

基于主导和非主导参数的参数可估计性辨识

何 桦¹, 顾 全¹, 卫志农², 孙国强²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211100; 2. 河海大学电气工程学院, 江苏省南京市 210098)

摘要:通过对参数估计应用难点的分析,介绍了参数的可估计性问题。借助电网线性模型的近似分析,提出了参数估计中的主导参数和非主导参数概念。据此解释了参数估计实践中遇到的一些现象,并得出了关于参数估计软件运行方式等的相关结论。根据非主导参数易受量测噪声影响的特点,提出了通过噪声敏感试验的方法辨识主导及非主导参数的方法。对 IEEE 算例进行了仿真实验,验证了文中提出的参数估计时应去除非主导参数的观点。

关键词:能量管理系统; 状态估计; 参数估计; 参数辨识

中图分类号: TM744; TM732

0 引言

随着我国电力工业的发展,对电网调度自动化的要求不断提高,能量管理系统(EMS)面临着许多新的机遇与挑战^[1-2]。由于电网负荷不断增长、规模不断扩大,调度运行人员希望 EMS 能够提供更为可靠和精确的电网分析结果。传统的状态估计软件一般假定已知电网参数正确(有载变压器变比除外),据此给出电网状态供其他应用软件使用。实际中,由于参数录入错误、参数理论值和现场实际值不对应以及现场工况变化等原因,可能会造成电网参数的错误。错误的电网参数可能导致状态估计、潮流计算、理论线损计算、最优潮流计算等与现场实际运行经验出现较大的偏差,从而降低整个 EMS 应用软件的实用化水平,并影响调度运行人员对相关应用软件的使用信心。因此,研究实用化的参数估计软件具有重要的现实意义^[3-4]。

目前参数辨识和估计的主要方法^[5-6]有扩展状态量的估计和基于量测残差的估计 2 种。大量的参数估计实践表明,参数估计具有不同于状态估计的特殊性。即使在量测配置齐全的情况下,也并非所有的参数错误都能被正确地估计出来。那么在一个电网中,有哪些参数可能被估计,又有哪些参数不容易被估计,或者没有必要参与最终的估计,本文将就此问题展开研究。

本文分析了参数估计的应用难点,指出了参数的可估计性问题。围绕参数估计这一特殊问题,提出了参数估计中的主导参数和非主导参数概念。以线性网络分析方法解释其概念,并给出了一种实用

的辨识主导及非主导参数的方法。根据这一概念,可以得到一些参数估计的相关结论。最后对 IEEE 试验系统进行了分析。

1 应用难点

自从 1970 年状态估计被引入电力系统以来,有关状态估计的内容一直吸引着众多的研究者^[7-10],目前状态估计软件已在 EMS 中得到广泛应用。相比之下,参数估计^[11-13]的相关研究较少,且实际应用也不多。造成这一现象的原因很多,其中导致参数估计比状态估计更为困难的 2 个重要因素是:①参数估计比状态估计的待估计量要多,这导致整个系统的量测冗余度降低或不可观测,而冗余度的降低必然影响到最终的估计精度;②状态量(电压的幅值和相角)和参数量与潮流间的关系不同。由潮流方程可知,电网潮流对状态量的变化比对参数量的变化更为敏感,因此基于同样的潮流量测,状态量的估计精度往往比参数量的估计精度高。这一结论还可从以下 2 点得到部分验证:

1) 参数量估计比状态量估计更易受到潮流量测噪声的影响,即参数估计易受量测噪声的影响。这一点将在下文详细论述。

2) 观察雅可比矩阵中的元素大小可以看出,量测对参数的导数分量比量测对状态的导数分量小很多,以致有时会出现病态的情况。这也说明了参数估计较状态估计更为困难,甚至有时难以估计。

2 主导与非主导参数的概念

与状态估计不同,在已经满足可观测性的条件下,参数估计还有可能出现错误的估计。那么参数的可估计性与哪些因素相关? 显然,如果某个支路

的参数发生改变时,会在整个电网中引起显著的潮流及状态变化,则这样的支路参数应能被准确估计,将这类参数称为“主导参数”。相反,如果某支路参数的改变所导致的电网状态及潮流变化很小,则通过潮流量测及电压量测可能(并非一定)难以估计出该支路参数的错误,称这类参数为“非主导参数”。为使主导及非主导参数的概念更为直观,以下通过近似的电网线性模型来阐述。

利用戴维南定理可以求出从某个阻抗错误支路的端口 i, j 看去的系统等效电压源及系统等效阻抗。同时,将支路 i, j 的阻抗错误等效为其正确的阻抗支路串联一个附加阻抗支路。如图 1 所示。

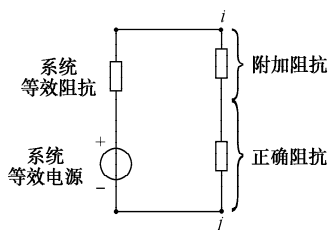


图 1 支路参数错误等效模型

Fig. 1 Equivalent model of parameter error

支路 i, j 阻抗参数的错误程度可以通过改变图 1 中的附加阻抗值的大小来进行模拟。如果附加阻抗的变化显著影响电网的潮流分布,则显然这条支路的参数就能被准确估计,反之则可能难以估计。显然,图 1 中附加阻抗对电网的影响大小取决于系统的等效电源与等效阻抗的大小。如果等效电源较小而等效阻抗较大,则附加阻抗的影响有限,即该支路参数的可估计性不强。由此可以得出参数估计中 2 条显而易见的结论:

1) 由于轻载线路向系统看去的等效电源相对较小,轻载线路的参数可能难以估计。在参数估计的实践中有时可以发现,包含某些轻载线路的参数估计会出现收敛性困难。

2) 由于辐射型支路的系统等效阻抗较大,所以辐射性支路的参数大都难以估计。由于我国地区调度电网一般都是开环运行,在地调状态估计软件的调试中可以发现,辐射型支路参数对量测残差的影响往往较小。

由上述结论可以看出,大部分的轻载线路参数和辐射型线路的参数都可以看做是非主导参数。这类参数对当前电网潮流不起主要作用,故称之为非主导参数。由于电网潮流对非主导参数不太敏感,因此非主导参数实际上允许有一定的错误存在。

对非主导参数的估计非常困难。由于非主导参数大的改变仅使得系统潮流有小的变化,也就是说

系统潮流的小改变就可能导致非主导参数的大变化,即非主导参数对电网潮流很敏感。在实际的电网潮流量测中,量测噪声不可避免。由于量测噪声的存在,使得非主导参数很容易受其影响,从而产生错误的估计,估计精度难以满足要求。

综上所述,对非主导参数的估计有时显得没有必要,且往往比较困难。因此,在进行参数辨识时,可以将非主导参数从可疑参数集合中去除。这样既避免了非主导参数的误估计,又减少了待估计参数的个数,增加了量测冗余度,从而能够提高估计精度。观察雅可比矩阵中的元素可以知道,由于非主导参数所对应的状态改变量往往很小,因此经常容易产生矩阵的病态。因此,去除非主导参数后的参数估计能大大改善增广雅可比矩阵及相应的信息矩阵(即增益矩阵)的病态情况,从而提高算法的数值稳定性。

3 主导与非主导参数的辨识方法

试验表明,主导参数的参数错误不仅导致其本身的残差变大,也会使邻近非主导参数支路的残差变大。在参数辨识时,仅从量测残差难以完全去除非主导参数。以下介绍一种能够准确辨识主导与非主导参数的实用方法。该方法利用非主导参数对电网潮流及其噪声较为敏感的特性,对某一电网断面主动多次加噪声进行扩展状态量方法的估计,统计估计结果的离散度指标。显然,非主导参数的估计结果会比较分散,不像主导参数那样容易聚集在真值附近。由于该方法根据电网参数对量测噪声的敏感程度进行试验性估计辨识,因此可以称其为“噪敏试验法”。

3.1 辨识流程

本文应用基于最小二乘法的增广状态估计进行参数的估计。首先利用常规状态估计方法进行估计,将残差较大的几条支路作为可疑支路(这里暂不考虑坏数据的影响)。可疑支路导纳参数作为增广状态量参与增广估计。增广估计最终迭代求解式为:

$$\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^T \mathbf{W} (\mathbf{Z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})) \quad (1)$$

式中: $\Delta \mathbf{x}$ 为增广状态修正量; $\mathbf{H}$ 为增广雅可比矩阵; $\mathbf{Z}, \mathbf{W}$ 及 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 分别为量测量、权矩阵及潮流计算值。

每次加噪声进行增广状态估计后需要记录参数估计值 x_i , 最后根据这些记录的参数估计值判别参数估计结果的离散程度。为此首先定义 n 次参数估计的均值 $\bar{x}$ 和标准方差 $\bar{\delta}$ 如下:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$\bar{\delta} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

标准方差已经能够反映估计结果的绝对离散程度。为了能够反映估计结果的相对离散程度,定义离散度指标 d 如下:

$$d = \frac{\bar{\delta}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4)$$

下文的仿真试验表明,这一离散度指标基本能够区分主导及非主导参数。非主导参数的这一离散度指标明显较大,表明非主导参数支路的参数估计易受量测噪声的影响,其可估计性不强。

3.2 病态情况的处理

如果没有特殊情况,迭代求解状态估计时,一般10次以内就可收敛。在进行增广状态估计时,经常会遇到迭代数十次甚至上百次仍不能收敛的情况。这实际上是增广的增益矩阵“病态”所造成的。观察雅可比矩阵中线路有功对其导纳参数的导数分量:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial g} = v_i^2 - v_i v_j \cos \theta_{ij} \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial b} = -v_i v_j \sin \theta_{ij} \quad (6)$$

在线路两端的电压差不大时,这些元素值可能会非常小,最后很可能造成数值求解不稳定。

出现迭代不收敛,实际上暗示可能是由于有非主导参数参与估计所造成的。当然,并不是有非主导参数的增广估计就一定会导致迭代不收敛。出现迭代难收敛的情况后,一种简易实用的解决方案是设置迭代次数上限(如30次)。在迭代达到上限后检查雅可比矩阵中式(5)及式(6)值最小的参数,将该参数去除。或者直接去除负载最小的参数。然后重新进行估计,一般最终都能够收敛。

4 算例分析

使用噪敏试验方法对IEEE 39节点系统进行仿真研究。仿真系统量测配置齐全。每次进行增广状态估计时附加不大于2%的量测噪声。对每一条线路依次串联0.02(标么值,下同)的附加电抗进行参数错误仿真。每次挑选残差最大的5条线路参与估计。估计及统计次数为20次。表1列出了部分试验结果。在常规状态估计后记录了总的量测残差,最后统计残差总加的均值。

表1 噪敏试验结果
Table 1 Test results of noise sensitivity experiments

首端节点	末端节点	残差总加均值	电抗真值	估计均值	估计误差/(%)	估计标准方差	离散度/(%)
2	1	3.823 68	0.041 1	0.043 448	-5.711 94	0.004 400 70	10.128 80
39	1	4.778 54	0.025 0	0.027 479	-9.915 35	0.005 486 10	19.964 90
3	2	15.345 70	0.015 1	0.015 893	-5.248 80	0.001 679 60	10.568 60
25	2	10.126 40	0.008 6	0.009 087	-5.662 93	0.000 938 03	10.322 80
4	3	7.690 17	0.021 3	0.022 101	-3.759 38	0.002 766 00	12.516 80
18	3	2.849 14	0.013 3	0.022 148	-66.522 40	0.006 389 70	28.850 80
5	4	5.825 42	0.012 8	0.014 645	-14.409 90	0.003 743 30	25.561 30
14	4	12.856 00	0.012 9	0.012 464	3.377 26	0.000 800 53	6.422 58
22	21	17.611 90	0.014 0	0.014 078	-0.556 71	0.000 255 31	1.813 52
23	22	3.609 83	0.009 6	0.013 289	-38.427 70	0.008 010 20	60.276 90
24	23	8.623 35	0.035 0	0.035 162	-0.462 07	0.000 744 87	2.118 42
26	25	3.365 79	0.032 3	0.036 220	-12.136 80	0.008 699 00	24.016 90
27	26	9.325 69	0.014 7	0.014 495	1.396 93	0.000 776 50	5.357 17
28	26	3.218 28	0.047 4	0.049 099	-3.585 49	0.003 218 70	6.555 38
29	26	3.762 35	0.062 5	0.063 518	-1.628 36	0.002 800 30	4.408 64
29	28	5.735 78	0.015 1	0.015 264	-1.084 16	0.000 469 75	3.077 57

注:误差百分比定义为:(1-估计值/真值)×100%;估计均值、估计标准方差及离散度的定义见3.1节。

从表1可以看出,离散度大于15%的参数其估计误差较大,可以归为非主导参数,如表中的线路39-1,18-3,5-4,23-22,26-25。反之则可以归为主导参数。非主导参数的估计效果较差,如果对其进行估计,往往会造成其参数的误估计。从表中还可以看出,非主导参数的错误所造成的全网量测残差总加较小。这就是说,非主导参数即使有一定的错误存在,也不会对全网的潮流状态分布产生大的影响。

因此在估计时可以将辨识出来的非主导参数从待估计参数中去除。值得注意的是,残差总加较小并不意味着就一定是非主导参数错误,如表中最后3条线路所示。

为对比显示噪声对主导及非主导参数的影响,表2给出了表1中的线路在无量测噪声情况下各自的估计误差。

表 2 无噪声估计结果
Table 2 Estimation results without noise

首端节点	末端节点	估计误差/(%)	首端节点	末端节点	估计误差/(%)
2	1	-2.155 6	22	21	-0.322 4
39	1	2.990 6	23	22	-2.385 0
3	2	3.241 9	24	23	-0.162 7
25	2	-1.537 9	26	25	-3.535 6
4	3	1.358 5	27	26	0.646 6
18	3	-4.580 2	28	26	-0.479 9
5	4	-3.858 0	29	26	-0.490 8
14	4	-0.066 9	29	28	-0.539 2

从表 2 可以看出,在无噪声的情况下,所有参数的估计精度都可以接受。对比表 1 可知,非主导参数的估计精度在加入噪声后变差,而噪声对主导参数的影响较小。非主导参数由于易受量测噪声的影响,其估计结果往往比较分散。图 2 给出了非主导参数线路(39-9)的 20 次电抗估计值所组成的曲线,该线路电抗真值为 0.025。作为对比,图 3 给出了主导参数线路(13-10)的 20 次电抗估计曲线,该线路电抗真值为 0.004 3。由于非主导参数的存在,在实际工程应用时可以考虑引入多源数据的概念^[14],以避免该类参数的误修改。

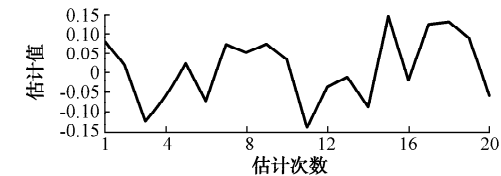


图 2 线路 39-9 的估计曲线
Fig. 2 Estimation results curve of line 39-9

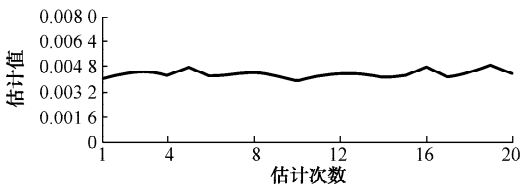


图 3 线路 13-10 的估计曲线
Fig. 3 Estimation results curve of line 13-10

5 结语

本文研究了参数估计中参数的可估计性问题,并据此提出了主导与非主导参数的分类及噪敏试验辨识方法。非主导参数由于易受量测噪声的影响,在实际运行环境下其可估计性很弱,不应参与参数估计,这样不仅能提高估计精度,还可改善算法的数值稳定性。从图 1 的分析还可以看出,参数估计的这一分类受到电网运行方式的影响。在电网运行方式发生改变后,非主导参数与主导参数可能会互换。

因此参数估计软件最好能准实时运行,即在运行方式改变时能及时获取多断面进行计算,而在运行方式基本不变时则可以离线。

参考文献

[1] 张伯明. 现代能量控制中心概念的扩展与前景展望. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 1-6.
ZHANG Boming. Concept extension and prospects for modern energy control centers. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 1-6.

[2] 姚建国, 高宗和, 杨志宏, 等. EMS 应用软件支撑环境设计与功能整合. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 49-53.
YAO Jianguo, GAO Zonghe, YANG Zhihong, et al. Supporting platform design and function integration for EMS application software. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 49-53.

[3] 温嘉宇, 奚杰. 电力系统网络参数对状态估计的影响. 黑龙江电力, 2004, 26(5): 358-360.
WEN Jiayu, XI Jie. Effect of network parameter in electric power system on status estimation. Heilongjiang Electric Power, 2004, 26(5): 358-360.

[4] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 53-60.
LI Bijun, XUE Yusheng, GU Jinwen, et al. Status quo and prospect of power system state estimation. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 53-60.

[5] ALSAC O, VEMPATI N, STOTT B, et al. Generalized state estimation. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 1069-1075.

[6] LIU W, WU F, LUN S. Estimation of parameter errors from measurement residuals in state estimation. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 81-89.

[7] 郭端鹏, 邵学俭, 韩祯祥. 基于分块吉文斯旋转的电力系统状态估计. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 6-31.
GUO Ruipeng, SHAO Xuejian, HAN Zhenxiang. A blocked Givens rotations based algorithm for power system state estimation. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 6-31.

[8] 李强, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于混合量测的电力系统状态估计混合算法. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 31-35.
LI Qiang, ZHOU Jingyang, YU Erkeng, et al. A hybrid algorithm for power system state estimation based on PMU measurement and SCADA measurement. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 31-35.

[9] 孙国强, 卫志农, 李阳林, 等. 计及统一潮流控制器的电力系统状态估计. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 63-67.
SUN Guoqiang, WEI Zhinong, LI Yanglin, et al. Power system state estimation with UPFC considered. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 63-67.

[10] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的状态估计研究综述. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 98-103.
DING Junce, CAI Zexiang, WANG Keying. An overview of state estimation based on wide-area measurement system. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 98-103.

- [11] 杨澄,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.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. Power System Technology, 2006, 30 (4): 43-49.
- [12] 何桦,柴京慧,卫志农,等.基于量测残差的改进参数估计方法.电力系统自动化,2007,31(4):33-36.
HE Hua, CHAI Jinghui, WEI Zhinong, et al. Improved method of parameter estimation based on measurement residuals. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (4): 33-36.
- [13] ZARCO P, EXPOSITO A G. Power system parameter estimation; a survey. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 216-222.

- [14] 叶锋,何桦,顾全,等.EMS 中负荷预测不良数据的辨识与修正.电力系统自动化,2006,30(15):85-88.
YE Feng, HE Hua, GU Quan, et al. Bad data identification and correction for load forecasting in energy management system. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (15): 85-88.

何桦(1977—),男,硕士,研究方向为 EMS 系统应用软件。E-mail: hehua@rcs-9000.com

顾全(1970—),男,高级工程师,主要从事调度自动化系统的研发工作。

卫志农(1962—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行分析与控制。

Identification of Parameter Estimation Feasibility Based on Dominant Parameter and Non-dominant Parameter

HE Hua¹, GU Quan¹, WEI Zhinong², SUN Guoqiang²

(1. Nanjing NARI-Relays Electric Co Ltd, Nanjing 211100, China)

(2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: By analyzing the application difficulties of parameter estimation, the parameter estimation feasibility of power system is discussed. The concept of dominant parameter and non-dominant parameter is proposed with the help of approximate analysis by using the linear model of power system. Therefore the behavior of parameter estimation practice can be explained and the inference for the software running mode of parameter estimation can be drawn from the linear model of power system. Employing the fact that the non-dominant parameter is susceptible to measurement noise, a method of identifying the non-dominant parameter based on the noise sensitivity experiments is presented. Simulation results of an IEEE sample power system are given to verify the viewpoint proposed that the non-dominant parameter should be wiped out in the parameter estimation.

Key words: energy management system (EMS); state estimation; parameter estimation; parameter identification