

基于时域、小波变换和 FFT 的电能质量扰动识别

赵凤展,杨仁刚

(中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要: 利用时域均方根值电压变动特性、小波变换及 FFT 变换对多种电能质量扰动信号进行分层次辨识。首先根据扰动信号均方根值分布特性将扰动初步分类,随后对扰动信号多尺度小波分析,确定具体的扰动类型。对陷波和谐波应用其频谱特性进行区分。仿真试验结果表明了该方法的可行性、有效性和较强的抗噪性。

关键词: 扰动辨识; 小波变换; 均方根值; FFT; 电能质量

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)08-0050-06

0 引言

随着各种敏感电力电子设备在工业中的广泛应用,诸如电压暂降、骤升、低频振荡等短时电能质量扰动问题已成为近年来各方面关注的焦点之一。有效的检测、分析电力系统波形短期现象,对于进一步认识电能质量和采取有效的补偿措施均具有重要意义。

电能质量扰动信号一般为非平稳信号。近年来,不少学者积极地采用现代信号处理技术和智能技术分析电能质量扰动信号。如应用差变信号与快速傅里叶变换结合检测扰动^[1],用短时傅里叶变换、瞬时无功功率理论^[2]对扰动信号进行分析,用专家系统的决策树^[3]、人工神经网络、支持向量机^[4]对扰动进行分析和识别等。小波变换具有时频局部化特征,在信号分析、故障诊断、图像识别等许多方面取得了具有科学意义和应用价值的重要成果。应用小波变换对电能质量扰动分析已成为近几年的一个研究热点。例如对信号进行小波多分辨率分析,提取小波系数的多个特征量^[5~7]对扰动进行分类;用不同特性的多小波组合的扰动识别法^[8];利用小波变换和分形指数提取动态电能质量扰动特征量的方法^[9]等。这些方法有的计算量较大,有的没有考虑噪声的影响,较难用在实际监测中。本文利用了小波多分辨率分析和奇异性检测原理及电压均方根值(即有效值)变化特征和 FFT 频谱分析,提出了一种具有一定实用价值的电能质量扰动辨识新方法。

1 扰动辨识原理

1.1 小波变换^[10]

小波变换是一种新的变换方法,它的主要特点

是通过变换能够充分突出信号某些方面的特征。对于任意的函数或信号 $f(t)$, 其小波变换定义为:

$$WT_f(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \frac{dt}{a} \quad (1)$$

其中: $WT_f(a, \tau)$ 是小波变换系数, $\psi(t)$ 是小波母函数, $\psi_a(t)$ 是小波基函数, 具有尺度 a 和 平移 τ 两个参数。

离散小波变换的小波基通常是对尺度进行幂级数离散化得到。由于小波变换具有时-频局部化的特点, 可以确定信号奇异点的位置和定量描述信号局部奇异性大小, 而且小波函数本身也属于一种暂态波形, 将其用于电能质量暂态过程分析领域具有其他变换无法比拟的优越性。

实际检测到的电力信号总会含有噪声, 电力系统的信号噪声一般为白噪声, 其小波变换系数随小波分解尺度的增加迅速变小, 而扰动信号一般随着小波分解尺度的增加幅值变大。由此可从含噪信号中识别扰动信号。

小波基函数的选取没有固定的模式, 如何选择合适的小波基, 应根据各小波不同的性质及信号的特点来确定。本文经试验发现, db4 小波能较好地识别电能质量扰动。

1.2 归一化电压均方根值^[11]

一个理想的供电系统的三相交流电源对称、电压均方根值恒定。而实际上, 供电系统电压每时每刻都发生着变化, 这种实际电压偏离系统标称电压的现象称为电压变动, 常用电压均方根值来描述。

均方根值电压变动特性 $U_{RMS}(t)$, 是指沿基波半个周期及其整数倍求取的电压均方根值随时间变

化的函数关系。现以电力线路接地故障引起的电压均方根值变动为例来说明这一变化关系,如图 1(b)所示,电压信号在 t_1 时刻发生了暂降扰动,在 t_2 时刻结束。

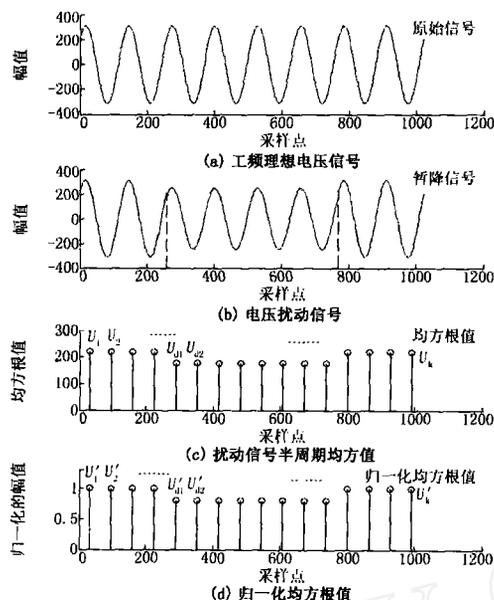


图 1 电压扰动信号的分析

Fig 1 Voltage disturbance signal analysis

半周期电压信号的均方根值计算公式为:

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} u_k^2} \quad (2)$$

式中: M 为半个周期采样点数; u_k 为第 k 点的瞬时电压值。

由实际扰动信号测得的电压半周期均方根值我们定义为扰动电压均方根值,用 U_j 表示,如图 1(c) 中的 $U_1, U_2, \dots, U_{d1}, U_{d2}, \dots, U_k$ 。其中,无扰动发生时的电压半周期均方根值我们定义为标准电压均方根值,用 U_r 表示,如图 1(c) 中的 U_1, U_2 。

定义 U_j 为归一化均方根电压幅值,是扰动电压均方根值 U_j 与标准电压均方根值 U_r 的比值,计算公式如下:

$$U_j = U_j / U_r \quad (3)$$

式中: $j=1 \sim 2N$, N 为采样信号周期数。

根据扰动幅值的定义可知,若 $(U_j)_m$ 为扰动时段电均方根极值(此处为最小值),则电压扰动幅值用式(4)计算:

$$(U_j)_m = (U_j)_m / U_r \quad (4)$$

即归一化均方根电压幅值的极值代表了扰动幅值。同理可计算电压中断和骤升幅值。

对于电压暂降,有 $0.1 < (U_j)_m < 0.9$,电压中

断时 $(U_j)_m < 0.1$,电压骤升时 $(U_j)_m > 1.1$ 。

1.3 电压均方根值、小波变换、FFT变换相结合的扰动识别方法

电压均方根值的变化代表了信号幅值的变化趋势和程度。小波变换的模极大值点与信号的突变点一致,利用这一特性,确定扰动发生的起止时刻。FFT变换能表征信号的频谱特性。

本文提出了一种电能质量扰动信号多层次分类方法。

首先,根据扰动信号均方根值分布特性将扰动初步分为两类,即电压暂降、骤升和中断为一类,瞬态脉冲、低频振荡、陷波、谐波和噪声为另一类。

随后,对扰动信号进行 db4小波 3尺度分解,根据小波的奇异性检测原理和小波系数模极大值的分布,进一步确定具体的扰动类型和扰动定位。对小波系数呈现相似分布的陷波和谐波应用 FFT变换后的频谱特性进行区分。

2 几种短时电能质量扰动的仿真

本文中扰动信号采样频率为 6.4 kHz,采样时间为 8 个工频周期,信噪比约为 26 dB。对扰动信号进行 db4小波 3尺度分解。

以下图 2~图 9 是借助 Matlab6.5 仿真系统实现的电压暂降、骤升、中断、瞬态脉冲、低频瞬变振荡、陷波、谐波、噪声等扰动信号的仿真分析结果,各图中 (a)代表某种电压扰动信号,(b)代表归一化的电压均方根值,(c)和 (d)分别是将扰动信号进行 db4小波 3尺度分解所得到的第一尺度和第三尺度高频系数 D1和 D3。

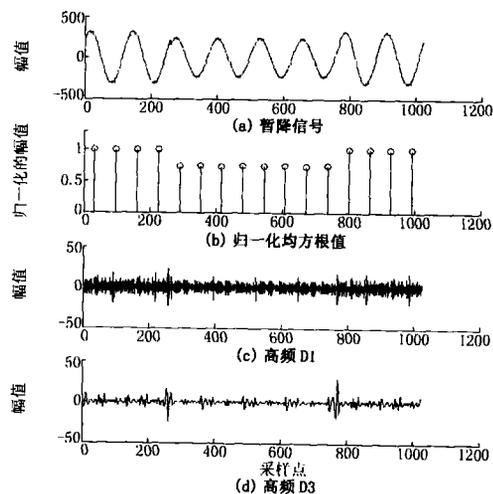


图 2 电压暂降采样信号及分析

Fig 2 Voltage dips analysis

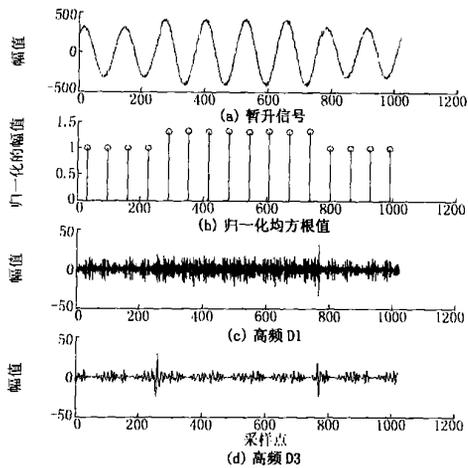


图3 电压骤升采样信号及分析

Fig. 3 Voltage swell analysis

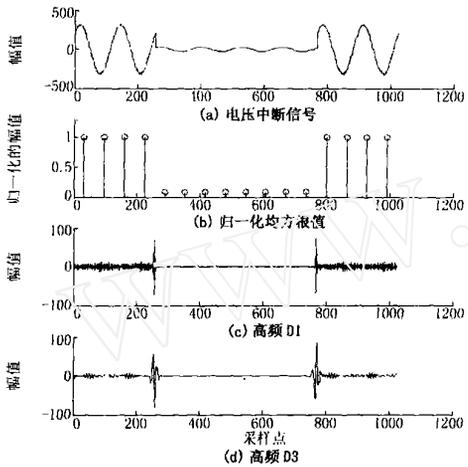


图4 电压中断采样信号及分析

Fig. 4 Voltage interruption analysis

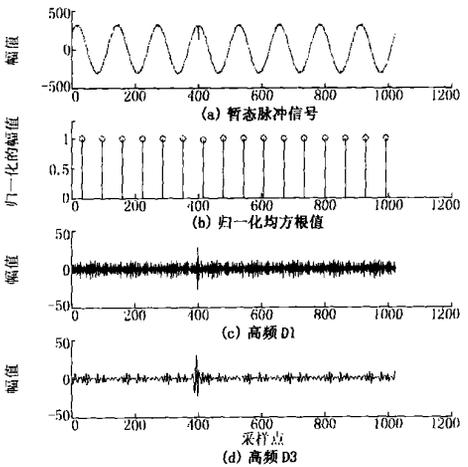


图5 电压瞬态脉冲采样信号及分析

Fig. 5 Voltage transient impulse analysis

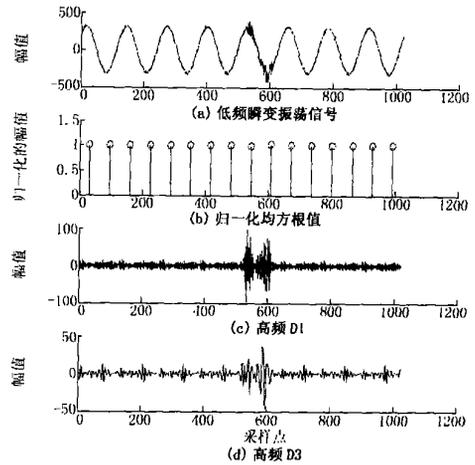


图6 电压瞬变振荡信号及分析

Fig. 6 Voltage transient oscillator analysis

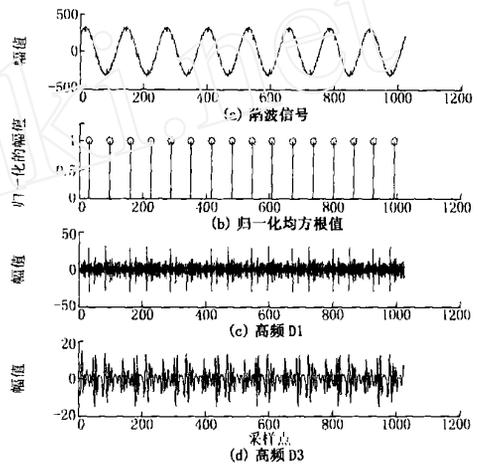


图7 陷波采样信号及分析

Fig. 7 Notches analysis

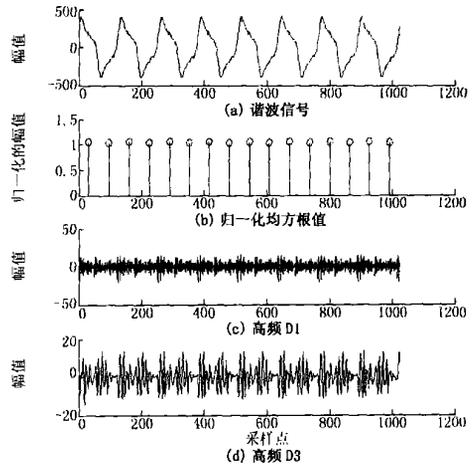


图8 谐波采样信号及分析

Fig. 8 Harmonics analysis

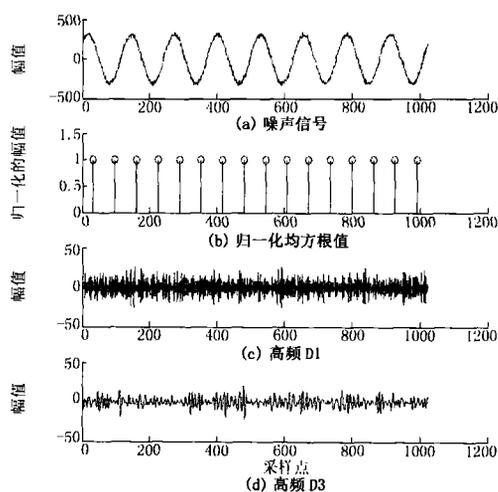


图 9 含噪声电压信号及分析

Fig 9 Noisy voltage analysis

比较图 2~图 9 的 (b) 图发现,电压暂降、骤升和中断信号的归一化电压均方根值均有较明显的变化,且持续一段时间;而低频瞬变振荡、瞬态脉冲、电压陷波、谐波和噪声信号的归一化电压均方根值没有明显的持续变化,根据这一特点可先将扰动分为两大类。

比较图 2~图 4 的 (c) 和 (d) 图发现,根据 D1 不易判断扰动发生的时刻。这是因为噪声的小波系数主要集中在 D1 和 D2 层高频系数,并会随着尺度的增大而减小,因此,可根据 db4 小波分解的 D3 来确定这类扰动信号的起止时刻。经试验,将 D3 进行 4 次方运算,噪声信号将明显变小,扰动时刻模极大值突现,更容易确定扰动信号的起止时刻。之后,根据图 (b) 扰动时段的归一化电压均方根值确定扰动类型和幅值。

比较图 5~图 9 的 (c) 和 (d) 图发现,图 5 电压瞬态脉冲信号的 D1 和 D3 中有较明显的单个极大值;图 6 电容器组冲能引起的低频瞬变振荡现象有短时段连续较大的一组系数;图 7、图 8 的电压陷波和谐波信号的 D1 和 D3 均呈现近似周期性的多个极大值,暂不能区分;图 9 含噪信号的 D1 和 D3 呈现出无规律性。由此,可根据 D1 或 D3 系数的分布规律分辨出四类扰动:低频瞬变振荡、瞬态脉冲、含噪信号、陷波(或谐波)。

陷波和谐波都是周期性的扰动信号。从陷波波形可看出,陷波整体上还是工频正弦波形,只在多处局部发生了瞬时变化;而谐波信号呈现出明显的非正弦畸变。傅里叶变换可以反应信号的频率分布。

对陷波、谐波(除基波和噪声外,还含有 30% 的 3 次谐波和 10% 的 5 次谐波)及间谐波(除基波和噪声外,还含有 30% 的 2.4 次谐波和 10% 的 4.3 次谐波)进行 512 点 FFT 变换,其频谱特性如图 10 所示。

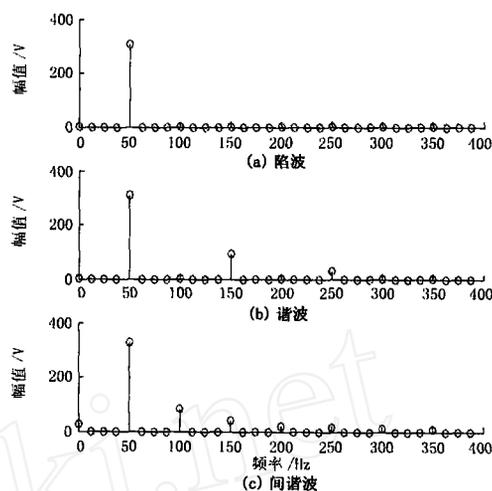


图 10 频谱特性

Fig 10 The spectrum of signals

图 10 (a) 为陷波的频谱特性,图中仅含有工频频率;图 (b) 中除了含有工频频率外,还有 3 次和 5 次谐波成分;图 (c) 也显示含有工频外的其他频率信号,由于用傅里叶变换分析间谐波时存在频谱泄漏误差,影响了其频率分析精度,但仍体现了信号的多频率分布特性。由此,可根据信号的 FFT 变换将陷波与谐波(或间谐波)区分开。至于谐波(间谐波)的准确测量可参见文献 [12],这里不再赘述。

3 电压暂态扰动识别算法框图

根据前面的仿真分析,得出本文电压扰动分层识别算法框图,如图 11 所示。

4 扰动识别试验

通过改变扰动的持续时间、幅值、起始相位角,本文产生了不同程度的 8 种扰动各 40 个扰动样本,共 320 个扰动信号,信噪比约为 26dB。应用本文提出的方法对这些扰动信号检测和分类,结果见表 1。

从试验结果看出,电压暂降、骤升与电压中断的平均测量误差较小,扰动类型识别率很高。而电压低频瞬变振荡信号持续时间较短时,容易被误判为电压瞬态脉冲信号。电压陷波、谐波和噪声的识别率也很高。

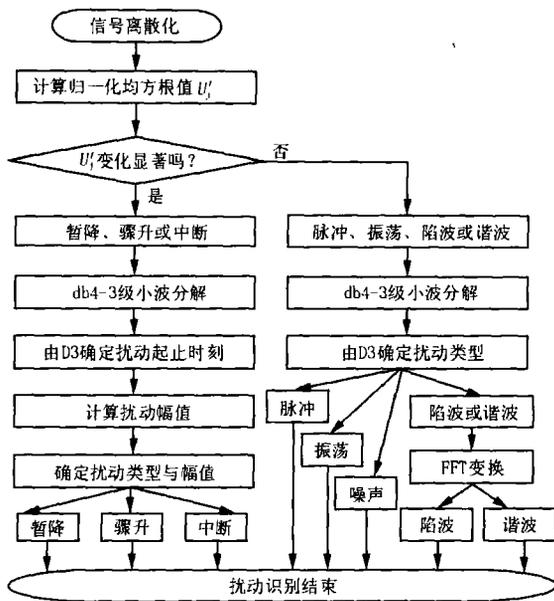


图 11 电压扰动识别规则框图

Fig 11 Disturbance recognition algorithm

表 1 扰动信号的识别试验

Tab 1 Tests of disturbance recognition

电压扰动类型	平均测量误差 / (%)			错误识别率
	开始时刻	结束时刻	幅值	
电压暂降	0.76	1.54	2.01	0
电压骤升	0.78	1.66	1.58	0
电压中断	1.43	1.54	2.01	0
瞬态脉冲	0.77		—	1/320
低频振荡	—	—	—	1/320
电压陷波	—	—	—	0
谐波	—	—	—	0
噪声	—	—	—	0

注:错误识别率 = 错误识别次数 / 试验总次数

5 结论

本文利用电能质量扰动信号的时域均方根值变化特性、小波系数分布特征及频谱特征对多种电能质量扰动信号进行分层次辨识,识别正确率较高,同时可较准确地测得电压暂降、骤升和中断的扰动时刻、幅值及瞬态脉冲的发生时刻。但是对于噪声含量较高的陷波、低频瞬变振荡较难进行非常准确的定位和幅值测量。仿真试验表明,该方法对噪声有较强的抑制能力,计算效率较高,在电能质量扰动的实时监测和辨识中有较高的实用价值。

参考文献:

[1] 刘安定,肖先勇,邓武军. 短时电能质量扰动检测的一种新方法[J]. 继电器, 2005, 33(8): 27-29.
 LU An-ding, XIAO Xian-yong, DENG Wu-jun. A New

Method of Short Time Power Quality Disturbances Detection[J]. Relay, 2005, 33(8): 27-29.

[2] 魏磊,张伏生,耿中行,等. 基于瞬时无功功率理论的电能质量扰动检测、定位与分类方法[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 53-58.
 WEI Lei, ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, et al. Detection, Localization and Identification of Power Quality Disturbance Based on Instantaneous Reactive Power Theory[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 53-58.

[3] Abdel-Galil T K, Kamel M, Youssef A M, et al. Power Quality Disturbance Classification Using the Inductive Inference Approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1812-1818.

[4] 占勇,程浩忠,丁屹峰,等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 51-56.
 ZHAN Yong, CHENG Hao-zhong, DING Yi-feng, et al. S-transform-based Classification of Power Quality Disturbance Signals by Support Vector Machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 51-56.

[5] Gaouda A M, Salama M M A, Sultan M R, et al. Power Quality Detection and Classification Using Wavelet multiresolution Signal Decomposition[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1469-1476.

[6] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 1-6.
 CHEN Xiang-xun. Wavelet-based Measurements and Classification of Short Duration Power Quality Disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 1-6.

[7] 胡铭,陈珩. 基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测与定位[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 12-16.
 HU Ming, CHEN Heng. Detection and Location of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform Modulus Maxima[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 12-16.

[8] 李天云,陈晓东,赵为红,等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 25-30.
 LI Tian-yun, CHEN Xiao-dong, ZHAO Wei-hong, et al. Double Wavelets Measurements and Classification of Short Duration Power Quality Disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 25-30.

[9] 王晶,束洪春,陈学允. 动态电能质量的分形指数小波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 40-45.
 WANG Jing, SHU Hong-chun, CHEN Xue-yun. Fractal Exponent Wavelet Analysis of Dynamic Power Quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 40-45.

[10] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB 实

- 现 [M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- Feisi Scientific Product R&D Center Wavelet Analysis Theory and MATLAB Implementation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [11] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- XIAO Xiang-ning Power Quality Analysis and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [12] 薛蕙,杨仁刚. 基于 FFT的高精度谐波检测算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 106-110.
- XUE Hui, YANG Ren-gang Precise Algorithms for Har-

monic Analysis Based on FFT Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 106-110

收稿日期: 2005-08-24; 修回日期: 2005-10-31

作者简介:

赵凤展 (1971-),女,博士研究生,讲师,研究方向为电能质量的分析与控制,配电自动化,低压无功补偿装置; E-mail: zhaofz@cau.edu.cn

杨仁刚 (1953-),男,博士生导师,教授,研究方向为电能质量的分析与控制,配电自动化,高、低压无功补偿装置。

Power quality disturbances classification based on time-domain, wavelet transform and FFT

ZHAO Feng-zhan, YANG Ren-gang

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Using time-domain voltage-RMS, wavelet transform and FFT, various types of power quality disturbance signals are layered-recognized. At first, according to the characteristics of RMS, the disturbances are preliminary classified. Then using wavelet multi-resolution analysis, the disturbance type is identified. Notches and harmonics are distinguished by their frequency spectrum. The results from simulation tests show that the proposed method is feasible, effective and anti-noisy.

Key words: disturbance recognition; wavelet transform; RMS; FFT; power quality

CSVC2000无功电压优化闭环控制系统介绍

2005年12月21日,由四方华能电网控制系统有限公司(以下简称:四方华能)开发研制的CSVC2000无功电压优化闭环控制系统通过了中国电力企业联合会组织的科技成果鉴定。鉴定委员会一致认为该系统实现的无功电压闭环控制的数字模型具有独创和实用性;实现无功电压优化控制的求解方法速度快、稳定性好;采用的短期负荷预测方法理论先进、预测精度高,保证了预决策控制的有效性;系统总体性能达到国内外先进水平;其中利用精确的状态估计并参考预决策控制计算结果,实现地区电网无功电压优化的自动控制。该系统的关键核心技术填补了我国在该领域的多项技术空白并达到了国内领先、世界先进水平。

CSVC2000无功电压优化闭环控制系统具有以下特点:

①作为控制决策的原始数据来自于系统的状态估计结果而不是系统的量测粗数据,从而可以消除测量误差和避免量测量中的坏数据,使控制决策结果更加精确、可靠。

②按各母线的负荷预测结果进行预决策控制计算,并将其作为实时控制决策的依据和参考,从而可以有效地限制变压器分接头档位调节和电容器组投切次数不超过规定数量。

③在多种控制计算结果中进行决策,从而可以在设备条件许可情况下,保证母线电压越限得到及时恢复,并使网络损耗得到尽可能的降低,同时可以将电容器组的投切次数和变压器分接头的调整次数限制在给定的范围之内。

④采用考虑现场工作人员运行经验的基于二次规划的无功电压优化控制的启发式算法。如:由于开关有一定的投切次数寿命,变压器分接头也有一定的调整次数寿命,故进行无功优化调节时不能长期调某些开关或变压器。

⑤实时无功电压优化功能:能生成当前状态下的无功优化方案。

⑥无功电压优化运行计划功能:能根据预测的各母线负荷的第二天24小时的有功无功负荷值,给出第二天的电容器投切和变压器档位调节的无功优化方案,并对生成的方案进行潮流计算,对各节点的电压波动、最高电压、最低电压、最高裕度、最低裕度等进行分析;运行人员可根据其计算结果下达第二天的运行方式计划。

⑦针对地区电网运行特点,简化算法模型,加快了算法运行速度。

⑧给用户提网络无功分布分析的辅助功能等。

CSVC2000无功电压优化闭环控制系统在河南濮阳供电公司首次使用中,为该地区电网的安全、稳定运行做出了重要贡献。从而实现了提高供电可靠性、降低网损的目的。据河南濮阳供电公司测算,使用该系统后电压合格率提高了0.3%,综合网损降低了0.5%,为我国在“十一五”规划中所提出的建立节约型社会、科技兴国的战略做出了四方华能人应有的贡献。日前四方华能已组织了工作人员正在积极申报《国家科技进步重点新产品》等荣誉。国家有关政府部门、电力行业有关专家、学者建议各相关用户单位应该普及该产品的广泛应用率,为中国经济的发展和腾飞而努力奋斗!

详情联系:

联系人:张卫辉 电话:86-10-62961796/7转133 传真:86-10-62979034

网址:www.sifanghn.com E-mail:sifanghn@sifanghn.com