

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181286

基于矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计

张明¹, 嵇文路¹, 潘小辉¹, 钱 婧², 卫志农², 臧海祥²

(1. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210005;
2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 当电力系统中的杠杆点存在不良数据时会严重影响状态估计的坏数据辨识和估计效果。现有的抗差估计方法也难以有效处理杠杆量测坏数据, 而剔除杠杆点量测可能会影响系统的可观性。在双线性 WLAV 状态估计的基础上, 通过对雅克比矩阵进行矩阵变换来实现对杠杆点不良数据的抗差。这种方法对算法本身进行改进, 不需要剔除杠杆量测, 既能提高对杠杆点不良数据的抗差能力, 又不会影响系统的可观性, 是一种比较理想的处理杠杆点不良数据的方法。基于 IEEE 标准系统以及国内某实际省网的仿真结果验证了该方法在提高计算精度和计算效率方面的有效性。

关键词: 状态估计; 矩阵变换; 内点法; 双线性

Bilinear WLAV state estimation based on matrix transformation

ZHANG Ming¹, JI Wenlu¹, PAN Xiaohui¹, QIAN Qiang², WEI Zhinong², ZANG Haixiang²

(1. Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210005, China;
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: If bad data exists in the leverage point of the power system, it will seriously affect the bad data identification and state estimation results. It is difficult for the existing robust estimation methods to effectively deal with the leverage measurement. The removal of the leverage point measurement may affect the observability of the system. This method can improve the bad data of the leverage point by transformation of the Jacobian matrix based on the bilinear WLAV state estimation. This method improves the algorithm itself. It does not need to eliminate the leverage measurements, which can not only improve the ability to resist the leverage point bad data, but also can not affect the observability of the system. It's an ideal way to deal with bad data at leverage points. Simulation results based on the IEEE standard system and a real provincial network verify the effectiveness of the proposed method in improving the computation accuracy and computing efficiency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277052).

Key words: state estimation; matrix transformation; interior point method; bilinear

0 引言

电力系统状态估计^[1-8]能够有效地利用能量管理系统收集到的数据, 比较准确地估计出电力系统的运行状态, 为电力系统的安全运行提供保障。但实际系统的量测数据中不可避免地存在坏数据, 而坏数据会降低状态估计的精度, 因此需要对坏数据进行检测辨识和处理^[9-13]。

目前应用最广泛的是基于标准化残差的坏数据检测辨识方法^[14-16]。该方法通过标准化残差识别不

良数据, 进而对不良数据进行删除或修正, 以保证状态估计的精度, 但不能处理系统杠杆点出现不良数据的情况。而处理杠杆点不良数据的第一种方法是先进行杠杆点量测数据检测, 剔除杠杆点不良数据后再进行状态估计。这种方法虽然可以排除杠杆量测对状态估计的影响, 但会导致量测减少, 降低量测冗余度, 甚至可能造成系统局部不可观, 不能从根本上解决杠杆点量测的问题。第二种方法是研究对杠杆点不良数据也有抗差能力的抗差估计算法。第二种方法可以从根本上解决杠杆点出现不良数据的问题。文献[17]是对 WLAV(Weighted Least Absolute Value)状态估计的改进, 对雅克比矩阵进行

尺度缩放可以提高算法对支路杠杆点量测的抗差能力。文献[18]在文献[17]的基础上,提出通过对雅克比矩阵进行坐标系线性变换可以提高 WLAV 抗差估计对杠杆点注入量测的抗差能力。文献[19]在文献[18]的基础上作了改进,根据系统的实际情况进行坐标系线性变换。

通过对雅克比矩阵进行伸缩变换提高状态估计算法对支路杠杆点量测的抗差能力,通过坐标系线性变换提高状态估计算法对杠杆点注入量测的抗差能力。这种方法对算法本身进行改进,不用剔除杠杆点量测数据,既能提高对杠杆点不良数据的抗差能力,又不会影响系统的可观测性,是一种比较理想的处理杠杆点不良数据的方法。

WLAV 状态估计是一种被广泛研究的抗差状态估计方法^[20-21],估计精度高,对不良数据也具有较好的抗差性,但 WLAV 状态估计一直存在对杠杆点坏数据缺乏抗差能力这一缺陷,对 WLAV 状态估计进行改进得到的双线性 WLAV 状态估计^[22-23]依然存在此问题。

本文充分考虑双线性 WLAV 状态估计算法的特点,将矩阵变换方法引入第一步线性化过程中,提出基于矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计方法。用 IEEE 标准系统以及国内某实际省网验证了所提方法的实用性及有效性。

1 双线性 WLAV 状态估计

电力系统状态估计的主要目标是由电力系统的量测向量估计电力系统当前的运行状态。电力系统状态估计属于非线性优化问题^[24],其量测方程可表示为

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: \mathbf{z} 为量测向量; \mathbf{x} 为状态向量; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为非线性函数; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为量测误差向量。

结合电力系统的物理特性,可通过引入中间变量将非线性方程(1)分解为^[25]

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}\mathbf{y} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

$$\mathbf{y}' = \mathbf{f}(\mathbf{y}) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}' = \mathbf{D}\mathbf{x}' + \boldsymbol{\varepsilon}_y \quad (4)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{t}(\mathbf{x}') \quad (5)$$

式中: \mathbf{y} 、 \mathbf{y}' 、 \mathbf{x}' 为中间变量; $\mathbf{f}(\mathbf{y})$ 和 $\mathbf{t}(\mathbf{x}')$ 为非线性函数; \mathbf{C} 和 \mathbf{D} 为常数矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}_y$ 为中间变量 \mathbf{y}' 的误差向量。

极坐标系下的电力系统量测方程可表示为

$$\begin{cases} V_i^2 = V_i^2 \\ P_i = \sum_{j \in i} (V_i V_j \cos \theta_{ij} G_{ij} + V_i V_j \sin \theta_{ij} B_{ij}) \\ Q_i = \sum_{j \in i} (-V_i V_j \cos \theta_{ij} B_{ij} + V_i V_j \sin \theta_{ij} G_{ij}) \\ P_{ij} = -V_i V_j \cos \theta_{ij} g - V_i V_j \sin \theta_{ij} b + V_i^2 g \\ Q_{ij} = V_i V_j \cos \theta_{ij} b - V_i V_j \sin \theta_{ij} g - V_i^2 (b + y_c) \end{cases} \quad (6)$$

式中: V_i 、 P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的电压幅值、注入有功及无功功率; P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为支路 ij 上的有功和无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的互电导和互电纳; g 、 b 、 y_c 分别为支路 ij 的 π 形等效电路的串联电导、串联电纳和对地电纳; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 为支路两端相角差。

取中间变量 \mathbf{y} 为

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} O_i \\ M_{ij} \\ N_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i^2 \\ V_i V_j \cos \theta_{ij} \\ V_i V_j \sin \theta_{ij} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)代入式(6)可得

$$\begin{cases} V_i^2 = O_i \\ P_i = \sum_{j \in i, j \neq i} (M_{ij} G_{ij} + N_{ij} B_{ij}) + O_i G_{ii} \\ Q_i = \sum_{j \in i, j \neq i} (-M_{ij} B_{ij} + N_{ij} G_{ij}) - O_i B_{ii} \\ P_{ij} = -M_{ij} g_{ij} - N_{ij} b_{ij} + O_i g_{ij} \\ Q_{ij} = M_{ij} b_{ij} - N_{ij} g_{ij} - O_i (b_{ij} + y_c) \end{cases} \quad (8)$$

式中, G_{ii} 、 B_{ii} 分别为节点 i 的自电导和自电纳。

由式(8)可得 \mathbf{C} 矩阵的各元素值如表 1 所示。

表 1 常数矩阵 \mathbf{C}

Table 1 Constant coefficient matrix \mathbf{C}					
中间变量	$\partial V_i^2 / \partial y$	$\partial P_i / \partial y$	$\partial Q_i / \partial y$	$\partial P_{ij} / \partial y$	$\partial Q_{ij} / \partial y$
$y = M_{ij}$	0	G_{ij}	$-B_{ij}$	$-g_{ij}$	b_{ij}
$y = N_{ij}$	0	B_{ij}	G_{ij}	$-b_{ij}$	$-g_{ij}$
$y = O_i$	1	G_{ij}	$-B_{ij}$	g_{ij}	$-b_{ij} - y_c$

令式(3)中的非线性函数为

$$\mathbf{y}' = \mathbf{f}(\mathbf{y}) =$$

$$\begin{bmatrix} \ln O_i \\ \ln(M_{ij}^2 + N_{ij}^2) \\ \arctan(N_{ij} / M_{ij}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \ln V_i \\ 2 \ln V_i + 2 \ln V_j \\ \theta_i - \theta_j \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(2)所得的 \mathbf{y} 代入式(9)中即可求得 \mathbf{y}' 。令中间变量 \mathbf{x}' 为

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} \ln V \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, V 和 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为节点电压幅值和相角向量。

可建立 \mathbf{y}' 与 \mathbf{x}' 之间的线性方程为

$$\mathbf{y}' = \mathbf{D}\mathbf{x}' + \boldsymbol{\varepsilon}_{y'} = \begin{bmatrix} 2|\mathbf{S}^T| & 0 \\ \mathbf{S}_r^T & 0 \\ 0 & 2\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln V \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}_{y'} \quad (11)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{S} 为节点关联矩阵; \mathbf{S}_r 为去掉平衡节点的节点关联矩阵。

求出 \mathbf{x}' 后可由式(12)求出 \mathbf{x} 。

$$\mathbf{x} = \mathbf{t}(\mathbf{x}') = \begin{bmatrix} e^{\ln(V)} \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2 基于矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计

为了辨识杠杆点量测, 定义如下的 \mathbf{K} 矩阵。

$$\mathbf{K} = \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{W} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{W} \quad (13)$$

\mathbf{K} 矩阵对角元素的期望值的计算过程如式(14)所示。

$$\begin{aligned} E(\mathbf{K}_{ii}) &= \frac{1}{m} \text{tr}(\mathbf{K}) = \\ &= \frac{1}{m} \text{tr} \left[\mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{W} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{W} \right] = \\ &= \frac{1}{m} \text{tr} \left[(\mathbf{C}^T \mathbf{W} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{W} \mathbf{C} \right] = \frac{n}{m} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: \mathbf{W} 是对角值为权重向量 \mathbf{w} 的对角阵; m 为测量维数; n 为状态量维数。

\mathbf{K} 矩阵对角元素的期望值为 n/m , 通过 \mathbf{K} 矩阵对角元素的值进行杠杆点判定, 一般当 $K_{ii} > 2\frac{n}{m}$ 时, 即可认为量测点 i 为杠杆点。

杠杆量测难以通过坏数据检测辨识有效处理, 会降低状态估计的数值稳定性。本文为提高双线性 WLAV 状态估计的抗差能力, 将矩阵变换方法引入到双线性 WLAV 状态估计的第一步线性过程中, 提出基于矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计。

基于矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计的模型为

$$\begin{cases} \min \mathbf{w}^T (\mathbf{l} + \mathbf{u}) \\ \text{s.t. } \mathbf{S}_s \mathbf{z} - \mathbf{S}_s \mathbf{C} \mathbf{Q} \hat{\mathbf{y}} + \mathbf{S}_s \mathbf{l} - \mathbf{S}_s \mathbf{u} = 0, (\mathbf{l}, \mathbf{u}) \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ 是权重向量, 其第 i 个元素取值为 $w_i = 1/\sigma_i^2$, 即为对应量测点的量测误差标准差 σ_i 的平方值的倒数; \mathbf{S}_s 为对雅克比矩阵 \mathbf{C} 的

行向量进行尺度缩放的对角阵, 其对角元素取雅克比矩阵行绝对值最大值的倒数; \mathbf{Q} 为对雅克比矩阵进行旋转变换的旋转矩阵; $\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{y}$ 。

对雅克比矩阵进行坐标旋转变换的形式如式(16)所示。

$$\mathbf{C} = \mathbf{C} \mathbf{Q} \quad (16)$$

式中: \mathbf{Q} 为旋转矩阵, 其形式为 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \dots \mathbf{Q}_n$, 是 n 个旋转矩阵的乘积; 对 \mathbf{C} 中第 i 列和第 j 列元素进行旋转的旋转矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_{n,ii} = \mathbf{Q}_{n,ji} = \cos \theta \\ \mathbf{Q}_{n,ij} = -\mathbf{Q}_{n,ji} = -\sin \theta \end{cases} \quad (17)$$

求旋转矩阵 \mathbf{Q} 的具体步骤如下。

(1) 标记出连接短支路的节点和连接支路数多于 3 条的节点;

(2) 以上节点中有注入量测且非零注入量测的节点即为需要进行旋转变换的节点;

(3) 将雅克比矩阵的列分为两类, 一类是对应标记节点的列, 称为主动列, 其他列称为被动列;

(4) 求出被动列数量与主动列数量的比值并取整, 记为 p , 从第一个主动列开始, 各分配 p 个被动列与之对应, 每个主动列与对应的被动列分别进行旋转, 旋转角度为 θ/p_i (p_i 为第 i 个主动列对应的被动列的个数), 则每个主动列进行 p_i 次旋转, 总的旋转角度为 θ , 每个被动列进行一次旋转, 旋转角度为 θ/p_i , 这种方式是目前证实效率最高的, 其中 θ 一般取 45° ;

(5) 为了提高旋转之后雅克比矩阵的稀疏度, 提高计算效率, 对于绝对值小于 0.1 的元素, 近似取 0。

构造出式(15)的拉格朗日函数为

$$\mathbf{L} = \mathbf{w}^T (\mathbf{l} + \mathbf{u}) - \boldsymbol{\eta}^T [\mathbf{S}_s \mathbf{z} - \mathbf{S}_s \mathbf{C} \mathbf{Q} \hat{\mathbf{y}} + \mathbf{S}_s \mathbf{l} - \mathbf{S}_s \mathbf{u}] - \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{S}_s \mathbf{l} - \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{S}_s \mathbf{u} \quad (18)$$

其中, $\boldsymbol{\alpha}$ 、 $\boldsymbol{\beta}$ 、 $\boldsymbol{\eta}$ 为拉格朗日乘子。

由式(18)的 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件可得如下 KKT 方程, 如式(19)。

$$\begin{cases} \mathbf{L}_y = -\mathbf{Q} \mathbf{C}^T \mathbf{S}_s \boldsymbol{\eta} = 0 \\ \mathbf{L}_l = \mathbf{w} - \mathbf{S}_s \boldsymbol{\eta} - \mathbf{S}_s \boldsymbol{\alpha} = 0 \\ \mathbf{L}_u = \mathbf{w} + \mathbf{S}_s \boldsymbol{\eta} - \mathbf{S}_s \boldsymbol{\beta} = 0 \\ \mathbf{L}_\eta = \mathbf{S}_s \mathbf{z} - \mathbf{S}_s \mathbf{C} \mathbf{Q} \hat{\mathbf{y}} + \mathbf{S}_s \mathbf{l} - \mathbf{S}_s \mathbf{u} = 0 \\ \mathbf{L}_\alpha = \mathbf{A} \mathbf{L} \boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\alpha} = 0 \\ \mathbf{L}_\beta = \mathbf{B} \mathbf{U} \boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\beta} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{L} 、 \mathbf{U} 分别为以 $\boldsymbol{\alpha}$ 、 $\boldsymbol{\beta}$ 、 \mathbf{l} 、 \mathbf{u} 为对角元

素的对角阵; μ 为扰动因子; \mathbf{e} 为单位列向量。

应用牛顿法解式(19), 可得修正方程如下:

$$-\mathbf{QC}^T \mathbf{S}_s d\boldsymbol{\eta} = -\mathbf{L}_y \quad (20)$$

$$-\mathbf{S}_s \mathbf{CQ} d\hat{\mathbf{y}} + \mathbf{S}_s d\mathbf{l} - \mathbf{S}_s d\mathbf{u} = -\mathbf{L}_\eta \quad (21)$$

$$-\mathbf{S}_s d\boldsymbol{\eta} - \mathbf{S}_s d\boldsymbol{\alpha} = -\mathbf{L}_l \quad (22)$$

$$\mathbf{S}_s d\boldsymbol{\eta} - \mathbf{S}_s d\boldsymbol{\beta} = -\mathbf{L}_u \quad (23)$$

$$\mathbf{A}d\mathbf{l} + \mathbf{L}d\boldsymbol{\alpha} = -\mathbf{L}_\alpha^\mu \quad (24)$$

$$\mathbf{B}d\mathbf{l} - \mathbf{U}d\boldsymbol{\beta} = -\mathbf{L}_\beta^\mu \quad (25)$$

取初值 $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{0}$, $\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\omega}$ 则 $\mathbf{L}_l = \mathbf{L}_u = \mathbf{0}$, 则式(23)一式(25)可化为

$$\begin{cases} d\boldsymbol{\alpha} = -d\boldsymbol{\eta} \\ d\boldsymbol{\beta} = d\boldsymbol{\eta} \\ d\mathbf{l} = -\mathbf{A}^{-1}(-\mathbf{L}d\boldsymbol{\eta} + \mathbf{L}_\alpha^\mu) \\ d\mathbf{u} = -\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{U}d\boldsymbol{\eta} + \mathbf{L}_\beta^\mu) \end{cases} \quad (26)$$

将式(26)代入式(20)、式(21), 可得修正方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{QC}^T \mathbf{S}_s \\ -\mathbf{S}_s \mathbf{CQ} & \mathbf{S}_s \mathbf{A}^{-1} \mathbf{L} + \mathbf{S}_s \mathbf{B}^{-1} \mathbf{U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\hat{\mathbf{y}} \\ d\boldsymbol{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{L}_y \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\gamma} = -\mathbf{L}_\eta + \mathbf{S}_s \mathbf{A}^{-1} \mathbf{L}_\alpha^\mu - \mathbf{S}_s \mathbf{B}^{-1} \mathbf{L}_\beta^\mu \\ d\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{Q}^{-1} d\mathbf{y} \end{cases} \quad (28)$$

迭代求解式(27)可以得到 $\hat{\mathbf{y}}$ 的值, 由式(29)求得 \mathbf{y} 的值, 然后进行第二步线性化过程求得状态量的值。

$$\mathbf{y} = \mathbf{Q}\hat{\mathbf{y}} \quad (29)$$

3 算例测试

3.1 精度测试

为表述方便, 本文用方法 1 表示双线性 WLAV 状态估计, 本文方法表示经过雅克比矩阵伸缩和旋转变换的双线性 WLAV 状态估计。本部分对方法 1 和本文方法在没有不良数据情况下的估计精度进行测试, 测试算例包括标准算例 IEEE14、IEEE57、IEEE118 和一个实际省网(包含 736 节点), 量测配置为满量测, 即在各条支路均配置支路功率量测, 在各个节点均配置节点注入功率和电压幅值量测。两种算法对不同测试算例进行计算, 所得电压幅值及相角的平均估计误差如图 1 和图 2 所示。

综合图 1 和图 2 可看出, 当不存在不良数据时, 两种算法估计精度接近, 且精度都比较高, 能满足实际应用的需求, 可见本文提出的基于矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计的精度满足要求。

3.2 抗差性测试

本部分以 IEEE14 节点系统作为算例, 当存在

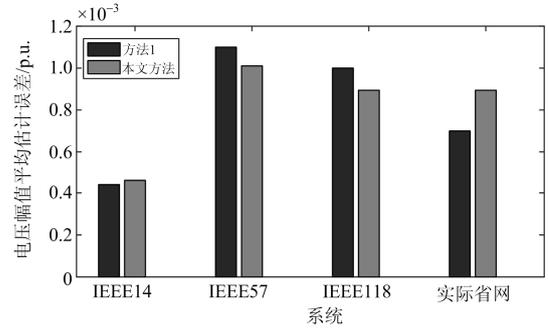


图 1 不同节点系统电压幅值平均估计误差

Fig. 1 Average estimation error of voltage amplitude for different node systems

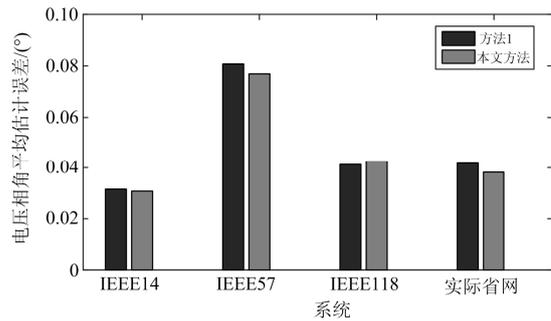


图 2 不同节点系统电压相角平均估计误差

Fig. 2 Average estimation error of voltage angle for different node systems

杠杆点坏数据时, 测试本文所提方法的抗差能力。IEEE14 节点系统量测量个数为 119 个, 双线性第一步线性过程的状态量为 54 个, 所以本文方法判定杠杆量测点的 \mathbf{K} 矩阵对角元素值的阈值为 $54 \times 2 / 119 = 0.9076$ 。

方法 1 和本文方法两种算法在计算 IEEE14 节点系统时, \mathbf{K} 矩阵对角元素的平均值及方差如表 2 所示。

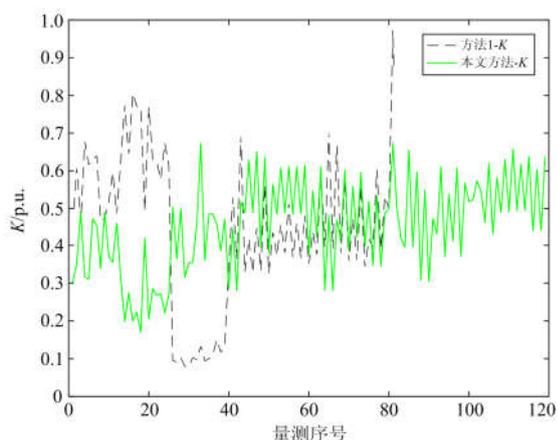
表 2 IEEE14 节点系统量测 \mathbf{K} 矩阵元素统计

Table 2 IEEE14 node system measurement of \mathbf{K} matrix element statistics

方法	\mathbf{K} 矩阵对角元素均值	\mathbf{K} 矩阵对角元素方差
方法 1	0.453 8	0.034 5
本文方法	0.453 8	0.017 1

由表 2 可知, 两种方法的 \mathbf{K} 矩阵元素均值相同, 都为 0.453 8, 其中方法 1 的 \mathbf{K} 矩阵对角元素方差为 0.034 5, 而本文方法的 \mathbf{K} 矩阵对角元素方差为 0.017 1, 明显小于方法 1, 可见矩阵变换明显减小了 \mathbf{K} 矩阵对角元素的方差。

图 3 为两种算法对应的 \mathbf{K} 矩阵元素的变化曲线。

图 3 IEEE14 节点系统量测 K 矩阵对角元素Fig. 3 Measurement of diagonal elements of K matrix by IEEE14 node system

由图 3 可知, 本文方法对应的 K 矩阵数据变化比较平缓, 并且没有数值大于 0.907 6 的元素, 而方法 1 对应的 K 矩阵元素变化比较大, 且存在两个点 K 矩阵对角元素值大于阈值, 这两个点分别对应支路 7-8 的首端无功量测和支路 7-9 的首端无功量测, 将其设为可疑杠杆量测。

表 3 中列出了方法 1 和本文方法对 IEEE14 节点系统杠杆量测点坏数据的抗差估计结果。

表 3 IEEE14 节点系统杠杆量测坏数据状态估计分析

Table 3 State estimation analysis of IEEE14 node system lever measurement bad data

量测	项目	数值	
支路 7-8 无功	真值/p.u.	-0.171 6	
	量测值/p.u.	0.157 6	
	方法 1	估计值/p.u.	0.001 9
		K	0.973 1
	本文方法	估计值/p.u.	-0.128 0
		K	0.673 2
支路 7-9 无功	真值/p.u.	0.052 3	
	量测值/p.u.	-0.064 4	
	方法 1	估计值/p.u.	0.010 2
		K	0.944 7
	本文方法	估计值/p.u.	0.037 1
		K	0.654 9

由表 3 可知, 方法 1 的误差大于本文方法, 经过矩阵变换后, 杠杆量测对应的 K 矩阵对角线值变小, 成为非杠杆量测点, 因此基于矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计能够有效处理杠杆量测点坏数据。

当 IEEE14 节点系统存在杠杆点坏数据时, 两种算法的估计精度如表 4 所示。

表 4 IEEE14 节点系统包含杠杆点坏数据时的状态估计精度分析

Table 4 Accuracy analysis of state estimation for IEEE14 node system containing lever data with bad data

方法	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta U_i /$ p.u.	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta \theta_i /$ rad	$\max \Delta U /$ p.u.	$\max \Delta \theta /$ rad
方法 1	0.004 2	0.000 7	0.028 2	0.001 4
本文方法	0.003 1	0.000 7	0.021 4	0.001 2

由表 4 可知, 经过矩阵变换后不再存在杠杆坏数据, 因此本文方法的估计精度高于方法 1。

4 结论

本文针对双线性状态估计抗差性较弱且难以处理杠杆量测点不良数据的问题, 建立了一种基于矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计模型。

算例测试表明当不存在不良数据时, 本文方法与未经过矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计算法的精度基本相同, 满足工程实际需求。而当算例中存在杠杆点不良数据时, 本文方法的估计精度高于普通的双线性 WLAV 状态估计算法, 对杠杆点量测的估计结果也更接近真实值, 矩阵变换提高了存在杠杆点不良数据时的抗差效果。

参考文献

- [1] SCHWEPPE F C, WILDES J. Power system static-state estimation, part I: exact model[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 120-125.
- [2] 孙江山, 刘敏, 邓磊, 等. 基于自适应无迹卡尔曼滤波的配电网状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 1-7.
SUN Jiangshan, LIU Min, DENG Lei, et al. State estimation of distribution network based on AUKF[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 1-7.
- [3] SCHWEPPE F C, ROM D B. Power system static-state estimation, part II: approximate model[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 125-130.
- [4] 孙江山, 刘敏, 邓磊, 等. 电力系统分区和解耦状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 162-169.
SUN Jiangshan, LIU Min, DENG Lei, et al. Review of the research on the partition and decoupled state estimation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 162-169.
- [5] SCHWEPPE F C. Power system static-state estimation, part III: implementation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 130-135.

- [6] 怀全, 候小虎, 何良策. 一种含分布式电源的中低压配电网状态估计方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 69-77.
HUI Quan, HOU Xiaohu, HE Liangce. A method of state estimation for middle voltage and low voltage distribution network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 69-77.
- [7] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985.
- [8] HOLTEN L, GJELSVIK A, AAM S, et al. Comparison of different methods for state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1798-1806.
- [9] 肖润龙, 王刚, 李子梦, 等. 中压直流输电直流区域配电综合电力系统静态状态估计方法研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3023-3033.
XIAO Runlong, WANG Gang, LI Zimeng, et al. Static estimation of the integrated power system with medium voltage DC and DC zonal distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3023-3033.
- [10] 蔡永智, 陈皓勇, 万楚林. 基于局部信息融合和估计投影法的多区域电力系统状态估计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 69-77.
CAI Yongzhi, CHEN Haoyong, WAN Chulin. Multi-area power system state estimation based on partial information fusion and estimate projection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 69-77.
- [11] 张志勇, 张飞, 刘志强, 等. 无刷直流电机输出转矩的非线性偏最小二乘回归估计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 62-69.
ZHANG Zhiyong, ZHANG Fei, LIU Zhiqiang, et al. Brushless DC motor torque estimation based on nonlinear partial least square method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 62-69.
- [12] 徐中一, 刘远龙. 基于差分进化粒子群算法的配电网状态估计[J]. 供用电, 2017, 34(9): 46-51.
XU Zhongyi, LIU Yuanlong. State estimation of distribution network based on differential evolution particle swarm algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(9): 46-51.
- [13] 吴奕, 徐敦彬, 刘翌, 等. 基于灵敏度分析的配电网可靠性提升研究[J]. 供用电, 2017, 34(2): 50-54.
WU Yi, XU Dunbin, LIU Yi, et al. Improvement of distribution network reliability based on sensitivity analysis[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(2): 50-54.
- [14] KOGLIN H, NEISIUS T. Bad data detection and identification[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1990, 12(90): 94-103.
- [15] KORRES, G N, CONTAXIS. A reduced model for bad data processing in state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 550-557.
- [16] SUN Qiming, SHI Libao, NI Yixin, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 19-28. DOI: 10.1186/s41601-017-0035-3.
- [17] CELIK M K, ABUR A. Use of scaling in WLAV estimation of power system states[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2): 684-692.
- [18] CELIK M K, ABUR A. A robust WLAV state estimator using transformations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 106-113.
- [19] CHEN Yanbo, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. A robust WLAV state estimation using optimal transformations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2190-2191.
- [20] 颜全椿, 卫志农, 徐泰山, 等. 基于主导与非主导参数的非线性加权最小绝对值参数估计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 71-76.
YAN Quanchun, WEI Zhinong, XU Taishan, et al. Nonlinear weighted absolute least value parameter estimation based on dominant and non-dominant parameter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 71-76.
- [21] RAMIREZ J M, BAROCIO E E. Solving state estimation in power system by an interior point method[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22(5): 355-365.
- [22] 厉超, 卫志农, 倪明, 等. 基于变量代换内点法的加权最小绝对值抗差状态估计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 48-52, 106.
LI Chao, WEI Zhinong, NI Ming, et al. WLAV robust state estimation based on variable substitution interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 48-52, 106.
- [23] SCHWEPPE F C, ROM D B. Power system static-state estimation, part II: approximate model[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 125-130.
- [24] HU Bo, WANG He, YAO Sen. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 70-80. DOI: 10.1186/s41601-017-0037-1.
- [25] HOLTEN L, GJELSVIK A, AAM S, et al. Comparison of different methods for state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1798-1806.

收稿日期: 2018-10-17; 修回日期: 2019-04-22

作者简介:

张明(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电自动化; E-mail: njgdzm@139.com

嵇文路(1974—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: jiwenu@126.com

(编辑 魏小丽)