

部分电压和电流相量可测量时电压相量的状态估计

卢志刚¹, 许世范¹, 史增洪², 韩 岩³

(1. 中国矿业大学信息学院, 徐州 221008)

(2. 中原石油勘探局供电管理处, 濮阳 457001)

(3. 南京电力自动化设备总厂, 南京 210003)

摘要: 基于电网部分电压相量和电流相量可测的条件下, 推导出了整个电网电压相量的线性状态估计表达式, 并对测量随机误差对电压相量状态估计的影响进行了分析。由于对电网电压相量的状态估计是线性的, 因此能实时实现对电网的监视。

关键词: 电力系统; 状态估计; 相量; 线性方程

中图分类号: TM 732

0 引言

状态估计技术被应用于电力系统是从 60 年代开始的。目前在电力系统运行的状态估计软件, 都是基于潮流的非线性状态估计^[1], 其计算整个电网电压相量的时间比较长。基于 GPS 的实时相角测量的研究和实现为相角的应用提供了保障^[2~4], 将相角测量加入到基于潮流的状态估计中, 仍然存在非线性方程和迭代运算, 但可提高估计的精度^[5,6]。文献^[7]推导了全部电压相量和电流相量可测时计算电压相量的状态估计表达式。当相角测量装置在电力系统部分点的安装使得系统可观测时, 在系统结构和参数已知的条件下, 有必要研究当部分电压相量和电流相量可测时, 整个电网电压相量的状态估计问题。本文推导了当部分电压相量和电流相量可测时, 整个电网电压相量的状态估计表达式, 从无噪声和有噪声两方面考虑, 得到了无迭代的、线性的状态估计公式。

1 无测量噪声时的状态估计

设有 N 个母线节点和 B 条支路的等值电力网, 其状态为:

$$\dot{\mathbf{V}} = [\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3, \dots, \dot{V}_N]^T$$

其中 $\dot{V}_i$ 表示第 i 个母线节点的电压相量(包括幅值和相角)。

在 L 个母线节点上装有相角测量装置, 相角测量装置不仅能测电压相量而且能测支路电流相量, 因此对于图 1 所示的支路, 其支路电流相量为:

$$\dot{I}_{i,j} = (Y_{i0} + Y_{i,j})\dot{V}_i - Y_{i,j}\dot{V}_j \quad (1)$$

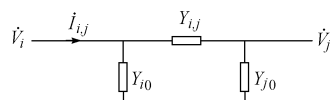


图 1 支路导纳图

Fig. 1 Diagram of a branch

其中 $\dot{I}_{i,j}$ 是支路电流相量; $\dot{V}_i$ 和 $\dot{V}_j$ 是母线节点的电压相量; $Y_{i,j}$ 是节点 i, j 之间的导纳。

相角测量装置测得的母线电压相量为 $\dot{\mathbf{Z}}_V$, 测得的线路电流相量为 $\dot{\mathbf{Z}}_I$, 不考虑测量噪声时, 则有测量方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Z}}_V \\ \dot{\mathbf{Z}}_I \end{bmatrix} = H\dot{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{12} & \mathbf{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_M \\ \dot{\mathbf{V}}_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{Y}_{12}$ 和 $\mathbf{Y}_{22}$ 是网络节点导纳块矩阵; $\dot{\mathbf{V}}_M$ 和 $\dot{\mathbf{V}}_C$ 分别表示可测量的节点电压相量和没有测量的节点电压相量。根据电网络理论可推得:

$$H = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{B1}\mathbf{A}_{MB}^T & \mathbf{Y}_{B2}\mathbf{A}_{CB}^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{1}$ 表示 $L \times L$ 单位阵; $\mathbf{Y}_{B1}$ 表示与电压可测点相连的支路自导纳矩阵, 它是一个 $B \times B$ 阶对角阵; $\mathbf{Y}_{B2}$ 表示与电压可测点相连支路间导纳矩阵, 它是一个 $B \times B$ 阶对角阵; $\mathbf{A}$ 是 $N \times B$ 阶的网络关联矩阵, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{MB} \\ \mathbf{A}_{CB} \end{bmatrix}$; $\mathbf{A}_{MB}$ 是 $L \times B$ 可测电压节点对应的关联矩阵; $\mathbf{A}_{CB}$ 是 $(N-L) \times B$ 不可测电压节点对应的关联矩阵。

一般 H 不是一个方阵, 由于系统可观测, 有 $\text{rank}(H) = N$, 其广义逆存在, 有:

$$\dot{\mathbf{V}} = (H^T H)^{-1} H^T \dot{\mathbf{Z}} \quad (4)$$

这是一个线性估计表达式。由于 $\dot{Z}$ 前面的系数矩阵可离线求出, 因此在线的计算非常简单, 有: $\dot{V}_i = \sum_{j=1}^N h_{i,j} \dot{Z}_j$, 其中 $h_{i,j}$ 为复系数。

2 有测量噪声时的状态估计

由于在实际测量时都存在测量噪声, 这里假设测量噪声是白噪声, 下面推导有噪声时基于相角测量的状态估计表达式。

2.1 有测量噪声时的目标函数

有一等值电力网, 其假设条件同上一节。设相角测量装置测得的母线电压相量为 $\dot{Z}_V$, 测得的线路电流相量为 $\dot{Z}_I$, 此时系统可观测, 则有测量方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_V \\ \dot{Z}_I \end{bmatrix} = H\dot{V} + \begin{bmatrix} e_V \\ e_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{B1}A_{MB}^T & Y_{B2}A_{CB}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_M \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_V \\ e_I \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 e_V, e_I 是测量噪声, 其他参数同式(2), 用最小二乘法估计电压相量, 目标函数为:

$$J(\dot{V}) = [(\dot{Z} - H\dot{V})^T]^* W [\dot{Z} - H\dot{V}] \quad (6)$$

其中 W 是实对角方阵; $*$ 表示共轭。

由于 $\frac{\partial J(\dot{V})}{\partial \dot{V}}$ 不存在^[8,9], 因此无法直接计算

$$\frac{\partial J(\dot{V})}{\partial \dot{V}}.$$

2.2 有测量噪声时目标函数的求导

由于 $\dot{V}$ 实际包括幅值和相角, 因此让目标函数分别对 V 和 δ 求导, 联立求解, 有:

$$\frac{\partial J(\dot{V})}{\partial V} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial J(\dot{V})}{\partial \delta} = 0 \quad (8)$$

其中 $\delta = [\delta_1, \dots, \delta_N]^T$, 当 $(H^T)^* W [\dot{Z} - H\dot{V}] = 0$ 时, 有 $H^T W [\dot{Z} - H\dot{V}]^* = 0$, 此时式(7)和式(8)同时为零^[5], 有:

$$(H^T)^* W [\dot{Z} - H\dot{V}] = 0 \quad (9)$$

根据矩阵性质^[7,8]: $\text{rank}((H^T)^* H) = \text{rank}(H)$, 因此 $(H^T)^* W H$ 有逆矩阵, 得估计解为:

$$\dot{V} = ((H^T)^* W H)^{-1} (H^T)^* W \dot{Z} \quad (10)$$

这是一个线性估计表达式, 由于 $\dot{Z}$ 前面的系数矩阵可离线求出, 因此在线的计算为: $\dot{V}_i = \sum_{j=1}^N h_{i,j} \dot{Z}_j$, 其中 $h_{i,j}$ 为复系数。

3 仿真研究

仿真研究的例子取自文献[1], 它是一个 4 节点的系统, 其接线图如图 2 所示。

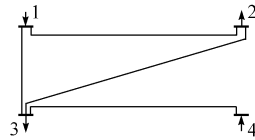


图 2 4 节点接线图

Fig. 2 Schematic diagram of 4-bus system

设在节点 3 装有相角测量装置, 它测得节点 3 电压相量和与节点 3 相连的支路电流相量, 这个系统的特点是没有冗余测量, 便于分析相角误差和幅值误差对电压相量估计精度的影响。设相角测量误差是白噪声, 其方差 σ 为 0.1° 。偏差的标准估计误差为方均根值^[10]。电压幅值的方差为^[7]:

$$\sigma_V = 0.0017 f_{sv} + 0.005 |V| \quad (13)$$

其中 f_{sv} 是电压测量仪器的标称值; V 是被测量电压的幅值。

电流幅值的方差为^[9]:

$$\sigma_I = 0.0017 f_{si} + 0.01 |I| \quad (14)$$

其中 f_{si} 是电流测量仪器的标称值; I 是被测量电流的幅值。

表 1 给出被测量相量有随机误差时, 由测量误差引起的相角标准估计误差。表 2 给出被测量相量有随机误差时, 由测量误差引起的幅值标准估计误差。

表 1 测量误差引起的相角标准估计误差
Table 1 The standard errors of phase-angle by measurement errors

($^\circ$)

节点号	电压幅值 有随机误差	电流相量 有随机误差	电压和电流相量 有随机误差
1	0.0079	0.0151	0.0380
2	0.0106	0.0184	0.0403
4	0.0574	0.0952	0.1150

表 2 测量误差引起的幅值标准估计误差
Table 2 The standard errors of voltage magnitude by measurement errors

kV

节点号	电压幅值 有随机误差	电流相量 有随机误差	电压和电流相量 有随机误差
1	0.7555	0.0079	0.7636
2	0.7583	0.0186	0.7672
4	0.7148	0.0968	0.7313

从上述仿真研究和分析中可以得出, 在由测量电流和测量电压估计整个系统的电压相量时, 并且

状态估计的冗余度不大时,被测量电压相量的随机误差就决定了被估计电压的误差。当然冗余度越大,整个系统的电压相量估计精度会越高。

4 结语

本文研究了基于相角测量的状态估计问题,推导了当部分电压相量和电流相量可测时电压相量的状态估计表达式,以往基于潮流的状态估计是非线性迭代运算,计算时间长。而基于相角测量的电压相量状态估计问题是一个线性估计问题,具有运算速度快的特点,因此可以做到实时运行。

参考文献

- 1 于尔铿(Yu Erkeng). 电力系统状态估计(State Estimation of Electric Power System). 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic Power Publishing Company), 1985
- 2 卢志刚,郝玉山,康庆平,等(Lu Zhigang, Hao Yushan, Kang Qingping, et al). 电力系统实时相角监控系统研究(Prediction of Reference Phase Angle in Real-Time Phase Angle Measurement of Electric Power System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(9)
- 3 卢志刚,郝玉山,康庆平,等(Lu Zhigang, Hao Yushan, Kang Qingping, et al). 电力系统实时相角测量中的参考相角预测(Prediction of Reference Phase Angle in Real-Time Phase Angle Measurement of Electric Power System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(8)
- 4 丁仁杰,闵勇,熊炜华,等(Ding Renjie, Min Yong, Xiong Weihua, et al). 基于GPS的电力系统动态安全监测装置及其动态模拟实验(Development of Power System Dynamic Monitoring Unit Based on GPS). 清华大学学报(Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)), 1997, 37(7): 78~81
- 5 Slutker I W, Gonzalez Provost J M, Sierra J B, et al. Implementation of Phasor Measurements in State Estimator at Sevillana de Electricidad, Conference Proceedings. In: IEEE Power Industry Computer Application Conference. 1995. 392~398
- 6 Thorp J S, Phadke A G, Karimi K J. Real Time Voltage-Phasor Measurements for Static State Estimation. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(11): 3098~3103
- 7 Phadke A G, Thorp J S, Karimi K J. State Estimation with Phasor Measurements. IEEE Trans on PWRs, 1986, 1(1): 233~238
- 8 合恩 R A, 约翰逊 C R (Horn R A, Johnson C R). 矩阵分析(Matrix Analysis). 杨奇译(Yang Qi, trans). 天津: 天津大学出版社(Tianjin: Tianjin University Press), 1989
- 9 庄圻泰, 张南岳 (Zhuang Qitai, Zhang Nanyue). 复变函数(Complex and Function). 北京: 北京大学出版社(Beijing: Peking University Press), 1982
- 10 杨惠连, 张涛 (Yang Huilian, Zhang Tao). 误差理论与数据处理(Error Theory and Data Processing). 天津: 天津大学出版社(Tianjin: Tianjin University Press), 1992

卢志刚,男,博士,现在中国矿业大学博士后工作站工作,主要研究电力系统相角测量及其应用等。

许世范,男,教授,博士生导师,研究方向为 CIMS、机器人和控制理论等。

史增洪,男,主要从事电力系统运行和管理工作的。

STATE ESTIMATION OF VOLTAGE PHASORS BASED ON PARTS OF VOLTAGE AND CURRENT PHASORS MEASUREMENTS

Lu Zhigang¹, Xu Shifan¹, Shi Zenghong², Han Yan³

(1. China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

(2. Central Plains Petroleum Prospecting Bureau, Puyang 457001, China)

(3. Nanjing Electric Power Automation Equipment General Factory, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper presents the linear expression of the state estimation of voltage phasor for the whole power network based on the fact that part of the bus voltage phasor and current phasor being measurable. The effects of the stochastic errors of measured phasor on the state estimation of voltage phasor are analyzed. The real-time monitoring to the power network can be realized with the linear state estimation of voltage phasor.

Keywords: power systems; state estimation; phasor; linear expression