

加权最小二乘状态估计量测权值计算的实用方法

龚成明^{1,2,3}, 於益军⁴, 路 轶³, 徐 田⁵, 王 丹⁶

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106;

2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏省南京市 211106; 3. 国网四川省电力公司, 四川省成都市 610041;

4. 中国电力科学研究院(南京), 江苏省南京市 210003; 5. 国网江苏省电力公司, 江苏省南京市 210024;

6. 国网河南省电力公司, 河南省郑州市 450052)

摘要:分析了实际系统中直接影响加权最小二乘状态估计量测权值的因素,基于量测精度等级及满量程提出了设置量测权值的实用化方法,展示了实际系统中典型量测权值的标么化数值,可以看出不同电压等级功率量测权值的差别以及电压幅值量测和功率量测权值之间的关系。使用文中方法计算得到的量测权值能更准确地反映量测精度,从而能够提高状态估计结果的准确性,模拟算例和实际工程应用验证了所述方法的有效性。文中还分析说明了计算两种派生量测权值的方法以及选取零注入量测权值的原则。

关键词:状态估计;量测权值;精度等级;满量程;标么化权值;加权最小二乘

0 引言

电力系统状态估计是智能电网调度控制系统应用功能的重要基础,目前状态估计功能已普遍应用于各级调控中心^[1-3]。为推进状态估计功能的实用化,相关使用单位提出了明确的要求^[4-5],还有很多文献分析了影响状态估计精度的因素^[6-7]。

基本的电力系统状态估计求解算法是加权最小二乘(weighted least square, WLS)以及相关的不良数据检测和辨识算法。在加权最小二乘算法中,基于量测方差的量测权值是算法得到准确结果的重要基础信息,同时关系到能否有效地检测和辨识出不良数据。尽管已围绕量测方差的估计开展了大量的研究^[8-9],但受量测配置等方面的限制其实际应用仍相当有限。

状态估计软件设置量测权值的理想方式是直接设定每个量测的方差,但这种做法因工作量巨大而不现实。常用的做法是分类设置标么化权值,但其存在以下不足之处:①标么化的量测权值不像量测有名值那样直观,如何设置功率和电压幅值等不同类型的量测权值是令人困扰的问题,而且不易区分不同电压等级功率量测的权值;②计算中最终使用的节点注入功率和母线电压等量测往往由多个量测

合成,其权值受分量数目的影响,无法简单统一设定;③模拟无注入节点的零注入量测的权值需要在节点功率平衡精度和数值计算稳定性之间进行权衡,很难由用户设定。

本文提出了基于有关标准中隐含的反映量测满量程的信息,结合量测精度等级设置来计算状态估计权值的实用方法;计算出的实际系统中一组典型的标么化权值展示了其数值分布的复杂程度。进一步分析给出了由多个具体的负荷量测合成的节点注入量测以及由多个具体的物理母线的电压量测合成的节点电压量测权值的计算方法,分析说明了零注入量测权值的设置原则。

1 加权最小二乘状态估计器的目标函数和量测权值

加权最小二乘状态估计器的目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^m w_{ii} r_i^2 \quad (1)$$

式中: m 为量测数目; w_{ii} 和 r_i 分别为第 i 个量测的权值和残差,且有

$$w_{ii} = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

其中 σ_i 为假定服从正态分布的独立量测 i 的标准差。 σ_i 和 r_i 同量测具有相同的量纲,因而 w_{ii} 也有量纲。

状态估计目标函数中的每一项 $w_{ii} r_i^2 = r_i^2 / \sigma_i^2$ 都

是一个没有量纲的纯数,且服从期望为 0、方差为 $s_{ii}\sigma_i^2$ 的正态分布,其中 s_{ii} 为残差灵敏度矩阵中与量测 i 对应的对角元。从而可以构造服从标准正态分布的标准化残差:

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{s_{ii}\sigma_i^2}} \tag{3}$$

其数值落在 $(-3,3)$ 区间的概率约为 99.73%,这也是使用标准化残差来检测和辨识不良数据时所依据的基本原理。

电力系统分析中一个常用的技巧是标么化。很多状态估计软件也把标么化的 w_{ii} 作为需要人为设置的数值。由下文分析可见,其数值分布范围相当复杂,要人工设置这一数值并不现实。

2 基本量测权值的设置

给有功量测、无功量测、电压幅值量测标么化权值简单地设置 3.0,2.0,5.0 这样的数值将错误地反映量测的实际精度,甚至影响状态估计结果的合理性。如果使用能更好地反映实际量测精度的信息,则能够得到更合适的量测权值。

首先可以使用精度等级信息。假定现场电压测量表计精度为 0.5 级,则表示表计本身(在接近满量程的相当一段范围内)测量的相对误差为 0.5%,再考虑其他环节的因素,就可以粗略地给出数据采集与监控(SCADA)系统中相应量测数据的相对误差,如 1.0%。

其次,可以使用满量程信息。在国家电网公司调度控制系统实用化验收的有关规定^[4-5]中,为便于统一计算估计值和量测值的相对偏差,定义了不同电压等级各类量测的基准值,用这组数值作为相应表计的满量程值,是很好的近似。

有了量测的相对误差和满量程信息,就可以计算标准差。可以给每一种量测类型 m 定义缺省的精度等级 p_m (如综合精度等级为 1 级则 $p_m=1.0$),以及在每一个电压类型 l 下的满量程值 $f_{m,l}$ 。对于每一个量测,可以计算出与类型 m 和 l 对应的标准差有名值:

$$\sigma(m,l) = f_{m,l} \times \frac{p_m}{100} \tag{4}$$

由标准差有名值可计算出标准差标么值以及量测权值的标么值。假设 110 kV 母线电压幅值量测 i 的缺省精度等级为 1.0(综合误差为 1.0%),满量程值为 132 kV,则该量测的标准差有名值为:

$$\sigma_i = f_{m,l} \times \frac{p_m}{100} = 132 \text{ kV} \times \frac{1.0}{100} = 1.32 \text{ kV} \tag{5}$$

假定该电压等级电压幅值的标么化基值 $V_B=110 \text{ kV}$,则量测 i 的标准差标么值为:

$$\sigma_i^{\text{pu}} = \frac{\sigma_i}{V_B} = \frac{1.32 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} = 0.012 \tag{6}$$

从而标么化权值为:

$$w_{ii}^{\text{pu}} = \frac{1}{(\sigma_i^{\text{pu}})^2} \approx 6\,940 \tag{7}$$

类似的,若线路有功和无功功率以及母线电压幅值量测的缺省精度等级分别为 1.0,2.0,1.0,且 110 kV 和 500 kV 功率量测和电压幅值量测的满量程及不同类型量测的标么化基值如表 1 所示。

表 1 分电压等级的满量程和标么化基值
Table 1 Full-scale and per-unit base in different voltage levels

电压等级/kV	线路功率 满量程值/ MVA	电压幅值 满量程值/ kV	线路功率 标么化基 值/MVA	电压幅值 标么化基 值/kV
110	114	132	100	110
500	1 082	600		500

可以计算得到两个电压等级下几类量测的缺省标么化权值,如表 2 所示。

表 2 一组标么化量测权值示例
Table 2 Illustration of a set of measurement weights (per-unit values)

电压等级/kV	标么化权值		
	线路有功功率	线路无功功率	电压幅值
110	7 695	1 924	6 944
500	85	21	6 944

可见,同样精度等级的线路功率量测在不同电压等级下,因为量测的满量程不同而标么化基值相同,其标么化权值会相差几十甚至上百倍。如果考虑到网络中还可能同时存在 1 000 kV 和 10 kV 的功率量测,其标么化权值甚至会相差成千上万倍。相同精度等级的电压幅值量测的标么化权值在不同电压等级下基本接近,但和功率量测的标么化权值差别很大。

3 派生量测的权值

实际应用中还存在两种典型的派生量测情况:一是接在同一条母线上的负荷及机组的量测合成为一个注入量测;二是并列运行的物理母线(对应一个计算节点)上的多个电压量测可以处理成一个电压量测。可由派生量测的表达形式和原始量测的标准差计算出派生量测的标准差从而得到权值。

1)对于由连接在计算节点 i 上多个实际负荷量测 p_k^{LD} (机组量测的符号相反,方法可类推)求和得到计算节点 i 的注入量测为:

$$p_i^{\text{INJ}} = \sum_{k \in i} p_k^{\text{LD}} \quad (8)$$

式中: $k \in i$ 表示负荷 k 连接于节点 i 。

如果 p_i^{INJ} 和 p_k^{LD} 的标准差分别为 σ_i^{INJ} 和 σ_k^{LD} , 则有

$$(\sigma_i^{\text{INJ}})^2 = \sum_{k \in i} (\sigma_k^{\text{LD}})^2 \quad (9)$$

从而得到

$$\frac{1}{(\sigma_i^{\text{INJ}})^2} = \frac{1}{\sum_{k \in i} (\sigma_k^{\text{LD}})^2} \quad (10)$$

此即为组合量测 p_i^{INJ} 的权值。可见, 求和所合成的量测其精度低于原始分量量测。特别是如果每个分量的量测精度相同, 则求和所合成的量测的权值与分量数目成反比。

需要说明的是, 式(9)假定全部的 p_k^{LD} 是相互独立的随机变量。实际情形中, 同一物理母线上设备的电压量测可能来自于同一组电压互感器, 这时部分 p_k^{LD} 不是完全独立的, 合成量测的方差比式(9)计算结果更大, 本文对此不作进一步分析。

2) 对于组成计算节点 j 的多个物理母线电压幅值量测 V_l^{BAR} 派生的计算母线的电压幅值量测 V_j^{BS} , 由式(11)可得到派生的计算节点 j 的电压幅值量测的加权最小二乘取值如式(12)所示, 其中 $l \in j$ 表示物理母线 l 连接于节点 j 。

$$\min \sum_{l \in j} \frac{(V_j^{\text{BS}} - V_l^{\text{BAR}})^2}{\sigma_l^2} \quad (11)$$

$$V_j^{\text{BS}} = \frac{\sum_{l \in j} (\omega_{ll}^{\text{BAR}} V_l^{\text{BAR}})}{\sum_{l \in j} \omega_{ll}^{\text{BAR}}} \quad (12)$$

其中权值

$$\omega_{ll}^{\text{BAR}} = \frac{1}{(\sigma_l^{\text{BAR}})^2} \quad (13)$$

式中: σ_l^{BAR} 为量测 V_l^{BAR} 的标准差。

若记

$$k_l = \frac{\omega_{ll}^{\text{BAR}}}{\sum_{l \in j} \omega_{ll}^{\text{BAR}}} \quad (14)$$

则

$$V_j^{\text{BS}} = \sum_{l \in j} k_l V_l^{\text{BAR}} \quad (15)$$

若量测 V_j^{BS} 的标准差为 σ_j^{BS} , 则

$$(\sigma_j^{\text{BS}})^2 = \sum_{l \in j} (k_l \sigma_l^{\text{BAR}})^2 = \frac{1}{\sum_{l \in j} \omega_{ll}^{\text{BAR}}} \quad (16)$$

从而

$$\omega_{jj}^{\text{BS}} = \frac{1}{(\sigma_j^{\text{BS}})^2} = \sum_{l \in j} \omega_{ll}^{\text{BAR}} \quad (17)$$

即量测 V_j^{BS} 的权值应取其对应的全部物理母线量测

V_l^{BAR} 的权值的和, 表明通过多源合成的量测其精度高于每一个原始分量量测。

4 零注入量测的权值

在加权最小二乘状态估计的实现中, 对于由没有实际注入设备的节点对应的潮流方程构成的等式约束, 通常采用零注入量测来模拟。理论上来说, 这些零注入量测的权值应该为无穷大。在实际应用中, 可以取足够大的值, 但又不宜过大, 因太大的数值可能引起数值不稳定问题。文献[10]论述了同一个系统中量测权值的差异对数值稳定性的影响, 同时提出了对于关键量测可以按照对数值稳定性影响最小的原则选取权值。

对于非关键的零注入量测的权值, 一般可以取比所有实际量测的权值的最大值再大 1~3 个数量级。如果零注入量测的权值相比于实际量测的权值不够大, 甚至还要小, 则状态估计的结果可能会严重偏离潮流解, 这种情况下状态估计的结果将失去意义。

5 算例分析

5.1 仿真测试算例

图 1 所示为测试用的四节点、三支路网络。节点 1, 2, 3 的电压等级为 500 kV, 节点 4 的电压等级为 110 kV。节点 2 为零注入节点。算例中标幺化基值均与前文一致。支路的标幺值参数如表 3 所示。用于测试的基态潮流数据如表 4 所示, 其中电压幅值和功率数据均为标幺值。

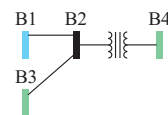


图 1 四节点测试网络的拓扑

Fig.1 Topology of 4-bus testing network

表 3 三条支路的参数

Table 3 Parameters of three branches

序号	首端节点	末端节点	类型	电阻	电抗	电纳或变比
1	1	2	线路	0	0.01	0
2	2	3	线路	0	0.02	0
3	2	4	变压器	0	0.80	0.985

表 4 测试用基态潮流断面

Table 4 Base power flow case for test

节点	电压幅值	电压相角/(°)	有功注入	无功注入
1	1.06	0	8.0	2.32
2	1.04	-4.20	0	0
3	1.02	-12.60	-7.8	-0.49
4	1.04	-12.50	-0.2	0

基于基态潮流数据,在真值的基础上添加不超过 3 倍标准差的误差作为测试量测集。有功和无功电压量测分别如表 5、表 6 所示。表中同时列出了两组权值,第 1 组权值为按照前文分析设置的数值,第 2 组没有区分不同电压等级功率量测的权值,零注入量测的权值和普通量测的权值相差为 10 倍。量测值和权值均为标么值。使用两组权值分别进行加权最小二乘状态估计,状态量的估计值及其与真值的偏差比较如表 7 所示。

表 5 模拟的有功量测和两组量测权值
Table 5 Simulated active power measurements and two sets of measurement weights

序号	类型	位置	真值	量测值	权值 1	权值 2
1	注入	1	8.0	8.3	85	5
2	注入	2	0	0	10 ⁶	50
3	注入	3	-7.8	-7.60	85	5
4	注入	4	-0.2	-0.21	7 695	5
5	支路	1 首端	8.0	7.9	85	5

表 6 模拟的无功功率、电压量测和两组量测权值
Table 6 Simulated reactive power & voltage measurements and two sets of measurement weights

序号	类型	位置	真值	量测值	权值 1	权值 2
1	注入	1	2.32	2.60	21	2
2	注入	2	0	0	10 ⁶	50
3	注入	3	-0.49	-0.20	21	2
4	注入	4	0	0.05	1 924	2
5	电压	1	1.06	1.07	6 944	20
6	电压	4	1.04	1.05	6 944	20

表 7 两组状态量估计值及与真值对比
Table 7 Comparison of estimated state variables and real state variables according to two sets of weights

节点	真值		估计值 1		估计值 2	
	电压幅值	电压相角	电压幅值	电压相角	电压幅值	电压相角
1	1.06	0	1.071	0	1.035	0
2	1.04	-4.2	1.052	-4.08	1.015	-4.38
3	1.02	-12.6	1.031	-12.35	0.994	-13.27
4	1.04	-12.5	1.046	-12.80	1.001	-13.76
偏差			0.021	0.409	0.059	1.438

表中偏差值为估计值向量与真值向量的欧氏距离。可见,使用第 2 组权值计算得到的状态向量与使用第 1 组权值计算得到的状态向量相比,其与真值向量的偏差对于电压幅值和电压相角向量,前者分别为后者的 2.8 倍和 3.5 倍。因此,使用第 1 组权值得到的结果明显优于使用第 2 组权值得到的结果。

由量测估计值与真值的比较也可以看出第 2 组权值引起的问题。其中有功量测估计值的对比如表 8 所示。

表 8 两组权值对应的有功量测估计值对比
Table 8 Comparison of estimated active power values according to two sets of weights

编号	真值	估计值 1	估计值 2
1	8.0	8.010 0	8.05
2	0	0.000 0	-0.01
3	-7.8	-7.860 0	-7.72
4	-0.2	-0.210 0	-0.32
5	8.0	8.010 0	8.05

从估计结果中的红色数字可以看出,使用第 1 组权值时,零注入节点的有功估计值在小数点后第 4 位仍为 0,而使用第 2 组权值时零注入节点有功注入的估计值为-0.01。在全网有很多零注入节点时,如此大的零注入节点功率的累加将使得状态估计结果远离潮流解;此外,使用第 1 组权值时,节点 4 注入功率估计值与真值的偏差接近于 0,而使用第 2 组权值时偏差超过 0.1,对应的有名值超过 10 MW,相对于仅有 114 MW 的满量程值来说,这一偏差已是明显的错误。使用第 2 组权值得到不合理结果的原因是,不同电压等级的功率量测使用统一标么化权值时,相当于降低了较低电压等级的量测精度,这样,高电压等级的功率量测误差就很容易污染低电压等级的结果。

5.2 工程应用效果

本文提出的全部量测权值的实用化设置方法应用于江苏等大型省级调控中心后,与之前只是简单地按照量测类型设置权值相比,较低电压等级的估计结果有明显的改善。在江苏主网网络规模约为 800 个计算节点的情况下,在调试初期仅此一项改动就将实用化验收标准^[4-5]中要求的状态估计遥测合格率指标从低于 94%提高到 96%以上。

另一方面,采用本文方法后,状态估计量测权值设置工作得到了简化,维护工作量显著降低。

6 结语

本文详细分析说明了加权最小二乘状态估计的目标函数和量测权值的含义,给出了实际应用中用量测精度等级和体现量测满量程的一些信息,来计算不同电压等级下各类量测的缺省标么化权值的方法,并用实际示例展示了典型的量测配置所对应的标么化权值的大小。文中还说明了在缺省标么化权值的基础上计算两类派生量测权值,以及选取合适的零注入量测权值的方法。模拟算例和实际工程应用验证了这些方法的有效性。

尽管如此,现有的状态估计软件在相关问题上仍有很多方面值得进一步完善和改进:①需要研究

和完善量测方差在线估计方法,以更准确地获得量测精度信息;②需要研究并应用数值稳定性高的算法,并尝试根据局部实际量测的权值选取零注入量测权值,以改善状态估计的数值稳定性;③需要研究和应用显式表达等式约束的状态估计算法,以从根本上避免引入零注入量测带来的数值稳定性问题,使状态估计更好地适应特大电网分析的需要。

参 考 文 献

[1] 于尔铿.电力系统状态估计[M].北京:水利电力出版社,1985.

[2] 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[J].电力系统自动化,1998,22(11):55-60.

LI Bijun, XUE Yusheng, GU Jinwen, et al. Status quo and prospect of power system state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 55-60.

[3] ABUR A, GÓMEZ EXPÓSITO A. Power system state estimation—theory and implementation[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2004.

[4] 国家电网公司.智能电网调度控制系统实用化要求(试行)[S]. 2013.

[5] 国家电网公司.智能电网调度控制系统实用化验收办法(试行)[S].2013.

[6] 黄滔,卢建刚,张辉.广东省调提高状态估计计算精度的措施[J].电网技术,2004,28(16):78-81.

HUANG Tao, LU Jiangang, ZHANG Hui, Adjustable measures to improve calculation precision of state estimation in Guangdong Province [J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 78-81.

[7] 王森,常乃超,刘金波,等.状态估计多指标综合评价方法[J].电力系统自动化, 2015, 39(1): 94-98. DOI: 10.7500/AEPS20141009019.

WANG Miao, CHANG Naichao, LIU Jinbo, et al. A multi-index comprehensive evaluation method of state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 94-98. DOI: 10.7500/AEPS20141009019.

[8] ZHONG Shan, ABUR A. Auto tuning of measurement weights in WLS state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 2006-2013.

[9] ZHONG Shan, ABUR A. Combined state estimation and measurement calibration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 458-465.

[10] 李碧君,薛禹胜,顾锦汶,等.状态估计中选取量测权值的新原则[J].电力系统自动化,2000,24(8):10-14.

LI Bijun, XUE Yusheng, GU Jinwen, et al. A new criterion of determine measurement weights in power system state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 10-14.

龚成明(1977—),男,通信作者,高级工程师,主要研究方向:电力系统调度控制。E-mail: gongchm@gmail.com

於益军(1967—),男,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统分析与控制。

路 轶(1977—),男,工程师,主要研究方向:电力系统调度自动化。

(编辑 章黎)

Practical Method for Calculating Measurement Weights in Weighted Least Square State Estimation

GONG Chengming^{1,2,3}, YU Yijun⁴, LU Yi³, XU Tian⁵, WANG Dan⁶

- (1. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China;
2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China;
3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China;
4. China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China;
5. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;
6. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: This paper analyzes the affecting factors of measurement weight and addresses a practical way to calculate the default weights based on the information of measurement precision grade and full scale. Typical per-unit weight values from actual systems are illustrated to show the great difference between power measurement at different voltage levels and the relationship between power measurement and voltage measurement. As the proposed method is based on available information that can well represent the precision of measurement, more appropriate weights can be generated and hence higher state estimation precision. The effectiveness of the proposed method is verified by simulated case studies. Furthermore, the method for calculating the weights of two kinds of combined measurement and the principles of setting proper weights for zero-injection measurement are briefly treated.

Key words: state estimation; measurement weight; precision grade; full scale; per-unit weight values; weighted least square (WLS)