

DOI: 10.7500/AEPS20130415006

# 混合量测状态估计相角参考点坏数据问题的处理方法

丁宏恩<sup>1</sup>, 高宗和<sup>2</sup>, 苏大威<sup>3</sup>, 赵家庆<sup>1</sup>, 常乃超<sup>4</sup>, 龚成明<sup>2</sup>

(1. 国网苏州供电公司, 江苏省苏州市 215004; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106;  
3. 国网江苏省电力公司, 江苏省南京市 210024; 4. 国家电力调度控制中心, 北京市 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,一旦其相角参考点上的 PMU 电压相角量测为坏数据,将影响其余所有相角量测引入,污染有功量的总体计算,严重影响计算精度。文中在建立混合量测状态估计计算模型的基础上,提出一种解决相角参考点坏数据问题的处理方法,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,形成雅可比矩阵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,当相角参考点上的 PMU 电压相角量测为坏数据时同样能够被检测和辨识,彻底消除其对计算结果的不利影响。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; 相量测量单元; 广域测量系统; 坏数据辨识; 相角参考点; 迭代计算

## 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<sup>[1-2]</sup>。随着电网调度自动化水平的不断提高和新一代智能电网调度控制系统的广泛应用<sup>[3]</sup>,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<sup>[4-6]</sup>。传统状态估计使用的实时数据主要由数据采集与监控(SCADA)应用提供,近年来,在利用电网广域测量系统(WAMS)应用提供的高精度相量测量单元(PMU)量测<sup>[7-8]</sup>改善状态估计性能方面取得了不少成果<sup>[9-16]</sup>。现阶段国内电网中配置的 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 和 SCADA 混合量测进行状态估计。

SCADA 量测集中不包含相角量测,基于此进行传统状态估计时,必需任意指定一个节点作为相角参考点,令其电压相角为  $0^\circ$ ,其余节点的电压相角为该节点与参考点之间的相角差,实践证明这种处理方式能很好地表述系统的运行状态。WAMS 中 PMU 相角量测通常也指定了一个节点作为相角参考点,令其相角量测为  $0^\circ$ ,其余节点的相角量测实际为该节点与参考点之间的相角量测差。为了将 PMU 相角量测引入状态估计,首先应将 PMU 相角量测从相对于量测相角参考点的相角差转化为相对于状态估计相角参考点的相角差<sup>[10-16]</sup>。

文献[11-12]提到先不考虑 PMU 量测进行状态估计,根据多个节点相角估计值和 PMU 相角量测之差的平均值来估计一个较好的参考点相角差。但该方法必须通过预先进行一次状态估计计算,并且此相角差是一个随时间变化的量,需要在每次估计前更新,实际工程中并不实用。文献[13-14]提到采用各个节点之间的相对角度差值量测引入状态估计计算的思路,可避免不同参考点相角差变换问题,并回避相角参考点量测出现坏数据的风险,但该方法同样存在问题:①WAMS 中节点 PMU 电压相角量测是该节点与参考点之间相对角度差的计算结果,如采用各个节点之间的相对角度差值作为量测引入,必须再进行一轮计算,多次计算显然会增大大量测误差,需计算实际量测误差并进行加权;②一旦发现量测为坏数据,不便于在两个节点之间准确定位子站问题;③考虑 PMU 布点还非常稀疏的现状,节点之间的相对角度差值量测往往不能与具体线路相关联,不便于量测和估计结果的具体表述。

文献[12-16]均提到选择 PMU 相角量测参考点作为状态估计的相角参考点的思路,这是一种直观且易于实现的相角差转化方法。但在实际工程中应用该方法时,如果使用传统状态估计计算模型引入 PMU 相角量测,由于其在形成雅可比矩阵时,作为角度的唯一参考的相角参考点状态量对应列并不建立,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辨识出来。同时,由于实际 WAMS 所提供的 PMU 电压相角量测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。由此可见,该方法同样存在致命缺陷。

本文考虑实际工程需求,通过改造现有成熟商用的传统状态估计程序,完善上述文献[12-16]方法,克服其中的缺陷,在建立混合量测状态估计计算模型,成功引入了 PMU 量测的基础上,着重提出一种解决相角参考点坏数据问题的处理方法,能使相角参考点上的 PMU 电压相角量测为坏数据时一样能够被检测和辨识,消除其对计算结果的不利影响。

## 1 关键技术

### 1.1 混合量测状态估计计算模型

首先,通过选择 PMU 相角量测的相角参考点作为混合量测状态估计的相角参考点,统一所有 PMU 电压相角量测和状态估计的相角参考点,从而使所有 PMU 相角量测能够被状态估计采用。

分别以  $\delta, \theta, r$  表示电压相角量测值矢量、待求矢量和残差矢量<sup>[1-2]</sup>,估计计算时,混合量测状态估计中相角参考点上 PMU 相角量测  $\delta_{\text{slack}}$  对应的量测方程如式(1)所示,其他 PMU 相角量测  $\delta_i$  对应的量测方程如式(2)所示。

$$\delta_{\text{slack}} = \theta_{\text{slack}} \quad (1)$$

$$\delta_i = \theta_i - \theta_{\text{slack}} \quad (2)$$

另外,在传统非线性状态估计中直接利用高精度 PMU 支路电流相量量测存在诸多不便,但是利用 PMU 提供的电压相量和电流相量计算出相关支路功率量测值,能够被状态估计很好地利用。这部分支路功率量测的量测方程与 SCADA 支路功率量测引入状态估计时的量测方程一样。

PMU 量测中除了电压相角量测以外,其他类型量测在 SCADA 量测系统中都同样包含,这些 PMU 量测的计算权值和坏数据处理可以直接采用和借鉴传统状态估计的相关处理技术。

### 1.2 相角参考点克服坏数据影响处理

由于传统状态估计中参考点的状态量被固定且不参与估计计算,相角参考点上没有相角量测被引入计算,同时相角参考点的相角估计结果也一定是  $0^\circ$ ,显然无法通过式(3)计算其量测残差值,参考点相角量测坏数据也就无法通过量测残差搜索辨识。

$$r_i = \delta_i - h_i(\hat{\theta}) \quad (3)$$

式中:  $\hat{\theta}$  为系统的状态估计矢量;  $h_i(\cdot)$  为量测  $\delta_i$  相对于状态矢量的非线性函数;  $r_i$  为量测  $\delta_i$  的残差。

针对混合量测状态估计,本文创新性地提出一种相角参考点问题的解决新思路。改变传统状态估计将相角参考点的状态量值固定,不参与迭代求解的做法,在形成状态估计雅可比矩阵时包含 PMU 量测对应行和相角参考点状态量对应列,所有相角量测作为相对值引入估计计算,将相角参考点的状态量不再特殊地固定为  $0^\circ$ ,同其他节点的状态量一样参与迭代求解。相角参考点的相角估计计算结果将不一定是  $0^\circ$ ,可以通过式(3)计算其量测残差值,从而使得当相角参考点上的相角量测为坏数据时一样能够通过量测残差搜索将其检测辨识出来,使其不会影响其余相角量测的引用,全面消除其对状态估计精度的不良影响。

在此特别说明一点,对于成熟商用的传统状态估计程序,如果直接将其相角参考点的状态量不再特殊地固定为  $0^\circ$ ,同其他节点的状态量一样参与迭代求解,由于这时候量测集中并不包含任何电压相角量测,计算实际上是很难收敛的。也就是说,采用本文方法是有前提条件的,一是针对的必须是混合量测状态估计,二是必须保证每个计算电气岛中至少有 1 个 PMU 电压相角量测能够参与计算,当该条件不满足时,程序需要自动在该岛参考点上增加 1 个伪相角量测,通常为相角量测  $0^\circ$ 。参与计算的 PMU 相角量测越多,本文方法在消除相角参考点上的相角量测为坏数据对状态估计精度的不良影响方面作用将越大。

综上所述,现阶段能够被混合量测状态估计采用的 PMU 量测主要包括母线电压相角和幅值量测、线路和变压器支路量测以及少量的发电机功率量测。形成的混合量测状态估计有功和无功量测雅可比矩阵分别如式(4)和式(5)所示,其中,由于参考点状态量参与迭代求解而增加了 1 列,由于引入了上述 PMU 量测而增加了相关对应行。

$H_P =$

$$H_P = \begin{matrix} & \cdots & \theta_i & \cdots & \theta_j & \cdots & \theta_{\text{slack}} & \cdots \\ \begin{matrix} P_i \\ P_i^* \\ P_{ij} \\ P_{ij}^* \\ \delta_i^* \\ \delta_{\text{slack}}^* \end{matrix} & \begin{bmatrix} \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_{\text{slack}}} & \cdots \\ \cdots & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_i} & \cdots & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_j} & \cdots & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_{\text{slack}}} & \cdots \\ \cdots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} & \cdots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} & \cdots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_{\text{slack}}} & \cdots \\ \cdots & \frac{\partial P_{ij}^*}{\partial \theta_i} & \cdots & \frac{\partial P_{ij}^*}{\partial \theta_j} & \cdots & \frac{\partial P_{ij}^*}{\partial \theta_{\text{slack}}} & \cdots \\ \cdots & 1 & \cdots & \cdots & \cdots & -1 & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1 & \cdots \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

$H_Q =$

|               |     |                                          |     |                                          |     |                                                |     |
|---------------|-----|------------------------------------------|-----|------------------------------------------|-----|------------------------------------------------|-----|
|               | ... | $V_i$                                    | ... | $V_j$                                    | ... | $V_{slack}$                                    | ... |
| $Q_i$         | ... | $\frac{\partial Q_i}{\partial V_i}$      | ... | $\frac{\partial Q_i}{\partial V_j}$      | ... | $\frac{\partial Q_i}{\partial V_{slack}}$      | ... |
| $Q_i^*$       | ... | $\frac{\partial Q_i^*}{\partial V_i}$    | ... | $\frac{\partial Q_i^*}{\partial V_j}$    | ... | $\frac{\partial Q_i^*}{\partial V_{slack}}$    | ... |
| $Q_{ij}$      | ... | $\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i}$   | ... | $\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j}$   | ... | $\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_{slack}}$   | ... |
| $Q_{ij}^*$    | ... | $\frac{\partial Q_{ij}^*}{\partial V_i}$ | ... | $\frac{\partial Q_{ij}^*}{\partial V_j}$ | ... | $\frac{\partial Q_{ij}^*}{\partial V_{slack}}$ | ... |
| $v_i^*$       | ... | 1                                        | ... | ...                                      | ... | ...                                            | ... |
| $v_{slack}^*$ | ... | ...                                      | ... | ...                                      | ... | 1                                              | ... |

(5)

式中: $P_i, P_{ij}$ 和 $Q_i, Q_{ij}$ 分别为 SCADA 有功和无功节点注入功率量测和支路功率量测; $P_i^*, P_{ij}^*$ 和 $Q_i^*, Q_{ij}^*$ 分别为 PMU 有功和无功节点注入功率量测和支路功率量测; $\delta_i^*, v_i^*$ 和 $\delta_{slack}^*, v_{slack}^*$ 分别为 PMU 各节点和相角参考点电压相角和幅值量测; $\theta_i, \theta_j, \theta_{slack}$ 分别为各节点及相角参考点电压相角状态量; $V_i, V_j, V_{slack}$ 分别为各节点及相角参考点电压幅值状态量。

1.3 进一步的思考

在混合量测状态估计中,PMU 量测的引入增加了状态估计量测方程数,可以使原来系统中的关键量测转变为冗余量测,从而提高了系统的可观测性和坏数据可辨识性。为适应 PMU 电压相角量测的引入,传统可观测性分析模块也需要改造。

采用本文方法进行混合量测状态估计计算时,当电气岛中仅含有 1 个 PMU 电压相角量测时,该孤立相角量测为坏数据将不会影响状态估计结果;当电气岛中存在 2 个或者更多相角量测时,此时相角量测为坏数据将影响状态估计结果;当相角量测达到一定冗余度时,混合量测状态估计将能检测和辨识相角量测中的坏数据。电气岛中至少存在 2 个相角量测时才可以检测相角量测中的坏数据,至少存在 3 个相角量测时才可以检测并辨识相角量测中的坏数据。当系统中存在多个电气岛时,为保证可观测性,每个电气岛中至少应含有 1 个 PMU 相角量测,当 1 个电气岛中无相角量测时,混合量测状态估计将自动给其增加 1 个伪相角量测。

PMU 电压相角量测是一种全新类型的量测,本文在引入 PMU 电压相角量测时,其计算权值确定和坏数据辨识虽然采用了类似于其他类型量测的处理方式,但效果并不是最理想的,后续还需要探索并完善 PMU 电压相角量测的计算权值确定和坏数据辨识方法。

2 程序实现

本文方法已成功应用到实际工程中的混合量测状态估计中,处理模块的相关环节包括以下几方面。

- 1)读取 WAMS 中相角参考母线信息。
- 2)将 WAMS 的相角参考母线作为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)基于非线性状态估计模型,形成雅可比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。

该方法不但统一了 PMU 电压相角量测和状态估计的相角参考点,而且能彻底处理相角参考点上 PMU 电压相角量测出现坏数据的情况,且不用对传统非线性状态估计程序作较大改动。具体增加的程序流程如图 1 所示。

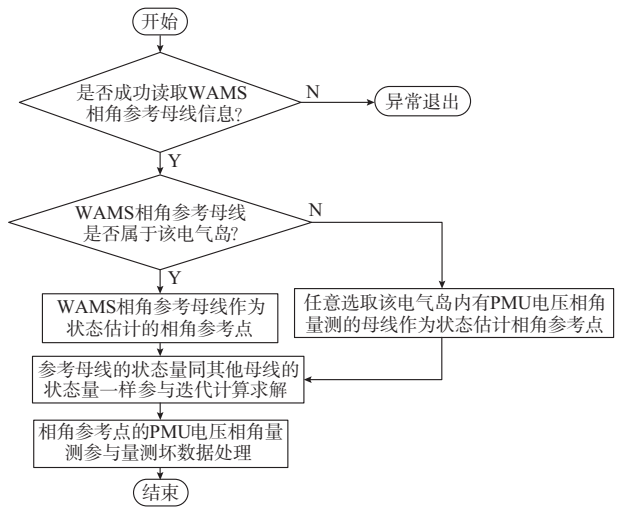


图 1 相角参考点处理模块的程序流程  
Fig.1 Flow chart for processing module of phase angle reference bus

3 实例验证

为了充分验证本文处理方法的有效性,基于某省级调度机构的混合量测状态估计,选取真实算例进行验证。选取某区域电网作为计算网络,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 子站全球定位系统(GPS)失步,新海 220 kV 正母线上的 PMU 电压相角量测置为坏数据。

首先,设置新海 220 kV 正母线作为混合量测

状态估计的相角参考点。然后,基于某个数据断面,用不处理相角参考点问题的算法(算法 1)和应用本文方法处理相角参考点问题的算法(算法 2)分别计算一次,两种算法结果的比较如表 1 和表 2 所示,其中表 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°。

表 1 两种算法遥测合格率

Table 1 Percent of pass of telemetering for two algorithms

| 量测类型   | 量测<br>点数 | 算法 1 结果  |           | 算法 2 结果  |           |
|--------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|        |          | 合格<br>点数 | 合格<br>率/% | 合格<br>点数 | 合格<br>率/% |
| 母线电压相角 | 36       | 2        | 4.55      | 34       | 90.91     |
| 母线电压幅值 | 811      | 806      | 99.38     | 806      | 99.38     |
| 线路有功量  | 1 695    | 1 418    | 83.66     | 1 603    | 94.57     |
| 线路无功量  | 1 664    | 1 637    | 98.38     | 1 638    | 98.44     |
| 变压器有功量 | 752      | 672      | 89.36     | 727      | 96.66     |
| 变压器无功量 | 766      | 750      | 97.91     | 751      | 98.04     |
| 发电机有功量 | 114      | 110      | 96.49     | 112      | 98.25     |
| 发电机无功量 | 114      | 113      | 99.12     | 113      | 99.12     |
| 全部有功量  | 2 561    | 2 200    | 85.90     | 2 442    | 95.35     |
| 全部无功量  | 2 544    | 2 500    | 98.27     | 2 502    | 98.35     |

对比表 1 和表 2,可得以下结论。

表 2 典型 PMU 相角量测值和估计结果

Table 2 Phase angle measurement values and estimation results for typical PMU

| 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/% | 是否为坏数据 | 估计结果/(°) | 误差比/% | 是否为坏数据 |
| 新海 220 kV 正母    | 0       | 0        | 0     | 否      | 61.27    | 17.02 | 是      |
| 东善桥 500 kV I 段母 | 63.01   | 2.14     | 16.91 | 是      | 61.85    | 0.32  | 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 I 段母  | 52.58   | -8.27    | 16.90 | 是      | 51.12    | 0.38  | 否      |
| 环保 220 kV 正母    | 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      |
| 利港二 500 kV I 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      |
| 华通 220 kV 正母    | 55.22   | -5.39    | 16.84 | 是      | 54.24    | 0.27  | 否      |
| 天厂 220 kV 正母    | 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      |
| 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      |

4 结语

随着变电站相量量测、广域动态监视和电网在线分析等技术的快速发展,研究有 PMU 量测参与的混合量测状态估计极具现实意义。本文结合实际工程,分析了将 PMU 量测引入状态估计所面临的实际问题,成功将 PMU 量测引入非线性状态估计中,并着重提出了一种解决相角参考点问题的行之有效的方法。

后续研究将是如何利用好 PMU 量测改善状态

1)当混合量测状态估计不处理相角参考点问题时,相角参考点上的 PMU 相角量测为坏数据却没有被辨识出来,除了相角参考点外其他的 PMU 相角量测全部被错误辨识为坏数据,如表 1 和表 2 中算法 1 结果所示,漏判的坏数据数目为 2 个,误判的坏数据数目为 34 个;同时,状态估计有功量测合格率被明显降低,如表 1 算法 1 结果所示,有功量测合格率降为 85.9%,相角参考点上的相角量测坏数据严重影响了状态估计精度。

2)当混合量测状态估计采用本文方法处理相角参考点问题时,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 1 和表 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 2 个,完全没有影响其余相角量测的引入;同时,状态估计有功量测合格率没有受到任何影响,如表 1 算法 2 结果所示,有功量测合格率依然为 95.35%,相角参考点上的相角量测坏数据没有影响到状态估计精度。

可见,上述试验和结果对比分析能够充分证明本文所述方法的有效性。

估计的性能,最大限度发掘 PMU 量测在状态估计应用上的潜力。可以考虑研究:①克服 PMU 量测与 SCADA 量测采集时延不一致对状态估计计算精度造成的不利影响;②探索适用于 PMU 电压相角量测引入时的计算权值确定方法;③探索适用于 PMU 电压相角量测的坏数据辨识方法。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] ABUR A, GÓMEZ EXPÓSITO A. Power system state estimation: theory and implementation [S]. New York, USA: Marcel Dekker, 2004.
- [2] SCHWEPPE F C, WILDES J. Power system static-state estimation: Part I exact model [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 120-135.
- [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] 顾锦汶. 对有关标准中关于状态估计的一些不同意见 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 134-135.  
GU Jinwen. Disagreements discussion on state estimation in related standards [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 134-135.
- [5] 何光宇, 董树锋. 基于量测不确定度的电力系统状态估计: (一) 结果评价 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 21-24.  
HE Guangyu, DONG Shufeng. Power system static-state estimation based on uncertainty of measurement: Part one result evaluation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 21-24.
- [6] 李立志, 孙宏斌, 张伯明, 等. 南方电网交直流混合实时状态估计的应用 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 106-110.  
LI Dazhi, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Application of an AC/DC hybrid real-time state estimator in China southern grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 106-110.
- [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 Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1643-1650.
- [9] 李虹, 李卫国, 毕天姝, 等. 基于 WAMS 的电力系统实时状态估计和预报 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 35-39.  
LI Hong, LI Weigu, BI Tianshu, et al. Power system real-time state estimation and prediction based on WAMS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 35-39.
- [10] PHADKE A G, THORP J S, KARIMI K J. State estimate with phasor measurements [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(1): 233-241.
- [11] REYNALDO F N. State estimation and voltage security monitoring using synchronized phasor measurements [D]. Blacksburg, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [12] KEMA. Metrics for determining the impact of phasor measurements on power system state estimation [R]. 2006.
- [13] 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.
- [14] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的状态估计研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 98-103.  
DING Junce, CAI Zexiang, WANG Keying. An overview of state estimation based on wide area measurement system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 98-103.
- [15] 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.
- [16] 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, 10(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, 10(10): 30-35.

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

高宗和(1962—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统分析与控制。

苏大威(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电网调度自动化。

(编辑 蔡静雯)

## Solution to Bad Data Problem of Phase Angle Reference Bus for State Estimation with Hybrid Measurement

DING Hongen<sup>1</sup>, GAO Zonghe<sup>2</sup>, SU Dawei<sup>3</sup>, ZHAO Jiaqing<sup>1</sup>, CHANG Naichao<sup>4</sup>, GONG Chengming<sup>2</sup>

(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. National Electric Power Dispatching and Control Center, 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 the PMU voltage phase angle measurement results on the reference bus are found to be bad data, the introduction of all the remaining phase angle measurements will be affected and the overall calculation of active parameters will be corrupted, which will seriously influence the accuracy of calculation. This paper proposes a new method to solve the bad data problem of phase angle reference bus based on the calculation model of state estimation with hybrid measurement. By changing the conventional method of taking the reference bus's state parameter as a definite value and ridding it from the iterative calculation, the proposed method adds a corresponding column of reference bus's state parameter and a corresponding row of PMU measurement in the Jacobi matrix generated. The reference bus's state parameters are employed in the iterative calculation as other buses. Then bad PMU measurements of reference bus can be detected, identified and removed from the state estimation measurement system so as to thoroughly eliminate its impact on the calculation results. Finally, the effectiveness of the method proposed is verified with an actual power grid example.

**Key words:** state estimation; phasor measurement unit (PMU); wide area measurement system (WAMS); bad data detection; phase angle reference bus; iterative calculation