

基于 Gauss-Markov 模型的电力系统 t 型抗差状态估计

颜全椿¹, 卫志农¹, 徐泰山², 王胜明², 孙国强¹

(1. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098;

2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 将 t 型估计引入状态估计中, 提出自适应 Gauss-Markov 模型的 t 型抗差状态估计。该方法能够克服传统不良数据辨识程序不能很好地辨识多个强相关不良数据的不足, 且与传统状态估计程序具有很好的兼容性, 利用 t 分布的自由度动态调节估计的效率和抗差性。该方法目标函数连续可微, 可利用与加权最小二乘 (WLS) 法类似的牛顿法进行求解。IEEE 标准系统和某实际输电网测试验证了所提方法的有效性, 与含不良数据辨识功能的 WLS 估计和二次-常数 (QC) 估计相比, 所提方法的抗差性具有明显的优势。

关键词: 电力系统; t 型估计; 自由度; 不良数据; 局部最优解; 状态估计

中图分类号: TM 721

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.023

0 引言

自 1794 年 Gauss 创立最小二乘 LS (Least Square) 法以来, 特别是 Gauss-Markov 定理建立后, 最小二乘估计一直被作为一个良好的估计方法而被广泛采用。传统的基于最小二乘及其派生出的快速解耦法状态估计在实际电网已有多年的运行经验, 该方法是对服从高斯分布样本的最优估计, 具有模型简单、计算量小、收敛速度快等优点^[1-2]。然而, 实际量测系统中往往存在误差较大的不良数据, 而这些不良数据并不服从高斯分布, 若不能将这些不良数据剔除, 将严重影响状态估计结果的精度。因此, 研究如何尽可能地降低不良数据对电力系统状态估计的影响具有重要意义^[3]。

针对该问题, 国内外学者的研究主要侧重 2 个方面: 一方面是在最小二乘估计的基础上, 嵌入一个含不良数据辨识的模块^[4-6]; 另一方面则是以 M 估计为代表的抗差状态估计^[7-12]。对于前一方面研究, 目前应用较广泛的是估计辨识法, 即首先找出残差较大的量测作为不良数据, 用估计值直接修正原来的状态估计, 修正后的状态估计恰恰是不良数据的最优估计。该方法无需重新进行状态估计, 实时性好, 但存在仅可辨识多个弱相关的不良数据、较难处理含多个强相关的不良数据的不足。对于后一方面研究, M 估计的抗差性和效率取决于状态量初值的可靠性、等价权函数及其临界值的合理性。电力系统状态估计中使用比较广泛的权函数有 Huber 权函数、

Hampel 权函数、Turkey 权函数和含有相关量测的 IGGIII 权函数等。不同等价权函数的选取相当于建立了不同的误差分布模型。统计界近年来提出并有较深入理论研究支撑的 t 型估计, 以 t 分布对量测误差建模, 属于带有刻度参数的 M 估计^[13-15]。当 t 分布取较大的自由度时, 趋于高斯分布, 对应最小二乘估计, 在量测误差为高斯分布时具有较高的效率; 当取较小的自由度时, 为柯西分布, 相应的估计具有很好的抗差性。恰当地选取自由度, 可以使 t 型估计兼顾状态估计的抗差性和效率。

本文在前人工作基础上, 将 t 型估计引入电力系统状态估计中, 针对 t 型估计求解较繁琐的特点, 提出近似模型, 并以零注入节点方程为等式约束。随后, 利用牛顿法进行求解, 结合一个简单的电力系统算例分析该方法在实际应用中可能存在的局部最优问题, 通过分步调整自由度保证取得全局最优解。最后, 借助 IEEE 标准系统和某实际电网测试该方法的有效性, 结果表明, 与含不良数据辨识功能加权最小二乘 (WLS) 估计 (简称 WLS+BD) 和二次-常数 QC (Quadratic-Constant) 估计进行比较, 本文方法处理不良数据能力更强。

1 t 型估计模型及其求解

1.1 电力系统 t 型估计模型

在给定网络结线、支路参数和量测系统的条件下, 电力系统的量测方程为^[1]:

$$z_i = h_i(\mathbf{x}) + r_i \quad i=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中, \mathbf{x} 为 $n \times 1$ 维状态变量, 包括除平衡节点外的所有节点电压幅值和相角; z_i, h_i, r_i 分别为 $m \times 1$ 维量测向量、量测函数向量和残差向量的第 i 个分量; m, n 分别为量测量及状态量的个数。

考虑量测误差的 Gauss-Markov 模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{r} \\ \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0, \quad \mathbf{D}(\mathbf{r}) = \sigma_0 \mathbf{R}^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期: 2013-05-03; 修回日期: 2014-01-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2011AA-A05A104); 国家自然科学基金资助项目 (51107032, 51277052, 61104045); 国家电网公司科技项目

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA-05A104), the National Natural Science Foundation of China (51107032, 51277052, 61104045) and Key Science and Technology Projects of SGCC

其中, σ_0 为未知的单位权方差因子; $E(\mathbf{r})$ 、 $D(\mathbf{r})$ 分别为量测残差的均值和方差; \mathbf{R} 为量测权重对角矩阵。

对于式(2), 定义 t 型抗差状态估计为如下的最优估计问题^[13]:

$$(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\sigma}) = \arg \min_{\mathbf{x}, \sigma > 0} \sum_{i=1}^m w_i \left\{ f \left[\frac{z_i - h_i(\mathbf{x})}{\sigma} \right] + \log \sigma \right\} \quad (3)$$

其中, \arg 表示右式取最小值时为最优估计; $\hat{\mathbf{x}}$ 、 $\hat{\sigma}$ 为 \mathbf{x} 、 σ 的最优估计值; w_i 为第 i 个量测对应的权重; σ 为一个未知的尺度参数, 利用最小体积椭球 MVE (Minimum Volume Ellipsoid) 位置-刻度估计方法进行求解时, 可以消除高杠杆点的影响, 从而达到较高的崩溃点, 但考虑 MVE 估计方法求解复杂, 且计算效率偏低^[15], 不适用于实际系统状态估计, 同时, 考虑目前实际现场 SCADA 等量测系统的精度较高, 本文综合考虑计算效率及求解精度 2 个因素, 提出近似模型, 将其设为 1, 此时 $\log \sigma = 0$, $f(u) = \log(1 + u^2/V)$, V 是自由度, 其值越小, 估计的效率越低, 相应的抗差性越好。

由于在实际运行中, 系统必须满足零注入节点的等式约束, 考虑这些约束则式(3)可写为:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} J &= \sum_{i=1}^m w_i f(r_i) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$r_i = z_i - h_i(\mathbf{x}) \quad i = 1, 2, \dots, m$$

其中, $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 为潮流约束及零注入节点功率量测的等式约束。

1.2 求解

利用内点罚函数法对式(4)进行处理, 则式(4)可转化为以下无约束的优化问题^[9]:

$$\min_{\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_{i=1}^m w_i f(r_i) + \sum_{j=1}^p \lambda_j g_j(\mathbf{x}) \quad (5)$$

其中, $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 为拉格朗日函数; $\boldsymbol{\lambda}$ 为 p 维拉格朗日乘子向量; $g_j(\mathbf{x})$ 表示第 j 个等式约束。

式(5)中 $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 的一阶最优条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \mathbf{x}} = \sum_{i=1}^m w_i \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{x}} + \sum_{j=1}^p \lambda_j \frac{\partial g_j}{\partial \mathbf{x}} = \\ \mathbf{H}^T \mathbf{F}'(\mathbf{x}) \mathbf{r} + \mathbf{G}^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \\ \frac{\partial L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{F}'(\mathbf{x}) = \text{diag} \{ F_{ii}'(\mathbf{x}) \} = \text{diag} \{ 2w_i / (V + r_i^2) \} \end{cases} \quad (6)$$

其中, \mathbf{H} 为 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 对 \mathbf{x} 的雅可比矩阵; \mathbf{G} 为零注入节点等式约束 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 对 \mathbf{x} 的雅可比矩阵。

通过牛顿法求解式(6)的非线性方程, 对式(6)求偏导可得增广拉格朗日函数 $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 的海森矩阵:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{x}^2} = \mathbf{H}^T \mathbf{F}' \left\{ \mathbf{I} - \text{diag} \left\{ \frac{2r_i^2}{V + r_i^2} \right\} \right\} \mathbf{H} = \mathbf{Q} \\ \frac{\partial^2 L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \mathbf{x} \partial \boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{G}^T \\ \frac{\partial^2 L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \boldsymbol{\lambda} \partial \mathbf{x}} = \mathbf{G}, \quad \frac{\partial^2 L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \boldsymbol{\lambda}^2} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\partial^2 L / \partial \mathbf{x}^2$ 部分忽略了二阶项, 在形式上与传统 WLS 类似, 具有较好的兼容性。

因此, 可得如下修正公式:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}^{(k)} \\ \Delta \boldsymbol{\lambda}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{G}^T \\ \mathbf{G} & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^T \mathbf{F}'(\mathbf{x}) \mathbf{r} + \mathbf{G}^T \boldsymbol{\lambda} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

令 $\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k+1)}$, $\boldsymbol{\lambda}^{(k+1)} = \boldsymbol{\lambda}^{(k)} + \Delta \boldsymbol{\lambda}^{(k+1)}$, 即可对式(4)的 t 型抗差估计模型进行求解。

2 局部最优解情况分析

从数学上看, t 型估计是一个典型的非线性优化问题, 可能存在局部最优解。以 2 节点系统为例进行测试, 该系统的潮流分布及网络参数参见文献[9]。由于 2 节点系统平衡节点 B1 的电压为 $1.05 \angle 0^\circ$ p.u., 不参与迭代, 因此优化变量仅有节点 B2 的电压幅值与相角。

分别取 $V=0.01$ 和 $V=1$, t 型估计目标函数随着节点 B2 电压幅值和相角变化的曲面如图 1、2 所示, 图中电压幅值为标幺值, 后同。为了便于观察, 将目标函数 $J(\mathbf{x})$ 符号取反, 图 3、4 给出了相应的等值线图。

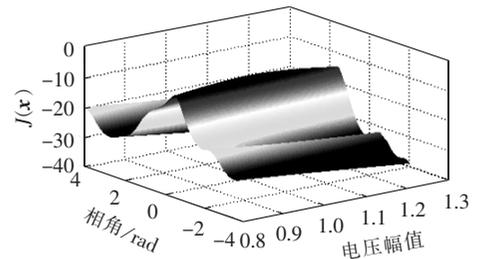


图 1 $V=0.01$ 时 t 型估计目标函数 $J(\mathbf{x})$ 的变化曲面
Fig.1 Curved surface of objective function $J(\mathbf{x})$ of t -type estimation when V is 0.01

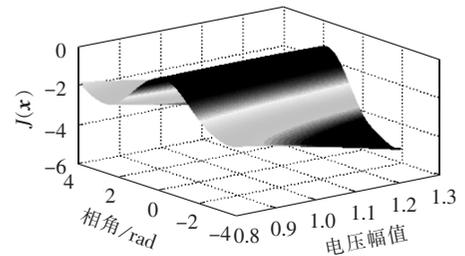


图 2 $V=1$ 时 t 型估计目标函数 $J(\mathbf{x})$ 的变化曲面
Fig.2 Curved surface of objective function $J(\mathbf{x})$ of t -type estimation when V is 1

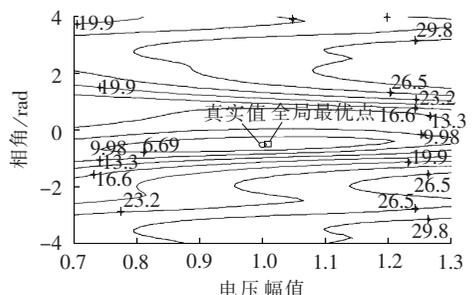


图 3 $V=0.01$ 时 2 节点系统目标函数等值线图
Fig.3 Contour map of objective function of 2-bus system when V is 0.01

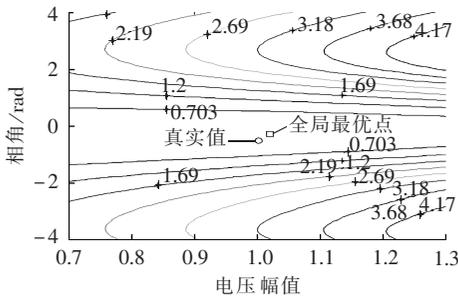


图 4 $V=1$ 时 2 节点系统目标函数等值线图
Fig.4 Contour map of objective function of 2-bus system when V is 1

由图 1 及图 3 可知, $V=0.01$ 时, 全局最优点为 $1.005 \angle -29.22^\circ$ p.u., 与真实值 $1.002 \angle -30^\circ$ p.u. 误差较小, 但此时目标函数出现多个局部最优点。图 2 中, $V=1$, 此时局部最优点消失了, 但是全局最优点为 $1.020 \angle -16.62^\circ$ p.u., 偏离了真实值。进一步, 本文对取不同自由度时全局最优点的影响进行分析, 结果如表 1 所示。由表可知, 自由度 V 取值越小, 估计结果的精度越高, 全局最优点与真实值越接近。

表 1 自由度 V 对全局最优解的影响

Tab.1 Impact of V on globally optimal solution

试验序号	V	电压幅值	电压相角/ $^\circ$
1	0.0004	1.0020	-29.794
2	0.0016	1.0020	-29.794
3	0.0064	1.0021	-29.221
4	0.0256	1.0060	-26.929
5	0.1024	1.0120	-21.772
6	0.4096	1.0240	-16.616
7	1.6384	1.0240	-15.470
8	6.5536	1.0260	-14.897
9	26.2140	1.0260	-14.897

实际上, V 值的改变与文献[9]中的 Parzen 窗宽度类似, 在数学上其作用是等价的。由图 4 可知, 局部最优点与全局最优点距离较远, 当节点电压在真实值的较大邻近区域内取初值时, 不会陷入局部最优点。因此, 如何确定初值是本文算法的关键。对于工程应用, 可将前一断面的状态估计结果作为后一断面状态估计的初值, 根据电力系统运行状态一般变化较平缓的特点, 能有效减少迭代次数, 从而提高程序收敛速度。同时, 文献[9]采用逐步调整 Parzen 窗宽的策略进行多次迭代求解, 能有效克服局部最优解问题, 但存在收敛速度较慢的不足。本文对自由度进行动态设置^[7]:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^m w_i |z_i - h_i(\mathbf{x})|}{m - n} \quad (9)$$

由式(9)可知, 自由度的确定与量测系统的残差大小有关。 t 型估计的计算流程如图 5 所示。

3 方法特点

与以往的状态估计方法相比, 本文方法特点如下。

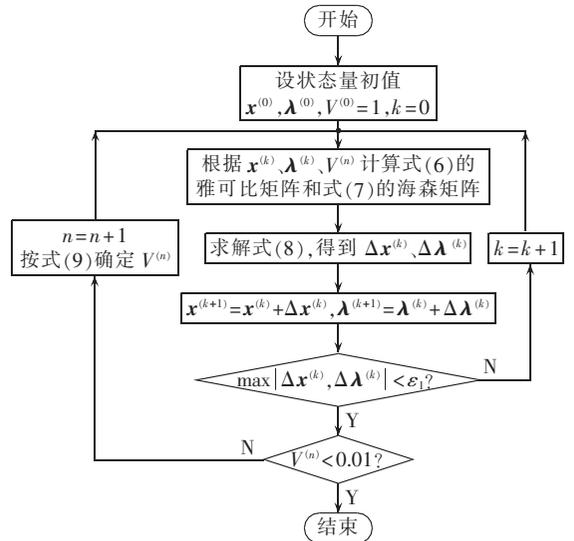


图 5 自适应 t 型状态估计流程图

Fig.5 Flowchart of adaptive t -type estimation

a. 传统 WLS 状态估计方法结果易受不良数据影响, 本文方法以量测残差对数函数值作为目标函数, 能够有效减小不良数据对状态估计结果的影响, 抗差性强, 估计结果合理性好。

b. 当 $V \rightarrow \infty$ 时, t 分布趋于正态分布, 对应的估计方法为 WLS 估计, 当量测系统中不含不良数据时有较高的计算效率; 当 V 取较小值时, 可取得较好的抗差性。本文方法能够动态调整自由度, 从而保证方法兼顾估计的抗差性和效率。

c. 该方法在循环迭代求解过程中通过对自由度动态调整, 可有效克服局部最优解问题^[9]。

4 算例分析

为了验证本文方法的有效性, 在 Visual C++ 平台上编制了自适应 t 型抗差估计。对 IEEE 标准系统和某实际输电网的数据进行试验, 通过将潮流结果加 2% 高斯随机误差获得量测生数据, 通过对生数据置 0 的方式得到试验用的不良数据。

4.1 抗差性测试

4.1.1 4 节点系统

由残差方程知, 某量测上出现不良数据时, 对自身及其他量测的残差均产生影响。由于量测误差的不确定性, 反映在残差上的情形也非常复杂, 本文仅考虑 2 个量测间的相关性, \mathbf{r} 与量测误差 \mathbf{v} 存在以下关系:

$$\mathbf{r} = \mathbf{K}\mathbf{v} \quad (10)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{I} - \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \quad (11)$$

其中, \mathbf{K} 为残差灵敏度矩阵。

对于 t 型估计, 若量测 i 的残差较大, 则对角元素 $F_{ii}(\mathbf{x}) = 2w_i / (V + r_i^2) \approx 0$, 即对该量测降权处理, 由此可以得出, t 型估计模型中抑制不良数据的影响是

可能的。

以下针对 4 节点系统^[16]进行测试,分析含强相关不良数据时状态估计结果的准确性。该系统的结构、量测分布和节点电压真值如图 6 所示。

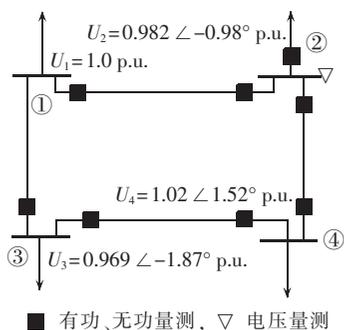


图 6 4 节点系统结构图

Fig.6 Structure of 4-bus system

在给定的量测系统和网络结构下,找出具有强相关性的量测对(CM),并分析不良数据对该量测估计值的影响。相关性分析可通过统计 K 中的相关系数,量测 i 与量测 j 之间的相关度指标^[12]为:

$$P_{ij} = \frac{|K_{ii}K_{jj} + K_{ij}K_{ji}|}{\sqrt{K_{ii}^2 + K_{jj}^2} \sqrt{K_{ji}^2 + K_{ij}^2}} \quad (12)$$

其中, K_{ij} 为 K 的第 i 行第 j 列元素值。

当相关度指标满足 $0.7521 < P_{ij} < 0.9498$ 时,为强相关量测对。该系统含 4 组强相关量测,各估计方法的强相关量测指标见表 2。这 4 组量测对于 WLS 估计均为强相关量测,而采用 t 型估计后,相关度指标显著减小。

表 2 4 节点系统强相关量测指标

Tab.2 Strong correlation measurement index of 4-bus system

序号	量测项	WLS	QC	t 型估计
CM1	P_{1-2}, P_{2-1}	0.891 00	0.325 18	0.130 63
CM2	Q_{1-2}, Q_{2-1}	0.889 64	0.317 64	0.128 51
CM3	P_{4-3}, P_{3-4}	0.763 93	0.301 79	0.129 42
CM4	Q_{4-3}, Q_{3-4}	0.764 77	0.299 84	0.124 38

为进一步测试不同方法对强相关量测不良数据的估计精度,对上述 4 组强相关量测添加不良数据,不同方法的估计结果见表 3,表中数据均为标么值。

表 3 4 节点系统强相关量测不同方法的估计结果比较

Tab.3 Comparison of estimation results among different strong correlation measurement methods of 4-bus system

序号	量测项	量测值	真实值	WLS		QC		t 型估计	
				估计值	量测残差	估计值	量测残差	估计值	量测残差
CM1	P_{1-2}	0	0.388 3	0.246 5	0.141 8	0.380 3	0.008 0	0.387 6	0.000 7
	P_{2-1}	-0.386 9	-0.386 0	-0.245 3	-0.140 7	-0.378 4	-0.012 4	-0.385 4	-0.000 6
CM2	Q_{1-2}	0	0.231 1	0.134 2	0.096 9	0.143 3	0.087 8	0.222 6	0.008 5
	Q_{2-1}	-0.321 9	-0.320 1	-0.175 6	-0.144 5	-0.236 4	-0.083 7	-0.311 6	-0.008 5
CM3	P_{4-3}	1.044 5	1.047 4	0.848 6	0.198 8	1.043 6	0.003 6	1.045 9	0.001 5
	P_{3-4}	0	-0.970 8	-0.257 3	-0.713 5	-1.024 9	0.054 1	-0.977 9	0.007 1
CM4	Q_{4-3}	0.570 7	0.569 4	0.435 4	0.134 0	0.619 8	-0.050 4	0.575 0	-0.005 6
	Q_{3-4}	0	-0.635 8	-0.171 3	-0.464 5	-0.654 7	0.018 5	-0.640 9	0.005 1

注:粗体数据为不良数据。

以支路 1-2 有功功率 P_{1-2} 为例说明不同方法的抗差性能,由表 3 可知,该量测的真值为 0.3883 p.u., WLS 估计结果为 0.2465 p.u.,残差为 0.1418 p.u.,而 t 型估计值为 0.3876 p.u.,残差仅为 0.0007 p.u.,很好地辨识出了不良数据。此外,对于该支路 P_{2-1} 功率量测, t 型估计的误差也仅为 -0.0006 p.u.,表明 t 型估计成功辨识出了该组强相关不良数据。

4.1.2 IEEE 57 节点系统

采用以下指标衡量估计的状态变量(除平衡节点外其余节点的电压幅值和相角)的准确性^[10]:

$$S_1 = \sum_{i=1}^n |x_i^* - x_i| \quad (13)$$

$$S_2 = \max |x_i^* - x_i| \quad (14)$$

其中, x_i^* 为第 i 个状态变量的估计值; x_i 为状态变量的真实值。

表 4 给出了 57 节点系统的试验结果,该系统含 421 个量测。由表 4 可知,本文方法随着不良数据比例的增加, S_1 指标和 S_2 指标变化较小,表明本文方法不易受不良数据的影响。

表 4 57 节点系统试验结果

Tab.4 Test results of 57-bus system

试验序号	不良数据比例/%	S_1		S_2	
		WLS+BD	t 型估计	WLS+BD	t 型估计
1	0	0.251 04	0.021 75	0.003 97	0.000 36
2	1.187 6	0.334 14	0.027 52	0.004 92	0.000 52
3	2.375 3	0.563 72	0.035 91	0.008 29	0.000 64
4	3.562 9	0.479 19	0.059 89	0.008 15	0.000 97
5	4.750 6	0.720 11	0.062 74	0.010 58	0.001 04
6	5.938 2	0.921 14	0.100 83	0.012 09	0.001 62
7	7.125 9	1.071 08	0.172 21	0.013 93	0.002 93

4.1.3 某实际省网

为了验证本文方法在实际电网中的性能,对某输电网进行测试,该系统含 1 119 条母线、1 992 条线路(简称省网 A)。由于实际系统中量测的真实值无法得到,本文对不同状态估计结果进行合格率评估^[10]。表 5、6 给出了各类型量测的考核基准值与合格门槛值,不同方法的状态估计合格率如表 7 所示。

由表 7 可知,6 个时间断面中,WLS+BD 估计的合格率最低为 93.54%,而本文方法的合格率最低为

表 5 状态估计合格评估基准值

Tab.5 Benchmark of state estimation conformity assessment

序号	电压类型名称/kV	电压考核基准/kV	功率考核基准/MW
1	BV-1.0	1.00	1.00
2	BV-6.0	132.00	114.00
3	BV-10.0	132.00	114.00
4	BV-35.0	132.00	114.00
5	BV-110.0	132.00	114.00
6	BV-220.0	264.00	305.00
7	BV-330.0	396.00	600.00
8	BV-500.0	600.00	1082.00

表 6 状态估计合格评估门槛值

Tab.6 Threshold of state estimation conformity assessment

量测类型	遥测预处理门槛	可疑遥测门槛	考核合格门槛
母线电压幅值	5.00	6.50	2.00
线路/节点注入有功功率	5.00	4.00	2.00
线路/节点注入无功功率	5.00	5.00	3.00

表 7 某实际输电网试验结果

Tab.7 Test results of a practical transmission network

时间断面	量测数目	合格率/%		
		WLS+BD	QC 估计	t 型估计
1	8 571	93.59	95.42	96.26
2	8 571	94.08	95.67	96.59
3	8 571	93.68	95.84	96.66
4	8 571	93.54	95.06	96.73
5	8 571	93.56	95.49	96.24
6	8 571	93.89	95.23	97.01

96.24%, 相比 WLS+BD 提高了 2.70%。QC 估计最低合格率为 95.06%, 较 WLS+BD 有一定程度的提高, 但仍低于 t 估计。试验结果表明本文方法具有较强的抗差性。

4.2 自由度对估计结果的影响测试

第 2 节讨论了本文方法的局部最优解问题, 提出了动态调整自由度的策略^[7,9], 并对 2 节点系统进行了分析, 由试验结果可知自由度的选择及初值的选取方法将决定算法的最终结果。本文对 IEEE 57 节点系统进一步分析, 采用定 V 方式(以 WLS 状态估计结果作为系统状态量初值)进行 t 型状态估计计算。同时, 为了验证本文动态调整自由度 V 方式的有效性, 表 8 给出了上述不同自由度下状态估计的结果比较。

由表 8 可知, 随着自由度 V 的减小, S_1 及 S_2 指标

表 8 不同 V 值的 t 型估计结果

Tab.8 Results of t -type estimation for different V values

方法	V	迭代次数	计算时间/ms	S_1	S_2
定 V 方式	1.0000	4	5.243	0.274 15	0.004 81
	0.1000	5	6.732	0.168 54	0.001 59
	0.0100	5	6.648	0.036 26	0.000 37
	0.0010	6	7.391	0.010 32	0.000 12
本文方法	1.0000	4	5.235	0.274 15	0.004 81
	0.0129	5	6.657	0.016 38	0.000 16

逐渐减小, 即较小的自由度具有更强的抗差能力。当自由度 $V=1$ 时, S_1 指标为 0.274 15, 平均误差为 0.002 43, 最大误差为 0.004 81。在试验中发现, 本文方法在第 1 次迭代后利用式(9)计算得到 $V=0.0129$, 继续进行迭代计算, 经过 5 次迭代收敛后 $V=0.002 68$, 满足收敛条件。最终 t 型估计结果 S_1 指标进一步减小至 0.016 38, 仅为第 1 次迭代时的 5.975%。同时, 与定 V 方式比较可知, 该方法并未陷入局部最优解。在计算效率上, 定 V 方式经 4 次迭代总时间为 26.014 ms, 而本文仅为 11.892 ms, 表明本文混合策略在保证求解精度的前提下, 显著提高了收敛速率。

为了进一步验证本文动态调整自由度策略在实际省网中的有效性, 图 7 给出省网 A 的 120 个量测断面状态估计时间。由图 7 可知, 采用文献[9]的定 V 方式时, 由于每次状态估计需 4 次循环迭代求解, 平均计算时间为 0.444 7 s, 而采用本文方法后, 平均计算时间为 0.367 2 s, 相比文献[9]可减少 17.43%。同时, 本文方法估计结果具有与定 V 方式同样的精度, 这也进一步说明了本文动态调整自由度策略在保持状态估计求解精度的前提下, 可有效减少 t 型估计的计算时间。实际上, 目前抗差估计的计算量往往较大, 这也是制约其在实际中进一步应用的原因^[9]。对于该省网, 实际现场采用的 WLS 估计平均计算时间为 0.176 5 s, 仅为本文方法的 48.07%, 因此, 如何进一步提高计算速度是今后一个重要的研究内容。

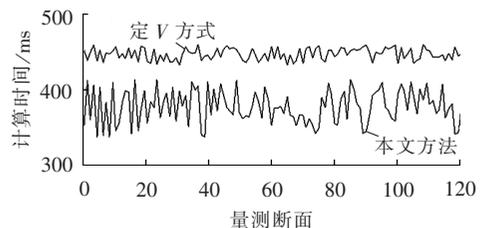


图 7 某实际省网 t 型抗差状态估计计算时间比较

Fig.7 Calculation time of t -type state estimation for a practical provincial network

5 结论

本文基于 t 型估计, 建立了适用于电力系统状态估计的简化模型, 利用其目标函数连续可微的特点给出类牛顿法的求解方法。该方法具有如下特点。

a. 以 t 型分布对误差建模, 当取较小自由度时, 具有良好的抗差性能, 有效排除不良数据对状态估计结果的影响。

b. 提出自适应动态调整自由度的策略, 兼顾了 t 型估计的效率和抗差性, 满足工程要求。

c. 作为一种新的抗差估计, t 型估计有很好的理论基础, 将 t 型估计引入电力系统状态估计中, 能够丰富和发展抗差状态估计的理论和方法。与传统 WLS 估计相比, 本文方法计算量仍然较大。

参考文献:

- [1] 李虹,赵书强. 基于 WAMS/SCADA 混合量测的电力系统跟踪滤波动态状态估计[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):101-105,116.
LI Hong,ZHAO Shuqiang. Power system dynamic state estimation of strong tracking filter based on hybrid WAMS/SCADA measurements[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):101-105,116.
- [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 Quanchun,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,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] 徐玮韡,刘东,柳劲松,等. 考虑质量标签的多数据源配电网状态估计算法[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):78-81.
XU Weiwei,LIU Dong,LIU Jinsong,et al. State estimation based on quality lag for distribution network with multiple data source[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):78-81.
- [4] CHOI D H,LE Xie. Fully distribute bad data processing for wide area state estimation[C]//IEEE International Conference on Smart Grid Communications,2011. Brussels,Belgium:[s.n.],2011:546-551.
- [5] 刘峰. EMS 中状态估计模块生产运行及实用化问题分析[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):118-123,126.
LIU Feng. Operation and practicability of state estimation module in EMS[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(4):118-123,126.
- [6] SOU K C,SANDBERG H,JOHANSSON K H. Data attack isolation in power networks using secure voltage magnitude measurements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(1):14-28.
- [7] 徐臣,余贻鑫. 提高配电网状态估计精度的量测配置优化方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):17-21.
XU Chen,YU Yixin. Evaluation and optimization meter placement to enhance distribution state estimation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(7):17-21.
- [8] 钱峰,龚庆武. 基于 IGG 法的电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化,2005,29(3):36-40.
QIAN Feng,GONG Qingwu. State estimation of power system based on IGG method[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(3):36-40.
- [9] 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 Boming,WU Wenchuan. Solution and performance analysis to a robust state estimation method with exponential objective function[J]. Proceeding of the CSEE,2011,31(7):89-95.
- [10] 董树锋,何光宇,孙英云,等. 以合格率最大为目标的电力系统状态估计新方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):40-43.
DONG Shufeng,HE Guangyu,SUN Yingyun,et al. A novel method for power system state estimation with maximum good measurement rate[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(16):40-43.
- [11] 何光宇,董树锋. 基于测量不确定度的电力系统状态估计(一)结果评价[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):21-24,35.
HE Guangyu,DONG Shufeng. Power system static state estimation based on uncertainty of measurement part one result evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(19):21-24,35.
- [12] 郭伟,单渊达. M 估计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):26-31.
GUO Wei,SHAN Yuanda. M -estimation and its application in power system state estimation[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(9):26-31.
- [13] 陈轲,归庆明,柳丽,等. Guass-Markov 模型的 t 型抗差估计[J]. 测绘学报,2008,37(3):280-292.
CHEN Ke,GUI Qingming,LIU Li,et al. Robust t -type estimation in Guass-Markov model[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica,2008,37(3):280-292.
- [14] CUI Henjian. On asymptotics of t -type regression estimation in multiple linear model[J]. Science in China, Ser A Mathematics,2004,34(3):361-372.
- [15] 《现代数学手册》编纂委员会. 现代数学手册(随机数学卷)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2000:399-426.
- [16] JESUS P M D,QUINTANA A R. New formulation for distribution system state estimation[C]//Andean Region International Conference,2011. Cuenca,Spain:[s.n.],2011:3-6.

作者简介:



颜全椿

颜全椿(1989-),男,福建三明人,硕士研究生,研究方向为电力系统状态估计(E-mail:yanquanchun@126.com);

卫志农(1962-),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等(E-mail:wzn_nj@263.net);

徐泰山(1968-),男,江苏泰兴人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制(E-mail:xutaihsan@sgepri.sgcc.com.cn)。

Robust t -type state estimation based on Gauss-Markov model for power system

YAN Quanchun¹,WEI Zhinong¹,XU Taishan²,WANG Shengming²,SUN Guoqiang¹

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute/Nari Group Corporation, Nanjing 210003, China)

Abstract: The t -type estimation is introduced into the state estimation to form the robust t -type state estimation based on the adaptive Gauss-Markov model, which, compatible with the traditional state estimation program, uses the freedom degree of t -type estimation to dynamically adjust its efficiency and robustness. Its objective function is continuously differentiable and can be solved by the Newton method, similar to the WLS (Weighted Least Square) method. It avoids the shortage of traditional bad data identification program, which cannot identify the strongly correlative bad data effectively. Its effectiveness is verified with IEEE standard system and a practical transmission network, which demonstrates that it has obviously better robustness than WLS estimation and Quadratic-Constant estimation.

Key words: electric power systems; t -type estimation; freedom degree; bad data; local optimum; state estimation