

基于小波包变换的电能质量调节系统的数据处理

陈继侠¹, 陈晓东²

(1. 东北电力学院信息中心, 吉林 吉林 132012; 2. 辽宁省电力有限公司调通部调度处, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 针对配电网电源侧电能综合调节系统(Active Power Line Conditioner - AFLC)的功能要求,基于小波理论设计了AFLC的数据处理系统。针对实时补偿检测中存在的时延问题,提出了基于小波变换的递推式预测检测方法,利用该检测系统获取的补偿指令信号可有效地解决时延问题。另外,数据的分析中,针对电能质量采集数据频带宽、数据存储量大的特点,在应用小波包变化数据进行就地分析时对存储数据进行了有效压缩,节省了大量的存储空间。仿真结果证实了所设计系统的有效性和可行性。该研究为配电网电源侧电能质量的分析和调节提供了一种良好的检测手段。

关键词: 小波理论; 检测; 配电网; 电能质量

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)04-0031-05

0 引言

随着市场经济引入电力系统,供电系统的电能质量将直接影响供电部门的经济效益,因此,消除谐波的危害、改善供电系统的电能质量是供电部门和用户都非常关心的问题。

1988年美国N. G. Hingorani博士首次提出了“Custom Power”概念^[1],即将电力电子技术、微处理器技术和控制技术应用于配、用电系统中,以提高供电可靠性和电能质量的新型综合技术。近年来,应用Custom Power技术改善电能质量的研究成为灵活输电系统的热门课题。

信号检测和数据处理是电能质量分析调节系统的关键之一,80年代初期提出的三相瞬时无功理论,为实时检测提供了理论依据,基于该理论检测方法应用较多^[1~4]。近期又提出了基于神经网络和基于小波变换的检测方法^[5,6]。针对实时补偿检测中存在的时延问题以及数据分析中存储量大的问题,本文在研制AFLC过程中提出了基于小波变换的递推式预测检测方法,利用该检测系统获取的补偿指令信号可有效地解决时延问题。另外,在信号数据的分析中,针对电能质量采集数据频带宽、数据存储量大的特点,对存储数据进行了有效压缩,节省了大量的存储空间。仿真和实验结果表明,本文方法有效,实现简单,且具有很好的抗干扰性能。

1 小波理论

小波变换作为数字信号分析的一种新兴工具,其实质是对原始信号的滤波过程,具有多分辨率

的特性。通过平移的可变窗口观察信号,在信号瞬变或突变处用窄窗,在信号缓变处用宽窗,每一分辨率尺度所用的滤波器中心频率和带宽成固定的比例,各尺度空间内的平滑信号和细节信号能提供原始信号的时频局部信息,因此,信号的小波分解能有效地提取信号中的瞬态、稳态信息。

1.1 离散小波变换(DWT)

多尺度分析(Multi-resolution Analysis)的过程就是频带剥离的过程,随着尺度的加大,DWT仅对低频段进行进一步的分解。具体为:设 $g(n)$ 和 $h(n)$ 是一对正交镜像滤波器,Mallat算法正是通过这对滤波器将信号在不同的尺度下进行分解。设 $\{V_j\}_j$, $V_j \perp V_{j+1}$ 是一给定的多分辨率分析, $\{W_j\}_j$ 是 $V_j \perp V_{j+1}$ 的正交补空间, $V_{j-1} \oplus W_{j-1} = V_j$,则尺度函数 $\phi_{j,n}(t)$ 是 $\{V_j\}_j$ 的生成元,而小波函数 $\psi_{j,n}(t)$ 是 $\{W_j\}_j$ 的生成元。再假如信号 $f(t)$ 在空间 V_j 中的信号,于是 $f(t)$ 可由下式表达:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{j,n} \phi_{j,n}(t) \quad (1)$$

由于 $V_{j-1} \oplus W_{j-1} = V_j$,因此,上式可以表示为:

$$f(t) = \sum_n C_{m_0,n} \phi_{m_0,n}(t) + \sum_{m=m_0}^{j-1} \sum_n d_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (2)$$

式中: $C_{m,n}$ 、 $d_{m,n}$ 为 $f(t)$ 和 $\phi_{m_0,n}(t)$ 、 $\psi_{m,n}(t)$ 的内积; $d_{m,n}$ 为小波级数系数。

设 A_2^{j-1} 是 f 在 V_{j-1} 上的投影, $D_2^{j-1}f$ 是 f 在 W_{j-1} 上的投影,由于 $V_{j-1} \oplus W_{j-1} = V_j$,故 $A_2^j f$ 可由 $(A_2^{j-1}, D_2^{j-1}f)$ 表示,依次类推,可以得到小波分解和重构的算法。

1.2 小波包变换(WPT)

小波包分析提供了更为丰富和精确的信号分析方法。小波包元素是由 3 个参数来确定的一个波形,这 3 个最基本参数是:位置、尺度和频率。

在多尺度分析中,对于固定的尺度情形,定义一系列递归函数:

$$W_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum h(k) W_n(2t - k)$$

$$W_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum g(k) W_n(2t - k) \quad (3)$$

其中: $g(k) = (-1)^k h(1 - k)$ 。

则当 k 固定时,序列 $\{W_n(t)\}_n$ 为关于序列 $\{h_k\}$ 的正交小波包。

信号按小波包基展开时,其小波库系数树就是二进长方块,长方块的行数表示小波包的尺度,而列数表示频率和位置参数。如图 1 所示。

x_1		x_2		x_3		x_4		x_5		x_6		x_7		x_8	
s_1				s_2				s_3				s_4			
ds_1				ds_2				sd_1				sd_2			
sss_1				dss_1				sds_1				dds_1			
ssd_1				dsd_1				sdd_1				ddd_1			

图 1 小波包基

Fig. 1 Wavelet packet basis

小波库是由许许多多小波包组成的,那么对于一个特定的信号,选取信息花费代价最小的小波包基即可进行信号的重构。

在正交小波分解过程中,一般的方法是将低频系数分解成两部分,分开后获得一个新的低频系数和一个高频系数向量,在两个连续低频系数中间丢失的信息被高频系数获得。下一步是将新的低频系数向量继续分解成两部分,而高频系数不会被再分解。然而,小波包分解中提供了更加精细的分析方法,它将频带进行多层次划分,对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解,并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择响应的频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时-频分辨率。

2 APLC 数据处理系统的结构

根据 APLC 功能的基本要求,本文提出的 APLC 数据处理系统将实现两个基本目标:一个是提供实时补偿指令信号;另一个是在线分析电能质量。其基本结构为图 2 所示。工频信号跟踪器采用基于 DWT 的递推式预测检测方法,以消除数据采样和信息提取过程中存在的延迟问题,从而获取精确、实时的补偿信号。而对于电能质量在线分析,采用了基于正交小波变换的小波包算法,对信号进行了更为

细致的分析。另外,由于电能质量分析频带非常宽(约 4 MHz),在 APLC 存储中采用了阈值压缩,在不增加费用的情况下大大地减少了内存占用空间。

2.1 补偿指令信号的预测检测

早在 80 年代初期日本学者提出了三相瞬时无功理论,基于该理论的谐波检测方法近年来多有论述^[2~5],实现起来不仅元件多、结构复杂,而且存在近 1 个周期的时延^[6]。近年来在相关的领域中应用预测检测方法来弥补传统检测方法中存在的时延问题,文献[6]中引入了神经网络进行预测检测,可有效地消除时延。该方法处理环节复杂,还可能受到人工神经网络的样本采集及训练收敛性等因素的困扰。文献[7]中在基于瞬时无功理论的检测方法中加入一个预测环节以消除检测时延。这种方法实现的检测需经坐标变换、低通滤波等多个环节,因此,元件多、结构复杂,在一定程度上将降低系统的可靠性。

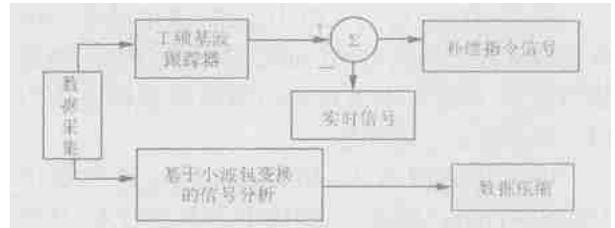


图 2 数据处理系统结构

Fig. 2 Structure of data processing system

对于配电系统,就电源侧来看电压、电流一般情况下在一定的时限内是稳定的,由于邻近两个周波的电流的低频成分关联较大,因此,在设计 APLC 的检测环节时取前半周波对其基波分量预测检测,递推地对之进行预报,来消除采样和基波分离产生的时间延迟,提高补偿的实时性和精度。

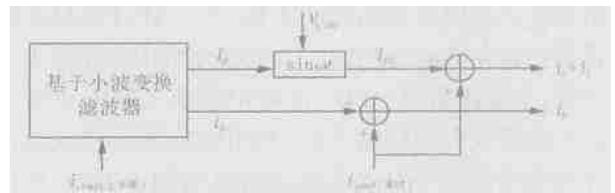


图 3 预测检测结构图

Fig. 3 Structure of the predicted detection system

图 3 为本文提出的预测检测的基本结构,本文的检测环节可根据电网的要求输出谐波补偿信号,也可以输出谐波及无功信号。如果配电网仅需要补偿谐波,则该检测环节通过对上半周波负荷电流信号的小波变换,提取电流的基波分量作为基波负荷的预报值,并与实时的负荷电流相减得到补偿的谐波信号;

如果配电网补偿电流要包括谐波和负荷无功有关的基波电流的无功分量,则通过小波变换提取基波电流的幅值,而采用电网电压为同步信号,构成与网压同步的基波有功电流分量,最后通过 i_{pr} 与负荷网侧输入电流 i_{Load} 比较得到检测环节的指令信号。

2.2 数据分析及压缩存储

电能质量扰动信号的频率变化范围非常广泛。例如,由电弧炉引起的电压波动的频率一般低于 25 Hz,而由雷电冲击引起的暂态脉冲的频率高达数兆赫兹。因此,要求电能质量监测系统的采样频率需近 4 MHz。对于这样大存储量的数据,又不希望增加成本,数据压缩便具有重要的意义。

对于扰动信号,进行小波包变换时,与扰动相关的小波包变换系数的幅值大于与扰动信号无关的变换系数的幅值,根据这一特点可以对电能质量的分析数据进行压缩。

数据压缩的阈值的获取有多种方法。最简单的方法:设 $0 < \mu < 1$,则对一尺度 s ,阈值 s_s 为:

$$s_s = (1 - \mu) \times \max\{|d_s|\} \quad (4)$$

对于每一个尺度分解系数 $d_s(n)$ 根据阈值可以进行筛选,得到新的分解系数 $\hat{d}_s(n)$ 。

$$\hat{d}_s(n) = \begin{cases} d_s(n) & |d_s(n)| > s_s \\ 0 & |d_s(n)| < s_s \end{cases} \quad (5)$$

重构时采用压缩后的分解系数,这样可以节省大量的内存空间。

3 数字仿真

本文的仿真中原信号采用如下的电流信号:

$$i_a(t) = 10.0 \sin t + 3.0 \sin(5t + 0.2) + 2.0 \times \sin(7t + 0.4) + e(t) \quad (6)$$

从式中可以看出,信号中含有 5、7 次谐波,各自的相位不同, $e(t)$ 是高斯随机噪声。

仿真中,小波函数为 B 样条小波,采样频率为 6.4 kHz。

3.1 控制指令信号的提取

图 4(a)、(b) 给出了仿真的配电网实时检测环节输出的补偿谐波的指令信号及其补偿后的负荷电流信号;而图 4(c)、(d) 为含有噪声时,实时检测环节输出的补偿谐波的指令信号及其补偿后的负荷电流信号。图中第 1 个半周期为小波变换进行基波分量预报的初始期,递推式完成以后的预报工作。在相邻周期中出现基波负荷操作时,对于谐波补偿指令信号的实时控制将另文阐述。

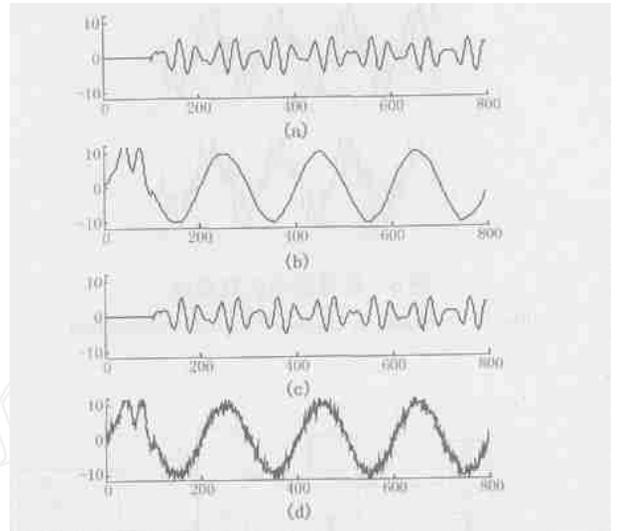


图 4 谐波补偿指令信号仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of harmonic compensation signal

3.2 抗噪声干扰特性分析

在实际检测过程中难免存在一定的噪声,仿真中,对于图 5(a) 给出了被白噪声和谐波污染的负荷电流,图 5(b) 给出了采用本文提出的方法进行检测的基波分量预报信号,仿真分析可知经过处理之后的基波误差仅有 1% 左右的提高。这说明本文提出的方法,对于噪声影响的抵御能力是很强的,完全符合实际现场的检测需要。

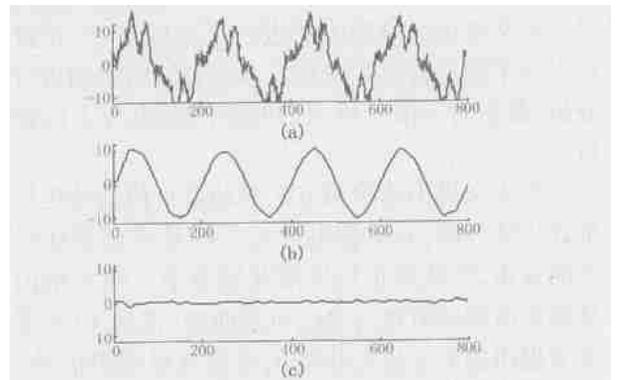


图 5 在随机噪声下的仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves under a random white noise

3.3 数据信号压缩

图 6(a) 是本文仿真所选择的带有噪声的信号,本文仿真中选取采用软阈值对每一尺度的小波包系数进行压缩,经过应用小波包压缩后的信号如图 6(b) 所示,信号的压缩率为 84.9%,而图形的恢复率为 99.93%。如增大阈值,信号的压缩率还可以增大,但其恢复率就会有所下降。

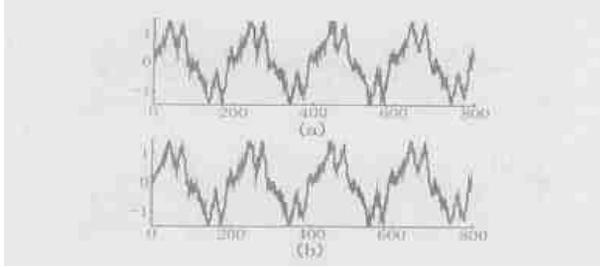


图 6 信号压缩仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves of signal compression

4 实验验证

试验电路设计中采用了双 DSP 并行处理技术,配以适当的外围电路来完成各项功能。主要有数字信号处理器 (DSP) TMS320F240 和 TMS320F206、数据采集、前端信号处理、资料存储、通讯和人机接口部分构成。整个系统应用总线技术,进行了模块化设计,有利于系统的调试并为系统升级和模块的替换提供了方便。系统的结构示意图如图 7 所示。

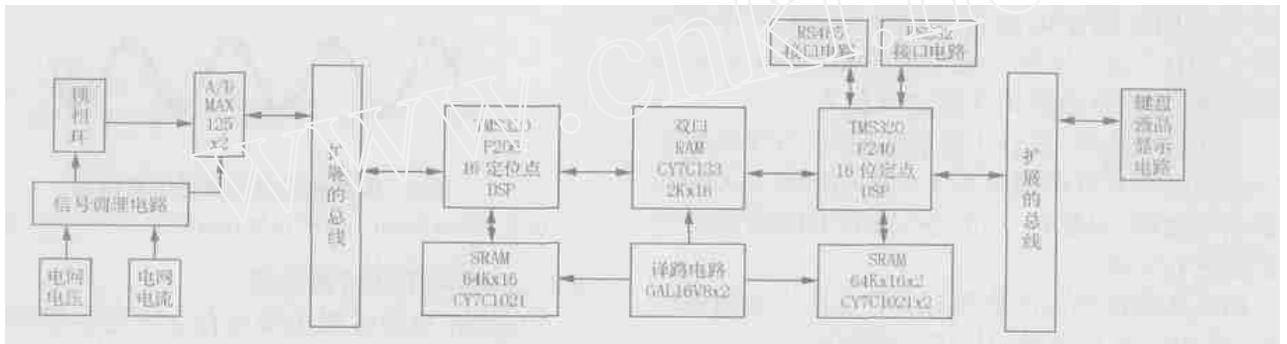


图 7 系统的结构示意图

Fig. 7 System structure

本文的实验中,负荷电流采用的是配电网电源侧动态负荷电流信号(如图 9 所示),在时刻 40 ms 基波负荷出现大幅度的变化,基波分量的幅值减小了近一倍。算法中小波变换基于 B 样条小波函数,对于本文提出的检测方法进行了实验仿真,并就噪声以及工频负荷发生变化对本文方法的影响进行了分析,最后对于信号检测的时滞问题进行了比较分析。

就本文提出的检测方法对动态负荷信号进行递推式小波分解,并根据电流信号的基波分量在尺度上的分布,经低频重构提取基波分量。图 8 给出了基波负荷稳定时被污染的负荷曲线(曲线 1)及采用本文提出的方法进行检测的基波分量预报信号(曲线 2),结果表明,本文提出的方法,对于基波分量进行递推式预报,消除了时滞;所提取的基波分量,与理论计算曲线相比较,当负荷基波分量变化时,经过半个周波与理论波形基本吻合。

图 9 给出了实验实时检测环节输出的基波负荷预报曲线(曲线 2)以及补偿谐波的指令信号(曲线 3)。图中第一个半周期为小波变换进行基波分量预报的初始期,递推式完成以后的预报工作。当在相邻周期(在时刻 40 ms)出现基波负荷操作时,过渡过程中的误差经半个周波减小至零。

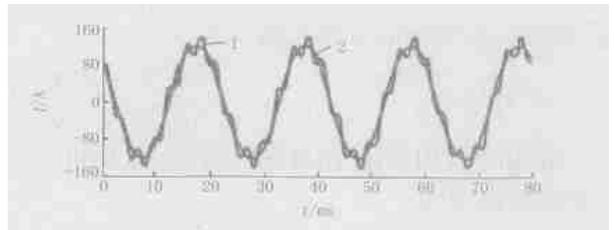


图 8 稳定基波负荷下的预报曲线

Fig. 8 Predicted curves under a static fundamental load

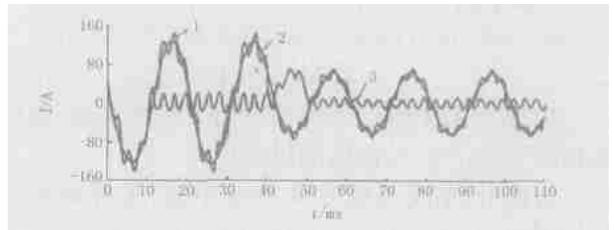


图 9 基波负荷调整时的预报曲线及补偿指令信号

Fig. 9 Predicted curves and harmonic compensation signal under an adjusted fundamental load

5 结语

本文提出的基于小波理论的 APFC 数据处理系统,以软件的方式提取补偿信号,降低了实现成本,采用小波变换提高了系统的抗噪声特性。

本文为了解决检测中的时延问题,采用了递推式预测检测策略,有效地消除了一般检测方法的延

迟问题。本文小波包算法在线分析电能质量受污染状况,借助小波包良好的局部时频特性,改善了分析效果,并用阈值进行数据压缩,节省了大量的内存空间。

参考文献:

- [1] Hingorani N G. Introducing Custom Power[J]. IEEE Spectrum, 1995, 32(6): 44-48.
- [2] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits[A]. IEEE Proceedings IPEC. Tokyo: 1983. 1375-1386.
- [3] Tanaka T, Akagi H. A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-phase Circuits[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1737-1742.
- [4] Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components[J]. IEEE Trans on Ind Applic, 1984, 20(3).
- [5] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components[J]. IEEE Trans on Ind Applic, 1984, 20(3): 625-634.
- [6] 吕征宇, 钱照明, Green T C. 并联有源电力滤波器的神经网络预测控制[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 22-26.
- LüZheng-yu, QIAN Zhao-ming, Green T C. A Predicted Control Scheme of Shunt Active Power Filter with Artificial Neural Network[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 22-26.
- [7] 赵成勇, 李庚银, 李海生, 等. 电力牵引系统的预测型谐波电流检测方法研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 85-88.
- ZHAO Cheng-yong, LI Geng-yin, LI Hai-sheng, et al. Research on Detection Method of Harmonic Current in Electric Traction Systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 85-88.
- [9] Santoso S, Powers E J, Grady W M. Power Quality Disturbance Data Compression Using Wavelet Transform Methods[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1250-1257.
- [10] Little T B, Morrow D J. Wavelets for the Analysis and Compression of Power System Disturbances[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(2): 358-364.
- [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.

收稿日期: 2004-06-08; 修回日期: 2004-07-24

作者简介:

陈继侠(1959-),男,高级工程师,从事电力系统电能质量调节与控制的研究; E-mail: shjx@neiep.edu.cn

陈晓东(1972-),男,工程师,从事电力系统调度运行工作。

Data processing system for APLC based on wavelet package transform

CHEN Ji-xia¹, CHEN Xiao-dong²

(1. Northeast China Electric Power Institute, Jilin 132012, China;

2. Liaoning Electric Power Co., Ltd, Shenyang 110006, China)

Abstract: Based on wavelet theory, a data processing system is designed to meet the demand of active power line conditioner(APLC) in the source side of the distribution system. The real-time property is one of the most important indices for the measurement link of APLC, and the issue of the time-delay caused by sampling and the signal processing is discussed. The recurrent predicted detection method is presented to eliminate the time-delay. Moreover, a wavelet packet transform based on data compression method is used for online power quality analyzing to reduce the memory demand. The simulation results with Matlab tools show that the proposed system is valid and feasible. The system provides a good detecting method for the analysis and dispatch of power quality at the source side of the distribution system.

Key words: wavelet theory; detection; distribution system; power quality