

文章编号:1000-582X(2008)10-1143-06

## 多频带分析的配电网单相接地故障选线

李新<sup>a,b</sup>, 李景丽<sup>a,b</sup>, 张从力<sup>c</sup>, 罗建<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 电气工程学院; b. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室; c. 自动化学院, 重庆 400030)

**摘要:**针对多年来一直未得到根本解决的配电网单相接地故障选线问题,在分析故障选线现状和基于小波包选线方法的基础上,提出了多频带分析的选线方法。根据各线路暂态零序电流信号小波包分解的能量分布情况,提出对各线路选择能量集中的特征频带或组合特征频带;并根据故障线路和非故障线路暂态零序电流大小关系原理,比较各条线路特征频带或组合特征频带的暂态零序电流的能量以确定故障线路。现场数据和大量的 Matlab 仿真试验结果表明:该选线方法可以准确、可靠地实现配电网单相故障的选线。

**关键词:**配电系统;小波变换;特征频带;组合特征频带;故障选线;继电保护

中图分类号:TM774

文献标志码:A

## Detecting a fault line under a single-phase to ground of distribution network based on analysis of multi-frequency bands

LI Xin<sup>a,b</sup>, LI Jing-li<sup>a,b</sup>, ZHANG Cong-li<sup>c</sup>, LUO Jian<sup>a,b</sup>

(a. College of Electrical Engineering; b. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology; c. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Addressing the problem of choosing a fault line under single-phase to ground of distribution network, we presented a new criterion based on analysis of the development of fault line selection and a method using wavelet packets. The feature frequency band, or the combined feature frequency bands of each line, in which the transient capacity current was concentrated was chosen for maximum energy. Based on the principle that the transient capacity current's energy of the fault line was larger than the that of normal lines, fault line selection can be carried out adaptively by contrasting the energy of the transient capacity currents of all lines in each chosen frequency band. The simulation results and spot testing data shows the proposed method can detect the fault line in distribution networks precisely and reliably.

**Key words:** distribution system; wavelet transform; characteristic frequency bands; combined characteristic frequency bands; fault line selection; relay protection

小电流接地系统单相接地故障的暂态过程中包含较多的故障特征,故障特征值较稳态值大几倍到几十倍<sup>[1]</sup>,因此如果能利用这些暂态特征量来实现故障选线,便具有更高的灵敏度和可靠性。小波变

换作为一种新的时频分析工具,通过小波函数的伸缩和平移产生可变时频窗,在暂态和非平稳信号分析方面具有独特的优越性。近年来,国内外文献中提出了一些利用小波(小波包)变换提取配电网单相

收稿日期:2008-06-12

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2006BB3213)

作者简介:李新(1960-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事在线监测与故障诊断、电力系统继电保护研究,

(Tel)023-65112062;(E-mail)lltd@cqu.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

接地时的暂态特征量以实现故障选线的新方法<sup>[2-10]</sup>。文献[6]利用小波包的分频特性,先选择暂态零序电压能量比较集中的频段,然后求出各线路暂态零序电流在该频段下的小波包分解结果,通过对它们的极性和大小的比较来实现故障选线。这虽解决了小波分频不细的问题,但配电网中每条馈线的长度、所带负荷及自然环境等条件各不相同,暂态电容电流的能量集中频带不一定一致,所以,在每条馈线的条件相差较大即能量集中频带相差较大时,用此方法进行故障选线难免会出现误判。文献[7]中充分利用了 db(daubechies)小波包,针对故障后各条线路暂态电容电流频率分布的不同情况,自适应地选择故障暂态特征最明显的频段进行分析和比较,提高了故障选线的可靠性。但是经过理论研究和仿真试验发现暂态电容电流的能量会出现不集中的现象,即在几个频带上都含有较大的能量;对于这种情况,如果只采用其中一个能量最大的频带内的能量为选线依据,在故障特征不是很明显的情况下很可能因为故障特征提取不完整而出现误判。

笔者在以上研究的基础上提出一种新的基于多频带分析的选线方法,此方法判断过程简单,抗干扰能力强,并应用现场录波和 Matlab 仿真数据验证了该方法的正确性和可靠性。

## 1 小波包分解介绍

小波分析对于信号的高频成分分辨率较差,而小波包分解是根据需要对小波分解中没有被分解的高频部分进行再分解,以使得小波包变换对原始信号的描述更加完整。它不仅继承而且还扩展了小波分析的优点<sup>[11]</sup>。

笔者采用的小波包是 db 正交小波包,由它设计的滤波器是一个共轭正交滤波器组系统(CQF)<sup>[12]</sup>,具有很好的分频特性,其幅频特性如图 1 所示。db 小波的阶次越高,正规性条件越好,幅频特性也越接近理想。因此选择 db10 小波包对故障时各条线路的零序电流信号进行小波包分解,充分利用共轭正交滤波器的能量无损性和功率互补性(能量无损性是指通过滤波器后信号的能量没有损失,保持不变;功率互补性是指尽管每个通道的频率特性不是全通的,也不是理想带通的,但各个通道合在一起却具有全通特性)。同时正交小波变换属于线性变换,所以笔者能够利用小波包分解后的频带来分析原始信号的频率分布,提取零序电流暂态信号的特征。

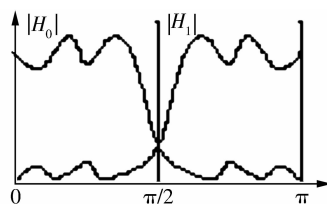


图 1 CQF 系统的幅频特性

## 2 故障特征及选线原理

### 2.1 配电网单相接地的故障特征

由文献[13-14]可知,在补偿电网发生单相接地故障的瞬间,可以采用图 2 所示的等值回路计算小电流接地系统单相接地暂态电流。图中  $C$  为补偿电网的三相对地电容; $L_0$  为三相线路和电源变压器等在零序回路中的等值电感; $R_0$  为零序回路中的等值电阻,其中包括故障点的接地电阻和弧道电阻; $r_L$ 、 $L$  分别为消弧线圈的有功损耗电阻和电感; $u_0$  为零序电源电压<sup>[4]</sup>。所以接地电流为

$$i_d = i_c + i_L = (I_{Cm} - I_{Lm})\cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \times \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega t\right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}}, \quad (1)$$

$$u_0 = U_{\varphi m} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{Cm} &= U_{\varphi m} \omega C, \\ I_{Lm} &= U_{\varphi m} / \omega L, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\omega_f$  为自由振荡电流分量的自振角频率; $\omega$  为工频; $\varphi$  为零序电压的初始相位; $\tau_L$ 、 $\tau_C$  分别为电感和电容回路的时间常数。式(1)中第一项为接地电流稳态分量,等于稳态电容电流和电感电流的幅值之差;其余为接地电流的暂态分量,其值等于电容电流的暂态分量和电感电流的暂态直流分量之和。

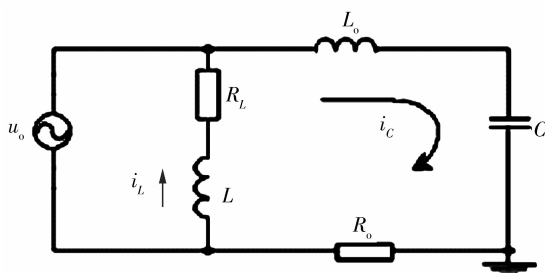


图 2 计算单相接地暂态电流的等值回路

根据以上分析可知:当单相接地故障发生后,暂态接地电流由暂态电容电流和暂态电感电流叠加而成,因为通常架空线路的波阻抗为  $250 \sim 500 \Omega$ ,同时故障点的接地电阻较小,一般都满足  $R_0 < 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$  的条件,所以电容电流具有周期性的衰减振荡特性,自由振荡频率一般为  $300 \sim 1\ 500 \text{ Hz}$ 。电缆线路与架空线路相比前者电感小而电容却较后者大许多倍,故电容电流暂态过程的振荡频率很高,一般为  $300 \sim 3\ 000 \text{ Hz}$ ,而暂态电感电流主要是由工频量和直流分量组成(有上述公式可知),两者幅值和频率差别悬殊,故不可能相互补偿。不论配电网的中性点为谐振接地或不接地方式,暂态接地电流的幅值和频率均主要由暂态电容电流所确定,并且暂态电容电流具有如下特征:

1)故障线路零序电流小波包分解结果具有较大的能量;

2)所有健全线路零序电流小波包分解系数与故障线路的极性相反;

3)暂态电容电流的频率成分和大小受网络参数、故障时刻、接地电阻、自然环境等多种因素的影响。

所以根据故障后暂态电流中的高频暂态电容电流特征可以实现故障线路的选择。而且,基于此特征的选线方法可以应用于各种中性点接地方式的配电网。

## 2.2 配电网单相接地故障选线原理

根据上述故障特征及仿真试验发现的暂态电容电流能量不集中的现象,笔者提出一种基于多频带分析的新判据:首先对各线路的暂态零序电流序列进行分解,并除去工频所在的最低频带;求出各线路各频带小波分解系数的平方和即能量并归一化,对每条线路选择能量大于阈值的频带作为分析频带(此时若某条线路只有一频带的能量大于阈值则称之为该线路的特征频带,若有 2 个或多个频带的能量大于阈值则称其为该线路的组合特征频带);比较每条线路分析频带的能量,最大者即为故障线路。故障选线流程如图 3 所示。

在笔者提出的选线判据中定义了组合特征频带的概念,通过比较特征频带或组合特征频带内各条出线能量大小来确定故障线路。避免了信号频带能量较小、测量和计算误差的存在而导致错误选线的可能,同时对于故障特征不是很明显即暂态电容电流频率分布较宽的情况,可以避免出现由于能量提取不完整而出现误判现象,从而为可靠、准确选线提供了基础。

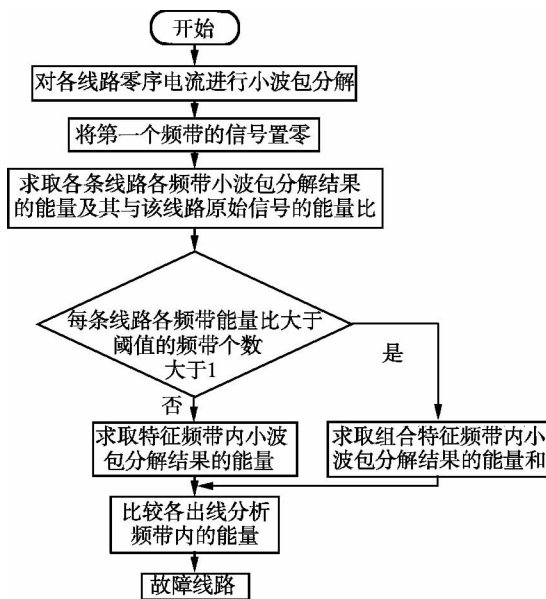


图 3 故障选线实现流程

## 3 选线方法有效性验证

### 3.1 现场数据验证

采用重庆市储奇门变电站现场故障录波数据对上述方法进行验证,结果证明了文中方法的有效性和正确性。这里给出 2 组故障算例。

故障算例 1:重庆市储奇门 110/10 kV 变电站采用中性点经消弧线圈接地方式,10 kV 侧为单母线分段,两段母线分别由十六回出线到用户端,三十二回线全部用电缆出线,总长为 34.79 km;线路参数为正序阻抗  $Z_1 = (0.17 + j0.08) \Omega/\text{km}$ ;零序阻抗  $Z_0 = (0.13 + j0.28) \Omega/\text{km}$ ;对地电容  $C_0 = 0.36 \mu\text{F}/\text{km}$ ;现场数据采样频率为 10 kHz。因为暂态电容电流持续时间约为 0.5~1 个工频周波,采集数据窗取故障后一个周期;根据上述对 db 小波包的介绍,笔者选用 db10 小波包;考虑到最终用于故障选线的频带宽度应选择适当,选线频带宽度定为 156 Hz,则根据小波包的频率二分特性,分解层数定为 5。计算并比较各频带的系统能量,暂态电容电流最集中的特征频带一致都是 (5, 1)。该频带下的小波包分解结果如图 4 所示,横坐标为采样点;纵坐标为小波包分解系数。计算得出线路  $L_1 \sim L_4$  在频带 (5, 1) 下的能量依次是  $2.26 \times 10^6$ ,  $3.3 \times 10^5$ ,  $1.8 \times 10^5$ ,  $2.5 \times 10^5$ , 即得故障发生在线路  $L_1$  上。

故障算例 2:各线路的暂态零序电流小波包分解结果在各频段下的能量分布情况如图 5 所示,图中的横坐标是第五层小波包分解后产生的 32 个子频段的序号;纵坐标表示的是归一化后的各子频段

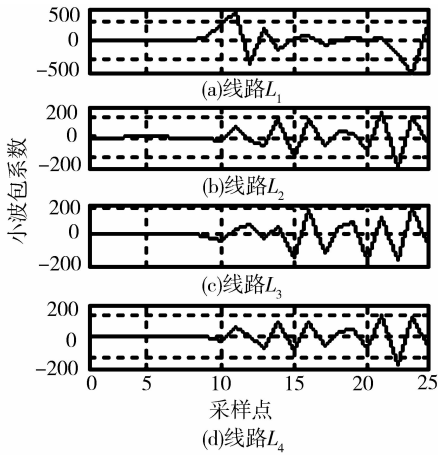


图 4 频带(5,1)下的小波包分解结果

下的小波包分解的能量。从图中可以注意到这样一种情况:线路  $L_1$  的暂态电容电流的能量主要分布于(5,1),(5,2),(5,3)3个频带之中,能量最大的频带(5,1)中的能量占此线路总能量的40%,频带(5,3)中的能量占此线路总能量的20%;线路  $L_2$  和  $L_3$  也出现了类似的线路暂态电容电流能量不集中的现象。

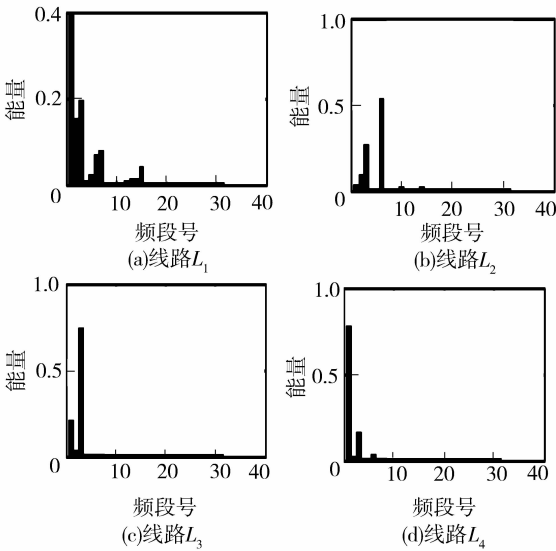


图 5 小波包分解结果能量分布图

配电网中每条馈线的长度、所带负荷和自然环境等条件各不相同,导致了上述算例中出现的各线路暂态电容电流能量集中的特征频带不一致,且能量集中频带分散的现象。这种现象是造成利用单一特征频带下暂态分量来实现故障选线可靠性不高的一个主要原因。经过大量的仿真证明在故障特征不是很明显的条件下,如果只取能量最大频带作为分析频带,通过对每条线路分析频带内的零序暂态电流能量大小的比较选择故障线路,则可能会因为提

取故障特征不完全导致误判。图 6 列出了此故障算例中各线路特征频带下小波包分解结果,可以证明这一论断。

基于以上理论分析和对各种故障条件下的多组算例的仿真经验选取 0.1 作为选取分析频带的阈值,对每条线路分别选取能量比大于 0.1 的频带作为分析频带,求取每条线路分析频带内暂态零序电容电流的能量分别为:10 222,4 572,8 756,7 881,所以线路  $L_1$  为故障线路。

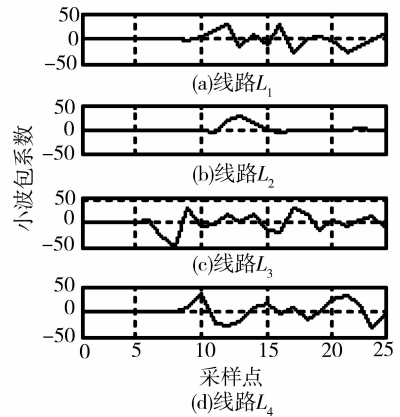


图 6 各线路特征频带下的小波包分解结果

### 3.2 Matlab 仿真数据验证

基于 Matlab 的仿真系统<sup>[15-16]</sup>是一个有 4 条出线的 10 kV 配电网,如图 7 所示。线路参数为正序阻抗  $Z_1 = (0.17 + j0.38) \Omega/\text{km}$ ;正序对地导纳  $b_1 = j3.045 \mu\text{S}/\text{km}$ ;零序阻抗  $Z_0 = (0.23 + j1.72) \Omega/\text{km}$ ;零序容纳  $b_0 = 1.884 \mu\text{S}/\text{km}$ 。接地方式为过补偿,补偿度 8%,根据线路参数及长度可以计算出消弧线圈电感  $L_N = 8.02 \text{ H}$ ;其串联电阻的阻值按消弧线圈感抗值的 10%考虑,即  $R_L = 252 \Omega$ 。

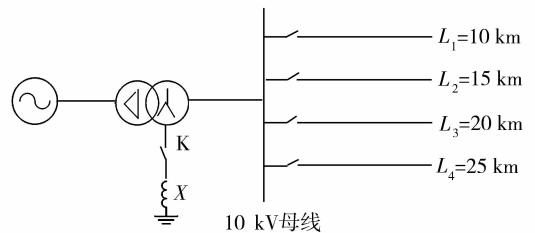


图 7 10 kV 配电系统结构

用 Matlab 进行配电网单相接地故障仿真时中性点不接地、经消弧线圈接地两种运行方式,并考虑不同的故障条件及其组合条件。Matlab 故障仿真数据导入文本编制的故障选线算法程序,进行如图 3 所示的处理和判别,表 1 列出了部分仿真结果。

表 1  $L_1$  故障时配电系统单相接地选线结果

$L/\text{km}$	$R_f/\Omega$	$\theta = 0^\circ$ 各线路分析频带能量				$\theta = 45^\circ$ 各线路分析频带能量				$\theta = 90^\circ$ 各线路分析频带能量			
		$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
3	1	8 164.00	403.00	1 575.0	2 847.00	201 348.0	8 517.0	28 463.0	95 105.0	376 412.0	13 916.0	66 017.0	175 499.0
3	100	1 045.00	48.00	180.0	394.00	5 728.0	1 002.0	2 223.0	3 717.0	13 484.0	2 329.0	4 652.0	6 545.0
3	1 000	25.30	1.90	9.5	15.50	190.7	79.3	151.6	174.5	489.0	191.0	334.0	392.0
3	4 000	1.66	0.21	0.9	1.38	18.2	8.5	16.4	16.7	46.4	21.5	39.5	36.7
5	10	8 122.00	162.00	790.0	3 292.00	47 805.0	1 785.0	10 658.0	21 283.0	96 749.0	4 537.0	19 251.0	44 247.0
5	1 000	62.90	10.10	15.9	19.00	231.9	94.2	146.7	171.4	419.0	161.0	302.0	365.0
10	10	1 999.00	78.00	408.0	831.00	4 144.0	541.0	1 898.0	2 429.0	16 188.0	1 423.0	5 284.0	8 369.0
10	1 000	32.60	6.40	16.0	20.90	127.6	55.7	103.0	113.0	363.0	148.0	261.0	307.0

上述仿真都是在中性点经消弧线圈的运行方式下进行的,笔者对中性点不接地的运行方式也进行了相似的故障选线仿真,证明该选线原理适用于中性点不接地和中性点经消弧线圈接地的电力系统。

#### 4 结 语

提出的配电网单相接地故障选线原理充分利用了 db 小波包的分频特性和能量无损性,针对故障后各线路暂态电容电流频率分布的不同情况以及仿真实验中存在的能量分布不集中的现象,设定阈值自适应地选择在故障暂态特征较为明显的特征频带或组合特征频带下进行分析和比较,因而能够更加有效地利用故障暂态过程中包含的信息,不会出现因干扰和测量误差而导致故障特征被湮没的情况,对故障特征不是很明显的情况下,避免了因为故障特征提取不完整而出现误判的情况,可以提高故障选线的可靠性。现场数据和仿真结果表明:利用该原理进行故障选线具有高度的灵敏性和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 马珂,张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望 [J]. 继电器, 2003, 31 (5):65-69.  
MA KE, ZHANG BAO-HUI. Development and prospect of the single-phase grounding fault detection in unearthed or compensated neutral networks [J]. Relay, 2003, 31 (5):65-69.
- [2] QI Z, YANG Y H. Study on line selection in non-effectively grounded system based on wavelet transform and wiener filter [C]// 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 6-10, 2004, Denver CO. Piscataway: IEEE, 2004 (1-2): 89-93.
- [3] HE Z Y, CHEN X Q, ZHANG B. Wavelet entropy measure definition and its application for transmission

line fault detection and identification (Part III: Transmission line faults transients identifications) [C]// 2006 International Conference on Power System Technology, October 22-26, 2006, Chongqing, China. New York: IEEE, 2006:1-5.

- [4] JIA Y F, YUAN S, ZHAO C F, et al. Transient selection for ground faults based on wavelet transform [C] // 2006 China International Conference on Electricity Distribution, Sept. 17-20, 2006, Beijing, China. Stevenage, UK: IET, 2006:185-189.
- [5] 毛鹏,孙雅明,张兆宁,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):9-13.  
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):9-13.
- [6] 戴剑锋,张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5):44-47.  
DAI JIAN-FENG, ZHANG YAN-XIA. Study on adaptively choosing fault line under single-phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5):44-47.
- [7] 赵慧梅,张保会,段建东,等. 一种自适应捕捉特征频带的配电网单相接地故障选线新方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2):41-44.  
ZHAO HUI-MEI, ZHANG BAO-HUI, DUAN JIAN-DONG, et al. A new scheme of faulty line selection with adaptively capturing the feature band for power distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (2):41-44.
- [8] 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的选线方法[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]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.
- [9] 林湘宁, 翁汉俐, 吴科成, 等. 小电流接地系统自适应单相接地保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 52-57.
- LIN XIANG-NING, WENG HAN-LI, WU KE-CHENG, et al. A novel adaptive protection principle of the single-phase earth fault of the non-effectively grounded power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 52-57.
- [10] 薛永瑞, 徐丙垠, 冯祖仁, 等. 电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.
- XUE YONG-RUI, XU BING-YIN, FENG ZU-REN, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
- [11] 唐晓初. 小波分析及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] LIAN H B, TAN W P, LI W F, et al. Research on a new compensation mode in MV power network[C] // 2004 IEEE PES Power Systems Conference & Exposition, Oct. 10-13, 2004, New York. Piscataway: IEEE, 2004: 1234-1239.
- [15] 王忠礼, 段慧达, 高玉峰. MATLAB应用技术在电气工程与自动化专业中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [16] XU Z Q, LIU M G, LI N. A new modeling method of fault diagnosis for power line based on fault sample information [C] // Proceedings of 2006 International Conference on Artificial Intelligence. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication Press, 2006: 664-668.

(编辑 李胜春)

~~~~~

(上接第 1133 页)

- [10] ARTURO D R, FABRIZIO N, DOMENICO L. Experimental analysis of common rail pressure wave effect on engine emissions[C] // SAE Technical Paper. Detroit: Society of Automotive Engineers, Inc., 2005.
- [11] 张均享. 高机动性运载车辆动力系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.
- [12] 刘果. 共轨柴油机流动过程仿真及实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2007.
- [13] 付水领, 祁晓野. AMESim 系统建模和仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [14] 丘铭军, 赵航, 姚培. AMESim 软件及其应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 8(22): 60-61.
- QIU MING-JUN, ZHAO HANG, YAO PEI. AMESim and application [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005, 8(22): 60-61.
- [15] AIBRECHT A, CORDE G, KNOP V, et al. 1D simulation of turbocharged gasoline direct injection engine for transient strategy optimization. [C] // SAE Technical Paper. Detroit: Society of Automotive Engineers, Inc., 2005.

(编辑 侯湘)