

## 电力系统状态估计算法的研究现状和展望

兰华, 李积捷

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 为了保证电力系统的安全性和经济性, 状态估计是能量管理系统(EMS)中不可或缺的组成部分。状态估计算法是状态估计的核心部分。综述了电力系统状态估计的研究现状。简要介绍了电力系统状态估计的基本概念及功能, 描述了状态估计的数学模型。介绍了几种目前常用的估计算法, 即加权最小二乘法、快速分解法、基于量测变换的状态估计算法等, 并对这些算法作了简明的对比, 指出各个算法的优缺点。最后, 对状态估计算法中值得研究的方面进行展望。

**关键词:** 电力系统; 状态估计; 能量管理系统; 算法

## Status quo and prospect of algorithm of power system state estimation

LAN Hua, LI Ji-jie

(Northeast China Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** State estimation is regarded as an essential part of Energy Management System (EMS) due to the economy and security of power system. Algorithms of state estimation are the core of state estimation. The status quo and prospect of power system state estimation are surveyed. The fundamental concept and function of power system state estimation are offered briefly and the mathematical model of state estimation is described. some usual algorithms of state estimation are offered and compared briefly, such as recursive least square algorithm, fast decoupled method, state estimation method based on measurement transformation, etc. Then the advantages and disadvantages of each algorithm are pointed out. At last, some important aspects to be studied further for the algorithms of state estimation are proposed.

**Key words:** power system; state estimation; energy management system; algorithm

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)10-0078-05

## 0 引言

状态估计是当代电力系统能量管理系统(EMS)的重要组成部分, 尤其在电力市场环境中发挥更重要的作用。状态估计问题的提出激发了许多学者的研究兴趣, 他们以数学、控制理论和其它新理论为指导, 根据当时的计算机软件和硬件条件, 结合电力系统的特点, 在理论方面进行了大量研究, 并提出了一系列的算法<sup>[1~5]</sup>。经过多年的研究, 电力系统实时网络状态估计各环节的基本框架已经建成, 并且已有成功的应用<sup>[6]</sup>。

然而, 随着电力系统规模的不断扩大, 电力工业管理体制向市场化迈进, 对状态估计有了新要求, 各种新技术和新理论不断涌现, 为解决状态估计的某些问题提供了可能。本文就电力系统状态估计算法的研究现状和进一步的研究方向进行了综合阐述。

## 1 电力系统状态估计简介

状态估计也称为滤波<sup>[7]</sup>, 它是利用实时测量系统的冗余度来提高数据精度, 自动排除随机干扰和噪声所引起的错误信息, 估计或预报系统的运行状态。状态估计功能流程图如图1所示。

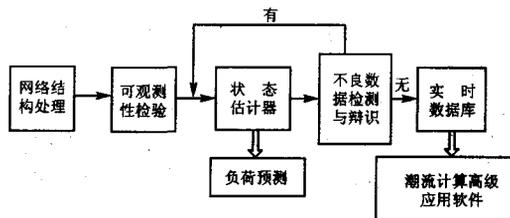


图1 状态估计功能流程框图

Fig.1 Flow chart of state estimation

电力系统状态估计的主要功能是<sup>[8]</sup>:

- 1) 根据测量量的精度(加权)和基尔霍夫定律(网络方程)按最佳估计准则进行状态估计, 得到最接近于系统真实状态的最佳估计值;
- 2) 对生数据进行检测与辨识, 删除或改正不良数据, 提高数据系统的完整性;

3) 推算出完整准确的电力系统各种电气量;

4) 根据遥测量估计电网的实际开关状态, 纠正偶然出现的错误的开关状态信息, 以保证数据库中电网接线方式的正确性;

5) 可以应用状态估计算法以现有的数据预测未来的趋势和可能出现的状态;

6) 如果把某些可疑或未知的参数作为状态量处理时, 也可以用状态估计的方法估计出这些参数的值;

7) 通过状态估计程序的离线模拟试验, 可以确定电力系统合理的数据收集与传送系统。

综上所述, 电力系统状态估计是远动装置和数据库之间的重要一环。它能从远动装置接受低精度、不完整、少量的不良数据, 而由状态估计后输出到数据库的是提高了精度, 并且是完整而可靠的数据。

## 2 状态估计的数学模型

### 2.1 量测模型

电力系统的量测量方程可表示为

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

式中:  $z$  为量测值矢量;  $h(x)$  为量测量的计算值矢量;  $v$  为量测误差矢量; 设量测量共  $m$  个, 则上述矢量均为  $m$  维;  $x$  为状态量, 设系统节点数为  $n$ , 则  $x$  为  $2n-1$  维。

### 2.2 目标函数

给定量测矢量  $z$  以后, 状态估计矢量  $\hat{x}$  是满足如下的目标函数:

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] = \sum_{i=1}^m (r_i / \sigma_i)^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

式中:  $R^{-1}$  起权重的作用, 是对角元素为  $\sigma_i^{-2}$  的  $m \times m$  维对角阵。

为了求状态估计值  $\hat{x}$ , 采用的迭代算法为:

$$\begin{aligned} \Delta x^{(l)} &= [H^T(x^{(l)}) R^{-1} H(x^{(l)})]^{-1} H^T(x^{(l)}) R^{-1} (z - h(x^{(l)})) \\ x^{(l+1)} &= x^{(l)} + \Delta x^{(l)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $H(x) = \partial h(x) / \partial x$  为量测方程的雅可比矩阵,  $l$  为迭代序号。

## 3 状态估计算法简介及比较

### 3.1 基本加权最小二乘法

加权最小二乘估计法是在状态估计中应用最为广泛的方法之一。文献[1]对加权最小二乘准则估计器作了详细的阐述。这种方法的优点是不需要随机变量的统计特性, 它是量测值  $z$  和量测估计值  $\hat{z}$

之差的平方和最小为目标准则的估计方法。它假定量测量按照理想的正态分布, 对理想正态分布的量测量, 估计具有最优一致且无偏等优良统计特性<sup>[9]</sup>。其量测方程、目标函数和迭代公式分别如式(1)、(2)、(3)。

### 3.2 快速分解法

快速分解法<sup>[9]</sup>在基本加权最小二乘法的基础上, 通过以下2种简化手段得出快速分解法状态估计的迭代修正公式, 降低了问题的阶次, 减少了雅可比矩阵的重复计算, 大大的加快了潮流的计算速度。

1) 有功和无功的分解: 在高压电网中, 正常运行条件下有功  $P$  和电压  $V$ 、无功  $Q$  和电压相角  $\theta$  之间联系很弱, 在雅可比矩阵中  $\partial P / \partial V$  和  $\partial Q / \partial \theta$  项接近于 0, 忽略掉这些元素就可以将  $P-\theta$  与  $Q-V$  分开。

2) 雅可比矩阵常数化: 一般来说, 雅可比矩阵在迭代中仅有微小的变化, 若作为常数处理仍能得到收敛的结果。

利用上述两项简化假设, 推导出快速分解法状态估计的迭代修正公式:

$$[H^T(x^{(l)}) R^{-1} H(x^{(l)})] \Delta x^{(l)} = H^T(x^{(l)}) R^{-1} (z - h(x^{(l)}))$$

将状态量  $x$  分为电压相角  $\theta$  和幅值  $v$ , 同时将雅可比矩阵对相角、幅值进行分解并简化, 只要给出状态量初始值, 经迭代就可以得到状态量估计值。

### 3.3 基于量测变换的状态估计算法

在进行基本加权最小二乘法的状态估计中, 状态估计迭代方程组的雅可比矩阵在每次迭代过程都须重新形成并重新因子化, 因此算法的效率较低, 无法满足电力系统实时在线的要求。量测变换状态估计算法<sup>[10,11]</sup>在进行状态估计计算时所需的原始信息仅仅包含支路潮流测量, 假设运行电压变化不大, 信息矩阵为常实数、对称的稀疏矩阵。该算法计算速度快, 节省内存, 但难以处理注入型测量量。文献[12,13]提出了等效电流量测的思想, 其基本思路为将各种量测等效变换为节点注入电流量测或支路电流量测, 从而使状态估计迭代方程组的雅可比矩阵成为常数矩阵, 在迭代过程中雅可比矩阵仅因子化一次。

### 3.4 上述三种传统方法的比较 (见表1)

三种状态估计算法的各自主要特点是:

1) 基本加权最小二乘法状态估计质量和收敛性能最好, 是状态估计的经典解法和理论基础, 适应各种类型的量测系统。其缺点是使用内存多, 计算量大, 计算时间长, 不适用于大型电力系统的实

时状态估计。

2) 快速分解状态估计算法的估计质量和收敛性能在实用精度范围内与加权最小二乘法相近,而在计算速度和使用内存方面优于加权最小二乘法。

3) 基于等效电流量测变换法的估计质量和收敛性能与快速分解状态估计算法相近,节省内存,算法效率高,是一种实用价值很高的算法。

表 1 三种常用状态估计算法的综合性能比较

Tab.1 Synthesizes comparison of three kinds of usual algorithms of state estimation

算法	估计质量和收敛性	计算速度	使用内存
基本加权最小二乘法	1	3	3
快速分解法	2	2	2
等效电流量测变换法	2	1	1

注:表中数字为性能优劣的次序(值越小性能越好)。

### 3.5 抗差最小二乘法

经过学者多年的努力,目前抗差最小二乘法已经形成了一套完整的理论体系。抗差最小二乘法常用的几种误差分布为:(1)正态分布;(2)Laplace分布;(3)Huber分布;(4)混合正态分布;(5)有界分布。其他的分布还有柯西分布、伽玛分布、t分布、F分布。抗差最小二乘法的抗差实质体现在等价权的选择上。现有的选择不同等价权的抗差方法有:Tukey双权法、Huber法、Hampel估计法、Andrews正弦法、IGG法。

目前很多其它的抗差最小二乘方法基本上都是在现有的几种方法上进行改进,或者综合现有几种方法的优缺点的综合算法。文献[14]介绍了抗差状态估计,认为实际量测服从Huber分布,并结合最小二乘法进行仿真,结果表明抗差估计不但具有加权最小二乘法状态估计的优良的统计特性,还具有优良的抗差特性,能够真实地反映量测的实际分布模式。抗差最小二乘法具有抗差性能好,收敛速度快,实时性好,算式简单等优点,能使抗差、状态估计在计算中一次完成。

### 3.6 计及 PMU 的状态估计算法

随着相量测量算法的成熟和高速数字信号处理器的出现,PMU的研制已经具备了软硬件条件,现在国内外都有了产品化的PMU装置并在电网中投入使用<sup>[15,16]</sup>。

Phadke AG博士在其先驱性的工作<sup>[17]</sup>中探讨了测量全部节点电压相量和全部或部分支路电流相量条件下的状态估计问题,并在线性观测方程基础上建立了线性状态估计问题。由于价格和技术两方面的原因,目前乃至相当长一段时间内,不可能在系

统的所有节点均装设PMU。因此,文献[18]提出了基于电网部分电压相量和电流相量可测量的条件下,并且系统结构和参数已知,推导出了整个系统电压相量的线性状态估计表达式。文献[19,20]将PMU量测及其直接计算值作为这些节点的状态估计值,可降低估计的规模和计算量。文献[21~23]提出了在传统SCADA的基础上增加PMU电压幅值和相角测量进行非线性估计。文献[24]提出通过量测变换来计及PMU支路电流幅值和相角量测的模型,仿真说明该模型具有很高的估计精度。文献[25]在等效电流量测变换状态估计模型的基础上引入旋转变换,不需对电压的相角和幅值及有功和无功的量测权重作出任何假设,即可实现法方程的实、虚部严格解耦。同时,该模型可以充分利用PMU量测信息,其中包括支路电流相量量测,以提高量测冗余度。因此该方法所需的存储量较小、计算速度快和计算精度较高。总之,计及PMU的状态估计算法是电力系统状态估计的一个重要研究方向。

## 4 研究方向展望

随着电力系统规模的不断扩大,各种新理论、新技术的不断涌现,无论从理论方面还是从实际应用需求方面,状态估计算法仍有许多问题需要深入研究。状态估计算法在以下方面有重要的研究价值:

- 基于GPS相位角量测的PMU技术应用于实时状态估计算法的研究;
- 面向大系统,开发计算速度快和数值稳定性好的算法,缩短状态估计执行周期;
- 各种类型和多个相关坏数据条件下,状态估计算法的研究;
- 量测误差相关情况下估计算法研究;
- 抗差估计理论应用于状态估计算法进一步研究;
- 新理论应用于电力系统状态估计算法的探讨和研究。

### 参考文献

- 李碧君,薛禹胜,韩祯祥,等.电力系统状态估计问题的研究现状和展望[J].电力系统自动化,1998,22(11):53-60.  
LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, HAN Zhen-xiang, et al. Status Quo Prospect of Power System State Estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 53-60.
- 刘浩,侯博渊.保留非线性的快速P-Q分解状态估计法[J].电力系统自动化,1995,19(1):26-30.  
LIU Hao, HOU Bo-yuan. State Estimation Method Using

- Fast Decoupled P-Q Retaining Nonlinearity[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19 (1): 26-30.
- [3] 余贻鑫, 王耀瑜, 等. 一种优越的电力系统状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 1993, 17 (5): 7-11.  
YU Yi-xin, WANG Yao-yu, et al. A Superior Electric Power System State Estimation Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(5):7-11.
- [4] 张俊龙, 陈阳舟, 等. 基于 SHGM 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, et al. State Estimation of Power System Based on the SHGM Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(1):34-36.
- [5] 倪小平, 张步涵. 一种带有等式约束的状态估计新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (21): 42-44.  
NI Xiao-ping, ZHANG Bu-han. New State Estimation Algorithm with Equality Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25 (21):42-44.
- [6] 王骞.面向对象的电力系统状态估计的理论与软件的研究与开发(硕士学位论文)[D].北京: 华北电力大学, 2001.  
WANG Qian.The Development of the Software and the Research of Theory of Object-oriented Power System State Estimation , Thesis[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2001.
- [7] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.  
YU Er-keng. State Estimation of Electric Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [8] Schweppe F C.Static State Estimation in Electric Power Systems[J].IEEE ,1974:972-982.
- [9] Horisberger H P, Richard J C, Rossier C. A Fast Decoupled Static-State Estimation for Electric Power System[J].IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1976,95(1):208-215.
- [10] Dopazo J F, Klitin O A. State Calculation of Power System from Line Flow Measurements[J].IEEE Trans on Power Systems, 1970,89(7):1698-1708.
- [11] Dopazo J F, Klitin O A.Implementation of AEP Real-time Monitoring Systems[J].IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1976,95(5):1618-1629.
- [12] Lu C N, Teng J H, Liu W H E. Distribution System State Estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1):229-236.
- [13] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 基于支路功率的配电状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 1998,22(8): 2-17.  
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. A Branch-power-based State Estimation Method for Distribution Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998. 22(8): 2-17.
- [14] 李响, 刘玲群, 等. 抗差最小二乘状态估计[J]. 继电器, 2003, 31(7): 50-53.  
LI Xiang, LIU Ling-qun, et al. State Estimation with the Least Robustness Square Method[J]. Relay, 2003, 31(7):50-53.
- [15] Hauer J F. Validation of Phasor Calculations in the Macrodyne PMU for California-Oregon Transmission Project Tests of 1993[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, (3).
- [16] 王兆家, 岑宗浩, 陈汉中. 华东电网多功能功角实时监测系统的开发及应用[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 73-77.  
WANG Zhao-jia, CEN Zong-hao, CHEN Han-zhong. Development of Multi-function Realtime Power Angle Monitoring System for East China Power Grid and Its Application[J]. Power System Technology, 2002,26(8): 73-77.
- [17] Phadke A G. State Estimation with Phasor Measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(1): 233-24.
- [18] 卢志刚, 许世范, 等. 部分电压和电流相量可测量是电压相量的状态估计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 42-44.  
LU Zhi-gang, XU Shi-fan, et al. State Estimation of Voltage Phasors Based on Parts of Voltage and Current Phasors Measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1):42-44.
- [19] 王勇. 基于相角测量技术的状态估计研究(硕士学位论文)[D]. 南京:河海大学, 2001.  
WANG Yong. State Estimation Study Based on Phasor Measurement Units, Thesis[D].Nanjing:Hohai University, 2001.
- [20] 刘怡. GPS 功角量侧在电力系统状态估计中的应用(硕士学位论文)[D]. 北京: 华北电力大学, 2002.  
LIU Yi. The Applying of GPS Phasor Measurement in Electrical Power System, Thesis[D].Beijing: North China Electric Power University, 2002.
- [21] Thorp J S. Phadke A G, Karimi K J. Real Time Voltage-phasor Measurements for Static State Estimation[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985,104 (11): 3098-3106.
- [22] Slutker I W,Uonzalez Provost J M. Sierra J B. Implementation of Phasor Measurements in State Estimator[A]. In: Proceedings of Power Industry Computer Application Conference[C].1995.
- [23] Reynaldo F N. State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements[M].Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University,2001.

- [24] 赵红嘎, 薛禹胜, 等. 计及 PMU 支路电流相量的状态估计模型[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 37-40.  
ZHAO Hong-ga, XUE Yu-sheng, et al. State Estimation Model with PMU Current Phasor Measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 37-40.
- [25] 孙国强. 基于相量测量的电力系统状态估计研究(硕士学位论文)[D]. 南京:河海大学, 2005.  
SUN Guo-qiang. State Estimation Study Based on Phasor

Measurements, Thesis[D]. Nanjing:Hohai University, 2005.

收稿日期: 2006-12-03 修回日期: 2006-12-18

作者简介:

兰 华(1956-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电气工程理论、信号处理及电力系统状态估计方向的研究;

李积捷(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统状态估计研究. E-mail: lijijiqi-011@163.com

(上接第 69 页 continued from page 69)

相结合的变电站主变后备保护的时间阶梯 $\Delta t$ 不能取小于 0.5 s, 否则使微机保护装置误动作, 造成事故范围的扩大。

关于这次保护误动的情况的理论分析和通过现场实际的应用结合, 说明本文提出的处理方法是符合实际情况的, 希望能为其它的工矿企业变电站整定计算时提供一定的参考。

### 参考文献

- [1] DL/T 584-95, 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].  
DL/T 584-95, Operational and Setting Code for Relay Protection of 3~110 kV Electrical Power Networks[S].
- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Relay Protection Principle of the Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [3] 罗钰玲, 吕铁民, 陈家楣, 等. 电力系统微机继电保护[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.

LUO Yu-ling, Lü Tie-min, CHEN Jia-mei, et al. Computer Relay Protection of Power System[M]. Beijing: China People's Telecom Press, 2005.

- [4] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

LI Guang-qi. Temporary Attitude Analysis of the Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

- [5] 孙彭年, 胡友富, 郭志善. 电机学[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1995.

SUN Peng-nian, HU You-fu, GUO Zhi-shan. Principle of the Electrical Machinery[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1995.

收稿日期: 2006-05-22 收稿日期: 2006-12-06

作者简介:

龚洪金(1978-), 男, 学士, 工程师, 主要从事变电站综合自动化项目的技术和管理的工作; E-mail: snghj@sina.com

刘树聘(1974-), 女, 讲师, 从事微机研究与教学工作; 秦莉敏(1977-), 女, 学士, 工程师, 主要从事电力系统调度工作。

(上接第 77 页 continued from page 77)

时由于断路器辅助触点转换造成的控制回路断线应该已经消失了, 因此同样可以保证在保护的正常运行过程中重合闸能够正常工作。改进方案执行后, 我们对现场不同的设备分别进行了模拟传动。当拉开线路侧刀闸时仍会出现控制回路断线的告警信号, 但继电保护装置均可靠地防止了在控制回路断线恢复时重合闸误动作行为的发生。结果完全符合我们的预期, 重合闸误动的隐患得以消除。

### 3 结语

由于各种原因形成的断路器位置反映不正确进而造成重合闸误动的问题在现场工作中经常出现,

结合这种情况下同时会出现控制回路断线的情况, 新一代的 110 kV 保护装置都开始引入了控制回路断线闭锁重合闸的相应功能。对于上一代的保护我们也应该根据实际情况加以改进, 从而保证设备运行的正常和稳定。

收稿日期: 2006-09-13 修回日期: 2007-03-03

作者简介:

甘景福(1973-), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护运行管理工作; E-mail: tsxg@sina.com

刘宝志(1966-), 男, 硕士研究生, 讲师, 主要从事电力系统分析与控制方面研究工作;

胡桃涛(1973-), 男, 本科, 工程师, 从事电网规划管理。