

基于小波去噪和暂态电流能量分组比较的 小电流接地选线新方法

周登登, 刘志刚, 胡非, 白玮莉

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 分析了故障选线的现状和基于故障暂态电流选线的优势, 提出了消弧线圈接地系统中基于小波去噪和暂态电流能量分组比较的选线新方法。该方法先将含噪电流信号进行小波软阈值去噪, 然后将去噪后的信号排序, 分组求能量并归一化, 接着对其进行阈值处理即可得到各个出线的累加变量值, 比较这些值的大小, 便可选出故障线路。该方法不受补偿度、故障地点、过渡电阻、负荷大小和故障相角的影响, 原理简单、可靠、计算量小、抗干扰能力强, 仿真证明了该方法的有效性。

关键词: 故障选线; 暂态电流; 消弧线圈接地系统; 小电流接地; 小波软阈值去噪

A new method for fault line selection based on wavelet de-noising and transient current energy grouping comparison in ineffective grounding system

ZHOU Deng-deng, LIU Zhi-gang, HU Fei, BAI Wei-li

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper analyses the development of the fault line selection and the advantages of using transient current for fault line selection, then proposes a new fault line selection method based on wavelet soft-threshold de-noising and transient current energy grouping comparison in arc suppression coil grounded system. It eliminates the noise in the current firstly, and then sorts the denoised signal, and makes the normalized energy of each two zero sequence currents. Through comparing the normalized energy with a given threshold, the accumulation variable value (AVV) of each outlet can be gained. The fault line will be selected by comparing these AVVs. This method has the advantages of simple principle, reliability, low computational complexity, and strong anti-interference ability. It is immune from the influences of compensation degree, fault location, phase angle, load, and fault transient resistance. The simulation results verify the effectiveness of proposed method.

Key words: fault line selection; transient current; arc suppression coil grounded system; non-solid earthed network; wavelet soft-threshold de-noising

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0022-07

0 引言

小电流接地选线问题仍然是一个未解决的难题, 当前, 小电流接地选线方法主要有两大类: 检测故障电流的方法和基于注入信号的方法^[1]。前者又可分为稳态选线和暂态选线两种。对于稳态选线, 当前涌现的方法主要有比幅法, 比相法, 群体比幅比相法^[2], 谐波电流方向法, 五次谐波法, 有功分量法和最大 $\Delta I \sin\phi$ 法^[3]等。由于单相接地时故障稳

态电流幅值很小, 且易受变电站强电磁环境的干扰, 这使得基于稳态信息选线的方法面临很大困难。

对于暂态选线法, 由于暂态电流比稳态电流大数十倍, 信噪比高, 且不受消弧线圈补偿方式的影响, 因此, 暂态选线法具有很高的灵敏度和强大的生命力, 甚至能检测瞬间性接地故障^[4], 尤其适合于检测电弧不稳定的接地故障^[5]。

目前主要的暂态选线法有暂态零序电流比较法首半波法^[6]和基于小波分析的选线方法^[7]。前者仅改善了稳态选线的电流分量小的缺点, 但仍然摆脱不了受间歇性电弧的影响^[8]。对于首半波法, 由于极性关系正确的时间非常短, 尤其是当故障发生在

基金项目: 教育部霍英东青年教师基金资助项目 (101060); 四川省杰出青年基金项目 (07JQ0075)

相电压过零值时, 首半波电流暂态分量很小, 使检测可靠性较低。

本文在分析故障暂态电流特征基础上提出基于小波去噪和暂态零序电流分组比较的选线方法。该方法在电磁干扰背景下仍能正确选出故障线路, 抗干扰能力强, 另外本方法不受补偿度, 过渡电阻, 故障地点和故障相角的影响, 计算简单, 可靠, 仿真验证了本方法的可行性。

1 单相接地故障暂态特征分析

图1是计算消弧线圈系统单相接地暂态电流的等值回路。图中: C 是补偿电网的三相对地电容; L_0 是三相线路和电源变压器等在零序网络中的等值电感; R_0 是零序网络回路的等值电阻(包括故障点的接地电阻和弧道电阻); U_0 为零序电源电压; r_L 是消弧线圈的有功损耗电阻; L 是消弧线圈的电感。

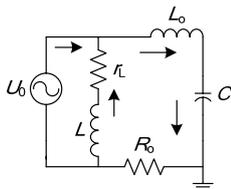


图1 单相接地暂态电流等值回路

Fig.1 The transient current equivalent circuit for the single-phase grounding fault

在分析电容电流的暂态特性时, 由于其自由震荡频率很高, L 远大于 L_0 , 这样消弧线圈支路相当于断开, 经过化简得电容电流:

$$i_c = i_{c.os} + i_{c.st} = I_{cm} \left[\left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (1)$$

其中: I_{cm} 为电容电流幅值; ω_f 为暂态自由震荡分量的角频率; $\delta = 1/\tau_c$ 为自由震荡分量的衰减系数 (τ_c 为回路时间常数); φ 为故障初相角; ω 为正常情况下电源频率。

对于暂态电感电流, 经过计算^[4]得:

$$i_L = I_{Lm} \left[\cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (2)$$

式中: I_{Lm} 为电感电流幅值; τ_L 为电感回路时间常数。

综合以上两种情况可得暂态接地电流表达式:

$$i_d = i_c + i_L = (I_{cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) +$$

$$I_{cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \right. \quad (3)$$

$$\left. \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}}$$

式中的一项为接地稳态分量, 为稳态电容电流和稳态电感电流之差; 其余为暂态分量, 等于电容的暂态自由振荡分量和电感的暂态直流分量之和。

综上所述, 当单相接地故障发生后, 故障点会产生衰减很快的暂态电容电流和衰减较慢的暂态电感电流。暂态接地电流的幅值主要由暂态电容电流决定, 消弧线圈补偿的作用在暂态电流初期不明显, 它对暂态电流的极性不产生影响, 但是其幅值却在一定程度上削弱了暂态电容电流^[5]。由于正常线路电流极性相同, 故障与正常线路电容电流极性相反, 通过求取两两差电流的能量, 不但会减小同极性的干扰电流, 还会放大反极性的有用电流, 从而使故障线路与正常线路差别更明显, 更易区别两者, 甚至在故障相角为 0 时也可产生比常规方法更大的电流, 有利于提高检测灵敏度。

2 小波去噪原理

信号消噪方法有多种, 就小波消噪而言主要有三种方法: 基于模极大值重构理论的消噪; 基于空域相关消噪; 阈值消噪^[9]。由于前两种消噪方法计算量太大, 算法复杂, 不易实时实现, 因而本文选用第三种消噪算法。

小波阈值消噪是基于这样的思考: 信号经过小波变换后, 可以由信号产生的小波系数包含有信号的重要信息, 其幅值大, 但数目较少, 而噪声对应的小波系数幅值小。因此, 通过在不同尺度上选取一合适的阈值, 并将小于该阈值的小波系数置零, 而保留大于该阈值的小波系数, 从而使信号中的噪声得到有效的抑制。最后进行逆小波变换, 得到去噪后的重构信号。

由于软阈值去噪法能够避免小波系数震荡, 连续性好, 因此本文选用 Donoho 提出的软阈值去噪法。在使用小波去噪的时候因为要进行小波变换, 故而存在分解层数和小波函数的选取问题。

小波函数的选取原则是小波支集尽量短, 以减少计算量, 根据暂态电流的特点可知, 电流是正弦和指数函数的乘积形式, 具有无限次可导性, 为了最大限度区分信号与噪声, 小波消失矩要尽量高。信号分解尽量无冗余以减小计算, 对称性尽量好以减小失真, 频域能量尽量集中以减小频带混叠, 振荡次数适中等。通过权衡各方面因素和调试, 最后

决定选用 db6 小波。

分解层数的选取原则是分解层数在尽量少的前提下最大程度地消除噪声。这需要根据噪声的种类和信噪比来确定。本文加的背景噪声是高斯白噪，经过反复测算，当采样率是 10 kHz 时，在使用 db6 小波分解的情况下，分解层数为 6 时达到最佳。噪声阈值 λ 的选取采用以下形式^[10]：

$$\lambda_i = \frac{\text{median}(|d_i(k)|)}{0.6745} \sqrt{2 \ln N} \quad i = 1, \dots, 6 \quad (4)$$

其中： $d_i(k)$ 表示小波分解的第 i 层细节系数序列； $\text{median}(|d_i(k)|)$ 表示对第 i 层细节系数的绝对值取均值； N 为第 i 层细节系数序列的元素个数。此公式表明对不同的尺度使用不同阈值，这充分利用了噪声的方差信息，相对于其它阈值选取方法而言更为准确。

3 选线算法流程

选线程序启动信号由零序电压 U_0 发出。选线算法涉及到数据窗的选择，数据窗的确定原则如下：对于不同的电压等级，不同的系统参数配置，暂态电流的持续时间是不同的。一般而言，暂态电容电流幅值大，持续时间短，约为 0.5~1.0 个工频周波；而暂态电感电流幅值较小，频率等于工频，持续时间通常可达 2~3 个工频周波^[4]。另外，由于采用小波去噪时会出现“边界效应”，保守起见，应该在上述暂态电流持续时间基础上分别在首尾再加大数据量的采集力度，以消除变换中的各种误差。经过消噪之后再再将故障前后多采集的点去掉以消除稳态影响。为此，选用故障前 0.5 个工频周波，故障后 1.5 个工频周波。

选线算法为：

(1) 将各出线按顺序进行编号，并将获得的零序电压 U_0 和 n 条出线零序电流 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 分别采用 db6 小波进行 6 层小波分解。即：

$$\begin{aligned} a_{i+1}(k) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_i(n)h_0(n-2k) \quad i = 0, \dots, 6 \\ d_{i+1}(k) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_i(n)h_1(n-2k) \quad i = 0, \dots, 6 \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $a_0(n)$ 为采样零序电流信号； h_0 为低通滤波器序列； h_1 为高通滤波器序列； a_6 为分解后的近似分量； d_1, d_2, \dots, d_6 为分解后的细节分量。

(2) 计算 d_1, d_2, \dots, d_6 各个尺度的方差，这些方差分别乘以 sqtwo log 阈值得到不同尺度的阈值。根据软阈值去噪原理进行各个细节尺度的去噪，最后将去噪后的细节分量和近似分量进行重构得到

消噪后的零序电流 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 和电压 U_0 。重构过程为：

$$a_j(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{j+1}(n)h_0(k-2n) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{j+1}(n)h_1(k-2n) \quad (6)$$

式(6)要反复进行，直到求出 a_0 为止。

(3) 将去噪后的各线路零序电流分别除以该线路的长度，得到各线路的单位长度零序电流。对这些单位长度零序电流两两分组求差电流： $I_{i,j} = \text{abs}(I_i - I_j)$ ，其中 $i \neq j$ ，共得到 $C_n^2 = n \times (n-1) / 2$ 种组合。分别求取这些差电流序列的均方能量：

$$\bar{I}_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{\text{length}(I_{i,j})} \sum_{k=1}^{\text{length}(I_{i,j})} I_{i,j}^2(k)} \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, n \\ j = 1, \dots, n \\ i \neq j \end{matrix} \quad (7)$$

将这些差电流均方能量按以下规则存储：

$b_i = [\bar{I}_{i,1}, \bar{I}_{i,2}, \dots, \bar{I}_{i,i-1}, \bar{I}_{i,i+1}, \dots, \bar{I}_{i,n}]$ ， b_i 表示与线路 i 有关的 $n-1$ 个差电流均方能量向量， $i = 1, 2, \dots, n$ 。并分别将其进行归一化处理，得到 C_i

$$C_i = \frac{[\bar{I}_{i,1}, \dots, \bar{I}_{i,i-1}, \bar{I}_{i,i+1}, \dots, \bar{I}_{i,n}]}{\sqrt{\sum_{j=1, j \neq i}^n \bar{I}_{i,j}^2}} \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

令 $C_{i,j}$ 表示 C_i 中第 j 个元素，令 add_i 作为 C_i 的特征量。则 add_i 的计算规则为：对某一阈值 K ，如果 $C_{i,j} > K$ ，则 add_i 自加 1 (add_i 初值为 0)，否则 add_i 数值不变化；按照此法对 $j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$ 时的 $n-1$ 种情况作完整的计算，得到 add_i 的最终值。如此反复计算可得 $\text{add}_1, \text{add}_2, \dots, \text{add}_n$ 。对这些特征量进行比较，如果 add_i 值远大于 $\text{add}_j (j = 1, \dots, n, j \neq i)$ ，那么线路 i 即为故障线路；如果所有的 $\text{add}_i (i = 1, \dots, n)$ 之间值差别很小，那么母线故障。

实际应用时需要选择恰当的阈值 K 。通过分析知道 K 的选取原则是：最大不能超过归一化差电流均方能量向量的最大元素值，最小要体现出区分度。另外，对于不同的系统 K 的绝对大小可能不同。因此为了找到一个适用于各类系统的合理的 K 值， K 的选取不应采用绝对值，而选用该系统下所有归一化差电流均方能量向量最大元素值的某一百分比。经过多个模型的仿真试验发现，该百分比选为 0.4~0.45 为宜。

4 仿真实例分析

4.1 仿真模型及参数设置

采用PSCAD / EMTDC4.02仿真软件, 建立一四出线10 kV消弧线圈接地配电线路仿真模型(过补偿), 如图2线路参数如下: 变压器110/10 kV, 正序参数: $R_1 = 0.48 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.9283 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1 = 0.07038 \mu\text{F}/\text{km}$, 零序参数: $R_0 = 0.79 \Omega/\text{km}$,

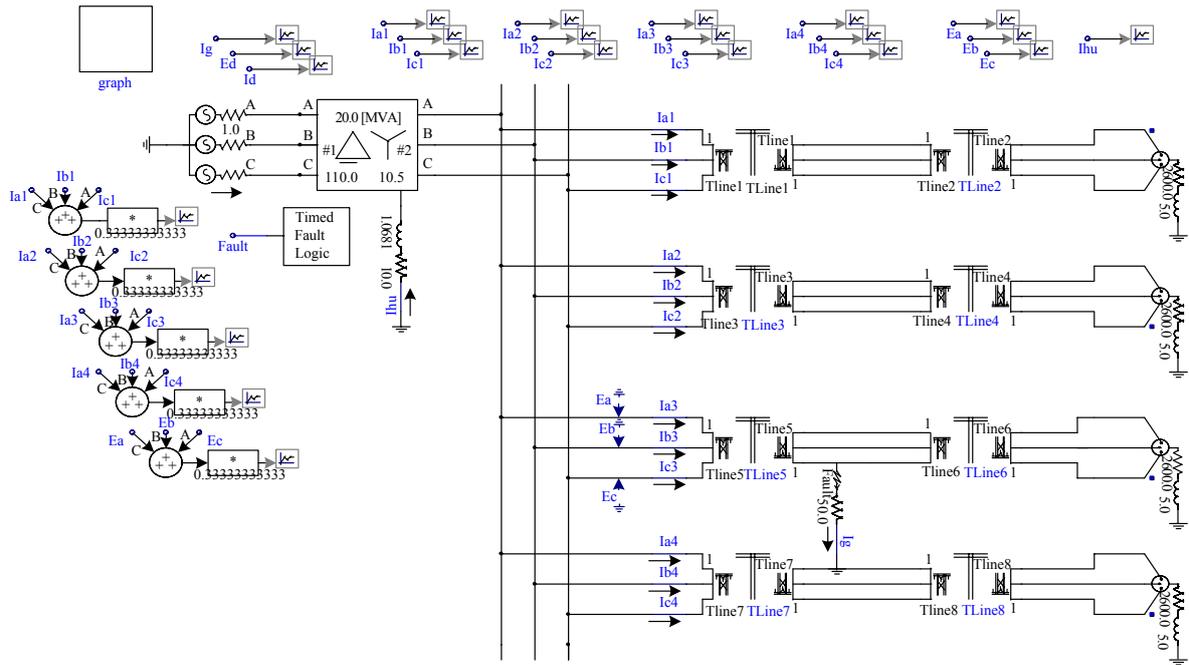


图2 消弧线圈接地系统仿真模型

Fig.2 The simulation model of arc suppression coil grounded system

当补偿度为5%时, 经计算 L 为1.1189 H。由于消弧线圈的有功损耗一般为其补偿容量的1.5%~3%, 即 $r_L / \omega L = 1.5\% \sim 3\%$ ^[4], 故本文选择消弧线圈的电阻为基波电抗的3%。数据窗选为故障前半周波, 故障后1.5个周波。数据采样率为10 kHz。故障相角从0° 开始按照15° 递增测算, 故障点接地电阻分别为0 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 500 Ω, 2 000 Ω, 10 000 Ω。故障点分别取为线路三距母线3 km, 7 km, 15 km和20 km处以及母线处, 负荷按1~5倍分别测试5次。

4.2 仿真结果及数据分析

为了使读者对测试结果有个直观的认识, 本文仅将归一化差电流列表如表1~表3。表1~表3下面三个表格分别为补偿度为10%时线路3在20 km处短路和母线单相短路的各种情况下选线处理的结果(限于篇幅仅列出部分数据), 阈值 K 选为所有归一化差电流均方能量向量最大元素值的0.45倍。

表1为正常数据选线处理结果, 通过表2的数

$L_0 = 4.2146 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 0.0436 \mu\text{F}/\text{km}$; 四条出线的长度分别为6 km、16 km、24 km、20 km, 全部采用相同的负载。输电线路由于较短, 故采用贝杰龙分布参数模型不影响计算精度。若按过补偿10%计算, 则补偿电感值为:

$$L = \frac{1 \times 10^6}{(1 + 10\%) \times 3 \times 66 \times (2\pi f)^2 \times C_0} = 1.0681 \text{ H}$$

据可以看出, 噪声对母线故障选线没有影响, 对低阻接地故障选线也没有影响, 但是对高阻接地故障影响很大, 如果不进行滤波处理, 除发生母线故障后选线结果可信外, 其他情况的故障将会使选线结果很不可靠。而实际上线路发生故障的次数要远多于母线发生故障的次数, 因此必须要消除噪声的影响。表3即为选用db6小波对以上数据进行软阈值消噪处理后选线的结果。

经过小波去噪后选线的结果见表3, 表中 I_{ij} 表示线路 i 与线路 j 零序差电流的归一化能量。由于一般故障大都发生在相电压最大值附近, 因此本文选取了90°, 75° 数据。为检验本算法在电压过零值时的灵敏度, 故又取了0° 时的数据。通过与表1的正常数据对比可以看出去噪后数据与正常数据的差别不大, 这反映了小波在去除高斯白噪干扰方面的强大实力。通过对去噪后的数据进行分析发现:

表 1 正常数据选线处理结果
Tab.1 Fault line selection result to the normal data

故障相角/ (°)	故障类型	过渡电阻/Ω	I_{12}/A	I_{13}/A	I_{14}/A	I_{23}/A	I_{24}/A	I_{34}/A	故障区域
0	线路	100	0.058 79	0.596 1	0.080 655	0.567 49	0.034 96	0.558 07	线路 3
		2 000	0.060 26	0.596 79	0.083 177	0.566 8	0.037 303	0.557 35	线路 3
	母线	100	0.373 67	0.611 97	0.493 69	0.339 55	0.332 41	0.321 25	母线
		2 000	0.385 66	0.647 61	0.513 81	0.313 36	0.350 94	0.351 25	母线
75	线路	100	0.070 834	0.590 57	0.094 091	0.566 09	0.057 295	0.560 02	线路 3
		2 000	0.073 07	0.591 33	0.097 826	0.564 29	0.060 966	0.559 72	线路 3
	母线	100	0.372 03	0.542 36	0.451 43	0.381 67	0.327 07	0.333 17	母线
		2 000	0.402 48	0.603 18	0.490 83	0.342 53	0.346 9	0.344 49	母线
90	线路	100	0.067 263	0.592 41	0.089 865	0.566 52	0.052 218	0.559 26	线路 3
		2 000	0.069 947	0.593 02	0.093 982	0.564 87	0.055 874	0.558 93	线路 3
	母线	100	0.371 99	0.555 71	0.457 15	0.375 44	0.314 99	0.321 96	母线
		2 000	0.398 31	0.613 48	0.494 67	0.337 45	0.325 77	0.335 45	母线

表 2 含噪数据选线处理的结果
Tab.2 Fault line selection result to the noise containing data

故障相角/ (°)	故障类型	过渡电阻/Ω	I_{12}/A	I_{13}/A	I_{14}/A	I_{23}/A	I_{24}/A	I_{34}/A	故障区域
0	线路	100	0.134 56	0.581 88	0.142 33	0.554 61	0.132 04	0.545 92	线路 3
		2 000	0.376 9	0.452 12	0.367 47	0.449 94	0.369 07	0.424 06	母线
	母线	100	0.392 14	0.461 35	0.428 54	0.392 87	0.381 89	0.386 73	母线
		2 000	0.406 28	0.405 89	0.401 79	0.416 94	0.403 44	0.414 91	母线
75	线路	100	0.140 26	0.578 87	0.150 68	0.554 51	0.132 79	0.545 36	线路 3
		2 000	0.359 45	0.442 07	0.361 72	0.448 04	0.378 39	0.447 89	母线
	母线	100	0.386 29	0.450 9	0.412 32	0.419 05	0.380 66	0.396 17	母线
		2 000	0.399 99	0.409 64	0.404 8	0.409 81	0.413 03	0.412 08	母线
90	线路	100	0.143 71	0.579 7	0.152 68	0.553 86	0.132 03	0.543 88	线路 3
		2 000	0.369 41	0.452 83	0.379 17	0.427 63	0.376 14	0.436 3	母线
	母线	100	0.395 47	0.451 91	0.431 42	0.399 49	0.387 89	0.378 43	母线
		2 000	0.411 49	0.408 87	0.404 89	0.418 45	0.406 2	0.399 34	母线

表 3 去噪后数据选线处理结果
Tab.3 Fault line selection result to the noise removing data

故障相角/ (°)	故障类型	过渡电阻/Ω	I_{12}/A	I_{13}/A	I_{14}/A	I_{23}/A	I_{24}/A	I_{34}/A	故障区域
0	线路	100	0.048 839	0.597 53	0.068 246	0.568 68	0.025 087	0.558 47	线路 3
		2 000	0.121 61	0.587 28	0.132 39	0.563 06	0.107 52	0.531 84	线路 3
	母线	100	0.394 28	0.659 79	0.503 39	0.300 26	0.309 4	0.332 25	母线
		2 000	0.419 47	0.519 45	0.326 34	0.466 48	0.349 21	0.366 75	母线
75	线路	100	0.057 1	0.598 02	0.074 685	0.569 02	0.025 787	0.555 95	线路 3
		2 000	0.086 255	0.583 22	0.144 49	0.552 76	0.131 3	0.552 96	线路 3
	母线	100	0.334 25	0.627 54	0.498 29	0.373 88	0.339 08	0.322 189	母线
		2 000	0.385 24	0.484 82	0.386 23	0.456 14	0.340 57	0.378 56	母线
90	线路	100	0.054 257	0.597 38	0.080 431	0.568 59	0.033 158	0.556 17	线路 3
		2 000	0.140 28	0.601 83	0.131 61	0.541 89	0.130 83	0.538 55	线路 3
	母线	100	0.346 73	0.643 99	0.505 01	0.339 43	0.326 53	0.318 51	母线
		2 000	0.346 31	0.465 3	0.405 45	0.351 48	0.347 98	0.504 52	母线

(1) 对线路故障而言, 不论是低阻故障还是高阻故障, 故障线路与非故障线路之间的归一化差电流远大于非故障线路之间的归一化差电流, 选线精度都很高。

(2) 对母线故障而言, 高阻故障时各条线路之间的归一化差电流差值较小, 且值都比较大(大于给定阈值)可以很准确地判定是母线故障。低阻故障时, 一化差电流差值虽然比高阻故障时要大一点, 但由于这些值都比线路故障时非故障线路之间的归一化差电流要大很多, 因此可以判定为是母线故障。

(3) 不论是线路故障还是母线故障, 选线结果都不受故障相角的影响, 这就弥补了一般方法在电压过零点短路时检测准确率低的缺陷。

由于一般故障初期都属于间歇性弧光接地过程, 接地电阻都比较大^[8], 因此事实上的选线基本上属于高阻接地故障类型, 无论何种故障类型, 选线都能达到较高的精度和速度。

图3~图5分别描述了线路故障时和母线故障时本算法的耐过渡电阻能力和抗故障相角能力。图中的曲线意义同表1~表3中的 I_{ij} 。通过图3、图4可以看出, 线路故障时随着故障相角和过渡电阻的递增, 差电流归一化能量基本上不变化, 可见本算法的鲁棒性很好。由于与线路3有关的 I_{13} , I_{23} , I_{34} 值都很大(大于0.5), 远大于与线路3无关的 I_{12} , I_{24} , I_{14} (小于0.1), 因此可以准确无误地判定是线路3故障。对于图5, 随着过渡电阻和故障相角的变化, I_{ij} 大部分曲线变化很小, 即便有个别变化大一点, 但值都在0.3以上, 比线路故障时非故障线路之间的 I_{ij} 要大很多, 即 I_{ij} 值都比较大, 因此可以认定是母线故障。

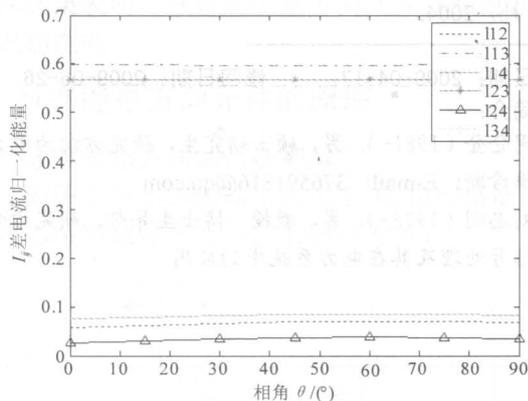


图3 过渡电阻为500Ω时差电流归一化能量随故障相角变化情况示意图

Fig.3 The schematic diagram of differential current normalized energy following the fault angle when transient resistance is 500Ω

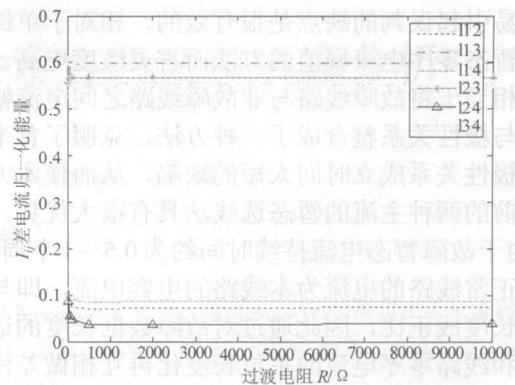


图4 相角为75°时差电流归一化能量随过渡电阻变化情况示意图

Fig.4 The schematic diagram of differential current normalized energy following the transient resistance when fault angle is 75°

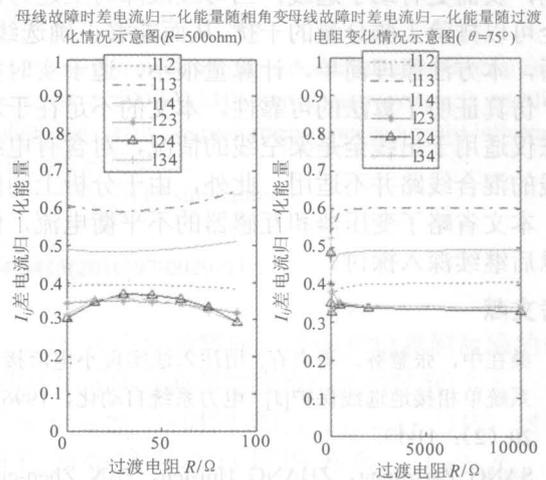


图5 母线故障时 I_{ij} 随相角和过渡电阻变化情况示意图

Fig.5 The schematic diagram of I_{ij} following the angle and transient resistance when the bus is fault

另外, 本文还对消弧线圈过补偿为15%和5%的情况, 负荷为初始负荷1~5倍的情况以及故障地点距母线为3 km, 7 km, 15 km的情况做了大量仿真, 结果与补偿度为10%的情况大体相当, 因此数据不再列出。但由此可以看出, 本方法的检测精度不受故障地点和消弧线圈补偿度和负荷大小的影响。

5 结论

通过对消弧接地系统暂态电流特征分析发现, 正常线路暂态电流极性相同, 且均与故障线路极性相反, 通过对各线路零序电流做差, 可以使故障线路与非故障线路的差别更大, 非故障线路之间差别减小, 从而更有利于突出故障与非故障线路的差别, 这对于克服首半波法的在电源相角为0°时灵敏度

差, 易引起误判的缺点是很有用的, 相对于单纯靠比较暂态零序电流幅值的方法而言灵敏度更高。本方法相当于将故障线路与非故障线路之间电流幅值关系与极性关系整合成了一种方法, 克服了首半波法的极性关系成立时间太短的缺陷, 从而使本方法比当前的两种主流的暂态选线法具有很大优势。另外, 由于故障暂态电流持续时间约为0.5~1个周波, 且各正常线路的电流为本线路的电容电流, 即与该线路长度成正比, 因此通过对故障数据长度的适当选取和线路零序电流的单位长度化再互相做差就可以排除正常线路之间工频分量的干扰, 而故障线路与正常线路之间单位长度化电流之差仍存在部分工频分量, 但该分量的出现更扩大了正常-故障线路差电流与正常-正常线路差电流的区别, 不但不会出现误判, 反而更有助于选线; 当母线故障时上述方法完全可以排除工频分量的干扰, 从而能够正确选线。最后, 本方法原理简单, 计算量很小, 适于实时实现, 仿真证明了算法的可靠性。本文的不足在于本方法仅适用于出线全是架空线的情况, 对含有电缆出线的混合线路并不适用。此外, 由于分析上的困难, 本文省略了变压器和互感器的不平衡电流, 留待以后继续深入探讨。

参考文献

[1] 桑在中, 张慧芬, 潘贞存. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (2): 11-13.
SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun. Single Phase Grounding Fault Protection by Injecting Currents in Ineffective Grounding Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (2): 11-13.

[2] 郝玉山, 杨以涵, 任元恒. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理[J]. 电力情报, 1994(2): 15- 19.
HAO Yu-shan, YANG Yi-han, REN Yuan-heng. Principle of Magnitude & Phase Comparison for Micro-computer Based Small Current Fault Line Selection[J]. Information on Electric Power, 1994(2): 15-19.

[3] 张立华, 徐文立. 小接地电流系统单相接地故障选线

的一种新算法[J]. 清华大学学报, 1998, 38 (9): 74-76.
ZHANG Li-hua, XU Wen-li. A New Algorithm of Fault Line Detection in Small Current Neutral Grounding System[J]. Journal of Tsinghua University, 1998, 38 (9): 74-76.

[4] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[5] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[6] 陈奎, 唐轶. 小电流接地系统电弧接地选线方法的研究[J]. 继电器, 2005, 33 (16): 5-9.
CHEN Kui, TANG Yi. Study on Faulty Line Detection of Single Phase to Ground Fault in Arc Suppression Coiled System[J]. Relay, 2005, 33 (16): 5-9.

[7] 王耀南, 霍百林, 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 Yao-nan, HUO Bai-lin, 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.

[8] 薛永端, 徐丙垠, 等. 利用暂态信号的小电流接地故障保护与监测技术[Z]. 淄博: 科汇电气, 2005.
XUE Yong-duan, XU Bing-yin, et al. Earth Fault Protection and Monitoring Technology Using Transient Signal in Non-solid Earthed Network[Z]. Zibo: Ke Hui Electric Power, 2005.

[9] 潘泉, 张磊, 孟晋丽. 小波滤波方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[10] 胡光书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

收稿日期: 2009-04-17; 修回日期: 2009-06-26

作者简介:

周登登 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: 376591816@qq.com

刘志刚 (1975-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代信号处理及其在电力系统中的应用。