

低频采样下基于卡尔曼滤波的同步相量测量算法的研究

吴智利¹, 赵庆生¹, 陈惠英¹, 韩肖清¹, 郭贺宏²

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 国网晋中供电公司, 山西 晋中 030600)

摘要: 各种基于定间隔采样的传统相量测量算法在跟踪速度和测量精度上不能很好地统一, 在低频采样情况(每周波 4~8 个采样点)下提出一种基于线性卡尔曼滤波技术的 10 状态卡尔曼滤波模型, 用于实时跟踪电力系统的电压有效值、频率、频率变化率和初相角, 为系统提供精确的参数。结合二元泰勒展开公式, 推导出各个参数的计算公式, 并依据信号模型选取合适的时间区间保证算法对突变信号的响应速度。从采样频率、数据窗持续时间和算法对突变信号的跟踪精度方面对算法进行了讨论, 结果表明使用该算法可以在低频采样下获得较高的参数估计精度。

关键词: 低频采样; 卡尔曼滤波; 二元泰勒展开; 电力系统; 实时相量测量

A Kalman-filter based phasor measurement algorithm under low sampling frequency

WU Zhi-li¹, ZHAO Qing-sheng¹, CHEN Hui-ying¹, HAN Xiao-qing¹, GUO He-hong²

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Jinzhong Electric Power Company, Jinzhong 030600, China)

Abstract: In consideration of unfavorable integration between tracking speed and measurement precision of conventional phasor measurement methods based on various constant-interval sampling, a ten-state linear Kalman-filter model for tracking power system RMS voltage, frequency, frequency variation rate as well as initial phase angle under the condition of low sampling frequency (4~8 sampling points per cycle) is presented. The algorithm is derived using the second-order Taylor expansion formula, and then the formulas of parameters above are established. According to the signal model, an appropriate time interval is selected to guarantee the response speed of algorithm to signal mutation. Sampling frequency, data window duration, and tracking precision to mutation signals are studied. Simulation results show that the algorithm has higher parameter estimation accuracy at low sampling frequency.

This work is supported by Special Fund for International S & T Cooperation Projects of China (No. 2010DFB63200), Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 2010011024-1), and State Grid Project of Shanxi Electric Power Company (Shanxi Power Development [2014] No. 88).

Key words: low sampling frequency; Kalman filter; second-order Taylor expansion; power system; real-time phasor measurement

中图分类号: TM723; TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0094-06

0 引言

广域测量系统(WAMS)是一种有效的电网动态安全监控系统, 相量测量算法的精度直接影响到电力系统稳定控制、故障分析及继电保护等高级应用的准确性^[1]。常用的相量测量方法包括离散傅里叶变换(DFT)^[2-4]、小波变换^[5-6]、dq变换法^[7-8]以及以最小二乘法^[9-10]、卡尔曼滤波和最大似然估计为基础的线性或非线性的参数估计方法^[11-12]。卡尔曼滤

波是一种基于模型的最优估计方法, 是一个不断预测、修正的递推过程。由于其在求解时不需要存储大量的观测数据, 并且每次迭代运算量少, 有利于实现高速运算, 因此卡尔曼滤波被越来越多地应用于实时动态数据处理^[13]。文献[14]使用线性卡尔曼滤波器的误差序增益和误差协方差阵以减小计算量。文献[15]探讨了复数型扩展卡尔曼滤波(ECKF)算法在电力系统畸变信号频率估计中的应用, 但当算法收敛后, 卡尔曼增益和误差协方差阵被限定在很小的数值上, 影响了算法对突变信号的响应速度。文献[16]和[17]都使用两状态线性卡尔曼技术计算电压的幅值和相位, 但是无法直接算出频率, 因此文献[17]使用锁频环(FLL)计算频率并与卡尔曼方法相配合以减小模型误差。

基金项目: 国家国际科技交流与合作专项(2010DFB63200); 山西省自然科学基金(2010011024-1); 国网山西省电力公司科技项目资助(晋电发展[2014]88号)

考虑到上述问题, 本文在两状态卡尔曼滤波器模型的基础上引入频率和频率变化率参数(估计频率变化率的意义在于预测系统是否可能发生严重的频率骤降, 并在事故发生之前提供合理的规避方案^[18]), 建立了10状态的卡尔曼滤波模型, 并根据信号模型选取合适的时间区间提高算法对突变信号的响应速度。最后使用仿真算例验证算法有效性。

1 信号的10状态模型

假定在采样过程中频率随着时间的推移线性变动, 幅值在数据采样窗口内保持不变, 电压信号可以表述为

$$v(t) = V \sin(2\pi ft + \pi bt^2 + \phi) \quad (1)$$

式中: V 为电压峰值; f 为信号频率; b 为频率变化率, 单位为 Hz/s; ϕ 为信号初相角, 单位为 rad; t 为时间, 单位为 s。

公式(1)可以写作如下形式:

$$v(t) = (V \cos \phi) \sin(2\pi ft + \pi bt^2) + (V \sin \phi) \cos(2\pi ft + \pi bt^2) \quad (2)$$

使用多元泰勒展开公式将上述公式在 $f = f_0$ 和 $b = 0$ 附近进行展开, 展开后表达式如式(3)~式(5)所示:

$$v(t) = h_{11}(t)y_1 + h_{12}(t)y_2 + \dots + h_{110}(t)y_{10} \quad (3)$$

其中定义状态变量 $\mathbf{Y}(t)$ 为

$$\begin{cases} y_1 = V \cos \phi & y_2 = (f - f_0)V \cos \phi \\ y_3 = V \sin \phi & y_4 = (f - f_0)V \sin \phi \\ y_5 = -bV \sin \phi - 2\pi(f - f_0)^2 V \cos \phi \\ y_6 = bV \cos \phi - 2\pi(f - f_0)^2 V \sin \phi \\ y_7 = b(f - f_0)V \cos \phi \\ y_8 = b(f - f_0)V \sin \phi \\ y_9 = b^2 V \cos \phi & y_{10} = b^2 V \sin \phi \end{cases} \quad (4)$$

参数 $\mathbf{H}(t)$ 为

$$\begin{cases} h_{11}(t) = \sin 2\pi f_0 t & h_{12}(t) = 2\pi t \cos 2\pi f_0 t \\ h_{13}(t) = \cos 2\pi f_0 t & h_{14}(t) = -2\pi t \sin 2\pi f_0 t \\ h_{15}(t) = \pi t^2 \sin 2\pi f_0 t & h_{16}(t) = \pi t^2 \cos 2\pi f_0 t \\ h_{17}(t) = -2\pi^2 t^3 \sin 2\pi f_0 t \\ h_{18}(t) = -2\pi^2 t^3 \cos 2\pi f_0 t \\ h_{19}(t) = -(\pi^2 / 2)t^4 \sin 2\pi f_0 t \\ h_{110}(t) = -(\pi^2 / 2)t^4 \cos 2\pi f_0 t \end{cases} \quad (5)$$

应当注意的是, 在式(3)中, 仅仅只截取至泰勒展开式的一阶展开项, 抛弃二阶及高阶展开项。如果按照预先选定的采样间隔 Δt 对电压波形进行采样, 则式(3)中的时间 t 可以用第 k 步的采样时间

$k\Delta t$ 表示, 式(3)可写作:

$$v(k\Delta t) = \begin{bmatrix} h_{11}(k\Delta t) & h_{12}(k\Delta t) & \dots & h_{110}(k\Delta t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{10} \end{bmatrix} \quad (6)$$

或者写成矩阵形式为

$$z(k\Delta t) = \mathbf{H}(k\Delta t)\mathbf{Y}(k) + \omega(k) \quad (7)$$

其中: $z(k\Delta t)$ 为第 k 步采样时刻的采样值; $\mathbf{H}(k\Delta t)$ 为第 k 步采样时刻的测量矩阵; $\mathbf{Y}(k)$ 为第 k 步采样时刻的状态矩阵; $\omega(k)$ 为第 k 步采样时刻的随机噪声。

$\mathbf{H}(k\Delta t)$ 矩阵的取值取决于时间基准 $t = 0$ 、采样频率及泰勒展开公式中保留的项数。 $\mathbf{H}(k\Delta t)$ 可以预先进行离线计算再应用到之后的在线实时计算中。

假定系统的状态保持稳定(仅有每次采样时产生的随机误差), 那么相邻两次系统状态变量之间的关系表达式为

$$\mathbf{Y}(k+1) = \Phi(k)\mathbf{Y}(k) + \zeta(k) \quad (8)$$

其中: $\Phi(k)$ 为 10×10 的状态转移矩阵; $\zeta(k)$ 为状态更新方程误差阵。式(7)和式(8)分别是电力系统电压信号模型的测量更新方程和状态更新方程, 均以状态变量的形式表示。

综上所述, 状态量 $\mathbf{Y}(k)$ 及其内各个元素含义已知, 根据卡尔曼递推公式, 各个采样时刻的电压幅值、频率、频率变化率和电压相角的求取如下所示。在第 k 个采样点处电压信号的峰值估计式为

$$V(k) = \sqrt{y_1^2(k) + y_3^2(k)} \quad (9)$$

同时, 该采样点处的频率偏移估计式可以使用下述两个公式之一:

$$\Delta f(k) = (f - f_0) = \frac{y_2(k)}{y_1(k)} = \frac{(f - f_0)V \cos \phi}{V \cos \phi} \quad (10)$$

$$\Delta f(k) = (f - f_0) = \frac{y_4(k)}{y_3(k)} = \frac{(f - f_0)V \sin \phi}{V \sin \phi} \quad (11)$$

但是当 $V \cos \phi$ 或者 $V \sin \phi$ 的值偏小时, 使用式(10)或者式(11)得到的估计值会有较大的误差, 因此使用下述公式来得到频率偏移的精确值。

$$|\Delta f(k)| = |f - f_0| = \sqrt{\frac{y_2^2(k) + y_4^2(k)}{y_1^2(k) + y_3^2(k)}} \quad (12)$$

并使用式(10)和式(11)联合确定频率偏移量的正负:

$$\Delta f(k) = (f - f_0) = \frac{y_2(k) + y_4(k)}{y_1(k) + y_3(k)} \quad (13)$$

同样出于计算精度的考虑,第 k 次采样的频率变化率使用如下公式来计算:

$$b(k) = \frac{y_1(k)y_6(k) - y_3(k)y_5(k)}{y_1^2(k) + y_3^2(k)} \quad (14)$$

初相角的计算可采用下面的公式:

$$\phi(k) = -j \ln[(y_1(k) + jy_3(k)) / \sqrt{y_1^2(k) + y_3^2(k)}] \quad (15)$$

2 卡尔曼滤波公式

2.1 滤波器模型

卡尔曼的状态更新方程和测量值更新方程需要写成如式(7)和式(8)的形式,在获得先验估计值 $\bar{Y}(k)$ 以及先验估计方差 $\bar{P}(k)$ 后,卡尔曼滤波方程的一般递推步骤如下所示^[19]。

(1) 计算卡尔曼增益

$$K(k) = \bar{P}(k)H^T(k)[H(k)\bar{P}(k)H^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (16)$$

(2) 计算后验估计值的方差

$$P(k) = [I - K(k)H(k)]\bar{P}(k) \quad (17)$$

(3) 使用测量值校正先验估计值得到后验估计值

$$\hat{Y}(k) = \bar{Y}(k) + K(k)[z(k) - H(k)\bar{Y}(k)] \quad (18)$$

(4) 使用后验估计值推导下一次先验估计值及先验估计方差

$$\bar{Y}(k+1) = \Phi(k)\hat{Y}(k) \quad (19)$$

$$\bar{P}(k+1) = \Phi(k)P(k)\Phi^T(k) + Q(k) \quad (20)$$

当采样间隔固定时,式(16)、式(17)和式(20)是独立于测量值和估计值的,因此可以离线计算,只有式(18)和式(19)需要实时计算。

2.2 滤波器初始估计值

卡尔曼滤波需要使用一个先验估计值和对应的方差值作为滤波器的初始值进行后续的递推运算。比较简单的方法是对若干个测量值进行最小二乘估计求出状态量的初始估计值。使用下述方法,可以达到相同的精度。

$$\bar{Y} = [M^T M]^{-1} M^T Z \quad (21)$$

其中: M 是由 m 个采样点对应的 $H(t)$ 参数构成的 $m \times n$ 维观测方程矩阵; Z 是 $m \times 1$ 维当前测量值矩阵; \bar{Y} 是 $n \times 1$ 先验估计向量。与状态量初值对应的误差阵为

$$\bar{P} = [M^T M]^{-1} \quad (22)$$

2.3 滤波器迭代过程

观察观测方程系数矩阵式(5)及卡尔曼增益式(16)可知,随着时间 t 取值增大,卡尔曼增益值逐渐

降低,导致算法对信号突变的响应速度降低。为了避免这个问题,在迭代过程中,时间 t 不可取值过大。经验证在式(5)中 t 取值在 $0 \sim 0.04$ s 或 $0 \sim 0.06$ s 区间时,算法对突变信号的反应快速准确。以 $t \in [0, 0.04]$ 、采样频率 200 Hz 为例,在 0.04 s 内得到采样点称为一个数据窗,数据窗内依据卡尔曼公式进行迭代。迭代过程进入下一数据窗时,使用前一窗口末计算得到的最优估计值和方差作为本窗口的迭代初值,并强制将本窗口的时间参数 t 置零,继续卡尔曼迭代过程。当采样间隔固定时,可根据采样时间预先计算得到窗口内每个采样点对应的参数值 $H(k\Delta t)$,无需重复计算。计算过程如图 1 中曲线所示。

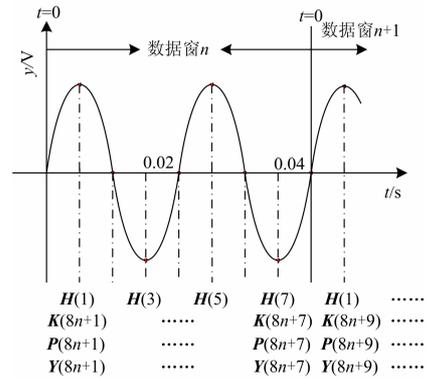


图 1 卡尔曼计算过程

Fig. 1 Kalman filter calculation process

图中 y 表示电压瞬时值; t 为时间; n 表示滤波过程中的第 n 个数据窗。 H 、 K 、 P 、 Y 与式(16)~式(20)中的含义相同。

2.4 算法适用范围

算例使用的源信号频率偏移范围为 $-0.2 \sim -1$ Hz、频率变化率为 $-0.05 \sim -1$ Hz/s,信号有效值为 220 V,初相角为 $\pi/3$ 。源信号的采样频率为 200 Hz,采样持续时间 0.35 s。图 2~图 5 显示了不同源信号下的参数估计结果。

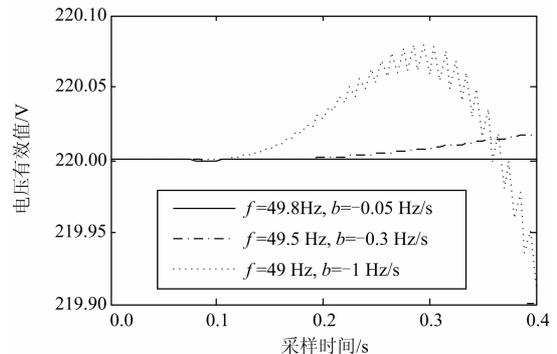


图 2 有效值估计值对比

Fig. 2 RMS estimations of different cases

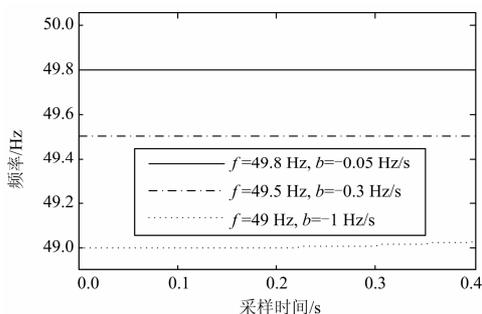


图3 频率估计值对比

Fig. 3 Frequency estimations of different cases

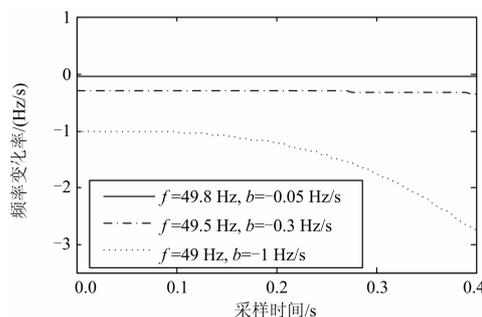


图4 频率变化率估计值对比

Fig. 4 Frequency variation rate estimations of different cases

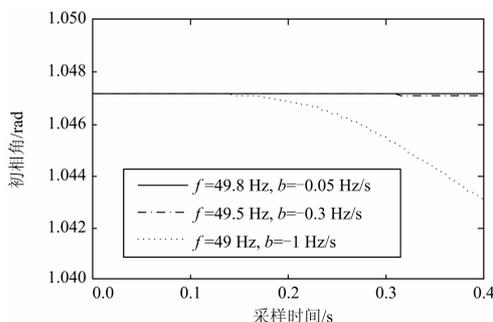


图5 相角估计值对比

Fig. 5 Phase estimations of different cases

根据仿真结果可得如下结论:

(1) 信号的10状态模型适用于小幅度的频率偏移和频率变化率, 在这种情况下, 估算得到的频率值、频率变化率、电压有效值、相角值与真实值几乎相同。

(2) 当频率偏移和频率变化率比较大时 ($\Delta f = -1$ Hz、 $b = -1$ Hz/s), 上述模型不再满足计算精度的要求, 需要在泰勒展开式中保留更多的项以保证估计结果的精度。

(3) 经验证, 在采样频率为200~400 Hz(源信号频率50 Hz)时, 算法结果受采样频率的影响不大, 频率变化率估计值对采样频率的变动最为敏感。当采样频率位于500~600 Hz时, 频率变化率参数的绝对误差达到 10^{-3} 级。随着采样频率的进一步提高, 算法估计值将围绕真实值做大幅度波动。基于此,

本算法更适用于200~400 Hz的低频率采样。

(4) 算法性能同时受到源信号频率和频率变化率的影响, 假定信号实际频率可用 $f = f_0 + bt$ 表示, 则随时间变化, 信号频率越接近工频则算法性能越好, 否则越差。对频率和频率变化率参数分别测试时可发现: 当 $b=0$ 时, 信号频率在工频信号 ± 1 Hz范围内或当 $f_0 = 50$ Hz时, 频率变化率在 ± 2 Hz/s范围内时, 算法仍可保证良好的精确性。

3 算法性能仿真

正常运行状态下电力系统母线电压是时刻变化的, 母线电压的三个参量中, 电压有效值和相位可能it发生较大幅度的非正常变化, 甚至是突变。算例使用上述信号波形对信号模型及其推导公式进行验证, 求取频率、频率变化率、电压有效值以及电压信号的相角。信号初相角均为 $\pi/3$, 采样频率为200 Hz, 采样时间1 s; 电压突变信号频率保持50 Hz不变, 电压有效值由220 V突然跌落至190 V; 相角突变信号频率保持50 Hz不变, 初相角由 $\pi/3$ 突变至 $\pi/2$; 以上两组信号突变的时间均位于0.2 s处; 另一组为频率线性变化, 信号频率在50 Hz的基础上以 $b=0.05$ Hz/s速度线性增加。计算结果如图6~图9所示, 实线表示电压有效值突降时的估计结果曲线; 点划线为相角突变时的估计结果曲线; 虚线为频率线性增加时的估计结果曲线。算法的估计误差参见表1。

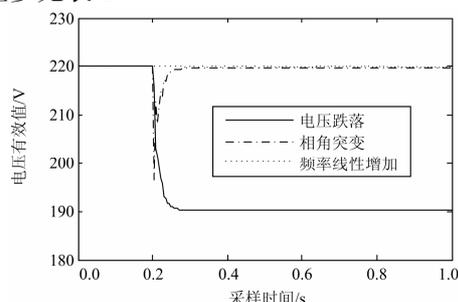


图6 有效值估计

Fig. 6 RMS estimations of different cases

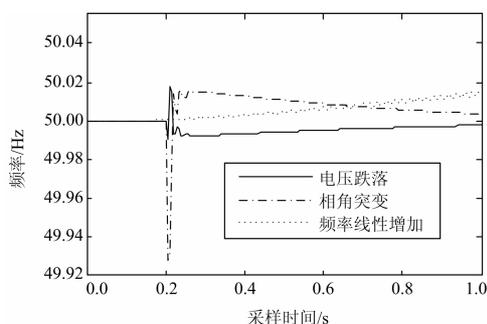


图7 频率估计

Fig. 7 Frequency estimations of different cases

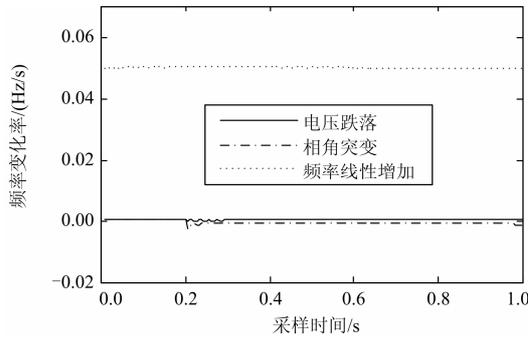


图 8 频率变化率估计

Fig. 8 Frequency variation rate estimations of different cases

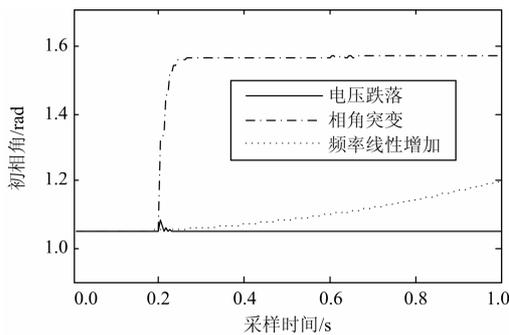


图 9 相角估计

Fig. 9 Phase estimations of different cases

表 1 算法的误差分析

Table 1 Data error of the algorithm

估计值	最大误差		
	电压跌落	相角突变	频率递增
有效值/V	1.49	-1.679	0.295
频率/Hz	-0.007 6	0.015 9	-0.01
频率变化率/ (Hz /s)	-2.45e-5	-0.001 3	-0.000 6
相角/rad	0.002 2	0.026 1	0.005

观察上述结果可以发现：(1)信号突变后算法各参数的估计值收敛至接近真实值约需 0.04 s；(2)有效值估计值能够快速准确跟踪信号变化，信号相角突变时对有效值估计有影响；(3)电压和相角突变对频率和相角参数的估计产生不同程度的影响，突变结束后相角估计值可以快速收敛到真实值，频率估计值在突变点处误差较大，0.04 s 后频率估计值最大误差不超过 0.02 Hz；(4)在上述三种情况下，频率变化率参数均能保持极高的估计精度；(5)相角估计值能够快速准确跟踪信号的初相角变化，信号幅值突变时对其影响不大；(6)在频率渐增情况下，算法能够准确跟踪信号的各个参数。

4 结语

本文中提出的线性卡尔曼滤波算法适用于低频采样下电压信号有效值、频率、频率变化率和初相角的估计，可以利用较低的采样频率得到较高精度的参数估计值。其中，频率变化率的估计可以预测系统中是否可能产生严重的频率骤降。由于滤波器算法简单，无需存储历史数据，采样率低，迭代运算量小，可以使 CPU 的计算负荷大为减少，达到实时跟踪的目的。本文给出了算法的适用范围，并从采样频率以及电力系统中的信号突变等方面考察了算法的准确性，结果表明在较低的采样率下，算法可以得到准确的参数估计结果。

参考文献

- [1] 麦瑞坤, 何正友, 薄志谦, 等. 动态条件下的同步相量测量算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 52-58.
MAI Rui-kun, HE Zheng-you, BO Zhi-qian, et al. Research on synchronized phasor measurement algorithm under dynamic conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 52-58.
- [2] 叶芳, 焦彦军, 周丹, 等. 一种基于傅立叶算法的高精度测频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 44-48.
YE Fang, JIAO Yan-jun, ZHOU Dan, et al. A high-accuracy algorithm of frequency measurement based on Fourier algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 44-48.
- [3] 王超, 汪芳宗. 一种高精度的电力系统相量测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 36-40.
WANG Chao, WANG Fang-zong. A high-precision algorithm for phasor measurement of power systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 36-40.
- [4] 王拔群, 周孟然. 一种基于傅式变换算法的系统频率变化求取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 54-57.
WANG Ba-qun, ZHOU Meng-ran. An algorithm for striking method of system frequency changes based on Fourier transform[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 54-57.
- [5] 张姝, 何正友, 何文. 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 Zheng-you, HE Wen. A recursive wavelet-based algorithm for phasor measurement[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 194-200.
- [6] REN J, KEZUNOVIC M. Elimination of DC offset in accurate phasor estimation using recursive wavelet transform[C] // 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference. 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest Romania, June 28th-July 2nd, 2009.
- [7] 李珊瑚, 杜雄, 王莉萍, 等. 解耦多同步参考坐标系电网电压同步信号检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 183-189.
- LI Shan-hu, DU Xiong, WANG Li-ping, et al. A grid voltage synchronization method based on decoupled multiple synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 183-189.
- [8] 常鲜戎, 王旋, 方学珍. 基波电流瞬时值检测及同步电流相量测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 60-66.
- CHANG Xian-rong, WANG Xuan, FANG Xue-zhen. Fundamental current instantaneous value detection and synchronized current phasor measurement method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 60-66.
- [9] CHUDAMANI R, VASUDEVAN K, RAMALINGAM C S. Real-time estimation of power system frequency using nonlinear least squares[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(3): 1021-1028.
- [10] 刘义成, 张学广, 景卉, 等. 电网电压正负序分量快速检测算法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 217-222.
- LIU Yi-cheng, ZHANG Xue-guang, JING Hui, et al. Fast detection algorithm of grid voltage positive and negative sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 217-222.
- [11] GIRGIS A A, PETERSON W L. Adaptive estimation of power system frequency deviation and its rate of change for calculating sudden power system overloads[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 585-594.
- [12] KUSLJEVIC M D. A simple recursive algorithm for simultaneous magnitude and frequency estimation[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(6): 1207-1214.
- [13] 曾富华, 汪远玲, 杨万麟. 一种基于扩展卡尔曼滤波器的频率及频率斜率估计算法[J]. 电讯技术, 2008, 48(3): 70-73.
- ZENG Fu-hua, WANG Yuan-ling, YANG Wan-lin. An algorithm for estimating frequency and frequency slope based on EKF[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(3): 70-73.
- [14] 张静, 徐政. 基于卡尔曼滤波误差的电能质量扰动检测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 25-30.
- ZHANG Jing, XU Zheng. Power quality disturbances detection based on Kalman filter residuals[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2006, 18(5): 25-30.
- [15] HUANG Chien-hung, LEE Chien-hsing, SHIH Kuang-jung, et al. Frequency estimation of distorted power system signals using a robust algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 41-51.
- [16] 任文琳, 赵庆生, 何志方. 基于卡尔曼滤波的电压扰动检测算法[J]. 水电能源科学, 2012, 30(11): 198-200, 217.
- REN Wen-lin, ZHAO Qing-sheng, HE Zhi-fang. Detection of voltage disturbance based on Kalman filter algorithm[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(11): 198-200, 217.
- [17] REZA M S, CIOBOTARU M, AGELIDIS V G. Frequency adaptive linear Kalman filter for fast and accurate estimation of grid voltage parameters[C] // Power System Technology (POWERCON). 2012 IEEE International Conference on Power System Technology, Oct 30, 2012-Nov 2, 2012, Auckland.
- [18] SOLIMAN S A, CHRISTENSEN G S, KELLY D H, et al. An algorithm for frequency relaying based on least absolute value approximation[J]. Electrical power System Research, 1990, 19(2): 73-84.
- [19] GREWAL M S, ANDREWS A P. Kalman filtering theory and practice using Matlab[M]. Third Edition. America: A John Wiley & Sons Inc Publication, 2008.
-
- 收稿日期: 2013-10-22; 修回日期: 2014-01-06
作者简介:
吴智利(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统建模与仿真; E-mail: lanyunvictor@126.com
赵庆生(1969-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制 and 电力系统建模与仿真; E-mail: zhaoqs1996@163.com
陈惠英(1965-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电工理论在电力系统的应用。