

基于暂态信息融合的输电线路 单端故障定位方法

王春明¹, 李杰², 徐正清^{3,4}, 韩佳兵^{3,4}, 李玉凯^{3,4}

(1. 国家电网有限公司华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100031; 3. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 210003;
4. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘要:传统基于暂态量的故障定位方法仅利用局部故障特征, 在不同故障工况下可靠性不高、适应性不强。为此, 深入分析暂态电压的时频域特性, 根据不同故障位置产生的暂态信息存在相似性和差异性的特点, 提取暂态信号中丰富的故障特征, 如各次暂态浪涌到达时间差, 幅值, 极性, 以及各次暂态浪涌主频分量波速、低频与高频能量比, 共五类故障暂态特征; 基于所提取的故障暂态特征, 构建故障暂态信息融合矩阵, 利用波形相关系数量化分析不同故障暂态信息矩阵的相似性和差异性, 形成基于暂态信息融合的单端故障定位方法。大量仿真结果表明, 所提方法可靠性高, 对不同故障工况具有良好的适应性, 且原理简单, 能够将调度中心与线路运维有效联系, 有利于缩短供电恢复时间, 提高供电可靠性, 具有一定工程应用价值。

关键词:输电线路; 信息融合; 故障定位; 单端; 波形相似度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.02.008 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2022)02-0062-10

Research on single-ended fault location of transmission line based on transient information fusion

WANG Chunming¹, LI Jie², XU Zhengqing^{3,4}, HAN Jiabing^{3,4}, LI Yukai^{3,4}

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 3. NARI Group Corporation, Nanjing 210003, China;
4. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The traditional fault location method based on transient value only utilizes local fault feature information and it has a poor adaptability to different fault conditions. Therefore, the time-frequency characteristics of transient voltage are analyzed at first. The similarity and difference of transient feature generated by different fault positions are considered and five fault features are involved in total. In time domain, the arrival time difference, amplitude, and polarity of each transient signal are extracted. In frequency domain, the energy ratio of low frequency to high frequency and the wave velocity of the main frequency components of each transient surge are selected. On this basis, a fault transient information fusion matrix is constructed according to the extracted fault features. Finally, the difference of different fault transient information matrix is analyzed quantitatively by utilizing a waveform correlation coefficient, and a novel single-ended fault location method based on fault transient information fusion is proposed and it can be a-

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-09-02

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(SGJS0000DKJS1800798); 国家自然科学基金(52077008)

通信作者: 王春明(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统及其自动化、电力市场等研究; E-mail: wangcm@cc.sgcc.com.cn

dapted to different fault conditions since it has a simple principle and low requirement for sampling frequency. The simulation verifies reliability and practical value of this method.

Key words: transmission line; information fusion; fault location; single end; waveform similarity

输电线路电压等级高、输送距离长和输送容量大,能够改善我国能源分布不均衡的状况。但输电线路所处环境往往复杂恶劣,易引发线路故障,破坏大电网运行稳定性,造成重大经济损失。准确可靠地发现线路故障位置,对于加快恢复电力供应,提升供电可靠性具有重要意义^[1-2]。目前,基于故障暂态量的故障定位技术以其故障信息丰富,定位精度高,不受运行方式变化的影响等特点在输电线路广泛推行。故障暂态量包含宽频带范围的故障信号,其中基于暂态量波头的定位方法利用所能检测到的最高频段暂态信号到达检测点的时间实现故障定位。由此,基于非平稳信号处理技术的信号检测算法繁荣发展,如小波变换^[3],希尔伯特-黄变换^[4],数学形态学^[5]等。然而,仅依靠暂态信号到达时间实现精确故障定位,要求很高的采样率,硬件成本较高,而且所采集的故障信号易混杂噪声干扰,难以可靠捕捉^[6-7]。

故障暂态量蕴含着丰富的故障信息,而暂态量波头到达时间仅是其中一种故障特征量。其他值得挖掘的故障信息包括高频暂态波头幅值与极性,暂态量主频率分量,暂态信号各频率分量能量占比等,能够全面准确地反映故障位置,故障程度等故障特性^[8-14]。若通过综合利用上述各种故障信息,实现不同故障工况下故障位置与故障暂态信息的相互匹配,构建一种融合多种故障信息的单端故障定位方法,不仅可以满足故障定位精度,还可以提升暂态量定位的可靠性。

该文从故障暂态时域波形和频谱构成两个角度分析暂态量蕴含的多种故障信息,根据不同故障位置的不同故障信息存在差异性,以提取宽频带暂态量中的多种故障特征量,形成一种故障暂态信息融合矩阵,实现故障位置与故障信息矩阵的相互对应,并借鉴图形相似度识别技术,构建一种基于故障暂态信息融合矩阵的输电线路单端定位方法,原理简单,具有一定的实用价值。

1 输电线路单端故障定位系统

输电网单端故障定位系统由安装于线路一端的暂态信号采集装置,变电站服务端和主站(单端故障定位系统分析平台)组成,其架构如图 1 所示。对于任一输电线路,至少一端安装有故障暂态信号采集装置。当线路发生故障,变电站将暂态信号采集装置采集的故障暂态数据进行汇总,并给该故障暂态数据添加数据属性,再通过无线通讯传输至主站,输电线路单端故障定位系统分析平台进一步进行故障暂态特征提取并完成故障定位。

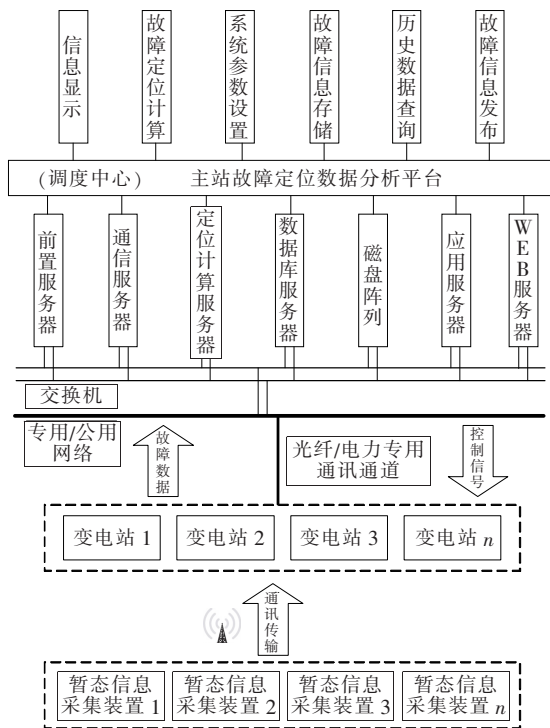


图 1 输电线路单端故障定位系统架构

Figure 1 Structure of single-ended fault location system in the transmission line

输电线路单端故障定位系统分析平台位于电网调度中心。该主站后台软件通过结合各变电站上传的故障暂态数据,以及线路保护装置断路器动作情况,确定故障线路,并调取对应线路的故障暂态数据进行分析。该分析平台具备功能:系统参数设置、系

统控制以及联网;故障暂态数据分析与计算;故障数据的存储与调用;故障定位结果输出与展示。主站服务器作为实现上述功能必不可少的硬件设备,按功能需求,可分为故障定位计算服务器、应用服务器、数据库服务器以及磁盘阵列。当主站后台软件通过分析各变电站服务端上送的故障暂态信息后,自动计算故障定位结果,并通过弹窗的形式输出,为调度中心人员发布线路故障检修命令提供辅助决策,如图2所示。

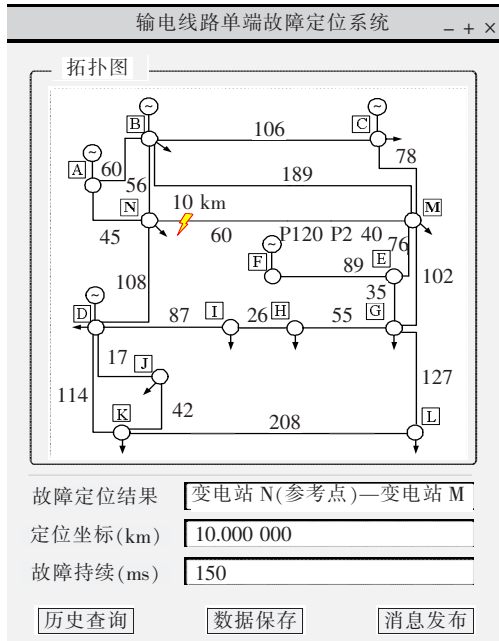


图2 输电线路单端故障定位发布的故障定位结果

Figure 2 Positioning results released by single-ended fault location system in the transmission line

此外,故障定位结果信息通过 Web 服务器以动态网页实时发布,线路运维人员通过查阅故障定位信息以快速开展运维工作。该系统能够将调度中心与线路运维有效联系,有利于缩短供电恢复时间,提高供电可靠性,具有良好的现实意义。

2 故障暂态特征分析

2.1 故障暂态信息时域特征

当故障发生后,故障点等效于又叠加上一个与故障前幅值大小相等、方向相反的暂态阶跃电压波。在线路电容和线路电感充放电的过程中,该阶跃波蕴含宽频带暂态分量,向线路两端传播。在传播过

程中经过线路电阻和线路电导产生损耗而发生衰减,其中高频分量的衰减系数更大,且随着传播距离的增加而迅速衰减。由于频率越高的分量传播速度越快,不同频率分量到达检测点的时间不同,暂态阶跃波波头陡度变缓,波头被拉长,阶跃波发生色散。暂态信号在遇到波阻抗不连续点发生折射和反射,产生新的折射波与反射波,并继续在线路上传输。上述过程中,暂态信号的故障特征主要受到故障点初始暂态量,线路的折射、反射系数和线路的传输函数影响,其数学表示为

$$A(\omega) = e^{-\gamma x} \quad (1)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \quad (2)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0(\omega)}{Y_0(\omega)}} = \sqrt{\frac{R_0(\omega) + j\omega L_0(\omega)}{G_0(\omega) + j\omega C_0(\omega)}} \quad (3)$$

$$\beta(\omega) = \frac{2Z_{c2}}{Z_{c1} + Z_{c2}} \quad (4)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2}} \quad (5)$$

$$v(\omega) = \frac{\omega}{\text{Im}[\gamma(\omega)]} \quad (6)$$

式(1)~(6)中 $A(\omega)$ 为传输函数; R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 分别为线路单位长度的电阻、电感、电导、电容,均是频率的函数; Z_c 为线路波阻抗; $\beta(\omega)$ 为反射系数; $\alpha(\omega)$ 为折射系数; $v(\omega)$ 为传播速度。

如图3所示,以某220 kV长度为150 km输电线路、距离检测点105 km处故障时产生的暂态信号为例,分析时域暂态信号在线路传播过程中蕴含的多种故障信息。由图3可得上述各次暂态浪涌的时域表达式:

$$u_{t1}|_{t=\tau_1} = (1 + \beta_p)u_f(t - \tau_1) \quad (7)$$

$$u_{t2}|_{t=2\tau_2+\tau_1} = \beta_Q\alpha_f(1 + \beta_p)u_f(t - \tau_1 - 2\tau_2) \quad (8)$$

$$u_{t3}|_{t=4\tau_2+\tau_1} = \alpha_f\beta_f\beta_Q^2(1 + \beta_p)u_f(t - \tau_1 - 4\tau_2) \quad (9)$$

$$u_{t4}|_{t=3\tau_1} = \beta_p\beta_f(1 + \beta_p)u_f(t - 3\tau_1) \quad (10)$$

式(7)~(9)中 $u_f(t)$ 为故障点起始暂态信号; τ_1 、 τ_2 分别为故障暂态量在线路 Pf 和 fQ 传播所用的时间; β_f 为故障点反射系数; α_f 为故障点折射系数; β_p 为 P 端母线反射系数; β_Q 为 Q 端母线反射系数。

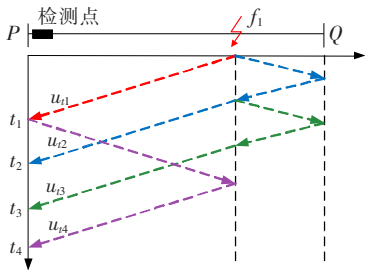


图 3 220 kV 架空线路故障暂态信号传输网络

Figure 3 Illustration of 220 kV overhead line fault transient signal transmission

1) 各次暂态浪涌的到达时间差。

由式(7)~(10)可知,各次暂态浪涌的传播时间能够反映其在线路的传输距离,是一种直观、方便获取的特征量。对于同一频率分量,暂态信号的传播速度是确定的,传输距离越远则传输时间越长。因此,各次暂态浪涌到达检测点的时间差反映各次暂态浪涌的传输距离差。由行波传输理论可知,线路上不同故障位置下产生的暂态浪涌的传输过程不同,其中直观的特征是各次暂态浪涌到达时间不同。因此,可用各次暂态浪涌的到达时间差这一特征量来反映不同故障位置的暂态信号传输过程,并基于该特征量区分不同故障位置。此外,某一故障位置下的该特征量可预先离线计算,并与实际故障暂态信号的各次浪涌到达时间进行比较,进而实现故障定位。各次暂态浪涌的到达时间差为

$$\begin{cases} \Delta t_1 = 0 \\ \Delta t_2 = t_2 - t_1 = 2\tau_2 \\ \Delta t_3 = t_3 - t_2 = 2\tau_2 \\ \Delta t_4 = t_4 - t_3 = 2\tau_1 + 4\tau_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中 t_1, t_2, t_3, t_4 分别为前 4 次暂态浪涌波头到达检测点的时间。

2) 各次暂态浪涌的极性。

由式(5)可知,反射系数的变化范围为 $[-1, 1]$,暂态信号经过负反射则极性会发生翻转。由式(7)~(10)可知,各次暂态浪涌经过不同折反射过程,所以到达检测点的各次浪涌极性可能不同。此外,不同故障位置下各次暂态浪涌到达时序可能发生改变,这又增加了各次浪涌极性组合的多样性。这使得各次暂态信号的极性组合具有表征不同故障位置的特

性。由于网络拓扑及母线结构已知,通过离线计算波阻抗不连续点的折射与反射系数,进而求得各次暂态信号的极性,便于与实际故障暂态信号比较来确定故障位置。各次暂态信号的极性为

$$\begin{cases} h_{t1} = \text{sgn}(u_{t1}) \\ h_{t2} = \text{sgn}(u_{t2}) \\ h_{t3} = \text{sgn}(u_{t3}) \\ h_{t4} = \text{sgn}(u_{t4}) \end{cases} \quad (12)$$

式中 h_{t_i} ($i = 1, 2, 3, 4$) 为各次暂态量的极性; $\text{sgn}(x)$ 可返回变量的正负。

3) 各次暂态浪涌的幅值。

以图 3 中故障为例,各次暂态信号的幅值为

$$|u_{t1}| = |(1 + \beta_p)A_{Pf}u_f| \quad (13)$$

$$|u_{t2}| = |\beta_Q\alpha_f(1 + \beta_p)A_{Pf}A_{Qf}^2u_f| \quad (14)$$

$$|u_{t3}| = |\alpha_f\beta_f\beta_Q^2(1 + \beta_p)A_{Pf}A_{Qf}^4u_{t3}| \quad (15)$$

$$|u_{t4}| = |\beta_p\beta_f(1 + \beta_p)A_{Pf}^3u_f| \quad (16)$$

式(13)~(16)中 A_{Pf} 、 A_{Qf} 分别为线路 Pf 、 Qf 的传输函数。

对于各次暂态信号中同一频率分量,线路的折射与反射系数是确定的,且传输函数仅受传输距离的影响。因此,暂态浪涌幅值与其经历的折反射过程以及传输距离有关。而不同故障位置下故障特征的不同主要表现为暂态信号传输过程不同,其中各次暂态浪涌的传输距离和折反射过程影响最为直观。因此,可以提取各次暂态信号的幅值并组合为一幅值特征向量,来直观反映不同故障位置的故障特征,进而基于该特征量区分不同故障位置。各次暂态信号幅值为

$$\begin{cases} m_{t1} = |u_{t1}| \\ m_{t2} = |u_{t2}| \\ m_{t3} = |u_{t3}| \\ m_{t4} = |u_{t4}| \end{cases} \quad (17)$$

式中 m_{t_i} ($i = 1, 2, 3, 4$) 为各次暂态量幅值。

2.2 故障暂态信息频域特征

故障暂态信号包含从工频噪声至上兆赫兹的宽频分量。通过合理利用不同频段的故障信息,能够实现基于全频域的故障定位技术^[15]。以图 3 故障位置为例,提取检测点处 2 ms 时间窗内故障暂态电

压信号,经过傅里叶变换,可得到其频谱组成,如图4所示。故障暂态信号分布在整个频带,各频率分量幅值随频率增大而逐渐减小。由式(1)、(2)、(6)知,线路参数有依频变化特性,使得线路的传输函数和不同频率分量的传播速度也具备依频变化性质。频率越高,暂态信号传播速度越快,但衰减也越快。

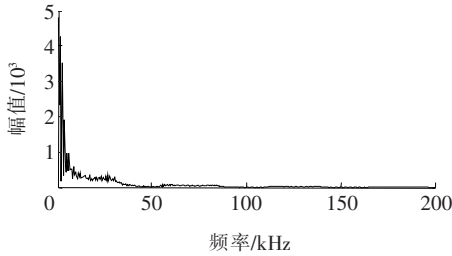


图4 故障暂态信号频谱组成

Figure 4 Fault transient signal spectrum

通过在 PSCAD 搭建架空线路频率相关模型,获取线路参数,可计算不同频率分量下的衰减函数曲线以及波速度依频变化曲线,如图5、6所示。

1) 各次暂态浪涌主频分量的传播波速特征。

由图5可知,传输距离越远,暂态信号频率越高,衰减越快。随着传输距离的增加,宽频带暂态信号中能量最高的分量(定义为主频分量)逐渐向低频

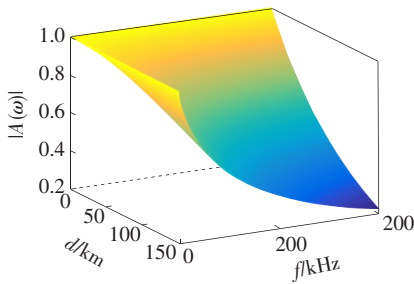


图5 暂态信号幅值衰减特性曲线

Figure 5 Amplitude attenuation curves of transient signals

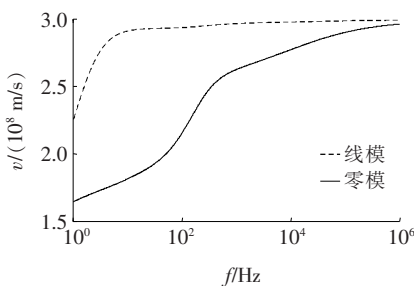


图6 故障暂态信号传播速度依频变化曲线

Figure 6 Frequency-dependent curves of fault transient signal wave speed

段移动,而频率越低,传播速度越小。换言之,不同传输距离下的各次暂态信号中主频分量的波速度不同,随着传输距离的增长,各次暂态浪涌主频分量波速降低。由文2.1中可知,不同故障位置下产生的各次暂态信号传输距离不同,其主频分量波速度将具有差异性。因此,各次暂态信号的主频分量波速度可组成一故障特征量,表征不同故障位置下的故障特性。各次暂态信号的主频分量对应的波速度为

$$\left\{ \begin{aligned} v_{i1}(\omega_{i1}) &= \frac{\omega_{i1}}{\text{Im}[\gamma(\omega_{i1})]} \\ v_{i2}(\omega_{i2}) &= \frac{\omega_{i2}}{\text{Im}[\gamma(\omega_{i2})]} \\ v_{i3}(\omega_{i3}) &= \frac{\omega_{i3}}{\text{Im}[\gamma(\omega_{i3})]} \\ v_{i4}(\omega_{i4}) &= \frac{\omega_{i4}}{\text{Im}[\gamma(\omega_{i4})]} \end{aligned} \right. \quad (18)$$

式中 $\omega_{i_i} = 2\pi f_{i_i} (i=1,2,3,4)$ 为各次暂态信号的主频分量。

2) 各次暂态浪涌低频与高频分量能量比。

中国在 110 kV 以上输电线路串联装有阻波器,可阻止高频信号泄露。阻波器与母线对地等效电容组成“线路边界”,与输电线路相连,其特性阻抗往往不等于线路波阻抗,因而形成波阻抗不连续点。以阻波器型号 XZF-3150-2.0/63-T6 为例,绘制阻波器频率特性,如图7所示。其阻塞频带(kHz)为 [40,160]。

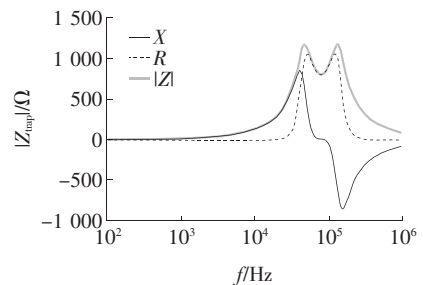


图7 阻波器幅频特性示意

Figure 7 Amplitude-frequency characteristics of line trap

线路边界(包括母线对地等效电容和阻波器)对 [50,100](尤其在阻塞频带内)的高频(kHz)分量产生较强的反射作用或折射衰减作用,而对 [1,10] 的低频(kHz)分量几乎不衰减通过线路边界^[16]。因此,利用各次暂态信号在到达线路边界时不同频段

分量折射衰减作用不同,来构建低频段与高频段暂态重构信号能量比这一特征量,直观表征不同故障位置产生的各次暂态信号的折射与反射过程。该文低频段暂态重构信号频率(kHz)范围取[1,50],高频段频率(kHz)范围取[50,150]。各次暂态信号的低、高频段重构信号能量比的数学表示为

$$\begin{cases} g_{t1} = E_{t1}^L / E_{t1}^H \\ g_{t2} = E_{t2}^L / E_{t2}^H \\ g_{t3} = E_{t3}^L / E_{t3}^H \\ g_{t4} = E_{t4}^L / E_{t4}^H \end{cases} \quad (19)$$

式中 g_{t_i} ($i=1,2,3,4$) 为各次暂态信号低频分量与高频分量的能量比值; $E_{t_i}^L$ 、 $E_{t_i}^H$ 分别为各次暂态信号的低、高频段能量。

综上所述,故障暂态信号蕴含着丰富的故障信息,可用来区分不同故障位置的故障特性。通过融合暂态信号到达时间差、幅值、极性、极性等时域暂态信息,以及各次暂态信号主频分量的传播波速、暂态分量低频与高频能量比等暂态频域信息,用以衡量不同故障位置下暂态信号的时频域差异性,为构建基于暂态信息融合矩阵的单端定位方案提供理论支撑。

3 基于故障暂态信息融合的单端故障定位方法

3.1 连续小波变换基本原理

连续小波变换适用于对非平稳信号的时频分析,具有良好的时频分析特性。它将有助于实现故障准确提取多尺度宽频带故障暂态信息。对于任意函数 $x(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换定义为

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (20)$$

式中 $W(a,b)$ 、 $\psi(t)$ 分别为小波系数、母函数; a 、 b 分别为母小波的尺度因子、平移因子。

复 Morlet 小波为

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{j2\pi f_c t} e^{-\frac{t^2}{f_b}} \quad (21)$$

式中 f_b 为母小波的带宽参数; f_c 为母小波的中心频率; j 表示虚部。

在频域中,连续小波变换可将信号分解为不同

的尺度,利用公式可得到不同频段下的中心频率:

$$f_a = \frac{f_c f_s}{a} \quad (22)$$

式中 f_s 为信号的采样频率。

3.2 故障暂态信息融合矩阵的构建

基于连续小波变换良好的时频分析特性,提取到达时间差、幅值、极性、主频分量传播波速以及低频与高频能量比等多种故障暂态特征量,构建故障暂态信息融合矩阵,全面反映故障暂态信号的时频域特征。现定义故障暂态信息融合矩阵:

$$\begin{aligned} C_{M \times N} = [\mathbf{T} \quad \mathbf{H} \quad \mathbf{M} \quad \mathbf{V} \quad \mathbf{G}] = \\ \begin{bmatrix} \Delta t_1 & h_{t1} & m_{t1} & v_{t1} & g_{t1} \\ \Delta t_2 & h_{t2} & m_{t2} & v_{t2} & g_{t2} \\ \Delta t_3 & h_{t3} & m_{t3} & v_{t3} & g_{t3} \\ \Delta t_4 & h_{t4} & m_{t4} & v_{t4} & g_{t4} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

式中 故障特征向量 \mathbf{T} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{M} 、 \mathbf{V} 、 \mathbf{G} 中各元素分别表示各次暂态信号的到达时间差、极性、幅值、主频分量对应的传播速度、低频与高频能量比。

值得注意的是,3 个时域特征向量受到线路参数依频变化特性的影响,直接提取时域波形特征,会造成数据误差。因此,实际计算该 3 个特征向量时应选取某一确定频率分量,以保证故障信息融合矩阵数据的准确性。此外,关于计算各次暂态信号低频与高频能量比的波形时窗选取问题,可提取各次暂态信号最高频率分量到达时间后 10 μ s 波形数据进行计算。

3.3 波形相似度的计算

为实现不同故障位置产生的暂态信息融合矩阵的相似度量化比较,该文采用图像识别中的相似度识别技术^[17]。设存在矩阵 C_{f1} 、 $C_{f2} \in C_{M \times N}$,二者的相关系数表达式为

$$\rho_{C_{f1}-C_{f2}} = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N C_{f1}(j,i) C_{f2}(j,i)}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N C_{f1}^2(j,i) \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N C_{f2}^2(j,i)}} \quad (24)$$

式中 $\rho_{C_{f1}-C_{f2}}$ 的取值区间为 $[-1,1]$ 。

不同故障暂态信息融合矩阵构建及相似度计算步骤如下。

1) 获取检测点的三相电压暂态波形。将故障波

形减去故障前正常电压波形,以提取故障分量。

2)相模变换。利用凯伦贝尔(Karrenbauer)相模变换矩阵对故障分量的解耦处理。考虑到线模暂态量衰减较零模缓慢,性质更稳定,因此选取线模暂态信号。

3)基于连续小波变换,分解得到线模暂态时频波形,提取并计算矩阵中各元素模值。

4)提取故障暂态特征量,构建故障暂态信息融合矩阵。由图5所示各频率分量衰减特性,选取一衰减较缓慢的分量,便于提取各次暂态信号时域特征。该文选取50 kHz频率分量来进行时域特征量计算。

①各次暂态信号到达时间差特征量。标定基于连续小波变换的初始暂态波形奇异点,识别初始暂态信号到达时间,并对接下来的三次暂态浪涌到达时间标定并记录,按式(11)计算暂态信号时间差特征量 \mathbf{T} 。

②各次暂态信号的极性特征量。提取连续小波变换时频矩阵中元素实部值,按式(12)提取各次暂态信号极性,形成故障暂态信号极性特征量 \mathbf{H} 。

③各次暂态信号的幅值特征量。提取连续小波变换时频矩阵中元素模值,形成故障暂态信号幅值特征量 \mathbf{M} 。

④各次暂态信号的主频分量波速特征量。通过计算小波变换时频矩阵元素幅值与对应频率的乘积表征该分量能量^[18],提取能量最大的频率分量作为主频分量,即

$$e(f_a) = f_a |W(t_i, a)|, i = 1, 2, 3, 4 \quad (25)$$

$$f_d = \underset{f_a}{\operatorname{argmax}} \{e(f_{a_1}) e(f_{a_2}) \cdots e_N(f_{a_N})\} \quad (26)$$

并按式(17)计算该频率分量下传播速度,形成各次暂态信号主频分量波速特征量 \mathbf{V} 。其中, $e(f_a)$ 为波形中心频率 f_a 下各次暂态信号到达时间 t_i 的波形能量, $|W(t_i, a)|$ 为尺度 a 、各次暂态信号到达时间 t_i 的小波模极大值, f_d 为所提取主频分量对应的中心频率。

⑤各次暂态信号的低、高频段重构信号能量比特征量。通过计算低、高频段重构波形的能量比,形成该特征量 \mathbf{G} ,即

$$\begin{cases} E_{t_1}^L = \sum_{l=1}^r (|u_{t_i}^L(l)|) \\ E_{t_1}^H = \sum_{l=1}^r (|u_{t_i}^H(l)|) \end{cases} \quad (27)$$

式中 $E_{t_1}^L$ 、 $E_{t_1}^H$ 分别为低、高频段暂态重构信号的能量; $|u_{t_i}^L|$ 、 $|u_{t_i}^H(l)|$ 分别为低、高频段暂态重构信号的幅值; r 为各次暂态信号时窗长度,本文取 $r = 10 \mu\text{s}$ 。

5)故障暂态信息融合矩阵归一化处理。设故障暂态信息融合矩阵为 $\mathbf{C}_{M \times N}$,进行归一化处理:

$$\bar{c}_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sqrt{\sum_{w=1}^4 c_{wj}^2}} \quad (28)$$

6)计算故障暂态信息融合矩阵相似度。根据式(24)计算2个故障暂态信息融合矩阵相似度,量化分析矩阵反映的故障信息的相关程度。

3.4 新型单端定位方法

基于暂态信息融合矩阵和波形相似度技术,构建新型单端定位方法,通过建立模拟故障点样本数据库,并提取实际故障暂态波形的故障信息,形成故障信息融合矩阵,与数据库样本进行故障信息相关程度量化比较。与实际故障信息相关程度的模拟故障点,距离实际故障位置越近,进而可以确定故障位置。该文所提单端定位方法步骤如下。

1)设置模拟故障点。在线路波阻抗不连续点处以及线路上每隔1 km设置模拟故障点。

2)建立并完善模拟故障点样本数据库 G' 。利用仿真测试,实验室实验,以及现场检测获取线路不同故障位置暂态波形数据,并构建故障暂态信息融合矩阵,建立样本数据库。所需完备的故障样本数据库,可通过仿真测试,动模实验测试以及历史故障数据获取线路不同故障位置暂态波形数据。其中,仿真测试模型通过线路实测参数来校核,依据实际运行的波形和数据,实测输电线路的运行参数,母线对地阻抗,和母线上连接各种设备的对地阻抗值等,力求仿真得到的数据和波形真实、可靠。

3)计算故障暂态信息融合矩阵相似度。当线路故障后,提取一定时间窗内暂态故障分量波形,利用连续小波分解得到故障暂态时频波形,并按照文3.3节中步骤形成暂态信息融合矩阵。

4) 基于波形相似度的单端故障定位。计算实际故障暂态信息融合矩阵与样本数据库 G' 内所有样本计算相似度,则实际故障位置位于与矩阵相似度最高的 2 个模拟故障点之间。

4 算法仿真与分析

在 PSCAD/EMTDC 中搭建 1 条 150 km 长的 220 kV 输电线路 PQ(图 3),采用频率相关模型。波形采集装置位于 P 端,采样率设置为 0.4 MHz。考虑到线路实际运行环境较差,信号常受到各种噪声干扰,故在原始暂态信号加入信噪比 50 dB 的白噪声进行干扰。通过设置不同故障位置,不同过渡电阻,不同故障初相角,得到故障暂态信息融合矩阵,并与样本库中矩阵进行相似度比较,验证所提方法的有效性。

不同故障位置仿真结果(Ag/0.1 Ω /90°)如表 1 所示;以故障位置 32.3 km 为例,设置不同故障过渡电阻,得到仿真结果(Ag/90°)如表 2 所示;设置不同故障初相角(Ag/0.1 Ω),得到仿真结果如表 3 所示;设置不同故障类型(90°/0.1 Ω),得到仿真结果如表 4 所示。

表 1~4 仿真数据结果表明:所提方法耐受故障点参数(故障过渡电阻,故障初相角,故障类型)的影响,故障定位结果可靠,故障定位误差在 500 m 以内。由于定位误差受所设置模拟故障点间隔影响,在实际搜索故障位置时,可根据上述结果再等分故障搜索区域,并同时进行搜索,以缩短故障位置查找时间。

表 1 不同故障位置的仿真结果

故障位置/km	$[L_i, \rho]$	$[L_{i+1}, \rho]$	定位结果/km
5.8	$[L_5, 0.945\ 2]$	$[L_6, 0.986\ 1]$	6
32.3	$[L_{32}, 0.984\ 3]$	$[L_{33}, 0.954\ 4]$	32
50.7	$[L_{50}, 0.958\ 8]$	$[L_{51}, 0.990\ 5]$	51
77.1	$[L_{77}, 0.997\ 4]$	$[L_{78}, 0.942\ 3]$	77
95.4	$[L_{95}, 0.980\ 2]$	$[L_{96}, 0.967\ 2]$	95
106.9	$[L_{106}, 0.940\ 7]$	$[L_{107}, 0.996\ 9]$	107
117.6	$[L_{117}, 0.963\ 3]$	$[L_{118}, 0.978\ 9]$	118
130.0	$[L_{130}, 0.999\ 2]$	$[L_{131}, 0.921\ 8]$	130
143.8	$[L_{143}, 0.951\ 7]$	$[L_{144}, 0.990\ 2]$	144

表 2 不同过渡电阻的仿真结果

过渡电阻/ Ω	$[L_i, \rho]$	$[L_{i+1}, \rho]$	故障位置/km	定位结果/km
0.1	$[L_{32}, 0.984\ 3]$	$[L_{33}, 0.954\ 4]$	32.2	32
10	$[L_{32}, 0.950\ 8]$	$[L_{33}, 0.932\ 2]$	32.2	32
50	$[L_{32}, 0.936\ 2]$	$[L_{33}, 0.917\ 9]$	32.2	32
100	$[L_{32}, 0.903\ 1]$	$[L_{33}, 0.875\ 1]$	32.2	32
200	$[L_{32}, 0.885\ 7]$	$[L_{33}, 0.861\ 3]$	32.2	32
300	$[L_{32}, 0.859\ 6]$	$[L_{33}, 0.837\ 4]$	32.2	32

表 3 不同故障初相角的仿真结果

故障初相角/(°)	$[L_i, \rho]$	$[L_{i+1}, \rho]$	故障位置/km	定位结果/km
5	$[L_{32}, 0.971\ 5]$	$[L_{33}, 0.947\ 3]$	32.2	32
15	$[L_{32}, 0.978\ 9]$	$[L_{33}, 0.956\ 2]$	32.2	32
30	$[L_{32}, 0.982\ 7]$	$[L_{33}, 0.953\ 1]$	32.2	32
45	$[L_{32}, 0.981\ 6]$	$[L_{33}, 0.948\ 9]$	32.2	32
60	$[L_{32}, 0.975\ 4]$	$[L_{33}, 0.950\ 8]$	32.2	32
90	$[L_{32}, 0.984\ 3]$	$[L_{33}, 0.954\ 4]$	32.2	32

表 4 不同故障类型的仿真结果

故障类型	$[L_i, \rho]$	$[L_{i+1}, \rho]$	故障位置/km	定位结果/km
Ag	$[L_{32}, 0.984\ 3]$	$[L_{33}, 0.954\ 4]$	32.2	32
Bg	$[L_{32}, 0.985\ 6]$	$[L_{33}, 0.954\ 2]$	32.2	32
Cg	$[L_{32}, 0.979\ 2]$	$[L_{33}, 0.958\ 9]$	32.2	32
AB	$[L_{32}, 0.943\ 4]$	$[L_{33}, 0.925\ 3]$	32.2	32
BC	$[L_{32}, 0.952\ 1]$	$[L_{33}, 0.941\ 4]$	32.2	32
ABg	$[L_{32}, 0.904\ 1]$	$[L_{33}, 0.883\ 7]$	32.2	32
CAG	$[L_{32}, 0.901\ 5]$	$[L_{33}, 0.887\ 6]$	32.2	32
ABC	$[L_{32}, 0.897\ 3]$	$[L_{33}, 0.853\ 1]$	32.2	32

此外,所提方案易受噪声等干扰影响,通过 Kalman 滤波^[19]、快速独立分量^[20]等技术可有效分离故障暂态信号,提升所提定位方法的可靠性。

5 结语

本文提出了一种基于故障暂态信息融合的输电线路单端定位方法。通过分析宽频带多尺度故障暂态信号的衰减特性,折射、反射过程以及线路边界的频率特性,提取了故障暂态信号蕴含的波形时域特

征;各次暂态信号的到达时间差,极性,幅值和暂态信号频域特征;各次暂态信号主频分量波速和低频段与高频段能量比。通过融合多种故障暂态信息,构建了故障暂态信息融合矩阵。基于波形相似度,量化分析不同故障位置产生的故障暂态信息差异性,进而提出了一种基于故障暂态信息融合矩阵相关性分析的单端定位方法。仿真结果表明,所提方法对故障电阻,故障初相角,不同故障类型等故障参数均有较强的适应性,且不需过高采样率,具有一定实用价值。

参考文献:

- [1] 李福志,郑卫宾,张文海,等. 基于回路直流电阻测量的输电线路单相接地故障离线故障定位[J]. 中国电力, 2021,54(2):140-146.
LI Fuzhi, ZHENG Weibin, ZHANG Wenhai, et al. Fault path direct-current resistance based off-line single-phase-to-ground fault location[J]. Electric Power, 2021, 54(2):140-146.
- [2] 何正友,李小鹏,林圣. 时频联合分析在输电线路继电保护和故障定位中的应用综述[J]. 电力科学与技术学报, 2013,28(1):5-16.
HE Zhengyou, LI Xiaopeng, LIN Sheng. Application review of time-frequency joint analysis in protective relaying and fault location[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013,28(1):5-16.
- [3] 王俊波,武利会,罗容波,等. 基于小波变换—振动起始时刻分析的高压断路器故障诊断方法[J]. 高压电器, 2020,56(6):211-217.
WANG Junbo, WU Lihui, LUO Rongbo, et al. Fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on wavelet transform-vibration start time analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(6):211-217.
- [4] 张小丽,曾祥君,马洪江,等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8):64-68.
ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(8):64-68.
- [5] 杜雪,肖扬,付滨,等. 基于负序电流比的主动配电网断线故障保护方法[J]. 电测与仪表, 2021,58(7):57-66.

- DU Xue, XIAO Yang, FU Bin, et al. Break fault protection method of active distribution network based on negative sequence current ratio[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021,58(7):57-66.
- [6] 于毅,尹丽菊,申晋,等. 改进整数规划的含分布式电源配电网故障定位[J]. 智慧电力, 2020,48(3):104-108+116.
YU Yi, YIN Liju, SHEN Jin, et al. Fault location in distribution network with distributed generation based on improved integer programming[J]. Smart Power, 2020, 48(3):104-108+116.
- [7] 马喜平,夏超浩,徐宏雷,等. 暂态干扰下并网光伏发电系统故障特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2020,36(4):90-96.
MA Xiping, XIA Chaohao, XU Honglei, et al. A study on fault characteristics of grid-connected photovoltaic power generation system under transient disturbance [J]. Power System and Clean Energy, 2020,36(4):90-96.
- [8] 刘健,王毅钊,张小庆,等. 配电网单相接地故障处理保护化关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(22):18-23.
LIU Jian, WANG Yizhao, ZHANG Xiaoqing, et al. Key technologies on single-phase earthed fault protection for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(22):18-23.
- [9] 邓丰,李欣然,曾祥君,等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(15):4399-4409+4640.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2019,39(11):3231-3243.
- [10] 邓丰,祖亚瑞,曾祥君,等. 基于行波全波形主频分量的单端定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6):2156-2167.
DENG Feng, ZU Yarui, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-ended fault location method based on the dominant frequency component of traveling-wave full waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6):2156-2167.
- [11] 刘浩芳,王增平,徐岩,等. 超高压输电线路波过程及暂

- 态电流保护性能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 71-75.
- LIU Haofang, WANG Zengping, XU Yan, et al. Analysis of transmission process of fault-generated travelling wave along EHV transmission lines and performance of transient current protection[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 71-75.
- [12] 夏璐璐, 何正友, 李小鹏, 等. 基于行波固有频率和经验模态分解的混合线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 67-73.
- XIA Lulu, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. A fault location method based on natural frequencies and empirical mode decomposition for mixed overhead-cable lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 67-73.
- [13] 李小鹏, 汤涌, 朱清代, 等. 利用测量波阻抗相位特征的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1251-1259.
- LI Xiaopeng, TANG Yong, ZHU Qingdai, et al. Pilot protection for HVDC transmission lines utilizing phase features of measured surge impedance[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1251-1259.
- [14] 彭楠, 王政, 梁睿, 等. 基于广域行波波头频率分量幅值比信息的输电网非同步故障定位[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 56-62.
- PENG Nan, WANG Zheng, LIANG Rui, et al. Asynchronous fault location of transmission system based on wide area amplitude ratio information of frequency components in traveling wave fronts[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 56-62.
- [15] 薄志谦, 马晓伟, 王林, 等. 输电线路的集成全频域保护[J]. 南方电网技术, 2016, 10(5): 10-15.
- BO Zhiqian, MA Xiaowei, WANG Lin, et al. Integrated all frequency protection for power transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(5): 10-15.
- [16] 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.
- [17] 郭谋发, 刘世丹, 杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 183-190.
- GUO Moufa, LIU Shidan, YANG Gengjie. A novel approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 183-190.
- [18] RIOUL O, VETTERLI M. Wavelets and signal processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1991, 8(4): 14-38.
- [19] XI Y H, ZHANG X D, LI Z W, et al. Double-ended travelling-wave fault location based on residual analysis using an adaptive EKF[J]. IET Signal Processing, 2018, 12(8): 1000-1008.
- [20] 谢庆, 张丽君, 程述一, 等. 快速独立分量分析算法在局放超声阵列信号去噪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 160-166+191.
- XIE Qing, ZHANG Lijun, CHENG Shuyi, et al. Application of the FastICA algorithm to PD ultrasonic array signal de-noising[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 160-166+191.