

DOI: 10.7667/PSPC180111

基于故障类型识别的输电线路自适应测距方法

程宏波^{1,2}, 高雅琦², 王勋², 李阳林¹, 康琛¹, 纪清照¹, 辛建波¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 输电线路的故障类型会影响测距的结果。为更准确地定位线路的故障位置, 需先识别故障的类型, 再匹配相应算法以提高测距结果的精度。首先, 利用空间域的关联维数描述故障后电气量变化的复杂程度, 利用时域的差值方根描述故障后电气量的畸变程度。然后, 根据两种特征包含信息量的多少, 采用熵权法对两种指标进行特征融合。最后, 以融合特征量为依据实现故障类型的识别, 在此基础上为不同类型的故障匹配相应的测距算法, 以最大程度减少故障阻抗对测距结果的影响。仿真表明, 提出的自适应故障测距方法不受故障类型的影响, 测距结果精度高, 具有普遍适用性。

关键词: 关联维数; 差值方根; 熵权法融合; 故障识别; 精确测距

Adaptive fault location method for transmission line based on fault type recognition

CHENG Hongbo^{1,2}, GAO Yaqi², WANG Xun², LI Yanglin¹, KANG Chen¹, JI Qingzhao¹, XIN Jianbo¹

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The result of fault location is affected by the type of fault. In order to locate fault accurately, it's necessary to identify the type of the fault and then match the corresponding location algorithm. First, the correlation dimension in space domain is proposed to describe the complexity of the change of electrical quantity after fault, and the difference square root in the time domain is proposed to describe the degree of distortion of electric quantity after fault. Then, the entropy weight method is used to fuse the two indexes, according to the amount of information contained in the two features. Finally, the fault type is recognized based on the fusion feature, the corresponding location algorithm is matched for different types of faults to minimize the impact of fault impedance. The simulation shows that the proposed adaptive fault location method can acquire the result accurately, and is of universal applicability.

This work is supported by Outstanding Young Talents Project of Jiangxi Province (No. 20162BCB23046), The Key R & D Projects of Jiangxi Province (No. 20161BBH80033), Research and Development Project of Jiangxi Education Department (No. GJJ160498), and Science and Technology Support Program of Nanchang (No. 2013HZCG013).

Key words: correlation dimension; difference square root; entropy weight fusion; fault recognition; accurate location

0 引言

输电线路是连接电厂与终端用户的纽带, 是电力系统运行的大动脉, 输电距离长、跨越区域多、受自然条件影响大等因素导致输电线路故障率高

且故障类型多样^[1]。及时准确地判断出故障点位置, 将有利于快速处理故障、及时恢复供电, 减少由于故障停电所带来的经济损失。

阻抗法测距原理简单、实现方便, 在电力系统中得到广泛应用。阻抗法根据故障回路阻抗与故障距离成正比的关系, 通过故障时测量点的阻抗与单位阻抗的比值得到故障点的距离^[2]。

$$Z_L \cdot L = \frac{U}{I} - Z_f \quad (1)$$

式中: Z_L 为线路单位阻抗; L 为计算所得故障距离;

基金项目: 江西省杰出青年人才计划项目资助 (20162BCB23046); 江西省重点研发计划项目资助 (20161BBH80033); 江西省教育厅科研项目资助 (GJJ160498); 南昌市科技支撑计划项目资助 (2013HZCG013)

U 为测量电压; I 为测量电流; Z_f 为过渡阻抗。

当 Z_f 为定值纯阻性电阻时, 可通过等式两边取虚部的方法消除过渡电阻对测距结果的影响, 但实际中输电线路的短路故障类型多样、原因各异, 故障的过渡阻抗特性各不相同^[3]。不同类型的故障过渡阻抗会对故障测距的结果产生影响^[4-7], 造成测距结果的准确度降低。

针对上述因素对测距结果的影响, 文献[8]提出利用故障点电压瞬时值过零时, 故障相电压的值与观测点电流和线路阻抗的乘积相等这一特性, 来消除过渡阻抗对故障定位结果的影响。这是在假设过渡阻抗为定值纯阻性的情况下得出的结论, 而实际中过渡阻抗并非全是固定不变的, 因此这种方法鲁棒性较低。文献[9]对传统的微分求解测距法进行改进, 采用等式两端求积分的方法消除微分方程求解中过渡电阻的影响, 但这种方法必须要求检测端电流与故障处电流具有相同的相位, 因此降低了其实用性。文献[10]通过对输电线路故障后电气量的分析, 定义了电压计算式, 当参考故障点与实际故障点重合时, 定位函数幅值最小且相位不发生变化, 采用搜索方法逐步缩小范围, 直到参考点与故障点重合。这种方法受到测量端负序电流与故障支路负序电流夹角的影响, 需提前计算, 且要得到准确度较高的结果, 搜索法运算量较大, 不易实现。由此, 有必要寻求一种准确度高、适用范围广且实用性好的故障测距方法。

本文在梳理输电线路常见故障类型及其特点的基础上, 分析故障信号的空间域和时域特征, 提取线路故障后电压电流信号的关联维数及差值方根, 并将其融合得到统一的故障识别特征量, 并以此作为故障类型判别的依据。根据所识别的故障类型自动匹配相应的故障测距算法, 从而避免故障类型对测距结果的影响, 提高测距结果的准确度。

1 输电线路故障类型及其特征提取

1.1 输电线路常见故障类型分析

输电线路常见故障分为金属性故障与高阻性故障, 其中高阻性故障又可分为弧光性故障与过渡阻抗性故障。输电线路通过金属导体与大地直接相连而形成的故障称为金属性故障, 故障阻抗为纯阻性, 其值较小且随时间无明显变化。

但绝大多数故障点存在着较为复杂的电气特性, 如弧光性故障与过渡阻抗性故障。弧光性故障一般是输电线路通过放电电弧连通而形成的故障。由于放电通道的变化及电弧的熄灭和重燃, 电弧伏安特性呈高度非线性^[11-12]。Mayr 模型是描述弧光故

障最常用的一种模型, 其表达式为

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_0 \cdot \left(\frac{l_{arc}}{l_0}\right)^\alpha} \left(\frac{|i|}{u_0 + r_0 \cdot |i_{arc}|} - g \right) \quad (2)$$

式中: g 为电弧电导; i 为测得的故障电流; τ_0 为初始时间常数; l_0 为初始电弧长度; l_{arc} 为电弧长度; u_0 、 r_0 分别为特性电弧电压、电阻。

过渡阻抗性故障一般是输电线路经由非金属性外界物体接触而形成的故障。过渡阻抗由介质的有效接触阻抗和介质与大地的非有效接触阻抗两部分组成。其故障阻抗可表示为^[13-15]

$$Z_g = a(t - t_f) \cdot Z + Z_f \quad (3)$$

式中: Z_f 表示数值固定的有效接触阻抗; a 为线性电阻系数; t_f 为故障时刻; $a(t - t_f) \cdot Z$ 表示随时间线性变化的非有效接触阻抗。与高度非线性的弧光故障不同, 过渡阻抗性故障为线性时变的。

不同类型的故障, 其阻抗的电气特性也不同, 会对测距结果产生不同的影响, 故障类型的识别是处理过渡阻抗影响的前提, 而故障类型准确识别的关键在于线路故障特征的有效提取^[16], 它直接关系到故障识别的准确性与可靠性。

1.2 基于关联维的故障特征提取

输电线路发生不同类型故障时, 故障后电压电流电气特征及其变化规律不同, 波形之间存在较大差异, 这种差异可反映不同故障类型的内在特征。关联维是利用关联积分计算前后变量的关联性, 揭示非线性系统中无序及有序的变化规律^[17]。可通过计算故障后波形的关联维数对故障类型进行判断。

计算关联维数, 需进行相空间重构。根据 Takens 理论, 一维混沌时间序列是高维空间信息的压缩^[18], 要找出系统的规律, 需在相空间中恢复吸引子, 即把长度为 n 的时间序列 $x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 经延迟法构造长度为 $l = n - (m - 1) \cdot \tau$ 的 m 维相空间序列。

$$\begin{cases} X(m) = \{x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\}^T \\ 1 \leq i \leq n - (m - 1) \cdot \tau \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ 为延迟时间; m 为嵌入维数。则在高维相空间恢复的吸引子相关积分为

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l H(r - \|x_i - x_j\|) \quad (5)$$

式中: $i \neq j$; H 为 Heaviside 单位阶跃函数; $\|x_i - x_j\|$ 为相空间信号矢量间的距离; r 为相空间中超球半径; $C(r)$ 为所取信号得关联积分函数, 可定量描述

嵌入空间中距离小于或等于 r 的向量对出现的概率, 其含义为对重构相空间中距离小于 r 的累计。

根据分形学原理, 如果原时间序列中存在低维吸引子, 则重构后的相空间中的序列轨迹有关联维数 C_D , 其表达式为

$$C_D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C(r)}{\ln r} \quad (6)$$

式中, $C(r)$ 为式(5)中所得的关联积分。在实际计算中, 不考虑 r 极小的噪声区和 r 极大时的不变饱和区, 利用 G-P 算法画出 $\ln(r) - \ln r$ 的曲线, 取曲线中接近直线部分所对应的 r 为无标度区间, 关联维数即无标度区间所对应直线部分的斜率。

从上述对关联维数的描述中可看出, 维数是对系统复杂程度的描述。输电线路发生故障时, 电气特性变化最复杂的是弧光性故障, 当输电线路对外放电时发生复杂的物理化学时变过程, 造成其变化的高度非线性特性, 因此从原理上推断出弧光性故障波形的关联维数应为三种故障类型中最高的。而金属性故障, 阻抗近似为阻值很小的固定电阻, 其故障波形的关联维数应是三种故障类型中最小的, 过渡阻抗故障波形的关联维数则介于两者之间。

在计算故障信号的关联维数时, 先用互信息法对所选取的故障时间序列信号进行分析处理, 可得到此信号进行相空间重构的最佳延迟时间 τ 。而后, 输入参数 τ 的值, 即可通过假邻近法确定其最佳嵌入维数 m 。假邻近法是由 Cao 式算法改进而来, 不需要传统 Cao 式算法阈值的主观选取, 可进一步提高所得结果的准确度。根据 Cao 式算法, 用联合判据表示相空间的展开程度, 当联合判据为恒定值时, 相空间完全展开, 所对应的 m 即为最佳嵌入维数。最后, 进行不同类型故障时间序列波形关联维数的计算。

1.3 基于差值分析的故障特征提取

关联维虽然可以利用不同故障发生时电气特性变化规律的复杂程度来区分不同的故障类型, 但可能存在部分类型故障变化规律复杂程度相近的情况, 此时只利用关联维数难以准确区分故障类型。需寻找能反映故障变化趋势的特征以弥补关联维数的不足。时域的差值分析可与关联维数所提取的有效信息形成互补, 更全面准确地判别故障类型。

输电线路出现故障时, 其电压电流波形会出现畸变。畸变的产生是由于故障的出现打破了原有的电压电流传输规律, 加入了新规律而造成的^[19]。差值可有效提取并直观显示故障波形的畸变程度, 为故障类型的识别提供另一重要特征。

对于故障周期为 n 的信号 x , 取故障后波形周期的峰值点 x_p , 则其第 i 个周期峰值差值为

$$c_i = x_{p_{i+1}} - x_{p_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (7)$$

差值方根为

$$d_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} c_i^2}{n-1}} \quad (8)$$

则差值方根 d_n 即可反映出不同类型故障的电压波形时域特征的区别。

金属性故障其阻抗数值较小且固定, 故障后波形基本无畸变, 差值方根近似为 0, 相较于线性变化的过渡阻抗性故障, 弧光性故障的阻抗呈现出明显的非线性特征, 故障波形的畸变更加严重, 差值方根也更高。因此可推断弧光性故障的差值方根最大, 过渡阻抗性故障的次之, 金属性故障的最小。

1.4 故障类型识别融合特征量

关联维数 C_D 体现了输电线路故障时非线性系统变化规律的复杂程度, 差值方根 d_n 则体现了故障前后电压波形畸变的程度。为了更加准确地判别故障类型, 以关联维数及差值方根对故障类型识别贡献程度的大小为依据, 用熵权法具体确定综合识别特征量中各自特征量所占比例^[20]。

熵权法是依据不同指标所包含信息量的多少来客观确定指标的权重^[21]。熵权值反映了各指标在决策中贡献度的差异度^[22]。

以不同故障类型的关联维数与差值方根为样本, 两个指标的信息熵权值为

$$w_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j}, \quad j = 1, 2 \quad (9)$$

式中, E_j 为各指标的熵, 它是系统混沌无序程度的度量:

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (10)$$

式中, $p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}}$ 表示第 i 个样本所占该指标的比

重, $x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}$ 为标准化后的样本数据。

据此, 样本值波动越大, 包含的信息量越多, 其熵值越小, 熵权越大, 识别过程中所起的作用就越大。故障类型识别的融合特征量为

$$T = w_c \times C_D + w_d \times d_n \quad (11)$$

因而, 融合特征量既能反映不同类型故障规律

的复杂程度，又能反映不同类型故障信号畸变的大小。

虽然从理论上分析关联维数和差值方根受到输电线路系统参数及结构的影响，不同输电线路下如发生同种类型故障，得到的融合特征量是有差别的。根据前述分析，故障信号的关联维数和差值方根都符合金属性故障的 $C_{D1}, d_{n1} <$ 过渡阻抗性故障的 $C_{D2}, d_{n2} <$ 弧光性故障的 C_{D3}, d_{n3} ，故融合特征量值也符合金属性故障的 $T_1 <$ 过渡阻抗性故障的 $T_2 <$ 弧光性故障的 T_3 。为增强区分度，引入灵敏度系数，金属性故障识别阈值 T'_{th} 和过渡阻抗性故障识别阈值 T_{th} 可据此设定。

$$\begin{cases} T'_{th} = \bar{T}_1 + k_1(\bar{T}_2 - \bar{T}_1) \\ T_{th} = \bar{T}_2 + k_2(\bar{T}_3 - \bar{T}_2) \end{cases} \quad (12)$$

当 $T < T'_{th}$ 时，为金属性故障，当 $T > T_{th}$ 时，为弧光性故障，当 $T'_{th} < T < T_{th}$ 时，为过渡阻抗性故障。其中， \bar{T}_1 、 \bar{T}_2 、 \bar{T}_3 分别为金属性故障、过渡阻抗性故障、弧光性故障的融合特征量平均值，可由输电线路不同位置、不同类型故障仿真信号为样本计算得到。 $k_i \in (0,1)$ ， $i=1,2$ 为灵敏度系数，可根据融合特征量数据分布的离散情况进行确定。

$$k_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_i + \sigma_{i+1}} \quad (13)$$

式中， σ_i 为第 i 类故障融合特征量 T_i 的标准差，它反映了第 i 类故障特征量的离散程度， σ_i 越大，第 i 类故障的融合特征量 T_i 波动离散越大。相对于第 $i+1$ 类故障，若第 i 类故障的融合特征量离散程度更大，则 k_i 也会较大，所得阈值可对故障类型进行更有效的区分。

2 考虑故障类型影响的自适应测距方法

在识别出故障类型的基础上，可有针对性地采取相应的故障测距算法，以消除故障类型对测距结果的影响。

以单端供电输电线路为例，设 M 端为测量端，F 点为故障点，其故障阻抗为 R_f ，金属性故障阻抗为 R_g ，弧光性故障阻抗为 R_{arc} ，过渡阻抗性故障阻抗为 Z_g ，如图 1 所示。

对于金属性故障，因其可近似为理想故障 $R_f = 0$ ，此时故障点到测量点的距离为 $l_{MF} = \frac{Z_M}{Z_l}$ ，因此用上述传统阻抗法对金属性故障进行测距所得

结果较为准确。

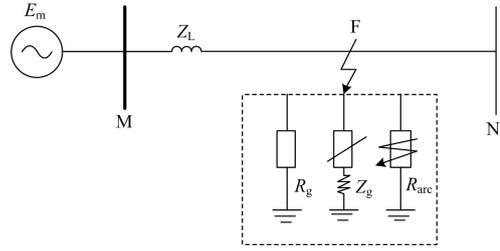


图 1 单端供电故障系统

Fig. 1 Single ended power supply fault system

弧光性故障其阻抗呈现较复杂的非线性变化，在暂态过程中会产生高频信号^[23]，根据弧光性故障的阻抗特性，采用最小二乘法进行定位^[24]。以故障后电压电流作为已知量，首先运用电路理论推导出故障点相电压电流的离散形式求取故障阻抗，并根据故障电流分量与故障边界电流求取故障系数，然后采用最小二乘法以故障阻抗均方差的平方最小为目标建立方程求出故障阻抗的准确值，进而解出故障距离。

其故障阻抗的离散形式为

$$\begin{cases} R_{arc} = \frac{u_F(n) - u_F(n-1)}{i_F(n) - i_F(n-1)} \\ R'_f = 3(K+1)R_{arc} \\ K = \frac{i_{f2,s}(t)}{i_{f1,s}(t)} \end{cases} \quad (14)$$

关于故障阻抗均方差的目标函数为

$$E_r = \sum_{i=1}^n (R'_i - \bar{R}'_i)^2, \quad i=1,2,\dots,n \quad (15)$$

过渡阻抗性故障其阻抗实时线性变化，不易精确测量，为了消除过渡阻抗对测距结果的影响，可以采用参数识别法^[25]，该方法把故障点后的系统简化为电感与电阻的形式，并把此电感、电阻与故障距离、过渡阻抗作为求解的未知量，根据故障网络与故障分量网络利用 KCL 及 KVL 原理推导出线性方程，而后代入测量点的电压、电流数据，求出线性方程组中的系数，最后根据系数与待识别参数的对应关系求出故障距离。其线性方程为

$$u_m = x_1 \left(i_m r + \frac{di_m}{dt} L \right) + x_2 \left(\frac{di_m}{dt} r + \frac{d^2 i_m}{dt^2} L \right) + x_3 \Delta i_m + x_4 \frac{d\Delta i_m}{dt} + x_5 \frac{du_m}{dt} \quad (16)$$

式中， $x_1 \sim x_5$ 为系数，与故障距离 l 、故障点阻抗 R_f 、故障点后系统电阻 R'_n 、电感 L'_n 的关系如式(17)所示。

$$\begin{cases} l = x_1 \\ R'_F = \frac{x_3 R'_n}{2(R_m + rl + R'_n)} + \frac{x_4 R'_n}{2(L_m + Ll + L'_n)} \\ L'_n = -x_5 R'_n \\ R'_F = \frac{x_3(L_m + Ll) - x_4(R_m + rl)}{x_4 + x_3 x_5} \end{cases} \quad (17)$$

关于弧光故障和过渡阻抗故障的处理方法详见参考文献[24-25]。

由上述分析可知基于故障类型识别的精确测距整体思路如图 2 所示。

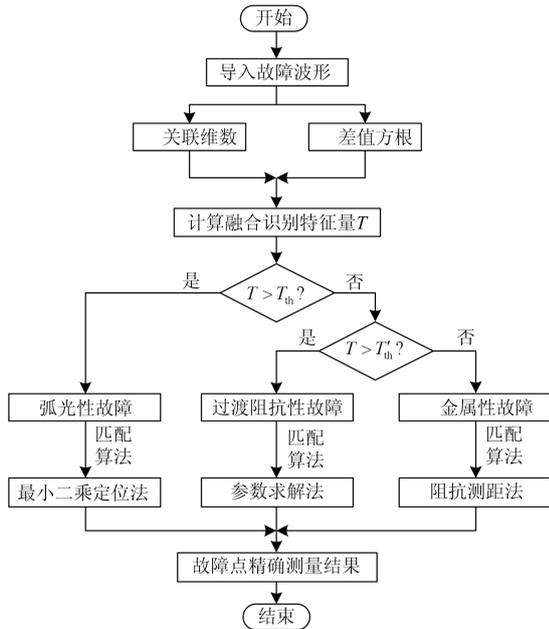


图 2 输电线路故障识别及测距流程图

Fig. 2 Fault identification and distance measurement flow chart of transmission line

表 1 不同故障情况下故障特征值及测距结果

Table 1 Fault eigenvalues and ranging results at different fault distance

故障类型	故障距离/km	关联维数	差值方根	融合特征量	测距结果/km			
					阻抗法	误差率/%	匹配后算法	误差率/%
金属性故障	50	0.951 4	0.473 6	0.699 0	49.68	0.64	49.68	0.64
	100	1.189 0	0.198 4	0.665 8	100.91	0.9	100.91	0.9
	150	1.208 5	0.685 0	0.932 0	151.55	1.03	151.55	1.03
	200	1.110 2	0.332 8	0.699 6	202.53	1.3	202.53	1.3
	250	1.292 1	0.920 5	1.095 8	252.38	0.95	252.38	0.95
弧光性故障	50	2.310 9	4.726 5	3.586 8	54.17	8.3	50.23	0.46
	100	3.070 3	8.857 8	6.127 3	109.03	9.0	100.49	0.50
	150	6.872 2	11.300 7	9.211 3	166.05	10.7	151.20	0.80
	200	4.628 1	11.290 5	8.147 2	214.56	7.28	200.97	0.49
	250	2.321 7	5.934 65	4.230 1	267.25	6.9	251.41	0.56
过渡阻抗性故障	50	1.526 8	1.804 2	1.673 3	59.51	19.0	49.75	0.5
	100	1.447 6	1.891 6	1.682 1	115.47	15.5	99.75	0.3
	150	1.730 3	2.986	2.393 6	176.35	17.57	149.83	0.11
	200	1.505 6	2.118 2	1.829 2	234.28	17.09	200.09	0.05
	250	1.672 5	2.406 2	2.060 0	287.63	15.10	250.49	0.20

3 算例分析

为验证上述方法的可行性, 用 PSCAD 软件对输电线路不同位置处发生不同类型故障的情况进行仿真, 故障系统如图 3 所示。

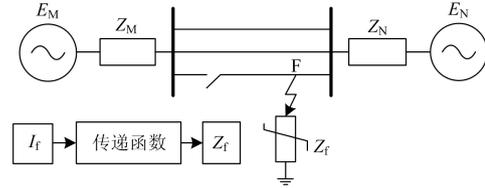


图 3 故障仿真系统图

Fig. 3 Fault simulation system diagram

输电线路为 Bergeron 模型, 总长度为 300 km, 采样频率为 10 kHz。两侧电源参数分别为: $E_M = 525 \angle 0^\circ$ kV, $E_N = 500 \angle 30^\circ$ kV。线路参数为: $r_1 = 0.020 83 \Omega/\text{km}$, $r_0 = 0.114 8 \Omega/\text{km}$, $x_{L1} = 0.282 24 \Omega/\text{km}$, $x_{L0} = 0.718 98 \Omega/\text{km}$, $x_{c1} = 239.150 9 \times 10^3 \Omega \cdot \text{km}$, $x_{c0} = 370.990 5 \times 10^3 \Omega \cdot \text{km}$ 。取不同距离故障点处信号为样本信号, 计算关联维数和差值方根指标的权重, 具体数据如表 1 所示。

据表 1 数据, 由式(10)得到关联维数和差值方根指标的信息熵为 $E_c = 0.7618$, $E_d = 0.7333$, 代入式(9)可得到融合特征量指标权重分别为 $w_c = 0.4718$, $w_d = 0.5282$ 。

由上述得到的指标权重 w_c 、 w_d 和表 1 中数据可计算得到金属性故障、过渡阻抗性故障、弧光性故障的均值关联维数、均值差值方根、均值融合特征量, 具体数据如表 2 所示。

表 2 不同类型故障的均值特征量
Table 2 Mean feature of different types of faults

	均值关联维数	均值差值方根	均值融合特征量
金属性故障	$\overline{C_{D1}}$ 1.150 2	$\overline{d_{n1}}$ 0.522 1	$\overline{T_1}$ 0.818 4
过渡阻抗性故障	$\overline{C_{D2}}$ 1.576 6	$\overline{d_{n2}}$ 2.231 8	$\overline{T_2}$ 1.922 7
弧光性故障	$\overline{C_{D3}}$ 3.840 6	$\overline{d_{n3}}$ 8.422 0	$\overline{T_3}$ 6.260 5

把表 1 不同类型故障的融合特征量数据分别代入式(13)得到灵敏度系数 $k_1=0.435 4$, $k_2=0.111 3$ 。再把所得结果代入式(12), 可得综合特征识别阈值为 $T_{th}'=1.299 2$, $T_{th}=2.405 5$ 。当计算所得 $T < 1.299 2$ 时, 判别其故障类型为金属性故障; 当 $T > 2.405 5$ 时, 判别其故障类型为弧光性故障; 当 $T < 2.405 5$ 且 $T > 1.299 2$ 时, 判别其故障类型为过渡阻抗性故障。

由表 1 和表 2 可分析得出:

1) 弧光故障的关联维数远高于金属性故障与过渡阻抗性故障, 且金属性故障波形关联维数最小。从差值方根结果中可发现, 金属性故障计算所得结果远小于弧光性故障与过渡阻抗故障, 弧光性故障比过渡阻抗性故障的差值分析结果稍大。与前文不同故障类型阻抗电气特性的复杂程度和畸变程度分析结果相一致。

2) 同类故障信号的关联维数及差值方根虽然随故障距离的不同有所波动, 但不同故障类型之间的关联维数及差值方根有一定的区分度。

3) 虽然对于不同类型故障关联维数与差值方根的值不同, 但区分度较小, 不能较准确地判断故障的类型, 而用熵权法融合所得的特征识别量融合了空间域及时域两种角度下的故障特征, 具有较强的故障类型识别能力。

4) 故障类型识别后匹配相应的测距算法结果更为准确, 最多可缩小 18% 的误差, 更具有普遍适用性。

4 结论

为消除因输电线路故障类型不同对测距结果造成的影响, 提出先判别故障类型后匹配测距算法的方法进行故障测距。对输电线路不同类型故障电气特性进行分析, 选取了空间域分析中的关联维数指标及时域分析中的差值方根指标对故障后信息进行提取, 并根据不同指标对故障类型识别贡献程度的大小, 得到融合后的综合识别特征量。得出以下结论:

1) 关联维数反映系统无序或有序变化规律的

复杂程度, 差值方根反映系统的畸变程度, 两者能在一定程度上反映不同故障类型的差异, 但单一指标不能完全区分所有故障类型。

2) 熵权法是利用客观数据中所包含的信息来确定权重的方法, 具有很好的客观性, 经过熵权法融合所得综合识别量较单一指标具有更强的区分能力, 可准确地区分输电线路不同类型的故障。

3) 不同类型的故障, 其发展机理有所区别, 对测距结果会产生一定的影响, 在故障类型识别的基础上进行测距, 所得结果更为准确。

参考文献

- [1] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133-137.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Review of fault location for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137.
- [2] ROOSTAEE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y.
- [3] 谈竹奎, 徐玉韬, 吕黔苏, 等. 利用电容主动放电脉冲的直流配电网故障选线方法[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 139-146.
TAN Zhukui, XU Yuzhen, LÜ Weisu, et al. Fault line selection method for DC distribution network using capacitive active discharge pulse[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 139-146.
- [4] 徐晓宾, 李凤婷, 袁冰, 等. 双馈风电场联络线单相接地故障单端测距分析[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(1): 66-72.
XU Xiaobin, LI Fengting, YUAN Bing, et al. Single-phase grounding fault location analysis in tie-grid of DFIG[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(1): 66-72.
- [5] 袁冰, 王宾, 陆元园, 等. 风电场并网线路单相接地故障单端测距误差特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 63-69.
YUAN Bing, WANG Bin, LU Yuanyuan, et al. Analysis on error characteristics of single-ended fault location in wind farm interconnected line with single phase fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 63-69.
- [6] 李子龙, 江秀臣, 刘浩, 等. 基于广域测量的故障区段定位方法[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 68-73.

- LI Zilong, JIANG Xiuchen, LIU Hao, et al. Fault segment location method based on wide area measurement[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(8): 68-73.
- [7] 李澄, 袁磊平, 严慧, 等. 基于函数幅值和线路等分法的双端故障定位研究[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(4): 126-131.
- LI Cheng, YUAN Leipin, YAN Hui, et al. Two-terminal fault location method based on amplitude of function and line equal partition[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(4): 126-131.
- [8] 王宾, 董新洲, 薄志谦, 等. 特高压长线路单端阻抗法单相接地故障测距[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(14): 25-29.
- WANG Bin, DONG Xinzhou, BO Zhiqian, et al. An impedance fault location algorithm for UHV long transmission lines with single-line-to-ground faults[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(14): 25-29.
- [9] 李欣唐, 员志皓, 孟昭勇. 一种适于高阻接地短路的故障测距新算法[J]. *电力自动化设备*, 2000, 20(4): 15-18.
- LI Xintang, YUAN Zhihao, MENG Zhaoyong. A new algorithm of fault allocation for high impedance grounding[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2000, 20(4): 15-18.
- [10] 林富洪, 曾惠敏. 基于分布参数模型的高压输电线路单相接地故障单端测距方法[J]. *电网技术*, 2011, 35(4): 201-205.
- LIN Hongfu, ZENG Huimin. Single end fault location method for single phase grounding fault of HV transmission line based on distributed parameter model[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(4): 201-205.
- [11] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 1-7.
- CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single-phase grounding integrated arc model and line selection method for low current grounding system[J]. *Power System Technology*, 2016, 44(16): 1-7.
- [12] 严国平, 陈昊, 谭风雷, 等. 基于电流特征提取的故障电弧识别方法[J]. *智慧电力*, 2018, 46(6): 101-105.
- YAN Guoping, CHEN Hao, TAN Fenglei, et al. Fault arc recognition method based on current feature extraction[J]. *Smart Power*, 2018, 46(6): 101-105.
- [13] ZHANG H, CHE R. Fault cause identification based on characteristics of transition resistances for transmission lines[C] // *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, IEEE, November 26-29, 2015, Changsha, China: 1405-1409.
- [14] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 基于介质击穿原理的配电网线路高阻接地故障精确建模[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(12): 62-66.
- WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. Accurate modeling of high resistance earthing fault in distribution lines based on dielectric breakdown principle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(12): 62-66.
- [15] BENNER C L, RUSSELL B D. Practical high-impedance fault detection on distribution feeders[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, 33(3): 635-640.
- [16] YAUSSEF O A S. Combined fuzzy-logic wavelet based fault classification for power system relaying[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(2): 582-589.
- [17] 杨凯, 张认成, 杨建红, 等. 基于分形维数和支持向量机的串联电弧故障诊断方法[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(2): 70-77.
- YANG Kai, ZHANG Rencheng, YANG Jianhong, et al. Fault diagnosis method of series arc based on fractal dimension and support vector machine[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(2): 70-77.
- [18] 管红立, 王博文, 赵智忠. 基于相空间重构和Lyapunov指数电弧电流混沌特性分析[J]. *电工电能新技术*, 2017, 36(3): 35-40.
- GUAN Hongli, WANG Bowen, ZHAO Zhizhong. Analysis of chaotic characteristics of arc current based on phase space reconstruction and Lyapunov exponent[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2017, 36(3): 35-40.
- [19] 赵洪山, 郭伟, 邵玲, 等. 基于子空间方法的风机齿轮箱故障预测算法[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(3): 27-32.
- ZHAO Hongshan, GUO Wei, SHAO Ling, et al. Fault prediction algorithm for fan gear box based on subspace method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(3): 27-32.
- [20] 杨志超, 张成龙, 葛乐. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(4): 90-94.
- YANG Zhichao, ZHANG Chenglong, GE Le. Fuzzy comprehensive evaluation of pollution flashover state of insulators based on entropy weight method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(4): 90-94.
- [21] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. *电网技术*, 2013, 37(1): 77-81.
- LUO Yi, LI Yulong. Transmission network planning scheme

- synthesis decision based on entropy weight method and gray relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.
- [22] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.
- DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk assessment of overhead transmission lines based on AHP-entropy combination method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [23] 范李平, 袁兆强, 张凯. 基于小波变换的单相接地故障电弧模型及其PSCAD/EMTDC仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 51-56.
- FAN Liping, YUAN Zhaoqiang, ZHANG Kai. Single phase earth fault arc model based on wavelet transform and its PSCAD/EMTDC simulation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 51-56.
- [24] 束洪春, 司大军, 葛耀中. 高压输电线路电弧故障检测与定位最小二乘法新解[J]. 电工技术学报, 2000, 15(5): 63-68.
- SHU Hongchun, SI Dajun, GE Yaozhong. New solution of arc fault detection and location least square method for high voltage transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(5): 63-68.
- [25] 索南加乐, 王增超, 康小宁, 等. 基于线性微分方程参数识别的单端准确故障测距算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 9-14.
- SUONAN Jiale, WANG Zengchao, KANG Xiaoning, et al. An accurate single end fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 9-14.

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-04-20

作者简介:

程宏波(1979—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为供电设备健康管理及电网的智能控制; E-mail: waitingbo@126.com

高雅琦(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障识别与检测。E-mail: 1242056326@qq.com

(编辑 葛艳娜)