

基于衰减电流分量的双树复小波相位选线原理

周登登, 刘志刚, 符伟杰, 胡 非

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 过补偿情况下, 在对小电流接地故障特征详细分析的基础上, 发现故障线路与正常线路存在着衰减电流的差别, 此差别电流反映在复小波变换相位上体现为相位的延迟, 据此, 通过采用具有时移不变性的双树复小波构造相位选线算法从而避免了实小波分解结果的不确定性, 另外也对过补偿情况下相位选线失效的问题提出了一个新的解决方案。仿真实例验证了所提出的算法有效、可行性。

关键词: 小电流接地; 双树复小波; 时移不变性; 相位选线

Abstract: Based on the analysis of fault features of neutral un-effectual grounded system in the case of overcompensation, it is found that there are some differences of decaying currents between fault line and normal line. These differences are presented as the delay of phase in complex wavelet transform phase relationship. So a line selection method based on dual-tree complex wavelet which possesses the characteristics of shift invariant is proposed. As a result, the uncertainty of real wavelet analysis results can be avoided. In addition, this method proposes a new solution scheme towards line selection failure problem in overcompensation situation. At last, the simulation examples prove the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: neutral un-effectual grounded system; dual-tree complex wavelet; shift invariant; phase line selection

中图分类号: TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0016-04

0 引 言

小电流接地选线^[1,2]问题一直是困扰电力科技工作者的一个难题。究其原因, 一方面是电流信号微弱, 存在各类弧光接地^[3], 信号受干扰影响大, 提取困难; 另一方面就是理论研究不充分。由于小电流接地选线是一种非常实用的技术, 因此各类选线算法层出不穷^[4~6], 但目前的算法大多是利用一种新的信号处理工具对故障信号进行处理, 而并不从理论上给故障情况予以研究, 虽然有的文章列出了理论基础, 但是这套理论与文章所建立的模型并不吻合, 以致出现结论胡乱套用的现象, 严重影响了后续选线方法的正确性。针对过补偿情况下正常线路与故障线路电流流向同向, 以至于传统比相关系不成立, 造成选线困难的难题, 下面从叠加原理出发研究小电流接地系统单相接地纯故障电流特征, 发现正常线路与故障线路由于存在衰减直流或衰减震荡电流的差异, 从而造成两种线路电流在复小波变换相位关系上表现为某些差别 (这种差别并非是相位相反), 根据这种差别可

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 (07ZQ026-012)

以构成基于复小波的相位选线原理, 仿真实例验证了该法的可行性。

1 复小波相位选线算法

1.1 分析工具的选择

由于故障信号是一非平稳信号, 小波在分析非平稳信号方面的能力是传统信号分析工具所不能及的, 因此选择小波作为信号分析的工具。而实小波存在分解系数震荡^[7], 缺乏相位信息和平移敏感性^[8]三大缺点。这就导致分解的结果可信用度较差, 况且相位信息是信号的一大特征量。双树复小波^[8]完全克服了实小波的以上缺点, 并且具有频域解析^[9,10]的功能, 而其他复小波只是得到了相位信息, 并不具有双树复小波的其他特点, 而这些特点对于分析结果的可信用度具有很大影响, 因此这里选择双树复小波。

1.2 相位选线原理

图 1 为中性点经消弧线圈接地, 出线条数为 n 的配电系统故障示意图。

图 1 中 U_0 为故障点故障前瞬间电压绝对值。 C_n 为出线 n 的单相对地电容, L 为补偿电感。视配电系统为一线性系统, 根据叠加原理可知故障情况等

价于电网正常运行情况与纯故障 (此时无发电电源) 的叠加。因此可以画出纯故障情况下的原理图, 见图 2。

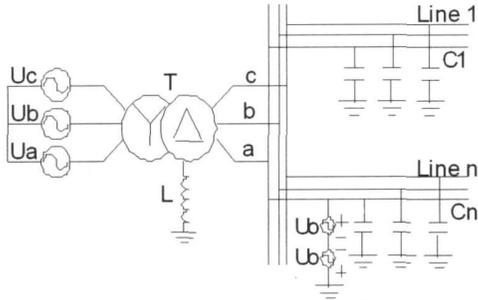


图 1 配电系统故障示意图

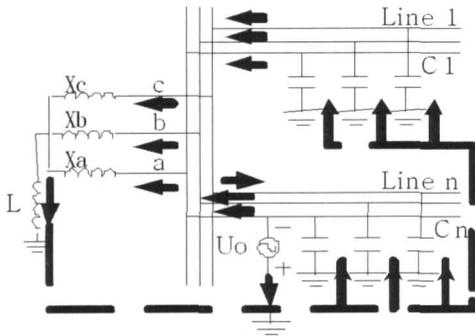


图 2 纯故障原理图

图中箭头方向为纯故障容性电流的流向 (假设欠补偿)。 X_a 、 X_b 、 X_c 分别为相应相变压器的电感。假设线路是均匀线路, 由于架空线路的电阻、感抗和变压器的感抗较线路容抗要小得多, 可以忽略, 因此图 2 又可以化简为图 3。

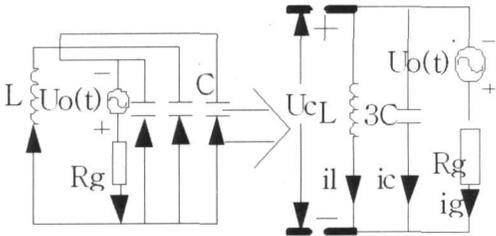


图 3 简化等效电路图

图 3 中, L 为补偿电感; C 为每相线路零序电容总和; R_g 为故障过渡电阻; $U_0(t)$ 为故障点故障前瞬间电压; U_c 为补偿电感两端电压; i 为补偿支路的纯故障电流; i 为各线路 (包括故障线路) 纯故障电流总和; i_g 为故障点的对地纯故障电流。

通过简化电路可知, 各条出线的电压均相等, 电流相位都相同。当过渡电阻为零欧时, 假设故障前瞬间 a 相电压为 $U_{na} = U_0$, 则 b, c 相分别为 $U_{nb} = \gamma U_0$, $U_{nc} = \gamma^2 U_0$, 其中, $\gamma = e^{-j120^\circ}$, 相应的 $\dot{I}_{na} = U_0 \dot{j}\omega C$, $\dot{I}_{nb} = \gamma U_0 \dot{j}\omega C$, $\dot{I}_{nc} = \gamma^2 U_0 \dot{j}\omega C$ 。对于纯故障电路, $\dot{I}_a = -$

$U_0 \dot{j}\omega C$, $\dot{I}_b = -U_0 \dot{j}\omega C$, $\dot{I}_c = -U_0 \dot{j}\omega C$ 。得合成电流为

$$U_a = \frac{(\dot{I}_{na} + \dot{I}_{nb})}{\dot{j}\omega C} = 0 \quad (1)$$

$$U_b = \frac{(\dot{I}_{nb} + \dot{I}_{nc})}{\dot{j}\omega C} = e^{-j150^\circ} \sqrt{3} U_0 \quad (2)$$

$$U_c = \frac{(\dot{I}_{nc} + \dot{I}_{ca})}{\dot{j}\omega C} = e^{-j210^\circ} \sqrt{3} U_0 \quad (3)$$

由此可见, 该法分析故障后的稳态电压符合小电流接地系统的故障特征。正常相的电压升高来源于故障相的放电。但是由于故障电压源流经故障相的流通回路不同于它流经正常相的流通回路, 因此, 正常相与故障相的电流相位存在一定差别。

对图 3 的电路列微分方程得

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = u_0 - R_g (i + i_g) \\ 3C \frac{du_c}{dt} = i \\ u_c = u_0 - (i + i_g) R_g \end{cases} \quad (4)$$

假设故障前的电压为 $u(t) = A \sin(\omega t + \theta)$, 其中, θ 为故障初相角; ω 为电网角频率; A 为电压最大幅值。由于故障前不存在纯故障电路, 因此纯故障电路里各个电量的初始值均为零。据此可化简上式得

$$3LCR_g \frac{d^2 i}{dt^2} + L \frac{di}{dt} + R_g i = u_0 \quad (5)$$

易知, 稳态电感电流为 $i_{(\infty)} = \frac{u_0}{R_g}$, 稳态电容电流为 $i_{(\infty)} = \frac{-3LC\omega^2}{R_g} u_0$ 。

假设各出线每相线路总长 66 km, 当选取每相线路单位对地零序电容为 $C = C_{0\Sigma} = \frac{1}{\omega X_{0C}} = 0.006 \times$

10^{-9} F/m (典型值) 时, 采用 8% 补偿度, 得转折过渡电阻为 1 290 Ω , 即在中等电阻的情况下, 电感电流类型就发生了转变, 由衰减直流转变成衰减震荡。由于过渡电阻可以达到 20 000 Ω (树枝接地等), 在发生间歇性弧光接地时, 过渡电阻也可以达到很大的数值, 因此教科书里所谓的“接地电阻一般都很小”的说法与讨论均是不全面的。在选取一些权威电力参数的情况下, 反复仿真所得的结果也验证了故障电流具有两种不同的表现形态。因此, 有必要研究不同阻值情况下的电感、电容电流变化情况。

暂态电流的解按以下情况讨论。

当 $R_g < \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 解为

$$i = \lambda_1 e^{\mu_1 t} + \lambda_2 e^{\mu_2 t} \quad (6)$$

其中, $\mu_{1,2} = \frac{-L \pm \sqrt{L^2 - 12LCR_g^2}}{6LCR_g} < 0$, 故此时暂

态电感电流为衰减直流分量。

此情况下的电容暂态电流为

$$\dot{i} = 3LC\lambda_1 \mu_1^2 e^{\mu_1 t} + 3LC\lambda_2 \mu_2^2 e^{\mu_2 t} \quad (7)$$

各条出线的零序电流为

$$\begin{cases} i_{h0} = \frac{i \times l}{3k} \\ i_{m0} = \frac{i - i + \frac{l}{k} \times i}{3} \\ i_{n0} = \frac{i \times l}{3k} \end{cases} \quad (8)$$

其中, l_n 为出线 n 的长度, k 为所有出线总长, i_{n0} 为正常线路 n 的零序电流, i_{m0} 为故障线路 m 的零序电流。其他参数意义类似。通过上式可以发现, 正常线路的电容电流相位都是相同的, 只是幅值有差别。而电感电流仅通过故障线路, 通过计算可得故障线路零序电流为

$$i_{m0} = \left(\frac{1}{3LC\mu^2} - 1 + \frac{l}{k} \right) i + \lambda_2 \left(1 - \frac{l^2}{k^2} \right) e^{\mu t} \quad (9)$$

由于两根线路不相等, 致使故障线路的零序电流与正常线路不成比例关系, 两者相差一个衰减直流分量。这个衰减直流分量反映在复小波变换的相位关系上就体现为相位的延迟, 从而造成了故障线路的电流相位稍不同于正常线路的电流相位, 据此可以构成选线的依据。这一点与微机保护算法中衰减直流分量对傅立叶变换的影响类似, 就是借助这一影响来构成选线判据的。

图 4(a)、(b) 分别是应用复小波对正弦信号和叠加了衰减直流分量及衰减震荡分量的正弦信号分解后的各自相位信息。图中红线均表示正弦信号的复小波分解相位, 绿线表示叠加了衰减信号后的合成信号的复小波分解相位。通过图中可以看到, 衰减直流分量的加入, 使信号的复小波分解相位关系发生了延迟, 从而能明显的区别原始信号与混入衰减信号的混合信号。

当 $R_g = \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 有两个相等的实根,

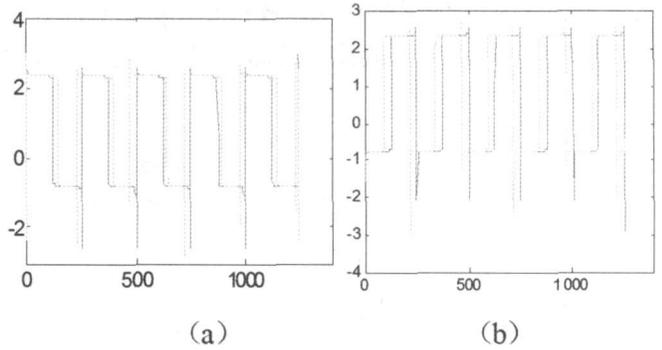


图 4 含有衰减分量的信号复小波相位检测

$$i = (\lambda_1 + \lambda_2 t) e^{\mu t} \quad (10)$$

$$\dot{i} = 3LC(\lambda_1 \mu^2 + 2\lambda_2 \mu) e^{\mu t} + 3LC\lambda_2 \mu^2 t e^{\mu t} \quad (11)$$

其中, $\mu = \frac{-L}{6LCR_g} < 0$

通过计算可得故障线路零序电流。

$$i_{m0} = \left(\frac{1}{3LC\mu^2} - 1 + \frac{l}{k} \right) i - \frac{2\lambda_2}{\mu} e^{\mu t} \quad (12)$$

可见, 此时故障线路零序电流与正常线路零序电流仍不成比例关系, 两者仍差一个衰减直流分量, 而正常线路零序电流之间相位是相等的, 故此时按照复小波分解后的相位关系仍可以区别出正常线路与故障线路。

当 $R_g > \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 解为

$$i = e^{\alpha t} (\lambda_1 \cos(\beta t) + \lambda_2 \sin(\beta t)) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{i} = & -\frac{1}{R_g} e^{\alpha t} [(6R_g C \alpha \lambda_1 + L\beta\lambda_2) \cos(\beta t)] \\ & + (6R_g C \alpha \lambda_2 - L\beta\lambda_1) \sin(\beta t) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\alpha = \frac{-1}{6CR_g}$, $\beta = \frac{\sqrt{12LCR_g^2 - L^2}}{6LCR_g}$ 。此时电感、

电容电流均为衰减震荡分量。

据式 (8) 可得故障线路零序电流为

$$\begin{aligned} i_{m0} = & \left(\frac{-1}{6C\alpha} - 1 + \frac{l}{k} \right) i + \frac{L\beta\lambda_1}{6R_g C \alpha} \sin(\beta t) \\ & - \frac{L\beta\lambda_2}{6R_g C \alpha} \cos(\beta t) \end{aligned} \quad (15)$$

通过式 (8)、(15) 可以看到, 虽然过渡电阻较大时电感、电容电流呈现另一种形态, 但并不影响它们之间的相位关系。正常线路电流比例关系一定, 相位仍相同, 而故障线路电流与正常线路电流比值是时间的函数, 两者间存在震荡信号的差别, 根据图 4(b) 可以看到, 复小波变换相位关系可以明显的检测这一差别, 据此又可以将故障线路与正常线路区别开来。

1.3 基于复小波的选线算法流程

复小波相位选线流程图如图 5 所示。

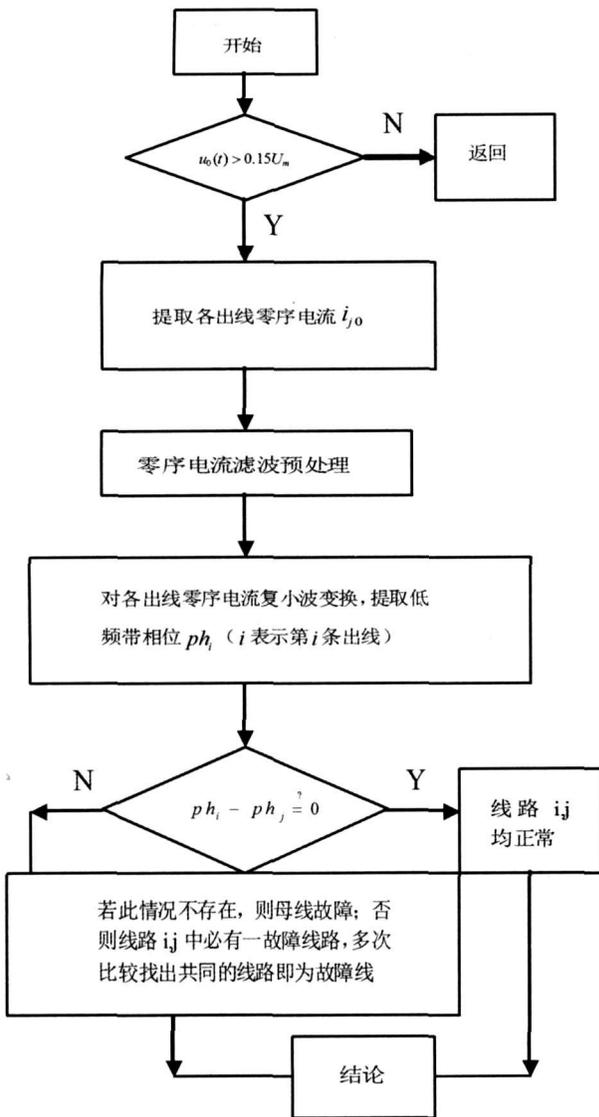


图 5 复小波相位选线流程图

2 实验验证

如图 1 所示建立四出线 10 kV 系统仿真模型, 线路参数如下: 消弧线圈 10% 过补偿, 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: $R_0=0.79 \Omega/\text{km}$, $L_0=4.2146 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0=0.0436 \mu\text{F}/\text{km}$; 四条出线的长度分别为 6 km、16 km、24 km、20 km, 线路 3 故障, 输电线路采用贝杰龙分布参数模型。

众所周知, 故障选线难以处理的是大过渡电阻与小故障初始合闸角的情况, 如果这两个问题解决, 其他情况的选线问题就迎刃而解了。为此, 着重研究一些极端情况。限于篇幅, 下面仅列出几个典型算例。

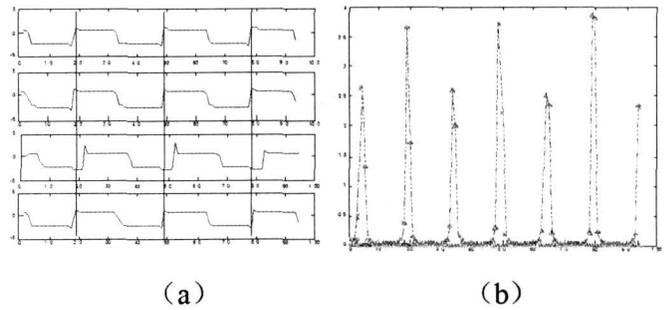


图 6 算例 1 分析结果

算例 1: 图 6(a) 是在 8% 补偿度, 故障处距母线 0.5 km, 故障合闸角 5 度, 接地过渡电阻为 20 000 Ω 情况下各条出线的复小波变换低频带相位图, 通过图中的关系可以知道, 在大过渡电阻情况下, 由于故障线路与正常线路差一衰减震荡分量, 导致该线路小波变换相位出现平移。对各出线相位两两做差可得相差关系图, 见图 6(b)。由图 6 可知, 线路 1 与 3, 2 与 3, 4 与 3 出现部分差值, 而线路 1 与 2, 1 与 4, 2 与 4 不存在相位差, 据此可以知道线路 3 出现故障。

算例 2: 图 7 是过渡电阻为 1 000 Ω , 5% 补偿, 故障合闸角为 15°, 距母线 22 km 处短路的情况, 按照上述选线原理, 也可以判断出是线路 3 发生故障。

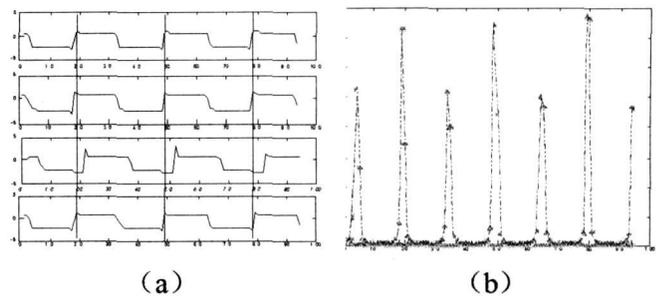


图 7 算例 2 分析结果

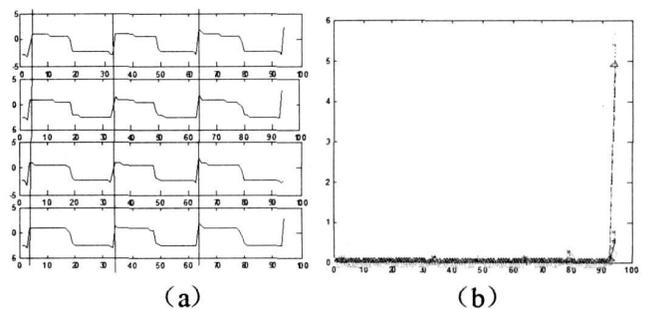


图 8 算例 3 分析结果

算例 3: 图 8 对应的是过渡电阻为 10 000 Ω , 补偿度为 8%, 故障合闸角为 5°, 母线故障的情况。通过图 8(a) 可以看到, 各出线的相位完全相同, 不存在相位之间的延迟, 图 8(b) 是各出线之间的相位差, 共 (下转第 87 页)

在一个居民小区内安装一台集中控制器,通过总线方式将该小区内所有数据采集器所采集的户表电量集中抄读并存储,通过 Modem 自动将数据传输到供电部门,实现远程无人集中抄表。

2)实现了对用户远程进行停送电操作:在居民用户的每只电能表的入户电表后接一只关断继电器,由一台停送电控制器集中控制,配接到数据采集器上实现远程控制。通过上位机软件对欠费用户发送批量停、送电或指定停、送电指令,系统自动执行远程停、送电操作。

3)实现数据冻结。将冻结数据传回供电部门,消除抄表时间误差,进行准确的线损计算,实现最基本的“分台区”线损管理。

4)实时监测。集中控制器通过对 10 kV 台变低压侧进行实时监测,定时将各种监测数据传回数据中心系统软件进行分析,形成报表供管理部门使用。

2.3 应用现状分析

截至 2002 年初,由龙泉驿供电局直抄到户的居民用户数为 3916 户,分管的用户较分散,距离供电局最远的有近 20 km。全靠人工方式,抄表人员需要 4 人,每月抄表周期至少需要 10 天;数据录入时间至少

需要 2 天。对严重拖欠电费的用户采取停电措施时,抄表人员必须到现场进行停电操作。

2002 年 10 月龙泉驿供电局逐步在新建小区开始试点推行远程集中抄表系统,先后在龙泉驿区洪河镇新建小区恋日家园 A、B 区进行试点,经过一年多的运行,基本达到预期效果;随后又将恋日家园 C、D、E、F、G、H 区、丽阳家园、金山花园等新建小区全面推广实施。

截至 2008 年底,由龙泉供电局直抄到户的居民用户数已经达到 16867 户,由于选用带远程停送电的自动抄表方式,目前抄表人员降至 3 人,每月抄表时间只需 10 天即可完成;对需要停送电的客户,可以远程进行操作。目前系统运行可靠稳定。

参考文献

- [1] 高光润,夏雪生.微处理器在电测技术中的应用[M].北京:机械工业出版社,1984.
- [2] 陆玉新.电子测量技术[M].北京:邮电出版社,1985.
- [3] 潘明惠.信息化工程原理与应用[M].北京:清华大学出版社出版,2004.

(收稿日期:2009-02-10)

(上接第 19 页)

六条曲线,而这些曲线之间相位之差均为零,表明各出线特征一样,应判为母线故障。

3 结论

通过分析小电流过补偿接地系统单相接地故障特征,发现正常线路的零序电流仅存在幅值差别,相位完全相同,而故障线路由于电感电流的原因使之与正常线路之间存在一衰减电流的差别,通过复小波变换可以发现这一差别体现在相位上表现为相位的延迟,据此形成了一种新的选线算法,该算法对当前过补偿系统下各出线相位关系难以确定的难题给出了一种新的解决方案,通过仿真验证了该法的有效性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 束洪春.配电网故障选线[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [3] 靳晓东,李谦,等.配电网弧光接地过电压的仿真与分析[J].高电压技术,1994,20(3):71-75.
- [4] 毛鹏,段玉倩,等.基于相关分析的故障选线方法[J].

电网技术,2004,28(2):36-39.

- [5] 王耀南,霍百林,王辉,何晓.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.
- [6] 束洪春,彭仕欣,等.一种配网电缆一线混合线路故障选线新方法[J].电力系统自动化,2008,32(11):1-4.
- [7] N. G. Kingsbury. "Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals." Appl Comput Harmon Anal, vol 10, no 3, pp 234 - 253, May 2001.
- [8] I W. Selesnick R. G. Baraniuk and N. G. Kingsbury. "The dual-tree complex wavelet transform." IEEE Signal Process Mag, vol 22, no 6, pp 123 - 151, Nov 2005.
- [9] I W. Selesnick. "Hilbert transform pairs of wavelet bases." IEEE Signal Process Lett, vol 8, no 6, pp 170 - 173, Jun 2001.
- [10] I W. Selesnick. "The design of approximate Hilbert transform pairs of wavelet bases." IEEE Trans Signal Process, vol 50, no 5, pp 1144 - 1152, May 2002.

作者简介:

周登登(1981-),男,硕士研究生,研究方向为配电网故障诊断;

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。

(收稿日期:2009-05-10)