

# 基于 PMU 量测数据和 SCADA 数据融合的 电力系统状态估计方法

薛 辉, 贾清泉, 王 宁, 王海棠, 马红霞  
(燕山大学 电气工程学院, 河北省 秦皇岛市 066004)

## A Novel Power System State Estimation Method Based on Merging PMU-Measured Data Into SCADA Data

XUE Hui, JIA Qing-quan, WANG Ning, WANG Hai-tang, MA Hong-xia

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** To remedy the defect of traditional static state estimation methods, an improved power system state estimation method, which merges the data of partial nodes measured by PMU into SCADA data then perform whole system state estimation, is proposed. The proposed method simplifies Jacobian matrix of power system and saves calculation time. For this purpose, after merging the voltage and current data measured by PMU into SCADA data a fast-decouple method is researched. According to the disadvantages of SCADA data, the power flow data is forecasted by historical database and the power system state is analyzed by PMU-measured data, then the dynamic monitoring of whole system state is performed. Tested by example and results, the new method improves the accuracy of results, reduces the number of iteration, and describes the variety process of power systems state accurately compared to traditional methods, which provide more information for control center to make the next decision making.

**KEY WORDS:** state estimation; phasor measurement unit (PMU); global positioning system (GPS); power flow forecasting; fast-decoupled method

**摘要:** 针对传统静态状态估计方法的缺点, 提出了一种改进的电力系统状态估计方法, 即将部分节点相量测量单元 (phasor measurement unit, PMU) 量测数据与监控数据采集 (supervisory control and data acquisition, SCADA) 量测数据融合进行电力系统的全网状态估计。该方法简化了系统的雅可比矩阵, 缩短了计算时间。文章研究了 PMU 和 SCADA 系统融合改进后的快速分解法, 针对 SCADA 量测数据的缺点, 通过历史数据库对潮流数据进行预测, 并依据 PMU 量测量对系统进行分析, 继而进行系统全网状态的动态监测。

通过算例证明, 与传统的估计方法相比, 该方法改善了状态估计的精确性, 减少了迭代次数, 细致地描绘了电网状态的变化过程, 为调度中心下一步的决策提供了依据。

**关键词:** 状态估计; 相量测量单元 (PMU); 全球定位系统 (GPS); 潮流预测; 快速分解法

## 0 引言

为保证电力系统安全、经济运行, 必须要迅速、准确、全面掌握电力系统实际运行状态, 特别是“8.14 美加大停电”事故发生以后, 人们进一步认识到状态估计在电网安全运行中的重要作用<sup>[1-2]</sup>。

状态估计也称为滤波, 它是利用实时量测系统的冗余度来提高数据精度, 自动排除随机干扰引起的错误信息, 估计或预报系统的运行状态 (或轨迹), 分为静态状态估计和动态状态估计<sup>[3-4]</sup>: 静态估计是利用同一断面的量测信息估计电网的状态; 动态估计是利用当前时刻的量测信息和前一时刻的量测信息对当前时刻的状态进行估计<sup>[5-6]</sup>。动态状态估计法不仅具有静态估计的所有优点, 还能实现经济分配、安全预估和预防控制等在线功能<sup>[7-9]</sup>。目前的状态估计大都属于静态状态估计, 量测数据源于监控数据采集 (supervisory control and data acquisition, SCADA) 系统, 一般包括节点注入功率、支路功率和节点电压幅值, 数据每 2 s 传送一次。由于系统的量测信息是通过远动装置传送到调度中心, 远动装置的误差及传送过程中各个环节的误差使得迭代求解出来的电压相量精度难以得到保证<sup>[10-11]</sup>。

近年来, 全球定位系统 (global position system, GPS) 全面建成并投入运行, 由于其时间传递精确而

在电力系统中得到了越来越广泛的应用, 基于 GPS 的相角测量装置(phasor measurement unit, PMU)也逐步应用于电力系统。PMU 传送数据较快且具有相角量测装置, 因此量测数据的精度比 SCADA 高。另外直接测量节点电压相量和支路电流相量也提高了其状态估计的精度。文献[12]分析了引入 PMU 测量值对电力系统状态估计的影响。文献[13]给出了完全使用相量量测的基于直角坐标系的实数形式电力系统线性量测方程和相应线性静态状态估计算法, 但没有充分融合 SCADA 系统的量测信息。文献[14-16]提出了基于同步测量在状态估计中的应用和发展前景, 通过状态估计对系统进行了动态监测。文献[17-20]提出了在传统的 SCADA 量测系统基础上, 部分节点安装 PMU 后混合量测的状态估计模型, 该模型提高了电力系统状态估计精度。但是由于这些方法也是基于同一个断面的量测信息, 因此仍属于静态状态估计。

本文将利用部分节点 PMU 量测数据与 SCADA 量测数据融合进行电力系统的全网状态估计。该方法简化了系统的雅可比矩阵, 缩短了计算时间, 改善了估计收敛性, 更适应于现代电力系统发展的需要。

### 1 传统快速分解方法

传统快速分解算法属于静态状态估计, 它充分利用了电力系统的物理性质, 而忽略了某些次要因素; 将  $P$ - $q$  和  $Q$ - $V$  分开计算, 降低了问题的阶次, 减少了内存的使用量, 提高了每次迭代的计算速度。

快速分解状态估计的迭代修正公式为

$$\begin{aligned} A\Delta q^{(l)} &= a^{(l)} \\ B\Delta V^{(l)} &= b^{(l)} \\ a^{(l)} &= V_0^2 [(-B_a)^T R_a^{-1} [Z_a - h_a(V_i, q_i)]] \Big|_{\substack{q=q^{(l)} \\ V=V^{(l)}}} \\ b^{(l)} &= V_0 [(-B_r)^T R_r^{-1} [Z_r - h_r(q, V)]] \Big|_{\substack{q=q^{(l)} \\ V=V^{(l)}}} \end{aligned}$$

$$A = V_0^4 [(-B_a)^T R_a^{-1} (-B_a)]$$

$$B = V_0^2 [(-B_r)^T R_r^{-1} (-B_r)]$$

式中:  $V_0$  为系统的参考节点电压;  $Z_a$  为有功量测值;  $Z_r$  为无功量测值、节点电压模值;  $h_a(V_i, q_i)$ 、 $h_r(V_i, q_i)$  分别为有功、无功量测方程

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ii} - V_i V_j g_{ij} \cos q_{ij} - V_i V_j b_{ij} \sin q_{ij} \quad (1)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ii} + y_c) - V_i V_j g_{ij} \sin q_{ij} + V_i V_j b_{ij} \cos q_{ij} \quad (2)$$

$$q_{ij} = q_i - q_j \quad (3)$$

$$P_i = \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_i = \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij}) \quad (5)$$

式中:  $g_{ij} + jb_{ij}$  为线路导纳;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  为节点导纳;  $q_{ij}$  为节点间的相角差;  $y_c$  为线路的对地导纳。

根据常规潮流计算的经验和,  $B_a$  取支路电抗的倒数(忽略对有功功率分布影响很小的变压器非标准变比和线路对地电容),  $B_r$  取支路导纳的虚部时具有最快的迭代收敛速度。

将以上函数代入修正公式得出

$$\begin{cases} (-B_a)^T R_a^{-1} (-B_a) \Delta q_i^{(l)} = \\ \frac{1}{V_0^2} [(-B_a)^T R_a^{-1} [Z_a - h_a(V_i, q_i)]] \Big|_{\substack{q=q^{(l)} \\ V=V^{(l)}}} \\ (-B_r)^T R_r^{-1} (-B_r) \Delta V_i^{(l)} = \\ \frac{1}{V_0} [(-B_r)^T R_r^{-1} [Z_r - h_r(V_i, q_i)]] \Big|_{\substack{q=q^{(l)} \\ V=V^{(l)}}} \end{cases} \quad (6)$$

通过以上传统快速分解法编制状态估计程序, 其流程如图 1 所示。

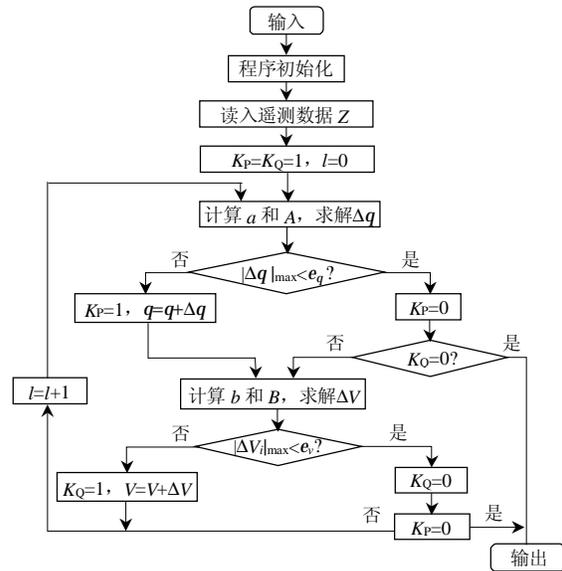


图 1 快速分解法流程图

Fig. 1 The flow chart of the fast-decoupled method

(1) 给定电压相角、幅值的初始值。

(2) 输入遥测数据, 包括节点电压相角、幅值、节点注入功率和支路潮流。

(3)  $K_p$  和  $K_q$  分别为  $P$ - $q$  和  $Q$ - $V$  的收敛标志, 0 表示收敛, 1 表示未收敛,  $l$  表示迭代次数。

(4) 将现在的  $q$  和  $V$  值代入量测函数  $h_a(V_i, q_i)$ , 求出相角修正矢量  $\Delta q$ , 检查其是否合格。若合格转入检查  $\Delta V$ ; 若不合格修正  $q$  并继续迭代直至  $\Delta q$  和  $\Delta V$  同时收敛, 输出  $q_i$  和  $V_i$ 。

## 2 改进快速分解方法

### 2.1 潮流预测

实际电力系统运行中, SCADA 量测数据每隔 2s 记录一次, 如果只利用 SCADA 量测数据进行状态估计, 系统至少需要每隔 2s 才能进行一次状态估计, 且精度不是很高。PMU 量测数据比较快, 大约每 40 ms 传送一次, 这样在每两次 SCADA 数据上传期间有 50 个 PMU 量测数据传送到调度中心。在传统状态估计中这 50 个时刻的 PMU 上传数据没有参与状态估计, 造成了数据浪费。如果能将这 50 次的 PMU 量测数据融入到 SCADA 量测数据中进行高频率的状态估计, 将改善状态估计的精度和动态监测过程。两种量测数据融合见图 2。

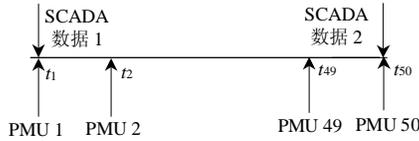


图 2 两种量测数据融合图

Fig. 2 The picture of two measured data fusion

由于 SCADA 量测数据每隔 2s 记录一次, 而在这 2s 内每个 PMU 上传时刻(40 ms)的 SCADA 量测数据无法量测, 因此需要一种潮流预测的方法来预测每个 PMU 上传时刻的 SCADA 潮流值。

用该方法对有功潮流和无功潮流分别进行预测, 预测公式为

$$\hat{S}_{i+1}^0 = \hat{S}_i + \overline{\Delta S}_i \quad (7)$$

式中:  $\overline{\Delta S}_i$  为预测的有功潮流或无功潮流的平均变化率值;  $\hat{S}_{i+1}^0$  为预测的  $i+1$  时刻的有功或无功潮流值;  $\hat{S}_i$  为  $i$  时刻计算出的状态估计值(与实际潮流值更加接近)。

取前 15 d(或更长时间)的 SCADA 量测值为历史数据, 由于 SCADA 数据为每隔 2s 上传一次, 根据每天所有的 SCADA 数据绘制当天的潮流曲线。假设曲线函数  $S = F(t)$ , 对函数在  $i$  时刻求导, 变化率为

$$\overline{\Delta S}_i = \frac{1}{15} \sum_{n=1}^{15} \Delta S_i \quad (8)$$

通过这个变化率可以预测下一 PMU 上传时刻(40 ms)的 SCADA 量测数据, 将这些数据直接进行状态估计结果比较粗略, 加入当前时刻的 PMU 值后就可进行更精确的状态估计。

为证明潮流求导的可行性, 在第一个 PMU 上传时刻处安装一套同样的 SCADA 系统, 记录此时的潮流量测, 使用该方法预测出的潮流量测和实际

潮流量非常接近。

考虑到 SCADA 量测数据的精确性问题, 本文对这些数据设定权重, 对精度比较高的 SCADA 量测值选用比较高的权重, 对量测精度较低的 SCADA 量测数据选用较低的权重, 以便根据这些 SCADA 量测数据的精度来确定其在状态估计过程中的重要性。

### 2.2 PMU 支路电流相量在状态估计中的应用模型

目前, 大部分基于 PMU 量测数据的状态估计只使用节点电压相量量测, 支路电流相量量测在电力系统状态估计中应用很少。

本文充分考虑了 PMU 的节点电压相量和支路电流相量, 并通过它们对系统进行可观性分析。利用装置 PMU 节点的邻接节点和相关联支路的伪量测数据, 可增加系统量测数据的冗余度, 提高系统的计算精度和收敛性。

单支路电路如图 3 所示, 装置 PMU 节点 1 的电压相量  $\mathcal{U}_1 = U_1 \angle q_{u_1}$  和支路电流相量  $\mathcal{I}_1 = I_1 \angle q_{i_1}$  为已知,  $d_{u_1}$ 、 $d_{i_1}$ 、 $d_{q_{u_1}}$ 、 $d_{q_{i_1}}$  分别为电压幅值、电流幅值、电压相角和电流相角量测误差的标准差。

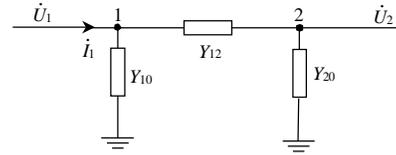


图 3 单支路电路图

Fig. 3 Diagram of one branch circuit

(1) 将电流相量变换为 PMU 相邻节点电压相量的方法。

由已知量  $\mathcal{U}_1 = U_1 \angle q_{u_1}$  和  $\mathcal{I}_1 = I_1 \angle q_{i_1}$  计算相邻节点 2 的电压相量, 将此电压相量应用于状态估计算法中作为节点 2 的电压相量伪量测数据, 增加了系统的已知量测量。

由节点 1 的电流方程可得出

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

根据误差传递原理, 设  $\mathcal{U}_2 = U_2 \angle q_{u_2}$ ,  $\mathcal{U}_2$  的幅值和相角误差方差为

$$R_{u_2} = \left( \frac{\partial U_2}{\partial U_1} \right)^2 d_{u_1}^2 + \left( \frac{\partial U_2}{\partial q_{u_1}} \right)^2 d_{q_{u_1}}^2 + \left( \frac{\partial U_2}{\partial I_1} \right)^2 d_{i_1}^2 + \left( \frac{\partial U_2}{\partial q_{i_1}} \right)^2 d_{q_{i_1}}^2$$

$$R_{q_{u_2}} = \left( \frac{\partial q_{u_2}}{\partial U_1} \right)^2 d_{u_1}^2 + \left( \frac{\partial q_{u_2}}{\partial q_{u_1}} \right)^2 d_{q_{u_1}}^2 + \left( \frac{\partial q_{u_2}}{\partial I_1} \right)^2 d_{i_1}^2 + \left( \frac{\partial q_{u_2}}{\partial q_{i_1}} \right)^2 d_{q_{i_1}}^2$$

由此可得出节点 2 的等效电压量测的权重  $R_{u_2}^{-1}$

和  $R_{q_{u_2}}^{-1}$ 。

(2) 将电流相量变换为支路潮流的方法。

已知量测量  $\hat{U}_1 = U_1 \angle q_{u_1}$  和  $\hat{I}_1 = I_1 \angle q_i$ ，可求出相关联支路 1-2 等值潮流量

$$\begin{cases} P = U_1 I_1 \cos(q_{u_1} - q_i) \\ Q = U_1 I_1 \sin(q_{u_1} - q_i) \end{cases}$$

变换后等值量测的有功、无功量测误差方差根据传播理论可确定为

$$\begin{aligned} R_P &= \left( \frac{\partial P}{\partial U_1} \right)^2 d_{u_1}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial q_{u_1}} \right)^2 d_{q_{u_1}}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial I_1} \right)^2 d_{I_1}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial q_i} \right)^2 d_{q_i}^2 \\ R_Q &= \left( \frac{\partial Q}{\partial U_1} \right)^2 d_{u_1}^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial q_{u_1}} \right)^2 d_{q_{u_1}}^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial I_1} \right)^2 d_{I_1}^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial q_i} \right)^2 d_{q_i}^2 \end{aligned}$$

由此可得出支路 1-2 等效功率量测的权重  $R_P^{-1}$  和  $R_Q^{-1}$ 。

### 2.3 改进动态估计算法

#### 2.3.1 量测精度不高时的状态估计

假设 PMU 量测精度不是很高时，给出权重值，将 PMU 测得的电压幅值和相角作为已知量测值，同时该节点的电压幅值和相角仍然作为待求状态量进行迭代，其相邻节点电压伪量测和相关联支路功率伪量测均作为已知量测值参加状态估计计算，此时的状态估计相当于增加了量测量，增加了系统的冗余度，使得估计出的状态量更加准确。状态估计步骤如下：

(1) 融入不太精确的 PMU 值后，计算出相邻节点的电压伪量测和相关联支路的功率作为量测值。

由于增加了量测信息，使迭代方程(6)中参数  $B_a$  矩阵增加了行向量，同样  $B_r$  矩阵也增加了行向量。 $Z_a$  为 2.1 节部分预测的有功量测值和 PMU 的量测电压相角，即

$$Z_a = [\hat{P}_{ij}^0 \ \hat{P}_i^0 \ q_i \ P]^T \quad (9)$$

式中： $P$  为装设 PMU 节点相关联支路的等效有功潮流； $\hat{P}_{ij}^0$ 、 $\hat{P}_i^0$  为有功预测值； $q_i$  为 PMU 量测电压相角及邻接节点电压相角。

$Z_r$  为 2.1 节部分预测的无功量测值和 PMU 的量测电压幅值，即

$$Z_r = [\hat{Q}_{ij}^0 \ \hat{Q}_i^0 \ V_i \ Q]^T \quad (10)$$

式中： $Q$  为装设 PMU 节点相关联支路的等效无功潮流； $\hat{Q}_{ij}^0$ 、 $\hat{Q}_i^0$  为无功预测值； $V_i$  为 PMU 量测电压幅值及邻接节点电压幅值。

(2) 假定各个节点的电压幅值和相角为初始值输入， $l$  为迭代次数，令  $l=0$ ，根据式(1)~(10)

求出  $\Delta q_i^{(0)}$ 。迭代流程为：

1) 若  $|\Delta q_i^{(0)}|_{\max} \leq e_q$  成立，则置  $K_p = 0$  收敛，令  $l = l + 1$ ，利用  $q_i^{(1)} = q_i^{(0)} + \Delta q_i^{(0)}$  与  $V_i^{(0)}$  求出  $\Delta V_i^{(0)}$ 。其中：若  $|\Delta V_i^{(0)}|_{\max} \leq e_v$  成立，则置  $K_Q = 0$ ，输出  $\Delta q_i^{(0)}$ 、 $\Delta V_i^{(0)}$ ；若  $|\Delta V_i^{(0)}|_{\max} > e_v$  不成立，则置  $K_Q = 1$ ，利用  $V_i^{(1)} = V_i^{(0)} + \Delta V_i^{(0)}$  与  $q_i^{(1)}$  求出  $\Delta q_i^{(1)}$ ，重复上述步骤直至  $|\Delta q_i^{(l)}|_{\max} \leq e_q$ ， $|\Delta V_i^{(l)}|_{\max} \leq e_v$  均成立，最后输出  $\Delta q_i^l$  和  $\Delta V_i^l$ 。

2) 若  $|\Delta q_i^{(0)}|_{\max} > e_q$  不成立，则置  $K_p = 1$  不收敛，令  $l = l + 1$ ，利用  $q_i^{(0)}$  与  $V_i^{(0)}$  求出  $\Delta V_i^0$ ，继而求出  $V_i^{(1)}$ ，重复上述判断步骤 1) 和 2)，直至  $|\Delta q_i^{(l)}|_{\max} \leq e_q$ ， $|\Delta V_i^{(l)}|_{\max} \leq e_v$  均成立，最后输出  $\Delta q_i^l$  和  $\Delta V_i^l$ 。

(3) 由第(2)步求出的  $\Delta q_i^l$  和  $\Delta V_i^l$  计算状态估计值  $q_i$  和  $V_i$ 。

(4) 同理可以根据此时刻的系统状态量  $q_i$  和  $V_i$  利用式(1)~(5)推导出此时刻的  $\hat{S}_{i+1}$ ，进而由式(7)求出  $i+2$  时刻 SCADA 潮流预测值  $\hat{S}_{i+2}^0$  和  $i+2$  时刻 PMU 量测值进行  $i+2$  时刻的状态估计，以此类推后面所有时刻的状态估计。

#### 2.3.2 量测精度较高时的状态估计

假设 PMU 测量精度很精确，PMU 量测值可以直接作为状态量，由它计算出的相邻节点电压伪量测作为状态量，这样减少了估计的状态量，降低了计算时间，提高了估计精度。

由于 PMU 量测值比较精确，可以作为已知状态量，与其相邻节点的状态量也可以通过节点电压方程求出，此时网络中未知节点状态量个数减少，使得  $B_a$ 、 $B_r$  矩阵简化，矩阵中对应装设 PMU 节点和相邻节点的列删去。

$Z_a$ 、 $Z_r$  为预测的有功量测值和无功量测值

$$Z_a = [\hat{P}_{ij}^0 \ \hat{P}_i^0 \ P]^T, \quad Z_r = [\hat{Q}_{ij}^0 \ \hat{Q}_i^0 \ Q]^T$$

式中： $P$  为装设 PMU 节点相关联支路的等效有功潮流； $\hat{P}_{ij}^0$ 、 $\hat{P}_i^0$  为有功预测值； $Q$  为装设 PMU 节点相关联支路的等效无功潮流； $\hat{Q}_{ij}^0$ 、 $\hat{Q}_i^0$  为无功预测值。以下步骤同 2.3.1 节中 (2) ~ (4)。

## 3 算例分析

IEEE 9 节点系统如图 4 所示。用电力系统分析软件得到的稳定潮流计算<sup>[21-22]</sup>数据(标么值)作为真

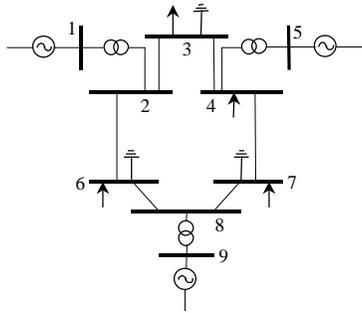


图 4 IEEE 9 节点系统

Fig. 4 IEEE 9-bus power system

值, 以节点 9 为参考节点。

考虑到如果直接将 PMU 测量的绝对电压相角应用到状态估计中会产生参考点的选择问题, 即状态估计的参考点和 PMU 的参考点不一定在同一点上, 本文在状态估计的参考节点 9 上装设 PMU, 这样由 PMU 直接测量的相角与状态估计的相角为同一参考点, 可以直接用于状态估计。

假设在节点 1、5、9 上分别装设 PMU 量测装置, 根据节点电压方程和相关支路电流相量可求出相邻节点 2、4、8 的电压相量和支路潮流伪量测  $P_{12}$ 、 $Q_{12}$ 、 $P_{54}$ 、 $Q_{54}$ 、 $P_{98}$ 、 $Q_{98}$ , 通过误差传递公式可以求出这些伪量测在状态估计计算中的权重。

由 SCADA 量测系统测出 0s 和 2s 时的量测数据, 根据以往的历史数据通过式(8)来预测每隔

40ms(PMU 数据上传时刻)的潮流平均变化率, 并根据这些 SCADA 数据的精度高低确定其权值, 通过 Matlab 软件编制迭代程序对以下几种状态估计方法进行比较:

方法 1: 使用传统的状态估计方法, 仅利用 2s 时的 SCADA 量测数据对系统 2s 时刻进行估计。

方法 2: 使用 2s 时刻的 PMU 量测数据与 2s 时刻的 SCADA 量测数据(包括伪量测数据)融合, 根据 PMU 量测精度的高低分别对系统进行 2s 时刻的状态估计。

方法 3: 在 0s 时刻通过将 SCADA 量测数据和 PMU 量测数据(包括伪量测)的融合计算出 0s 时刻的状态估计值。通过该时刻的状态估计值计算出该时刻的支路潮流量, 再根据以往的历史数据通过式(7)预测 40ms 的支路潮流量。通过这些支路潮流量和当前时刻的 PMU 量测数据对系统进行状态估计, 进而求出 40ms 时刻的状态估计值。以此类推, 根据 40ms 时刻的状态估计值求出该时刻的支路潮流量, 并预测出 80ms 时刻的支路潮流量, 进而融合 80ms 时刻的 PMU 量测进行 80ms 时刻的状态估计, 直至推出 2s 时刻的状态估计值。

通过以上不同方法对 IEEE 9 节点系统进行状态估计得到的状态估计结果见表 1。

表 1 状态估计结果

Tab. 1 The results for state estimation

节点	方法 1		方法 2				方法 3				状态真值	
	$q_i$	$V_i$	PMU 量测精度较低		PMU 量测精度较高		PMU 量测精度较低		PMU 量测精度较高		$q_i$	$V_i$
			$q_i$	$V_i$	$q_i$	$V_i$	$q_i$	$V_i$	$q_i$	$V_i$		
1	9.479 7	1.029 8	9.431 0	1.028 5	9.429 5	1.025	9.427 1	1.028 2	9.3	1.025	9.3	1.025
2	3.397 0	1.033 3	3.552 0	1.029 0	3.590 0	1.026	3.568 5	1.028 7	3.7	1.026	3.7	1.026
3	0.960 7	1.012 7	0.850 0	1.014 0	0.845 0	1.018	0.844 0	1.014 3	0.855 5	1.015	0.7	1.016
4	2.188 7	1.022 5	2.102 5	1.029 0	2.100 0	1.032	2.070 3	1.029 3	2.0	1.032	2.0	1.032
5	5.027 0	1.023 8	4.950 0	1.024 0	4.905 0	1.025	4.903 8	1.024 3	4.7	1.025	4.7	1.025
6	-4.148	1.013 9	-4.065	1.012 0	-4.025	1.010	-4.056	1.001 5	-4.045	1.001	-4.0	0.996
7	-3.800	1.022 3	-3.750	1.020	-3.747	1.019	-3.768	1.020 4	-3.735	1.017	-3.7	1.013
8	-2.337	1.033 3	-2.290	1.033	-2.25	1.026	-2.286	1.032 8	-2.2	1.026	-2.2	1.026

由表 1 可知, 基于 SCADA 量测数据的传统快速分解法误差较大, 且每隔 2s 才对系统进行一次静态估计。融合 PMU 与 SCADA 量测数据的快速分解法相对于传统方法精度有所提高, 但估计间隔仍然为 2s, 属于静态估计。本文提出的改进方法根据 PMU 的量测精度高、低分开对 IEEE9 节点系统进行高频率的状态估计, 结果表明该方法不仅能估计出每个 PMU 传送时刻的系统状态, 还能细致描绘系统的状态变化。随着潮流预测精度提高, 该方法估计出的状态值将更加精确。

## 4 结语

由于 PMU 量测数据与 SCADA 数据相比更加精确, 因此将 PMU 量测数据用于电力系统的状态估计是未来发展的必然趋势。本文将 PMU 量测数据融入到 SCADA 量测数据中, 针对 SCADA 量测数据上传慢的缺点, 采用一种高频率的动态状态估计法对每个毫秒级 PMU 传送时刻进行状态估计, 并通过算例验证了可行性。同时, 将两个 SCADA 数据上传期间各个时刻各个节点的状态量连接成一条光滑的曲线, 反映了系统状态的变化过程, 为

下一步决策提供了依据。另外,由于系统的潮流变化是负荷变化所引起,而系统节点的状态量通过潮流量测估计,因此负荷的变化必然影响着状态估计值的变化,随着负荷预测算法和精度的改善,电力系统的动态状态估计必将迎来新的发展。

## 参考文献

- [1] 印永华,郭剑波,赵建军.美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J].电网技术,2003,27(10):1-6.  
Yin Yonghua, Guo Jianbo, Zhao Jianjun. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected north America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 1-6(in Chinese).
- [2] 王英涛,印永华,蒋彦国.我国实时动态监测系统的发展现状及实施策略的研究[J].电网技术,2005,29(11):42-48.  
Wang Yingtao, Yin Yonghua, Jiang Yiguo. Study on current development situation and implementation strategy of real-time dynamic monitoring system in power system in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 42-48(in Chinese).
- [3] 于尔铿.电力系统状态估计[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [4] Park J K. The concept and design of dynamic state estimation [C]. Proceedings of the American Control Conference San Diego, California, 1999.
- [5] 郭伟,单渊达. M 估计方法及其在电力系统状态估计中的应用[J].中国电机工程学报,2000,20(9):26-31.  
Guo Wei, Shan Yuanda. M-estimation and its application in power system state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 26-31(in Chinese).
- [6] Othman A, Irving A K M R. Uncertainty modelling in power system state estimation[J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(3): 233-239.
- [7] Watson N R. An adaptive Kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 1577-1584.
- [8] Nima A. Short-term bus load forecasting of power systems by a new hybrid method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 333-334.
- [9] Ashwani K. Robust dynamic state estimation of power system harmonics[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(1): 65-74.
- [10] 于尔铿,刘广一,周京阳.能量管理系统(EMS)[M].北京:科学出版,1998.
- [11] 徐建华.状态估计与系统识别[M].北京:科学出版社,1981.
- [12] 丁军策,蔡泽祥,王克英.相量测量单元测量值对状态估计中等效电流测量变换算法的影响[J].电网技术,2005,29(5):47-51.  
Ding Junce, Cai Zexiang, Wang Keying. Influences of measured values from phasor measurement units on equivalent current based measurement transform algorithm state estimation[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 47-51(in Chinese).
- [13] 李强,周京阳,于尔铿.基于相量量测的电力系统线性状态估计[J].电力系统自动化,2005,29(18):24-28.  
Li Qiang, Zhou Jingyang, Yu Erkeng. Power system linear state estimation based on phasor measurement[J]. Automation of Electric

Power Systems, 2005, 29(18): 24-28(in Chinese).

- [14] 许树楷,谢小荣,辛耀中.基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J].电网技术,2005,29(2):44-49.  
Xu Shukai, Xie Xiaorong, Xin Yaozhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system [J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49(in Chinese).
- [15] 肖晋宇,谢小荣,李建.电网广域动态安全监测系统及其动态模拟试验[J].电网技术,2004,28(6):5-9.  
Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Li Jian. Wide-area dynamic security monitoring system for power network and its dynamic simulation [J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 5-9(in Chinese).
- [16] 丁军策,蔡泽祥,王克英.基于广域测量系统的混合量测状态估计算法[J].中国电机工程学报,2006,26(2):58-63.  
Ding Junce, Cai Zexiang, Wang Keying. Mixed measurements state estimation based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 58-63(in Chinese).
- [17] 李强,周京阳,于尔铿.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(19):31-35.  
Li Qiang, Zhou Jingyang, Yu Erkeng. A hybrid algorithm for power system state estimation based on PMU measurement and SCADA measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 31-35(in Chinese).
- [18] 李大虎,曹一家.基于SCADA/PMU混合量测的广域动态实时状态估计方法[J].电网技术,2007,31(6):72-78.  
Li Dahu, Cao Yijia. Wide-area real-time dynamic state estimation method based on hybrid SCADA/PMU measurements[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 72-78(in Chinese).
- [19] Keith H, Mishra E. Intrusion detection through SCADA systems using fuzzy logic-based state estimation methods[J]. International Journal of Critical Infrastructures, 2007, (3): 58-87.
- [20] 常乃超,兰洲,甘德强.广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J].电网技术,2005,29(10):46-52.  
Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang. A survey on applications of wide-area measurement system in power system and control [J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52(in Chinese).
- [21] 卜广全,刘文焯.中国版BPA潮流程序用户手册[M].北京:中国电力科学研究院,2002.
- [22] 汤涌,卜广全,印永华,等.中国版BPA暂态稳定程序用户手册[M].北京:中国电力科学研究院,2000.



薛辉

收稿日期:2007-10-15。

作者简介:

薛辉(1980—),男,硕士研究生,从事电力系统相量测量、电力系统运行、分析与控制的研究;

贾清泉(1970—),男,博士,教授,从事电力系统自动化、电力系统运行、分析与控制的研究;

王宁(1981—),男,硕士研究生,从事电力系统自动化、电力系统运行、分析与控制的研究;

王海棠(1983—),男,硕士研究生,从事电力系统自动化、铁磁谐振的研究;

马红霞(1982—),女,硕士研究生,从事电力系统低频振荡的研究。

(实习编辑 王晔)