

基于预测机制的电能质量扰动检测方法研究

李加升^{1,2}, 戴瑜兴², 柴世杰²

(1. 益阳职业技术学院, 湖南 益阳 413049; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 通过对现有各种扰动监测算法的研究和比较, 提出了一种基于线性预测机制的时间域电能质量扰动检测方法。将待分析的电网信号通过由线性预测机制得到的误差预测滤波器, 当电网中发生电能质量扰动时, 预测信号波形会在扰动发生及结束时刻产生突变, 使得所提检测算法能够及时检测到电网中发生扰动信号的起始时刻和持续时间。仿真和试验结果表明了所提方法能准确检测电压暂升、暂降等变化相对缓慢且持续时间也相对较长的暂态扰动信号, 对电压骤降等变化时间极为短暂的瞬时性扰动信号依然具有良好的监测效果。

关键词: 电能质量扰动; 线性预测; 检测

Research of the power quality disturbance detection method based on forecasting mechanism

LI Jia-sheng^{1,2}, DAI Yu-xing², CHAI Shi-jie²

(1. Yiyang Professional Technology Institute, Yiyang 413049, China; 2. School of Electric and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Through researching and comparing the existing various disturbance monitor algorithms, one kind of time domain power quality disturbance detection methods based on the linear prediction mechanism is proposed. The electrical network signals go through the error predictive filter obtained by the linear prediction mechanism, and the prediction waveform will has the sudden change in the terminal time and the perturbation when the power quality disturbances occur, which makes the proposed detection algorithm timely detect the start time and duration of disturbance signal. Simulation and experimental results show that the proposed method can accurately detect transient disturbance signals such as voltage swell, voltage sag and other changes which are relatively slow and have relatively long duration, and it can also monitor the extremely short time transient disturbance signals such as voltage plummets.

Key words: power quality disturbance; linear prediction; detection

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0096-05

0 引言

近年来, 电能质量问题日益受到人们的关注, 供用电双方对电能质量的要求越来越高。电力系统中, 故障、动态运行或非线性负荷经常引起各种各样的电能质量扰动(PQD), 例如: 电压暂降、电压暂升、电压中断、瞬态脉冲、暂态振荡和谐波等。这些电能质量问题给基于微处理器、微计算机的自动控制设备的正常运行带来了极大危害。为了改善电能质量, 制造绿色电能, 需要及时了解电网电能质量状况。电能质量监测是了解电能质量的唯一途

径。电能质量监测系统的首要环节是电能质量及时、准确的检测。

目前, 电能质量扰动的检测方法主要有点对点方法、神经网络方法、基于小波变换或小波包变换的方法等。

点对点方法是电能质量扰动检测的最常用算法, 其思想是^[1]: 通过比较相邻波形对应点的变化来检测电信号是否发生变化。但该方法抗噪声的能力弱, 对阈值的设置比较敏感, 且不能有效地检测诸如平顶波这类周期性变化的波形畸变。

为了减小噪声或其他一些干扰因素的影响, 文献[2]提出了神经网络方法。该方法针对不同的扰动类型设计不同结构的神经网络, 从而对某种类型扰动能获得较好的检测结果; 可由于神经网络固有的

基金项目: 湖南省科技计划项目(2010GK3179); 益阳科技局科技项目(益科学[2008]14号)

特性,神经网络检测方法的可移植性和扩展性不强。

文献[3-8]提出了小波方法。小波方法是针对FFT在分析非稳态信号方面的局限性形成和发展起来的一种十分有效的时频分析工具,它克服了FFT的缺点,采用不同尺度的分析方法,能在信号的不同部位得到最佳的时域分辨率和频域分辨率,为非稳态信号的分析提供了一条新的途径,对暂态扰动进行检测和定位,取得很好的效果。但小波函数在频域存在混频现象,频率分辨率低,小波分析计算量大,不仅费时,而且容易出现误判^[9]。

文献[10]提出了一种时域的方法,直接在时域确定电能质量扰动的开始时刻与持续时间要比在小波域快得多,但这种方法的难点在于:在确定扰动结束时刻时,需要分别对扰动信号的持续时间小于、等于和大于1个工频周期三种情况进行处理。

除此之外,还有基于自相关的方法、时频分析方法^[11-12],AR模型方法^[13-14],动态测度方法以及基于数学形态学的扰动检测方法^[15-16]等等。

本文提出一种时间域的基于线性预测机制的电能质量扰动检测方法。当电网中发生电能质量扰动时,预测信号波形会在扰动发生时刻产生突变,利用该检测算法能够及时检测到电网中发生的扰动信号。

1 线性预测检测方法

1.1 线性预测理论

线性预测的基本思想是:信号之间都存在一定的自相关性,可以用过去的样本值来预测现在或是未来的样本值,即一个信号的采样能够用过去若干个信号采样或它们的线性组合来逼近。通过实际信号采样和线性预测采样之间的误差在某个准则下达到最小值来决定唯一的一组线性预测系数。

线性预测分析是目前应用广泛的一种特征参数提取技术,它的基本原理是将被分析的信号用一个模型来表示,即将信号看作是某一个模型(即系统)的输出。这样,就可以用模型参数来描述信号。如图1是信号 s_n 的模型化框图,它是一个线性时不变(LTI)系统,图中 u_n 表示模型的输入, s_n 表示模型的输出。

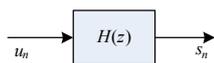


图1 LTI系统

Fig.1 LTI system

输出信号 s_n 可由以前的输出信号与未知的输入信号求出,如式(1):

$$s_n = -\sum_{k=1}^p a_k s_{n-k} + G u_n \quad (1)$$

其中, G 是增益因子。对于每个参数 a_k 可以通过尽量减少总的平均误差来获得。

1.2 线性预测检测机理

当所设定的模型中只包含有限值极点而没有有限值零点时,其系统函数可表示为:

$$H(z) = \frac{G}{1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (2)$$

这种模型称为“全极点模型”或“自回归(AR)模型”,式中的系数 a_k 和增益 G 就是模型参数,此时信号就可以用有限数目的参数构成的信号模型来表示。线性预测分析就是根据已知的 s_n 对各参数 $\{a_k\}$ 和 G 进行估计。这里, a_k 系数称为线性预测系数。线性预测的基本问题是由电能质量扰动信号直接决定一组预测器系数 $\{a_k\}$,使预测误差在某个准则下最小。如果采用最小均方误差LMS准则进行估计,就得到了著名的线性预测分析(LPC)算法,这一过程就称为线性预测分析。

根据前面介绍的模型化思想,可以对电能质量扰动信号建立模型,如图2所示。可以看出,图2的模型是电能质量扰动产生模型的一种特殊形式,将其简化为一个时变的数字滤波器来等效,其系统函数为:

$$H(z) = \frac{S(z)}{U(z)} = \frac{G}{1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (3)$$

这样把 s_n 模型化为一个 p 阶的AR模型。图2模型的参数有:增益常数 G 及数字滤波器参数 $\{a_k\}$, $(0 < k < p+1)$ 。当然,这些参数都是随时间在缓慢变化的。采用这样一种简化的模型,其主要优点在于能够用线性预测分析方法对滤波器系数 $\{a_k\}$ 和增益常数 G 进行非常直接和高效的计算。

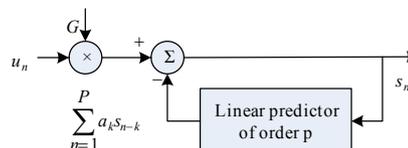


图2 时间域线性预测模型

Fig.2 Discrete all-pole model in the time domain

1.3 电能质量扰动线性预测的基本解法

信号模型化过程实际上必须解决的是参数估计问题,因为信号是客观存在的,用一个有限数目参

数的模型来表示信号总是存在误差的，或者说通过若干个极点和零点来表征模型是否太多或者太少，是不能预先准确确定的，更何况信号通常是时变的。因此求解模型的参数（如上式（3）所示） a_k 或者 G 的过程通常是一个逼近过程。逼近方法是，先假定 p 的值，然后将输入 u_n 送入该系统，得到的输出将是 s_n ，我们采用某种准则逼近 s_n 。

在讨论电能质量扰动信号的预测分析原理时，假定一个电能质量扰动样本 s_n 可以近似被它过去的 p 个样本的线性组合所预测，预测样本值：

$$\tilde{s}_n = -\sum_{k=1}^p a_k s_{n-k} \quad (4)$$

式中 a_k ($0 < k < p+1$) 称为预测系数； p 是预测阶数；令 e_n 表示实际值与预测值之间的误差：

$$e_n = s_n - \tilde{s}_n = s_n + \sum_{k=1}^p a_k s_{n-k} \quad (5)$$

e_n 即线性预测误差，也称作线性预测残差。对式（5）两边取变换后有：

$$E(z) = (1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}) S(z) = A(z) S(z) \quad (6)$$

$$A(z) = (1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}) \quad (7)$$

因此， e_n 可以让电能质量扰动信号 s_n 通过一个全零点的滤波器 $A(z)$ 而得到。可以设想，如式(4)预测效果很好的话，那么预测残差 e_n 的幅度变化范围和平均能量必定比原来的电能质量扰动信号 s_n 要小。如果对残差序列 e_n 做量化和编码，在同样信号量化噪声比条件下，所需的量化比特数就可以减少，从而达到压缩编码的目的。基于这一原理的方法称作预测编码，电能质量扰动信号变化时，又称自适应预测编码。当预测系数是自适应地随电能质量扰动信号变化时，又称自适应预测编码器。

2 仿真结果及分析

为了验证本文所提算法的有效性，在Matlab7.0中将本文所提算法应用到电压暂降、电压暂升、电压中断等几类电能质量扰动信号，将其进行了检测并分析，同时为了更进一步说明问题，还检测了变化时间极为短暂的瞬时性扰动信号电压骤降和参有噪声的电压暂降。仿真中预测模型的阶数 p 为3，增益常数 G 为1，预测系数 a_k 由输入信号计算得到。

1) 电压暂降扰动检测

应用本文所提算法对电压暂降扰动信号进行检测，从图3中可以看到电压暂降发生在0.1~0.2s的

时间段，从预测误差信号的波形中我们能够看到，本文所提算法能够准确定位电压暂降的发生时刻和持续时间，在电压暂降的发生时刻预测误差有一个大的负的突变，在电压暂降结束时刻预测误差有一个大的正的突变。

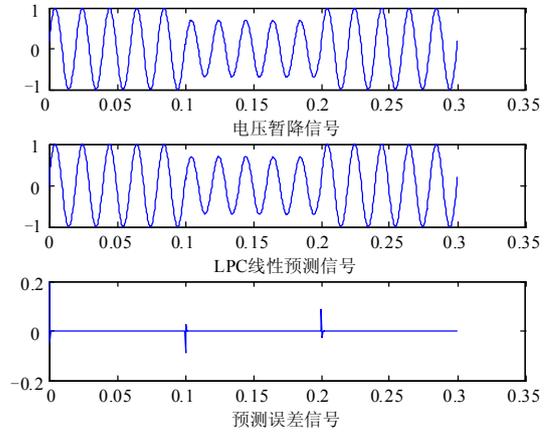


图3 电压暂降检测

Fig.3 Detection of voltage sags

2) 电压暂升扰动检测

应用本文所提算法对电压暂升扰动信号进行检测，从图4中可以看到电压暂升发生在0.05~0.15s的时间段，从预测误差信号的波形中我们能够看到，本文所提算法能够准确定位电压暂升的发生时刻和持续时间，在电压暂升的发生时刻预测误差有一个大的负的突变，在电压暂升结束时刻预测误差有一个大的正的突变。

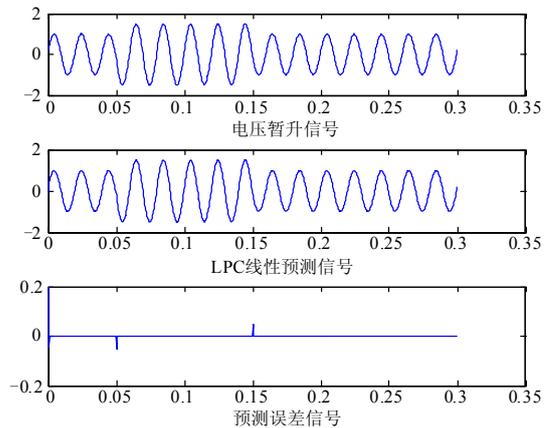


图4 电压暂升检测

Fig.4 Detection of voltage swells

3) 电压中断扰动检测

应用本文所提算法对电压中断扰动信号进行检测，从图5中可以看到电压中断发生在0.15~0.25s的时间段，从预测误差信号的波形中我们能够看到，本文所提算法能够准确定位电压中断的发生时刻和

持续时间, 在电压中断的发生时刻预测误差有一个大的正的突变, 在电压中断结束时刻预测误差有一个大的负的突变。

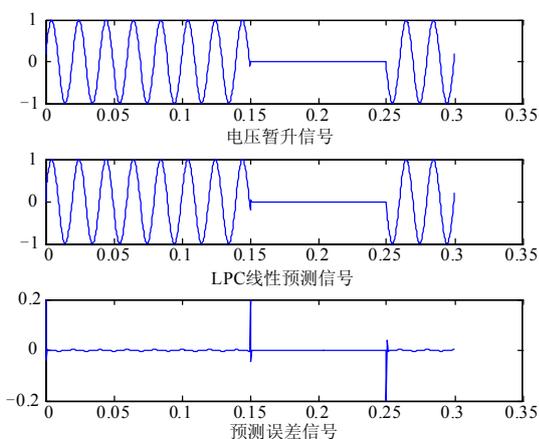


图5 电压中断检测

Fig.5 Detection of voltage interrupt

4) 电压骤降扰动检测

应用本文所提算法对电压骤降扰动信号进行检测, 从图6中可以看到电压骤降发生在0.15~0.17s的时间段, 从预测误差信号的波形中我们能够看到, 本文所提算法能够准确定位电压骤降的发生时刻和持续时间, 在电压骤降的发生时刻预测误差有一个大的正的突变, 在电压骤降结束时刻预测误差有一个大的负的突变。

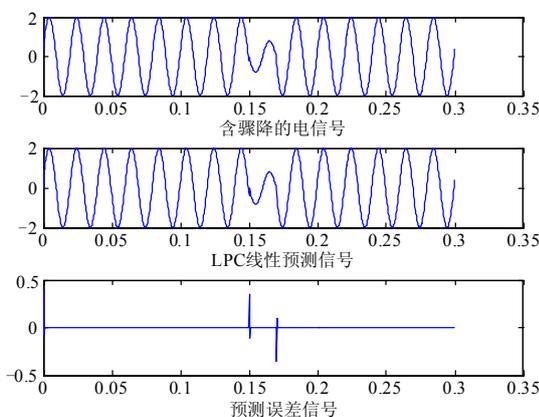


图6 电压骤降检测

Fig.6 Detection of voltage plummets

通过上面仿真可以看出本文所提算法可以很好地监测电网中的扰动信号, 确定扰动发生的起始时刻和持续时间, 根据预测误差信号的突变特点和扰动发生时间信号的均方根值可进一步对扰动信号进行区分。

5) 噪声干扰情况下的检测情况

为了检测本文所提算法在噪声干扰情况下对扰

动信号的检测影响, 在图3所示的电信号中加入了噪声信号, 信噪比 $SNR=43$ dB, 仿真结果如图7所示。

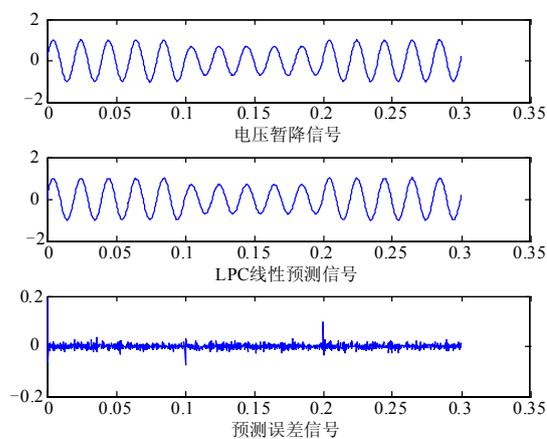


图7 加入了噪声信号后的电压暂降检测

Fig.7 Detection of voltage sags by adding the noise signal

从预测误差信号曲线中依然能够很好地检测出电压暂降发生的起始时刻和持续时间, 说明本文所提算法能解决点对点检测法所不能解决的问题, 并具有很强的抗噪声能力和很好的鲁棒性。

3 结论

线性预测分析建立了这样一种电能质量扰动检测模型, 认为电能质量扰动检测模型是一种时变的线性系统, 一短时间段内模型参数是固定不变的, 传输函数是全极点函数。实际情况是极少数电能质量扰动检测系统的传输函数出现了零点, 这些会使线性预测分析带来误差。但实际应用中, 模型带来的误差不大, 分析计算简单, 速度快, 计算所得的数据量少, 使得它在电能质量扰动检测中更加具有实时性。

参考文献

- [1] 王宾, 潘贞存. 基于网络的用户侧电能质量监测仪设计[J]. 继电器, 2004, 32(1): 54-57.
WANG Bin, PAN Zhen-cun. Design of customer power quality monitor based on network technology[J]. Relay, 2004, 32(1): 54-57.
- [2] 林涛, 樊正伟. 利用小波变换及人工神经网络识别电能扰动[J]. 高电压技术, 2007(7): 43-47.
LIN Tao, FAN Zheng-wei. Application of wavelet transform and artificial neural network to power disturbance identification[J]. High Voltage Engineering, 2007(7): 43-47.
- [3] Santoso S, Hofmann P. Power quality assessment via wavelet transform analysis[J]. IEEE Trans on Power

Delivery, 1996, 11 (2): 924-930.

[4] Robertson D C, Camps O I, Mayer J S, et al. Wavelets and electromagnetic power system transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (2): 1050-1058.

[5] Karimi M, Mokhtari H, Reza M. Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4): 1212-1220.

[6] Sakis Meliopoulos A P, Lee Chien-Hsing. An alternative method for transient analysis via wavelets[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (1): 114-121.

[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] 薛惠, 杨仁刚. 基于小波包除噪的电能质量扰动检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (3): 85-90.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Power quality disturbance detection method using wavelet package transform based de-noising scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (3): 85-90.

[9] 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.
CHENG Xiang-xun. Wavelet-based measurements and classification of short duration power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (10): 1-6.

[10] 朱韬析, 江道灼. 一种简单实用的电能质量扰动检测方法[J]. 继电器, 2005, 33 (7): 46-49.
ZHU Tao-xi, JIANG Dao-shuo. A simple and practical method of measuring short duration power quality disturbances[J]. Relay, 2005, 33 (7): 46-49.

[11] 文继峰, 刘沛. 一种电能质量扰动检测的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (12): 17-20.
WEN Ji-feng, LIU Pei. A new method for detection of power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (12): 17-20.

[12] 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.

[13] 王波. 基于 AR 谱估计和插值 FFT 的间谐波检测方法[J]. 继电器, 2006, 34 (4): 49-52, 56.
WANG Bo. A method for interharmonic measurement based on AR model spectral estimation and interpolation FFT algorithm[J]. Relay, 2006, 34 (4): 49-52, 56.

[14] 朱灿焰, 何佩馄. 相关杂波的 AR 谱模型及其研究[J]. 现代雷达, 1998, 20 (5): 36-43.
ZHU Can-yan, HE Pei-kun. Research of correlated clutter AR model[J]. Modern Radar, 1998, 20 (5): 36-43.

[15] 李义红, 韩富春. 基于数学形态学的电能质量扰动检测方法研究[J]. 水电能源科学, 2008, 36(3):179-181.
LI Yi-hong, HAN Fu-chun. Study on power quality detection method based on mathematical morphology[J]. Water Resources and Power, 2008, 36 (3): 179-181.

[16] 曾纪勇. 基于数学形态学的电能质量检测方法及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
ZENG Ji-yong. Power quality detection method based on mathematical morphology and application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

收稿日期: 2009-09-21; 修回日期: 2009-11-25

作者简介:

李加升 (1965-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为电能质量检测、信号处理、应用电子技术; E-mail: lijiaosheng@163.com

戴瑜兴 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向: 数字化系统设计理论与应用现代网络通信理论及应用;

柴世杰 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电能质量检测、信号处理。

(上接第95页 continued from page 95)

LI Ping. The research on implement technique of automatic differentiation tools[D]. Changsha: National University of Defense, 2002.

[12] Schweppe F C, Wildes J, Rom D B. Power system static state estimation parts I, II, and III[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 9 (1): 120-135.

作者简介:

叶芳 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制; E-mail: yefang87@126.com

卫志农 (1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等;

孙国强 (1978-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统运行分析与控制。

收稿日期: 2010-01-19; 修回日期: 2010-02-24