

· 自动化技术 ·

抗不良杠杆量测的稳定收敛状态估计方法

余娟¹, 廖龙飞¹, 朱黎丽³, 颜伟¹, 赵雪骞², 赵霞¹

(1. 重庆大学输电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 沙坪坝区 400044; 2. 国网北京电力科学研究院 北京 丰台区 100075;
3. 重庆工程职业技术学院电气工程学院 重庆 沙坪坝区 400037)

【摘要】不良杠杆量测使得传统的含有不良数据辨识的状态估计方法失效, 严重降低了状态估计的精度, 为了能够自动排除不良杠杆量测的干扰, 同时保证状态估计计算的数值稳定性和收敛性, 提出了抗不良杠杆量测的稳定收敛状态估计方法。在利用等价权原理并统一量测残差尺度的基础上, 提出了采用标准化残差的指数型权函数, 并基于此得到抗差状态估计模型。该模型能够根据量测残差自动修正量测权重, 具有较强地抵抗不良杠杆量测的能力, 能有效保证算法的数值稳定性和收敛速度。分别采用3节点和IEEE118节点算例对该方法的特点进行了验证。

关键词 不良杠杆量测; 收敛性; 指数型权函数; 数值稳定性; 抗差状态估计

中图分类号 TM744

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.04.014

Stable Convergence State Estimation Method for Bad Leverage Measurements

YU Juan¹, LIAO Long-fei¹, ZHU Li-li³, YAN Wei¹, ZHAO Xue-qian², and ZHAO Xia¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University Shapingba Chongqing 400044;
2. State Grid Beijing Electric Power Research Institute Fengtai Beijing 100075;
3. College of Electrical Engineering, Chongqing Institute of Engineering Shapingba Chongqing 400037)

Abstract Traditional state estimation methods which include bad data identification fail in bad leverage measurements, resulting the degradation of state estimation precision. In order to exclude the interference of bad leverage measurements automatically, while ensuring the numerical stability and convergence of state estimation calculation, this paper proposes a stable convergence state estimation method for bad leverage measurements. On the base of utilizing the principle of equivalent weight and unifying the scales of measurement residuals, this paper presents the exponential weight function by using the standardized residual and builds the model of robust state estimation. This model can correct the weight of measurement automatically according to the measurement residual, therefore, shows the strong ability to resist bad leverage measurements and effectively guarantee the numerical stability and convergence speed. The characteristics of the proposed method are demonstrated on the 3-bus and the 118-bus systems.

Key words bad leverage measurements; convergence; exponential weight function; numerical stability; robust state estimation

杠杆量测与系统的结构紧密相关, 目前已知的产生杠杆量测的原因^[1]有: 1) 配置在连有较多线路的母线上的注入功率量测; 2) 与短线路相关联的节点注入功率量测; 3) 短线路上的支路功率量测; 4) 对零注入功率虚拟量测使用非常大的权重, 可见在电力系统中较易出现杠杆量测。从本质上讲, 杠杆量测是指量测残差灵敏度矩阵对角线元素接近0

的量测, 一旦在杠杆量测中出现不良数据^[2-3], 那么, 根据量测残差辨识不良数据的传统状态估计方法便会失效, 此时的状态估计结果也就不能反映系统的实际运行状态, 也将影响后续分析计算及决策的正确性^[4-8]。因此, 研究能够很好地排除不良杠杆量测的抗差估计方法十分必要。人们在排除不良杠杆量测, 提高状态估计精度方面已有部分研究。采用映

收稿日期: 2013-11-27; 修回日期: 2014-03-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费(CDJZR13150008)

作者简介: 余娟(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统优化运行及风险评估、电力系统静态等值、状态估计方面的研究。

射统计原理辨识杠杆量测以及“2阶段选择等价权”抗差估计方法分别被提出^[4-5], 文献[6-7]提出针对配电网不良杠杆量测的抗差估计方法, 其特点是在WLAV估计中引入结构抗差因子, 并转化为等价权函数。以上文献的共同思路是采用了等价权原理^[9], 其基本思想是将M估计的求解转化为最小二乘估计进行求解, 从而给传统最小二乘估计赋予抗差能力, 对不良杠杆量测具有一定的抑制作用。但这些方法均对量测误差提出了假设, 一旦系统量测误差不服从其假设分布, 那么将对这些方法的抗差效果产生不利影响。另外, 文献[8]提出以残差绝对值为幂的指数权函数的抗差最小二乘(ELAV)估计方法, 由于不良杠杆量测的残差与正常量测的残差几乎无异, 因此难以通过残差的绝对值来辨识不良杠杆量测。

针对以上问题有学者基于信息学理论中的最小信息损失决策原理提出指数型目标函数(MES)电力系统抗差状态估计方法^[10-11]。该方法能够适应任何概率分布的量测误差, 对不良杠杆量测有很强的抑制作用, 能够在状态估计过程中自动排除不良量测, 无需不良数据辨识环节。但该方法还存在不足: 1) Parzen窗法的特性决定了其容易陷入较差的局部解, 而Parzen窗宽初值选择不当可能会导致算法不收敛或者计算结果不够准确, 数值稳定性不强。2) 在寻优计算中Parzen窗宽不能减小太快, 从而导致迭代次数有所增加, 计算效率还有待提高。

本文针对以上不足进行了分析, 在利用等价权原理, 考虑量测残差尺度统一性问题的基础上, 提出采用标准化残差的指数型权函数及抗不良杠杆量测的稳定收敛状态估计方法。该方法具有较强的抗不良杠杆量测的能力, 能够根据量测残差自动修正量测权重。本文采用带等式约束的法方程法进行求解, 能有效保证算法的数值稳定性, 状态估计结果准确可靠, 具有较快的收敛速度。

1 抗不良杠杆量测的稳定收敛状态估计模型及其特点的理论分析

1.1 模型的提出

根据等价权原理可知任何M估计的求解可转化为最小二乘估计进行求解, 从而给传统最小二乘估计赋予抗差能力, 因此本文首先提出抗不良杠杆量测的稳定收敛状态估计模型:

$$\begin{cases} \min J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m w_i^* [z_i - h_i(\mathbf{x})]^2 \\ \text{s. t. } \mathbf{c}(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $J(\mathbf{x})$ 为最小二乘形式的目标函数; m 为系统的量测数; \mathbf{x} 为 n 维状态变量, 包括节点电压的幅值与相角; w_i^* 、 z_i 、 $h_i(\mathbf{x})$ 分别为第 i 号量测的指数型权函数、量测值、量测函数; $\mathbf{c}(\mathbf{x})=0$ 为 p 维零注入功率等式约束。由于实际电力系统中存在大量的零注入功率节点, 利用这些精确的虚拟量测可提高状态估计的精度, 因此在本文模型中加入零注入功率的等式约束。

MES抗差状态估计模型的目标函数为:

$$J_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m w_i \exp\left(-\frac{[z_i - h_i(\mathbf{x})]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中, σ 为Parzen窗宽; w_i 为 i 号量测的固定权重。当 $J_1(\mathbf{x})$ 取极值时, 则有:

$$\frac{\partial J_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \sum_{i=1}^m \mathbf{H}_i \frac{w_i}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_i^2}{2\sigma^2}\right) r_i = 0 \quad (3)$$

式中, \mathbf{H}_i 为第 i 号量测函数 $h_i(\mathbf{x})$ 对 \mathbf{x} 的偏导数; r_i 为第 i 号量测的残差, 即 $r_i = z_i - h_i(\mathbf{x})$ 。

令 $R_i = \frac{w_i}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_i^2}{2\sigma^2}\right)$, 则式(3)可改写成:

$$\frac{\partial J_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \sum_{i=1}^m \mathbf{H}_i R_i r_i = 0 \quad (4)$$

类似地, 当式(1)中 $J(\mathbf{x})$ 取极值时, 可得:

$$\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \sum_{i=1}^m \mathbf{H}_i w_i^* r_i = 0 \quad (5)$$

可见式(4)与式(5)有相同的形式, 根据等价权原理可将MES估计模型的求解转化为如式(1)所示的最小二乘模型的求解。 R_i 的常数系数项 $1/\sigma^2$ 在每次迭代中是不变的, 所以可均乘以 σ^2 , 得到初步的指数型权函数为:

$$w_i' = w_i \exp\left(-\frac{r_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

由于量测残差的方差往往不同, 需要把残差统一在同一尺度上, 这时可通过残差的协方差对式(6)中的 r_i 进行标准化处理, 以便在排除不良杠杆量测中获得更好的效果。标准化残差的计算为:

$$r_{Ni} = \frac{r_i}{\sqrt{K_{ii} w_i}} \quad (7)$$

式中, K_{ii} 为残差灵敏度矩阵 \mathbf{K} 的对角元, $K_{ii} w_i$ 为残差的协方差矩阵的对角元。残差灵敏度矩阵 \mathbf{K} 的计算公式为:

$$\mathbf{K} = \mathbf{I} - \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \quad (8)$$

式中, \mathbf{I} 和 $\mathbf{W} = \text{diag}(w_i^*)$ 分别为 $m \times m$ 维单位矩阵和指数型权函数权重矩阵; $\mathbf{H} = \partial \mathbf{h}(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}$ 为 $m \times n$ 维量测函数雅克比矩阵, 其转置矩阵用 \mathbf{H}^T 表示。

引入式(7)与式(8), 采用 r_{Ni} 替换式(6)中的 r_i , 由此提出采用标准化残差的指数型权函数为:

$$w_i^* = w_i \exp\left(-\frac{r_{Ni}^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

将式(9)代入到式(1)中, 即得到本文的抗不良杠杆量测的稳定收敛状态估计模型。

1.2 模型特点的理论分析

本文根据等价原理推导出初步的指数型权函数, 并进一步采用量测残差的协方差对 r_i 进行标准化处理, 得到采用标准化残差 r_{Ni} 的指数型权函数 w_i^* 。对于不良杠杆量测, 其残差灵敏度矩阵对角元素 K_{ii} 接近于0, 即使其 r_i 较小, 从式(7)可以看出此时的 r_{Ni} 仍很大, 因此式(9)中的 w_i^* 就会很小, 从而具有自动减小不良杠杆量测权重的作用, 对不良杠杆量测具有很强的抑制作用。

由于采用了式(9)的标准化残差的指数型权函数 w_i^* , 量测权重初值可根据量测误差方差的倒数设置, 在之后的迭代过程中本文方法将根据实际的量测数据计算标准化残差 r_{Ni} , 并应用式(9)更新所有量测权重值。这有助于解决工程人员根据历史数据选取量测权重值比较困难或者选取值偏离实际情况较大的问题。

2 模型求解算法及特点分析

2.1 模型求解及算法流程

本文的抗不良杠杆量测的稳定收敛状态估计模型包含了等式约束, 因此采用带等式约束的法方程法进行求解, 引入拉格朗日乘子向量, 将式(1)转化为以下无约束优化问题:

$$\min_{\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = J(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{c}(\mathbf{x}) \quad (10)$$

式中, $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 为增广拉格朗日函数; $\boldsymbol{\lambda}$ 为 p 维拉格朗日乘子向量。当 $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 取极值时, 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} = -\mathbf{H}^T \mathbf{W}[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] + \mathbf{C}^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{c}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (11)$$

式中, \mathbf{z} 为 $m \times 1$ 维量测向量; $\mathbf{C} = \partial \mathbf{c}(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}$ 为 $p \times n$ 维零注入功率函数雅克比矩阵。

对于非线性方程组式(11)的解可以通过迭代计算得到。将 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x}^k 附近进行泰勒展开, 忽略二次及以上的非线性项后得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}^k \\ \boldsymbol{\lambda}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{H}^T \mathbf{W}[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^k)] \\ -\mathbf{c}(\mathbf{x}^k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

令 $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}^k$, 即可求得该次迭代计算的值, k 表示迭代次数, 在满足收敛判据后迭代结束, 从而最终得到对式(10)无约束优化问题的最优解, 也即求解了各状态变量的估计值, 其求解流程如图1所示。

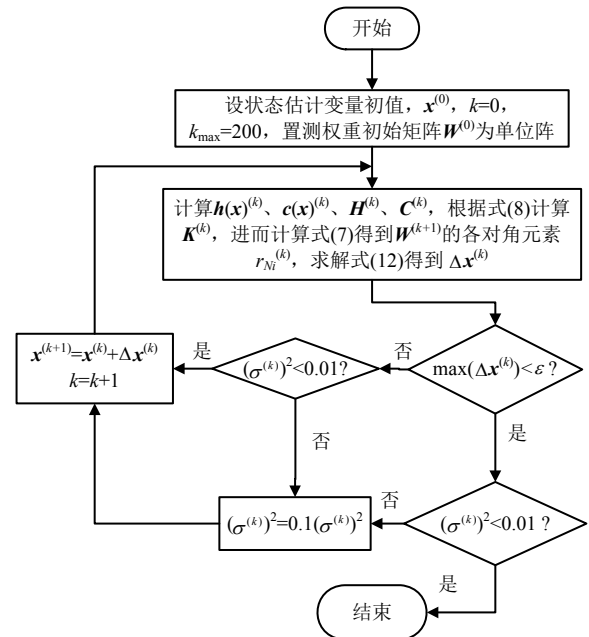


图1 本文模型的求解流程图

2.2 模型求解特点的理论分析

由于Parzen窗法的特性决定了Parzen窗宽 σ 初值会给本文算法的数值稳定性带来一定影响, 文献[10-11]中没有说明求取 σ 初值的具体方法。在本文模型的目标函数中 $J(\mathbf{x})$ 是最小二乘形式, 在含有等式约束的情况下, 采用带等式约束的法方程法进行求解, 由于其算法本身具有较好的数值稳定性, 对 σ 的初值不敏感, 式(9)中 σ 初值可在一个较大的范围之间取值, 如0.5~100, 均能保证本文方法稳定地估计出较为准确的结果。因此采用带等式约束的法方程法求解本文模型可有效避免 σ 初值选择不当所导致的估计结果较差或算法不收敛的问题。

在采用本文方法进行求解时, 每次迭代计算所需时间主要用在更新量测函数 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 和对应的雅克比矩阵 \mathbf{H} 以及指数型权函数 w_i^* 上, 同时还增加了 p 维零注入功率函数 $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ 和对应的 $p \times n$ 维雅克比矩阵 \mathbf{C} 的计算。就单次迭代计算的时间而言, 本文方法相比于WLS估计增加了 $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ 、 \mathbf{C} 和 w_i^* 的计算时间。本文方法具有良好的收敛性能, 分析其原因主要有两个方面: 一方面本文采用式(9)的标准化残差的指数型权函数, 对不良杠杆量测具有较强的抑制作用, 能够自动排除不良数据的干扰; 另一方面, 本文算法

对 σ 初值的选取要求不高,在迭代过程中其减小策略也较为灵活,因此可选择较小的 σ 初值,这样在相同的减小策略下, σ 能够更快地下降到满足收敛条件的值。综上所述,本文算法的收敛速度较快,在排除不良杠杆量测影响的同时又具有较高的计算效率。

3 方法性能验证

为了验证本文方法在抗不良杠杆量测、数值稳定性和收敛性方面的能力,在MATLAB环境下编制测试程序,以3节点系统^[12]和IEEE118节点系统的算例进行了仿真分析。

3.1 算例描述

3节点系统的网络参数、量测分布如图2所示。1号量测为杠杆量测,并设置为不良数据,其他量测值取真值(潮流计算值),如表1所示,其中 P 、 Q 分别表示有功和无功功率。

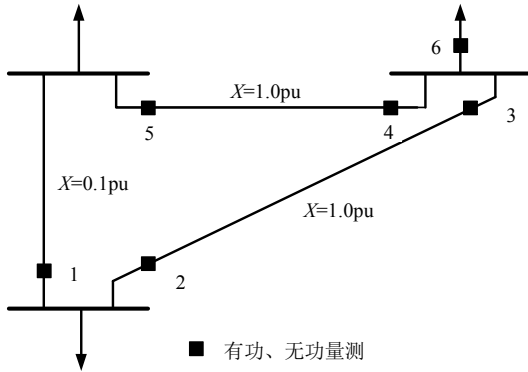


图2 3节点系统结构图

表1 3节点系统量测数据配置表

序号	真实值/pu		量测值/pu	
	P	Q	P	Q
1	-0.956 3	0.094 3	-9.956 3	1.094 3
2	-0.522 5	0.187 0	-0.522 5	0.187 0
3	0.522 5	0.095 0	0.522 5	0.095 0
4	0.602 3	0.139 9	0.602 3	0.139 9
5	-0.602 3	0.242 4	-0.602 3	0.242 4
6	1.124 8	0.234 9	1.124 8	0.234 9

对于IEEE118节点系统,12、49、59、77、80、92、100号节点的注入功率量测及与之相连支路的支路功率量测为杠杆量测^[1],并将其全部设置为不良量测。算例中采用所有节点的电压和注入功率量测以及所有支路功率量测,正常量测量的电压幅值、注入功率和支路功率的量测误差标准差分别为0.004、0.01和0.008^[13],不良量测误差标准差设为正常量测误差标准差的100倍。

3.2 处理不良杠杆量测的性能分析

现分别采用本文方法、ELAV、MES($\sigma^0=10$)和WLS估计计算3节点系统量测量的估计值(\hat{x})和残差(r),从而分析以上方法抗不良杠杆量测的能力,计算结果如表2所示。

表2 3节点系统中各方法估计结果的比较

序号	类型	本文方法和MES估计		ELAV估计		WLS估计	
		\hat{x} /pu	r /pu	\hat{x} /pu	r /pu	\hat{x} /pu	r /pu
1	P	-0.956 8	-8.999 5	-0.349 9	-9.606 4	-9.847 8	-0.108 5
	Q	0.094 4	0.999 9	1.081 6	0.012 7	1.122 1	-0.027 8
2	P	-0.522 5	0	-0.521 8	-0.000 7	-0.244 6	-0.277 9
	Q	0.187 0	0	0.144 6	0.042 4	0.414 7	0.227 7
3	P	0.522 5	0	-0.521 8	-0.000 7	0.244 6	0.277 9
	Q	0.095 0	0	0.150 1	-0.055 1	-0.283 6	0.378 6
4	P	0.602 3	0	0.602 8	-0.000 5	0.889 6	-0.287 3
	Q	0.139 9	0	0.085 2	0.054 7	0.454 0	-0.314 1
5	P	-0.602 3	0	-0.602 8	0.000 5	-0.889 6	0.287 3
	Q	0.242 4	0	0.285 2	-0.042 8	0.478 9	-0.236 5
6	P	1.124 8	0	1.124 6	0.000 2	1.134 2	-0.009 4
	Q	0.234 9	0	0.235 2	-0.000 3	0.170 5	0.064 4

从表2中可以看出本文方法和MES估计能准确地估计出系统的真实状态,1号不良杠杆量测能够被辨识并自动排除,而ELAV估计抗不良杠杆量测的能力有限,无法估计出系统的真实状态。WLS估计没有抗不良杠杆量测的能力。

3.3 数值稳定性及收敛性分析

3.3.1 数值稳定性分析

在3节点系统算例的仿真中,Parzen窗宽(σ)的初值对MES估计和本文方法结果的影响如表3所示。表中 ΔU_{mean} 和 $\Delta \theta_{\text{mean}}$ 分别表示节点电压幅值和相角估计误差绝对值的平均值。

表3 3节点系统MES估计和本文方法数值稳定性比较

σ 初值	MES估计		本文方法	
	$\Delta U_{\text{mean}}/\text{pu}$	$\Delta \theta_{\text{mean}}/\text{rad}$	$\Delta U_{\text{mean}}/\text{pu}$	$\Delta \theta_{\text{mean}}/\text{rad}$
0.5	不收敛	不收敛	0	0
1	0.095	3.855	0	0
5	0.203	0.156	0	0
10	0	0	0	0
20	—	—	0	0
50	0	0	0	0
100	不收敛	不收敛	0	0

从表3中可以看出,对于7组不同的 σ 初值,本文方法均能稳定收敛,所有估计值均等于真值。因此, ΔU_{mean} 和 $\Delta \theta_{\text{mean}}$ 均为0。由此可见,本文方法对 σ 的初值不敏感,估计结果稳定准确,数值稳定性强。MES估计对 σ 的初值较为敏感,在本算例中当 σ 取值较大

或较小时都会造成算法不收敛；当 σ 取值为20时，会造成MES估计模型求解算法中海森矩阵接近奇异，无法得到估计结果。经过大量仿真发现，本文方法中 σ 的初值取在0.5~100范围可有效避免因 σ 的初值选取不当所带来的数值稳定性问题。

3.3.2 收敛性分析

在IEEE118节点系统中进行收敛性分析。

首先，当不良杠杆量测占全系统量测的5.65%时，设置不同的收敛精度，各个方法的收敛性比较如图3所示，可以看出本文方法的迭代次数最少，ELAV和WLS估计随收敛精度的减小都有不同程度增加，MES估计由于其数值稳定性问题未能得到收敛的结果。

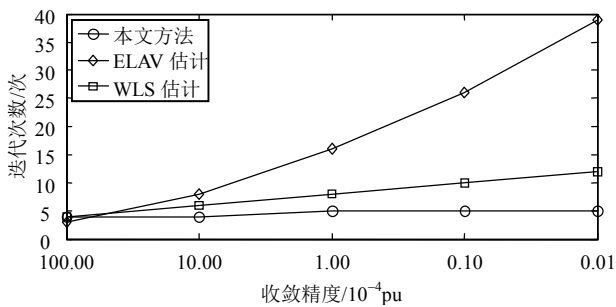


图3 不同收敛精度下各方法收敛性比较

当收敛精度统一设置为 10^{-4} pu时，不同比例的不良杠杆量测对各个方法的收敛性影响如图4所示，可见随着不良杠杆量测比例的增大，本文方法的迭代次数一直保持在4次左右，ELAV估计在迭代次数均处于15次左右，MES估计和WLS估计的收敛性均不能得到保证。

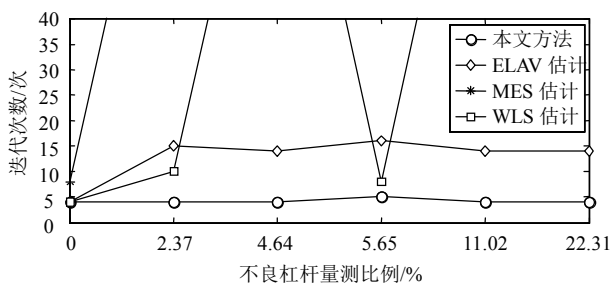


图4 不同规模不良杠杆量测下各方法收敛性比较

另外，取不良杠杆量测比例为2.37%、收敛精度为 10^{-4} pu时比较各方法的平均每次迭代时间和总计算时间，如表4所示。

从表4中可以看出，本文方法的迭代次数最少，虽然平均每次迭代时间并不占优势，但总计算时间仅次于WLS估计，而WLS估计不具备抗不良杠杆量测的能力。ELAV估计总用时最多，MES估计未获得

收敛的结果。在排除不良杠杆量测的同时，本文方法总计算时间仅比WLS估计多23.94%，而ELAV估计所需时间几乎是WLS估计的3.7倍。

表4 IEEE118节点系统中各方法的计算时间比较

估计方法	总计算时间/s	平均每次迭代时间/s	迭代次数
本文方法	8.495	2.124	4
ELAV估计	25.271	1.685	15
MES估计	—	—	—
WLS估计	6.854	1.646	4

4 结论

本文提出了抗不良杠杆量测的稳定收敛状态估计方法，其中采用标准化残差的指数型权函数更新量测权重矩阵，应用带等式约束的法方程法进行求解。通过以上分析可得本文方法的特点：1) 抑制不良杠杆量测的能力较强，提高了状态估计的精度；2) 量测权重根据量测残差自动修正，这有助于解决工程人员根据历史数据选取量测权重值比较困难或者选取值与实际情况不相符的问题；3) 数值稳定性及收敛性强，对Parzen窗宽初值不敏感；4) Parzen窗宽的减小策略灵活，在相同的收敛条件下，收敛速度快，计算效率较高。

参考文献

- [1] ABUR A, EXPOSITO A G. Power system state estimation: Theory and implementation[M]. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- [2] 颜全椿, 卫志农, 孙国强, 等. 基于多预测校正内点法的WLAV抗差状态估计[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2194-2200.
YAN Quan-chun, WEI Zhi-nong, SUN Guo-qiang, et al. A robust WLAV state estimation based on multiple predictor-corrector interior point method[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2194-2200.
- [3] KORRES G N. A robust algorithm for power system state estimation with equality constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1531-1541.
- [4] 张俊龙, 陈阳舟, 高俊侠, 等. 基于SHGM估计方法的电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 34-36.
ZHANG Jun-long, CHEN Yang-zhou, GAO Jun-xia, et al. State estimation of power system based on the SHGM method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1): 34-36.
- [5] 郭伟, 单渊达. M估计方法及其在电力系统状态估计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 27-32.
GUO Wei, SHAN Yuan-da. M-estimation and its application in power system state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 27-32.
- [6] 李慧, 杨明皓. 一种处理杠杆量测的配电网抗差估计算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 31-35.

(下转第590页)

- [C]//Proceedings of twenty-first ACM SIGOPS Symposium on Operating Systems Principles. New York, USA: ACM, 2007.
- [7] LITTY L, LAGAR-CAVILLA H A, LIE D. Hypervisor support for identifying covertly executing binaries[C]// Proceedings of the 17th USENIX Security Symposium. [S.l.]: [s.n.], 2008.
- [8] RILEY R, JIANG X, XU D. Guest-transparent prevention of kernel rootkits with vmm-based memory shadowing[C]// Proceedings of the 11th International Symposium on Recent Advances in Intrusion Detection. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [9] WANG Z, JIANG X, CUI W, et al. Countering kernel rootkits with lightweight hook protection[C]//Proceedings of the 16th ACM Conference on Computer and Communications Security. New York, USA: ACM, 2009.
- [10] CHECKOWAY S, DAVI L, DMITRIENKO A, et al. Return-oriented programming without returns[C]// Proceedings of the 17th ACM Conference on CCS. New York, USA: ACM, 2010.
- [11] BLETSCH T, JIANG X, FREEH V. Mitigating code-reuse attacks with control-flow locking[C]//ACSAC 11. Orlando, Florida USA: [s.n.], 2011.
- [12] LI J, WANG Z, BLETSCH T, et al. Comprehensive and efficient protection of kernel control data[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(4): 1404-1414.
- [13] DANIEL P. Virtual machine manager[R/OL]. [2013-2-19]. <http://virt-manager.org/>.
- [14] SZEFER J, LEE R B. Architectural support for hypervisor-secure virtualization[J]. SIGARCH Comput Archit News, 2012, 40(1): 437-450.
- [15] WANG Z, WU C, GRACE M, et al. Isolating commodity hosted hypervisors with HyperLock[C]//Proceedings of the ACM European Conference on Computer Systems (EuroSys). New York, USA: ACM, 2012.
- [16] Linux Foundation. The XEN project[R/OL]. [2013-2-25]. <http://www.xen.org/>.
- [17] Bitmover Company. Performance analysis tool[R/OL]. [2013-2-19]. <http://www.bitmover.com/lmbench/>.

编辑 税 红

(上接第556页)

- LI Hui, YANG Ming-hao. Robust estimation algorithm for distribution system leverage measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 31-35.
- [7] 李慧. 用于配网负荷处理的全面抗差估计方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 138-142.
- LI Hui. A comprehensive robust estimation algorithm for distribution network load data processing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 138-142.
- [8] 蔡凝露, 么莉, 林济铿, 等. 基于指数权函数的抗差状态估计算法[J]. 中国电力, 2013, 46(4): 69-73.
- CAI Ning-lu, YAO Li, LI Ji-keng, et al. A robust state estimation method based on exponential weight functions[J]. Electric Power, 2013, 46(4): 69-73.
- [9] 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. Poor resistance to the least square method[M]. Wuhan: Huazhong University of Science Press, 1997.
- [10] 吴文传, 郭焯, 张伯明. 指数型目标函数电力系统抗差状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 67-71.
- WU Wen-chuan, GUO Ye, ZHANG Bo-ming. A robust state estimation method with exponential objective function[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 67-71.
- [11] 郭焯, 张伯明, 吴文传. 指数型目标函数电力系统抗差状态估计的解法与性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 89-95.
- GUO Ye, ZHANG Bo-ming, WU Wen-chuan. Solution and performance analysis to a robust state estimation method with exponential objective function[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 89-95.
- [12] MILI L, CHENIAE M G, VICHARE N S, et al. Robust state estimation based on projection statistics of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 1118-1127.
- [13] ZHAO Liang, ABUR A. Multi area state estimation using synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 611-617.

编辑 漆 蓉