

基于谐波功率分解的奖惩性电能计量方法

代双寅¹, 杨君超², 李琼林¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国网郑州供电公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了合理地计量谐波电能, 提出了一种基于谐波功率分解的奖惩性电能计量方法。根据谐波电压、电流采样数据采用复线性最小二乘法估算谐波等值电路参数, 然后通过谐波功率分解求解系统谐波功率和用户谐波功率, 基于奖惩性计量模型即可得到奖惩性谐波功率。该方法考虑了公共连接点处谐波功率的分解, 能够更合理地计量典型工况下的谐波功率。最后以 IEEE14 节点系统为例进行仿真分析, 结果验证了所提方法的合理性和实用性。
关键词: 谐波; 计量; 奖惩性方案; 功率分解; 复线性最小二乘法

An incentive energy measurement method based on harmonic power decomposition strategy

DAI Shuangyin¹, YANG Junchao², LI Qionglin¹

(1. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: An incentive energy measurement method based on harmonic power decomposition strategy is proposed to measure the harmonic power reasonably. Harmonic equivalent circuit parameters are estimated by using complex least squares method based on the harmonic sampling data, then user harmonic power and network harmonic power are calculated by using power decomposition strategy, and the incentive harmonic power is obtained based on incentive measurement model. The harmonic power at PCC is measured more reasonably considering the power decomposition. Finally, the reasonability and practicality of the method are proved by the examples of IEEE 14-bus system.

Key words: harmonic; measurement; incentive scheme; power decomposition; complex least squares method

中图分类号: TM933

文章编号: 1674-3415(2016)01-0111-06

0 引言

随着各种非线性用电设备的广泛应用, 公用电网谐波污染问题日益严重^[1-4]。目前我国普遍采用的全波计量方法无法合理地计量谐波电能, 可能出现非线性用户产生谐波污染却被少计电量、线性用户吸收谐波污染却被多计电量的不合理现象^[5-6]。因此亟需开展谐波电能计量方法研究, 为合理计量谐波电能提供指导和参考。

国内外在谐波电能计量方面进行了广泛研究, 提出了多种奖惩性谐波计量原则和方法^[7-9], 其主要思路为: 根据负荷性质调整其电价或者计量功率, 对非线性用户和线性用户分别进行惩罚和补偿, 以达到合理计量谐波、促进谐波污染治理的目的。实际电网中总是不可避免地存在着背景谐波, 对于某非线性用户来说, 其既向系统注入谐波污染, 又要

吸收来自于系统的谐波污染, 公共连接点(PCC)处谐波功率可分解为系统谐波功率和用户谐波功率两部分, 这两部分应分别进行奖励和惩罚。已有文献中所提出的奖惩性计量方法均未考虑 PCC 处谐波功率分解, 其计量合理性有待进一步提升。

本文提出一种基于谐波功率分解的奖惩性电能计量方法, 根据 PCC 处谐波电压、电流同步采样数据采用复线性最小二乘法估算谐波等值电路参数, 然后通过谐波功率分解求取系统谐波功率和用户谐波功率, 基于奖惩性计量模型即可得到奖惩性谐波功率, 以实现合理计量谐波电能。

1 基于谐波功率分解的奖惩性计量方法

PCC 处奖惩性谐波计量模型如下:

$$P_h = -\alpha_s P_{hs} + \alpha_c P_{hc} \quad (1)$$

式中: P_h 为奖惩性谐波功率; P_{hs} 为 PCC 点 h 次系

统谐波功率，表示用户吸收的谐波功率，且规定其正方向为从系统侧流向用户侧； P_{hc} 为 h 次用户谐波功率，表示用户产生的谐波功率，且规定其正方向为从用户侧流向系统侧； α_s 、 α_c 分别为奖励系数和惩罚系数，分别表示对用户吸收谐波功率的奖励程度和对用户产生谐波功率的惩罚程度，可由供用电双方根据谐波经济损失协商决定。为了促进谐波污染治理，通常规定 $\alpha_s \leq 1$ ， $\alpha_c > 1$ 。分别研究以下 3 种典型工况下的奖惩性谐波功率以分析该方法计量结果的合理性。

(1) 系统侧存在背景谐波，用户为线性负荷。此时 $P_{hc} = 0$ ，代入式(1)可得谐波功率 $P_h = -\alpha_s P_{hs} < 0$ ，故总功率 $P_{pcc} = P_1 + P_h < P_1$ 。这表明线性用户因吸收谐波污染而被少计电量，获得了相应的补偿。

(2) 系统侧不存在背景谐波，用户为非线性负荷。此时 $P_{hs} = 0$ ，代入式(1)可得谐波功率 $P_h = \alpha_c P_{hc} > 0$ ，故 $P_{pcc} = P_1 + P_h > P_1$ 。这表明非线性用户因向系统注入谐波污染而被多计电量，受到了相应的惩罚。

(3) 系统侧存在背景谐波，用户为非线性负荷。这是一种最为普遍的工况，此时谐波功率如式(1)所示，PCC 点总功率 $P_{pcc} = P_1 - \alpha_s P_{hs} + \alpha_c P_{hc}$ 。此时非线性用户既因吸收谐波污染而获得了奖励，又因向系统注入谐波污染而受到了惩罚。

计量结果分析表明：基于谐波功率分解的奖惩性电能计量方法对用户产生和吸收的谐波功率分别进行惩罚和奖励，且考虑了 PCC 处谐波功率的分解，能够合理地计量各种工况下的谐波功率。

2 公共连接点谐波功率分解方法

求取系统谐波功率和用户谐波功率是基于谐波功率分解的奖惩性计量方法实现的关键，然而实际工程中仅能通过采样得到 PCC 点谐波电压和电流，无法直接得到谐波功率分量。为了解决这一问题，本文提出一种基于谐波电压、电流采样数据的奖惩性电能计量实现方法：首先根据采样数据采用复线性最小二乘法估算谐波等值电路参数，然后通过谐波功率分解求取系统谐波功率和用户谐波功率，基于奖惩性计量模型即可得到奖惩性谐波功率。

2.1 谐波等值电路参数估算

h 次谐波等值电路如图 1 所示，其中 \dot{U}_s 为系统侧等值谐波电压源， \dot{I}_c 为用户侧等值谐波电流源， Z_s 、 Z_c 分别为系统侧和用户侧等值谐波阻抗， \dot{U}_{pcc} 、

\dot{I}_{pcc} 分别为 PCC 点谐波电压、谐波电流。

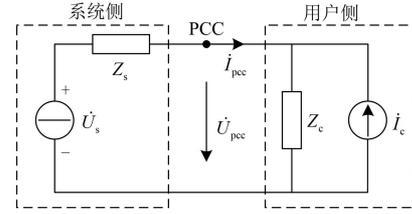


图 1 谐波等值电路

Fig. 1 Harmonic equivalent circuit

对于谐波等值电路的系统侧，根据基尔霍夫电压定律，列写相量形式的 KVL 方程如下：

$$\dot{U}_{pcc} = \dot{U}_s - \dot{I}_{pcc} Z_s \quad (2)$$

从式(2)可以看出：谐波电压 \dot{U}_{pcc} 与谐波电流 \dot{I}_{pcc} 呈线性关系^[10-12]，可通过一组谐波电压、电流的采样值采用回归分析求取系统谐波电压 \dot{U}_s 和谐波阻抗 Z_s 。目前广泛采用二元线性回归法求解回归系数，将谐波电压相量、电流相量的实部和虚部分别进行线性回归分析，因此所得的回归系数不是原问题真正的最小二乘解。为了克服以上不足，本文基于复线性最小二乘法估算系统谐波电压和谐波阻抗。

假设有 n 组采样值 $\dot{U}_{pcc}(i)$ 和 $\dot{I}_{pcc}(i)$ ($i=1,2,\dots,n$)，代入式(2)并表示为矩阵形式，有：

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (3)$$

式中：

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{pcc}(1) \\ \dot{U}_{pcc}(2) \\ \vdots \\ \dot{U}_{pcc}(n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -\dot{I}_{pcc}(1) \\ 1 & -\dot{I}_{pcc}(2) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\dot{I}_{pcc}(n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \dot{U}_s \\ Z_s \end{bmatrix}$$

对于形如式(3)的复线性方程，其复最小二乘解为

$$\mathbf{x} = (\overline{\mathbf{A}}\mathbf{A})^{-1} \overline{\mathbf{A}}\mathbf{y} \quad (4)$$

其中 $\overline{\mathbf{A}}$ 表示 \mathbf{A} 的共轭转置运算。由式(4)计算得到相量 \mathbf{x} ，即得到系统谐波电压 \dot{U}_s 和等值谐波阻抗 Z_s 。

同理，对于谐波等值电路的用户侧，根据基尔霍夫电流定律，列写相量形式的 KCL 方程如下：

$$\dot{I}_{pcc} = -\dot{I}_c + \dot{U}_{pcc} Y_c \quad (5)$$

基于复线性最小二乘法对式(5)所示的线性方程，计算其复最小二乘解即可得到用户谐波电流 \dot{I}_c 和等效谐波导纳 Y_c ，取 Y_c 的倒数即可得到用户谐波

阻抗 Z_c 。

2.2 谐波功率分解

谐波等值电路中系统谐波电压源 \dot{U}_s 单独作用时分电路 PCC 点谐波电压 \dot{U}_{spcc} 、谐波电流 \dot{i}_{spcc} 为

$$\dot{U}_{spcc} = \frac{\dot{U}_s Z_c}{Z_s + Z_c} \quad \dot{i}_{spcc} = \frac{\dot{U}_s}{Z_s + Z_c} \quad (6)$$

用户谐波电流源 \dot{i}_c 单独作用时分电路 PCC 点谐波电压 \dot{U}_{cpcc} 、谐波电流 \dot{i}_{cpcc} 为

$$\dot{U}_{cpcc} = \frac{\dot{i}_c Z_c Z_s}{Z_s + Z_c} \quad \dot{i}_{cpcc} = -\frac{\dot{i}_c Z_c}{Z_s + Z_c} \quad (7)$$

根据叠加定理, PCC 点谐波电压 \dot{U}_{pcc} 、谐波电流 \dot{i}_{pcc} 为

$$\dot{U}_{pcc} = \dot{U}_{spcc} + \dot{U}_{cpcc} \quad (8)$$

$$\dot{i}_{pcc} = \dot{i}_{spcc} + \dot{i}_{cpcc} \quad (9)$$

为了求取系统谐波功率和用户谐波功率, 必须对 PCC 点谐波功率进行分解, 且分解结果应满足叠加定理, 即系统谐波功率与用户谐波功率之和等于 PCC 点谐波功率。由于功率是电压和电流的乘积, 按照单个电源单独作用时分电路计算所得的谐波功率不满足叠加定理^[13-15]。接下来根据电路的基本理论提出一种满足叠加定理的谐波功率分解方法。

将式(9)代入有功功率的定义, 可得到 PCC 点谐波功率为

$$P_{hf} = \text{Re}[\dot{U}_{pcc} \dot{i}_{pcc}^*] = \text{Re}[\dot{U}_{pcc} \dot{i}_{spcc}^*] + \text{Re}[\dot{U}_{pcc} \dot{i}_{cpcc}^*] = P_{hs} + P_{hc} \quad (10)$$

由式(10)可得系统谐波功率、用户谐波功率的定义如下:

$$P_{hs} = \text{Re}[\dot{U}_{pcc} \dot{i}_{spcc}^*] = \text{Re}[\dot{U}_{spcc} \dot{i}_{spcc}^*] + \text{Re}[\dot{U}_{cpcc} \dot{i}_{spcc}^*] \quad (11)$$

$$P_{hc} = \text{Re}[\dot{U}_{pcc} \dot{i}_{cpcc}^*] = \text{Re}[\dot{U}_{spcc} \dot{i}_{cpcc}^*] + \text{Re}[\dot{U}_{cpcc} \dot{i}_{cpcc}^*] \quad (12)$$

由式(10)可知: (1) 采用所提出的谐波功率分解方法可将 PCC 点谐波功率 P_{hf} 分解为系统谐波功率 P_{hs} 和用户谐波功率 P_{hc} , 且分解结果满足叠加定理。(2) P_{hs} 、 P_{hc} 等于 PCC 点电压与相应电流分量共轭值乘积的实部, 需注意此时谐波功率的定义不同于传统意义上功率的定义, 而是将传统意义上功率分量和交叉项功率分量两部分进行叠加后, 得到了具有实际意义的功率概念。

2.3 奖惩性谐波电能计量实现流程

奖惩性谐波电能计量方法的主要步骤如下:

(1) 采样得到 PCC 点各次谐波电压和电流; (2) 设置谐波次数初始值 $h=2$; (3) 基于采样数据利用复线性最小二乘法估算谐波等值电路参数; (4) 根据谐波等值电路参数采用 2.2 节提出的谐波功率分解方法计算系统谐波功率 P_{sh} 和用户谐波功率 P_{ch} ; (5) 重复步骤(3)和(4)直到 h 达到计量精度所要求的最高次数; (6) 将步骤(4)计算得到的各次系统谐波功率 P_{sh} 和用户谐波功率 P_{ch} 代入式(1)即得到 PCC 点奖惩谐波功率 P_h 。

3 算例分析

3.1 算例简介

应用奖惩性谐波电能计量方法对如图 2 所示的 IEEE14 节点标准测试系统进行仿真计算, 该测试系统由 2 台发电机、3 台同步调相机、14 条母线、15 条输电线路和 3 台变压器组成。基于 PSCAD/EMTDC 建立该系统的仿真模型, 建模中将变压器等值为阻抗支路, 发电机和同步调相机等值为次暂态电抗, 输电线路以 π 型等值电路表示, 且考虑长距离输电线路对地电容。

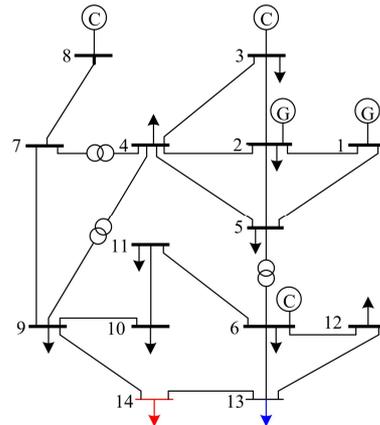


图 2 IEEE14 节点测试系统

Fig. 2 IEEE 14-bus test system

假定母线 14 为关注的公共连接点, 在母线 14 处接入谐波电流源 HS14, 通过改变谐波源参数以模拟线性或非线性用户, 在母线 13 处接入谐波电流源 HS13 以模拟 PCC 点系统侧背景谐波。以 5 次谐波为例仿真分析 PCC 点谐波功率。

谐波源 HS13 的 5 次谐波电流曲线采用文献[16]的经典曲线(如图 3 所示), 对谐波电流曲线进行采样, 每 3 s 1 个采样点, 整个时间段内(一天)共得到 28 800 个采样点。

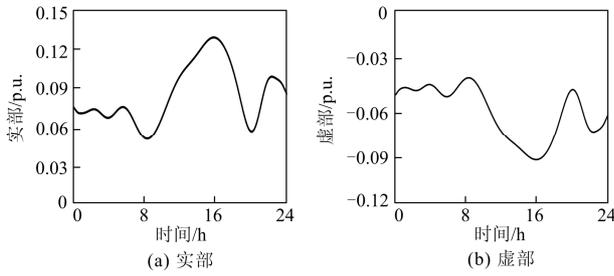


图 3 5次谐波电流
Fig. 3 5th harmonic current

3.2 仿真分析

设定谐波源 HS14 的 5 次谐波电流幅值为 0.2 p.u., 初始相角为 -90° , 仿真计算 PCC 处 5 次谐波相电压和用户注入母线 14 的谐波电流有效值, 结果如图 4、图 5 所示。

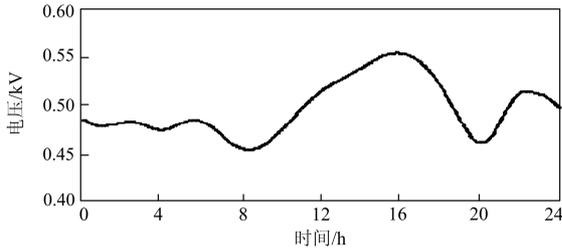


图 4 PCC 点谐波电压有效值
Fig. 4 5th harmonic voltage RMS at PCC

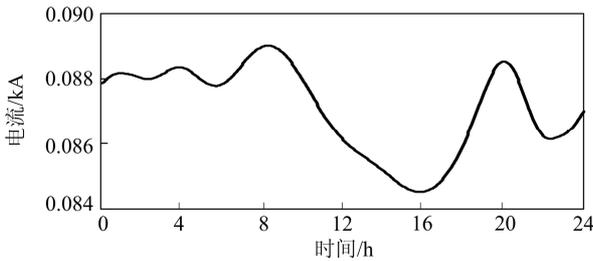


图 5 用户注入 PCC 的谐波电流有效值
Fig. 5 Harmonic current RMS injected by the user

由图 4、图 5 可以看出, 整个时间段内 PCC 点谐波电压、电流发生较大变化, 但对于较短的测量时段可认为系统谐波电压和系统谐波阻抗基本保持不变, 因此可将测量数据划分为若干段分别进行分析。把 PCC 点谐波电压和电流数据分为 1 440 段, 每段包含 20 组数据, 对每段数据分别采用复线性最小二乘法估算系统谐波电压、系统谐波阻抗、用户谐波电流和用户谐波阻抗等参数, 估算结果平均值如表 1 所示。表中谐波等值电路参数的估算值与真实值非常接近, 误差均小于 0.1%。

表 1 谐波等值电路参数估算结果

Table 1 Estimated results of harmonic equivalent circuit parameters

仿真参数	估算值	真实值
$i_{c5} / \text{p.u.}$	$0.201 \angle 0^\circ$	$0.2 \angle 0^\circ$
z_{u5} / Ω	$4.2047 \angle 73.682^\circ$	$4.2053 \angle 73.679^\circ$
z_{s5} / Ω	$22.6420 \angle 3.838^\circ$	$22.6431 \angle 3.839^\circ$

根据等值电路参数估算结果采用所提出的功率分解方法计算系统谐波功率 P_{hs} 和用户谐波功率 P_{hc} , 计算结果如图 6 所示。把 P_{hs} 、 P_{hc} 代入式(1)即可得到奖惩性谐波功率 P_h , 其中假定奖励系数 $\alpha_s = 1$, 惩罚系数 $\alpha_c = 2$, 计算结果如图 7 所示。为了对比分析全波计量和奖惩性计量结果的差异, 图中给出了采用全波计量方法时 PCC 点谐波功率 P_{hf} 。

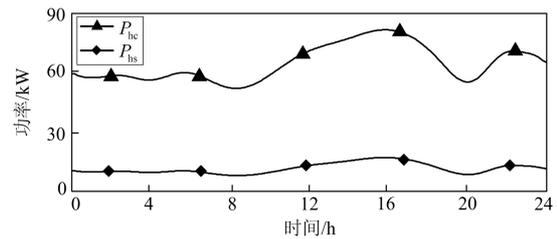


图 6 系统谐波功率和用户谐波功率
Fig. 6 User harmonic power and network harmonic power

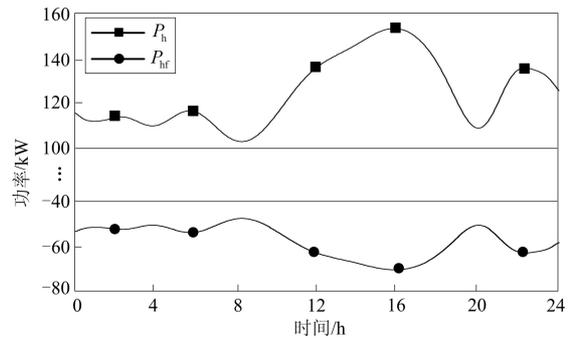


图 7 PCC 点谐波功率
Fig. 7 Harmonic power at PCC

设定谐波源 HS14 的 5 次谐波电流幅值为 0, 采用奖惩性谐波电能计量方法仿真计算 PCC 点谐波功率, 计算结果如图 8 所示。

由计算结果可以看出: (1) PCC 点谐波功率 P_{hf} 被分解为系统谐波功率 P_{hs} 和用户谐波功率 P_{hc} , 且分解结果满足叠加定理, 验证了该谐波功率分解方法的有效性。(2) $i_c = 0$ p.u. 时, 用户为线性负荷, 通过计算得到 $P_{hc} = 0$, 奖惩性谐波功率 $P_h = -P_{hs} < 0$,

故 PCC 点总功率 $P_{\text{pcc}} = P_1 + P_h < P_1$ 。而采用全波计量方法时, 谐波功率 $P_h = P_{\text{hs}} > 0$, 故 $P_{\text{pcc}} = P_1 + P_{\text{hf}} > P_1$ 。(3) $\dot{I}_c = 0.2 \angle -90^\circ$ p.u. 时, 通过计算得到 $P_{\text{hs}} < P_{\text{hc}}$, 奖惩性谐波功率 $P_h = 2P_{\text{hc}} - P_{\text{hs}} > 0$, 故 $P_{\text{pcc}} = P_1 + P_h > P_1$ 。而采用全波计量方法时, $P_{\text{hf}} = P_{\text{hs}} - P_{\text{hc}} < 0$, 故 $P_{\text{pcc}} = P_1 + P_{\text{hf}} < P_1$ 。对比分析结果可知基于谐波功率分解的奖惩性电能计量结果更合理, 可避免出现非线性用户产生谐波污染却被少计电量、线性用户吸收谐波污染却被多计电量的不合理现象。

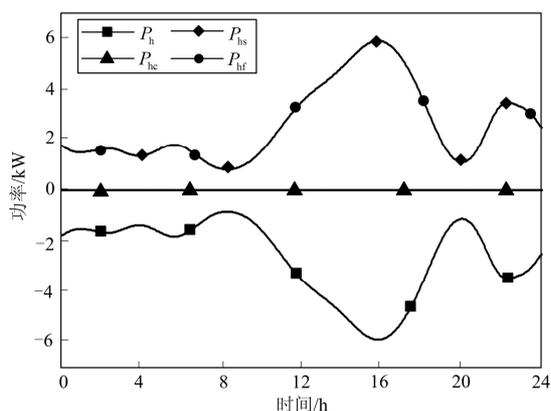


图 8 PCC 点谐波功率($\dot{I}_c=0$ p.u.)

Fig. 8 Harmonic power at PCC ($\dot{I}_c=0$ p.u.)

4 结论

本文提出了一种基于谐波功率分解的奖惩性谐波电能计量方法及其实现方法, 对用户产生和吸收谐波功率分别进行惩罚和奖励, 从而实现谐波电能的合理计量。理论分析与算例验证表明, 本文所提出的方法具有计量结果合理、易于工程实现等优点。接下来还需在在奖惩系数取值、谐波等值电路参数估计等方面开展进一步研究。

参考文献

[1] 肖湘宁. 新一代电网中多源多变换复杂交直流系统的基础问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 1-14.
XIAO Xiangning. Basic problems of the new complex ac-dc power grid with multiple energy resources and multiple conversions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 1-14.

[2] 张航, 毛欣, 王佳佳, 等. 单相整流负荷谐波功率需求建模分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 8-14.
ZHANG Hang, MAO Xin, WANG Jiajia, et al. Modeling and analysis for harmonic power demand of single-phase

rectification loads[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 8-14.

[3] 刘文业, 罗隆福, 李勇, 等. 基于感应滤波的工业整流系统潜在谐波放大及防治措施[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 304-316.
LIU Wenyue, LUO Longfu, LI Yong, et al. Potential harmonic amplification and its prevention of industrial rectifier system based on inductive filtering method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 304-316.

[4] 刘书铭, 李琼林, 陈栋新, 等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 150-155.
LIU Shuming, LI Qionglin, CHEN Dongxin, et al. The power quality characteristics study of nonlinear power user in medium-high voltage distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 150-155.

[5] 赵贺, 林海雪. 电网中非线性负荷谐波功率方向的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 47-50.
ZHAO He, LIN Haixue. Determining harmonic power flow direction of nonlinear load in power network[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 47-50.

[6] 罗亚桥, 胡翀. 谐波对电能计量的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 130-132.
LUO Yaqiao, HU Chong. Influence of harmonics on power energy measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 130-132.

[7] XU Wilsun, LIU Yilu. A method for determining customer and utility harmonic contribution at the point of common coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 3-16.

[8] 孙鸣, 张纬, 章书剑, 等. 基于等值功率因数法的含谐波源支路的电能量计量方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 182-185.
SUN Ming, ZHANG Wei, ZHANG Shujian, et al. The study of energy metering containing harmonic source branch based on equivalent power factor method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 182-185.

[9] ALESSANDRO F, MARCO P, SIMONA S. A metrological comparison between different methods for harmonic pollution metering[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(11): 2972-2981.

[10] 黄舜, 徐永海. 基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗

- 与谐波发射水平的估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 93-97.
- HUANG Shun, XU Yonghai. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on partial least-squares regression method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 93-97.
- [11] 贾秀芳, 华回春, 曹东升, 等. 基于复线性最小二乘法的谐波责任定量划分[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 149-155.
- JIA Xiufang, HUA Huichun, CAO Dongsheng, et al. Determining harmonic contributions based on complex least squares method[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 149-155.
- [12] 牛胜锁, 张达, 梁志瑞, 等. 基于抗差总体最小二乘法的电力系统谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 106-111.
- NIU Shengsuo, ZHANG Da, LIANG Zhirui, et al. Power system harmonic state estimation based on robust total least squares[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 106-111.
- [13] 肖湘宁, 罗超, 陶顺. 电气系统功率理论的发展与面临的挑战[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 1-10.
- XIAO Xiangning, LUO Chao, TAO Shun. Development and challenges of power theory in electrical power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 1-10.
- [14] 冯林桥, 许文玉, 邓昌安, 等. 共轭电流全损耗功率分量定义及其叠加原理[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 65-69.
- FENG Linqiao, XU Wenyu, DENG Changan, et al. Definition of conjugate current whole power loss component and their superposition theorem[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 65-69.
- [15] 艾永乐, 郑建云. 基于谐波有功功率贡献量的主谐波源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 16-22.
- AI Yongle, ZHENG Jianyun. Localization of the main harmonic source based on the harmonic active power contributions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 16-22.
- [16] GURSOY E, NIEBUR D. Harmonic load identification using complex independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 285-292.

收稿日期: 2015-03-11; 修回日期: 2015-05-30

作者简介:

代双寅(1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: daishuangyin@163.com

杨君超(1987-), 女, 工程师, 研究方向为电力系统运行分析;

李琼林(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电能质量分析与控制。

(编辑 张爱琴)