

文章编号:1673-5005(2006)03-0135-05

基于暂态分量的配电网单相接地故障选线新方法

王艳松, 张萌萌

(中国石油大学 信息与控制工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:在对目前应用小波变换技术进行配电网单相接地选线方法综合分析的基础上,提出了一种基于最小瞬时零序功率的选线新方法。通过分析配电网单相接地故障的暂态过程,给出了配电网单相接地故障时零序电压和各条线路的零序电流的瞬时表达式,定义了瞬时零序功率并将其作为故障选线特征量。结合配电网单相接地故障的大量仿真分析,应用小波包将零序电流和零序电压暂态信号逐层剥离,提取最大分量的信号频段为特征频段;根据各线路特征频带的零序电流、零序电压计算每条线路的瞬时零序功率,在短路第1个周期内,具有最小瞬时零序功率的线路为故障线路。仿真分析结果表明,该选线方法对中性点不接地和中性点经消弧线圈接地配电网都适用,而且不受短路时刻、线路长度的影响,抗电弧过渡电阻能力强。

关键词:配电网;小波包;瞬时零序功率;单相接地故障

中图分类号:TM 711 **文献标识码:**A

A novel method of fault line selection by transient component for single-phase to ground fault in distribution networks

WANG Yan-song, ZHANG Meng-meng

(College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: The methods of fault line selection by wavelet transform were summarized for single-phase to ground fault in distribution networks. Then a novel method of fault line selection was presented based on minimum instantaneous zero sequence power. By analyzing the transient process of single-phase to ground fault in distribution networks, the expression of zero sequence voltage and zero sequence current was given. And instantaneous zero sequence power was defined and taken as characteristic quantity of fault line selection. The instantaneous zero sequence voltage and current is decomposed into many frequent bands by wavelet packet. The character frequent band is obtained by comparing the value and the regulation of instantaneous zero sequence voltage and current in each frequent band. The zero sequence instantaneous power of each line is calculated within first period of character frequent band. The fault line selection is implemented by comparing the minimum instantaneous zero sequence power of each line. If its minimum instantaneous zero sequence power is least among all lines, the line is fault line. It is avoided to compare the polarity of each line between zero sequence voltage and zero current. The new criterion is adaptive to any type of neutral node connection in distribution networks. Simulation indicates that this novel selection fault line method exactly selects fault line in any time of short circuit with high value arc-resistance and with different length line.

Key words: distribution network; wavelet packet; instantaneous zero sequence power; single-phase to ground fault

中性点经消弧线圈接地的配电网,单相接地选线一直是电力系统的一个难题。基于稳态分量的单相接地选线方法有五次谐波电流的幅值方向法^[1-2]、注入信号源法^[3]、零序电流有功分量法^[4-5]等。由于稳态零序电流幅值较小,基于稳态分量的

单相接地选线准确率不高;消弧线圈短时并联电阻^[6-7],可提高接地选线的可靠性,但不能很好发挥消弧线圈的作用。近年来,有人以小波变换为理论研究工具,分别提出了应用零序电流小波变换系数模值与极性^[8-13]、模值的积分^[14]和零序电压电流的

收稿日期:2006-01-10

基金项目:中国石油大学青年博士基金资助项目(Y050503)

作者简介:王艳松(1965-),女(汉族),山东蓬莱人,副教授,博士,从事配电自动化与配电网优化规划的研究。

小波变换系数之比^[15]作为选线判据。但目前基于小波变换技术的配电网单相接地故障选线的研究主要局限于应用小波变换检测高频零序电流的大小或奇异性,其选线精度受短路时刻、网络结构、线路长度、接地点的位置、电弧电阻以及被分析信号的数据长度、小波基的选取等多因素的影响较大。笔者通过分析配电网单相接地故障的暂态过程,提出一种基于最小瞬时零序功率的选线新方法。

1 小波包

小波分析是一种窗口大小固定但其形状可以改变的时间窗和频域窗的时-频局部化分析方法,在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。多分辨分析在空间上将信号分为低频和高频两部分,并不断对低频部分进行细分,而高频部分不予考虑。小波包分析可以对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解,并根据被分析信号的特征,自适应地选择相应的频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时-频分辨率。

小波子空间 $\{U_j^n, j \in \mathbf{Z}, n \in \mathbf{Z}\}$ 的任意函数 $f_j^n(t)$ 都可以展开成正交小波级数

$$f_j^n(t) = \sum_{l \in \mathbf{Z}} c_l^{j,n} \mu_n(2^l t - l).$$

式中, $c_l^{j,n}$ 为小波子空间 U_j^n 的小波包重构系数; $\mu_n(2^l t - l)$ 为小波包函数族。

根据小波包空间的正交直和分解关系 $U_j^{n+1} = U_j^{2n} \oplus U_j^{2n+1}$, 得到小波包分解系数 $d_l^{j,2n}$ 和 $d_l^{j,2n+1}$ 的递推公式为

$$d_l^{j,2n} = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_m d_k^{j+1,n}, \quad d_l^{j,2n+1} = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_m d_k^{j+1,n}.$$

式中, g_m 和 h_m 均为滤波器系数; $m = k - l$ 。

由小波包分解系数 $d_l^{j,2n}$ 和 $d_l^{j,2n+1}$, 可得到小波包重构系数 $c_l^{j,n}$ 的递推公式为

$$c_l^{j+1,n} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} [h_m d_k^{j,2n} + g_m d_k^{j,2n+1}], \quad m = l - 2k.$$

利用小波包分析对故障信号进行精细分析, 比较小波分析方法处理信号的结果与理论结果的误差, 并由此来选定最优小波基。

2 配电网单相接地暂态故障特征

中性点经消弧线圈接地的系统, 当发生金属性单相接地时, 由于通常消弧线圈处于过补偿状态, 故障线路与非故障线路的基波零序电流在数值和方向上都很难区分。所以, 在中性点经消弧线圈接地的电

网中, 不能利用基波零序电流的数值大小和方向实现单相接地故障选线。单相接地故障的暂态分量中包含多种频率成分的周期分量和非周期分量, 暂态信号特征频段的确定是利用暂态量进行故障选线的关键。

当中性点经消弧线圈接地的配电网发生单相接地故障时, 零序网络见图 1。故障点有一个假想的零序电源, 零序电源的电压近似用下式表示:

$$u_0 = u'_0 + u''_0 = U_m \sin(\omega t + \varphi) +$$

$$\frac{U_m \sin \varphi}{\sin \beta} e^{-bt} \sin(\omega_0 t - \beta).$$

其中

$$\beta = \arctan(\omega_0/b).$$

式中, u'_0 为以 ω 电源角频率变化的强制分量; u''_0 为以 ω_0 角频率振荡的自由分量; t 为时间, s; U_m 为零序电压的幅值, 随电弧电阻变化, V; φ 为零序电压的初相角, 与短路时刻有关, rad。由于配电网线路较短, 零序电流较小, 近似认为配电网各点的零序电压相等。

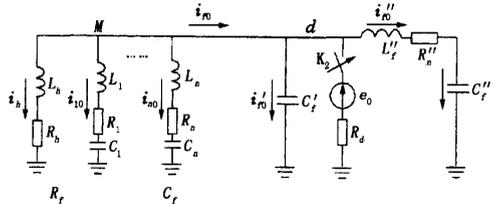


图 1 配电网单相接地零序电路

第 k 条正常线路的零序电流也由两部分组成, 一个是以 ω 电源角频率变化的强制分量 i'_{ck} , 另一个是以 ω_0 角频率振荡的自由分量 i''_{ck} , 即

$$i_{0k} = i_{ck} = i'_{ck} + i''_{ck} = I_{mk} \sin(\omega t + \varphi - \psi_k) + \frac{I_{mk} \sin(\varphi - \psi_k)}{\sin \alpha_k} e^{-b_k t} \sin(\omega_k t - \alpha_k),$$

其中

$$\omega_k = \sqrt{\frac{1}{L_k C_k} - \left(\frac{R_k + R_d}{2L_k}\right)^2}, \quad \alpha_k = \arctan \frac{\omega_k}{b_k},$$

$$b_k = (R_k + R_d)/2L_k.$$

式中, ω_k 为谐振角频率, rad/s; ψ_k 为线路 k 的复阻抗角, rad; I_{mk} 为稳态电流分量的幅值, 随电弧电阻和短路时刻变化, A。

第 f 条故障线路的零序电流也由强制分量和自由分量组成, 其中自由分量由所有正常线路的多个振荡频率组成, 即

$$i_{f0} = -(i'_h + \sum_{k=1, k \neq f}^n i'_{0k}) - (i''_h + \sum_{k=1, k \neq f}^n i''_{0k})$$

$$= - [I_{mh} \sin(\omega t + \varphi - \psi_h) + \sum_{k=11, k \neq f}^n I_{mk} \sin(\omega t + \varphi - \psi_k)] - \{ - I_{mh} \sin(\varphi - \psi_h) e^{-t/\tau_h} + \sum_{k=11, k \neq f}^n [I_{mk} \sin(\varphi - \psi_k) e^{-b_k t} \sin(\omega_k t - \alpha_k)] \}$$

式中, I_{mh} 为消弧线圈支路的稳态零序电流的幅值, A; ψ_h 为消弧线圈支路等值复阻抗角, rad; τ_h 为消弧线圈支路非周期分量的衰减时间常数, s。

瞬时零序功率 P_0 定义为 $P_0 = i_0 u_0$ 。其中, i_0 为任意时刻的零序电流, A; u_0 为相应时刻的零序电压, V。

由于故障线路零序电流包含了所有正常线路的零序自由分量和消弧线圈支路的零序电流自由分量,因此故障线路与非故障线路零序电流中自由分

量衰减振荡频率成分和衰减振荡变化形状不同,在相同的零序电压的作用下,故障线路一部分频率成分的瞬时零序功率在某些时刻将被相互加强。瞬时零序功率比瞬时零序电流更能明显区分故障线路和非故障线路。

3 单相接地短路仿真分析

某 35 kV 中性点经消弧线圈接地配电网,其 Matlab 仿真模型如图 2 所示。5 条一级线路的长度分别为 9, 25, 13, 19, 34 km, 线路 2 和线路 3 分别接有 3 条二级线路, 长度分别为 10, 13, 9 和 13, 10, 10 km。线路的正序单位长度参数为 $R_1 = 0.17 \Omega$, $L_1 = 1.2 \text{ mH}$; $C_1 = 9.697 \text{ nF}$; 线路的零序单位长度参数为 $R_0 = 0.23 \Omega$, $L_0 = 5.48 \text{ mH}$, $C_0 = 6 \text{ nF}$ 。

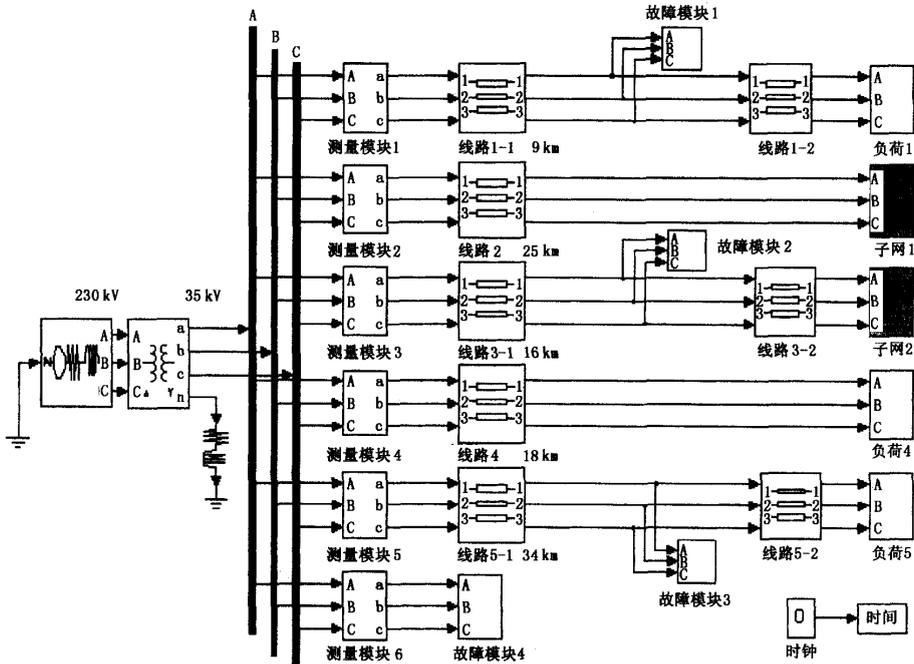


图 2 35 kV 配电网故障仿真模型

各测量模块的采样频率为 4.8 kHz, 改变电弧电阻、短路点位置和短路时刻,进行了大量单相接地故障仿真。应用小波包分析暂态零序电流和零序电压,通过对各尺度的不同频带的信号进行分析比较发现,在 300 Hz 以下各低频段,零序电流和零序功率的变化规律基本一致,故障线路与非故障线路的特征有明显区别。在 300 Hz 以上各高频段的零序电压和零序电流值比低频段小得多,受短路时刻、过渡电阻的影响较大,抗高阻能力较差,且各线路的零序电流和零序功率的变化规律与 0 ~ 300 Hz 频段变化规律相

反。本文中选中波基为 db10, 对各线路零序电流的故障前一个周期和故障后一个周期的信号进行分析,提取 0 ~ 300 Hz 频段的信号作为特征信号,并计算各线路瞬时零序功率作为故障选线依据。

对图 2 配电网中最短线路 1 和最长线路 5 分别进行各种情况的单相接地故障仿真,各线路最小瞬时零序功率随电弧电阻、短路时刻和故障距离的变化见图 3 ~ 5 (图中实线和虚线分别为故障和非故障线路瞬时零序功率波形)。

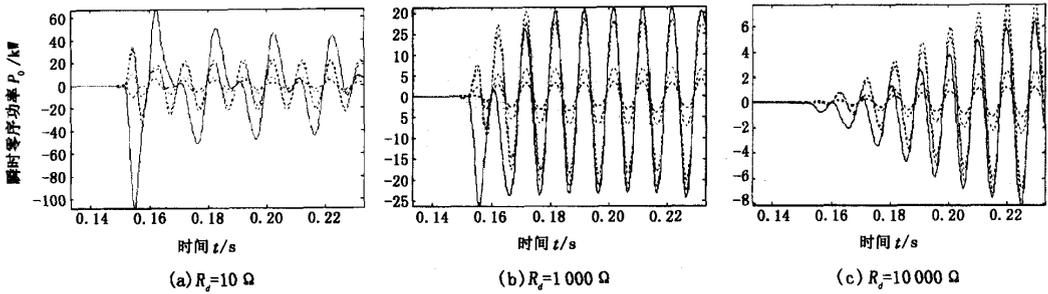


图3 瞬时零序功率随电弧电阻的变化规律

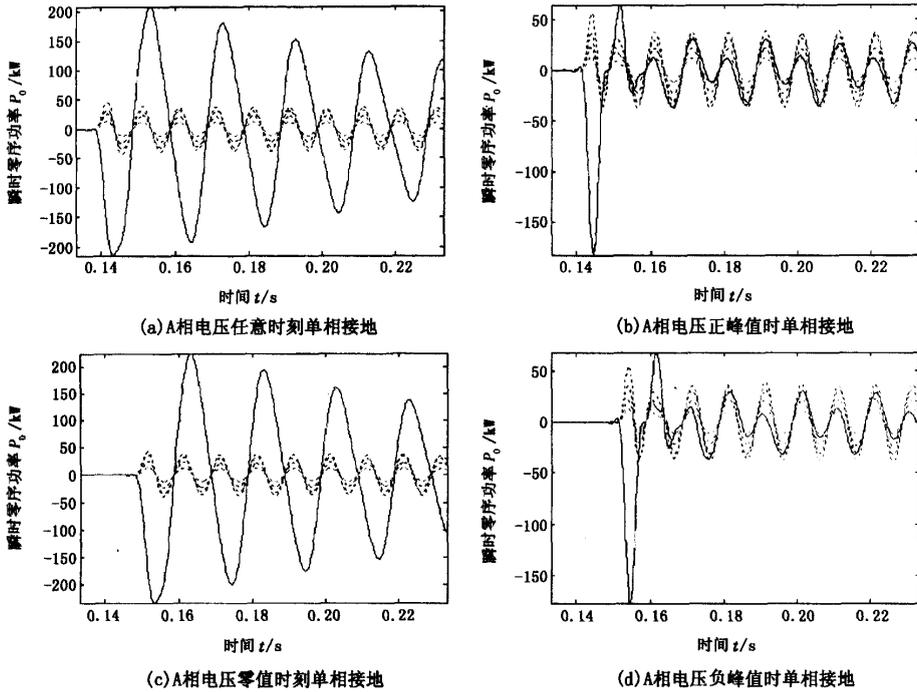


图4 瞬时零序功率随短路时刻的变化规律

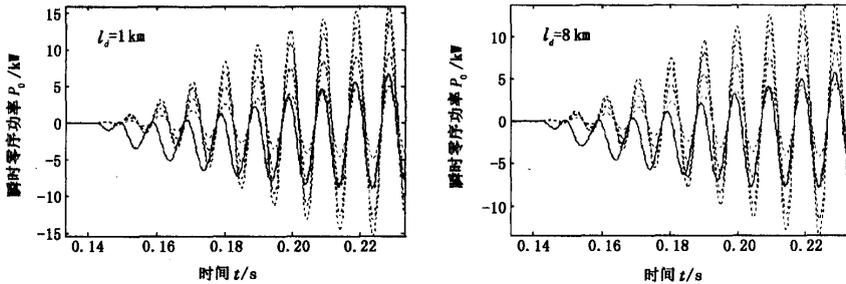


图5 单相接地瞬时零序功率随故障距离的变化规律

在短路第1个工频周期内,比较各条线路最小瞬时零序功率的大小,其中最小者为故障线路,选线结果见表1。

上述结果对应配电网补偿率为10%。改变配电网补偿度为5%,选线结果依然正确。由图3~5和表1可知,在短路第1个周期内故障线路的负峰值

比正常线路的负峰值小得多,这个变化规律不受故障距离、故障时刻和接地过渡参数的影响。

表1 配电网单相接地时各线路最小瞬时零序功率 P_{0i} 和选线结果

故障线路	故障距离 l_d/km	接地电阻 R_d/Ω	短路时刻 t_d/s	P_{01}/kW	P_{02}/kW	P_{03}/kW	P_{04}/kW	P_{05}/kW	选线结果
1	1	10	0.1484	-937.70	-154.02	-71.92	-95.39	-184.71	1
1	8	10	0.1484	-282.82	-33.76	-16.04	-24.18	-73.93	1
1	8	100	0.1484	-151.56	-19.71	-9.43	-13.17	-27.66	1
1	8	100	0.1534	-936.38	-32.231	-13.670	-19.746	-42.173	1
1	1	10	0.1400	-635.24	-153.59	-134.88	-120.70	-212.82	1
1	8	1000	0.1434	-18.299	-7.254	-3.625	-5.038	-10.031	1
1	8	5000	0.1400	-325.78	-0.7598	-0.3902	-0.5436	-1.0664	1
5	33	5000	0.1484	0.0098482	-0.0273117	-0.0139813	-0.0199080	-0.0723801	5
5	33	5000	0.1434	-0.0117098	-0.0342338	-0.0170128	-0.0237080	-0.0820528	5
5	33	5000	0.1534	-0.0090466	-0.0260965	-0.0131838	-0.0184798	-0.0698741	5
5	1	5000	0.1534	-2.326	-6.377	-3.475	-4.797	-19.096	5
5	1	10	0.1484	-56.3	-177.6	-84.3	-112.4	-1157.5	5

4 结论

(1) 应用小波包变化提取特征频段的零序电流和零序电压,可计算各线路特征频段的瞬时零序功率值。

(2) 在短路第1个周期内,比较各条线路最小瞬时零序功率,以其中最小时为故障线路,不受短路时刻、线路长短、故障距离的影响,抗电弧电阻能力强。

(3) 该选线判据不仅适用于中性点经消弧线圈接地配电网,也适用于中性点不接地配电网。

参考文献:

[1] 孟润泉,米建军,杨毅. 谐波方向原理在矿井高压电网接地选线系统中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2004,35(12):168-171,182.
MENG Run-quan, MI Jian-jun, YANG Yi. The application of fifth harmonic direction principle to the single-phase-grounding protection system of underground HV distribution networks[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004,35(12):168-171,182.

[2] 闫静,金黎,张志成,等. 小电流接地系统的选线系统与设计[J]. 高电压技术, 2003,29(12):12-14.
YAN Jing, JIN Li, ZHANG Zhi-cheng, et al. A novel device of ground faulted line detection in resonant grounding[J]. High Voltage Engineering, 2003,29(12):12-14.

[3] 桑在中,张惠芬,潘贞存,等. 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):11-12,35.
SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, et al. Protection for single phase to earth fault line selection

for ungrounded power system by injecting signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996,20(2):11-12,35.

[4] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. 电网技术, 1999,23(9):60-62.
MU Long-hua. Principle of selective grounding fault protection based on active component direction of zero-sequence current[J]. Power System Technology, 1999,23(9):60-62.

[5] 杜丁香,徐玉琴. 消弧线圈接地电网的有功选线[J]. 继电器, 2002,30(5):33-36.
DU Ding-xiang, XU Yu-qin. Faulted line detecting with active power in an auto-compensated distribution network[J]. Relay, 2002,30(5):33-36.

[6] 陈玉书,张一华. 谐振接地系统单相接地故障 DK 法选线及其应用[J]. 高电压技术, 2004,30(6):69-70.
CHEN Yu-shu, ZHANG Yi-hua. The DK method of fault line detection and application in neutral resonant grounded network[J]. High Voltage Engineering, 2004,30(6):69-70.

[7] 韩静,徐丽杰. 中性点经消弧线圈瞬时并联小电阻接地研究[J]. 高电压技术, 2005,31(1):38-39,52.
HAN Jing, XU Li-jie. Study of a neutral grounding method with an arc suppression coil and parallel low resistance[J]. High Voltage Engineering, 2005,31(1):38-39,52.

[8] 俞晓荣,廖培金,彭书涛,等. 小波分析在小电流接地系统故障选线中的应用[J]. 电力系统及自动化学报, 2003,15(4):24-26.
YU Xiao-rong, LIAO Pei-jin, PENG Shu-tao, et al. The application of wavelet transform in finding fault feeder of earth fault in resonant grounded system[J]. Proceeding of the EPSA, 2003,15(4):24-26.

(下转第143页)

方法对各价值活动之间的优化空间进行超前分析、整体思考和动态控制是完全可行的。

参考文献:

- [1] SHANK John K, GOVINDAREJIN Vijay. Strategic cost management-the new tool for competitive advantage [M]. New York: The Free Press, 1993.
- [2] MACHER Michael. Cost accounting creative value for management[M]. 5th ed. [S. L.]: Mechanical Publishing House, 1999.
- [3] SHANK John K, GOVINDARAJAN Vijay. Handbook of cost management: strategic cost management and the

value chain[M]. New York: Warren Gorham & Lamont, 1991.

- [4] 迈克尔·波特. 竞争优势[M]. 陈小悦,译. 3版. 北京:华夏出版社,1998:10-21.
- [5] 李济东,赵振智,张洪庆,等. 油气开采企业成本预算管理研究[M]. 东营:石油大学出版社,2005:131-144.
- [6] KRUMWIEDE Kip R. ABC: why it's tried and how it succeeds management accounting[M]. [S. L.]:[S. n.], 1998:32-38.
- [7] 陈轲. 企业战略成本管理研究[M]. 北京:中国财政经济出版社,2001:29-52.

(编辑 修荣荣)

(上接第139页)

- [9] 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.

JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, Yang Yi-han, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Proceeding of the CSEE, 2001, 21(10):78-82.

- [10] 王娜,周有庆,龚静. 小波变换在配电网单相接地故障选线中的应用[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):27-30.

WANG Na, ZHOU You-qing, GONG Jing. Application of wavelet transform to phase-to-ground fault detection in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003,23(10):27-30.

- [11] 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.

- [12] 毛鹏,孙雅明,章兆宁,等. 小波包在配电网单相接地故障选线中的应用[J]. 电网技术,2000,24(6):10-17.

MAO Peng, SUN Ya-ming, ZHANG Zhao-ning, et al. Wavelets packet based detection of phase-to-ground fault in distribution automation system [J]. Power System Technology, 2000,24(6):10-17.

- [13] 束洪春,肖白. 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法[J]. 电力系统自动化,2002,26(21):58-61.

SHU Hong-chun, XIAO Bai. A transient-based study of fault line selection for single-phase to ground faults on distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(21):58-61.

- [14] 肖白,杜世君,周晓岩. 一种基于小波变换的小接地电流系统单相接地故障选线方法[J]. 东北电力学院学报,2003,23(1):72-75.

XIAO Bai, DU Shi-jun, ZHOU Xiao-yan. A method of single phase earth fault protection in distribution system based on wavelet transfer[J]. Journal of China Institute of Electric Power Engineering, 2003,23(1):72-75.

- [15] 操丰梅,苏沛浦. 小波变换在配电网自动化接地故障检测中的应用研究[J]. 电力系统自动化,1999,23(13):33-36.

CAO Feng-mei, SU Pei-pu. Study on the application of wavelet transform to detect earth-fault in distribution automation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999,23(13):33-36.

(编辑 修荣荣)