

# 基于测量不确定度的电力系统状态估计 (三)算法比较

何光宇, 董树锋

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084)

**摘要:** 加权最小二乘估计准则在电力系统状态估计中应用广泛,但其结果易受不良测点影响。为解决这一问题,已经提出了加权最小绝对值准则、非二次准则等估计器。应用大量算例,对已有估计准则和文中所提出的以最大测点正常率为目标的状态估计方法进行了对比研究,进一步对残差污染情况进行了讨论。算例表明,在估计结果合理性方面,当测点中不含不良数据时,文中所提出的方法与加权最小二乘估计相当,优于其他方法;当测点中含有不良数据时,文中所提出的方法大幅度优于以往状态估计方法,说明所提出的方法可较好地解决残差污染问题。

**关键词:** 状态估计; 加权最小二乘; 加权最小绝对值; 非二次准则; 测点正常率

**中图分类号:** TM744; TM732

## 0 引言

本文是系列文章(共3篇)的第3篇。本文在前2篇<sup>[1-2]</sup>的基础上,对第2篇<sup>[2]</sup>提出的状态估计方法与以往状态估计方法进行了较详细的对比研究。

在以往研究中,加权最小二乘(WLS)估计准则<sup>[3]</sup>应用最为广泛。在不存在不良测点(指量测值与真值之差绝对值大于3倍标准差的测点)时,该方法估计结果的优点是具有最优一致且无偏,缺点是抗差能力较差,容易受不良测点影响。目前,解决此问题有2种方法:第1种方法是在应用WLS估计准则进行状态估计前应用经验准则或其他方法对不良数据进行检测<sup>[4-5]</sup>,这也是实际中常采用的方法;第2种方法是采用某种可同时识别不良测点的估计器,如非二次(non-quadratic)准则估计器<sup>[6]</sup>(包括QL(quadratic-linear)和QC(quadratic-constant)估计器等)。

以往状态估计方法基于测点残差这一概念,因此其估计结果的合理性较难进一步提高,系列文章第1篇<sup>[1]</sup>已对此进行了评述。本文应用大量算例,对系列文章第2篇<sup>[2]</sup>提出的最大测点正常率(maximum normal measurement rate, MNMR)估计方法与以往状态估计方法进行了详细比较,进一步运用多个实际断面对这些方法的估计结果进行了对比。特别地,残差污染是以往应用WLS准则估计器时较难解决的问题,本文也对此进行了对比分析。

## 1 已有状态估计方法

状态估计的数学模型如下:

$$z = h(x) + v \quad (1)$$

式中: $z$ 为量测值向量; $h(x)$ 为量测函数向量; $v$ 为量测误差向量;设共有 $m$ 个量测量,则上述向量均为 $m$ 维; $x$ 为状态量,设系统节点数为 $n$ ,以节点电压幅值和相角作为状态变量,并取某一节点作为相角参考节点,则 $x$ 为 $2n-1$ 维。

$$\text{令} \quad e_i = z_i - h_i(x) \quad (2)$$

式中: $z_i$ 为第 $i$ 个量测的量测值; $h_i(x)$ 为第 $i$ 个量测的量测方程。

状态估计器求解状态量 $x$ 采用的优化问题目标函数可以表示为:

$$J(x) = \min \sum_{i=1}^m \rho_i(e_i) \quad (3)$$

式中: $\rho_i(e_i)$ 对于WLS估计器、加权最小绝对值(WLAV)估计器和非二次准则估计器,采用不同形式。

### 1) WLS 估计器

WLS估计器 $\rho_i(e_i)$ 的形式为:

$$\rho_i(e_i) = w_i e_i^2 \quad (4)$$

式中: $w_i$ 为第 $i$ 个量测的权重。

### 2) WLAV 估计器

WLAV估计是继WLS估计之后引入电力系统的状态估计器<sup>[7-8]</sup>。该估计器 $\rho_i(e_i)$ 的形式为:

$$\rho_i(e_i) = w_i |e_i| \quad (5)$$

### 3) 非二次准则估计器

非二次准则估计器可分为QL和QC估计器,

收稿日期: 2009-03-14; 修回日期: 2009-06-05。

国家自然科学基金资助项目(50507013)。

它们所采用的  $\rho_i(e_i)$  形式分别如下:

$$\rho_i(e_i) = \begin{cases} \frac{W_i e_i^2}{2} & |e_i| \leq \delta_i \\ W_i \left( \delta_i e_i - \frac{\delta_i^2}{2} \right) & e_i > \delta_i \\ W_i \left( -\delta_i e_i - \frac{\delta_i^2}{2} \right) & e_i < -\delta_i \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho_i(e_i) = \begin{cases} \frac{W_i e_i^2}{2} & |e_i| \leq \delta_i \\ \frac{W_i \delta_i^2}{2} & |e_i| > \delta_i \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\delta_i$  为与第  $i$  个量测相关的参数;  $W_i$  为第  $i$  个量测的权重。

WLS, WLAV, QL, QC 估计器所采用的  $\rho_i(e_i)$  的函数形状如附录 A 图 A1 所示。

## 2 试验条件

为了检验系列文章第 2 篇<sup>[2]</sup>提出的 MNMR 方法在估计结果合理性和收敛性(迭代次数)等方面的表现,分别用 IEEE 14, 30, 39, 57, 118 节点系统对 MNMR, WLS, WLAV, QL, QC 共 5 种估计器进行了对比试验。

下面进行的试验中, MNMR 估计器采用系列文章第 2 篇<sup>[2]</sup>中式(6)所示模型。其中,参数  $k$  均取 2,  $\lambda$  均取 4。其他估计器的优化问题采用如下模型:

$$\begin{cases} J(\mathbf{x}) = \min \sum_{i=1}^m \rho_i(z_i - h_i(\mathbf{x})) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$  为潮流方程;  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$  为实际物理约束。

本文中,由于试验数据为 IEEE 标准算例,因此没有考虑实际物理约束,即  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$  代表的约束集为空集。

式(8)模型具有最优潮流形式,本文基于开源现代内点法优化计算软件包<sup>[9-10]</sup>求解上述优化问题。其中, WLAV 问题求解采用文献<sup>[8]</sup>方法。

## 3 算法比较

系列文章第 2 篇<sup>[2]</sup>提出以测点正常率最大为目标的状态估计准则,本节将其与以往提出的状态估计准则,包括 WLS 准则、WLAV 准则、非二次准则等从各方面进行对比研究。

本文 3.1 节和 3.2 节针对没有不良量测和不良量测较多 2 种情况,分别用各种方法对 IEEE 14, 30, 39, 57, 118 节点系统进行对比研究,包括状态估计结果合理性、迭代次数、计算时间等。其中,进行状态估计结果合理性评价时,采用  $S_1, S_2, \bar{S}_1, \bar{S}_2, \xi_{3\sigma}, \xi_{2\sigma}, \xi_{\sigma}, \eta, \eta_{2/3}, \eta_{1/3}$  等评价指标,各评价指标的具体介绍参见系列文章第 1 篇<sup>[1]</sup>。

本文提出的 MNMR 方法的抗差性较强,可自动对不良数据进行辨识,非二次准则估计器(QL 和 QC 估计器)也以具有不良数据辨识能力著称,3.3 节对这 3 种方法的不良测点辨识能力进行比较。

### 3.1 没有不良量测情况

通过将潮流计算结果加上方差为 2% 真值的高斯噪声得到试验用生数据,表 1 给出了 IEEE 118 节点的试验结果,其他 IEEE 标准系统的详细试验结果见附录 B 表 B1。

表 1 不含不良量测时 IEEE 118 节点系统计算结果  
Table 1 Test results of IEEE 118-bus system with no bad data

估计方法	迭代次数	$S_1$	$S_2$	$\bar{S}_1$	$\bar{S}_2$	$\xi_{3\sigma}$	$\xi_{2\sigma}$	$\xi_{\sigma}$
MNMR	13	61.734 0	0.524 3	1.957 6	0.091 1	1.000 0	0.999 1	0.950 7
WLS	12	61.885 9	0.524 7	1.602 9	0.091 2	1.000 0	0.998 1	0.934 5
WLAV	55	62.656 0	0.525 5	5.399 7	0.161 1	0.997 2	0.972 5	0.811 2
QL	11	61.808 3	0.525 5	3.663 5	0.059 5	0.925 0	0.883 3	0.762 8

从表 1 试验结果可以看出,不含不良量测时,

1) 估计结果合理性方面: MNMR 方法和 WLS 方法最好,其合理性指标几乎没有差别; WLAV 方法次之, QL 方法最次。

2) 收敛性方面: MNMR 方法、WLS 方法最好,其迭代次数在 13 次以下; WLAV 方法迭代次数略多,为 30 次~60 次; QL 方法偶尔出现迭代次数超过 300 次的情况。

### 3.2 有不良量测情况

通过将生数据改变符号、置零、加减 20% 以上量测值等手段得到试验用不良数据。不良数据较少(小于 3%)和较多(大于 5%)时,对几种状态估计器的估计结果合理性指标进行了对比,如表 2 和表 3 所示,其他 IEEE 标准系统的详细试验结果见附录 B 表 B2 和表 B3。

表2 含不良量测较少时 IEEE 118 节点系统计算结果  
Table 2 Test results of IEEE 118-bus system with less bad data

估计方法	迭代次数	$S_1$	$S_2$	$\bar{S}_1$	$\bar{S}_2$	$\xi_{3\sigma}$	$\xi_{2\sigma}$	$\xi_{\sigma}$
MNMR	13	61.872 0	0.524 3	1.802 4	0.029 5	0.993 4	0.986 7	0.933 6
WLS	14	63.903 7	0.544 0	22.820 0	0.753 1	0.751 4	0.656 5	0.374 8
WLAV	42	62.389 8	0.631 3	22.766 5	1.557 4	0.929 8	0.901 3	0.753 3
QL	606	61.760 1	0.533 3	13.692 9	0.363 6	0.778 9	0.707 8	0.513 3

表3 含不良量测较多时 IEEE 118 节点系统计算结果  
Table 3 Test results of IEEE 118-bus system with more bad data

估计方法	迭代次数	$S_1$	$S_2$	$\bar{S}_1$	$\bar{S}_2$	$\xi_{3\sigma}$	$\xi_{2\sigma}$	$\xi_{\sigma}$
MNMR	12	61.785 3	0.525 2	2.238 5	0.063 2	0.990 5	0.982 0	0.922 2
WLS	14	65.213 3	0.554 7	36.731 5	0.859 5	0.663 2	0.530 4	0.265 7
WLAV	49	62.256 8	0.617 5	41.860 5	3.476 6	0.870 0	0.831 1	0.610 1
QL	953	63.553 8	0.634 0	21.179 6	0.972 2	0.673 6	0.604 4	0.457 3

从表2和表3的试验结果可以看出,含不良量测时,

1)估计结果合理性方面:MNMR方法的结果合理性大幅度优于其他方法,其 $\xi_{\sigma}$ 指标接近于1;WLAV方法、QL方法次之,WLS方法最差。

2)收敛性方面:与不含不良量测情况类似,MNMR方法、WLS方法最好;WLAV方法迭代次数略多;QL方法最差,经常出现迭代次数超过100次的情况。

### 3.3 不良数据辨识试验

QL, QC和MNMR估计器具有不良数据辨识能力,表4给出了IEEE 118节点系统的试验结果。IEEE 30节点系统的试验结果见附录B表B4。

表4 IEEE 118节点系统计算结果  
Table 4 Test results of IEEE 118-bus system

试验序号	不良数据个数	QL		QC		MNMR	
		误检个数	漏检个数	误检个数	漏检个数	误检个数	漏检个数
1	12	—	—	2	0	0	0
2	23	—	—	3	0	0	0
3	30	250	8	3	0	0	0
4	36	190	10	2	0	0	0
5	49	—	—	0	0	0	0

注:“—”表示不收敛。

从表4试验结果可以看出,MNMR估计器和QC估计器具有较强的不良数据辨识能力,尤其是MNMR估计器,试验中没有发生误检和漏检情况。

## 4 实际运行情况

针对约含1800个遥测点的某实际输电网的多个实际数据断面,应用WLS, WLAV, QL, QC和MNMR等多种方法进行试算。由于真值和测点标准差未知,对状态估计结果合理性评价采用了测点合格率指标<sup>[1]</sup>,其计算结果如表5所示。

表5 某输电网多个实际断面测点合格率计算结果  
Table 5 Test results of good measurement rate for real power system grid

序号	遥测数	测点合格率/(%)				
		WLS	WLAV	QL	QC	MNMR
1	1828	90.54	92.72	92.67	92.40	95.30
2	1828	90.86	92.67	93.05	92.78	95.57
3	1828	90.10	92.89	92.45	93.16	95.19
4	1828	90.75	92.45	93.00	92.67	95.30
5	1828	90.75	92.67	92.94	92.67	95.57

应用WLS和WLAV方法时,测点权重取目前该系统实际采用的值,500kV电压测点权重取10;220kV电压测点权重取2.236;其他电压等级的电压测点权重取1.0;有功测点权重取1.0;无功测点权重取0.2。

从表5可以看出,MNMR方法的测点合格率指标较其他方法有较大提高。

## 5 残差污染情况

基于残差搜索的不良数据检测方法有2种:加权残差搜索法(简称为 $r_w$ 法)和标准化残差搜索法(简称为 $r_N$ 法)。这2种检测方法随着不良数据值的增大,有时会产生残差污染现象。下面以文献[11]中的4节点系统为例,对此进行对比研究。

4节点系统线路参数和量测配置见附录C图C1,该系统包括16个量测,量测噪声为高斯噪声,每一个量测的量测值、真值和所对应的标准差见附录C表C1。

文献[11]给出了发生残差污染的例子,当 $P_1$ 为不良数据(不良数据值分别为 $\pm 50, \pm 100$ )时, $r_w$ 法和 $r_N$ 法检测 $P_1, P_{12}, P_{13}, P_{31}, P_{32}, P_3, P_{34}$ 为不良测点,出现了残差污染现象。

表6给出了MNMR方法估计结果,其中,MNMR估计器的参数 $k$ 和 $\lambda$ 分别取3和1。可以

看出,4 种情况下, MNMR 方法的估计结果相同, 表现出了强烈的抗差性; 估计结果中只有  $P_1$  的估计

值与量测值之间相差  $\pm 3\sigma$  以上, 不良数据被正确辨识, 避免了残差污染的发生。

表 6 MNMR 方法估计结果  
Table 6 Estimation results of MNMR method

不良数据值	$P_1$	$Q_1$	$P_{12}$	$Q_{12}$	$P_{13}$	$Q_{13}$	$P_{31}$	$Q_{31}$	$P_{32}$	$Q_{32}$	$P_3$	$Q_3$	$P_{34}$	$Q_{34}$	$U_1$	$U_3$
50	24.33	34.79	43.09	37.72	-18.76	-2.93	18.85	-10.76	130.77	41.56	-47.51	-41.20	-197.13	-72.00	111.47	111.69
-50	24.33	34.79	43.09	37.72	-18.76	-2.93	18.85	-10.76	130.77	41.56	-47.51	-41.20	-197.13	-72.00	111.47	111.69
100	24.33	34.79	43.09	37.72	-18.76	-2.93	18.85	-10.76	130.77	41.56	-47.51	-41.20	-197.13	-72.00	111.47	111.69
-100	24.33	34.79	43.09	37.72	-18.76	-2.93	18.85	-10.76	130.77	41.56	-47.51	-41.20	-197.13	-72.00	111.47	111.69

## 6 结语

本文对所提出的新型状态估计方法——以测点正常率最大为目标的状态估计 MNMR 方法与以往状态估计准则(WLS, WLAV, QL, QC 等)进行了对比研究。使用 IEEE 14, 30, 39, 57, 118 节点系统对这 5 种估计器在估计结果合理性、收敛性(迭代次数)、不良数据辨识能力等方面的指标进行了对比分析, 并运用这些方法对多个实际数据断面进行了计算, 进一步对残差污染现象进行了分析和讨论。可以看出:

1) 估计结果合理性方面, 当量测中不含不良测点时, MNMR 估计器与 WLS 估计器的估计结果合理性相当, 优于其他估计器; 当量测中含有不良测点时, MNMR 估计器的估计结果合理性大幅度优于其他估计器。

2) 收敛性方面, MNMR 估计器与 WLS 估计器相当, 其迭代次数一般都在 20 次以下; WLAV 估计器的迭代次数稍多; QL 估计器的收敛性较差。

3) MNMR 估计器具有较好的不良数据辨识能力。

4) MNMR 估计器应用于实际系统时, 状态估计结果合理性较以往状态估计准则有了较大提高。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

[1] 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. 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. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 21-24, 35.

[2] 何光宇, 董树锋. 基于测量不确定度的电力系统状态估计:(二) 方法研究. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 32-36  
HE Guangyu, DONG Shufeng. Power system static state estimation based on uncertainty of measurement: Part two a

new method. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (20): 32-36.

[3] MILI L, CHENIAL M G, ROUSSEEUW P J. Robust state estimation of electric power systems. IEEE Trans on Circuits and Systems: I fundamental theory and applications, 1994, 41 (5): 349-358.

[4] ZHANG B M, LO K L. A recursive measurement error estimation identification method for bad data analysis in power system state estimation. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 191-197.

[5] ZHANG B M, WANG S Y, XIANG N D. A linear recursive bad data identification method with real-time application to power system state estimation. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1378-1385.

[6] BALDICK R, CLEMENTS K A, PINJO-LAZIGAL Z, et al. Implementing non-quadratic objective functions for state estimation and bad data rejection. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 376-382.

[7] CELIK M K, ABUR A. A robust WLAV state estimator using transformations. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 106-113.

[8] WEI H, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. An interior point method for power system weighted nonlinear  $L^1$  norm static state estimation. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 617-623.

[9] W? CHATER A, BIEGLER L T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. Mathematical Programming, 2006, 106(1): 25-57.

[10] W? CHTER A. An interior point algorithm for large-scale nonlinear optimization with applications in process engineering [D]. Pittsburgh, PA, USA: Carnegie Mellon University, 2002.

[11] 于尔铿. 电力系统状态估计. 北京: 水利电力出版社, 1985.

何光宇(1972—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力系统经济运行及优化理论在电力系统中的应用。  
E-mail: gyhe@mail.tsinghua.edu.cn  
董树锋(1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统优化和控制。

(下转第 71 页 continued on page 71)

LI Ye, JING Wei. Operation analysis of extra high voltage transmission line series capacitor. *Power Capacitor*, 2006(4): 8-12.

[12] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术, 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 195-197.

[13] GOLDSWORTHY D L. A linearized model for MOV-protected series capacitors. *IEEE Trans on Power Systems*, 1987, 2(4): 953-957.

陈福锋(1979—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 高压线路保护。E-mail: fujiant@163.com

钱国明(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 高压线路保护。

魏 曜(1979—), 男, 工程师, 主要研究方向: 高压线路保护。

## Distance Protection Scheme for Series Compensated Lines Based on the Fault Point Identification

CHEN Fufeng, QIAN Guoming, WEI Yao

(Guodian Nanjing Automation Co. Ltd., Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The analysis shows that sensitivity of voltage-detected program for the existing line distance protection of series compensation is insufficient. Based on uniform transmission line positive and negative traveling wave equation, the along line voltage calculating formula is derived with the measuring current and voltage. The characteristics of calculating along line voltage is analyzed separately for fault point before and after the compensated capacitors. The calculating along line voltage will appear minimum amplitude points if the fault point is before compensation capacitor, and the minimum voltage amplitude is zero in theory. If the fault point is after compensation capacitor, the calculating voltage even having minimum, but its amplitude is a bit higher. According to the characteristics, a method for identifying the point of fault is derived, integrating it with the traditional distance protection, a new series compensated line distance protection program is proposed. The program can solve distance protection overreach problem and improve the sensitivity of distance protection for series compensated line. When series compensation capacitors installed on the end of line the sensitivity will not be impacted by series compensation capacitors. EMTF simulation results show the effectiveness and reliability of the program.

**Key words:** distance protection; series compensation capacitors; line voltage; fault point identification; sensitivity

(上接第 31 页 continued from page 31)

## Power System Static-state Estimation Based on Uncertainty of Measurement

### Part Three Algorithms Compared

HE Guangyu, DONG Shufeng

(State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The weighted least squares (WLS) estimator is the currently most widely used method for power system state estimation. However, the estimation results of WLS could be far from the true values of state variables when bad data are present. To solve the problem, a non-quadratic objective estimator, the weighted least absolute value (WLAV) estimator, and least mean squares (LMS) estimator are proposed. Numerical simulations, including residual pollution examples, are carried out to compare existing estimators and the maximum normal rate estimator (MNR) described in the second paper of this series. Test results show that the proposed method is as good as WLS and better than other methods when no bad data is contained in the test system, and it is far superior to all other methods when test points contain bad data, showing that the proposed method can deal with the residual pollution scenario fairly well.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50507013).

**Key words:** state estimation; weighted least squares; weighted least absolute value; non-quadratic objective; normal rate of measuring points