

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.011

基于正序电压变化量的故障电压暂降源定位算法

戴锋¹, 刘贞瑶¹, 李丹奇², 沙浩源², 陈轩¹, 郑建勇²

(1. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:随着越来越多敏感负荷接入电网,由电压暂降问题直接及间接带来的经济损失日趋严重。在各类电压暂降中,故障引发的电压暂降占比最大,对其进行准确定位是高效治理电网故障的必要前提。文中针对故障型暂降源提出一种基于正序电压变化量的定位方法,基于发生故障时各监测点的正序电压分布特性,建立监测点信息库和各支路故障距离定位模型;然后基于马氏距离与 Pearson 相关系数定义相似度指标,利用信息库匹配的方法对故障所在支路进行初选;最后采用遗传算法对最优故障距离目标函数进行寻优,定位故障源。利用 IEEE 14 节点仿真系统对所提方法的有效性与准确性进行了验证。

关键词:故障定位;正序电压;马氏距离;Pearson 相关系数;遗传算法

中图分类号:TM761

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)04-0068-09

0 引言

随着工业装备、建筑电气自动化及智能化水平越来越高,电压暂降问题对于工商业大用户的生产经营影响也越来越显著^[1-3]。因电压暂降导致的生产中断和延缓呈明显上升趋势,由此带来的直接及间接经济损失日趋严重^[4-7]。短路故障是造成电压暂降的最大成因^[8-10],且其危害严重。及时准确定位故障暂降源发生位置,有助于电网公司尽快排除暂降源,提高电网运维效率。

目前国内外学者已经对故障暂降源定位方法展开大量研究。文献[11]定义了扰动功率与扰动能量的概念,提出通过检测扰动引发的功率变化来确定扰动源相对于监测器的位置,但未涉及精确的故障点定位。文献[12-13]采用了行波测距法进行定位,但该方法需要安装行波测量装置,成本过高。文献[14]采用实、虚部分离法,依次在每个测点求解定位方程,确定故障位置和过渡电阻,再取所有测点故障位置估计值的平均值作为最终定位的故障位置,该方法计算量过大,且必须建立在提取辨识干扰源类型准确的基础上才能保证有效性。文献[15]利用监测点可观测域、扰动源方位、扰动类型等判据,先提取可能线路集,通过在可能的故障线路上假设虚拟故障点,利用故障距离分布函数定位故障源,但定位结果受过渡电阻影响较大。文献[16-18]通过对大量故障信息训练建立数据库,将实际数据与样本进行匹配确定故障位置,定位误

差取决于训练样本的数量,采用遍历法处理所有可能故障点才能达到理想精度。文献[19-20]基于故障距离分布函数,采用最小二乘法进行定位,但在网络结构较复杂时容易陷入局部最优问题,定位误差较大。

针对上述问题,文中基于电能质量监测系统,提出一种基于正序电压变化量的故障电压暂降源(以下简称故障源)定位方法。该方法基于发生故障时各监测点的正序电压分布特性,利用正序电压变化量建立监测点信息库和各支路故障距离定位模型。然后,基于马氏距离与 Pearson 相关系数定义监测点正序电压变化量相似度指标,用于衡量待定位故障信息与信息库中各支路的匹配度,以实现故障源所在支路选线定位。最后,采用遗传算法,确定故障所在支路的最优故障距离,实现配电网故障源具体位置定位。该方法不受过渡电阻和故障类型的影响,且具有良好的定位准确度:对于电源侧故障,定位误差为 1%~4%;对于用户侧故障,定位误差为 1%以内。

1 故障时刻的正序电压分布原理

故障位置、故障类型、过渡电阻是决定各监测点电压的 3 个变量。电网发生故障示意如图 1 所示,假设节点 A 与节点 B 之间的线路阻抗为 Z_L ,故障点 F 到节点 A 的距离与到节点 B 的距离之比为 $\lambda/(1-\lambda)$,过渡电阻为 R_F ,电力系统中有一监测点 M。

监测点 M 与故障点 F 之间的正序阻抗 $Z_{MF}^{(1)}$ 可由正序节点阻抗计算得到^[21]。

收稿日期:2020-02-11;修回日期:2020-03-15

基金项目:江苏省重点研发计划资助项目(BE2017030)

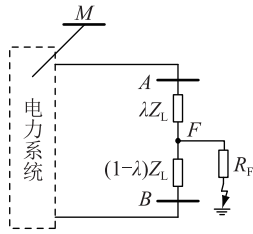


图1 电网故障示意

Fig.1 Schematic of power grid failure

$$Z_{MF}^{(1)} = (1 - \lambda)Z_{MA}^{(1)} + \lambda Z_{MB}^{(1)} \quad (1)$$

式中: $Z_{MA}^{(1)}$, $Z_{MB}^{(1)}$ 分别为监测点 M 到节点 A 、节点 B 的正序互阻抗。

根据叠加定理,故障后监测点 M 的正序电压 $\dot{V}_M^{(1)}$ 为:

$$\dot{V}_M^{(1)} = \dot{V}_M^{\text{std}} - Z_{MF}^{(1)} \dot{I}_F^{(1)} \quad (2)$$

式中: \dot{V}_M^{std} 为故障发生前监测点 M 的正序电压; $\dot{I}_F^{(1)}$ 为故障点处的正序短路电流。

定义监测点正序电压变化量为:

$$\Delta V_M^{(1)} = |\dot{V}_M^{\text{std}} - \dot{V}_M^{(1)}| = |Z_{MF}^{(1)} \dot{I}_F^{(1)}| \quad (3)$$

由式(3)可知,监测点正序电压变化量仅与监测点、故障点间的正序阻抗以及故障正序电流有关。监测点与故障点之间的正序阻抗代表监测点与故障点之间的相对位置信息。对于线路中任何一个故障位置,各监测点与其之间的正序阻抗是一一对应的,不受故障类型和过渡电阻影响。

假设系统中有 2 个监测点 M_1, M_2 。 M_1 与故障点 F 之间的正序阻抗为 $Z_{M_1F}^{(1)}$; M_2 与故障点 F 之间的正序阻抗为 $Z_{M_2F}^{(1)}$; 当 F 处发生故障 1 时,短路正序电流为 $\dot{I}_{F_1}^{(1)}$; 当 F 处发生故障 2 时,短路正序电流为 $\dot{I}_{F_2}^{(1)}$ 。其中,故障 1 和故障 2 的故障类型和过渡电阻均不相同。由式(3)可知:

$$\frac{\Delta V_{M_1F_1}^{(1)}}{\Delta V_{M_2F_1}^{(1)}} = \frac{|Z_{M_1F}^{(1)} \dot{I}_{F_1}^{(1)}|}{|Z_{M_2F}^{(1)} \dot{I}_{F_1}^{(1)}|} = \frac{|Z_{M_1F}^{(1)}|}{|Z_{M_2F}^{(1)}|} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta V_{M_1F_2}^{(1)}}{\Delta V_{M_2F_2}^{(1)}} = \frac{|Z_{M_1F}^{(1)} \dot{I}_{F_2}^{(1)}|}{|Z_{M_2F}^{(1)} \dot{I}_{F_2}^{(1)}|} = \frac{|Z_{M_1F}^{(1)}|}{|Z_{M_2F}^{(1)}|} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta V_{M_1F_1}^{(1)}}{\Delta V_{M_2F_1}^{(1)}} = \frac{\Delta V_{M_1F_2}^{(1)}}{\Delta V_{M_2F_2}^{(1)}} \quad (6)$$

由式(6)可知,监测点 M_1, M_2 的正序电压变化量在 2 次不同故障时的比值相等。可推广归纳出故障时的正序电压分布特性:同一故障位置的故障类型或过渡电阻不同时,各监测点的正序电压变化量等比例变化,监测点间的大小次序关系不变。

2 基于正序电压变化量的故障源定位方法

2.1 故障支路判断方法

根据正序电压分布特性可知,当某一点发生故障时,各监测点的正序电压变化量将会等比例变换。将各监测点的正序电压变化量记作离散数列 M 。在系统中任一位置发生故障时,故障位置信息与离散数列 M 一一对应。文中利用马氏距离与 Pearson 相关系数(Pearson correlation coefficient)定义相似度指标,将待定位故障的监测点信息与监测点信息库中元素进行相似度匹配,筛选出最有可能的故障支路。

2.1.1 马氏距离

现有 n 个监测点,已知在 m 个不同位置的故障源引发的 m 组监测点信息数列 M_1, M_2, \dots, M_m , 每个数列所包含元素数量等于监测点数量,由于监测点信息数量为 n 维,则 $M_i = (m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{in})$ 。将其组合为 $X = [M_1, M_2, \dots, M_m]^T$ 。设 $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_k, \dots, \mu_n)$, 其中 $\mu_k = E(X_k)$ 为 X 第 k 列(第 k 个监测点)的期望值。

待定位故障的监测点信息 M_f 与任意一点的已知监测点信息 M_i 的马氏距离定义为:

$$D(M_f, M_i) = \sqrt{(M_f - M_i)C^{-1}(M_f - M_i)^T} \quad (7)$$

式中: C 为协方差矩阵,如式(8)所示。

$$C = (c_{ab})_{n \times n} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $c_{ab} = \text{cov}(X_a, X_b)$; $a, b = 1, \dots, n$ 。协方差矩阵的作用是对各特征量规格化和去相关性,因此马氏距离避免了特征量尺度的干扰。

马氏距离利用样本协方差描述同类特征的相关性,在不受特征量尺度影响前提下考虑了特征量间的相关性^[22-23]。与欧式距离相比,欧式距离是各特征量等权值运算,而马氏距离通过协方差矩阵调整样本特征量权值,获得更优距离。

在同一故障点的 M_i 拥有相同的模式,它们之间的马氏距离极小甚至为 0, 2 个模式的相似程度高; 当 2 条数列的模式差异越大时,其马氏距离也越大, 2 个模式的相似程度越小。

2.1.2 Pearson 相关系数

Pearson 相关系数是用来衡量 2 个定距变量间的线性关系^[24]。相关系数的绝对值越大,相关性越强。相关系数越接近于 1 或 -1,相关性越强;相关系数越接近于 0,相关性越弱。相关系数为正代表

正相关,为负则代表负相关。

数列 X 与数列 Y 的 Pearson 相关系数定义为式(9),其中 N 为数列维度。

$$\rho(X, Y) = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \cdot \sqrt{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2}} \quad (9)$$

2.1.3 监测点正序电压变化量相似度指标

为了描述待定位故障的监测点信息与已知的监测点信息的相似度,定义监测点正序电压变化量相似度指标:

$$S(M_f, M_i) = \frac{\rho(M_f, M_i)}{1 + \ln[1 + D(M_f, M_i)]} \quad (10)$$

式中: $S(M_f, M_i)$ 为待定位故障的监测点信息 M_f 与某已知监测点信息 M_i 的正序电压变化量相似度指标,取值范围为 $[-1, 1]$; $\rho(M_f, M_i)$ 为待定位故障的监测点信息 M_f 与某已知监测点信息 M_i 的 Pearson 相关系数; $D(M_f, M_i)$ 为待定位故障的监测点信息 M_f 与某已知监测点信息 M_i 的马氏距离。2 组信息线性正相关程度越高, $S(M_f, M_i)$ 越趋近于 1; 2 组信息线性负相关程度越高, $S(M_f, M_i)$ 越趋近于 -1; 2 组信息完全相同时, $S(M_f, M_i) = 1$; 两组信息相似度越低, $S(M_f, M_i)$ 越趋近于 0。

2.2 故障源具体位置定位方法

初步确定故障所在支路后,可建立该支路以故障距离 λ 为自变量,以各监测点正序电压变化量为因变量的模型。在该支路模型中,以监测点信息相似度最高为目标,寻找与此故障引起的 M_f 最匹配的 λ 最优解,进一步确定故障在该支路的具体位置。

2.2.1 故障距离定位模型

根据式(1)和式(3),得到所有监测点的正序电压变化量,构成监测点正序电压变化量序列为:

$$\begin{cases} \Delta V^{(1)} = [\Delta V_{M_1}^{(1)}, \Delta V_{M_2}^{(1)}, \dots, \Delta V_{M_n}^{(1)}] = \\ \quad |(1 - \lambda)Z_l^{(1)} + \lambda Z_r^{(1)}| \cdot |\dot{I}_F^{(1)}| \\ Z_l^{(1)} = [Z_{M_1l}^{(1)}, Z_{M_2l}^{(1)}, \dots, Z_{M_nl}^{(1)}] \\ Z_r^{(1)} = [Z_{M_1r}^{(1)}, Z_{M_2r}^{(1)}, \dots, Z_{M_nr}^{(1)}] \end{cases} \quad (11)$$

式中: $Z_l^{(1)}$, $Z_r^{(1)}$ 分别为各监测点到支路首、末节点的正序传递阻抗。

正序短路电流为:

$$\dot{I}_F^{(1)} = \frac{\dot{V}_F^{\text{std}}}{Z_{FF}^{(1)}} = \dot{V}_M^{\text{std}} / [(1 - \lambda)^2 Z_{ll}^{(1)} + \lambda^2 Z_{rr}^{(1)} + 2\lambda(1 - \lambda)Z_{lr}^{(1)} + \lambda(1 - \lambda)z_{lr}^{(1)}] \quad (12)$$

式中: \dot{V}_F^{std} 为 F 处发生故障前的正序电压; $Z_{FF}^{(1)}$, $Z_{ll}^{(1)}$, $Z_{rr}^{(1)}$ 分别为故障点 F , 节点 l , 节点 r 的正序自阻抗; $Z_{lr}^{(1)}$ 为节点 l 与 r 之间的正序互阻抗; $z_{lr}^{(1)}$ 为节点 l 与 r 之间的线路正序阻抗。

监测点正序电压变化量由式(11)、式(12)可得:

$$M_{i,b,\lambda} = \frac{|[(1 - \lambda)Z_{M_i l}^{(1)} + \lambda Z_{M_i r}^{(1)}] \dot{V}_{M_i}^{\text{std}}|}{|(1 - \lambda)^2 Z_{ll}^{(1)} + \lambda^2 Z_{rr}^{(1)} + 2\lambda(1 - \lambda)Z_{lr}^{(1)} + \lambda(1 - \lambda)z_{lr}^{(1)}|} \quad (13)$$

式中: b 为支路编号; λ 为故障距离; $M_{i,b,\lambda}$ 为标准化后 b 支路 λ 处发生故障时第 i 个监测点的正序电压变化量。

将式(13)的监测点正序电压变化量数列进行标准化后,得到支路 b 以 λ 为优化变量,且只有 λ 这一变量的故障距离定位模型。

$$L_{b,\lambda} = [M_{1,b,\lambda}, M_{2,b,\lambda}, \dots, M_{n,b,\lambda}] \quad (14)$$

由公式变换可知,监测点实际正序电压变化量 M_f 与模型中监测点正序电压变化量 $L_{b,\lambda}$ 的相似度指标 $S(M_f, L_{b,\lambda})$ 越高,计算出的 λ 定位结果越准确。文中采用遗传算法对该相速度目标函数进行寻优。

2.2.2 遗传算法

对于求函数最大值的优化问题(求函数最小值也类同),数学规划模型^[25]为:

$$\begin{cases} \max f(X) \\ \text{s.t. } X \in R \\ R \subset U \end{cases} \quad (15)$$

式中: X 为决策变量; $\max f(X)$ 为目标函数; $X \in R$, $R \subset U$ 为约束条件, U 为基本空间, R 为 U 的子集,满足约束条件的解 X 称为可行解, R 为所有满足约束条件的解所组成的集合,称为可行解集合。遗传运算流程如图 2 所示。

(1) 初始化。设置进化代数计数器 $t = 0$, 设置最大进化代数 T , 随机生成 M 个个体作为初始群体 $P(0)$ 。

(2) 个体评价。计算群体 $P(t)$ 中各个体的适应度。

(3) 选择运算。将选择算子作用于群体,选择的目的是把优化的个体直接遗传到下一代或通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代,选择操作建立在群体中个体的适应度评估基础之上。

(4) 交叉运算。将交叉算子作用于群体,遗传算法中起核心作用的就是交叉算子。

(5) 变异运算。将变异算子作用于群体,即对

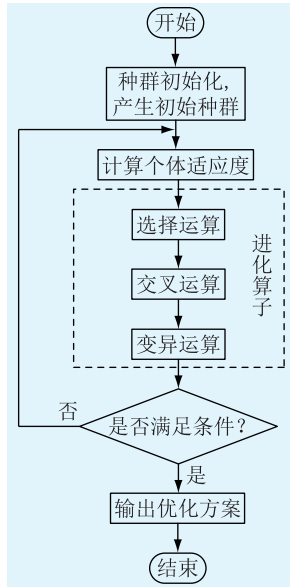


图2 遗传算法流程

Fig.2 Flow chart of genetic algorithm

群体中的个体串的某些基因座上的基因值作变动, 群体 $P(t)$ 经过选择、交叉、变异运算之后得到下一代群体 $P(t+1)$ 。

(6) 终止条件判断。若 $t = T$, 则以进化过程中所得到的具有最大适应度个体作为最优解输出, 终止计算。

遗传算法直接对结构对象进行操作, 没有求导和函数连续性的限制, 具有内在的隐并行性。相比于爬山算法、粒子群算法易出现的局部最优问题, 遗传算法具有更强的全局寻优能力。采用概率性的寻优方法, 可以自动获取和指导优化的搜索空间, 自适应地调整搜索方向, 无需确定规则。

3 故障电压暂降源定位算法流程

若想定位当前故障源所在支路, 以不同位置发生故障时的监测点信息, 建立监测点正序电压变化量信息库, 通过当前故障发生时的监测点信息与信息库信息进行相似度匹配, 从而确定故障源所在支路。在理想情况下, 假设信息库中包含了任意一点故障时的监测点信息, 则系统中任何点发生故障, 都可在信息库中找到与之完全匹配的映射, 从而确定故障位置。实际工况需考虑存储和计算量等限制, 应尽可能选择有代表性的故障位置, 建立监测点正序电压变化量信息库。

文中选取每条支路的中点发生故障时的监测点信息 ($\lambda = 0.5$) 进行标准化, 建立监测点正序电压变化量信息库。将当前故障对应的监测点信息进行标准化预处理, 并与信息库进行匹配, 通过相似

程度高低, 筛选出故障可能性最大的支路。标准化过程如式(16)所示, 将每组监测点信息规范至区间 $[-1, 1]$ 。

$$b_n^* = \frac{2b_n - (\max_{1 \leq i \leq N} b_i + \min_{1 \leq i \leq N} b_i)}{\max_{1 \leq i \leq N} b_i - \min_{1 \leq i \leq N} b_i} \quad n = 1, \dots, N \quad (16)$$

式中: b_n 为第 n 个实际数据; b_n^* 为第 n 个实际数据的标准化结果。具体流程如图 3 所示。

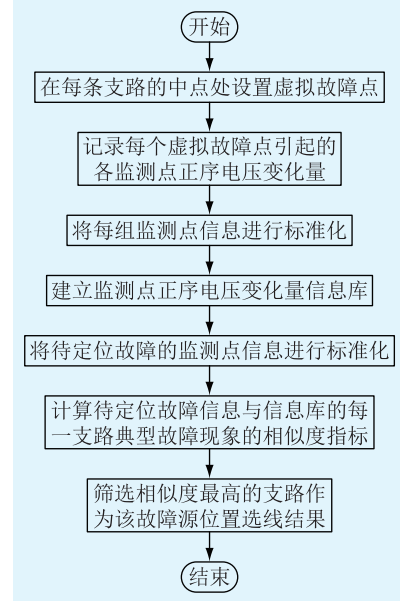


图3 故障源所在支路定位方法

Fig.3 Fault source branch location method

遗传算法的约束条件为 $\lambda \in [0, 1]$, 遗传算法的目标函数为监测点正序电压变化量相似度指标 $S(M_f, L_{b,\lambda})$ 。使用遗传算法可求得最大相似度指标及其对应的最优故障距离 λ_p , 进而定位故障具体位置。具体故障定位流程见图 4。

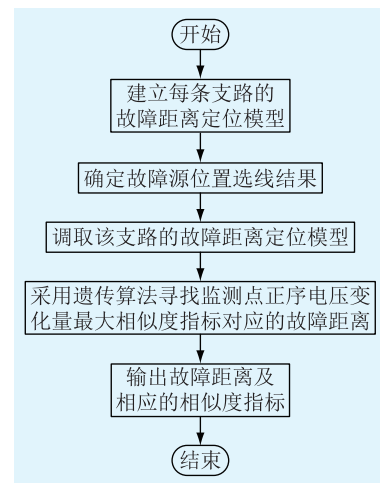


图4 故障源具体位置定位方法

Fig.4 Fault source location method

4 IEEE 14 节点仿真

4.1 仿真模型

在 PSCAD 中搭建 IEEE 14 节点典型配电网模型进行仿真验证,如图 5 所示。

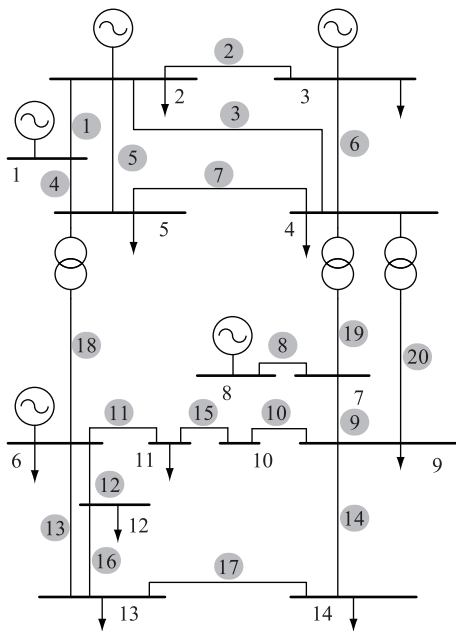


图 5 IEEE 14 节点典型网络
Fig.5 IEEE 14-bus typical network

图 5 中,各支路编号及参数见附表 A1。假设在系统每个节点处安置监测器(共 14 个),设置每条支路中点处发生故障($\lambda = 0.5$),依次记录每条支路发生故障时,各个监测点的正序电压变化量信息。对数据进行标准化,建立监测点正序电压变化量信息库,见附表 A2。结合图 5 与附表 A2 可知,两端直接与电源相接的支路发生故障时,仅首、末节点的正序电压发生改变,系统其他节点不变。如支路 1 发生故障时,由于首末端节点 1、节点 2 均与电源直接相连,故仅有节点 1、节点 2 的电压发生变化。两端不与电源相接的支路发生故障时,系统中多个节点的正序电压将发生改变,如支路 14 发生故障时,节点 9—14 的正序电压变化量均不为 0。

4.2 故障源所在支路定位

假设支路 10 在距 9 号节点 $\lambda = 0.8$ 、距 10 号节点 $1 - \lambda = 0.2$ 处发生 A 相接地故障 F ,以故障 F 为例对文中所提故障定位方法进行验证。

从各监测点处获得故障 F 引起的正序电压变化量 $\Delta V_M^{(1)}$,进行标准化处理得到 $\Delta V_M^{*(1)}$,如表 1 所示。将故障 F 标准化后的正序电压变化量与信息库中的每条支路进行相似度计算,得到相似度指标如图 6 所示。

表 1 故障 F 的监测点信息

Table 1 Monitoring point information of fault F

节点	$\Delta V_M^{(1)}$	$\Delta V_M^{*(1)}$
1	0	-1.00
2	0	-1.00
3	0	-1.00
4	0	-1.00
5	0	-1.00
6	0	-1.00
7	0	-1.00
8	0	-1.00
9	0.10	-0.85
10	1.33	1.00
11	0.59	-0.11
12	0	-1.00
13	0	-1.00
14	0.03	-0.95

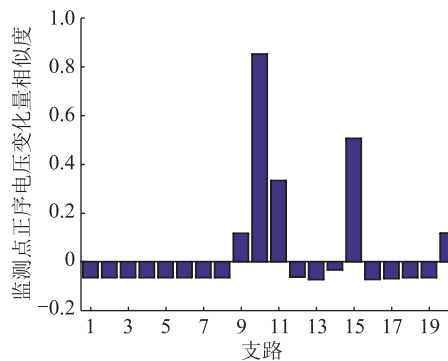


图 6 故障 F 与各支路的相似度

Fig.6 Similarity of the fault F with each branch

图 6 中,故障 F 与信息库中的 10 号支路相似度最高,验证了故障源支路定位结果的准确性。在每条支路中,随机选取 10 处故障(共 200 个,其中包含单相接地故障、相间短路故障、三相短路故障)进行故障源支路定位选线试验。将各支路中的故障信息与信息库中的信息,按照式(10)进行相似度计算,得到模拟故障引起的监测点正序电压变化量与信息库中的典型正序电压变化量相似度平均值,如表 2 所示。由表 2 可知,待定位故障与信息库中对应的正序电压变化量的相似度平均值接近 1,与其他变化量的相似度平均值均较小。该方法可以有效匹配故障所在支路,具有良好的区分度。

4.3 故障源具体位置定位

以 4.2 节中的故障 F 为例,已判断故障发生在支路 10 后,以故障位置距节点 9 的距离为变量 λ ,建立 10 号支路的故障距离定位模型 $L_{10,\lambda} = [M_{1,10,\lambda}, M_{2,10,\lambda}, \dots, M_{14,10,\lambda}]$ 。按照式(7)、式(9)、式(10)计算 4.2 节中 $\Delta V_M^{*(1)}$ 与 $L_{10,\lambda}$ 的相似度指标

表2 试验中部分支路与信息库中各支路故障的平均相似度

Table 2 The average similarity between each branch fault in the experiment and the information base

信息库支路	试验支路									
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	-0.02	-0.02	-0.09	-0.03	-0.04	-0.07	-0.05	-0.10	-0.03	-0.08
2	-0.03	-0.02	-0.10	-0.06	-0.05	-0.05	-0.02	0.00	-0.07	-0.07
3	-0.05	-0.04	-0.04	-0.07	-0.01	-0.06	-0.05	-0.09	-0.01	-0.09
4	-0.02	-0.03	-0.01	-0.02	-0.03	-0.02	-0.06	-0.09	-0.07	-0.09
5	-0.08	-0.09	-0.03	-0.01	-0.08	-0.05	-0.07	-0.08	-0.01	-0.03
6	-0.02	-0.04	-0.04	-0.03	0.00	-0.10	-0.04	-0.01	-0.07	-0.07
7	-0.02	-0.02	-0.06	-0.03	-0.09	-0.05	-0.04	-0.03	-0.05	-0.02
8	1.00	0.11	-0.12	-0.10	-0.10	-0.12	-0.12	-0.11	-0.12	-0.13
9	0.18	0.75	0.03	-0.10	-0.23	-0.27	-0.05	-0.06	-0.27	-0.20
10	-0.11	0.01	0.85	0.30	-0.15	-0.19	-0.13	0.49	-0.18	-0.18
11	-0.10	-0.08	0.30	1.00	-0.14	-0.17	-0.15	0.54	-0.17	-0.17
12	-0.10	-0.23	-0.16	-0.14	0.99	0.24	-0.03	-0.15	0.56	0.10
13	-0.13	-0.27	-0.20	-0.17	0.24	0.97	0.15	-0.19	0.44	0.42
14	-0.16	0.07	-0.09	-0.14	-0.07	0.09	0.68	-0.14	-0.02	0.38
15	-0.11	-0.04	0.55	0.47	-0.15	-0.19	-0.15	0.78	-0.19	-0.19
16	-0.12	-0.27	-0.19	-0.16	0.60	0.41	0.02	-0.18	0.88	0.22
17	-0.12	-0.14	-0.17	-0.16	0.05	0.30	0.62	-0.17	0.15	0.63
18	-0.09	0.01	0.08	0.02	0.09	0.02	0.04	-0.10	0.03	0.03
19	-0.03	0.01	0.07	-0.07	0.02	-0.03	0.01	0.07	0.06	-0.09
20	-0.06	-0.07	0.07	-0.06	-0.01	-0.03	0.10	0.08	0.00	-0.08

$S(\Delta V_M^{*(1)}, L_{10,\lambda})$ 。采用遗传算法,以 $\lambda \in [0,1]$ 为约束条件, $\max[S(\Delta V_M^{*(1)}, L_{10,\lambda})]$ 为目标函数,计算出故障距离 λ 的最优值。为了更直观地观察 $S(\Delta V_M^{*(1)}, L_{10,\lambda})$ 关于 λ 的变化情况,采用遍历法绘制图 7,由图中可看出相似度在 $\lambda = 0.8$ 附近达到最大值,随 λ 向两边逐渐减小,呈现凸函数形式。采用遗传算法寻优结果如下:故障距离 $\lambda = 0.8$ 时, $S(\Delta V_M^{*(1)}, L_{10,\lambda})$ 取得最大值 0.981 583。仿真定位结果与故障 F 的设置参数一致,与图 7 呈现结果一致,验证了文中方法在故障源定位中的有效性。

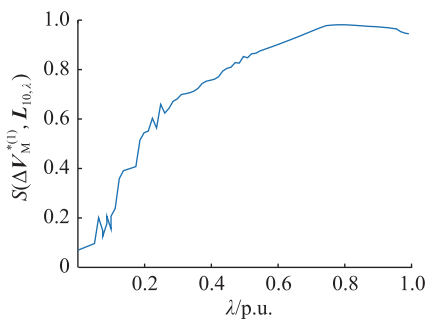


图7 不同故障距离下的相似度

Fig.7 Similarity under different fault distances

在每条支路中,随机选取 10 处故障(共 200 个,其中包含单相接地故障、相间短路故障、三相短路故障)进行故障源具体距离定位试验。分别建立 20

条支路的故障距离定位模型,将各支路中的故障信息与对应支路的故障距离定位模型进行 λ 寻优,得到每个故障的最优故障距离及其对应的正序电压变化量相似度,进行故障源定位方法的准确性验证。定义定位误差率来描述定位结果的准确性,如式(17)所示。

$$e = |\lambda^* - \lambda'| \times 100\% \quad (17)$$

式中: λ^* 为实际故障距离; λ' 为仿真故障距离。误差率越小则定位越准确。各支路故障的平均定位误差率如表 3 所示。

表3 各支路故障的平均定位误差率

Table 3 Average positioning error rate of each branch fault

支路	平均误差率/%	支路	平均误差率/%
1	3.26	11	3.50
2	3.62	12	3.15
3	2.51	13	2.95
4	3.65	14	0
5	2.53	15	0.10
6	1.39	16	0.25
7	1.00	17	0.11
8	1.50	18	2.19
9	0.95	19	0.17
10	0.25	20	0.84

由表3可知:支路1—8,11—13,18的定位平均误差率为1%~4%,误差较大;支路9—10,14—17,19—20的定位平均误差率为1%以内,误差较小。对应附表A2正序电压变化量分析,故障源所在支路两端不直接与电源相接时,节点变化较多;故障源所在支路两端直接与电源相接时,节点变化较少,导致在定位此类故障源时所能依据的数据较少,准确率较低。

5 结论

文中针对故障型干扰源提出了基于正序电压的配电网故障源定位方法,该方法基于发生故障时各监测点的正序电压分布特性,利用正序电压变化量建立监测点信息库和各支路故障距离定位模型。基于马氏距离与Pearson相关系数定义了相似度指标,用于衡量待定位故障信息与信息库中各支路的匹配度,实现故障源所在支路选线。采用遗传算法,以确定支路的故障距离定位模型寻找最优故障距离,实现了配电网故障源定位。

该方法的判断参考信息只涉及发生故障时各监测点的正序电压变化量,规避了故障源类型与过渡电阻对定位结果的影响。进行故障源所在支路选线时,排除相似度低的支路,缩减了定位范围,减少了计算量。采用遗传算法概率化的寻优方法,自动获取和指导优化的搜索空间,自适应地调整搜索方向,寻找最优故障距离,实现故障源具体位置定位。遗传算法强大的全局寻优能力,解决了可能出现的局部最优解问题。

文中采用PSCAD搭建IEEE 14节点仿真模型,验证了所提方法能够对各种类型的故障源进行定位。对于电源侧故障,定位误差为1%~4%;对于用户侧故障,定位误差为1%以内。所提方法可在一定程度上帮助工程人员正确判断故障发生位置,对电能质量治理具有重要意义。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018036)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
XIAO Xiangning. Power quality analysis and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.

[2] YANG L, PENG J, WANG T, et al. Compliance verification and probabilistic analysis of state-wide power quality monitoring data[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 391-395.

[3] 刘旭娜, 肖先勇, 汪颖. 电压暂降严重程度及其测度、不确定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 644-658.

LIU Xuna, XIAO Xianyong, WANG Ying. Voltage sag severity and its measure and uncertainty evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 644-658.

[4] 王玥, 肖斐, 艾芊, 等. 基于深度置信网络的电能质量扰动事件分类[J]. 供用电, 2019, 36(1): 40-45.
WANG Yue, XIAO Fei, AI Qian, et al. Deep belief networks based classification of power quality disturbance events[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(1): 40-45.

[5] BACH Q K. Assessment of voltage SAG in distribution system regarding the uncertainty of wind-based distributed generation [C]// Proceedings of the 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. IEEE, 2011: 896-899.

[6] XU X, ZHAO X, LI J, et al. Quantitative credibility evaluation of global energy interconnection data[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 514-521.

[7] 李丹奇, 梅飞, 张宸宇, 等. 基于深度置信网络的电压暂降特征提取及源辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 150-160.
LI Danqi, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Deep belief network based method for feature extraction and source identification of voltage sag[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 150-160.

[8] BISWAL M, DASH P K. Detection and characterization of multiple power quality disturbances with a fast S-transform and decision tree based classifier[J]. Digital Signal Processing, 2013, 23(4): 1071-1083.

[9] 陶顺, 肖湘宁. 电力系统电能质量评估体系架构[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 171-175.
TAO Shun, XIAO Xiangning. Power system power quality assessment system architecture[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 171-175.

[10] CHATTOPADHYAY S, MITRA M, SENGUPTA S. Electric power quality[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2011.

[11] 王珂. 基于综合判据的电压暂降源定位方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
WANG Ke. Research on voltage sag source location method based on comprehensive criteria[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[12] 唐金锐. 电力线路在线巡视监测及故障精确定位的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
TANG Jinrui. Research on online patrol monitoring and precise fault location of power lines[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.

[13] 李泽文, 易志鹏, 杨毅, 等. 基于遗传算法的电网故障行波定位装置的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 77-83.
LI Zewen, YI Zhipeng, YANG Yi, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment for power grid based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 77-83.

[14] 邱玉涛, 肖先勇, 赵恒, 等. 满足电压暂降与故障位置均可观的监测装置二阶段配置[J]. 电网技术, 2014, 38(11):

- 3166-3172.
- QIU Yutao, XIAO Xianyong, ZHAO Heng, et al. Two-stage configuration of monitoring devices to meet both voltage sags and fault locations [J]. Power Grid Technology, 2014, 38(11):3166-3172.
- [15] 刘颖英,王同勋,冯丹丹,等. 基于多重判据的电压暂降故障源定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 103-111.
- LIU Yingying, WANG Tongxun, FENG Dandan, et al. Multi-criteria based fault source location method for voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 103-111.
- [16] 李勋,龚庆武,肖辉,等. 基于相关分析匹配度的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 90-95.
- LI Xun, GONG Qingwu, XIAO Hui, et al. Distribution network fault location based on correlation analysis matching degree [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 90-95.
- [17] 谭丹,杨洪耕,曲广龙. 基于故障距离分布函数的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 119-124.
- TAN Dan, YANG Honggeng, QU Guanglong. Distribution network fault location based on fault distance distribution function [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 119-124.
- [18] 朱超群. 基于故障信息的配电网故障定位研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- ZHU Chaoqun. Research on fault location of distribution network based on fault information [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [19] MOKHLIS H, LI H. Non-linear representation of voltage sag profiles for fault location in distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(1): 124-130.
- [20] 周超,田立军,侯燕文,等. 基于监测点优化配置的电压暂降故障点定位估计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 102-107.
- ZHOU Chao, TIAN Lijun, HOU Yanwen, et al. Voltage sag fault location estimation based on optimal configuration of monitoring points [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 102-107.
- [21] 林涌艺,邵振国,张嫣,等. 基于多测点正序电压相关性与典型模式匹配寻优的电压暂降源定位[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 35-46.
- LIN Yongyi, SHAO Zhenguo, ZHANG Yan, et al. Voltage sag source location based on multi-point positive sequence voltage correlation and typical pattern matching [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 35-46.
- [22] 肖先勇,崔灿,汪洋,等. 电压暂降分类特征可比性、相关性及马氏距离分类法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1299-1305.
- XIAO Xianyong, CUI Can, WANG Yang, et al. Comparability and relevance of voltage sag classifying features and classification methods based on Mahalanobis distance [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1299-1305.
- [23] 韩涵,王厚军,龙兵,等. 基于改进马氏距离的模拟电路故障诊断方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1713-1717.
- HAN Han, WANG Houjun, LONG Bing, et al. Fault diagnosis method of analog circuit based on improved Mahalanobis distance [J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1713-1717.
- [24] 陈功平,王红. 改进 Pearson 相关系数的个性化推荐算法[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 940-944.
- CHEN Gongping, WANG Hong. An improved personalized recommendation algorithm for Pearson correlation coefficient [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 47(6): 940-944.
- [25] LEE E, BAHN H. A genetic algorithm based power consumption scheduling in smart grid buildings [C]// International Conference on Information Networking. ICOIN, 2014: 469-474.

作者简介:



戴锋

戴锋(1973),男,学士,高级工程师,从事超、特高压电网安全生产管理工作(E-mail: zj_df@js.sgcc.com.cn);

刘贞瑶(1979),男,硕士,高级工程师,从事输电线路运检管理工作;

李丹奇(1996),女,硕士在读,研究方向为电力系统及其自动化。

附录 A

表 A1 IEEE 14 节点典型网络参数

Table A1 IEEE 14-bus typical network parameters

支路	首末端节点	支路电阻	支路电抗	支路电容
1	1—2	0.019 38	0.059 17	0.026 40
2	2—3	0.046 99	0.019 79	0.021 90
3	2—4	0.058 11	0.176 32	0.018 70
4	1—5	0.054 03	0.223 04	0.024 60
5	2—5	0.056 95	0.173 88	0.017 00
6	3—4	0.067 01	0.171 03	0.017 30
7	4—5	0.013 35	0.042 11	0.006 40
8	7—8	0	0.176 15	0
9	7—9	0	0.110 01	0
10	9—10	0.031 81	0.084 50	0
11	6—11	0.094 98	0.198 90	0
12	6—12	0.122 91	0.155 81	0
13	6—13	0.066 15	0.130 27	0
14	9—14	0.127 11	0.270 38	0
15	10—11	0.082 05	0.192 07	0
16	12—13	0.220 92	0.199 88	0
17	13—14	0.170 93	0.348 02	0
18	5—6	0	0.252 02	0
19	4—7	0	0.209 12	0
20	4—9	0	0.556 18	0

表 A2 信息库中各支路监测点信息
Table A2 Branch monitoring points formation in information base

支路	节点													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1.000	0.988	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
2	-1.000	1.000	0.992	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
3	-1.000	0.994	-1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
4	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	0.949	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
5	-1.000	0.969	-1.000	-1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
6	-1.000	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
7	-1.000	-1.000	-1.000	0.960	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
8	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
9	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	0.100	-1.000	1.000	-0.200	-0.600	-0.900	-1.000	-0.300
10	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.683	1.000	-0.109	-0.980	-1.000	-0.881
11	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.231	1.000	-1.000	-1.000	-1.000
12	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	-0.421	-0.818
13	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.114	1.000	-0.291
14	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.650	-0.875	-0.003	-0.825	-0.450	1.000
15	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.921	0.762	1.000	-1.000	-1.000	-0.980
16	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	0.441	-0.548
17	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.385	0.692	1.000
18	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
19	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
20	-1.000	-1.000	-1.000	0.105	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	-0.196	-0.600	-0.910	-1.000	-0.302

Fault source location method for distribution network based on positive sequence voltage

DAI Feng¹, LIU Zhenyao¹, LI Danqi², SHA Haoyuan², CHEN Xuan¹, ZHENG Jianyong²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As more and more devices sensitive to voltage fluctuation are widely connected to the power grid, the direct and indirect economic losses caused by the faults in the distribution network become more and more serious, which puts forward higher requirement for power supply quality. Accurate location of fault sources is an indispensable step in the treatment of power quality problems. A fault source location method for distribution network based on positive sequence voltage is proposed for fault-type disturbance. Based on the distribution characteristics of positive sequence voltage at each monitoring point when a fault occurs, the information based on monitoring points and the fault distance location model of each branch are established. The concept of similarity index is defined based on the correlation coefficient between Mahalanobis distance and Pearson correlation coefficient, which serves as the objective function to determine the location of the fault source. The genetic algorithm is used to find the optimal fault distance as the location result. The effectiveness and accuracy of the proposed method are verified by PSCAD simulation based on IEEE 14-bus network.

Keywords: fault location; positive sequence; Mahalanobis distance; Pearson correlation coefficient; genetic algorithm

(编辑 吴楠)