

基于抗差总体最小二乘法的电力系统谐波状态估计

牛胜锁, 张达, 梁志瑞, 霍晓娣

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 介绍了谐波状态估计的数学模型及最小二乘和总体最小二乘的求解算法, 综合考虑测量误差和参数误差的影响, 利用总体最小二乘法进行谐波状态估计。分析了测量粗差对估计结果的影响, 针对总体最小二乘法不具备抑制粗差能力的缺点, 提出利用抗差总体最小二乘法进行谐波状态估计。用 Matlab 搭建了 IEEE-14 节点谐波测试系统仿真模型, 在测量数据和参数矩阵中分别加入含有粗差的正态分布误差及正态分布误差, 画出概率密度曲线图, 并对总体最小二乘法、抗差最小二乘法和抗差总体最小二乘法进行比较, 结果表明利用抗差总体最小二乘法能够得到更精确的谐波状态估计结果。

关键词: 谐波状态估计; 测量误差; 参数误差; 总体最小二乘法; 抗差总体最小二乘法

Power system harmonic state estimation based on robust total least squares

NIU Sheng-suo, ZHANG Da, LIANG Zhi-rui, HUO Xiao-di

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The mathematical model of harmonic state estimation and total least squares method are introduced. Harmonic state estimation is analyzed using robust total least squares method, considering the effect of measurement error and parameter error. This paper analyzes the shortcoming of total least squares that it is less capable of resisting gross error and proposes that the robust total least squares is used for harmonic state estimation. A mathematical model of IEEE-14 bus system is built in Matlab. Normal distribution error of gross error is added to measurement data, so as to normal distribution error to parameter matrix. The probability density curve and a comparison among total least squares, robust least squares and robust total least squares show that harmonic state estimation based on robust total least squares is the most accurate.

Key words: harmonic state estimation; measurement error; parameter error; total least squares; robust total least squares

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)11-0106-06

0 引言

随着电力系统的发展, 非线性设备及负荷在电力网络中大量增加, 由此而产生的谐波问题影响了电力系统的正常运行。为了有效地治理谐波及其产生的一系列问题, 对谐波的产生和扩散进行监视是十分必要的, 而电力系统谐波状态估计可以根据电网部分节点的测量值来估计整个网络的谐波状态, 实现对谐波的有效监视^[1-2]。

1989年谐波状态估计问题被 Heydt 首次提出^[3], 引起了许多学者和电力工作者的兴趣, 使其得到了快速发展。文献[4]提出了以电压和电流作为测量量, 谐波电压作为状态量的最小二乘谐波状态估计方法, 这一方法需要足够的冗余测量, 当系统复杂母线数目较多时, 冗余度较大, 此时的矩阵运算量较大, 而且测量费用昂贵。针对这一不足, 提

出奇异值分解的谐波状态估计方法^[5-7], 这一方法能够在系统状态非完全可观的情况下对电网谐波状态进行有效的估计, 降低了对测量冗余的要求。文献[8]根据不同次数谐波呈现不同的相序特性, 介绍了电力谐波原件的序参数数学模型和考虑谐波相序特性的网络数学模型, 提出了考虑谐波相序特性的谐波状态估计算法。文献[9]提出了一种基于相量量测的电力系统谐波状态估计算法, 并通过优化测量方程和母线编号, 提出了谐波状态估计的分层算法, 大幅降低了量测矩阵的维数。文献[10]针对最小二乘法无抗粗差能力的缺点, 提出了抗差最小二乘谐波状态估计方法, 当测量量中有粗差存在时这一方法能够得到更精确的估计结果。以上方法是最小二乘法和以最小二乘法为基础的方法, 均没有考虑到参数误差对估计结果的影响。为了弥补最小二乘法的不足, 文献[11]提出了综合考虑测量误差和参数

误差的总体最小二乘谐波状态估计方法, 并通过分析计算得出参数误差对谐波状态估计的影响不可忽略, 但这一方法并没有考虑到粗差对估计结果的影响。

在实际的电力系统中, 测量误差总会存在, 有时会有粗差。总体最小二乘法不具备抑制粗差的能力, 有粗差存在时, 总体最小二乘法不能准确估计出电网的谐波状态, 为了提高谐波状态估计抑制粗差的能力, 本文提出运用抗差总体最小二乘法^[12]进行谐波状态估计。

1 谐波状态估计数学模型

谐波状态估计的数学模型是电压量测, 电流量测或其形式变化后的组合^[13]。本文选用节点电压作为状态量, 部分节点电压和与测量节点相连的支路电流作为测量量。

当不考虑测量误差和参数误差时, 谐波状态估计的数学模型可表示为

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (1)$$

式中: \mathbf{z} 为 $n \times 1$ 维不含误差时的测量真值; \mathbf{H} 为 $n \times m$ 维不含误差时的参数矩阵真值; \mathbf{x} 为 $m \times 1$ 待求状态量。

由于实际系统中测量的仪器不精确, 测量的方法不合理, 加上随机噪声和通信问题等因素的影响, 测量量已不再是真值^[14-16], 在考虑了测量量的误差后式(1)变为

$$\mathbf{z} + \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为由于随机噪声、变换器误差和通信问题而导致的 $n \times 1$ 维量测误差向量。

现有的谐波状态估计的方法中, 基于式(2)的最小二乘法和加权最小二乘法的使用较为广泛。最小二乘法和加权最小二乘法是以网络参数完全已知和确定为前提, 但实际上网络参数的准确值难以获得。

当同时考虑测量误差和参数误差时, 即参数矩阵 \mathbf{H} 和测量相量 \mathbf{z} 均被噪声所污染, 谐波状态估计的数学模型可表示为

$$\mathbf{z} + \boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{H} + \mathbf{E}_H)\mathbf{x} \quad (3)$$

式中: \mathbf{E}_H 为 $n \times m$ 维参数矩阵元素的随机误差; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 \mathbf{E}_H 具有独立, 同分布, 服从零均值和相同的方差。

2 谐波状态估计数学模型的求解

谐波状态估计问题就是按照相应的估计准则, 通过计算得到使目标函数最优的状态值的过程。

2.1 最小二乘估计

最小二乘的观测方程为

$$\mathbf{z} + \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (4)$$

相应的残差方程为

$$\mathbf{v} = \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{z} \quad (5)$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}$ 为 \mathbf{x} 的估值; \mathbf{v} 为观测余差相量。最小二乘估计准则为

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \min \quad (6)$$

求解未知参数 \mathbf{x} 的最小二乘估值 $\hat{\mathbf{x}}$ 的法方程为

$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{H}^T \mathbf{z} = 0 \quad (7)$$

估值 $\hat{\mathbf{x}}$ 为

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{z} \quad (8)$$

由于最小二乘没有考虑到参数误差及粗差对估计结果的影响, 因此最小二乘和以最小二乘为基础的谐波状态估计算法, 均不能全面的反应实际的电力系统中不确定因素对谐波状态估计的影响^[17]。针对这一问题本文提出将抗差总体最小二乘估计用于谐波状态估计。

2.2 抗差总体最小二乘估计

总体最小二乘法观测方程为

$$\mathbf{z} + \boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{H} + \mathbf{E}_H)\mathbf{x} \quad (9)$$

总体最小二乘法的准则为:

$$\min_{[\boldsymbol{\varepsilon}; \mathbf{E}_H]} \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{E}_H \\ \boldsymbol{\varepsilon} \end{bmatrix} \right\|_F \quad (10)$$

式中: $\| \cdot \|_F$ 表示 Frobenius 范数; $[\mathbf{E}_H; \boldsymbol{\varepsilon}]$ 表示 $n \times (m+1)$ 维的增广矩阵^[18]。将增广矩阵 $[\mathbf{H}; \mathbf{z}]$ 进行奇异值分解(SVD)得

$$[\mathbf{H}; \mathbf{z}] = \mathbf{U}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (11)$$

式中: $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n] \in \mathbf{R}^{n \times n}$; $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{m+1}] \in \mathbf{R}^{(m+1) \times (m+1)}$; $\boldsymbol{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_{m+1})$ 并且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_m > \sigma_{m+1}$ 。

因此, 当 $\sigma_m > \sigma_{m+1}$ 且 $\mathbf{v}_{m+1, m+1} \neq 0$ 时, 系数矩阵和观测值向量的总体最小二乘估计为

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{H}} \\ \hat{\mathbf{z}} \end{bmatrix} = \mathbf{U}\hat{\boldsymbol{\Sigma}}\mathbf{V}^T \quad (12)$$

式中: $\hat{\boldsymbol{\Sigma}} = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_m, 0)$, 因此参数的总体最小二乘估计可以通过奇异值分解(SVD)得到^[19-20], 即有

$$\hat{\mathbf{x}} = -\frac{1}{\mathbf{v}_{m+1, m+1}} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1, m+1}, \dots, \mathbf{v}_{m, m+1} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

由于总体最小二乘法无抵御粗差的能力, 本文将 Huber 抗差估计与之相结合用于电力系统谐波状态估计, 来解决该问题。

所谓抗差估计,既是通过选择适当的估计方法,得到实际模式下的最佳估计值。抗差总体最小二乘估计是以加权总体最小二乘估计为基础得来的,主要体现在变权上,当测量值对应的残差超过限定门槛值时,对该测量量的对应权值进行降权处理,不超过时则权值保持不变。

抗差估计基本上可分为三大类: M 估计、L 估计和 R 估计。M 估计是经典的极大似然估计的推广,称为广义极大似然型估计^[21]。本文所用的 Huber 抗差估计即为广义极大似然估计的一种。

考虑参数矩阵 H 含有误差的加权 EIV 模型:

$$\begin{cases} z + \varepsilon = (H + E_H) \cdot x \\ \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \text{vec} E_H \end{bmatrix} \sim \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P_z^{-1} & 0 \\ 0 & P_H^{-1} \end{bmatrix} \right) \end{cases} \quad (14)$$

式中:“vec”为矩阵列向量化算子, σ_0^2 为单位权方差; P_z 和 P_H 分别为测量向量和系数矩阵的权阵。其中 $P_H = P_0 \otimes P_x$, $P_0 \in R$, $P_x \in R$, P_0 为参数矩阵 H 的列向量权阵, P_x 为参数矩阵 H 的行向量权阵,平差计算中为了不影响常数项,对于 H 中不需要改正的第 j 列,令 $P_0 = (i,j) = 0$,其余为 1, $P_x = P_z$ 。“ \otimes ”代表的是矩阵之间的直积,相应的抗差总体最小二乘的估计准则为^[22]

$$\varepsilon^T P_z \varepsilon + \varepsilon_H^T P_H \varepsilon_H = \min \quad (15)$$

根据拉格朗日极值条件,建立方程:

$$\Phi(\varepsilon, \varepsilon_H, \lambda, x) = \varepsilon^T P_z \varepsilon + \varepsilon_H^T P_H \varepsilon_H + 2\lambda^T (z - \varepsilon - Hx + (x^T \otimes I_n) \varepsilon_H) \quad (16)$$

其中, λ 为拉格朗日乘子,令 $(x^T \otimes I_n) = B$, 分别对 ε 、 ε_H 、 λ 、 x 求导可得

$$P_z \varepsilon = \lambda \quad (17)$$

$$P_H \varepsilon_H + B^T \lambda = 0 \quad (18)$$

$$z + \varepsilon - Hx - B \varepsilon_H = 0 \quad (19)$$

$$-H^T \lambda = 0 \quad (20)$$

由式(17)、式(18)可得

$$\varepsilon = P_z^{-1} \lambda \quad (21)$$

$$\varepsilon_H = -P_H^{-1} B^T \lambda \quad (22)$$

将式(21)、式(22)代入式(19)得

$$\lambda = (P_z^{-1} + B P_H^{-1} B^T)^{-1} (z - Hx) \quad (23)$$

Huber 权因子如式(24)所示,选取相应的权函数

$$P(v) \begin{cases} 1, & |v| \leq k \\ k \cdot \text{sign}(v) / |v| = k / |u|, & |v| > k \end{cases} \quad (24)$$

式中, $v = (1 - h_i^T \hat{x}) / s$; s 在 $|v| \leq k$ 区间取 $\hat{\sigma}$ (标准差), 在 $|v| > k$ 区间取 MAD ,

$$MAD = \text{med}_i |l_i - h_i^T \hat{x}|.$$

采用迭代算法进行计算: 设定初值, $E_{H(0)} = 0$, $P_{z(0)} = I_n$ 。

$$\hat{x}_{(0)} = (H_{(0)}^T H_{(0)})^{-1} H_{(0)} z \quad (25)$$

由式(17)~式(23)可得迭代计算步骤如下,从 $i = 0$ 开始迭代。

$$H_{(i)} = H - E_{H(i)} \quad (26)$$

$$B_i = x_i^T \otimes I_n \quad (27)$$

$$\Delta z_i = z - H_i x_i \quad (28)$$

$$Q_{li} = P_{z(i)}^{-1} + B_i P_H^{-1} B_i^T \quad (29)$$

$$\Delta \hat{x}_{(i+1)} = (H_{(i)}^T Q_{li}^{-1} H_{(i)})^{-1} H_{(i)}^T Q_{li}^{-1} (\Delta z_i - E_{H(i)} x_{(i)}) \quad (30)$$

$$E_{H(i)} = -P_x^{-1} \left(P_z^{-1} + (\hat{x}_{(i)}^T P_0^{-1} \hat{x}_{(i)}) P_x^{-1} \right)^{-1} \times \quad (31)$$

$$(z - H_{(i)} \hat{x}_{(i)}) \hat{x}_{(i)}^T P_0^{-1}$$

$$x_{(i+1)} = x_{(i)} + \Delta \hat{x}_{(i+1)} \quad (32)$$

迭代直至前后两次误差小于所设定的阈值,即 $\|\hat{x}_{i+1} - \hat{x}_i\| < \delta$ 。

3 算法的仿真实验

仿真系统采用 IEEE-14 节点谐波测试系统,其拓扑关系如图 1 所示,采用 Matlab 7.8 仿真软件搭建统数学模型进行仿真分析。

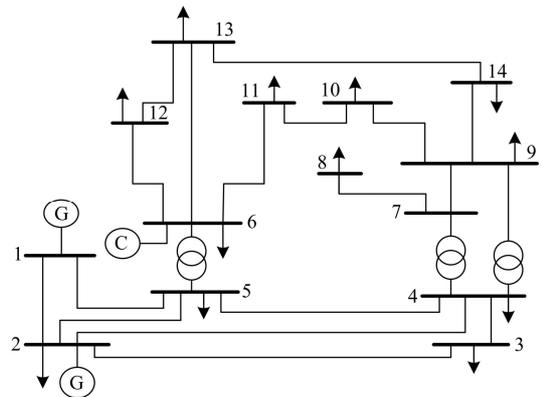


图 1 IEEE-14 节点谐波测试系统

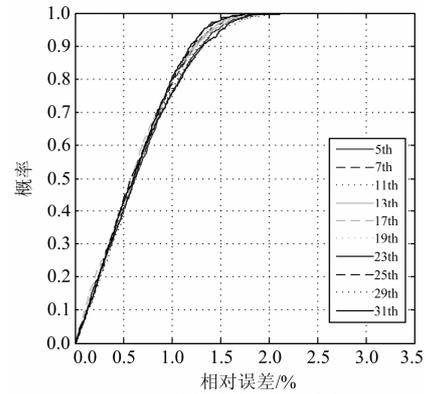
Fig. 1 IEEE-14 bus harmonic test system

该系统是一个具有 14 节点的三相完全对称系统,包括两个谐波源,分别是位于 3 节点的高压直

流输电系统的终端以及位于 8 节点的静止无功补偿器(SVC)^[23]。在 2、6、8、9 母线上配置相量测量单元 (Phasor Measurement Unit, PMU), 选择节点电压为状态量, 与这 4 个节点相连的支路电流、母线电压及注入电流相量为测量量。

在参数矩阵中加入 $\pm 1\%$ 以内的正态分布误差, 在测量相量幅值中加入 $\pm 1\%$ 以内的正态分布误差并在个别数据上加入粗差, 在测量相量相角中加入 $\pm 0.5^\circ$ 以内的误差^[24-25]。分别用总体最小二乘法, 抗差最小二乘法和抗差总体最小二乘法对不大于 31 次的 $6k \pm 1$ 次谐波进行状态估计, 在误差分析中, 由于单次抽样结果具有较大的随机性, 设定在多次谐波状态估计过程中抽样 1000 次, 分别用总体最小二乘法, 抗差最小二乘法和抗差总体最小二乘法计算每次抽样估计各节点电压幅值的相对误差, 抽样计算结束后绘制估计相对误差的累计概率密度曲线图, 如图 2、图 3 所示。图中横坐标为电压幅值估计的相对误差, 纵坐标为小于对应相对误差的概率。

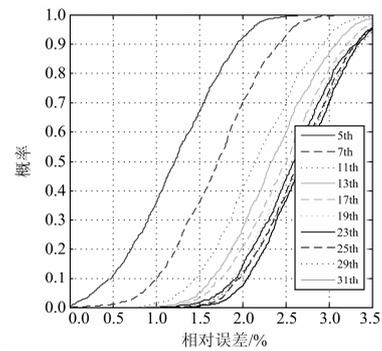
图 2 和图 3 分别描述了不同方法中节点 10 和节点 13 上的不大于 31 次的 $6k \pm 1$ 次谐波的估计误差特征。由图 2 可知, 用总体最小二乘法的估计结



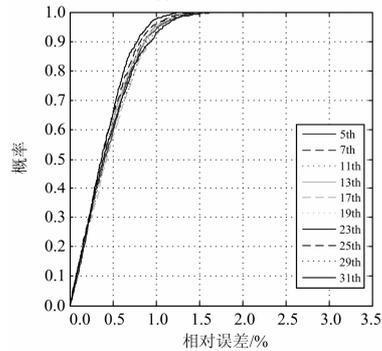
(c) 抗差总体最小二乘法

图 2 节点 10 谐波电压估计相对误差累计概率密度曲线

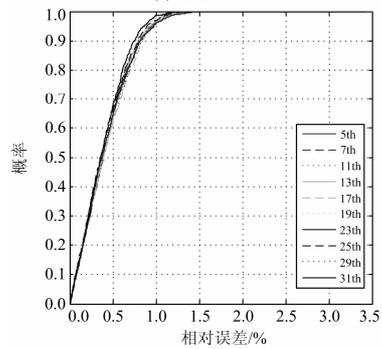
Fig. 2 The cumulative probability density curve of harmonic voltage estimation relative error in bus 10



(a) 总体最小二乘法



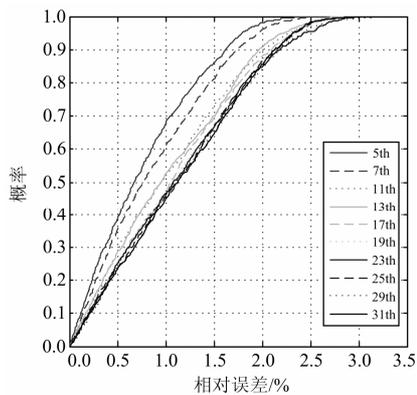
(b) 抗差最小二乘法



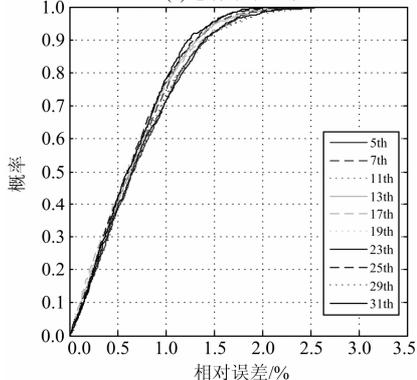
(c) 抗差总体最小二乘法

图 3 节点 13 谐波电压估计相对误差累计概率密度曲线

Fig. 3 The cumulative probability density curve of harmonic voltage estimation relative error in bus 13



(a) 总体最小二乘法



(b) 抗差最小二乘法

果中相对误差小于1%的概率约为45%，其最大相对误差可达到3.3%；抗差最小二乘法估计的结果中相对误差小于1%的概率大约为70%，而由抗差总体最小二乘法估计的结果中相对误差小于1%的概率大约为76%。由图3可知，总体最小二乘法由于没有抑制粗差的能力，其在节点13上估计的测谐波电压的相对误差累计概率密度曲线畸变严重，节点13上抗差最小二乘法估计结果中相对误差小于1%的概率约为90%，抗差总体最小二乘法估计结果中相对误差小于1%的概率约为95%。综上可知在1000次的采样分析中，抗差总体最小二乘法的计算结果更优。

4 结论

在实际的电力系统中得到系统参数的准确值很困难，参数误差必然存在。总体最小二乘法综合考虑了测量误差和参数误差，但它不具备抑制粗差的能力，本文针对这一不足，提出谐波状态估计的抗差总体最小二乘法，通过仿真对总体最小二乘法、抗差最小二乘法和抗差总体最小二乘法进行了对比，结果表明抗差总体最小二乘法在综合考虑了参数误差，测量误差和粗差的情况下，估计结果的准确性要优于总体最小二乘法和抗差最小二乘法。

本文所加粗差在非杠杆测量点，杠杆测量具有很强的保差性，当杠杆测量点出现粗差时，抗差总体最小二乘法不能得到准确结果，如何在数据处理方面采用相应的措施，削弱杠杆观测的保差影响，需要进一步的研究工作。

参考文献

- [1] 徐志向, 侯世英, 吕厚余, 等. 电力系统谐波源定位方法评述[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(3): 64-67.
XU Zhi-xiang, HOU Shi-ying, Lü Hou-yu, et al. A survey on location method for harmonic sources in power system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(3): 64-67.
- [2] 张谦, 韩维键, 俞集辉, 等. 电动汽车充电站仿真模型及其对电网谐波影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 159-164.
ZHANG Qian, HAN Wei-jian, YU Ji-hui, et al. Simulation model of electric vehicle charging station and the harmonic analysis on power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 159-164.
- [3] HEYDT G T. Identification of harmonic sources by a state estimation technique[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 569-576.
- [4] MELIOPOULOS A P S, ZHANG Fan, SHALOM Z. Power system harmonic state estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3): 1701-1709.
- [5] 徐志向, 侯世英, 周林, 等. 基于奇异值分解的电力系统谐波状态估计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(11): 28-31.
XU Zhi-xiang, HOU Shi-ying, ZHOU Lin, et al. Power system harmonic state estimation based on singular value decomposition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(11): 28-31.
- [6] 侯世英, 汪瑶, 祝石厚, 等. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计算法的研究[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 42-46.
HOU Shi-ying, WANG Yao, ZHU Shi-hou, et al. Study of phasor measurements based power system harmonic state estimation algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(2): 42-46.
- [7] MATAIR S S, WATSON N R, WONG K P. H-armonic state estimation: a method for remote harmonic assessment in aderegulated utility network[C] // 2000 International Conference on Electric Utility DRPT, 2000: 4-7.
- [8] 谭志勇, 王艳松. 考虑谐波相序特性的谐波状态估计算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 79-84.
TAN Zhi-yong, WANG Yan-song. Study on the harmonic state estimation algorithm considering the phase sequence characteristics of harmonic[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 79-84.
- [9] 吴笃贵, 徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计(I)——理论、模型与求解算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 64-68.
WU Du-gui, XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurements (I)——theory, model and solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 64-68.
- [10] 牛胜锁, 刘颖, 梁志瑞, 等. 基于广域测量系统和抗差最小二乘法的电力系统谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 10-14.
NIU Sheng-suo, LIU Ying, LIANG Zhi-rui, et al. Power system harmonic state estimation based on generalized measurement and robust least squares[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 10-14.
- [11] 周念成, 谭桂华, 赵渊, 等. 一种计及参数误差的电网谐波状态估计方法[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(2):

- 146-150.
ZHOU Nian-cheng, TAN Gui-hua, ZHAO Yuan, et al. A method for considering parameter errors in power system harmonic state estimation[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(2): 146-150.
- [12] 陈玮娴, 袁庆. 抗差总体最小二乘法[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 32(6): 112-113.
CHEN Wei-xian, YUAN Qing. A robust total least-squares method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 32(6): 112-113.
- [13] 李丽, 马宏忠, 姜宁, 等. 基于改进偏最小二乘的系统谐波阻抗及谐波发射水平估算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 92-95.
LI Li, MA Hong-zhong, JIANG Ning, et al. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on improved partial least-squares regression method[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 92-95.
- [14] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-160.
LIANG Zhi-rui, YE Hui-qiang, ZHAO Fei. Overview on power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-160.
- [15] 周念成, 谭桂华, 何建森, 等. 基于统计方法的电网谐波状态估计误差分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 109-114.
ZHOU Nian-cheng, TAN Gui-hua, HE Jian-sen, et al. error analysis in harmonic state estimation of power system based on the statistical approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 109-114.
- [16] 谭桂华. 基于总体最小二乘法的电网谐波状态估计及误差分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
TAN Gui-hua. Harmonic state estimation of power system based on total least squares and its error analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [17] 李响, 刘玲群, 郭志忠. 抗差最小二乘法状态估计[J]. 继电器, 2003, 31(7): 50-53.
LI Xiang, LIU Ling-qun, GUO Zhi-zhong. State estimation with the least robustness square method[J]. Relay, 2003, 31(7): 50-53.
- [18] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
ZHANG Xian-da. Matrix analysis and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [19] 李红伟, 魏少春, 陈安平, 等. 总体最小二乘法在直线拟合中的应用[J]. 地矿测绘, 2010, 26(2): 4-5.
LI Hong-wei, WEI Shao-chun, CHEN An-ping, et al. Application of total least squares in straight line fitting[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2010, 26(2): 4-5.
- [20] GOLUB H G, VAN LOAN F C. An analysis of the total least squares problem[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1980, 17(6): 883-893.
- [21] 祝石厚, 侯世英, 吕厚余. 电力系统谐波分析的有效方法: 谐波状态估计综述[J]. 现代电力, 2007, 24(3): 6-10.
ZHU Shi-hou, HOU Shi-ying, Lü Hou-yu. Analysis method for power system harmonics: review on harmonic state estimation[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(3): 6-10.
- [22] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-259.
ZHANG Peng, LI Hong-bin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete wavelet transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 252-259.
- [23] SHEN Y Z, LI B F, CHEN Y. An iterative solution of weighted total least-squares adjustment[J]. Journal of Geodesy, 2010, 85(4): 229-238.
- [24] 周江文. 抗差最小二乘法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.
ZHOU Jiang-wen. Robust least squares[M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1997.
- [25] 徐志向. 基于奇异值分解算法的谐波状态估计及谐波源定位的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
XU Zhi-xiang. Harmonic state estimation of singular value decomposition-based and harmonic source location research[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

收稿日期: 2013-08-18; 修回日期: 2013-09-27

作者简介:

牛胜锁(1980-), 男, 博士, 研究方向为电气设备参数的测量技术与研究;

张达(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波状态估计与谐波源定位; E-mail: 88520987@qq.com

梁志瑞(1959-), 男, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化、电力系统广域测量技术与应用。