

谐振接地系统暂态波形差异性识别法接地选线

郭谋发, 高源, 杨耿杰

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 利用谐振接地系统发生单相接地故障时, 故障线路与非故障线路间的暂态零序电流波形差异性大于非故障线路间的暂态零序电流波形差异性的特点, 提出一种基于暂态波形差异性识别的接地选线新方法。对各线路故障暂态零序电流波形进行小波包分解、重构及信号增强处理, 根据各频带频率大小确定该频带的时间窗的划分数量, 求取各组时间窗波形的分布特征矩阵及其相互间的相对熵, 用于衡量同组时间窗波形间的差异程度, 采用等权重投票法统计各频带各组时间窗的初步选线结果并确定故障线路。大量仿真结果表明该选线方法选线准确、可靠。

关键词: 接地选线; 小波包变换; 相对熵; 波形差异性识别; 等权重投票; 谐振; 接地

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.009

0 引言

谐振接地系统发生单相接地故障时, 由于故障情况复杂且故障电流较微弱, 以及受线路结构参数、互感器非线性特性、电磁干扰等因素影响, 故障暂态零序电流的频谱特性、能量分布及衰减特性有着很大的差异, 其选线保护问题长期以来未能得到很好的解决。

综合国内外研究现状, 根据是否利用故障信号, 可将能在谐振接地系统中应用的选线保护原理分为注入信号跟踪法和利用故障信号法, 其中利用故障信号法又可分为利用故障信号稳态量和暂态量 2 类。谐振接地系统发生单相接地故障时, 因故障电流较微弱、电弧不稳定及随机因素等的影响, 基于故障信号稳态量的选线保护方法在实际应用时效果不理想, 而利用比故障信号稳态量大若干倍的故障信号暂态量进行选线保护是近年来该领域的研究热点^[1]。采用的信号量主要有零序电流、零序电压、行波及相电流等, 采用的特征量主要有能量^[2]、突变量^[3]、幅值^[4]及极性^[5]等, 采用的数学方法主要有小波(包)法、Prony 法、S 变换法、形态学法及 HHT 法^[6]等。

单一特征量难以适应所有故障情况^[7]; 各线路的故障暂态零序电流波形中包含了极性、幅值及相位等信息, 比较各线路故障暂态零序电流波形差异性, 则同时进行了多种信息的比较, 有利于提高选线的可靠性。本文利用谐振接地系统发生单相接地故障时, 故障线路与非故障线路暂态零序电流波形的差异性大于非故障线路间暂态零序电流波形的差异性的特点, 提出一种基于暂态波形差异性识别的接地选线新方法。该方法求取故障暂态零序电流波形时

频分布特征矩阵间的相对熵, 用其表征波形间的差异度, 进而确定接地的故障线路。

1 暂态波形差异性识别法选线依据

用 MATLAB 的 SPS 工具箱搭建含 7 条出线的谐振接地系统仿真模型^[8-9]见图 1。架空线路正序参数: $R_1=0.17 \Omega/\text{km}$, $C_1=0.0097 \mu\text{F}/\text{km}$, $L_1=1.21 \text{mH}/\text{km}$ 。架空线路零序参数: $R_0=0.23 \Omega/\text{km}$, $C_0=0.008 \mu\text{F}/\text{km}$, $L_0=5.5 \text{mH}/\text{km}$ 。电缆线路正序参数: $R_1=0.27 \Omega/\text{km}$, $C_1=0.339 \mu\text{F}/\text{km}$, $L_1=0.255 \text{mH}/\text{km}$ 。电缆线路零序参数: $R_0=2.7 \Omega/\text{km}$, $C_0=0.28 \mu\text{F}/\text{km}$, $L_0=1.019 \text{mH}/\text{km}$ 。消弧线圈过补偿度设为 5%, 计算得 $L=0.803 \text{H}$ 。

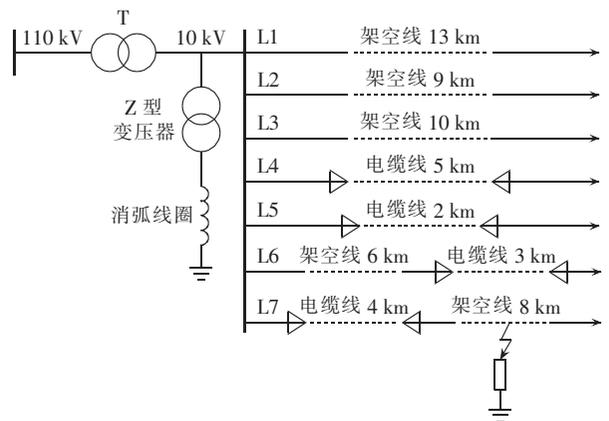


图 1 谐振接地系统仿真模型

Fig.1 Simulation model of resonant earthed system

故障点零序电源, 即故障相电源电压为系统唯一的零序电压源^[10]。忽略线路阻抗时, 零序电压源 u_0 与任意一条非故障线路零序电流间的关系为:

$$i_m = C_m^0 \frac{du_0}{dt} \quad (1)$$

其中, $m(m=1, 2, \dots, S)$ 为线路编号, S 为线路数; i_m 为第 m 条非故障线路的零序电流; C_m^0 为第 m 条非故

障线路的等效零序分布电容。

由式(1)可知,非故障线路的暂态零序电流主要与线路的零序分布电容相关,所有非故障线路的充放电过程相似,非故障线路间的暂态零序电流波形差异性较小。而故障线路暂态零序电流等于非故障线路暂态零序电流与流经消弧线圈的暂态零序电流的叠加,故障线路的零序电流为:

$$i_f = -(i_1 + \dots + i_m + \dots + i_s + i_L) \quad (2)$$

其中, i_L 为流经消弧线圈的零序电流; i_s 为第 s 条线路的零序电流。

因此,故障线路与非故障线路间暂态零序电流波形的差异性较大。

假设线路 L1 及母线在故障合闸角为 30° 时发生单相接地故障,接地电阻为 $2 \text{ k}\Omega$,线路 L1 接地位置距母线 6 km ,则线路 L1、L4、L7 的故障暂态零序电流波形如图 2 所示。

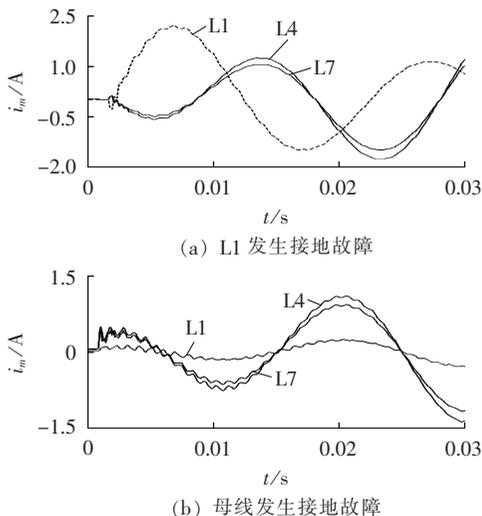


图 2 高阻接地时故障暂态零序电流
Fig.2 Transient zero-sequence current of grounding fault with high resistance

假设线路 L1 及母线在故障合闸角为 70° 时发生金属性接地,线路 L1 接地位置距母线 6 km ,则线路 L1、L4、L7 的故障暂态零序电流波形见图 3。

由以上分析可知谐振接地系统的线路发生单相接地故障时,故障线路与非故障线路间暂态零序电流波形的差异性大于非故障线路间暂态零序电流波形的差异性;在故障合闸角及接地电阻等情况相近的条件下,相对于线路发生单相接地故障,母线发生单相接地故障时,各线路的暂态零序电流波形较相似。

2 利用暂态波形差异性识别的选线方法

各线路故障后首个周期的暂态零序电流波形经小波包分解、单支重构后得到各频带重构系数,对各重构系数进行信号增强,考虑暂态波形时频局部特

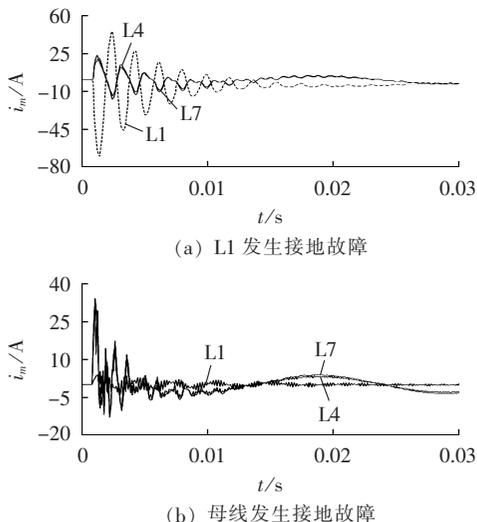


图 3 金属性接地时故障暂态零序电流
Fig.3 Transient zero-sequence current of grounding fault with low resistance

征,根据各频带频率大小确定频带的时间窗划分数量,对增强后的同频带重构系数进行等间隔划分,获得多组时频小块波形。求取各组时频小块波形的分布特征矩阵,进而算得各分布特征矩阵间的相对熵,用于衡量同组时间窗波形间的差异程度,得到各组时间窗的选线结果。采用等权重投票法统计各组时间窗的选线结果,得到各频带的初步选线结果,进而确定故障线路。

2.1 暂态波形分布特征矩阵

各线路故障后首个周期的暂态零序电流波形经小波包分解重构后,均得到多个频带的重构系数^[11],假设某个频带重构系数为:

$$A = \{A(k), k=1, 2, \dots, K\} \quad (3)$$

其中, K 为采样点数。

对单频带重构系数 A 做时域的分割有利于比较各线路对应频带波形间的时频局部特征^[12]。对 A 做等时间间隔的划分,则各时间窗内采样点数量相同,同频带等间隔时间窗划分方法如图 4 所示。

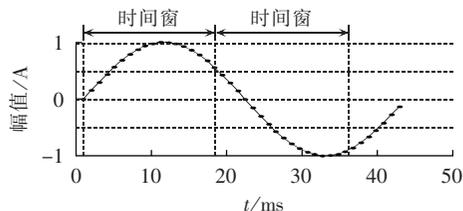


图 4 时间窗划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of time-window division

根据各频带的频率范围确定其时间窗的划分数量,频率越高的频带,分割的时间窗数量越多。各频带按频率由低到高依次排列,可令前 N 个频带时间窗数量为 1,第 $N+1 \sim 2N$ 个频带的时间窗数量为 2,依此类推。对各线路故障暂态零序电流波形各频带

内的所有时间窗进行不重复的编号,将所有线路相同频带对应时间窗内的波形归为同一组,其组数与该频带内的时间窗数量相等。

取第 m 条线路某频带内的一个时间窗重构系数 B 。为增强波形间的差异性,将 B 中各元素的值 $B(k)$ 乘以其绝对值得到:

$$E = \{E(k), k=1, 2, \dots, K\} \quad (4)$$

其中, $E(k) = B(k) |B(k)|$ 。

根据图 5 所示的单时间窗网格划分方法,以波形 E 的最小值作为最低点、最大值作为最高点、最大值与最小值之差作为网格的总高度,在总高度范围内将波形 E 等分为 F 个网格。在一个时间窗内,从上到下依次给网格编号,统计各个网格内的采样点数,若采样点正好处于网格线(图中虚线所示)上,将该点划归到编号大的网格,则可得到由各网格内的采样点数组成的列向量 C_m 如式(5)所示,其元素值的大小反映了采样点在某个幅值范围内的聚集程度。

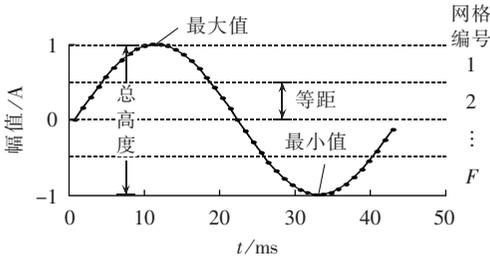


图 5 波形网格划分示意图

Fig.5 Schematic diagram of waveform grid division

$$C_m = \begin{bmatrix} C_{m1} \\ C_{m2} \\ \vdots \\ C_{mf} \\ \vdots \\ C_{mF} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $f(f=1, 2, \dots, F)$ 为网格编号; C_{mf} 为波形 E 的第 f 个网格的采样点数。

对 C_m 做归一化处理,即将其各元素除以该时间窗波形内的总采样点数,得到:

$$P_m = \begin{bmatrix} P_{m1} \\ P_{m2} \\ \vdots \\ P_{mf} \\ \vdots \\ P_{mF} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, P_{mf} 为第 f 个网格的采样点数占该时间窗波形内的总采样点数的百分比。

同时考虑所有线路同频带内的各组时间窗,可得到矩阵:

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_m \ \dots \ P_s] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} & \dots & P_{m1} & \dots & P_{s1} \\ P_{12} & P_{22} & \dots & P_{m2} & \dots & P_{s2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{1f} & P_{2f} & \dots & P_{mf} & \dots & P_{sf} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{1F} & P_{2F} & \dots & P_{mF} & \dots & P_{sF} \end{bmatrix} \quad (7)$$

将矩阵 P 内元素按行进行归一化处理,即将各元素除以该元素所在行的所有元素之和,得到各线路同频带内同组时间窗波形的分布特征矩阵:

$$P' = [P'_1 \ P'_2 \ \dots \ P'_m \ \dots \ P'_s] = \begin{bmatrix} P'_{11} & P'_{21} & \dots & P'_{m1} & \dots & P'_{s1} \\ P'_{12} & P'_{22} & \dots & P'_{m2} & \dots & P'_{s2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P'_{1f} & P'_{2f} & \dots & P'_{mf} & \dots & P'_{sf} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P'_{1F} & P'_{2F} & \dots & P'_{mF} & \dots & P'_{sF} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, P'_{mf} 表示第 m 条线路某频带系数的一个时间窗内第 f 个网格的特征系数。

2.2 波形分布特征矩阵间的相对熵

相对熵表示系统处于一个状态相对于另一个状态的概率的差异程度^[13-14]。将波形分布特征矩阵看成一个系统,矩阵内的元素看作该系统的状态,元素值看作状态出现的概率。因此,可用相对熵表示各线路故障暂态零序电流波形间的差异性^[15-16],进而确定故障线路。

定义向量 P'_m 关于 P'_n 的相对熵为:

$$M_{mn} = \sum_{f=1}^F \left| P'_{mf} \ln \frac{P'_{mf}}{P'_{nf}} \right| \quad (9)$$

则各线路同频带同组时间窗波形相互间的相对熵组成的矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1m} & \dots & M_{1n} & \dots & M_{1s} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & M_{2m} & \dots & M_{2n} & \dots & M_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ M_{m1} & M_{m2} & \dots & M_{mm} & \dots & M_{mn} & \dots & M_{ms} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \dots & M_{nm} & \dots & M_{nn} & \dots & M_{ns} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ M_{s1} & M_{s2} & \dots & M_{sm} & \dots & M_{sn} & \dots & M_{ss} \end{bmatrix} \quad (10)$$

令第 m 条线路某频带一个时间窗波形相对其他线路同频带同组时间窗波形的相对熵为:

$$M_m = \sum_{l=1}^s (M_{ml} + M_{lm}) \quad (11)$$

由各线路相对其他线路同频带同组时间窗波形的相对熵构成列向量 M_d ,对其各元素做归一化处理,即将各元素除以其所在行的所有元素之和得到:

$$M'_d = [M'_1 \ M'_2 \ \dots \ M'_m \ \dots \ M'_s]^T \quad (12)$$

其中, M'_m 为 M_m 归一化后的值, 越大说明其对应的时间窗波形与其他线路同组时间窗波形差异性越大。

2.3 确定疑似故障线路

由大量仿真得到, 当式(12)中线路某时间窗波形相对熵的最大值比次大值大 0.1, 即满足式(13)时, 最大值所对应的线路为该组时间窗波形的疑似故障线路, 此时该线路的疑似故障次数加 1, 否则认为该组时间窗波形无线路发生故障。依次求出各组时间窗的疑似故障线路。

$$\begin{cases} a_1 > a_2 > \dots > a_i > \dots > a_s \\ \sum_{i=1}^s a_i = 1 \\ a_1 - a_2 > 0.1 \end{cases} \quad (13)$$

其中, a_1 为 M'_d 中最大相对熵; a_2 为 M'_d 中次大相对熵; $i=1, 2, \dots, S$ 。

2.4 等权重投票选线

在单个频带内, 疑似故障次数最多的线路, 若其疑似故障次数超过该频带一半的时间窗数时, 则该频带拥有一张有效选票, 选票只能投向疑似故障次数最多的线路; 否则, 该频带投弃权票。等权重表示一个频带的选票数只有一张, 总票数等于线路的频带数。

统计各频带的投票结果, 弃权票越多, 母线发生故障的可能性越大; 弃权票越少, 线路发生故障的可能性越大。

最终选线判据为: 若弃权票数大于 3/4 的总票数, 判定母线故障; 否则, 有效票数最多的线路为故障线路。

3 选线范例及差异性增强验证

故障暂态零序电流波形频率范围: 纯架空线组成的系统约为 0~1500 Hz, 纯电缆线组成的系统约为 0~3000 Hz。取故障后各线路一个周期的故障暂态零序电流数据, 考虑裕度, 本文的电缆混合系统的频率分析范围取 0~3500 Hz, 信号采样频率为 10 kHz, 经 7 层小波包分解后得到 128 个频段, 每个频段的频带宽度约为 39 Hz, 经抗混叠处理并将各频段按频率由低到高排列, 其中第 0~90 个频段的频带总宽度约为 3500 Hz。令前 10 个频带的时间窗数量都为 1, 每隔 10 个频带, 频带的时间窗数量增加 1, 网格数取 5。

3.1 选线范例

设线路 L3 在距母线 2 km 处发生单相接地故障, 当接地电阻为 200 Ω 、消弧线圈电感值为 0.803 H、过补偿度为 5%、故障合闸角为 60° 时, 得到各线路 1 个周期的故障暂态零序电流仿真波形见图 6。

经小波包 7 层分解后, 处理小波混频并将分解系数进行单支重构, 各频带按频率由低到高排列。第 1

个频带第 1 个时间窗(也是唯一的时间窗)的单支重构系数波形如图 7 所示。

将线路 L3 第 1 个频带第 1 个时间窗系数的单支重构系数波形的各点数据乘以其绝对值, 得到重构后的增强波形, 如图 8 所示。

第 1 个频带的时间窗数量为 1, 将图 8 的各波形等分为 5 个网格, 各网格采样点数矩阵见式(14)。

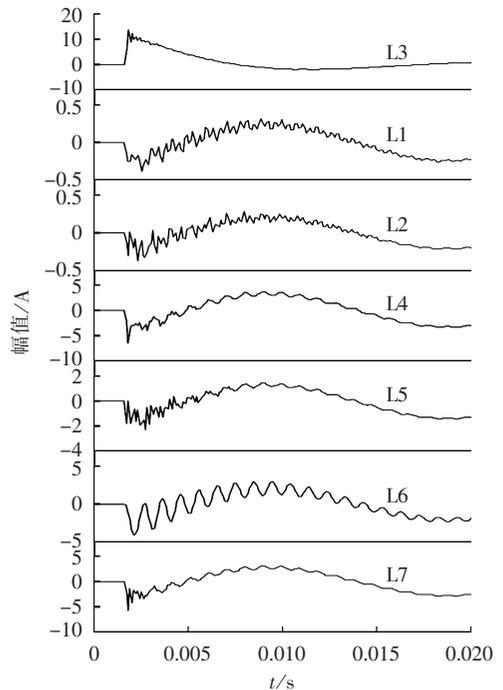


图 6 线路故障暂态零序电流波形

Fig.6 Fault transient zero-sequence current waveforms

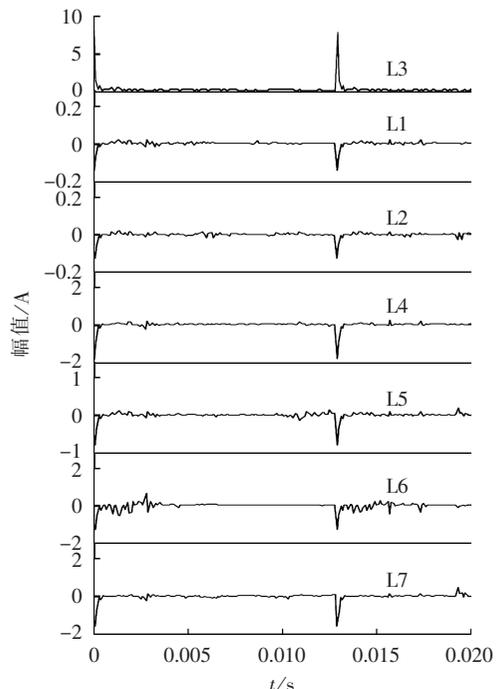


图 7 第 1 个频带第 1 个时间窗系数单支重构后波形
Fig.7 Reconstructed waveforms of first time window for first frequency band in single scale

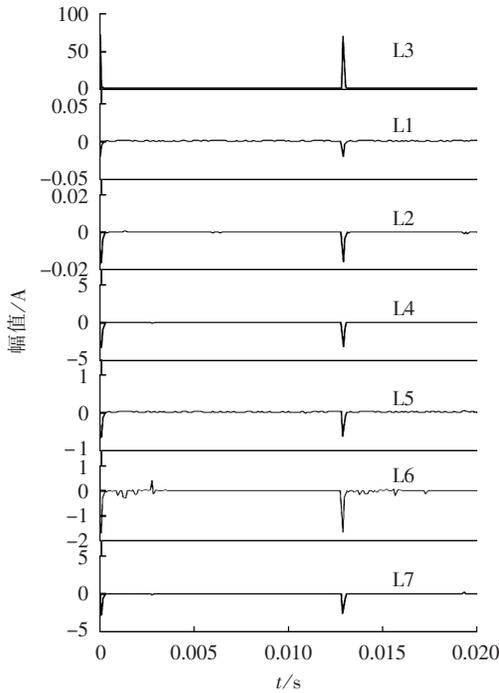


图 8 差异性增强后波形

Fig.8 Difference-enhanced waveforms

$$C=[C_1 \ C_2 \ \dots \ C_7]^T = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 2 & 196 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 196 \\ 198 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 196 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 196 \\ 2 & 0 & 0 & 24 & 174 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 196 \end{bmatrix} \quad (14)$$

求相对熵过程中有对数计算,为使相对熵的计算不受 0 值的影响,将矩阵 C 内的元素值全部加 1 后对各元素做归一化处理,得到:

$$P' = \begin{bmatrix} 0.0138 & 0.1429 & 0.1429 & 0.0732 & 0.1694 \\ 0.0138 & 0.1429 & 0.1429 & 0.0732 & 0.1694 \\ 0.9171 & 0.1429 & 0.1429 & 0.0244 & 0.0026 \\ 0.0138 & 0.1429 & 0.1429 & 0.0732 & 0.1694 \\ 0.0138 & 0.1429 & 0.1429 & 0.0732 & 0.1694 \\ 0.0138 & 0.1429 & 0.1429 & 0.6098 & 0.1505 \\ 0.0138 & 0.1429 & 0.1429 & 0.0732 & 0.1694 \end{bmatrix} \quad (15)$$

经式(9)计算后,可得相对熵矩阵式(16)。

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.8472 & 0 & 0 & 0.1752 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8472 & 0 & 0 & 0.1752 & 0 \\ 3.8843 & 3.8843 & 0 & 3.8843 & 3.8843 & 3.9357 & 3.8843 \\ 0 & 0 & 0.8472 & 0 & 0 & 0.1752 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8472 & 0 & 0 & 0.1752 & 0 \\ 1.3107 & 1.3107 & 2.6326 & 1.3107 & 1.3107 & 0 & 1.3107 \\ 0 & 0 & 0.8472 & 0 & 0 & 0.1752 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

经式(11)和(12)计算后,各线路的总相对熵为:

$$M'_d = \begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_2 \\ M'_3 \\ M'_4 \\ M'_5 \\ M'_6 \\ M'_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0826 \\ 0.0826 \\ 0.4014 \\ 0.0826 \\ 0.0826 \\ 0.1826 \\ 0.0826 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由式(17)和疑似故障线路判据,该时间窗内线路 L3 为疑似故障线路。

因第 1 个频带内时间窗仅 1 个,由等权重投票选线可知,该频带有有效票 1 张,且投向线路 L3,故总票数加 1。第 1 个频带选线投票结束后,选票信息见表 1。

表 1 选票信息表

Tab.1 Vote information

有效票数							弃权票数
L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	
0	0	1	0	0	0	0	0

所有 90 个频带都执行选线投票,结果见表 2。

表 2 最终选票信息表

Tab.2 Final vote information

有效票数							弃权票数	选线结果
L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7		
1	0	85	0	0	0	0	4	L3

据最终选线判据,因 $4 < 90 \times 3/4$,且线路 L3 得到的有效票数最多,故线路 L3 为故障线路。

3.2 差异性增强验证

同样故障条件下,第 1 个频带第 1 个时间窗系数单支重构后的系数波形如图 7 所示。若跳过式(4)的计算过程,其余计算过程与 3.1 节一致,则得到各网格采样点数矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 19 & 47 & 131 \\ 2 & 1 & 19 & 46 & 132 \\ 147 & 32 & 17 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 20 & 46 & 131 \\ 2 & 1 & 19 & 47 & 131 \\ 3 & 22 & 39 & 122 & 15 \\ 2 & 1 & 20 & 46 & 131 \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

相对熵矩阵 M 如式(19)所示。

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.0043 & 1.2704 & 0.0089 & 0 & 0.6991 & 0.0089 \\ 0.0042 & 0 & 1.2670 & 0.0076 & 0.0042 & 0.7039 & 0.0076 \\ 4.9083 & 4.9081 & 0 & 4.9136 & 4.9083 & 3.5085 & 4.9136 \\ 0.0091 & 0.0079 & 1.2670 & 0 & 0.0091 & 0.6972 & 0 \\ 0 & 0.0043 & 1.2704 & 0.0089 & 0 & 0.6991 & 0 \\ 1.3953 & 1.4026 & 1.7001 & 1.3902 & 1.3953 & 0 & 1.3902 \\ 0.0091 & 0.0079 & 1.2670 & 0 & 0.0091 & 0.6972 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

对式(19)中的相对熵做归一化处理,得式(20)。

$$M'_d = \begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_2 \\ M'_3 \\ M'_4 \\ M'_5 \\ M'_6 \\ M'_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0832 \\ 0.0833 \\ 0.3610 \\ 0.0832 \\ 0.0832 \\ 0.1568 \\ 0.0832 \end{bmatrix} \quad (20)$$

比较式(17)和式(20)可知,差异性增强处理后故障线路的熵值要大于未增强前的熵值。

4 选线方法仿真验证

仿真系统如图 1 所示,在不同故障合闸角、不同故障位置、不同接地电阻、不同补偿度、不同信噪比噪声干扰、采样不同步及两点接地等情况下,验证本文所提选线方法的可靠性和正确性。

a. 故障合闸角不同。

当过补偿度为 5% 时,在不同故障合闸角情况下,线路 L7 在距离母线 1 km 处发生接地电阻为 2 kΩ 的单相接地故障,选线结果见表 3,由表中数据可知,选线结果不受故障合闸角的影响。

表 3 不同故障合闸角的选线结果

Tab.3 Results of faulty line selection for different fault switching angles

合闸角/(°)	各线路选票数							弃权票数	选线结果
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7		
0	0	0	0	0	0	0	87	3	L7
30	0	1	0	0	0	0	84	5	L7
60	0	0	0	0	0	0	84	6	L7
90	0	1	0	0	0	0	78	11	L7

b. 故障位置不同。

当故障合闸角为 70°、过补偿度为 5% 时,线路 L7 在不同位置发生金属性单相接地故障,选线结果见表 4,表中距母线为 0 时表示母线接地故障。由表 4 可知,选线结果不受故障位置的影响。

c. 接地电阻不同。

当合闸角为 40°、过补偿度为 5% 时,接地电阻不同情况下,线路 L4 距母线 3 km 处发生单相接地故障,选线结果见表 5。由于接地电阻主要影响暂态零序电流波形的幅值,因此,选线结果不受接地电阻的影响。

表 4 不同故障位置的选线结果

Tab.4 Results of faulty line selection for different fault locations

与母线距离/km	各线路选票数							弃权票数	选线结果
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7		
0	1	0	2	0	0	0	0	87	母线
4	3	3	17	0	0	0	47	20	L7
8	3	9	16	1	0	0	37	25	L7
12	5	7	20	0	0	0	35	23	L7

表 5 不同接地电阻的选线结果

Tab.5 Results of faulty line selection for different grounding resistances

接地电阻/Ω	各线路选票数							弃权票数	选线结果
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7		
0	16	1	6	42	0	0	0	25	L4
20	18	2	4	51	0	1	0	14	L4
200	4	0	0	74	0	0	0	12	L4
2000	0	0	0	86	0	0	0	4	L4

d. 补偿度不同。

由于消弧线圈的过补偿作用,使得谐振接地系统单相接地故障零序电流减小,减小量与消弧线圈的补偿度有关。当故障合闸角为 30°、接地电阻为 2 kΩ 时,线路 L4 在距离母线 2 km 处发生单相接地故障,此时不同补偿度下的选线结果见表 6,表中补偿度为 0 表示中性点不接地系统,补偿度为 100% 表示完全补偿。由表 6 可知,所提方法对谐振接地系统在不同补偿度下发生单相接地故障均适用。

表 6 不同补偿度的选线结果

Tab.6 Results of faulty line selection for different compensation degrees

补偿度	各线路选票数							弃权票数	选线结果
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7		
0	0	0	0	74	0	3	0	13	L4
95%	0	0	0	83	2	2	0	3	L4
100%	0	0	0	85	0	4	0	1	L4
105%	0	0	0	88	0	0	0	2	L4
110%	1	0	0	86	0	1	0	2	L4

e. 信噪比噪声干扰不同。

工程应用中,需考虑外界噪声干扰对接地选线方法的影响。当故障合闸角为 90°、过补偿度为 5% 时,线路 L6 在距离母线 2 km 处发生单相接地故障,接地电阻为 2 kΩ,表 7 为不同信噪比情况下的选线结果。由表 7 数据可知,所提选线方法能在噪声干扰的情况下正确选线。

f. 燃弧间距的间歇性电弧不同。

表7 不同噪声信噪比的选线结果

Tab.7 Results of faulty line selection for different signal-to-noise ratio

信噪比/dB	各线路选票数							弃权票数	选线结果
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7		
100	0	0	0	0	0	66	0	24	L6
90	0	0	0	0	0	66	0	24	L6
80	0	0	0	0	0	66	0	24	L6
70	0	0	0	0	0	65	0	25	L6

当故障合闸角为 40° 、接地电阻为 $2\text{ k}\Omega$ 、过补偿度为 5% 时,线路L1在距离母线 8 km 处发生不同燃弧间距的间歇性电弧故障,选线结果如表8所示。由表可见,在燃弧间距不同时,所提方法均可正确选线。

表8 不同燃弧间距下的选线结果

Tab.8 Results of faulty line selection for different arc spacing

燃弧间距 周期数	各线路选票数							弃权票数	选线结果
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7		
1/4	67	1	3	1	3	0	0	15	L1
1/2	54	1	17	1	0	0	1	16	L1
3/4	61	1	9	0	0	1	0	18	L1
1	61	1	9	0	0	1	0	18	L1

5 结论

运用小波包对故障暂态零序电流信号进行分解重构,得到不同频带内的小波包重构系数;在时域上对各频带小波包重构系数进行分块,得到各组时间窗波形,求其波形分布特征矩阵,进而算得各组时间窗波形分布特征矩阵间的相对熵,用于衡量各组时间窗波形间的差异程度,得到各组时间窗的选线结果,按等权重投票选线方法获得最终的故障线路。理论分析和大量仿真结果表明了所提选线方法的有效性。

参考文献:

- [1] 束洪春,刘娟,王超,等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线新方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(11):72-76.
SHU Hongchun,LIU Juan,WANG Chao,et al. Adaptive method for fault circuit selection in arc suppression coils system by using transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(11):72-76.
- [2] 吴乐鹏,黄纯,林达斌,等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):70-75.
WU Lepeng,HUANG Chun,LIN Dabin,et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(5):70-75.
- [3] GONG Jing,LUAN Ru. A new wavelet packet method of single-phase earth fault line selection in distribution network based on the maximum difference comparison[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Tokyo,Japan:IEEE,2009:1-5.
- [4] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠,等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(9):48-53.
XUE Yongduan,FENG Zuren,XU Bingyin,et al. Earth fault

protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(9):48-53.

- [5] 郭谋发,杨耿杰,黄世远. 谐振接地系统暂态特征自适应故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):35-41.
GUO Moufa,YANG Gengjie,HUANG Shiyuan. Adaptive faulty line selection based on transient characteristics for resonant earthing system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):35-41.
- [6] 康忠健,李丹丹,刘晓林. 应用非工频暂态分量的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):1-6.
KANG Zhongjian,LI Dandan,LIU Xiaolin. Faulty line selection with non-power frequency transient components of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):1-6.
- [7] 张艳霞,王清亮. 应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):76-80.
ZHANG Yanxia,WANG Qingliang. New method for single phase-to ground fault feeder selection based analysis of fault transient characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(16):76-80.
- [8] 顾荣斌,蔡旭,陈海昆,等. 非有效接地电网单相电弧接地故障的建模及仿真[J]. 电力系统自动化,2009,33(13):63-67.
GU Rongbin,CAI Xu,CHEN Haikun,et al. The effective grounding grid modeling and simulation of single-phase ground fault arc [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(13):63-67.
- [9] 陈少华,桂存兵,雷宇,等. 基于小波包的永久性单相接地故障的故障选线的仿真研究[J]. 继电器,2007,35(1):8-21.
CHEN Shaohua,GUI Cunbing,LEI Yu,et al. Simulation and research on permanent single-phase to ground fault based on wavelet packets[J]. Relay,2007,35(1):8-21.
- [10] 何正友. 配电网故障诊断[M]. 成都:西南交通大学出版社,2011.
- [11] 张峰,梁军,高红梅,等. 基于多频带信息融合的小电流故障选线方法[J]. 山东大学学报:工学版,2012,42(2):118-123.
ZHANG Feng,LIANG Jun,GAO Hongmei,et al. Adaptive fault line selection method based on a multi-scale frequency signal in non-solid earthed network[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012,42(2):118-123.
- [12] 王耀南,霍白林,王辉,等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):54-58.
WANG Yaonan,HUO Bailin,WANG Hui,et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(6):54-58.
- [13] 胡勇,赵春霞,郭志波,等. 一种基于相对熵阈值分割的改进方法[J]. 系统仿真学报,2009,21(12):31-33.
HU Yong,ZHAO Chunxia,GUO Zhibo,et al. Based on the relative entropy-threshold segmentation method[J]. Journal of System Simulation,2009,21(12):31-33.
- [14] 罗国敏,何正友,林圣. 利用小波相对熵值的差异识别输电线路暂态信号的探讨[J]. 电网技术,2008,32(15):47-51.
LUO Guomin,HE zhengyou,LIN Sheng. Discussion on using discrepancy among wavelet relative entropy values to recognize transient signals in power transmission line[J]. Power System Technology,2008,32(15):47-51.
- [15] 何正友,蔡玉梅,钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统故障检测

中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):38-43.

HE Zhengyou,CAI Yumei,QIAN Qingquan. A study of wavelet entropy theory and its application in electric power system fault detection[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):38-43.

[16] 束洪春,彭仕新. 利用全频带综合小波能量相对熵的配网故障选线方法[J]. 高电压技术,2009,35(7):60-64.

SHU Hongchun,PENG Shixin. Distribution network fault line detection using the full waveband complex relative entropy of wavelet energy[J]. High Voltage Engineering,2009,35(7):60-64.

作者简介:



郭谋发

郭谋发(1973-),男,福建福清人,副教授,硕士,研究方向为电力系统自动化(E-mail: gmf@fzu.edu.cn);

高源(1988-),男,福建平潭人,硕士研究生,研究方向为配电网自动化;

杨耿杰(1966-),男,福建武夷山人,教授,研究方向为电力系统分析。

Faulty line detection based on transient waveform difference recognition for resonant earthed system

GUO Moufa,GAO Yuan,YANG Gengjie

(College of Electrical Engineering and Automation,Fuzhou University,Fuzhou 350108,China)

Abstract: When single-phase grounding fault occurs in resonant earthed system,the transient zero-sequence current waveform difference between faulty line and healthy line is bigger than that between healthy lines, based on which,an approach of faulty line detection is put forward. The wavelet packet decomposition, reconstruction and information enhancement are carried out for the fault transient zero-sequence current waveform of each line and the amount of time windows is determined for each frequency band according to its size. The distribution feature matrixes of each time window and its relative entropy are calculated and then used to recognize the waveform difference degree among the same time window of different lines. The faulty line is then picked out by the equal weight voting from the candidate faulty lines selected during waveform difference recognition for different time windows. Substantial simulative results show its accuracy and reliability.

Key words: faulty line detection; wavelet packet transform; relative entropy; waveform difference recognition; equal weight voting; resonant; electric grounding

(上接第52页 continued from page 52)

Integral-integral estimate of interconnected system ISS and its applications in isolated system

QIN Boyu,ZHANG Xuemin,WEI Dongning

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: ISS(Input-to-State Stability) theory judges the stability of interconnected system according to the stabilities of its subsystems,which can be properly used in the stability analysis of isolated power system with variable topology. Two premises are necessary:acquiring the ISS/IOS(Input-to-Output Stability) property of equipment;obtaining the stability criterion of interconnected system. Because the integral-integral estimate, the equivalent form of ISS definition,can more accurately define the ISS property of equipment,the local IOS theorem for interconnected system is deduced under the integral-integral estimate definition,which detects the stability of interconnected system by judging only two algebraic inequalities based on the acquired ISS/IOS property of equipment;the small gain condition and the locally stable condition. The stability of an interconnected system with generator and motor is analyzed with PSCAD simulation software and the simulative results verify the correctness of theoretical analysis.

Key words: input-to-state stability; input-to-output stability; integral-integral estimate; electric power equipment; interconnected system; stability