

基于混合量测的电力系统状态估计混合算法

李 强, 周京阳, 于尔铿, 刘树春, 王 磊

(中国电力科学研究院, 北京市 100085)

摘要: 研究了相量量测装置(PMU)相量量测和监控与数据采集(SCADA)量测混合使用时的数据匹配问题,提出了利用状态量转换预测得到预报系统状态和预报节点注入电流向量的方法。在此基础上,提出了应用 PMU 实时相量量测和预报节点注入电流向量的线性静态状态估计算法,以及应用 PMU 实时相量量测和预报系统状态的线性动态状态估计算法。文中将这 2 种算法与传统状态估计算法相结合,组成了状态估计混合算法,保证了状态估计的计算精度。该混合算法有效减少了状态估计的计算时间,对 PMU 的量测配置也没有严格的要求,具有很好的通用性。最后采用 IEEE 30 节点系统对该方法进行了验证。

关键词: 电力系统; 相量量测装置; SCADA; 状态估计; 线性静态状态估计; 线性动态状态估计

中图分类号: TM73; TM744

0 引言

根据我国相量量测装置(PMU)的发展情况, PMU 在各电力公司的安装是渐进式、分阶段完成的,最终目标是在电力系统的所有节点装设 PMU,实现 PMU 对电力系统状态的直接观测。但目前乃至相当长一段时间内,还不可能在系统的所有节点均装设 PMU,也不大可能实现系统状态完全可观测的 PMU 配置方案。

本文研究这样一种情况,系统在部分厂站安装了 PMU,但这些 PMU 无法提供足够的量测,使系统状态完全可观测。如何充分利用已安装的 PMU,使其用于状态估计,提高网络的可观测性及状态估计的速度和精度,是各电力公司共同关心的问题。

文献[1]提出了完全使用 PMU 量测的线性状态估计算法,电力系统的状态量可以直接计算得到,增益矩阵只在拓扑变化时才需要重新计算,计算速度很快,是基于 PMU 量测的最理想的静态状态估计器,但安装的 PMU 数目必须满足电力系统状态有冗余的完全可观测;文献[2]提出将 PMU 的相角量测纳入传统状态估计向量集的状态估计方法,程序改动不大,容易实现,但利用 PMU 量测的信息很少,对状态估计结果的改进有限;文献[3]提出了利用 PMU 的相角量测形成修正方程式,修正状态量,以提高状态估计精度的方法,但存在与文献[2]方法相同的缺点;文献[4]提出了 2 种方法:第 1 种是将

传统状态估计结果作为监控与数据采集(SCADA)量测和 PMU 量测一起进行线性状态估计的方法,第 2 种是将线性状态估计和内插法相结合的状态估计方法,前一种方法是一个很有意义的改进方法,但增大了计算工作量,从而降低了计算速度,也没有充分利用 PMU 的速度优势,后一种方法充分发挥了 PMU 量测的特点,计算速度很快,但是对 PMU 的量测配置有严格的可观测度的要求,不具有通用性。以上方法均为静态状态估计的方法。

本文研究了 PMU 相量量测和 SCADA 量测混合使用时的数据匹配问题,提出了基于混合量测的电力系统状态估计混合算法,并详细阐述了所提出的方法,最后采用 IEEE 30 节点例题验证了算法的有效性。

1 SCADA 量测与 PMU 量测的匹配问题

SCADA 量测中没有相角量测,在进行状态估计时,需要指定某一节点作为参考节点,令其电压相角为 0,其余节点的电压相角为该节点与参考节点的相角差。PMU 量测中包含节点电压及相应支路电流的相角量测,其相角量测值为量测点与全球定位系统(GPS)参考点之间的相角差。若要在状态估计计算中使用 PMU 的相角量测,就必须对 PMU 相角量测进行转换,使之从相对于 GPS 参考点的相角差变为相对于状态估计指定参考节点的相角差。为此,首先应得到 2 个参考点之间的相角差 ϕ ,然后据此修正所有 PMU 相角量测值。

如图 1 所示,对于母线 i ,在状态估计中,其电压相角为 θ_i ,而 PMU 量测值为 δ_i ,很明显:

$$\theta_i = \delta_i + \Phi \tag{1}$$

则参考点的相角差为:

$$\Phi = \theta_i - \delta_i \tag{2}$$

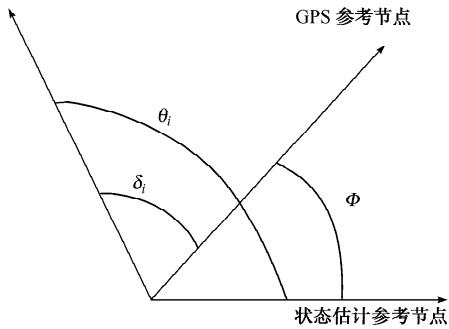


图 1 状态估计相角和 PMU 相角量测关系示意图
Fig. 1 State estimation angle and PMU angle

可使用 m 个母线的状态估计电压相角估计值与 PMU 电压相角量测值之差的平均值,来估计一个较好的参考点相角差:

$$\Phi = \sum_{i=1}^m \frac{\theta_i - \delta_i}{m} \tag{3}$$

但上述方法需要预先计算一次状态估计,并根据状态估计的结果来估计参考点相角差。考虑到参考点相角差 Φ 是随时间变化的量,每次进行参考点相角差估计十分麻烦,并不实用。

本文采用的方法是指定安装了 PMU 的某一节点为传统状态估计的参考节点,设参考节点的 PMU 相角量测值为 δ_{slack} ,则参考点的相角差可直接得到:

$$\Phi = 0 - \delta_{slack} = -\delta_{slack} \tag{4}$$

这样,就不需要在进行混合状态估计前先进行传统状态估计计算以确定参考点相角差。

根据参考点相角差 Φ ,可以对所有 PMU 相角量测进行修正,使其参考节点由 GPS 参考点变为状态估计参考点。若有 m 个 PMU 相角量测,则每个 PMU 相角量测修正为:

$$\delta_k' = \delta_k + \Phi \quad k = 1, 2, \dots, m \tag{5}$$

另外,PMU 量测和 SCADA 数据的时间匹配问题参见文献[5],本文对该问题不做讨论。

2 状态量转换预测

由于电力系统通用状态变量节点电压幅值 V 和角度 δ 在节点间的相关性强,不易进行预测,本文通过将通用状态变量转换为节点间相关性弱的非通用状态变量(发电机机端节点电压、节点注入有功和无功率),对转换后的状态变量进行预测,然后利用潮流计算将预测后的状态转换为通用状态变量节点电压幅值和角度,并得到节点注入电流向量。具

体实现框图见图 2。

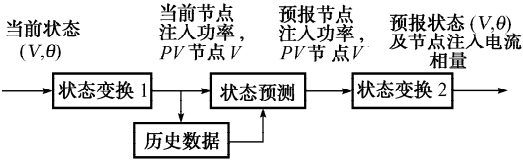


图 2 状态量转换预测
Fig. 2 State conversion forecasting

图中:状态变换 1 可通过非线性网络方程实现;状态变换 2 可通过非线性潮流计算实现;状态预测可以各节点负荷单独预测,也可根据系统负荷预报通过分配系数得到。发电机机端节点电压值最好与电压计划接口,若不能得到电压计划的结果,则假设发电机机端节点电压基本恒定,但这样会影响状态量转换预测的精度。

3 线性静态状态估计混合算法

SCADA 数据和 PMU 数据各有其特点,如表 1 所示。两者在采样间隔长短和数据一致性方面有很大的不同,前者采样间隔为 3 s~5 s,数据一致性一般或较差,后者采样间隔为 5 ms~30 ms,数据一致性很好。

表 1 SCADA 量测与 PMU 量测特点比较
Table 1 Features of SCADA measurement and PMU measurement

量测	采样间隔	数据一致性	量测配置	可观测性	量测种类	从属系统
PMU	短	好	不全	部分可观测	包括相角量测,不包括网络拓扑信息	广域量测系统
SCADA	长	一般或较差	全	可观测	不包括相角量测,包括网络拓扑信息	SCADA

另外,基于 SCADA 数据的状态估计只能采用非线性状态估计算法,而基于 PMU 数据的状态估计则可以采用快速的线性状态估计算法。由此设计了以下混合算法:每隔 1 min(可设定),用传统的加权最小二乘(WLS)法进行非线性状态估计,在其中考虑 PMU 的相角量测。同时,通过 WLS 法状态估计确定母线负荷预报中各类型、各负荷的基本分配系数。每隔 5 s(可设定),利用来自 PMU 的数据,采用线性 WLS 算法进行线性状态估计。

由于 PMU 的数据满足不了系统观测性的要求,需要增加伪量测以满足可观测性的要求。伪量测源自传统 WLS 状态估计(SE)的结果和状态量转换预测的结果,即根据传统 SE 的结果、系统超短期负荷预报和由传统 SE 维护的母线负荷预报系数,

计算得到当前时刻的母线注入功率,再根据发电计划得到发电机机端电压,调用潮流计算模块,得到当前时刻的系统状态,将其转换为母线注入电流向量的形式,作为伪量测与 PMU 量测一起进行线性状态估计计算。若 PMU 量测中包含某些母线的注入电流相量量测,则以 PMU 量测为准,状态量转换预测的结果只用于补充没有 PMU 注入电流相量量测的情况。算法框图如图 3 所示。

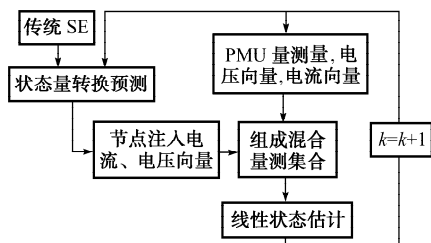


图3 线性静态状态估计混合算法框图

Fig. 3 Block diagram of linear static state estimation hybrid method

算法特点如下:

1)通过状态量转换预测模块,将 PMU 数据与 SCADA 数据有机结合,将不可观测变为可观测,形成了线性状态估计,是现有方法的结合。

2)由于 PMU 量测量比较稳定,而补充的节点注入电流向量伪量测也是一定的,所以,混合算法中采用的线性状态估计具有完全 PMU 线性状态估计的所有优点,即 H 阵、增益矩阵 G 在拓扑结构变化前恒定不变,计算速度很快。

3)该方法提高了状态估计的运行速度,可使状态估计的运行周期从分钟级降至秒级,从而从时间意义上提高了状态估计的实用性和准确性。

4)算法的开发工作量相对较少,只需对现有状态估计程序做很小的改动,在其量测集中增加 PMU 提供的电压相角量测,就可以得到考虑 PMU 电压相角量测的非线性状态估计程序。混合量测的线性状态估计程序则需要单独开发。

4 线性动态状态估计混合算法

将线性状态估计的算法由 WLS 变为 Kalman 算法,增加状态量转换预测模块,线性静态状态估计混合算法就变成了具有预报功能的线性动态状态估计混合算法。算法公式参见文献[6],算法框图如图 4 所示。

传统状态估计和 Kalman 的算法接口,一方面是根据传统状态估计的结果得到 Kalman 算法可用的协方差信息矩阵,另一方面是利用 Kalman 算法的预报结果,补充 WLS 状态估计的量测信息(如注

入型伪量测可用 Kalman 算法的预报结果代替),以提高系统的可观测性和不良数据辨识能力。

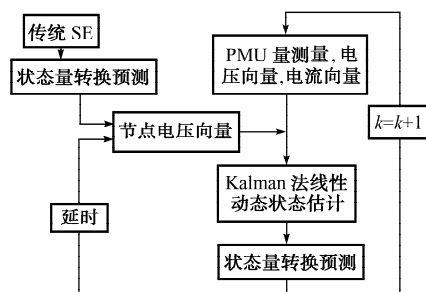


图4 线性动态状态估计混合算法框图

Fig. 4 Block diagram of linear dynamic state estimation hybrid method

在系统拓扑结构不变的情况下,由于线性动态状态估计的协方差信息矩阵 P 有快速稳定并保持常数矩阵的特点,可以在第 1 次 Kalman 计算时,先对 P 做几次递推计算,得到较稳定的 P 后再进行状态量的递推计算[6]。

算法特点如下:

1)混合算法的计算量远小于纯 Kalman 算法的计算量。主要原因是中间采用 Kalman 算法进行修正计算时,采用的不是全部的量测量,而是以 PMU 量测数据为主的部分量测量。

2)采用混合算法可以利用 SCADA 数据和 PMU 数据互相校正,互为初值,增强了计算的可靠性。由于 Kalman 算法采用的 PMU 量测量达不到系统完全可观测,多次递推计算后很可能偏离系统的状态真值,采用混合算法可以避免这种情况的持续发展,隔一段时间总能够利用成熟的经过验证的传统状态估计算法加以修正。

3)混合算法便于与现有状态估计程序结合,既实现了动态状态估计,又利用了经过长期考验、可靠实用的 WLS 算法状态估计程序。

5 数值试验结果

本文采用 IEEE 30 节点系统[7]进行模拟测试,利用潮流计算得到系统状态的真值。为了得到变化的潮流数据,模拟负荷的变化情况如下:30 个采样周期,负荷从 90%变化到 120%。负荷的功率因数假定为常数,为保证功率平衡,发电按一定的分配系数根据负荷变化而变化。每个采样周期,对使用上述方式得到的负荷和发电数据进行潮流计算,作为状态向量的真值和量测向量。模拟量测数据,有功、无功功率和电流为真值加零期望且标准方差为 2% 的高斯噪声,电压幅值为真值加零期望且标准方差为 0.2% 的高斯噪声。

考虑到 IEEE 30 节点系统的基本 PMU 配置方案为在节点 2,4,10,12,19,24,27 上配置共 7 台 PMU^[8],所以进行了分别为 3 台、5 台和 7 台 PMU 的 3 组实验。第 1 组实验在 3 个节点 10,12,27 上安装有 PMU,共有 3 个母线电压相量、2 个负荷电流相量和 15 个线路电流相量有 PMU 量测。第 2 组实验在 5 个节点 2,10,12,24,27 上安装有 PMU,共有 5 个母线电压相量、4 个负荷电流相量和 22 个线路电流相量有 PMU 量测。第 3 组实验在 7 个节点 2,4,10,12,19,24,27 上安装有 PMU,共有 7 个母线电压相量、6 个负荷电流相量和 28 个线路电流相量有 PMU 量测。每组实验均根据负荷的变化进行了 30 次计算。对功率和电压的标准偏差进行了监视。这里标准偏差是指一次计算中状态估计值(母线电压幅值、角度,线路和变压器的有功功率、无功功率)与真值的绝对差值。

负荷预报结果增加了期望为 0、方差为 0.5% 的高斯噪声。状态估计对所用伪量测进行了实时修正。

图 5、图 6 分别为当 PMU 个数为 5、负荷预报加方差为 0.5% 的高斯噪声时,线性静态状态估计混合算法和线性动态状态估计混合算法的计算结果示意图。完整的数值试验结果见表 2。

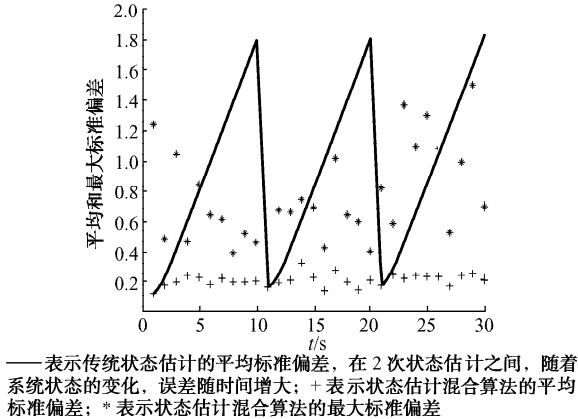


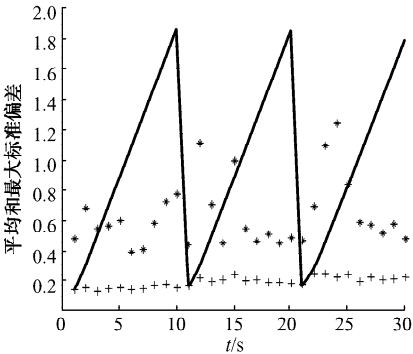
图 5 线性静态状态估计混合算法

Fig. 5 Test results of linear static state estimation hybrid method

2 种算法的比较如下:

1)线性 Kalman 算法受状态量转换预报结果的影响很大,良好的负荷预报结果是线性动态状态估计的基础。模拟结果中,在计算精度上线性动态状态估计混合算法要优于线性静态状态估计混合算法,与此有关,若预报精度下降,则线性静态状态估计混合算法的计算精度会优于线性动态状态估计混合算法的计算精度。

2)从计算时间看,2 个算法的计算时间略有不同。PMU 个数少时(如 3,5,7),线性 Kalman 算法的计算时间较短;当 PMU 个数继续增加时,线性 WLS 算法的计算时间较短。这与线性 WLS 法采用混合量测计算、而线性 Kalman 算法只采用 PMU 量测数据计算有关。当 PMU 个数少时,混合量测的数目要远大于 PMU 量测数目,可以抵消 Kalman 算法的求逆计算量;当 PMU 个数增加到一定数目后,Kalman 算法的求逆计算量将相应增大。



——表示传统状态估计的平均标准偏差,在 2 次状态估计之间,随着系统状态的变化,误差随时间增大;+表示状态估计混合算法的平均标准偏差;*表示状态估计混合算法的最大标准偏差

图 6 线性动态状态估计混合算法

Fig. 6 Test results of linear dynamic state estimation hybrid method

表 2 数值试验结果
Table 2 Results of numerical test

PMU 个数	线性静态状态估计混合算法		线性动态状态估计混合算法	
	估计残差平均值	单次计算时间/s	估计残差平均值	单次计算时间/s
3	0.358 0	0.06	0.204 5	0.03
5	0.293 6	0.06	0.132 3	0.03
7	0.258 5	0.06	0.114 8	0.04

注:估计残差平均值为一组 30 次计算中所有状态估计值(母线电压幅值、角度,线路和变压器的有功功率、无功功率)与真值绝对差值的算术平均值;单次计算时间为一组 30 次计算中单次线性静态状态估计算法和单次线性动态状态估计算法的平均计算时间。

3)对于线性 WLS 算法而言,负荷伪量测和电压伪量测是必需的,否则 PMU 不可观测部分的估计值有较大的差异。而线性 Kalman 算法在预报阶段已经考虑了负荷与电压的影响,则不必增加这些伪量测,直接采用 PMU 量测数据即可。

数值试验结果表明,当对伪量测实时修正时,状态估计混合算法的效果很好,可以反映负荷变化对系统状态的影响;PMU 个数越多,状态估计混合算法的效果越好。

6 结语

PMU 量测的精度较高,可以提高系统的可观测性和状态估计的精度。PMU 配置的越多,对状态估计精度的提升越大。随着 PMU 技术的发展,使得动态状态估计的实用化成为可能,可提供实时性更强的状态估计结果,供快速网络分析使用。

本文所提出的基于相量量测和 SCADA 量测的电力系统状态估计混合算法,对 PMU 配置没有严格要求,适用于我国当前 PMU 的发展状况。该算法采用线性状态估计算法,有效地减少了状态估计的计算时间,采用传统状态估计算法保证了状态估计的计算精度。通过状态量转换预测模块,将 PMU 数据与 SCADA 数据有机地结合,互相校正,互为初值,增强了计算的可靠性。可使状态估计的运行周期从分钟级降至秒级,从而从时间意义上提高了状态估计的实用性和准确性。另外,该方法便于与现有成熟的状态估计程序结合,利于实现。

下一步的工作是需要深入研究 PMU 对状态估计中不良数据辨识、可观测性分析、遥信状态辨识、电力系统参数辨识等方面的影响,促进状态估计混合算法的实用化。

参 考 文 献

- [1] PHADKE A G, THORP J S, KARIMI K J. State Estimation with Phasor Measurements. *IEEE Trans on Power Systems*, 1986, 1(1): 233—241.
- [2] THORP J S, PHADKE A G, KARIMI K J. Real Time Voltage Phasor Measurements for Static State Estimation. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1985, 104(11): 3098—3106.
- [3] 王克英,穆钢,陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究. *中国电机工程学报*, 2001, 21(8): 29—33.

WANG Ke-ying, MU Gang, CHEN Xue-yun. Precision Improvement and PMU Placement Studies on State Estimation of a Hybrid Measurements System with PMUs. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(8): 29—33.

- [4] NUQUI R F. State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements, Doctoral Dissertation. <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07122001-030152>, 2001.
- [5] 赵红嘎,薛禹胜,高翔,等. 量测量的时延差对状态估计的影响极其对策. *电力系统自动化*, 2004, 28(21): 12—16.
ZHAO Hong-ga, XUE Yu-sheng, GAO Xiang et al. Impacts of the Difference Between Measurement Transmission Delays on State Estimation and the Countermeasures. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(21): 12—16.
- [6] 李强,周京阳,于尔铿,等. 基于相量量测的电力系统线性状态估计. *电力系统自动化*, 2005, 29(18): 24—28.
LI Qiang, ZHOU Jing-yang, YU Er-keng et al. Power System Linear State Estimation Based on PMU Measurements. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(18): 24—28.
- [7] 吴际舜,侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
WU Ji-shun, HOU Zhi-jian. *Computer Algorithm of Power System Power Flow Solution*. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000.
- [8] 李强,于尔铿,吕世超,等. 一种改进的相量测量装置最优配置方法. *电网技术*, 2005, 29(12): 57—61.
LI Qiang, YU Er-keng, LU Shi-chao et al. An Improved Optimal PMU Placement Algorithm. *Power System Technology*, 2005, 29(12): 57—61.

李 强(1966—),男,高级工程师,从事电力系统 EMS 和 DTS 等方面的工作。E-mail: liq@epri.ac.cn

周京阳(1962—),女,教授级高级工程师,从事电力系统 EMS、DTS 和电力市场等方面的工作。

于尔铿(1938—),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统 EMS 和电力市场等方面的工作。

A Hybrid Algorithm for Power System State Estimation Based on PMU Measurement and SCADA Measurement

LI Qiang, ZHOU Jing-yang, YU Er-keng, LIU Shu-chun, WANG Lei
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: The data matching problem in aligning the phasor measurement unit (PMU) measurement and SCADA measurement is studied. The state conversion forecast is used to get the forecast state and node injection current vector. A linear static state estimation algorithm using PMU real-time measurement and forecast node injection current vector, and a linear dynamic state estimation algorithm using PMU real-time measurement and forecast state are proposed. By combining the two algorithms and traditional state estimation, a hybrid algorithm suitable for any PMU placement status is formed. The linear state estimation algorithm is used to reduce the calculating time and traditional state estimation algorithm to ensure calculating accuracy. The effectiveness of the algorithm proposed is illustrated with numerical simulation using the IEEE 30-bus system.

Key words: power systems; phasor measurement unit (PMU); state estimation; linear static state estimation; linear dynamic state estimation