

基于量测函数向量线性相关的网络可观测性分析

卢志刚, 张宗伟

(燕山大学 电气工程学院, 河北省 秦皇岛市 066004)

Network Observability Analysis Based on Linear Dependence between Measurement Function Vectors

LU Zhi-gang, ZHANG Zong-wei

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

ABSTRACT: A new numerical algorithm is proposed, By means of analyzing the linear dependence between measurement function vectors, firstly the node injection radix measurement is defined and the coefficient matrix of redundant measurement function vectors, which are linearly represented by node injection radix measurement function vectors, is attained; secondly, a new matrix is composed by means of using relevant rows in above-mentioned coefficient matrix that correspond to partial measurement vectors in redundant measurement; thirdly, after the simplification of new matrix the network observability can be judged by calculating the rank of new matrix. Taking a 220kV power network in a certain region for example, the observability of this network is judged and analyzed, the results show that the proposed method is effective and feasible, thus it can meet the requirement of practical application.

KEY WORDS: observability; linear dependence; measurement function vectors; state estimation; power system

摘要: 提出了一种新的数值算法, 该算法通过分析量测函数向量之间的线性相关性, 首先定义节点注入基量测, 然后求用节点注入基量测函数向量线性表示的系数矩阵, 再用冗余量测中部分量测对应系数矩阵中的相应行组成新矩阵, 然后将该新矩阵简化后并通过求其秩来判断网络的可观测性。文中以某地区 220 kV 电网为实际背景进行了可观测性判断分析, 结果表明该方法有效可行, 满足实际应用的要求。

关键词: 可观测性; 线性相关性; 量测函数向量; 状态估计; 电力系统

0 引言

在特定的网络接线及量测配置下, 当采集的量测量通过量测方程覆盖所有母线的电压幅值和相角, 并通过状态估计可以得到这些值, 则称该网络

是可观测的^[1]。

量测量装置(PMU)在我国的发展十分迅速^[2-4], 在增加 PMU 后系统可观测性方面的相关研究也很多^[5-11]。现有的可观测性分析方法主要有 2 类: 数值算法^[12-16]和拓扑算法^[17-20]。其中, 拓扑算法是在量测网络中搜寻满秩的生成树, 如果存在, 则认为网络拓扑可观测, 但是构造满秩生成树的过程具有组合特性, 分析逻辑较为复杂, 不适合计算机编程实现; 数值算法通过对信息矩阵进行 LU 三角分解, 检查分解过程中是否出现零主元来判断系统可观测性, 这种方法适合于计算机分析, 编程简单, 但是计算次数和运算量较大。文献[21]提出将上述 2 种基本算法混合使用, 但该方法在减少运算量和简化编程方面仍然不够理想。

1 网络可观测性分析

1.1 相关概念

假设某一待估计系统量测方程如下

$$z = h(x) + v \quad (1)$$

式中: z 为 m 维的量测量向量, 包括所有支路功率、所有结点注入功率以及部分节点电压量测; $h(x)$ 为量测函数向量, x 是系统的 n 维状态量, 包括各节点电压模值和相角; v 为量测误差向量。

应用 PQ 快速分解法, 以有功模型为例, 将量测函数向量 $h(x)$ 线性化, 得到 $m \times n$ 阶常数矩阵 H_c , 则 H_c 的每行对应于一个量测函数向量, 由于 H_c 的各行元素的和均为零, 所以 H_c 的行向量所在的线性空间维数小于 n , 则 H_c 至多存在 $n-1$ 个线性无关的行向量, 也就是该系统中至多存在 $n-1$ 个线性无关的量测函数向量。在潮流计算的 PQ 快速分解法中, 有 n 个节点注入功率量测, 则任意 $n-1$ 个量测的量

测函数向量都是线性无关的。

基于上述定义，在状态估计中，除去选为参考节点以外的剩余的 $n-1$ 个节点注入量测为节点注入基量测。节点注入基量测以外的所有 $m-n+1$ 个量测对应的量测函数向量都可以由节点注入基量测的量测函数向量线性表示

$$\mathbf{H}_{c(k)} = \sum_{i=1}^{n-1} a_{(i)} \mathbf{H}_{c(i)} \quad (2)$$

其中 $k=n, n+1, \dots, m$ ，这 $m-n+1$ 个量测也称为节点注入基量测对应的冗余量测。

节点注入基量测保证了系统的可观性，冗余量测则提高了状态估计的计算精度和量测系统的可靠性。

1.2 用节点注入基量测函数向量线性表示冗余量测函数向量

在式(1)的估计系统中，选定某一节点作为参考节点，应用 PQ 分解法后，将有功量测用节点注入基量测函数向量表示形成 $(n-1) \times (n-1)$ 阶雅克比矩阵 \mathbf{H} ，则此时的各个冗余量测函数向量均可以由 \mathbf{H} 矩阵的 $n-1$ 个函数向量线性表示。设所有冗余量测函数向量组成 $(m-n+1) \times (n-1)$ 阶矩阵 \mathbf{H}_r ，各冗余量测函数向量由 \mathbf{H} 矩阵的行向量线性表示时对应的系数组成 $(m-n+1) \times (n-1)$ 阶系数矩阵 \mathbf{K} ，则

$$\mathbf{H}_r = \mathbf{K}\mathbf{H} \quad (3)$$

雅克比矩阵 \mathbf{H} 为 $n-1$ 阶可逆方阵，所以

$$\mathbf{K} = \mathbf{H}_r \mathbf{H}^{-1} \quad (4)$$

其中系数矩阵 \mathbf{K} 的各行元素值是对应的冗余量测函数向量用节点注入基量测函数向量线性表示的系数。无功量测系数矩阵的求法与有功相同。

1.3 网络可观性判断步骤

文中通过求雅克比矩阵的秩来判断系统是否可观，判断原则如下：

在 n 个节点的系统中，有 m 个量测量，如果存在由 $n-1$ 个量测的量测函数向量组成秩为 $n-1$ 的雅克比矩阵 \mathbf{H}_d ，则该量测系统能使网络可观，否则网络不可观。

假设待估计网络有 n 个节点，并且量测量的个数为 p ，以 PQ 分解后的有功量测为例，网络可观性判断步骤如下：

(1) 用所有 p 个量测组成集合 A ，将 A 中的节点注入基量测移入基量测集合 B 中，同时记 B 中量测个数为 f 。

(2) 如果 $f=n-1$ ，或 $f=n-2$ ，同时 A 中有参考节点的注入量测，则说明系统可观，转步骤 (9)；

否则继续下一步。

(3) 若 A 中有参考节点的注入量测，则该量测的函数向量一定不能由 B 中量测的函数向量线性表示，将其移入待定量测集合 D 中。

(4) 取 A 中的一个量测，观察该量测在矩阵 \mathbf{K} 中对应一行的元素值，如果该行中不为零的元素对应的节点注入基量测已全部包含在集合 B 中，则说明该量测函数向量可以被此时 B 中的基量测函数向量线性表示。该量测对应此时基量测的冗余量测，于是将其移入冗余量测集合 C 中；否则将其移入待定量测集合 D 中。若此时 $f=n-2$ ，则说明系统可观，转步骤 (9)；否则转下一步。

(5) 取 A 中下一个量测，观察该量测在矩阵 \mathbf{K} 中对应一行的元素值，如果该行中不为零的元素对应的节点注入基量测已全部包含在此时的集合 B 中，将其移入冗余量测集合 C 中；否则再观察该量测的对端量测是否在集合 D 中。由于所有支路量测的量测函数向量与其对端的量测函数向量都是线性相关的，所以若对端量测在集合 D 中，则将其移入集合 C 中；否则将该量测移入集合 D 中。

(6) 重复步骤 (5)，直到集合 A 中的所有量测都被移出为止。

(7) 将集合 D 中量测对应系数矩阵 \mathbf{K} 中相应的各行向量取出，组成一个新矩阵，观察各行不为零的元素，若对应的节点注入基量测已经包含在集合 B 中，则将该元素值归零，从而得到判断矩阵 \mathbf{K}_d 。

(8) 求矩阵 \mathbf{K}_d 的秩 r ，若 $r=(n-1)-f$ ，则说明在该量测配置下系统可观；否则不可观。

(9) 结束。

2 算例分析

下面以秦皇岛地区 220 kV 主网为例，判断某量测系统的可观性，节点系统如图 1 所示。选取节点 4 为参考节点，为简化计算，规定所有节点间联络线的电抗为 $j1$ ，PQ 分解后，以有功功率为例，求冗余量测的函数向量用节点注入基量测的函数向量线性表示的系数矩阵 \mathbf{K} ，如表 1 所示。

观察以上系数矩阵可以发现，支路量测函数向量与其对端量测函数向量是线性相关的；与系统只有单条联络线相连的节点，其对应联络线的量测函数向量与该节点的注入量测函数向量线性相关。

表 2 为量测量给定时，系统有功量测配置。

表1 冗余量测用节点注入基量测线性表示的系数矩阵

Tab.1 Coefficient matrix of redundancy measurement denoted linearly by radix measurement

编号	量测项目	P_1	P_2	P_3	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}
1	P_{10-11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.67	-0.33
2	P_{11-10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.67	0.33
3	P_{10-12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.33	-0.67
4	P_{12-10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.67
5	P_{11-12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	-0.33
6	P_{12-11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.33	0.33
7	P_{7-4}	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.25	0.50	0.50	0.50
8	P_{4-7}	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.25	-0.50	-0.50	-0.50
9	P_{7-5}	0	0	0	-1.00	0	0	0	0	0	0	0
10	P_{5-7}	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0	0	0
11	P_{7-6}	0	0	0	0	-1.00	0	0	0	0	0	0
12	P_{6-7}	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0	0
13	P_{3-7}	1.00	1.00	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0
14	P_{7-3}	-1.00	-1.00	-1.00	0	0	0	0	0	0	0	0
15	P_{4-9}	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.75	-0.50	-0.50	-0.50
16	P_{9-4}	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.75	0.50	0.50	0.50
17	P_{7-10}	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	-0.25	-0.50	-0.50	-0.50
18	P_{10-7}	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.25	0.50	0.50	0.50
19	P_{7-8}	0	0	0	0	0	0	-1.00	0	0	0	0
20	P_{8-7}	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0
21	P_{9-10}	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.25	-0.50	-0.50	-0.50
22	P_{10-9}	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	-0.25	0.50	0.50	0.50
23	P_{2-3}	0	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	P_{3-2}	0	-1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	P_{1-3}	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	P_{3-1}	-1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	P_4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

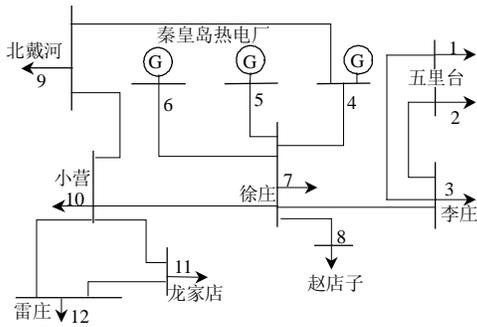


图1 秦皇岛地区 220 kV 电网结构图

Fig.1 220 kV network configuration of Qinhuangdao

表2 给定的有功量测配置

Tab.2 Presented active power measurement

编号	1	2	3	4	5	6	7
量测项目	P_1	P_2	P_4	P_5	P_8	P_{10}	P_{11}
编号	8	9	10	11	12	13	14
量测项目	P_{7-4}	P_{4-7}	P_{3-1}	P_{1-3}	P_{5-7}	P_{4-9}	P_{9-4}
编号	15	16	17	18	19		
量测项目	P_{9-10}	P_{10-12}	P_{11-12}	P_{10-11}	P_{11-10}		

用表2数据组成集合A, 再找到A中的系统节点注入基量测 P_1 、 P_2 、 P_5 、 P_8 、 P_{10} 、 P_{11} , 组成集合B, 得到 $f = 6 \neq 11$, 接着发现参考节点的注入量测 P_4 也已知, 但 $f + 1 \neq 10$, 所以已有的节点注入

量测不能保证系统可观。

用1.3节中方法逐个检测A中的量测并分类, 得到冗余量测集合C和待定量测集合D, 如表3。将集合D中量测对应系数矩阵K中的相应行取出, 组成一个矩阵, 再把已经包含在集合B中的节点注入基量测对应应该矩阵中相应列的元素归零, 最后得到 7×11 阶矩阵 K_d , 如公式(5)。

$K_d =$

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0.75 & 0 & 0.75 & 0.75 & 0 & 0.25 & 0 & 0 & 0.5 \\
 0 & 0 & -0.25 & 0 & -0.25 & -0.25 & 0 & -0.75 & 0 & 0 & -0.5 \\
 0 & 0 & -0.25 & 0 & -0.25 & -0.25 & 0 & 0.25 & 0 & 0 & -0.5 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.67 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.33 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.33
 \end{bmatrix} \quad (5)$$

表3 冗余量测和待定量测

Tab.3 Redundancy and uncertain measurement

集合C	编号	1	2	3	4	5	6
量测项目	P_{4-7}	P_{3-1}	P_{1-3}	P_{5-7}	P_{9-4}	P_{11-10}	
集合D	编号	1	2	3	4	5	6
量测项目	P_4	P_{7-4}	P_{4-9}	P_{9-10}	P_{10-12}	P_{11-12}	P_{10-11}

求矩阵 K_d 的秩 r , $r = \text{rank}(K_d) = 3$, 则 $r \neq (n-1) - f = 11 - 6 = 5$, 所以在该量测配置下系统不可观测, 表 2 中的量测的量测函数向量中只有 9 个线性无关的向量, 而必须要达到 11 个才能保证此时的系统可观测, 也就是需要增加 2 个量测函数向量与当前量测函数向量线性无关的量测才能让系统可观测, 下面通过 2 步求得一个缩小的增加量测的选取范围。

(1) 除表 2 中以外的节点注入量测有 P_3 、 P_6 、 P_7 、 P_9 、 P_{12} 。若将 P_3 放入集合 B 中, 则矩阵 K_d 中对应 P_3 的一列元素值需要归零, 求得 $r = \text{rank}(K_d) = 3$, 而此时的 $f = 7$, 于是共有 10 个线性无关的向量函数, 这就说明该量测的函数向量与表 2 中已有量测的函数向量线性无关。同样还可求得 P_6 、 P_7 的函数向量与表 2 中已有量测的函数向量线性无关。

(2) 除表 2 中以外的支路量测有 14 个, 由于增加的量测函数向量与当前量测函数向量必须线性无关, 所以将对端量测已包含在表 2 中或可以用表 2 中的基量测线性表示的量测也去掉, 得到 P_{7-6} 、 P_{6-7} 、 P_{7-10} 、 P_{10-7} 、 P_{7-3} 、 P_{3-7} 共计 6 个量测。于是增加的 2 个量测可以在 P_3 、 P_6 、 P_7 、 P_{7-6} 、 P_{6-7} 、 P_{7-10} 、 P_{10-7} 、 P_{7-3} 、 P_{3-7} 这 9 个量测中选取, 当然同一支路两端的量测由于量测函数向量线性相关, 不能被同时选取。例如, 在该算例中增加 P_6 、 P_{3-7} 这 2 个量测后, 再应用 1.3 节的判断方法, 可知能使系统可观测。

3 结论

本文提出的可观测性判断方法, 系数矩阵只需在判断前计算一次完成。一般高压输电网的运行方式比较稳定, 不会经常变化, 而只要网络结构不变该矩阵就不变, 以后的判断分析都基于此矩阵。可见这种方法适合计算机编程、计算量小、结果准确。

参考文献

- [1] 陈怡, 蒋平, 万秋兰, 等. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 许树楷, 谢小荣. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.
Xu Shukai, Xie Xiaorong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49 (in Chinese).
- [3] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.
Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang, et al. A survey on applications of wide area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52(in Chinese).
- [4] 王英涛, 印永华, 蒋宜国, 等. 我国实时动态监测系统的发展现状及实施策略研究[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 44-48.
Wang Yingtao, Yin Yonghua, Jiang Yiguo, et al. Study on current development situation and implementation strategy of real time dynamic monitoring system in power systems in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 44-48(in Chinese).
- [5] 蔡田田, 艾芊. 电力系统中 PMU 最优配置的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 32-37.
Cai Tiantian, Ai Qian. Research on optimal PMU placement in power systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 32-37(in Chinese).
- [6] 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[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 57-61.
Li Qiang, Yu Erkeng, Lü Shichao, et al. An improved optimal phasor measurement unit placement algorithm[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 57-61(in Chinese).
- [7] 陈得治, 郭志忠. 基于表计配置的配电网可观测性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 36-41.
Chen Dezhi, Guo Zhizhong. Distribution system network observability analysis based on meter placement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 36-41 (in Chinese).
- [8] 安天瑜, 周苏荃, 于继来. 基于电压薄弱区域监视的 PMU 非完全观测配置[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 24-28.
An Tianyu, Zhou Suquan, Yu Jilai. Weak voltage area surveillance based PMU incomplete observable configuration[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 24-28(in Chinese).
- [9] 刘道伟, 谢小荣. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 13-17.
Liu Daowei, Xie Xiaorong. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 13-17 (in Chinese).
- [10] 黄莹, 徐政. 基于同步相量测量单元的直流附加控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 7-12.
Huang Ying, Xu Zheng. HVDC supplementary controller based oil synchronized phasor measurement units[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 7-12(in Chinese).
- [11] 毛安家, 郭志忠. 与 SCADA 互补的 WAMS 中 PMU 的配置及数据处理方法[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 71-74.
Mao Anjia, Guo Zhizhong. A practical placement of PMU in WAMS complementary to SCADA and data processing method[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 71-74(in Chinese).
- [12] 阎欣, 单渊达. 基矢量抽取法及可观测性分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 18-22.
Yan Xin, Shan Yuanda. Base-vector extraction method and its application in observability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 18-22 (in Chinese).
- [13] Monticelli A, Wu F F. Network observability identification of observable islands and measurement placement[J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(5): 1035-1041.
- [14] 孟宪强. 网络可观测性分析: 以正交换法计算矩阵的秩[J]. 电网

- 技术, 1995, 19(5): 15-19.
- Meng Xianqiang. Network observability analysis: using normal exchange method to calculate matrix rank[J]. Power System Technology, 1995, 19(5): 15-19 (in Chinese).
- [15] Bei G. Jacobian matrix-based observability analysis for state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 348-357.
- [16] Castillo E, Antonio J, Fellow C. Observability analysis in state estimation: a unified numerical approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 877-886.
- [17] 邓佑满, 张伯明. 网络可观性的拓扑分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1993, 4(2): 8-13.
- Deng Youmang, Zhang Boming. Network observability topological analysis[J]. Proceedings of Tsinghua University, 1993, 4(2): 8-13(in Chinese).
- [18] 叶周, 卢建刚, 顾全, 等. 广东省网 EMS 中状态估计可观性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 1(10): 55-58.
- Ye Zhou, Lu Jianguang, Gu Quan, et al. A practical observability analysis algorithm for state estimation in EMS of guangdong power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 1(10): 55-58(in Chinese).
- [19] 张海波, 张伯明, 孙宏斌, 等. 电力系统状态估计可观性分析中关于量测岛合并的理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 46-49.
- Zhang Haibo, Zhang Boming, Sun Hongbin, et al. Theory analysis about measurement islands' combination in observability analysis in power system state estimation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 46-49(in Chinese).
- [20] 张海波, 张伯明, 孙宏斌, 等. 基于潮流定解条件的电力系统状态估计可观性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 54-58.
- Zhang Haibo, Zhang Boming, Sun Hongbin, et al. Observability analysis of power system state estimation based on the solvability condition of power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 54-58(in Chinese).
- [21] 汤振飞, 单渊达. 线性相关环及其在电力系统可观察性分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 35-38.
- Tang Zhenfei, Shan Yuanda. Linear dependent loop and its applications in observability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 35-38(in Chinese).

收稿日期: 2007-03-10.

作者简介:

卢志刚(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统经济运行及分析研究;

张宗伟(1981—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统状态估计和理论线损计算研究, E-mail: zzw330@126.com.

(实习编辑 王晔)

(上接第40页 continued from page 40)

- [10] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥. 基于在线辨识的电力系统广域阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 22-27.
- Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Hu Zhixiang, Han Yingduo. Power systems wide-area damping control based on online system identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 22-27(in Chinese).
- [11] 肖晋宇, 谢小荣, 韩英铎. 利用有限时间扰动后的响应辨识电力系统的主导特征值[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 1-5.
- Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Han Yingduo. Online identification of power system dominant eigenvalues based on zero-input responses following limited-time disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 1-5(in Chinese).
- [12] Bounou M, Lefebvre S, Malhame P R. A spectral algorithm for extracting power system modes from time recordings[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 665-671.
- [13] Hauer J F, Fellow. Application of Prony analysis to the determination of modal content and equivalent models measured power system response[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 1062-1068.
- [14] 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[J]. 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 98-103(in Chinese).
- [15] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的混合量测状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 58-62.
- Ding Junce, Cai Zexiang, Wang Keying. Mixed measurements state estimation based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 58-62(in Chinese).
- [16] 刘豹. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [17] 常勇, 徐政. 基于射影控制的直流输电和静态无功补偿器协调控制[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 41-45.
- Chang Yong, Xu Zheng. Coordinate control between HVDC and SVC based on the projective control theory[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 41-45(in Chinese).
- [18] Srinivasan A, Batur C, Veillette R. Projective control design for multi-zone crystal growth furnace[J]. IEEE Trans on Control System Technology, 1994, 2(2): 142-147.
- [19] Medanic J. Nonlinear output feedback controller design by projective control[J]. Proceeding of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii USA, 2003.
- [20] 原野, 程林, 孙元章, 等. 广域阻尼控制的时滞影响分析及时滞补偿设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 6-9.
- Yuan Ye, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. Effect of delayed input on wide-area damping control and design compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 6-9 (in Chinese).

收稿日期: 2007-04-01.

作者简介:

陈树恒(1974—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: chenshuheng_scu@163.com;

李兴源(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制方面的研究工作。

(责任编辑 马晓华)