

基于粒子群聚类算法的小电流接地系统故障定位方法研究

提出一种基于粒子群聚类算法的小电流故障定位方法,该方法利用小波包变换对故障后的各线路段监测的数据进行计算,提取故障特征量,采用粒子群聚类算法对各特征量进行聚类分析,有效识别出故障区段和非故障区段。经大量试验仿真证明,该方法可以有效提高故障区段判断的正确率,适应未来配电网发展需求。

徐 振 许 明 汪 洋 夏 炜/国网安徽省电力公司淮南供电公司
杜向楠/国网电力科学研究院

0 引言

目前,小电流接地故障选线技术已经比较成熟,出现了各种选线算法^[1-4],包括群体比幅比相法、谐波分量法、有功分量法、突变量法、首半波法和暂态能量法等。在正确选线基础上,国内专家学者开始展开了对故障线路实行故障位置的定位研究,主要包括故障区段以及行波定位的理论研究^[5-9],故障区段定位算法主要集中于基于暂态信号的被动故障定位法、行波法故障定位以及信号注入法进行故障点检测。

本文在上述研究基础上,提出一种新的故障定位方法,基于小波包变换提取线路各段故障特征量值,利用粒子群聚类算法,对大量故障特征量进行综合计算,得出最终的故障区段位置。经大量仿真实验证明,该方法具有一定的实用性和可靠性。

1 小电流接地系统单相接地故障特征及定位原理

1.1 中性点不接地系统单相接地故障特征

中性点不接地电网正常运行时,各

相对地电压对称,各相对地电容流过的电容电流相同,且超前相电压 90° ,各线路中不会出现零序电流。当系统发生单相接地时,系统出现了零序电压,相当于在接地点加入了一个零序电压源,向各线路提供零序电流。流过非故障分支上的零序电流方向为从母线指向线路,超前零序电压 90° ;流过故障分支上的零序电流方向从线路指向母线,滞后零序电压 90° 。单相接地故障零序等效网络图如图1所示。

图1中, C_a 为故障点前线路以及各非故障线路对地电容之和; C_b 为故障点后线路对地电容之和。

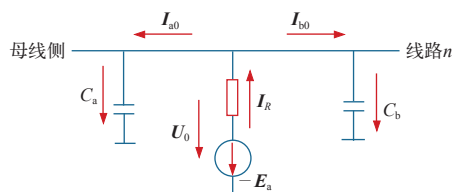


图1 单相经电阻接地故障零序网络图

1.2 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障特征

对于中性点经消弧线圈接地系统,消弧线圈通常处于过补偿或者全补偿的状态,电流接地系统发生单相接地故障时,由于消弧线圈电感电流的补偿作用,故障点前后的零序电流基波相位接近相同。但是消弧线圈只能补偿基波电流,不能补偿谐波分量,因此从零序回路的等效模型来看,零序电流的谐波分量方向是从故障点流向母线及线路的末端。



徐 振/工程师

关键词/Keywords

小电流接地·
小波包变换·
粒子群聚类·
故障定位·

1.3 单相接地故障信号突变奇异特征

当系统发生单相接地故障时，故障量是故障网络在故障源激励下的零初始状态响应，故障电源的突然投入必然引起电压、电流的瞬时突变。在故障线路上故障路段的故障电流突变极性与非故障路段的突变极性相反，根据此特征可以进行区段定位判据。

小波包变换可以对突变信号进行检测，并反映突变位置及信号强度，根据小波包奇异性检测理论对采集各终端故障数据进行小波包变换，模极大值对应了信号的突变点，模极大值的极性对应了信号突变的方向。

1.4 故障区段定位判据

根据以上分析可知，可依据基波零序电流相位法、谐波法以及暂态突变极性法作为故障区段定位判据进行故障定位。判据具有以下特点。

1) 对于中性点不接地系统，单相接地各线路零序电流与零序电压的相位关系理论上不受过渡电阻大小影响，即故障路段零序电流相位滞后零序电压相位 90° ，非故障路段零序电流相位超前零序电压相位 90° 。

2) 中性点经消弧线圈接地系统由于消弧线圈的补偿作用，利用基波的定位方法失效，可以利用5次谐波分量法进行定位，其判据与基波方法相同。

3) 当发生高阻接地等故障时，接地电流较小，部分线路终端采集计算的基波或5次谐波相位容易被噪声影响导致较大误差，利用暂态信号突变量特征可以有效提高判据的正确性，当系统发生弧光接地时，会有持续多次的暂态故障特征，基于小波模极大值理论可以有效提取该故障下的故障特征值。

2 基于小波包变换提取故障特征量

2.1 小波包变换

小波包变换是建立在小波变换的基础上的，其可以实现信号频带的均匀划分，能够更好地提取信号的时频特性，具有谐波分析及暂态突变信号的检测能力。

小波包可以用以下定义：设正交小波的滤波器系数为 h_n 、 g_n ，记尺度函数 $\phi(t)$ 为 $u_0(t)$ ，记小波函数 $\psi(t)$ 为 $u_1(t)$ ，尺度方程为

$$u_0(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k u_0(2t-k) \quad (1)$$

$$u_1(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k u_0(2t-k) \quad (2)$$

定义式(3)、式(4)，即

$$u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k u_n(2t-k) \quad (3)$$

$$u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k u_n(2t-k) \quad (4)$$

定义的函数集合 $\{u_n(t)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 为由 $u_0(t) = \phi(t)$ 所确定的小波包， $\mathbb{Z}$ 为整数集。

2.2 利用小波包变换进行特征量提取

1) 利用小波包变换提取突变时刻对应的小波极大值及极性。

2) 利用小波包变换提取5次谐波相位信息。

3) 利用小波包变换提取基波相位信息。

3 基于粒子群聚类方法的故障区段定位

3.1 粒子群聚类算法

聚类分析是指根据一组样品的特征，利用某种相似性度量的方法，把特征相同或相近的归为一类实现聚类划分。粒子群聚类算法是一种有效的全局寻优算法，基于群体智能理论的优化算法，采用速度-位移模型，保留了基于种群的全局搜索策略，避免了复杂的遗传操作，具有更快的收敛特性以及全局寻优能力，同时避免了传统聚类方法易陷入局部极小值和对初始值敏感等缺陷^[10-11]。具体原理如下。

设样本集 $X = \{X_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ ，其中 X_i 为 n 维向量，聚类过程是指找到 m 个聚类中心，使得总的类内离散度 J 最小，即

$$J = \sum_{j=1}^M \sum_{X_i \in \omega_j} d(X_i, \overline{X^{(\omega_j)}}) \quad (5)$$

式中， $\overline{X^{(\omega_j)}}$ 为第 j 个聚类中心； $d(X_i, \overline{X^{(\omega_j)}})$ 为向量到聚类中心的距离； J 为所有向量到聚类中心距离

总和。聚类过程实质是求类内离散度 J 最小、类间距最大的过程。

基于粒子群算法求解聚类过程,是将每个 n 维向量看作一个粒子,并将聚类中心集合赋予每个粒子,所有向量组成一个粒子群。每个粒子根据给定的粒子适应度函数 J_e ,按照粒子群算法步骤找到最优粒子,即聚类中心。

$$J_e = \frac{\sum_{j=1}^{N_c} \left[\sum_{z_p \in c_j} d(z_p, m_j) \right] / |c_j|}{N_c} \quad (6)$$

$$m_j = \frac{1}{n_j} \sum_{z_p \in c_j} z_p \quad (7)$$

$$d(z_p, m_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_b} (z_{pk} - m_{jk})^2} \quad (8)$$

式中, N_b 为数据维数; N_c 为聚类中心个数; z_p 为向量(故障样本); n_j 为聚类中心; c_j 为向量个数, m_j 为均值。

粒子群聚类方法步骤如下。

- 1) 初始化粒子群,设置聚类数目和粒子数目。
- 2) 计算聚类中心,并作为粒子位置编码。
- 3) 计算粒子适应度,将粒子初始速度设为零。
- 4) 根据粒子适应度,产生全局和个体最优位置。
- 5) 按粒子群优化算法的位置公式更新粒子的位置和速度。
- 6) 根据粒子的聚类中心编码对样品进行聚类划分,重新计算聚类中心和粒子适应度。
- 7) 更新粒子最优位置,判断是否达到预设的迭代次数。
- 8) 结束聚类过程,返回全局最优位置。

3.2 基于粒子群聚类故障定位方法流程

1) 实时采集监测线路段测点的零序电流以及站内母线零序电压值,对每个采样点进行GPS授时,精确到微秒,在故障时刻启动录波,预录3个周波,故障后2个周波。

2) 利用小波包算法提取小波变换模极大值、极性以及5次谐波、基波相位,主站对接收的所有终端数据进行预处理,将所有特征量中的较大数

剔除(坏数据)并以均值替代。

3) 将每个终端提取的特征值作为一个向量 X_i ,特征量的个数对应向量的维数 n 。将预处理后的数据输入至粒子群聚类分析算法程序。

4) 根据3.1小节中的方法进行粒子群聚类算法分析,得到最优聚类中心。聚类个数预设置为两个,即故障向量集和非故障向量集。

4 实验仿真及算法验证

4.1 搭建仿真模型

利用Matlab/Simulink仿真软件建立10 kV中性点经消弧线圈接地配电系统,模型包括多条出线,架空线参数如表1所示。

表1 架空线参数

相序	电阻/(Ω/km)	电容/(μF/km)	电感/(mH/km)
零序	0.23	0.006 0	5.474 9
正序	0.17	0.009 7	1.209 6

只针对故障线路进行测点仿真,根据图2搭建故障仿真模型。终端编号由①~⑩组成。故障点位置在⑥、⑦之间,接地电阻设为1.5 kΩ,输出信号人为加入系统随机噪声,采用方差 σ 等于0.1的白噪声。

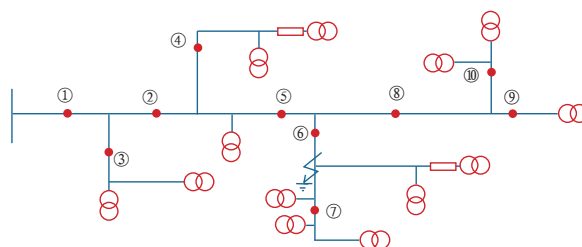


图2 故障线路段测点分布示意图

4.2 故障仿真数据

表2为故障后故障线路各终端利用小波包提取的5次谐波幅值、相位以及小波变换模极大值。其中相位值为零序电流减去零序电压相位差值。

4.3 经粒子群聚类算法后的数据点图

从表2可以看出,单相接地故障后5次谐波法因为谐波值很小,个别终端值因噪声污染计算误差较大,若只按照某一种特征量进行故障判定,

表2 故障后故障线路各终端参数

终端编号 /特征量	5次谐波幅值	5次谐波相位	小波变换模极大值 (带正负号)
终端1	2.209 6	-87.78	-1.712 2
终端2	1.980 2	-90.09	-1.681 0
终端3	0.591 1	58.59	0.593 7
终端4	0.073 4	92.01	0.771 2
终端5	1.143	-90.19	1.378 82
终端6	2.960	23.01	-1.177 7
终端7	0.257 8	0.91	0.663 7
终端8	1.721 9	123.62	0.570 2
终端9	0.000 3	-45.37	0.901 1
终端10	0.214 3	78.96	1.348 2

很难准确判断故障区段。将表2中的数据输入至粒子群聚类算法进行分析,聚类个数定为2,得出聚类中心值和终端划分,如表3所示。

表3 进行聚类后的聚类中心

聚类群集	聚类中心	
	1	2
特征量1	0.276 5	2.073 2
特征量2	78.076 7	-72.765 7
特征量3	0.741 4	-0.798

图3为各终端位置及聚类中心位置。圆点代表各终端位置,方形代表聚类中心位置。

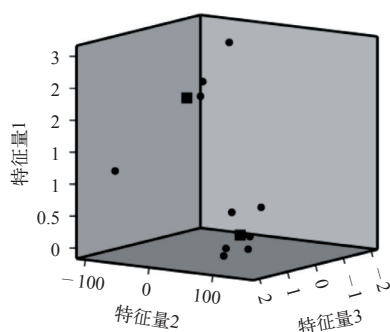


图3 各终端位置及聚类中心位置

5 结束语

提出一种基于粒子群聚类算法的小电流故障在线定位方法,该方法通过小波包变换提取多维故障向量,并将线路每个测量终端的数据作为粒子群的一个粒子,依据粒子群聚类算法实现故障区段定位。随着智能配电网的发展和无线传感器

网络的普及,未来将会有大量智能终端装设在配电网,粒子群聚类算法对这种大数据量和高维空间特点的样本集具有很好的划分能力和效率,是一种有效的故障定位方法。

参考文献

- [1] 白雪松,刘震宇,王轶,等.小电流接地电网的一种故障选线方法[J].电气应用,2015,34(5):68-71.
- [2] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等.应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J].中国电机工程学报,2001,21(10):78-82.
- [3] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠.中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J].西安交通大学学报,2004,38(2):195-199.
- [4] 齐郑,艾欣,杨以涵,等.基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线方法的有效域[J].电网技术,2005,29(12):33-36.
- [5] 郑顾平,杜向楠,齐郑,等.小电流单相接地故障在线定位装置研究与实现[J].电力系统保护与控制,2012,40(8):135-138.
- [6] 杨以涵,齐郑.中压配电网单相接地故障选线及定位技术[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [7] 唐华,田俊强,吴镒,等.应用小波熵的小电流接地系统故障区段定位方法[J].电气应用,2014,33(23):50-52.
- [8] 季涛,刘向坤,孙波.基于暂态零序分量的小电流接地故障定位方法[J].电气应用,2012,31(16):96-98.
- [9] 季涛,孙同景,徐丙垠,等.配电混合线路双端行波故障测距技术[J].中国电机工程学报,2006,26(12):89-94.
- [10] 李雅洁,孟晓丽,宋晓辉,等.基于最优FIR滤波器与层次聚类的配电网单相接地故障选线方法[J].电网技术,2015,39(1):143-148.
- [11] 王立,朱学峰.基于模糊聚类的多神经网络在短期电力负荷预测中的应用[J].电气应用,2007,26(7):24-27.

(收稿日期:2015-11-03) EA