

# 基于遗传算法的PMU配置对谐波状态估计质量影响的研究

王艳松, 韩美玉, 谭志勇

(中国石油大学信息与控制工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要:** 谐波状态估计的质量是PMU配置数量和安装地点的函数。研究PMU配置对谐波状态估计质量的影响, 建立量测方程, 并应用最小二乘法求解谐波状态估计的量测方程。建立了综合考虑量测配置PMU投资和状态估计误差的加权数学模型, 并应用遗传算法求解加权数学模型, 通过对最优代PMU配置方案的分析, 给出了不同数目和位置的PMU对谐波状态估计误差和系统可观性的影响规律。利用Matlab搭建了配电网的仿真模型, 获得了研究所需的原始数据, 仿真算例验证了算法的有效性。

**关键词:** 遗传算法; 谐波状态估计; 最小二乘法; PMU

## Study on the effect of PMU allocation on the quality of harmonic state estimation

WANG Yan-song, HAN Mei-yu, TAN Zhi-yong

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** The quality of harmonic state estimation is a function of the number and the placement of PMU. The effect of PMU allocation on the quality of harmonic state estimation is researched. First, the measurement equation is established for harmonic state estimation, which is solved using Least Square Method. Second, considering the investment of PMU allocation and the error of harmonic state estimation comprehensively, a weighted mathematical model is established. By analyzing the PMU allocation of the best generation, the influence rule is given, which the number and the placement of PMU has influence on the error and the objectiviteit of harmonic state estimation. At last, a distribution network model is established in MATLAB, by which the initial data are obtained. Example analysis shows the validity of the algorithm.

**Key words:** genetic algorithm; harmonic state estimation; least square method; phase measurement unit (PMU)

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0233-04

## 0 引言

近年来, 由于电力电子装置、大功率可控整流设备在电力系统中的应用, 以及电弧炉、轧钢机、电力牵引机车的广泛使用, 造成电力系统越来越严重的谐波污染。

谐波状态估计根据有限点上的测量值来估计整个网络的谐波状态, 是指导谐波治理的依据。目前, 谐波状态估计研究主要集中在谐波状态估计建模、谐波状态估计的求解算法、谐波状态估计的可观性和误差、PMU量测优化配置等方面。文献[1-2]选取节点谐波电压相量作状态量, 以节点谐波电压、支路谐波电流和注入谐波电流相量作为量测量, 建立谐波状态估计问题的数学模型。文献[3]针对输电线路、变压器、同步电机、无功补偿设备、电力负荷和谐波源, 研究电力系统元件的谐波建模。文献[4]提出了基于奇异值分解的电力系统谐波状态估计,

用复数奇异值分解求解病态线性复变量方程组。文献[5]综合考虑参数误差和量测误差, 提出了应用总体最小二乘法进行谐波状态估计的新方法。文献[6]将谐波状态估计描述为一个带约束的基于L1-准则最小化的稀疏最大化问题, 通过线性编程进行有效求解。文献[7]将谐波状态估计的求解视为一个优化问题, 给出了一种利用有限的量测量估计电力系统谐波畸变的进化策略方法。文献[8]将测量矩阵的最小条件数作为顺序排除的基准, 提出了一种电力系统谐波状态估计优化测量选址的新技术。文献[9]提出应用遗传算法用于谐波状态估计优化测量选址。文献[10-11]应用统计的方法对谐波状态估计的误差进行了分析。文献[12]考虑了参数误差对谐波状态估计结果的影响。

由于谐波估计的质量是量测数量和量测装置安装地点的函数, 故选择适当的谐波量测装置安装地点是非常重要的<sup>[13]</sup>。本文应用遗传算法研究了PMU

量测配置对谐波状态估计质量的影响。

### 1 谐波状态估计的量测方程

传统谐波状态估计具有如下数学模型：

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{H} \dot{\mathbf{X}} + \boldsymbol{\eta} \quad (1)$$

式中： $\dot{\mathbf{Z}}$ 为测量向量； $\mathbf{H}$ 为测量矩阵； $\dot{\mathbf{X}}$ 为被估计的状态向量； $\boldsymbol{\eta}$ 为测量噪声向量。

测量矩阵表示测量向量与被估计状态向量之间的关系，如果被估计的是节点谐波电压，则有3种情况<sup>[2]</sup>。

a) 量测量是节点注入谐波电流 $I_N$ 时，节点谐波电压 $U_N$ 与节点谐波导纳矩阵 $\mathbf{Y}_{NN}$ 的关系为：

$$\mathbf{I}_N(h) = \mathbf{Y}_{NN}(h) \mathbf{U}_N(h) \quad (2)$$

b) 量测量为节点谐波电压时，有：

$$\mathbf{U}_N(h) = \mathbf{I} \mathbf{U}_N(h) \quad (3)$$

式中， $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

c) 量测量为母线连接支路谐波电流测量 $I_L$ 时，节点谐波电压 $U_N$ 与谐波导纳矩阵 $\mathbf{Y}_{LN}$ 的关系为：

$$\mathbf{I}_{LN}(h) = \mathbf{Y}_{LN}(h) \mathbf{U}_N(h) \quad (4)$$

## 2 PMU 配置对谐波状态估计质量的影响

### 2.1 加权多目标数学模型的建立

谐波状态估计的可观性是谐波量测装置安装数目和安装地点的函数。为了研究谐波量测配置对谐波状态估计可观性的影响规律，算法综合考虑谐波量测装置的安装数量、位置和谐波状态估计的误差，建立了统一的加权多目标数学模型：

$$\begin{cases} \min f(x) = \min \left( a \sum_{i=1}^n \gamma_i + b \sum_{i=1}^n |\tilde{X}_i - X_i| \right) \\ \text{s.t. } \dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{H} \dot{\mathbf{X}} + \boldsymbol{\eta} \end{cases} \quad (5)$$

式中：变量 $\gamma_i$ 表示第 $i$ 个节点处安装谐波量测装置与否，如果节点 $i$ 处安装谐波量测装置，则 $\gamma_i = 1$ ，反之， $\gamma_i = 0$ ； $\tilde{X}_i$ 和 $X_i$ 分别表示仿真条件下的实测值和谐波状态估计的估计值；变量 $a$ 和 $b$ 为两个权值因子，表示模型综合考虑了谐波量测装置的安装数目、位置和谐波状态估计的估计误差。

### 2.2 应用遗传算法求解 PMU 配置

(1) 给定算法的群体规模 $M$ 及染色体长度 $L$ ；设定群体的总进化代数 $Max$ 、交叉率 $P_c$ 和变异率 $P_m$ ，预置参数 $bestkeep$ （用来判断算法收敛性）以及进化次数变量 $Num$ 。

(2) 当母线的节点数为 $N$ 时，用 $N$ 个二进制码表示PMU的数量和位置。当节点数较多时，根据系

统可观性配置原则，先对网络进行等效化简，再进行编码。

设 $p$ 是个体二进制解码，如图1， $p(i)=1$ ，表示 $i$ 节点安装PMU， $p(i)=0$ ，表示 $i$ 节点没有安装PMU， $\sum p(i)$ 表示PMU的安装数量。

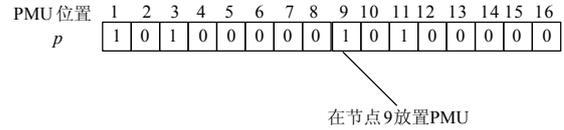


图1 PMU 安装数量与位置的编码矩阵

Fig.1 Coding matrix of the number and placement of PMU

(3) 遗传操作包括选择、交叉和变异三个算子。首先，对种群中的每个个体进行适应度值计算，并根据适应度大小对个体进行排序，并按直接比较法进行选择。然后，将选择的种群按照单点交叉方法将种群中的个体随机两两配对，进行交叉操作。最后本文采用单点变异，随机选择一个变异点进行变异取反操作，即0变异为1，1变异为0。本文交叉率为：0.85，变异概率为：0.05。

### (4) 收敛条件

采用最优个体最少保留代数与最大遗传代数相结合的终止进化准则。本文最少保留代数为：15，最代遗传代数为：200。

### 2.3 分析PMU配置对谐波状态估计的影响

记录遗传进化每代的最优个体，根据PMU配置的解码串，如果配置的PMU量测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以观测的。对于量测方程 $\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{H} \dot{\mathbf{X}}$ ，利用最小二乘法求解得到：

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \dot{\mathbf{Z}} \quad (6)$$

但是，冗余测量会导致矩阵运算量增大，而且量测投资费用增加。

如果量测矩阵是病态的，可以通过奇异值分解（Singular Value Decomposition, SVD）算法<sup>[3]</sup>求解：

如果将系数矩阵 $\mathbf{A}$ 分解为：

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \Sigma & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (7)$$

式中： $\mathbf{A} \in R^{m \times n}$ ， $\mathbf{U} \in R^{m \times m}$ ， $\mathbf{V} \in R^{n \times n}$ 。 $\mathbf{U}$ ， $\mathbf{V}$ 是正交阵， $\Sigma = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_r)$ ，并有 $\omega_j > 0 (j=1, 2, \dots, r)$ ， $r$ 为矩阵 $\mathbf{A}$ 的秩（ $r \leq \min(m, n)$ ）。 $\mathbf{U} = (\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2)$ ， $\mathbf{U}_1$ 为 $\mathbf{U}$ 中前 $r$ 列正交向量组构成的 $m \times r$ 阶矩阵； $\mathbf{V} = (\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2)$ ， $\mathbf{V}_1$ 为 $\mathbf{V}$ 中前 $r$ 列正交向量组构成的 $n \times r$ 阶矩阵。如果矩阵 $\mathbf{A}$ 的广义逆定义为：

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{V}_1 \Sigma^{-1} \mathbf{U}_1^T \quad (8)$$

那么线性方程组  $Ax = B$  的解可以表示为:

$$x = A^{-1}B = V_1 \sum^{-1} U_1^T B \quad (9)$$

以PMU配置和仿真数据为基础,应用谐波状态估计的算法求解系统各节点的谐波电压。分析PMU不同数量和位置对系统各节点的谐波状态估计的误差和系统可观性的影响。

### 3 仿真算例分析

#### 3.1 仿真模型

本文以 16 节点配电网为例搭建仿真模型,如图 2 所示。该系统有一台变压器(原边为 110 kV,副边为 10.5 kV)、15 个负荷节点、8 个电容器接地支路和一个谐波源注入节点。

通过仿真,在各节点获取节点电压,支路电流的测量数据,作为评估谐波状态估计误差的依据。

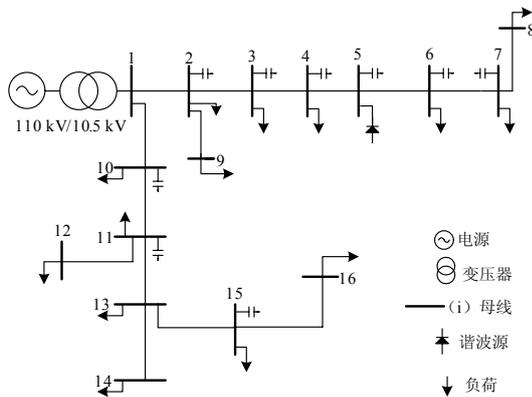


图 2 配电系统拓扑接线图

Fig.2 The topology diagram of distribution network

#### 3.2 不同安装数目和位置对谐波状态估计的影响

通过遗传算法解得最优代PMU配置解码如表 1 所示。对该PMU优化配置结果,应用最小二乘法获得系统的谐波状态估计结果和误差见图 3、图 4。

表 1 最优PMU配置的编码解码

Tab.1 The code and decoding of optimization PMU allocation

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8
配置编码	0	1	0	0	1	0	0	1
配置解码	否	是	否	否	是	否	否	是
节点编号	9	10	11	12	13	14	15	16
配置编码	0	0	1	0	0	1	1	0
配置解码	否	否	是	否	否	是	是	否

由图 5~图 6 可知,系统处于完全可观的状态,谐波状态估计的精度是很高的,误差主要是出现在 3、4、10 节点,其中 3、4 节点靠近谐波源点(5 节点),故若要提高精度,靠近谐波源点的节点应该优先配

置。

由表 1 知共在 6 个节点上配置了 PMU,结合拓扑图 2 可知,这 6 个点主要是配置在了出线度较高的节点,如 2 和 11 节点,以及靠近谐波源的节点,如节点 5。由于算法的目标函数是节点配置数目和位置与谐波状态估计误差的加权,故从优化配置结果来看,可以得到以下结论: a) 谐波量测装置应该优先配置在距离谐波源较近的节点,或者直接配置在含有谐波源的节点。b) 出于经济的角度,PMU 应该尽量配置在出线度较高的节点上。

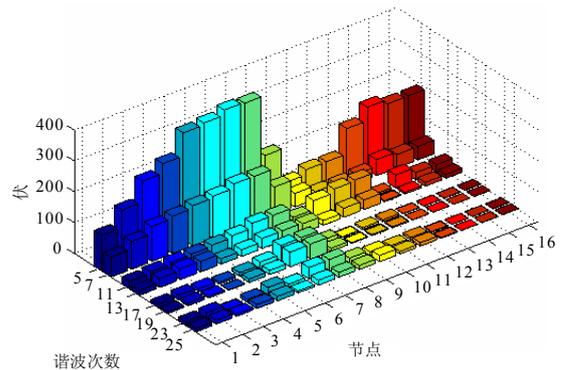


图 3 节点谐波电压幅值估计值

Fig.3 The magnitude of node harmonic voltage estimated

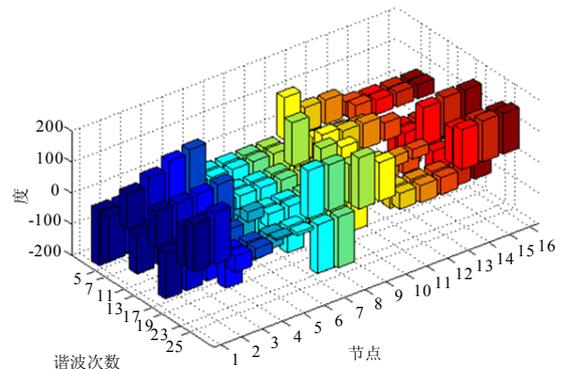


图 4 节点谐波电压相角估计值

Fig.4 Phasor of node harmonic voltage estimated

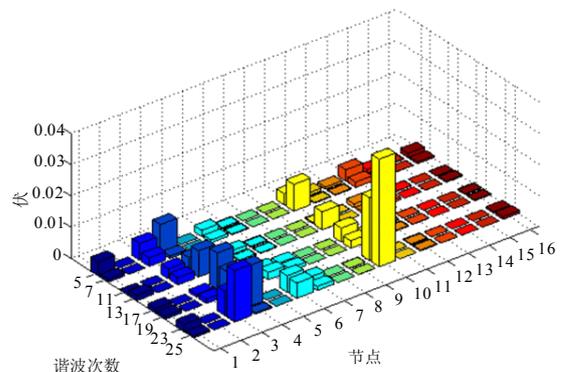


图 5 节点谐波电压幅值估计误差

Fig.5 Estimated error of the phase of node harmonic voltage

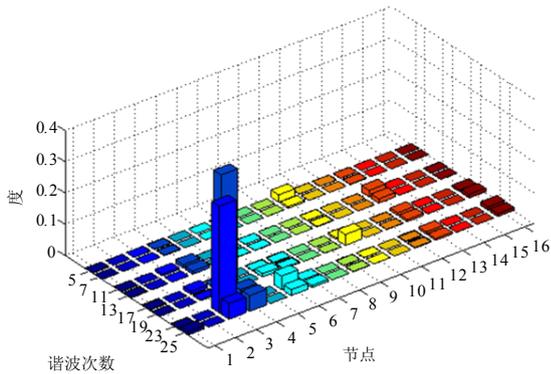


图 6 节点谐波电压相角估计误差

Fig.6 Estimated error of the phase of node harmonic voltage

### 3.3 不同 PMU 数目和位置对谐波状态估计可观性的影响

图 7 给出了不同的 PMU 安装数目和安装地点时，谐波状态估计可观数目的对比。

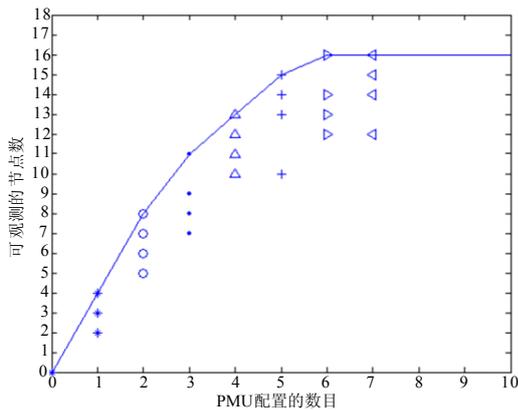


图 7 PMU 的不同数目和位置对系统可观性的影响

Fig.7 The effect of the number and placement of PMU on the system objectivity

当测量节点数大于 6 时，系统可以达到完全可观测，若再增加量测，系统的冗余度会增加，数据稳定性会增强，但是花费也会变大；当量测不够时，只要配置位置得当，也可以使得谐波状态估计可观数目较大。对于 16 节点算例，当配置节点数目为 3，且安装在 2、6、11 节点上可观测的节点数为 11；同样安装节点数为 3，但安装在 9、14、16 节点上，则可观测的数目只有 6 个，远少于安装在 2、6、11 节点上时可观测的数目。因此，量测配置安装的位置对谐波状态估计的影响是很大的。若量测不够时可以应用以上算法获得最优的配置集，使得谐波状态估计的可观数目最大。

## 4 结论

(1) 相同的 PMU 量测数目，配置在不同的位

置，对谐波状态估计可观数目的影响不同。

(2) 量测配置装置应当优先安装在出线度较高的节点上，以及可能含有谐波源的节点上和需要重点监视的节点上。

(3) 当 PMU 量测配置数量达到临界值时，系统谐波状态估计完全可观，再增加 PMU 数量，谐波状态估计的量测数据将是冗余的。

## 参考文献

- [1] 吴笃贵, 徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计 (I) —理论、模型与求解算法[J]. 电工技术学报, 2004 (2) : 66-70,90.  
WU Du-gui, XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurement (I) — theory, model and solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004 (2) : 66-70,90.
- [2] 吴笃贵, 徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计 (II) —可观性、质量评估与算例研究[J]. 电工技术学报, 2004 (3) : 78-83.  
WU Du-gui, XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurement (II) — observability analysis, quality evaluation algorithm and example studies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004 (3) : 78-83.
- [3] 吴笃贵. 电力系统谐波建模和谐波状态估计的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [4] Yu K K C, Watson N R. Three-phase harmonic state estimation using SVD for partially observable systems[C]. //2004 International Conference on Power System Technology, POWERCON. 2004: 29-34.
- [5] 谭桂华. 基于总体最小二乘法的电网谐波状态估计及误差分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [6] LIAO Huai-wei. Power system harmonic state estimation via sparsity maximization[J]. IEEE, 2006.
- [7] Arruda E F, Kagan N. Estimation of harmonic states using evolutionary strategies[J]. Controley Automacao, 2009, 20 (2): 177-191.
- [8] Madtharad, Chakphed, Premrudeepreechacharn, et al. An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1514-1521.
- [9] Dehkordi, Behzad Mirzaeian, Fesharaki, et al. Optimal measurement placement for static harmonic state estimation in the power systems based on genetic algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2009, 4 (2): 175-184.
- [10] Yu Kent K C, Watson Neville R, Arrillaga Jos. Error analysis in static harmonic state estimation: a statistical approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1045-1050.

(下转第 240 页 continued on page 240)

发送的单播响应报文数量、接收的单播响应报文数量。该网络对时模拟客户端，可在线设置对时周期（例如从 10 ms 到 50 s 等）。

应用该模拟客户端，发现了某 GPS（带 SNTP 服务器）在多客户端短小时内大量请求的情况下，不再响应 SNTP 请求报文的问题。在图 2 所示环境中为了增大对被测 SNTP 服务器的压力，增加计算机为 SNTP 模拟客户端，该对时模拟客户端的单播请求周期设置为 10 ms，此时被测服务器（GPS）的 SNTP 流量为 130 次/s 左右（ARP 和 UDP 报文数量为 200 帧/s 左右），运行 15 min 左右会出现被测服务器不再响应 SNTP 请求的现象。不满足“SNTP 请求量：500 次/s”的要求。

经分析发现是由于该对时服务器（GPS）程序中资源消耗迅速，响应栈未响应，原因是上次还未处理完，故以后的请求命令都未处理。解决方法是：若本次处理未结束，则下一次来的请求命令就被缓存，等待被处理。

#### 4 结论

通过进行智能变电站网络对时客户端/服务器的测试研究，设计开发了 SNTP 模拟客户端/服务器应用于否定测试，可根据需要模拟响应报文延时或丢弃，测试 SNTP 请求/响应报文丢帧对被测设备（服务器/客户端）的影响；在请求或响应报文中增加错误数据包，验证被测设备的检测与处理能力。这些对智能变电站网络化对时（如 SNTP、IEEE 1588 等对时方案）的可靠性和冗余性设计及其测试都有借鉴意义，提高了测试效率和测试全面性。

#### 参考文献

[1] DL/T 860.72-2004 (IEC 61850-7-2) 变电站通信网络和系统第 7-2 部分：变电站和线路（馈线）设备的基本通信结构 抽象通信服务接口（ACSI）[M]. 北京：中国电力出版社，2002.

（上接第 236 页 continued from page 236）

[11] 周念成, 谭桂华, 何建森, 等. 基于统计方法的电网谐波状态估计误差分析[J]. 电工技术学报, 2009 (6): 109-114.  
ZHOU Nian-cheng, TAN Gui-hua, HE Jian-sen, et al. Error analysis in harmonic state estimation of power system based on the statistical approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009 (6) : 109-114.  
[12] 周念成, 谭桂华, 赵渊, 等. 一种计及参数误差的电网谐波状态估计方法[J]. 重庆大学学报, 2009 (2) :30-34.  
ZHOU Nian-cheng, TAN Gui-hua, ZHAO Yuan, et al. A

DL/T 860.72-2004 (IEC 61850-7-2) basic information and communication structure-abstract communication service interface (ACSI) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.  
[2] DL/T 860.81 (IEC 61850-8-1) 变电站通信网络和系统第 8-1 部分：特定通信服务映射（SCSM）映射到制造报文规范MMS[M]. 北京：中国电力出版社，2002.  
DL/T 860.81 (IEC 61850-8-1) communication networks and systems for power utility automation-part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) - mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.  
[3] 黄沛芳. 基于 NTP 的高精度时钟同步系统实现[J]. 电子技术应用, 2009, 35 (7): 55-57.  
HUANG Pei-fang. Implementation of high-precision clock synchronous system based on NTP[J]. Application of Electronic Technique, 2009, 35 (7): 55-57.  
[4] DL/T 860.10 (IEC 61850-5) 变电站通信网络和系统第 5 部分：功能通信要求和装置模型[M]. 北京：中国电力出版社，2002.  
DL/T 860.10 communication networks and systems for power utility automation-part 5 : Communication requirements for functions and device models[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.  
[5] DL/T 860.10 (IEC 61850-10) 变电站通信网络和系统第 10 部分：一致性测试[M]. 北京：中国电力出版社，2002.  
DL/T 860.10 communication networks and systems for power utility automation-part 10: conformance test[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

收稿日期：2009-12-05； 修回日期：2010-03-30

#### 作者简介：

张清枝（1970-），女，副教授，硕士，研究方向为电力系统控制、网络等；

左群业（1975-），男，工程师，硕士研究生，主要从事电力系统通信及变电站自动化产品开发与测试；E-mail: qunyez@xjgc.com

何刚（1980-），男，工程师，本科，主要从事电力系统通信及变电站自动化产品开发与测试。

method for considering parameter errors in power system harmonic state estimation[J]. Journal of Chongqing University, 2009 (2) : 30-34.

[13] Chakphed Madtharad, Suttichai. An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2005, 20 (2): 1514-1521.

收稿日期：2010-04-10

#### 作者简介：

王艳松（1965-），女，博士，教授，研究方向为电能质量分析、配电网优化规划和配电网故障诊断。E-mail: hdjd@upc.edu.cn