

基于行波法的谐振接地电网单相接地故障定位方法

针对谐振接地系统单相接地故障定位困难和准确度低的问题,提出一种利用暂态行波进行故障定位的新方法。首先介绍行波的故障定位理论,在此基础上提出基于小波理论的行波奇异性检测和时刻标定方法,并给出具体的故障区间和故障点的定位方法。最后对该方法进行仿真验证,通过仿真结果验证了其有效性。

张惠娟 郑文龙 冯 珏 刘伯颖/河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建国家重点实验室 张渭澎/天津市电力公司城西供电分公司



张惠娟/教授

我国大多数配电网都采用中性点经消弧线圈接地方式,其发生单相接地故障时故障电流小,线电压仍能保持对称,不会造成供电中断。然而长时间单相接地故障运行容易破坏相间绝缘,造成两相接地短路故障,弧光接地还会引起系统过电压,进而损坏设备,因此及时确定故障点并排除故障非常重要。解决以下问题即可确定故障点:当母线有很多出线时,需要进行故障选型;故障线确定后,需要确定故障点所在的分支或故障区段;最后在故障区段中确定故障点位置。故障选型技术已经有了相当的发展,但故障的定位问题一直未被很好地解决,本文的研究内容即为单相接地故障点的定位。

关键词/Keywords

谐振接地系统·
故障定位·
行波·
小波理论·

单相接地行波的故障定位理论

电力系统行波是一种突变型的、非平稳的高频暂态信号,当谐振接地系

统发生单相接地故障时,故障点就会出现暂态行波,并以一定的波速沿着电力网向远离故障点传播,并在阻抗不连续点(主要包括故障点、母线、线路的终端及分支的节点和端点)发生透射和反射。实际应用中,当配电网某一点发生单相接地故障时,故障产生的行波向两侧传播,并在阻抗不连续点处透射和反射。在母线处检测行波,当已知行波的传播速度 v 时,可以确定各个波头到达检测端的时刻,从而确定故障区间;在故障区间内,利用区间端点处相关的反射波即可确定故障点具体位置。

为了及时检测到输电线路的故障特征信号,一般在输电线路的两端安装故障信号测量装置,当线路中某一点出现故障,故障点会产生大量的行波向线路两端进行传播,在行波的传输过程中,折射行波与入射行波极性相同,对故障信号干扰很小,可以忽略不计,但反射行波对故障信号采集有影响。下面分别对故障行波在母线处、故障点处和对端母线处的反射进行分析。图1为一个母线节点的等效电路。

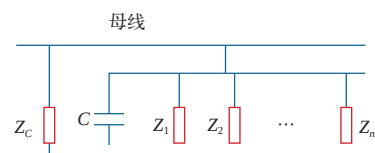


图1 母线节点的等效电路

图1中, Z_c 为故障线路的波阻抗, Z_1 、 Z_2 、 Z_n 为同一母线上非故障线路的波阻抗,为线路分布电容。

河北省科技支撑计划项目(13212104),天津市高等学校科技发展基金计划项目(20130423),大学生创新创业训练计划国家级与省级立项项目(201310080017)。

假设母线上所有输电线路的分布参数相同,波阻抗数值均为 Z ,那么这个母线节点的电压反射系数和电流反射系数的频域函数形式为

$$\begin{cases} \beta_u(j\omega) = \frac{1-n-j\omega CZ}{1+n+j\omega CZ} \\ \beta_i(j\omega) = \frac{j\omega CZ+n-1}{j\omega CZ+n+1} \end{cases} \quad (1)$$

由上式可知,电压反射系数和电流反射系数与行波的频率和母线节点的出线数目密切相关,对于输电线路来说,母线的进线数为2,出线数不小于4。

对于故障线路,初始行波模量由入射行波与反射行波叠加而成,其表达式为

$$\begin{cases} u = u_q + u_f = u_q + \beta_u u_q \\ i = i_q + i_f = i_q + \beta_i i_q \end{cases} \quad (2)$$

当输电线路发生单相接地故障时,接地点处会存在接地电阻,其数值随接地情况的不同而变化。故障点的出现使得输电线路上的波阻抗不再相同,相当于出现了不连续点,在这一点行波会出现反射与折射现象。假设输电线路的波阻抗为 Z ,接地故障电阻为 R_f ,那么在接地故障点的折射系数 α 、反射系数 β 分别为

$$\alpha_u = \frac{2R_f}{z+2R_f} \quad (3)$$

$$\beta_u = -\frac{z}{z+2R_f} \quad (4)$$

$$\alpha_i = \frac{2R_f}{z+2R_f} \quad (5)$$

$$\beta_i = \frac{z}{z+2R_f} \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可知,电压反射系数与电流反射系数随着接地故障电阻的增大而变小,由式(2)可知电压反射系数与电流反射系数的减小会使得电压行波与电流行波的故障特征不明显,不利于对暂态故障特征信号的提取。

暂态故障行波在线路对端母线的反射规律与在线路始端母线的反射规律相同,由行波的传输规律可知,正向电压行波与反向电压行波具有相同的极性,正向电流行波与反向电流行波具有

相反的极性,结合上述对始端母线反射规律的分析,可以得出这样的结论:接地故障线路产生的初始暂态电压行波和电流行波与其传输到对端母线反射回来的反射电压行波和电流行波的极性都相反。

小波变换对信号奇异性检测理论

谐振接地系统出现单相接地故障时,会在线路中产生特征行波信号,这些行波信号中包含各个阻抗不连续点反射来的行波波头是信号中的奇异点,正确地提取奇异信号信息对于正确诊断故障点很重要。与原有的信号提取方法相比,小波变换具有极大的优势,它可以对包含丰富暂态故障特征的电压信号、电流信号进行处理,并迅速检测出故障信号的奇异点及这个点所对应的时刻,利用这些信息再结合行波传输的特征就可以算出故障点与所设定参考点之间的距离,从而实现故障点的准确定位。

1. 小波变换的行波奇异值检测理论

函数 $f(x)$ 的局部化特性可以利用小波变换 $W_f(s, x_0)$ 在细微尺度上实现表征,因此,可以利用下面的定理将小波变换与任意一点李氏指数的正则性相结合。

定理:设 $f(x) \in L^2(R)$, $[m, n] \in R$, $\alpha \in [0, 1]$, 对 $\forall \varepsilon > 0$, $f(x)$ 在 $L^2(R)$ 上一致李氏指数的充要条件是对任意常数 A , $x \in [m + \varepsilon, n + \varepsilon]$, $a > 0$, 有式(7)成立,即

$$W_f(a, x_0) \leq Aa^\alpha \quad (7)$$

由上述定理可以看出小波变换能够表征信号函数的局部奇异特性。实际的数字信号处理过程中,是利用信号函数的小波变换模极大值点来实现信号的奇异性检测。

如果对任意 $x \in (x_0, \delta)$, 有

$$|W_f(a_0, x)| \leq |W_f(a_0, x_0)| \quad (8)$$

点 (m_0, x_0) 即为函数 $f(x)$ 的模极大值点。

由上面的定理可以得出,对任意 $x \in (x_0, \delta)$, 当 $a \rightarrow 0$ 时, $|W_f(a, x)| = 0(a^\alpha)$, 对于函数 $f(x)$ 的奇异点 x_0 , 其李氏指数 α 的数值小于 x_0 邻域 (x_0, δ) 内其他点的 α 数值, 在 $a \rightarrow 0$ 时, x_0 点处经小波变换模极大值

的衰减速率最慢,此时, x_0 邻域 (x_0, δ) 内其他点同时收敛到 x_0 点成为模极大值。

利用小波分析检测信号突变点的方法是:对信号进行分析,在信号出现突变时,其小波变换后的系数具有模量极大值,小波变换系统重构的信号由多个分频带组成,在高频带中信号的奇异点附近有较大的幅值。因而可通过对高频带信号的分析来寻找行波中的反射波。

2. 小波变换的检测时刻标定

利用小波变换模极大值点来实现信号的奇异性检测,然后根据模极大值理论实现对暂态故障特征行波波头到达线路两端母线测量端的时刻标定。为了提高时刻标定的准确度,对连续的暂态特征行波信号进行离散采样,采用两种不同的采样频率进行采样,即首先进行粗采样,采样频率为2 000 Hz,从设定的零时刻开始,每隔500 μ s采样一次,实现了将线路故障点所产生的暂态电压和电流信号的离散化;然后对所得到的2 000 Hz频率下的每一个采样区间再次进行准确采样,采样频率为1 MHz,这样可以将每个粗采样区间的连续信号再次离散化,可提高暂态故障行波信号的离散采样准确度和暂态故障行波波头到达测量端时刻标定的准确度,而所标定的暂态故障行波波头到达线路测量端的时刻以准确采样条件下暂态故障行波波头到达线路两测量端的时刻为准。

故障定位过程

1. 故障区间的确定

图2为单相接地故障时行波传播路径,在母线M端检测故障。B-C区间的F点发生故障,故障产生的行波遇到阻抗不连续点时会发生透射和反射,在M点能相继检测到这些行波。已知行波的传

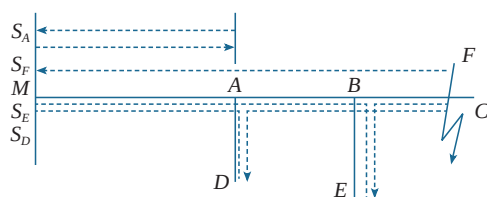


图2 单相接地故障时行波传播路径

播速度 v ,根据线路的结构和各区段的长度,可以确定各个波头到达检测端的时刻。如果能检测到某分支端点的反射波,就可以确定故障在其下方区段;如果不能检测到某分支端点的反射波,就可以确定故障在其上方区段。

线路的区段由相邻的两个不连续点组成,对于图2中的线路M-C,共有5个区段:M-A、A-B、B-C、A-D和B-E。用来确定故障区段的波称为特征波,当特征波波头到达检测端时计算特征波的信息,以确定故障区段。在计算特征波的信息时,需计算特征波的局部能量。局部能量是相对于整个取样时间范围内信号的总能量而言,它是信号在某一时间范围的能量,能反映该时间范围内信号的强弱,由这些局部能量组成一个特征矩阵。对于行波信号,线路上阻抗不连续点产生的反射波波头是信号的奇异点,在利用小波分解系数重构的高频信号中,奇异点的信号能量会高于附近信号的能量,因此根据信号的局部能量可以找到来自阻抗不连续点的反射波波头。

在特征波到达M端时,对信号求取局部能量 e^* ,当线路上有 p 个分支时,特征波的数量为 $m=2p+1$,一个特征矩阵中需要计算的局部能量为 $2p+1$ 。特征波的总能量 E 和每个特征波的归一化局部能量 e_i 为

$$E = \sum_{i=1}^{2p+1} e_i^* \quad (9)$$

$$e_i = e_i^* / E \quad (10)$$

为了降低误判概率,一般使用多个频带信号进行局部能量计算而组成一个特征矩阵。利用小波变换对原始信号进行多层分解,对其中的 n 个频带信号进行局部能量计算,得到 n 组局部能量,从而组成特征矩阵 T ,可对故障区间进行判断。这里有

$$T = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1,2p+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{n,2p+1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

2. 故障点的确定

在已知故障区段的前提下,利用与故障相关的2个反射波,可确定故障点的位置。图3为单相

故障时反射波的传播路径, 设故障 F 发生在 $A-B$ 区段, 其中 B 为故障区间分支的端点, A 为主干线上故障区段的上方节点, D 为分支 $A-D$ 的端点, L_{AD} 是 $A-D$ 区段的长度, L_{AB} 是故障所在区段 $A-B$ 的长度, L_{MA} 是 $M-A$ 的长度。 S_{FA} 是由故障上方节点 A 反射回故障点, 然后又从故障点传播到 M 点, 传播路径为 $F \rightarrow A \rightarrow F \rightarrow A \rightarrow M$, 与初始行波波头的时差是 $2L_{AF}/v$; S_{FD} 的传播路径 $F \rightarrow A \rightarrow F \rightarrow D \rightarrow A \rightarrow M$, 与初始行波波头的时差是 $2(L_{AF} + L_{AD})/v$ 。两者以初始行波波头 S_F 到达监测点的时间为基准, S_{FA} 到达 M 的时间范围是已知的, 表示为

$$T_{FA} = (0 \sim 2L_{AB} / v) \tag{12}$$

同理, S_{FD} 到达 M 的时间范围为

$$T_{FD} = [2L_{AD} / v \sim 2(L_{AD} + L_{AB}) / v] \tag{13}$$

S_{FA} 和 S_{FD} 到达监测点的时间差是固定值 $2L_{AF}/v$, 除去该固定值的时间差, 2个波到达检测点的时间只与 F 点的位置有关, 即只与 L_{AF} 的长度有关。令 $t = 2L_{MA}/v$, 则故障距离可按式计算得到

$$L_F = L_{MA} + v^*t / 2 \tag{14}$$

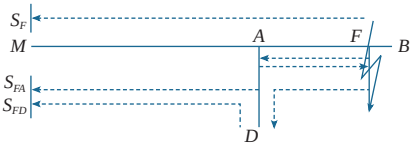


图3 单相接地故障时反射波的传播路径

仿真及结果分析

当谐振接地系统发生单相接地故障时, 要进行故障定位, 首先要获取准确的故障信息, 本文利用小波奇异值检测其特性, 以获取准确的故障信息。

仿真算例选取: 假设线路1发生单相接地故障, 时刻 $T = 0.02\text{ s}$, 接地电阻为 $100\text{ }\Omega$, 距离母线 4 km 。图4为故障点电压的小波分解图。

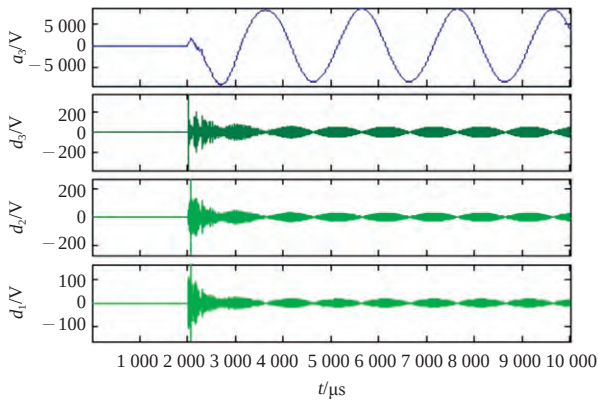


图4 故障点电压的小波分解图

仿真结果表明, 小波变换对于故障点信息的提取具有准确、快速的优点, 适用于行波定位方法的波头计算和时刻标定, 下表为三次仿真获得的故障数据。

表 三次仿真获得的故障数据

仿真 次序	故障点(距离M端) /km	行波波头到达母线端时刻 /μs	母线端波头峰值 / $\times 10^4\text{ V}$	反射行波波头到达母线端 /μs	测量距离(距M端) /km	绝对误差 /km	相对误差 (%)
1	4	32.3	4.092 0	187.2	3.970	-0.030	0.75
2	4	31.1	4.045 0	168.8	3.958	-0.042	1.05
3	4	31.7	3.997 7	171.0	3.946	-0.054	1.35

由上表可知, 该方法对故障的定位过程所需时间短, 不超过 $200\text{ }\mu\text{s}$, 故障距离的相对误差也在2%以内, 完全符合谐振接地系统的单相接地故障检测要求。

结束语

本文介绍了谐振接地系统单相接地故障的行波定位方法, 定位过程包括故障区间确定和

故障点位置确定, 在行波故障定位原理的基础上, 着重介绍了小波变换对故障行波的检测、行波波头的计算和时刻标定, 通过所获得的信息, 给出了故障区间和故障点位置确定的具体方法。最后通过Matlab对该方法进行仿真验证, 结果表明, 该方法用于单相接地故障的定位切实可行。

(下转第96页)

- [5] 张剑, 孙元章. 三相单级光伏并网系统对配网侧负荷建模的影响 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (2) : 73-78.
- [6] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Marco Liserre, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (5) : 1398-1409.
- [7] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] Amirnaser Yazdani, Prajna Paramita Dash. A control methodology and characterization of dynamics for a photovoltaic (PV) system interfaced with a distribution network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (3) : 1538-1551.
- [9] Michael E Ropp, Sigifredo Gonzalez. Development of a Matlab/Simulink model of a single phase grid connected photovoltaic system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23 (3) : 195-202.
- [10] Seu Kim, Jin Hong Jeon, Chang Hee Cho, et al. Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis solar energy [J]. 2009, 83 (5) : 664-678.
- [11] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (5) : 1198-1208.
- [12] 梁宏晖. 小功率光伏发电及最大功率跟踪控制的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [13] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Yong Kang. A variable step size INC MPPT method for PV systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (7) : 2622-2628.
- [14] Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng. A single-stage three-phase grid-connected photovoltaic system with Modified MPPT method and reactive power compensation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (4) : 881-886.

(收稿日期: 2015-02-10) EA

(上接第71页)

参考文献

- [1] 吴琦. 小波分析法在配电网谐振接地系统故障选线的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [2] 张慧芬, 张帆, 潘贞存. 基于注入信号法的配电网单相接地故障自动定位算法 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (6) : 19-43.
- [3] 孙霞. 配电网单相接地故障选线方法研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2007.
- [4] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005 (4) .
- [5] 唐晓初. 小波分析及其应用 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006.
- [6] 季涛. 基于暂态行波的配电线路故障测距研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [7] 林圣, 梅俊涛, 陈双, 等. 基于暂态行波时频特征的输电线路故障检测与选相方法 [J]. 电网技术, 2012, 36 (7) : 48-53.

(收稿日期: 2014-09-04) EA