

# 基于现代谱估计方法的间谐波检测

马秉伟<sup>1</sup>, 周莉<sup>1</sup>, 刁均伟<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 电力设备厂, 广东 广州 510285)

**摘要:** 电力系统中的间谐波问题日益突出, 因此有必要准确地检测间谐波的参数。FFT算法无法在较短的采样时间内精确检测信号中的间谐波和谐波成分, 因而提出采用现代谱估计方法检测间谐波, 仿真验证了该方法能够在较短的采样时间内准确检测出频率邻近的间谐波成分和多个间谐波分量。

**关键词:** 间谐波; 检测; 谱估计; 快速傅里叶变换

**中图分类号:** TM93      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2005)03-0025-03

## 0 引言

电力系统间谐波问题已经引起国内外的广泛关注<sup>[1,2]</sup>。传统的间谐波源是电弧性负载, 如电焊机、电弧炉等。随着大量电力电子装置在电力系统中的应用, 电力电子设备已经成为主要的间谐波源。间谐波对电力系统的危害包括降低电能质量, 引起电压闪变, 使低频继电器误动作, 造成 CT饱和, 干扰电力线路载波, 使传统滤波装置失效甚至损坏等。因此, 需要准确地检测和估计间谐波的参数。目前国内外学者提出运用 FFT算法检测间谐波, 但是加窗采样时间比较长, IEC-61000-4-30<sup>[3]</sup>, IEC61000-4-7<sup>[4]</sup>提出的加矩形窗的 FFT算法, 窗宽为 10个基波周期, 使用汉宁窗多达几十个基波周期<sup>[5]</sup>。本文简要分析了 FFT算法在间谐波检测中的局限性, 运用基于 AR模型的现代谱估计方法检测间谐波, 通过仿真实验与 FFT方法进行了比较。

## 1 FFT算法的局限性

FFT算法在谐波检测方面取得了很大的成功, 因其算法简单、快速, 结果准确, 得到广泛的应用。但是在间谐波检测中, 因为间谐波不同于谐波分量的特点, 运用 FFT算法往往不能得到令人满意的结果。

DFT有一个隐含的意义, 即计算的是周期序列, 也就是说采样时间等于各分量周期的最小公倍数。因此对于谐波只要采样一个基波周期就可以得到较好的结果, 但是对于含有间谐波的波形, 因为间谐波分量的频率是基波的分数倍, 往往很难确定波形周期。这样就将引入较大的检测误差。

另外, 间谐波与基波和各谐波分量的频域距离小于一个工频, 也就是说在检测间谐波时需要提高

频率分辨率, 这就要求采样时间加长。如果我们想得到 5 Hz的分辨率, 理论上采样时间最小为 10个基波周期。

间谐波的幅值往往远小于基波与谐波分量的幅值。这意味着间谐波分量对频谱泄漏具有很高的灵敏性。谐波分量的频谱泄漏有可能淹没真实的间谐波, 或者产生虚假的间谐波而难以分辨。当间谐波与基波、谐波分量的频率接近时, 这种影响就更加明显。加窗可以在一定程度上减轻频谱泄漏, 表 1给出了各种窗函数的性能指标。

表 1 窗函数的性能指标

Tab 1 Performance of Window function

窗函数	性能指标	
	旁瓣峰值 /dB	主瓣宽度
矩形窗	-13	2
三角窗	-25	4
汉宁窗	-31	4
海明窗	-41	4
布莱克曼窗	-57	6

可见, 随着窗形状的变化, 旁瓣衰减加大, 主瓣宽度也加宽了, 这意味着以加长采样时间为代价减少频谱泄漏。

但是实际存在的间谐波是变化的, 比如在调速装置里, 当输出频率变化时, 输入到电网里的间谐波也在不断的变化。此时如果采样时间过长, 前后所测的数据可能不是同一信号产生。检测结果误差将是非常大的。

## 2 参数谱估计方法

### 2.1 AR模型

实际上加窗算法本身就隐含着一个假设, 即窗外未检测到的数据都为 0, 这显然是不合理的。如果考虑到谐波过程具有某种统计规律, 从而对被估

计过程作出合理的假定,为其建立一个尽量准确的模型来逼近真实过程,就可以得到更为有道理的结果。通常使用的参数模型有三种:AR模型、MA模型和ARMA模型。其中MA模型的参数估计一般要求解非线性方程组,ARMA模型不仅要确定AR、MA阶数,还需要AR、MA的参数估计。而AR模型仅涉及AR参数的估计,计算过程相对简化。因此,一般工程计算都基于AR模型:

$$x(n) = -\sum_{i=1}^k a_{ki} x(n-i) + v(n) \quad (1)$$

式中  $v(n)$  是均值为零,方差为  $\sigma_k^2$  的白噪声序列。

根据随机信号功率谱密度的定义可以方便地得到  $x(n)$  的功率谱密度为:

$$P_x(\omega) = \frac{\sigma_k^2}{\left| 1 + \sum_{i=1}^k a_{ki} e^{-j\omega i} \right|^2} \quad (2)$$

这样问题就归结为根据信号的有限个采样值估计AR模型的参数  $\sigma_k^2, a_{ki}$ 。

### 2.2 Burg算法原理

Burg算法是利用前向和后向预测误差功率最小准则,从低阶开始,根据采样数据来估计反射系数,然后使用Levinson-Durbin递推公式计算AR模型的系数。它避免了计算相关函数值和求解Yule-Walker方程的矩阵运算。

设  $N$  个数据为  $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$

定义前、后向预测误差分别为:

$$f_k(n) = \sum_{i=0}^k a_{ki} x(n-i) \quad (3)$$

$$e_k(n) = \sum_{i=0}^k a_{ki} x(n-k+i) \quad (4)$$

前向和后向预测误差功率的平均值为

$$P_k = \sum_{n=k}^{N-1} [ |f_k(n)|^2 + |e_k(n)|^2 ] \quad (5)$$

为使平均功率最小,令  $\frac{\partial P_k}{\partial a_{ki}} = 0$ , 可得到反射系数

$$a_{ki} = \frac{2 \sum_{n=k}^{N-1} [f_{k-1}(n) e_{k-1}(n-1)]}{\sum_{n=k}^{N-1} [ (f_{k-1}(n))^2 + (e_{k-1}(n-1))^2 ]} \quad (6)$$

计算各阶前、后向预测误差可以利用格型滤波器结构递推。

然后即可利用Levinson-Durbin递推公式求出:

$$a_{ki} = a_{k-1, i} - \alpha_k a_{k-1, k-i}, \quad 1 \leq i < k \quad (7)$$

$$\alpha_k = \frac{2}{k} \left( 1 - \frac{2}{k} \right) \alpha_{k-1} \quad (8)$$

### 3 仿真计算

本文通过Matlab仿真,将参数谱估计方法与FFT算法在间谐波检测上的性能作了比较。

#### 仿真实验一

为了检验参数谱估计方法检测幅值较小且频率靠近谐波频率的间谐波的性能,设定待检验信号为:

$$x = \sin(2\pi \cdot 50t) + 0.01 \sin(2\pi \cdot 45t)$$

此时要求分辨率为5 Hz,理论上采样时间最小为10个基波周期。图1是使用参数化谱估计的检测结果,幅值用分贝(dB)表示。图2是使用FFT算法的检测结果。采样周期为4个工频周期(80 ms),采样频率1000 Hz。

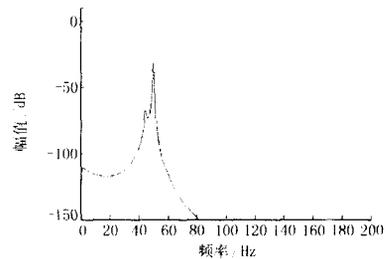


图1 参数化谱估计的结果

Fig 1 Result of parameter spectral estimation

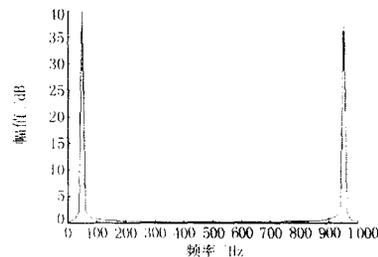


图2 FFT结果

Fig 2 Result of FFT

#### 仿真实验二

为了检验参数化谱估计方法检测多个谐波与间谐波分量的性能,设定待检验信号为:

$$x = 0.02 \sin(2\pi \cdot 40t + \pi/3) + 3 \sin(2\pi \cdot 50t + \pi/6) + 0.3 \sin(2\pi \cdot 100t + \pi/8) + 0.1 \sin(2\pi \cdot 125t + \pi/4) + 0.2 \sin(2\pi \cdot 200t + \pi/9)$$

图3是使用参数化谱估计的检测结果。图4是使用FFT算法的检测结果。采样周期为4个工频周期(80 ms),采样频率1000 Hz。

从仿真结果对比中可以看出,在同样短的采样时间里,使用参数化谱估计的检测结果明显比使用

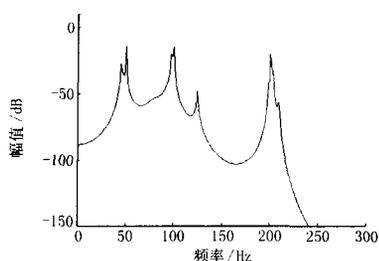


图 3 参数化谱估计的结果

Fig 3 Result of parameter spectral estimation

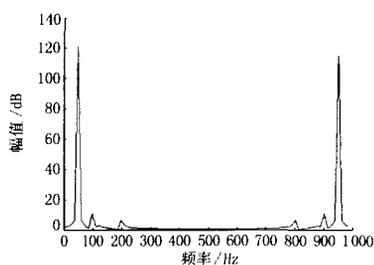


图 4 FFT结果

Fig 4 Result of FFT

FFT算法的检测结果准确。特别是在当间谐波频率接近基频且幅值相对较小时,参数化谱估计可以检测到间谐波分量,而FFT算法却无能为力。

#### 4 结语

基于FFT算法的检测方法在采样时间较短的情况下,在准确检测间谐波分量方面有很大的局限性。参数化谱估计方法能够较好地解决这个问题,且该方法仅对处理器计算速度有要求,而对其它硬件部分要求不高,故此方法在谐波检测方面有着良好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 林海雪. 电力系统中的间谐波问题 [J]. 供用电, 2001, 18(3): 6-9.  
L N Hai-xue. Interharmonics in Electrical Power System [J]. Distribution & Utilization, 2001, 18(3): 6-9.
- [2] Gunther E W. Interharmonics in Power Systems [A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2001. 15-19.
- [3] IEC Standard Draft 61000-4-30, Power Quality Measurement Methods [S].
- [4] IEC Standard Draft 61000-4-7, General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto [S].
- [5] 祁才君, 王小海. 基于插值FFT算法的间谐波参数估计 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 92-95.  
Q I Cai-jun, WANG Xiao-hai. Interharmonics Estimation Based on Interpolation FFT Algorithm [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2003, 18(1): 92-95.
- [6] 姚天任, 孙洪. 现代数字信号处理 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.  
YAO Tian-ren, SUN Hong. Modern Digital Signal Processing [M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1999.

收稿日期: 2004-05-22; 修回日期: 2004-06-16

#### 作者简介:

马秉伟 (1976 -), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电能质量控制; E-mail: xf76mbw@tom.com

周莉 (1976 -), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动;

刁均伟 (1973 -), 男, 本科, 主要从事高电压试验工作。

#### Interharmonics measurement using modern spectral estimation method

MA Bing-wei<sup>1</sup>, ZHOU Li<sup>1</sup>, DIAO Jun-wei<sup>2</sup>

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

2. Guangzhou Electric Power Equipment Plant, Guangzhou 510285, China)

**Abstract:** The problem of interharmonics in electric power system is becoming increasingly severe. It is necessary to measure the interharmonics exactly. But FFT can not get good results in short sampling time. This paper uses modern spectral estimation method to measure interharmonics and harmonics. The simulation result shows that the approach can accurately measure the interharmonics with adjacent frequency and several interharmonics components of the signal.

**Key words:** interharmonics; measurement; spectral estimation; FFT