

基于 Rife-Vincent 自卷积窗插值校正的 发电机准同期参量测量方法

李永刚¹, 张文静¹, 武玉才¹, 李和明¹, 蒋理², 刘剑²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003;

2. 辽宁省电力有限公司电力经济技术研究院, 辽宁省 沈阳市 110006)

Generator Quasi Synchronization Parameter Measurement Method Based on Rife-Vincent Self-Convolution Window and Interpolation Correction

LI Yonggang¹, ZHANG Wenjing¹, WU Yucan¹, LI Heming¹, JIANG Li², LIU Jian²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;

2. Institute of Electric Economic Technology, Liaoning Electric Power Company, Shenyang 110006, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: It is the core task for automatic synchronization device to estimate the generator quasi synchronization parameter rapidly and precisely. However, when measuring the parameter based on harmonic analysis method, the result will have a great error because of non-synchronization sampling. To reduce this error, a generator quasi synchronization parameter measurement method based on Rife-Vincent self-convolution window (RVSCW) and interpolation correction was presented. The main lobe characteristic and the relationships between side-lobe characteristic and the order of self-convolution were analyzed. Besides, interpolation spectrum correction theory based on RVSCW was given as well. In the situations of fundamental frequency fluctuation, harmonic and white noise existence, the parameter was calculated. What's more, taking the voltage as non-stationary signal, the parameter was calculated and the causes of error were analyzed as well. Simulation results show that the method presented in this paper has superior performance, which can inhibit spectrum leakage effectively.

KEY WORDS: quasi synchronization parameter; measurement; Rife-Vincent self-convolution window; interpolation correction

摘要: 对准同期参量进行精确快速测量是发电机准同期并列成功的关键。非同步采样时, 基于谐波分析理论的准同期参量测量结果会产生较大误差, 为此提出了基于 Rife-Vincent 自卷积窗插值校正的发电机准同期参量测量方法。分析了 Rife-Vincent 自卷积窗主瓣特性以及自卷积阶数对旁瓣性能的影响, 同时给出了基于 Rife-Vincent 自卷积窗的插值频谱校正方法。通过仿真计算, 得到了基波频率波动、谐波

影响、噪声影响等不同情况下发电机准同期参量测量结果; 同时对电压非稳态情况进行了仿真, 分析了误差产生原因。仿真结果表明所提方法性能优越, 能有效抑制频谱泄露效应。

关键词: 准同期参量; 测量; Rife-Vincent 自卷积窗; 插值校正

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.02.015

0 引言

自动准同期方式是日前发电机最常用的并列方式。对并列双方电压信号频率、幅值以及相位进行准确测量是自动准同期并列成功与否的关键^[1]。目前, 准同期参量测量方法主要分为硬件法和软件法^[2]。硬件法是利用硬件电路实现对待并列两侧电压信号的频率差及相角差的测量, 其运算速度快, 但存在抗干扰能力弱、累计误差大等缺点。软件法主要是对待并列两侧电压信号进行交流采样^[3]并通过数值方法对电压信号参量进行计算, 目前常见方法主要有模拟滤波器法^[4]、小波分析法^[5-6]、神经网络法^[7]、傅里叶分析法^[8-10]等。其中傅里叶分析法(快速傅里叶(fast fourier transformation, FFT)算法及其改进算法)由于其原理简单, 受直流分量及谐波干扰小^[11], 已经成为一种典型的准同期参量测量方法^[3,12-13]。然而, 发电机并列时, 机端电压频率会在很大范围内发生波动, 电网电压频率波动也时有发生, 很难保证对并列双发电电压信号进行同步采样及整周期截断, 使 FFT 分析结果受到频谱泄露效应和栅栏效应影响, 难以直接将 FFT 分析结果用于发电机准同期参量的测量。基于此, 越来越多的频谱校

基金项目: 国家自然科学基金项目(51107039)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51107039).

正方法被提出^[14-16]，并取得了良好的效果。

文献[3]及文献[12]提出一种基于加窗离散傅里叶变换结合相位差频谱校正法的准同期参量测量方法，实现了对准同期参量的较为准确测量。然而加普通窗函数对信号进行截断时，频谱泄露抑制能力是有限的，急需设计一种旁瓣性能优越的新型窗函数进一步抑制频谱泄露效应；基于相位差法进行频谱校正，需要采集并保存2段离散信号，对硬件系统有较高的要求，不利于参量测量的实时性。基于此，本文提出一种基于 Rife-Vincent 自卷积窗插值校正的发电机准同期参量测量方法。给出了 Rife-Vincent 自卷积窗的频率特性，给出了基于 Rife-Vincent 自卷积窗的插值频谱校正方法。在频率波动、谐波影响、噪声影响以及电压信号为非稳态信号等情况下，对发电机准同期参量进行了仿真计算。

1 Rife-Vincent 自卷积窗

1.1 Rife-Vincent 自卷积窗定义

对信号加窗截断后进行频谱分析能有效抑制频谱泄露效应。但传统的窗函数其旁瓣性能是有限的，非同步采样时，难以保证对频率、幅值、相角等相关电气量做到准确测量。基于此，文献[17]提出一种将矩形窗进行自卷积运算得到新型矩形自卷积窗的窗函数构造方法，并分析了矩形自卷积窗的频谱特性，优化了窗函数旁瓣性能。在此基础上，文献[18]提出运用纳托尔窗构建纳托尔自卷积窗并用于谐波分析，取得了较好效果。本文运用窗函数性能更为优越的 Rife-Vincent 窗构建 Rife-Vincent 自卷积窗，并用于发电机准同其参量测量。

Rife-Vincent 窗是一种典型的余弦组合窗，按组合项数及系数的不同，典型的 Rife-Vincent 窗可以有6种表达形式，其中4项1阶 Rife-Vincent 窗由于其结构相对简单且旁瓣特性优越，其旁瓣峰值电平为-61 dB，旁瓣衰减速率为18 dB/倍频程，使用较为广泛。其中旁瓣衰减速率是指当频率 f_2 为 f_1 的2倍(即 f_2 与 f_1 之间距离为1倍频程)时， f_2 处旁瓣幅值相比 f_1 处旁瓣幅值衰减的大小。本文 Rife-Vincent 自卷积窗就是基于4项1阶 Rife-Vincent 窗构建的。长度为 M 的4项1阶 Rife-Vincent 窗离散时域表达式为

$$w_{RV}(n) = 1 - 1.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right) + 0.6 \cos\left(\frac{4\pi n}{M}\right) - 0.1 \cos\left(\frac{6\pi n}{M}\right) \quad (1)$$

式中 $n=0,1,\dots,M-1$ 。

定义， P 阶 Rife-Vincent 自卷积窗为

$$w_{RVP}(n) = \underbrace{w_{RV}(n)w_{RV}(n)\cdots w_{RV}(n)}_{P-1次自卷积} \quad (2)$$

由卷积性质，长度为 M 的离散序列做一次自卷积，得到新序列长度为 $2M-1$ ，将其末尾补零，则新序列长度为 $2M$ 。这样，长度为 M 的 Rife-Vincent 窗做 $P-1$ 次自卷积，并末尾补零就可得到 P 阶 Rife-Vincent 自卷积窗，其长度为 N ，且有

$$N=MP \quad (3)$$

1.2 Rife-Vincent 自卷积窗频率特性

1.2.1 频谱特性

由离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)定义，长度为 M 的4项1阶 Rife-Vincent 窗的频谱函数为

$$W_{RV}(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^3 a_m (W_R(\omega - m) + W_R(\omega + m)) \quad (4)$$

式中： ω 为归一化角频率，且有 $\omega=2\pi f/f_s$ ，其中， f 为频率， f_s 为采样频率； $a_0=1$ ； $a_1=-1.5$ ； $a_2=0.6$ ； $a_3=-0.1$ 。

$$W_R(\omega) = e^{-j\omega(M-1)\pi/M} \frac{\sin(\omega\pi)}{\sin(\omega\pi/M)} \quad (5)$$

对式(4)进一步化简可得 Rife-Vincent 窗频谱函数为

$$W_{RV}(\omega) = \sin(M\omega/2) e^{-j\frac{\omega}{N}} \sum_{m=0}^3 \frac{a_m \sin(\omega)}{2 \sin\left(\frac{\omega}{2} - \frac{\pi m}{M}\right) \sin\left(\frac{\omega}{2} + \frac{\pi m}{M}\right)} \quad (6)$$

由卷积定理，在时域内对信号进行卷积等于其在频域内乘积。 P 阶 Rife-Vincent 自卷积窗频谱函数为

$$W_{RVP}(\omega) = (W_{RV}(\omega))^P \quad (7)$$

对 ω 离散化，即 $\omega=2k\pi/N$ ， $k=0,1,\dots,N-1$ ，易得 P 阶 Rife-Vincent 自卷积窗频谱特性为

$$W_{RVP}(k) = \left\{ \sin\left(\frac{k}{P}\pi\right) e^{-j\frac{k\pi}{P}} \sum_{m=0}^3 \frac{a_m \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}{2 \sin\left(\pi\left(\frac{k}{N} - \frac{m}{M}\right)\right) \sin\left(\pi\left(\frac{k}{N} + \frac{m}{M}\right)\right)} \right\}^P \quad (8)$$

1.2.2 主瓣特性

由DFT的基本性质可知， P 阶 Rife-Vincent 自卷积窗经离散傅里叶变换后频谱关于原点对称，以 2π 为周期。故主瓣宽度为原点与原点右侧第1个频谱过零点之间距离2倍

由式(8), 且令 $|W_{RVP}(k)|=0$, 则有

$$\begin{cases} \frac{k}{P}\pi = q\pi, & q \in \mathbf{Z} \\ \pi(\frac{k}{N} \pm \frac{m}{M}) \neq q\pi, & q \in \mathbf{Z} \end{cases} \quad (9)$$

$k=4N/M$ 时, k 为中心频点右侧首个过零点, 即 $k=4P$ 。中心频点与右侧首个频率过零点之间距离为 $8P\pi/N$, 故其主瓣宽度为

$$B_{RVP} = 16P\pi/N = 16\pi/M \quad (10)$$

1.2.3 旁瓣特性

Rife-Vincent 自卷积窗各旁瓣宽度为 $2\pi/N$, 且旁瓣中点取得峰值, $k=5N/M$ 为中心频点右侧第 2 个过零点。首个过零点与第 2 个过零点的中点处得旁瓣峰值, 即 $k=(4+0.5)N/M=4.5P$ 时, 取得旁瓣峰值。故 Rife-Vincent 自卷积窗的旁瓣峰值电平 B (单位为 dB) 为

$$B = 20\lg \frac{|W_{RVP}(4.5P)|}{|W_{RVP}(0)|} = -61P \quad (11)$$

图 1 为由原长度 $M=64$ 的 Rife-Vincent 窗分别构建 1~4 阶 Rife-Vincent 自卷积窗的幅频特性。

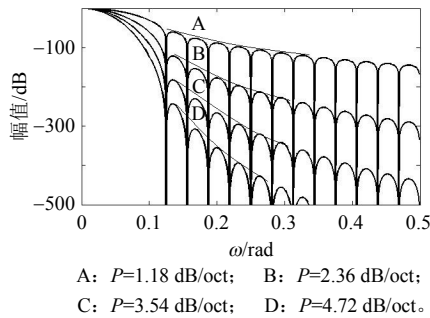


图 1 1~4 阶 Rife-Vincent 自卷积窗幅频特性
Fig. 1 Frequency responses of 1~4 order Rife-Vincent self-convolution window

由图 1 可知, 1~4 阶 Rife-Vincent 自卷积窗旁瓣衰减速率分别约为 18、36、54、72 dB/倍频程。故 1~4 阶 Rife-Vincent 自卷积窗旁瓣衰减速率 V 与其自卷积阶数 P 有如下近似关系:

$$V \approx 18P \quad (12)$$

4 阶 Rife-Vincent 自卷积窗其旁瓣峰值电平为 -244 dB, 旁瓣衰减速率为 72 dB/倍频程, 其旁瓣性能优越, 可有效抑制频谱泄露。

2 基于 Rife-Vincent 自卷积窗的插值校正法

为求分析简便, 以单一频率(基波)信号为例进行分析, 其经采样频率为 f_s 的离散采集系统后, 得到离散信号表达式为

$$x(n) = A \sin(2\pi n f_0 / f_s + \phi) \quad (13)$$

式中: A 为信号幅值; ϕ 为信号初相角; f_0 为基波

频率。

采用长度为 N 的 Rife-Vincent 自卷积窗对采样序列进行加窗截断, 并由离散傅里叶变换求其离散频谱, 加窗序列 $x_w(n)$ 的离散频谱为

$$X_w(k) = \frac{1}{2j} (Ae^{j\phi} W_{RVP}(k - k_0) + Ae^{-j\phi} W_{RVP}(k + k_0)) \quad (14)$$

并有

$$k_0 = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{f_0}{f_s / N} = k + \Delta k, \quad -0.5 \leq \Delta k \leq 0.5 \quad (15)$$

式中: k_0 为基波离散频谱准确位置; k 为频谱幅值最大谱线; Δk 为频率偏移量。

式(14)中, 第 2 项为负频率分量, 当 k_0 较大, 即离 $\omega=0$ 较远时, 由于本文介绍的 Rife-Vincent 卷积窗优越的旁瓣性能, 负频率分量的频谱泄露影响作用可以忽略不计。即

$$X_w(k) = \frac{1}{2j} A e^{j\phi} W_{RVP}(k - k_0) \quad (16)$$

若为同步采样, 此时 k_0 为正整数, Δk 为零, 基波可以在离散谱线中找到其准确谱线位置, $X_w(k_0)$ 就反映了基波的相位和幅值。然而通常很难保证同步采样, 非同步采样时, k_0 为非整数, 基波频点准确谱线不与任一离散谱线重合, 会有一定的偏移量 Δk 。如何准确求解 Δk 对减小频率、初相角、幅值计算误差就显得尤为重要。

由于栅栏效应, 基波所对应的谱线位于离散谱线 k_1 与 k_2 之间, 且有 $k_1 \leq k_0 \leq k_2 = k_1 + 1$ 。谱线 k_1 与 k_2 对应的幅值分别为 $y_1 = |X_w(k_1)|$, $y_2 = |X_w(k_2)|$, 且两谱线为离散频谱幅值最大与次大值。同时, 引入参量 λ , 并令 $\lambda = k_0 - k_1 - 0.5$, 则 $\lambda \in [-0.5, 0.5]$ 。

令 $\delta = f(\lambda) = (y_2 - y_1) / (y_2 + y_1)$, 则有

$$\delta = \frac{|W_{RVP}(-\lambda + 0.5)| - |W_{RVP}(-\lambda - 0.5)|}{|W_{RVP}(-\lambda + 0.5)| + |W_{RVP}(-\lambda - 0.5)|} \quad (17)$$

考虑到 $\delta = f(\lambda)$ 形式复杂, 难以直接求出 $\lambda = f^{-1}(\delta)$ 准确解析表达式, 可运用最小二乘法对插值修正公式进行拟合。且由式(17), $f(\lambda) = -f(-\lambda)$, 即 δ 是关于 λ 的奇函数, 故 $\lambda = f^{-1}(\delta)$ 中偶次项为零。考虑到算法实时性, 逼近次数一般不超过 7 次^[19], 故拟合函数可写成

$$\lambda = f^{-1}(\delta) = \alpha_1 \delta + \alpha_3 \delta^3 + \alpha_5 \delta^5 + \alpha_7 \delta^7 \quad (18)$$

拟合计算时, 可以将 $\lambda \in [-0.5, 0.5]$ 等步长取 100 个值, 并求出 δ , 基于 Matlab 中 polyfit 函数求出插值多项式各次系数。4 阶 Rife-Vincent 自卷积窗下插值多项式拟合函数为

$$\lambda = 14.087\delta + 0.0831\delta^3 + 0.0768\delta^5 + 0.0695\delta^7 \quad (19)$$

幅值最大谱线最接近基波准确谱线位置,且噪声对其影响效果最小,用其值进行修正,结果精度较高。当 $\lambda \in [-0.5, 0]$ 时, k_0 此时更接近 k_1 , 此时频率偏移量为

$$\Delta k = \lambda + 0.5 \quad (20)$$

将式(20)代入式(8)(14)中, 则基波频率、幅值与初相位分别为

$$\begin{cases} f_0 = (k_1 + \lambda + 0.5)f_s / N \\ A = |2X_W(k_1) / W(-\lambda - 0.5)| \\ \phi = \arg[X_W(k_1)] - \arg[W_{RVP}(-\lambda - 0.5)] + \pi / 2 \end{cases} \quad (21)$$

当 $\lambda \in [0, 0.5)$ 时, k_0 此时更接近 k_2 , 此时频率偏移量为

$$\Delta k = \lambda - 0.5 \quad (22)$$

同理, 基波频率、幅值与初相位分别为

$$\begin{cases} f_0 = (k_2 + \lambda - 0.5)f_s / N \\ A = |2X_W(k_2) / W(-\lambda + 0.5)| \\ \phi = \arg[X_W(k_2)] - \arg[W_{RVP}(-\lambda + 0.5)] + \pi / 2 \end{cases} \quad (23)$$

特别地, 当 $\lambda = \pm 0.5$ 时为同步采样, 此时结果精度最高, 理论上无误差。

3 方法准确性与有效性仿真分析

3.1 本文测量方法具体流程及仿真信号模型

为验证本文提出的准同期参量测量方法的准确性与有效性, 本文设计了仿真实验。本文准同期参量测量方法具体步骤如下:

1) 确定合适的信号采样频率, 选择合适长度的 Rife-Vincent 窗, 构建 Rife-Vincent 自卷积窗。

2) 对并列双方电压信号进行离散采样, 得到发电机测电压采样序列 $u_1(n)$ 和电网侧电压采样序列 $u_2(n)$ 。

3) 分别对两序列加 Rife-Vincent 自卷积窗截断, 并进行快速傅里叶变换。

4) 根据第 2 节中介绍方法, 运用插值频谱校正理论, 求出频率偏移量, 进而求出待并列双方电压信号基波频率、幅值以及相位信息。

5) 求出待并列双方电压信号频率差、幅值差、相位差。

本文中, Rife-Vincent 自卷积窗由原始长度为 64 的 Rife-Vincent 窗构建 4 阶自卷积窗得到, 即自卷积窗长度为 256, 信号采样长度为 256, 采样频率选取为 1.5 kHz, 电压信号仿真模型时域表达式为 $u(t) = 100 \sin(2\pi f_0 t + \pi/3)$ V。

3.2 频率波动对测量结果的影响

发电机并列操作时, 发电机侧电压频率将在较大范围内发生波动, 为分析基波频率波动对本

文方法精度的影响, 设置基波频率变化范围分别为 30~70 Hz、45~53 Hz, 其余参量保持不变, 其频率、相位、幅值计算结果相对误差分别如图 2 所示。

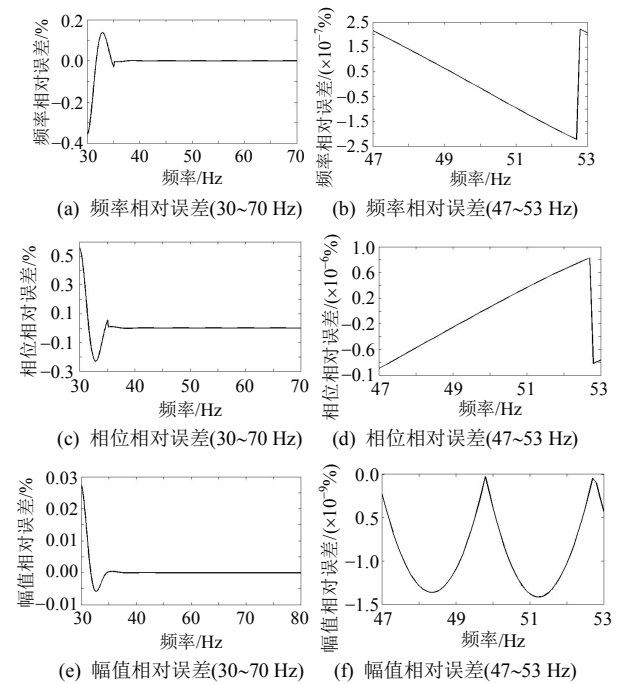


图 2 频率变化对测量结果的影响

Fig. 2 Influence of frequency fluctuation on quasi synchronization parameter measurement

由图 2 可知, 频率在较大范围内波动时, 采用本文方法计算准同期参量误差均限制在很小的范围内。当频率较低(文中为 30~35 Hz)时, 计算结果误差明显增大, 这是由于负频率部分长程频谱泄露造成的, 文献[20]对此进行了详细分析, 通常情况下可采用增大采样数据长度, 使基波离散频点远离中心频点来克服负频率部分频谱泄露影响, 提高低频部分计算精度。当频率波动范围在 47~53 Hz 时(并列装置投入运行时, 发电机机端电压频率一般处于 48~52 Hz 之间), 本文方法计算结果频率相对误差小于 $2.5 \times 10^{-7}\%$ 、相位相对误差小于 $1 \times 10^{-6}\%$ 、幅值相对误差小于 $1.5 \times 10^{-9}\%$ 。基于本文方法的准同期参量测量结果能有效克服频率波动的影响。

3.3 谐波对测量结果的影响

由于频谱泄露, 谐波会对基波的计算结果产生影响, 谐波比例变化将直接影响到准同期参量的测量结果。为分析谐波对基于本文方法的准同期参量测量结果的影响, 设置基波频率范围为 47~53 Hz, 2 次谐波注入比例分别为占基波 5% 和 10% 时, 其频率、相角、幅值计算结果如图 3 所示。

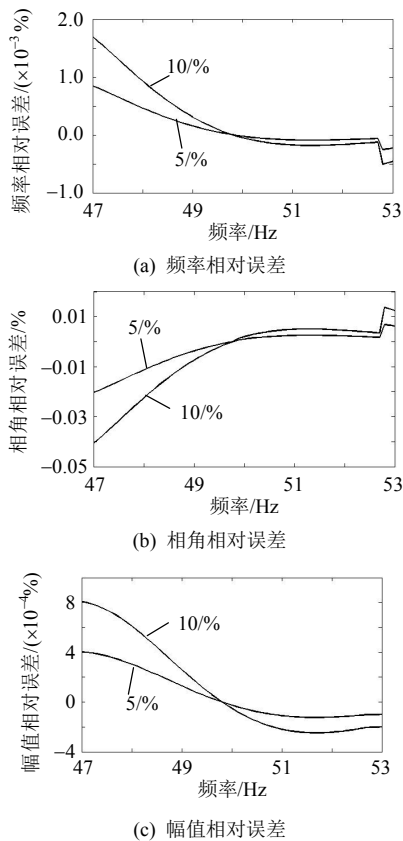


图3 谐波对测量结果影响
Fig. 3 Influence of harmonic component on quasi synchronization parameter measurement

由图3可知, 2次谐波的存在会对本文方法计算精度造成一定的影响, 这主要是由于频谱泄露使谐波成分泄露到基波主瓣之中造成的; 但由于4阶Rife-Vincent自卷积窗其旁瓣性能优越, 对频谱泄露有很强的抑制作用, 故当2次谐波存在时, 采用本文方法的发电机准同期参量测量结果仍保持有较高的精度; 当二次谐波比例为基波10%时, 频率、相位、幅值计算结果相对误差分别小于0.002%, 0.05%, 0.001%, 保持有较高精度。电力系统中, 谐波成分一般以奇次为主, 3次谐波与基波之间谱线距离更远, 其频谱泄露成分对基波影响更小, 即对准同期参量计算结果精度影响更小。综上所述, 本文提出的发电机准同期参量测量方法能有效克服谐波成分对测量结果精度的影响。

3.4 噪声对测量结果的影响

准同期参量测量现场不可避免的会存在着各种各样的环境噪声, 噪声将对准同期参量计算结果精度产生一定的影响。本文分别在信噪比为30~120 Db的高斯白噪声影响下, 基波频率为50 Hz时, 采用3.1节中介绍仿真模型, 对准同期参量进行仿真计算, 其结果见图4。

由图4可知, 当测试信号存在噪声时, 会对参

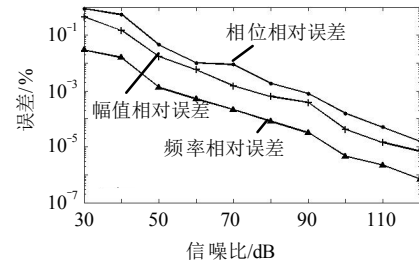


图4 噪声对测量结果的影响

Fig. 4 Influence of white noise on quasi synchronization parameter measurement

量计算结果精度产生较大影响。当信噪比大于60 dB时, 采用本文方法的准同期参量测量结果频率、相位、幅值测量相对误差分别小于0.001%、0.1%、0.5%, 达到较高的计算精度。故基于本文介绍方法能在噪声环境下能准确测量发电机准同期并列参量。

4 考虑电压信号为非稳态信号模型的仿真分析

发电机并列操作时, 机端电压幅值及频率均会在较大范围内发生波动, 其电压信号严格意义上来说是一个非稳态信号, 当发电机电压信号为非稳态信号时, 对本文方法精度的影响效果如何是必须考虑的问题。

设并列操作时, 发电机机端电压信号为

$$u(t) = A(\sin(2\pi f_G t + \pi/3) + 0.1\sin(2\pi \times 3f_G t + \pi/4)) \text{ V}$$

式中: $A=95+t$, 即电压幅值从95 V开始以1 V/s的速度上升, t 为时间(单位为s); $f_G=45+t$, 即频率从45 Hz开始以1 Hz/s的速度上升。图5为1~10 s时间段内, 运用本文方法的电压频率、相位以及幅值测量结果。

由图5可知, 当电压信号为非稳态信号时, 准同期参量计算结果精度会有一定程度的下降, 这主要是由以下几方面造成:

1) 电压信号和频率不断发生变化, 信号为非周期信号, 用基于周期信号分析的傅里叶变换分析方法会产生一定误差。

2) 某一时刻的准同期参量具体数值, 是这一时刻之前若干采样数据进行计算得到的, 其结果具有一定的滞后性。

然而, 一般发电机幅值、频率变化速率较小, 上述因素对计算结果精度的影响可以减弱; 同时在保证计算精度的同时, 适当提高采样频率、减小采样数据长度也可减小上述因素对结果精度的影响。文中仿真模型下, 采用本文方法的发电机准同期参量测量结果相对误差随时间变化(即随电压频率变

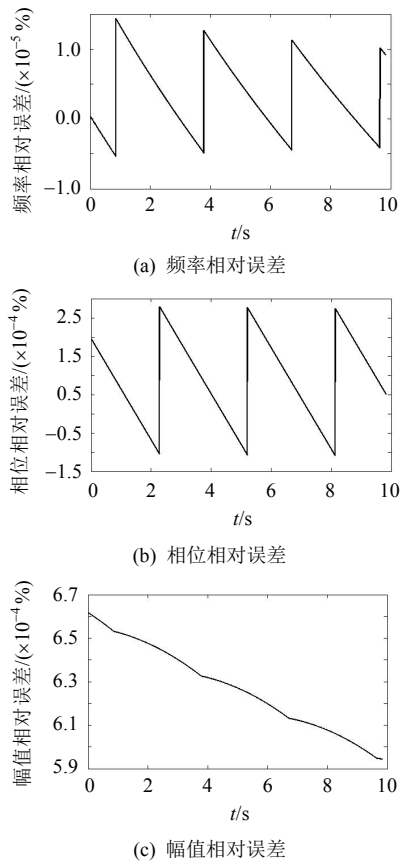


图5 准同期参量测量结果影响

Fig. 5 Quasi synchronization parameter measurement results

化)呈现出一定周期震荡态势,这可能是由于频域偏移量 Δk 随着频率的变化呈现周期性变化决定的。

本文仿真模型下,电压信号频率、相位、幅值相对误差分别小于 $1.5 \times 10^{-5}\%$ 、 $3 \times 10^{-4}\%$ 、 $6.7 \times 10^{-4}\%$ 。结果表明,考虑到实际并列时电压信号幅值、频率同时变化的情况,采用本文方法能对准同期参量进行准确测量,其最小测量间隔仅取决于硬件计算速度,避免了采用相位差法进行频谱校正时2段采样序列间隔时间对计算实时性的影响,提高了准同期参量测量的实时性。

5 结论

本文利用 Rife-Vincent 窗做自卷积构造了一种新型 Rife-Vincent 自卷积窗,通过分析其频谱特性得出该窗函数旁瓣峰值电平与旁瓣衰减速率同自卷积阶数成正比关系,具有优越的频谱泄露抑制能力的结论。在此基础上提出了一种基于 Rife-Vincent 窗插值校正的发电机准同期参量测量方法,并给出该方法具体实现步骤。在频率波动、谐波变化、噪声影响并考虑电压信号为非稳态信号等情况下,运用本文方法对发电机准同期参量进行了仿真计算。结果表明,基于本文介绍的发电机准同期参量测量方法,无需对信号同步采样,结果精度高,且硬件

要求低,能满足准同期参量实时测量需要。

当采样数据过短时,准同期参数测量误差会有所提高,这主要是由于负频率部分频谱泄露效应使文中频谱校正插值公式不适用造成的。下一步将重点研究计及负频率影响的频谱校正插值方法,以求满足结果准确性的前提下减小小采样长度,提高测量实时性。

参考文献

- [1] 卢志刚, 吴士昌, 贺仁睦, 等. 发电机的广义跟踪同期控制研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 149-156.
Lu Zhigang, Wu Shichang, He Renmu, et al. Research of generalized following synchronous control[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 149-156(in Chinese).
- [2] 叶念国. 由我国同期装置的现状所引发的思考[J]. 电网技术, 1998, 22(12): 74-77.
Ye Nianguo. Current situation and existing problems of current synchronizers in china[J]. Power System Technology, 1998, 22(12): 74-77(in Chinese).
- [3] 黄纯, 何怡刚, 江亚群. 一种新的自动准同期并列算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 60-64.
Huang Chun, He Yigang, Jiang Yaqu. Novel algorithm for automatic synchronization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 60-64(in Chinese).
- [4] 肖雁鸿, 毛筱, 周靖林, 等. 电力系统谐波测量方法综述[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 61-64.
Xiao Yanhong, Mao Xiao, Zhou Jingling, et al. A survey on measuring method for harmonics in power system[J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 61-64(in Chinese).
- [5] Pham V, Wong K. Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(3): 249-254.
- [6] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-258.
Zhang Peng, Li Hongbin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete wavelet transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 252-258(in Chinese).
- [7] Lin H C. Intelligent neural network-based fast power system harmonic detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 43-52.
- [8] 金维刚, 刘会金. 基于三次样条插值时域采样重构的间谐波检测新算法[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 74-79.
Jin Weigang, Liu Huijin. A new algorithm for interharmonics measurement based on time domain sampling and reconstruction by cubic spline interpolation[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 74-79(in Chinese).
- [9] Yang J Z, Yu C S, Liu C W. A new method for power signal harmonic analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1235-1239.
- [10] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 270-277.
Wen He, Teng Zhaosheng, Wang Yong, et al. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 270-277(in Chinese).
- [11] 律方成, 晁红军, 徐志钮, 等. 介质损耗数字化测量方法综述[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(6): 21-26.
Lü Fangcheng, Chao Hongjun, Xu Zhiniu, et al. Overview of digital method for dielectric loss measurement[J]. Journal of North China

- Electric Power University, 2008, 35(6): 21-26(in Chinese).
- [12] 林国汉. 准同期参数测量算法研究[J]. 湖南工程学院学报, 2007, 17(3): 1-4.
Lin Guohan. Research on quasi synchronization parameter measurement algorithm[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2007, 17(3): 1-4(in Chinese).
- [13] 江亚群, 何怡刚, 黄纯, 等. 双单片机实现的双原理自动准同期并列装置[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 87-90.
Jiang Yaqun, He Yigang, Huang Chun, et al. Dual-principle-based automatic quasi-synchronization device with two MCUs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 87-90(in Chinese).
- [14] 丁康, 江利旗, 离散频谱的能量重心校正法[J]. 振动工程学报, 2001, 14(3): 354-358.
Ding Kang, Jiang Liqi. Energy centrobaric correction method for discrete spectrum[J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(3): 354-358(in Chinese).
- [15] 谢铭, 王晓君, 葛建华. DFT 测频的加窗插值算法与实现[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(2): 192-196.
Xie Nuo, Wang Xiaojun, Ge Jianhua. Algorithm and implementation of windowed interpolation for DFT measuring frequency[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(2): 192-196(in Chinese).
- [16] 段虎明, 秦树人, 李宁. 离散频谱的校正方法综述[J]. 振动与冲击, 2007, 26(11): 139-145.
Duan Huming, Qin Shuren, Li Ning. Review of correction methods for discrete spectrum[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 26(11): 139-145(in Chinese).
- [17] 张介秋, 梁昌洪, 陈砚圃. 一类新的窗函数—卷积窗及其应用[J]. 中国科学, E 辑, 2005, 35(7): 773-784.
Zhang Jieqiu, Liang Changhong, Chen Yanpu. A new family of windows-convolution windows and their applications[J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2005, 35(7): 773-784(in Chinese).
- [18] 曾博, 滕召胜. 纳托尔自卷积窗加权电力谐波分析方法[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 134-139.
Zeng Bo, Teng Zhaosheng. A nuttall self-convolution window-based approach to weighted analysis on power system harmonic[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 134-139(in Chinese).
- [19] Qian H, Zhao R X, Chen T. Interharmonics analysis based on interpolating windowed FFT algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1064-1069.
- [20] 陈奎孚, 王建立, 张森文. 频谱校正的复比值法[J]. 振动工程学报, 2008, 21(3): 314-318.
Chen Kuifu, Wang Jianli, Zhang Senwen. Spectrum correction based on the complex ratio of discrete spectrum around the main-lobe[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 22(2): 1064-1069(in Chinese).



李永刚

收稿日期: 2013-07-26.

作者简介:

李永刚(1967), 男, 博士, 教授, 研究方向为大型电机诊断与在线监测;

张文静(1988), 女, 硕士研究生, 研究方向为大型电机诊断与在线监测, E-mail: 619341493@qq.com;

武玉才(1982), 男, 博士, 讲师, 研究方向为大型电机诊断与在线监测;

李和明(1957), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为大型电机诊断与在线监测。

(责任编辑 徐梅)

“直流输电与直流电网”专栏征稿启事

随着未来能源格局的深刻变化, 传统的电力装备、电网结构和运行技术等面临着巨大的挑战, 基于常规直流及柔性直流的多端直流输电和直流电网技术被认为是解决大规模可再生能源消纳问题的有效技术手段之一。鉴于近年来已有许多学者投入大量精力研究直流输电及直流电网技术, 本刊从 2013 年第 9 期起开辟“直流输电与直流电网”专栏, 集中刊登该领域的最新成果。为了准确把握论文质量, 《电网技术》编辑部特邀国网智能电网研究院汤广福博士担任该专栏主编。真诚欢迎全国专家学者和博士生、硕士生积极投稿, 本刊将争取快速审阅、刊登。希望本专栏能够集成全国各相关领域研究人员的研究成果与经验, 为我国直流输电与直流电网技术的发展提供有益的启迪与参考。

征稿内容包括(但不限于):

- (1) 特高压直流输电技术。
- (2) 多端柔性直流输电技术。
- (3) VSC-HVDC 工程应用的相关技术问题。
- (4) 交直流混合输电系统相关技术。
- (5) 直流电网网络架构设计与分析, 地理与潮流分布设计。
- (6) 直流电网运行性能研究, 包括稳态与暂态性能、直流电网功率传输特性与运行特性研究。
- (7) 直流电网调度技术和协调控制方法。
- (8) 直流电网仿真技术、保护原理及保护策略、广域测量及故障检测技术、安全可靠评估技术。
- (9) 直流电网关键设备研制, 如高压直流断路器、大容量 DC/DC 变压器和高压直流电缆等。
- (10) 直流电网的标准化, 包括电压等级标准化, 设备标准化、换流器的独立控制级传输协议标准化等。