

基于量测数据相关性的电力系统 不良数据检测和辨识新方法

黄彦全¹, 肖建¹, 李云飞¹, 邵明¹, 黄庆²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031;

2. 四川省电力公司 绵阳供电公司, 四川省 绵阳市 621000)

A New Method to Detect and Identify Bad Data Based on Correlativity of Measured Data in Power System

HUANG Yan-quan¹, XIAO Jian¹, LI Yun-fei¹, SHAO Ming¹, HUANG Qing²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China; 2. Mianyang Electric Power Supply Company, Sichuan Provincial Electric Power Corporation, Mianyang 621000, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The quality of the measured data is one of the important factors impacting the efficiency and result of power system state estimation. Unfortunately bad data always exist in measured data objectively, so the detection and identification of bad data are the important components in power system state estimation. The authors research the variation regularity of the elements in measured data's covariance matrix while the measured data involve white noise, abrupt changed quantity and bad data, propose a novel method to detect and identify the bad data by means of the variation regularity of the elements in measured data's covariance matrix. The correctness of the proposed method is verified by simulation results of IEEE 14-bus system.

KEY WORDS: Detection and identification; Bad data; Correlativity of measured data; Covariance matrix; Power system

摘要: 电力系统量测数据的质量是影响电力系统状态估计效率和结果的重要因素, 而量测数据中客观地存在少量不良数据, 检测和辨识这些不良数据是电力系统状态估计的重要组成部分。文章分析了量测数据协方差矩阵中的元素值在量测数据中含有白噪声、突变量和不良数据时的变化规律, 提出了通过量测数据协方差矩阵中元素的变化规律检测和辨识不良数据的新方法, 在 IEEE14 节点系统上的仿真试验验证了该方法的正确性。

关键词: 检测和辨识; 不良数据; 量测数据的相关性; 协方差矩阵; 电力系统

1 引言

电力系统量测数据通常可看作有效的量测数据和量测噪声的线性组合, 通常情况下量测噪声为白噪声, 通过一定的技术处理手段一般可消除白噪声对电力系统状态估计^[1-3]结果的影响。但当量测数据中包含不良数据(指偏离实际量测数据变化轨迹较远的数据, 也称粗差)时, 这些不良数据对电力系统状态估计结果的影响是不容忽视的^[4]。不良数据的检测和辨识方法主要有两大类:

(1) 估计后检测和辨识: 完成状态估计后得到量测量残差, 对量测量残差进行适当处理(残差加权处理、残差标准化等), 设定阈值, 通过假设检验检测出是否存在残差, 并利用残差搜索完成对不良数据的辨识。这种检测和辨识方法通常是有效的, 但存在计算量大的不足, 此外残差淹没也会降低检测的灵敏度。

(2) 估计前检测和辨识: 通过对量测值进行预测获得量测残差, 根据量测残差之间的相关关系检测和辨识出不良数据。这种方法对于多不良数据的检测具有良好的效果, 但具有在动态系统中检测困难和对量测冗余信息利用不足的缺点。

上述两种方法各有特点, 对不良数据的检测和辨识都有一定的效果, 但也存在一定的局限性。在估计后检测和辨识方面有大量的研究成果和文献

基金项目: 四川省应用基础研究项目(05JY029-006-4); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040613013)。

报导^[5-8], 相对而言, 估计前检测和辨识方法的研究成果和文献报导较少。文献[9-11]采用图论和拓扑的方法, 通过给定量测系统中量测量之间的线性关系对不良数据进行检测和辨识, 这种方法对多不良数据的检测和辨识具有良好的效果; 文献[12]采用厂站、全网双层状态估计算法, 在一定程度上可防止残差转移, 改善对强相关性不良数据的检测和辨识效果; 文献[13]针对等效电流量测变换状态估计器, 根据误差传播理论确定估计权值, 再进行估计计算。

利用量测量之间的相关性对不良数据进行检测和辨识是一种有效的途径, 理论上对于防止残差淹没和残差转移有一定的积极意义, 但在具体实施时尚有许多课题需要研究。本文通过分析电力系统量测数据协方差矩阵中各元素值在量测数据中含有白噪声、突变量和粗差时的变化情况, 提出了利用量测数据协方差矩阵中各元素的变化规律检测和辨识不良数据的方法。

2 不良数据检测和辨识新方法的原理

M 维电力系统量测数据可用以下时间序列表示

$$\mathbf{Z}=[z_i(k)]+[v_i(k)] \quad (i=1,2,\dots,M) \quad (1)$$

式中 \mathbf{Z} 为量测时间序列集合; k 为时标; $z_i(k)$ 为第 i 个量测量时间序列; $v_i(k)$ 为量测噪声。

取一定的移动时间窗口, 计算式(1)中各变量的协方差矩阵为

$$\mathbf{Q}=\text{cov}(\mathbf{Z})=E[\mathbf{Z}, \mathbf{Z}^T] \quad (2)$$

n 时刻协方差矩阵中各元素为

$$\begin{cases} q_{ii}(n)=E[z_i(k)-\hat{z}_i(n)]^2 \\ q_{ij}(n)=q_{ji}(n)=E[(z_i(k)-\hat{z}_i(n))(z_j(k)-\hat{z}_j(n))] \end{cases} \quad (3)$$

($i, j=1,2,\dots,M$; $k=n-N, n-N+1, \dots, n$)

式中 N 为时间序列长度; $\hat{z}_i(n)$ 为第 i 个量测量在时间窗内的平均值; $q_{ii}(n)$ 为第 i 个量测量在 n 时刻的自方差; $q_{ij}(n)$ 为第 i 个量测量与第 j 个量测量在 n 时刻的协方差。

理论上, 当各量测量噪声为独立随机变量时协方差矩阵为主元非零、其它元素为零的对角阵, 也就是说, 某一量测量的噪声信号与其它量测量的噪声信号是不相关的。但实际计算出来的协方差矩阵的非对角元素很难完全等于零, 只能是接近于零, 原因是多方面的:

(1) 电力系统的量测量之间不是独立变量, 在某一量测量发生变化时其它量测量也会发生相

应的变化, 这种相互影响的内因在于电力系统中的有功功率、无功功率和电压等的变化是受内在物理关系制约的, 各个量测量的变化必然反映到协方差矩阵中的各个元素上。

(2) 电力系统的量测量测量实际上是非同步的, 而电力系统是一个动态系统, 因此量测量的自方差及与其它量测量之间的协方差不为零。

正常情况下, 协方差矩阵中的各元素可近似认为是常数, 只有系统量测数据发生较大范围的波动时协方差矩阵中的各元素才发生较明显的变化。协方差矩阵中的各元素反映的是量测量之间的变化关系, 而有效检测量测数据异常变动的指标应是该量测数据的方差, 即

$$[S_i(n)]^2=E[z_i(k)-\hat{z}_i(n)]^2 \quad (4)$$

对于每个量测量设置一个阈值, 其自方差超过该阈值时可判定量测值出现异常。量测值出现异常可能是系统运行状态变化引起的, 也可能是量测粗差造成的, 假设协方差矩阵中各元素在 k 时刻和 $k+1$ 时刻的值分别为 $q_{ij}(k)$ 和 $q_{ij}(k+1)$ ($i, j=1,2,\dots,M$), 只要计算时间窗口长度 N 足够长且系统量测值没有明显变化即可认为

$$q_{ij}(k) \approx q_{ij}(k+1) \quad (i, j=1,2,\dots,M) \quad (5)$$

同样, 当计算时间窗口足够长且系统量测值没有明显变化时也可认为

$$q_{ij}(k) \approx q'_{ij}(k) \quad (i, j=1,2,\dots,M) \quad (6)$$

式中 $q_{ij}(k)$ 的计算时间窗口长度为 N , $q'_{ij}(k)$ 的计算时间窗口长度为 $N+1$ 或 $N-1$ 。当 $k+1$ 时刻出现异常时有

$$q_{ij}(k+1) \approx q_{ij}(k) + \frac{1}{N}[z_i(k+1)-\hat{z}_i][z_j(k+1)-\hat{z}_j] \quad (7)$$

式中 \hat{z}_i 和 \hat{z}_j 分别为量测量 z_i 和 z_j 的期望值。

如果 $k+1$ 时刻量测值出现异常, 则 $q_{ij}(k+1)$ 与 $q_{ij}(k)$ 相比会有较大的变化。将 $q_{ij}(k)$ 转化为相关系数, 则有

$$r_{ij}(k)=\frac{q_{ij}(k)}{\sqrt{D[z_i(k)]}\sqrt{D[z_j(k)]}} \quad (8)$$

若量测值出现异常是系统运行状态变化引起的, 则 z_i 的变化会引起 z_j ($j=1,2,\dots,M, j \neq i$) 的变化, 或者说 z_i 的变化是与 z_j 的变化相关的, 因此 $r_{ij}(k) \rightarrow \pm 1$; 若量测异常是由量测粗差引起的, 则 z_i 的变化与 z_j 的变化是不相关的, $|r_{ij}(k)|$ 会增大, 但增大的幅度与系统运行状态变化引起的增加值不同。

3 不良数据检测和辨识新算法

基于以上分析和讨论，本文提出了电力系统量测数据中不良数据检测和辨识的新方法，算法流程如图 1 所示，其计算步骤如下：

- (1) 选定一定的时间窗长度，根据式(4)计算量测量的方差，根据一定的阈值判断是否超标，若不超标则说明量测数据没有异常。
- (2) 若量测量超标则计算与超标量测量相关量测量的相关系数，若 s_i 超标则检查 r_{ij} ，若大部分 r_{ij} 都不符合接近 ± 1 的特征，则该方差超标的量测值为不良数据。
- (3) 若 s_i 超标，而大部分 r_{ij} 都具有接近 ± 1 的特征，则该超标量测值应纳入不良数据可疑范围，若不良数据可疑集中只有一个量测数据，则该数据为系统突变量。
- (4) 若纳入不良数据可疑集合的量测数据不止一个，则需进一步对可疑数据进行排除，可采用逐个排除法。

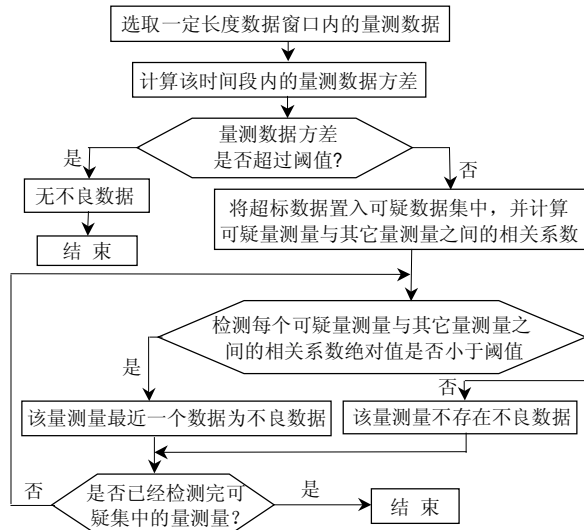


图 1 不良数据检测和辨识流程图

4 算例分析

以 IEEE14 节点系统为例，系统接线如图 2 所示，系统参数见文献[14]。以 PowerWorld 公司的仿真软件模拟系统运行情况，量测配置见表 1，量测量分别取测量有功功率和无功功率，对系统运行中的每个量测量取 400 个采样数据，对每个量测量分别注入按正态分布的量测噪声，每次计算的数据窗长度为 10，在试验中所有的量测数据均没有经过滤波处理。

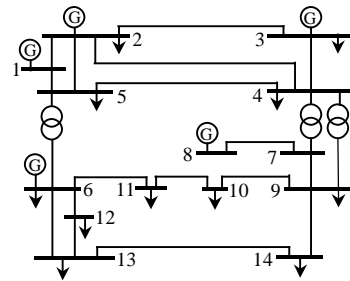


图 2 IEEE14 节点系统接线图
Fig. 2 Diagram of IEEE14-bus network

表 1 量测配置表
Tab. 1 Measurement configuration

量测号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
量测类型	6	6	4	6	6	6	4	6	6	4	6	4	4	6	4	4	6
起始节点	1	1	2	2	2	3	4	4	4	5	6	6	6	7	7	9	9
终止节点	2	5	3	4	5	4	5	7	9	6	11	12	13	8	9	10	14

量测号	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
量测类型	4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
起始节点	10	12	13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
终止节点	11	13	14														

注：量测类型=2 表示节点注入形量测；量测类型=4 表示支路潮流流量测，位于起始节点侧；量测类型=6 表示支路潮流流量测，位于终止节点侧。

分别对节点 6 和节点 12 的有功功率量测和无功功率量测进行变化处理，在原运行参数的基础上突然增加 10%，记录系统运行参数作为突变量检测样本。分别对节点 6 和节点 12 的有功功率量测和无功功率量测进行变化处理，节点 6 和节点 12 的有功功率和无功功率量测值直接增加 10%，系统其它量测值不变，作为不良数据检测样本。对节点 6 和节点 12 有功功率和无功功率的方差检测结果见表 2。

表 2 方差检测结果
Tab. 2 Results of variance detection

标准差	26 号量测量		32 号量测量	
	有功功率	无功功率	有功功率	无功功率
正常时标准差值	0.08293	0.29563	0.07508	0.07183
存在突变量时标准差值	1.05760	0.76915	1.11810	0.21100
存在量测粗差时标准差值	0.53549	0.81806	0.30627	0.14335

不良数据样本各个量测量之间相关系数的部分计算结果见表 3，由表 3 可以看出，26 号量测量和 32 号量测量出现不良数据时，二者与其它量测量之间的相关系数并没有明显地趋于 ± 1 。

对突变数据样本各个量测量之间相关系数的部分计算结果见表 4，由表 4 可以看出，26 号量测量和 32 号量测量出现不良数据时，二者与其它量测量之间的相关系数明显趋于 ± 1 。

表3 量测数据中存在不良数据时相关系数计算结果

Tab. 3 The calculating results of correlation coefficient with bad data involved in measured data

量测号	26号量测量				32号量测量			
	有功功率		无功功率		有功功率		无功功率	
	正常	异常	正常	异常	正常	异常	正常	异常
1	-0.22858	-0.30641	0.40023	0.41047	-0.31245	-0.21358	-0.38599	-0.46700
2	0.27502	-0.45103	-0.25826	0.31186	-0.54158	-0.47869	0.36109	-0.24137
3	-0.07145	-0.21166	0.58634	0.14732	-0.0362	-0.08669	-0.73594	-0.25622
4	-0.58161	-0.11348	-0.16524	0.13634	0.11820	-0.19919	0.30388	0.12521
5	0.06978	-0.44325	-0.27857	0.51763	0.69469	-0.41407	0.21640	-0.43163
6	-0.40830	-0.12804	-0.90617	0.01388	0.17309	-0.13621	0.74053	-0.00669
7	0.15285	-0.31280	-0.25430	0.35593	-0.26993	-0.28919	0.57386	-0.25892
8	-0.18973	0.00397	0.61911	0.03639	0.31857	0.08795	-0.54683	-0.15827
9	-0.16061	-0.49954	0.76090	0.48287	0.00835	-0.41959	-0.69736	-0.45917
10	-0.07402	-0.28994	0.73343	0.24575	-0.07523	-0.20120	-0.50908	-0.44130
11	0.38768	-0.00869	0.69741	0.02265	-0.12915	0.05749	-0.62321	-0.07343
12	0.52928	0.44190	0.67588	-0.33898	0.06734	0.25661	-0.85143	0.31416
13	0.30280	-0.07749	0.78887	0.09362	-0.14422	-0.15897	-0.55991	-0.20523
14	-0.16727	0.32561	-0.50910	-0.44816	-0.39704	0.36327	0.35106	0.51238
15	0.35887	-0.15833	0.47388	0.24143	0.37563	-0.13657	-0.69446	-0.32623
16	-0.27317	-0.00326	-0.77956	-0.01636	0.37726	0.00230	0.59591	0.19476
17	0.10435	0.13371	0.28275	-0.05078	0.17938	0.01287	-0.27878	-0.04788
18	0.04720	-0.08768	0.94546	0.25077	-0.30747	-0.08956	-0.82219	-0.40627
19	0.17225	-0.08192	0.22102	0.12883	-0.13263	-0.10067	-0.57664	-0.08817
20	-0.20364	-0.03239	-0.84753	-0.15490	0.22404	0.00232	0.91504	0.30562
21	0.01456	0.27679	0.84908	-0.08406	-0.06871	0.08803	-0.81278	0.05377
22	-0.34424	0.30649	-0.54542	-0.35569	0.07737	0.32244	0.17306	0.46613
23	-0.18508	-0.40032	-0.19592	0.32583	-0.01410	-0.36459	0.32952	-0.21495
24	0.19520	-0.07008	0.40906	0.14447	-0.07723	-0.21873	-0.50904	-0.21362
25	0.21767	-0.13387	-0.50794	0.10952	0.18059	-0.00972	0.44839	0.022392
26	0.28944	-0.08198	-0.21553	0.08156	-0.24079	-0.20152	0.33017	-0.09093
27	-0.20990	0.12153	-0.91553	-0.28084	0.21699	0.13698	0.89227	0.44119
28	-0.22081	-0.05289	-0.91791	-0.16181	0.12471	-0.00555	0.94197	0.31658
29	-0.13632	0.37503	-0.04007	-0.47518	0.15021	0.33292	0.35453	0.43753
30	0.00138	-0.26436	-0.19857	0.22798	0.14191	-0.21463	0.22397	-0.17394

表4 量测数据中存在突变量时相关系数计算结果

Tab. 4 The calculating results of correlation coefficient with abrupt changed quantities involved in measured data

量测号	26号量测量				32号量测量			
	有功功率		无功功率		有功功率		无功功率	
	正常	异常	正常	异常	正常	异常	正常	异常
1	0.35490	0.97106	0.62595	0.96224	-0.23102	0.96406	-0.67180	-0.98172
2	-0.12043	-0.94399	-0.20489	-0.95219	-0.50939	-0.93613	0.19348	0.95883
3	0.12381	0.90921	0.72000	0.91145	0.03977	0.89897	-0.66321	-0.91721
4	0.10745	-0.81388	-0.41603	-0.74891	0.01790	-0.81315	0.15049	0.79090
5	-0.30878	-0.98485	-0.28103	-0.96090	0.44369	-0.98567	0.33231	0.97338
6	-0.24506	-0.96903	-0.21568	-0.95442	0.10603	-0.96354	0.64686	0.97982
7	-0.45675	-0.96866	-0.01511	-0.95221	-0.11758	-0.97346	-0.12792	0.94923
8	-0.17030	0.94708	0.64697	0.93608	0.13082	0.93749	-0.69116	-0.94884
9	0.56439	0.28627	0.53540	0.42107	0.02251	0.28502	-0.77087	-0.38315
10	-0.53200	0.97132	0.025593	0.94046	0.42644	0.98135	0.19583	-0.93967
11	0.37189	0.99428	0.27586	0.96793	-0.06812	0.99122	-0.57577	-0.97564
12	-0.10656	0.73539	0.44109	0.72654	-0.41709	0.73221	-0.27654	-0.70583
13	-0.46064	0.84154	0.34412	0.86781	-0.07561	0.83780	0.06872	-0.86177
14	-0.15601	-0.95508	-0.57186	-0.95823	0.11957	-0.95021	0.41068	0.97418
15	0.07940	-0.27909	-0.14555	-0.23050	-0.46218	-0.26749	0.45109	0.22945
16	0.11824	-0.98975	0.66394	-0.95801	-0.19241	-0.98951	-0.75401	0.96783
17	0.01186	-0.96172	0.56420	-0.93177	-0.62522	-0.96510	-0.51588	0.92018
18	0.02671	0.99723	0.77792	0.96592	-0.32468	0.99804	-0.89211	-0.97200
19	-0.24386	0.99856	-0.00753	0.96024	0.27193	0.99869	0.04869	-0.96674
20	0.01848	-0.98939	-0.70890	-0.97731	0.08741	-0.98828	0.92314	0.98663
21	0.31758	0.95156	0.62910	0.96833	-0.09387	0.94900	-0.79818	-0.95405
22	0.21416	-0.95594	-0.42789	-0.95239	0.37903	-0.96314	0.51898	0.96600
23	0.41129	-0.90719	-0.30167	-0.93258	-0.04888	-0.91303	-0.06102	0.91823
24	0.10432	0.95195	0.13105	0.93858	-0.07464	0.95847	0.04921	-0.94711
25	-0.09015	-0.96227	-0.05659	-0.93909	0.02348	-0.95729	0.35154	0.94308
26	-0.28565	-0.97184	-0.18487	-0.96822	0.30316	-0.97244	0.14591	0.97800
27	-0.13651	-0.99237	-0.78334	-0.97889	0.13499	-0.99111	0.97159	0.98582
28	-0.08557	-0.99254	-0.75515	-0.97704	0.03660	-0.99228	0.95346	0.98485
29	0.31038	-0.94784	-0.60103	-0.94515	0.43031	-0.95096	0.32494	0.96266
30	-0.62651	-0.93488	-0.07630	-0.94993	-0.35473	-0.93879	0.08390	0.94488

笔者在进行量测量突变检测和辨识仿真试验的同时也进行了调整负荷试验、切断负荷试验和切断线路试验, 计算结果不受系统拓扑结构的影响, 由于篇幅所限, 这里没有一一列出。

对26号量测量加入突变量的同时对32号量测量加入不良数据, 相关系数计算结果与表4相似。

在进行仿真试验时也发现, 当某一量测量的数值在一段时间内接近0时, 该量测量与其它量测量的相关系数对于其它量测量的数值变化不敏感, 无法用于辨识不良数据和突变量。

5 结论

(1) 通过量测量自方差的变化及该量测量与其它量测量之间相关系数的变化能正确检测和辨识出单个或多个不良数据。

(2) 如果量测数据中同时出现突变量和不良数据, 该检测方法只可部分地辨识出不良数据, 尚需进一步改进以提高算法对不良数据的可辨识性。

(3) 该不良数据检测和辨识方法不受系统拓扑结构变化的影响。

本文仅是利用量测量之间的相关性检测和辨识电力系统量测量中不良数据的初步研究, 算法的有效性仍需在实际应用中进一步加以验证。

参考文献

- [1] 刘浩, 戴居丰. 基于系统分割的保留非线性快速 P-Q 分解状态估计法[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 72-76.
Liu Hao, Dai Jufeng. System partition based state estimation algorithm using fast decoupled P-Q and retaining nonlinearity[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 72-76.
- [2] 杜正春, 牛振勇, 方万良. 基于分块 QR 分解的一种状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 50-55.
Du Zhengchun, Niu Zhenyong, Fang Wanliang. A block QR based power system state estimation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 50-55.
- [3] 王翌, 刘志远, 裴润, 等. 具有约束的不确定系统的滚动时域状态估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 99-102.
Wang Zhao, Liu Zhiyuan, Pei Run, et al. State estimation for uncertain system by moving horizon strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 50-55.
- [4] 卫志农, 张云岗, 郑玉平. 基于量测量突变检测的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 34-37.
Wei Zhinong, Zhang Yungang, Zheng Yuping. The improvement of measurement suddenly-change detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 34-37.
- [5] 刘浩, 崔巍. R_N 检测与状态预估相结合的不良数据检测辨识法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(2): 39-43.
Liu Hao, Cui Wei. The detection and identification method of bad data combined R_N detection and state forecast[J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13(2): 39-43.
- [6] 刘浩. 状态估计中不良数据的混合检测辨识法[J]. 电工技术杂志, 1999, (6): 18-21.
Liu Hao. Hybrid detection and identification method of bad data in state estimation[J]. Electrotechnical Journal, 1999, (6): 18-21.
- [7] 魏强, 王凯, 韩学山. 不良数据识别发生误判和漏判时的处理[J]. 东北电力学院学报, 2003, 23(1): 34-38.
Wei Qiang, Wang Kai, Han Xueshan. A correction method for distributor when bad data identification mistake happens[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2003, 23(1): 34-38.
- [8] 张海波, 李林川. 电力系统状态估计的混合不良数据检测方法[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 17-20.
Zhang Haibo, Li Linchuan. A hybrid approach for detection of bad data in power system state estimation[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 17-20.
- [9] 张兴民, 毛玉华, 朱剑峰, 等. 利用图论方法进行多不良数据检测与辨识[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 69-72, 47.
Zhang Xingmin, Mao Yuhua, Zhu Jianfeng, et al. Detection and identification of multi-bad data using graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(1): 69-72, 47.
- [10] 赵海天, 相年德, 王世纛, 等. 多不良数据的相关量检测方法[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(6): 24-30.
Zhao Haitian, Xiang Niande, Wang Shiying, et al. A new detection method for bad data using linear dependence properties of the measurements in power system state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(6): 24-30.
- [11] 马昭彦, 全一男. 电力系统状态估计的可观测性、误差可检测性、可辨识性[J]. 中国电机工程学报, 1985, 5(2): 15-24.
Ma Zhaoyan, Quan Yinan. Observability, error-detectability and identifiability of state estimation in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1985, 5(2): 15-24.
- [12] 王力哲, 王心丰, 范正刚, 等. 电力系统中厂站/全网双层状态估计[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 6-9.
Wang Lizhe, Wang Xinfeng, Fan Zhenggang, et al. Hierarchical state estimation of plants/whole network for power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 6-9.
- [13] 倪小平, 张步涵. 基于等效电流量测变换的状态估计及不良数据检测与辨识方法[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 12-15.
Ni Xiaoping, Zhang Buhan. A state estimation method for bad data detection and identification based on equivalent current measurement transformation[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 12-15.
- [14] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

收稿日期: 2005-11-16。

作者简介:

黄彦全(1961-), 男, 副教授, 主要从事变电站综合自动化、微机保护和电力系统状态估计等方面的研究, E-mail: yquang@nec.swjtu.edu.cn;
肖建(1950-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事自动控制理论和应用方面的研究;
李云飞(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事配电系统自动化方面的研究;
邵明(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事微机保护方面的研究;
黄庆(1969-), 男, 工程师, 主要从事电能质量管理和继电保护信息系统方面的研究。

(责任编辑 沈杰)