

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.04.013

考虑电网频率变化率的改进相位差校正法研究

林申力, 陈隆道*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对电网信号基波频率动态变化时相位差校正法测量结果存在较大误差,甚至可能测量失败的问题,提出了一种考虑频率变化率的改进相位差校正法。指出了非同步采样造成的频谱泄漏是相位差校正法测量误差的主要来源,尤其当基频动态变化导致基波频率偏移较大时,非同步采样使测量精度严重降低。推导了基于频率变化率修正的归一化频率校正量公式,在线测量时,频率变化率用前次与当次测得的基波频率进行差商运算求得,再据此对测量结果进行了修正。分别使用考虑频率变化率的方法和原方法对变频电网信号进行了数值仿真研究。研究表明,改进相位差校正法有更高的测量精度,对基波的测量精度提高一个数量级,采样窗长为IEC标准规定窗长的50%,能满足频率动态变化时谐波在线测量的精度与实时性要求。

关键词:谐波测量;频率偏移;频率变化率(ROCOF);归一化频率校正量;相位差校正法

中图分类号:TM935.21

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)04-0386-08

An improved phase difference correction method considering rate of change of frequency of the power systems

LIN Shen-li, CHEN Long-dao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that the phase difference correction method had a large error and sometimes might fail when the fundamental frequencies of the power signals varied with time, an improved phase difference correction method considering the rate of change of frequency (ROCOF) was presented. The fact that the spectral leakage from asynchronous sampling was the main source of the measurement error for phase difference correction method in power harmonic analysis was pointed out. When the fundamental frequencies of the power signals varied with time which led to a remarkable frequency offset, the accuracy of the phase difference correction method was low because of the asynchronous sampling. The modified normalized frequency correction value based on the ROCOF was deduced. During online measurement, the rate of change of frequency was estimated by calculating the difference quotient of fundamental frequency of last measurement and this measurement. After that, the result of this measurement was modified with the ROCOF. The variable-frequency power signals were simulated using the method considering ROCOF and the original method respectively. The results indicate that the accuracy of the phase difference correction method considering ROCOF is higher than the original method. The accuracy of amplitudes is improved by one order of magnitude and the time length of the window is 50% of that prescribed by IEC standard. This method satisfies the requirements of accuracy and real-time performance in the online harmonic measurements of the variable-frequency power systems.

Key words: harmonic measurement; frequency offset; rate of change of frequency(ROCOF); the normalized frequency correction value; phase difference correction method

收稿日期:2016-10-08

作者简介:林申力(1991-),男,广东广州人,硕士研究生,主要从事信号分析与处理、电力谐波在线监测方面的研究. E-mail:lin_shenli@126.com

通信联系人:陈隆道,男,教授,博士生导师. E-mail:chen_longdao@zju.edu.cn

0 引言

随着电力电子技术的飞速发展和各种非线性负荷的广泛应用,谐波污染日趋严重^[1-2]。电力谐波的在线测量是治理谐波污染的重要技术手段,而近年来微网和新能源并网等技术的提出和发展则为电力谐波参数的准确、快速监测提出了新的应用背景^[3-4]。快速傅里叶变换(FFT)是电力谐波参数测量的常用算法之一,在同步采样下可以精确获得各次谐波的参数^[5],而在非同步采样下由于时域截断造成的频谱泄漏和频域离散化造成的栅栏效应,谐波参数的测量将存在较大的误差^[6]。

在电网的实际运行中,由于发电机与负荷之间的不平衡,电网基波频率处于动态变化中^[7],产生了频率偏移,实现理想的同步采样是不可能的。为此,国内外学者提出了多种非同步采样下基于FFT的谐波分析方法。

在时域,一般采用基于时域准同步的算法。文献[8]利用基于复化梯形的准同步采样算法估算基频,采用10阶牛顿插值法根据估算的基频插值重构准同步采样序列,再通过FFT对重构的采样序列进行频谱分析。该算法对硬件要求不高,重构后的序列接近理想同步采样序列,可以减小频谱泄漏的影响,但10阶牛顿插值法计算量较大,速度较慢。

在频域,则多采用加窗插值法、能量重心法、谱质心法、相位差校正法等离散频谱校正算法。文献[9]提出了一种基于Rife-Vincent窗的三谱线插值算法,其精度较常用的加窗插值方法更高,但加窗多谱线插值算法在计算当中需要求解多项式方程,计算量较大。文献[10]将能量重心法运用于电力谐波参数估计中,该方法计算量较加窗插值法小,并且具有较高的精度,但能量重心法在噪声背景下可能出现峰值谱线找错等情况。文献[11]提出了基于谱质心的电力谐波参数校正方法,该方法精度较高,算法简单,不需要峰值搜索,但是不能应用于频率未知的任意多频信号的分析中。文献[12]提出了一种通用的时移相位差离散频谱校正方法,该方法的优点是通用性好、算法简单、计算速度快、抗噪声干扰能力较强。

根据IEEE的定义,电力系统的频率是时间的函数,频率对时间的导数称为频率变化率(ROCOF)^[13]。

电力系统运行正常时,发电随负荷变化而及时调整,工频为50 Hz且保持稳定^[14],频率偏差一般限定为 ± 0.2 Hz,当系统容量较小时,限值放宽为 ± 0.5 Hz^[15],此时,ROCOF的值约等于0,相位差校正法测量电力谐波参数精度较高。电力系统遭受严重扰动时,系统频率可能产生较大的振荡变化,此时,ROCOF的值不为零,相位差校正法测量电力谐波参数精度急剧降低。

系统频率产生较大的偏移,对电力系统本身和用户都会造成较大的损害,因此要求谐波参数的测量在频率变化率较大时也具有较高的精度和实时性。

本研究将针对传统相位差校正法在基频动态变化的电网中测量精度较低的情况,提出一种考虑频率变化率的改进相位差校正法,基于频率变化率对归一化频率校正量进行修正,并用变频电网信号对其进行数值仿真,以验证该方法在基频动态变化的电网中是否具有较高的精度和较好的实时性。

1 相位差校正法原理

假设电网信号各谐波分量之间的相互干扰忽略不计,电力信号中的 k 次谐波分量为:

$$x_k(t) = A_k \cos(2\pi f_k \cdot t + \varphi_k) \quad (1)$$

式中: A_k —谐波的幅值, φ_k —初相角, f_k —频率。

设采样窗的时域解析式为 $w(t)$,频域解析式为 $W(f)$,采样窗长为 T ,则该谐波分量时域加窗截断并做傅里叶变换,只考虑频谱的正半部分,有:

$$\begin{aligned} X(f) &= F[x_k(t)w(t)] = \\ &F[x_k(t)] * [W(f)e^{-j\pi fT}] = \\ &\frac{A_k}{2} W(f - f_k) e^{-j[\pi T(f - f_k) - \varphi_k]} \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可知该谐波信号加窗截断后的相位为:

$$\Phi = \varphi_k - \pi T(f - f_k) \quad (3)$$

离散频谱中该次谐波对应的峰值频率 f 需通过校正方能得到实际的频率 f_k ,设频率校正量为 ∇f ,即:

$$f_k = f + \nabla f \quad (4)$$

则式(3)中的相位可表示为:

$$\Phi = \varphi_k + \pi T \nabla f \quad (5)$$

将该谐波信号在时域上向左平移时间长度,则其初相位也随之变化为 $\varphi'_k = \varphi_k + 2\pi f_k t_0$,因此平移后的信号相位为:

$$\Phi' = \varphi_k + 2\pi f_k t_0 + \pi T \nabla f \quad (6)$$

式(6)减去式(5),可得两段信号的相位差为:

$$\Delta\Phi = \Phi' - \Phi = 2\pi t_0(f + \nabla f) \quad (7)$$

由式(7)可推导出频率校正量为:

$$\nabla f = \frac{\Delta\Phi - 2\pi t_0 f}{2\pi t_0} \quad (8)$$

在实际测量过程中,首先应对 k 次谐波分量 $x_k(t)$ 加窗长为 T 的采样窗并以 f_s 的采样频率进行离散采样,取两段长度为 N 点的采样序列,第二段序列比第一段延后 L 点,其中,采样序列点数与采样窗长的关系为 $N = T \cdot f_s$ 。加窗采样后,分别对两段序列做 N 点 FFT 分析得到离散频谱序列。假设频谱序列中, k 次谐波对应的峰值谱线号为 m_k ,归一化频率校正量为 Δm_k ,频率分辨率为 $\Delta f = f_s/N$,则可推得以下关系式:

第二段序列平移的时间长度为:

$$t_0 = \frac{L}{f_s} \quad (9)$$

频率校正量为:

$$\nabla f = \Delta m_k \Delta f \quad (10)$$

该次谐波对应的峰值频率为:

$$f = m_k \Delta f \quad (11)$$

将式(9 ~ 11)代入式(8)可得归一化频率校正量为:

$$\Delta m_k = \frac{\Delta\Phi - \frac{2\pi L m_k}{N}}{\frac{2\pi L}{N}} \quad (12)$$

设峰值谱线号 m_k 对应的谱线幅值为 A_{m_k} ,归一化的采样窗频谱的模函数为 $W_1(m)$,信号 FFT 的实部和虚部分别为 R_k 和 I_k ,根据式(12)可以进行频率、幅值和相位的校正,校正公式分别为:

$$f_k = \frac{(m_k + \Delta m_k)f_s}{N} \quad (13)$$

$$A_k = \frac{A_{m_k}}{W_1(\Delta m_k)} \quad (14)$$

$$\varphi_k = \arctan\left(\frac{I_k}{R_k}\right) + \Delta m_k \pi \quad (15)$$

式中: Δm_k —式(12)中的归一化频率校正量。

2 相位差校正法的误差分析与修正

2.1 基频动态变化下相位差校正法误差分析

仿真测试发现,相位差校正法在电网信号基波频

率较稳定时测量精度较高,而当电网信号基频动态变化时,测量误差明显增大。造成这种结果有如下原因:

(1) 观察式(13 ~ 15)可以发现,相位差校正法中各谐波参数的校正公式均与归一化频率校正量 Δm_k 有关,因此各谐波参数的测量精度均与 Δm_k 的计算精度直接相关。但传统的相位差校正法在推导频率校正量公式的过程中,认为所分析的信号频率恒定不变,并未考虑到频率动态变化对归一化频率校正量造成的影响。

当基频动态变化导致偏离 50 Hz 的额定频率时,采样窗长不再等于整数倍基波周期,即发生了非同步采样。此时,真实频率成分在 FFT 各谱线对应的频率之间不断移动,产生频谱泄漏现象, Δm_k 的计算结果将存在较大的误差。由于频率变化率不为零,相位差校正法中两段采样序列的基频不同,因此需要对归一化频率校正量的公式进行修正。

(2) 相位差校正法在频率较稳定时,采样窗长越长,FFT 分辨率越高。因此在测量频率稳定的信号时,采用较长的采样窗长有利于测量精度的提高。但在基波频率动态变化的情况下,随着采样窗长的加长,非同步采样造成的误差不断积累,因此需要选择适当的采样窗长。

(3) 电力系统额定频率为 $f_1 = 50$ Hz。设电力系统实际运行的动态频率为 $f_1(t) = f_1 + df(t)$,其中, $df(t)$ —随时间变化的频率偏移量。则次谐波的频率为:

$$f_k(t) = k f_1(t) = k \cdot f_1 + k \cdot df(t) \quad (16)$$

由于基频动态变化引起了频率校正量的变化,本研究将式(4)中的 ∇f 用新的频率校正量 $\nabla f'$ 替代,并与式(16)一起代入式(8),可知 k 次谐波的实际频率校正量为:

$$\nabla f' = \frac{\Delta\Phi - 2\pi t_0 k f_1 - 2\pi t_0 [k \cdot df(t) - \nabla f']}{2\pi t_0} \quad (17)$$

由式(17)和式(8)对比可知,要减小 $df(t)$ 和 $\nabla f'$ 对频率校正量 ∇f 的影响,就要使 t_0 尽量小,即尽量减小第二段序列平移的点数 L 。但为了保证算法的抗噪能力, L 的取值不宜过小^[16]。

2.2 相位差校正法的修正

在传统相位差校正法的基础上,考虑频率变化率,对算法进行如下修正:

假设电力信号 $x(t)$ 的基频 f_1 以 df_1/dt 的速率变化,即 $ROCOF_1 = df_1/dt$,则 k 次谐波的频率变化率为 $ROCOF_k = df_k/dt = k \cdot df_1/dt$ 。第一段信号与第二段信号的频率分别为 f_k 和 f'_k ,则两段信号的频率偏移量为 df_k ,即:

$$f'_k = f_k + df_k \quad (18)$$

此处认为频率偏移量等于信号的频率变化率与时间的乘积,因此:

$$df_k = ROCOF_k \cdot t_0 = \frac{kt_0 \cdot dt_1}{dt} \quad (19)$$

将式(9)代入式(19)得:

$$df_k = \frac{\frac{kL}{f_s} \cdot df_1}{dt} \quad (20)$$

由于第二段信号频率发生了变化,初相位应修正为 $\varphi'_k = \varphi_k + 2\pi f'_k t_0 = \varphi_k + 2\pi(f_k + df_k)t_0$,因此式(6)中第二段信号的相位应修正为:

$$\Phi' = \varphi_k + 2\pi f_k t_0 + 2\pi t_0 df_k + \pi T \nabla f \quad (21)$$

式(21)减去式(5),再结合式(4)推得两段信号的相位差:

$$\Delta\Phi = \Phi' - \Phi = 2\pi t_0(f + \nabla f) + 2\pi t_0 df_k \quad (22)$$

则修正的频率校正量为:

$$\nabla f = \frac{\Delta\Phi - 2\pi t_0 f - 2\pi t_0 df_k}{2\pi t_0} \quad (23)$$

进行离散频谱校正时,将式(9~11)代入式(23)可得修正的归一化频率校正量:

$$\Delta m_k = \frac{\Delta\Phi - \frac{2\pi L m_k}{N} - \frac{2\pi L}{f_s} df_k}{\frac{2\pi L}{N}} \quad (24)$$

实际计算中,令 $\delta = \Delta\Phi - 2\pi L m_k / N - 2\pi L df_k / f_s$,由于相位的取值范围为 $(-\pi, \pi)$,周期为 2π , δ 可能超过这一区间,因此需要进行以下处理:令 $\delta' = \text{mod}(\delta, 2\pi)$,再令 $\sigma'' = \begin{cases} \delta' + 2\pi, \delta' < -\pi \\ \delta' - 2\pi, \delta' > +\pi \end{cases}$,使 δ'' 处于 $(-\pi, \pi)$ 的范围内。经过处理后,修正的归一化频率校正量为:

$$\Delta m_k = \frac{\delta''}{\frac{2\pi L}{N}} \quad (25)$$

将式(25)代入式(13~15)中即可得到修正的频率、幅值、相位校正公式。

与对 δ 的处理同理,相位校正公式的计算结果 φ_k

有可能不在 $(-\pi, \pi)$ 区间内,因此也需要令 $\varphi'_k = \text{mod}(\varphi_k, 2\pi)$,再令 $\varphi''_k = \begin{cases} \varphi'_k + 2\pi, \varphi'_k < -\pi \\ \varphi'_k - 2\pi, \varphi'_k > +\pi \end{cases}$,将所得到的处于 $(-\pi, \pi)$ 范围内的结果 φ''_k 作为最终的校正结果。

3 在线测量的实现方法

在线测量指的是工业生产、工程科学研究乃至生活中所进行的一切实时测量^[17]。

在采用改进相位差校正法进行电力谐波在线测量的过程中,基波的频率变化率 $ROCOF_1$,即 df_1/dt 是一个重要的参数。本研究中,频率变化率用前后两次测量的基波频率之差除以两次测量的时间间隔求得,即前次与当次测得的基波频率进行差商运算。本研究采用以下两种方法实现基于改进相位差校正法的在线测量:

(1)方法1。用传统的相位差校正法对基波进行两次连续的测量,频率变化率由第二次与第一次测量的基波频率之差除以两次测量的时间间隔求得,将其代入式(20,24,25)中修正第二次测量的归一化频率校正量,继而通过式(13~15)得到修正的频率、幅值、相位作为测量的最终结果。测量流程如图1所示。

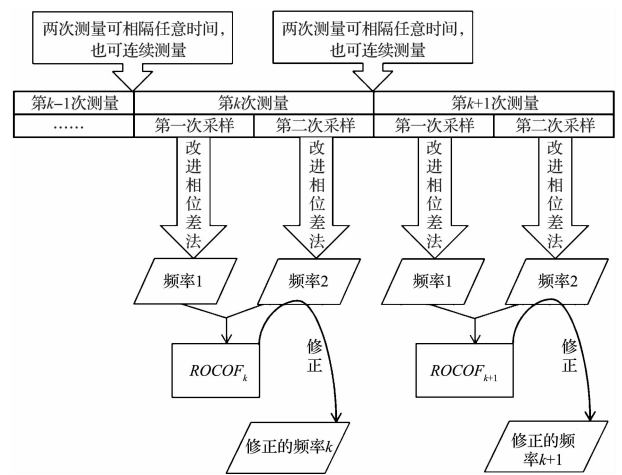


图1 方法1的测量流程

方法1的优点是可以应用于不定期的一次性测量,不必多次连续测量,在频率变化率随机变化和连续变化的情况下均可进行;缺点是应用于连续在线测量时采样时间长,实时性较差。

(2)方法2。于在线测量过程中进行连续的测量,

频率变化率由每次测得的基波频率减去前次测得的基波频率再除以两次测量的时间间隔求得,将其代入式(20,24,25)与式(13~15)中对本次测量进行修正。在线测量过程中除了第一次测量无法用本研究方法进行修正外,之后的测量均可采用修正方法。测量流程如图2所示。

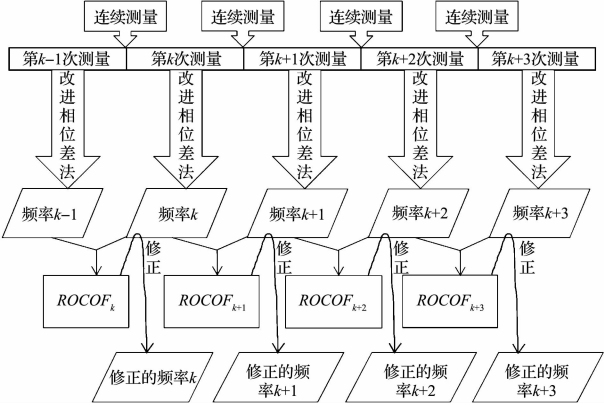


图2 方法2的测量流程

方法2的优点是实时性较好;缺点是只能在多次连续测量过程中使用。

上述两种方法本质上并无区别,方法2是为了提高算法的实时性,将前次测得的频率用于本次频率变化率的计算,从而使连续在线测量中的采样时间缩短了一半。

表1 仿真信号各次谐波的参数

谐波次数 k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
幅值 A_k/V	220	2	10	3	6	1.5	3	1.3	2.1	0.8	1.1	0.7	0.65	0.15	1	0.06	0.4	0.02	0.03
相位 φ_k/rad	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9

依据当前技术标准^[19],考虑到2.1节中的分析,同时考虑到欲保证算法的精度,采样至少需要4个基波周期^[20],因此仿真中采样频率 f_s 设定为6 400 Hz,每段采样序列长度为 $N=640$ 点,第二段序列平移点数为 $L=128$ 点。

在此设定下,笔者分别建立频率稳定、基频大范围波动、基频变化不确定但有界和频率崩溃4种状态下的频率变化模型,以验证改进相位差校正法在电网不同运行状态下的测量精度和实时性。

4.1 频率稳定情况下的仿真分析

电力系统稳定运行情况下,频率偏差一般限定为 ± 0.2 Hz。为模拟频率稳定的情况,笔者在仿真中建立频率变化的模型如下:

$$f_1 = 49.9 + 0.1 \times \sin(2\pi \times 0.1t) \quad (29)$$

4 改进相位差校正法的仿真分析

为了验证改进的相位差校正法较传统的相位差校正法具有更高的精度和更强的实时性,本研究采用一种基于汉宁窗的相位差校正法,分别运用考虑频率变化率的改进方法与不考虑频率变化率的原方法进行数值仿真对比。

原方法的频率校正公式与式(13)相同。

幅值校正公式为:

$$A_k = |\Delta m_k (\Delta m_k^2 - 1) (\Delta m_k^2 - 4) (\Delta m_k^2 - 9)| \cdot \frac{4\pi}{N \sin(\pi \Delta m_k)} \cdot |X_{H-5}(m_k)| \quad (26)$$

相位校正公式为:

$$\varphi_k = \text{phase}(X_{H-5}(m_k)) - \Delta m_k \pi \quad (27)$$

式中: Δm_k —式(12)中的归一化频率校正量, N —相位差校正法中每段序列的采样点数, m_k — k 次谐波对应的峰值谱线号。

由于测量的谐波次数一般为第2到第19次^[18],本研究构造的仿真信号模型如下:

$$x(n) = \sum_{k=1}^{19} A_k \cos(2\pi \frac{kf_1}{f_s} \cdot n + \varphi_k) \quad (28)$$

仿真信号中各次谐波的参数如表1所示。

即基频初值为49.9 Hz,测量过程中信号以10 s为周期,在49.8 Hz~50 Hz之间发生正弦变化。采用原方法与改进的方法(包括方法1与方法2)分别进行10 000次连续测量,记录测量总时间。由于均方根误差(RMSE)对一组测量中的特大或特小误差反应非常敏感,不会淹没测量中较大的随机误差,能更好地反映测量的精度,笔者绘出原方法、方法1和方法2各次谐波幅值的均方根误差曲线如图3所示。

由图3可知,不考虑ROCOF的相位差校正法在频率稳定情况下对信号各次谐波幅值的测量精度较高,基本上达到了 10^{-4} 次。而方法1和方法2的测量精度较原方法有一定的提高,除2、14次谐波以外,测量精度均达到了 10^{-4} 次,5、15、17和19次谐

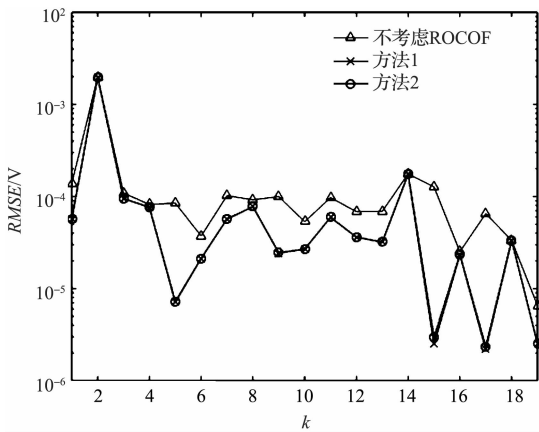


图3 频率稳定情况下谐波幅值均方根误差比较

波的精度更是达到了 10^{-5} 次。对于奇次谐波的改善比对于偶次谐波的改善更为明显。观察图3发现,方法1和方法2在测量精度上差异并不明显。原方法、方法1、方法2的10 000次测量总时间分别为11.356 s、21.028 s和11.557 s,因此方法2在实时性上比方法1更有优势,更适用于电力谐波在线实时测量。

4.2 基频大范围波动情况下的仿真分析

当电网局部发生故障时,基频有可能发生较大范围的波动,为模拟基频大范围波动的情况,本研究将频率变化的模型设定为:

$$f_1 = 50 + 7.5 \times \sin(2\pi \times 0.2t) \quad (30)$$

即基频从50 Hz开始,发生周期为5 s的正弦波动,波动幅度为 ± 7.5 Hz。本研究采用原方法与改进的方法(包括方法1与方法2)分别进行10 000次连续测量,绘出原方法、方法1和方法2各次谐波幅值的均方根误差曲线如图4所示。

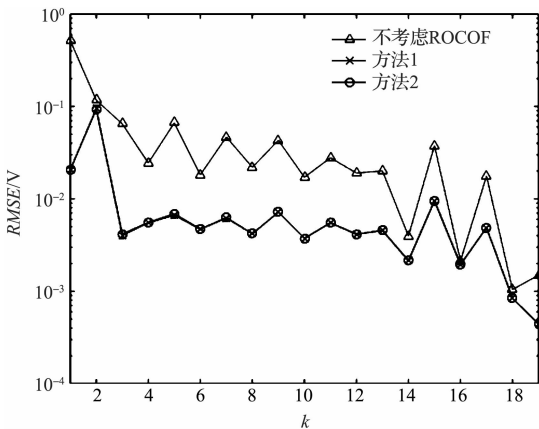


图4 基频大范围波动情况下谐波幅值均方根误差比较

由图4可知,不考虑ROCOF的相位差校正法在基

频发生大范围波动情况下对信号各次谐波幅值的测量精度较频率稳定时显著下降,大部分谐波幅值测量精度均未能达到 10^{-2} 次,二次谐波测量误差高达0.116 9 V,未能达到IEC标准的精度要求。而方法1和方法2对信号各次谐波幅值的测量精度较原方法有较大的提高,3次以上谐波测量精度均达到了 10^{-2} 次,18和19次谐波的精度更是达到了 10^{-3} 次。对于奇次谐波的改善比对于偶次谐波的改善更为明显,奇次谐波测量精度为原方法的3~15倍,偶次谐波测量精度为原方法的1.1~5倍。基波的幅值测量精度为原方法的25倍,提高了一个数量级,二次谐波的测量精度较原方法提高了25%,达到了IEC标准的精度要求。方法1和方法2在测量精度上差异并不明显。

4.3 基频变化不确定但有界情况下的仿真分析

电力系统实际运行时,为模拟基频变化不确定的情况,将基频变化的模型设定为:

$$f_1(i) = f_1(i-1) + 0.001 \times [2 \cdot \text{rand}(1) - 1] \quad (31)$$

式中: i —采样点序号, $i=0,1,2,3,\dots$; $f_1(i)$ —第 i 个采样点采样时刻的基波频率。

设定 $f_1(0) = 50$,且当 $f_1(i)$ 大于57.5时,令 $f_1(i) = 57.5$,当 $f_1(i)$ 小于42.5时,令 $f_1(i) = 42.5$ 。即基频从50 Hz开始,每个采样时间间隔中均发生 ± 0.001 Hz范围内的随机偏移,仿真中基频变化范围为42.5 Hz~57.5 Hz。由于每个采样时间间隔中可能发生的最大频率偏移为0.001 Hz,当采样频率为6 400 Hz时,该模型中频率变化率的变化范围为 ± 6.4 Hz/s。考虑到实际情况下,系统频率不可能产生频繁的突变,因此还需要对频率变化曲线进行平滑处理。仿真中某一时间段内的频率变化曲线如图5所示。

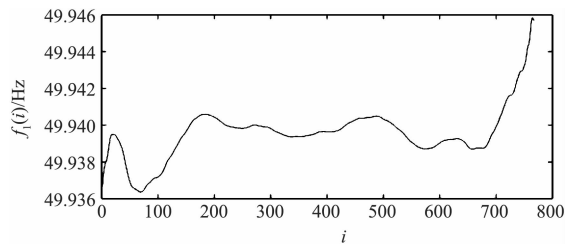


图5 基频变化不确定但有界情况下某一时间段内的频率变化曲线

由于方法1实时性较差,不适用于频率随机变化情况下的监测,本研究采用原方法与方法2进行

比较,分别进行 10 000 次连续测量,绘出原方法和方法 2 各次谐波幅值的均方根误差曲线如图 6 所示。

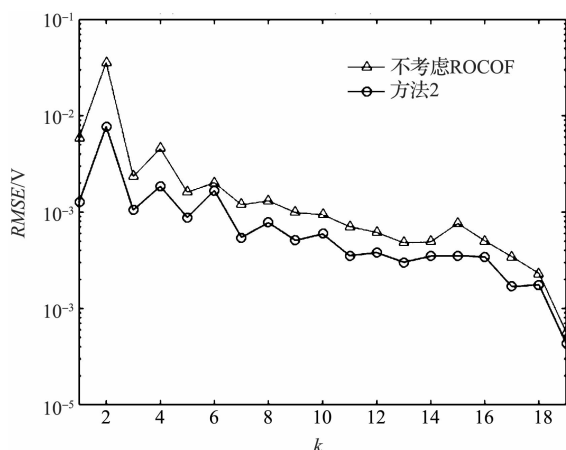


图 6 基频变化不确定但有界情况下谐波幅值均方根误差比较

由图 6 可知,不考虑 ROCOF 的相位差校正法在基频变化不确定但有界的情况下对信号十次以下谐波幅值的测量精度均未能达到 10^{-3} 次。而改进相位差校正法对信号各次谐波幅值的测量精度较原方法有一定的提高,除 1、2、3、4、6 次谐波外,测量精度均达到了 10^{-3} 次。基波的幅值测量精度为原方法的 4.5 倍,二次谐波的幅值测量精度为原方法的 4.6 倍,其他次谐波的幅值测量精度为原方法的 1.4~2.4 倍。由此可知,当频率变化不确定时,改进相位差校正法较原方法具有更高的测量精度,更适用于动态电网的实际测量。

4.4 频率崩溃情况下的仿真分析

电网频率产生较大的偏移,对电力系统本身和用户都会造成较大的损害,若电网遭受严重的有功缺额,有可能使频率发生快速的下降,甚至导致频率崩溃^[21-22]。为模拟频率崩溃的情况,本研究采用的频率变化模型如下:

$$f_1 = 50 - 3t \quad (32)$$

即基频从正常运行时的 50 Hz 开始,突然发生频率崩溃,频率以 -3 Hz/s 的速率下跌。由于方法 1 实时性较差,不适用于突发情况的监测,本研究采用原方法与方法 2 进行比较,分别对信号进行连续测量,当频率下跌幅度超过 7.5 Hz 时停止测量,记录频率变化率的平均值,绘出原方法和方法 2 各次谐波幅值的均方根误差曲线如图 7 所示。

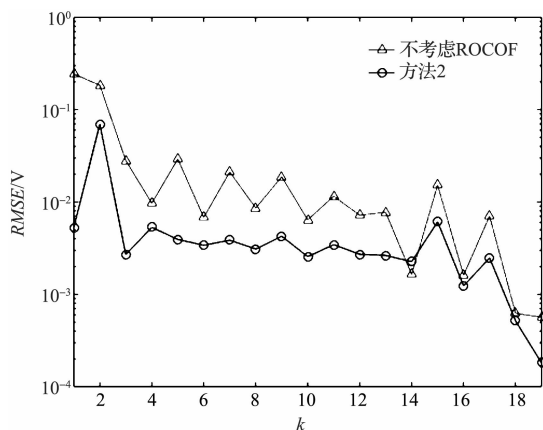


图 7 频率崩溃情况下谐波幅值均方根误差比较

由图 7 可知,不考虑 ROCOF 的相位差校正法在频率崩溃情况下对信号各次谐波幅值的测量精度较频率稳定时显著下降,二次谐波测量误差高达 0.183 8 V,未能达到 IEC 标准的精度要求。而改进相位差校正法对信号各次谐波幅值的测量精度在频率崩溃的情况下较原方法有较大的提高,除二次谐波以外,测量精度均达到了 10^{-2} 次,18 和 19 次谐波的精度更是达到了 10^{-3} 次。对于奇次谐波的改善比对于偶次谐波的改善更为明显。测量奇次谐波的精度为原方法的 2.5~10 倍,基波的幅值测量精度为原方法的 46 倍,提高了一个数量级。对于偶次谐波,仅有 14 次谐波的测量精度没有得到改善,其他偶次谐波的测量精度为原方法的 1.2~2.8 倍,二次谐波的测量精度为原方法的 2.6 倍,达到了 IEC 标准的精度要求。频率变化率的测量结果为 $-3.000\ 024\ 512\ 732\ 11$ Hz/s,证明本研究的改进方法可以精确地计算频率变化率,并且在频率崩溃事故中也能精确地测量电力谐波参数。

4.5 仿真的实时性分析

IEC 标准限制了 50 Hz 电力系统的分析窗长为 10 个周波,即 200 ms。本研究在采样频率为 6 400 Hz,每段采样序列长度为 $N = 640$ 的条件下,仅需 100 ms 的采样窗长即可达到 IEC 标准的测量精度要求,因而能较实时地判断系统状态,防止重大事故发生。

5 结束语

针对基频动态变化时相位差校正法测量电力谐波参数精度较低的情况,本研究提出了一种考虑频率变化率的改进方法。在计算归一化频率校正量时,在原方法的基础上考虑了频率变化率的影响,推导了修正的归一化频率校正量公式。将前次与当次测得的基波

频率进行差商运算所得的结果作为频率变化率的计算值,并且采用两种不同的方法实现在线测量,分别适用于不定期的单次测量以及连续的在线实时测量。将原方法和改进方法分别在频率稳定、基频大范围波动、基频变化不确定但有界和频率崩溃情况下进行仿真对比和分析,最后对改进方法的实时性进行了分析。

仿真分析结果表明,考虑频率变化率的改进相位差校正法,在频率波动范围较大、频率变化不确定甚至发生频率崩溃时也能实现精确快速的谐波参数测量,能够精确地判断频率变化率的改变,有利于在系统频率发生异常时及时采取紧急控制措施。

参考文献(References):

- [1] ALESSANDRO L, LUCA S, STEFANO B, et al. Sinusoidal voltage shaping of inverter-equipped stand-alone generating units[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2015, 62(6): 3557-3568.
- [2] 刘书铭,李琼林,陈栋新,等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. **电力系统保护与控制**, 2012, 40(15): 150-155.
- [3] KOURO S, LEON J I, VINNIKOV D, et al. Grid-connected photovoltaic systems: an overview of recent research and emerging PV converter technology[J]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 2015, 9(1): 47-61.
- [4] 陈鹏伟,肖湘宁,陶 顺. 直流微网电能质量问题探讨[J]. **电力系统自动化**, 2016, 40(10): 148-158.
- [5] 熊杰锋,李 群,袁晓冬,等. 电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J]. **电力系统自动化**, 2013, 37(11): 125-133.
- [6] 贾清泉,杨晓雯,宋知用. 一种电力系统谐波信号的加窗频移算法[J]. **中国电机工程学报**, 2014, 34(10): 1631-1640.
- [7] 符 玲,韩文朕,麦瑞坤,等. 基于频域动态模型的同步相量测量算法[J]. **中国电机工程学报**, 2015, 35(6): 1371-1378.
- [8] 王 康,滕召胜,陈继斌,等. 基于时域准同步的介损角快速测量算法[J]. **中国电机工程学报**, 2015, 35(4): 873-881.
- [9] 黄冬梅,龚仁喜,焦凤昌,等. 莱夫-文森特窗三谱线插值的电力谐波分析[J]. **电力系统保护与控制**, 2014, 42(2): 28-34.
- [10] 唐 轶,杨 洛,梁华洋,等. 能量重心法在电力谐波参数估计中的运用[J]. **电力系统保护与控制**, 2012, 40(18): 101-105.
- [11] 曾金芳,滕召胜. 谱质心在电力谐波分析中的应用[J]. **中国电机工程学报**, 2013, 33(31): 73-80.
- [12] 丁 康,罗江凯,谢 明. 离散频谱时移相位差校正法[J]. **应用数学和力学**, 2002, 23(7): 729-735.
- [13] C37-118-1TM-2011. IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems[S]. New York: IEEE, 2001.
- [14] PRABHA KUNDUR, JOHN PASERBA, VENKAT AJJARAPU, et al. Definition and classification of power system stability[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [15] GB/T 15945—2008, 电能质量 电力系统频率偏差[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 杨志坚,丁 康. 高斯白噪声背景下时移相位差校正法的频率估计精度分析[J]. **振动工程学报**, 2007, 20(3): 274-279.
- [17] 周国亮,朱永利,王桂兰,等. 实时大数据处理技术在状态监测领域中的应用[J]. **电工技术学报**, 2014, 29(1): 432-437.
- [18] GB/T 14549—1993. 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [19] IEC 61000-4-7-2002. 电磁兼容试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [20] 潘 文,钱韵寿,周 鄂. 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, 9(2): 53-56.
- [21] HORNE J, FLYNN D, LITTLE T. Frequency stability issues for islanded power systems[C]. **Proceedings of 2004 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition**, New York: IEEE, 2004.
- [22] 张执超,王增平,方攀宇. 基于频率和电压稳定的紧急控制策略研究[J]. **电力系统保护与控制**, 2013, 41(3): 149-155.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

林申力,陈隆道. 考虑电网频率变化率的改进相位差校正法研究[J]. **机电工程**, 2017, 34(4): 386-393.

LIN Shen-li, CHEN Long-dao. An improved phase difference correction method considering rate of change of frequency of the power systems[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(4): 386-393.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>