

以合格率最大为目标的电力系统状态估计新方法

董树锋¹, 何光宇¹, 孙英云¹, 常乃超¹, 张王俊², 张健²

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084; 2. 上海市电力公司, 上海市 200122)

摘要:以合格率最大为目标,考虑潮流约束和运行中上下界约束,提出一种电力系统状态估计方法。该方法可用现代内点法求解,收敛性好。与以往方法相比,文中方法得到的状态估计结果合格率高;估计结果有较强的抗差性;所求的解为潮流解,满足各种物理约束,更加接近实际;计算中无需做坏数据检验、可观性校验,无需主观设定测点权重,大幅减少了调试和维护工作量。IEEE 39 节点系统、IEEE 118 节点系统和某实际输电网等试验系统的测试结果验证了该方法的优越性。

关键词:状态估计;合格率;加权最小二乘;抗差估计器;电力系统

中图分类号:TM744; TM732

0 引言

传统的状态估计方法由 Schweppe 等人于 1970 年创立^[1]。根据求解状态变量所用的目标函数的不同,状态估计器有不同的估计准则,常用的估计准则包括:加权最小二乘(WLS)准则、非二次准则^[2]、加权最小绝对值(WLAV)准则^[3-4]、最小均方(LMS)准则和最小截取二乘(LTS)准则^[5]。当前应用最广泛的是 WLS 估计准则,其优点是模型简单、计算量小,对理想正态分布的量测量,估计结果具有最优一致且无偏等优良统计特性,缺点是抗差能力差,即估计结果易受不良数据的影响而偏离真值较远。非二次准则、WLAV、LMS 和 LTS 估计器都属于抗差估计器,其显著优点是具有抗差能力,但有计算量大、需要主观确定加权因子等缺点,这也是妨碍其发展的重要原因^[6]。

纵观以往方法的基本思想,WLS 准则是使残差加权平方和最小,WLAV 准则是使残差加权绝对值之和最小,以及其他估计方法,都不是使估计结果的合格率最大。然而,实际应用中评价状态估计效果的标准是合格率。传统状态估计方法的理念与状态估计性能评价标准之间存在不可逾越的鸿沟。

本文提出一种新型电力系统状态估计方法,该方法以合格率最大为目标,可用现代内点法求解^[7],计算速度快、收敛性好。

1 方法介绍

1.1 主要思想

电力系统的遥测量方程可表示为:

$$Z_i = h_i(x) + e_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (1)$$

式中: Z_i 为系统中测点 i 的量测值; x 为系统状态; $h_i(x)$ 为测点 i 的量测函数; e_i 为测点 i 的量测误差; m 为系统中测点数目。

在实际应用中,对测点 i ,若

$$|e_i| = |Z_i - h_i(x)| \leq \alpha_i \quad (2)$$

则称测点 i 合格,反之则不合格。 α_i 为给定常量,可按电力公司已有标准选取,本文采用值见附录 A。

经典最小二乘状态估计方法的基本思想是在已知量测情况下,希望找到某个状态 x ,使得残差平方和最小。这样,当某个测点量测数据为坏数据时,其残差较大,对最小二乘结果影响也较大,造成所谓“残差污染”。实际应用中,为克服这一问题,往往要通过某些方法^[8-9],判断出该量测数据为坏数据,计算时给予较小的权重,来减少坏数据对估计结果的影响(即提高“抗差性”)。这种方法,需要主观确定加权因子,调试和维护较为困难。

对这一问题,本文采用一种全新思路:①任给系统某个状态 x 。②在这一状态下,对任一测点 i ,若其是合格测点(满足式(2)),则认为该测点“投票同意”这一状态;反之,认为该测点“投票反对”这一状态。③认为最多测点赞同的状态即为待求的系统状态。显然,在该状态下,系统合格点数最多(即合格率最大)。基于以上思路,本文提出一种新的状态估计方法。

1.2 测点评价函数

根据上文思想,可建立如下测点评价函数:

$$g_i(e_i) = \begin{cases} 0 & |e_i| \leq \alpha_i \\ 1 & |e_i| > \alpha_i \end{cases} \quad (3)$$

式(3)意义为,当测点 i 合格($|e_i| \leq \alpha_i$)时, $g_i(e_i)$ 为 0;反之, $g_i(e_i)$ 为 1。 $g_i(e_i)$ 形状见图 1。

函数 $g_i(e_i)$ 的缺点是:在 $\pm\alpha_i$ 处有间断点,并且不是处处连续可导,不便于实际应用。

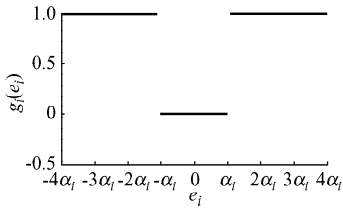


图1 函数 $g_i(e_i)$ 的形状
Fig.1 Figure of function $g_i(e_i)$

为此,建立 $g_i(e_i)$ 的近似函数,令

$$f_i(e_i) = \frac{1}{1 + e^{\frac{(e_i - \alpha_i)c}{\alpha_i}}} + \frac{1}{1 + e^{\frac{(\alpha_i + e_i)c}{\alpha_i}}} \quad (4)$$

式中: c 一般为大于 3 的常数。

$f_i(e_i)$ 形状如图 2 所示 (图中 $\alpha_i = 10, c = 10$)。

关于参数取值与算法收敛性关系讨论参见算例。

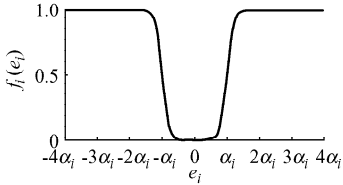


图2 函数 $f_i(e_i)$ 的形状 ($\alpha_i = 10, c = 10$)
Fig.2 Figure of function $f_i(e_i)$ ($\alpha_i = 10, c = 10$)

由图 2 可见, $f_i(e_i)$ 没有间断点,处处连续可导,且 $f_i(e_i)$ 与 $g_i(e_i)$ 的特性接近,即当测点 i 合格时, $f_i(e_i)$ 接近于 0;反之, $f_i(e_i)$ 接近于 1。因此,本文采用式(4)定义的 $f_i(e_i)$ 作为测点评价函数。需要说明的是,测点评价函数也可采用其他形式,只要保证处处连续可导,且当测点 i 合格时,测点评价函数值接近于 0,反之接近于 1 即可。

1.3 数学模型

设系统中不合格测点数目为 k ,则 $\sum_{i=1}^m f_i(e_i) \approx k$ 。而要寻求某一系统状态,使得合格测点数最多,即相当于寻求某一系统状态,使得在该状态下 $\sum_{i=1}^m f_i(e_i)$ 最小。得到新的状态估计模型如下:

$$\begin{cases} \min_x \sum_{i=1}^m f_i(e_i) \\ \text{s. t. } Z_i = h_i(x) + e_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (5)$$

由于实际运行中,真实系统状态必然满足潮流约束和运行中上下界约束,考虑这些约束后,得到改进的状态估计模型:

$$\begin{cases} \min_x \sum_{i=1}^m f_i(e_i) \\ \text{s. t. } Z_i = h_i(x) + e_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ g(x) = 0 \\ \underline{h} \leq h_i(x) \leq \bar{h} \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (6)$$

式中: $g(x) = 0$,代表潮流约束; $\underline{h} \leq h_i(x) \leq \bar{h}$,代表各测点运行中上下界约束。

1.4 求解算法

式(6)中,将 e_i 代入目标函数中,即得:

$$\begin{cases} \min_x \sum_{i=1}^m f_i(Z_i - h_i(x)) \\ \text{s. t. } g(x) = 0 \\ \underline{h} \leq h_i(x) \leq \bar{h} \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (7)$$

式(7)是最优潮流问题,可用求解最优潮流的算法求解。由于现代内点法在最优潮流求解中的成功应用^[10],最优潮流的收敛性和计算速度均得到保证,因而模型(式(7))也可用现代内点法顺利求解。

2 方法特点

与以往状态估计方法相比,本文方法具有以下特点:

1)估计准确性不易受不良数据影响,具有很强的抗差性。以往状态估计方法易受不良数据影响,且估计值偏离量测值越远,受影响就越大。本文方法中,当测点不合格(不满足式(2))时,无论估计值偏离量测值多远,其反映在目标函数中大小都是 1,因而估计准确性不易受不良数据影响,抗差性强。

2)可自动对坏数据点进行识别。本文方法所估计状态为绝大多数测点所赞同的状态。由此推论:若绝大多数点赞同某一状态,则投票反对该状态的测点必为坏量测点。因而,本文方法在进行状态估计时,自动对坏数据点进行了识别。

3)其他特点。①所求得的状态估计结果为潮流解,且满足各种物理约束,更加接近实际;②计算中无需做坏数据校验、可观性校验、权重因子设置,调试和维护极为简单;③求解算法为现代内点法,收敛性好、计算速度快。

3 算例

分别用文献[11]中 4 节点系统、IEEE 39 节点系统、IEEE 118 节点系统和某实际输电网的数据进行试验。对 IEEE 标准系统试验中,通过将潮流计算结果加上 2% 的高斯噪声,得到不含不良数据的生数据,通过将生数据改变符号、置零或加减量测值 20% 以上等得到试验用的不良数据。试验中,如无特别说明,WLS 方法中测点 i 的权重取 $1/\sigma_i^2$, σ_i 为正态分布标准差,本文方法中取 $\alpha_i = 3\sigma_i$ 。

3.1 4 节点试验系统

4 节点系统量测配置见附录 B 图 B1。在正常量测基础上将 P_{12} 符号取反作为不良数据,表 1 为试验结果。可以看出:WLS 方法受不良数据的影响

导致量测 P_1, P_{12} 等估计结果偏离真值较远, 本文方法在案例中表现出抗差性, 且估计值都逼近真值。

表 1 4 节点系统试验结果
Table 1 Test results of 4-bus system

量测项	量测值	真值	WLS 方法	本文方法
P_1	18.71	20.86	-12.47	22.09
Q_1	34.05	35.79	35.70	34.22
P_{12}	-41.79	40.33	12.95	40.38
Q_{12}	37.96	38.35	37.46	37.37
P_{13}	-19.10	-19.47	-25.43	-18.29
Q_{13}	-2.24	-2.56	-1.76	-3.15
P_{31}	17.55	19.57	25.59	18.37
Q_{31}	-10.74	-11.12	-11.74	-10.55
P_{32}	132.57	130.42	120.87	125.37
Q_{32}	42.61	41.35	41.19	41.58
P_3	-49.49	-50.00	-48.76	-49.48
Q_3	-41.93	-40.00	-41.80	-40.99
P_{34}	-193.22	-199.99	-195.22	-193.23
Q_{34}	-71.08	-70.22	-71.25	-72.02
U_1	112.15	111.50	111.45	111.47
U_3	110.99	111.71	111.78	111.69

3.2 IEEE 39 节点系统

采用以下的指标来衡量估计的状态变量(取平衡节点外其余节点的电压和相角)的准确性^[12]:

$$S_1 = \sum_i |x_i^* - x_i|$$

$$S_2 = \max |x_i^* - x_i|$$

式中: x_i^* 为第 i 个状态变量的估计值; x_i 为第 i 个状态变量的真值。

表 2 给出了试验结果, IEEE 118 节点的试验结果见附录 C 表 C1。

表 2 IEEE 39 节点系统试验结果
Table 2 Test results of IEEE 39-bus system

试验序号	不良数据比例/(%)	S ₁		S ₂	
		WLS	本文方法	WLS	本文方法
1	0.00	0.122 9	0.125 9	0.003 9	0.004 0
2	1.59	2.276 5	0.092 7	0.060 4	0.003 4
3	2.38	4.009 1	0.069 4	0.113 6	0.001 5
4	3.97	3.044 2	0.268 7	0.152 9	0.002 5
5	4.76	3.309 7	0.268 7	0.079 4	0.010 4
6	6.35	4.328 2	0.196 1	0.152 1	0.004 1

可以看出: 本文方法随不良数据所占比例增加, S_1 和 S_2 指标变化较小, 不易受不良数据的影响。

3.3 某实际输电网实际数据

某实际输电网连续 5 个断面的试验结果见表 3。计算时各测点权重取目前该系统实际采用的权重值: 500 kV, 220 kV 和其他电压等级的电压测点权重分别取 10, 2.236, 1.0; 有功和无功测点权重分别取 1.0 和 0.2。 α_i 的取值见附录 A。从表 3 中可

以看出, 本文提出的状态估计方法在合格率方面较传统状态估计方法有了明显提高。

表 3 某输电网实际数据试验结果
Table 3 Test results of a real power system

断面序号	量测点数	合格率/(%)	
		WLS 方法	本文方法
1	1 828	90.54	95.30
2	1 828	90.86	95.57
3	1 828	90.10	95.19
4	1 828	90.75	95.30
5	1 828	90.75	95.57

去除不合格测点后再进行状态估计, 合格率均为 100%, 说明本文方法可自动识别不合格测点。

3.4 收敛性试验

试验中, 使用 IEEE 118 节点系统, 各次试验使用相同初值, 计算模型均采用模型(式(7)), 其中 c 取不同值时, 迭代次数和状态估计结果评价指标如表 4 所示, 其他测试结果见附录 C 表 C2 和表 C3。

表 4 含有 6.072% 不良量测时的试验结果
Table 4 Test results with 6.072% bad data

c	迭代次数	S ₁	S ₂
3.0	12	61.849 2	0.525 8
4.5	15	61.827 6	0.525 9
6.0	16	61.804 3	0.525 9
7.5	19	61.785 7	0.526 0
9.0	19	61.776 4	0.526 1

从测试结果中可以看出: 无论模型中是否含有不良数据, 且无论含有多少不良数据, 均有迭代次数少、解的合理性好, 且迭代次数和合理性指标变化不大, 这也说明了本文方法的稳定性和合理性。

3.5 测点合格率标准对估计结果的影响

试验中, 使用 IEEE 39 节点系统, 测点中含有 2.38% 的不良数据, 模型(式(7))中参数 c 取 3。表 5 给出了 α_i 取不同值时的试验结果。

表 5 α_i 取不同值时的试验结果
Table 5 Test results when value of α_i changes

α_i	迭代次数	S ₁	S ₂
$0.5\sigma_i$	27	0.077 3	0.003 9
σ_i	12	0.049 3	0.005 0
$2\sigma_i$	11	0.060 8	0.004 5
$3\sigma_i$	11	0.063 8	0.004 3
$5\sigma_i$	10	0.065 9	0.004 2
$6\sigma_i$	9	0.066 1	0.004 2

可以看出, 式(2)中的 α_i 取 0.5 倍~6.0 倍标准差时, 估计结果均比较准确, 本文方法对合格率标准不敏感。

4 结语

基于全新理念,建立了以合格率最大为目标的状态估计模型,该方法具有以下特点:①所求得的状态估计结果合格率更高;②估计准确性不易受不良数据影响,具有很强的抗差性;③可自动对坏数据点进行识别;④所求得的状态估计结果为潮流解,且满足各种物理约束,更加接近实际;⑤计算中无需做坏数据检验、可观性校验、权重因子设置,调试和维护极为简单;⑥求解算法为现代内点法,收敛性好,计算速度快。

用4节点系统、IEEE 39节点系统、IEEE 118节点系统和某实际输电网实际数据的算例证明了本文方法的有效性。

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

参考文献

- [1] SCHWEPPE F C, WILDES J. Power system static-state estimation: Part I-III. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 120-135.
- [2] BALDICK R, CLEMENTS K A, PINKO-IAZIGAL Z, et al. Implementing non-quadratic objective functions for state estimation and bad data rejection. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1997, 12(1): 376-382.
- [3] CELIK M K, ABUR A. A robust WLAV state estimator using transformations. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 106-113.
- [4] SINGH H, ALVARADO F L, LIU W H E. Constrained LAV state estimation using penalty functions. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 383-388.
- [5] MILI L, CHENIAL M G, ROUSSEUW 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.

- [6] 李碧君,薛禹胜,顾锦汶,等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 53-60.
LI Bijun, XUE Yusheng, GUO Jinwen, et al. Status quo and prospect of power system state estimation. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 53-60.
- [7] WÄCHTER A. An interior point algorithm for large-scale nonlinear optimization with applications in process engineering [D]. Pittsburgh, PA, USA: Carnegie Mellon University, 2002.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] WEI H, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 870-877.
- [11] 于尔铿. 电力系统状态估计. 北京: 水利水电出版社, 1985.
- [12] KOTIGUA W W, VIDYASGAR M. Bad data rejection properties of weighted least absolute value techniques applied to static state estimation. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(4): 844-853.

董树锋(1982—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统状态估计和优化运行。E-mail: dongshufeng@gmail.com

何光宇(1972—),男,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。

孙英云(1974—),男,博士,主要研究方向:电力系统优化和控制。

A Novel Method for Power System State Estimation with Maximum Good Measurement Rate

DONG Shufeng¹, HE Guangyu¹, SUN Yingyun¹, CHANG Naichao¹, ZHANG Wangjun², ZHANG Jian²

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: With the objective of maximum good measurement rate (GMR) while satisfying power flow equations and operational limits of state variables, a novel method for power system state estimation is proposed. The problem is solved using the interior point method with good convergence performance. Compared with existing state estimation methods, the method proposed has a higher GMR and better bad-data rejection performance. The resulting estimation based on the method is more realistic since it satisfies power flow equations and various physical constraints. The method does not ask for additional bad data checking, observability verification, or subjective weighting factors setting, thus achieving substantial reduction in debugging and maintenance workload. The effectiveness of the method proposed is proved by test results of the IEEE 39-bus system, the IEEE 118-bus system, and a practical utility system.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: state estimation; good measurement rate; weighted least squares; robust estimation; power systems

附录 A α_i 选择规则

在系列文章中， α_i 值根据某电力公司规定选取，规则如下：

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.02z_{ibase} & \text{节点}i\text{是电压测点} \\ 0.02z_{ibase} & \text{节点}i\text{是有功测点} \\ 0.03z_{ibase} & \text{节点}i\text{是无功测点} \end{cases}$$

(A1)

式中： z_{ibase} 取值如下：

- 1) 对于电压幅值量测， z_{ibase} 取电压等级 1.2 倍。如，500kV 等级取 600kV，330kV 等级取 396kV，220kV 等级取 264kV，等等。
- 2) 对于发电机功率量测， z_{ibase} 取发电机视在功率。

对于线路功率量测，500kV 等级取 1083MVA，330kV 等级取 686MVA，220kV 等级取 305MVA，110kV 等级取 114MVA，66kV 电压等级取 69.7MVA。

附录 B 4 节点系统量测配置

4 节点系统配置示意图见图 B1。

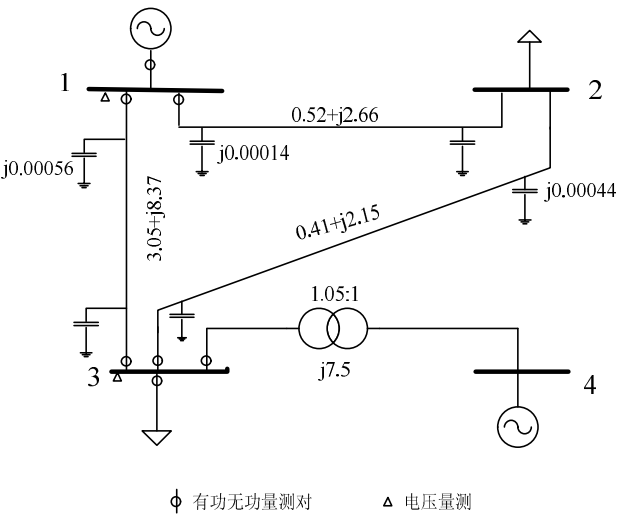


图 B1 4 节点试验系统
Fig.B1 Four-bus system

附录 C IEEE 118 节点系统算例

IEEE 118 节点系统试验结果见表 C1~表 C3。

表 C1 IEEE 118 节点系统试验结果
Table C1 Test results of IEEE 118-bus system

试验 序号	不良数 据比例	S ₁		S ₂	
		WLS	本文方法	WLS	本文方法
1	1.33%	62.5377	61.8282	0.5308	0.5260
2	2.18%	63.8084	61.8529	0.5346	0.5246
3	3.04%	63.9037	61.9026	0.5440	0.5246
4	4.08%	64.9934	61.9480	0.5455	0.5256
5	5.22%	63.7869	61.7738	0.5435	0.5255
6	6.17%	65.2133	61.6494	0.5547	0.5237

表 C2 不含不良数据 IEEE 118 节点系统试验结果
Table C2 Test results of IEEE 118-bus system with no bad data

c	迭代次数	S ₁	S ₂
3	13	61.8881	0.5246
4.5	16	61.9128	0.5248
6	17	61.9415	0.5250
7.5	27	61.9696	0.5252
9	20	61.9887	0.5253

表 C3 含 3.131%不良量测时 IEEE 118 节点系统试验结果
Table C3 Test results of IEEE 118-bus system with 3.131 percent bad data

c	迭代次数	S ₁	S ₂
3	21	61.8127	0.5251
4.5	15	61.7934	0.5245
6	19	61.7909	0.5246
7.5	25	61.7432	0.5247
9	26	61.7816	0.5247