

# 基于参数辨识方法的谐波源定位

蔡明<sup>1</sup>, 唐昆明<sup>1</sup>, 张太勤<sup>2</sup>

- (1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044;
2. 重庆新世纪电气有限公司, 重庆市沙坪坝区 400030)

## Harmonic Source Localization Based on Parameter Identification

CAI Ming<sup>1</sup>, TANG Kunming<sup>1</sup>, ZHANG Taiqin<sup>2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing New Century Electrical Co., Ltd., Shapingba District, Chongqing 400030, China)

**ABSTRACT:** In allusion to the feature that non-linear load leads to harmonics, an equivalent load model in time domain is built. Under unknown load parameters at system side and consumer side, by use of physical relation between voltage and current at the point of common coupling (PCC) the load impedance is traced and identified by parameter identification to locate harmonic source, meanwhile the quantized nonlinearity of current is led in to decide the responsibility to be borne by each consumer for the deterioration of power quality caused by harmonics. Simulation results show that the proposed method is simple and feasible and is not influenced by background harmonics.

**KEY WORDS:** harmonic source; parameter identification; nonlinearity

**摘要:** 根据非线性负荷产生谐波的特点, 建立了负荷时域等值模型。在系统侧和用户侧负荷参数未知的情况下, 利用公共耦合点上电压、电流的物理关系, 采用以参数辨识方法跟踪辨识负荷阻抗, 确定谐波源, 同时引入量化的电流非线性度来划分各负荷的谐波责任。仿真结果表明, 该方法简单可行, 不受背景谐波影响。

**关键词:** 谐波源; 参数辨识; 非线性度

## 0 引言

随着智能电网的发展, 电力电子装置等非线性元件被越来越多地用以改造或代替传统的电力设备; 同时其他非线性负荷也日益增多, 导致配电网中形成了多个谐波源并存的复杂局面。目前, 配网中谐波污染问题日益严重, 已引起了企业界和学术界的重视<sup>[1]</sup>。

研究谐波源定位问题对于大规模复杂负荷的实际电网有着重要意义。在实际电网中, 正确识别综合负荷中的谐波源, 并定量划分各谐波源的谐波

责任是解决谐波潮流计算、滤波器配置和采用经济手段惩罚谐波问题的基础。但现有方法易受背景谐波的影响, 且对于定量划分各负荷的谐波责任存在一定困难。

文献[2-3]提出利用最小方差估计器的谐波源识别算法, 通过选用注入的视在功率和线路的视在功率进行测量, 并以此来获得负荷注入系统的谐波功率, 当注入谐波功率为正时, 则判定该负荷为谐波源。然而, 在波形畸变的情况下, 对于无功功率并没有普遍接受的定义。此外, 该方法依赖于傅里叶变换, 只能处理时域周期信号, 不能对包含间谐波的谐波源作出正确的分析。谐波功率流向法<sup>[4-5]</sup>是上述方法的改进, 虽简单明了, 但在复杂的多谐波源网络中, 某些非线性负荷可能吸收谐波功率, 将导致无法检测出该负荷发出的谐波功率。因此, 该方法原理上不能避免出现错误的结果<sup>[6-7]</sup>。谐波源简化模型法<sup>[8-13]</sup>能直观地将网络中的谐波源用等效电路模型表示, 也可对谐波电流中由线性和非线性负荷部分引起的谐波分量进行区分, 但在实际情况下, 由于负荷种类繁多, 很难精确获得各种具体参数, 造成谐波源模型法计算误差比较大。

## 1 谐波产生的机制

电力系统中主要的谐波源是非线性的装置和负荷。发电机通常是在 50 或 60 Hz 恒定频率下发电, 其电动势波形可以视为正弦波。但当一个正弦电压源加在一个非线性装置或负荷上时, 产生的电流并不完全是正弦的, 因为系统阻抗将产生一个非正弦电压降, 导致负荷端出现电压畸变, 即电压中含有谐波<sup>[14]</sup>。此时, 畸变的电压加在线性负荷的两

端,使线性负荷的电流也发生畸变。图1通过系统电流电压发生畸变的例子说明谐波产生的机制。其中  $\dot{E}_M$  为等效电源的电动势;  $Z_1$  为线性负荷阻抗;  $Z_2$  为非线性负荷阻抗;  $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$  分别为其支路电流;  $u(t)$  为公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压。

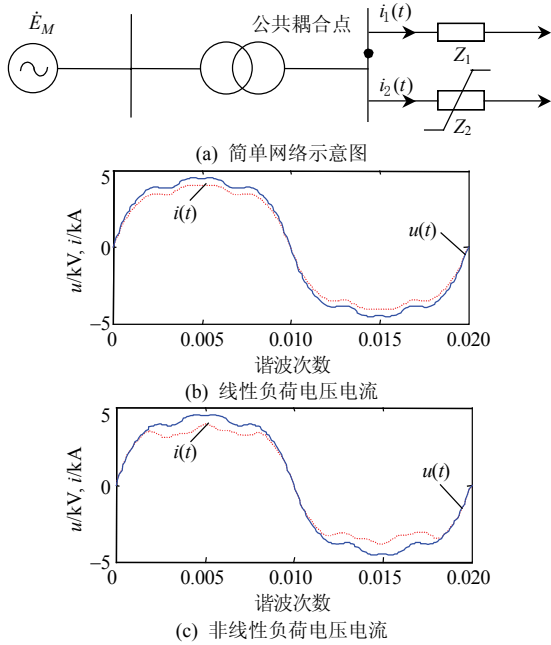


图1 线性负荷和非线性负荷电压电流

Fig. 1 V&I waveform of linear and non-linear loads

## 2 基于参数辨识法定位谐波源的基本原理

### 2.1 阻感负荷电路

若负荷呈感性,其时域等值模型如图2所示。其中  $Z$  为感性负荷;  $u(t)$ 、 $i(t)$  为 PCC 点负荷测量电压和电流。当负荷为线性时,根据式(1)(2)确定阻抗参数,此时阻抗参数呈线性关系。当负荷为非线性负荷时,按照微元法的思想,采用分段线性化法计算,则在整个采样周期内其阻抗参数呈非线性关系。

$$i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L(t)} \int_{t_0}^t u_L(\xi) d\xi \quad (1)$$

$$u_L(t) = u(t) - R(t)i(t) \quad (2)$$

式中  $R(t)$ 、 $L(t)$  分别为  $t$  时刻感性负荷的电阻和电感部分等值参数。

采样频率远大于负荷参数的变化频率,在一个

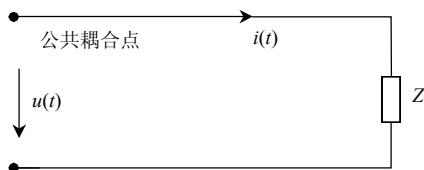


图2 负荷电路

Fig. 2 Load circuit

微元时间  $\Delta t$  内,可认为连续相邻的4个采样点上的  $R$ 、 $L$  值不变。根据梯形等效法,设  $\Delta t = t_3 - t_1$ , 则有

$$i(t_3) = i(t_1) + \frac{1}{L} \frac{[u(t_3) - Ri(t_3)] + [u(t_1) - Ri(t_1)]}{2} \Delta t \quad (3)$$

$$i(t_4) = i(t_2) + \frac{1}{L} \frac{[u(t_4) - Ri(t_4)] + [u(t_2) - Ri(t_2)]}{2} \Delta t \quad (4)$$

其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [i(t_3) + i(t_1)] \frac{\Delta t}{2} & i(t_3) - i(t_1) \\ [i(t_4) + i(t_2)] \frac{\Delta t}{2} & i(t_4) - i(t_2) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [u(t_3) + u(t_1)] \frac{\Delta t}{2} \\ [u(t_4) + u(t_2)] \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过在 PCC 点对一系列电压、电流值的测量,应用式(5)可以计算出相应的  $R(t)$ 、 $L(t)$  值,若  $R(t)$ 、 $L(t)$  呈线性变化,则该负荷为线性;反之则为非线性,即该处存在谐波源。

### 2.2 阻容负荷电路

当负荷呈容性,即认为图2中  $Z$  为容性负荷。若负荷为线性,且满足式(6)(7),则所求解的负荷阻抗参数呈线性;反之,其阻抗参数呈非线性。

$$u(t) = R(t)i(t) + \frac{1}{C(t)} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi + u_C(t_0) \quad (6)$$

$$u_C(t) = u(t) - R(t)i(t) \quad (7)$$

式中  $C(t)$  为  $t$  时刻容性负荷的电容部分等值参数。其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} R \\ \frac{1}{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t_3) - i(t_1) & [i(t_3) + i(t_1)] \frac{\Delta t}{2} \\ i(t_4) - i(t_2) & [i(t_4) + i(t_2)] \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u(t_3) - u(t_1) \\ u(t_4) - u(t_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过对 PCC 点上一系列电压、电流值的测量,应用式(8)可以计算出相应的  $R(t)$  和  $C(t)$  值。若  $R(t)$ 、 $C(t)$  呈线性变化,则该负荷为线性;反之则为非线性,即该处存在谐波源。

需要说明的是,非线性负荷计算出的  $R$ 、 $L$ 、 $C$  值,并不完全代表负荷的实际参数,而是体现出负荷电压和电流间的数学关系。由于实际负荷大多呈感性,一般采用式(5)计算负荷的等值阻抗参数。显然,只要采样电压、电流的频率足够高,阻抗便可以精确地计算出来,即谐波源可容易地辨识出来。

考虑到测量噪声的影响,式(5)(8)可用最小二乘估计式来计算,即

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{Z}'$  为由电压构成的测量矩阵;  $\mathbf{H}$  为量测矩阵;  $\mathbf{X}$  为待定的状态矢量;  $\mathbf{V}$  为量测噪声矢量。

为获得更好的辨识结果,实际建模中的采样点数常大于状态变量数,根据最小二乘理论,此时状

态变量的最优估计值为式(10)。其中  $H^+$  称为  $H$  的广义逆或伪逆，由于在电压、电流波形畸变不太严重的情况下，矩阵  $(H^T H)^{-1}$  往往是奇异或接近奇异的，因此本文采用奇异值分解技术<sup>[15-16]</sup>求解负荷阻抗。

$$\hat{X} = (H^T H)^{-1} H^T Z = H^+ Z \quad (10)$$

$$H^+ = (H^T H)^{-1} H^T \quad (11)$$

### 2.3 谐波责任的划分

在研究电网谐波污染问题时，关键是划分各个负荷对电网谐波污染承担的责任。由于负荷参数是连接电压波形和电流波形的纽带，因此可通过监测阻抗参数的波动状态，即阻抗非线性度来衡量不同负荷对电流电压波形畸变的影响程度。当负荷阻抗的非线性度为 0 时，负荷不会导致电压电流波形畸变；然而当负荷阻抗非线性度增加时，其对电网的波形畸变的影响也增加。

负荷阻抗的非线性度采用方差表征，对辨识出的阻抗值进行离散化，可得离散点  $R(k)$ 、 $L(k)$ 、 $C(k)$ ， $k=1, \dots, N$ ，则电阻的非线性度为

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (R(k) - \bar{R})^2}{N}} \quad (12)$$

式中  $\bar{R}$  可由式(14)计算得到。

电感和电容的非线性度亦类似。然而当有多个谐波源时， $S_r$ 、 $S_l$ 、 $S_c$  只能表征阻抗在数值上的振荡，却无法直观的表征各谐波源对系统谐波的污染程度。根据谐波电流反应非线性负荷的特点<sup>[17]</sup>，可利用电流非线性度(current non-linearity, CNL)，即通过比较等效线性负荷电流与实测负荷电流来划分各负荷对系统谐波污染的责任，为

$$C_{NL}(t) = \sqrt{[(i_1(t) - i_2(t))/i_2(t)]^2} \quad (13)$$

式中： $i_1(t)$  为实际畸变电流； $i_2(t)$  为等效线性负荷电流；等效线性负荷阻抗为

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R(k), \quad \bar{L} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N L(k), \quad \bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C(k) \quad (14)$$

当正弦电压加在线性负荷两端时，产生正弦电流，电流非线性度为 0；加在非线性负荷两端，则产生畸变的电流。实际中电流畸变会随着负荷非线性特性的增强而严重，即负荷的电流非线性度与谐波发射水平成正比关系。另外，当含有背景谐波的电压加在一线性负荷两端会产生畸变的电流，而该畸变电流中的谐波部分是由背景谐波电压产生，与线性负荷无关。因此，电流非线性度不受背景谐波影响。

### 3 算法仿真实例

为了验证该方法的正确性和有效性，对整流负荷、时变线性负荷等典型的非线性负荷谐波源及线性负荷进行仿真分析。采用 PSCAD 建立仿真模型，母线电压分为 220、110 及 35 kV 3 个电压等级。试验采用 110、35 kV 2 个电压等级并取其中若干支路进行测试，人为设置负荷参数。110 kV 负荷由电阻负荷  $Z_1$ 、阻感负荷  $Z_2$ 、容性负荷  $Z_3$ 、整流负荷  $Z_4$  并联组成；35 kV 负荷由时变线性负荷  $Z_5$  和时变线性负荷  $Z_6$  并联组成。其中  $Z_5$  为电阻幅值从  $1 \sim 10 \Omega$ ，频率为 1 Hz 的方波，电感幅值为  $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4} H$ ，频率为 0.5 Hz 的方波，其负荷主要为电阻； $Z_6$  的电阻和电抗与  $Z_5$  一致，其负荷主要为电感。仿真测试如图 3 所示，采样频率为 2 kHz，采集时间为 5 s，数据处理软件为 Matlab。

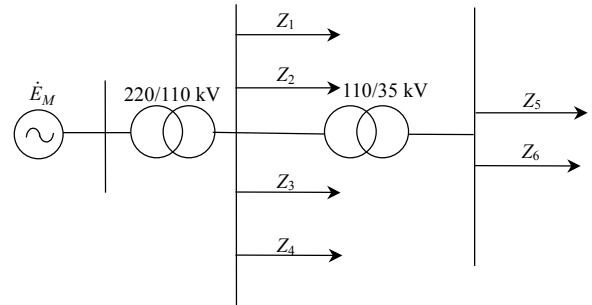


图 3 仿真测试示意图

Fig. 3 System model for simulation

这里仅对  $Z_5$  和  $Z_4$  给出阻抗参数辨识的结果，如图 4、5 所示。

由辨识结果可知，该算法能够较好地跟踪负荷参数的变化。误差主要发生在设定值发生突变的时刻，这是由于受到采样值过零点的影响，可

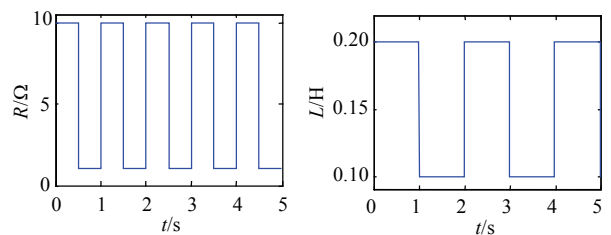


图 4 非线性负荷  $Z_5$  辨识结果

Fig. 4 Non-linear load  $Z_5$  identification results

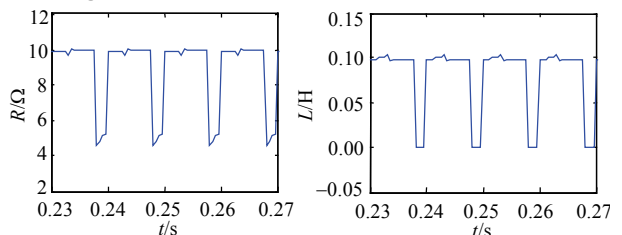


图 5 整流负荷  $Z_4$  辨识结果

Fig. 5 Rectifier load  $Z_4$  identification results

通过 Nair 法<sup>[18]</sup>去除辨识结果中的异常值,提高估计精度。

阻抗参数辨识方法从负荷特性出发,不受背景谐波的影响。表 1 给出了各负荷阻抗非线性度的计算结果。由结果可知  $Z_4 \sim Z_6$  为该系统的谐波源。由于  $Z_5$  的电阻取值远大于电感,故  $S_r$  远大于  $S_l$ 。 $Z_6$  的电感和电阻取值都比较小,相应计算出的阻抗非线性度也比较小。

表 2 不同背景谐波电压下相同负荷的阻抗非线性度

Tab. 2 Results of various back ground harmonic voltage

电压谐波畸变率/%	$Z_1$		$Z_2$		$Z_3$		$Z_4$		$Z_5$		$Z_6$	
	$S_r$	$S_l$	$S_r$	$S_l$	$S_r$	$S_l$	$S_r$	$S_l$	$S_r$	$S_l$	$S_r$	$S_l$
0	0.00	0.00	0.000 0	0.00	2.136 3	0.039 6	4.495 6	0.000 1	0.874 4	0.014 2		
0.5	0.00	0.00	0.000 0	0.00	2.136 4	0.039 6	4.495 3	0.000 1	0.874 2	0.014 2		
3.0	0.00	0.00	0.000 0	0.00	2.136 4	0.039 4	4.495 3	0.000 1	0.873 6	0.014 2		
5.0	0.00	0.00	0.000 1	0.00	2.136 8	0.039 3	4.495 3	0.000 1	0.873 5	0.014 2		
9.09	0.00	0.00	0.000 1	0.00	2.136 9	0.039 3	4.495 3	0.000 1	0.873 2	0.014 2		
20.0	0.00	0.00	0.000 1	0.00	2.140 1	0.038 9	4.495 5	0.000 1	0.869 6	0.014 3		

当有多个谐波源时,应用电流非线性度仿真如图 6、7 所示。

从图 7 可以看出,  $Z_4 \sim Z_6$  为该系统的谐波源,与表 1 结果一致。其中  $Z_4$  为该系统的主要谐波源,  $Z_5$  和  $Z_6$  的电流非线性度幅值相等,相位相差  $90^\circ$ ,与预期结果一致。从以上分析可知,阻抗非线性度

阻抗非线性度是负荷的本身特性,和电网的背景谐波电压无关。表 2 为同一负荷在不同背景谐波下阻抗非线性度的仿真结果,表明背景谐波存在与否不影响阻抗非线性度。

表 1 阻抗非线性度

Tab. 1 Results of Impedance non-linearity

负荷类型	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$
阻抗	$S_r$ 0.000 0	0.000 0	0.000 0	2.136 3	4.495 6	0.874 4
非线性度	$S_l$ 0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.039 6	0.000 1	0.014 2
	$S_c$ 0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

仅表示阻抗数值上的振荡,能够初步确定谐波源,而电流非线性度不但能够定位谐波源,并且从本质上反映了各负荷的谐波责任。

### 4 结论

1) 以系统测量的瞬时电流和电压值的参数辨识方法求解负荷阻抗,原理简单且不受背景谐波的影响。

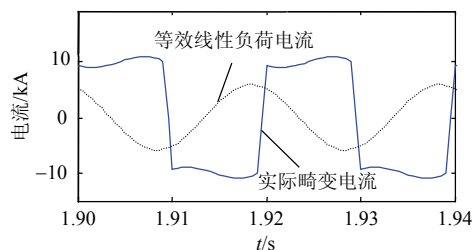
2) 单纯从电压和电流的波形畸变不能判断谐波源,须从分析负荷特性入手。由于非线性负荷等值阻抗参数  $R$ 、 $L$ 、 $C$  是造成公共连接点电压波形畸变的根本原因,因此通过判断阻抗和电流的非线性度可衡量负荷波形振荡程度并进一步划分各负荷的谐波责任。

3) 公共连接点电压的畸变是导致线性负荷电流波形畸变的根本原因,因此线性负荷与系统出现的波形干扰问题无关。在进行谐波的等效电路分析时,不能简单地把监测到的负荷电流看作等效谐波电流源来处理。

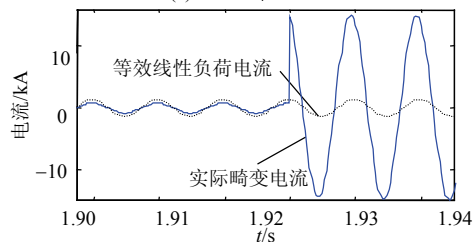
4) 随着嵌入式系统采样速率的提高,发展基于瞬时采样数据的非线性负荷辨识方法,易于进行仪器开发和工程实现。

### 参考文献

[1] 宋夕阳, 张忠. 电力系统谐波的危害与治理[J]. 智能建筑电气技术, 2009, 3(5): 63-66.  
Song Xiyang, Zhang Zhong. Harmonic harm and elimination for power system[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2009, 3(5): 63-66(in Chinese).



(a) 整流  $Z_4$  电流



(b) 非线性  $Z_6$  电流

图 6 畸变电流与等效线性负荷电流

Fig. 6 Actual distorted and calculated current waveform

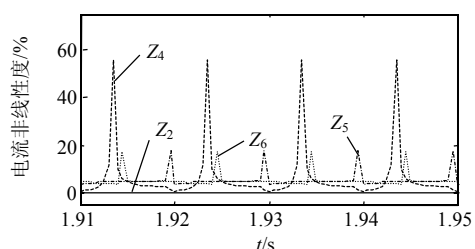


图 7 负荷电流非线性度

Fig. 7 Loads current non-linearity

- [2] Larson R E, Tinney W F, Peschon J. State estimation in power systems, part I: theory and feasibility[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(3): 345-352.
- [3] Schweppe F C, Handschin E I. Static state estimation in electric power systems[C]//Proc of IEEE. Grenoble, France: IEEE, 1974: 972-982.
- [4] Azouaou R, Rabahallah S, Leulmi S. Study of the direction of the harmonic injections in the electrical power systems[C]//IEEE International Universities Power Engineering Conference. Bristol, United Kingdom: IEEE, 2004: 944-947.
- [5] Wilsun Xu, Yilu Liu. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling [J]. IEEE Trans on Power Delivery: IEEE, 2000, 15(2): 804-811.
- [6] Wilsun Xu. Power Direction method cannot be used for harmonic source detection[C]//IEEE Power Eng Society Summer Meeting. Seattle, USA: IEEE, 2000: 873-876.
- [7] Chun L, Wilsun X, Tayjasanant T. A "critical impedance"-based method for identifying harmonic sources[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 671-678.
- [8] Hamzah N, Mohamed A. Methods for determining utility and customer harmonic contributions at the point of common Coupling[C]//National Power and Energy Conference. Bangi, Malaysia: IEEE, 2003: 167-171.
- [9] Fauri M. Harmonic modeling of non-linear load by means of crossed frequency admittance Matrix[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1632-1638.
- [10] 赵勇, 张涛, 李建华, 等. 一种新的谐波源简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 46-50.  
Zhao Yong, Zhang Tao, Li Jianhua, et al. A new simplified harmonic source model for harmonic analysis and mitigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 46-50(in Chinese).
- [11] 占勇, 程浩忠, 葛乃成, 等. 基于广义生长-剪枝径向基函数神经网络的谐波源建模[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 45-50.  
Zhan Yong, Cheng Haozhong, Ge Naicheng, et al. Generalized growing and pruning RBF neural network based harmonic source modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 45-50(in Chinese).
- [12] 刘畅, 张庆范, 郑伟杰. 基于反向传播算法神经网络的谐波源模型分析[J]. 现代电子技术, 2007, 39(6): 108-110.  
Liu Chang, Zhang Qingfan, Zheng Weijie. Back propagation algorithm neural network-based harmonic source modeling [J]. Modern Electronics Technique, 2007, 39(6): 108-110(in Chinese).
- [13] Moustafa A A, Moussa A M, El-Gammal M A. Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution systems [C]//Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Orlando, Florida: IEEE, 2000: 1035-1040.
- [14] 林海雪, 范明天, 薛惠. 电力系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 1-4.
- [15] 沈睿佼, 杨洪耕, 吴昊. 基于奇异值总体最小二乘法的间谐波估计算法[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 45-49.  
Shen Ruijiao, Yang Honggeng, Wu Hao. An algorithm of interharmonic estimation based on singular value decomposition total least square[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 45-49(in Chinese).
- [16] 胡卫红, 舒泓, 栾宇光. 基于奇异值分解的电能质量信号去噪[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 30-33.  
Hu Weihong, Shu Hong, Luan Yuguang. Power quality signals' de-noising method based on singular value decomposition (SVD)[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 30-33(in Chinese).
- [17] IEEE Std 519-1992, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems[S].
- [18] GB 4883-85, 数据统计处理和解释—正态样本异常值的判断和处理[S].



蔡明

收稿日期: 2010-11-12。

作者简介:

蔡明(1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化、电力系统谐波分析, E-mail: caiming\_042@163com;

唐昆明(1959), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化、电能质量分析;

张太勤(1966), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护及自动化产品研发工作。

(编辑 张磊)