fault initial angles, fault locations, and transition resistances, and demonstrates stronger noise resistance. [**Conclusions**] The proposed protection method achieves high identification accuracy and strong reliability, making it suitable for stator single-phase ground fault protection of Powerformers under various operating conditions.

Key words: relay protection of power system; Powerformer; stator ground fault protection; variational mode decomposition; convolutional neural network

Foundation items: Project (52177069) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects (CX20240077, CX20210795) supported by Hunan Graduate Scientific Research Innovation

Corresponding author: WANG Yuanyuan (1980—) (ORCID: 0000-0002-9575-3712), male, professor, research interest: power system protection. E-mail: wyy_1202@163.com

0 引言

在我国"碳达峰、碳中和"战略目标的驱动下, 电力行业将以"低排放、低消耗、高效率"为宗旨实 施改革。高压发电机(Powerformer)采用高压交联 聚乙烯电缆绕制定子绕组,机端输出电压能突破 绝缘限制,可达到理论值400 kV,从而取消变压 器,实现发电单元与高压输电网直连。该发电机 已在日本、加拿大、瑞典实际投运,投运电压在25~ 155 kV^[1-3]。变压器的取消使得 Powerformer 的应 用在经济效益和环保方面存在优势,而定子单相 接地故障是 Powerformer 最常见的定子电气故障类 型,且容易发展为危害更大的匝间和相间故障,最 终损害发电机^[4]。

许多学者对发电机定子单相接地保护开展了 相关研究。田庆等^[5]提出了一种基于零序功率流 向的 Powerformer 定子单相接地故障方法,该方法 实现了定子绕组接地故障的全覆盖保护。然而, 该研究提出的定子模型简化了Powerformer定子电 容分布,即将其等效置于中性点与机端两侧,这一 简化处理影响了该方法的可靠性。为此,WANG 等^[6]、林成等^[7]考虑了 Powerformer 定子电容分布 特性,并进一步推导绕组匝电动势的分布规律,提 出了自适应门槛保护判据,从而提高了保护灵敏 度与可靠性。然而,并联连接的高压发电机都具 有相同的机端电压,仅基于电压信号的保护无法 实现保护的选择性。WANG等^[8]通过分析高压发 电机泄漏电流和故障点能量耗散的变化,构建了 单一特征量的保护判据。然而,该保护方法仅使 用一个故障特征作为判据,可靠性相对较低。在

此基础上,WANG 等^[9-10]通过提取泄漏电流大小、 泄漏电流方向、零序电流大小、零序电流方向4种 故障特征构成融合特征向量,并借助模糊聚类与 系统聚类算法判别故障,但在实际运行中产生的 噪声给该保护方法的精度带来了挑战。

近些年来,采用时频分析技术进行数据处理, 再结合机器学习进行识别的方法,在电力系统保 护领域有着良好的效果。常用的时频分析技术包 括经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)^[11]、集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)^[12]、变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD)^[13]等。与 前两者不同,VMD通过循环迭代求约束变分问题 的最优解,得到本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量的中心频率及中心频率附近的 带宽,具有抗噪能力强、收敛速度快等优点,且不 存在EMD模态混叠和EEMD输入噪声残留影响判 别准确性的问题,适用于各类非线性、非平稳信号 的处理。机器学习模型中的卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN)算法因其局部 权值共享的特殊结构在语音识别和图像处理方面 有着独特的优越性[14],其独特的权值共享机制降 低了网络的复杂性,提高了运算速度。

基于以上研究,本文提出了一种采用改进 VMD和CNN算法的高压发电机定子单相接地故 障保护方法。针对不同故障条件下的高压发电 机,本文提取零序电流信号作为输入信号,利用自 适应VMD将其分解为多个能直观体现其组成的 IMF分量,并构造融合特征向量,同时采取放射状 填充策略将融合特征向量升维,通过CNN判别模 型实现高压发电机定子单相接地故障判别。

1 Powerformer保护方法

当 Powerformer 并列运行时,机端电压相同, 电压量保护不再适用。因此,本文将零序电流作 为突破点,寻找故障与非故障情况之间的差异性 特征。

1.1 改进变分模态分解(VMD)

当 Powerformer 定子单相接地故障发生时,产 生的零序电流信号具有非线性、非平稳的特点,且 严重影响保护的可靠性与灵敏性。为此,本文采 用鲁棒性强、收敛速度快的 VMD 算法对故障样本 数据进行重构处理,解决了分解子序列模态混叠 问题^[15],完美处理了零序电流信号,深度挖掘了时 间域与频率域的联合分布信息,且在挖掘零序电 流信号特征方面具有显著优势。

然而,VMD分解层数K值需要人为确定,取值 偏小会造成分解不充分,取值偏大会导致过分 解^[16]。为此,本文采用EMD算法自适应获取最优 分解层数K值^[17-18],解决了VMD的K值取值难的 问题,实现VMD自适应分解,从而分解得到与分 解层数K数量相同的IMF分量,如图1所示。



图1 自适应VMD分解流程图 Fig.1 Adaptive VMD flow chart

1.2 卷积神经网络(CNN)模型

在继电保护领域日渐成熟的今天,利用故障 特征进行故障分类是一种非常直接有效的方式。 深度学习算法有着自身独特的优势,CNN模型则 是深度学习浩繁算法模型中最为成功的一个^[19], 其结构图如图2所示。CNN模型的优势主要表现 在以下三个方面:①局部连接、权值共享机制基于 数据特征之间的相关性,而Powerformer故障特征 之间有很强的相关性;②这种机制可大量减少待 训练参数,提高计算速度,而Powerformer故障特征 数据规模往往很大,对计算能力有较高的要求;③ CNN带来的高泛化能力也正是多噪声的故障数据 需要的。因此,CNN模型在Powerformer故障分类 方面具有显著优势。





设*Y* ∈ **R**, *Y*₁ ∈ *Y*, *Y*₂ ∈ *Y*, 其中*Y*为二维数据样本集, **R**为实数集, *Y*₁为故障数据样本集, *Y*₂为非故障数据样本集。CNN模型通过卷积核*k*与样本 *y*进行卷积运算, 提取样本的特征信息。卷积运算 公式如下:

$$C_{\text{#R}}(x,k) = \sum_{t=1}^{p} x(t) k(t)$$
 (1)

式中:x为样本y的感受野;p为卷积核与感受野的 大小。

池化层对特征进行下采样,以保证特征的时 移不变性。在多次卷积和池化操作后,CNN模型 将提取的特征输入全连接层获得全局信息,并对 其进行分类,得到样本属于故障类的概率g_a和非 故障类的概率g_b。

设 $u \in \mathbf{R}$,其中u为输出的结果,则保护判据为

$$\begin{cases} u \in Y_1, \ g_a \ge g_b \\ u \in Y_2, \ g_a < g_b \end{cases}$$
(2)

式中:若 $g_a \ge g_b$,则该样本属于 Y_1 类,即判别该样本所属发电机发生了故障;反之,则未发生故障。

虽然 CNN 十分契合 Powerformer 的故障特征 提取,但故障数据是一维数据,而 CNN 模型缺少处 理一维数据的机制和结构。为了解决这一难题, 本文采用放射状填充策略。首先,借助皮尔逊积 矩相关系数刻画数据之间关系的紧密程度,如式 (1)所示:

$$C_{\rm orr}(\boldsymbol{M}_i, \boldsymbol{M}_j) = \frac{C_{\rm ov}(\boldsymbol{M}_i, \boldsymbol{M}_j)}{\sigma_i \sigma_j}$$
(3)

式中: $C_{orr}(M_i, M_j)$ 为皮尔逊积矩相关系数,表示 特征向量 M_i 和特征向量 M_j 的相关性; $C_{or}(M_i, M_j)$ 为 M_i 和 M_j 的协方差; σ_i 和 σ_j 分别为 M_i 和 M_j 的标 准差。

至此,任意两个特征向量之间相关关系的大 小都可以获得。其次,将一维故障数据投影到能 够反映网格间相对距离的网格单元中,可将一维 数据转换为适合 CNN 处理的二维网格格式数据。 最后,CNN 通过卷积运算和池化过程提取二维故 障数据中的关键信息和特征。这些特征在全连接 层进行融合后,由输出层给出最终的分类结果,即 判断样本是属于故障发电机、正常发电机还是区 外故障。

1.3 基于改进 VMD 和 CNN 的保护方法

本文保护方法适用于具有B台并列运行的高 压发电机系统。本文提出的保护方法如图3所示, 每一步骤的详细描述如下。

1) 信号采集。

在母线和Powerformer机端安装电压互感器和 电流互感器,当母线电压互感器检测到电压异常 降低后,各台Powerformer机端电流互感器对机端 侧零序电流进行采样。

2) 信号处理。

采用 EMD 自适应计算采样的零序电流信号 分解层数K,并将K值赋予VMD,分解为与分解层 数相同数量的 IMF分量,提取组合峭度 α (本质为 故障发电机与非故障发电机零序电流波形的陡峭 度)。峭度 c_1 是描述电流波形尖峰度的无量纲参 数,其数学表达式如式(4)所示:

$$\int_{1}^{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (z_i - \bar{z})^4 / N}{\sigma^4}$$
(4)

式中:z_i为第*i*个零序电流信号值; *σ*为标准差; *N*为 零序电流信号长度; *z*为零序电流信号均值。

当定子单相接地故障发生时,故障发电机所 受冲击成分会越强,该信号的峭度指标也会越大。 然而,时域峭度无法反映整个周期的变化特征,且 受外界因素影响较大,包络谱峭度注重循环周期



图 3 本文提出模型的方法 Fig. 3 Proposed model in this paper

投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home

性,将两者相乘定义为IMF分量的组合峭度,这样 既保留了峭度指标的良好特性,也充分保留了故 障冲击中的周期性特征,将所有IMF的组合峭度 均值作为故障特征量。组合峭度α的表达式如式 (5)所示:

$$\alpha = \frac{1}{K'} \sum_{i=1}^{K'} \alpha_{i1} \alpha_{i2}$$
 (5)

式中: *K*' 是分解的 IMF 分量数量; *α_{i1}* 第*i* 个 IMF 分量的时域峭度; *α_{i2}*是第*i* 个 IMF 分量的包络谱 峭度。

综合能量熵β本质为故障发电机与非故障发 电机的能量对比,即表征零序电流大小差异。

首先,计算第*i*台高压发电机零序电流经 VMD分解后的敏感分量的能量 E_i ,以及其占所有 高压发电机敏感分量的能量的比例 A_i 。 E_i 和 A_i 的 计算式分别如式(6)、式(7)所示:

$$E_{i} = \sum_{i=1}^{T} m_{i}^{2}(n)$$
 (6)

$$A_i = \frac{E_i}{\sum_{i=1}^{B} E_i} \tag{7}$$

式中:*m_i*为敏感分量;*T*为*m_i*的长度;*B*为 Powerformer系统总台数。

其次,根据相对熵理论放大故障发电机与正 常发电机的能量值差异,得到第*i*台和第*j*台的相 对熵 β_{ij} ,并求取第*i*台发电机与其余发电机之间的 综合能量熵 β_{io} , β_{ij} 和 β_{i} 的计算式分别如式(8)、式 (9)所示:

$$\boldsymbol{\beta}_{ij} = \left| A_i \ln \frac{A_i}{A_j} \right| \tag{8}$$

$$\boldsymbol{\beta}_{i} = \sum_{j=1}^{B} \boldsymbol{\beta}_{ij} + \boldsymbol{\beta}_{ji} (i \neq j)$$
(9)

综合凹凸系数γ为零序电流敏感IMF分量凹 凸系数特征,其本质为零序电流方向。

本研究将α、β、γ三个特征量构成融合特征向 量,借助皮尔逊积矩相关系数构建一维故障特征 向量的相关系数矩阵,采用放射状填充策略将样 本集填入二维网格,借助网格单元之间的空间相 邻相关关系反映故障特征向量隐含的相关性信 息,把一维故障特征向量转换成二维数据。

3) 故障识别。

将二维数据划分为训练集和验证集,将训练集

输入 CNN 模型进行训练,得到训练好的 CNN 模型, 再采用验证集进行准确率校验,最后进行故障判别, 即辨别是故障发电机、正常发电机还是区外故障。

2 仿真验证与分析

2.1 仿真建模

本文利用电力系统仿真软件 PSCAD/EMTDC, 搭建了由三台高压发电机构成的系统仿真模型, 如图 4 所示,并将这三台高压发电机分别命名为 P1、P2、P3。由图 4 可知,每台高压发电机每相绕 组的电动势、电阻均分为4个单元电路,K₁、K₂为开 关,F1、F2、F3、F4、F5为不同故障位置,对地电容 分别设置为 0.185、0.148、0.111 和 0.074 μ F,P1、 P2、P3容量均为 75 MVA,额定电压为 150 kV,中 性点接地电阻 R_d 为 1 900 Ω ,消弧线圈串联电阻 R_s 为 57 Ω ,消弧线圈串联电感 L_s 为 1 838 mH,单相接 地故障开始时间为 0.07 s,图中 R_s 为过渡电阻。本 文设置了 684种不同高压发电机定子单相接地故 障仿真条件,见表 2。



图 4 PSCAD 仿真模型 Fig. 4 Simulation model of PSCAD

表 2	。 高压发电机定子单相接地故障仿真条件
Table 2	Simulation conditions of stator single-phase ground

fault of different	Powerformers
--------------------	--------------

中性点接地方式(2种)	故障初始角θ/(°)(3种)
经高阻接地(HRNM)、 经消弧线圈接地(NEM)	0、45、90
单相接地故障位置 $F_d(6种)$	过渡电阻 $R_g/\Omega(19种)$
定子绕组0%、	5,50,100,500,1000,
25% 50% 75%	1 500,,7 000,7 500,
100%处及外部线路	8 000

2.2 仿真案例分析

以 P3发电机的定子绕组 75% 处发生的 a 相接 地故障为例,接地方式为消弧线圈接地,合闸角为 45°,过渡电阻为1000 Ω,得到各发电机零序电压 和零序电流波形,如图5所示。





本文对各发电机的暂态零序电流使用 EMD 进行处理,通过自适应计算可得到 K=5,这一结果 通过 EMD 分解 IMF 数量也可以得到验证,如图 6 所示。



将K值赋予VMD,进而实现自适应分解,得到 各IMF分量,如图7所示。图7中的IMF1、IMF2、 IMF3、IM4、IMF5分别代表IMF的分量1、分量2、分 量3、分量4、分量5。由图7可以看出,VMD分解 得到的IMF分量不存在模态混叠的现象,并且能 够充分提取有效信息。





本仿真试验通过改变中性点接地方式、故障 初始角、故障位置及过渡电阻等故障条件增加样 本的多样性,并评估故障检测效率效果。通过对 不同故障条件进行仿真,提取组合峭度α、综合能 量熵β和综合凹凸系数γ,得到不同故障条件下的 高压发电机故障特征仿真数据,见表3(仅列出P3 数据)。

本研究通过仿真试验一共获得2052个故障 特征向量,其中高压发电机处于故障运行状态时 的故障特征向量为684个,处于正常运行状态时的 故障特征向量为1368个;然后,利用构造放射状 填充策略,将2052个一维向量转换为228个二维 网络数据,并随机选取其中70%(159组)作为训练 样本,并用于训练CNN故障识别模型,另外30% (69组)作为测试样本测试模型。部分仿真结果见 表4,其中×表示故障发电机,√表示非故障发电 机,Θ表示区外故障。

仿真试验结果表明,本文提出的保护方法能 够以100%的准确率判别故障高压发电机,并能准 确区分内部故障和外部故障,而且在各种运行条 件下,都能准确判别。

表	3 不同条件下 Powerformer 的 仿 具数 据
Table 3	Simulation data of Powerformers under different

fault conditions

中性点接	$\theta/(^{\circ}) = R_{g}/\Omega$	P /O	F	P3仿真数据		
地方式		$K_{g}/\Omega L$	r _d	α	β	γ
	0	5	0%	0.147 0	0.499 0	-1.000 0
		50	25%	0.147 2	0.499 3	-1.000 0
	45	100	50%	0.147 2	0.499 0	-1.000 0
HRNM						
		6 000	75%	0.147 7	0.379 0	-1.000 0
	90	7 000	100%	0.147 6	0.329 2	-1.000 0
		8 000	区外	0.335 4	0.328 9	1.000 0
NEM	0	5	0%	0.237 7	0.496 1	-1.000 0
		50	25%	0.226 8	0.495 7	-1.000 0
	45	1 000	50%	0.227 7	0.495 7	-1.000 0
		6 000	75%	0.229 5	0.335 5	-1.000 0
	90	1 000	100%	0.228 8	0.327 7	-1.000 0
		8 000	区外	0.331 4	0.337 3	1.000 0

表4 故障发电机判别结果

 $\begin{tabular}{ll} Table 4 & Identification results of faulty generators \end{tabular}$

样本编号	结果标签	判别结果
7	\checkmark	正确
18	\checkmark	正确
29	\checkmark	正确
40	×	正确
51	×	正确
62	Θ	正确

2.3 与不同机器学习判别方法的对比

为了验证VMD与CNN相结合的优势,本文将 特征数据加入5种信噪比,分别为20、15、10、5、3 dB, 其中噪声为高斯白噪声。本文将所构建模型在不 同信噪比下的性能与支持向量机(support vector machine,SVM)、K最近邻算法(K-nearest neighbor, KNN)、随机森林(random forest, RF)、极致梯度提 升(extreme gradient boosting, XGBoost)模型的性能 进行对比分析,对比结果见表5。

由表5可知,相比其他模型,CNN模型有着明显的优势,且随着信噪比的减小,CNN算法的优势愈加显著。

衣) 不问信架比下合力法时性能对	比
------------------	---

 Table 5
 Performance comparison of methods under different signal-to-noise ratios

措 刑	不同信噪比下的准确率/%				
侠堂	20 dB	15 dB	10 dB	5 dB	3 dB
VMD-SVM	100.00	89.45	65.71	63.82	62.18
VMD-KNN	100.00	92.33	81.46	70.12	64.69
VMD-RF	100.00	94.25	86.94	76.87	67.25
VMD-XGBoost	100.00	97.25	91.33	86.32	77.48
VMD-CNN	100.00	99.85	98.68	92.35	86.58

3 讨论

为了验证本文所提保护方法的优势,本研究 将该方法与已有的基于S变换结合RF算法^[2]和基 于电流特征结合模糊C均值(fuzzy C-means,FCM) 聚类^[9]的方法进行比较,对比结果见表6。

表6 不同保护方法性能对比 Table 6 Performance comparison of different prote

Table o	Performance comparison of different protection
	methods

方法名称	过渡电阻影响	故障位置影响
S变换结合 RF法	适用于5kΩ以下	当中性点附近发生故 障时,零序有功功率特 征失效
电流特征结合 FCM聚类法	适用于5 kΩ以下	当故障位置距中性点 10%以内时,电流微弱 导致误判
本文保护方法	适用于8 kΩ以下	故障识别准确率高, 受故障位置影响较小

由表6可知,当单相接地故障发生在距离中 性点附近位置时,泄漏电流极其微弱,导致基于 电流特征结合FCM模型会出现特征失效的情况。 在该情况下,S变换结合RF的判别模型也会发生 误判,且S变换结合RF法和电流特征结合FCM 聚类法均仅适用于5kΩ以下的过渡电阻。而本 文所提基于改进VMD和CNN的保护方法没有上 述死区,且受运行方式的影响较小,这是VMD强 鲁棒性的体现。因此,与S变换结合RF法和电流 特征结合FCM聚类法相比,本文保护方法在识 别高压发电机定子单相接地故障应用方面效果 更佳。

4 结论

针对可直连电网的 Powerformer,本文以零序 电流为突破口,首先采用 EMD 处理自适应计算 *K* 值,然后将 *K*值赋予 VMD 并分解为 *K*个 IMF 分量, 分析构造暂态特征,最后通过 CNN 算法进行判别, 提出了无需整定值的 Powerformer 单相接地保护 方法。

该方法通过调整中性点接地方式、故障初始 角、过渡电阻、故障位置等参数来设置不同的运行 方式,并进行保护效果验证。仿真结果表明,本文 方法可提高判别准确率,且具有以下特点:

1) 在数据处理阶段,本文针对非线性的故障 数据采用了时频分析技术中的VMD。该方法不存 在模态混叠,可有效提取故障信息,并且在结合 EMD之后,K值选取难题也得以解决。

2)本文保护方法不需要设置阈值,且耐受过 渡电阻能力强,在保护灵敏性和可靠性方面满足 相关规范要求。与SVM、KNN、RF、XGBsoost等机 器学习方法相比,本文采用的CNN算法具有更 优秀的抗噪声能力,以及更高的精度和更强的 鲁棒性。

[参考文献]

- TOUMA-HOLMBERG M, SRIVASTAVA K. Double winding, high-voltage cable wound generator: steadystate and fault analysis [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19 (2): 245-250. DOI: 10.1109/TEC.2004.827024.
- [2] 王媛媛,殷惠,林成,等.基于S变换与RF算法的高 压发电机定子单相接地保护[J].电力系统自动化,
 2018,42(22):194-199.DOI:10.7500/ AEPS20180411001.

WANG Yuanyuan, YIN Hui, LIN Cheng, et al. Stator single-phase-to-ground fault protection for Powerformers based on S-transform and random forest algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (22) : 194-199. DOI: 10.7500/ AEPS20180411001.

- [3] GAO Y, LIN X N, TIAN Q, et al. Novel identification method of stator single phase-to-ground fault for cablewound generators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23 (2): 349-357. DOI: 10.1109/ TEC.2008.921554.
- [4] 薛磊,孙钢虎,王小辉,等.大型隐极发电机定子单

相接地故障定位新方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42 (1): 221-224. DOI: 10.16081/j. epae. 202109023.

XUE Lei, SUN Ganghu, WANG Xiaohui, et al. Novel location method for stator single-phase grounding fault of large non-salient pole generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 221-224. DOI: 10.16081/j.epae.202109023.

[5] 田庆,林湘宁,刘沛.高压发电机定子电容电流自适应补偿差动保护方法[J].电力系统自动化,2006,30 (24):62-68,76.DOI:10.3321/j.issn:1000-1026.2006.24.013.

TIAN Qing, LIN Xiangning, LIU Pei. Novel selfadaptive compensated differential protection design suitable for Powerformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (24) : 62-68, 76. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-1026.2006.24.013.

- [6] WANG Y Y, HUANG X C, ZENG X J, et al. Studies on stator single-line-to-ground faults protection for a Powerformer considering the winding electromotive force distribution [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119: 105940. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.105940.
- [7] 林成,王媛媛,曾祥君,等.基于分级绝缘的高压发电机定子单相接地故障保护[J].中国电机工程学报,2018,38(23):7052-7060,7139.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.180189.

LIN Cheng, WANG Yuanyuan, ZENG Xiangjun, et al. Stator single phase ground fault protection of Powerformers based on grading insulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7052-7060, 7139. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.180189.

- [8] WANG Y Y, ZENG X J, JIAN J B, et al. Studies on the stator single-phase-to-ground fault protection for a high-voltage cable-wound generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28 (2): 344-352. DOI: 10.1109/tec.2013.2240303.
- [9] WANG Y Y, ZENG X J, DONG Z Y, et al. Novel protection scheme of stator single-phase-to-ground fault for Powerformers [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53: 321-328. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.05.010.
- [10] WANG Y Y, ZENG X J, DONG Z Y, et al. Stator single-phase-to-ground fault protection for busconnected Powerformers based on hierarchical clustering algorithm [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28 (4): 991-998. DOI: 10.1109/ TEC.2013.2281491.
- [11] DAMERVAL C, MEIGNEN S, PERRIER V. A fast algorithm for bidimensional EMD [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12 (10): 701-704. DOI:

0676.

10.1109/LSP.2005.855548.

- [12] SHAHID M A, KHAN T M, ZAFAR T, et al. Novel health diagnostics schemes analyzing corona discharge of operational aerial bundled cables in coastal regions
 [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36 (1): 84-91. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2974751.
- [13] 马星河,朱昊哲,刘志怀,等.基于VMD的电力电缆 局部放电信号自适应阈值降噪方法[J].电力系统保 护与控制,2019,47(23):145-151.DOI:10.19783/j. cnki.pspc.190010.

MA Xinghe, ZHU Haozhe, LIU Zhihuai, et al. An adaptive threshold value noise suppression method for detecting partial discharge of power cables based on variational mode decomposition [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 145-151. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190010.

- [14] LI H L, HUANG Y Q, ZHANG Z J. An improved faster R-CNN for same object retrieval [J]. IEEE Access, 2017, 5: 13665-13676. DOI: 10.1109/access. 2017.2729943.
- [15] 陈强伟,蔡文皓,牛春光,等.基于VMD的APF谐波 检测算法[J].电力科学与技术学报,2018,33(1): 120-124.DOI: 10.3969/j.issn.1673-9140.2018.01.018. CHEN Qiangwei, CAI Wenhao, NIU Chunguang, et al. A APF harmonics detection method based on VMD [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 120-124. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9140.2018.01.018.
- [16] 付华,王婧羽.基于 SR-VMD 的微弱故障行波检测方 法[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):156-162.

DOI:10.19783/j.cnki.pspc.200104.

FU Hua, WANG Jingyu. Weak fault traveling wave detection method based on SR-VMD[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 156-162. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200104.

- [17] 杨冬锋,陈盛开,刘晓军,等.基于自适应 VMD 和时-频分段能量熵特征的过电压信号识别[J].电网技术,2019,43(12):4597-4604.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0676.
 YANG Dongfeng, CHEN Shengkai, LIU Xiaojun, et al. Research on overvoltage signal recognition based on adaptive VMD and time-frequency segment energy entropy[J]. Power System Technology, 2019, 43(12):4597-4604.DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.
- [18] PENG X G, ZHENG W Q, ZHANG D, et al. A novel probabilistic wind speed forecasting based on combination of the adaptive ensemble of on-line sequential ORELM (outlier robust extreme learning machine) and TVMCF (time-varying mixture copula function) [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 138: 587-602. DOI: 10.1016/j.enconman.2017. 02.004.
- [19] 李炳臻,刘克,顾佼佼,等.卷积神经网络研究综述
 [J].计算机时代,2021(4):8-12,17.DOI:10.16644/ j.cnki.cn33-1094/tp.2021.04.003.
 LI Bingzhen, LIU Ke, GU Jiaojiao, et al. Review of the

researches on convolutional neural networks [J] Computer Era, 2021(4): 8-12, 17. DOI: 10.16644/j. cnki.cn33-1094/tp.2021.04.003.

(责任编辑:刘平;校对:彭三军)