

部分节点引入相量测量的状态估计

王 勇,鞠 平

(河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 基于 GPS 的相量测量装置(PMU)可以直接测得节点电压相量,包括电压有效值和相角.在状态估计一般模型的基础上,建立了部分节点电压相量可测时的状态估计模型,并针对不同的相角量测精度,采用不同的状态估计模型. PMU 精度较低时,在增加量测量冗余度的同时,PMU 所在节点的电压相量仍然作为状态变量参与迭代;PMU 精度足够高时,直接将 PMU 的量测值作为状态估计的状态解.算例验证了方法的有效性和相量测量对状态估计的改善作用.

关键词 状态估计 模型 量测精度 相量 相量测量装置 全球定位系统
中图分类号 :P228.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)03-0316-04

状态估计是当代能量管理系统(EMS)的重要组成部分,它是利用量测系统的冗余度,以非线性方程组求出系统各节点的电压有效值与相角,提高了数据的精度.传统的状态估计都是基于潮流的非线性状态估计.通过 SCADA 系统测量到的量测量,如节点注入功率、支路功率、节点电压有效值等,以求解非线性方程组的方式,得出系统的状态变量.

随着 GPS 的民用化,其精确的时间传递功能在电力系统中也得到了广泛的应用^[1],基于 GPS 的相量测量装置(PMU)也开始逐步装设于电力系统中^[2,3].由相量测量装置可以获得精度较高的电压相角,将这些相角量引入状态估计中,改变了状态估计的条件.文献[4]推导了全部电压相量和电流相量可测量时的状态估计线性表达式.文献[5]建立了系统在满足线性可观测条件下,部分电压相量和电流相量可测时的线性状态估计公式.但在实际工程中,很难完全满足上述条件,一般都是在现有 SCADA 系统中装设一定数量的 PMU,将 PMU 的量测量与 SCADA 的量测量共同用于状态估计中.文献[6]建立了这种条件下的状态估计模型,但该模型仅考虑量测量为成对量测的支路有功和无功潮流.实际上,状态估计的量测量不仅包含支路功率量测,还包括节点注入功率和节点有效值电压.

本文在状态估计一般方法的基础上,建立了部分节点引入相量测量的状态估计模型,该模型不受量测量类型的限制,并针对不同的 PMU 量测精度采用不同的状态估计模型.

1 状态估计的一般模型^[7]

在给定网络结线、支路参数和量测系统的条件下,量测方程为

$$z = h(x) + v \tag{1}$$

式中 z —— m 维量测向量; x ——状态矢量; v ——噪声矢量.给定量测矢量 z 后,状态估计矢量 $\hat{x}$ 是使目标函数

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \tag{2}$$

达到最小 x 的值.将 $h(x)$ 在给定近似值 $x^{(0)}$ 处线性化,可得状态估计的修正方程为

$$\Delta x = [H^T(x) R^{-1} H(x)]^{-1} H^T(x) R^{-1} [\Delta z] \tag{3}$$

$$\Delta z = z - h(x)$$

$$G = H^T R^{-1} H$$

式中 Δz —— m 阶残差向量; H —— $m \times n$ 阶雅可比矩阵; G —— $n \times n$ 阶信息矩阵.

利用 $P - V$ 和 $Q - \theta$ 之间的弱耦合,将有功和无功进行分解计算,得到状态估计的修正方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{aa} & \\ & G_{rr} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{aa} & \\ & H_{rr} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_a & \\ & R_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta z_a \\ \Delta z_r \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中:下标 a——与有功相对应的量;下标 r——与无功相对应的量。

2 引入相量测量的状态估计模型

在系统中部分节点装设 PMU 后,可以直接由 PMU 测得这些节点的电压相量.根据 PMU 量测精度的不同,可以采用不同的状态估计模型.

2.1 相量测量作为待求量参与状态估计

采用快速分解状态估计法,将量测向量 z 分解成有功 z_a 和无功 z_r 两部分.当 PMU 量测精度不够高时,由于 $P - V, Q - \theta$ 之间的弱耦合或者说 $P - \theta, Q - V$ 之间的强耦合,将相角测量当作有功量测量的一部分,电压有效值量测量当作无功量测量的部分,修正雅可比矩阵,将它们当作待求解的状态量加入状态估计中一起迭代,从而达到提高精度的目的.加入了相角测量后, z_a 和 z_r 分别为

$$z_a = \begin{bmatrix} P_{km} \\ P_k \\ \theta_k \end{bmatrix} \quad z_r = \begin{bmatrix} Q_{km} \\ Q_k \\ V_k \end{bmatrix}$$

式中: P_{km} ——支路 km 的有功功率; P_k ——节点 k 的注入有功功率; θ_k ——节点 k 的直接相角测量值,其中包含了 PMU 的量测误差. Q_{km} ——支路 km 的无功功率; Q_k ——节点 k 的注入无功功率; V_k ——节点 k 的电压有效值,其中包含了 PMU 的量测误差.

对于 z 中装设 PMU 装置,与 θ 相对应的量,可以简单地给出

$$\theta_k = \theta_k$$

对于迭代过程中相角量测量的残差向量 $z - h(x)$,有

$$z - h^{(l)}(x) = \theta_k - \theta_k^{(l)}$$

式中 $\theta_k^{(l)}$ 为经过 l 次迭代后的相角估计值.同样,将雅可比矩阵 H 分解,并采用快速潮流计算中的一些经验,得

$$H = \begin{bmatrix} H_{aa} & \\ & H_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_0^2 B_a & \\ & -V_0 B_r \end{bmatrix}$$

式中: V_0 ——系统参考节点电压; B_a ——直接取支路电抗的倒数; B_r ——取支路导纳的虚部.

此时的雅可比矩阵与传统快速分解状态估计法中的雅可比矩阵相比,不同之处就在于增加了一行与相角量测有关的元素,而这一行中的非零元素与含有相角量测的节点相对应.且该行元素取值为 1.此时,快速分解的迭代公式修正为

$$G \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = H^T(V_i, \theta_i) W[z - h(V_i, \theta_i)]$$

同样对信息矩阵 G 以及等式右边各分量进行有功和无功分解,并采用快速分解法中的一些假设,最后得到状态估计迭代公式为

$$\Delta \theta_i = A^{-1} a_i \quad \Delta V_i = B^{-1} b_i$$

其中

$$\begin{aligned} A &= (-B_a)^T W_a (-B_a) & B &= (-B_r)^T W_r (-B_r) \\ a_i &= \frac{1}{V_0^2} \{ (-B_a)^T W_a [z_a - h_a(V_i, \theta_i)] \} & b_i &= \frac{1}{V_0} \{ (-B_r)^T W_r [z_r - h_r(V_i, \theta_i)] \} \end{aligned} \tag{5}$$

由于 PMU 较传统量测方式有更高的精度,因此,在状态估计中可以赋予较高的权值.加入相角量测量与加入传统的潮流量相比,对提高状态估计精度以及改善收敛性都有一定的效果.但是当 PMU 量测值还不能达到工程所要求的精度时,装设 PMU 的节点仍作为状态变量参与状态估计,可以通过迭代修正提高精度.

2.2 相量测量作为已知量参与状态估计

当 PMU 达到工程所要求的精度时,在状态估计中不考虑其量测误差,直接把 PMU 的测量结果作为系统的状态解.此时,装设 PMU 节点的电压相量作为已知量而不参与状态估计,显然系统的状态变量数将减少.此时的状态估计模型与前面给出的加入相角量测量的状态估计模型基本类似,所不同的是装设 PMU 的节点不参与状态估计,因此,雅可比矩阵中去除了与这些节点相对应的量,量测向量 z 按有功无功分为

$$z_a = \begin{bmatrix} P_{km} \\ P_k \end{bmatrix} \quad z_r = \begin{bmatrix} Q_{km} \\ Q_k \\ V_k \end{bmatrix}$$

由于参与估计的状态变量减少,雅可比矩阵中去除了与这些节点电压相量相对应的列,雅可比矩阵的规模也相应减小.另外,装设有 PMU 的节点不作为状态变量参与状态估计,迭代过程中与这些节点相关的电压有效值和相角在计算 $h(V, \theta)$ 的过程中保持不变,均取为 PMU 的量测值,状态估计的迭代公式仍然是式(5).

3 算例分析

算例系统取自文献[7],如图 1 所示.取节点 9 为参考节点,假设系统有 13 个有功量测量,包括节点注入有功功率和支路有功功率;15 个无功量测量,包括支路无功功率、节点注入无功功率以及节点 1,5 的电压有效值量测.

分别对该系统进行了 3 种情况下的状态估计计算:(a)不装设 PMU 的常规状态估计;(b)节点 1,5 装设 PMU,且 PMU 量测量参与状态估计;(c)节点 1,5 装设 PMU,且 PMU 量测量不参与状态估计.3 种计算结果见表 1,其中,真值取综合稳定计算程序 PSASP 的计算结果,后两种状态估计的初值采用常规状态估计的结果,误差均方根定义如下:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_k - x_{k0})^2 / N}$$

式中: k, N ——节点号和节点总数减一(算例中 N 为 8); x 在算例中用变量 V 或 $\theta(^{\circ})$ 代入计算,下标 0 为真值.

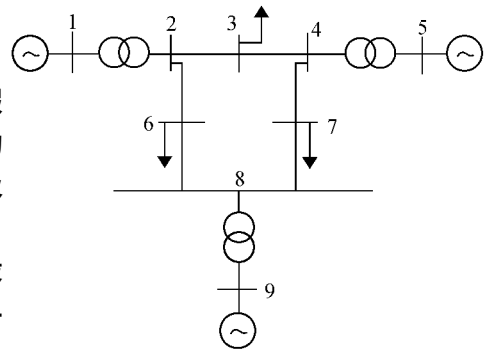


图 1 9 节点系统接线
Fig.1 9-bus system

表 1 三种状态估计结果的比较

Table 1 Results of state estimation with three models

节点号	真值		常规状态估计		引入相量测量,并参与估计		引入相量测量,不参与估计	
	V	$\theta/(^{\circ})$	V	$\theta/(^{\circ})$	V	$\theta/(^{\circ})$	V	$\theta/(^{\circ})$
1	1.025	9.3	1.0298	9.4797	1.0282	9.4281	1.0250	9.3000
2	1.026	3.7	1.0333	3.3970	1.0287	3.5685	1.0234	3.7759
3	1.016	0.7	1.0127	0.9607	1.0143	0.8440	1.0148	0.7995
4	1.032	2.0	1.0225	2.1887	1.0293	2.0903	1.0314	1.9468
5	1.025	4.7	1.0238	5.0270	1.0243	4.9538	1.0250	-4.0000
6	0.996	-4.0	1.0039	-4.1481	1.0015	-4.0562	0.9984	-4.0450
7	1.013	-3.7	1.0223	-3.8002	1.0204	-3.7481	1.0180	-3.7331
8	1.026	-2.2	1.0333	-2.3372	1.0329	-2.2862	1.0290	-2.2455
误差均方根			0.0069	0.2195	0.0045	0.1322	0.0025	0.0544
迭代次数			12		10		6	

从表 1 可以看出:(a)引入相量测量并参与估计的状态估计结果与常规的状态估计相比,估计精度有所提高,迭代次数有所减少.(b)引入相量测量并作为已知量不参与估计的状态估计结果与常规的状态估计相比,在估计精度和收敛性上都有明显改善.与装设 PMU 节点直接相连的节点估计结果改善最大,与装有 PMU 的节点电气距离较远的节点估计结果改善较小,但也有较明显地改善,迭代次数也有了明显地减少.(c)引入相量测量相角精度的改善比有效值精度的改善更为显著.以上各点从定性上也是可以理解的.

4 结 论

加入相量测量的状态估计与一般的状态估计相比,在估计精度和收敛性上都有改善.当 PMU 精度不高时,将其量测量作为量测向量的一部分加入状态估计中,仍然可以提高状态估计精度,减少收敛次数,但对状态估计的收敛性改善不太明显.当 PMU 精度较高时,将其量测量直接作为状态估计的状态解,可显著地改善状态估计精度和收敛性.

参考文献：

[1] 高厚磊,厉吉文,文峰,等. GPS 及其在电力系统中的应用 [J]. 电力系统自动化,1995,19 :41—44.
[2] 卢志刚,郝玉山,康庆平,等. 电力系统相角测量和应用 [J]. 电力系统自动化,1997,21 (4) :41—43.
[3] PHADKE A G. Synchronized phasor measure power system [J]. IEEE Computer Applications in Power,1993,6 (2) :10—15.
[4] PHADKE A G. THORP J S, KARIMI K J. State estimation with phasor measurements [J]. IEEE Trans on PS. 1986,1 (1) :233—238.
[5] 卢志刚,许世范,史增洪,等. 部分电压和电流相量可测量时电压相量的状态估计 [J]. 电力系统自动化,2000,24 (1) :42—44.
[6] 王克英,穆刚,陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究 [J]. 中国电机工程学报,2001. 21 (8) :29—31.
[7] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 北京 水利电力出版社,1985. 62—64.

Study on state estimation with PMU equipped at partial nodes of power systems

WANG Yong, JU Ping

(College of Electrical Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098, China)

Abstract :GPS-based phasor measurement unit (PMU) can measure the voltage phasor directly, including the effective value and phase angle. In this paper, state estimation models are developed with PMU of different precision equipped at partial nodes. When the precision of PMU is low, with the increase of the redundance of measurement, the voltage phasor at the nodes equipped with PMU is iterated as the state variable. When the precision of PMU is high, the measured data obtained by PMU are taken as the state solution. The effectiveness of the method and the function of phasor measurement in improvement of state estimation are verified by examples.

Key words :state estimation ; model ; precision of measurement ; phasor ; phasor measurement unit ; GPS