电力系统谐波频谱分析的相位差校正法

王 涛[1], 邓亚文[2], 李红伟[2]
(1. 成都市三新电力服务有限公司, 四川 成都 610000;
2. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

摘 要: 采用快速傅里叶变换(FFT)进行电力系统谐波分析时很难做到同步采样, 故造成频谱泄漏, 而要得到准确的频谱分析结果就必须对经FFT变换得到的频谱进行校正。详细分析了常用的相位差校正法的几种实现方法, 并通过仿真比较了它们的优劣性。

关键词: 谐波分析; 相位差校正法; 汉宁窗

Abstract: There have difficulties in synchronized sampling during the harmonic analysis of power system using fast Fourier transform (FFT) algorithm, which results in frequency spectrum leakage. So it needs the accurate spectrum value by correcting the frequency spectrum obtained by FFT. Three conventional phase difference calibration methods are analyzed in detail, and their advantages and disadvantages are compared by the simulation.

Key words: harmonic analysis; phase difference calibration; Hanning window

中图分类号: TM861 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2013)06-0043-03

电力系统的谐波问题在世界范围内得到了十分广泛的关注, 谐波的管理、检测和治理等被摆到了十分重要的位置。谐波问题涉及面广, 它包括谐波分析、谐波测量、谐波抑制等。谐波测量是谐波问题管理的主要依据, 实测电网谐波的干扰和分布状况, 已成为保证电网安全经济运行、高质量供电必不可少的措施之一[1,2]。

而电力系统谐波分析的主要方法是频域分析, 由于栅栏效应、频率混叠和频谱泄漏, 故要得到准确的频谱分析结果就必须对经FFT变换得到的频谱进行校正。相位差校正法由于其相对简单, 通用性好, 计算方便, 故在不很密集的频谱分析中得到了广泛应用。下面讨论了几种实现相位差校正法的方法, 并通过仿真对几种方法做了对比分析。

1 余弦窗函数及其拼谱

电网信号主要含有整数次谐波, 因而常采用基于余弦窗的组合窗, 这类窗只要选取观测时间是信号周期的整数倍, 其频谱在各次整数倍谐波频率处幅值为零, 因而谐波之间不发生相互泄漏[4]。

余弦窗一般可以表达为(H为窗的项数减1)

$$w(n) = \frac{1}{N}\sum_{h=0}^{H} a_h \cos\frac{2\pi nh}{N} \cdots n = 0 \sim N-1 \quad (1)$$

归一化后的频谱可表示为(满足$\sum_{h=0}^{H} a_h = 0$)

$$W(\lambda) = \sin\pi\lambda \cdot e^{-j\pi\lambda}\left[\sum_{h=0}^{H}\frac{a_h}{2N}\cdot\frac{\sin\frac{2\pi\lambda}{N}}{\sin\frac{\pi(\lambda-h)}{N}\sin\frac{\pi(\lambda+h)}{N}}\right] \quad (2)$$

可见, 在窗的主瓣内具有线性相位$-\lambda\pi$。

2 相位差校正法[3]

2.1 相位差校正方法1

采集两段连续的信号样本, 然后对这两段信号做FFT变换, 利用其对应离散谱线的相位差校正出谱峰处的准确频率和相位。对两段信号加相同的窗函数后进行FFT变换后的相频函数, 在窗函数主瓣内都具有同样的相位偏差θ_w, 而且斜率相同, 则第k次谐波有(θ_k为信号实际相位)

$$\theta_{k0} = \theta_k + \theta_w$$
$$\theta_{k1} = \theta_k + \theta_w + 2\pi\times\Delta x/T_k \quad (3)$$

相位差为(令$\Delta x_k = \mathrm{mod}(\Delta x, T_k)$)

$$\Delta k = \Delta x_k/T_k = (\theta_{k1}-\theta_{k0})/2\pi \quad (4)$$

$$(\Delta x_k + nT_k) = T \Rightarrow (m+\Delta k)T_k = T \quad (5)$$

校正频率为

$$f_k = (m + \Delta k)\frac{f_s}{N} \tag{6}$$

可得式(5)、(6)中,T_k 为 k 次谐波的周期;T 为采样序列的周期;m 为峰值谱线号;N 为采样点数;f_s 为采样频率,$f_s/=N/T$。)

设窗函数的频谱模函数为 $w(\lambda)$,y_k 为谱线为 n 时的 FFT 幅值,则幅值校正为[5]

$$A = \frac{y_k}{w(\Delta k)} \tag{7}$$

而汉宁窗的幅值校正公式为

$$A = \frac{2\pi\Delta k}{\sin(\pi\Delta k)}\cdot(1-\Delta k^2)y_k \tag{8}$$

当实部为 R_k,虚部为 I_k 时,真实相位角 θ_k 为

$$\theta_k = \tan^{-1}\left[\frac{I_k}{R_k}\right] - \Delta k\pi \tag{9}$$

其特点是通用性好,对不同窗函数时可用相同的公式进行频率和相位校正,频率分辨率为窗函数的分辨率,如上面的汉宁窗为两倍的采样基波频率(2/T),校正精度高。且计算方法简单,运算速度快,加汉宁窗时,考虑旁瓣干扰,适用于频率间隔为2个以上的频率分辨率的离散频率成分的校正。当频率成分很靠近时,存在旁瓣干扰,甚至会发生主瓣干扰,因而会影响校正精度,甚至无法校正。

2.2 相位差校正方法2

这种方法只对原始信号采用一段样本,然后分别作 N 点和前 $N/2$ 点 FFT,利用其对应离散谱线的相位差校正出谱峰处的精确频率和相位。同样加窗后两段信号的相位分别为

$$\theta_{k0} = \theta_k + \theta_w$$
$$\theta_{k1} = \theta_k + \theta_w/2 \tag{10}$$

故可得 $\theta_w = -2\Delta\theta = \Delta k\pi$ (11)

即 $\Delta k = -2\Delta\theta/\pi$

同样,加汉宁窗后的第 k 次谐波校正频率、校正幅值和校正相位基于式(6)、(8)、(9)求得。

这种方法的特点是只需要一段时间信号,对于频率成分靠得很近,因为作 $N/2$ 点 FFT 时,频率分辨率扩大一倍而导致校正误差大,故加汉宁窗时,适用于频率间隔为5个以上频率分辨率的离散频率成分的校正。

2.3 相位差校正方法3

这种方法只采用一段时域信号,然后构造另一时间序列,再对这两段时间序列做 FFT 变换,利用其相位差进行频谱校正。构造序列的方法是:根据原始序列 $x(n)$($n=0,1,\cdots,N-1$),将原序列的前 $N/2$ 点向右平移 $N/4$,然后将序列的前后 $N/4$ 点置零,利用窗函数的能量集中在中间近似求解。

加窗做 FFT 变换后,两段信号的相位分别为

$$\theta_{k0} = \theta_k + \theta_w$$

$$\theta_{k1} = \theta_k + \theta_w + \frac{\pi k}{2} + \frac{\Delta x}{4T_k}\cdot 2\pi \tag{12}$$

相位差为(令 $\Delta xk=\mathrm{mod}(\Delta x, T_k)$,$i=\mathrm{mod}(k,4)$)

$$\Delta\theta = (\theta_{k1} - \theta_{k0}) = \frac{\pi i}{2} + \frac{\Delta x_k}{2T_k}\cdot\pi \tag{13}$$

$$\Delta k = \Delta x_k/T_k = 2(\Delta\theta - \pi i/2)/\pi \tag{14}$$

同样,加汉宁窗后的第 k 次谐波校正频率、校正幅值和校正相位基于式(6)、(8)、(9)求得。

这种方法的特点是速度快。只需采一段时间信号,加任何对称窗函数均可,通用性好。但精度比第一种方法略低,但其有比较好的抗干扰能力。但此方法仍然无法消除频谱干扰带来的误差,不适用于密集频率分析。

3 仿真实例

3.1 较远的频率成分的校正比较

信号如式(15)所示,采样频率为1 024 Hz,频谱分析点数为1 024,频率分辨率为1 Hz。选用汉宁窗,分别进行无噪声和加最大幅值为0.5的随机小噪声(消除直流成分后,相当于各频率成分幅值的25%)以及加最大幅值为2的随机大噪声(消除直流成分后,相当于各频率成分幅值的100%)。实验分析结果如表1、2所示。

$$\begin{aligned} y(t) &= \cos(2\pi 4.2t + 20\pi/180) \\ &\cdots + \cos(2\pi 150.5t + 30\pi/180) \\ &\cdots + \cos(2\pi 300.7t + 50\pi/180) \end{aligned} \tag{15}$$

结果表明如下。

(1)在小噪声(无噪声)的情况下,对于间隔较远的频率成分,各种相位差的校正方法在频率、幅值和相位方面的校正精度很高。比较而言,相位差法1的精度高于其他两种校正法。

(2)在加大噪声的情况下,各种校正方法的校正精度都明显降低,但结果精度仍然很高。相比而言,第3种校正法受噪声影响最小。

3.2 间隔较近的频率成分的校正比较

信号如式(16)所示,采取方法1中同样的采样频率、点数。

$$\begin{aligned} y(t) &= \cos(2\pi 123.4t + 20\pi/180) \\ &\cdots + \cos(2\pi 127.4t + 30\pi/180) \\ &\cdots + \cos(2\pi 131.4t + 50\pi/180) \end{aligned} \tag{16}$$

对式(16)信号加最大幅值为0.5的小噪声,再

加汉宁窗进行分析。对比的结果如表3所示。

表1 叠加随机小噪声信号校正结果分析

校正方法	名称	结	果	
未校正值	频率	4.000	150.000	300.000
	幅值	0.966	0.850	0.943
	相位/(°)	55.581	119.878	−3.719
相位差法1	频率	4.200	150.504	300.701
	幅值	1.006	1.007	0.998
	相位/(°)	19.475	28.685	49.604
相位差法2	频率	4.201	150.497	300.706
	幅值	1.004	1.020	1.003
	相位/(°)	19.74	30.594	48.565
相位差法3	频率	4.200	150.507	300.710
	幅值	0.995	1.017	1.012
	相位/(°)	18.991	29.877	48.582

表2 叠加随机大噪声信号校正结果分析

校正方法	名称	结	果	
未校正值	频率	4.000	150.000	300.000
	幅值	0.978	0.865	0.960
	相位/(°)	55.927	120.455	−3.632
相位差法1	频率	4.196	150.505	300.706
	幅值	1.028	1.0235	1.048
	相位/(°)	20.630	28.38	49.446
相位差法2	频率	4.223	150.463	300.617
	幅值	1.011	0.907	0.953
	相位/(°)	15.158	38.597	54.307
相位差法3	频率	4.191	150.502	300.693
	幅值	0.979	0.985	1.001
	相位/(°)	20.546	31.422	47.745

表3 校正结果分析($\Delta f=4$ Hz)

校正方法	名称	结	果	
未校正值	频率	123.000	127.000	131.000
	幅值	0.903	0.905	0.914
	相位/(°)	91.986	101.484	121.376
相位差法1	频率	123.399	127.401	131.402
	幅值	0.993	0.997	1.000
	相位/(°)	20.348	29.666	49.324
相位差法2	频率	123.397	127.626	130.832
	幅值	0.987	1.169	0.916
	相位/(°)	20.320	−10.854	152.759
相位差法3	频率	123.394	127.380	131.377
	幅值	1.001	0.987	0.990
	相位/(°)	20.693	32.660	54.691

在频率间隔4个频率发辨率时,利用相位差法1进行校正,频率最大误差为0.001 749个频率分辨率,幅值最大误差为0.709 9,相位最大误差为0.675 663°。利用相位差法3进行校正,频率最大误差为0.022 803个频率分辨率,幅值最大误差为1.200 49%,相位最大误差为4.690 788°。而用相位差法2进行校正,频率最大误差为0.431 97个频率分辨率,幅值最大误差为16.931 1%,相位最大误差为100.758 972°

4 结 论

通过几个仿真中可总结出,在无噪声和小噪声的情况下第1种相位差校正法校正精度高于其他两种。从电力系统谐波分析的实际考虑,假定谐波是平稳分布的,通过进一步仿真表明,采样周期选为5倍的基波周期时,相位差校正法1的精度完全可以满足要求。而达到同样精度,其他两种算法要抽样时间大于10倍的基波额定周期。实际中,相位差法1需要采样两个序列,故3种方法的采样时间相差不大,但如果分析的谐波次数相同的情况下,后两种方法的采样速率必须是前者的两倍,处理的数据量也增加了一倍。另外,如果考虑更好的窗函数,可以求得更好的结果,但计算复杂,且3次以上窗很难得到准确的校正公式[5]。故基于第1种相位差校正法的优点,推荐使用加汉宁窗的第1种相位差校正法进行校正。

参考文献

[1] 吴竞昌.供电系统谐波[M].北京:中国电力出版社,1998.
[2] 宋文南,刘宝仁.电力系统谐波分析[M].北京:水利电力出版社,1995.
[3] 丁康,钟舜聪.通用的离散频谱相位差校正方法[J].电子学报,2003(1):142−145.
[4] 潘文,钱俞寿基于加窗插值FFT的电力谐波测量理论:(I)窗函数研究[J].电工技术学报,1994(1):50−54.
[5] 潘文,钱俞寿.基于加窗插值FFT的电力谐波测量理论:(II)双插值FFT理论[J].电工技术学报,1994(2)53−56.
[6] 沈国峰,王祁.进一步提高准同步采样谐波分析法准确度的方案[J].仪器仪表学报,2001(5):455−457.
[7] 谭山,熊元新,刘珠明.电力系统分数谐波的测量方法[J].继电器,2002(2):19−21.
[8] 陈隆道,王小海.周期域分析中的信号周期算法[J].仪器仪表学报,2001(4):410−412.

作者简介:

王 涛(1970),男,工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

邓亚文(1990),男,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化、智能控制;

李红伟(1977),男,博士,副教授,研究方向为电力系统及其自动化、智能控制。

(收稿日期:2013−09−04)