

基于多方式电网断面的输电网络参数估计

吴昊¹, 闫文瑾², 何桦³

(1. 安徽电力调度通信中心, 安徽省 合肥市 230061; 2. 东南大学 电气工程学院, 江苏省 南京市 210096;
3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省 南京市 211100)

Parameter Estimation of Power Transmission Network Based on Multi-Cases of Power Flow Operating Conditions

WU Hao¹, YAN Wen-jin², HE Hua³

(1. Anhui Electric Power Dispatching & Communication Centre, Hefei 230061, Anhui Province, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;
3. NARI-Relays Electrical Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A method to estimate parameters of power transmission network based on multi-cases of power flow operating conditions is designed. In this paper, the cases are divided into two types, i.e., filtering conditions and operating conditions. How to utilize multi-cases of power flow operating conditions for parameter estimation is analyzed. One kind of loop measurement estimation equations based on SCADA and two kinds of branch measurement estimation equations, in which one kind is based on SCADA and the other kind is based on PMU, are obtained. Combining with multi different cases of power flow operating conditions, parameter errors can be accurately identified and estimated by above-mentioned three kinds of equations. The proposed method is tested by New-England 29-bus system, and test results show that the overall parameter estimation of transmission network can be implemented by the proposed method.

KEY WORDS: parameter estimation; SCADA; PMU; multi-case of power flow operating condition

摘要: 研究了基于多方式断面的输电网络参数估计方法, 将电网断面分为滤波断面和方式断面, 分析了如何利用多方式电网断面进行参数估计, 得出了电网环路测量估计方程和电网支路测量估计方程, 结合多个不同方式的电网断面, 可实现错误参数的准确定位及估计。在 New-England 39 节点系统上对该算法进行了测试, 结果表明该方法可实现输电网络参数全估计。

关键词: 参数估计; 监视控制与数据采集(SCADA); 同步相角测量单元(PMU); 多方式电网断面

0 引言

参数问题是影响能量管理系统(energy

management system, EMS)应用软件实用化的重要问题^[1-12]。由于种种原因, EMS 数据库中的电网参数或多或少存在错误。对此, 可以重新测量参数, 也可以利用调度中心采集到的数据对电网参数进行估计。前者代价太大, 不可能大面积使用; 后者依赖于采集数据的精度。目前, 高压输电网络监视控制与数据采集(supervisory control and data acquisition, SCADA)、同步相角测量单元(phasor measurement unit, PMU)的测量精度和稳定性有较大提高, 输电网络参数估计已具备可行性。

本文对多方式电网断面在电网参数估计中的应用进行了研究。按照是否增加可观测参数, 将电网断面分为滤波断面和方式断面, 并分析了如何利用多方式电网断面进行电网参数估计。文中得出了电网环路测量估计方程和 2 类电网支路测量估计方程, 并设计了完整的电网参数估计流程。在 New-England 39 节点系统上进行了算法测试, 结果表明: 该算法可以实现电网参数的全估计。

1 多电网断面

由于待估计参数的数量一定, 随着电网断面的增多, 参数估计的冗余度将提高。假定 n_p 和 q 分别为可疑参数数量及参与估计的 SCADA 断面数量, m 和 n 分别为单个断面的测量数量和电网状态数量, 则估计冗余度为: $[mq/(nq+n_p)] = [m/(n+n_p/q)]$ 。当 $q \rightarrow \infty$ 时, 参数估计的冗余度接近于状态估计的冗余度(m/n)。能够提高参数估计冗余度的电网断面称作滤波断面, 能够提高参数估计可观测参数数量

的电网断面称为方式断面。

基于残差灵敏度的参数估计方法和基于增广状态量的参数估计方法^[13-14]都可以推广至多方式断面估计。由于残差灵敏度矩阵只能在单断面下求取，即可疑参数只有满足单断面可观测才能进行估计。前一种方法仅利用多时间断面滤噪，没有考虑多电网断面下的可观测性问题；后一种方法向已有的电网断面中添加新断面进行估计，可能增加参数的可观测性。这2种方法仅利用滤波断面而未能够考虑方式断面，因此，只有当电网中错误参数分布满足单电网断面下的可观测性要求，才能进行参数估计。实际上，EMS数据库中错误参数的数量及分布往往难以预料，需要利用多方式电网断面进行参数估计，以提高可观测参数的数量。电网的稳态参数中，电抗参数的正确估计是其它参数估计的前提，本文只针对电抗参数进行估计。

2 环路方程

根据高压输电网有功传输特点，可进行如下简化：1) 由于有功损耗只占有功传输的1%，可忽略有功潮流方程的电阻参数；2) 任一输电线路或变压器两端的角差 θ_{ij} 很小，满足 $\sin\theta_{ij} \approx \theta_{ij}$ ，则电网单一支路有功潮流方程为

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{x_{ij}} \theta_{ij} \quad (1)$$

式中： P_{ij} 为线路(或变压器)有功； V_i 、 V_j 为端电压； x_{ij} 为电抗； θ_{ij} 为角差。

为提高供电可靠性，高压输电网采用环网供电。每个电网环路中所有支路的角度差之和为0，电网环路 Φ 的环路潮流方程为

$$\sum_{i,j \in \Phi} P_{ij} x_{ij} / (V_i V_j) = 0 \quad (2)$$

根据文献[15]，假设电网 G 有 n 个节点、 b 条支路，求取圈基的方法为：

- 1) 用深度优先搜索法得到生成树 T 。
- 2) 标注 G 中不在 T 上的边 $e_1, e_2, \dots, e_{b-n+1}$ 。
- 3) 在 T 上添加 e_i ，删除 $(T+e_i)$ 的一次项，得到的那个圈即是圈基。如此，可得 $(b-n+1)$ 个圈基。

得到电网的全部圈基后，按照是否有公共支路对圈基分组，有公共支路相连的圈基集合为圈基组，不同圈基组之间没有共同的支路相连。

设阈值 δ ，圈基环路满足

$$\sum_{i,j \in \Phi} P_{ij} x_{ij} / (V_i V_j) < \delta \quad (3)$$

则认为该圈基环路不含错误参数支路。与基于测量残差的参数辨识不同，该方法仅辨识环路中有没有错误参数，不定位错误参数的位置。

对于有错误参数的环路，将测量的误差分量引入上式，并考虑多个圈基环路以及多方式电网断面的电网测量，可得如下环路方程

$$\begin{bmatrix} v_1^1 \\ \vdots \\ v_m^1 \\ v_1^2 \\ \vdots \\ v_m^2 \\ v_1^n \\ \vdots \\ v_m^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i,j \in \Phi_1} P_{ij}^1 x_{ij} / (V_i^1 V_j^1) \\ \vdots \\ \sum_{i,j \in \Phi_m} P_{ij}^1 x_{ij} / (V_i^1 V_j^1) \\ \sum_{i,j \in \Phi_1} P_{ij}^2 x_{ij} / (V_i^2 V_j^2) \\ \vdots \\ \sum_{i,j \in \Phi_m} P_{ij}^2 x_{ij} / (V_i^2 V_j^2) \\ \vdots \\ \sum_{i,j \in \Phi_1} P_{ij}^n x_{ij} / (V_i^n V_j^n) \\ \vdots \\ \sum_{i,j \in \Phi_m} P_{ij}^n x_{ij} / (V_i^n V_j^n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中等号左边为误差分量，其上标为电网断面序号，下标为圈基序号；等号右边项的上标为电网断面序号， Φ_i 为第 i 个圈基。

3 支路方程

环路方程无法估计全部参数，可增加已知参数值进行伪测量。由于事先无法准确定位错误参数的位置，伪测量的权重很难确定，必须增加支路方程，使支路方程组变为非齐次方程组^[2]。支路方程有2个来源：1) 由环路方程变形得到；2) 根据PMU得到。

如果某圈基环路不包含有错误参数的支路，其支路 Γ 包含在其它含有错误参数的圈基环路 Φ 中，则可以从环路方程中除去 Γ 。考虑到多方式电网断面，可得到支路方程

$$\begin{bmatrix} v_\Phi^1 \\ \vdots \\ v_\Phi^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i,j \in E} P_{ij}^1 x_{ij} / (V_i^1 V_j^1) + \sum_{i,j \in \Gamma} P_{ij}^1 x_{ij} / (V_i^1 V_j^1) \\ \vdots \\ \sum_{i,j \in E} P_{ij}^n x_{ij} / (V_i^n V_j^n) + \sum_{i,j \in \Gamma} P_{ij}^n x_{ij} / (V_i^n V_j^n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： E 为 Φ 去除 Γ 后剩下的支路集合； v_Φ^i 为支路方程的误差分量， i 为时间断面， $i=1,2,\dots,n$ ；等号右边第1项为 Φ 的可疑支路；第2项为 Φ 中参数正确支路，是常数项。

配置了PMU测量的节点，可以直接测量电网相应节点之间的相角差。假定在节点 i 和节点 j 上布置有PMU测量，则节点 i 和 j 之间的角差 θ_{ij} 为已知量，考虑到多方式电网断面，可以增加新的支路方程

$$\begin{bmatrix} v_{\Gamma}^1 \\ \vdots \\ v_{\Gamma}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i,j \in \Gamma} P_{ij}^1 x_{ij} / (V_i^1 V_j^1) + \theta_{ij}^1 \\ \vdots \\ \sum_{i,j \in \Gamma} P_{ij}^n x_{ij} / (V_i^n V_j^n) + \theta_{ij}^n \end{bmatrix} \quad (6)$$

4 估计模型及估计流程

由加权最小绝对值估计得到总的估计模型

$$\min \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_1} \omega_{1j} |v_{1j}^i| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_2} \omega_{2j} |v_{2j}^i| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_3} \omega_{3j} |v_{3j}^i| \right) \quad (7)$$

式中： m_1 为环路数量； m_2 为不含错误参数的支路数量； m_3 为含错误参数的支路数量； ω_{1j} 为环路方程的权系数； ω_{2j} 为不含错误参数的支路方程的权系数； ω_{3j} 为含错误参数的支路方程的权系数。权系数应综合反映测量精度和支路数量，测量精度高、支路数量少的方程，其权系数大。

假如电网中存在有错误参数的支路，则电网电抗参数估计流程如图 1 所示。

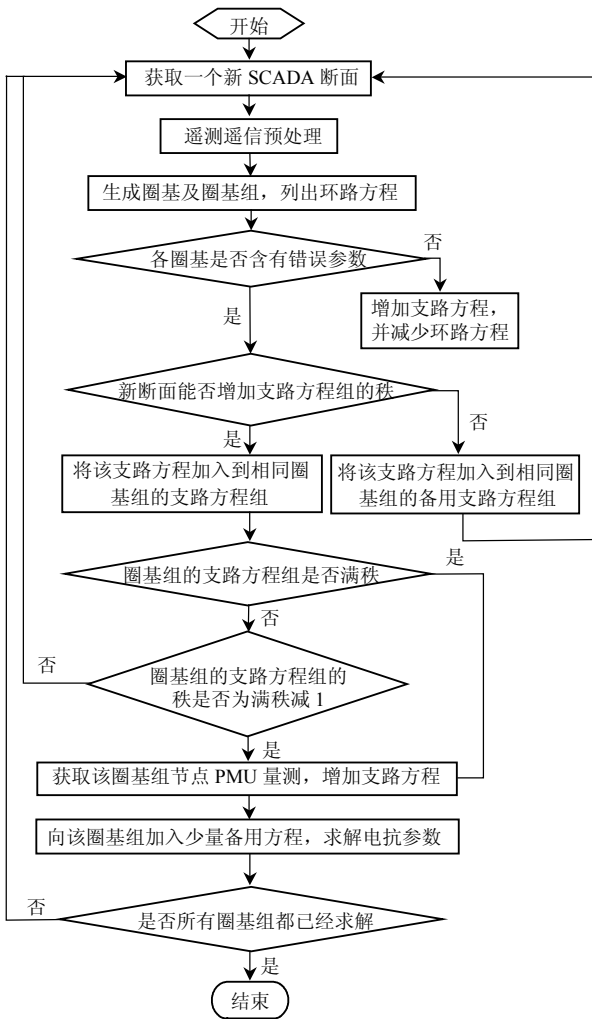


图 1 参数估计流程

Fig. 1 Flow chart for parameter estimation

5 算法测试

在 New-England 39 节点系统上测试本文提出的算法。系统中发变组支路(带有发电机标志 G 的支路)都是辐射型支路，其余支路组成了环网。

算法测试 1，假定所有环路都存在可疑参数，无法形成基于 SCADA 断面的支路方程，见图 2。假定系统的 16、23、26、29 节点上配置有 PMU，以三角形标注，其所经历的支路路径用实心圆圈标注。该系统有 8 个圈基，用带圆圈的数字标注，这些圈基分为 3 个圈基组，其中最大的圈基组由①、②、③、④、⑤和⑥圈基组成，另 2 个圈基组分别为⑦圈基和⑧圈基。从图 2 可以看出，4 个 PMU 测点是该系统 3 个圈基组所有参数可观测的最小配置。

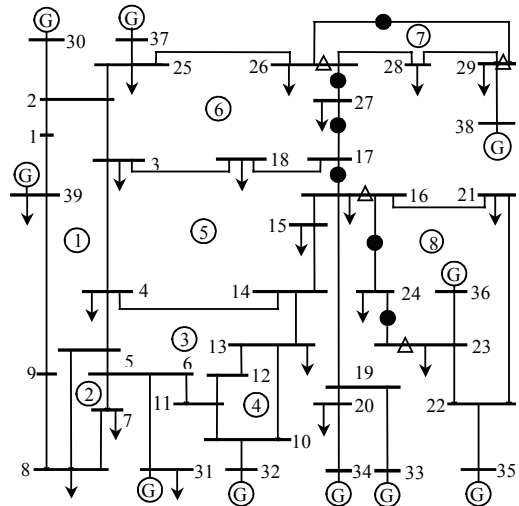


图 2 算法测试 1 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of algorithm test 1

算法测试 2，假定圈基②支路不含错误参数，可得到与圈基②相连的圈基①和③的支路方程，见图 3。

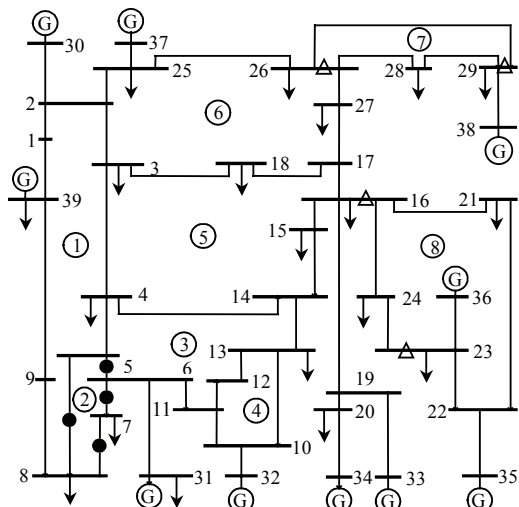


图 3 算法测试 2 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of algorithm test 2

该圈基组的参数估计不再需要 PMU 测量, 在系统 23、26、29 节点上配置 PMU 测量, 即可完成对全部环网参数的估计。

设计了多个不同方式的潮流断面, 根据式(4)~(7)估计参数, 3 个圈基组中第 1 条支路的估计结果见表 1。

表 1 参数估计结果

Tab. 1 Parameter estimation results

目标支路	真值/ Ω	估计值/ Ω	相对误差
1-2	0.041 1	0.039 6	0.034 1
16-21	0.013 5	0.014 2	0.051 9
26-28	0.047 4	0.049 4	0.042 2

6 结语

参数的准确性关系到整个 EMS 应用软件的准确度和可信度。本文设计了基于 SCADA 的环路方程、支路方程及基于 PMU 的支路方程, 这些方程不含对电网状态的估计, 能有效利用电网的多方式电网断面进行参数估计, 具有良好的应用前景。该方法对 PMU 测量的配置要求低, 在有正确参数支路时, 不需要 PMU 测量, 就可以完成对相关圈基组支路参数的全估计。

参考文献

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 24.
- [2] Zarco P, Exposito A G. Power system parameter estimation: A survey[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 216-222.
- [3] Abur A, Exposito A G. Power system state estimation: Theory and implementation[M]. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [4] 杨滢, 孙宏斌, 张伯明, 等. 集成于 EMS 中的参数估计软件的开发与应用[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 43-49.
Yang Ying, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Development and application of parameter estimation software integrated into EMS [J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 43-49(in Chinese).
- [5] 王明俊. 我国电网调度自动化的发展: 从 SCADA 到 EMS[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 43-46.
Wang Mingjun. Development of dispatching automation technology in China: From SCADA to EMS[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 43-46(in Chinese).
- [6] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 1-10.
Xin Yaozhong. Development trend of power system dispatching automation technique in 21st century[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 1-10(in Chinese).
- [7] 张海波, 张伯明, 王志南, 等. 地区电网外网等值自动生成系统的开发与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 10-15.
Zhang Haibo, Zhang Boming, Wang Zhinan, et al. Development and application of real-time external network equivalent system for sub-transmission network[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 10-15(in Chinese).
- [8] 何桦, 顾全, 卫志农, 等. 基于主导和非主导参数的参数可估计性辨识[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 49-52.
He Hua, Gu Quan, Wei Zhinong, et al. Parameter estimation feasibility identifying based on dominant parameter and non-dominant parameter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 49-52(in Chinese).
- [9] 何桦, 卫志农, 顾全, 等. EMS 中基于测量置换的对地电容参数估计方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 63-66.
He Hua, Wei Zhinong, Gu Quan, et al. A measurement transposition algorithm for transmission line grounding capacitance estimation in energy management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 63-66(in Chinese).
- [10] 何桦, 张瑜, 宣丽娜. 基于线性内点法及正交变换的抗差参数估计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 36-40.
He Hua, Zhang Yu, Xuan Lina. WLAV robust parameter estimation based on linear interior point algorithm and orthogonal transformations [J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(20): 36-40(in Chinese).
- [11] 冯永青, 吴文传, 孙宏斌, 等. 现代能量控制中心的运行风险评估研究初探[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 73-79.
Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Sun Hongbin, et al. A preliminary investigation on power system operation risk evaluation in the modern energy control center[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 73-79(in Chinese).
- [12] 梁军, 麻常辉, 真志皓. 基于线路参数估计的高压架空输电线路故障测距新算法[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 60-64.
Liang Jun, Ma Changhui, Yun Zhihao. A fault location algorithm for high voltage overhead power transmission line based on line parameter estimation[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 60-64(in Chinese).
- [13] Liu W, Swee-Lian Lim. Parameter error identification and estimation in power system state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 200-209.
- [14] Liu W, Wu F F, Lun S M. Estimation of parameter errors from measurement residuals in state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 81-89.
- [15] 王树禾. 图论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 20.



吴昊

收稿日期: 2009-04-13。

作者简介:

吴昊(1980—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电网稳定与控制;

闫文瑾(1987—), 女, 本科, 研究方向为电力系统自动化;

何桦(1977—), 男, 硕士, 主要研究 EMS 系统。

(编辑 蒋毅恒)