

DOI: 10.7667/PSPC161543

高频采样下基于 DFT 的配电网相量测量算法研究

周治国¹, 王毅¹, 张华良²

(1. 北京理工大学, 北京 100081; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 配电网规模的增大以及分布式能源的并网给配电网的运行工况带来了巨大的挑战, 面向配网的相量测量技术逐渐成为研究热点。针对输电网中各种相量测量算法在精度、响应时间以及实时性上不能有效兼顾的问题, 提出一种适用于配电网的相量测量算法。在定间隔高频采样条件下, 该算法运用动态校正因子的思想对传统 DFT 算法进行校正, 解决了传统算法在电力系统发生频偏或动态条件下测量精度骤降的缺点, 保证算法在精度、响应时间以及实时性上同时满足配电网的量测要求。最后, 基于该算法原理在 Matlab/Simulink 上搭建相量测量软件仿真平台, 确保研究人员可以在仿真环境中就能验证配电网的相量测量算法甚至研究故障定位和状态估计等高级应用。

关键词: 配电网; 离散傅立叶变换; 相量测量算法; 动态测试; 建模

Research on phasor measurement algorithm of distribution network based on DFT under high frequency sampling

ZHOU Zhiguo¹, WANG Yi¹, ZHANG Hualiang²

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: With the increasing scale of distribution network and the interconnection of distributed energy has brought a great challenge to the operation condition of distribution network, the phasor measurement technology has gradually become a research focus. In view of the problem that the algorithm can't effectively balance the accuracy, response time and real-time performance in the transmission network, this paper proposes a phasor measurement algorithm which is suitable for distribution network. Under the condition of fixed interval and high frequency sampling, the algorithm uses dynamic calibration factor to correct the traditional DFT algorithm, which solves the shortcomings of the rapid decline in traditional algorithm measurement accuracy under the condition of power system frequency deviation or dynamic measurement. Finally, the phasor measurement software simulation platform is built in Matlab/Simulink based on the principle of the algorithm, providing a simulation environment for researchers to verify the phasor measurement algorithm of distribution network and the fault location, state estimation or other advanced application.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA 040103).

Key words: distribution network; DFT; phasor measurement algorithm; dynamic testing; modeling

0 引言

随着基于相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)的广域测量系统(Wide-Area Measurement System, WAMS)的技术逐渐成熟, PMU 在输电网已经得到充分的开发和广泛的应用, 形成了布点数量多、检测范围广的格局, 具有了动态监测和在线诊

断的能力^[1]。但是在配电网中, 相量测量技术一直没有得到重视, 相比输电网, 技术落后了几十年, 这是由于传统配电网结构简单, 大多呈辐射状和单向潮流, 只需评估计算峰值负载和故障电流等暂态信息, 而不需要 PMU 来实时监测配电网的时间运行状态^[2]。然而随着新能源技术的发展, 大量诸如分布式发电(Distributed Generation, DG)、电动汽车和可控负载等分布式能源(Distributed Energy Resource, DER)接入之后, 打破了传统配电网的单相潮流模式, 影响网络的供电可靠性以及加剧电能质量的恶化等, 配电网的保护和监测受到越来越多的关注和重视^[3-5]。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA 040103); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KGCX2-EW-104); 中国科学院战略性先导专项(XDA06021100)

配电系统作为电力系统到用户的最后一环,配电网与输电网在网络结构、结构稳定性、三相平衡及负荷类型等方面有着很大的不同。相量测量技术已经在输电系统中得到广泛应用,但是应用到配电网系统中,相量测量技术必须要做出如下改变^[6-8]:

1) 受馈线线路长度的局限,配电系统线路两端电压的相量测量精度将是输电系统量测误差的十分之一或者几分之一。

2) 配电网线路受谐波和噪声等影响更加严重,必须要求相量测量算法在动态条件下具有很高的稳定性。

3) 配电网节点众多,要求相量测量装置的成本大幅下降。

算法是相量测量技术的核心^[9],研究适用于配电网的相量测量算法,以保证算法在精度、响应时间和实时性这3个方面满足配电网相量测量的要求^[10]。

目前在输电网领域常见的相量测量算法有:离散傅立叶变换法、过零检测法、小波变换法、小相量法、卡尔曼滤波法和最小二乘法。其中过零检测法^[11]原理简单,软硬件的设计相对容易实现,但实时性较差,容易受过零点高次谐波的影响。卡尔曼滤波^[12-13]具有很好的实时性,但卡尔曼滤波属于IIR滤波器的一种,它的群延时不确定,难以对相量相角进行准确计算。由于相量估计的对象是以额定频率为中心频率的窄带信号,小波变换^[14-15]的优势并不能在以额定频率为中心频率的窄带信号中得到很好的体现,反而由于小波分析运算复杂影响了相量测量的处理速度。小相量法^[16]能根据不同的应用选取不同的分辨率以提高相量估计的精度,但其精度受谐波影响较大,且数据处理量大,计算速度慢。这些算法的缺点使得它们在配电网上的相量测量应用受到一定的限制。

传统的离散傅立叶变换法(DFT)计算量小、运算速度快、对谐波有很好的抑制作用,但在频率偏移条件下会因频谱泄漏而导致算法测量误差较大。针对频谱泄漏现象,有学者提出自适应校正算法,对信号进行同步采样,即采样频率与信号的实际频率保持倍数关系,这种算法的优点是精度高,运算量小,但由于窗函数截取长度的变动导致实时性较差。现有的商用PMU采用的相量估计算法针对传统的DFT算法进行改进,通过幅值和相位修正使得其在频率偏移条件下仍然具有较高的测量精度。然而,当电压电流的幅值、频率和相角呈现低频振荡等动态条件时,商用DFT算法的精度急剧下降^[17]。因此,研究一种具有良好动态性能的DFT改进算法,对于判断配电网状态、预测配电网发展方向和

采取正确快速的保护措施都具有较大的现实意义。

本文提出一种基于DFT原理的相量测量算法,利用动态校正因子的思想对传统DFT算法的相量值进行校正,使得该算法既承接了DFT算法运算速度快的优点,又能在动态条件下具有很好的估计精度。最后,在Simulink上搭建相量测量软件平台,能够对标准电网模型实现相量参数的测量,为研究人员提供一种在软件环境中就可以观察相量测量过程并验证算法精度的研究平台。

1 理论分析

1.1 相量测量算法原理分析

信号模型为

$$x(t) = A \cos(2\pi ft + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: A 为信号幅值; f 为信号实际频率; φ_0 为信号初相角; 对 $x(t)$ 进行非同步采样, 采样频率为 $f_s = Nf_0$, 其中 N 为矩形窗的截断长度, f_0 为电力信号工频 50 Hz, 对应的采样间隔 $T_s = 1/f_s = 1/(Nf_0)$ 。则得到离散的采样信号表达式为

$$x(k) = A \cos(2\pi f k T_s + \varphi_0) \quad (2)$$

用长度为 N 的矩形窗函数对信号 $x(k)$ 进行截取后作 DFT 变换, 得

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (3)$$

式中, n 取 0 到 N , 分别得到基频为 50 Hz 的直流、基波、二次谐波以及高次谐波的频谱分量 $X_0, X_1, X_2, \dots, X_N$ 。现提取基波频谱 X_1 , 由于电力系统工频为 $f_0 = 50$ Hz, X_1 也称作信号 $x(t)$ 的工频相量。其表达式为

$$X_1 = \frac{A}{2N} e^{j\varphi_0} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\left(\frac{f-f_0}{Nf_0}\right)2\pi k} + \frac{A}{2N} e^{-j\varphi_0} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j\left(\frac{f+f_0}{Nf_0}\right)2\pi k} \quad (4)$$

式中:

$$\sum_{k=0}^{N-1} e^{-j\left(\frac{f+f_0}{Nf_0}\right)2\pi k} = \frac{\sin\left(\frac{(f+f_0)\pi}{f_0}\right)}{\sin\left(\frac{(f+f_0)\pi}{Nf_0}\right)} e^{-j\frac{(f+f_0)\pi}{f_0}\left(1-\frac{1}{N}\right)} \quad (5)$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} e^{j\left(\frac{f-f_0}{Nf_0}\right)2\pi k} = \frac{\sin\left(\frac{(f-f_0)\pi}{f_0}\right)}{\sin\left(\frac{(f-f_0)\pi}{Nf_0}\right)} e^{j\frac{(f-f_0)\pi}{f_0}\left(1-\frac{1}{N}\right)} \quad (6)$$

结合式(5)、式(6)中表达式的特点, 现令动态校正因子 P 与 Q 为

$$P = \frac{\sin\left[\frac{\pi(f-f_0)}{f_0}\right]}{N \sin\left[\frac{\pi(f-f_0)}{Nf_0}\right]}, \quad Q = \frac{\sin\left[\frac{\pi(f+f_0)}{f_0}\right]}{N \sin\left[\frac{\pi(f+f_0)}{Nf_0}\right]} \quad (7)$$

则可得基波频谱 X_1 表达式为

$$X_1 = \frac{A}{2} e^{j\varphi_0} e^{j\frac{(f-f_0)\pi}{f_0}\left(1-\frac{1}{N}\right)} P + \frac{A}{2} e^{-j\varphi_0} e^{-j\frac{(f+f_0)\pi}{f_0}\left(1-\frac{1}{N}\right)} Q \quad (8)$$

针对式(7)而言, P 与 Q 是关于电力信号实际频率 f 的唯一自变量的函数, 在实际工程, 信号实际频率变化范围一般在 45~55 Hz 之间。在 Matlab 中对其仿真如图 1 所示。

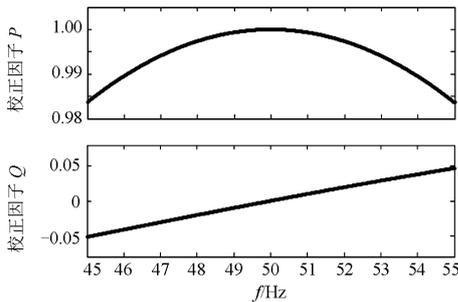


图 1 校正因子 P 与 Q 关于频率的变化曲线

Fig. 1 Change curve of the calibration factor P and Q with respect to frequency

根据仿真分析可知, 只要确定窗函数的截取长度 N , 校正因子 P 与 Q 的值在 45~55 Hz 范围之内始终保持不变, 而 P 与 Q 是在后续相量校正中非常重要的参数。

已知信号 $x(t)$ 在起点时刻的理论相量值 X 为

$$X = \frac{A}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_0} \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可得工频相量 X_1 与理论相量 X 之间的关系为

$$X_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} X e^{j\frac{(f-f_0)\pi}{f_0}\left(1-\frac{1}{N}\right)} P + \frac{1}{\sqrt{2}} X^* e^{-j\frac{(f+f_0)\pi}{f_0}\left(1-\frac{1}{N}\right)} Q \quad (10)$$

由式(4)可知, 工频相量 X_1 可以通过 DFT 计算得到, 如果可以用工频相量 X_1 来精确表示理论相量 X , 即 $X=f(X_1)$, 则可以通过校正思想对工频相量进行校正, 使得校正后的相量值接近理论值。显然, 在上面这种表达式情况下, 不容易得到两者的校正关系。

在实际工程中, 输电网上的 PMU 的采样速率一般都在 10 kHz 以下^[18], 目前, PMU 产品的采样率一般为 1200 Hz/4800 Hz/9600 Hz/10 000 Hz, 对应数据窗宽度为 24 点/96 点/192 点/200 点。相量数据反映电网的实时状态, 通过一定速率将相量数据上传到电力系统分析控制中心, 对于实现电网的控制、

保护和预测具有重要的价值。在理论情况下, 相量数据的上传速率为 f_s , 即采样率越高, 单位时间内得到的相量数据也就越多。相较于输电网, 由于分布式能源的接入和网络结构多变等因素使得配电网的电能质量急剧恶化, 实际工程监测表明配电网的波形震荡比输电网要剧烈得多。为了掌握配电网的实时状态, 在单位时间内配电网分析控制中心需要更多的相量数据, 此时面向输电网的低采样率相量测量算法已不再适用于配电网的相量测量要求。目前国外配电网波形数据的采样速率达到 200 kHz 左右^[18], 对应窗函数的截取长度 N 至少为 4000 点。基于此, 在此处作如下近似:

$$\left(1 - \frac{1}{N}\right) \approx 1 \quad (11)$$

则式(10)就可以近似得到

$$X_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} X e^{j\frac{(f-f_0)\pi}{f_0}} P + \frac{1}{\sqrt{2}} X^* e^{-j\frac{(f+f_0)\pi}{f_0}} Q \quad (12)$$

通过式(12)就可以用工频相量 X_1 来表示理论相量 X , 如式(13)。

$$\text{幅度: } |X| = \sqrt{2 \left| \frac{\text{Re}[X_1]}{(P+Q)} \right|^2 + 2 \left| \frac{\text{Im}[X_1]}{(P-Q)} \right|^2} \quad (13)$$

$$\text{相角: } \arg X = \arctan \left\{ \frac{(P+Q)\text{Im}[X_1]}{(P-Q)\text{Re}[X_1]} \right\} - \frac{f}{f_0} \pi$$

由于 DFT 算法的均值效应, 该算法估计得到的幅度值是对应时间窗中点的值, 相位值是对应时间窗首点的值。

1.2 频率跟踪算法原理分析

频率是电力系统的一个重要参数, 准确地测量电力系统实际频率对保证电力系统稳定运行和潮流分析具有重要意义。当前对信号频率的测量算法已有大量的研究^[17], 且精度已经达到 0.001 Hz。本文采用一种基于数学解析结合迭代和泰勒展开的方法来求得电力系统振荡时瞬时频率的快速算法。

由式(2)可知, 以间隔为 T_s 对 $x(t)$ 进行采样, 则第 k 、 $k+1$ 、 $k+2$ 、 $k+3$ 点对应的采样值的表达式为

$$\begin{cases} x(k) = A \cos(2\pi k T_s + \varphi_0) \\ x(k+1) = A \cos(2\pi f(k+1)T_s + \varphi_0) \\ x(k+2) = A \cos(2\pi f(k+2)T_s + \varphi_0) \\ x(k+3) = A \cos(2\pi f(k+3)T_s + \varphi_0) \end{cases} \quad (14)$$

将 $x(k)$ 与 $x(k+3)$ 相加的结果除以 $x(k+1)$ 与 $x(k+2)$ 相加的结果, 得到

$$\frac{x(k) + x(k+3)}{x(k+1) + x(k+2)} = 1 - 4 \sin^2(\pi f T_s) \quad (15)$$

将式(15)作 m 次计算并进行绝对值求和补偿, 再根据等比定理得到

$$1 - 4\sin^2(\pi f T_s) = \frac{\sum_{k=1}^m |x(k) + x(k+3)|}{\sum_{k=1}^m |x(k+1) + x(k+2)|} = a \quad (16)$$

式中: a 为 $x(k)$ 绝对值多项求和得到的参数; m 为分子分母绝对值相加的项数。利用绝对值多项求和的思想, 不仅可以消除分母过零点的影响, 还可以起到抑制噪声的作用。则信号实时频率的表达式为

$$f = \frac{1}{\pi T_s} \arcsin\left(\frac{\sqrt{1-a}}{2}\right) \quad (17)$$

为了检验该频率跟踪算法的精度, 选择 4 个不同类型的输入信号, 在 Matlab 上验证该算法的频率跟踪精度。表 1 列出了 4 个信号的不同特点以及最大估计误差; 图 2 是这 4 种信号在该测频算法下的仿真误差; 仿真时间为 1 s。

表 1 频率测量算法的跟踪精度

Table 1 Tracking precision of frequency measurement algorithm

信号编号	信号特点	最大频率误差/Hz
$x_1(t)$	频率为恒定值	3.4×10^{-11}
$x_2(t)$	频率呈正弦变化	4×10^{-4}
$x_3(t)$	频率呈线性变化	0.7×10^{-3}
$x_4(t)$	频率呈二次曲线变化	1.3×10^{-3}

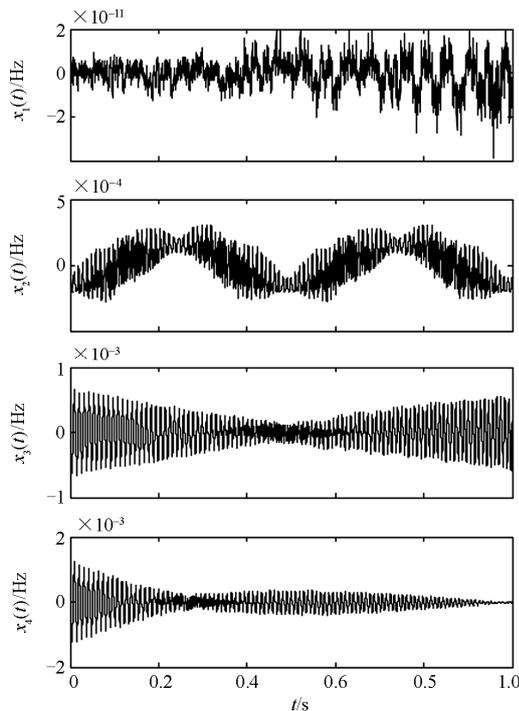


图 2 针对 4 个不同类型信号的频率跟踪误差

Fig. 2 Frequency tracking error of four different types of signals

由上述仿真图形可知, 在不同类型的输入信号下, 信号的频率变化越缓慢, 则测量精度越高, 特别地, 当信号仅发生频率偏移时, 其测量误差达到了 10^{-11} Hz 量级, 即使发生频率振荡等极端条件下, 该测频算法的最大频率误差在 0.001 Hz 以内, 满足 IEEE 标准所规定 0.002 Hz 的精度要求。

1.3 相量测量算法的误差分析

以上两小节完成了相量测量算法的理论推导过程, 实现了对电力信号参数诸如幅度、相角以及频率的高精度估计。本节主要在 Matlab 平台上仿真本算法的相量估计精度。根据 IEEE 测量标准^[18], 相量测量误差采用总相量误差 (Total Vector Error, TVE), 而国内发布的标准《电力系统同步相量测量装置检测规范》中采用幅值误差和相角误差来表征相量测量精度^[19-20], 图 3 给出了国内外两种标准之间的关系, 本文的误差分析采用国内标准。

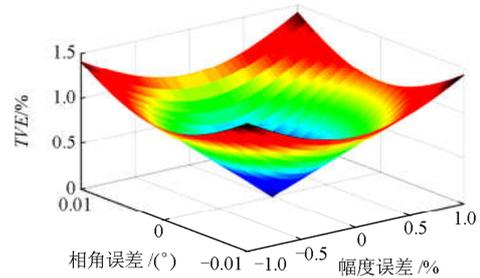


图 3 TVE 关于幅值误差和相角误差的关系

Fig. 3 TVE on the relationship between the amplitude error and angle error

图 4 与图 5 分别给出了信号实际频率 f 在 45~55 Hz、初相角在 $-\pi \sim \pi$ 条件下所对应相量估计的幅值误差百分比与相角误差的变化情况, 其中采样频率 $f_s = 200$ kHz, 窗函数长度 $N = 4000$ 。

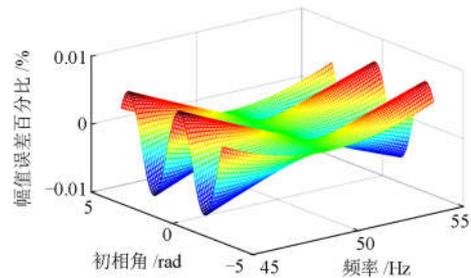


图 4 幅度误差关于初相角和频率的变化关系

Fig. 4 Amplitude error on the change of relationship between frequency and initial angle

由仿真结果可知, 当频率恒定时, 本算法的估计精度随着初相角的变化而呈现类似正弦规律的波动; 当初相角恒定时, 本算法的估计精度随着频偏

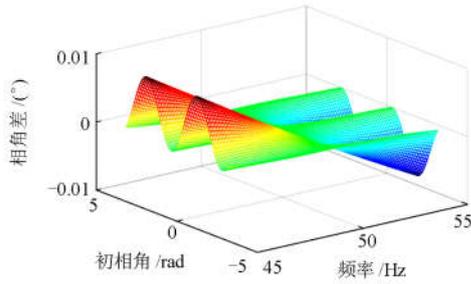


图 5 相角误差关于初相角和频率的变化关系
Fig. 5 Angle error on the change of the relationship between frequency and initial angle

增大误差呈现类似线性规律增大。在频偏为 ± 5 Hz 的极端情况下, 本算法的最大幅值误差为 0.006%, 最大相角误差为 0.007° , 相对于国内标准所规定的输电网幅度误差不超过 0.2%、相角误差不超过 0.2° 的精度要求, 提升了近两个量级。而在实际工程中, 电力系统工作时的信号频率波动范围为 50 ± 0.2 Hz, 此时对应的幅度误差在 0.0001% 以内, 相角误差在 0.0001° 以内。

2 算例仿真测试

目前国内外还没有针对配电网的相量测量制定相关标准, 但是研究人员可以根据目前已经具有的输电网量测标准为配电网的相量测量提供指导。由国内外颁布的测量标准^[16-17]可知, 测量性能主要包括静态性能、动态性能和响应时间。静态性能主要考察频偏测试、谐波测试以及噪声测试。动态性能主要考察信号的幅值、频率以及相角发生低频振荡情况下的调制测试。响应时间主要考察阶跃测试。

在 Matlab 软件下对本算法进行仿真测试, 仿真条件为: 采样频率 $f_s=200$ kHz, 数据窗长度 $N=4000$, 工频 $f_0=50$ Hz。

2.1 静态测试

在静态条件下, 电力信号的幅值和频率不发生变化, 主要关注噪声、谐波和频率偏移的情况。由于本文算法是基于 DFT 原理, DFT 算法具有很好的抑制谐波和抗噪性的优点, 故静态测试只考察频率偏移的情况。静态信号模型为

$$x(t) = \sqrt{2}A \cos(2\pi ft + \varphi_0) \quad (18)$$

则该信号在 $t=nT_s$ 时刻的理论相量为

$$\dot{X} = A \angle [2\pi(f - f_0)nT_s + \varphi_0] \quad (19)$$

图 6 给出了频率 $f=49$ Hz, 幅值 $A=1$, 初相角 $\varphi_0=\pi/6$ 条件下的相量估计误差随时间的变化情况, 仿真时长为 0.1 s。观察可知, 在频率偏移情况下, 相量误差曲线呈正弦规律变化, 且幅值误差百分比

小于 0.002%, 相角误差小于 0.002° 。因此, 本算法在静态条件下具有很高的测量精度。

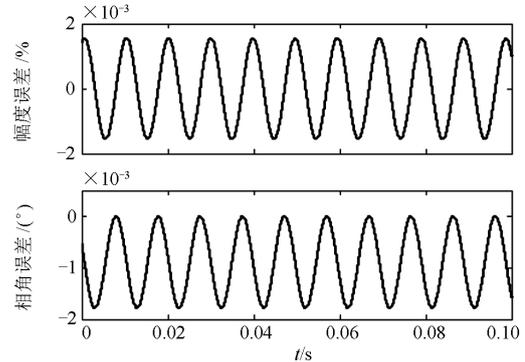


图 6 频率偏移条件下的测量误差
Fig. 6 Phasor measurement error under the condition of off-nominal frequency

2.2 动态测试

在电力系统动态条件下, 信号的幅值、频率或相位发生缓慢振荡, 反映到数学上对应调幅信号、调频信号以及调相信号。

当电力信号幅度发生振荡, 对应表达式为

$$x(t) = \sqrt{2}A[1 + k_a \cos(2\pi f_a t + \varphi_a)] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (20)$$

式中: A 为基波幅值; k_a 为幅度调制深度; f_0 为基波频率; f_a 为调制频率; φ_a 为调制部分初相角。此时, 该信号对应 $t=nT_s$ 时刻理论相量为

$$\dot{X} = A[1 + k_a \cos(2\pi f_a nT_s + \varphi_a)] \angle \varphi_0 \quad (21)$$

对式(20)利用积化和差公式, 得到

$$x(t) = \sqrt{2}A \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + \frac{\sqrt{2}}{2} k_a A \cos[2\pi(f_0 + f_a)t + (\varphi_0 + \varphi_a)] + \frac{\sqrt{2}}{2} k_a A \cos[2\pi(f_0 - f_a)t + (\varphi_0 - \varphi_a)] \quad (22)$$

幅度调制信号除了基频 f_0 分量外, 还有 $(f_0 \pm f_a)$ 的频率分量。图 7 给出了 $A=1$, $k_a=10\%$, $f_a=2$ Hz, $\varphi_a=0$, $\varphi_0=\pi/6$ 条件下的信号频率实时跟踪效果图, 由图 7 可知, 调幅信号的频率呈正弦规律振荡。图 8 给出的是调幅信号的测量误差, 其幅度误差百分比小于 0.0012%, 相角误差小于 0.0011° 。因此本算法在幅度振荡条件下具有很好的测量精度。通过比较图 7 与图 8 可知, 信号的实际频率偏移额定频率越大, 对应的测量误差也就越大, 该仿真结果与理论相吻合。

当电力信号频率发生振荡, 对应表达式为

$$x(t) = \sqrt{2}A \cos[2\pi f_0 t + \frac{f_d}{f_p} \sin(2\pi f_p t + \varphi_p) + \varphi_0] \quad (23)$$

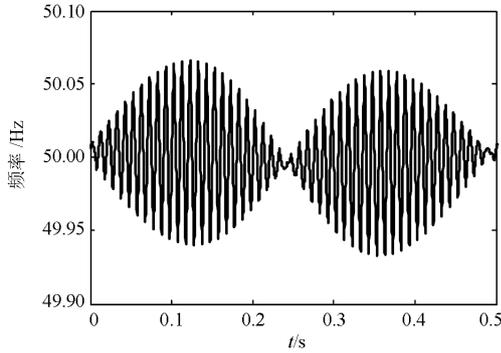


图 7 调幅信号的实时频率测量

Fig. 7 Real-time frequency of amplitude oscillation

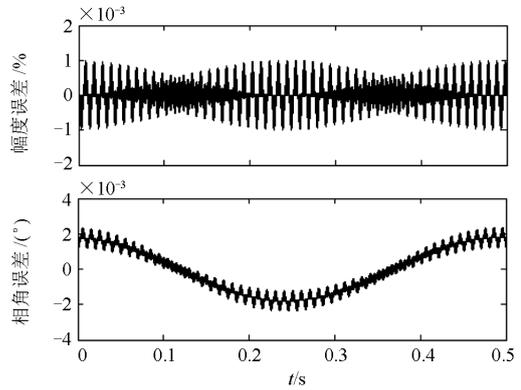


图 9 频率振荡条件下的测量误差

Fig. 9 Phasor measurement error under the condition of frequency oscillation

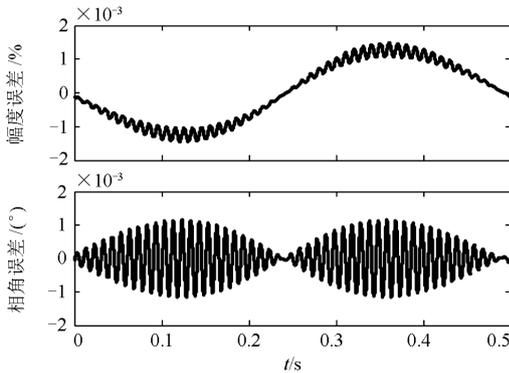


图 8 幅度振荡条件下的测量误差

Fig. 8 Phasor measurement error under the condition of amplitude oscillation

式中： f_d 为频率调制深度； f_p 为调制频率； φ_p 为调制部分初相位； f_0 为基波频率。此时，该信号对应 $t=nT_s$ 时刻理论相量值为

$$\dot{X} = A \left[\varphi_0 + \frac{f_d}{f_p} \sin(2\pi f_p n T_s + \varphi_p) \right] \quad (24)$$

由于信号的频率与相位之间呈微分关系，可得信号的实时理论频率为

$$f = f_0 + f_d \cos(2\pi f_p n T_s + \varphi_p) \quad (25)$$

图 9 给出了 $f_0=50$ Hz, $f_d=0.5$ Hz, $f_p=2$ Hz, $\varphi_p=0$ rad 条件下调频信号的测量误差，其幅度误差百分比小于 0.001%，相角误差小于 0.002°。因此，本算法在频率振荡的动态条件下具有很好的测量精度。

2.3 阶跃测试

阶跃突变主要模拟配电网中的接地故障、短路或者大扰动造成的电压电流信号变化情况。阶跃测试主要包括幅值阶跃测试和频率阶跃测试，验证该算法在信号发生突变情况下的响应时间。幅值阶跃测试信号为

$$x(t) = \sqrt{2} [A + A_1 \varepsilon(t - \tau)] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (26)$$

式中： A_1 为幅值突变大小； $\varepsilon(t)$ 为阶跃函数。频率阶跃测试信号为

$$x(t) = \sqrt{2} A \cos[2\pi(f_0 + f_1 \varepsilon(t - \tau))t + \varphi_0] \quad (27)$$

式中， f_1 为频率阶跃突变大小。由仿真结果可知，当 $A=1$, $A_1=1$, $\tau=0.2$ s, $f_1=0.5$ Hz 条件下，幅值阶跃测试的响应时间为 20 ms，频率阶跃测试的响应时间为 16 ms，远远小于标准里规定 30 ms，验证了本算法有足够快的响应速度。

3 相量测量软件平台

前两节提出一种适用于配电网的相量测量算法，并通过算例仿真分析可知该算法在静态和动态条件下具有很高的测量精度。为了验证该算法能否对电网模型实现相量测量的功能，本节提出在 Matlab/Simulink 平台上搭建相量测量软件平台。图 10 显示的是该软件平台的内部结构，以帮助研究人员可以在软件平台上理解相量测量过程以及验证相量测量算法。

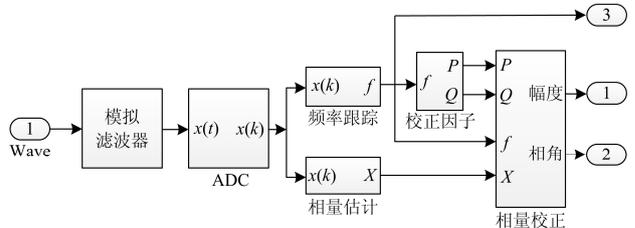


图 10 相量测量仿真器的内部结构

Fig. 10 Internal structure of the phasor measurement simulator

在 Matlab/Simulink 的 SimPowerSystems 工具箱中已经提供了多个标准电网模型，例如 IEEE 5 节点和 39 节点电网模型等等，图 11 显示的是 2 节点

10 kV 配电网仿真模型, 其中 PMU 为所搭建的相量测量模块。该电网模型主要分为电源、变压器、断路器、输电线、V-I 测量单元、故障和负载等 7 个

部分, 该模型可以仿真电力系统中不同的工作状态, 例如: 正常状态、单相接地故障、双相短路故障以及负载激增或骤降等等。

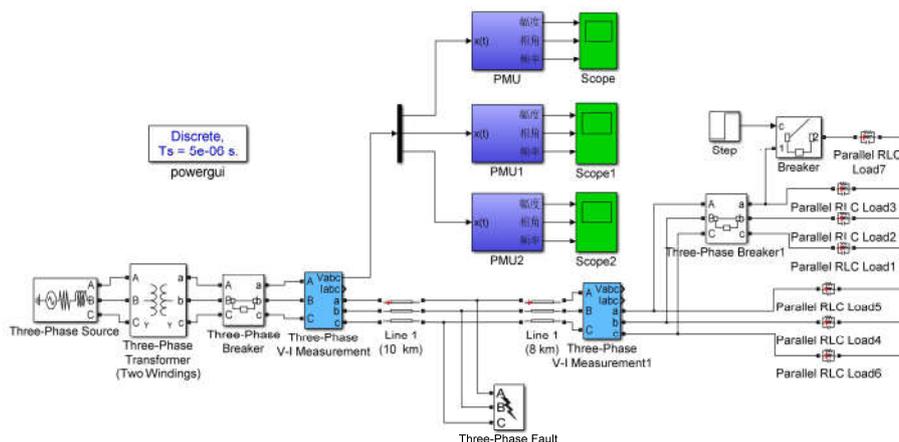


图 11 10 kV 的配电网模型

Fig. 11 10 kV distribution network model

结合电网模型和相量测量软件平台, 研究人员只需要在软件环境下, 通过 IEEE 多节点电网仿真模型实现相量测量, 掌握配电网的线路参数和实时运行状态。基于此, 在 Simulink 上搭建相量测量仿真器, 就可以在软件仿真平台上实现对相量测量技术以及更高级的应用(故障定位、状态估计等等)进行研究。例如可以把电力系统的工作状态设置成某种故障, 通过该仿真器提供实时量测数据, 运用阻抗匹配法、行波法或人工神经网络等故障定位算法, 进行故障类型识别或故障测距。

4 结语

随着新能源技术的发展, 本文针对配电网的结构特点, 提出一种适用于配电网的相量测量新算法。通过仿真分析, 可以得到以下结论:

1) 对信号采用非同步采样, 采样频率不随实际频率的变化而变化, 因而每一次的计算时窗大小保持恒定为 20 ms, 保证该算法具有较高的实时性。

2) 该算法是建立在 DFT 基础上的改进算法, 其继承了传统 DFT 算法的运算速度快的优点。算法运算复杂度小的特点, 有效降低了相量测量装置的成本。

3) 通过动态校正因子的思想, 保证该算法在静态、动态测试和阶跃测试条件下都具有非常优越的测量性能。

本文针对配电网相量测量算法性能的研究同时兼顾到响应时间、实时性以及测量精度 3 个方面的

考量, 结合当前诸如 Xilinx 公司推出的 7 系列板卡等高性能硬件产品, 保证该算法具有很很好的工程研究意义, 适合在工程中推广应用, 本团队的后续研究将会在配电网分布式同步相量测量装置上更进一步。

参考文献

- [1] 段刚, 严亚勤, 谢晓东, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 73-80.
DUAN Gang, YAN Yaqin, XIE Xiaodong, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 73-80.
- [2] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [4] ZHAO Jinqian, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real-time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 11pp.

- DOI 10.1186/s 41601-016-0013-1
- [5] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [6] ALEXANDRA V M, DAVID C, ALEX M, et al. Micro-synchphasors for distribution systems[C] // 2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, USA, April 19-22, 2013: 1-14.
- [7] 王宾, 孙华东, 张道农, 等. 配电网信息共享与同步相量测量应用技术评述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊): 1-7.
WANG Bin, SUN Huadong, ZHANG Daonong, et al. Review on data sharing and synchronized phasor measurement technique with application in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S): 1-7.
- [8] LIU Y L. A US-wide power systems frequency monitoring network[C] // 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, GA, Oct 29-30, 2006: 159-166.
- [9] LIN Z Z, LIU Y, JIA Y, et al. Dynamic performance test of single-phase phasor measurement units[C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit Michigan, USA, July 24-29, 2011: 1-7.
- [10] FARROKH A, MAHMUD F, AMIR S, et al. Synchrophasor measurement technology in power systems: panorama and state-of-the-art[J]. IEEE Access, 2014: 1607-1628.
- [11] NGUYEN C T, SRINIVASAN K, AMIR S, et al. A new technique for rapid tracking of frequency deviations based on level crossings[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(8): 2230-2236.
- [12] SUNGHAN K, MC N J. Tracking tremor frequency in spike trains using the extended Kalman smoother[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(8): 1569-1577.
- [13] 吴智利, 赵庆生, 陈惠英, 等. 低频采样下基于卡尔曼滤波的同步相量测量算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 94-99.
WU Zhili, ZHAO Qingsheng, CHEN Huiying, et al. A Kalman-filter based phasor measurement algorithm under low sampling frequency[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 94-99.
- [14] SERNA J A O. Reducing the error in phasor estimates from phasor lets in fault voltage and current signals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 856-866.
- [15] 张姝, 何正友, 何文, 等. 基于递归小波的相量测量算法[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 194-200.
ZHANG Shu, HE Zhengyou, HE Wen, et al. A recursive wavelet-based algorithm for phasor measurement[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 194-200.
- [16] 张晓丽, 许勇, 刘慧海, 等. 一种提高同步相量测量装置动态性能的新算法及其测试研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 48-54.
ZHANG Xiaoli, XU Yong, LIU Huihai, et al. Research of a new algorithm to improve dynamic performance for phasor measurement unit and test verification[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 48-54.
- [17] 沈健, 周斌, 张道农, 等. 提升 PMU 动态测量性能的若干方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 89-94.
SHEN Jian, ZHOU Bin, ZHANG Daonong, et al. Methods for improvement of dynamic performance of PMU[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 89-94.
- [18] IEEE standard for synchro phasors for power systems: IEEE Std C37. 118—2011[S]. New York, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [19] 张道农, 刘灏, 毕天姝, 等. 中外 PMU 静态标准及评估方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 140-145.
ZHANG Daonong, LIU Hao, BI Tianshu, et al. Comparison of the PMU static and dynamic standards and evaluation methods between Chinese standards and IEEE[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 140-145.
- [20] 全国电力系统管理及其信息交换标准化技术委员会. 电力系统同步相量测量装置检测规范: GB/T 26862—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

收稿日期: 2016-09-18; 修回日期: 2016-12-16

作者简介:

周治国(1977—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子实时仿真、嵌入式系统与半实物仿真; E-mail: zhiguozhou@bit.edu.cn

王毅(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网相量测量技术; E-mail: kinyee@163.com

张华良(1976—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为实时半实物仿真, 主动配电网. E-mail: zhanghualiang@sina.cn

(编辑 周金梅)