

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200524

# 基于改进无迹卡尔曼滤波的短线路同杆并架双回线参数辨识

杨韬<sup>1</sup>, 罗萍萍<sup>1</sup>, 龚锦霞<sup>1</sup>, 黄星宇<sup>2</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 福建水口发电集团有限公司, 福建 福州 350000)

**摘要:** 由于短线路同杆并架双回线通常不采用换位架设, 存在线路参数不对称以及参数难以估计的问题。针对该问题, 提出了一种基于改进无迹卡尔曼滤波法的短线路同杆并架双回线的参数辨识方法。首先根据短线路同杆并架双回线的特点, 建立对应的阻抗模型、导纳模型和量测方程。然后根据量测误差修正量, 在线校正量测值和误差方差阵补偿量测噪声。相比于其他参数辨识方法, 所提方法考虑了短线路参数不对称性, 因此更符合电网实际运行情况, 且引入了量测误差修正量能够进一步提高参数辨识精度和稳定性。仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 无迹卡尔曼滤波; 误差校正; 同杆并架双回线; 参数辨识

## Parameter identification of short parallel double-lines based on a modified unscented Kalman filter

YANG Tao<sup>1</sup>, LUO Pingping<sup>1</sup>, GONG Jinxia<sup>1</sup>, HUANG Xingyu<sup>2</sup>

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Fujian Shuikou Power Generation Group Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

**Abstract:** Because short parallel double-lines lines on the same tower are usually not transposition-erection, there is a problem of asymmetry of the line parameters and difficulty in estimating the parameters. To solve this problem, this paper proposes a parameter identification method based on an improved unscented Kalman filtering method for short parallel double-lines lines on the same tower. First, according to the characteristics of short-circuit parallel transmission lines on the same tower, the corresponding impedance models, admittance models, and measurement equations are established. Then, based on the measurement error corrections, the measurement values and error variance arrays are corrected online to compensate for the measurement noise. Compared with other parameter identification methods, the method takes into account the asymmetry of short line parameters, so it is more in line with the actual operation of the power grid, and the introduction of measurement error correction can further improve the accuracy and stability of parameter identification. Simulation results verify the effectiveness of this method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607112).

**Key words:** unscented Kalman filter; error correction; parallel double lines; parameter identification

## 0 引言

电力系统状态估计在系统调度、实时控制和安全运行等方面有重要意义。随着电力系统的频繁扩建, 为了有效利用输电走廊架设了大量同杆并架双回线。由于部分线路较短而往往不采用导线换位, 导致短线路同杆并架双回线参数不对称<sup>[1]</sup>, 线路参数无法准确估计, 进而影响电力系统状态估计精度。

参数辨识在电力系统中应用广泛, 主要对象为

铁磁元件<sup>[2-4]</sup>和输电线路。在输电线路的应用中, 目前的理论计算方法存在考虑因素不够全面、离线测量方法会因为运行工况和线路复杂性导致测量值不能准确反映实际运行状态等问题<sup>[5-6]</sup>。为了能够有效且快速地进行线路参数辨识, 利用 SCADA 数据<sup>[7]</sup>和 PMU 实测数据的在线测量方法成为近几年的研究重点。现有研究中, 大多都以单回线或者三相对称的双回线为模型并利用最小二乘法进行辨识, 然而最小二乘法辨识精度容易受到量测冗余度和 PMU 数据质量影响。文献[8-11]利用无误差的量测数据对输电线路进行参数辨识。文献[12]对坏数据进行剔除后, 利用最小二乘法对线路进行参数辨识。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607112)

文献[13]对线路电阻和对地电纳忽略不计, 只计算出线路电抗。卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)是现代控制理论的关键部分, 已有不少改进的卡尔曼滤波法在电力系统中得到广泛应用, 例如文献[14]提出了一种强跟踪卡尔曼滤波法, 通过引入自适应渐消因子, 增强了系统鲁棒性, 然而该方法存在滤波发散和容易受到噪声影响的问题。文献[15-17]利用自适应卡尔曼滤波法进行谐波检测以及配电网状态估计。文献[18]提出了一种基于逆向卡尔曼滤波的电力变换器故障诊断方法。文献[19]论述了基于最小二乘法和卡尔曼滤波法的动态相量估计方法。针对传统卡尔曼滤波方法的缺陷, Julier 提出了一种无迹卡尔曼滤波方法(Unscented Kalman Filter, UKF), 该方法不仅具有传统卡尔曼滤波方法计算快速的特点, 在保持强鲁棒性的同时能够抑制滤波发散问题<sup>[20-21]</sup>。文献[22-24]提出改进的无迹卡尔曼滤波法对电力系统进行状态估计, 仿真结果显示参数辨识精度要明显优于传统的卡尔曼滤波方法。虽然无迹卡尔曼滤波相比传统卡尔曼滤波提高了估计精度, 但其稳定性容易受到过程噪声和量测噪声影响<sup>[25-27]</sup>的问题依然存在。

针对上述问题, 本文提出了一种基于改进无迹卡尔曼滤波(Modified Unscented Kalman Filter, MUKF)的短线路同杆并架双回线参数辨识方法, 通过短线路同杆并架双回线的阻抗阵和导纳阵建立参数辨识量测方程。针对过程噪声和量测噪声的方差为时不变的特点, 采用改进的次优 Sage-Husa 法补偿过程噪声<sup>[28-29]</sup>; 对于量测噪声方面, 通过引入量测误差修正量, 在线调整量测误差方差阵修正量测数据, 从而补偿量测噪声。相比于其他参数辨识方法, 本文方法充分考虑了短线路的不对称性, 更符合电网实际运行情况; 又因为引入了量测误差修正量对结果进行校正, 本文方法受到的噪声干扰相对较小, 因而也具有更高的参数辨识精度。仿真结果验证了本文方法的有效性。

## 1 无迹卡尔曼滤波(UKF)基本原理

电力系统的状态方程和量测方程可以表示为

$$x_t = f(x_{t-1}) + q_{t-1} \quad (1)$$

$$z_t = h(x_t) + r_t \quad (2)$$

式中:  $x_t$  为  $n$  维状态矢量, 即参数辨识量;  $f(x)$  为状态转移函数;  $z_t$  为  $m$  维量测矢量;  $h(x)$  为量测函数;  $q_{t-1}$  为过程噪声;  $r_t$  为量测噪声。

UKF 算法是卡尔曼滤波的一种扩展, 其精度可以达到二阶以上。通过无损变换(Unscented

Transformation, UT)模拟非线性函数的概率密度达到近似效果, 并以状态量均值点为中心, 使用一组带有权重的 Sigma 点近似非线性函数随机分布, 进而实现将点集中的所有点非线性变换。

对于非线性变换  $y = g(x)$ ,  $x$  是均值为  $\bar{x}$ 、方差为  $P_x$  的随机变量, 选择合适的采样策略来确定 Sigma 点集  $\{\chi_i\}$  及对应的均值权值  $\{W_i^m\}$  和方差权值  $\{W_i^c\}$ , 使得

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^L W_i^m \chi_i \quad (3)$$

$$P_x = \sum_{i=1}^L W_i^c (\chi_i - \bar{x})(\chi_i - \bar{x})^T \quad (4)$$

式中,  $L$  为 Sigma 点的个数。

首先对所有 Sigma 点集进行非线性变换, 得到变换后的点集  $Y_i = g(\chi_i)$ ; 再对变换后的点集  $\{Y_i\}$  进行加权处理来获得统计量  $\bar{y}$  和  $P_y$ 。

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^L W_i^m Y_i \quad (5)$$

$$P_y = \sum_{i=1}^L W_i^c (Y_i - \bar{y})(Y_i - \bar{y})^T \quad (6)$$

根据  $t-1$  时刻的状态量  $x_{t-1}$  和协方差  $P_{t-1}$ , 根据选取的采样策略构造 Sigma 点集  $\chi_{i,t-1}$  得到  $t$  时刻的统计量为

$$\begin{cases} \chi_{i,t|t-1} = f(\chi_{i,t-1}) + q_{t-1} \\ \tilde{x}_{t|t-1} = \sum_{i=1}^L W_i^m \chi_{i,t|t-1} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{t|t-1} = \sum_{i=1}^L W_i^c (\chi_{i,t|t-1} - \tilde{x}_{t|t-1})(\chi_{i,t|t-1} - \tilde{x}_{t|t-1})^T + Q_t \quad (8)$$

式中,  $Q_t$  为过程噪声方差阵。

根据  $t-1$  时刻的状态量  $\tilde{x}_{t|t-1}$  和协方差  $P_{t|t-1}$  构造 Sigma 点集  $\{\tilde{\chi}_{i,t-1}\}$ , 得到统计量  $y_{i,t}$  为

$$y_{i,t} = h(\tilde{\chi}_{i,t-1}) + r_{t-1} \quad (9)$$

则  $t$  时刻的量测预测值  $\bar{y}_{t|t-1}$  和自协方差矩阵  $S_t$ 、互协方差矩阵  $C_t$  为

$$\begin{cases} \bar{y}_{t|t-1} = \sum_{i=1}^L W_i^m y_{i,t} \\ S_t = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (y_{i,t} - \bar{y}_{t|t-1})(y_{i,t} - \bar{y}_{t|t-1})^T + R_t \\ C_t = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{i,t|t-1} - \bar{x}_{t|t-1})(y_{i,t} - \bar{y}_{t|t-1})^T \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $R_t$  为量测噪声方差阵。

计算增益  $K_t$ 、 $t$  时刻状态估计值  $x_t$  和协方差估计值  $P_t$  为

$$\begin{cases} K_t = C_t S_t^{-1} \\ x_t = \bar{x}_{t|t-1} + K_t (z_t - \bar{y}_{t|t-1}) \\ P_t = P_{t|t-1} - K_t S_t K_t^T \end{cases} \quad (11)$$

本文采取常用的对称方案。为了避免采样时的非局部效应和高阶项误差,需要对 Sigma 点进行比例修正<sup>[20]</sup>。采样策略如式(12)所示。

$$\chi_i = \begin{cases} \bar{x}, & i = 0 \\ \bar{x} + [\sqrt{(n+\lambda)P_x}]_i, & i = 1, \dots, n \\ \bar{x} - [\sqrt{(n+\lambda)P_x}]_i, & i = n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (12)$$

均值和方差的权值可以表示为

$$\begin{cases} W_0^m = \frac{\lambda}{n} + \lambda \\ W_0^c = \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1-\alpha^2 + \beta) \\ W_i^m = W_i^c = \frac{1}{2(n+\lambda)}, & i = 1, 2, \dots, 2n \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n$ ,  $\kappa$  为自由参数,描述已知高阶矩的信息;  $\alpha$  为比例修正因子,能改变 Sigma 点与均值  $\bar{x}$  之间的距离;  $\beta$  为表示先验信息的高阶矩知识;  $[\sqrt{(n+\lambda)P_x}]_i$  为矩阵平方根的第  $i$  列。

## 2 基于 MUKF 的短线路同杆并架双回线参数辨识

### 2.1 建立状态方程

本文的状态方程选用两参数指数平滑法<sup>[17]</sup>,它是一种短期预测方法,可以表示为

$$\begin{cases} \tilde{x}_t = a_{t-1} + b_{t-1} \\ a_{t-1} = \alpha_H \hat{x}_{t-1} + (1-\alpha_H) \tilde{x}_{t-1} \\ b_{t-1} = \beta_H (a_{t-1} - a_{t-2}) + (1-\beta_H) b_{t-2} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\tilde{x}_{t-1}$  为  $t-1$  时刻系统预测值;  $\hat{x}_{t-1}$  为  $t-1$  时刻系统估计值;  $\tilde{x}_t$  同理;  $a_{t-1}$  和  $b_{t-1}$  为中间变量;  $\alpha_H$  和  $\beta_H$  为平滑参数,通常取值为 $[0,1]$ 。

### 2.2 建立量测方程

#### 2.2.1 短线路同杆并架双回线参数模型

根据短线路同杆并架双回线的架构特点,其可分为三角型、鼓型、垂直型和水平型多种结构,根据相序排列关系还可以细分为同相序、反相序和逆相序。

由于未换位的短线路同杆并架双回线的阻抗矩阵耦合形式复杂。本文以短线路同杆并架双回线的

垂直结构(图 1)为例,给出阻抗矩阵模型和导纳阵模型,其他结构的阻抗矩阵可以依类似方法获得。

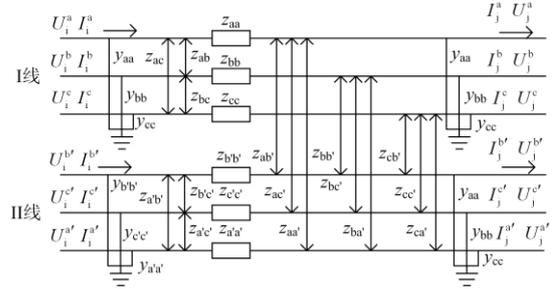


图 1 垂直型布置的同杆并架双回线

Fig. 1 Short parallel double-line with vertical configuration

对于图 1 所示的垂直型异相序排列 abc-b'c'a' 的同杆并架双回线,其线路阻抗和导纳可以分别表示为

$$\begin{aligned} Z_{abc} &= \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ab'} & Z_{ac'} & Z_{aa'} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bb'} & Z_{bc'} & Z_{ba'} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cb'} & Z_{cc'} & Z_{ca'} \\ Z_{b'a} & Z_{b'b} & Z_{b'c} & Z_{b'b'} & Z_{b'c'} & Z_{b'a'} \\ Z_{c'a} & Z_{c'b} & Z_{c'c} & Z_{c'b'} & Z_{c'c'} & Z_{c'a'} \\ Z_{a'a} & Z_{a'ab} & Z_{a'ac} & Z_{a'ab'} & Z_{a'ac'} & Z_{a'a'} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} & x_{35} & x_{36} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} & x_{45} & x_{46} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} & x_{54} & x_{55} & x_{56} \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} & x_{64} & x_{65} & x_{66} \end{bmatrix} \quad (15) \\ Y_{abc} &= \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^6 Y_{1i} & -Y_{ab} & -Y_{ac} & -Y_{ab'} & -Y_{ac'} & -Y_{aa'} \\ -Y_{ba} & \sum_{i=1}^6 Y_{2i} & -Y_{bc} & -Y_{bb'} & -Y_{bc'} & -Y_{ba'} \\ -Y_{ca} & -Y_{cb} & \sum_{i=1}^6 Y_{3i} & -Y_{cb'} & -Y_{cc'} & -Y_{ca'} \\ -Y_{b'a} & -Y_{b'b} & -Y_{b'c} & \sum_{i=1}^6 Y_{4i} & -Y_{b'c'} & -Y_{b'a'} \\ -Y_{c'a} & -Y_{c'b} & -Y_{c'c} & -Y_{c'b'} & \sum_{i=1}^6 Y_{5i} & -Y_{c'a'} \\ -Y_{a'a} & -Y_{a'ab} & -Y_{a'ac} & -Y_{a'ab'} & -Y_{a'ac'} & \sum_{i=1}^6 Y_{6i} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^6 Y_{1i} = Y_{aa} + Y_{ab} + Y_{ac} + Y_{ab'} + Y_{ac'} + Y_{aa'} \\ \sum_{i=1}^6 Y_{2i} = Y_{ba} + Y_{bb} + Y_{bc} + Y_{bb'} + Y_{bc'} + Y_{ba'} \\ \sum_{i=1}^6 Y_{3i} = Y_{ca} + Y_{cb} + Y_{cc} + Y_{cb'} + Y_{cc'} + Y_{ca'} \\ \sum_{i=1}^6 Y_{4i} = Y_{b'a} + Y_{b'b} + Y_{b'c} + Y_{b'b'} + Y_{b'c'} + Y_{b'a'} \\ \sum_{i=1}^6 Y_{5i} = Y_{c'a} + Y_{c'b} + Y_{c'c} + Y_{c'b'} + Y_{c'c'} + Y_{c'a'} \\ \sum_{i=1}^6 Y_{6i} = Y_{a'a} + Y_{a'b} + Y_{a'c} + Y_{a'b'} + Y_{a'c'} + Y_{a'a'} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $Z_{st} = R_{st} + jX_{st}$ , 为  $s$  相与  $t$  相之间的阻抗,  $R_{st}$  为  $s$  相与  $t$  相之间的电阻,  $X_{st}$  为  $s$  相与  $t$  相之间的电抗;  $Y_{st} = jB_{st}/2$ ;  $s, t$  表示线路任一相;  $Z_{abc}$  和  $Y_{abc}$  为短线路同杆并架双回线的阻抗阵和导纳阵。式(15)中  $Z_1$  和  $Z_4$  分别表示双回线中 I 线和 II 线的自阻抗;  $Z_2$  和  $Z_3$  表示 I 线和 II 线的互阻抗。式(16)同理, 为导纳元素。

### 2.2.2 建立量测方程式

对于图 1 所示的短线路同杆并架双回线, 基于输电线路的量测量和式(15)、式(16)建立量测方程式为

$$\dot{U}_i - \dot{U}_j = \mathbf{Z}_{abc} (\mathbf{Y}_{abc} \dot{U}_j + \dot{\mathbf{I}}_j) \quad (18)$$

$$\dot{U}_i = (\mathbf{E} + \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{Y}_{abc}) \dot{U}_j + \mathbf{Z}_{abc} \dot{\mathbf{I}}_j \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{I}}_i &= \dot{\mathbf{I}}_j + \mathbf{Y}_{abc} \dot{U}_i + \mathbf{Y}_{abc} \dot{U}_j = \dot{\mathbf{I}}_j + \mathbf{Y}_{abc} \dot{U}_j + \\ &(\mathbf{Y}_{abc} + \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{Y}_{abc}^2) \dot{U}_j + \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{Y}_{abc} \dot{\mathbf{I}}_j = \\ &(\mathbf{E} + \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{Y}_{abc}) \dot{\mathbf{I}}_j + (2\mathbf{Y}_{abc} + \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{Y}_{abc}^2) \dot{U}_j \end{aligned} \quad (20)$$

式中:

$$\dot{U}_i = [\dot{U}_i^a \quad \dot{U}_i^b \quad \dot{U}_i^c \quad \dot{U}_i^{b'} \quad \dot{U}_i^{c'} \quad \dot{U}_i^{a'}]^T$$

$$\dot{\mathbf{I}}_i = [\dot{I}_i^a \quad \dot{I}_i^b \quad \dot{I}_i^c \quad \dot{I}_i^{b'} \quad \dot{I}_i^{c'} \quad \dot{I}_i^{a'}]^T$$

$$\dot{U}_j = [\dot{U}_j^a \quad \dot{U}_j^b \quad \dot{U}_j^c \quad \dot{U}_j^{b'} \quad \dot{U}_j^{c'} \quad \dot{U}_j^{a'}]^T$$

$\dot{U}_i$  和  $\dot{U}_j$  为线路  $i$  端和  $j$  端的电压向量;  $\dot{U}_i^a$ 、 $\dot{U}_i^b$ 、

$\dot{U}_i^c$ 、 $\dot{U}_i^{b'}$ 、 $\dot{U}_i^{c'}$  和  $\dot{U}_i^{a'}$  分别为线路 I 和线路 II 首端  $i$  端的 a 相、b 相和 c 相的电压量测相量,  $j$  端同理;  $\dot{\mathbf{I}}_i$  为线路  $i$  端和  $j$  端的电流向量;  $\dot{I}_i^a$ 、 $\dot{I}_i^b$ 、 $\dot{I}_i^c$ 、 $\dot{I}_i^{b'}$ 、 $\dot{I}_i^{c'}$  和  $\dot{I}_i^{a'}$  分别为线路 I 和线路 II 首端  $i$  端的 a 相、b 相和 c 相的电流量测相量。

对式(19)和式(20)进一步推导, 并进行虚部和实部解耦, 以 a 相为例, 得到

$$\begin{cases} \dot{U}_i^a = \sum_m \sum_n x_{1n} y_{nm} \dot{U}_j^m + \sum_{m=1}^6 x_{1m} \dot{I}_j^m + \dot{U}_j^a \\ \dot{I}_i^a = \sum_m \sum_n x_{1n} y_{nm} \dot{I}_j^m + 2 \sum_{m=1}^6 y_{1m} \dot{U}_j^m + \dot{I}_j^a + \\ \sum_s \sum_m \sum_n x_{1n} y_{nm} y_{ms} \dot{U}_j^s \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)虚部和实部解耦得到

$$\begin{cases} \text{Re}(\dot{U}_i^a) = \frac{1}{2} \cdot \sum_m \sum_n [-X_{1n} \cdot B_{nm} \cdot \text{Re}(\dot{U}_j^m) - \\ R_{1n} \cdot B_{nm} \cdot \text{Im}(\dot{U}_j^m)] + \text{Re}(\dot{U}_j^a) + \\ \sum_{m=1}^6 [R_{1m} \cdot \text{Re}(\dot{I}_j^m) - X_{1m} \cdot \text{Im}(\dot{I}_j^m)] \square A \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \text{Im}(\dot{U}_i^a) = \frac{1}{2} \cdot \sum_m \sum_n [R_{1n} \cdot B_{nm} \cdot \text{Re}(\dot{U}_j^m) - \\ X_{1n} \cdot B_{nm} \cdot \text{Im}(\dot{U}_j^m)] + \text{Im}(\dot{U}_j^a) + \\ \sum_{m=1}^6 [X_{1m} \cdot \text{Im}(\dot{I}_j^m) + R_{1m} \cdot \text{Re}(\dot{I}_j^m)] \square B \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Im}(\dot{I}_i^a) = \frac{1}{2} \cdot \sum_m \sum_n [R_{1n} \cdot B_{nm} \cdot \text{Re}(\dot{I}_j^m) - \\ X_{1n} \cdot B_{nm} \cdot \text{Im}(\dot{I}_j^m)] + \sum_{m=1}^6 B_{nm} \cdot \text{Re}(\dot{U}_j^m) - \\ \frac{1}{4} \cdot \sum_s \sum_m \sum_n [B_{nm} \cdot B_{ms} \cdot X_{1m} \cdot \text{Re}(\dot{U}_j^s) + \\ B_{nm} \cdot B_{ms} \cdot R_{1m} \cdot \text{Im}(\dot{U}_j^s)] + \text{Im}(\dot{I}_j^a) \square C \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \text{Im}(\dot{I}_i^a) = \frac{1}{2} \cdot \sum_m \sum_n [R_{1n} \cdot B_{nm} \cdot \text{Re}(\dot{I}_j^m) - \\ X_{1n} \cdot B_{nm} \cdot \text{Im}(\dot{I}_j^m)] + \sum_{m=1}^6 B_{nm} \cdot \text{Re}(\dot{U}_j^m) - \\ \frac{1}{4} \cdot \sum_s \sum_m \sum_n [B_{nm} \cdot B_{ms} \cdot X_{1m} \cdot \text{Re}(\dot{U}_j^s) + \\ B_{nm} \cdot B_{ms} \cdot R_{1m} \cdot \text{Im}(\dot{U}_j^s)] + \text{Im}(\dot{I}_j^a) \square D \end{cases}$$

根据复功率定义有

$$P_i^a + jQ_i^a = \dot{U}_i^a (\dot{I}_i^a)^* \quad (24)$$

$$\begin{cases} P_i^a = \text{Re}[\dot{U}_i^a (\dot{I}_i^a)^*] = AC + BD \\ Q_i^a = \text{Im}[\dot{U}_i^a (\dot{I}_i^a)^*] = BC - AD \end{cases} \quad (25)$$

式中： $P_i^a$ 和 $Q_i^a$ 为*i*端线路I的有功功率量测和无功功率量测； $\text{Re}(\bullet)$ 表示取向量实部； $\text{Im}(\bullet)$ 表示取向量虚部。

由式(22)、式(23)和式(25)得到以线路I的a相量测数据为基础的量测方程式，其他相序做相同处理，便可得到短线路同杆并架双回线的量测方程式。

### 3 噪声处理

#### 3.1 过程噪声

由于UKF表示的预测模型的过程噪声是未知的，将系统过程误差方差阵 $Q_k$ 设为常数会降低估计准确性。为此引入改进的Sage-Husa噪声统计估计器<sup>[28]</sup>。具体方法为

$$\begin{cases} \hat{q}_t = (1 - d_{t-1})\hat{q}_{t-1} + d_{t-1}[x_{t|t} - \sum_{i=1}^L W_i^m f(\chi_{i,t|t})] \\ Q_t = (1 - d_{t-1})Q_{t-1} + d_{t-1}[K_t V_t V_t^T K_t^T + P_t - \sum_{i=1}^L W_i^c (\chi_{i,t+1|t} - x_{t+1|t})(\chi_{i,t+1|t} - x_{t+1|t})^T] \end{cases} \quad (26)$$

式中： $d_{t-1} = (1 - b)/(1 - b^t)$ ， $b$ 为遗忘因子， $0 < b < 1$ ， $b$ 的取值与系统状态变化剧烈程度正相关； $V_t = z_t - \bar{y}_t$ ，为*t*时刻量测值 $z_t$ 与预测值残差。改进后的噪声估计器能够自适应地处理随时间变化的过程噪声，并将系统建模带来的误差也纳入到过程噪声中去。

#### 3.2 量测噪声

针对Sage-Husa滤波器存在无法同时估计 $Q$ 和 $R$ ，而且在高阶系统下容易出现滤波发散的问题，本文引入计算量测误差修正值对量测值和 $R$ 进行校正。

由于量测噪声主要源于PMU幅值和相角以及功率量测误差。本文根据输电线路的特点建立相应关系式。以图1线路的a相为例，有

$$\dot{I}_i^a + \dot{I}_j^a = \frac{Y_{aa}}{2} \dot{U}_i^a + \frac{Y_{aa}}{2} \dot{U}_j^a \quad (27)$$

为计算简便，假设电压和电流的幅值误差修正量相同；电压和电流的相角误差修正量相同；有功和无功误差修正量相同。根据两个时刻的量测，并引入修正量可得

$$\frac{(I_{i1}^a + v_\Delta) e^{j(\theta_{i1}^a + \delta_\Delta)} + (I_{j1}^a + v_\Delta) e^{j(\theta_{j1}^a + \delta_\Delta)}}{(U_{i1}^a + v_\Delta) e^{j(\phi_{i1}^a + \delta_\Delta)} + (U_{j1}^a + v_\Delta) e^{j(\phi_{j1}^a + \delta_\Delta)}} - \frac{(I_{i2}^a + v_\Delta) e^{j(\theta_{i2}^a + \delta_\Delta)} + (I_{j2}^a + v_\Delta) e^{j(\theta_{j2}^a + \delta_\Delta)}}{(U_{i2}^a + v_\Delta) e^{j(\phi_{i2}^a + \delta_\Delta)} + (U_{j2}^a + v_\Delta) e^{j(\phi_{j2}^a + \delta_\Delta)}} = 0 \quad (28)$$

式中： $\theta_{i1}^a$ 和 $\theta_{j1}^a$ 为线路*i*端和*j*端第一个时刻的电流相角； $\phi_{i1}^a$ 和 $\phi_{j1}^a$ 为线路*i*端和*j*端第一个时刻的电压相角；同理， $\theta_{i2}^a$ 、 $\theta_{j2}^a$ 、 $\phi_{i2}^a$ 和 $\phi_{j2}^a$ 为第二个时刻量测量； $v_\Delta$ 和 $\delta_\Delta$ 为幅值误差修正量和相角误差修正量。

由线路功率损耗关系式以及功率因数计算式可得到如下表达式：

$$\frac{(P_i^a)^2 + (Q_i^a)^2}{(U_i^a)^2} = \frac{(P_j^a)^2 + (Q_j^a)^2}{(U_j^a)^2} \quad (29)$$

$$\cos \varphi_i = \frac{P_i^a}{\sqrt{(P_i^a)^2 + (Q_i^a)^2}} \quad (30)$$

$$\frac{(P_i^a + P_\Delta)^2 + (Q_i^a + Q_\Delta)^2}{(U_i^a + v_\Delta)^2} = \frac{(P_j^a + P_\Delta)^2 + (Q_j^a + Q_\Delta)^2}{(U_j^a + v_\Delta)^2} \quad (31)$$

$$P_i^a - P_\Delta = \sqrt{(P_i^a + P_\Delta)^2 + (Q_i^a + Q_\Delta)^2} \cos(\phi_i^a - \theta_i^a) \quad (32)$$

根据式(28)、式(31)、式(32)三个非线性方程，采用牛拉法，即式(33)进行求解3个修正量。牛拉法可以表示为

$$\Delta X = -F(X)[F'(X)]^{-1} \quad (33)$$

式中： $\Delta X$ 为修正量； $F(X)$ 是由式(28)、式(31)和式(32)组成的非线性方程； $F'(X)$ 为对应的雅可比矩阵。

由式(10)和式(11)可知，估计值和增益矩阵会受到量测误差方差矩阵和量测值精度影响，而实际计算中的量测值带有误差，量测误差方差阵 $R$ 数值给定，此时无法得到高精度的预报值，导致系统估计性能下降。因此本文通过计算出的量测误差修正值对量测数据和 $R$ 进行在线修正，对预报值进行合理调整，提高辨识精度。

平均值和方差定义表示为

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \end{cases} \quad (34)$$

式中： $x_i$ 为*i*时刻误差； $\bar{x}$ 为*i*时刻误差均值； $\sigma^2$ 为误差方差； $n$ 为量测时刻总数。

对第*i*时刻量测误差方差、均值以及量测数据进行修正，对量测值和修正量进行求和，补偿量测误差，从而调整 $R$ 。具体修正表达式为

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i + x_{\Delta}^i}{n} \\ \sigma_f^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i + x_{\Delta}^i - \bar{x}_f)^2}{n} \end{cases} \quad (35)$$

$$z_{t,f} = z_t + x_{\Delta}^i \quad (36)$$

$$\mathbf{R}_{t,f} = \begin{bmatrix} \sigma_{1,f}^2 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \sigma_{i,f}^2 & \\ & & & \ddots \\ & & & & \sigma_{n,f}^2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\mathbf{S}_{t,f} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^c (y_{i,t} - \bar{y}_{i|t-1})(y_{i,t} - \bar{y}_{i|t-1})^T + \mathbf{R}_{t,f} \quad (38)$$

$$\begin{cases} \mathbf{K}_{t,f} = \mathbf{C}_t \mathbf{S}_{t,f}^{-1} \\ x_{t,f} = \bar{x}_{i|t-1} + \mathbf{K}_{t,f} (z_{t,f} - \bar{y}_{i|t-1}) \\ \mathbf{P}_t = \mathbf{P}_{i|t-1} - \mathbf{K}_{t,f} \mathbf{S}_{t,f} \mathbf{K}_{t,f}^T \end{cases} \quad (39)$$

考虑到量测误差对线路参数辨识结果的影响以及  $\mathbf{R}$  无法实时修正的局限性, 利用误差修正量提高修正量测值对预报值的影响程度以及降低  $\mathbf{R}$  中各个分量的误差波动程度, 可以一定程度上降低量测噪声的影响。

综上, 根据同杆并架双回线的结构, 建立相应的量测方程。对过程噪声  $\mathbf{Q}$  和量测噪声  $\mathbf{R}$  进行一定补偿, 从而提高预报值精度。基于无迹卡尔曼滤波法的短线路同杆并架双回线参数辨识过程如图2所示。

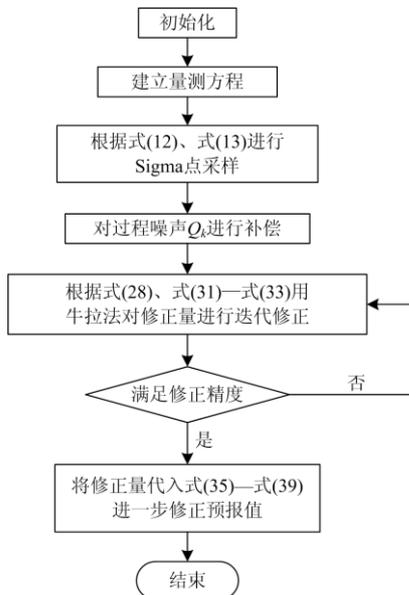


图2 MUKF 参数辨识流程

Fig. 2 Flow chart of MUKF parameter identification

## 4 仿真分析

为了验证本文方法的正确性和有效性, 基于 PSCAD 平台构建一条 500 kV 的垂直型异相序排列短线路同杆并架双回线系统, 如图 3 所示。线路 I 参数设置(线路 II 同线路 I)如表 1 和表 2 所示。通过采集多个时间段的量测数据作为实验数据, 并对每个量测添加高斯白噪声。对电压幅值及相角、电流幅值及相角和有功功率及无功功率均叠加 0.1% 和 5% 不同强度的白噪声。

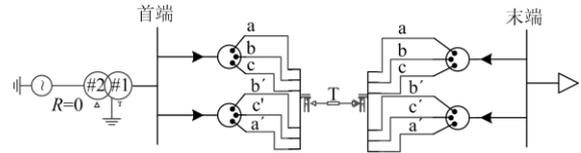


图3 垂直型异相序同杆并架双回线仿真

Fig. 3 Simulation of double-circuit lines with vertical dissimilar phase sequence

表1 相间参数

Table 1 Phase-to-phase parameters

| 相序关系 | $R/\Omega$ | $X/\Omega$ | $B/10^{-6}\text{S}$ |
|------|------------|------------|---------------------|
| a-a  | 5.95       | 50.12      | 10.25               |
| b-b  | 5.12       | 48.125     | 10.25               |
| c-c  | 4.93       | 44.39      | 10.25               |
| a-b  | 2.962      | 10.212     | 0.658               |
| b-a  | 2.962      | 10.212     | 0.658               |
| a-c  | 1.208      | 7.458      | 0.592               |
| c-a  | 1.208      | 7.458      | 0.592               |
| b-c  | 2.591      | 6.615      | 0.658               |
| c-b  | 2.187      | 6.615      | 0.658               |

表2 线间参数

Table 2 Parameters between lines

| 相序关系 | $R/\Omega$ | $X/\Omega$ | $B/10^{-6}\text{S}$ |
|------|------------|------------|---------------------|
| a-a' | 3.15       | 2.024      | 10.25               |
| b-b' | 2.94       | 1.915      | 10.25               |
| c-c' | 1.657      | 1.647      | 10.25               |
| a-b' | 1.489      | 2.182      | 0.592               |
| b-a' | 3.945      | 1.945      | 0.592               |
| a-c' | 3.18       | 2.187      | 0.658               |
| c-a' | 4.678      | 2.15       | 0.658               |
| b-c' | 1.188      | 2.184      | 0.658               |
| c-b' | 3.486      | 2.189      | 0.658               |

本文进行三种不同情况下的仿真, 验证所提出的短线路同杆并架双回线参数辨识方法, 主要包括: 不含噪声时的辨识、同一噪声下量测值是否修正的

辨识、含不同等级的量测噪声辨识。参数迭代初值均偏离设计值 40%，辨识结果均以相间电抗和线间电抗为例。在不含噪声时，分别采用最小二乘法和本文方法进行辨识，辨识结果如表 3 和表 4 所示。当含有噪声且补偿过程噪声时，在量测值修正和不修正的情况下，利用本文建立的量测方程，采用无迹卡尔曼滤波进行辨识，结果分别如表 5 和表 6 所示。在含有不同等级(0.1%、5%)白噪声的情况下，采用本文方法进行辨识，部分结果如图 4 和图 5 所示。

表 3 相间阻抗辨识结果

Table 3 Results of phase-to-phase impedance identification

|          | 最小二乘法误差/% | 本文方法误差/% |
|----------|-----------|----------|
| $X_{aa}$ | 51.01     | 3.189    |
| $X_{bb}$ | 68.524    | 1.058    |
| $X_{cc}$ | 21.541    | 0.064    |
| $X_{ab}$ | 45.244    | 2.618    |
| $X_{ba}$ | 28.018    | 1.289    |
| $X_{ac}$ | 12.572    | 2.186    |
| $X_{ca}$ | 98.94     | 3.981    |
| $X_{bc}$ | 22.372    | 0.388    |
| $X_{cb}$ | 87.284    | 2.659    |

表 4 线间阻抗辨识结果

Table 4 Impedance identification results between lines

|          | 最小二乘法误差/% | 本文方法误差/% |
|----------|-----------|----------|
| $X_{aa}$ | 35.752    | 2.476    |
| $X_{bb}$ | 77.157    | 3.01     |
| $X_{cc}$ | 87.23     | 2.64     |
| $X_{ab}$ | 12.98     | 0.901    |
| $X_{ba}$ | 73.76     | 2.289    |
| $X_{ac}$ | 83.541    | 1.532    |
| $X_{ca}$ | 35.057    | 2.345    |
| $X_{bc}$ | 87.137    | 2.932    |
| $X_{cb}$ | 82.101    | 1.784    |

表 5 相间阻抗辨识结果

Table 5 Results of phase-to-phase impedance identification

|          | 量测未修正误差/% | 量测修正后误差/% |
|----------|-----------|-----------|
| $X_{aa}$ | 12.821    | 3.564     |
| $X_{bb}$ | 23.842    | 2.648     |
| $X_{cc}$ | 15.684    | 3.82      |
| $X_{ab}$ | 45.125    | 3.24      |
| $X_{ba}$ | 23.812    | 2.469     |
| $X_{ac}$ | 65.912    | 3.9       |
| $X_{ca}$ | 34.028    | 4.24      |
| $X_{bc}$ | 84.381    | 0.178     |
| $X_{cb}$ | 65.641    | 2.78      |

表 6 线间阻抗辨识结果

Table 6 Impedance identification results between lines

|          | 量测未修正误差/% | 量测修正后误差/% |
|----------|-----------|-----------|
| $X_{aa}$ | 36.456    | 1.345     |
| $X_{bb}$ | 46.752    | 3.27      |
| $X_{cc}$ | 38.218    | 2.67      |
| $X_{ab}$ | 25.025    | 5.752     |
| $X_{ba}$ | 33.722    | 2.243     |
| $X_{ac}$ | 53.642    | 3.67      |
| $X_{ca}$ | 35.138    | 2.68      |
| $X_{bc}$ | 53.62     | 3.374     |
| $X_{cb}$ | 45.879    | 5.733     |

由表 3 和表 4 可以看出，即使不含噪声，最小二乘法也无法得到满意的结果。这是因为辨识参数过多且最小二乘法算法过于简单，只能进行线性估计，由上文建立的量测方程可知，同杆并架双回线的参数呈非线性关系。而 MUKF 通过建立相应的量测方程，其本身是基于 UKF 的改进。不含噪声时，采取一般 UKF 进行辨识，在求解非线性方程时无需将方程线性化，能够很好地求解非线性方程。而由表 5 和表 6 可以看出，在只补偿过程噪声情况下，仅仅采用 UKF 辨识结果会发散，这是因为量测值会受到算法、互感器和卫星同步等影响，所以会产生电压和电流的幅值与相角的量测误差。而 MUFK 在使用量测数据之前，通过引入修正量对量测噪声进行补偿并且修正量测值，从而减少误差造成的负面影响，提高辨识精度。

由图 4 和图 5 可以看出，在加入高强度噪声后的辨识结果精度普遍比加入低强度噪声的辨识结果精度差一些，但是 MUKF 依然可以保持较高的辨识精度。由上文所述自协方差矩阵和估计值会受到量测噪声方差阵和量测值的影响，而后两者含有的误差会造成  $S_i$  和  $x_i$  计算结果不准确。MUKF 通过计算修正量补偿量测噪声，剔除  $R_i$  和  $z_i$  中的误差分量，进而提高了辨识精度。不论加入高强度还是低强度，辨识过程都会出现抖动现象，是因为单一辨识参数

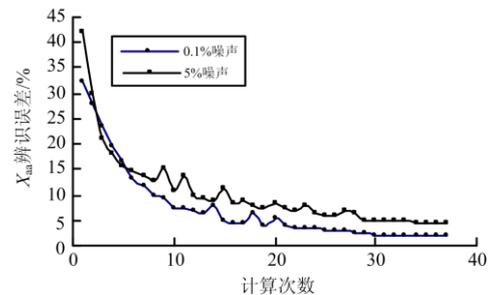


图 4 自阻抗  $X_{aa}$  辨识结果

Fig 4 Results of self-impedance  $X_{aa}$

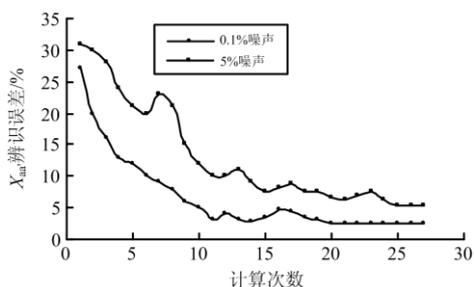


图 5 线间阻抗  $X_{aa'}$  辨识结果

Fig. 5 Impedance  $X_{aa'}$  identification results between lines

与辨识参数值相关。随着计算次数增加, 计算结果更精确并逐渐达到收敛。

为了进一步验证本文方法的有效性, 采用某电网两条 500 kV 同杆并架双回线的双端 PMU 量测量和功率量测来辨识线路。线路型号为  $4 \times$  LGJ-400/35, 分裂间距为 0.45 m, 外径为 26.82 mm, 直流电阻为  $0.073\ 89\ \Omega/\text{km}$ , 长度为 98 km, 排列方式为垂直型异相序。由于运行参数真值未知, 将理论计算值为初值, 辨识结果与离线测量值进行比较, 部分辨识结果如表 7—表 9 所示。

表 7 电阻辨识结果

Table 7 Resistance identification results

| 参数        | 电阻辨识误差/% |
|-----------|----------|
| $R_{aa'}$ | 8.182    |
| $R_{bb'}$ | 7.128    |
| $R_{cc'}$ | 6.989    |
| $R_{ab'}$ | 15.752   |
| $R_{ba'}$ | 7.513    |
| $R_{ac'}$ | 9.937    |
| $R_{ca'}$ | 6.54     |
| $R_{bc'}$ | 13.341   |
| $R_{cb'}$ | 5.003    |

表 8 电抗辨识结果

Table 8 Reactance identification results

| 参数       | 电抗辨识误差/% |
|----------|----------|
| $X_{aa}$ | 3.591    |
| $X_{bb}$ | 2.648    |
| $X_{cc}$ | 4.15     |
| $X_{ab}$ | 3.211    |
| $X_{ba}$ | 2.469    |
| $X_{ac}$ | 3.02     |
| $X_{ca}$ | 4.281    |
| $X_{bc}$ | 5.178    |
| $X_{cb}$ | 2.69     |

表 9 电容辨识结果

Table 9 Capacitance identification results

| 参数        | 电容辨识误差/% |
|-----------|----------|
| $B_{aa'}$ | 1.984    |
| $B_{bb'}$ | 5.298    |
| $B_{cc'}$ | 2.967    |
| $B_{ab'}$ | 3.752    |
| $B_{ba'}$ | 1.243    |
| $B_{ac'}$ | 4.167    |
| $B_{ca'}$ | 3.618    |
| $B_{bc'}$ | 4.924    |
| $B_{cb'}$ | 5.703    |

由表 7—表 9 可以看出电抗和电容的辨识结果与离线测量值较为接近, 部分电阻结果偏差较大。由于实测数据与环境、线路运行状况以及老化情况等因素有关, MUKF 的辨识结果仍具有较好的可信度。

为进一步验证 MUKF 对实际情况的有效性, 通过一端电气量测量以及辨识值, 利用式(19)和式(20)推算另一端电气量测量, 并与实测值做比较, 结果如图 6 和图 7 所示。

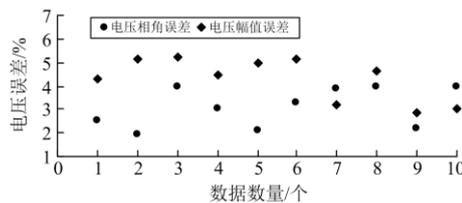


图 6 电压幅值和相角误差

Fig. 6 Voltage amplitude and phase angle error

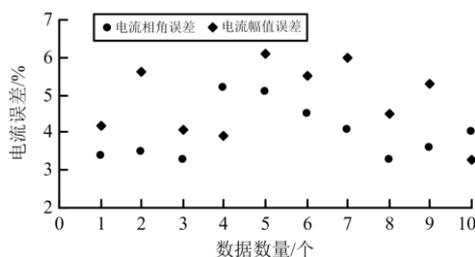


图 7 电流幅值和相角误差

Fig. 7 Current amplitude and phase angle error

图 6 和图 7 表明利用辨识值拟合出来的电压电流数据与实测数据相差不大, 同时考虑辨识值是基于修正后的实测数据得到的, 因运行工况以及实测数据的误差等影响, MUKF 得到的结果是比较精确的。

## 5 结论

针对短线路同杆并架双回线线路参数难以估计的问题, 本文提出了一种基于改进无迹卡尔曼滤波

的参数辨识方法。根据同杆并架双回线的特点建立量测方程,为解决量测误差对辨识结果影响较大的问题,提出引入量测误差修正值,通过在线修正误差方差阵和量测值,提高辨识精度。

本文提出的算法中对量测误差修正量的处理进行了假设,因此下一步的方向是进一步研究修正量不相同时的处理方法。

## 参考文献

- [1] 刘阳升, 林济铿, 戴赛, 等. 计及短线路同杆并架双回线的输电网混合状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7163-7173.  
LIU Yangsheng, LIN Jikeng, DAI Sai, et al. A hybrid state estimation algorithm for transmission system considering the short untransposed double-circuit lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7163-7173.
- [2] 刘力卿, 何思名, 冯军基, 等. 一种快速高鲁棒性变压器铁心 Jiles-Atherton 磁滞模型参数辨识方法[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 55-60.  
LIU Liqing, HE Siming, FENG Junji, et al. Fast and robust parameter identification method for Jiles-Atherton hysteresis model of transformer core[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 55-60.
- [3] 高浩, 刘庆珍, 蔡金锭. 基于去极化电流 Prony 拟合的油纸绝缘德拜参数辨识方法[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 210-218.  
GAO Hao, LIU Qingzhen, CAI Jinding. Debye parameter identification method of oil-paper insulation based on depolarization current prony algorithm fitting[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 210-218.
- [4] 段建东, 雷阳, 李浩, 等. 铁磁元件 J-A 模型的研究进展与趋势[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 16-23.  
DUAN Jiandong, LEI Yang, LI Hao, et al. Review of ferromagnetic components J-A model[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 16-23.
- [5] GOU B. Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1099-1104.
- [6] XU B, ABUR A. Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs[C] // IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, October 10-13, 2004, New York, NY, USA.
- [7] 李鸿奎, 曾文婷, 李福建, 等. 一种基于 SCADA 量测的线路动态参数辨识方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 121-128.  
LI Hongkui, ZENG Wenting, LI Fujian, et al. A method of line dynamic parameter identification based on SCADA measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 121-128.
- [8] KIM IL-DONG, AGGARWAL R K. A study on the on-line measurement of transmission line impedances for improved relaying protection[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(6): 359-366.
- [9] SHI D, TYLAVSKY D J, LOGIC N, et al. Identification of short transmission-line parameters from synchrophasor measurements[C] // 40th North American Power Symposium, September 28-30, 2008, Calgary, Canada.
- [10] YUAN L, MLADEN K. Optional estimate of transmission line fault location considering measurement errors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1335-1341.
- [11] 王茂海, 鲍捷, 齐霞, 等. 基于 PMU 实测数据的输电线路参数在线估计方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 25-27.  
WANG Maohai, BAO Jie, QI Xia, et al. Online estimation of transmission line parameters based on PMU measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 25-27.
- [12] 陆进军, 张力. 基于 PMU 量测的线路参数辨识算法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(11): 27-31.  
LU Jinjun, ZHANG Li. Line parameter identification algorithm based on PMU measurements[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(11): 27-31.
- [13] 黄潇潇, 杨韬, 郑晓麟, 等. 基于 PMU 量测信息的短线路同杆并架双回线参数辨识[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 141-148.  
HUANG Xiaoxiao, YANG Tao, ZHENG Xiaolin, et al. Parameter identification of short parallel double-circuit lines based on PMU measurements[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 141-148.
- [14] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 非线性系统带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波[J]. 控制与决策, 1990, 5(5): 1-6.  
ZHOU Donghua, XI Yugeng, ZHANG Zhongjun. Suboptimal fading extended Kalman filter for nonlinear systems[J]. Control and Decision, 1990, 5(5): 1-6.
- [15] 崔永林, 席燕辉, 张小东. 基于自适应卡尔曼滤波残差分析的谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 92-100.  
CUI Yonglin, XI Yanhui, ZHANG Xiaodong. Detection of harmonic based on residual analysis using adaptive Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 92-100.
- [16] 张叶贵, 刘敏, 石倩, 等. 基于自适应容积卡尔曼滤波的主动配电网状态估计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(19): 27-32.  
ZHANG Yegui, LIU Min, SHI Qian, et al. State

- estimation of active distribution network based on UKF[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(19): 27-32.
- [17] 罗永平, 刘敏, 谭文勇. 基于无迹粒子滤波的配电网状态估计[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(16): 71-77.  
LUO Yongping, LIU Min, TAN Wenyong. State estimation of distribution network based on unscented particle filter[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(16): 71-77.
- [18] 刘子幸, 王子赟, 纪志成. 基于逆向卡尔曼滤波的电力变换器故障诊断方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9): 19-26.  
LIU Zixing, WANG Ziyun, JI Zhicheng. Inverse Kalman filtering based converter fault diagnosis method[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(9): 19-26.
- [19] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(1): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [20] JULIER S, UHLMANN J, DURRANT-WHYTE H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(3): 477-482.
- [21] JULIER S S J. The scaled unscented transformation[C] // *Proceedings of the 2002 American Control Conference*, May 8-10, 2002, Anchorage, AK, USA: 4555-4559.
- [22] 贺觅知. 基于卡尔曼滤波的电力系统动态状态估计算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
HE Mizhi. Study on power system dynamic estimation calculation based on Kalman filter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [23] 孙怡, 何光宇, 翟少鹏. 基于无迹卡尔曼滤波的电力系统抗差动态估计[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(4): 1-6.  
SUN Yi, HE Guangyu, ZHAI Shaopeng. Robust dynamic estimation for power system based on unscented Kalman filter[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(4): 1-6.
- [24] 李大路, 李蕊, 孙元章. 混合量测下基于 UKF 的电力系统动态状态估计[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(17): 17-21.  
LI Dalu, LI Rui, SUN Yuanzhang. Power system dynamic state estimation with mixed measurements based on UKF[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(17): 17-21.
- [25] 徐凯, 毕天姝, 郭津瑞, 等. 卫星同步授时偏差对 PMU 量测的影响[J]. *电网技术*, 2015, 39(5): 1323-1328.  
XU Kai, BI Tianshu, GUO Jinrui, et al. Impact of time service synchronization deviation on PMU measurement[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(5): 1323-1328.
- [26] 刘灏, 毕天姝, 周星, 等. 电力互感器对同步相量测量的影响[J]. *电网技术*, 2011, 35(6): 176-182.  
LIU Hao, BI Tianshu, ZHOU Xing, et al. Impact of instrument transformers on synchronous phasor measurement[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(6): 176-182.
- [27] 曹闯. PMU 数据质量对系统动态监测和线路参数辨识影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.  
CAO Chuang. Research on the effect of PMU data quality on power system dynamic monitoring and line parameter identification[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [28] 赵洪山, 田甜. 基于自适应无迹卡尔曼滤波的电力系统动态状态估计[J]. *电网技术*, 2014, 38(1): 188-192.  
ZHAO Hongshan, TIAN Tian. Dynamic state estimation for power system based on an adaptive unscented Kalman filter[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(1): 188-192.
- [29] 闵伟, 周志宇, 周振华. 改进型 Sage-Husa 卡尔曼滤波器在电压暂降检测中的应用[J]. *电网技术*, 2013, 37(1): 230-234.  
MIN Wei, ZHOU Zhiyu, ZHOU Zhenhua. Application of improved Sage-Husa Kalman filter in voltage sag detection[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(1): 230-234.

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-12-31

作者简介:

杨 韬(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统状态估计; E-mail: 784690711@qq.com

罗萍萍(1969—), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为继电保护, 配网自动化; E-mail: 592860862@qq.com

黄星宇(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为次同步振荡抑制与稳定性分析、电力系统谐波检测。

(编辑 周金梅)