电网电压正负序分量快速检测算法

刘义成 张学广 景卉 徐殿国
（哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院 哈尔滨 150001）

摘要 准确快速地获得电网电压的正负序分量是三相并网变流器稳定运行的前提。本文提出了一种基于复最小二乘的检测算法。该算法在含有高次谐波和随机噪声的情况下，可以准确快速地检测出电网电压的正负序分量的幅值和相角。由于算法的前提假设是已知电网频率，导致其不能对电网频率进行跟踪。卡尔曼滤波和最小二乘在算法上具有相似性，且含有状态方程和输出方程，可以估计出更多的电网信息。基于以上思路，本文对所提出算法进行了改进，改进后的算法不仅可以准确分离正负序分量，而且还能检测出电网频率的变化。仿真分析和实验结果验证了所提出算法的正确性和有效性。

关键词：电压故障检测 复最小二乘 扩展复卡尔曼滤波 协方差复位
中图分类号：TM614

Fast Detection Algorithm of Grid Voltage Positive and Negative Sequence Components

Liu Yicheng Zhang Xueguang Jing Hui Xu Dianguo
（Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China）

Abstract One of the important issues in the operation of three phase grid-connected converters is fast and precise detection of fundamental-frequency positive and negative sequence components present in three phase input voltages. A new detection algorithm based on complex least squares is proposed. This algorithm can detect amplitude and phase of grid voltage positive and negative sequence accurately and rapidly when the voltage contains high order harmonics and random noise. Because of the assumption that the frequency is known, the algorithm can't track grid frequency variation. Kalman filter has many similarities with least squares, and it contains state equation and output equation which can estimate more grid information. Based on the above ideas, this paper proposes an improved algorithm which not only separates positive and negative sequence components, but also detects frequency variation. The simulation and experimental results verify the correctness and validity of the algorithm.

Keywords：Voltage fault detection, complex least squares, extended complex Kalman filter, covariance resetting

国家自然科学基金（ 50877017），台达环境与教育基金会 《电力电子科教发展计划 》重点资助项目。
收稿日期 2010-10-25 改稿日期 2011-02-22

1 引言

近在风力发电系统运行过程中，需要时刻与电网保持同步，而准确检测电网电压的相角是保持同步的前提。在电网电压不对称的情况下，为了保证风力发电系统不脱网运行，又必须获取电压的负序分量[1-3]。因此研究电网电压 正负序分量快速检测技术具有重要的实用价值。该检测技术 对于有源滤波器、动态电压恢复器、 各种柔性交流输电控制装置的设计与控制同样具有一定的借鉴意义 [4-5]。

目前电网电压相量的检测技术主要可以分为以下几类：一类是通过各种滤波器和坐标变换进行检测的方法，其中比较典型的是 无时延的改进 dq 变换法[6]，改进的 αβ 变换检测法[7]等。此类方法 可以比

较快速地检测出电压跌落的幅值 和相角。但是因为这几种方法都是利用求导由已知电压得到虚拟电压 ，而在 DSP 中，因为 A-D 采样会引起正弦电压波形带有毛刺，给求导结果造成很大误差 。另一类为基于锁相环的电压相量检测方法，如基于双同步坐标系的改进锁相环[8]，可适用于检测不平衡电压下的基波正负序分量，但是在谐波含量较高时，锁相环的输出会产生较大的震荡。文献 [9]提出了增强型锁相环，其主要的优点就是改变了鉴相器的机制，更具有灵活性，可以提供更多信息，如幅值、相角等，但是暂态响应过慢。还有 一类为采用状态空间估计的方法，文献[10]提出了一种基于卡尔曼滤波的检测方法，可以同时对电压的幅值、相角、频率进行估计，但只是针对单相情况，不能估计电压的正负序分量。

本文首先分析了故障情况下电网电压的构成，然后利用 3/2 变换将其表示成复数形式的空间相量，再将空间相量表示成输出方程，最后用经典的最小二乘递推算法估计电压的正负序分量。由于算法的前提假设是已知电网频率，导致其不能对电网频率进行跟踪，而卡尔曼滤波和最小二乘在算法上具有相似性，且含有状态方程和输出方程，可以估计出更多的电网信息。基于以上思路，本文对所提出算法进行了改进，改进后的算法可以检测出电网电压正负序分量的幅值、相角、频率偏移。并且对 高次谐波和随机噪声 具有一定的鲁棒性。由于采用了协方差复位技术，使得算法的动态响应速度加快。为了论证算法的有效性，给出了仿真分析和实验结果。

2 算法基本原理

2.1 复数形式的电压相量

在电力系统中，只考虑三相三线制系统，是不存在零序分量的，所以可以将零序分量忽略。无零序分量的不平衡三相电压可以表示成以下 离散形式

$$\begin{cases} V_{\mathrm{a}}(k)=V_{\mathrm{m}}^{+}\sin(\omega k\Delta T+\varphi^{+})+ \\ \qquad V_{\mathrm{m}}^{-}\sin(-\omega k\Delta T+\varphi^{-})+\epsilon_{\mathrm{a}}(k) \\ V_{\mathrm{b}}(k)=V_{\mathrm{m}}^{+}\sin(\omega k\Delta T+\varphi^{+}-2\pi/3)+ \\ \qquad V_{\mathrm{m}}^{-}\sin(-\omega k\Delta T+\varphi^{-}-2\pi/3)+\epsilon_{\mathrm{b}}(k) \\ V_{\mathrm{c}}(k)=V_{\mathrm{m}}^{+}\sin(\omega k\Delta T+\varphi^{+}+2\pi/3)+ \\ \qquad V_{\mathrm{m}}^{-}\sin(-\omega k\Delta T+\varphi^{-}+2\pi/3)+\epsilon_{\mathrm{c}}(k) \end{cases} \tag{1}$$

式中， ω 表示电网角频率； V_{m}^{+}、V_{m}^{-} 表示电压正负序分量的幅值； φ^{+}、φ^{-} 表示电压正负序分量的初始相角； ΔT 表示采样间隔； k 表示采样瞬时值；$\epsilon_{\mathrm{a}}(k)$、$\epsilon_{\mathrm{b}}(k)$、$\epsilon_{\mathrm{c}}(k)$ 表示随机噪声和高次谐波的任意组合。电网电压在 αβ坐标系下的分量为

$$\begin{pmatrix} V_{\alpha}(k) \\ V_{\beta}(k) \end{pmatrix}=\frac{2}{3}\begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} V_{\mathrm{a}}(k) \\ V_{\mathrm{b}}(k) \\ V_{\mathrm{c}}(k) \end{pmatrix} \tag{2}$$

根据上式可以获得一个复电压相量

$$\begin{aligned} V(k)&=V_{\alpha}(k)+\mathrm{j}V_{\beta}(k) \\ &=V_{\mathrm{m}}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega k\Delta T+\varphi^{+})}+V_{\mathrm{m}}^{-}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-\omega k\Delta T+\varphi^{-})}+\eta(k) \end{aligned} \tag{3}$$

式中，第一项和第二项分别表示电网电压的正负序相量，第三项表示随机噪声和高次谐波经过坐标变换后的合成 相量。

2.2 基于复最小二乘的检测方法

首先假设电网频率是已知的， 然后将式（3）表示成

$$V(k)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega k\Delta T}V_{\mathrm{dq}}^{\mathrm{p}}+\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega k\Delta T}V_{\mathrm{dq}}^{\mathrm{n}}+\eta(k) \tag{4}$$

式中

$$\begin{cases} V_{\mathrm{dq}}^{\mathrm{p}}=V_{\mathrm{m}}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi^{+}}=V_{\mathrm{d}}^{\mathrm{p}}+\mathrm{j}V_{\mathrm{q}}^{\mathrm{p}} \\ V_{\mathrm{dq}}^{\mathrm{n}}=V_{\mathrm{m}}^{-}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi^{-}}=V_{\mathrm{d}}^{\mathrm{n}}+\mathrm{j}V_{\mathrm{q}}^{\mathrm{n}} \end{cases} \tag{5}$$

下标 d 和 q 代表在同步旋转坐标系下的变量 ；上标 p 和 n 分别代表正序和负序分量 。将式（4）表示的三相不平衡电压变换成 矩阵形式

$$V(k)=\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}+\eta(k) \tag{6}$$

式中

$$\begin{cases} \boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}=\left(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega k\Delta T},\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega k\Delta T}\right) \\ \boldsymbol{\theta}=\begin{pmatrix} V_{\mathrm{m}}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi^{+}} \\ V_{\mathrm{m}}^{-}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi^{-}} \end{pmatrix} \end{cases} \tag{7}$$

如果把式（6）看成观测方程，则 $\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}$ 为估计出来的复电压值， $\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}$ 为已知的复数形式的行向量，$\boldsymbol{\theta}$ 为待估计的参数向量。在实际应用中，必须通过观测来得到复电压值，而 观测信息中往往含有 高次谐波和噪声。所以观测到的只能是含有干扰的复电

压值 $V(k)$。为了获得参数的估计值，可以采用带遗忘因子的递推复最小二乘算法。递推最小二乘算法是一种典型的应用于信号提取的自适应滤波算法，此算法具有良好的抑制噪声的能力，不计及噪声统计特性的影响。对输入向量相关矩阵本征值范围内的变化不敏感。同样的信号处理问题，使用复数形式，可以减小信号处理时间，增强算法的实时性。而且物理意义更加清晰。选择价值函数为

$$J[\boldsymbol{\theta}(k)]=\sum_{j=0}^{k}\lambda^{k-j}\left(V(j)-\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(j)\boldsymbol{\theta}(j)\right)^{*\mathrm{T}}\left(V(j)-\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(j)\boldsymbol{\theta}(j)\right) \tag{8}$$

式中，λ 为遗忘因子，$\lambda\in(0,\ 1]$；上标“*”和“T”分别表示一个复数矩阵的共轭和转置。为了求得使价值函数最小化的 $\boldsymbol{\theta}$，使用式（9）所示的带遗忘因子的递推最小二乘法。

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)=\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)+\boldsymbol{K}(k)\left[V(k)-\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)\right]\\ \boldsymbol{K}(k)=\boldsymbol{P}(k-1)\boldsymbol{h}(k)\left[\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{P}(k-1)\boldsymbol{h}(k)+\lambda\right]^{-1}\\ \boldsymbol{P}(k)=\lambda^{-1}\left[\boldsymbol{I}-\dfrac{\boldsymbol{P}(k-1)\boldsymbol{h}(k)\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(k)}{\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{P}(k-1)\boldsymbol{h}(k)+\lambda}\right]\boldsymbol{P}(k-1)\end{cases} \tag{9}$$

下面讨论遗忘因子对检测效果的影响。在时变系统中，为了能不断修正参数，必须防止估计误差协方差矩阵 $\boldsymbol{P}(k)$ 衰减到零，从上式看出 $\boldsymbol{P}(k)$ 的更新过程多了 λ^{-1} 一项。当 $0<\lambda<1$ 时，可以有效地阻止 $\boldsymbol{P}(k)$ 趋于零。λ 越小，老数据对估计值的影响就越小，从而跟踪时变参数的能力就越强，但是稳态精度会相应降低，估计值容易受到噪声干扰而误差加大。λ 越大，旧数据的可信度也越大，检测精度随之提高，对噪声具有一定的鲁棒性，但是动态响应变慢。实际应用中，需要在动态响应和稳态精度两方面折中考虑。在下面的仿真分析中，还会进一步讨论如何选取参数 λ，以取得理想的检测效果。递推算法要想工作，必须设置初始参数值。通常的做法就是直接将初始参数取为

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{\theta}}(0)=\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}\\ \boldsymbol{P}(0)=\pi_0\boldsymbol{I}\end{cases} \tag{10}$$

式中，π_0 为初始误差协方差常数，$\pi_0>0$；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。通过迭代可求得 $\boldsymbol{\theta}$ 的估计值，也即电网电压的正负序分量的幅值和初始相角，但有时正序 dq 轴分量和负序 dq 轴分量更常用。可通过两者的关系式来相互推导。两者的关系如下：

$$\begin{cases}V_{\mathrm{m}}^{+}=\sqrt{\left(V_{\mathrm{d}}^{\mathrm{p}}\right)^2+\left(V_{\mathrm{q}}^{\mathrm{p}}\right)^2}\\ \varphi^{+}=\arctan\left(\dfrac{V_{\mathrm{q}}^{\mathrm{p}}}{V_{\mathrm{d}}^{\mathrm{p}}}\right)\\ V_{\mathrm{m}}^{-}=\sqrt{\left(V_{\mathrm{d}}^{\mathrm{n}}\right)^2+\left(V_{\mathrm{q}}^{\mathrm{n}}\right)^2}\\ \varphi^{-}=\arctan\left(\dfrac{V_{\mathrm{q}}^{\mathrm{n}}}{V_{\mathrm{d}}^{\mathrm{n}}}\right)\end{cases} \tag{11}$$

2.3　基于复卡尔曼滤波的检测方法

传统的递推最小二乘算法有良好的抑制噪声的能力，但在非稳态环境下跟踪能力变弱，导致误差加大。并且以上算法是在假设频率已知的情况下进行的，一旦频率发生变化，将导致算法失去稳定性。卡尔曼滤波和最小二乘之间存在一一对应的关系，卡尔曼滤波与最小二乘相比，多了一个状态方程。所以引入卡尔曼滤波的一步预测估计和新的状态转移矩阵，可以实现对电网频率的跟踪。接下来把式（3）表示成标准状态方程的形式，然后应用扩展复卡尔曼滤波来进行状态估计。首先把离散的观察向量 $\boldsymbol{V}(k)$ 表示成如下状态空间的形式

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}(k+1)=\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}(k))\\ \boldsymbol{V}(k)=\boldsymbol{Y}(k)=\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{\eta}(k)\\ \boldsymbol{X}(k)=\left(X_1(k),\ X_2(k),\ X_3(k)\right)^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{12}$$

式中的 $\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}(k))$、$\boldsymbol{H}$ 分别为

$$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{X}(k))=\left(X_1(k),\ X_1(k)X_2(k),\ \frac{X_3(k)}{X_1(k)}\right) \tag{13}$$

$$\boldsymbol{H}=\left(0,\ 1,\ 1\right) \tag{14}$$

其中 $X_1(k)$，$X_2(k)$，$X_3(k)$ 为

$$\begin{cases} X_1(k)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega\Delta T} \\ X_2(k)=V_{\mathrm{m}}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega k\Delta T+\varphi^{+})} \\ X_3(k)=V_{\mathrm{m}}^{-}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-\omega k\Delta T+\varphi^{-})} \end{cases} \tag{15}$$

从以上各式可以看出状态 向量的第一个分量中含有电压频率的信息 ； 第二个分量中含有正序分量的幅值和相角的信息 ； 第三个分量中含有负序分量的幅值和相角的信息 。如式（12）所示，三相不平衡电压已经表示成了非线性状态方程的形式 。然后利用扩展卡尔曼滤波的迭代算法 ，以获得状态向量的估计值。经典的扩展卡尔曼滤波 迭代方程为

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}(k\mid k-1)=\boldsymbol{\Phi}(k-1)\boldsymbol{P}(k-1\mid k-1)\boldsymbol{\Phi}^{*\mathrm{T}}(k-1) \\ \boldsymbol{K}(k)=\boldsymbol{P}(k\mid k-1)\boldsymbol{H}^{*\mathrm{T}}(k)\mathrm{g} \\ \qquad \left[\boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{P}(k\mid k-1)\boldsymbol{H}^{*\mathrm{T}}(k)+\boldsymbol{R}_k\right]^{-1} \\ \boldsymbol{P}(k\mid k)=\left[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}(k)\boldsymbol{H}(k)\right]\boldsymbol{P}(k\mid k-1) \\ \hat{\boldsymbol{X}}(k\mid k-1)=\varphi\left[\hat{\boldsymbol{X}}(k-1\mid k-1)\right] \\ \hat{\boldsymbol{X}}(k\mid k)=\hat{\boldsymbol{X}}(k\mid k-1)+ \\ \qquad \boldsymbol{K}(k)\left[Y(k)-\boldsymbol{H}(k)\hat{\boldsymbol{X}}(k\mid k-1)\right] \end{cases} \tag{16}$$

其中 $\boldsymbol{\Phi}(k-1)$ 定义为

$$\boldsymbol{\Phi}(k-1)=\left.\frac{\partial\varphi}{\partial\boldsymbol{X}}\right|_{\boldsymbol{X}(k-1)=\hat{\boldsymbol{X}}(k-1\mid k-1)} \tag{17}$$

式中， $\boldsymbol{K}(k)$ 为卡尔曼增益矩阵； $\boldsymbol{P}$ 为估计误差协方差矩阵； $\boldsymbol{H}$ 为观察向量。

由于使用的是复数域下的滤波方程 ，所以矩阵的转置需要改为共轭转置 。在此算法中，估计误差协方差矩阵 $\boldsymbol{P}$ 和观测噪声方差阵 $\boldsymbol{R}_k$ 的初始值选取非常重要，关系到算法的稳定性和收敛速度 。一般情况下 $\boldsymbol{R}_k$ 取为单位矩阵 $\boldsymbol{I}$。而 $\boldsymbol{P}$ 取为 $\pi_0\boldsymbol{I}$，π_0 为初始误差协方差常数 。通常 π_0 为一个很大的正实数。

2.4 协方差复位技术

当以上两种递推算法第一次收敛以后，估计参数趋向于真实值，这时，估计误差协方差矩阵 $\boldsymbol{P}(k)$ 中的元素值会变得很小。如果电网电压再一次发生突变，修正项将失去原有的修正能力，从而使递推算法收敛缓慢，甚至出现发散。为了加快算法的跟踪速度，使其具有连续的修正能力，这里采用了估计误差协方差矩阵复位技术。基本原理就是防止估计误差协方差矩阵 $\boldsymbol{P}(k)$ 趋于零。具体做法如下：首先确定一个阈值， 当估计误差大于 所取阈值时，那么就将估计误差协方差矩阵 $\boldsymbol{P}(k)$ 复位成初始值 $\pi_0\boldsymbol{I}$。这样，每次电网电压发生突变时，算法都具有最初的修正能力。

本文采用滞环比较的方法来决定复位时刻，滞环的宽度由电压中含有的谐波和噪声决定。例如干扰噪声的含量如果为基波分量的 10%，则可将滞环的宽度选为基波幅值的 30%，这样可以防止协方差矩阵的频繁复位。 e_{H}、e_{L} 分别为复位和置位协方差矩阵的阈值，当估计误差大于 e_{H} 时，则将协方差矩阵复位成初始值，直到估计误差小于 e_{L} 时，才停止复位。引入滞环的目的就是保证滤波器的稳定运行。

3 仿真分析

首先对基于复最小二乘的检测算法进行仿真分析。仿真参数如下：e_{H} 设为基波幅值的 20%，e_{L} 设为基波幅值的 0.2%，采样频率为 5kHz，λ =1，π_0 =1000。如图 1a 所示，电网电压发生了严重的不平衡，由故障前的单位正序基波变成了故障后的单位负序基波，在此基础上又多加入了 10%的 5 次谐波分量，2.5%的 7 次谐波分量。图 1b 和图 1c 为估计出的电网电压的正序 dq 轴分量和负序 dq 轴分量，可见算法在故障后 10ms 以内收敛到稳态。可以满足诸如风电场低电压穿越、DVR、UPS 对检测时间的要求。

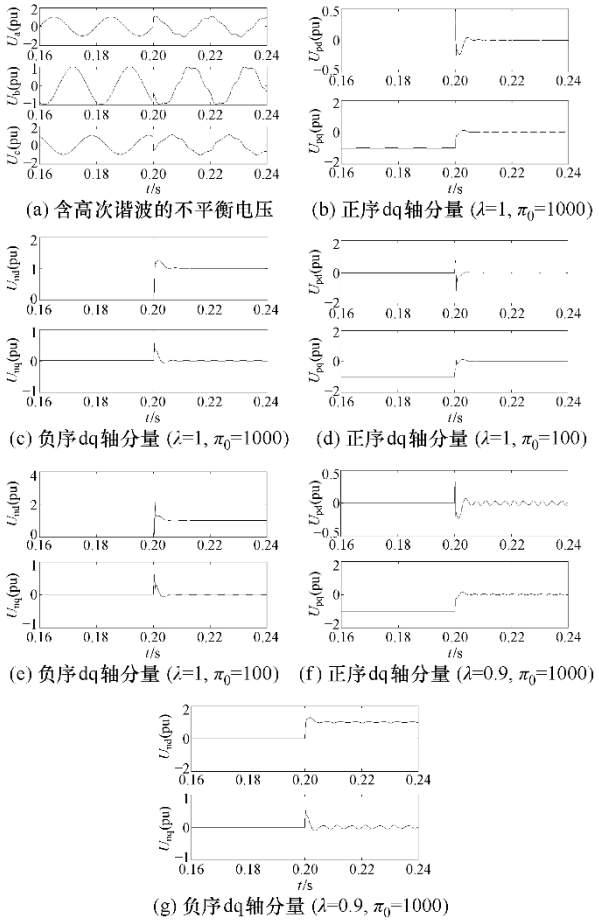


图 1　复最小二乘算法的仿真结果

Fig.1　Simulation results of complex least squares algorithm

接下来考察初始误差协方差常数 π_0 对检测速度的影响。图 1d 和图 1e 所示为 π_0=100 时的检测结果。与图 1b 和图 1c 相比可得，π_0 的大小影响算法的动态响应速度，π_0 越大，动态响应速度越快 。而图 1f 和图 1g 为λ =0.9 时的检测结果，与图 1b 和图 1c 相比可得，λ 影响稳态精度，λ 越大，稳态精度越高。下表所示为正序电压 d 轴分量的稳态误差占峰值的百分比。可以看出， 稳态精度与遗忘因子λ 成正比，而与 初始误差协方差常数 π_0 无关。

表　不同参数值下的稳态误差

Tab.　Steady-state error with different parameters

初始误差协方差常数 π_0	遗忘因子 λ			
	1	0.98	0.95	0.9
1000	0.004	0.006	0.015	0.038
500	0.004	0.006	0.015	0.038
200	0.004	0.006	0.015	0.038
100	0.004	0.006	0.015	0.038

下面对基于复卡尔曼滤波的检测算法进行仿真分析。仿真参数设置如下： 采样频率 10kHz，$\boldsymbol{R}_k$ =1， π_0 =1000。e_H 设为基波幅值的 20%，e_L 设为基波幅值的 0.2%。电网故障电压 如图 2a 所示：故障前，电网电压中含有单位正序分量和 10%的负序分量；故障 后，正序分量的 幅值突变到标幺值的 50%，且相角跳变了 π/2，负序分量的 幅值也突变到 50%。而频率由 50Hz 跳到 60Hz。可见在 1s 时，电网电压的正负序分量的幅值、相角、频率同时发生了变化。图 2b～图 2f 为检测出的电网电压的幅值、相角、频率信息，各个变量均可在 0.01s 左右检测出来。但是频率检测出现了比较大的超调，这是由于一步预测向量和真 实值相差较大引起的 。

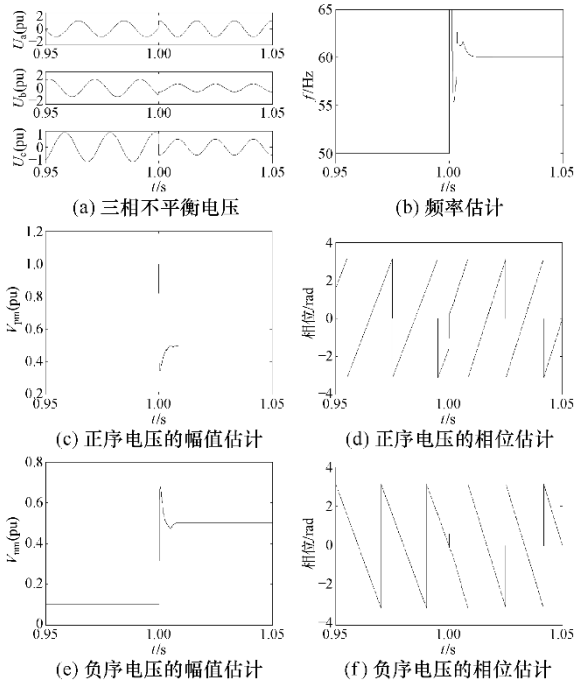


图 2　复卡尔曼滤波算法的仿真结果

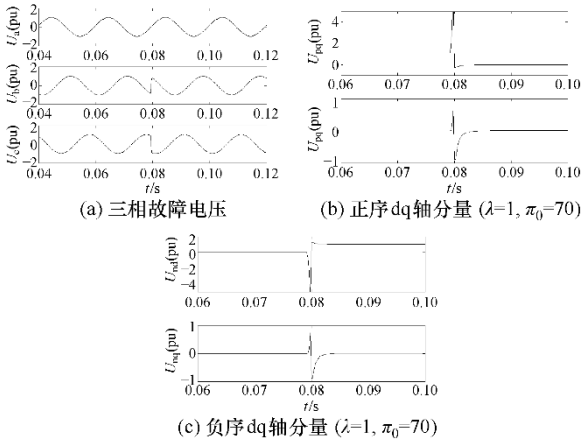
Fig.2　Simulation results of complex Kalman filter algorithm

4　实验验证

本节在实验平台上进一步验证了 所提算法的正确性和有效性。首先在 DSP 芯片 TMS320F2812 上用 C 语言编程实现了 所提出的算法，然后利用 Chroma 61705 高效三相可编程交流电源模拟出各种电网故障情况 。所得实验数据 存储在 DSP 的 RAM 区中，然后在 Matlab 环境下进行处理 。

图 3 所示为基于复最小二乘算法的实验结果。实验中采样频率设为 5kHz，遗忘因子取为 1，初始误差协方差常数 取为 70，电压基准值为 100V。

从图 3a 可以看出，电网电压由故障前的单位正序基波变成了故障后的单位负序基波，且不含谐波。如图 3b 和图 3c 所示，算法在大约 5ms 左右即可检测出电网电压的正负序分量。之所以将 初始误差协方差常数取得较小，是为了保证算法的数值稳定性。



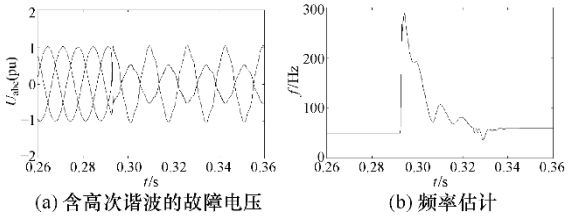
(a) 三相故障电压 (b) 正序dq轴分量 (λ=1, π_0=70)

(c) 负序dq轴分量 (λ=1, π_0=70)

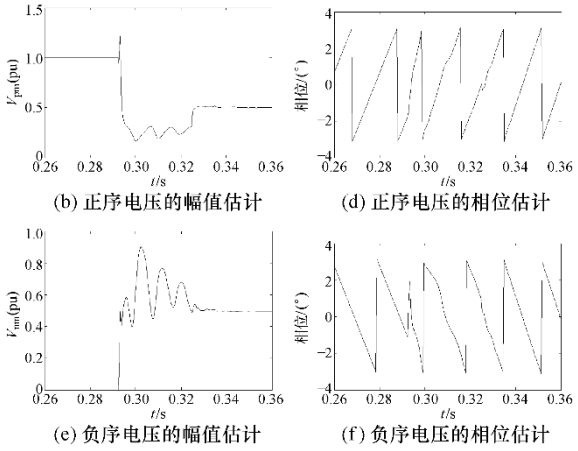
图 3 复最小二乘算法的实验结果

Fig.3 Experimental results of complex least squares algorithm

图 4 所示为基于复卡尔曼滤波的检测算法的实验结果，电压基准值为 100V。故障发生时电压的幅值、相角、频率都发生了突变，且含有 幅值为 10%的 5 次谐波、幅值为 2.5%的 7 次谐波。由于卡尔曼滤波的计算量较大，所以这里将 DSP 的采样周期设为 2.5kHz，为了防止算法在迭代的过程中产生发散，π_0 的值取为 40。这些都将使动态响应速度减慢。从图中看出，算法大约经过两个电网周期收敛到稳态。



(a) 含高次谐波的故障电压 (b) 频率估计



(b) 正序电压的幅值估计 (d) 正序电压的相位估计

(e) 负序电压的幅值估计 (f) 负序电压的相位估计

图 4 复卡尔曼滤波算法的 实验结果

Fig.4 Experimental results of complex Kalman filter algorithm

5 结论

针对现有电网电压故障检测算法存在动态响应速度慢和抗谐波能力差等问题，本文提出了基于复最小二乘的电压正负序分量检测算法，并对影响算法检测效果的参数进行了分析，得到以下结论。

（1）算法的稳态精度与初始误差协方差常数无关，其主要由遗忘因子决定，遗忘因子越大，检测精度越高。

（2）此方法可以在半个电网周期内准确检测出电压的正负序分量的幅值和相角，可以将其应用在对检测速度要求较高的场合，如风电场低电压穿越等。

（3）为了进一步跟踪电网频率的变化，对所提算法进行了改进，改进后的算法可以准确检测出正负序分量的幅值、相角和频率偏移。

参考文献

[1] Chen S Z, Cheung N C, Wong K C, et al. Integral sliding-mode direct torque control of doubly-fed induction generators under unbalanced grid voltage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 356-368.

[2] Yazdani A, Iravani R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1620-1629.

[3] Hu Jiabing, He Yikang. Modeling and control of grid-connected voltage-sourced converters under generalized unbalanced operation conditions[J]. IEEE

Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 903-913.

[4] Shu Z, Guo Y, Lian J. Steady-state and dynamic study of active power filter with efficient FPGA-based control algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1527-1536.

[5] Li Y W, Blaabjerg F, Vilathgamuwa D M, et al. Design and comparison of high performance stationary-frame controllers for DVR implementation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 602-612.

[6] 赵国亮，刘宝志，肖湘宁，等. 一种无时延的改进 d-q 变换在动态电压扰动识别中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(7): 53-57.
Zhao Guoliang, Liu Baozhi, Xiao Xiangning, et al. Application of improved d-q transform without time delay in dynamic voltage disturbance identification[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 53-57.

[7] 张庆超，肖玉龙. 一种改进的电压暂降检测方法 [J]. 电工技术学报 , 2006, 21(2): 123-126.
Zhang Qingchao, Xiao Yulong. An improved detection method of voltage sag[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 123-126.

[8] Rodriguez P, Pou J, Bergas J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.

[9] Ghartemani M K, Reza Iravani M. A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1263-1270.

[10] Huang C H, Lee C H, Shih K J, et al. Frequcncy estimation of distorted power system signals using a robust algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 41-51.

作者简介:刘义成　男，1985 年生，博士研究生，研究方向为风力发电技术。张学广　男，1981 年生，博士，讲师，研究方向为可再生能源发电技术。