

希尔伯特变换在配电网故障选线中的应用

张国军, 任荣, 韩静静, 田永峰

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 为克服目前小电流接地系统单相故障发生在相电压过零点附近选线方法灵敏度低的缺点, 提出了一种基于希尔伯特变换的综合选线判据。将零序电流进行小波包分解的同时, 运用希尔伯特变换对分解结果进行瞬时频率分析, 计算频带能比因子。将频带能比因子作为启动选线方法的条件, 当高频分量多时比较小波高频能量, 当低频分量多时比较直流分量能量, 将两种方法进行有机综合可以构成完善的故障选线方案。仿真结果表明该方法有效、准确、且适用性强, 不受系统结构和运行方式等的影响。

关键词: 小电流接地系统; 希尔伯特变换; 频带能比因子; 高频能量; 直流分量

Application of Hilbert transform in faulty line selection of distribution network

ZHANG Guo-jun, REN Rong, HAN Jing-jing, TIAN Yong-feng

(School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technology University, Huludao 125105, China)

Abstract: In order to overcome the disadvantage of low sensitivity of line selection method in neutral ineffectively grounded system when fault occurs near the zero-crossing point of phase voltage, a faulty line selection based on Hilbert transform is proposed, which carries out the wavelet packet decomposition of transient zero-sequence current for each line into low and high frequency subbands, whose instantaneous frequency are calculated by Hilbert transform at the same time, calculates the frequency band energy factors according to the wavelet coefficients. The frequency band energy factor is used as a condition of starting line selection method, when the high-frequency component is the main ingredient, we select the faulty line according to the maximum value of high-frequency wavelet energy; when the low-frequency component is the main ingredient, we select the faulty line according to the maximum value of DC component energy. A perfect scheme will be worked out combining with the two methods. Results of simulation show that, the proposed method, which is immune to the system structures and the mode of operations, has the characteristics of reliability, accurately and practicality.

Key words: neutral ineffectively grounded system; Hilbert transform; frequency band energy factor; high-frequency wavelet energy; DC component

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0023-06

0 引言

稳态量的各种选线方法在工程实际上并不实用, 接地故障时暂态电流比稳态电流大很多, 基于暂态分量的选线方法选线精度高、效果好且不受消弧线圈的影响^[1-2]。但是由于电流系统的结构和运行状态不尽相同^[3-4], 而导致系统发生单相接地故障后, 暂态信号不明显或不稳定^[5-6], 如果只使用单一特征分量的选线方法不可能彻底解决小电流接地系统的选线难题^[7], 也不可能做到 100%正确选线。所以, 必须通过对各种选线方法进行有机综合, 才能够建立出完善的故障选线方案。

本文分析故障暂态零序电流特征, 运用希尔伯特变换求取瞬时频率, 然后进行小波分解提取特征频带计算频带能比因子, 根据计算所得的频带能比因子 k 判断接地电流的成分, 对于高频分量占主要成分的情况, 采用故障线路暂态能量最大原理进行故障选线; 对于低频分量占主要成分的情况, 则采用直流分量法, 因故障线路零序电流中含有较强的直流分量, 而非故障线路中几乎不含直流分量, 因此可以根据这个差异性进行选线。该综合选线方法可以自适应地选定小波分解层数提取信号特征, 减少了算法时间, 为用于实际创造了条件。

1 单相接地故障暂态零序电流特征分析

发生单相接地故障时小电流接地系统的结构图^[8]如图 1 所示, Q 处于断开状态时为中性点不接地系统, Q 处于闭合状态时为中性点经消弧线圈接地系统。图中, L_{0i} 、 R_{0i} 、 C_{0i} 分别为第 i 条线路的电感、电阻和分布电容; u_0 为母线零序电压; L 为消弧线圈零序电感; R 为消弧线圈串联电阻; R_{f0} 为零序过渡电阻; U_{f0} 为故障接地点位置等效电压; n 为馈出线数。

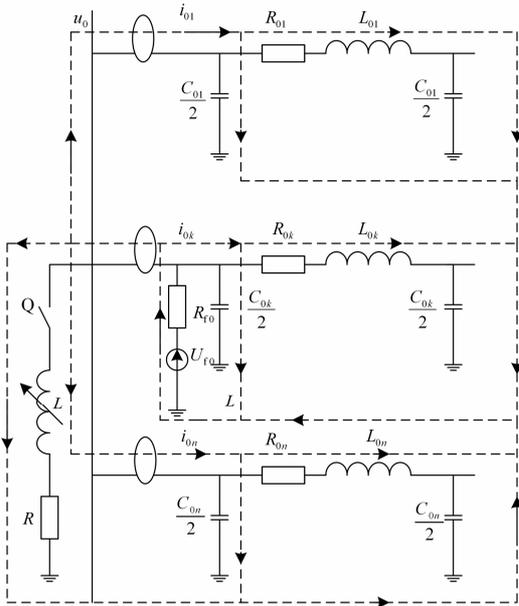


图 1 单相接地故障零序网络

Fig. 1 Equivalent circuit of zero sequence network

令 $u_0 = U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi)$, 则接地电流的暂态分量为

$$i_{d.os} = i_{C.os} + i_{L.os} = \frac{u_0}{L_0 \omega_0} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t + I_{Lm} \cos \phi e^{-t/\tau_L} \quad (1)$$

式中: ω_0 为回路的自振荡角频率; L_0 为零序回路中的等效电感; φ 为零序电压的初相角; $I_{Lm} = U_{\phi m} / \omega L$; τ_L 、 τ_C 分别为电感和电容回路的时间常数; δ 为自由振荡分量的衰减系数, $\delta = 1/\tau_C$ 。

由式 (1) 可知, 在相电压初相角为不同值时, 接地电流中的电容电流和电感电流差别很大, 暂态电感电流由直流分量和工频分量构成^[9]。暂态容性电流频率为暂态电流中的高频段分量, 而暂态感性电流频率为低频段分量^[10]。因此相电压初相角不同

时, 暂态电流信号中的低频段分量与高频带分量的比例差别较大, 为反映这种差别, 引入频带能比因子, 它是暂态电流信号中的低频段分量与高频段分量的能量之比, 即

$$k = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_H} = \frac{\sum_n x_L^2}{\sum_n x_H^2} \quad (2)$$

其中: ε_L 为暂态电流中低频成分的能量; ε_H 为暂态电流中高频成分的能量; x_L 为小波包分解低频段的小波包分解系数; x_H 为小波包分解高频段的小波包分解系数。

为保证选线的正确性, 本文根据频带能比因子是否大于 1 来判断零序电流中的主要成分, 然后采用不同的方法进行选线。当零序电流的主要成分是高频率分量时, 采用暂态方法进行选线; 当零序电流的主要成分是低频分量时, 采用暂态电流分量法, 利用小波重构提取衰减直流分量, 比较衰减直流分量的能量与基频信号的能量比进行选线。

2 选线原理

2.1 希尔伯特变换

一个实值函数的希尔伯特变换是将信号 $s(t)$ 与 $1/(\pi t)$ 做卷积, 以得到 $s'(t)$, 其表达式为

$$s'(t) = h(t) * s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) h(t - \tau) d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

其中, $h(t) = 1/(\pi t)$ 。

则其反变换为

$$s(t) = h(t) * s'(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s'(\tau) h(t - \tau) d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s'(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

易知, $s(t)$ 与 $s'(t)$ 是一对共轭复数, 则假设

$$r(t) = s(t) + js'(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (4)$$

式中: $A(t) = \sqrt{s^2(t) + s'^2(t)}$ 为瞬时幅值; $\theta(t) = \arctan \frac{s'(t)}{s(t)}$ 为相位。

则由相位公式可知, 瞬时频率为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt}$$

2.2 希尔伯特算法流程

将小波包分解作为希尔伯特变换以及特征频

带提取的预处理, 通过逐层对零序电流进行小波分解, 分解成高、低频信号, 运用希尔伯特变换求取高、低频信号的瞬时频率, 根据求得的频率判断是否符合我们所需的特征频带, 如果符合, 终止小波分解; 如果不符合, 进行下一层的小波分解, 直到满足我们所需的要求。我们设定 300~1500 Hz 为我们所需的高频频带, 0~50 Hz 为我们所需的低频频带, 其算法流程如图 2 所示。

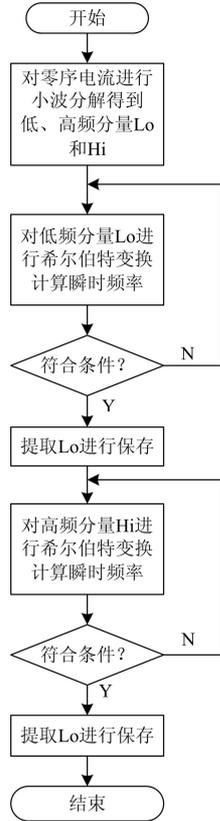


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of algorithm

假设零序电流 $i(t)$ 的第 i 层第 k 个子频带分量 $d_{i,k}(t)$ 的瞬时频率为 $f_{i,k}(t)$, 其中 $t=1, \dots, N$ 。设 (f_A, f_B) 为特征频带的频率, 则提取条件为

$$f_A \leq \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [f_{i,k}(t) - \bar{f}_{i,k}]^2} \leq f_B \quad (5)$$

式中, $\bar{f}_{i,k} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N f_{i,k}(t)$ 是瞬时频率的平均值。

2.3 选线原理

采用 db10 小波对零序电流进行小波分解, 采样频率为 4 000 Hz, 运用希尔伯特变换求取瞬时频率, 当满足

$$300 \leq \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [f_{i,k}(t) - \bar{f}_{i,k}]^2} \leq 1500$$

时, 停止小波高频分解, 当满足

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [f_{i,k}(t) - \bar{f}_{i,k}]^2} \leq 50$$

时, 停止小波低频分解。然后求取频带能比因子, 如果频带能比因子最小值小于 1, 则认为零序电流主要成分是高频分量时, 采用小波能量极大值法进行选线, 比较小波高频能量, 找出能量最大的那条出线, 再将最大能量与其他线路能量进行比较; 当最大能量大于等于其他能量之和 ($\max \varepsilon_j \geq \sum_{i=1, i \neq j}^n \varepsilon_i$)

时, 则认定能量最大线路 j 发生单相接地故障。反之, 如果所有线路的暂态高频能量相差不大, 则认为母线故障。如果每条线路的频带能比因子都大于 1, 则暂态电流中的主要成分是低频分量, 对零序电流进行小波分解到一定层数提取相应的直流分量和工频分量, 对这两部分信号进行单枝重构, 然后比较重构信号的能量, 即直流分量的能量与工频信号的能量比, 令 $m = \frac{\text{直流能量}}{\text{基频信号能量}}$

$m > 1$, 非故障线路 $m < 1$, 如果所有线路的 m 都小于 1, 则为母线故障。

实现步骤的流程如图 3 所示。

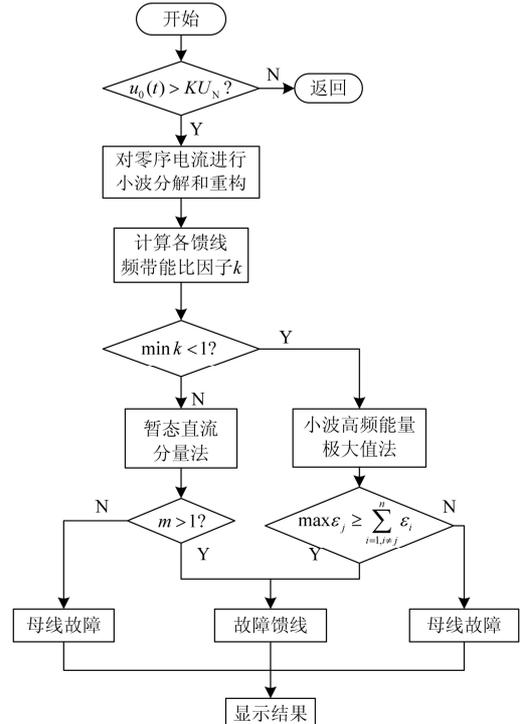


图 3 故障选线流程图

Fig. 3 Flowchart of faulty line selection

3 仿真结果及分析

假设系统为一个有4条线路的10 kV配电网。线路仿真参数设置为

$$r_1 = 0.45 \Omega/\text{km} \quad l_1 = 1.1714 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$$

$$c_1 = 6.1 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{km} \quad r_0 = 0.7 \Omega/\text{km}$$

$$l_0 = 3.9065 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km} \quad c_0 = 3.8 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{km}$$

线路1~线路4的长度分别为6 km、9 km、12 km、20 km，低压侧中性点开关断开时系统不接地，开关闭合时系统经消弧线圈接地， L 计算公式为

$$L = \frac{1}{3(1-\nu)(2\pi f_N)^2 l c_0} \quad (6)$$

其中： l 为系统线路总长； f_N 为工频50 Hz； c_0 为馈线零序电容； ν 为失谐度， $\nu = (I_C - I_L)/I_C$ 。

在上述仿真条件下，改变相电压初相角以及故障时刻，则频带能比因子将是不同的，不同初相角和故障时刻下各出线的频带能比因子如表1所示。

表1 不同初相角下各出线的频带能比因子

Table 1 Under different initial angle the frequency band energy factor of each line

φ	K_1	K_2	K_3	K_4
0°	2.037	2.032	2.026	53.297
10°	2.100	1.510	1.431	31.164
20°	1.782	1.077	0.805	16.077
30°	0.317	0.804	0.677	5.178
40°	0.206	0.615	0.499	2.815
45°	0.151	0.333	0.611	1.925
50°	0.250	0.353	0.226	1.362
60°	0.228	0.286	0.194	0.849
70°	0.395	0.145	0.172	0.487
80°	0.284	0.124	0.163	0.331
90°	0.082	0.183	0.341	0.274

由表1可知，频带能比因子与电压初相角有关。在 $\varphi = 0^\circ$ 附近时，故障线路和非故障线路的频带能比因子都大于1，说明低频能量比高频能量多，此时低频能量占主要成分，采用暂态直流分量法选线。在 $\varphi = 90^\circ$ 附近时，故障线路和非故障线路的频带能比因子都小于1，说明高频能量比低频能量多，此时高频能量占主要成分，则采用高频能量极大值方法选线。在 $\varphi = 0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时，故障线路和非故障线路的频带能比因子不是都大于1或者不是都小于1，则最小的频带能比因子小于1时，认为暂态电流中高频能量多，也采用高频能量极大值方法。

对图1所示系统在Matlab中搭建模型，在不同线路长度、补偿度、过渡电阻、故障点进行大量仿真，结果如表2所示。

由表2可知，对下述几种情况采用高频能量极大值法，如表3所示，都满足 $\max \varepsilon_j \geq \sum_{i=1, i \neq j}^n \varepsilon_i$ ，因此可以正确选线。

表2剩余情况采用暂态电流分量法，如表4所示，满足故障线路 $m > 1$ ，非故障线路 $m < 1$ ，如果都小于1，则认为是母线故障，因此也可以正确选线。

m 同时还受过渡电阻的影响，假设故障发生在中性点经消弧线圈线路4的10 km处，采用过补偿8%，通过改变过渡电阻的值，可以得到如图4的变化曲线。由图可见，随着过渡电阻阻值的增加，故障线路的 m 减小，当过渡电阻为10 k Ω 时， m 还是大于1，同非故障线路的 m 相比还是要大很多，这表明用该方法适用性强。

综上分析，基于希尔伯特变换的综合选线方法不受接地方式、过渡电阻、相电压初相角的影响，可靠性高，能够准确选出故障线路和母线。

表2 故障选线方法确定

Table 2 Results of faulty line selection methods

故障线路	R_f	φ	补偿方式	X_f	K_1	K_2	K_3	K_4	选线方法
线路1	5	0	过补偿8%	4	35.837 4	1.967 3	1.954 2	1.879 5	暂态直流分量法
	100	60	不接地	2	1.014 0	0.373 1	0.530 9	0.623 8	能量法
	1 000	90	欠补偿8%	1	0.435 7	0.724 5	3.237 9	1.238 8	能量法
线路4	5	0	欠补偿4%	12	1.901 4	1.904 9	1.891 3	50.357 0	暂态直流分量法
	100	45	不接地	10	0.405 0	1.103 3	1.629 9	1.129 6	能量法
	1 000	90	过补偿10%	4	0.932 1	2.378 5	3.045 1	3.196 2	能量法
母线	5	0	过补偿5%	0	1.748 0	1.964 6	1.967 8	1.872 8	暂态直流分量法
	100	90	不接地	0	0.468 3	0.304 0	0.526 7	0.497 1	能量法
	1 000	60	欠补偿9%	0	3.730 8	5.205 2	6.190 2	6.669 8	暂态直流分量法

表 3 能量法故障选线结果

Table 3 Results of energy methods to faulty line selection

故障线路	R_f	φ	补偿方式	X_f	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	结果
线路 1	100	60	不接地	2	518.363	21.087 9	54.409 2	117.448	正确
	1 000	90	欠补偿 8%	1	59.429 2	3.814 1	4.794 9	21.633 9	正确
线路 4	100	45	不接地	10	31.262 0	29.169 5	20.912 7	215.104	正确
	1 000	90	过补偿 10%	4	16.870 7	9.966 5	10.061 0	41.084 5	正确
母线	100	90	不接地	0	61.889 3	76.182 3	81.985 9	131.586	正确

表 4 暂态直流分量法故障选线结果

Table 4 Results of transient DC component methods to faulty line selection

故障线路	R_f	φ	补偿方式	X_f	m_1	m_2	m_3	m_4	结果
线路 1	5	0	过补偿 8%	4	29.545 6	0.502 5	0.509 1	0.503 6	正确
线路 4	5	0	欠补偿 4%	12	0.482 0	0.475 0	0.472 2	28.101 3	正确
母线	5	0	过补偿 5%	0	0.528 3	0.514 6	0.519 3	0.516 2	正确
	1 000	60	欠补偿 9%	0	0.502 5	0.402 1	0.407 4	0.401 8	正确

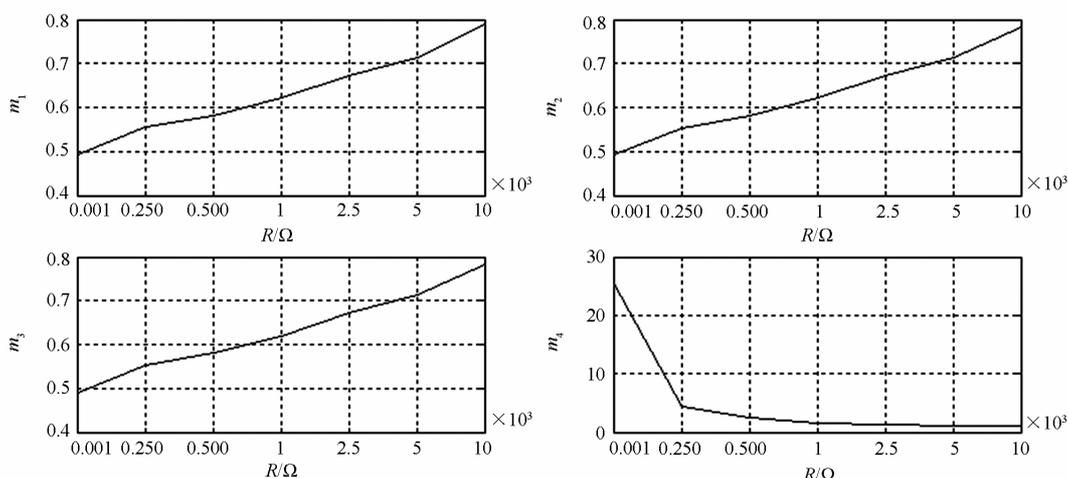


图 4 能量比随过渡电阻值变化曲线

Fig. 4 Curves of energy ratio and transitional resistance

4 结论

运用希尔伯特变换提取特征分量, 可以根据信号特性自适应地确定小波分解的层数, 克服了以往小波分解方法运算时间长和数据量大的缺点, 然后根据频带能比因子判断故障时刻暂态电流是高频分量为还是低频分量为, 将两种情况分开处理, 这样就解决了用单一方法失效的缺点。对于高频分量为时, 比较小波高频能量进行故障选线, 对于低频分量为时, 比较直流分量能量进行故障选线, 最后显示选线结果即可。理论分析和大量仿真表明该方法有效、可靠和准确。

参考文献

[1] BALDWIN T, RENOVICH F. Fault locating in

ungrounded and high-resistance grounded systems[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2001, 37(4): 1152-1159.

[2] 贾清泉. 非有效接地电网选线保护技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

JIA Qing-quan. The effective protection grounding grid line selection technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.

[3] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.

XU Bo, ZHANG Jian-wen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of

- China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.
- [4] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 172-178.
- JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.
- [5] 刘毅华, 王媛媛, 宋执环. 基于平稳小波包分解和希尔伯特变换的故障特征自适应提取[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 145-182.
- LIU Yi-hua, WANG Yuan-yuan, SONG Zhi-huan. Adaptive fault feature extraction based on stationary wavelet packet decomposition and Hilbert transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 145-182.
- [6] 徒有峰, 何俊佳, 周志成. 基于零序功率及谐波相位综合的小电流接地系统微机选线装置[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 190-193.
- TU You-feng, HE Jun-jia, ZHOU Zhi-cheng. NUGS choosing earth-fault line device based on zero sequence power method and harmonic phase method[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3): 190-193.
- [7] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌. 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): 70-74.
- WU Le-peng, HUANG Chun, LIN Da-bin. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-74.
- [8] 徐梅, 杨文荣, 吴淑梅, 等. 基于零序电流比值变化的小电流接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 68-71.
- XU Mei, YANG Wen-rong, WU Shu-mei, et al. A method of single-phase grounded feeder detection in indirectly earthed power system based on judging the change of zero-sequence current ratios[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 68-71.
- [9] 张琦兵, 王鹏, 邵能灵, 等. 船舶选择性微机漏电保护系统[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 60-64.
- ZHANG Qi-bing, WANG Peng, TAI Neng-ling, et al. Microcomputer-based selective leakage protection system of marine electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 60-64.
- [10] 岳云峰, 蔡旭. 基于故障过程分析的补偿电网接地与串联谐振辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 49-53.
- YUE Yun-feng, CAI Xu. Identification of series resonant and grounding fault based on process analysis of zero sequence voltage in the compensation network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 49-53.

收稿日期: 2013-07-09; 修回日期: 2013-08-23

作者简介:

张国军(1960-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电机与电器;

任荣(1988-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为节能型电力电子技术与应用; E-mail: rxx881003@163.com

韩静静(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为节能型电力电子技术与应用。