

DOI: 10.7667/PSPC151409

基于混合量测的二次线性状态估计方法及其工程应用

丁宏恩¹, 戴则梅², 霍雪松³, 周劼英⁴, 徐秀之¹, 吕洋¹, 俞瑜¹

(1. 国网苏州供电公司, 江苏 苏州 215004; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106;
3. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 4. 国家电力调度控制中心, 北京 100031)

摘要: 基于相量测量单元(PMU)和数据采集与监控(SCADA)混合量测进行状态估计计算时, 如果仍采用传统非线性估计模型, 将面临 PMU 量测计算权值难以确定、PMU 量测坏数据辨识不准、相角参考点和成熟商用程序改动等多方面问题。提出了一种基于混合量测的二次线性状态估计方法。该方法在传统非线性状态估计收敛后, 利用其结果中的各节点电压幅值及相角估计值和 PMU 相量量测再进行二次线性状态估计计算, 有效解决了上述问题。最后结合电网实例验证了该方法的有效性。

关键词: 状态估计; PMU 量测; 坏数据处理; 计算权值; 相角参考点

Hybrid measurement based secondary linear state estimation method and its engineering application

DING Hongen¹, DAI Zemei², HUO Xuesong³, ZHOU Jieying⁴, XU Xiuzhi¹, LÜ Yang¹, YU Yu¹

(1. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 4. State Electric Power Dispatching Center of China, Beijing 100031, China)

Abstract: In the state estimation based on hybrid measurement of the phasor measuring unit (PMU) and supervisory control and data acquisition (SCADA), once calculations are based on the traditional nonlinear model, it will face some problems such as difficult to determine PMU measurement calculated weight, inaccurately processing of PMU measurement bad data, the change of phase angle reference point and mature commercial program, etc. In order to solve the above problems, this paper proposes a new secondary linear state estimation method with hybrid measurement. This method uses the voltage amplitude of each node and phase angle estimation of the result based on the convergence of traditional nonlinear state estimation and the PMU measurement to re-calculate the secondary linear state estimation. The effectiveness of the method proposed is illustrated using actual example.

Key words: state estimation; phasor measurement unit (PMU) measurement; bad data process; weight calculation; reference point

0 引言

状态估计是电网调度自动化系统的基础应用, 其主要功能是从含有误差的电力系统实时数据中获得系统状态信息的最佳估计值^[1-2]。随着电网调度自动化水平的不断提高和新型智能电网调度控制系统的广泛应用^[3-4], 作为电力系统实时在线分析的基础, 状态估计应用的重要性被提到了一个更新的高度^[5-6]。传统状态估计使用的实时数据主要由监控和数据采集(SCADA)应用提供, 近年来, 利用电网广

域动态监视(WAMS)应用提供的高精度相量测量装置(PMU)量测在改善状态估计性能方面取得了不少成果^[7-9]。现阶段我国电网中配置的 PMU 数目远不足以进行完全基于 PMU 量测的状态估计, 一种比较可行的方案是基于 PMU 量测和 SCADA 混合量测进行状态估计。

将高精度 PMU 相量量测直接或者适当变换后引入到传统非线性状态估计中, 可以增大量测系统冗余度, 提高状态估计的性能^[10-11]。但是传统引入方法并没有充分利用 PMU 量测高精度、直接可测相角以及状态量线性等特性, 大多仍采用非线性估计模型, 将 PMU 相量量测和传统 SCADA 量测等

同对待, 将二者混合在一起进行非线性迭代计算和坏数据处理^[11-14], 这样的混合处理将带来 PMU 量测计算权值确定、PMU 量测坏数据处理、相角参考点等一系列不易克服的问题。

本文另辟蹊径提出了一种基于混合量测的二次线性状态估计方法。该方法在传统非线性状态估计收敛以后, 利用其结果(各节点电压幅值及相角估计值)和 PMU 相量量测再进行二次线性状态估计计算, 几乎不对原有工程化程序进行任何改动, 就可以很方便地解决上述问题, 极大地推动了混合量测状态估计的实用化。

1 二次线性状态估计模型

WAMS 能够提供的 PMU 相量量测主要包括节点电压相量量测和支路电流相量量测。其中, PMU 节点电压相量量测可以在二次线性状态估计中直接使用, PMU 支路电流相量量测需要按照以下方法转化为相邻节点电压相量量测以后使用^[15-16]。

基于 PMU 节点电压相量量测和相关支路 PMU 电流相量量测, 可以推算出相邻未装置 PMU 节点的电压相量量测^[17-18]。以图 1 所示的单支路图为例, 假设在节点 1 配置 PMU, $\dot{U}_1 = U_1 \angle \theta_{u_1}$, $\dot{I}_1 = I_1 \angle \theta_{i_1}$ 为 PMU 相量测量, 如式(1)所示, 可以利用 \dot{U}_1 和 \dot{I}_1 推算出相邻未装置 PMU 节点 2 的电压相量量测。这些节点电压相量量测和 PMU 节点电压相量量测一样可以在二次线性状态估计中直接使用。

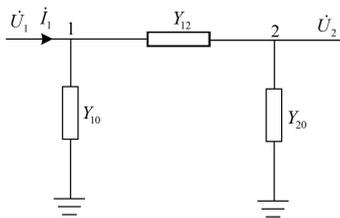


图 1 单支路图

Fig. 1 Diagram of one branch

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{I}_1 - (Y_{10} + Y_{12})\dot{U}_1}{-Y_{12}} \quad (1)$$

传统非线性状态估计收敛以后, 利用其结果中的各节点电压幅值及相角估计值和 PMU 相量量测再进行二次线性状态估计计算在二次线性状态估计可使用的量测包括: PMU 节点电压相量量测(其中包含转化来的相邻节点电压相量量测)、传统非线性状态估计结果, 所有量测值与节点状态量均存在直接的线性关系, 因而计算可在极坐标下进行且有功和无功可以分解计算。以有功部分为例, 其量测方程为如式(2)所示。

$$z = Ax + \varepsilon = \begin{bmatrix} \theta_{SE} \\ \theta_{PMU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{SE} \\ A_{PMU} \end{bmatrix} \hat{\theta} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{SE} \\ \varepsilon_{PMU} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: z 为量测值矢量; θ_{SE} 、 θ_{PMU} 分别对应传统非线性状态估计的节点电压相角结果和 PMU 节点电压相角量测; ε 为量测误差矢量, ε_{SE} 、 ε_{PMU} 分别对应传统非线性状态估计的节点电压相角结果误差和 PMU 节点电压相角量测误差; $\hat{\theta}$ 为系统待求的状态矢量; A 为关系矩阵, A_{SE} 、 A_{PMU} 分别对应传统非线性状态估计的节点电压相角结果和 PMU 节点电压相角量测, A_{SE} 是 $N \times N$ 阶的单位矩阵, A_{PMU} 是一个 $P \times N$ 阶的矩阵; P 是 PMU 电压相角量测数, 相对于第 i 个 PMU 电压相角量测 θ_i 的行为 $A_{PMU_i} = [\dots 0 \dots 0 \dots 1 \dots 0 \dots]$, 唯一的非零元素与该量测所在节点的状态量相对应。

分析上述量测方程会发现, 所有量测皆为节点状态量测, 关系矩阵 A 与系统拓扑及参数没有关系, 每行只含有非零元素 1, 始终不变且高度稀疏, 这些特点都大大减小了线性状态估计的计算量。根据上面的量测方程, 应用加权最小二乘法原理可以得到线性状态估计的计算式如式(3)所示。

$$\hat{\theta} = (A^T R^{-1} A)^{-1} A^T R^{-1} z \quad (3)$$

式中, R^{-1} 为量测的计算权值矩阵。

有功部分二次线性状态估计计算程序流程如图 2 所示。

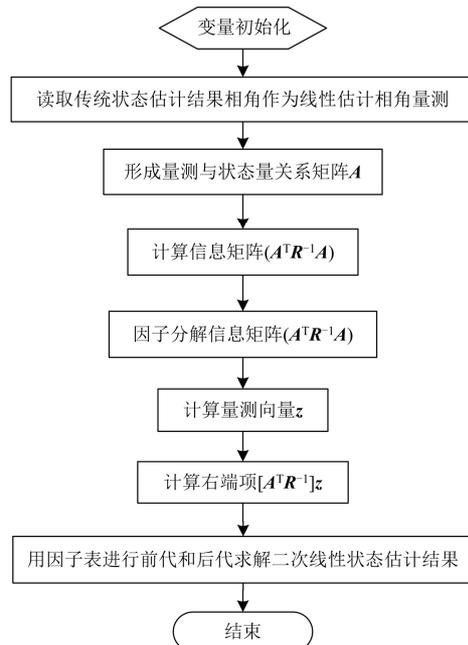


图 2 计算程序流程图

Fig. 2 Program flow chart of calculation

2 若干问题的处理方法

应用本文方法将 PMU 量测引入状态估计时, 可以很方便地解决传统引入方法所面临的 PMU 量测计算权值确定、PMU 量测坏数据处理、相角参考点三大问题, 以下将分别详述。

2.1 PMU 量测计算权值确定

采用传统非线性估计模型引入 PMU 量测, 不考虑 PMU 量测的特殊性, 将 PMU 相角量测和传统 SCADA 量测等同对待, 将与系统状态量成非线性关系的传统 SCADA 量测中的发电机、变压器、线路等功率量测和与系统节点状态量成线性关系的 PMU 电压相量量测混合在一起进行非线性迭代计算, 不同特性的量测直接混合在一起计算, 怎样给新增的 PMU 量测一个合适的计算权值成为了问题。

本文所述的二次线性状态估计方法为确定 PMU 量测计算权值提供了新思路。二次计算时所有量测值与节点状态量均存在直接的线性关系, 可以很方便很直观地给新增的 PMU 量测确定一个合适的计算权值。

首先, 确定 PMU 电压相量量测计算权值的方法, 类似于其他常规类型量测, 第 i 个 PMU 电压相量量测的计算权值如式(4)所示^[1]。

$$W_i = R_i^{-1} = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (4)$$

式中: R_i 为该 PMU 电压相量量测误差的方差; σ_i 为该 PMU 电压相量量测误差的标准差。

其次, 还必须确定传统非线性状态估计结果相量的计算权值。传统非线性状态估计结果相量的计算权值同样也跟其误差的方差有关, 因此求解传统非线性状态估计的结果相量计算权值的关键点是如何求解其误差的方差矩阵。已知传统非线性状态估计的所有 SCADA 量测误差的方差矩阵 R 如式(5)所示。

$$R = \text{diag}\{\sigma_1^2 \quad \sigma_2^2 \quad \cdots \quad \sigma_m^2\} \quad (5)$$

依据参考文献[2], 不难推导出传统非线性状态估计的结果相量误差的方差矩阵 \hat{R} 如式(6)所示。该式即为基于传统非线性状态估计 SCADA 量测误差的方差矩阵 R 求解其结果相量误差的方差矩阵 \hat{R} 的关系式。

$$\hat{R} = \text{diag}\left\{H(\hat{x})\left[H^T(\hat{x})R^{-1}H(\hat{x})\right]^{-1}H^T(\hat{x})\right\} \quad (6)$$

式中: \hat{x} 为系统的状态估计矢量; $H(\hat{x})$ 为量测雅克比矩阵。

如果传统非线性估计一般采用快速分解法, 仿

照式(6)同样可以推导出快速解耦法非线性状态估计结果相量误差的方差矩阵 \hat{R}_p 和 \hat{R}_Q , 分别如式(7)和式(8)所示。

$$\hat{R}_p = \text{diag}\left\{H_p\left[H_p^T R_p^{-1} H_p\right]^{-1} H_p^T\right\} \quad (7)$$

$$\hat{R}_Q = \text{diag}\left\{H_Q\left[H_Q^T R_Q^{-1} H_Q\right]^{-1} H_Q^T\right\} \quad (8)$$

式中, H_p 和 H_Q 分别为有功和无功量测雅克比矩阵。

2.2 PMU 量测坏数据处理

采用传统非线性估计模型引入 PMU 量测, 不考虑 PMU 量测的特殊性, 将 PMU 相角量测和传统 SCADA 量测等同对待, 将与系统状态量成非线性关系的传统 SCADA 量测中的发电机、变压器、线路等功率量测和与系统节点状态量成线性关系的 PMU 电压相量量测混合在一起坏数据处理, 造成了 PMU 量测坏数据检测辨识不准确。

基于残差搜索辨识法^[2]基本原理的启发, 考虑到基于传统非线性状态估计结果相量和 PMU 电压相量量测的二次线性状态估计计算量非常小且可以快速多次重复计算的特点, 本文提出在二次线性状态估计中使用经过改进的最大标准化残差搜索法处理 PMU 电压相量量测坏数据。

以有功部分为例, 第 i 个 PMU 电压相角量测的标准化残差 r_i^N 如式(9)所示。

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{W_{ii} R_i}} \quad (\text{其中 } i=1, 2, \dots, p) \quad (9)$$

式中: p 代表相角量测的数目; r_i 代表第 i 个相角量测的残差; R_i 代表第 i 个相角量测误差的方差; W_{ii} 代表残差灵敏度矩阵 W 中与第 i 个相角量测相对应的对角项, 残差灵敏度矩阵 W 的表达式如式(10)所示。

$$W = I - A(A^T R^{-1} A)^{-1} A^T R^{-1} \quad (10)$$

式中: I 是 $N \times N$ 阶的单位矩阵; N 是电网中的节点数。

二次线性状态估计量测坏数据处理程序的具体流程如图 3 所示。

2.3 相角参考点问题

采用传统非线性估计模型引入 PMU 量测时, 在形成雅克比矩阵时, 并不考虑 PMU 量测的特殊性, 作为角度的唯一参考的相角参考点状态量对应列仍然不建立, 且不参与迭代求解, 不能计算相角参考点上角度量测的残差值, 故而参考点上相角量测坏数据无法通过量测残差搜索方法辨识出来。同时, 由于实际 WAMS 所提供的 PMU 电压相角量测

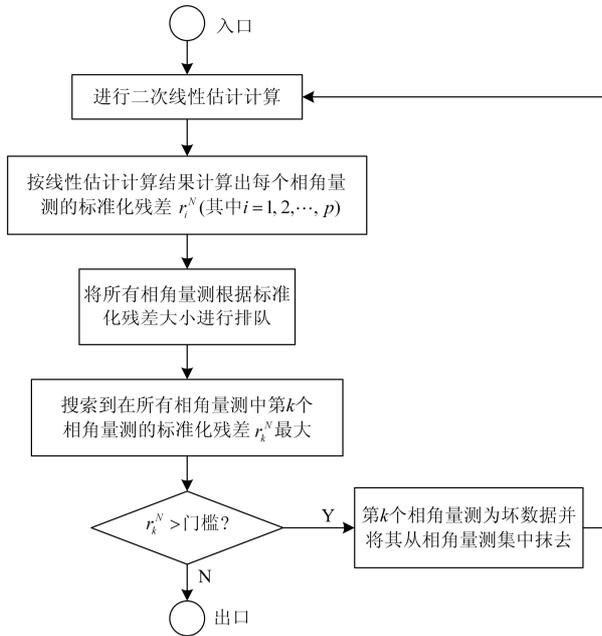


图 3 坏数据处理程序流程图

Fig. 3 Program flow chart of bad data process

都是基于一个相角参考点的相角量测差，引入计算时，一旦相角参考点上 PMU 电压相角量测为坏数据，将影响其余所有相角量测的引入，污染全系统有功量的总体计算，严重影响状态估计精度。

基于混合量测的二次线性状态估计方法，本文提出一种解决相角参考点坏数据问题的新方法，在进行二次线性状态估计时改变传统状态估计将相角参考点状态量值固定且不参与迭代求解的做法，形成关系矩阵 A 时增加相角参考点状态量对应列和 PMU 量测对应行，将相角参考点状态量同其他节点一样参与迭代求解，能够使相角参考点上的 PMU 电压相角量测为坏数据时同样能够被检测和辨识，使其不会影响其余相角量测的引用，彻底消除其对计算结果的不利影响。处理模块的相关环节包括：

(1) 读取 WAMS 系统中相角参考母线信息；

(2) 将 WAMS 系统的相角参考母线作为二次线性状态估计的相角参考点，统一 PMU 相角量测和状态估计的相角参考点；

(3) 基于二次线性状态估计模型，形成关系矩阵时增加被传统状态估计排除在外的与相角参考点相对应的列，将相角参考母线的状态量同其他母线的状态量一样参与计算求解；

(4) 将相角参考点的 PMU 电压相角量测参与量测的坏数据处理。

具体增加的程序流程如图 4 所示。

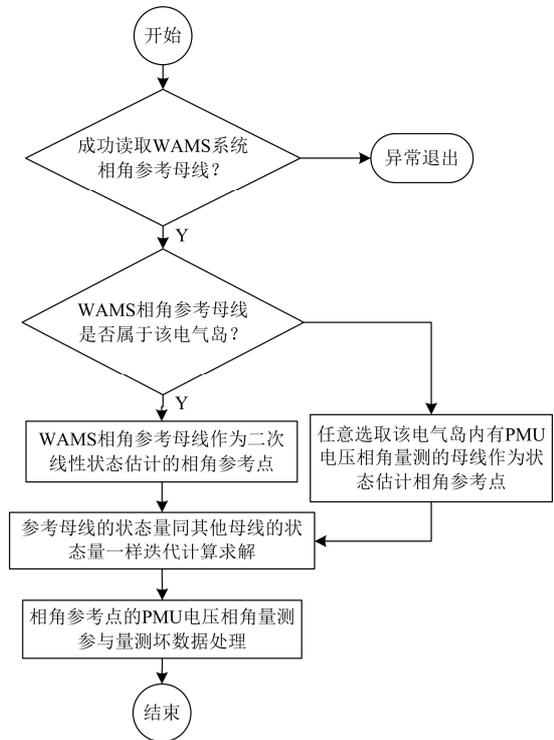


图 4 相角参考点处理模块的程序流程

Fig. 4 Procedures for processing the problem of reference point

3 实例验证

(1) 计算网络

选取某省级真实电网的部分区域作为计算网络，计算节点数为 728，量测系统中有功 SCADA 量测约为 2 561 个，PMU 母线电压相角量测约为 36 个。其中由于新海站 PMU 子站 GPS 失步，新海 220 kV 正母线上的 PMU 电压相角量测置为坏数据。

(2) 试验算法

以有功计算为例，基于传统非线性状态估计结果中电压相角和 PMU 电压相角量测进行二次线性状态估计计算。

(3) 估计精度指标

$$J_{SCADA} = \frac{1}{s} \left(\sum_{i=1}^s \left(\frac{z_i - h_i(\hat{x})}{\sigma_i^2} \right)^2 \right)$$

式中： s 为 SCADA 有功量测总数； $h_i(\bullet)$ 为量测 z_i 相对于状态矢量的非线性函数。

$$J_{PMU} = \frac{1}{p} \left(\sum_{i=1}^p \left(\frac{z_i - h_i(\hat{x})}{\sigma_i^2} \right)^2 \right)$$

式中， p 为母线电压相角量测总数。

(4) 二次线性状态估计相角计算权值

非线性状态估计结果相角的计算权值取为 R_{SE} ($R_{SE} = \frac{1}{\sigma_{SE}^2}$, σ_{SE} 为非线性状态估计结果相角误差统一的标准差);

PMU 母线电压相角量测的计算权值取为 R_{PMU} ($R_{PMU} = \frac{1}{\sigma_{PMU}^2}$, σ_{PMU} 为 PMU 电压相角量测误差统一的标准差)。

(5) 计算权值确定

基于 15 个不同时间段的量测数据断面, 在不同计算权值条件下运行本文算法程序, 估计精度量化指标 J_{SCADA} 和 J_{PMU} 的计算值如表 1 所示。

(6) 相角参考点和坏数据问题处理

设置新海 220 kV 正母线作为基于混合量测二次线性状态估计的相角参考点。然后基于某个数据断面, 应用不处理相角参考点及坏数据问题的传统非线性状态估计方法(以下简称算法 1)和本文处理相角参考点及坏数据问题的二次线性状态估计方法(以下简称算法 2)分别计算一次, 两种算法结果的比较如表 2 所示, 表 2 全部内容详见附录 A 表 A1。表 2 中误差比为量测和估计结果的误差百分比, 基值为 360° 。

(7) 试验结论

a) 表 1 某些数据断面时, 如数据断面 1、3、6、

8、9、12 和 14, 在 PMU 电压相角量测的计算权值取较小的条件下(当 $R_{SE}/R_{PMU} = \frac{\sigma_{PMU}^2}{\sigma_{SE}^2} = 100$ 时), 引入

PMU 电压相角量测可以使得基于混合量测运行状态估计时的 J_{SCADA} 与仅用 SCADA 量测进行状态估计时的 J_{SCADA} 相比变小, 首先证明只要给现在实际工程中的 PMU 电压相角量测相对合适的计算权值, 引入后便可以改善状态估计精度; 其次能够证明更重要一点, 现在实际工程中的 PMU 电压相角量测误差的标准差 σ_{PMU} 大约是传统非线性状态估计结果相角误差的标准差 σ_{SE} 的 10 倍, 这个结论解决了 PMU 电压相角量测计算权值的确定问题。

b) 表 1 在所有数据断面时, 在 PMU 电压相角量测的计算权值取较大的条件下(当 $W_{SE}/W_{PMU} = \frac{\sigma_{PMU}^2}{\sigma_{SE}^2} = 4$ 时), 引入 PMU 电压相角量测使得基于混合量测运行状态估计时的 J_{SCADA} 与仅用 SCADA 量测进行状态估计时的 J_{SCADA} 相比变大明显, 本文方法试验数据能够证明现在实际工程中的 PMU 电压相角量测精度还没有达到可以设置很大计算权值参与状态估计的标准, 显然离用它们直接代替状态估计结果的标准更远。

表 1 试验数据统计表

Table 1 Results statistics of test

数据 断面	权值条件 1 ($R_{PMU}=0$)		权值条件 2 ($R_{SE}/R_{PMU}=100$)		权值条件 3 ($R_{SE}/R_{PMU}=20$)		权值条件 4 ($R_{SE}/R_{PMU}=4$)	
	J_{SCADA}	J_{PMU}	J_{SCADA}	J_{PMU}	J_{SCADA}	J_{PMU}	J_{SCADA}	J_{PMU}
1	34.565 1	6.973 34	27.356 7	6.861 86	57.437 6	6.690 54	88.473 4	5.982 05
2	26.893 5	7.148 83	100.570	7.029 67	54.442 7	6.996 05	90.725 5	6.228 38
3	33.695 5	6.674 41	15.609 5	6.546 57	53.716 5	6.515 27	88.879 9	5.800 38
4	32.156 7	7.402 37	97.954 1	7.324 72	58.694 4	7.289 70	100.969	6.489 83
5	34.064 0	6.951 91	96.780 3	6.866 13	58.942 1	6.833 30	92.009 6	6.083 51
6	32.354 7	6.740 87	32.068 6	6.650 62	85.761 8	6.618 82	87.883 5	5.892 55
7	29.837 4	6.983 49	30.955 8	6.897 17	85.270 3	6.864 20	86.857 2	6.111 02
8	32.413 0	7.537 94	31.907 0	7.425 99	90.816 9	7.390 48	95.054 7	6.579 51
9	32.724 0	7.304 62	18.911 7	7.193 77	77.247 9	7.159 38	100.990	6.373 77
10	35.283 5	6.836 53	93.694 9	6.741 79	60.818 3	6.709 55	102.627	5.973 33
11	30.853 7	7.421 58	32.884 6	7.266 78	93.043 9	7.230 90	96.905 1	6.437 47
12	31.370 8	7.203 70	22.495 1	7.030 04	93.077 7	6.996 43	95.259 1	6.228 73
13	28.125 8	6.833 54	78.632 1	6.762 87	55.336 7	6.730 54	86.493 3	5.992 03
14	30.695 5	6.767 71	16.618 6	6.616 87	55.717 5	6.595 18	91.278 9	5.903 18
15	33.354 72	6.974 49	38.968 7	6.850 62	84.961 8	6.797 82	89.783 8	5.982 55

表 2 典型 PMU 相角量测值和估计结果对比表
Table 2 Results statistics of typical PMU measurements

母线上的 PMU 电压相角量测	量测值	算法 1 结果			算法 2 结果		
		估计结果	误差比	坏数据	估计结果	误差比	坏数据
新海 220 kV 正母	0.00	0.00	0.00	否	61.27	17.02	是
东善桥 500 kV II 段母	63.01	2.14	16.91	是	61.85	0.32	否
东善桥 220 kV II 段母	61.17	0.71	16.80	是	60.38	0.22	否
华润南 220 kV I 段母	62.17	1.44	16.87	是	61.12	0.29	否
石牌 500 kV II 段母	52.58	-8.27	16.90	是	51.12	0.38	否
石牌 220 kV IV 段母	49.17	-11.27	16.79	是	48.16	0.28	否
环保 220 kV 副母	50.42	-10.19	16.84	是	49.22	0.33	否
斗山 220 kV III 段母	52.03	-7.65	16.58	是	50.74	0.36	否
利港二 500 kV II 段母	55.00	-5.78	16.88	是	53.52	0.41	否
扬二厂 500 kV II 段母	66.51	5.58	16.93	是	65.38	0.32	否
华通 220 kV 副母	55.25	-5.39	16.84	是	54.24	0.28	否
天厂 220 kV 副母	55.94	-4.84	16.88	是	54.76	0.33	否
彭城 220 kV 正母	72.67	11.49	17.00	是	71.66	0.28	否
徐厂 220 kV I 段母	66.50	5.32	16.99	是	65.60	0.25	否
徐塘 220 kV I 段母	64.69	3.25	17.07	是	63.70	0.27	否
上河变 500 kV I 段母	65.26	5.20	16.68	是	65.19	0.02	否
华淮 220 kV I 段母	64.40	3.14	17.02	是	63.31	0.30	否

c) 分析表 2 中数据可知, 当采用本文方法处理相角参考点及坏数据问题时, 相角参考点上的 PMU 相角量测为坏数据但被正确辨识出来, 如表 2 中算法 2 结果所示, 在相角参考点上, 正确判出坏数据数目为两个, 完全没有影响其余相角量测的引入, 相角参考点上的相角量测坏数据没有影响状态估计精度。

d) 分析表 2 中数据可知, 本文提出的改进最大标准化残差搜索法能够准确有效地将 PMU 电压相角量测中坏数据检测辨识出来。

附录 A

表 A1 全部 PMU 相角量测值和估计结果对比表
Table A1 Results statistics of all PMU measurements

母线上的 PMU 电压相角量测	量测值	算法 1 结果			算法 2 结果		
		估计结果	误差比	坏数据	估计结果	误差比	坏数据
新海 220 kV 正母	0.00	0.00	0.00	否	61.27	17.02	是
新海 220 kV 副母	-0.12	0.00	0.03	否	61.27	17.05	是
东善桥 500 kV I 段母	63.01	2.14	16.91	是	61.85	0.32	否
东善桥 500 kV II 段母	63.01	2.14	16.91	是	61.85	0.32	否
东善桥 220 kV I 段母	61.17	0.71	16.80	是	60.38	0.22	否
东善桥 220 kV II 段母	61.17	0.71	16.80	是	60.38	0.22	否
东善桥 220 kV III 段母	61.17	0.71	16.80	是	60.38	0.22	否
东善桥 220 kV IV 段母	61.17	0.71	16.80	是	60.38	0.22	否

4 结语

本文提出了一种基于混合量测的二次线性状态估计方法, 使得 PMU 量测对状态估计精度的影响更加直观, 且在 PMU 量测计算权值确定、PMU 量测坏数据处理、相角参考点等问题的解决上极具优势。算法的实现也不需要传统非线性状态估计做任何改动, 只需增加一些自身模块, 易于实用化推广, 具有良好的应用前景。

续表 A1

母线上的 PMU 电压相角量测	量测值	算法 1 结果			算法 2 结果		
		估计结果	误差比	坏数据	估计结果	误差比	坏数据
华润南 220 kV I 段母	62.17	1.44	16.87	是	61.12	0.29	否
石牌 500 kV I 段母	52.58	-8.27	16.90	是	51.12	0.38	否
石牌 500 kV II 段母	52.58	-8.27	16.90	是	51.12	0.38	否
石牌 220 kV I 段母	49.17	-11.27	16.79	是	48.16	0.28	否
石牌 220 kV II 段母	49.17	-11.27	16.79	是	48.16	0.28	否
石牌 220 kV III 段母	49.17	-11.27	16.79	是	48.16	0.28	否
石牌 220 kV IV 段母	49.17	-11.27	16.79	是	48.16	0.28	否
环保 220 kV 正母	50.42	-10.19	16.84	是	49.22	0.33	否
环保 220 kV 副母	50.42	-10.19	16.84	是	49.22	0.33	否
斗山 220 kV I 段母	52.03	-7.65	16.58	是	50.74	0.36	否
斗山 220 kV II 段母	52.04	-7.65	16.58	是	50.74	0.36	否
斗山 220 kV III 段母	52.03	-7.65	16.58	是	50.74	0.36	否
利港二 500 kV I 段母	55.00	-5.78	16.88	是	53.52	0.41	否
利港二 500 kV II 段母	55.00	-5.78	16.88	是	53.52	0.41	否
扬二厂 500 kV I 段母	66.51	5.58	16.93	是	65.38	0.32	否
扬二厂 500 kV II 段母	66.51	5.58	16.93	是	65.38	0.32	否
华通 220 kV 正母	55.22	-5.39	16.84	是	54.24	0.27	否
华通 220 kV 副母	55.25	-5.39	16.84	是	54.24	0.28	否
天厂 220 kV 正母	55.94	-4.84	16.88	是	54.76	0.33	否
天厂 220 kV 副母	55.94	-4.84	16.88	是	54.76	0.33	否
彭城 220 kV 副母	72.70	11.49	17.00	是	71.66	0.29	否
彭城 220 kV 正母	72.67	11.49	17.00	是	71.66	0.28	否
徐厂 220 kV I 段母	66.50	5.32	16.99	是	65.60	0.25	否
徐塘 220 kV I 段母	64.69	3.25	17.07	是	63.70	0.27	否
徐塘 220 kV II 段母	64.70	3.27	17.06	是	63.68	0.28	否
上河变 500 kV I 段母	65.26	5.20	16.68	是	65.19	0.02	否
上河变 500 kV II 段母	65.26	5.20	16.68	是	65.19	0.02	否
华淮 220 kV I 段母	64.40	3.14	17.02	是	63.31	0.30	否

参考文献

- [1] ABUR A, GÓMEZ-EXPÓSITO A. Power system state estimation: theory and implementation[M]. New York, USA: Marcel Dekker, 2004.
- [2] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [3] 国家电力调度通信中心. 智能电网调度技术支持系统建设框架[R]. 2009.
- [4] Q/GDW 680-2011 智能电网调度技术支持系统系列规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2011.
- [5] 丁宏恩, 高宗和, 苏大威, 等. 混合量测状态估计相角参考点坏数据问题的处理方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 132-135.
- [6] DING Hongen, GAO Zonghe, SU Dawei, et al. Solution to bad data problem of phase angle reference bus for state estimation with hybrid measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 132-135.
- [6] 冯飞, 宋凯, 逯仁贵, 等. 磷酸铁锂电池组均衡控制策略及荷电状态估计算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 22-29.
- FENG Fei, SONG Kai, LU Rengui, et al. Equalization control strategy and SOC estimation for LiFePO4 battery

- pack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 22-29.
- [7] PHADKE A G. Synchronized phasor measurements in power systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 10-15.
- [8] BURNETT R O, BUTTS M M, CEASE T W, et al. Synchronized phasor measurements of a power system event[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1643-1650.
- [9] 李强, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于混合量测的电力系统状态估计混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 30-35.
LI Qiang, ZHOU Jingyang, YU Erkeng, et al. A hybrid algorithm for power system state estimation based on PMU measurement and SCADA measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 30-35.
- [10] 赵红嘎, 薛禹胜, 汪德星, 等. 计及 PMU 量测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 Hongga, XUE Yusheng, WANG Dexing, et al. State estimation model with PMU current phasor measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 37-40.
- [11] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(42): 145-153.
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(42): 145-153.
- [12] ZIVANOVIC R, CAIRNS C. Implementation of PMU technology in state estimation: an overview[C] // 4th African Conference in Africa, September 24-27, 1996, Stellenbosch, South Africa: 1006-1011.
- [13] CHEN J, ABUR A. Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1608-1615.
- [14] 李虹, 赵书强. 基于 WAMS/SCADA 混合量测的电力系统强跟踪滤波动态状态估计[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(19): 101-105.
LI Hong, ZHAO Shuqiang. Power system dynamic state estimation of strong tracking filter based on hybrid WAMS/SCADA measurements[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(19): 101-105.
- [15] 卢志刚, 赵号, 刘雪迎, 等. 基于可靠度与可观度的量测优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 180-187.
LU Zhigang, ZHAO Hao, LIU Xueying, et al. Optimal measurement configuration based on degree of reliability and observability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 180-187.
- [16] 李静, 罗雅迪, 赵昆, 等. 考虑大规模风电接入的快速抗差状态估计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 113-118.
LI Jing, LUO Yadi, ZHAO Kun, et al. Research of fast and robust state estimation considering large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 113-118.
- [17] 赵俊博, 张葛祥, 黄彦全. 含新能源电力系统状态估计研究现状和展望[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 7-20.
ZHAO Junbo, ZHANG Gexiang, HUANG Yanquan. Status and prospect of state estimation for power system containing renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 7-20.
- [18] 荀挺, 张珂珩, 薛浩然, 等. 电网调控数据综合智能分析决策架构设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 121-127.
XUN Ting, ZHANG Keheng, XUE Haoran, et al. Framework design of the analysis decision system about the power grid data[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 121-127.

收稿日期: 2015-08-11; 修回日期: 2015-11-03

作者简介:

丁宏恩(1982-), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网调度自动化与智能化相关技术; E-mail: hongending@163.com

戴则梅(1973-), 女, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电网调度自动化;

霍雪松(1977-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行控制与管理。

(编辑 魏小丽)