

引用格式:范继锋,王永强,张天龙,等.基于时频分析矩阵与BP神经网络的输电线路保护方法[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):46-52.

Citation: FAN Jifeng, WANG Yongqiang, ZHANG Tianlong, et al. Transmission line protection method based on time-frequency analysis matrix and BP neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 46-52.

基于时频分析矩阵与BP神经网络的 输电线路保护方法

范继锋,王永强,张天龙,陈鹏,闫云峰

(内蒙古电力(集团)有限责任公司乌海超高压供电分公司,内蒙古 乌海 016000)

摘要:针对现有高压输电线路的暂态保护存在误动、拒动等情况,提出一种结合反向传播(back propagation, BP)神经网络与暂态电压信号时频矩阵的输电线路保护方法,根据故障电压行波的一维连续小波变换后得到的时频分析矩阵来进行输电线路的暂态保护,根据已有的故障电压行波数据或者仿真故障电压行波数据进行时频分析得到时频矩阵,取其时频特征明显部分作为BP神经网络的输入,故障情况作为输出,通过神经网络的学习实现高压输电线路区内外故障的可靠判断,实现高压输电线路的快速保护。仿真结果表明,该方法能够综合利用暂态波形在时域和频域上的故障特征,且计算速度快,有望提高高压输电线路暂态保护的可靠性。

关键词:暂态电压;故障诊断;时频分析;连续小波变换;BP神经网络

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.005 中图分类号: TM75 文章编号: 1673-9140(2026)01-0046-07

Transmission line protection method based on time-frequency analysis matrix and BP neural network

FAN Jifeng, WANG Yongqiang, ZHANG Tianlong, CHEN Peng, YAN Yunfeng
(Wuhai Ultra-High Voltage Power Supply Branch, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Wuhai 016000, China)

Abstract: To address the misoperation and failure issues of existing transient protection schemes for high-voltage transmission lines, this paper proposes a transmission line protection method that combines a back propagation (BP) neural network with the time-frequency matrix of transient voltage signals. Transient protection of transmission lines is implemented based on the time-frequency analysis matrix obtained through a one-dimensional continuous wavelet transform of fault-induced voltage traveling waves. According to the existing fault voltage traveling wave data or simulated fault voltage traveling wave data, the time-frequency matrix is obtained by time-frequency analysis. The part with obvious time-frequency characteristics is taken as the input of the BP neural network, and the fault condition is taken as the output. Through neural network learning, reliable discrimination of internal and external faults within the high-voltage transmission line protection zone is realized, and rapid protection of high-voltage transmission lines is achieved. Simulation results demonstrate that the proposed method comprehensively utilizes fault characteristics of transient waveforms in both the time and frequency domains while maintaining a high computational efficiency. It is expected to improve the reliability of transient protection of high-voltage transmission lines.

Key words: transient voltage; fault diagnosis; time-frequency analysis; continuous wavelet transform; BP neural network

收稿日期: 2024-11-17; 修回日期: 2025-08-27

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(2024-4-38)

作者简介: 范继锋(1979—),男,硕士,高级工程师,主要从事电气一次设备维护、安全生产管理等研究; E-mail: 925955029@qq.com

随着电力系统的不断发展和不同区域之间的联系逐渐紧密,电能的传输距离也相应地变得越来越长。为降低电能在远程传输过程中的有功功率损失,超高压、特高压技术得到了大力发展^[1-8],电压等级的提升对电网继电保护的可靠性、灵敏性、快速性、选择性等方面也提出了更加严苛的要求。基于电力系统故障暂态行波信号的电网保护技术由于具有不受电力系统运行状况、过渡电阻大小等因素影响的优势,在电力系统继电保护领域已备受关注并且在超高压、特高压输电线路保护中得到了实际的应用^[9-14]。

现有的基于故障暂态行波信号的高压输电线路保护方法主要有利用双端测量信息量的差动保护方法、距离保护方法和基于单端测量信息量的距离保护方法^[15]。这些方法简单易行,但都存在着不同程度的保护死区,所以不能对系统进行全面地保护。文献[14]针对特高压输电线路的结构进行讨论,分析了现有的各种纵联保护的优势和不足,并对特高压输电线路的保护提出了发展方向和建议。文献[16]设计了一种能够测量断路器电流相位的新装置,通过将测量到的断路器内部电流的相位与电流互感器测得的结果作差并取模值,当所得结果的余弦值为正则可判断为死区故障,从而迅速断开线路两端。该方法原理简单易行,但是需要额外添加设备,可靠性和快速性不高。文献[17]在系统发生故障时,通过采集故障死区所在的一侧发生动作的断路器信号,强制将故障所在的那一侧的电流互感器的电流信息归零,同时使用在差动保护中,保护设定的固有动作时间以实现两侧的故障切除。相关操作在运行时简洁、快速,但是需要对整定值进行严格的计算,否则可能会使保护不动作,进而对电力系统造成更大的危害。

针对现有的高压输电线路的保护可靠性存在的问题,本文提出了一种利用暂态信号的线路保护方法,通过对线路两端测量得到的暂态信号进行时频分析,放大暂态信号的故障特征,再利用人工神经网络对暂态信号的时频分析矩阵和故障类型之间的关系进行学习,从而实现高压输电线路的快速、可靠判定。

1 输电线路模型与故障暂态信号的时频特征

1.1 传统输电线路模型

高压输电线路在发生接地故障时,会从故障点

沿着输电线路向线路两端传播高频暂态行波信息。其波速与行波的衰减情况与线路参数有关,在波阻抗不连续的地方,如架空线到母线或架空线到电缆等情况时会发生折反射,使得行波的波形发生复杂的变化。因此,行波的波形中包含了大量的故障特征信息与线路的拓扑和参数信息。

不同的网络结构所产生的暂态信号波形各不相同,因此需要对典型的输电线路模型进行可靠建模。图1分别展示了两种典型的传统高压输电线路结构模型^[18],在位置 L 处安装了高压输电线路保护装置以及故障暂态信号检测装置, M 处为母线,图1(a)为母线只有一条出线的结构,图1(b)为母线有两条不同线路长度的出线结构。图2展示了不同电网结构下的暂态电压信号。在距离 L 相同的位置处发生故障时,从仿真中可以看出其暂态电压波形具有明显的不同,这是由暂态信号在传播时的衰减和折反射情况决定的。本文选用运行情况更为复杂的结构2作为典型结构进行保护方案设计。

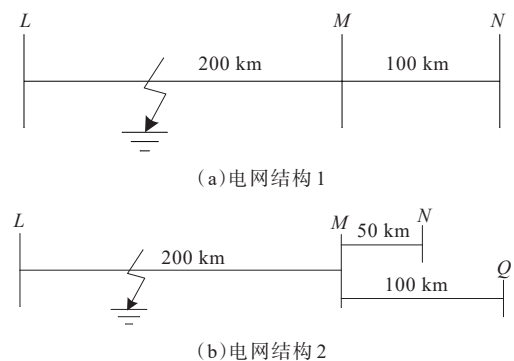


图1 高压输电线路结构模型

Figure 1 Structural model of high-voltage transmission line

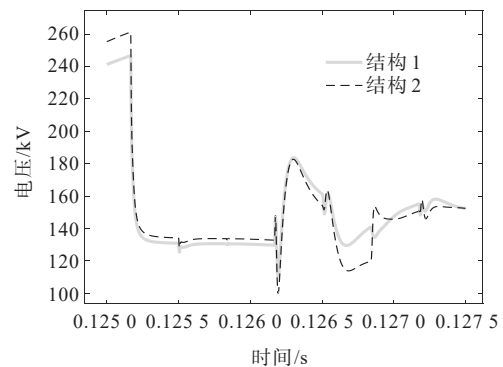


图2 不同电网结构下的暂态电压信号

Figure 2 Transient voltage signals under different power grid structures

1.2 不同故障情况下的暂态信号

1.2.1 不同接地电阻下的波形分析

当故障位置距离 L 50 km且初始相角为 30° ,单相

接地故障的故障电阻分别为10、100和300 Ω 时, L 处采集到的不同接地电阻下的暂态电压波形如图3所示。由图3可以看出,随着接地电阻的增大,电压暂态信号的幅值和陡度都在降低,但是波形和行波的极性并没有改变,因此接地电阻的大小主要影响着故障暂态信号的幅值。

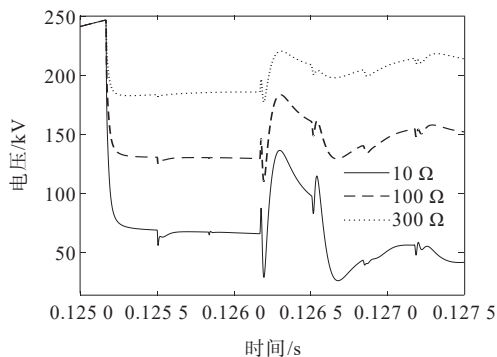


图3 不同接地电阻下的暂态电压波形

Figure 3 Transient voltage waveforms under different grounding resistances

1.2.2 不同故障位置的波形分析

当系统发生单相接地故障,接地电阻为100 Ω ,故障初相角为30°时,分别在距离 L 10、50、100、190 km的位置设置故障,得到如图4所示的暂态电压波形。可以看出,随着故障距离的逐渐增长,故障暂态信号到达的时刻和幅值都变得不同。随着故障距离的增长,暂态信号的波头幅值衰减严重,同时因为折反射情况的不同,暂态信号的波形也不一致,但波头的极性仍然相同。

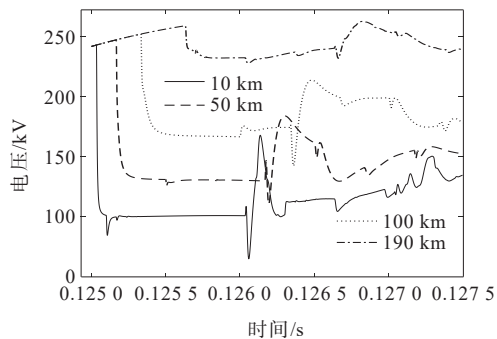


图4 不同故障位置下的暂态电压波形

Figure 4 Transient voltage waveforms at different fault locations

1.2.3 不同故障初相角的波形分析

当系统发生单相接地故障,故障点位于距离 L 50 km处,故障电阻为100 Ω ,故障角分别为5°、30°、60°、90°时,测量得到的暂态电压波形如图5所示。

由图5可以看出,故障角度越小,电压暂态信号的波形特征越不明显,但是波形的变化特征是一致的,波头的极性也是相同的。初相角越接近0°越可能会导致保护装置无法检测到故障暂态信号。

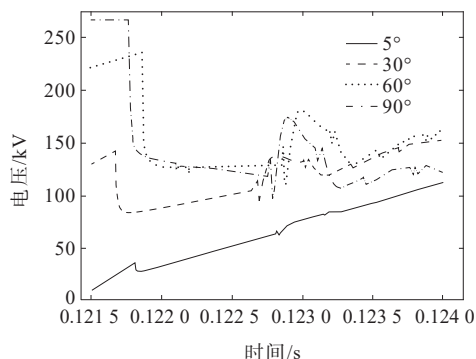


图5 不同故障初相角的暂态电压波形

Figure 5 Transient voltage waveforms under different fault initial phase angles

1.2.4 不同故障类型下的波形分析

当故障距离 L 50 km,初相角为30°,故障电阻为100 Ω ,发生单相故障、两相接地故障和三相接地故障时,得到的暂态电压波形如图6所示。由图6可以看出,系统发生3种故障时故障暂态信号的波形变化趋势几乎一致,但是单相故障时的波头幅值最大,且第二个极性相反的波头幅值约为初始波头的一半,两相接地故障的第一个波头与三相短路时的幅值几乎相同,但是第二个极性相反的波头和初始波头幅值相同,且小于三相短路时的幅值,以此特征可以判别系统发生的故障类型。

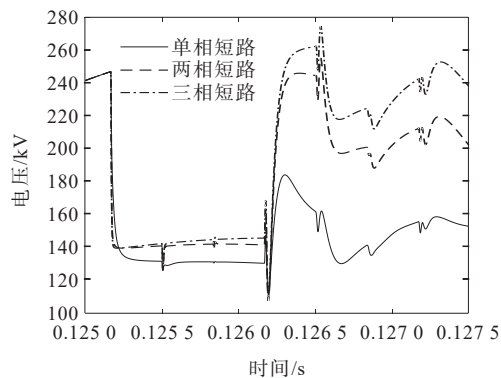


图6 不同故障类型的暂态电压波形

Figure 6 Transient voltage waveforms under different fault types

经过以上分析可知,当线路发生故障时,由于故障类型、故障位置、过渡电阻、初相角等因素的不同,检测装置采集到的故障暂态波形特征在时域上都有其独特的波形,但是时域上的折反射可能会令

部分特征被掩盖,因此本文选择将故障暂态波形进行时频分析,放大故障暂态波形的特征。

1.3 暂态信号的时频域特征

由前文分析可知,在发生不同情况的故障时,暂态信号的时域波形会发生不同的变化,即每种波形都对应着相应的故障,所以深入分析故障暂态信号的特征尤为重要。

故障的暂态信号是一个宽频带的信号,具有时域和频域上的双重特征,需要对其进行深入分析,放大信号的特征,所以本文利用一维连续小波分析对故障暂态电压信号进行分析,得到时频矩阵。故障暂态电压信号时频特征三维展示如图 7 所示,相关二维等高图如图 8 所示。

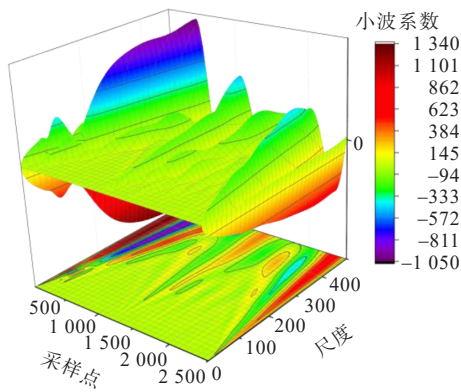


图 7 故障暂态电压信号时频特征三维展示

Figure 7 Three-dimensional display of time-frequency characteristics of fault transient voltage signals

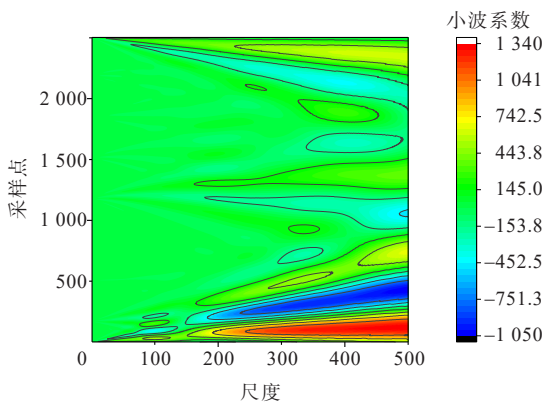


图 8 故障暂态电压信号时频特征二维等高图

Figure 8 Two-dimensional contour map of time-frequency characteristics of fault transient voltage signals

由图 7、8 可知,故障暂态信号在时间-频率域上的分布情况更为复杂,且大多集中在高频成分,因此本文选择利用连续小波分解的时频矩阵来对线路保护方案进行设计。

2 基于时频矩阵与 BP 神经网络的输电线路保护方案设计

2.1 BP 神经网络原理

人工神经网络是模仿生物的神经系统所设计出的算法,其通过神经元之间的连接实现对数据的学习。其中,反向传播(back propagation, BP)神经网络的应用最为广泛^[19],其网络结构如图 9 所示。

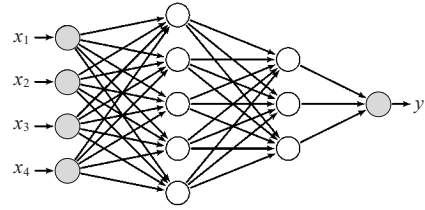


图 9 BP 神经网络结构

Figure 9 Structure of BP neural network

理论上,3层的神经网络可以模拟任意的非线性输入输出关系^[20-21],但是网络的神经元个数的选择会影响网络的表现。目前,神经网络的神经元个数选取还没有较为权威的理论指导,大多采用经验或者不断试验的方法进行配置。

有学者针对简单的 3 层 BP 神经网络进行了深入研究,得到输入层的神经元数目 N_{in} 与隐层神经元数目 N_{hid} 之间的关系式^[22]为

$$N_{hid} = 2N_{in} + 1 \quad (1)$$

同时,给出了隐层神经元数的上界:

$$N_{hid} \leq \frac{N_{train}}{R + (N_{in} + N_{out})} \quad (2)$$

式中, N_{train} 为训练样本数; N_{out} 为输出层节点的个数; R 的取值区间为 $[5, 10]$ 。

如果 BP 神经网络的输出节点只有一个,且偏置为零,输入层节点数 N_{in} 、隐含层神经元数 N_{hid} 、训练样本数 N_{train} 三者之间的关系如下:

$$0.11N_{train} \leq N_{hid}(N_{in} + 1) \leq 0.30N_{train} \quad (3)$$

部分学者根据 Kolmogrov 定理,较为系统地证明了隐含层的神经元设置数目和输入层的节点数应当满足的约束关系^[22]为

$$N_{hid} \leq N_{in} + 1 \quad (4)$$

文献[22]从训练样本的个数 N_{train} 、输出层节点的个数 N_{out} 和网络权值总量的角度出发,研究出隐含层的节点个数 N_{hid} 的不等约束如下:

$$\frac{N_{\text{train}} \log_2 N_{\text{train}}}{N_{\text{train}}} \leq N_{\text{hid}} \leq \frac{N_{\text{train}} \log_2 N_{\text{train}}}{N_{\text{out}}}$$

$$\log_2 \frac{N_{\text{train}} \log_2 N_{\text{train}}}{N_{\text{out}}} \quad (5)$$

考虑所采用的数据时频矩阵元素较多,本文选用式(5)来对BP神经网络的隐含层神经元进行数量选择。

BP神经网络在运算时包括前向传播和反向传播两个方向,具体步骤如下:1)将原始信号转化为向量,输入网络的输入层,经过中间各个隐含层神经元的运算之后,能够得出一次运算之后的输出;2)将输出值与已有数据的真实输出数据进行对比并计算两者之间的差距,由此从输出层往前,反馈给隐含层的神经元,使其调整自身的权重和偏置;3)将输入数据按照第一次的流程进行计算并再次得到输出结果,与真实输出数据进行对比得到误差,反馈给前面各隐含层的神经元;4)以此循环往复,使隐含层神经元不断调整权值和偏置,直到产生的输出与真实输出之间的误差小于给定的误差值或者迭代次数大于人为设置的数值后,训练终止,得到训练好的BP神经网络。

2.2 高压输电线路保护方案设计

本文通过将电压暂态信号进行一维连续小波变换之后,得到时间-尺度的矩阵,表示暂态信号的时频特征。但是,考虑矩阵的维数较大,如果全部输入则会对计算造成不利的影晌,导致计算时间过长,从而影晌保护的快速性,所以本文选择截取部分时频特征明显的数数据形成向量,作为BP神经网络的输入。暂态电压信号时频特征突出部分二维等高图如图10所示。通过观察图8,本文选择矩阵中尺度分别为300、400、500时的数据列组成向量,如图10中虚线所示部分。

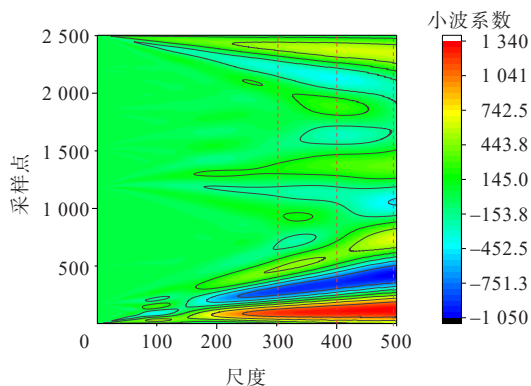


图10 暂态电压信号时频特征突出部分二维等高图

Figure 10 Two-dimensional contour map of prominent part of time-frequency characteristics of transient voltage signals

保护方案步骤设计如下。

1)搭建如图1(b)所示的高压线路仿真模型,并进行数据采集,得到50组不同故障情况下的电压暂态信号数据。

2)将数据进行一维连续小波分解,得到故障暂态信号的时频矩阵。

3)截取各个暂态信号时频矩阵小波分解尺度分别为300、400、500的列组成列向量,得到50组不同故障情况下的时频特征向量。

4)将步骤3)中得到的时频特征向量作为BP神经网络的学习样本,网络结构为3层,隐含层神经元个数按照式(5)进行选取,对此结构的BP神经网络进行学习训练,从而得到训练好的网络。

5)将待分析的网络按照步骤2)、3)进行分析,作为输入代入步骤4)中,从而对保护动作进行判定。

3 仿真与验证

本文在PSCAD中搭建如图1(b)所示的高压线路进行仿真,电源为无线大功率电源,输电导线为500 kV高压输电线路,导线采用四分裂方式,参数均为 4×400 mm,导线 L_{KM} 长度为200 km, L_{MN} 长度为50 km, L_{MQ} 长度为100 km,暂态信号采集装置以及保护装置位于K点,采样率设置为1 MHz,采集2500个采样点时间窗长度的暂态电压波形数据。当线路发生单相接地故障时,测点处可采集到明显的电流行波信号。单相接地时测点的电流行波如图11所示。在此基础上,本文设置不同的故障类型得到50组数据作为学习样本,并针对这些数据进行分析。

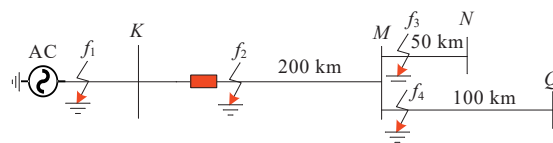


图11 单相接地时测点的电流行波

Figure 11 Current traveling wave at measuring point during single-phase-to-ground fault

按照本文所提的基于时频矩阵与BP神经网络的输电线路保护方法,在进行不同的故障情况的仿真之后进行一维连续小波分析得到时频矩阵,并选择时频特征明显的矩阵元素进行BP神经网络训练,选择小波尺度分别为300、400、500的列向量进行合并训练,得到的网络即为进行保护判断的网络N。

对网络N的保护可靠性进行验证,分别在不同故障情况下设置故障,为了验证保护方案的适用性

与可靠性,在进行故障位置、过渡电阻、故障初相角的设置时与BP神经网络学习所用的数据有适当的差别,得到不同过渡电阻情况下的保护判断结果(故障距离为50 km)如表1所示,不同故障距离及初相角情况下的保护判断结果(过渡电阻为100 Ω)如表2所示。

表1 不同过渡电阻情况下的保护判断结果(故障距离为50 km)

Table 1 Protection decision results under different transition resistances (fault distance is 50 km)

故障点	过渡电阻/Ω	初相角/(°)	判定结果
f_1	30	15	反向区外
	150	15	反向区外
	350	15	反向区外
f_2	30	15	正向区内
	150	15	正向区内
	350	15	正向区内
f_3	30	15	正向区外
	150	15	正向区外
	350	15	正向区外
f_4	30	15	正向区外
	150	15	正向区外
	350	15	正向区外

表2 不同故障距离及初相角情况下的保护判断结果(过渡电阻为100 Ω)

Table 2 Protection decision results under different fault distances and initial phase angles (transition resistance is 100 Ω)

故障点	过渡电阻/Ω	初相角/(°)	判定结果
f_1	5	15	反向区外
	90	30	反向区外
	180	85	反向区外
f_2	5	15	正向区内
	90	30	正向区内
	180	85	正向区内
f_3	5	15	正向区外
	90	30	正向区外
	180	85	正向区外
f_4	5	15	正向区外
	90	30	正向区外
	180	85	正向区外

根据表1、2可以看出,本文所设计的保护方案在不同的故障电阻、故障距离、故障初相角的情况下,均能准确判断出高压输电线路的区内外故障并给出动作。当故障电阻值较大且故障初相角较小时,此时的暂态信号的波形不明显,会给保护方案的实施带来一定的难度,但是保护方案仍然能够根据时频双重特征实现保护准确动作。

4 结语

针对高压输电线路保护存在的误动、拒动的情况,本文提出了一种利用暂态信号时频矩阵结合BP神经网络的高压输电线路保护方案,综合利用了故障电压暂态信号的时间和频率上的双重特征,有望提高高压输电线路的保护可靠性,所提方法为现有的线路保护提供了一种新的思路。

本文制定的保护方案致力于提高保护方案的可靠性,在处理电压暂态故障信号的时频方法上也仅选取了较为简单的一维连续小波分析方法,数据来源也大多依靠仿真,然而实际应用过程中的情况可能比仿真更加复杂。考虑监测装置取得的电压暂态信号为二次信号,存在与真实的一次信号不一致的问题,同时在真实情况中还存在各种噪声的影响以及需要进行合理去噪的问题,本文并未做出深入探讨,因此要将所提方法运用到实际现场中,还需要进行大量的仿真验证、数据采集以及抗干扰分析等工作。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013,37(3):567-574.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3):567-574.
- [2] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009,33(9):1-4.
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9):1-4.
- [3] 汤广福. 高压直流输电装备核心技术研发及工程化[J]. 电网技术, 2012,36(1):1-6.
TANG Guangfu. R&D and application of key technologies for HVDC equipment[J]. Power System Technology, 2012, 36(1):1-6.
- [4] 高艳丰,朱永利,闫红艳,等. 基于VMD和TEO的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016,31(1):24-33.
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning fault locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1):24-33.
- [5] 石逸雯,徐星,屠幼萍,等. 超高压架空线-电缆混合线路合闸过电压特性仿真分析[J]. 电力科学与技术学报, 2022,37(1):178-185.
SHI Yiwen, XU Xing, TU Youping, et al. Simulation analysis of closing overvoltage characteristics of overhead-cable hybrid lines with extra high voltage[J].

- Journal of Electric Power Science and Technology,2022, 37(1):178-185.
- [6] 刘琦,褚旭,付乐天,等.面向新能源电力系统的交流输电线保护新方案[J].智慧电力,2025,53(7):76-83.
LIU Qi, CHU Xu, FU Letian, et al. A novel protection scheme for AC transmission lines in renewable energy power systems[J]. Smart Power, 2025, 53(7): 76-83.
- [7] 王洪彬,周念成,王伟,等.基于行波模式分解的特高压直流输电线路双端行波测距方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(1):109-120.
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, WANG Wei, et al. A double-terminal fault location method for UHVDC transmission lines based on traveling wave mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 109-120.
- [8] 张峥,原帅,时伟光,等.基于深度神经网络的UHVDC输电系统故障诊断[J].电网与清洁能源,2024,40(7):88-94.
ZHANG Zheng, YUAN Shuai, SHI Weiguang, et al. Fault diagnosis of UHVDC transmission lines based on deep neural network[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2024, 40(7): 88-94.
- [9] 李泽文,唐迪,夏翔翔,等.输电线路故障行波保护综述[J].电力工程技术,2020,39(5):49-58.
LI Zewen, TANG Di, XIA Yixiang, et al. A summary of fault traveling wave protection for transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 49-58.
- [10] 冯瑞发,蔡汉生,廖民传,等.变电站跳通段雷电过电压特性仿真[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):148-156.
FENG Ruifa, CAI Hansheng, LIAO Minchuan, et al. Simulation study on lightning overvoltage characteristics of equipment in the substation connection section[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 148-156.
- [11] 余波,高学军,王灿,等.基于行波特征与KOA-CNN-BiGRU-AM的柔直输电线路故障诊断[J].电力工程技术,2025,44(2):185-196.
YU Bo, GAO Xuejun, WANG Can, et al. Fault diagnosis of MMC-MTDC based on traveling wave characteristics and KOA-CNN-BiGRU-AM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 185-196.
- [12] 郗鑫,文韬,韩彬,等.考虑变电站内接线和拓扑瞬态调整的断路器短路电流分析[J].电力建设,2024,45(7):113-121.
QIE Xin, WEN Tao, HAN Bin, et al. Analysis of short-circuit current of circuit breakers considering substation wiring and topology transient adjustment[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7): 113-121.
- [13] 刘祥波,王森,高芳,等.基于幅值和斜率变化的配电线路故障录波数据同步方法研究[J].供用电,2024,41(4):19-27.
LIU Xiangbo, WANG Sen, GAO Fang, et al. Research on synchronization method of fault recording data of distribution line based on amplitude and slope change[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(4): 19-27.
- [14] 贺家李,李永丽,李斌,等.特高压输电线继电保护配置方案(二)保护配置方案[J].电力系统自动化,2002,26(24):1-6.
HE Jiali, LI Yongli, LI Bin, et al. Relay protection for uhv transmission lines part two disposition of relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 1-6.
- [15] 段建东,张保会,任晋峰,等.超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J].中国电机工程学报,2007,27(1):37-43.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, REN Jinfeng, et al. Single-ended transient-based protection for EHV transmission lines basic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 37-43.
- [16] 刘志学,单鸿旭,李诗华.高压电力系统死区保护的一种实现方法[J].电工技术,2010(12):52-54.
LIU Zhixue, SHAN Hongxu, LI Shihua. An implementation method of dead zone protection in high-voltage power systems[J]. Electric Engineering, 2010(12): 52-54.
- [17] 俞胜,马继政,钱美芳,等.一种线路死区的保护方式[J].电力系统保护与控制,2008,36(23):113-115.
YU Sheng, MA Jizheng, QIAN Meifang, et al. A new method for the blind zone protection[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 113-115.
- [18] 李泽文,郭田田,曾祥君,等.基于波形相关性分析的输电线路暂态保护方法[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(8):44-50.
LI Zewen, GUO Tiantian, ZENG Xiangjun, et al. Wave correlation analysis based transient protection method for transmission lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2018, 30(8): 44-50.
- [19] 余华,吴文全,曹亮.BP神经网络的改进算法及其应用[J].电脑知识与技术,2009,5(19):5256-5258.
YU Hua, WU Wenquan, CAO Liang. The improves on the standard BP algorithm and their use[J]. Computer Knowledge and Technology, 2009, 5(19): 5256-5258.
- [20] 刘彩虹.BP神经网络学习算法的研究[D].重庆:重庆师范大学,2008.
LIU Caihong. The Study of algorithm of BP neural network. Chongqing: Chongqing Normal University, 2008.
- [21] 李卓,王胤喆,叶林,等.从感知-预测-优化综述图神经网络在电力系统中的应用[J].中国电力,2024,57(12):2-16.
LI Zhuo, WANG Yinze, YE Lin, et al. The application of graph neural networks in power systems from perspective of perception-prediction-optimization[J]. Electric Power, 2024, 57(12): 2-16.
- [22] 王立威.人工神经网络隐层神经元数的确定[D].重庆:重庆大学,2012.
WANG Liwei. Determination of number of ANNs' hiddenlayer neurons[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.