

结合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计

黄知超, 谢霞, 王斌

(桂林电子科技大学电气工程系, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对电力系统状态估计中各种类型量测数据精度对状态估计结果有重要影响的问题, 在基本加权最小二乘法估计的基础上, 结合模糊综合评判与决策中的层次分析法(Alytic Hierarchy Process,AHP)讨论了一种改进权值确定方法的加权最小二乘法。它是将电力系统状态估计分解为量测值与估计值的差值平方最小(目标)、不同类型的量测值(准则)、各类型量测值相对精度的大小(方案)等层次, 在此基础上进行定性和定量分析。通过 IEEE 14-bus、IEEE 30-bus 和 IEEE 57-bus 的标准算例进行仿真分析, 证明层次分析法确定权值的加权最小二乘法能够有效地计算出电力系统的状态估计值。通过和基本加权最小二乘法进行比较, 证明了该方法的优越性和实用性。

关键词: 状态估计; 最小二乘; 层次分析法; 权值

Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making

HUANG Zhichao, XIE Xia, WANG Bin

(Department of Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In power system state estimation, the accuracy of different type measurements will exert a great impact on the state estimation results, and thus to determine the weight of the measurement is particularly important. Based on the weighted least squares method, this paper proposes a weighted least squares method that the weight of measurements is determined by the Analytic Hierarchy Process (AHP). The AHP method decomposes the power system state estimation into the minimum square of the difference between the measurements and estimated values(target), different types of measurement value (guideline) and relative accuracy of each type measurement (scheme), and based on which qualitative and quantitative analysis is conducted. Experimental results of IEEE 14-bus system show that using the proposed method the state estimation values of the power system can be estimated effectively. Through comparing the proposed method with basic weighted least squares method the effectiveness and applicability of the proposed algorithm are validated.

Key words: state estimation; weighted least squares; analytic hierarchy process; weights

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0065-05

0 引言

随着电力系统的迅速发展, 电力系统的结构与运行方式日趋复杂, 电力系统调度中心自动化水平也逐步提高^[1]。状态估计作为现代能量管理系统(Energy Management System, EMS)的核心与基石, 通过对数据采集监控系统(SCADA)传送的量测数据进行实时处理, 可大幅提高电力系统数据精度^[2]。

状态估计是由美国MIT的F.C. Schweppe教授于

20世纪70年代引入电力系统的, 利用的是基本加权最小二乘法(WLS)^[3]。状态估计(State Estimation, SE)是一个多属性决策问题^[4], 它是利用量测系统的冗余度来提高数据精度、排除随机误差和干扰引起的错误信息, 从而预报系统运行状态^[5], 实现海量量测数据的有效利用^[6]。在进行电力系统状态估计时, 有多种类型量测数据, 不同类型的量测数据对状态估计结果的影响也不同, 再者, 量测权值取值太分散, 会使算法性能不稳定, 不易收敛^[7]。因此, 不同类型量测数据在状态估计中的权值是一个值得研究的问题。目前, 国内外的电力系统状态估计的研究主要集中在算法和估计模型上, 已取得一些进展, 主要方法大多是在加权最小二乘法的基础上以数值

基金项目: 广西科技开发攻关项目(桂科攻: 14122007-1); 广西电网公司科技开发项目(K-GX2013-128); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室项目(13-051-09-001Z)

稳定性和计算效率为目标进行改进和优化。基本加权最小二乘估计中的权值矩阵是采用量测值误差方差阵的逆矩阵。但针对加权最小二乘估计中的权值取值问题,文献[8-9]提出非二次估计准则,其中加权最小绝对值(WLAV)估计准则是广大学者研究最多的非二次估计准则之一,受到许多学者的关注,但在计算中出现了收敛慢并且误差大等问题;文献[10]提出了考虑质量标签的加权最小二乘法状态估计,即量测数据的权值是由质量标签赋值得到,较大程度上抑制了量测量中的不良数据对估计结果的不良影响,但是算法比较复杂。

本文采用基本加权最小二乘法和层次分析法,以节点电压幅值和电压相角为状态变量,用层次分析法确定量测数据的权值,基于状态量求解估计量,进而计算估计值与量测值的加权差平方和。仿真比较结果表明,基于层次分析法的加权最小二乘法可获得较好的精度和收敛性。

1 加权最小二乘(WLS)状态估计的数学模型

加权最小二乘法是电力系统状态估计中应用最为广泛的方法之一^[11]。在网络拓扑结构已知,线路参数和量测系统给定的条件下,系统量测数据值和系统状态量之间的关系可以由式(1)的方程表示^[12]。

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

其中: z 为量测数据值,一般为节点电压幅值、节点注入功率和支路首末段功率; x 为 n 维系统状态变量,一般取各节点的复电压,用极坐标表示为电压幅值和电压相角; $h(x)$ 为量测函数,由满足电路基本定理,如基尔霍夫定律、功率方程所组成; v 为量测随机误差,表征量测设备与理论真值之间的偏差。

状态估计问题就是求使目标函数达到最小时的值。

$$J(x) = [z - h(x)]^T W [z - h(x)] \quad (2)$$

其中, W 为量测权值矩阵。

通过对量测函数 $h(x)$ 行进线性化假设,即对 $h(x)$ 进行泰勒级数展开并忽略二次以上的非线性项,可以得到WLS状态估计的迭代公式^[13]:

$$H^T(x^{(k)})WH(x^{(k)})\Delta x^{(k)} = H^T(x^{(k)})W[z - h(x^{(k)})] \quad (3)$$

$$\Delta x^{(k)} = G(x^{(k)})^{-1} H^T(x^{(k)})W[z - h(x^{(k)})] \quad (4)$$

由此得出状态量表达式为

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (5)$$

式中: (k) 表示迭代序号; H 为量测函数的雅可比矩阵。

2 层次分析法

2.1 层次分析法概念

20世纪70年代初,美国运筹学家Saaty提出了著名的层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)。层次分析法是从定性分析到定量分析的一种典型的系统工程方法,它将人们对复杂系统的思维过程数学化,将人的主观判断为主的定性分析进行定量化,将各种判断因素之间的差异数量化,帮助人们保持思维过程的一致性,常用于复杂的模糊综合评价系统,是目前一种被广泛应用的确权值的方法^[14]。

2.2 层次分析法的原理与步骤

运用层次分析法来解决复杂的实际问题时,通常可按以下四个步骤进行^[15]:

- (1) 建立清晰的层次结构模型;
- (2) 构建判断矩阵;

引用数字1-9及其倒数作为标度来定义判断矩阵 A (如表1)。

表1 判断标度矩阵及其含义

Table 1 Judgment scale matrix and its meaning

标度	含义
1	表示两指标相比,具有同样重要性
3	表示两指标相比,一个指标比另一个指标稍微重要
5	表示两指标相比,一个指标比另一个指标明显重要
7	表示两指标相比,一个指标比另一个指标强烈重要
9	表示两指标相比,一个指标比另一个指标极端重要
2、4、6、8	上述两相邻判断中值
倒数	指标 i 与 j 比较得判断 b_{ij} , 则指标 j 与 i 比较的判断 $b_{ji} = 1/b_{ij}$

(3) 对判断矩阵一致性检验

① 计算一致性指标 CI

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

其中, λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值。

② 查找一致性指标 RI (见表2)。

表2 1-9阶判断矩阵的平均随机一致性指标 RI 值

Table 2 Mean random consistency index RI values of 1-9 order judgment matrix

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI 值	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

③ 计算一致性比例 CR

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

当 $CR < 0.10$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则应对判断矩阵作适当修正。

层次分析法有多种计算方法求权重, 本文选用特征向量法。

2.3 基于层次分析法的状态估计步骤

根据上面的理论介绍, 可以得出基于层次分析法加权最小二乘法状态估计的步骤如下:

(1) 根据量测装置的量测类型确定各类型量测量的权重;

① 根据量测类型建立层次结构模型;

② 按表1构造判断矩阵;

③ 计算权重向量并做一致性检验, 满足一致性进行(2), 不满足则修改判断矩阵。

(2) 输入原始数据, 包括线路数据、量测数据和权重数据。

(3) 对量测数据进行可观性分析, 若满足可观性要求, 则进行(4), 否则返回(2)。

(4) 计算雅克比矩阵 H , 进行迭代计算。

(5) Δx 是否满足收敛条件, 满足则迭代结束, 否则, 转到(4)。

(6) 计算整个网络的潮流分布和有关的状态估计指标, 如状态估计最小目标函数值 $J(x)$ 等。

(7) 输出数据。

(8) 结束。

3 算例分析

3.1 权值的确定

本文采用IEEE14节点系统、IEEE30节点系统和IEEE57节点系统进行仿真分析, 量测数据类型包括: 节点注入有功、无功功率, 支路始末端有功、无功功率和节点电压幅值。根据层次分析法的原理可以确定各因素的相对重要性判断矩阵 A 和权重如表3所示。

表3 各指标的相对重要性判断矩阵 A

Table 3 Relative importance of each index judgment matrix A

A	PF	PT	PG	QF	QT	QG	Vm	W
PF	1	1	1/3	3	3	2	1/3	0.274 3
PT	1	1	1/3	3	3	2	1/3	0.274 3
PG	3	3	1	5	5	3	1	0.627 5
QF	1/3	1/3	1/5	1	1	1/3	1/5	0.097 4
QT	1/3	1/3	1/5	1	1	1/3	1/5	0.097 4
QG	1/2	1/2	1/3	3	3	1	1/3	0.207 1
Vm	3	3	1	5	5	3	1	0.627 5

经计算, 上述判断矩阵具有满意的一致性。

3.2 算例分析

本文用Matlab编制了基于层次分析法确定权重的加权最小二乘法状态估计程序, 为便于比较, 同时还实现了传统加权最小二乘法。在系统可观测的前提下, 在潮流计算的结果中选定某些节点电压的幅值、某些节点的注入功率以及某些支路功率的量测真值; 然后, 所有量测量的量测值由量测真值加上对应量测的随机量测误差形成, 而量测误差是均值为零的随机变量, 它的标准方差与量测值和满刻度有关系。电压幅值和功率为标么值, 电压相角单位为弧度, 功率基准值100 MVA。算例以节点电压幅值和相角为状态变量, 各节点的电压初始值选为幅值为1, 相角为0。参考节点电压幅值和相角都不参与迭代。收敛误差标准为 10^{-6} 。在状态估计算法运行之前, 对量测数据的可观性进行了验证。试验结果如图1~图4所示。

IEEE14节点系统的试验结果如图1、图2所示。从图1、图2可以看出, 相比于WLS估计值, AHP对状态变量电压幅值和电压相角的估计值更接近于潮流值, 这说明AHP的估计值结果更精确。

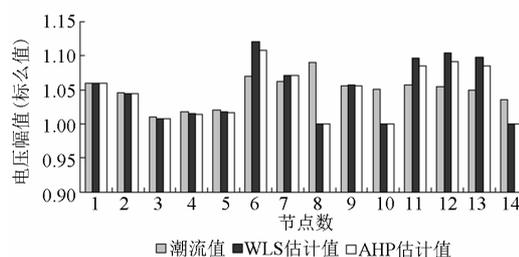


图1 IEEE14系统节点电压幅值潮流值与估计值的对比

Fig. 1 Comparison of voltage amplitude estimation error of IEEE14-bus system

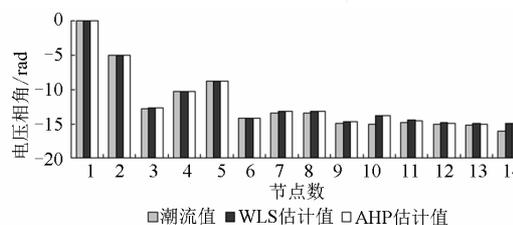


图2 IEEE14系统节点电压相角潮流值与估计值的对比

Fig. 2 Comparison of voltage phase angle estimation error of IEEE14-bus system

IEEE30节点系统的试验结果如图3、图4所示。从图3、图4可以看出, AHP对状态变量电压幅值和电压相角的估计值优于WLS估计值, 这说明AHP能精确地估计系统的运行状态。而且对于不同系统具有适应性。

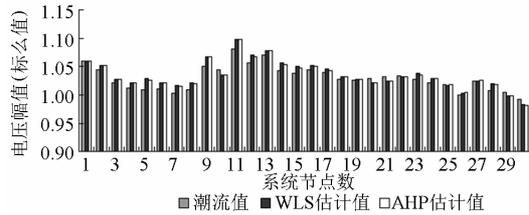


图3 IEEE30系统节点电压幅值潮流值与估计值的对比

Fig. 3 Comparison of voltage amplitude estimation error of IEEE 30-bus system

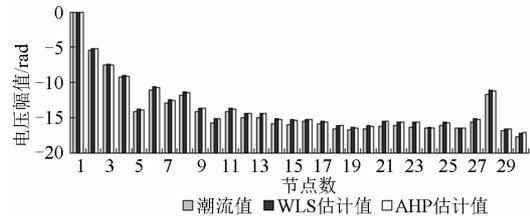


图4 IEEE30系统节点电压相角潮流值与估计值的对比

Fig. 4 Comparison of voltage phase angle estimation error of IEEE 30-bus system

表4给出了三个系统在两种估计方法下的试验结果。从表4可以看出，AHP状态估计减少了迭代

次数，降低了平均绝对误差。这说明AHP法更具有优越性。

表4 两种不同估计方法的性能比较

Table 4 Performance comparison of two different estimation methods

估计方法	14节点系统		30节点系统		57节点系统	
	迭代次数	平均绝对误差	迭代次数	平均绝对误差	迭代次数	平均绝对误差
WLS	7	0.022 559	7	0.022 361	8	0.031 004
AHP	5	0.021 249	5	0.021 190	4	0.030 333

4 结论

层次分析法是将与决策有关的元素分解成目标、准则和方案等层次，在此基础上进行定性和定量分析的决策方法，该方法具有系统、灵活、简洁的优点。本文充分利用了电力系统量测数据类型多的特点，在基本加权最小二乘法的基础上，采用层次分析法确定权重的加权最小二乘的状态估计算法，并进行了仿真试验。通过分析总结，得出如下结论：

(1) 层次分析法确定权重的加权最小二乘估计法能正确地进行电力系统的状态估计，且估计结果精度优于基本加权最小二乘估计法。

(2) 由于有功量测精度通常比无功量测精度高，但目前的很多状态估计算法假设有功、无功量测精度相同，这将严重影响状态估计结果的精度。本文算法有效地克服了这一点，因而更具适用性。

(3) 层次分析法原理简单，理论基础扎实，编程容易实现，具有良好的应用前景。

(4) 当指标数过大时，数据统计量大，权重难以确定。

参考文献

[1] GUO Ye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A method for evaluating the accuracy of power system state estimation results based on correntropy[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014, 60: 45-52.
 [2] 卫志农, 周奕, 李阳林. 基于信息融合理论的动态状

态估计探讨[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 103-108.
 WEI Zhinong, ZHOU Yi, LI Yanglin. Discussion on dynamic state estimation based on information fusion theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 103-108.
 [3] 庞博, 卫志农, 孙国强. 基于风力发电机简化RX模型的电力系统状态估计[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 159-163.
 PANG Bo, WEI Zhinong, SUN Guoqiang. Power system state estimation based on simplified RX model of wind power generator[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 159-163.
 [4] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-21.
 ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-21.
 [5] 王韶, 江卓翰. 基于奇异值分解和等效电流量测变换的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 111-115.
 WANG Shao, JIANG Zhuohan. Power system state estimation based on singular value decomposition and equivalent current measurement transformation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 111-115.
 [6] 李建生, 梁军, 负志皓, 等. 基于电气信息评估设备状态渐进变化的概率分析方法[J]. 电工技术学报, 2013,

- 28(10): 355-364.
- LI Jiansheng, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Probability analysis of progressive changes of equipment state based on electrical information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 355-364.
- [7] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-160.
- LIANG Zhirui, YE Huiqiang, ZHAO Fei. Overview on power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-160.
- [8] OKON T, WILKOSZ K. Consideration of different operation modes of UPFC in power system state estimation[J]. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011: 1-4.
- [9] BI Suzhi, ZHANG Yingjun. Graphical methods for defense against false-data injection attacks on power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1216-1227.
- [10] 王冰, 李积捷, 王春璞, 等. 基于改进IGGIII和快速分解法的电力系统状态估计算法[J]. 继电器, 2008, 36(11): 1-5.
- WANG Bing, LI Jijie, WANG Chunying, et al. State estimation algorithm based on the improved method of IGGIII and fast decoupled arithmetic[J]. Relay, 2008, 36(11): 1-5.
- [11] 叶芳, 卫志农, 孙国强, 等. 基于自动微分技术的电力系统状态估计算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 91-95.
- YE Fang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. State estimation of power systems with automatic differentiation technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 91-95.
- [12] 王贺, 胡志坚, 张翌晖, 等. 基于聚类经验模态分解和最小二乘支持向量机的短期风速组合预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 237-245.
- WANG He, HU Zhijian, ZHANG Yihui, et al. A hybrid model for short-term wind speed forecasting based on ensemble empirical mode decomposition and least squares support vector machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 237-245.
- [13] 栗秋华, 周林, 张凤, 等. 基于模糊理论和层次分析法的电力系统电压态势预警等级综合评估[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 40-45.
- LI Qiuha, ZHOU Lin, ZHANG Feng, et al. Comprehensive evaluation of forewarning grade of voltage state and tendency in power systems based on fuzzy theory and analytic hierarchy process[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 40-45.
- [14] 熊以旺, 程浩忠, 王海群, 等. 基于改进AHP和概率统计的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 48-52.
- XIONG Yiwang, CHENG Haozhong, WANG Haiqun, et al. Synthetic evaluation of power quality based on improved AHP and probability statistics[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 48-52.
- [15] 陈静, 李华强, 郑武, 等. 基于全局模糊指标的电力系统在线安全评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 93-98.
- CHEN Jing, LI Huaqiang, ZHENG Wu, et al. Power system on-line security assessment based on global fuzzy index[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 93-98.

收稿日期: 2014-06-30

作者简介:

黄知超(1963-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化;

谢霞(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统状态估计; E-mail: xiexia0216@126.com

王斌(1970-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为配电网自动化。

(编辑 葛艳娜)