

自适应抗差理论在配网状态估计中的应用

郑健¹, 王承民¹, 张强², 刘志强³

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200030; 2. 河南省质量监督检验所, 河南 郑州 450000;

3. 安徽省六安市供电局, 安徽 六安 237010)

摘要: 提出了一种基于自适应抗差理论的配电网状态估计算法。该方法首先对生数据进行预处理, 然后基于抗差原理, 利用权因子把一般性的 M 估计转换为加权最小二乘法, 并将权系数和余差联系起来, 有效地解决了常规加权最小二乘法中, 由于常数权系数所导致的, 对粗差处理能力不足的问题。将该方法应用于一个实际配电网的状态估计当中, 结果表明该方法可以有效减小或消除量测量中粗差的影响。

关键词: 加权最小二乘法; 配电网; 状态估计

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)10-0068-05

0 引言

随着电力系统的迅速发展, 系统结构和运行方式也日趋复杂。为了能够迅速、准确地掌握电力系统的实际运行状态, 预测和分析系统的运行趋势, 必须加强对电力系统状态估计的研究。

配电网状态估计算法中最经典的是加权最小二乘法。主要包括基本加权最小二乘法、快速分解的最小二乘法、带约束的最小二乘法等等^[1]。文献[2]结合配电网的电流测量和补充伪量测等特性发展了传统加权最小二乘状态估计理论方法。文献[3]提出以节点电压的幅值和相角作为状态变量, 推导出支路功率和电流、节点注入功率和电流的量测方程。但是算法中需要进行规模较大的矩阵计算, 计算量大。文献[4]提出了匹配潮流技术, 假设误差仅存在于伪量测, 直接利用现有的潮流计算程序, 提高了计算速度。文献[5]提出了一种面向支路估计的状态估计实用化算法, 核心思想是将整个配电网的状态估计问题分解为与配电网支路数相等的一系列状态估计子问题, 每个子问题只需要求解几个低阶的最小二乘问题。这两种方法计算速度快, 但是对节点电压量测量的处理不够完善, 而且仅适用于辐射型网络。

最小二乘状态估计法作为一种最基本的状态估计算法, 具有收敛性能好, 估计质量高的优点, 但是处理粗差的能力较差, 数据中的粗差会严重影响估计的结果^[6,7]。文献[8]、[9]分别提出了基于 IGG 方法和基于 SHGM 方法的抗差状态估计算法来消除粗差的影响。此外还应该对生数据进行预处理, 因为在大量的数据中肯定会存在不完整、含噪声和

不一致的数据, 而如果不对这些数据进行处理, 会影响数据挖掘所获知识的质量。

抗差估计的提出是与粗差 (GROSS ERROR) 相联系的^[10,11]。粗差指离群的误差, 由失误、观测模式差、分布模式差而来, 它实际上是不可避免。所谓抗差估计, 就是在粗差不可避免的情况下, 选择估计方法尽可能减免粗差对未知量估计值的影响, 得出正常模式下的最佳估值。抗差估计也包括方差估计和假设检验。最小二乘估计由于受到粗差的吸引, 使得未知量估值发生偏离, 但在正常分布模式下, 此法具有优越的数学和统计性能。因此一个有效的估计方法必须在保留最小二乘法优越性的同时, 增强抗差性。

本文在对生数据进行预处理之后, 引导出一种抗差原理, 利用权因子把一般性的 M 估计转换为加权最小二乘法, 并将权系数和余差联系起来。将该方法应用于一个实际电网的状态估计中, 结果表明该方法可以有效减小或消除量测量里粗差的影响, 在配电网状态估计技术中有较强的实用性。

1 数据预处理

数据预处理主要是对空缺值和孤立点数据进行处理, 以提高状态估计的准确性。

1.1 空缺值的处理

由 SCADA 所提供的量测数据中, 由于通信通道问题, 或量测装置问题, 会有一部分量测量没有传送到调度中心; 或者送到了数据库, 但没有被保存。所有这些都造成了数据的缺失。对于数据空缺值的处理, 应尽可能地利用其同一时段所采集到的其它数据来进行填补。

本文采用 ROUSTDA 算法来对空缺值进行处理。ROUSTDA 算法的目标是使具有空缺值的对象和其他类似对象的属性值尽可能地保持一致,即尽可能地使属性值之间的差异最小。

ROUSTDA 算法的具体实现如下:可辨识矩阵反映了对象间的属性差异,因此利用可辨识矩阵作为算法的基础,是一种很自然的想法。由于不完备信息系统中存在多个属性值及其不同的分布,因此对信息系统空缺数据值的填补不是通过对初始可辨识矩阵的一次运算并加以完整化分析就能对所有的空缺值进行补齐的,实际上要经过多次对扩充差异矩阵的计算和完整化分析,直至终止条件成立。为此,设初始信息系统为 S^0 ,对象集为 $\{x_i^0\}$,相应的可辨识矩阵为 M^0 , x_i 的空缺属性集为 MAS_i^0 ,无差别对象集为 NS_i^0 ;第 r 次完整化分析后的信息系统为 S^r ,对象集为 $\{x_i^r\}$,相应的可辨识矩阵为 M^r , x_i 的空缺属性集为 MAS_i^r ,无差别对象集为 NS_i^r ,完整化分析依赖于可辨识矩阵计算。

设 $M^{r+1} = [M^{r+1}(i, j)]_{n \times n}$, $r = 0, 1, 2, \dots$, 则 $M^{r+1}(i, j)$ 的计算过程如下:

- 1) 如果 $MAS_i^r \cap MAS_j^r = \phi$ (ϕ 为空集), 则 $M^{r+1}(i, j) = M^r(i, j)$;
- 2) 否则, 设 k 属于 $MAS_i^r \cap MAS_j^r$, 则 $M^{r+1}(i, j) = M^r(i, j) \setminus \{k\}$ 。

1.2 孤立点的判断和处理

孤立点就是与数据库中的大部分数据有很大不同或不一致的数据。本文采用基于距离的方法来检测孤立点数据。其基本思想是:如果样本库 S 中至少有一部分数量为 p 的样本到 S_i 的距离比 d 大,那么样本 S_i 是数据集 S 中的一个孤立样本。其判断的标准是建立在两个参数 p, d 基础上的,这两个参数值可根据实际情况来确定。本文把 5 个采样数据作为一组,即 S 中样本的数量为 5,而令 $p = 3$,一般线路功率 d 值的选择不超过线路所传输功率的 20%,而电压 d 值的选择一般是线路额定电压的 10%。

按照上述规则,如果孤立点数据被检测出来的话,则可以用另外几个数据的平均值来替换: Σ 正常点的量测值/正常点的个数。

2 加权最小二乘法原理

如果有相互独立的观测样本 $\{z_i\}$, $i = 1, \dots, n$ 。其对应观测权为 $\{r_i\}$ 。该观测的 M 估计即

是由 z_i 求状态量 x_j , $j = 1, \dots, m$, 余差为 v_i 。设目标函数为 J , 则下列方程的解即为利用 M 估计求得的 x_j 估计值:

$$\begin{aligned} [R \frac{\partial}{\partial x_j} J] &= [R (\frac{\partial}{\partial v} \cdot \frac{1}{v}) \frac{\partial v}{\partial x_j} \cdot v] = \\ [R \cdot \frac{\partial v}{\partial x_j} \cdot v] &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

上式可以改写为:

$$(\frac{\partial v}{\partial x_j}) R \cdot V = 0 \quad (2)$$

即 $A \cdot R \cdot V = 0$ 。

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial v_1}{\partial x_n} \\ \dots & \ddots & \dots \\ \frac{\partial v_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial v_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}, R = (r_{ii}), r_{ii} = r_i \cdot$$

$(\frac{\partial}{\partial v} \cdot \frac{1}{v})_i = r_i \cdot$, 称为权因子。

如令 $\hat{v}_i = \sum_{i=1}^n r_{ii} \cdot \frac{1}{2} v_i^2$, $i = 1, r_{ii} = r_i$, 则这样的 M 估计也称为加权最小二乘法。

3 抗差最小二乘算法

引入权因子概念后,式 (2) 就成了方程 $AX = Z + V$ 的最小二乘解法的方程。即可以用最小二乘估计来求取 x_j 的估计值。这就为配电网状态估计提供了理论基础。

配网状态估计中,量测量为节点注入功率 $Z = \{p_i, q_i\}$, $i = 1, \dots, n$, 状态量为节点电压 $X = \{v_i, v_i\}$, 余差 $V = \{v_i\}$ 。其关系为:

$$\begin{cases} p_i = v_i \sum_{j=1}^n v_j (g_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} + b_{ij} \cdot \sin \theta_{ij}) \\ q_i = v_i \sum_{j=1}^n v_j (g_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cdot \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$; 写成矩阵形式就是:

$$Z = h(X) + VZ \quad (4)$$

从上面可以看出 $h(X)$ 为非线性函数,为了利用刚才得出的结论,可以利用级数展开将其转化为线性关系。设 x_0 是 X 的足够小邻域内的一点, $x = x_0 + \Delta x$, 则:

$$h(x) = h(x_0) + \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_0} \cdot \Delta x \quad (5)$$

定义: $H(x_0) = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_0}$, 根据式 (3)、(4), 电力系统中

$H(x_0)$ 就是系统量测量的 Jacobian 矩阵。将 $x = x_0 + x$ 代入式 (4), 可得: $Z = h(x_0) + H(x_0) \cdot x + V$; 令 $Z = Z - h(x_0)$ 得: $Z = H(x_0) \cdot x + V$ 。状态估计的目标是使如下的目标函数最小:

$$(x) = [Z - h(x)]^{-1} \cdot R \cdot [Z - h(x)] = [Z - H(x_0) \cdot x]^{-1} \cdot R \cdot [Z - H(x_0) \cdot x] \quad (6)$$

而欲使 (x) 最小, 经推导可得公式:

$$\begin{cases} [H^T(\hat{x}^{(k)}) \cdot R \cdot H(\hat{x}^{(k)})] x^{(k)} = \\ H^T(\hat{x}^{(k)}) \cdot R \cdot [Z - h(\hat{x}^{(k)})] \\ \hat{x}^{(k+1)} = \hat{x}^{(k)} + x^{(k)} \end{cases} \quad (7)$$

在加权最小二乘法中, 各权因子为 1, 与量测误差无关, 这样各数据的影响力相同, 导致该公式抗粗差性能比较差, 如果粗差较大, 会使估计结果受粗差影响而严重偏离真值。为了减小或消除粗差的影响, 可以根据余差来确定其权因子。余差小的权因子应该大于余差大的权因子, 余差过大的量测量在估计时不采用以消除其影响, 这样就增加了最小二乘法算法的抗粗差能力, 可以称之为抗差最小二乘法。根据概率论和系统实际情况, 可以采用如下的权因子:

$$(v_i) = \begin{cases} 1, & |v_i| < K \\ \frac{K}{|v_i|}, & K < |v_i| < \\ 0, & |v_i| > \end{cases} \quad (8)$$

和等价权:

$$p_{ii} = \begin{cases} p_i, & |v_i| < K \\ \frac{K}{|v_i|} \cdot p_i, & K < |v_i| < \\ 0, & |v_i| > \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\sigma^2 = \sum v_i^2 / n$, $K = 1.5$, $\sigma = 2.5$ 。这样, 根据各余差求出对应的权因子后, 利用等价权即把式 (4) 的 M 估计转化为抗差最小二乘估计, 再代入式 (7) 迭代求解。

4 算例

在一个实际配网的应用中, 表 1 表示实际的潮流计算出来的数据; 而表 2 表示状态估计出来的结果, 从实际的分析可以看出, 两者之间一定的差别, 但是差别不是太大。为了进一步说明本文方法的有效性, 将部分节点电压的实测真值和对应的潮流计算结果、状态估计结果进行比较, 如表 3 所示。相比之下, 显然状态估计的结果可信度更高。

表 1 潮流计算结果

编号	母线名称	电压	相角	有功	无功
1	雨山变 1# 高压侧	1.050	0.000	0.0640	0.0076
2	雨山变 低压侧	1.053	1.562	0.0000	0.0000
3	雨山变 2# 高压侧	1.050	0.000	0.0640	-0.0076
4	花山变 低压侧	1.052	1.358	0.0000	0.0000
5	花山变 2# 高压侧	1.050	0.000	0.0556	0.0058
6	花山变 1# 高压侧	1.050	0.000	0.0556	0.0058
7	公配 马钢公司	1.052	-1.642	0.0034	0.0017
8	排水厂	1.052	-1.713	-0.0019	-0.0009
9	商业大厦 马钢医院	1.051	-1.776	-0.0168	-0.0104
10	门诊部	1.050	-1.794	-0.0041	-0.0020
11	马钢宾馆	1.050	-1.788	-0.0164	-0.0082
12	公配	1.050	-1.685	-0.0180	-0.0090
13	冰库	1.052	-1.737	-0.0074	0.0000
14	公配	1.052	-1.810	-0.0107	-0.0053
15	公配	1.049	-2.036	-0.0063	-0.0031
16	公配	1.049	-2.059	-0.0144	-0.0072
17	公配	1.051	-1.496	-0.0160	-0.0080
18	公配	1.052	-1.673	-0.0096	-0.0048
19	公配	1.050	-1.854	-0.0053	-0.0026
20	公配	1.048	-2.027	-0.0088	-0.0044
21	少年宫	1.046	-2.144	-0.0163	-0.0082
22	公配	1.045	-2.223	-0.0227	-0.0113
23	公配	1.045	-2.195	-0.0094	-0.0047
24	公配	1.046	-2.115	-0.0074	-0.0037
25	公配	1.047	-2.006	-0.0063	-0.0031
26	公配	1.048	-1.852	-0.0043	-0.0021
27	公配	1.049	-1.749	-0.0049	-0.0024
28	公配	1.050	-1.618	-0.0075	-0.0038
29	公配	1.050	-1.590	-0.0103	-0.0051
30	公配	1.050	-1.995	-0.0102	-0.0051

表 2 状态估计的结果

编号	母线名称	电压	相角	有功	无功
1	雨山变 1# 高压侧	1.051	0.162	0.0539	-0.0061
2	雨山变 低压侧	1.052	0.151	-0.0004	0.0016
3	雨山变 2# 高压侧	1.052	0.151	-0.0004	0.0016
4	花山变 低压侧	1.052	0.001	0.0131	0.0002
5	花山变 2# 高压侧	1.051	-0.052	0.0026	0.0037

续表 2

编号	母线名称	电压	相角	有功	无功
6	花山变 1# 高压侧	1.050	-0.110	-0.015 4	-0.003 7
7	公配	1.050	-0.132	-0.003 6	0.002 8
8	马钢公司 排水厂	1.049	-0.128	-0.015 2	-0.002 7
9	商业大厦 马钢医院 门诊部	1.049	-0.037	-0.014 2	-0.004 3
10	马钢宾馆	1.052	-0.068	0.009 1	0.002 4
11	公配	1.051	-0.127	-0.006 5	0.001 6
12	公配	1.050	-0.338	-0.005 7	0.001 5
13	冰库	1.049	-0.359	-0.013 3	-0.001 0
14	公配	1.051	0.135	0.000 9	-0.005 4
15	公配	1.051	-0.046	0.006 7	-0.002 8
16	公配	1.049	-0.202	-0.001 0	0.001 9
17	公配	1.047	-0.367	-0.007 7	0.000 4
18	公配	1.046	-0.481	-0.016 0	-0.003 7
19	公配	1.044	-0.557	-0.022 4	-0.006 5
20	公配	1.045	-0.531	-0.009 3	-0.001 7
21	少年宫	1.045	-0.452	-0.0072	-0.001 3
22	公配	1.047	-0.344	-0.006 0	-0.000 7
23	公配	1.048	-0.191	-0.003 3	0.000 7
24	公配	1.049	-0.092	-0.001 1	0.000 3
25	公配	1.050	0.020	0.006 9	-0.002 7
26	公配	1.050	0.042	0.004 2	-0.004 0
27	公配	1.050	-0.299	-0.008 8	-0.000 2
28	公配	1.051	0.162	0.053 9	-0.006 1
29	公配	1.052	0.151	-0.000 4	0.001 6
30	公配	1.052	0.151	-0.000 4	0.001 6

表 3 估计结果比较

Tab 3 Comparison of state estimation result

母线名称	实测电 压幅值 /kV	潮流计算结果		状态估计结果	
		电压幅 值 /kV	相对误 差 / (%)	电压幅 值 /kV	相对误 差 / (%)
雨山变 1# 高压侧	36.78	36.75	0.08	36.79	0.03
雨山变 2# 高压侧	36.82	36.75	0.19	36.82	0.00
花山变 2# 高压侧	36.78	36.75	0.08	36.79	0.03
马钢公司 排水厂	36.71	36.82	0.30	36.72	0.03
冰库	36.72	36.82	0.27	36.72	0.00
少年宫	36.59	36.61	0.05	36.58	0.03

注:潮流计算和状态估计的结果已经转换为有名值。

5 结论

通过在一个实际配网当中的应用,说明该抗差方法抗粗差能力较好,并且在实际应用中有良好的表现,同时由于此法仍采用最小二乘原理,故保证了本法的有效性、无偏性、一致性和稳健性。不失为一

种理论价值和实用价值俱佳的技术。

参考文献:

- [1] 峦兆文,王庚. 电力系统状态估计算法研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(4): 13-16
LUAN Zhao-wen, WANG Geng The Study of the Algorithm of System State Estimation[J]. Proceedings of EP-SA, 1998, 10(4): 13-16
- [2] 李建,王心丰,韩英铎,等. 基于等效功率转换的配电网状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 39-44
LI Jian, WANG Xin-feng, HAN Ying-duo, et al A State Estimation Method for Distribution System Based on Equivalent Power Transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 39-44
- [3] Baram M E, Kelley A W. State Estimation for Real-time Monitoring of Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1601-1609.
- [4] 孙宏斌,张伯明,相年德. 配电匹配潮流技术及其在配电网状态估计中的应用[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(7): 18-22
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de Distribution Matching Power Technology and Its Application to State Estimation for Distribution Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(7): 18-22
- [5] DENG You-man, HE Ying, ZHANG Bo-ming A Branch-estimation-based Stage Estimation Method for Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(4): 1057-1062
- [6] 周江文,黄幼才,杨元喜. 抗差最小二乘法[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1997.
ZHOU Jiang-wen, HUANG You-cai, YANG Yuan-xi Robust Least Square Algorithm[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1997.
- [7] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京:水利水电出版社, 1985.
YU Er-keng Power System State Estimation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [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): 36-39.
QIAN Feng, GONG Qing-wu State Estimation of Power System Based on IGG Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 36-39.
- [9] 张俊龙,陈阳舟,高俊侠,等. 基于 SHCM 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
- [10] 宁永香,郝延锦. 误差理论与抗差估计 [J]. 煤炭技术, 2001, (1): 54-56
- N NG Yong-xiang, HAO Yan-jin. Error Theory and Robust Estimation[J]. Coal Technology, 2001, (1): 54-56
- [11] 周维虎, 费业泰, 丁叔丹. 最小二乘参数估计若干问题的讨论 [J]. 宇航计测技术, 1999, 19(3): 6-8
- ZHOU Wei-hu, FEI Ye-tai, D NG Shu-dan. Discussion on Some Least Square State Estimation Problems applica-

tion [J]. Aviation Methodology and Measurement Technology, 1999, 19(3): 6-8

收稿日期: 2005-11-03; 修回日期: 2005-12-02

作者简介:

郑健(1969-),男,工程师,从事电力系统自动化方面的研究; E-mail: wch0670@263.com

王承民(1970-),男,讲师,从事电力网络分析和电力市场方向的研究;

张强(1960-),男,工程师,从事电力系统自动化方面的研究。

Robust estimation application in state estimation of distribution system

ZHENG Jian¹, WANG Cheng-min¹, ZHANG Qiang², LIU Zhi-qiang³

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200230, China; 2. Henan Quality Supervise Institute, Zhengzhou 450000, China; 3. Liaun Power Supply Company, Liaun 237010, China)

Abstract: A robust state estimation algorithm is presented. The initial data is preprocessed at first, then the universal M-estimation is transferred to WLS (weighted least square) and the weight coefficients are related with the errors. The gross error is handled effectively, which will result in a great deviation from the true value because of the constant weight coefficients in the conventional WLS method. Application of the proposed method to a distribution network shows that this method can effectively decrease the gross error influence.

Key words: weighted least square; distribution network; state estimation

(上接第 63 页 continued from page 63)

Construction and application of electrical distribution CM model

ZHU Jian-wei, D NG Qiao lin, YANG Hong, WANG Jing

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: According to the characteristics of distribution networks and requirements of the application systems, based on both sides of computing analysis and equipment management, using the general description of almost all of the power system resources of the object-oriented CM model, this paper presents a method of three steps for the distribution networks modelling to illuminate the attributes of equipments and connectivity relations. Information of distribution computing and equipment management can be obtained from this model. And a power system standard model meeting the CM criteria is developed according to a typical feeder system. Based on this model, loss calculation is done.

Key words: common information model(CM); distribution network; object-oriented; feeder system; loss calculation

《继电器》杂志文摘编写要求

根据国际检索的要求,《继电器》杂志对投稿摘要的编写作以下修改说明:

1. 摘要应是一篇独立的短文,应包含与论文同等量的主要信息,主要由三部分组成,即:研究的问题、过程和方法、结果。
2. 摘要中应排除本学科领域已成为常识的内容,切忌把引言中出现的内容写入摘要,一般也不要对论文内容作诠释和评价,尤其是自我评价。
3. 摘要应用第三人称编写,不必使用“本文”“作者”等作主语。应尽量取消或减少背景信息。
4. 摘要应使用规范化的名词术语,不用非公知公用的符号和术语,新术语或尚无合适汉文术语的,可用原文或译出后加括号注明原文。
5. 摘要一般不用数学公式或化学结构式,不出现插图、表格,不用引文。缩略语、略称、代号首次出现时必须加以说明。
6. 中文摘要一般在 200~250 个字之间,英文一般 150 个单词左右,关键词一般应列出 5~8 个。