

零模复合导纳法配电网单相接地故障选线与定位

孙波¹, 孙同景¹, 薛永端², 徐丙垠³

(1. 山东大学控制学院, 山东 济南 250061; 2. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 257061;
3. 山东科汇电力自动化有限公司, 山东 淄博 255087)

摘要: 提出一种基于零模复合导纳的小电流接地故障暂态方向保护新方法。在特征频段内(SFB), 利用单一频率零模无功功率与整个频段内同频率零模电压与零模电流产生的无功功率代数值的比值作为该频率下零模导纳的加权系数, 对整个频段内的单一频率零模导纳进行加权积分作为零模复合导纳。通过计算零模复合导纳的相角确定故障方向, 实现接地保护。根据故障方向的不同可进一步实现故障选线与定位。最后利用仿真和现场数据验证了所提方法的正确性。

关键词: 小电流接地; 零模复合导纳; 暂态方向保护; 故障选线; 故障定位

Fault line identification and fault section location based on transient zero-module combination admittance in non-solidly earthed network

SUN Bo¹, SUN Tong-jing¹, XUE Yong-duan², XU Bing-yin³

(1. School of Control, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 257061, China; 3. Shandong Kehui Electric Co., Ltd, Zibo 255087, China)

Abstract: A new transient direction protection principle using zero-module combination admittance is presented for non-solidly earth fault. In selected frequency band (SFB), ratio of algebraic addition of single frequency zero-module reactive power to that of the reactive power caused by zero-module voltage and zero-module current of same frequency in the whole frequency band is taken as weighted coefficient of zero-module admittance, and the weighted integral of single frequency zero module admittance in the whole frequency band is considered as transient combination admittance. The fault direction is determined by calculating zero-module combination admittance angle. According to the different fault directions, the fault line selection and earth fault location can be realized. In the end, simulation results and field data demonstrate the feasibility of the approach.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 51077090).

Key words: non-solidly earth fault; zero-module combination admittance; transient directional protection; fault line selection; fault location

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0057-06

0 引言

我国中压配电网广泛采用中性点非有效接地运行方式。配电网发生单相接地(小电流接地)故障的概率很高, 由于接地电流微弱, 电弧不稳定等原因, 小电流接地故障一直不能有效的检测。

传统的基于工频量的检测方法灵敏度较低且受消弧线圈的影响^[1-2], 文献[3]提到的行波法适用于分支少、距离长的高压输电线路或中压配电线路; 文献[4]提到的“S注入法”现场应用中有一定的效果,

但是由于存在不稳定电弧过程, 造成接地和注入电流不稳定, 在此条件下检测效果较差, 并且增加注入设备, 加大了投资; 由于故障电流基本是无功电流, 文献[5-6]提到的能量法对原始信号的利用率较低; 线路中的谐波含量较小, 文献[7]提到的谐波法可靠性较低; 文献[8-10]提到的零序导纳法基于工频信号, 受消弧线圈的影响, 且不能检测瞬时性接地故障。另外, 基于小波变换^[10-13]、数学形态学^[14]等数学分析工具的保护方法也没有解决小电流接地故障的可靠检测问题。

本文根据小电流接地故障零模网络频率特性, 定义了特征频段内的暂态零模复合导纳, 利用复合

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077090)

导纳的相角计算故障方向，并可进一步实现小电流接地故障选线与定位。最后通过仿真与现场数据验证了本方法的正确性。

1 小电流接地故障相频特征分析

中性点不接地系统零模网络中，健全线路和故障线路故障点至负荷区段，从检测点看进去，各线路输入阻抗在其首次串联谐振频率之前成容性，均可用一集中参数电容等效^[15]。故障点至母线区段，由于健全线路可看作此段线路的负荷，且在所有健全线路首次串联谐振频率最小值之前，所有健全线路可等效为一集中参数电容，因此，从检测点向母线方向看进去，该段线路可看作带有容性负荷的均匀传输线，输入阻抗在其首次串联谐振之前也为容性，可用一集中参数电容等效。

在谐振接地系统中，健全线路和故障线路故障点至负荷段的输入阻抗不受消弧线圈的影响，相频特性与中性点不接地系统相同。故障线路故障点至母线段检测点检测到的输入阻抗将受消弧线圈的影响，但在暂态信号频率大于三次谐波（150 Hz）时，可以忽略消弧线圈的影响，即从三次谐波到第一次串联谐振频率之间输入阻抗仍然呈现容性，可用一集中参数电容等效^[15]。

根据输入阻抗的频率特性，选取所有线路输入阻抗均成容性的低频段作为特征频段（SFB）。该频段内，所有线路可以等效为集中参数电容^[13, 15]。SFB频段内，零模网络等效电路如图 1 所示^[16]。

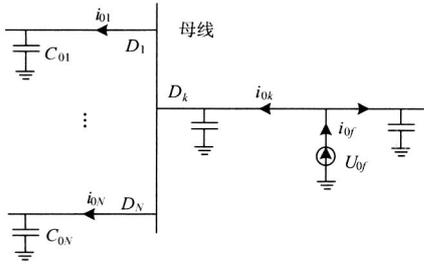


图1 SFB频段内的零模网络等效图

Fig.1 Equivalent circuit of zero module network in SFB

2 基于零模复合导纳的暂态方向保护原理

2.1 单一频率零模导纳

单一频率 ω 下的零模导纳 $\dot{Y}_0(j\omega)$ 可表示为^[8-10]：

$$\dot{Y}_0(j\omega) = \frac{\dot{I}_{0\omega}}{\dot{U}_{0\omega}} \quad (1)$$

式中， $\dot{U}_{0\omega}$ 、 $\dot{I}_{0\omega}$ 为频率为 ω 的零模电压和零模电流相量。

设电流从母线流向线路为正方向，SFB频段内，故障线路故障点至母线段，零模电流从线路流向母线，方向为负；健全线路及故障线路故障点至负荷段，零模电流从母线或故障点流向负荷，方向为正。

SFB频段内，零模网络所有线路均可等效为集中参数电容，有：

故障线路故障点至母线段

$$\text{零模导纳: } \dot{Y}_{0b}(j\omega) = -j\omega C_{0b} \quad (2a)$$

$$\text{相角: } \arg \dot{Y}_{0b} = -\frac{\pi}{2} < 0 \quad (2b)$$

式中， C_{0b} 为故障点至母线段检测点检测到的线路等效电容。

故障线路故障点至负荷段

$$\text{零模导纳: } \dot{Y}_{0e}(j\omega) = j\omega C_{0e} \quad (3a)$$

$$\text{相角: } \arg \dot{Y}_{0e} = \frac{\pi}{2} > 0 \quad (3b)$$

式中， C_{0e} 为故障点至负荷段检测点检测到的线路等效电容。

健全线路

$$\text{零模导纳: } \dot{Y}_{0n}(j\omega) = j\omega C_{0n} \quad (4a)$$

$$\text{相角: } \arg \dot{Y}_{0n} = \frac{\pi}{2} > 0 \quad (4b)$$

式中， C_{0n} 为健全线路检测点检测到的线路等效电容。

SFB频段内零模导纳相角的极性代表了零模电流的方向，理论上可以利用任一频率下的零模导纳计算故障方向，但是：

① 单一频率下的零模电压和零模电流信号能量较小。

② 由于干扰信号的影响，某些频率下的零模导纳及相角不满足上述关系。

③ 实际应用中，SFB频段不易准确确定^[10]，在SFB之外，上述关系不成立。

2.2 零模复合导纳

SFB频段包含了暂态信号的绝大部分能量，SFB频段之外信号以及干扰信号能量很小。在SFB频段内，由于线路等效为电容，在暂态持续时间内，

电容与电源之间只进行能量的交换, 不消耗能量, 可用无功功率作为能量交换的量度。为充分利用整个SFB频段内信号, 提高抗干扰能力, 定义SFB频段内零模复合导纳为

$$\dot{Y}_t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega}|}{Q} \dot{Y}_0(j\omega) d\omega \quad (5)$$

式中: q_{ω} 为频率为 ω 的零模电压和零模电流信号产生的无功功率; Q 为SFB频段内同频率零模电压和零模电流产生的无功功率的代数和; ω_1 、 ω_2 为SFB频段上下限截止频率。

频率为 ω 的零模无功功率为

$$q_{\omega} = U_{0\omega} I_{0\omega} \sin \varphi$$

式中: $U_{0\omega}$ 、 $I_{0\omega}$ 为频率为 ω 的零模电压和零模电流的有效值; φ 为电压电流相位差。

SFB频段内, 健全线路与故障线路故障点至负荷段有 $\sin \varphi = -1$, 故障线路故障点至母线段有 $\sin \varphi = 1$, 正负号代表功率方向。

SFB频段内, 同频率零模电压与零模电流产生的无功功率的代数和 Q 表示为

$$Q = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |q_{\omega}| d\omega$$

2.3 暂态方向保护方法

将式(2a)代入式(5), 故障线路故障点至母线段, 有

$$\dot{Y}_{tb} = -j \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega b}|}{Q_b} \omega C_{0b} d\omega = -j \rho_{0b} \quad (6a)$$

由于 $\rho_{0b} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega b}|}{Q_b} \omega C_{0b} d\omega > 0$, 有

$$\arg \dot{Y}_{tb} = -\frac{\pi}{2} < 0 \quad (6b)$$

将式(3a)代入式(5), 故障线路故障点至负荷段, 有

$$\dot{Y}_{tc} = j \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega c}|}{Q_c} \omega C_{0c} d\omega = j \rho_{0c} \quad (7a)$$

由于 $\rho_{0c} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega c}|}{Q_c} \omega C_{0c} d\omega > 0$, 有

$$\arg \dot{Y}_{tc} = \frac{\pi}{2} > 0 \quad (7b)$$

将式(4a)代入式(5), 健全线路, 有

$$\dot{Y}_m = j \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega n}|}{Q_n} \omega C_{0n} d\omega = j \rho_{0n} \quad (8a)$$

由于 $\rho_{0n} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega n}|}{Q_n} \omega C_{0n} d\omega > 0$, 有

$$\arg \dot{Y}_m = \frac{\pi}{2} > 0 \quad (8b)$$

根据式(6)、(7)、(8), 在SFB频段内, 零模复合导纳相角的极性代表了零模电流的方向, 可用作保护用参量, 利用其来计算故障方向, 实现接地保护。

3 性能分析

1) 检测的可靠性

暂态过程与故障初相角、故障电弧、接地电阻等有关。同等条件下, 故障发生在相电压峰值时, 故障暂态越明显, 暂态零模电流幅值越大, 此时暂态零模电流的幅值与未补偿的工频零模电流幅值之比近似等于暂态信号主频率与工频之比。故障发生在相电压过零时, 暂态零模电流较小, 但是暂态零模电流的幅值也接近未补偿的工频零模电流。在接地电阻很小时, 暂态过程明显, 暂态零模电流较大; 当接地电阻很大时(高阻接地), 暂态过程不明显, 零模电流较小。现场的单相接地故障中, 绝大多数为瞬时性接地或间歇性接地, 其故障点普遍为电弧接地。间歇性接地故障的电弧不稳定, 将持续产生高频暂态过程, 直到故障消失。即使在永久性接地故障中, 由于接地电流微弱, 故障电弧也不稳定。丰富的暂态信号保证了检测的可靠性。

2) 不受线路参数(等效电容)变化的影响

SFB频段内, 线路等效电容不是一个恒定不变的常量, 是随频率变化的。等效电容的变化, 可能会造成故障线路与健全线路零模电流的极性不完全相反^[17], 影响故障方向的计算。本方法根据暂态零模复合导纳相角来计算故障方向, 等效电容的变化不影响复合导纳的相角, 不影响计算故障方向。

3) 不受多频率信号混叠的影响

SFB频段的范围较宽, 包含了大量不同频率的暂态信号。在单一频率下, 故障线路和健全线路零模电流极性完全相反。但是多个频率信号叠加后, 故障线路与健全线路的零模电流极性在某些时刻会出现不完全相反现象^[17], 影响故障方向的计算。本方法先求取单一频率下的零模导纳, 然后再在SFB频段内进行积分, 消除了不同频率信号混叠产生的影响。

4) 抗干扰能力强

利用无功功率对不同频率下的零模导纳进行加

权, 大大降低了能量弱的干扰信号和SFB频段外信号的影响, 提高了抗干扰能力。

4 应用

4.1 小电流接地故障选线

利用母线处的零模电压与各线路出口处的零模电流计算暂态零模复合导纳相角, 根据健全线路复合导纳相角极性为正, 故障线路为负的特征, 可实现小电流接地故障选线。由于某些健全线路暂态电流过小时易受噪声干扰, 现场应用中可选择幅值最大的若干条(不少于3条)线路再参与极性比较。

福建某电业局清濛变电站共两段母线, 每段母线的出线数均在10条以上。2007年, 装置共捕捉到该变电站完整故障数据79次, 其中永久性接地故障5次, 其余均为自恢复的瞬时性接地故障。对所有完整故障数据利用本文提出的方法进行验证, 选线结果均正确。

图2所示为清濛变一次典型接地故障时, 利用母线处的零模电压与线路出口处的零模电流计算单一频率下的零模导纳相角及无功功率 $|q_{\omega}|$ 。从图2可以看出, 在低频段, 故障线路零模导纳相角为负, 随着频率的增加, 相角正负交替出现, 很难确定一个精确的SFB频段。本例中, 可粗略确定150~700 Hz

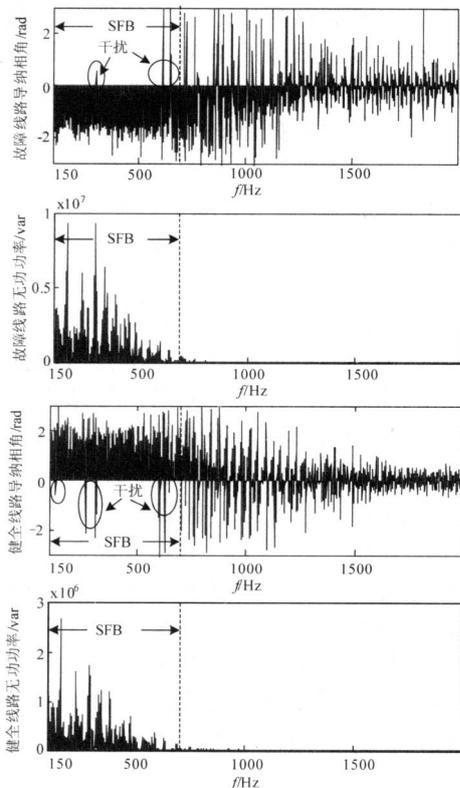


图2 现场数据分析

Fig.2 Analysis result of a earth fault

为SFB频段。该频段内, 由于干扰信号的影响, 某些频率下导纳相角呈现相反的规律, 即故障线路中某些频率下导纳相角为正, 而健全线路某些频率下导纳相角为负。

无功功率绝大部分集中在SFB频段内, SFB频段外信号无功功率很小。零模导纳相角规律不成立的干扰信号的无功功率很小。

利用该故障数据计算暂态零模复合导纳及相角, 对故障线路, 有

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{fb} &\approx -j1.0254 \\ \arg \dot{Y}_{fb} &= -94^\circ \approx -\frac{\pi}{2} < 0 \end{aligned}$$

对健全线路, 有

$$\begin{aligned} \dot{Y}_m &\approx j0.2037 \\ \arg \dot{Y}_m &= 87^\circ \approx \frac{\pi}{2} > 0 \end{aligned}$$

表1所示为其中5次永久性接地故障利用本文所述方法的选线结果。

表1 选线结果

故障线路 编号	幅值最大的 3条线路编号	3条线路零模 复合导纳相角	选线 结果
616	616, 612, 614	-95°, 85°, 86°	616
631	631, 616, 614	-99°, 89°, 87°	631
615	615, 614, 616	-96°, 86°, 88°	615
611	611, 614, 616	-100°, 78°, 88°	611
617	617, 615, 616	-92°, 86°, 89°	617

4.2 小电流接地故障定位

利用故障线路沿线不同检测点检测到的暂态零模复合导纳计算故障方向, 根据故障点至母线段复合导纳相角为负, 故障点至负荷段为正的规律, 可实现小电流接地故障定位。故障点位于最后一个为负的检测点和第一个为正的检测点之间。若所有检测点处复合导纳相角均为负, 则故障点位于最后一个检测点与线路末端区段。

在仿真线路中, 线路长度14 km, 每隔2 km设置一个检测点, $Q_1 \sim Q_7$ 为7个检测点, 其中 Q_1 位于线路出口处, 如图3所示。发生小电流接地故障时, 不同电压初相角, 不同接地电阻以及不同故障距离时的仿真结果如表2所示。

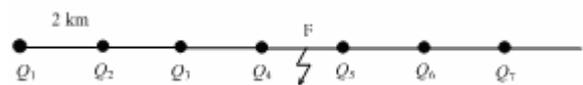


图3 故障区段定位示意图

Fig.3 Sketch map of earth fault section location

表2 定位结果

Tab.2 Results of earth fault section location

故障距离 5 km, 接地电阻 5 Ω, 不同电压初相角									
电压相角 / (°)	暂态零模复合导纳相角 / (°)							故障区段	
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7		
30	-90.8	-91.3	-91.6	88.5	89.1	89.3	89.4	$Q_3 \sim Q_4$	
45	-90.5	-90.7	-91.2	89.1	89.2	89.5	89.8	$Q_3 \sim Q_4$	
60	-90.7	-90.9	-91.3	88.3	88.6	89.2	89.7	$Q_3 \sim Q_4$	
90	-90.3	-90.8	-91.7	88.1	88.4	88.8	89.0	$Q_3 \sim Q_4$	

电压初相角为 90°, 不同故障距离, 不同接地电阻									
故障距离 / km	接地电阻 / Ω	暂态零模复合导纳相角 / (°)							故障区段
		Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	
1	5	-90.5	89.7	89.9	89.8	89.9	89.7	89.4	$Q_1 \sim Q_2$
3	50	-90.9	-91.6	88.9	89.0	89.5	89.7	89.9	$Q_2 \sim Q_3$
5	100	-91.9	-92.5	-93.6	87.5	88.1	88.9	88.5	$Q_3 \sim Q_4$
9	200	-95.7	-96.9	-97.8	-98.4	-99.1	86.2	87.5	$Q_5 \sim Q_6$
13	500	-110.9	-110.9	-111.2	-111.8	-112.4	-112.9	-113.2	$Q_7 \sim$ 末端

5 结论

通过上述分析, 可以得到以下结论:

1) 利用SFB频段内信号求取的零模复合导纳能够计算故障方向, 有效地实现配电线路接地保护。

2) 利用无功功率对不同频率的零模导纳进行加权, 有效地提高了算法的抗干扰能力; 且不受信号混叠的影响, 不受线路参数(等效电容)变化的影响。

3) 利用零模复合导纳计算故障方向可实现故障选线与定位。该方法不受消弧线圈和线路结构的影响, 能够检测间歇性和瞬时性接地故障, 且不需要注入信号, 不需要其他检测点的故障信息。

参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong. Theory and techniques of new types of protective relaying and fault location[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

[2] 王政, 吴杰. 配合 FTU 的小电流系统单相接地故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (2): 21-26.
WANG Zheng, WU Jie. Method of single phase grounding fault locating for FTU in networks with ungrounded neutral[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (2): 21-26.

[3] 季涛, 薛永端, 孙同景, 等. 配电线路行波故障测距初探[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (19): 66-71.

Ji Tao, XUE Yong-duan, SUN Tong-jing, et al. Fault location for distribution feeders based on traveling waves power line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (19): 66-71.

[4] 张慧芬, 张帆, 潘贞存. 基于注入信号法的配电网单相接地故障自动定位算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (6): 39-43.
ZHANG Hui-fen, ZHANG Fan, PAN Zhen-cun. Automatic fault locating algorithm based on signal injection method for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28 (6): 39-43.

[5] 何奔腾, 金华烽, 李菊. 能量方向保护原理和特性研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17 (3): 166-170.
HE Ben-teng, JIN Hua-feng, LI Ju. Principle and property research of the energy directional protection[J]. Proceeding of the CSEE, 1997, 17 (3): 166-170.

[6] 吴军基, 杨敏, 杨伟, 等. 暂态高频分量能量法小电流接地故障选线[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (6): 14-17.
WU Jun-ji, YANG Min, YANG Wei, et al. Fault line detection using transient high frequency energy for small current grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (6): 14-17.

[7] 李孟秋, 王耀南, 王辉, 等. 小电流接地系统单相接地故障点探测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (10): 6-9.
LI Meng-qiu, WANG Yao-nan, WANG Hui, et al. A new approach on detecting the single-phase-to-ground fault location on power system with neutral unearthed[J].

Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (10) : 6-9.

[8] 唐轶, 陈奎, 刘庆, 等. 馈出线测量导纳互差求和法小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (11) : 69-73.
TANG Yi, CHEN Kui, LIU Qing, et al. Study on the earthed fault detection method in indirectly earthed power system using summation of outgoing feeder measurement admittance mutual difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (11) : 69-73.

[9] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈出线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (4) : 5-10.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (4) : 5-10.

[10] 林湘宁, 高艳, 刘沛, 等. 基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (10) : 45-49.
LIN Xiang-ning, GAO Yan, LIU Pei, et al. A novel method to identify the single phase-to-earth fault in the neutral un-effectual grounded system using the zero-sequence compensated admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (10) : 45-49.

[11] 潘露, 吕艳萍, 于芳, 等. 基于相频特性与多频带分析的小电流接地系统故障选线[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (4) : 76-79.
PAN Lu, Lü Yan-ping, YU Fang, et al. Fault line selection in non-solidly earthed network based on phase-frequency characteristic and multi-frequency band analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (4) : 76-79.

[12] 庞清乐, 孙同景, 孙波, 等. 基于小波包分析的配电网故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4) : 19-22.
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, SUN Bo, et al. Faulty line detection based on wavelet packet analysis for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (4) : 19-22.

[13] 刑亚辉, 王海军, 吕艳萍. 基于线路零序频率特性的小电流接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (4) : 59-62.
XING Ya-hui, WANG Hai-jun, Lü Yan-ping. Faulty line selection in non-solid earthed network based on zero sequence frequency characteristic of transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (4) : 59-62.

[14] 任建文, 孙文武, 周明, 等. 基于数学形态学的配电网单相接地故障暂态选线算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (1) : 70-74.
REN Jian-wen, SUN Wen-wu, ZHOU Ming, et al. Transient algorithm for single-line to ground fault selection in distribution networks based on mathematical morphology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (1) : 70-74.

[15] 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 Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, 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.

[16] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38 (2) : 195-199.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin. Analysis of transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38 (2) : 195-199.

[17] 薛永端. 基于暂态特征信息的配电网单相接地故障检测研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.

收稿日期: 2009-08-25

作者简介:

孙波 (1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能配电网故障检测技术、电动汽车优化控制与嵌入式系统; E-mail: sunbo@sdu.edu.cn

孙同景 (1948-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机先进控制与智能系统;

薛永端 (1970-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为配电网自动化及其暂态故障检测技术。

(上接第 56 页 continued from page 56)

[10] Jimenez G A, Munoz A O, Duarte-Mermoud M A. Fault detection in induction motors using Hilbert and wavelet transforms[J]. Journal of Electrical Engineering, 2007, 89 (3): 205-220.

作者简介:

邱赤东 (1968-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电机故障诊断; E-mail: qiuchidong@sina.com

薛征宇 (1972-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为电机故障诊断。

收稿日期: 2009-11-18; 修回日期: 2010-06-08