

基于小波变换的直流主动配电网电压波动源辨识

张宸宇¹, 邓 凯², 史明明¹, 郑建勇³, 缪惠宇³

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京, 211103;

2. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京, 210000;

3. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京, 210096)

摘要: 由于直流主动配电网接入了大量分布式电源, 直流母线的电压问题主要包括直流母线的电压波动, 直流母线的电压暂降和直流母线的电压中断等。本文介绍了小波变换的基本思想, 建立不同的小波函数, 利用基于小波变换的方法对直流供电系统电压波动源进行辨识, MATLAB 仿真分析表明, 不同小波函数可以辨识出直流电压的波动时刻与对应的波动源, 具有良好的辨识效果。

关键词: 电能质量; 小波变换; 直流主动配电网; 污染辨识

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0021-05

0 引言

目前国内外绝大部分学者对于电能质量的研究都集中在交流供电系统^[1], 但是诸如储能、光伏等分布式发电都是直流电源, 加上随着越来越多直流负载的出现, 直流供电系统开始得到关注和展。相比交流供电系统, 直流供电系统的电能质量不存在电压频率、无功、谐波等问题, 所以受到如楼宇供电等特定领域的欢迎^[2-4]。从直流供电的特点可以看出其电能质量问题是控制直流母线的稳定, 所以直流供电系统电压波动源辨识研究具有重要的意义。

小波变换是一种信号的时间-频率(时间-尺度)分析方法, 是短时傅里叶变换的继承和发展, 优点是时间和频率同时具有良好的局部化性质, 其自适应窗口能随频率自动调节, 在分析低频信号时有高的频率分辨率, 而分析高频信号时有高的时间分辨率, 因而可以观察到信号的任意细节^[5]。至今, 小波分析理论已在图像处理、故障识别、数据挖掘、预测分析等领域取得了一定程度的理论和实际应用成果。随着信号识别技术的快速发展, 小波分析理论在电力系统领域也有广泛的应用, 特别是在暂态电力信号分析上有着广阔的应用前景。

信号的奇异点是指检测信号在某处出现间断点或信号的某阶导数不连续。一般来说, 信号中的奇异点及不规则的突变部分常常带有重要信息, 代表信号的一个重要特征。小波变换则具有良好的

时频局部化特性, 能够有效地分析信号的奇异性, 并可以确定奇异点的位置及奇异度的大小^[6-8]。而直流供电系统电能质量的辨识问题实质是对存在扰动的信号的奇异点进行检测, 因此采用小波变换的方法比较适合分析直流供电系统的电能质量问题。对于直流供电系统的各种电能质量问题信号, 在发生时刻和结束时刻电压波形中都会出现一个细小的突变, 通过小波变换可将这个细小的突变放大、显示出来, 从而可以检测出这一突变, 即可检测出电能质量信号持续时间和故障信号的幅值, 实现电能质量问题信号的定位。

1 基于小波变换的电压波动源辨识

小波变换的基本思想是通过某一函数表示或逼近分析的信号 $f(t)$, 而这一函数是由基本小波函数 $\psi(t)$ 经过不同尺度的伸缩和平移所构成的。具体如下, 设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅里叶变换为 $\Psi(\omega)$, 当 $\psi(\omega)$ 满足允许条件:

$$C_\psi = \int \frac{|\Psi(\omega)|}{|\omega|} < \infty \quad (1)$$

则可称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波函数。将其进行伸缩和平移后可得到小波序列:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中: a, b 分别为伸缩参数和尺度参数。则对于任意信号 $f(t) \in L^2(R)$, 连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx = f(x) \psi_a(x) \quad (3)$$

其重构公式如式(4):

收稿日期: 2017-02-26; 修回日期: 2017-04-01

基金项目: 国家电网公司科技项目(基于全网谐波监测数据的干扰源分析技术研究与应用)

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \iint \frac{W_f(a, b)}{a^2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

直流供电系统电能质量的扰动定位的目的是确定扰动的起止时刻。由于扰动的起止时刻通常对应着信号的突变点,而信号的突变点就是小波变换模极大值点对应的点,因此可以通过小波变换模极大值点来确定扰动时刻。可设定一个光滑低通函数 $\theta(x)$, 并且满足积分为 1, 无限远处衰减为 0 的条件, 则其一阶导数为:

$$\varphi(x) = \frac{d\theta}{dx} \quad (5)$$

则 $\varphi(x)$ 是带通函数, 符合小波的可容许条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = 0 \quad (6)$$

因此 $\varphi(x)$ 可作为小波变换的母小波。若用 $\theta_a = [\theta(x/a)]/a$ 表示函数 $\theta(x)$ 对尺度因子 a 的伸缩, 则尺度因子 a 的小波函数为:

$$\varphi_a(x) = \frac{\varphi(x/a)}{a} = \frac{d\theta(x/a)}{dx} = a \frac{d\theta_a(x/a)}{dx} \quad (7)$$

由式(3)可知, 此时信号 $f(t)$ 在尺度 a 上的小波变换为:

$$W_f(a, x) = f(x) \varphi_a(x) = f(x) \left(a \frac{d\theta_a(x/a)}{dx} \right) = a \frac{d[f(x)\theta_a(x)]}{dx} \quad (8)$$

对于固定尺度 a 下, $W_f(a, x)$ 就是信号 $f(t)$ 经过函数 $\theta_a(x)$ 平滑后的一阶导数, 即 $W_f(a, x)$ 模极大值时所对应的点就是信号的局部突变点。所以, 可以利用各尺度下的小波变换的模极大值点的位置来对应信号的突变点。

设小波变换多分辨分解的高频系数为 CD_n , 低频系数为 A_n , 其中 n 代表分解层数。高频系数能反映小波的细节部分, 而低频系数反映小波的整体概貌^[9-15]。直流供电系统电压波动源辨识信号定位流程如图 1 所示, 具体检测与定位方法步骤如下:

(1) 采样。满足香农采样定理, 确保采样精确度, 在本文中采样频率取 5 kHz, 得到采样序列。

(2) 选取小波基和分解尺度。函数在某处有间断点或某阶导数不连续时, 则称这个函数在此处具有奇异性, 称该点为函数的奇异点。信号的奇异点检测可用实小波变换的模极大值原理获取。考虑到 db 系列小波函数满足时频紧支撑性、正交性、高正则性, 又具有 Mallat 快速算法等特点, 综合考虑后选取 db4 小波对直流母线电压值采样序列进行 5 层分解, 得到第一层和第二层高频系数 CD_1, CD_2 。

(3) 确定扰动突变点位置。通过上一个步骤求出第一层高频系数 CD_1 和第二层高频系数 CD_2 的模极

大值及其位置, 模极大值位置为信号的突变点。

(4) 确定扰动突变点时刻。记录上一步骤求出模极大值点所对应的时刻, 分别是暂态扰动发生和结束的时刻, 其时间间隔即为扰动持续时间。

(5) 判断直流供电系统电能质量暂态扰动类型。信号经过 db4 小波五层分解后得到第五层低频小波系数 A_5 , 通过 A_5 的幅值信息可以估测扰动信号的幅度, 进而判断直流配电系统暂态电压波动的类型。

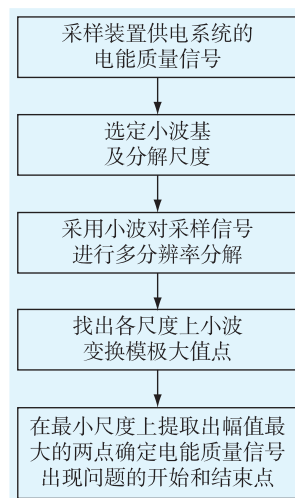


图 1 电压波动源辨识信号定位流程

Fig.1 Voltage fluctuation source identification signal positioning process

直流母线电压问题判别逻辑如图 2 所示, 图中 $U_{bus,Std}$ 为直流母线电压标准值, 利用电压的变化范围及小波变换判断母线电压的电能质量问题。母线电压变化时小波分解检测到电能质量问题, 当范围在 10% 时, 利用电压变化率识别电压偏差和电压波动; 当变化范围在 10%~90% 则认为母线发生了电压暂降; 当电压下降到 10% 以下时, 判断主网发生电压中断, 当中断时间超过 3 min 则判断该中断为长时中断。识别电能质量问题后再利用各模块的小波分解检测问题, 当模块小波检测出现奇点则可定位问题所在模块。对于极端情况下出现电压长时中断的情况, 需要将供电系统与主网断开并切除所有负载以减小事故范围。

2 仿真实验

为了验证基于 db4 小波对直流供电系统电能质量的检测, 在 MATLAB 的 Simulink 模块中进行了仿真验证, 仿真中直流母线通过 DCDC 变换器接入光伏电池, 直流母线电压设定为 380 V, 仿真在 0~1 s 内频繁投入或者切除大量二级负荷, 通过负荷投切造成电压波动, 在仿真 1~1.5 s 利用线路故障造成

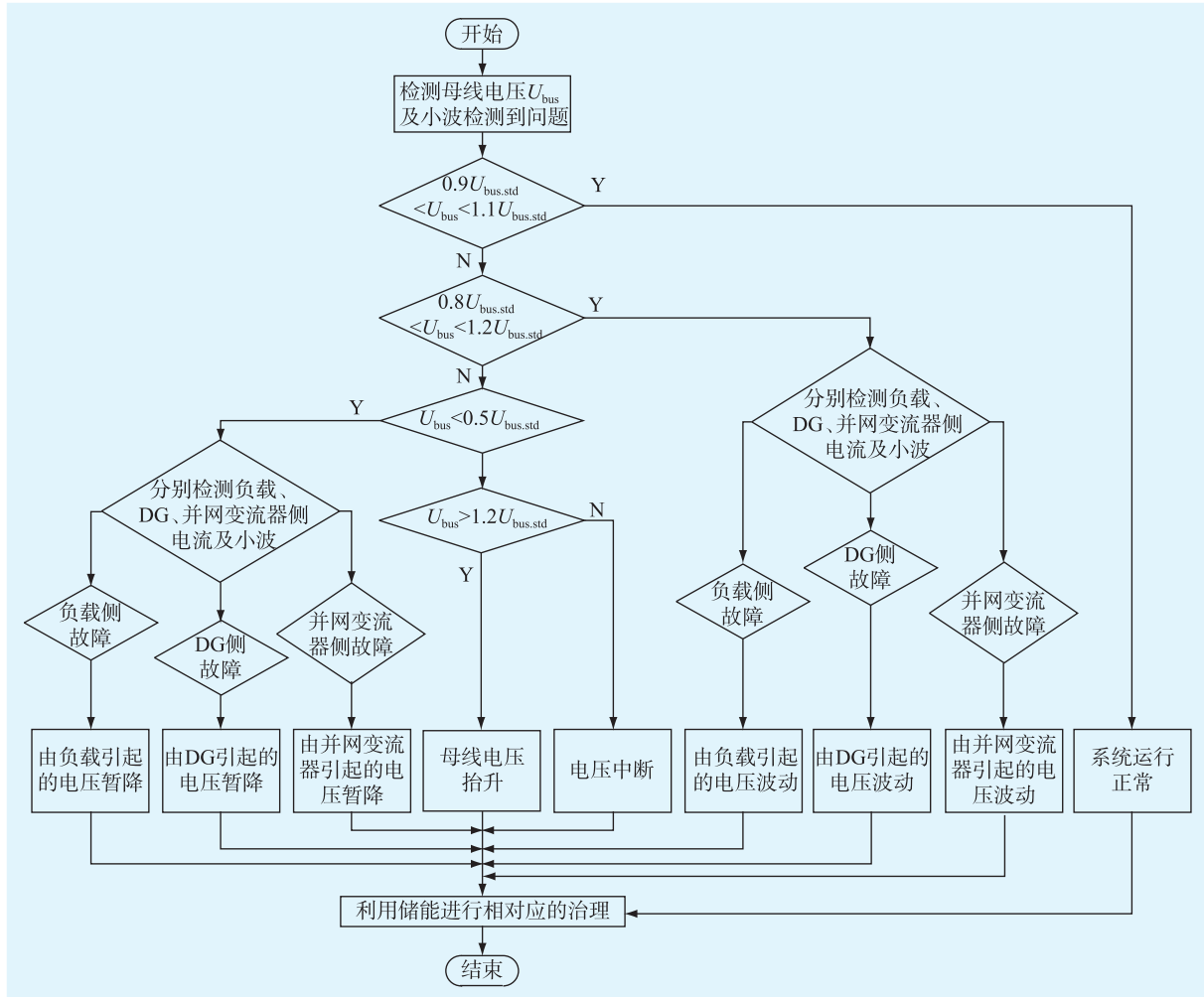


图2 直流母线电压问题判别逻辑

Fig.2 Distinguishing logic of DC bus voltage problem

一次电压暂降,在3 s时光伏辐照度发生变化,仿真4 s时,电压跌落形成一次电压中断。

图3通过小波分解算法检测了直流母线电压问题,其中db4分解效果最好。直流母线电压在0~1 s内出现电压波动,在1~1.5 s出现电压暂降,在3 s时出现电压异常,4 s时出现电压中断,在其他时间电压均正常。以上出现所有问题都在db4小波检测图中出现奇点,表明小波分析检测到了电能质量问题。

图4通过小波分解光伏电池功率检测了光伏电池出现的电能质量问题,在实际仿真中模拟光伏电池在3 s时接收辐照度出现异变,其中db6分解效果最好。由图可见,在3 s时,由于辐照度发生突变,光伏电池输出功率出现异常,可由小波检测到光伏电池输出功率的突变;在其他时段由于直流母线中其他设备对光伏电池输出功率产生轻微影响使输出功率产生波动,当小波分解可以检测出光伏电池并未出现电能质量问题,其判断结果较为理想。

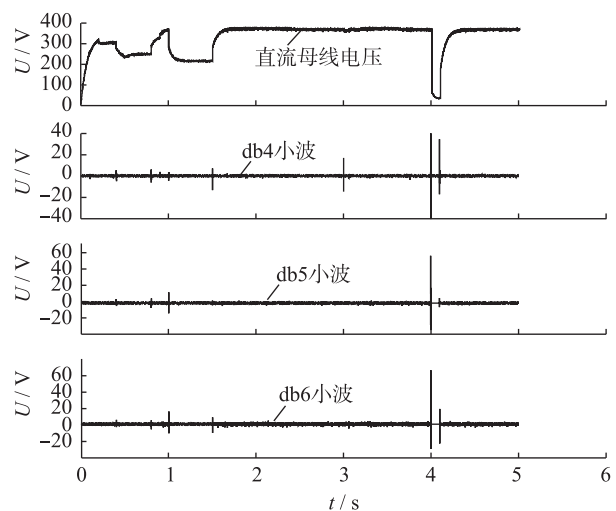


图3 直流母线电压经db4,db5,db6小波分析检测结果

Fig.3 Wavelet analysis of DC bus voltage detected by db4, db5, db6

图5通过小波分解负载功率检测了负载侧出现的电能质量问题,在实际仿真中0~1 s由于负载波动造成了直流母线电压波动,1~1.5 s由于负荷问

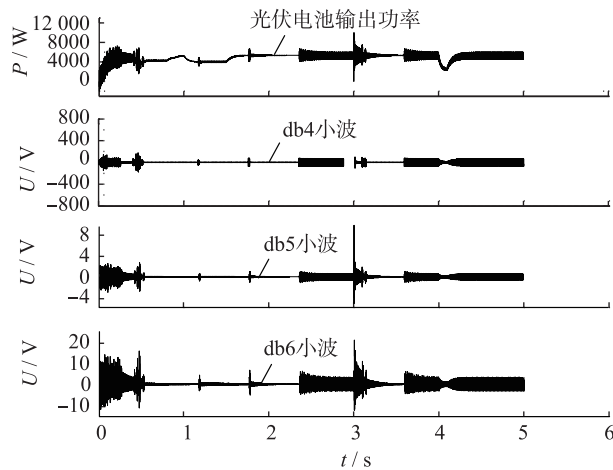


图4 光伏电池输出功率经 db4,db5,db6 小波分析检测结果

Fig.4 Wavelet analysis of photovoltaic cell detected output power by db4, db5, db6

题造成直流母线电压暂降,4 s 时由于冲击负荷接入对直流母线造成电压中断。图 5 为负载侧功率变化,可以明显观察到 0~1 s 内的波动及 4 s 时的冲击 db6 分解效果最好,如图所示在 0~1 s 内 0.2 s,0.4 s,0.6 s,0.8 s,1 s,1.5 s 及 4 s 都出现奇点,表明小波分解检测到了负载侧的电能质量问题。

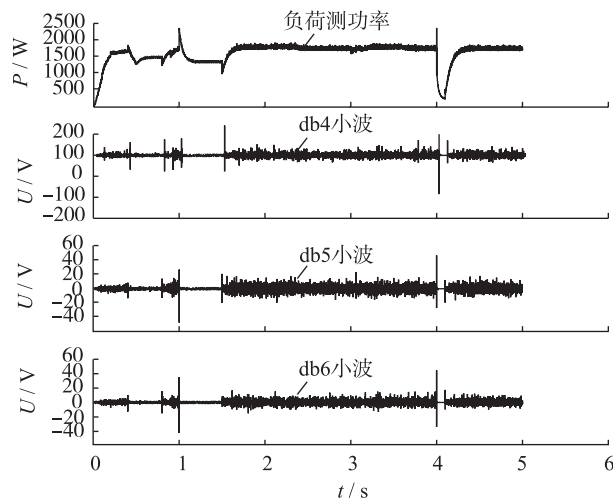


图5 负载功率变化经 db4,db5,db6 小波分析检测结果

Fig.5 Wavelet analysis of load power change detected by db4, db5, db6

3 结语

本文给出了基于小波变换的直流供电系统电压波动源的辨识方法,分析了小波变换的思想。基于 MATLAB 的仿真分析表明,采用小波分析可以辨识出直流电压的波动时刻与对应的波动源,仿真结果证明了本文提出算法的正确性和有效性。

参考文献:

[1] 柳丹,张宸宇,张震,等.基于混合储能的直流微电网

母线电压控制策略[J]. 电器与能效管理技术, 2016(6): 47-52.

LIU Dan, ZHANG Chenyu, ZHANG Zhen, et al. Voltage control strategy of DC microgrid based on hybrid energy storage [J]. Electrical and Energy Efficiency Management Technology, 2016(6): 47-52.

[2] KUMARS R, ARASH M, CANDELA J I, et al. A generalized voltage droop strategy for control of multiterminal DC grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 607-618.

[3] ZHANG Chenyu, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. Control method for fault-tolerant active power filters [J]. Journal of Power Electronics, 2015, 15(3): 796-805.

[4] DOH T Y, RYOO J R. Robust approach to repetitive controller design for uncertain feedback control systems [J]. IET Control Theory and Applications, 2013, 7(3): 431-439.

[5] 吴兆刚. 基于小波变换的电能质量检测与仿真分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

WU Zhaogang. Power quality detection and simulation analysis based on Wavelet Transform [D]. Changsha: Hunan University, 2014.

[6] 弼程, 建书. 小波分析及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

BI Cheng, JIAN Shu. Wavelet analysis and its applications [M]. Beijing: Press of Electronics Industry, 2003.

[7] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

LUO An. Power grid harmonic control and reactive power compensation technology and equipment [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.

[8] 张宸宇. 微网及含微网的配电网电能质量综合控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.

ZHANG Chenyu. Research on power quality comprehensive control of microgrid and distribution grid with microgrid [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

[9] LI Yunwei, HE Jinwei. Distribution system harmonic compensation methods [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(4): 18-31.

[10] WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke, et al. Coordinated optimal design of inverter controllers in a micro-grid with multiple distributed generation units [J]. IEEE Transactions on Power System, 2013, 28(3): 2679-2687.

[11] HIROFUMI A. Control strategy and site selection of a shunt active power filter damping of harmonic propagation in power distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 354-363.

[12] VILATHGAMUWA D M, LOH P C, LI Yunwei. Protection of microgrids during utility voltage sags [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1427-1436.

[13] 陈平, 李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 60-65.

(下转第 30 页)

Design and Application of Coordinated Control System in Active Distribution Network

HUANG Sujuan¹, ZHANG Xiaoqing¹, SUN Baohua², YU Jianyang³, HUANG Weiyi², SONG Yunxiang²

(1. NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 211106, China; 3. State Grid Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213003, China)

Abstract: With constantly increasing accesses of distributed generators and diversity load development such as electric vehicles, the operational control of distribution network is facing a huge challenge. In order to make full use of active distribution network and meet the development requirement of smart grid, this paper proposes a coordinated control system in active distribution network. The paper elaborates the general architectural design, software architectural design, and functional designs including of characteristic analysis, situation awareness and coordinated control. Through the coordinated interaction and control of source-load-storage being realized, the potential of controllable resources in distribution network is fully exploited, distributed generator optimizes its power generation absorption and diversity load improves its ability of participating in electric network load adjustment basing on active distribution network in safe and reliable operation. The coordinated control system designed and developed based on this paper has been applied in Changzhou distribution network.

Key words: active distribution network; coordinated control; architectural design; distributed generator

(编辑 徐林菊)

(上接第 24 页)

CHEN Ping, LI Qingming. Design and analysis of mathematical morphology-based digital filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (11): 60-65.

[14] 刘伟, 孟庆刚, 商皎, 等. 一种新型级联多电平动态电压恢复器的研究 [J]. 江苏电机工程, 2012, 31(5): 27-31.

LIU Wei, MENG Qinggang, SHANG Jiao, et al. Research on a new cascaded multilevel dynamic voltage Restorer [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(5): 39-42.

[15] 吴志坚, 徐星星, 王宝安. 一种新型低压电网动态电压恢复器的仿真分析 [J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3): 39-42.

WU Zhijian, XU Xingxing, WANG Baoan. Simulation and analysis of a new type DVR for distribution network [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(3): 39-42.

作者简介:



张宸宇

张宸宇 (1989—), 男, 江苏扬州人, 博士, 从事微网电能质量治理工作 (E-mail: zcy530@sina.com);

邓凯 (1986—), 男, 江苏淮安人, 博士, 从事特高压输电技术工作;

史明明 (1986—), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事电能质量工作;

郑建勇 (1966—), 男, 江苏南京人, 教授, 研究方向为新能源并网、在线监测与故障诊断;

缪惠宇 (1992—), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 从事主动配电网相关工作。

Identification of Voltage Pollution Source Based on Wavelet Transform in DC Active Distributed Network

ZHANG Chenyu¹, DENG Kai², SHI Mingming¹, ZHENG Jianyong³, MIAO Huiyu³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing, China, 211103;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing, China, 210000;

3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing, China, 210096)

Abstract: The voltage problems in the DC voltage bus contains the voltage fluctuation, the voltage sag and the voltage interruption problems. In this paper, the wavelet module is established based on idea of wavelet transform. The voltage pollution source in the DC bus is identified by wavelet transform. In the Matlab simulation, different wavelet function can identify the fluctuation time of the DC voltage and the corresponding wave source, which has a good identification effect.

Key words: Power quality; Wavelet transform; DC power supply system; pollution identification

(编辑 刘晓燕)