

基于复数卡尔曼滤波的电力系统对称分量估计

崔博文

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对实数域对称分量估计实时处理效率低的问题, 提出了一种基于复数 Kalman 滤波的电力系统正序谐波对称分量估计算法。利用对称分量理论获得了三相电力系统正序瞬时值对称分量, 通过相应变换获得复数数字信号模型, 根据需要估计的正序谐波对称分量, 获得相应的状态方程和观测方程, 利用复数 Kalman 滤波算法实现了正序谐波对称分量估计。仿真实验结果表明, 该算法可实时在线实现正序谐波对称分量估计。

[关键词] 电力系统; 复数卡尔曼滤波; 谐波; 对称分量; 状态方程

[中图分类号] TM 935. 21

Complex Kalman Filter Based Symmetrical Components Estimation for Power System

CUI Bo-wen

(School of Marine Engineering, Jimei University, Ximen 361021, China)

Abstract: The paper presents a new complex Kalman filter based method to estimate positive symmetrical (PS) harmonic components of power system. The theory of symmetrical component was used to obtain instantaneous PS component, and the complex numerical signal model of three phase power system was obtained by using transformation. State and observation equations are obtained according to the PS harmonic component to be estimated. The PS harmonic components were estimated by using complex Kalman filter. The simulation results show that the method presented in the paper can estimate the PS harmonic components accurately in real time.

Keywords: power system; complex Kalman filter; harmonics; symmetrical components; state equation

0 引言

电力系统信号大多为三相正弦信号, 当一组三相正弦信号幅值相等、相位相差 120° 时就认为三相电力系统是平衡的, 否则就认为三相电力系统不平衡。对称分量理论指出不对称三相电力系统信号可以分解为对称的正序、负序和零序等三种信号。当电力系统运行在已知频率状态时, 正序、负序和零序信号唯一取决于其幅值和相位, 这样, 电力系统的运行状态就由这三种信号的幅值和相位决定。因此, 对称分量理论就成为三相电力系统分析的重要工具。目前, 对称分量理论已经在电力系统元件的数字保护、谐波治理、故障分析等方面得到广泛应用^[1-8]。

[收稿日期] 2016-05-04

[修回日期] 2016-06-27

[基金项目] 福建省自然科学基金资助项目(2015J01640)

[作者简介] 崔博文(1966—), 男, 教授, 博士, 从事电力系统状态监控与参数估计研究。

El-Naggar^[9], Soliman^[10] 利用适当变换, 分别获得零序和正序状态方程, 直接应用 Kalman 滤波方法在实数域分别估计三相非对称系统的零序和正序对称分量。Paap^[11] 通过正交变换获取对称分量, 但无法获得构成对称分量的各次谐波分量。Irvani^[12] 和 Karimi-Ghartemani^[13] 分别利用锁相环 (phase-locked loop) 方法获得对称分量估计, 但无法获得期望的各次谐波分量。Alammari^[14] 首先利用 α - β 变换, 将不对称三相电压变换为两相电压, 再将两相电压变换到实数域, 获得实数域量测方程, 利用最小二乘估计方法获得正序对称分量, 最后通过相应的变换获得负序和零序对称分量。Andria^[15] 针对逆变器输出的复数域信号情况, 通过适当变化转换为实数域信号, 利用 Kalman 滤波方法, 在实数域对逆变器输出的三相电压信号实现了基本正序对称分量估计。

正序、负序本质是一种复数信号, 复数虽然可以转化为实数域问题进行处理, 但这往往会增加信号处理时间, 实时信号处理效率大大降低。本文在现有研究基础上, 直接在复数域进行信号处理, 利用复数 Kalman 滤波方法实现了正序对称分量多阶期望谐波分量的估计。

1 三相电力系统数字信号模型

1.1 瞬时正序对称分量

本文以三相电力系统电压信号为研究对象, 三相电压信号可表示为

$$\begin{cases} v_a(t) = \sqrt{2} V_a \sin(\omega t + \varphi_a), \\ v_b(t) = \sqrt{2} V_b \sin(\omega t + \varphi_b - 120^\circ), \\ v_c(t) = \sqrt{2} V_c \sin(\omega t + \varphi_c + 120^\circ). \end{cases} \quad (1)$$

三相电压系统对应的傅立叶级数可表示为

$$\begin{cases} v_a(t) = \sum_k \sqrt{2} V_{ak} \sin(k\omega t + \varphi_{ak}), \\ v_b(t) = \sum_k \sqrt{2} V_{bk} \sin(k\omega t + \varphi_{bk}), \\ v_c(t) = \sum_k \sqrt{2} V_{ck} \sin(k\omega t + \varphi_{ck}). \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 表示电力系统运行角频率; $k = 1, 2, \dots$, 表示谐波分量的次数; V_{ak} , V_{bk} 和 V_{ck} 为各相 k 次谐波分量幅值; φ_{ak} , φ_{bk} 和 φ_{ck} 为各相 k 次谐波分量相位。

令 $v_p(t)$, $v_n(t)$, $v_0(t)$ 分别表示三相电压系统对应的瞬时正序、负序和零序电压对称分量, 根据瞬时对称分量分析理论, 同时考虑式 (2) 中存在系数 $\sqrt{2}$, 不对称三相电力系统的电压信号利用对称分量可表示为

$$\begin{bmatrix} v_0(t) \\ v_p(t) \\ v_n(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中 $\alpha = e^{(j2\pi/3)} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ 。由于 $v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$ 都是实数, 而 α 和 α^2 为一对共轭复数, 因此 $v_p(t)$, $v_n(t)$ 为一对共轭复数。一旦获得了 $v_p(t)$, 即可同时获得 $v_n(t)$ 。

由式 (3) 可获得三相电压系统的正序瞬时值对称分量为

$$v_p(t) = (\sqrt{2/3}) [v_a(t) + \alpha v_b(t) + \alpha^2 v_c(t)] \quad (4)$$

对式 (4) 进行适当变换, 可以获得由线电压表示的瞬时值正序对称分量

$$v_p(t) = (\sqrt{2/3}) v_{ab}(t) + (1/(3\sqrt{2})) v_{bc}(t) + (j/\sqrt{6}) v_{bc}(t) \quad (5)$$

1.2 数字信号模型

利用相量方法, 三相电压系统各相电压的谐波分量可用谐波相量表示为

$$\begin{cases} \dot{V}_{ak} = V_{ak} e^{j\varphi_{ak}}, \\ \dot{V}_{bk} = V_{bk} e^{j\varphi_{bk}}, \\ \dot{V}_{ck} = V_{ck} e^{j\varphi_{ac}}. \end{cases} \quad (6)$$

把式 (6) 代入式 (2)，经过适当变换后有

$$v_p(t) = -j \sum_k \dot{V}_{pk} e^{jk\omega t} + j \sum_k \dot{V}_{nk}^* e^{-jk\omega t}. \quad (7)$$

式中 \dot{V}_{nk}^* 表示复共轭相量。假设需要估计的正序谐波分量最大阶数为 K 次，对式 (7) 进行离散化处理，可以获得三相电压系统数字信号模型

$$v_p(m) = -j \sum_{k=1}^K \dot{V}_{pk} e^{jk\omega m \Delta t} + j \sum_{k=1}^K \dot{V}_{nk}^* e^{-jk\omega m \Delta t}. \quad (8)$$

式中： $m = 0, 1, 2, \dots$ ，表示第 m 个采样值， Δt 为采样时间间隔。

2 复数 Kalman 滤波算法

2.1 电力系统状态方程和观测方程

定义系统待估计的状态变量为各阶正序对称分量

$$\mathbf{X}(n) = [x_1 \cdots x_{2K}]^T = [\dot{V}_{p1} \quad \dot{V}_{p2} \quad \cdots \quad \dot{V}_{pK}]^T \quad (9)$$

则系统状态方程可表示为

$$\mathbf{X}(n+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}(n) + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_K \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{X}(n) + \mathbf{u}(n) \quad (10)$$

式中， $\mathbf{X}(n+1) \in \mathbf{C}^{K \times 1}$ 表示 t_n 时刻的状态向量； $\mathbf{u}(n)$ 表示系统干扰；

根据式 (8) 表示的电力系统数字信号模型式，系统观测方程可表示为

$$y(n) = jv_p(m) = \sum_k \dot{V}_{pk} e^{jk\omega m \Delta t} - \sum_k \dot{V}_{nk}^* e^{-jk\omega m \Delta t} =$$
$$[e^{j\omega m \Delta t} \quad e^{j2\omega m \Delta t} \quad \cdots \quad e^{jK\omega m \Delta t}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_K \end{bmatrix} + v(n) = \mathbf{B}\mathbf{X}(n) + v(n). \quad (11)$$

式中 $v(n) = \sum_{k=1}^K \dot{V}_{pk} e^{jk\omega m \Delta t} - \sum_k \dot{V}_{nk}^* e^{-jk\omega m \Delta t}$ ，可以看作系统噪声干扰。

$\mathbf{u}(n), v(n)$ 的统计特性满足如下条件

$$E[\mathbf{u}(i)\mathbf{u}^T(k)] = \begin{cases} Q(k), & i = k, \\ 0, & i \neq k; \end{cases} \quad (12)$$

$$E[v(i)v^T(k)] = \begin{cases} R(k), & i = k, \\ 0, & i \neq k. \end{cases} \quad (13)$$

2.2 复数域 Kalman 滤波算法

Kalman 滤波是一种将状态空间引入随机估计理论而形成的一种状态空间估计算法。目前，多数研究者利用 Kalman 滤波算法进行的参数估计多集中于实数参数的估计，而且已经取得很多研究成果^[9-15]。但当需要估计的参数为复数时，传统的 Kalman 滤波算法就需要做适当的改变。

本文中待估计的状态变量为复数，传统的实数域 Kalman 滤波算法无法使用，此时的复参数的 Kalman 滤波算法可以表示为：

步骤 1 计算 Kalman 增益 $K(k)$

$$K(k+1) = P(k+1|k)B^H[BP(k+1|k)B^H + R(k+1)]^{-1};$$

(14)

步骤 2 利用观测方程计算状态估计

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)[y(k+1) - B\hat{X}(k+1)];$$

(15)

步骤 3 计算误差协方差矩阵

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - P(k+1|k)[P(k+1|k) + R(k+1)]^{-1}P(k+1|k);$$

(16)

步骤 4 计算一步预测误差方差矩阵

$$P(k+1|k) = A(k)P(k+1|k)A^H(k) + Q_k;$$

(17)

步骤 5 计算 $X(k+1)$ 的一步预测估计值

$$\hat{X}(k+1|k) = A\hat{X}(k|k)。$$

(18)

式中： A^H 、 B^H 分别表示矩阵 A 、 B 的复共轭。

3 仿真算例

为验证基于复 Kalman 滤波的对称分量估计方法，本文以图 1 所示的三相逆变器供电的电动机驱动系统为例，输入直流电压 $V_d=632\text{ V}$ ，采用规则采样法形成三相 PWM 波形，载波比为 18，调制系数 $M=0.85$ ，逆变器输出三相电源频率 $f=42.5\text{ Hz}$ 。为消除采集过程中的高次谐波影响，对采集信号低通滤波处理，限定最高谐波次数 $k_M=60$ ，取采样频率 $f_s=5440\text{ Hz}$ ，正序瞬时值对称分量实部和虚部见图 2。

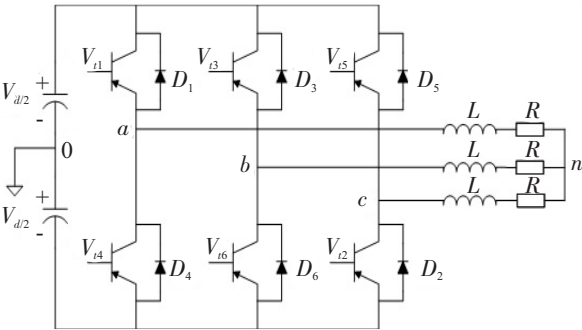


图 1 电动机变频调速系统
Fig. 1 Inverter-fed motor drive system

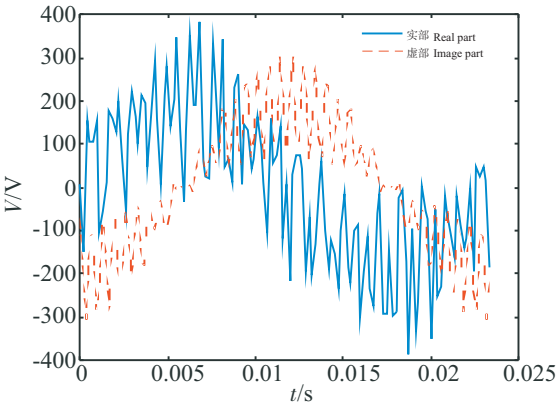


图 2 正序瞬时值对称分量实部和虚部
Fig. 2 Real and image parts of positive instantaneous symmetrical components

如果需要估计的正序对称分量分别为基波正序分量，16 次、20 次和 37 次谐波正序分量，则系统信号状态方程和观测方程分别为

$$X(n+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = X(n) + u(n);$$

(19)

$$y(n) = \begin{bmatrix} e^{j\omega_m\Delta t} & e^{j16\omega_m\Delta t} & e^{j20\omega_m\Delta t} & e^{j37\omega_m\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + v(n) = HX(n) + v(n)。$$

(20)

利用复数 Kalman 滤波算法获得的基波和各次谐波分量如图 3 表示。

从图 3 可以看出，正序对称分量基波和各次谐波分量幅值估计可以快速收敛到真值。为了验证复

数 Kalman 滤波的有效性，利用加窗 FFT 对瞬时正序对称分量信号进行谱分析，本文选择三项 Nuttall 窗作为抑制谱泄漏的窗函数，对应的谱分析结果见图 4。

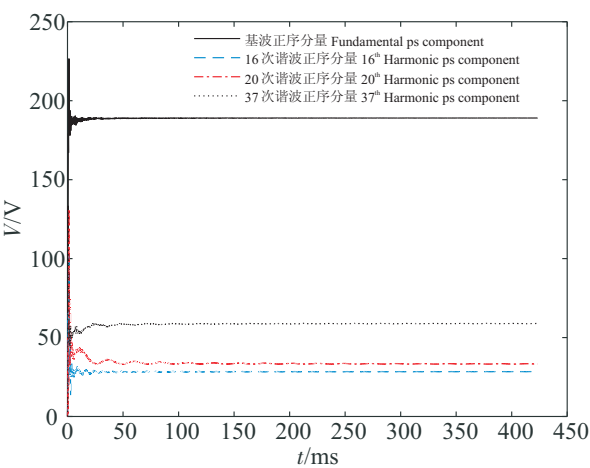


图 3 基波正序分量估计

Fig. 3 Estimation of fundamental positive symmetrical components

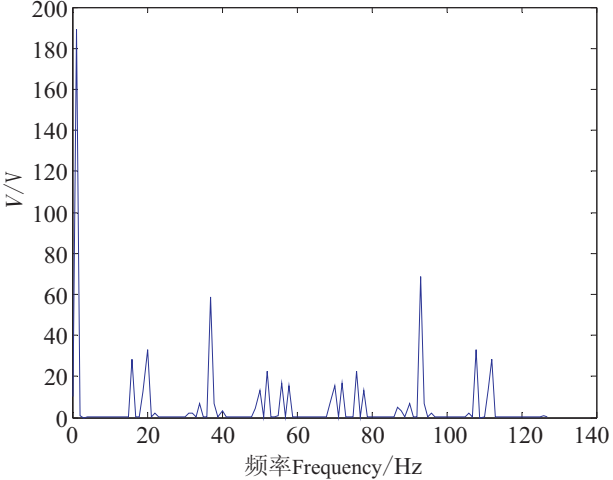


图 4 加窗 FFT 频谱分析

Fig. 4 Spectral analysis using window FFT

本文所提出的复数 Kalman 滤波算法获得的基波正序分量、各次谐波正序分量估计均值与加窗 FFT 谱分析结果见表 1。

从表 1 对照结果可以看出，本文方法与 FFT 分析方法相比，基波分量估计相对误差为 0.3%，而最大的 16 次正序对称谐波分量估计的相对误差也仅为 1.78%，因此本文提出的复数 Kalman 滤波算法能有效实现基波正序分量和各次谐波正序分量估计，估计精度较高。

表 1 正序分量估计结果

Tab. 1 Estimation results of positive symmetrical components

正序分量 Ps component	加窗 FFTWindow FFT	本文方法 Suggested method	相对误差 Relative error/%
基波 Fundamental ps component	189.0760	188.5074	0.30
16 次 16 th ps component	28.4419	27.9333	1.78
20 次 20 th ps component	33.1929	33.6896	1.50
37 次 37 th ps component	58.9725	58.9045	0.12

4 结论

本文利用对称分量理论建立了三相电压系统复数数字信号模型，根据需要估计的正序谐波对称分量，通过适当变换可以得到相应的三相电压系统状态方程和观测方程。在对应的状态方程和观测方程条件下，利用复数 Kalman 滤波实现了三相电压系统谐波正序分量估计。相对于实数域 Kalman 滤波算法将复数分解为两个实数进行估计，本文算法能有效减少估计时间。本文方法与加窗 FFT 结果对照，表明本文方法计算精度高，实时性强，可实时在线对三相电压系统进行参数估计，可实现三相电压系统状态监控及故障诊断。

[参考文献]

[1] STANKOVIC A M, AYDIN T. Analysis of asymmetrical faults in power systems using dynamic phasors. IEEE Trans on Power System, 2000, 15(3): 1062-1068.

[2] LOTFI-FARD S, JAWAD F, IRAVANI R. Improved overcurrent protection using symmetrical components. IEEE Trans

on Power Delivery, 2007, 22(2): 843-850.

- [3] STANKOVIC A M, LEV-ARI H, PERISIC M M. Analysis and implementation of model-based linear estimation of dynamic phasors. IEEE Trans Power Syst, 2004, 19(4): 1903-1910.
- [4] HSU S JOHN. Instantaneous phasor method for obtaining instantaneous balanced fundamental components for power quality control and continuous diagnostics. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1494-1500.
- [5] RAO U K, MISHRA M K, GHOSH A. Control Strategies for load compensation using instantaneous symmetrical component theory under different supply voltages. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(4): 2310-2317.
- [6] GU YUNJIE, LI WUHUA, HE XIANGNING. Analysis and control of bipolar LVDC grid with DC symmetrical component method. IEEE Trans Power system, 2016, 31(1): 685-694.
- [7] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 52-58.
- [8] 冯士刚, 艾芊, 徐伟华. 基于瞬时对称分量的负荷谐波建模. 高电压技术, 2008, 34(4): 783-787.
- [9] EI-NAGGAR K M. A fast method for identification of symmetrical components for power system protection. Electrical Power and Energy System, 2001, 23: 813-817.
- [10] SOLIMAN S A, EL-HAWARY M E. Application of Kalman filtering for online estimation of symmetrical components for power system protection. Electrical Power and Energy System, 1997, 38: 113-123.
- [11] GERARDUS C PAAP. Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 522-528.
- [12] IRAVANI M R, KARIMI-GHARTEMANI M. Online estimation of steady state and instantaneous symmetrical components. IEE Proc Gener Transm Distrib, 2003, 150(5): 616-622.
- [13] KARIMI-GHARTEMANI M, KARIMI H. Processing of symmetrical components in time-domain. IEEE Trans on Power System, 2007, 22(2): 572-572.
- [14] ALAMMARI R A, SOLIMAN S A, MOSTAFA M A, et al. Two digital filtering algorithms for fast estimation of symmetrical components in a power system: a static estimation approach. Electric Power Systems Research, 2003, 66: 133-137.
- [15] ANDRIA G, SALVATORE L. Inverter drive signal processing via DFT and EKF. IEE Proc Pt B, 1990, 137(2): 111-119.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)