

PMU配置不完全可观测系统状态计算

王宗义¹, 郭志忠^{1,2}

(1 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2 许继电力科学研究院, 北京 100085)

摘要: 对配置 PMU 系统, 从网络节点方程解算理论入手, 提出了系统可观测性判定算法, 将系统节点分为动态可观测节点和不可观测节点。如何求得不可观测节点的电压相量, 一种方法是视可观测节点为 V 节点的潮流方法, 另一种方法是将不可观测节点功率注入等效为等值阻抗 (导纳) 形式, 用可观测节点电压的线性组合形式来表示不可观测节点电压。该文分析了两种方法各自的特点, 算例分析验证了方法的有效性。

关键词: PMU 配置; 不完全可观测; 潮流

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)08-0010-03

0 引言

基于 GPS 技术的同步相量测量单元 (PMU) 在电力系统的应用^[1], 使人们可以直接测量到电压和电流的幅值和相角, 为电网实时监测和在线闭环控制提供了有效的手段。以最小的 PMU 数目, 通过合理的配置来实现系统的动态可观测, 在算法方面取得了一定的成果^[2]。由于经济因素和通讯手段的限制, 在当前条件下还无法实现系统的完全动态可观测, 即某些节点的电压相量不能直接测得或者通过量测值直接计算出来。

另外, 现代电力系统无一例外都配置有完善的状态估计系统, 该系统通过 SCADA 系统测量节点注入复功率、支路复功率和节点电压幅值, 进而计算系统的状态量。与基于 PMU 的量测值相比, 传统的状态估计结果精度较低并且测量周期长, 不能反映系统的动态变化。利用 PMU 测量数据和静态状态估计的结果, 对动态不可观测节点的状态量进行计算, 近似实现系统动态可观测, 是本文的主要出发点。

本文的主要内容包括: 提出给定 PMU 配置的系统动态可观测性分析算法, 找出系统的不可观测节点; 将可观测节点视为 V 节点的潮流算法; 利用传统状态估计数据, 实现系统的近似动态可观测, 并推导了运行状态变化后的灵敏度修正公式; 最后通过算例, 验证了所提算法的有效性。

1 给定 PMU 配置的系统动态可观测分析

所谓系统的动态可观测, 是指通过 PMU 量测和基于量测的计算, 可以得到电网任何节点电压的动态瞬时值 (正弦波形的幅值和相位角)。对于不能

实现完全动态可观测的系统, 电压相量可测或可求出的节点称为可观测节点, 不可测且无法求得的节点称为不可观测节点。本文中对可观测与动态可观测不加区分。

假设 PMU 均为电压电流型, 即对于配置 PMU 的节点, 其节点电压相量及所有出线电流相量均可测得。关于系统可观测性的判定条件, 本文在综合文献 [2, 3] 有关论述的基础上, 从网络节点方程解算理论入手, 提出了配置 PMU 系统的节点可观测性判定条件。

1) 配置 PMU 的节点及其相邻节点为可观测节点。

2) 对于可观测的零注入节点, 若其相邻节点中只有一个节点可观测性未知, 其余都可观测, 则该可观测性未知节点为可观测节点。

3) 对于可观测性未知的零注入节点, 若其相邻节点皆为可观测节点, 则该节点为可观测节点; 若其相邻节点中包含可观测性未知的节点, 其可观测性需要用节点方程理论来判定。具体方法是列写所有可观测性未知零注入节点的节点电压方程, 寻找可解的最大方程集合, 求解出的节点为可观测节点。

根据以上三条原则, 提出网络节点的可观测性分析方法。

已知: 配置 PMU 节点集合、网络拓扑、网络参数和零注入节点集合。

求取: 可观测节点集合。

计算步骤:

1) 将所有配置 PMU 的节点及其相邻节点的属性置为可观测, 系统其余节点属性置为可观测性未知。设可观测节点集合为 S_0 , 可观测性未知节点集

合为 S_u , 零注入节点集合为 S_z , S_o 和 S_u 集合在分析过程中随时更新。

2) 定义可观测性未知的零注入节点集合 $S = S_z \cup S_o$ 。

对任意节点 $Node \in S_z$, 考察其相邻节点属性, 统计相邻节点中可观测性未知节点的个数 k , 如果:

a) $Node \in S_u$, 且 $k=0$, 置 $Node$ 节点属性为可观测。

b) $Node \in S_o$, 且 $k=1$, 置相邻节点中可观测性未知节点的属性为可观测。

若相邻节点中含有可观测性未知的非零注入节点, 若 $Node \in S$, 则将 $Node$ 从 S 中剔除。

3) 所有零注入节点扫描完成后, 令 $S_0 = S$, 对 S 进行第 1 次遍历, 剔除 S 中含有不属于 $(S \setminus S_0)$ 的相邻节点的节点, 结果记为 S_1 , 若 $S_1 \subset S_0$, 则进行第 n ($n \geq 2$) 次遍历, 结果记为 S_n , 直到 $S_n = S_{n-1}$, 遍历结束。将 S_n 所包括节点属性置为可观测。

4) 步骤 2)、3) 若没有发现新的可观测节点, 将所有可观测性未知节点属性置为不可观测, 计算结束, 否则转步骤 2)。

2 不完全可观测系统的潮流计算

由于可观测节点的电压相量已知, 所以可将这些节点作为 V 节点, 不可观测节点的功率注入由 SCADA 系统获取, 这样可以通过潮流计算得到不可观测节点的电压相量。对于多 V 节点的潮流计算问题, 文献 [4] 提出的方法是将 V 节点看作理想电压源, 其作用通过诺顿等值转移到与其相联的节点上去。本文从电路的基本方程出发, 得到多 V 节点潮流计算的一般方法, 同时从更一般的意义上证明了文献 [4] 的方法。

对于 n 节点网络的任意节点 k , 有

$$I_k = \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \quad (1)$$

其中: I_k 为节点注入电流。写成矩阵形式, 有

$$I = YV \quad (2)$$

一般情况下, 包含系统所有节点的导纳矩阵 $Y_{n \times n}$ 为奇异阵或病态阵, Y^{-1} 无法求得, 方程 (2) 有无穷多解。平衡节点的引入, 则完全克服了这个问题。对于式 (1), 将 V 节点所在的项移到左侧,

$$I_k - \sum_{j \in \text{slack}} Y_{kj} V_j = \sum_{i=1, i \neq \text{slack}}^n Y_{ki} V_i \quad (3)$$

写成矩阵形式, 设 V 节点个数为 m , 有

$$I = Y_{(n-m) \times (n-m)} V \quad (4)$$

Y 为导纳矩阵 Y 去掉 V 节点所在的行和列后的剩余部分, 整个方程组的维数降为 $(n-m)$ 。节点 k 注入电流为

$$I_k = I_k - \sum_{j \in \text{slack}} Y_{kj} V_j \quad (5)$$

其中: $Y_{kj} V_j$ 相当于理想电压源 V_j 在相邻节点 k 上诺顿等值注入电流。

将可观测节点的高精度电压相量作为 V 节点的电压值加入网络潮流计算中, 降低了潮流问题的维数, 减少了每次计算时间, 同时也能够提高结果的精度。但是不可观测节点的功率注入由 SCADA 获取, 而 SCADA 的数据刷新速度要比 EMU 慢得多, 这样就牺牲了 EMU 测量快速性的优点。另一方面, SCADA 系统的量测值不能保证同步, 也使得计算结果准确度难以保证。

3 利用传统状态估计结果的动态状态计算及修正方法

利用潮流方法计算不可观测节点的电压相量, 由于 SCADA 系统数据更新慢, 无法实现动态观测。文献 [5] 用相邻可观测节点电压的线性组合形式来估计不可观测节点电压, 受此启发, 本文利用传统状态估计输出的节点注入复功率和电压幅值数据, 将不可观测节点功率注入等效为等值阻抗 (导纳) 形式, 从而使不可观测节点变为零注入节点, 利用网络方程求出不可观测节点电压对可观测节点电压的表达式。

对于不可观测节点 k , 由式 (3) 得

$$I_k = \sum_{j \in \text{observed}} Y_{kj} V_j + \sum_{i \in \text{unobserved}} Y_{ki} V_i \quad (6)$$

因为 $I_k = \frac{P_k - jQ_k}{\hat{V}_k} = \frac{P_k - jQ_k}{|V_k|^2} V_k = y_{kk} V_k$, 表示相量的共轭, y_{kk} 为等值导纳。即

$$y_{kk} = \frac{P_k - jQ_k}{|V_k|^2} \quad (7)$$

$$0 = \sum_{j \in \text{observed}} Y_{kj} V_j + (Y_{kk} + y_{kk}) V_k + \sum_{i \in \text{unobserved}, i \neq k} Y_{ki} V_i \quad (8)$$

用 V_o 表示可观测节点电压向量, V_u 表示不可观测节点电压向量, 写成矩阵形式

$$0 = Y_{uo} V_o + Y_{uu} V_u \quad (9)$$

$$V_u = - (Y_{uu})^{-1} Y_{uo} V_o \quad (10)$$

其中：

$$Y_{uu} = Y_{uu} + \text{diag}\left(\frac{P - jQ}{|V|^2}\right) \quad (11)$$

在一个 SCADA 更新周期内,可认为节点注入复功率变化不大, Y_{uu} 保持不变,式 (10) 实现了对不可观测节点的动态观测。

当 SCADA 数据更新时,相应地对系数 $K = -(Y_{uu})^{-1} Y_{uo}$ 进行修正。

$$K = -(Y_{uu})^{-1} Y_{uo} (Y_{uu})^{-1} Y_{uo} \quad (12)$$

$$Y_{uu} = \text{diag}\left(\frac{P - jQ}{|V|^2}\right) \quad (13)$$

4 算例分析

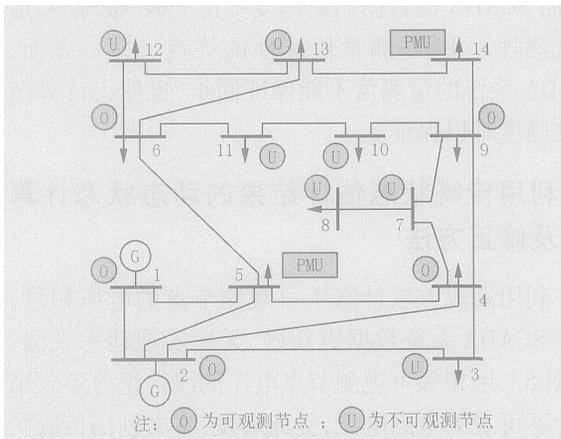


图 1 IEEE14 母线系统配置 PMU 可观测性分析结果

Fig 1 Observability of PMU placement in IEEE14-bus system

对于 IEEE14 节点系统 (见图 1),在节点 5 和节点 14 配置 PMU,因此节点 5 和节点 14 以及与他们相邻的节点 1、2、4、6、9、13 都为可观测节点。剩余的节点 3、7、8、10、11、12 为不可观测节点。

令

$$V_o = [V_1 \quad V_2 \quad V_4 \quad V_5 \quad V_6 \quad V_9 \quad V_{13} \quad V_{14}]^T$$

$$V_u = [V_3 \quad V_7 \quad V_8 \quad V_{10} \quad V_{11} \quad V_{12}]^T$$

$$Y_{uo} = \begin{bmatrix} 0 & -1.135 & -1.986 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & +4.782j & +5.069j & & & & & \\ 0 & 0 & 4.8895j & 0 & 0 & 9.090j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.902 & 0 & 0 \\ & & & & & +10.36j & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.955 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & +4.094j & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.526 & 0 & -2.489 & 0 \\ & & & & +3.176j & & +2.252j & \end{bmatrix}$$

$$Y_{uu} = \begin{bmatrix} 3.121 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -9.822j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -19.55j & 5.677j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5.677j & -5.677j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.783 & -1.881 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -14.77j & +4.403j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.881 & 3.836 & 0 & 0 & 0 \\ & & & +4.403j & -8.497j & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.015 & 0 \\ & & & & & & -5.428j & \end{bmatrix}$$

由式 (7) 计算各不可观测节点的注入等值导纳,得

$$y_{uu} = \text{diag} \begin{bmatrix} -0.9234 & -1.000j & -0.0815 & -0.03133 & -0.05479 \\ & -1.000j & +0.05251j & +0.01611j & +0.01437j \\ 0 & 0.4448 & 0.4856 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0.0145j & +0.0849j & & & & & & \\ 0 & 0 & 0.3321 & 0 & 0 & 0.6174 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2824 & 0 & 0 & 0.5249 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1752 & 0.8313 & 0 & 0 \\ & & & & +0.0107j & -0.0053j & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5783 & 0.4281 & 0 & 0 \\ & & & & +0.0155j & -0.0104j & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5165 & 0 & 0.4901 & 0 \\ & & & & -0.0959j & & +0.1013j & \end{bmatrix}$$

由式 (10) 计算不可观测节点电压结果与潮流结果完全一致,结果不再列出。当系统运行状态发生变化,只需对 y_{uu} 进行修正。由矩阵 K 可以看出,不可观测节点电压只与周围的可观测节点有关,这种现象很容易用电路理论证明。

5 结论

- 1) 从网络节点方程解算理论入手,提出了配置 PMU 系统的节点可观测性判定条件。
- 2) 将可观测节点作为 V 节点,不可观测节点的功率注入取自 SCADA 系统,通过潮流计算得到不可观测节点的电压值,但牺牲了 PMU 测量快速性的优点。
- 3) 将不可观测节点功率注入等效为等值阻抗(导纳),用可观测节点电压的线性组合形式来表示不可观测节点电压,可近似实现系统的动态可观测。

参考文献:

[1] Phadke A G Synchronized Phasor Measurement in Power Systems [J]. IEEE Computer Application in Power, 1993, 6(2): 10-15.

[2] Baldwin TL, Mili L, Boisen M B Jr, et al Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 703-715.

(下转第 75 页 continued on page 75)

- [11] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin Theory and Analysis of Dynamic Electric Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002

作者简介:

姚成 (1974 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护; E-mail: yao_cheng69@163.com

朱金大 (1964 -),男,高级工程师,研究方向为配网系统自动化;

徐石明 (1967 -),男,高级工程师,研究方向为配网系统自动化。

收稿日期: 2004-07-22; 修回日期: 2004-12-08

A practical protection scheme for small power source connected to power networks in 110 kV transformer substation

YAO Cheng, ZHU Jin-da, XU Shiming

(Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: To solve the problems of small power source connected to power networks, such as protection sensitivity on small power source side is so low that sometimes the protection can't start, and after small power source is connected to power networks, power supply reliability of the 110kV transformer substation will decrease, then a practical protection scheme for small power connected to power networks based on the low voltage protection is proposed. Protection theory and configuration of the scheme are very simple, which greatly simplifies the protection setting and operation management, especially enhances the startup sensitivity on small power side and power reliability of the transformer substation. Moreover, the sensitivity is less influenced by small power impedance change. The practice proves the simplicity and efficiency of the proposed scheme.

Key words: small power source; connected to power networks; protection

(上接第 12 页 continued from page 12)

- [3] 彭疆南,孙元章,王海风. 考虑系统完全可观测性的 PMU 最优配置方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (4): 10-16
PENG Jiang-nan, SUN Yuan-zhang, WANG Hai-feng An Optimal PMU Placement Algorithm for Full Network Observability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (4): 10-16
- [4] 于继来,王江,柳焯. 电力系统潮流计算的几点改进 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (9): 88-93
YU Ji-lai, WANG Jiang, LIU Zhuo Improvements on Usual Load Flow Algorithms of Power System [J]. Proceed-

ings of the CSEE, 2001, 21 (9): 88-93.

- [5] Nuqui R F, Phadke A G Phasor Measurement Unit Placement Based on Incomplete Observability[A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2002 888-893

收稿日期: 2004-08-03

作者简介:

王宗义 (1971 -),男,博士研究生,研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: zongyiw@bjxj-xjgc.com

郭志忠 (1961 -),男,博士,教授,博士生导师,当前主要研究方向为电力系统分析与控制、光学电流互感器等。

Power system state calculation of PMU placement based on incomplete observability

WANG Zong-yi¹, GUO Zhi-zhong^{1,2}

(1. Dept of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2 XJ Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: A novel method for analyzing observability of PMU placement is presented based on network node equation calculation algorithm, which divides system nodes into dynamic observed nodes and unobserved nodes. Two methods for calculating node voltage of the unobserved buses are put forward. One is load flow method in which the observed nodes are taken as slack nodes. The other is the observed nodes voltage is used to present the unobserved voltage and the injected power of unobserved nodes are transformed into equivalent impedances. Characteristics of the proposed methods are analyzed respectively, and the effectiveness of the proposed algorithm is verified by numeric simulation using IEEE14-bus system.

Key words: PMU placement; incomplete observability; bad flow