

谐波在线预测系统的研制

任 波¹,高允京²,周一久³,于荣华⁴

(1. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;2. 武汉铁路分局,湖北 武汉 430023;
3. 武汉市轨道交通有限公司,湖北 武汉 430025;4. 柳州供电局,广西 柳州 545005)

摘要: 基于“虚拟仪器”的概念,引入快速抗混迭傅里叶变换方法,用分段积分的方法取代快速傅里叶变换中离散序列求和方法进行复频谱系数的数值计算,提高了谐波测量精度并降低了硬件成本。提出一种自适应自回归(ADAR)预测模型,可根据谐波过程特性变化自适应调整自回归预测模型的参数乃至结构。描述了其预测方程,介绍了电力谐波在线分析预测系统的功能结构及软件设计。该系统能实时测量谐波,并可对设定次数谐波的未来状况作出在线短期预测。

关键词: 电力谐波; 分析和预测; 虚拟仪器

中图分类号: TM 935

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)06-0046-03

具有非线性或时变伏安特性的设备在电网中的使用越来越广泛,导致电力系统的波形畸变问题日趋严重。对谐波的有效监测和管理,已经成为目前电力系统亟待解决的课题之一。在此背景下,对电力系统的谐波进行在线分析和预测,并依照国标的要求开发一套基于 PC 机的电力谐波在线分析预测系统,无疑具有重要的现实意义^[1]。

1 谐波分析研究现状

目前所采用的电力谐波分析仪按测量原理大致可分为模拟式和数字式两类。以微处理器为核心的智能型数字谐波分析仪基本上都是采用将离散采样的被测信号用经典的快速傅里叶变换(FFT)进行处理,进而获取信号各次谐波的幅值和相位的测量方法^[2]。但从信号的复原和信号频谱分析的角度考虑,将模拟信号离散化计算其频谱会出现泄漏误差和频谱混迭误差,以及由于离散信号频谱的周期性重复导致不能求出高次谐波的问题。在实际工程应用中,为了减小泄漏误差,在硬件上通常采用跟踪锁相技术;在软件上采用加窗和加窗插值等技术。对于频谱混迭误差,通常采用在被测信号输入通道上加前置低通抗混迭滤波器的办法,滤去信号中的高频成分以防频谱的混迭;而对于频谱的周期性重复,则是 FFT 算法本身所无法避免的原理性误差,其克服只能是取决于频谱分析计算方法的创新。

2 新型谐波分析——FAFT 方法

2.1 传统谐波分析方法及其弊端

谐波是一个周期电气量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍,这是将该周期电气量按傅里叶级数展开而获得的,即

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)] = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n)] \quad (1)$$

上述周期函数的指数形式的傅里叶级数展开式可写成:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (A_n e^{jn\omega_1 t}) \quad (2)$$

式中 A_n 为傅里叶级数指数展开式第 n 次系数,且

$$A_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \quad (3)$$

将式(3)中连续函数的积分用离散序列的求和近似计算,则可得到目前所普遍采用的周期信号复频谱数值计算公式:

$$A_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k e^{-j2\pi kn/N}), n=0,1,2,\dots,N-1$$

令 $W_N = e^{-j2\pi/N}$,则有

$$A_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k W_N^{kn}), n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (4)$$

式中 $\sum_{k=0}^{N-1} (x_k W_N^{kn})$ 即为有限离散序列 $x_k (k=0,1,2,\dots,N-1)$ 的离散傅里叶变换(DFT),可用目前各种版本的 FFT 算法进行计算^[1,3]。

以上即为传统的信号频谱分析方法。由式(4)可知,由于 W_N^{kn} 的周期性,使得 A_n 亦为以 N 为周期的周期序列,其误差同样由于用离散序列的求和代替连续函数的积分而产生的原理性计算误差所致。又由 $|A_n| = |A_{-n}|$ 可知, $|A_n|$ 序列还具有对称性的特点。这样,对于周期信号,当一个周期内的采样点数为 N 时,传统的频谱计算方法只能够分析出 $N/2$ 次及以下的谐波幅值及其初相角;若要获取更高次数谐波的情况,必须提高采样频率。这将对测量硬件提出更高的要求,使频谱计算的开销显著增大,从而增加成本。另外为了防止频谱混迭,信号采样频率 f_s 须

不小于信号的截止频率 f_c 的 2 倍,即 $f_s \geq 2f_c$ 。而实际上,几乎所有的连续信号均不会有较低的截止频率。为了减小频谱混迭误差,可考虑采取增加周期内采样点数的办法,但这同样会大大增加计算量和硬件的负担。在实际的谐波测量中,通常是在信号输入通道上加前置低通抗混迭滤波器对信号进行预处理,滤去信号中频率高于 $f_s/2$ 的频率分量,使信号在进行频谱分析计算之前就截止在 $f_s/2$ 以下。但这种做法在消除了频谱混迭误差的同时,又引入了另一方面的误差。

因此,在电力系统的谐波测量中,目前所广泛采用的 FFT 算法都普遍存在着分析精度不高、在一定的硬件性能支持和计算开销下所能分析的频谱范围不够宽的问题。

2.2 FAFT 的数学原理简介^[4]

鉴于传统的基于 FFT 算法的谐波分析方法的一些不足,文献[1]提出了一种新的快速高精度的频谱分析方法——快速抗混迭傅里叶变换 FAFT (Fast Anti-aliasing Fourier Transform),它与常规的 FFT 算法在数学原理方面最本质的差异在于对复频谱系数 $A_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)e^{-jn\omega_0 t} dt = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)e^{-jn2\pi t/T} dt$ 所采取的数值计算方法上。FFT 是简单地用离散序列的求和近似计算连续函数 $x(t)e^{-jn\omega_0 t}$ 在区间 $[0, T]$ 上的积分;而 FAFT 则是采用分段积分的方法进行计算,即将信号 $x(t)$ 在区间 $[0, T]$ 内分成若干段,并将各段内的 $x(t)$ 展开成泰勒级数,取其前三项逼近 $x(t)$,泰勒级数的各展开项系数用该小段内 $x(t)$ 离散序列的函数近似表示,很显然,从数值计算原理上看,后者的计算精度无疑要比前者高。

3 ADAR 谐波预测数学模型

3.1 谐波过程的运动变化特性

与电力系统的负荷过程相比,谐波的运动变化过程要复杂得多。谐波过程具有 3 个特性:谐波运动变化过程的非线性;短时间内谐波运动变化过程的随机性;较长时期内谐波运动变化的周期性。采用具有时变参数的自适应模型进行谐波预测能够较好地跟踪谐波的随机变化过程,从而获得较好的预测精度^[5]。

3.2 ADAR 模型结构

电力系统谐波的在线短期预测问题,是属于一类非线性的非平稳强随机过程的预测问题,利用自适应技术构造一种模型结构和参数均能有效跟踪谐波过程的随机变化,自适应预测模型就成为很自然的解决方案。为了满足短期在线预测较强的实时性要求,便于预测模型的在线辨识计算,选择了模型结构形式较为简单的自回归(AR)模型。但由于该模

型在应用中通常是一经辨识确定之后其结构和参数就保持固定,因而只适用于线性平稳的随机过程预测,而对于非线性的、具有较强随机性的非平稳谐波过程预测,它无法有效跟踪谐波过程的随机变化,因此,采用了自适应处理技术自动地根据预测效果不断地对 AR 预测模型的参数乃至结构进行调整,以保证所用的 AR 预测模型对当前的谐波过程特性的变化具有良好的自适应能力,从而达到了既发挥了 AR 模型易于辨识计算的优点,又增强了其适应性的目的,进而获得较为满意的预测效果。在此,称之为自适应自回归 ADAR (ADaptive AR) 模型,其数学表达式可写为

$$y(t) + \mathbf{W}_t \mathbf{Y}_{t-1} = \varepsilon(t) \quad (5)$$

式中 $y(t)$ 为 t 时刻随机过程的输出; $\mathbf{W}_t$ 为 t 时刻模型的 M 维权系数向量, $\mathbf{W}_t = [w_{t/0}, w_{t/1}, \dots, w_{t/M-1}]$; $\varepsilon(t)$ 为 t 时刻的白噪声; $\mathbf{Y}_{t-1}$ 为 $t-1$ 时刻及以前时刻随机过程的输出构成的输出向量,且

$$\mathbf{Y}_{t-1} = [y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-M)]$$

则其 t 时刻的一步超前预测器方程可写为

$$y(t+1|t) = -\mathbf{W}_t \mathbf{Y}'_t \quad (6)$$

式中 $y(t+1|t)$ 为 t 时刻对 $t+1$ 时刻所作预测值。其一步预测误差为

$$e(t+1|t) = y(t+1) + \mathbf{W}_t \mathbf{Y}'_t \quad (7)$$

在以上的预测器方程式中,权系数向量 $\mathbf{W}_t$ 为一时变向量,其各个分量乃至其维数都会根据预测的效果而作自适应地调整,以跟踪谐波过程特性的随机变化。该 ADAR 一步超前预测器的基本结构如图 1 所示。

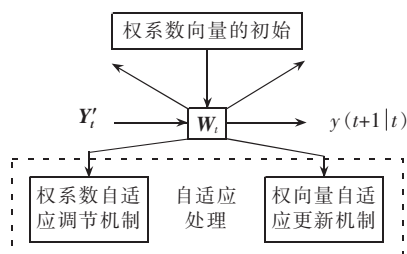


图 1 ADAR 一步超前预测器的结构图

Fig.1 One-step-advanced ADAR predictor

由最优预测器的链接性质可知,在得到最优一步超前预测器的基础上,就可以通过链接得到最优的 d 步超前预测器。其做法是用已得到相应的预测值代替预测器模型输入向量中的未来输入即可,如下式所示:

$$y(t+d|t) = -[w_{t/0} y(t+d-1|t) + \dots + w_{t/d-1} \times y(t) + \dots + w_{t/M-1} y(t+d-M)] \quad (8)$$

$y(t+d|t)$ 就是建立的 t 时刻对 $t+1$ 时刻所作的预测值。

由此可见,式(6)及式(8)可以构成本研究所采用的 ADAR 电力谐波在线短期预测器的数学模型。

4 系统功能结构设定

本系统是基于“虚拟仪器”的概念,以 PC 机为核心,配以相应的接口扩展功能插卡及功能软件而构成的电力谐波在线分析预测系统。其总体功能结构如图 2 所示。

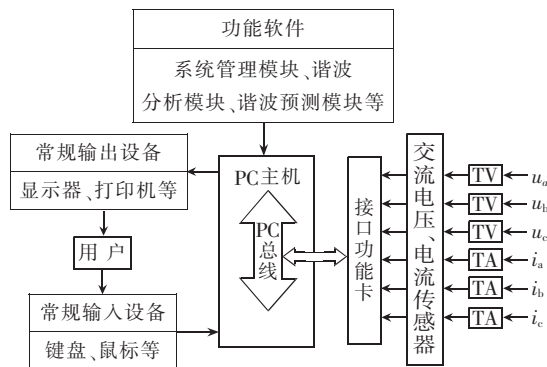


图 2 系统总体功能结构

Fig.2 The overall system function block diagram

本系统具有如下功能:

- 测量的谐波次数范围为第 2 到第 63 次,这样,根据 FAFT 频谱分析算法,每个电网周期采样 64 点即可满足测量要求;
- 2 次谐波测量的间隔时间缺省设定为 1.5 min,并可人为地根据测量点的谐波运动变化的快慢作适当调整;
- 为了区别谐波与系统的电磁暂态过程,每次谐波测量的结果设定为 3 s 内所作的 10 次测量结果的方均根值;
- 为了满足数理统计的要求,每个谐波测量时段的测量次数设定为 40 次,这样,每个测量时段的记录为该时段内 40 次测量结果的 95% 大值,测量时段的缺省长度设定为 1 h;
- 可完成对预先设定的谐波预测对象进行预测;
- 能够实现对谐波分析预测结果的实时显示、超限报警、记录保存、记录浏览和打印输出。

对于谐波测量预测中的有关参数均可以进行人为整定,从而可以方便地实现对谐波测量预测的流程控制。

5 系统软件的总体设计

在本系统中,采用链接 PC 系统的时钟中断方法,在系统时钟中断服务程序中加设时间间隔计数器,实现系统各个任务的按时间片分时轮转启动和运行,从而形成以系统时钟为核心的任务调度机制。这样,不仅充分利用了 PC 系统的软/硬件资源,简化了硬件设计,降低了成本,而且有利于加强系统的稳定性和可维护性。

整个软件采用模块化设计,以 BORLAND C++ 为主要开发语言进行程序代码编写,其主要程序模块包括:主函数模块、软面板显示及系统管理模块、数据采集模块、谐波分析模块、谐波预测模块以及谐波测量记录管理模块等。其中,主函数模块主要完成整个软件系统的初始化以及对各个程序模块正常运行的流程控制和系统的正常退出;软面板显示及系统管理模块则是负责对系统谐波分析预测结果的显示和有关系统谐波分析预测过程中各个工作参数的设置和修改等。

6 结语

为了适应日益突出的电力系统谐波监测和管理的需要,本文开发研制了一套基于 PC 的电力谐波在线分析预测系统,它不仅能够实时测量电力系统谐波,还能对设定次数谐波的将来状况作出在线短期预测,为谐波的控制和管理提供参考和依据。

参考文献:

- [1] 胡广书. 数字信号处理:理论算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [2] 李圣清. 电网谐波检测方法的综述[J]. 高电压技术, 2004,30(3):39-42.
LI Sheng-qing. The overview of detecting methods for harmonic in power system[J]. **High Voltage Engineering**, 2004,30(3):39-42.
- [3] 胡怡红. 信号处理[M]. 北京:人民邮电出版社,1999.
- [4] 陈祥训. 快速高精度频谱分析方法[J]. 中国电机工程学报,1991,11(1):34-41.
CHEN Xiang-xun. A fast anti-aliasing Fourier transform method—FAFT[J]. **Proceedings of the CSEE**,1991,11(1):34-41.
- [5] MORI H, ITOU K, UEMATSU H, et al. An artificial neural-net based method for predicting power system voltage harmonics[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**,1992,7(1):10-16.
- [6] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [7] 刘宏才. 系统辨识与参数估计[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

任波(1975-),男,湖南湘阴人,硕士研究生,主要从事电力系统测量与控制技术方面研究(E-mail:woshirenbo@163.com);

高允京(1960-),男,河南驻马店人,总工程师,主要从事电气工程方面研究;

周一久(1962-),男,湖北襄樊人,专职工程师,主要从事电气自动化方面研究;

于荣华(1972-),男,广西柳州人,高级工程师,主要从事电力系统自动化方面研究。

Development of on-line power harmonics analysis and prediction system

REN Bo¹,GAO Yun-jing²,ZHOU Yi-jiu³,YU Rong-hua⁴

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Supply Power in the Hankou Section, Railroad Suboffice of Wuhan,

Wuhan 430023, China; 3. Wuhan Rail Transportation Co., Ltd., Wuhan 430025, China;

4. Circuit Place of Power Supply Administration of Liuzhou, Liuzhou 545005, China)

Abstract: Based on the concept of virtual apparatus, the FAFT (Fast Anti-aliasing Fourier Transform) method is applied, which calculates the complex spectrum coefficient by phase integration instead of summing up the discrete sequence, used in fast Fourier transform. The harmonic measuring precision is thus enhanced and the hardware cost is lowered. ADAR (ADaptive AR) predicting model is presented, whose parameters and exponent number can be adaptively tuned according to the characteristic variation of harmonic. Its predicting equations are described, and the functions and software design of the on-line power harmonics analysis and prediction system are offered. It can real-timely measure harmonics and make an on-line short-term prediction for the preset harmonics.

Key words: power harmonics; analysis and prediction; virtual apparatus