

DOI: 10.7667/PSPC151333

基于无迹 Kalman 滤波的基波分量提取

吕思颖, 黎丹, 要航, 裴昂

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对全波 Fourier 和 Kalman 滤波算法在提取基波分量时对频率偏移敏感和直流偏移量抑制能力差的缺点, 提出了一种新的基波分量提取算法。首先以故障信号的直流偏移量、基波角频率和基波分量作为状态变量, 建立信号的非线性状态空间模型。然后采用无迹 Kalman 滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)在信号的非线性模型基础上估计出基波分量。此外, 滤波算法还能够实时估计出信号的直流偏移量和基波频率。通过多个算例仿真对算法进行验证与测试, 仿真结果证实了算法的可行性和有效性。仿真结果表明, 算法对频率突变和直流偏移量突变具有良好的适应性, 能快速准确地提取出基波分量。

关键词: 基波分量提取; 直流偏移量; 基波角频率; 非线性状态空间模型; 无迹 Kalman 滤波

Fundamental component extraction based on unscented Kalman filter

LÜ Siying, LI Dan, YAO Hang, PEI Chan

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming at the full-wave Fourier and Kalman filter algorithms' shortcomings of sensitive to frequency changes and poor ability of DC offset component reduction in the extraction of the fundamental component, a new fundamental component extraction algorithm is presented. First of all, this paper defines the DC offset component, fundamental angular frequency, fundamental component of the fault signal as state variables, and establishes the nonlinear state space model. Then, the Unscented Kalman Filter (UKF) is adopted to estimate the fundamental component based on the nonlinear model of signal. In addition, the filter algorithm is able to estimate the DC offset component and fundamental frequency in real-time. Several numerical simulations are carried out to testify the proposed algorithm and the results validate the algorithm's feasibility and effectiveness. The simulation results show that the algorithm is adaptive to the sudden changes of frequency and DC offset component, and it can extract the fundamental component quickly and accurately.

Key words: fundamental component extraction; DC offset component; fundamental angular frequency; nonlinear state space model; UKF

0 引言

在电力系统微机保护算法中, 如何有效滤除故障信号中的暂态噪声并快速准确地提取出电参量是国内学者研究热点问题^[1-8]。目前普遍采用全波和半波 Fourier 算法^[9-11]求取故障信号的基波分量进行故障判断。全波和半波 Fourier 无法滤除信号中的衰减直流分量和非整数次谐波分量, 对频率偏移比较敏感, 对测量噪声抑制能力差, 计算时间长, 响应速度慢。Girgis 等人将 Kalman 滤波引入到微机保护领域, 以期望提高滤波算法的精度和速度^[12-13]。

Kalman 滤波^[10-11,14]将各次谐波视为噪声, 将衰减直流分量作为状态变量进行估计, 能够有效抑制各次谐波和衰减直流分量, 且算法只需要当前周期的采样值, 计算量和储存量小, 能够实时在线计算。

但是, 传统的 Kalman 滤波普遍采用的线性状态空间方程没有考虑恒定直流分量以及频率偏移, 影响滤波算法的估计精度和对频率偏移的适应性。文献[15]建立了含有直流偏移量和基波角频率的非线性状态模型, 对状态方程线性化后采用线性的强跟踪 Kalman 滤波器估计状态, 由于采用了线性化过程, 降低了滤波器的估计精度。和扩展 Kalman 滤波、强跟踪 Kalman 滤波相比, UKF^[16-17]不需要对非线性系统进行线性化, 具有更高的估计精度,

因此被广泛应用于非线性随机系统的状态估计。

针对基于 Fourier 变换或 Kalman 滤波等滤波算法的不足, 本文建立含有直流偏移量和基波角频率的信号非线性状态空间模型, 利用无迹 Kalman 滤波算法提取信号的基波分量, 通过多个算例仿真对算法进行验证和测试。

1 信号的状态空间模型

考虑非线性离散系统, 其状态方程为

$$\mathbf{X}_{k+1} = f(\mathbf{X}_k) + \mathbf{W}_{k+1} \quad (1)$$

观测方程为

$$\mathbf{Z}_k = h(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_k \quad (2)$$

式中: k 是采样周期数; $\mathbf{X}_k \in \mathbf{R}^n$ 是状态向量; $\mathbf{Z}_k \in \mathbf{R}^m$ 是观测向量; $f(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 分别是非线性的状态函数和观测函数; 过程噪声 $\mathbf{W}_k \in \mathbf{R}^n$ 和观测噪声 $\mathbf{V}_k \in \mathbf{R}^m$ 是互不相关、均值为零、服从高斯分布的白噪声, 协方差矩阵分别为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 。

假设电网的电压或电流信号 $s(t)$ 只包含直流分量和基波分量, 其离散时间表达式为

$$s_k = A_{0,k} + A_{1,k} \sin(\omega_k k T_s + \theta_{1,k}) \quad (3)$$

式中: T_s 为采样周期; $A_{0,k}$ 为直流偏移量; $A_{1,k}$ 为基波幅值; $\theta_{1,k}$ 为基波相角; ω_k 为基波角频率。

定义系统状态变量 $x_{4,k} = A_{1,k} \sin(\omega_k k T_s + \theta_{1,k})$, $x_{3,k} = A_{1,k} \cos(\omega_k k T_s + \theta_{1,k})$, $x_{2,k} = \omega_k$, $x_{1,k} = A_{0,k}$ 。假设第 k 个采样周期到第 $k+1$ 个采样周期, 信号没有发生突变, 可认为 $A_{0,k+1} \approx A_{0,k}$, $A_{1,k+1} \approx A_{1,k}$, $\omega_{k+1} \approx \omega_k$, $\theta_{1,k+1} \approx \theta_{1,k}$ 。则在第 $k+1$ 个采样周期的状态变量 $x_{3,k+1}$ 可近似为

$$x_{3,k+1} = A_{1,k+1} \sin(\omega_{k+1} k T_s + \omega_{k+1} T_s + \theta_{1,k+1}) \approx A_{1,k} \sin(\omega_k k T_s + \omega_k T_s + \theta_{1,k}) =$$

$$x_{3,k} \cos(x_{2,k} T_s) + x_{4,k} \sin(x_{2,k} T_s)$$

同理, 状态变量 $x_{4,k+1}$ 可近似为

$$x_{4,k+1} \approx -x_{3,k} \sin(x_{2,k} T_s) + x_{4,k} \cos(x_{2,k} T_s) \quad (5)$$

考虑过程噪声 \mathbf{W}_{k+1} , 得到系统状态方程用式(1)

表示, 其中: $\mathbf{X}_k = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$,

$$f(\mathbf{X}_k) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \cos(x_2 T_s) + x_4 \sin(x_2 T_s) \\ -x_3 \sin(x_2 T_s) + x_4 \cos(x_2 T_s) \end{bmatrix}_k。$$

实际的电压或电流信号还包含谐波分量和测量噪声, 将这些量的总和视为观测噪声 \mathbf{V}_k 。则在式(3)的基础上, 得到系统观测方程用式(2)表示, 其中 $\mathbf{Z}_k = [s_k]$, $h(\mathbf{X}_k) = [1 \ 0 \ 1 \ 0] \mathbf{X}_k$ 。

2 无迹 Kalman 滤波

2.1 算法原理

考虑非线性离散系统, 其状态方程和观测方程分别为式(1)和式(2)。UKF 算法主要有三个步骤: 具体如下:

Step1: Sigma 采样

根据上一周期的状态估计值 $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 和协方差矩阵估计值 $\hat{\mathbf{P}}_{k-1}$ 采集 $2n+1$ 个 Sigma 粒子 $\{\chi_i\} (i=0, 1, \dots, 2n)$, 并计算分配到每个 Sigma 粒子的均值和协方差的权重系数 w_i^m 和 $w_i^c (i=0, 1, \dots, 2n)$ 。计算公式如下:

$$\begin{cases} \chi_{i,k-1} = \hat{\mathbf{X}}_{k-1} & i=0 \\ \chi_{i,k-1} = \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \boldsymbol{\Psi}_i & i=1, \dots, n \\ \chi_{i,k-1} = \hat{\mathbf{X}}_{k-1} - \boldsymbol{\Psi}_i & i=n+1, \dots, 2n \\ \lambda = \alpha^2 (n + \kappa) - n \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} w_0^m = \frac{\lambda}{\lambda + n} \\ w_0^c = \frac{\lambda}{\lambda + n} + 1 - \alpha^2 + \beta \\ w_i^m = w_i^c = \frac{1}{2(\lambda + n)} & i=1, \dots, 2n \\ \lambda = \alpha^2 (n + \kappa) - n \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{\Psi}_i = \left(\sqrt{(n+\lambda) \hat{\mathbf{P}}_{k-1}} \right)_i$ 为 $(n+\lambda) \hat{\mathbf{P}}_{k-1}$ 矩阵 Cholesky 分解的第 i 列; $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ 控制采样点的分布状态, 决定采样点与均值的离散程度; κ 的作用是保证 $(n+\lambda) \hat{\mathbf{P}}_{k-1}$ 为一个半正定矩阵, 通常选择 $\kappa=0$ 或 $3-n$; 参数 β 用来描述状态变量的先验分布信息, 对于状态变量是单变量且符合高斯分布的情况, β 的最优值是 2。

Step2: 预测

状态预测: $\chi_{i,k|k-1} = f(\chi_{i,k-1})$

计算状态预测的均值: $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \chi_{i,k|k-1}$

预测协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})(\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})^T + \mathbf{Q}_k$$

Step3: 更新

$$\text{更新观测值: } \mathbf{Z}_{i,k|k-1} = h(\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1})$$

$$\text{计算观测值平均值: } \hat{\mathbf{Z}}_k = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \mathbf{Z}_{i,k|k-1}$$

计算自协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{P}}_{zz} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\mathbf{Z}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_k)(\mathbf{Z}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_k)^T + \mathbf{R}_k$$

计算互协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{P}}_{xz} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})(\mathbf{Z}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_k)^T$$

$$\text{计算 UKF 增益: } \mathbf{K}_k = \hat{\mathbf{P}}_{xz} \hat{\mathbf{P}}_{zz}^{-1}$$

$$\text{状态更新: } \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_k)$$

$$\text{更新协方差矩阵: } \hat{\mathbf{P}}_k = \hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \hat{\mathbf{P}}_{zz} \mathbf{K}_k^T$$

2.2 电参量提取

利用 UKF 算法从电压/电流观测值中估计出状态变量 $\hat{\mathbf{X}}_k = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4]^T$, 直流偏移量估计值 $\hat{A}_{0,k}$ 、频率的估计值 \hat{f}_k 、基波幅值的估计值 $\hat{A}_{1,k}$ 和基波相角的估计值 $\hat{\theta}_{1,k}$ 通过式(9)-式(12)计算得到。

$$\hat{A}_{0,k} = \hat{x}_1 \quad (9)$$

$$\hat{f}_k = \hat{x}_2 / 2\pi \quad (10)$$

$$\hat{A}_{1,k} = \sqrt{\hat{x}_3^2 + \hat{x}_4^2} \quad (11)$$

$$\hat{\theta}_{1,k} = \tan^{-1}(\hat{x}_4 / \hat{x}_3) \quad (12)$$

3 数值仿真实验

本节进行 3 个算例仿真, 采用 UKF 算法提取三种不同测试信号的基波分量, 并和传统的全波 Fourier 算法进行对比。定义电流测试信号:

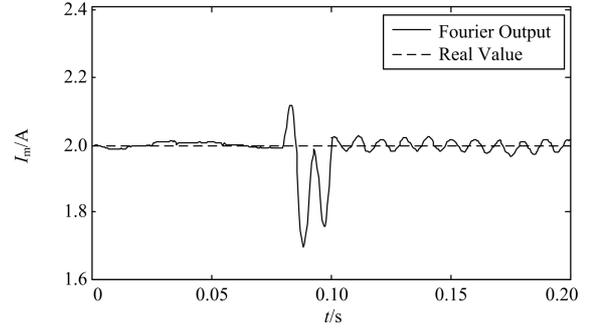
$$i(t) = I_0 + I_m \sin(\omega t + \theta_m) + v \quad (13)$$

式中: 直流偏移量 $I_0 = 0.2 \text{ A}$; 基波幅值 $I_m = 2 \text{ A}$; 基波角频率 $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$; 基波相角 $\theta_m = 0 \text{ rad}$; 测量噪声 v 为 35 dB 的高斯白噪声。算例 1 和算例 2 采用的测试信号是在 $i(t)$ 基础上改变得到。算例 3 采用的测试信号通过在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型得到。

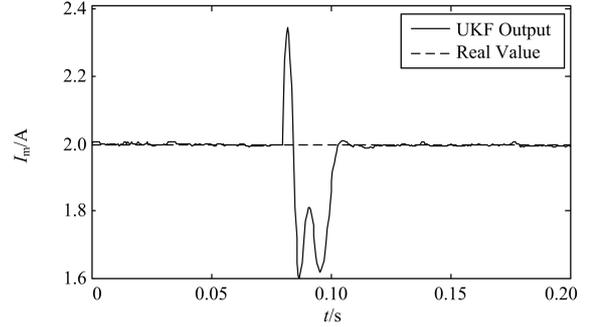
3.1 频率突变

本算例是仿真比较电力信号频率突变对全波 Fourier 算法和 UKF 算法的影响。设置电流测试信号 $i(t)$ 的基波角频率 ω 在 $t = 0.08 \text{ s}$ 时由 $100\pi \text{ rad/s}$

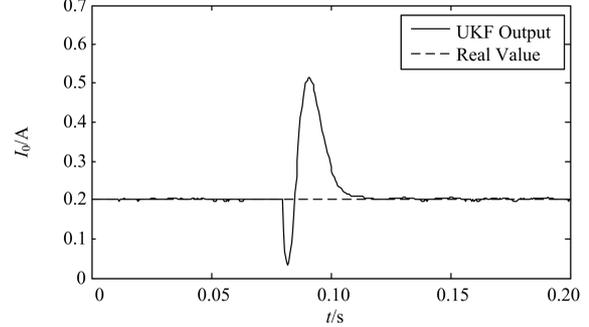
变化为 $102\pi \text{ rad/s}$, 即基波频率由 50 Hz 增加到 51 Hz, 仿真结果如图 1 所示。



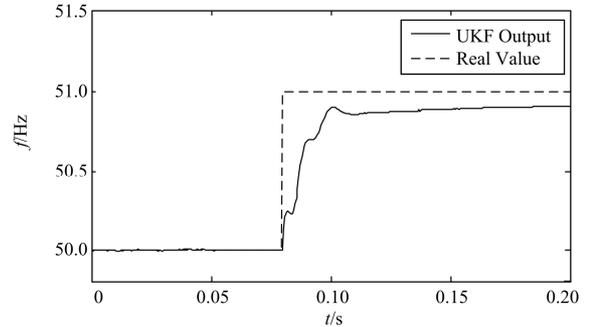
(a) 全波 Fourier 基波幅值提取结果



(b) UKF 基波幅值提取结果



(c) UKF 直流偏移量提取结果



(d) UKF 基波频率提取结果

图 1 信号基波频率突变时仿真结果

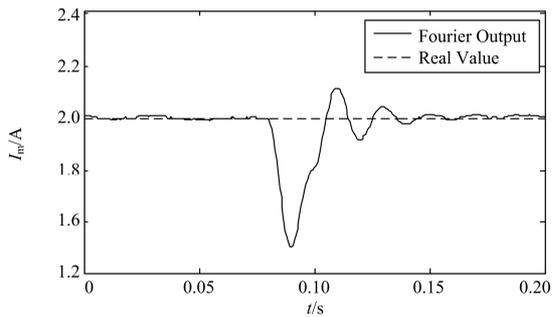
Fig. 1 Simulation results when the signal's fundamental frequency has a sudden change

对比图 1(a)和图 1(b)可知, 频率突变前, 受到测量噪声的影响, 全波 Fourier 算法基波幅值估计曲

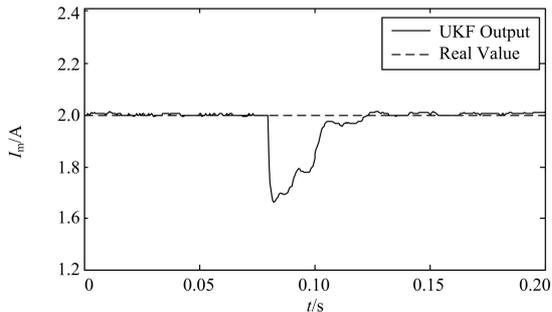
线呈现一定的振荡，而 UKF 算法和全波 Fourier 相比，其基波幅值估计曲线比较平滑，体现了 UKF 算法对测量噪声较强的抑制能力。频率突变后，全波 Fourier 最后收敛为一个持续振荡的曲线，而 UKF 算法和全波 Fourier 算法相比，虽然收敛过程中超调量更大，但是在 0.11 s 即收敛到稳定值，稳态误差为 0.01 A，体现了 UKF 算法对频率突变良好的适应性。UKF 算法提取直流偏移量曲线如图 1(c)所示，估计曲线经过振荡后在 0.11 s 收敛到稳态值，稳态误差为 0.004 A。UKF 算法提取基波频率曲线如图 1(d)所示，估计曲线在 0.12 s 收敛到稳态值，稳态误差为 0.1 Hz。分析图 1(c)和 1(d)可知，UKF 能够实现了对直流偏移量和基波频率比较快速准确地跟踪。

3.2 直流偏移量突变

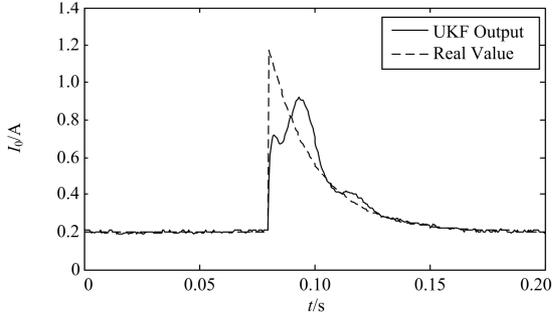
本算例是仿真比较电力信号直流偏移量突变对全波 Fourier 算法和 UKF 算法的影响。设置电流测试信号 $i(t)$ 的直流偏移量 I_0 在 $t = 0.08$ s 时由 0.2 A 变化为 $0.2 + e^{-50(t-0.08)}$ A，仿真结果如图 2 所示。



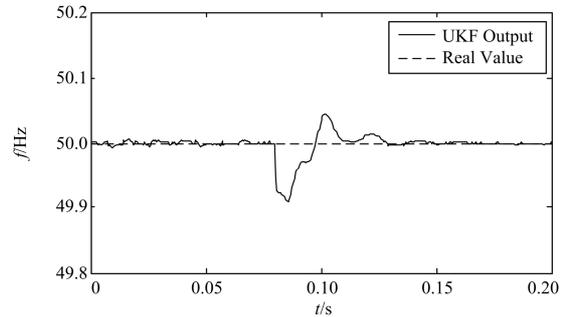
(a) 全波 Fourier 基波幅值提取结果



(b) UKF 基波幅值提取结果



(c) UKF 直流偏移量提取结果



(d) UKF 基波频率提取结果

图 2 信号直流偏移量突变时仿真结果

Fig. 2 Simulation results when the signal's dc offset component has a step change

对比图 2(a)和图 2(b)可知，直流偏移量突变后，全波 Fourier 经过多次振荡在 0.16 s 左右收敛到稳态值，稳态误差为 0.02 A，而 UKF 和全波 Fourier 算法相比，收敛曲线超调量小，振荡次数少，在 0.13 s 左右即收敛到稳态值，稳态误差为 0.008 A，体现了 UKF 对直流偏移量突变良好的适应性。UKF 提取信号直流偏移量和基波频率曲线分别如图 2(c)和 2(d)所示，从图中可知，发生突变后，估计曲线都是经过振荡后分别在 0.13 s 和 0.14 s 左右收敛到稳态值，稳态误差分别为 0.005 A 和 0.02 Hz，体现了 UKF 算法对直流偏移量和基波频率良好的跟踪性能。

3.3 故障实例仿真

本算例仿真对比全波 Fourier 算法和 UKF 算法对输电线路故障信号基波分量的提取效果。在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建如图 3 所示的双端电源系统输电线路故障仿真模型，仿真模型参数为：

E_M 端电源电压 $E_M = 525 \angle 0^\circ$ kV， E_N 端电源电压 $E_N = 525 \angle 30^\circ$ kV，两端电源内阻 $Z_M = Z_N = 5.74 + j1.193 \Omega$ ，系统频率 50 Hz，线路长度 $L_1 = L_2 = 50$ km，线路正序阻抗 $Z_1 = 0.02083 + j0.2821 \Omega/\text{km}$ ，线路零序阻抗 $Z_0 = 0.1148 + j0.7186 \Omega/\text{km}$ ，线路对地正序电容 $C_1 = 12.94 \times 10^{-3} \mu\text{F}/\text{km}$ ，线路对地零序电容为 $C_0 = 5.23 \times 10^{-3} \mu\text{F}/\text{km}$ 。仿真时间 0.2 s，采样频率为 2000 Hz，即每个周波采样 40 点。

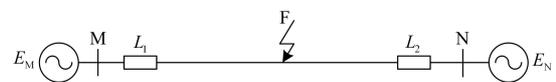


图 3 输电线路故障模型

Fig. 3 Model of transmission line fault

0.08 s 时刻在 F 处设置 AB 两相接地短路故障，从母线 M 处保护装置采集 A 相电流 i_a 如图 4(a)所示。从图中可知，故障发生后的短路电流 i_a 的幅值

远大于正常状态下的电流幅值, 并且含有衰减的直流分量。采用全波 Fourier 算法对故障电流 i_a 的基波幅值 I_{am} 进行估计得到的结果如图 4(b)所示, 利用 UKF 算法提取的基波幅值如图 4(c)所示。首先对算法的收敛精度进行分析, 从图中可知, 两种算法的收敛精度都比较高, 稳态误差在 0.05 kA 左右。然后对算法的收敛速度进行分析, 受到各次谐波、衰减直流分量等暂态噪声的影响, 全波 Fourier 算法经过多次振荡才在 0.145 s 左右收敛到稳态值。而 UKF 算法和全波 Fourier 算法相比, 振荡次数少, 超调量小, 在 0.125 s 左右即达到稳态值, 具有较快的响应速度。此外, 在故障发生后, 两种算法输出都存在反向突变量, 和全波 Fourier 算法相比, UKF 算法输出的突变量较小, 体现了其良好的滤波性能。UKF 实时估计出故障信号 i_a 的直流偏移量 I_{a0} 和频率 f_a , 仿真结果分别如图 4(d)和 4(e)所示, 估计曲线能够较好地反映信号的变化趋势。

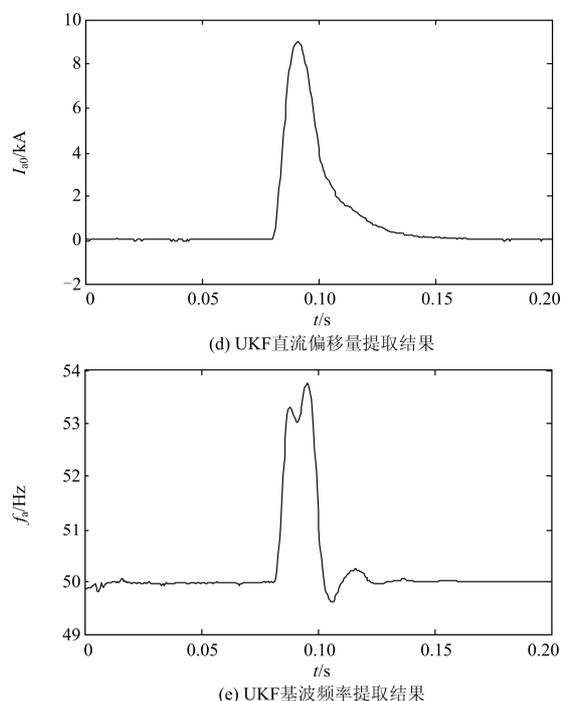
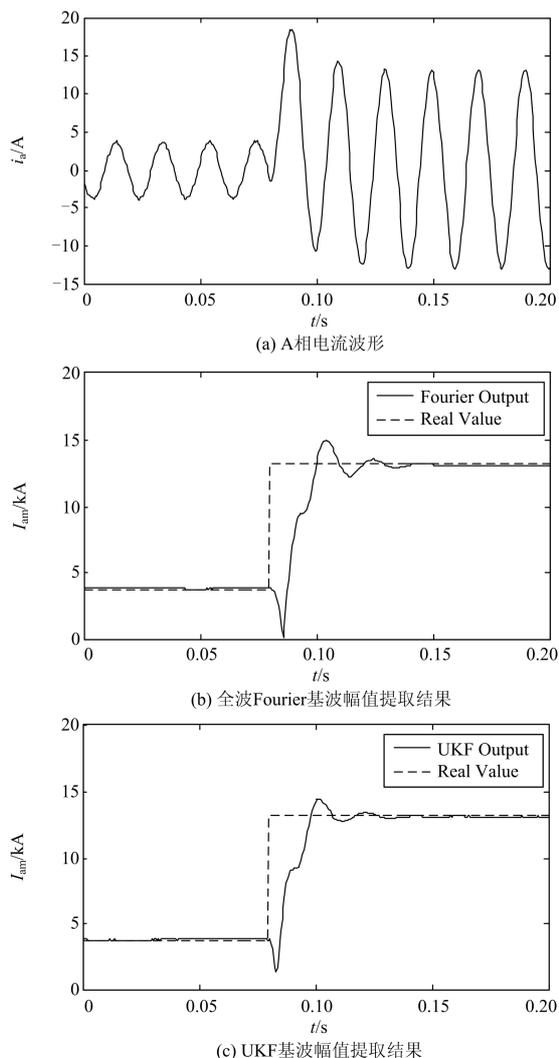


图 4 AB 两相接地短路故障时仿真结果

Fig. 4 Simulation results when AB two-phase ground short circuit fault happens

4 结论

本文采用无迹 Kalman 滤波在建立的信号非线性模型基础上, 提取出信号的基波分量、直流偏移量以及基波频率。多个算例仿真结果表明, 滤波算法抗噪声能力强, 对频率突变、直流偏移量突变具有良好的适应性, 在信号突变后滤波器的估计曲线能够比较快速、平滑地收敛到稳态值, 具有较快的收敛速度和较高的收敛精度。

参考文献

- [1] 张斌, 张东来. 电力系统自适应基波提取与频率跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 81-88.
ZHANG Bin, ZHANG Donglai. Adaptive fundamental component extraction and frequency tracking algorithm for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 81-88.
- [2] 梁远升, 王钢, 李海锋. 消除暂态过程影响的滤波算法及其在故障测距中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 77-82.
LIANG Yuansheng, WANG Gang, LI Haifeng. A filtering algorithm for eliminating effect of transient component and its application on fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 77-82.
- [3] 梅永, 王柏林. 降阶快速傅里叶变换算法在电力系统

- 谐波分析中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 117-120.
- MEI Yong, WANG Bolin. Application of order-reducing Fourier transform algorithm in power system harmonics analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 117-120.
- [4] 于九祥. 利用卡尔曼滤波技术滤取工频分量的方法[J]. 电网技术, 1993, 17(6): 44-50.
- YU Jiuxiang. Method of obtaining fundamental frequency components with Kalman filtering technique[J]. Power System Technology, 1993, 17(6): 44-50.
- [5] 吴晓波, 赵仁德, 马帅. 电网畸变条件下基于滑动平均-自陷波滤波器的基波相位提取[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3528-3533.
- WU Xiaobo, ZHAO Rende, MA Shuai. Fundamental phase extraction based on moving average-adaptive notch filter under distorted grid conditions[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3528-3533.
- [6] 江辉, 邹崇杰, 谢兴, 等. 基于集合 Kalman 滤波的暂态电压扰动检测[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 38-44.
- JIANG Hui, ZOU Chongjie, XIE Xing, et al. Transient voltage disturbances detection based on Ensemble-Kalman filtering[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 38-44.
- [7] 翟明岳, 苏岭东. 基于 EMD-TFPP 算法的电力线通信噪声消除技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 51-56.
- ZHAI Mingyue, SU Lingdong. A noise mitigation method based on EMD-TFPP in powerline communication system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 51-56.
- [8] 黄世年, 佟为明, 郭志忠, 等. 直接提取基频分量瞬态值的快速滤波算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 44-49.
- HUANG Shinian, TONG Weiming, GUO Zhizhong, et al. A fast filtering algorithm for extracting fundamental instantaneous value[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 44-49.
- [9] 胡志坚, 张承学, 陈允平, 等. 滤除衰减非周期分量的微机保护算法研究[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 7-11.
- HU Zhijian, ZHANG Chengxue, CHEN Yunping, et al. Study on protective algorithm for elimination of decaying aperiodic component[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 7-11.
- [10] 吕思颖, 裴岳, 秦昕, 等. 基于小波多尺度分析和 Kalman 滤波的微机保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 54-59.
- LÜ Siying, PEI Chan, QIN Xin, et al. Microprocessor-based protection algorithm based on wavelet multi-scale analysis and Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 54-59.
- [11] 张举, 董杰. 数字保护中两种算法的比较研究[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(4): 6-10.
- ZHANG Ju, DONG Jie. Comparison of two algorithms in digital protection[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(4): 6-10.
- [12] GIRGIS A A, BROWN R G. Application of Kalman filtering in computer relaying[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1981, 100(7): 3387-3395.
- [13] GIRGIS A A. A new Kalman filtering based digital distance relay[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1982, 101(9): 3471-3380.
- [14] 李江, 王义伟, 魏超, 等. 卡尔曼滤波理论在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 135-144.
- LI Jiang, WANG Yiwei, WEI Chao, et al. A survey on the application of Kalman filtering method in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 135-144.
- [15] 马帅, 赵仁德, 吴晓波. 基于强跟踪滤波器的单相电压基波相位实时提取[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 68-73.
- MA Shuai, ZHAO Rende, WU Xiaobo. Strong tracking filter based fundamental phase real-time extraction for single-phase voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 68-73.
- [16] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3): 401-422.
- [17] 潘泉, 杨峰, 叶亮, 等. 一类非线性滤波器-UKF 综述[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 481-490.
- PAN Quan, YANG Feng, YE Liang, et al. Survey of a kind of nonlinear filters-UKF[J]. Control and Decision, 2005, 20(5): 481-490.

收稿日期: 2015-07-31; 修回日期: 2015-09-13

作者简介:

吕思颖(1989-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护、高压直流输电; E-mail: 369347928@qq.com

黎丹(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为工业自动化、信号处理分析。E-mail: 631628690@qq.com

(编辑 张爱琴)