

基于奇异值分解的 电力系统谐波状态估计

徐志向^{1,2}, 侯世英^{1,2}, 周 林^{1,2}, 吕厚余^{1,2}

(1. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044;

2. 重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 用传统最小二乘法及其改进方法进行谐波状态估计时, 大都是对谐波进行非同步测量, 然后求解一个大型的超定线性方程组, 其估计精度不足、计算量大、状态量测量数目多且费用昂贵。提出一种基于同步相量测量的谐波状态估计, 并用复数奇异值分解求解病态线性复变量方程组的方法, 可在系统状态非完全可观的情况下进行有效估计, 降低了对测量冗余的要求。以 IEEE 30 节点系统为例, 采用同步测量方法测量支路的谐波电流和节点的谐波电压, 分别用 Matlab 和基于奇异值分解(SVD)的最小二乘估计程序进行仿真。结果表明, 用 SVD 算法对系统进行谐波状态估计时较为准确。

关键词: 谐波; 最小二乘状态估计; 同步相量测量单元; 奇异值分解

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)11-0028-04

0 引言

电力系统中谐波污染问题已经得到广泛的认识, 谐波的传播严重影响了电网的电能质量。现在提倡的绿色电能, 就是要构建一个干净的电网。这就需要对电网中的谐波进行有效治理, 对向电网注入谐波的单位进行经济处罚。只有实时地掌握电网中的谐波状态才能经济有效地解决谐波的治理和处罚问题^[1]。

20 世纪 80 年代末 Heydt 把电力系统状态估计应用于谐波状态估计, 提出了谐波状态估计问题^[2], 并在此后得到了快速的发展。传统的电力系统状态估计的基本模式有^[3]: 单相模式; 单频模式; 非同步模式; P 、 Q 、 U 、 I 为量测量。

这些基本模式有以下 3 个假设^[3]:

a. 所有的电压、电流波形是具有固定频率和幅值的纯正弦波;

b. 系统运行在三相平衡的条件下;

c. 电力系统是一个只有正序的三相对称系统。

由于谐波的功率定义还没有得到统一, 所以谐波功率 P 、 Q 就不能作为量测量进行估计^[4-5]。而且实际的电力系统大都运行在三相不完全平衡、不完全对称的状态下, 在这种情况下进行状态估计, 需要对各相进行同步的精确测量。基于全球定位系统(GPS)的相量测量单元(PMU)测量技术^[6]可以同时记录三相谐波电压、电流的微小扰动, 而且同步的时间偏差小于 $1 \mu s$, 可以从根本上改善传统状态估计单相、单频、非同步的模式。

1 传统谐波状态估计

基于最小二乘法的传统谐波状态估计具有如下数学模型:

$$Z(h) = A(h)X(h) + E(h) \quad (1)$$

式中 $Z(h)$ 为测量向量; $A(h)$ 为测量矩阵; $X(h)$ 为被估计的状态向量; $E(h)$ 为测量噪声向量; h 为谐波次数。

测量矩阵表示测量向量与被估计状态向量的关系, 如果被估计的是节点谐波电压, 则有 3 种情况。

a. 量测量是节点注入谐波电流 I_N 时, 节点电压 U_N 与节点导纳矩阵 Y_{NN} 的关系为

$$I_N(h) = Y_{NN}(h)U_N(h) \quad (2)$$

b. 量测量为节点电压时有

$$U_N(h) = IU_N(h) \quad (3)$$

式中 I 为单位矩阵。

c. 量测量为母线连接支路电流测量 I_L 时, 节点电压 U_N 与导纳矩阵 Y_{LN} 的关系为

$$I_L(h) = Y_{LN}(h)U_N(h) \quad (4)$$

式中 $Y_{LN} = Y_L A^T$, 其中 Y_L 为支路导纳矩阵, A 为关联矩阵。

考虑到谐波电压随谐波次数的增加在电网中的衰减速度大大超过谐波电流的衰减速度^[2], 而且测试实验也表明, 由于高次谐波电压衰减快, 离谐波源 10~50 km 的可靠测量距离对 13 次以上的谐波已经不再适用^[7], 所以, 在大多数的情况下, 选择节点注入谐波电流作为估计量能够更好地判定电网中的谐波状态^[2]。

根据式(1)可得某时刻某次谐波的状态估计, 因为在式(1)中的测量噪声并不影响谐波状态估计模型的可解性, 所以可将其忽略^[8]。为了减少量测量及

运算量,可将系统的节点电压分成 2 种:无谐波源注入节点电压 U_{N0} 和可能有谐波源注入节点电压 U_{NS} 。同理,对节点注入谐波电流也分为 I_{N0} 和 I_{NS} ,即

$$U_N = \begin{bmatrix} U_{N0} \\ U_{NS} \end{bmatrix}, \quad I_N = \begin{bmatrix} I_{N0} \\ I_{NS} \end{bmatrix}$$

其中 $I_{N0}=0$,则式(2)就可以写为

$$\begin{bmatrix} I_{N0} \\ I_{NS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{NON0} & Y_{NONS} \\ Y_{NSNO} & Y_{NSNS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{N0} \\ U_{NS} \end{bmatrix} \quad (5)$$

可以得到:

$$U_{N0} = -Y_{NON0}^{-1} Y_{NONS} U_{NS} \quad (6)$$

$$I_{NS} = Y_{NSNO} U_{N0} + Y_{NSNS} U_{NS} \quad (7)$$

联合式(6)(7)可得:

$$I_{NS} = (-Y_{NSNO} Y_{NON0}^{-1} Y_{NONS} + Y_{NSNS}) U_{NS} \quad (8)$$

又根据式(2)(4)可得:

$$I_{NS} = (Y_{NSNS} Y_{LN}^{-1}) I_L \quad (9)$$

因为对于整个电网系统而言,各个节点的连接支路都装有开关,所以对支路进行谐波电流的测量是比较实际可行的。在测量部分的支路电流和部分的节点谐波电压后,根据式(6)(8)(9) 3 个式子得到各个节点的注入谐波电流,以及全部节点的谐波电压和全部支路的谐波电流。

2 谐波状态估计的求解方法

2.1 一般求解方法

如果 I_{NS} 的测量数量大于状态变量的数量,即有足够的冗余测量,则此时的系统是完全可观的,矩阵 $A^T A$ 是非奇异阵,可以用一般的方法求解。

对于等式 $Z=AX$,利用最小二乘法求解得到:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (10)$$

但是,冗余测量会导致矩阵运算量增大,而且测量费用昂贵^[1,7]。

2.2 奇异值分解(SVD)

电力系统状态能够被表征的必要条件是它的可观察性。一般,一个系统只有是可观察的,才能进行状态估计。但是,由于网络的拓扑结构变化引起的漏测量或其他原因引起的系统不可观察时,也就是当式(1)是病态的或 $A^T A$ 是奇异阵时,可以用一些方法进行状态估计^[9-10]。用 SVD 方法进行估计时可以不需要对系统进行可观测性分析,同时也可以解决病态问题^[11]。

SVD 如以下等式所示^[12]:

$$A = U \Sigma V^H \quad (11)$$

式中 A 为式(1)中的矩阵($m \times n$); Σ 为对角阵($n \times n$),其元素均大于等于零,是矩阵 H 的奇异值,它们是 $A^T A$ 特征值的非负平方根值; $U(m \times n)$ 和 $V(n \times n)$ 都为酉矩阵; V^H 为 V 的 Hermite 矩阵($n \times n$)。

根据 SVD 方法,对 $A^T A$ 奇异时的等式 $Z=AX$ 进行求解,可得:

$$X = V \Sigma^{-1} U^H Z \quad (12)$$

如果 Σ 中的元素都大于零,那么就可以认为系统是完全可以观,谐波的状态估计结果是准确的^[13]。

3 仿真实验和 SVD 算法实现

3.1 仿真实验

测试采用 IEEE 30 节点系统,节点 1~30 中 1、2、5、7、8、11、13、16、28 为无谐波源注入节点,其他都为可能有谐波源注入节点。采用同步测量的方法测量支路的谐波电流和节点的谐波电压。分别用 Matlab 和基于 SVD 的最小二乘估计程序进行仿真。

图 1 所示为 IEEE 30 节点系统图,共有 30 个节点(圈中数字表示),41 条节点连接支路,6 条电源注入支路(6 个机端电压可调发电机),26 条负荷支路(26 个负荷),4 个分接头可调变压器,具体的编号见节点系统图。

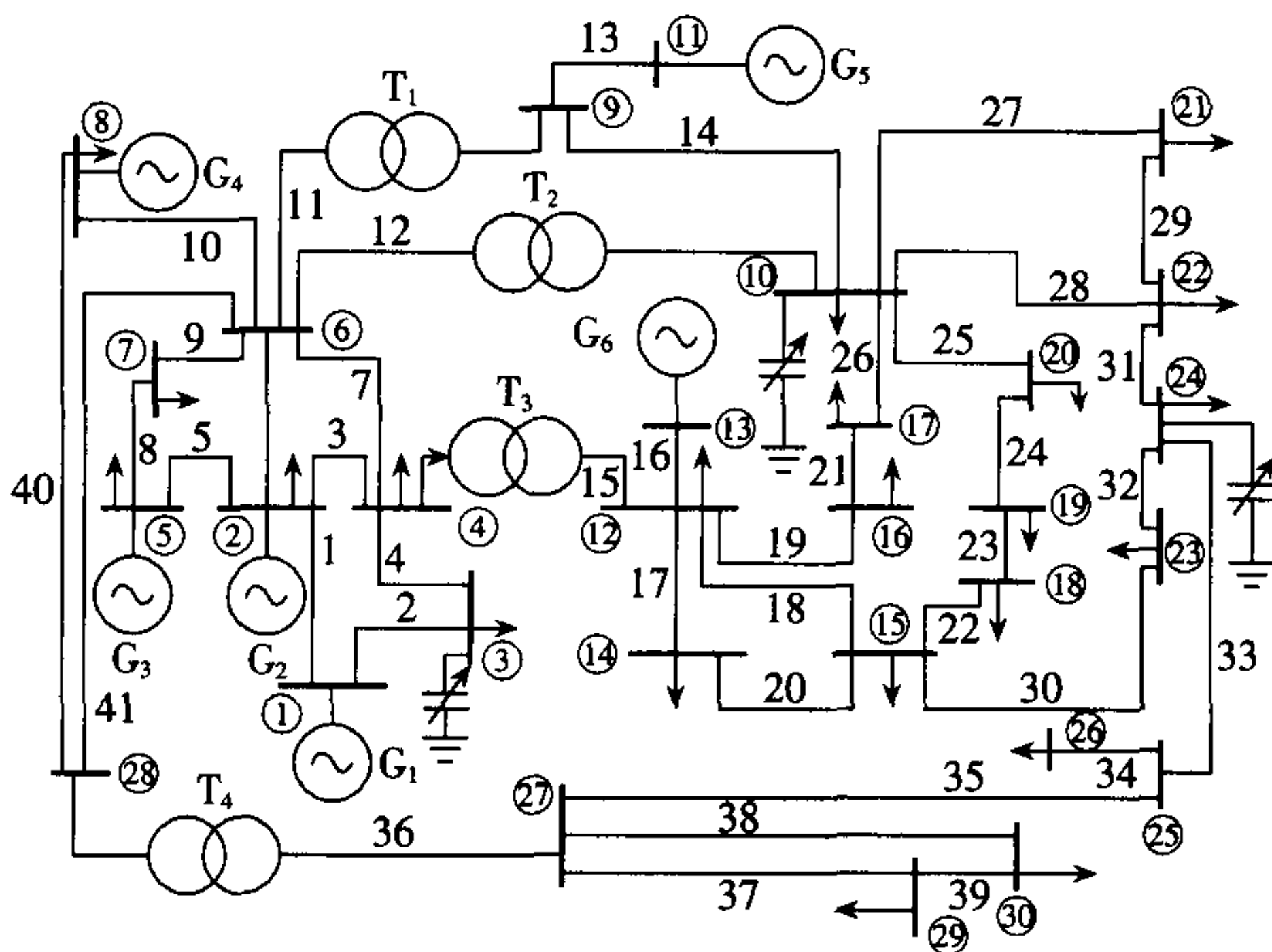


图 1 IEEE 30 节点系统图

Fig.1 IEEE 30-bus system

用 Matlab 模拟实际系统仿真中,如图 1 所示,传输线用 π 型等效模型,非线性负荷连接在节点 19、29,2 个节点注入各次谐波电流分量如图 2 所示(h 为谐波次数)。

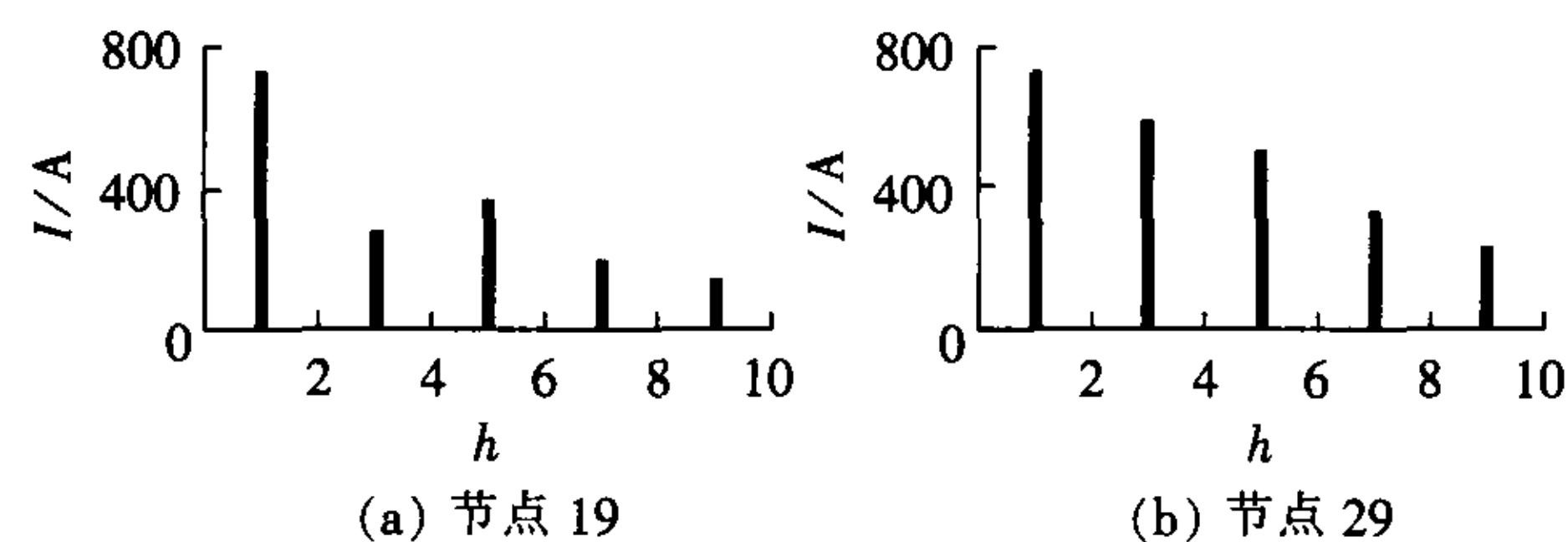


图 2 节点 19、29 注入谐波电流分量

Fig.2 Injection of harmonic currents into bus 19 and 29

仿真结果如图 3、4 所示(图中 N_B 为节点号, N_L 为支路号;曲线 1~4 分别对应 3、5、7、9 次谐波,后同)。

3.2 SVD 算法

IEEE 30 节点测试系统有 26 个带负荷节点、9 个无谐波源节点。用于一般状态估计的测量有 30 个节点谐波电压测量、41 条连接支路谐波电流测量、6 条电源支路谐波电流测量、26 条负荷支路电流测量,共 103 个测量。根据 SVD 算法,选择测量部分支路的谐波电流和部分节点的谐波电压进行谐波状态估计,波形如图 5~7 所示。

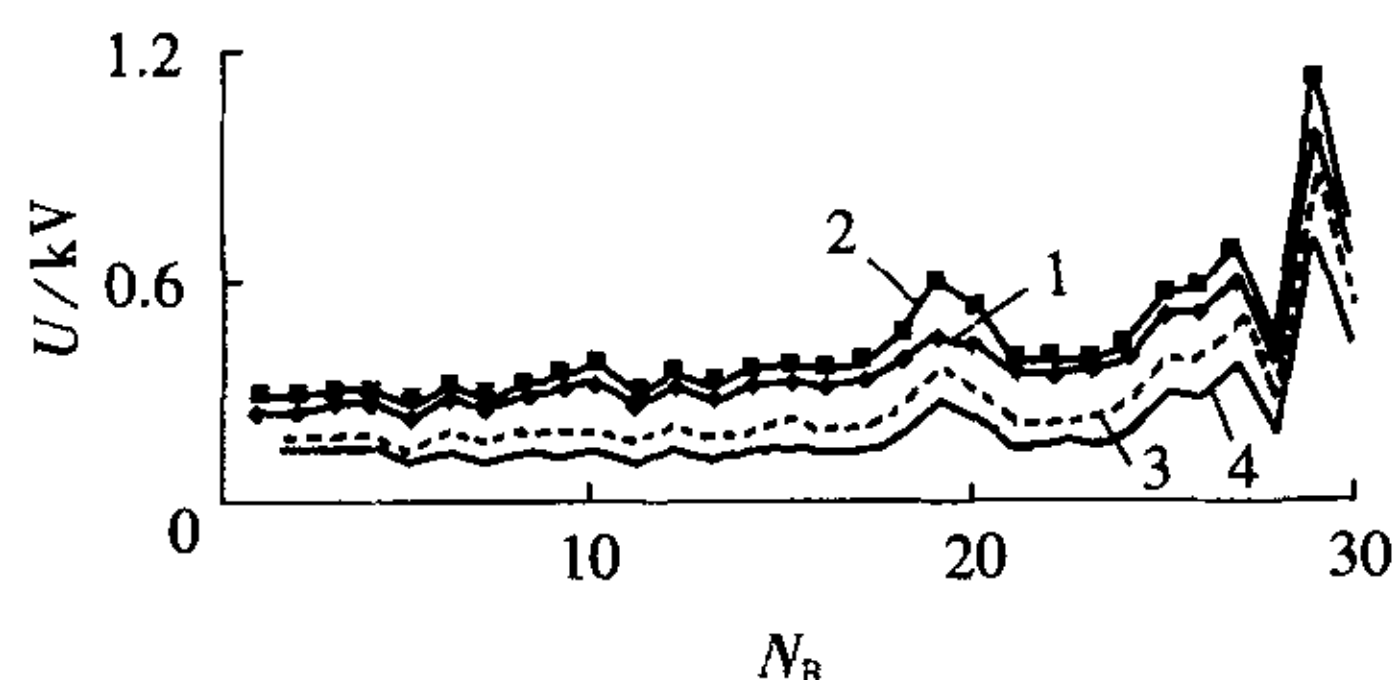


图3 各节点谐波电压
Fig.3 Bus harmonic voltages

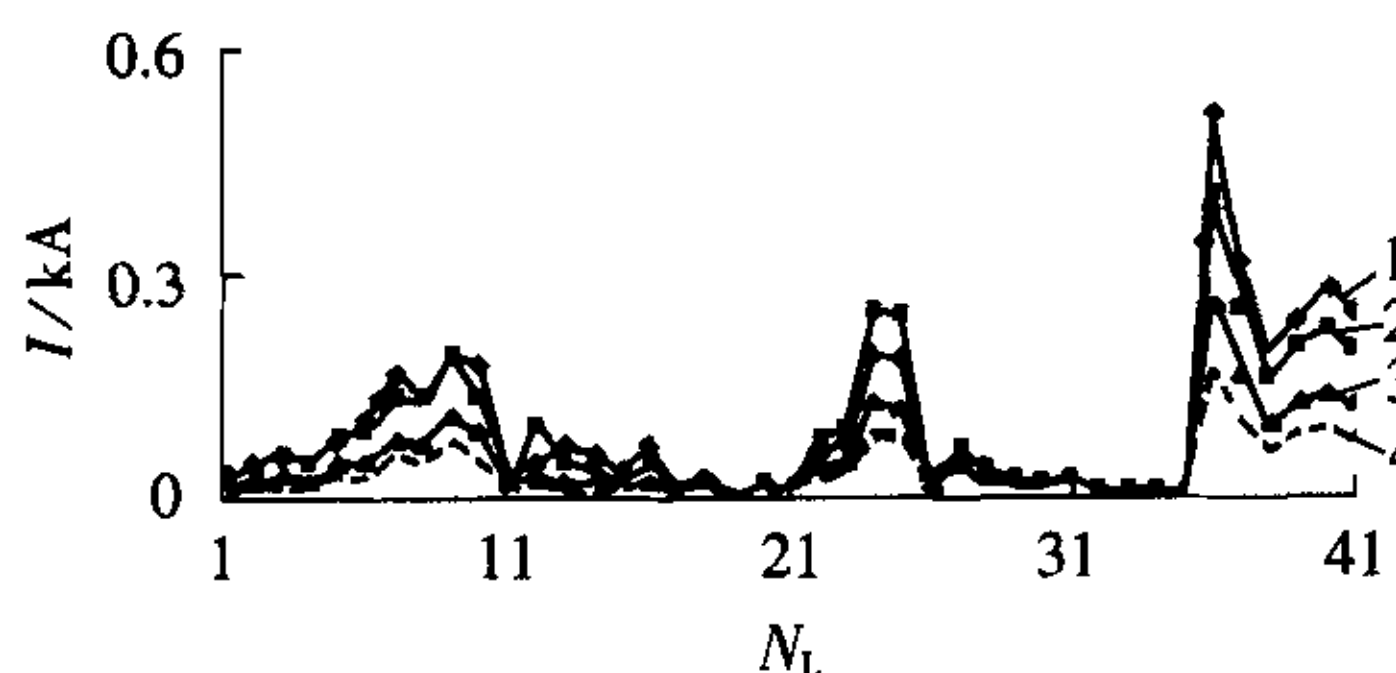


图4 各支路谐波电流
Fig.4 Branch harmonic currents

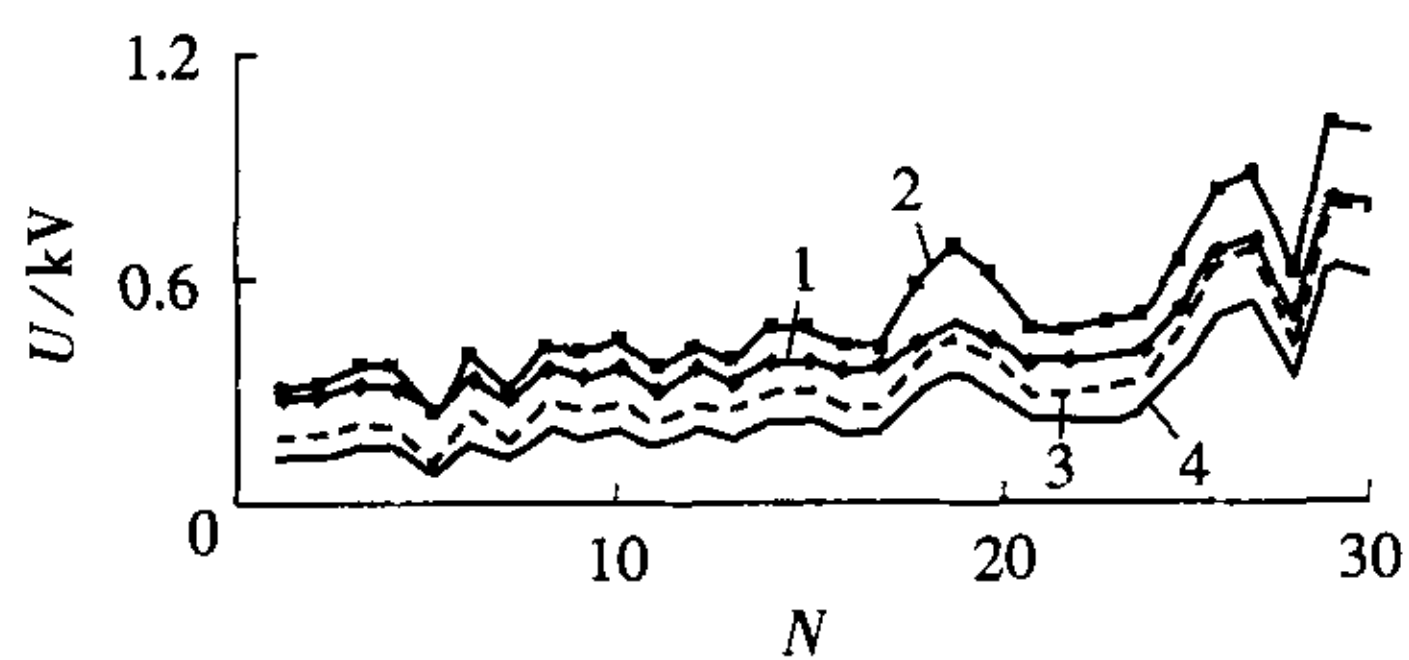


图5 SVD分解时节点谐波电压估计值
Fig.5 Bus harmonic voltages
by SVD-based estimation

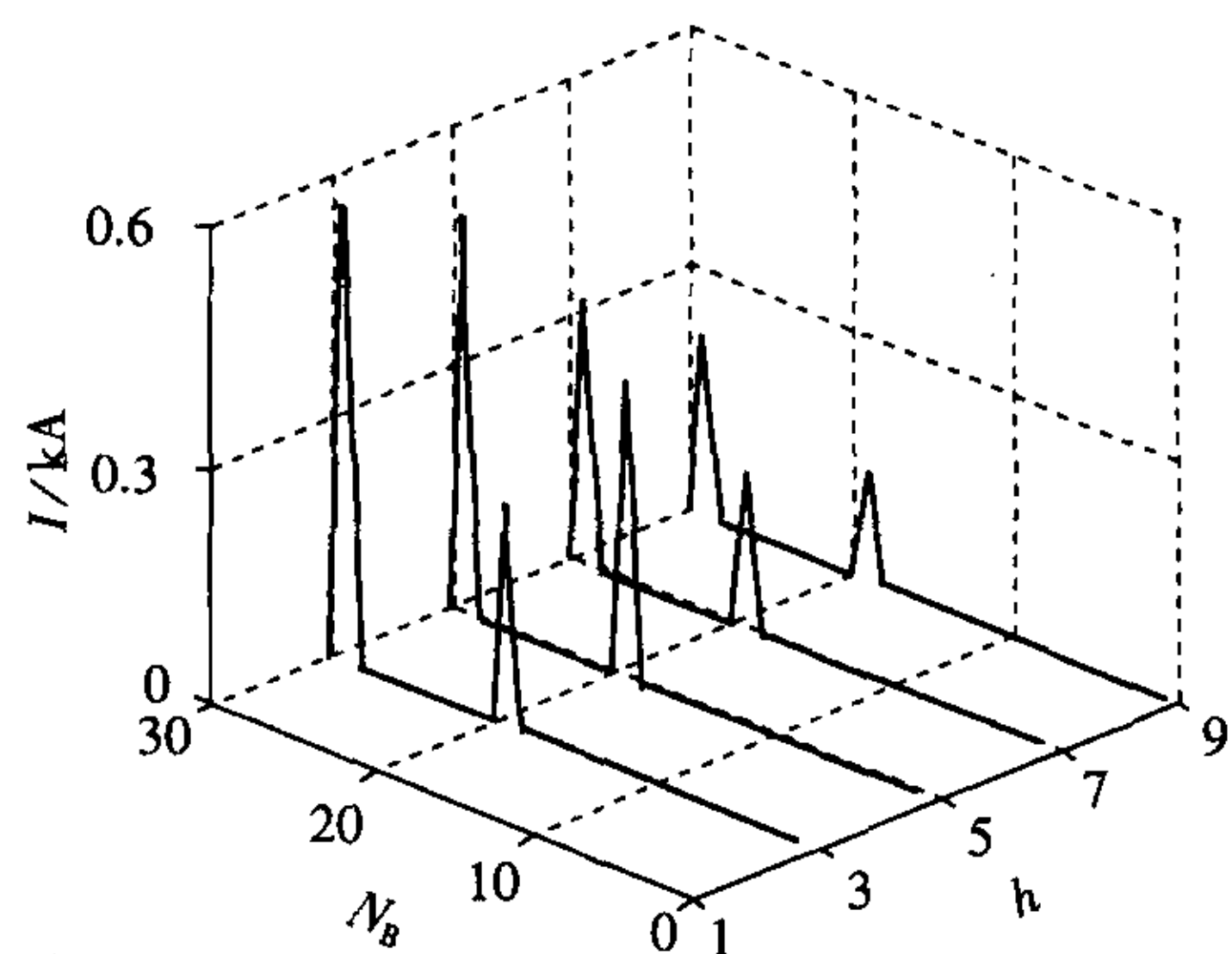


图6 仿真时节点注入谐波电流测量值
Fig.6 Injected bus harmonic currents
measured for simulation

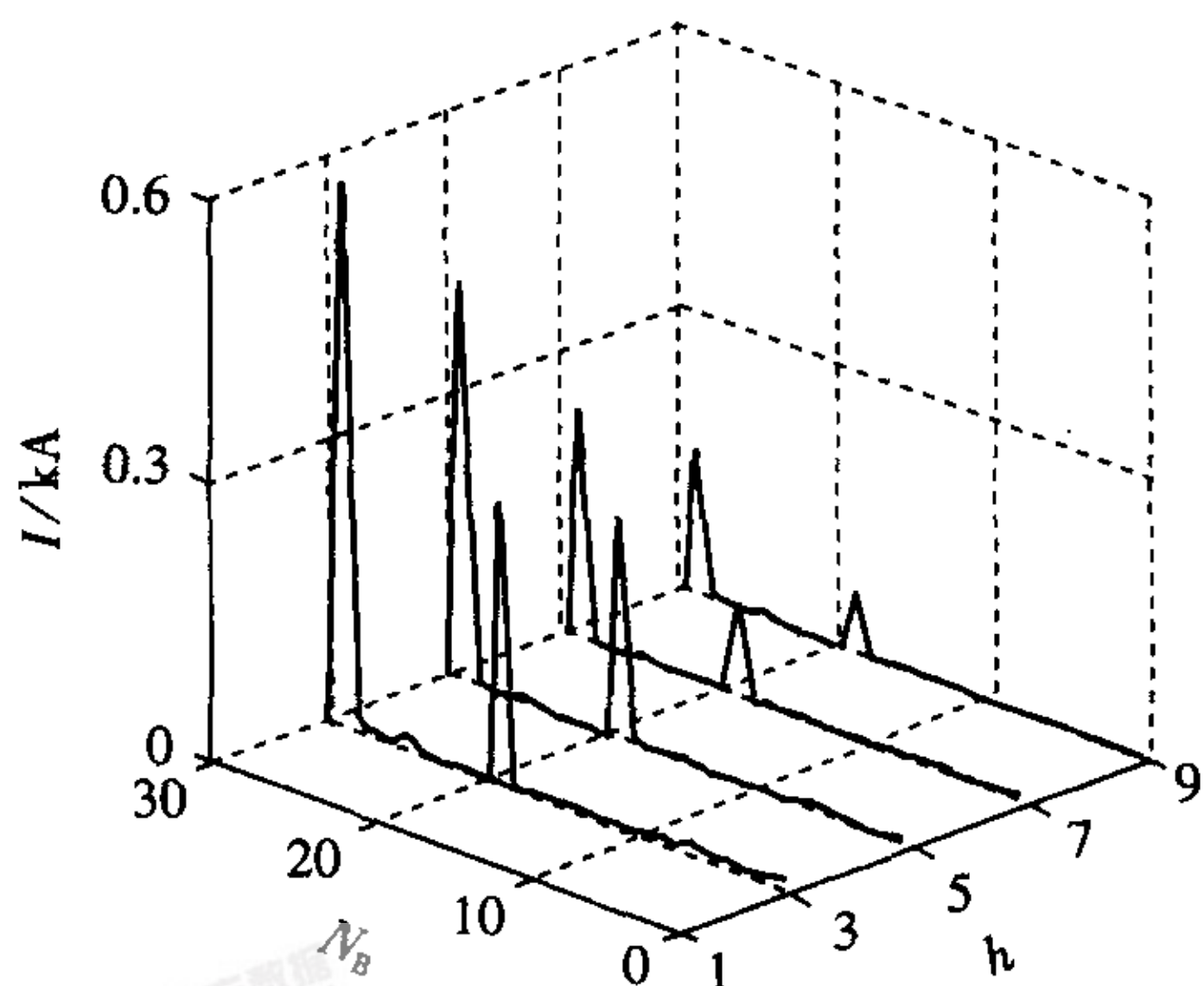


图7 SVD分解时节点注入谐波电流估计值
Fig.7 Injected bus harmonic currents
estimated by SVD

各节点注入谐波电流的仿真与SVD算法误差 ΔI 如图8所示。

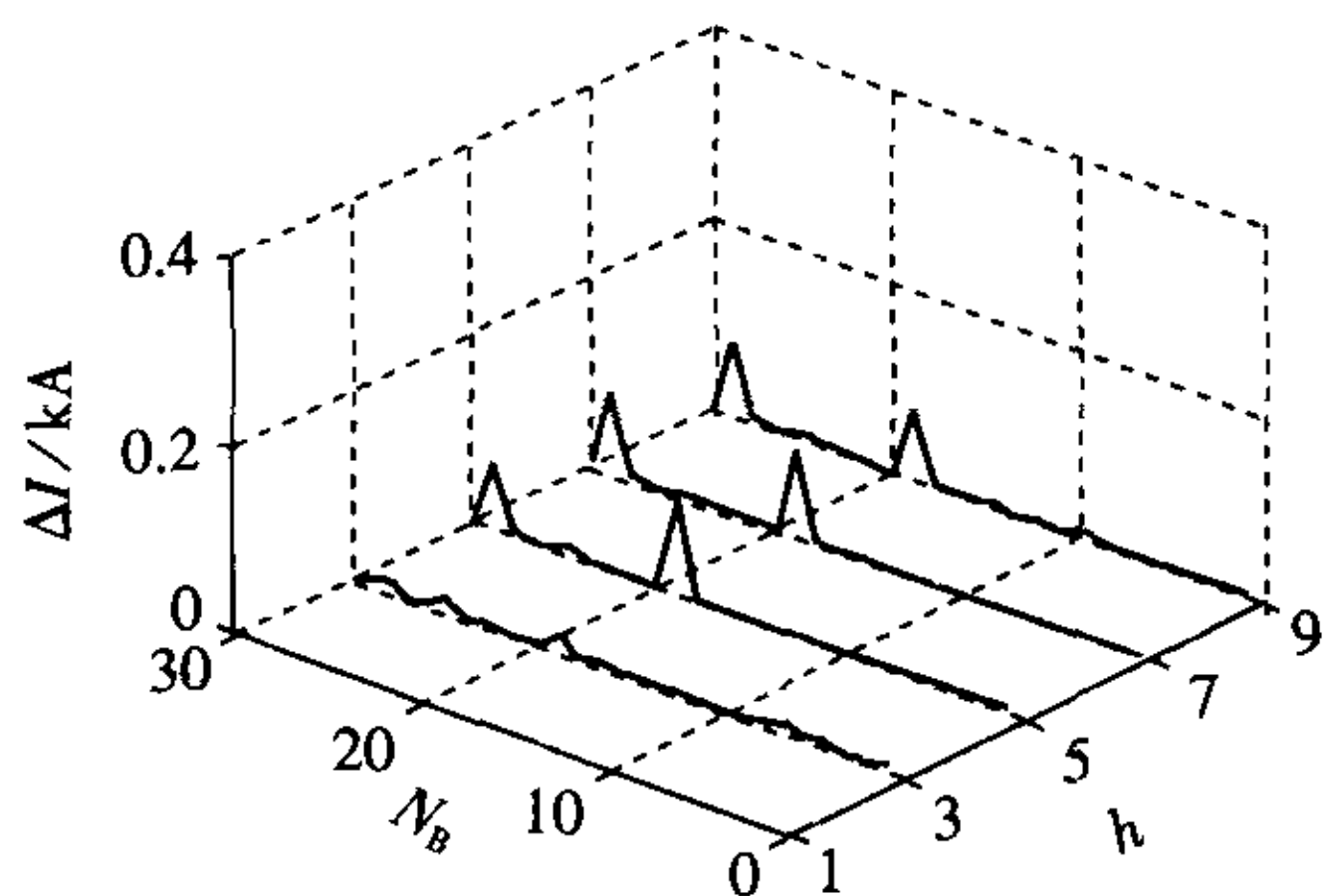


图8 仿真与估计的节点注入谐波电流误差
Fig.8 Differences of injected bus harmonic
currents between simulation and estimation

根据以上估计结果得知,用SVD算法进行谐波状态估计时,节点19、29注入了谐波电流,与仿真时提供的条件,即谐波电流从节点19、29注入相符合,而且其注入谐波电流的幅值和仿真时得到的幅值之间的误差以及各节点谐波电压的误差均比较小,能够比较准确地反映系统的谐波状态。

4 结论

根据传统谐波状态估计的不足提出了改进方法,其中同步相量测量能有效减少测量的误差,而基于奇异值分解的最小二乘估计法能够在系统状态非完全可观的情况下进行有效的估计,在保持精确度的同时,大幅降低了对测量冗余的要求,减少了测量费用。仿真结果证明了以上结论。

参考文献:

- [1] 吴笃贵,徐政. 电力系统谐波状态估计技术的发展与展望[J]. 电网技术,1998,22(1):75-77.
WU Du-gui,XU Zheng. Development of the harmonic state estimation for the power system[J]. Power System Technology,1998,22(1):75-77.
- [2] HEYDT G T. Identification of harmonic sources by a state estimation technique[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1989,4(1):569-576.
- [3] MELIOPOULOS A P S,ZHANG Fan. Power system harmonic state estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1994,9(3):1701-1709.
- [4] XU Wilsun. Direction method cannot be used for harmonic source detection[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle,USA;IEEE,2000:873-876.
- [5] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [6] MELIOPOULOS A P S,ZHANG Fan,ZELINCHER S. Hardware and software requirements for a transmission system harmonic measurement system[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Harmonics in Power Systems(ICHPSV). Atlanta,USA;IEEE,1992:330-338.
- [7] CARLSON D,CRANE L,HEYDT C. The analysis and measurement of harmonics in the vicinity of an HVDC inverter[J]. Electric Machines and Power Systems,1986,11(6):499-510.
- [8] 周杰娜. 现代电力系统调度[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
- [9] HOLTEN L,GJELSVIK A,AAM S,et al. Comparison of different methods for distribution networks[J]. IEEE Trans Power Systems,1998,3(4):1798-1806.

- [10] THUKARAM D, JEROME J, SURAPONG C. A robust three-phase state estimation algorithm for distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 2000, 55(3): 191-200.
- [11] VEMPATI N, SLUTSKER I W, TINNEY W F. Enhancements to givens rotations for power system state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 842-849.
- [12] 胡以怀, 周轶尘. 一般复数矩阵 SVD 算法[J]. 武汉交通大学学报, 1995, 19(2): 150-154.
- HU Yi-huai, ZHOU Yi-chen. Algorithm for singular value decomposition of complex matrix[J]. Transaction of Wuhan Transportation University, 1995, 19(2): 150-154.
- [13] MATHARAD C, PREMRUDEEPREECHACHARN S, WATSON N R. Power system state estimation using singular value decomposition[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(2):

99-107.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

徐志向(1980-), 男, 浙江永康人, 硕士研究生, 主要从事电力系统谐波状态估计以及谐波源定位的研究(E-mail: 1.tea@163.com);

侯世英(1962-), 女, 四川南充人, 副教授, 主要从事谐波分析与仿真的研究;

周林(1965-), 男, 重庆人, 教授, 主要从事电能质量以及谐波抑制与补偿的研究;

吕厚余(1947-), 男, 重庆人, 教授, 主要从事电能质量以及谐波监测的研究。

Power system harmonic state estimation based on singular value decomposition

XU Zhi-xiang^{1,2}, HOU Shi-ying^{1,2}, ZHOU Lin^{1,2}, LÜ Hou-yu^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Traditional and advanced LSE (Least Squares Estimation) methods are mostly to measure harmonics asynchronously and then to solve the giant overdetermined linear equations, which has low estimation accuracy, tremendous calculations and measurements, and high cost. A harmonic state estimation method based on synchronous phasor measurements is presented, and ill-conditioned linear equations with complex variables are solved by the CSVD (Complex Singular Value Decomposition), which makes the estimation still effective when the system is partial observable and reduces the measurement redundancy degree. Taking the IEEE 30-bus system as an example, branch harmonic currents and bus harmonic voltages are synchronously measured with phasor measurement units. Simulations are carried out with Matlab and the SVD-based LSE program respectively. Results show that the harmonic state estimation based on SVD reflects the system harmonic state more accurately.

Key words: harmonic; the least square estimation; synchronous phasor measurement unit; singular value decomposition

国电南自 KKS2006 编码管理系统简介

电站标识系统 KKS (Kraftwerk-Kennzeichen-System) 作为一种命名标准, 由一组数字和英文字母组成。它按照一定规律来标识和辨别电厂的机组及其各级系统、设备, 充分考虑到设计单位、制造厂家和使用单位各类专业的需要, 满足电厂计划、施工和运行过程中有关各方相关标识的要求。KKS 编码是由德国 VGB 技术分类系统协会在 20 世纪 70 年代制定的, 自 1995 年推出第 4 版本后, 其内容已经涵盖了各种类型电厂, 目前已经成为世界各国电力行业应用最为广泛的一种编码体系。

近年来, 中国发电企业信息化进程明显加快, 各种大型信息系统 (DCS、SIS、EAM 等) 在发电企业中陆续上马。为了帮助发电企业能在信息系统中更好的管理本厂设备, 真正建立起“数字化电厂”, 实现管控一体化, 国电南自在充分研究了 KKS 编码理论和国内外现有 KKS 编码软件的基础上, 推出了适应国内发电企业生产特点的“KKS 2006 编码管理系统”。

本系统能够帮助编码人员方便准确地按照编码索引完成编码工作, 提高编码工作的效率和准确性; 以多种形式的树状结构优化 KKS 编码的管理和显示; 通过多种对外接口方便 KKS 编码与其他应用系统配合使用; 可以在发电企业和所属发电集团之间进行 KKS 数据交换, 为发电集团的数字化集中统一管理提供保障。按照上述功能描述, 本系统共分为编码索引管理、辅助编码、编码管理、标准样例管理、报表管理、支持系统管理共 6 大功能模块。

本系统遵循 J2EE 平台构架, 利用 JAVA (JSDK 1.5) 编程语言开发, 完全采用 B/S 3 层结构, 由数据库服务器、应用服务器、Web 服务器和客户端组成, 采用组件化设计, 实现了样式、数据和业务逻辑的分离。客户端无需安装程序, 直接利用浏览器完成信息的显示和数据的反馈提交, 业务逻辑组件负责处理所有日常业务, 数据访问组件完成对数据库的操作, 应用接口与其他应用进行交互。系统总体上具备极强的可伸缩性、可扩展性和易维护性, 是一个高复用、高可靠的软件产品。

本系统的数据库服务器支持 DB 2、SQL Server、Oracle 等大型主流数据库系统, 采用 Windows 2000 Server 或 Unix 操作系统, 应用服务器支持 Tomcat、WebSphere、WebLogic 等应用服务器, 客户端支持 IE (不低于 6.0 版本)、Netscape 等浏览器, 采用 Windows 2000、Windows XP 等操作系统。

联系电话: 025-83537553 电子邮箱: zhn@sac-china.com 联系人: 张海宁

地址: 南京市新模范马路 38 号电力市场及 MIS 事业部

(国电南自电力市场及 MIS 事业部)