

# 基于小波多分辨率分析的电压暂降源定位研究

杨杰<sup>1</sup>, 王金浩<sup>1</sup>, 章雪萌<sup>2</sup>, 徐永海<sup>2</sup>

(1. 山西电力科学研究院, 山西 太原 030009; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 根据监测点的电压电流波形, 基于小波多分辨率分析方法, 分析暂降期间监测点三相瞬时功率信号, 提取并计算低频段信号能量的变化, 以其变化的正负极性判断暂降源相对于监测点的位置。线路故障、异步电动机启动、变压器投运是引起暂降的主要原因, 用 PSCAD 建立了暂降仿真模型, 对这三种类型暂降事件分别应用上述方法进行仿真验证, 并对监测点受到干扰源影响的情况做了仿真。结果证明方法简洁可靠, 可以用来进行暂降源定位的判断。

**关键词:** 电压暂降; 定位; 小波变换; 多分辨率分析; 瞬时功率

## Analysis of voltage sag source location based on wavelet multiresolution method

YANG Jie<sup>1</sup>, WANG Jin-hao<sup>1</sup>, ZHANG Xue-meng<sup>2</sup>, XU Yong-hai<sup>2</sup>

(1. Shanxi Electric Power Science & Research Institute, Taiyuan 030009, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** A method of voltage sag source location is proposed based on wavelet-multiresolution using the voltage and current waveforms from monitoring points. The signal energy of three-phase instantaneous power during voltage sag is decomposed, and the change of low-frequency signal energy is extracted and calculated to identify the sag source location relative to the monitoring points. The location of voltage sag caused by line fault, transformer energizing and induction motor starting, which are the main reasons of sag, is analyzed and tested using this method based on PSCAD simulation model. Specially, the simulation when the data of monitoring points influenced by sources of interference is also tested. The results show that the method is simple and reliable and can be used to determine sag source location.

**Key words:** voltage sag; location; wavelet transform; multiresolution analysis; instantaneous power

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0090-06

## 0 引言

电压暂降是系统中常见的电能质量问题, 短路故障、大容量异步电动机启动和变压器投运都会引起电压暂降。近年来, 电力电子设备和微处理设备在工业生产中广泛应用, 这些设备对暂降特别敏感, 导致设备损坏与误动作, 造成很大经济损失。

对于电力部门来说, 由电压暂降引发的用户损失增多, 从而造成的经济纠纷增多。电压暂降源的定位问题, 对于电能质量故障检测诊断、经济责任的区分、赔付和缓和措施的制定是十分必要的。

目前国内外对暂降源定位进行了一定的研究<sup>[1-8]</sup>, 其中文献[1]最早提出从扰动功率和扰动能量角度判断暂降源相对于监测点的位置; 文献[2]基于小波变换定位扰动起始时刻, 通过瞬时功率定位扰动源; 文献[3]对监测点的瞬时有功功率和无功功率的变化来判断; 文献[4]通过线路上安装的继电器获得暂降前后的阻抗和相角变化判断暂降源的位

置, 该方法的局限性在于故障发生的位置等因素影响继电器的指示失误; 文献[5-6]根据暂降发生前后的等效阻抗实部和虚部的正负情况判断暂降源的位置, 该方法的难点在于对暂降前后的测量周期的选择会影响结果的正确性; 文献[7]用最小二乘法对暂降期间的基频电压幅值与功率因数的乘积 ( $|U\cos\theta|$ ) 和基频电流幅值 ( $I$ ) 数据拟合成的直线斜率判断, 但该方法对于不对称故障的判别上准确性不高<sup>[8]</sup>。鉴于能量分析法直接利用监测点的电压电流波形计算, 受系统不同结构影响小, 具有普遍适应性, 本文从暂降期间监测点能量的流动进行研究。值得注意的是, 电力系统在线监测中的监测信号含有大量的现场背景噪声, 另一方面随着非线性用电负荷的增多, 向系统注入谐波电流使得公共连接点的波形畸变情况严重, 并产生很强的电磁干扰, 这些都会影响监测点对暂降源的判断, 而以往的文章没有考虑到这一点。本文基于以时-频局部化见长的小波多分辨率分析方法计算暂降期间三相瞬

时功率信号能量相对相同时间下稳态情况下的变化, 以低频能量在暂降期间的变化极性来判断暂降源相对于监测点的位置。本文用PSCAD建立了暂降仿真模型, 对这三种典型暂降事件分别应用本文的方法进行了仿真验证。

## 1 能量定位方法分析

### 1.1 暂降发生原因分析

当输配电系统中发生短路故障、异步电动机启动以及变压器投运等事件时, 均可引起电压暂降。发生短路时, 由于电源供电回路阻抗的减小以及突然短路时的暂态过程, 使短路回路中短路电流值大大增加, 从而引起电网中电压下降; 异步电动机启动需要从电源汲取的电流值为满负荷时的 500%~800%, 这一大电流流过系统阻抗时, 会引起电压下降<sup>[9]</sup>; 变压器投运, 铁心饱和特性, 会在送电端产生数倍于额定电流的涌流, 导致投运前后系统电压短时跌落<sup>[10]</sup>。

通过以上分析可以看出, 当系统发生暂降时, 可以将暂降源看作是从系统吸收能量。暂降发生时, 有能量流向故障处, 因此, 可以通过研究电网中瞬时能量的流动达到定位目标。

### 1.2 判断方法

一般来说, 电能质量的监测是用户与电力部门的共同需要, 监测点的数据可以向双方提供客观真实的资料。监测点往往是公共连接点, 如变电站母线、系统和用户连接点等处, 通过监测点记录的瞬时三相电压电流波形可计算出三相瞬时功率  $p(t)$ , 如式 (1)。因此电压暂降源的定位可通过监测点能量变化参考监测点的位置相对判断。

$$p(t) = u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t) \quad (1)$$

具体来说, 如图 1 所示, 可以参照基波有功潮流的方向, 如果故障发生在监测装置的后方, 称为上游方向; 如果故障发生在监测装置的前方, 称为下游方向。当监测点暂降期间的能量与相同时间稳态下的能量比较, 若有减少说明暂降源在监测点上游方向, 反之则在下游方向。

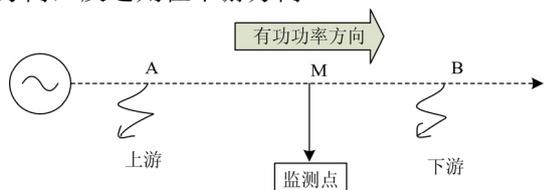


图 1 电压暂降源相对定位

Fig.1 Relative location of voltage sag

## 2 小波多分辨率分析方法与判据

### 2.1 多分辨率分析方法

小波变换分析法由于其良好的时-频局部化特性, 能够很好地处理微弱或突变信号, 适合用于暂态电能质量的分析<sup>[11]</sup>。多分辨率概念由 S.Mallat 和 Y.Meyer 于 1986 年提出, 将此前所有的正交小波基的构造统一起来, 并给出了正交小波的快速算法即 Mallat 算法<sup>[12]</sup>。多分辨率分析是建立在函数空间概念上的理论, 即将信号空间划分到不同的尺度空间, 每个空间对应着不同的频率空间。平方可积函数可以看成某一逐级逼近的极限情况, 每级逼近都是用某一低通平滑函数  $\Phi(t)$  对函数做平滑结果, 在逐级逼近时平滑函数  $\Phi(t)$  也做逐级伸缩, 即用不同分辨率分析函数。以三层多分辨率分解为例, 其小波分解如图 2: 其中 S 表示信号, A 表示低频, D 表示高频。

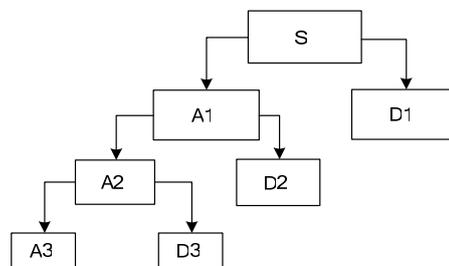


图 2 三层多分辨率树结构

Fig.2 Three-layer multi resolution tree structure

从图 2 中可以看出, 多分辨率分析只是对低频部分进行进一步分解, 而高频部分不予考虑。分解具有关系:  $S=A3+D3+D2+D1$ 。如果要进行下一步的分解, 则可以把低频部分分解为低频部分 A4 和高频部分 D4, 以下分解以此类推。

任意信号  $x(t) \in L^2(R)$  可用多分辨率公式分解为:

$$x(t) = \sum_k c_j(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (2)$$

右边第一部分是信号  $x(t)$  在尺度空间的投影, 它是信号的平滑逼近, 分解系数  $c_j(k)$  称为离散平滑逼近,  $\phi_{j,k}(t)$  称为尺度函数; 第二部分是信号在小波空间的投影, 反映了邻近尺度两个平滑逼近的细节差异, 也就是对信号所做的细节补充, 分解系数  $d_j(k)$  称为离散细节信号即小波变换系数,  $\psi_{j,k}(t)$  是具有带通性质的小波函数, 将小波变换与多分辨率分级联系起来。

Mallat 算法是根据相邻二尺度空间的尺度函数和小波函数的基本关系得到小波分解快速算法, 如

式 (3)、(4) :

$$c_{j+1}(k) = \sum_m h_{0(m-2k)} c_j(m) \quad (3)$$

$$d_{j+1}(k) = \sum_m h_{1(m-2k)} c_j(m) \quad (4)$$

式中,  $h_{0(k)}$ 和 $h_{1(k)}$ 分别为低通数字滤波器单位取样响应和高通数字滤波器取样响应。

### 2.2 信号能量的计算与判据

多分辨率分析的主要特征之一是不同分辨率的小波系数能量代表不同频带的原信号能量。

根据 Parseval 定理, 利用尺度函数和小波函数的正交性质, 原信号能量可分为各尺度下子频带的能量之和, 由各个分解尺度上的高频、低频系数计算<sup>[13-14]</sup>, 如式 (5)、(6) 所示:

$$\int |f(t)|^2 dt = \sum_k |c_j(k)|^2 + \sum_j \sum_k |d_j(k)|^2 \quad (5)$$

$$E_{\text{低频}} = \sum_k |c_j(k)|^2 \quad (6)$$

上式右边第一部分是低频信号能量。本文对暂降前后几个周期监测点监测到的三相瞬时功率信号, 进行多分辨率小波分析, 计算其低频信号能量, 并与相同时间内扰动前三相瞬时功率的低频能量对比, 作为判断的依据。对大多数信号来说, 低频部分更重要, 它包含信号特征和变化趋势, 采用低频信号能量作为判据可以消除噪声和低频谐波对判断的干扰。设暂降期间的信号低频能量为  $E$ , 稳态时相同时间的低频能量为  $E_0$ ,  $\Delta E = E - E_0$ ,  $\Delta E$  反映了暂降期间能量相对于稳态时的变化值, 判据为: 若暂降期间  $\Delta E$  为负, 则暂降源在该监测点后方; 反之, 则在监测点前方。

## 3 仿真实验

### 3.1 仿真模型

图 3 给出了本文所用的电压暂降源定位的仿真系统结构图, 其中 M1-M5 是设置的监测点, 本文

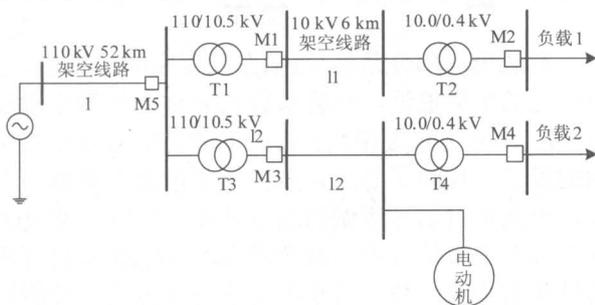


图 3 电压暂降仿真的系统结构图

Fig.3 System construction for voltage sag simulation

采用 PSCAD 对典型暂降源如短路故障、变压器投运和异步电动机启动仿真, 得到各监测点的电压电流波形。

### 3.2 小波函数的选择

小波基函数的选择是小波应用的关键, 选择小波基时, 考虑时频两域的紧支撑性尤为重要, db 小波具有正交、时频紧支撑、高正规性等特点, 因此在电力系统中推荐用 db 小波<sup>[15]</sup>, db4 小波相对于其他小波, 具有最短的时窗, 具有更好的时间分辨率。本文采用 db4 正交小波对信号进行 6 层分解, 信号采样率  $f_s$  为 4 kHz, 各层信号频带:

- d1: 2~4 kHz                      d2: 1~2 kHz
- d3: 0.25~0.5 kHz              d4: 0.125~0.25 kHz
- d5: 62.5~125 Hz                d6: 30.25~62.5 Hz

信号的多分辨率分析及信号能量的计算用 Matlab 软件完成。

### 3.3 短路故障

(1) 110 kV 架空线路 I 上分别设置三相对称故障和不对称故障, 图 4、图 5 分别是监测点 M5 在对称故障和非对称故障情况下暂降期间的三相瞬时功率变化情况。从图中可以看出, 若仅仅靠功率的方向来判断暂降源, 如果没有精确定位暂降的发生时间, 有可能判断错误 (如图 5)。应用本文方法计算, 观察各监测点能量变化情况, 如图 6、图 7 所示。

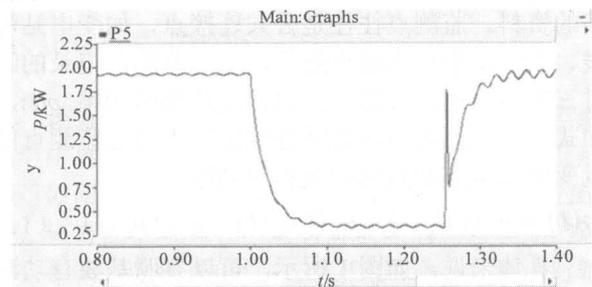


图 4 暂降期间 M5 三相瞬时功率的变化 (对称故障)

Fig.4 Change of three-phase instantaneous power in M5 during voltage sag (symmetrical fault)

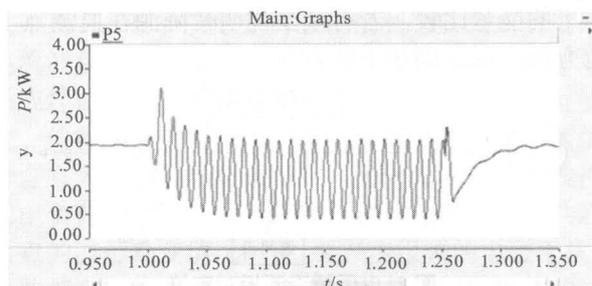


图 5 暂降期间 M5 三相瞬时功率的变化 (不对称故障)

Fig.5 Change of three-phase instantaneous power in M5 during voltage sag (asymmetrical fault)

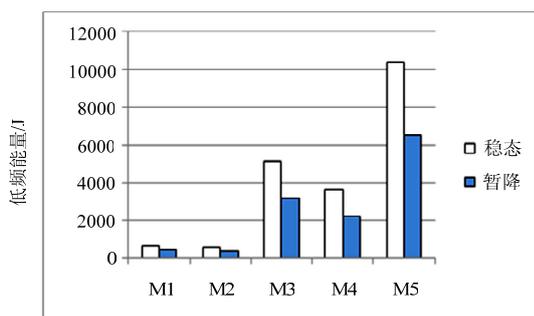


图 6 暂降与稳态期间各监测点能量比较情况-1 (对称故障)  
Fig.6 Comparison of energy in monitoring point during sag and steady state-1(symmetrical fault)

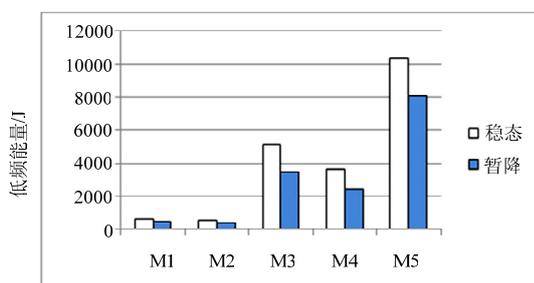


图 7 暂降与稳态期间各监测点能量比较情况-2 (非对称故障)

Fig.7 Comparison of energy in monitoring point during sag and steady state-2(asymmetrical fault)

从计算结果可以看出,与稳态相比  $\Delta E$  均减小,根据本文方法判断,故障发生在各监测点后方即上游方向,与仿真情况相符合。

(2) 10 kV 架空线路  $l_1$  上分别设置三相对称故障和不对称故障,表 1 是暂降期间,各监测点能量与稳态对比时的变化量  $\Delta E$ ,根据表 1 数据, M1 与 M5 有能量流进,其余点能量均减少,用本文方法判断,暂降源在 M1 前方, M2 后方,与仿真试验一致。

表 1 监测点暂降期间能量变化情况-1

Tab.1 Change of energy in monitoring point during sag-1

监测点 \ $\Delta E/J$	三相对称故障	不对称故障
M1	74 545.55	20 403.55
M2	-150.707	-83.844
M3	-63.8	-31.1
M4	-44.8	-21.8
M5	9 895.6	32 428

(3) 400 V 负载 1 的配电线路上分别设置三相对称故障和不对称故障,图 8、图 9 是各监测点能量流动情况,两幅图的各点变化趋势相似。从图中

可以看出, M1、M2、M5 能量有增加, M3 和 M4 能量几乎不变化,判断暂降源在 M2 的前方,与仿真实验符合。

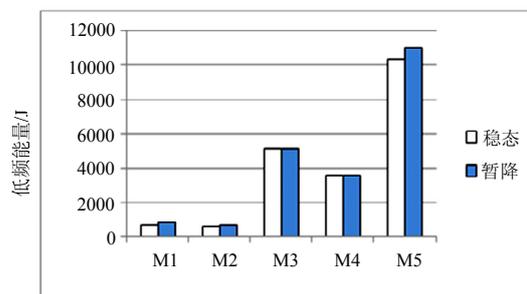


图 8 暂降与稳态期间各监测点能量比较情况-3 (对称故障)  
Fig.8 Comparison of energy in monitoring point during sag and steady state-3(symmetrical fault)

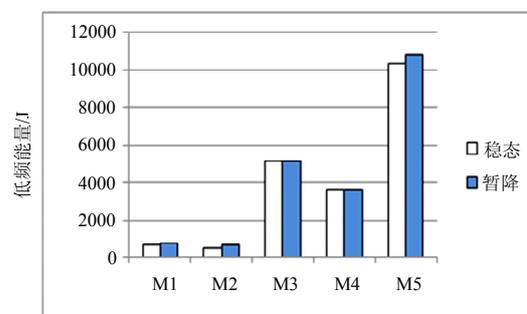


图 9 暂降与稳态期间各监测点能量比较情况-4 (非对称故障)

Fig.9 Comparison of energy in monitoring point during sag and steady state-4(asymmetrical fault)

### 3.4 变压器投运

变压器 T3 投运,图 10 是各监测点暂降与稳态能量比较图。从图 10 的结果判断,暂降源在 M5 前方, M1, M2 后方,与仿真试验一致。

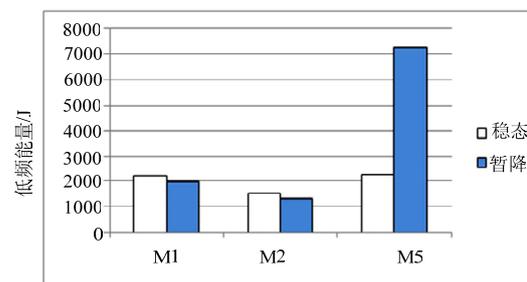


图 10 暂降与稳态期间各监测点能量比较情况-5

Fig.10 Comparison of energy in monitoring point during sag and steady state-5

### 3.5 异步电动机启动

如图 2 所示的异步电动机启动,能量变化如图 11 所示。

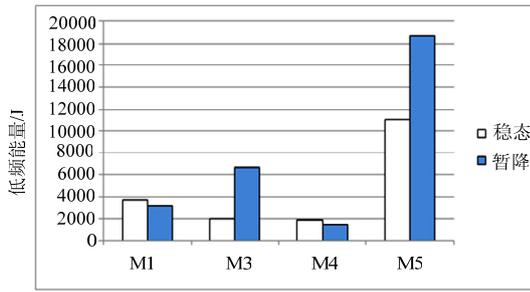


图 11 暂降与稳态期间各监测点能量比较情况-6  
Fig.11 Comparison of energy in monitoring point during sag and steady state-3

从图 11 的结果可看出, M3, M5 能量有增加, 说明暂降源在它们前方, M1, M4 能量减小, 说明暂降源在其后方, 综合考虑暂降源位于 M3 与 M4 之间, 与仿真试验相符。

### 3.6 考虑干扰源的暂降源的判断

为了考察本文方法在监测点受到干扰源影响时的准确性, 在 3.3~3.5 的仿真实验中的相同位置设置暂降源(短路故障只考察不平衡故障)的条件下, 加入高次谐波源, 各监测点信号发生畸变, 表 2 为各种情况下  $\Delta E$  的变化, 结果均能正确判断暂降源位置。

表 2 有干扰源时监测点暂降期间能量变化情况-2

Tab.2 Change of energy in monitoring point during sag with disturbance source-2

$\Delta E/J$	M1	M2	M3	M4	M5
110 kV 线路 不对称故障	-190.27	-161.022	-1 614.8	-1 137.4	-3 211.5
10 kV 线路 不对称故障	20 301.55	-34.553 5	-29.1	-20.3	32 283
400 V 线路 不对称故障	110.737 5	83.148 3	-0.8	-0.5	404
变压器投切 (T3)	-111.4	-82.3	—	—	1 606.2
电动机启动	-382.2	—	5 568.3	-232	7 680

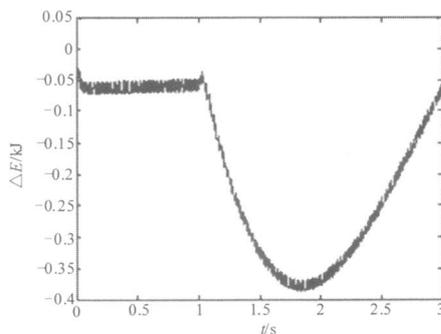


图 12 积分方法计算的 M5 暂降期间扰动能量变化  
Fig.12 Disturbance energy in M5 by integration method

对比文献[1-3]中对扰动功率积分计算能量的方法, 本文也用该方法进行了计算, 在有高次谐波的变压器投切情况中, 积分方法对 M5 的扰动能量计算如图 12 所示, 监测点有能量流失, 不能正确反映暂降源的位置。

## 4 总结

本文判断暂降源的方法是利用监测点广泛存在的监测装置, 结合小波多分辨率分析法通过计算监测点的瞬时功率的信号能量实现对暂降源相对于监测点的定位, 方法简洁, 并用仿真模型验证了方法的正确性。

另外, 本文提出的暂降源定位方法在放射状系统中进行了仿真验证, 对于在环网中的应用还需要更合适的模型做进一步的研究, 以及将方法推广到其他电能质量的扰动源定位上也需要更深入研究。

## 参考文献

- [1] Parsons A C, Grady W M, Powers E J, et al. A direction finder for power quality disturbances based upon disturbance power and energy[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (3), 1081-1086.
- [2] 张凯, 关根志, 张海龙. 用小波变换和瞬时功率定位电能质量扰动源[J]. 高电压技术, 2008, 34 (3): 375-775.  
ZHANG Kai, GUAN Gen-zhi, ZHANG Hai-long. Location for disturbance source based on wavelet transform and instantaneous power[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34 (3): 375-775.
- [3] KONG Wei, DONG Xin-zhou, ZHE Chen. Voltage sag source location based on instantaneous energy detection[C].// Power Engineering Conference. 2007.
- [4] Ashok Kumar Pradhan, Aurobinda Routray. Applying distance relay for voltage sag source detection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20 (1): 529-531.
- [5] Tayjasant Thavatchai, LI Chun, Xu Wilsun. A resistance sign-based method for voltage sag source detection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(4): 2544-2551.
- [6] Barrera Núñez V, Berjaga Moliner X, Melendez Frigola J, et al. Two methods for voltage sag source location[C]. //13th International Conference on Harmonics & Quality of Power. 2008.
- [7] Li C, Tayjasant T, Xu W, et al. Method for voltage-sag-source detection by investigating slope of the system trajectory[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2003, 150 (3).
- [8] Roberto Chouhy Leborgne, Daniel Karlsson, Jaap Dalalder. Voltage sag source location methods performance under symmetrical and asymmetrical fault

- conditions[C]. //IEEE PES Transmission and Distribution Conference. 2006.
- [9] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] 王克星, 宋政湘, 陈德桂, 等. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 29-54.  
WANG Ke-xing, SONG Zheng-xiang, CHEN De-gui, et al. Interference source identification of voltage sag in distribution system based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 29-54.
- [11] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等. 小波变换在电能质量分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (23): 55-58.  
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han, et al. Application of wavelet transform in power quality analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (23): 55-58.
- [12] 葛哲学, 沙威. 小波分析理论与MATLAB R2007实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [13] 周文晖, 李青, 周兆经. 采用小波多分辨率信号分解的电能质量检测[J]. 电工技术学报, 2001, 16 (6): 81-84.  
ZHOU Wen-hui, LI Qing, ZHOU Zhao-jing. Power quality detection using waveletmultiresolution signal decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16 (6): 81-84.
- [14] 王继东, 王成山. 基于小波变换的电容器投切扰动源定位[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (5): 20-23.  
WANG Ji-dong, WANG Cheng-shan. Capacitor switching disturbance source locating based on wavelet transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (5): 20-23.
- [15] 熊玲玲, 刘会金, 傅志伟. 基于小波包变换的电压骤降信号分析[J]. 继电器, 2004, 32 (11): 8-12.  
XIONG Ling-ling, LIU Hui-jin, FU Zhi-wei. Voltage sag analysis based on wavelet package transform[J]. Relay, 2004, 32 (11): 8-12.

收稿日期: 2009-11-18; 修回日期: 2009-12-23

作者简介:

杨杰(1966-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高电压技术、电力系统分析与控制;

王金浩(1975-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统、电能质量分析与控制;

章雪萌(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究电能质量的监测与评估。E-mail: zxm0804@163.com

(上接第 89 页 continued from page 89)

- HUANG Yan-quan. Research on some problems of state estimation of power system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [8] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6 (5): 87-94.  
YANG Wei, LI Qi-qiang. Survey on particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Engineering, 2004, 6 (5): 87-94.
- [9] 陈建华, 李先允, 邓东华, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用综述[J]. 继电器, 2007, 35(23): 77-84.  
CHEN Jian-hua, LI Xian-yun, DENG Dong-hua, et al. A review on application of particle swarm optimization in electric power systems[J]. Relay, 2007, 35 (23): 77-84.
- [10] 马豫超, 侯志俭, 蒋传文, 等. 基于粒子群算法求解电力市场发电商最优供给函数模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 35-39.  
MA Yu-chao, HOU Zhi-jian, JIANG Chuan-wen, et al. POS algorithm based optimal supply function model for power producer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 35-39.
- [11] 张振宇, 葛少云, 刘自发. 粒子群优化算法及其在机组优化组合中应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(5): 33-38.  
ZHANG Zhen-yu, GE Shao-yun, LIU Zi-fa. Particle swarm optimization algorithm and its application in unit commitment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(5): 33-38.
- [12] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14-19.  
YUAN Xiao-hui, WANG Cheng, ZHANG Yong-chuan, et al. A survey in application of particle swarm optimization to electric power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19.
- [13] 杨帮宇, 彭建春, 龚演平, 等. 线路潮流转归分量及其在固定成本分摊中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (14): 46-50.  
YANG Bang-yu, PENG Jian-chun, GONG Yan-ping, et al. Imputation of branch power flow method and its application in allocation of fixed cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (14): 46-50.

收稿日期: 2009-11-13; 修回日期: 2009-11-27

作者简介:

闫丽梅(1971-), 女, 副教授, 博士后, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: yanlimei@yahoo.cn

张士元(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。