

基于多分辨率小波变换的配电网高阻接地故障检测方法

刘科研¹, 叶学顺¹, 李 昭¹, 谭云耀², 李 波²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 配电网中发生高阻接地故障时, 故障特征电气量突变微弱, 现有的故障检测方法难以有效识别高阻故障特征, 且容易受到谐波、噪声等干扰。为实现高阻故障的可靠检测, 提出一种基于多分辨率小波变换的高阻接地故障检测方法。该方法结合故障下零序电压的频域分布特征, 先利用多分辨率小波分解对零序电压进行处理, 然后对所得不同频段下细节系数进行信号重构, 最后计算故障前、后一个工频周期内重构信号的绝对值之和, 将前、后变化量与预设阈值对比实现高阻接地故障的有效检测。大量仿真结果表明, 该方法能够准确识别高阻故障, 对干扰具有较强的耐受能力, 能够有效适应不同配电网场景下的高阻故障检测。

关键词: 配电网; 高阻接地故障; 故障检测; 频率分解; 小波变换

Detection Method of High Impedance Fault in Distribution Network Based on Multi-resolution Wavelet Transform

LIU Keyan¹, YE Xueshun¹, LI Zhao¹, TAN Yunyao², LI Bo²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: When a high impedance fault occurs in distribution network, the sudden change of electrical quantity of fault characteristics is weak. The existing fault detection methods are difficult to effectively identify the characteristics of high impedance fault, and are easy to be disturbed by interferences such as harmonic and noise. In order to realize the reliable detection of high impedance fault, a high impedance fault detection method based on multi-resolution wavelet transform is proposed. Combined with the frequency domain distribution characteristics of zero-sequence voltage under faults, the zero-sequence voltage is processed by multi-resolution wavelet decomposition, and then the detail coefficients are reconstructed under different frequency bands. Finally, the sum of the absolute values of the reconstructed signals within the power frequency cycle are calculated before and after the faults. And the changes before and after the fault with the preset threshold are compared to realize the effective detection of high impedance fault. A large number of simulations show that this method can be adopted to accurately distinguish faults and interferences, and has strong adaptability to high impedance fault detection in different distribution network scenarios.

Key words: distribution network; high impedance fault; fault detection; frequency decomposition; wavelet transform

0 引言

配电网线路由于离地面较近、接入居民区等因素, 受到树触或断线等威胁, 容易造成高阻接地故障^[1]。高阻接地故障发生时, 由于过渡电阻通常较大, 具有隐蔽性高、电气量突变微弱等特点, 难以

可靠识别, 且容易受到谐波与干扰的影响^[2-3]。高阻接地故障若未被及时检测并处置, 可能长期存在并进一步转化为两相故障, 进而引发火灾等严重后果, 对生命及财产安全具有严重的威胁^[4]。因此, 快速准确地检测出高阻接地故障具有重要的意义。

目前, 针对高阻接地故障检测的研究根据分析域的不同, 主要分为时域法、频域法和时频域法 3 类。其中, 时域法通过分析故障后零序电流、零序电压波形的时域电气特征, 结合时域的数学处理以实现故障检测, 如基于电弧热效应和零序电流波形

基金资助项目: 国家电网公司总部科技项目(一二次融合智能配电开关数字化提升关键技术与开发)(5400-202099524A-0-0-00)。Project supported by Technology Project of Headquarters of State Grid Corporation of China (Research and Development of Key Technologies for Digital Upgrade of Primary and Secondary Fused Intelligent Distribution Switches)(5400-202099524A-0-0-00).

凹凸性变化的方法^[5], 基于接地电阻非线性和伏安特性曲线斜率变化的方法^[6], 基于零序电流在零序电压方向投影幅值和极性的方法^[7]等, 时域法以信号波形时域特征为依据, 具有明确的物理意义, 在小电阻接地系统中应用效果好, 但易受互感器测量精度的影响, 检测可靠性仍待提高。频域法通过故障信号中的谐波分量构建判据以实现故障检测, 如基于间谐波均方根值的故障检测方法^[8], 基于谐波能量分布特性和故障波形畸变特征的方法^[9], 基于区别扰动的高次谐波分量构建判据的方法^[10]等, 频域法能够充分利用波形非线性畸变的谐波分量, 结合现代信号处理技术可以提高检测灵敏度, 但此类方法未能结合故障时域特征, 易受噪声干扰。为了克服时域法和频域法易受系统开关操作干扰的困难, 学者们提出利用时频域分析技术提取特征量。小波变换因其在时频域具有良好局部特征表征能力而得到广泛应用, 如基于小波变换后细节系数和小波能量矩阵的方法^[11-12], 基于离散小波变换和粒子群算法构建判据的方法^[13], 基于自适应小波变换参数的方法^[14]等。结合小波变换的时频域分析法具有良好的局部特征分析能力, 但现有的方法大多结合信号高频段特征, 对现场高频噪声干扰缺乏一定适应性, 在低信噪比场景下的检测缺乏可靠性。此外, 随着分布式电源接入配电网, 配电网故障场景更加多变, 高阻接地故障的特征更加复杂, 对高阻故障的检测需要具备更强的适应能力。

为了解决配电网高阻故障检测困难的问题, 本文重点分析了零序电压频域特征在高阻接地故障、谐波干扰、噪声干扰情况下的变化情况, 提出一种基于零序电压和多分辨率小波变换的高阻接地故障检测方法。首先, 对高阻接地故障暂态特征和频域分布进行分析, 发现故障下基频附近故障分量明显区别于干扰下基频附近分量。其次, 结合多分辨小波变换和零序电压频域分布特征构建检测判据。最后, 利用 PSCAD 仿真平台测试了大量的故障工况, 验证了所提方法的可靠性和面对不同配电网故障场景的适应性。

1 高阻接地故障的暂态特征与频域分布

高阻接地故障时电气量突变微弱, 难以用于有效区分故障与谐波、噪声等干扰, 可能导致高阻故障持续存在, 造成故障的不断演变与发展, 最终引起严重的故障事件。研究发现零序电压、电流在故

障后相比三相电压、电流具有更明显的突变, 能够作为高阻故障检测的重要依据。为此, 本节对高阻接地故障的暂态特征与零序电压的频域分布进行详细分析, 为后续故障检测方法奠定理论依据。

1.1 高阻接地故障的暂态特征分析

对于中性点谐振接地系统单相高阻接地故障(后文简称高阻故障)暂态分析, 文献[7]给出了高阻故障的配电网等值电路图, 如图 1 所示。其中: u_f 为故障点等效电源, $u_f = U_m \sin(\omega_0 t + \theta)$; U_m 为故障相电压幅值; ω_0 为工频频率; θ 为故障初始相角; R 为 3 倍的接地点过渡电阻 R_f ; L_p 为消弧线圈等效电感; 假设配电网共有 n 条馈线且第 n 条馈线发生高阻故障, C_{0j} ($j=1, 2, \dots, n$) 为第 j 条馈线对地零序分布电容。

故障线路 n 的暂态电流 i_{0n} 由故障线路自身对地零序电容电流的暂态分量 $i_{C_{0n}}$ 和故障点零序电流暂态分量 i_{0f} 2 部分组成, 根据图 1 等值电路分析运算^[7]可得欠阻尼情况和过阻尼情况分别为:

$$i_{0n} = -i_{0f} + i_{C_{0n}} = \frac{L_p(A_4\omega_f - \delta A_3)}{R} e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) + \frac{L_p(-A_3\omega_f - \delta A_4)}{R} e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) + L_p C_{0n} \cdot \quad (1)$$

$$(\delta^2 A_3 - A_3\omega_f^2 - 2\delta A_4\omega_f) e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) + L_p C_{0n} (\delta^2 A_4 - A_4\omega_f^2 + 2\delta A_3\omega_f) e^{-\delta t} \sin(\omega_f t)$$

$$i_{0n} = -i_{0f} + i_{C_{0n}} = \frac{L_p p_1 A_1}{R} e^{p_1 t} + \frac{L_p p_2 A_2}{R} e^{p_2 t} + L_p C_{0n} (A_1 p_1^2 e^{p_1 t} + A_2 p_2^2 e^{p_2 t}) \quad (2)$$

式中: ω_f 为谐振频率; δ 为衰减因子; A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 p_1 、 p_2 均为影响因子, 影响因子的大小受配电网中线路参数大小的影响, 如消弧线圈补偿度等。故障点零序电压 u_{0f} 与故障点零序电流暂态分量 i_{0f} 成比例, 比例系数为 3 倍故障点过渡电阻 R_f , 即 2 者关系为:

$$u_{0f} = R i_{0f} = 3R_f i_{0f} \quad (3)$$

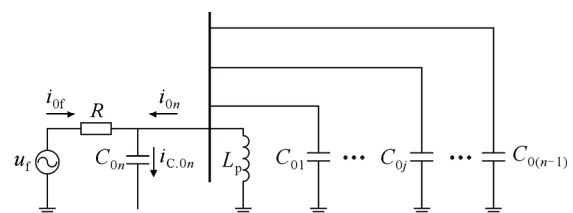


图 1 中性点谐振接地系统高阻故障等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of high impedance fault in neutral resonant grounding system

图 2 为高阻故障和单相低阻故障下零序电压和零序电流的对比图。由图 2 可知, 相较于一般单相低阻故障的零序电压和零序电流, 高阻故障的故障特征很小; 受接地过渡电阻的影响, 相较于零序电流的故障特征, 零序电压的故障特征也更加明显。对于高阻故障而言, 即使零序电流暂态部分可能比零序电流稳态部分大几倍, 但是受高阻故障接地过渡电阻较大的影响, 零序电流较于正常运行时体现的突变依然很小。同时, 虽然零序电压的突变值在接地过渡电阻的影响下有所增加, 但与受如图 3 所示谐波或噪声影响的正常运行线路下的零序电压突变值区别很小。因此, 仅依据零序电压突变值构建的高阻故障检测判据不具有可靠性。

1.2 零序电压的频谱分析

为得到更明显的高阻故障特征以区分高阻故障、谐波和噪声对零序电压产生的影响, 对不同因素影响下的零序电压进行快速傅里叶分解, 截取 0~500 Hz 的频率段进行分析, 如图 4 所示。

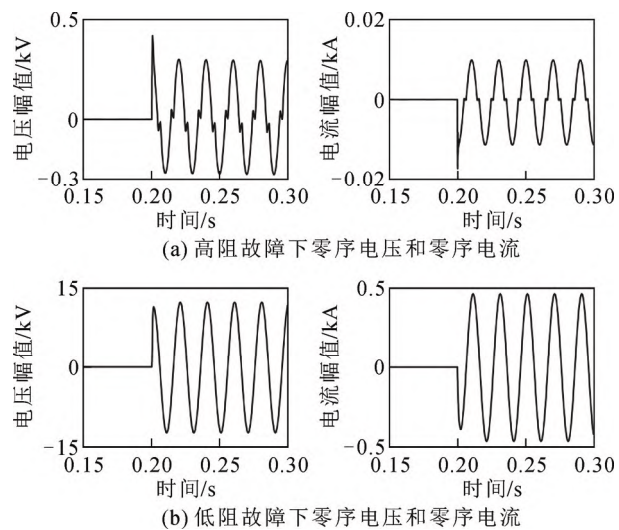


图 2 零序电压和零序电流的对比图

Fig.2 Comparison diagram of zero-sequence voltage and zero-sequence current

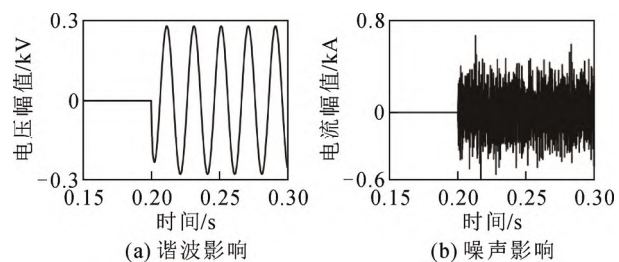


图 3 正常运行时受谐波和噪声影响的零序电压

Fig.3 Zero-sequence voltage affected by harmonics and noise during normal operation

由图 4 可知, 高阻故障下基频附近故障分量最大, 高频故障分量相对较少。对于谐波影响下的零序电压, 频率分布集中在高频部分, 基频附近的分量则很少, 对于噪声影响下的零序电压, 频率分布呈现均匀分布态势。基于此, 可根据零序电压频率分量分布情况, 区分高阻故障和谐波、噪声造成的零序电压突变, 从而判断高阻故障发生与否。

同时, 为了更准确地获取高阻故障零序电压信号的频率分布特征, 使其区别于谐波、噪声等干扰,

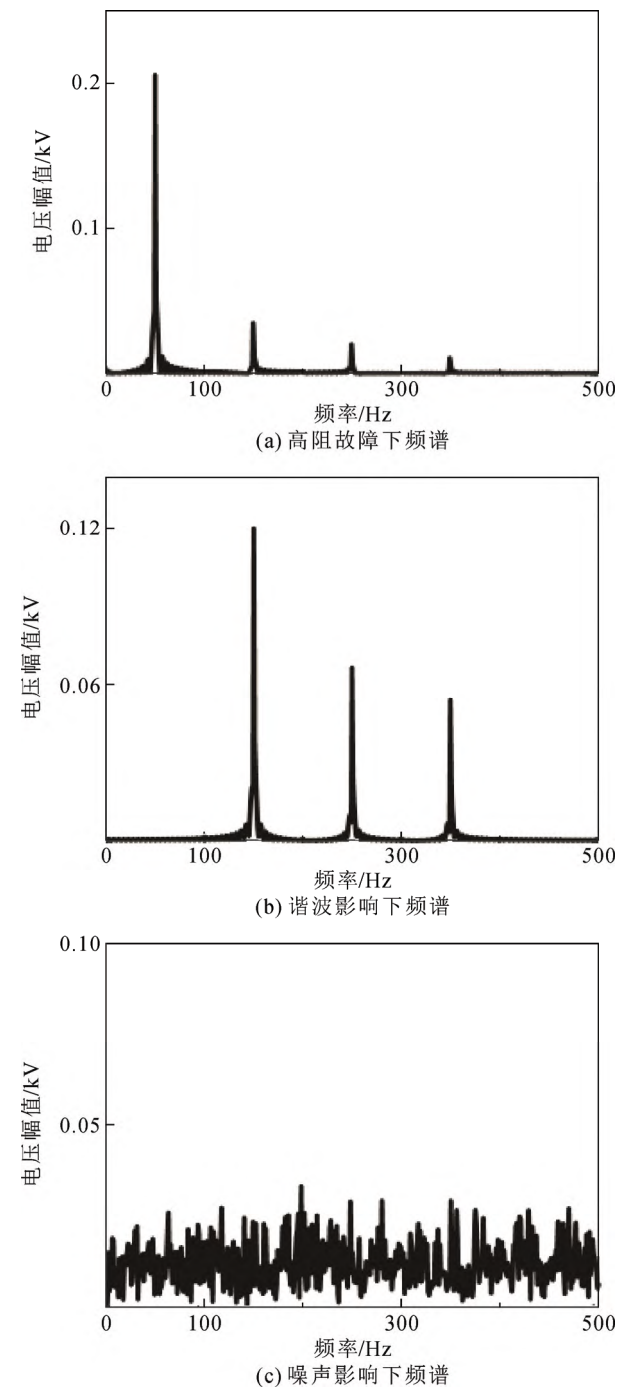


图 4 不同因素下零序电压频谱图

Fig.4 Zero-sequence voltage spectrum under different factors

利用基于多分辨率分析的小波变换对零序电压信号的频率分布进一步细化, 采取基频段求和的方式扩大故障特征, 以构建高阻故障检测判据。

2 基于小波变换的高阻接地故障检测方法

小波变换是继傅立叶变换后的时频性较强的信号处理方法。尤其是多分辨率小波变换可以在不同分辨率上将原始信号分解为不同频段的子信号。因而能够使不明显的零序电压暂态信号在多层分解后的不同子信号中以更为明显的形式表现出来, 从而提取零序电压信号的特征信息, 并构建高阻故障检测判据。

2.1 多分辨率小波变换理论

多分辨率小波变换可以在不同分辨率上对原始信号进行分解, 得到 2 个子信号: 平滑信号和细节信号。其中, 平滑信号分解到低一级, 其反映的是信号序列的概貌和变化趋势; 细节信号分解到高一, 其反映的是信号序列的细节变化。多分辨率小波分解的分析树结构图如图 5 所示^[15-18]。

由图 5 可知, 在多分辨率小波分解的处理下, 原始信号 S 被分解成了不同频段的子信号, 从而能够在时域和频域 2 个维度下分析原始信号。

采用正交小波变换, 原始信号能够在多层分解下得到各层细节系数 $d_j(n)$ 和最大层下的粗糙系数 $a_j(n)$, 两者的递推式^[19]为:

$$\begin{cases} a_{j+1}(n) = \sum_{m=1}^N h(n-2m)a_j(n) \\ d_{j+1}(n) = \sum_{m=1}^N g(n-2m)d_j(n) \end{cases} \quad (4)$$

式中: h 和 g 分别为低通滤波器和高通滤波器函数; $j=1, 2, \dots, J$, J 为最大小波分解层数; $n=1, 2, \dots, N$, N 为总的采样点数; $m=1, 2, \dots, M$, m 为小波函数的离散化程度。滤波器的最初输入 $a_0(n)$ 采用待处理的原始信号 $u_{0f}(t)$ 的原始采样序列 $u_{0f}(n)$ 。设采样频率为 f_s , 则 $u_{0f}(t)$ 占据的频段为 $0 \sim f_s$, 经过一层分解后, 得到 $a_1(n)$ 和 $d_1(n)$, 它们占据的频段分别为 $0 \sim f_s/4$ 和 $f_s/4 \sim f_s/2$; 依次类推, 经过 J 层分解, 可以得到信号 $u_{0f}(t)$ 的 $J+1$ 个信号系数 $a_j(n)$ 、 $d_1(n)$ 、 $d_2(n)$ 、 \dots 、 $d_j(n)$ 。

对原始信号进行多分辨率小波分解后所得到的 $J+1$ 个信号系数进行信号重构, 得到原始信号各频段的信号分量 $A_j(n)$ 、 $D_1(n)$ 、 $D_2(n)$ 、 \dots 、 $D_j(n)$, 信号系数的重构式^[19]为:

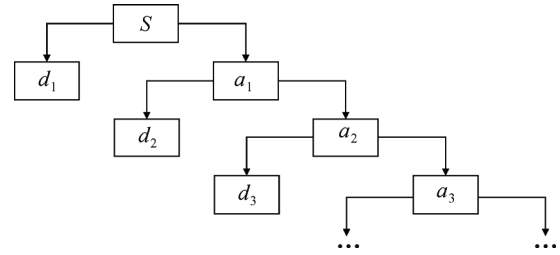


图 5 多分辨率小波分解的分析树结构图

Fig.5 Analysis tree structure diagram of multi-resolution wavelet decomposition

$$\begin{cases} A_j(n) = \sum_{n=1}^N a_j(n)\varphi_{j,n}(t) \\ D_j(n) = \sum_{n=1}^N d_j(n)\psi_{j,n}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\varphi_{j,n}(t)$ 和 $\psi_{j,n}(t)$ 分别为尺度函数和小波函数。将重构的信号分量按式(6)相加便能完整恢复原始信号 S 。

$$S = \sum_{n=1}^N a_j(n)\varphi_{j,n}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N d_j(n)\psi_{j,n}(t) \quad (6)$$

由式(6)可知, 重构的信号分量不仅能够体现各频段分量的占比, 也能体现信号分量随时间的分布情况, 从而全面地反映原始信号的时频特性。

2.2 故障判据和检测算法流程

高阻故障判据的构建流程为:

1) 为了获取小波分解后最大的参考量, 本文选择具有较好正交性的 Daubechies 小波作为小波基。对高阻故障发生后的零序电压进行多分辨率小波分解, 得到零序电压的粗糙系数 $a_j(n)$ 和细节系数 $d_1(n)$ 、 $d_2(n)$ 、 \dots 、 $d_j(n)$ 。

2) 对所有的细节系数 $d_1(n)$ 、 $d_2(n)$ 、 \dots 、 $d_j(n)$ 进行信号重构, 得到零序电压信号各频段的信号分量 $D_1(n)$ 、 $D_2(n)$ 、 \dots 、 $D_j(n)$ 。

3) 为了放大线路正常运行与线路发生高阻故障后的特征差别, 计算各频段的信号分量在发生故障后一个工频周期内的信号绝对值之和 S_{dk} 。本文仿真的采样频率为 2 kHz, 即一个工频周期为 40 个采样点, 因此 S_{dk} 的计算式为:

$$S_{dk} = \sum_{n=1}^N |D_k[n]| \quad (7)$$

式中: k 为小波分解层数; $D_k[n]$ 为在 k 层分解下的信号分量在采样点 n 处的值。

4) 选取 S_{dk} 中最大值 $S_{dk,max}$, 计算最大值与正常运行下 S_{dk} 的变化量 ΔS_{dk} , 将变化量 ΔS_{dk} 与预设阈值 Q 比较, 如果 $\Delta S_{dk} > Q$, 则线路发生高阻故障;

如果 $\Delta S_{dk} < Q$, 则线路正常。此处的阈值 Q 的设定在 3.1 节说明。

步骤 4 中选取 S_{dk} 中的最大值 $S_{dk,max}$ 是为了确定使 S_{dk} 最大的分解层数, 在确定分解层数 k' 后, 对高阻故障后的零序电压以不同 Daubechies 小波为小波基进行 8 层分解, 得到在分解层数 k' 下 ΔS_{dk} 的对比图, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 在不同小波基下进行小波分解得到的 ΔS_{dk} 大小会有所不同, 而以 db6 小波为小波基得到的 ΔS_{dk} 最大。因此, 本文选取 db6 小波作为小波基对零序电压进行多分辨率小波 8 层分解。综上所述, 基于多分辨率小波变换的高阻故障检测流程图如图 7 所示。

从算法流程中可知, 本文检测方法不同于常规时频域法通常结合信号高频段特征, 本文通过多分辨率小波分解更多结合信号基频段特征, 对现场高频干扰有较强适应性, 在强噪声场景下的故障检测更具可靠性。

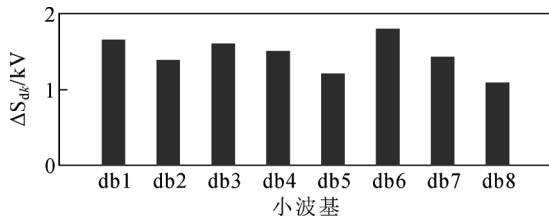


图 6 不同小波基下的 ΔS_{dk} 对比图

Fig.6 Comparison of ΔS_{dk} under different wavelet bases

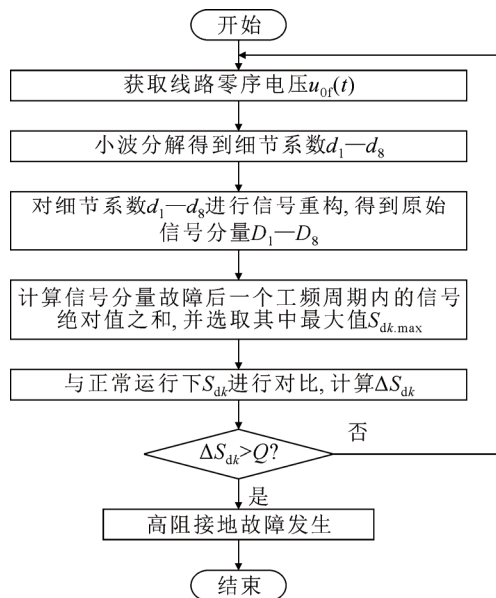


图 7 基于多分辨率小波变换的高阻故障检测流程图

Fig.7 Flow chart of high impedance fault detection based on multiresolution wavelet transform

3 仿真实验

本文基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建如图 8 所示的 10 kV 配电网仿真模型, 以验证本文所提基于多分辨率小波变换的故障检测方法。该模型采用中性点谐振接地方式, 其系统参数设置如表 1 和附录 A 所示。其中高阻故障设置在 L4 上, 监测点设置在线路首端。

高阻故障的模型如图 9 所示^[20-21]。其中, U_p 、 U_n 为 2 个直流电源, 通过改变直流电源的值, 可以使电流正负半周不对称; D_p 、 D_n 为 2 个二极管; R_p 、 R_n 为 2 个可变电阻, 通过改变电阻的值, 可以控制高阻故障的电流的大小和相位。本文的参数设置为: $R_p=R_n=1\text{ k}\Omega$, $U_p=3\text{ kV}$, $U_n=2\text{ kV}$ ^[20]。

表 1 仿真模型的设置

模型	类型
电压源	理想电源, 模拟无穷大三相电源
T1	110 kV/10.5 kV, Δ/Y
T2、T3	10 kV/0.4 kV, Δ/Y
L1、L3、L4	8 km、10 km、12 km 架空线路
L2	10 km 电力电缆

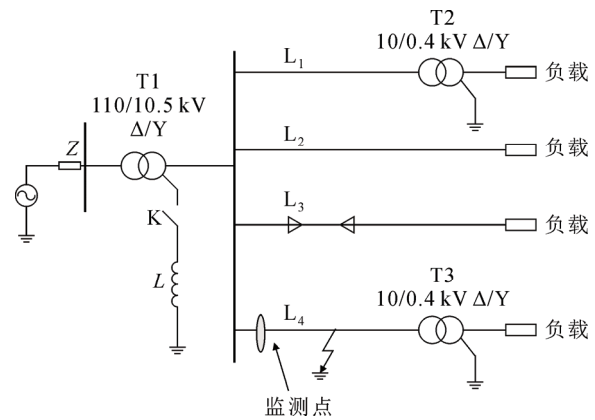


图 8 10 kV 中性点谐振接地的配电网仿真示意图

Fig.8 Simulation diagram of distribution network with 10 kV neutral resonant grounding

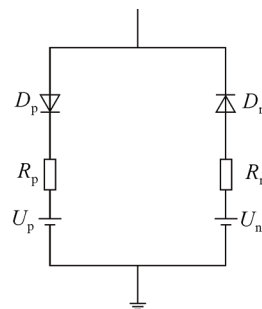


图 9 高阻故障模型

Fig.9 High impedance fault model

3.1 单相高阻接地故障检测

当图 8 所示配电网 L4 馈线上距监测点 7 km 处发生 B 相高阻故障时, 得到如图 10 所示的零序电压波形。

由图 10 可知, 高阻故障发生后, 零序电压波形呈现为幅值高于稳态幅值的暂态过程。同时, 故障发生前后零序电压变化量相较于 10 kV 的线路电压很小, 不足以构建故障检测判据, 因此需对零序电压波形作进一步的处理。为了包括暂态过程所有非基频暂态部分, 选取故障后 0.1 s 内的零序电压信号进行小波分解, 得到如图 11 所示的分解结果。

由图 11 可知, 高阻故障的零序电压暂态信息主要留存于故障发生后的首个工频周期内。同时分解结果显示第 5 层分解所处频段的分量信号占比最大, 由于 6—8 层分解所处频段信号占比很小, 所以根据式(7)计算 1—5 层信号分量的 S_{dk} , 得到故障前后 S_{dk} 的对比情况, 如表 2 所示。

由表 2 可知, 在线路正常运行时, 前 4 层分解的 S_{dk} 非常小; 发生了高阻故障后, S_{dk} 有明显的增大, 特别是 S_{d5} 增大最明显, 而 S_{d1} 、 S_{d2} 、 S_{d3} 、 S_{d4} 的变化明显小于 S_{d5} 。因此, S_{d5} 的变化量能够作为检测高阻故障的指标。

为了确定检测方法的整定值 Q , 同时验证方法的可靠性, 即能够区分高阻故障和正常运行时受谐波、噪声造成的影响, 针对仅含有干扰的正常运行下的零序电压进行了仿真。对于系统中的干扰, 本文模拟了如图 3 所示最接近高阻故障突变的 10 dB 谐波和 15 dB 白噪声信号, 得到如表 3 所示的仿真结果。

由表 3 可知, 线路正常运行时, 面对谐波和噪声的影响, S_{d1} 、 S_{d2} 、 S_{d3} 、 S_{d4} 变化很大, 而 S_{d5} 变化很小, 与表 2 中 S_{d5} 的变化区别很大。因此, 本文将整定值 Q 设置为 1, 既满足灵敏性, 又能防止谐波和噪声引起的误动。

3.2 检测方法的适应性

本节首先对一般的低阻接地故障进行仿真以验证所提方法的适用性。其次, 对谐波影响下、噪声影响下、不同接地电阻、不同故障位置、三相不平衡负载以及线路加入分布式电源等情况进行针对性的仿真测试, 以进一步验证所提高阻故障检测方法的适应能力。

3.2.1 单相低阻接地故障检测

本文模拟了几种不同过渡电阻^[21]下的单相低阻故障, 经过算法流程得到如表 4 所示的结果。

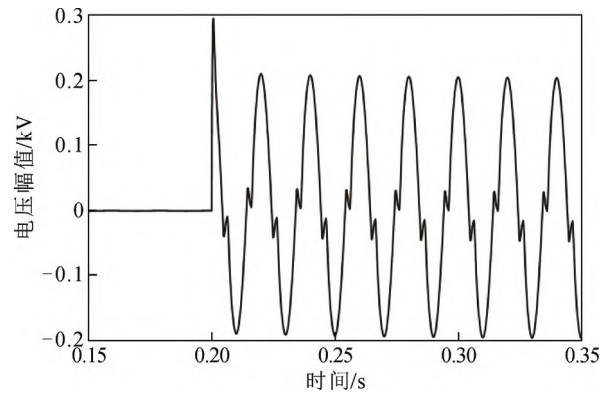


图 10 高阻故障下的零序电压波形

Fig.10 Zero-sequence voltage waveform under high impedance fault

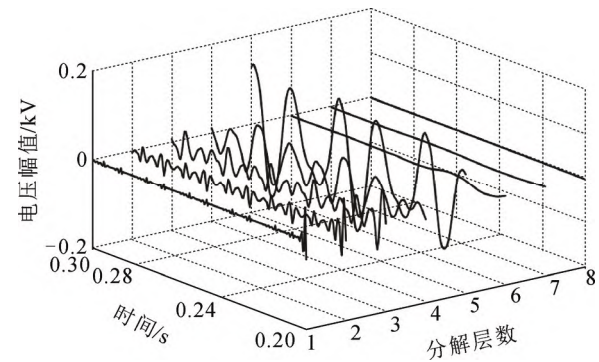


图 11 高阻故障下的小波分解结果

Fig.11 Wavelet decomposition results under high impedance fault

表 2 高阻故障前后 S_{dk} 对比情况

Table 2 Comparison of S_{dk} before and after high impedance fault

	kV				
线路状态	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	S_{d4}	S_{d5}
正常	0.003	0.007	0.013	0.004	0.037
故障	0.365	0.776	1.321	0.707	4.240
ΔS_{dk}	0.362	0.769	1.308	0.703	4.203

表 3 线路正常运行下受谐波和噪声影响情况

Table 3 Influence of harmonic and noise on the line under normal operation

	kV				
影响因素	ΔS_{d1}	ΔS_{d2}	ΔS_{d3}	ΔS_{d4}	ΔS_{d5}
谐波	0.513	1.624	3.446	0.954	0.292
噪声	5.099	2.612	2.062	1.356	0.810

表 4 单相低阻接地故障时 ΔS_{dk} 对比情况Table 4 Comparison of ΔS_{dk} in case of single-phase low resistance grounding fault

kV					
过渡电阻/ Ω	ΔS_{d1}	ΔS_{d2}	ΔS_{d3}	ΔS_{d4}	ΔS_{d5}
10	2.858	11.470	29.782	90.423	265.093
50	3.096	8.114	14.753	22.937	100.960
100	2.518	5.076	8.388	11.883	56.055

由表 4 可知, ΔS_{dk} 显著增大, 原因在于发生单相低阻接地故障时零序电压突变值很大, 使得通过判据计算的数值显著增大, 远远大于检测整定值 Q 。因此, 所提方法能够适用于单相低阻故障检测, 且灵敏性较高。

3.2.2 谐波、噪声对检测结果的影响

对于系统中的干扰, 本文分别模拟了系统中白噪声影响以及系统中 3 次、5 次、7 次等奇次谐波干扰, 根据文献[22]分别设置了不同信噪比的白噪声和谐波干扰, 得到如表 5 和表 6 所示的仿真结果。此时接地电阻设置为 $1\text{ k}\Omega$, 故障位置设置为距离监测点 7 km 处。

由表 5 和表 6 可知, 面对不同信噪比下谐波和噪声的影响, ΔS_{d1} 、 ΔS_{d2} 、 ΔS_{d3} 、 ΔS_{d4} 变化程度不同, 但 ΔS_{d5} 变化程度最小, 且都超过检测整定值 Q 。因此, 本文所提检测方法能够克服谐波和噪声的影响准确检测高阻故障。

3.2.3 过渡电阻对检测结果的影响

表 7 给出了不同大小的过渡电阻的高阻故障下 ΔS_{dk} 的统计情况, 此时故障位置设置为距离监测点 7 km 处。

由表 7 可知, 随着接地电阻的增加, ΔS_{dk} 的值逐渐减小, 该方法的检测灵敏性会有所降低, 但方法对于高阻故障依然能够检测。

3.2.4 三相负载不平衡对检测结果的影响

本文模拟了针对线路三相负载不平衡情况的仿真, 经过算法流程得到如表 8 所示的结果。此时接地电阻设置为 $1\text{ k}\Omega$, 故障位置设置为距离监测点 7 km 处。

由表 8 可知, 三相不平衡负载下线路正常运行时 S_{dk} 较三相平衡负载更大, 原因是三相负载不平衡时线路三相电压不对称, 即零序电压呈现一个幅值较大的正弦波状态。但是, 发生高阻故障后, S_{d5}

表 5 线路高阻故障时受谐波影响情况

Table 5 Harmonic influence in case of high impedance fault of line

kV					
信噪比/dB	ΔS_{d1}	ΔS_{d2}	ΔS_{d3}	ΔS_{d4}	ΔS_{d5}
40	0.363	0.761	1.312	0.710	4.199
30	0.367	0.750	1.325	0.729	4.190
20	0.390	0.732	1.419	0.787	4.163
10	0.486	0.862	1.872	0.988	4.077

表 6 线路高阻故障时受噪声影响情况

Table 6 Noise influence in case of high impedance fault of line

kV					
信噪比/dB	ΔS_{d1}	ΔS_{d2}	ΔS_{d3}	ΔS_{d4}	ΔS_{d5}
40	0.467	0.752	1.284	0.686	4.234
30	0.996	1.171	1.318	0.673	4.250
20	2.303	2.222	1.720	1.443	4.020
10	7.393	4.368	3.655	1.348	3.866

表 7 高阻故障不同接地电阻 ΔS_{dk} 对比情况Table 7 Comparison of ΔS_{dk} under different transition resistances of high impedance fault

kV					
过渡电阻/ $\text{k}\Omega$	ΔS_{d1}	ΔS_{d2}	ΔS_{d3}	ΔS_{d4}	ΔS_{d5}
1.0	0.362	0.769	1.308	0.703	4.203
1.5	0.241	0.512	0.872	0.468	2.803
2.0	0.180	0.383	0.647	0.351	2.099
2.5	0.142	0.306	0.521	0.280	1.676

表 8 三相负载不平衡下故障前后 S_{dk} 对比情况Table 8 Comparison of S_{dk} before and after fault under three-phase load imbalance

kV					
线路状态	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	S_{d4}	S_{d5}
正常	0.001	0.007	0.422	8.758	28.261
故障	0.447	0.810	0.888	7.393	22.824
ΔS_{dk}	0.446	0.803	0.466	1.365	5.437

依旧会有较大变化, 变化量也远大于检测整定值 Q 。因此, 此方法能够适应线路三相负载不对称时高阻故障检测。

3.2.5 故障位置对检测结果的影响

表 9 给出了不同故障位置的高阻故障下 ΔS_{dk} 的

统计情况，此时接地电阻设置为 1 kΩ。

由表 9 可知，随着故障位置的变化， ΔS_{dk} 的值会有所波动，但整体变化不大，说明对检测方法造成的扰动很小。

3.2.6 分布式电源对检测结果的影响

在故障线路上接入分布式电源，本文选择在图 2 线路 4 中接入容量为 0.75 MW 的光伏电源为例进行仿真，接入光伏电源后的线路 4 如图 12 所示。接入分布式电源后 ΔS_{dk} 的变化如表 10 所示，此时接地电阻设置为 1 kΩ，故障位置为距离监测点 7 km 处。

由表 10 可知，分布式电源的接入对 ΔS_{dk} 的值会产生一定的影响，但分布式电源的功率大多都很小，当高阻故障发生时，对零序电压的影响也很小。因此，本文所提方法依旧能适用于含分布式电源的配电网高阻故障检测。

综上所述，本文所提方法具有较强的适应性，在谐波影响下、噪声影响下、不同接地电阻、不同故障位置、三相不平衡负载以及线路加入分布式电源等情况，当系统发生高阻故障时，检测方法均能有效动作。同时，面对一般单相低阻接地故障，本文所提方法仍能有效检测。

3.3 不同高阻故障检测方法的对比

如前文所述，针对高阻接地故障检测的研究根据分析域的不同，主要分为时域法、频域法和时频域法 3 类。本文进一步对比了其他高阻故障检测方法，主要对比的故障检测方法包括 2 种时域法：基于故障相电压极化量的检测方法^[1](方法 1)、基于零序电流投影系数的检测方法^[23](方法 2)；1 种频域法：基于零序电压特征谐波的检测方法^[10](方法 3)；1 种时频域法：基于小波能量矩的检测方法^[18](方法 4)。这 4 种方法同样针对故障后零序分量进行特征提取以实现高阻故障检测，具有一定代表性。本节对本文方法以及上述 4 种方法的抗噪声、谐波干扰能力进行对比。

为了统一方法对比时的变量，仿真在本文描述的配电网中进行，并且过渡电阻以 1 kΩ、故障位置在距离监测点 7 km 处为例。分别对本文算法以及上述 4 种方法进行不同信噪比干扰测试，得到如附录 B 表 B1—表 B5 所示的仿真结果。

由附录 B 表 B1—表 B4 可知：方法 1 几乎不受谐波影响，但是该方法抗噪声干扰能力不足；方法 2 虽然具有较好的抗谐波干扰能力，但特征值易受

表 9 高阻故障下不同故障位置 ΔS_{dk} 对比情况

Table 9 Comparison of different fault location ΔS_{dk} under high impedance fault

故障位置距监测点距离/km	kV				
	ΔS_{d1}	ΔS_{d2}	ΔS_{d3}	ΔS_{d4}	ΔS_{d5}
3.0	0.364	0.727	1.338	0.722	4.343
5.0	0.360	0.748	1.324	0.709	4.271
7.0	0.362	0.769	1.308	0.703	4.203
9.0	0.364	0.790	1.291	0.703	4.138

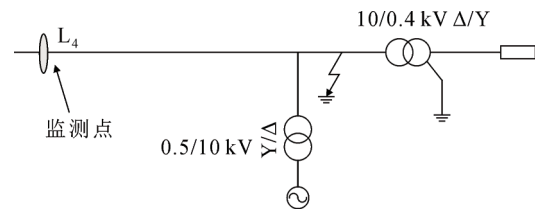


图 12 接入分布式电源后线路 4 示意图

Fig.12 Schematic diagram of line 4 after connected to distributed power supply

表 10 接入分布式电源后 ΔS_{dk} 故障前后对比情况

Table 10 Comparison of ΔS_{dk} before and after fault after connected to distributed power supply

线路状态	kV				
	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	S_{d4}	S_{d5}
正常	0.002	0.006	0.013	0.003	0.036
高阻故障	0.361	0.719	1.302	0.662	4.113
ΔS_{dk}	0.359	0.713	1.289	0.659	4.077

噪声干扰的影响；方法 3 在发生故障时受到干扰能准确检测故障的发生，但是仿真结果表明配电网正常运行时受到干扰会发生误动，说明方法 3 具有一定的抗干扰能力，但可靠性有待进一步提高；方法 4 在发生故障时受到噪声干扰也能检测高阻故障的发生，但是面对低信噪比的谐波干扰无法准确检测高阻故障的发生，同时仿真结果表明正常运行时受到噪声干扰会发生误动，说明方法 4 具有一定的抗噪声干扰能力，但缺乏一定可靠性。与方法 1—4 相比，本文所提检测方法具有较强的抗噪声、谐波干扰能力，在不同信噪比条件下均能够完成对故障的可靠检测，且在配电网正常运行下受到低信噪比干扰时也不会引起误动，说明本文方法在抗干扰能力和可靠性上均具有优势。

4 结论

本文针对高阻故障问题, 提出一种基于多分辨率小波变换的检测方法, 利用仿真进行了验证, 得到如下结论。

1) 通过多分辨率小波变换提取了故障后首个工频周期内重构信号的绝对值之和 S_{dk} , 选取其中最大值 $S_{dk,max}$ 与正常运行下 S_{dk} 对比产生的差值 ΔS_{dk} 作为检测指标并搭建检测判据, 有效扩大了故障前后运行特性的差别, 并能可靠区分高阻故障与谐波、噪声等干扰。

2) 大量的仿真表明, 本文基于多分辨率小波变换的高阻故障检测方法的灵敏性会受到发生高阻故障时配电网所处场景的影响, 但本文所提方法依然能准确检测高阻故障的发生, 说明该方法具有较强的适应性。

3) 将本文检测方法与已有的 4 种高阻故障检测方法抗干扰能力进行对比, 仿真结果表明本文所提方法在抗干扰能力和可靠性上均具有优势。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] 管廷龙, 薛永端, 徐丙垠. 基于故障相电压极化量的谐振接地系统高阻故障方向检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 73-81.
GUAN Tinglong, XUE Yongduan, XU Bingyin. Method for detecting high-impedance fault direction in a resonant grounding system based on voltage polarization of the fault phase[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 73-81.
- [2] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3548-3556.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3548-3556.
- [3] 刘科研, 盛万兴, 董伟杰. 配电网弧光接地故障建模仿真与实验研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 12-22.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, DONG Weijie. Overview of modeling simulation and experimental research on arc grounding fault in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 12-22.
- [4] 王 宾, 崔 鑫. 中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接地故障非线性建模及故障解析分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3864-3872.
WANG Bin, CUI Xin. Nonlinear modeling and analytical analysis of arc high resistance grounding fault in distribution network with neutral grounding via arc suppression coil[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3864-3872.
- [5] 耿建昭, 王 宾, 董新洲, 等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 85-91.
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 85-91.
- [6] 王 宾, 耿建昭, 董新洲. 配电网高阻接地故障伏安特性分析及检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3815-3823.
WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics for high impedance faults in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3815-3823.
- [7] 薛永端, 李 娟, 陈筱菁, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5037-5048.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048.
- [8] MACEDO J R, RESENDE J W, BISSOCHI JR C A, et al. Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(16): 2593-2601.
- [9] 韦明杰, 张恒旭, 石 访, 等. 基于谐波能量和波形畸变的配电网弧光接地故障辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 148-154.
WEI Mingjie, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Identification of arcing grounded fault in distribution network based on harmonic energy and waveform distortion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 148-154.
- [10] 周 封, 朱 瑞, 王晨光, 等. 一种配电网高阻接地故障在线监测与辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 685-693.
ZHOU Feng, ZHU Rui, WANG Chenguang, et al. Online criterion and identification of single-phase ground fault with high resistance in distribution network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 685-693.
- [11] 何仁君, 李春晓. 小波法识别配电网线路高阻故障[J]. 电气开关, 2018, 56(2): 25-28, 33.
HE Renjun, LI Chunxiao. Identification of high resistance fault in distribution network by wavelet method[J]. Electric Switchgear, 2018, 56(2): 25-28, 33.
- [12] 邱 进, 田 野, 李冠华, 等. 基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 180-187.
QIU Jin, TIAN Ye, LI Guanhua, et al. Study on transient line selection of small current grounding fault based on field recorded waveform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 180-187.
- [13] 翁月莹, 陈翔宇, 肖新华, 等. 基于 PSO 和贝叶斯分类器的配电网高阻接地故障识别技术[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 52-56.
WENG Yueying, CHEN Xiangyu, XIAO Xinhua, et al. High impedance ground fault identification technology based on PSO and Bayes classifier[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 52-56.
- [14] QI P, LEZAMA J, JOVANOVIĆ S, et al. Adaptive real-time DWT-based method for arc fault detection[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Electrical Contacts. Dresden, Germany: IEEE, 2014: 1-6.
- [15] 陈 坚, 刘思议, 金 涛. 基于 SURE 小波阈值消噪和 MCEEMD-HHT 的低频振荡分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 151-160.
CHEN Jian, LIU Siyi, JIN Tao. Analysis of low-frequency oscillation based on SURE wavelet threshold De-noising and MCEEMD-HHT method[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 151-160.
- [16] 赵莉华, 丰 遥, 谢荣斌, 等. 基于交叉小波的变压器振动信号幅频特征量提取方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 505-511.
ZHAO Lihua, FENG Yao, XIE Rongbin, et al. Amplitude and frequency feature extraction for transformer vibration based on cross-wavelet transform[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2):

- 505-511.
- [17] 张 鹏, 张 峰, 梁 军, 等. 采用小波包分解和模糊控制的风电机组储能优化配置[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 609-617.
ZHANG Peng, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system for wind farm using wavelet packet decomposition and fuzzy control[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 609-617.
- [18] 余 浩, 庄池杰, 曾 嵘, 等. 提高暂态电压测量精度的自适应小波去噪方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2139-2147.
YU Hao, ZHUANG Chijie, ZENG Rong, et al. Adaptive wavelet de-noising method for improving the accuracy of transient overvoltage measurement[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2139-2147.
- [19] 姚海燕, 张 静, 留 毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.
- [20] 朱晓娟, 林 圣, 张 姝, 等. 基于小波能量矩的高阻接地故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 161-168.
ZHU Xiaojuan, LIN Sheng, ZHANG Shu, et al. High-impedance grounding fault detection based on wavelet energy moment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 161-168.
- [21] 龙官微, 穆海宝, 张大宁, 等. 基于多特征融合神经网络的串联电弧故障识别技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 463-471.
LONG Guanwei, MU Haibao, ZHANG Daning, et al. Series arc fault detection technology based on multi-feature fusion neural network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 463-471.
- [22] 庄胜斌, 缪希仁, 江 灏, 等. 基于改进欧氏-动态时间弯曲距离的谐振接地配电网单相高阻接地故障选线方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 273-281.
ZHUANG Shengbin, MIAO Xiren, JIANG Hao, et al. A line selection method for single-phase high-impedance grounding fault in resonant grounding system of distribution network based on improved Euclidean-dynamic time warping distance[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 273-281.
- [23] 杨 帆, 刘鑫星, 沈 煜, 等. 基于零序电流投影系数的小电阻接地系统高阻接地故障保护[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1128-1133.
YANG Fan, LIU Xinxing, SHEN Yu, et al. High resistance ground fault protection of low resistance grounding system based on zero sequence current projection coefficient[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1128-1133.



LIU Keyan
Ph.D., Professor

刘科研

1978—, 男, 博士, 教授级高工
主要从事配电网运行分析、配电网建模仿真与智能分析、配电网大数据分析、电网信息物理系统相关的研究

E-mail: liukeyan@epri.sgcc.com.cn



LI Bo
Ph.D.
Corresponding author

李 波(通信作者)

1996—, 男, 博士
主要从事城市电网故障分析、保护与控制方面的研究

E-mail: libo186@foxmail.com

收稿日期 2022-01-10 修回日期 2022-10-09 编辑 程子丰