

基于谐波有功功率贡献量的主谐波源定位

艾永乐, 郑建云

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 为了准确辨识和定位主谐波源, 提出了一种基于谐波有功功率贡献量的方法。该方法综合考虑谐波电压和谐波电流的影响, 不仅能够定量地划分各自的谐波责任, 准确地判断出主谐波源的位置, 而且克服了使用谐波电压贡献量或谐波电流贡献量进行主谐波源定位时存在的局限性。首先推导了系统侧和用户侧单独作用时对 PCC 处谐波有功功率贡献量公式, 然后推广到多谐波源系统中, 并建立了通用的数学模型, 从理论上实现了对主谐波源的定位。最后以两个非线性用户系统为例进行 Matlab/Simulink 仿真分析, 仿真结果与理论分析相一致, 验证了该方法的正确性与有效性。

关键词: 电能质量; 谐波源; 谐波有功功率贡献量; 责任划分; 主谐波源定位

Localization of the main harmonic source based on the harmonic active power contributions

AI Yongle, ZHENG Jianyun

(College of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to accurately identify and locate the main harmonic source, this paper proposes a method based on the active power harmonic contributions. Synthetically considering the influence of harmonic voltage and harmonic current, the method can quantitatively divide their harmonic responsibility and accurately determine the position of the main harmonic source. And it also overcomes the limitations in the main harmonic source localization by using the harmonic current or harmonic voltage contributions. Firstly, the calculation equation of the harmonic active power contributions on PCC which are from the system and the user side alone are deduced, then extended to the multi-harmonic source system. A general mathematical model is constructed, with which the position of the main harmonic source can be located theoretically. Finally, a simulation model with two nonlinear users as a research object is built and simulated in Matlab/Simulink. The simulation results are consistent with the theoretical analysis, and it verifies the correctness and validity of the method.

Key words: power quality; harmonic sources; harmonic active power contributions; responsibilities division; main harmonic source localization

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0016-07

0 引言

随着电力电子技术的迅速发展, 工业生产中的大功率换流设备、电弧炉、电气化铁路等非线性负荷向电网注入大量谐波电流, 导致电压发生了严重畸变, 影响电网和其他用电设备的正常工作^[1-6]。为了提高电能质量, 就需要对谐波进行治理, 但由于受测试技术条件的限制和对谐波源特性认识的不足, 往往会出现谐波治理效果不理想的现象, 其主

要原因是主谐波源位置没有确定, 仅凭谐波电流超标, 就在母线侧安装滤波装置必然具有盲动性。因此, 寻找主谐波源是治理谐波的关键。

谐波源定位实质上是通过测量公共连接点(PCC)的电压和电流, 对所测数据采用相应的算法判定系统侧和用户侧谁是主谐波源。若系统侧为主谐波源, 则要承担主要谐波责任; 反之, 则用户侧要负主要谐波责任^[7]。目前使用最广泛的主谐波源辨识方法是有功功率方向法, 根据谐波有功功率的方向来定位主谐波源, 该方法简单直观、易于实现。然而, 该方法受 PCC 两侧电压相角差的影响比较大, 当相角差在一定范围时, 该方法失效^[8]。文献

[9]提出了无功功率定位法, 无功功率的方向能反映系统侧和用户侧谐波电压源的谐波发射水平, 即可通过无功功率方向判断两侧谐波源的相对大小, 从而定位主谐波源。但是该方法受 Q 的影响, 其结果准确度一般仅为 50%。文献[10-12]提出了根据负荷参数 R 与 L 随时间的变化规律是否呈现线性来辨识谐波源的方法, 但该方法只能从定性上说明负荷中是否含有谐波源, 不能定量地得出谐波含量的大小。文献[13]提出了采用 QR-RLS 算法提取各次谐波电流以及它们之间的相位差, 从而求出各谐波支路单独产生的谐波电流, 并在此基础上分析主谐波源的位置。该方法简单实用, 易于实现, 但没有考虑谐波电压的影响。文献[14]提出了一种基于电能质量数据交换下的谐波污染责任定量估计算法, 选择谐波电压作为衡量谐波污染责任的指标来确定主谐波源。该方法计算简便, 易于工程应用, 适用于目前电能质量检测平台, 但没有考虑谐波电流的影响。文献[15-16]提出了一种基于谐波电流矢量的方法来估计系统侧和用户侧的谐波电压和谐波电流贡献量来划分各自的谐波责任, 从而找出主谐波源。该方法虽然计算简单, 但应用谐波电流或谐波电压这两个衡量谐波污染责任的指标来确定主谐波源, 得出的结论有时会出现矛盾。

综合考虑谐波电流和谐波电压的影响, 本文提出谐波有功功率贡献量来定位主谐波源。与谐波电流贡献量或谐波电压贡献量进行主谐波源定位相比, 该方法更为合理、可靠。

1 谐波有功功率贡献量

在电力系统中, 系统和用户通过公共连接点 (PCC) 进行能量交换。在分析用户侧产生的谐波对系统造成的影响或系统中已经存在的谐波对用户侧的影响, 只有通过获得的 PCC 处的电流、电压信息进行计算、处理与分析, 才能作出正确的判断。在谐波源定位时, 对于某一次频率的谐波, 要判断主谐波源的位置, 一般在 PCC 处将系统分成两个部分: A 侧和 B 侧, 如图 1 所示。因此, 谐波源定位的问题就转化为对 PCC 处谐波贡献量大小的判断。



图 1 谐波源定位的等效模型

Fig. 1 Equivalent model of harmonic source location

根据诺顿等效电路原理, 将系统和用户都等效为谐波电流源和谐波阻抗的并联, 如图 2 所示。 I_s 和 I_c 分别为系统侧和用户侧的谐波电流源; Z_s 和 Z_c 分别为系统侧和用户侧的谐波阻抗。 I_{PCC} 和 V_{PCC} 分别为公共连接点处的谐波电流和谐波电压。

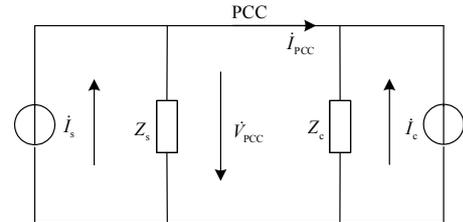


图 2 谐波分析的诺顿等效电路

Fig. 2 Norton equivalent circuit for harmonic analysis

由图 2 可得

$$\dot{I}_s = \frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_s} + \dot{I}_{PCC} \quad (1)$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_c} - \dot{I}_{PCC} \quad (2)$$

利用叠加定理, 可以将系统分解为如图 3 所示的两个等效电路。每个谐波源单独作用下对 PCC 处产生的谐波贡献量, 就是该谐波源实际应承担的谐波污染责任量。

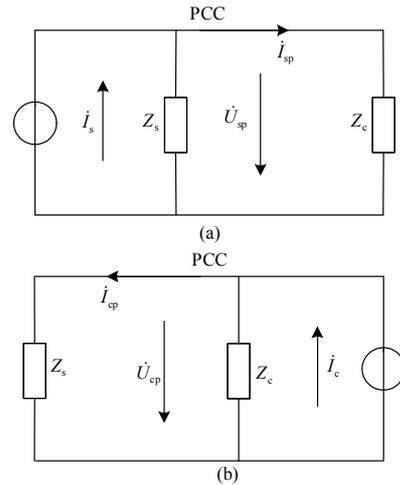


图 3 分解后的诺顿等效电路

Fig. 3 Decomposed Norton equivalent circuit

由图 3 可得, 系统侧和用户侧的谐波源单独作用时在 PCC 处的谐波电流贡献量 I_{sp} 、 I_{cp} 分别为

$$\dot{I}_{sp} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_c} \cdot \dot{I}_s = \frac{Z_s}{Z_s + Z_c} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_s} + \dot{I}_{PCC} \right) \quad (3)$$

$$\dot{I}_{cp} = \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} \cdot \dot{I}_c = \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_c} - \dot{I}_{PCC} \right) \quad (4)$$

同理，系统侧和用户侧的谐波源单独作用时在 PCC 处的谐波电压贡献量 U_{sp} 、 U_{cp} 分别为

$$\dot{U}_{sp} = \frac{Z_s \cdot Z_c}{Z_s + Z_c} \cdot \dot{i}_s = \frac{Z_s \cdot Z_c}{Z_s + Z_c} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_s} + \dot{i}_{PCC} \right) \quad (5)$$

$$\dot{U}_{cp} = \frac{Z_c \cdot Z_s}{Z_s + Z_c} \cdot \dot{i}_c = \frac{Z_c \cdot Z_s}{Z_s + Z_c} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_c} - \dot{i}_{PCC} \right) \quad (6)$$

系统侧和用户侧的谐波阻抗可以根据偏最小二乘回归方法估计得到^[17]。

若采用谐波电压贡献量来衡量谐波污染，系统侧承担主要谐波责任的充分必要条件是 $I_s > I_c$ ；而采用谐波电流贡献量来衡量谐波污染，系统侧承担主要谐波责任的充分必要条件是 $|Z_s| I_s > |Z_c| I_c$ ^[14]。因此，单独采用谐波电流贡献量或谐波电压贡献量来进行主谐波源定位，会出现以下两类情况：

(1) 当 $|\dot{i}_{sp}| > |\dot{i}_{cp}|$ 、 $|\dot{U}_{sp}| > |\dot{U}_{cp}|$ 时，系统侧的谐波电压和谐波电流的责任都大，说明系统侧为主谐波源；当 $|\dot{i}_{sp}| < |\dot{i}_{cp}|$ 、 $|\dot{U}_{sp}| < |\dot{U}_{cp}|$ 时，用户侧的谐波电压和谐波电流的责任都大，说明用户侧为主谐波源。

(2) 当 $|\dot{i}_{sp}| > |\dot{i}_{cp}|$ 、 $|\dot{U}_{sp}| < |\dot{U}_{cp}|$ 或 $|\dot{i}_{sp}| < |\dot{i}_{cp}|$ 、 $|\dot{U}_{sp}| > |\dot{U}_{cp}|$ 时，若采用谐波电流贡献量与谐波电压贡献量确定主谐波源的位置将无法判定。

鉴于用电量都是用千瓦时计量的，再综合考虑谐波电压和谐波电流的影响，本文采用谐波有功功率贡献量来定位主谐波源，可以使判断的结果更加准确。根据式(3)~式(6)，可以求出系统侧和用户侧的谐波源单独作用时在 PCC 处的有功功率贡献量 P_{sp} 、 P_{cp} ，分别如下式所示。

$$P_{sp} = \text{Re}(\dot{U}_{sp} \dot{i}_{sp}^*) = \frac{|\dot{V}_{PCC} + \dot{i}_{PCC} \cdot Z_s|^2}{|Z_s + Z_c|^2} \cdot |Z_c| \cos \theta_{Z_c} \quad (7)$$

$$P_{cp} = \text{Re}(\dot{U}_{cp} \dot{i}_{cp}^*) = \frac{|\dot{V}_{PCC} - \dot{i}_{PCC} \cdot Z_c|^2}{|Z_s + Z_c|^2} \cdot |Z_s| \cos \theta_{Z_s} \quad (8)$$

式中， θ_{Z_s} 和 θ_{Z_c} 分别为 Z_s 和 Z_c 的相角。

根据式(7)和式(8)，通过判断比较系统侧和用户侧单独作用时在 PCC 处的有功功率贡献量的大小，便可以判断出主谐波源的位置。其判断依据如下：

①当 $P_{sp} > P_{cp}$ 时，说明系统侧的谐波对 PCC 处的影响大，主谐波源位于系统侧；

②当 $P_{sp} < P_{cp}$ 时，说明用户侧的谐波对 PCC 处的影响大，主谐波源位于用户侧；

③当 $P_{sp} = P_{cp}$ 时，说明两侧的谐波对 PCC 处的影响相当。

2 谐波有功功率贡献量在多谐波源系统中的推导

随着电力电子技术的发展，电网中的非线性负荷越来越多。因此，电网中不可能仅仅存在一个谐波源，而是多个谐波源并存。为了更好地了解电网中各个谐波源的分布情况及其谐波责任，就要对每个谐波源的谐波贡献量进行量化。下面对多谐波源系统进行分析，其等效电路如图 4 所示。

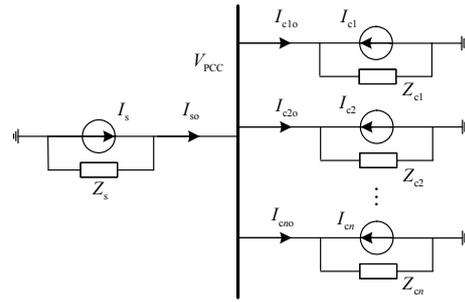


图 4 多谐波源系统的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit with multiple harmonic sources

其中 V_{PCC} 是母线电压， I_{so} 、 I_{c1o} 、 I_{c2o} 、 \dots 、 I_{cno} 分别为各个支路电流。 I_s 是系统侧的谐波电流源， Z_s 是系统侧的等效谐波阻抗。 I_{c1} 、 I_{c2} 、 \dots 、 I_{cn} 为用户侧的谐波电流源， Z_{c1} 、 Z_{c2} 、 \dots 、 Z_{cn} 为用户侧的等效谐波阻抗。

由图 4 可得，用户侧总的等效谐波阻抗为

$$Z_{eq} = \frac{Z_{c1} \times Z_{c2} \times \dots \times Z_{cn}}{\prod_{k=c1-cn, k \neq cn} Z_k + \prod_{k=c1-cn, k \neq c(n-1)} Z_k + \dots + \prod_{k=c1-cn, k \neq c2} Z_k + \prod_{k=c1-cn, k \neq c1} Z_k} \quad (9)$$

式中， $\prod_{k=c1-cn, k \neq cn} Z_k$ 表示从 Z_{c1} 连乘到 Z_{cn} ，但不包括 Z_{cn} ^[18]。

则系统侧和用户侧的谐波源单独作用时在 PCC 处的谐波电流和谐波电压贡献量分别为

$$\begin{cases} \dot{i}_{sp} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_{eq}} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_s} + \dot{i}_{so} \right) \\ \dot{i}_{c1p} = \frac{Z_{eq}}{Z_s + Z_{eq}} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_{c1}} - \dot{i}_{c1o} \right) \\ \vdots \\ \dot{i}_{cnp} = \frac{Z_{eq}}{Z_s + Z_{eq}} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_{cn}} - \dot{i}_{cno} \right) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{sp} = \frac{Z_s \cdot Z_{eq}}{Z_s + Z_{eq}} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_s} + \dot{i}_{so} \right) \\ \dot{U}_{clp} = \frac{Z_s \cdot Z_{eq}}{Z_s + Z_{eq}} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_{cl}} - \dot{i}_{cl0} \right) \\ \vdots \\ \dot{U}_{cnp} = \frac{Z_s \cdot Z_{eq}}{Z_s + Z_{eq}} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{PCC}}{Z_{cn}} - \dot{i}_{cno} \right) \end{cases} \quad (11)$$

根据式(10)和式(11)可以求出系统侧和用户侧的谐波源单独作用时在 PCC 点的谐波有功功率贡献量为

$$\begin{cases} P_{sp} = \frac{|\dot{V}_{PCC} + \dot{i}_{so} \cdot Z_s|^2}{|Z_s + Z_{eq}|^2} \cdot |Z_{eq}| \cos \theta_{Z_{eq}} \\ P_{clp} = \frac{|\dot{V}_{PCC} - \dot{i}_{cl0} \cdot Z_{eq}|^2}{|Z_s + Z_{eq}|^2} \cdot |Z_s| \cos \theta_{Z_s} \\ \vdots \\ P_{cnp} = \frac{|\dot{V}_{PCC} - \dot{i}_{cno} \cdot Z_{eq}|^2}{|Z_s + Z_{eq}|^2} \cdot |Z_s| \cos \theta_{Z_s} \end{cases} \quad (12)$$

式中, θ_{Z_s} 和 $\theta_{Z_{eq}}$ 分别为 Z_s 和 Z_{eq} 的相角。

因此, 式(12)可以作为在多谐波源系统中计算各个谐波源的谐波有功功率贡献量的通用公式。

3 Matlab/Simulink 仿真分析

基于图 4 的等效电路, 以两个非线性用户系统为例, 在 Matlab/Simulink 中搭建系统仿真实验模型, 如图 5 所示。

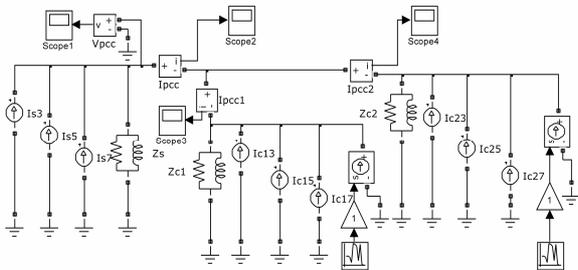


图 5 系统仿真实验模型

Fig. 5 System simulation model

其中, I_s 表示系统侧谐波源, I_{c1} 、 I_{c2} 分别表示用户 1 和用户 2 的谐波源, Z_s 表示系统侧阻抗, Z_{c1} 、 Z_{c2} 分别表示用户 1 和用户 2 的阻抗。Random Number 模块用来模拟用户侧的扰动, 来产生方差为 3、均值为 0 的均匀分布的随机数。

仿真电路中各次谐波电流源和谐波阻抗的参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

名称	系统侧	用户 1	用户 2
3 次谐波源/A	$80 \angle 30^\circ$	$200 \angle 30^\circ$	$120 \angle 30^\circ$
5 次谐波源/A	$100 \angle 50^\circ$	$40 \angle 50^\circ$	$150 \angle 50^\circ$
7 次谐波源/A	$200 \angle 45^\circ$	$130 \angle 45^\circ$	$50 \angle 45^\circ$
电阻/ Ω	5.23	85.76	34.58
电感/H	0.052	0.935	0.385

通过仿真, 对 PCC 处的电压和各支路的电流进行采样, 得到电压和电流测量数据, 利用 FFT 变换对采样数据进行分析, 得到 PCC 处各次谐波电压和谐波电流幅值和相位如表 2 所示。

表 2 PCC 点的谐波电压和谐波电流

Table 2 Harmonic voltage and harmonic current of the PCC

名称	3 次谐波	5 次谐波	7 次谐波
V_{PCC}/V	$1618.02 \angle 49.16^\circ$	$1576.93 \angle 41.02^\circ$	$1361.33 \angle 44.31^\circ$
I_{so}/A	$233.90 \angle -132.49^\circ$	$106.90 \angle -128.77^\circ$	$145.11 \angle -128.67^\circ$
I_{c10}/A	$81.19 \angle -128.51^\circ$	$22.35 \angle -119.88^\circ$	$134.29 \angle -129.05^\circ$
I_{c20}/A	$153.01 \angle -134.61^\circ$	$84.88 \angle -131.11^\circ$	$10.86 \angle -123.94^\circ$

根据所获得的谐波电流和电压数据, 按照图 6 所示流程图完成谐波电压、谐波电流和谐波有功功率贡献量的计算。计算结果如表 3、表 4 和表 5 所示。

表 3 各谐波源的谐波电压贡献量

Table 3 Harmonic voltage contribution of each harmonic source

名称	U_{sp}/V	U_{c1p}/V	U_{c2p}/V
3 次谐波	277.91+201.59j	240.02+355.66j	540.27+666.76j
5 次谐波	717.38+476.44j	102.19+138.61j	370.20+419.83j
7 次谐波	435.78+278.45j	392.92+513.40j	145.38+159.08j

表 4 各谐波源的谐波电流贡献量

Table 4 Harmonic current contribution of each harmonic source

名称	I_{sp}/A	I_{c1p}/A	I_{c2p}/A
3 次谐波	12.06+7.10j	53.15+63.10j	116.91+116.46j
5 次谐波	30.22+17.66j	21.24+25.25j	75.93+75.74j
7 次谐波	18.15+10.57j	79.62+94.73j	29.19+29.15j

由表 3 和表 4 可以看出, 对于 3 次谐波, $|U_{sp}| < |U_{c1p}| < |U_{c2p}|$, $|I_{sp}| < |I_{c1p}| < |I_{c2p}|$, 以谐波电压贡献量或谐波电流贡献量都可以准确判断出用户 2 是

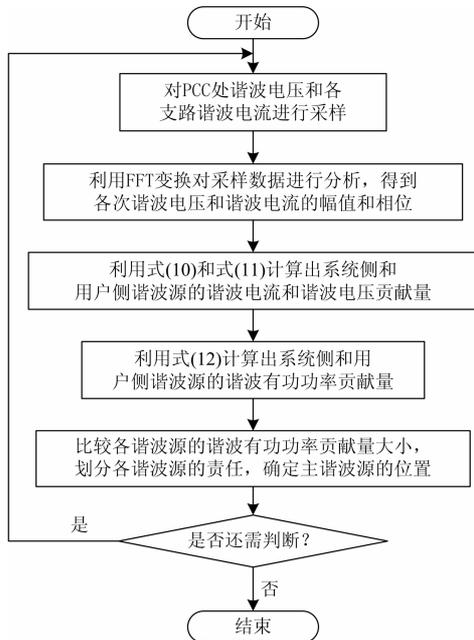


图 6 确定主谐波源的流程图

Fig. 6 Implementation procedure in determining the main harmonic source

主谐波源。但是，对于 5 次谐波， $|U_{c1p}| < |U_{c2p}| < |U_{sp}|$ ， $|I_{c1p}| < |I_{sp}| < |I_{c2p}|$ ，若以谐波电压贡献量来划分谐波责任，则系统侧为主谐波源，若以谐波电流贡献量来划分谐波责任，则用户 2 为主谐波源；同理，对于 7 次谐波， $|U_{c2p}| < |U_{sp}| < |U_{c1p}|$ ， $|I_{sp}| < |I_{c2p}| < |I_{c1p}|$ ，若以谐波电压贡献量来划分谐波责任，则系统侧承担的谐波责任要比用户 2 的多，若以谐波电流贡献量来划分谐波责任，则用户 2 承担的谐波责任要比系统侧多。此时，对于 5 次和 7 次谐波，利用谐波电压贡献量和谐波电流贡献量来定位主谐波源的结果将是不一致的。因此，需要采用谐波有功功率贡献量来定位主谐波源。

表 5 各谐波源的谐波有功功率贡献量

Table 5 Harmonic active power contribution of each harmonic source

名称	P_{sp}/W	P_{c1p}/W	P_{c2p}/W
3 次谐波	1 921.19	9 686.00	14 484.42
5 次谐波	13 268.57	1 329.88	3 690.75
7 次谐波	4 964.74	17 347.90	393.06

由表 5 可以看出，对于 3 次谐波， $P_{sp} < P_{c1p} < P_{c2p}$ ；则可以看见用户 2 承担的谐波责任应该最大，其次为用户 1，最小的是系统侧；同理，对于 5 次谐波， $P_{c1p} < P_{c2p} < P_{sp}$ ；则系统侧承担的谐波责任最大，其次为用户 2，最小的是用户 1；对于 7 次谐波，

$P_{c2p} < P_{sp} < P_{c1p}$ ；则用户 1 承担的谐波责任最大，其次是系统侧，最小的是用户 2。判断的结果与原先设置的主谐波源的位置相一致。由此可见，运用谐波有功功率不仅可以定量地划分各自的谐波责任，而且能够准确地判断出主谐波源的位置。

实际工程中，每一个谐波源注入电网的谐波电流都是随时间随机变化的，其幅值和相位都具有随机特性，因此本文对电网中各谐波源的谐波有功功率贡献量进行一段时间的统计分析(每 1 min 统计一次)，来提高该结论的可靠性，各次谐波有功功率贡献量统计结果如图 7 所示。

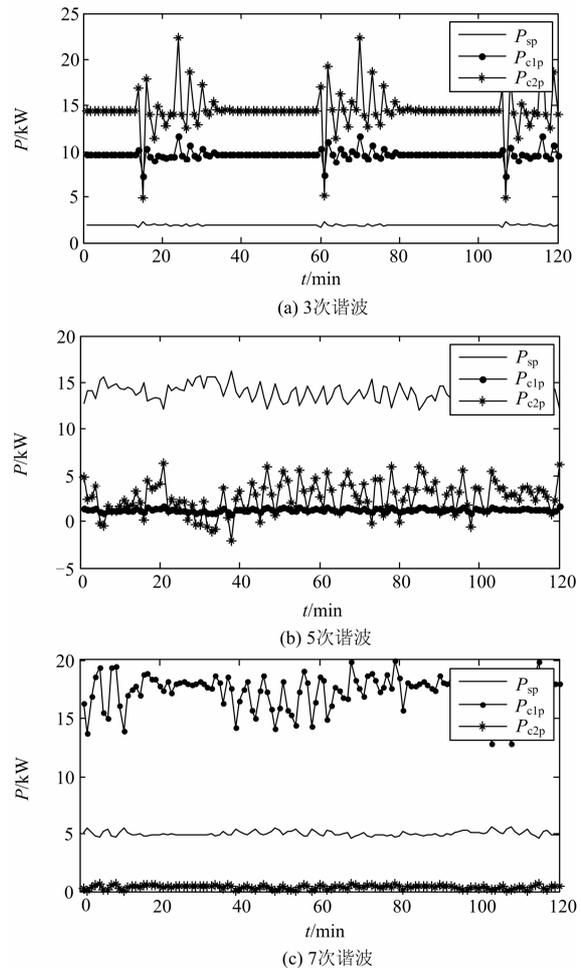


图 7 各次谐波有功功率贡献量的统计

Fig. 7 Statistics of active power contribution of each order harmonic

由图 7 中的各次谐波有功功率贡献量曲线可以看出，对于 3 次谐波，用户 2 的谐波有功功率贡献量维持在 14 kW，承担的谐波责任最大，其次为用户 1，最小的是系统侧；对于 5 次谐波，承担最大谐波责任的是系统侧，其谐波有功功率贡献量维持在 13 kW，而用户 2 的谐波有功功率虽然在某些时

刻低于用户 1, 但总体上还是比用户 1 的大; 对于 7 次谐波, 承担最大谐波责任的是用户 1, 其谐波有功功率贡献量维持在 17 kW, 其次是系统侧, 最小的是用户 2。运用统计法可以排除异常点产生不同结果的情况, 从而增强了判断的准确性与可靠性。

4 结论

本文通过理论分析谐波电压贡献量和谐波电流贡献量在进行主谐波源定位时存在的局限性, 提出使用谐波有功功率贡献量来定位主谐波源, 该方法比用谐波电压贡献量和谐波电流贡献量对谐波责任划分及主谐波源定位更加合理、可靠。然后以两个非线性用户系统为例进行仿真分析, 仿真结果与理论分析相一致, 验证了该方法的正确性。谐波有功功率贡献量法, 综合考虑了谐波电压和谐波电流的影响, 对谐波责任划分来说是一种正确、有效的手段, 并能为电力部门进行科学地定位主谐波源提供理论依据。

若使该方法在主谐波源定位中准确应用, 必须得到精确的谐波阻抗值, 谐波阻抗值越精确, 主谐波源定位就越准确。虽然目前一些方法能够较好地估计谐波阻抗, 但还是存在较大的误差。因此谐波阻抗的精确计算成为下一阶段的主要研究方向。

参考文献

- [1] 徐志强, 李冰, 周田华, 等. 基于模态分析的运动负荷牵引电网谐波谐振分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 76-80, 121.
XU Zhiqiang, LI Bing, ZHOU Tianhua, et al. Harmonic resonance assessment of traction system with moving load based on modal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 76-80, 121.
- [2] 宁志毫, 罗隆福, 李勇, 等. 大功率整流系统谐波功率特性及其对电能计量的影响和节能分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 248-255.
NING Zhihao, LUO Longfu, LI Yong, et al. Analysis of energy saving and harmonic power characteristics and its effects on electric energy measurement in high power rectifier system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 248-255.
- [3] 林建钦, 杜永宏. 电力系统谐波危害及防止对策[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(2): 28-31.
LIN Jianqin, DU Yonghong. Harm and countermeasure of harmonics in power system[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(2): 28-31.
- [4] 陈民武, 宫衍圣, 李群湛, 等. 电气化铁路电能质量评估及新型控制方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 141-147.
CHEN Minwu, GONG Yansheng, LI Qunzhan, et al. Assessment of power quality of electrified railway and the research on the new control scheme[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 141-147.
- [5] 史训涛, 蒋金良. 谐波对感应式无功电能表的电能计量影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 157-160.
SHI Xuntao, JIANG Jinliang. Harmonic influence on power measurement of induction reactive watt-hour meter[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2012, 24(6): 157-160.
- [6] 孙媛媛, 尹志明, 郑伟杰, 等. 晶闸管可控电抗器的谐波产生特性研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 267-273.
SUN Yuanyuan, YIN Zhiming, ZHENG Weijie, et al. Study of the harmonic producing characteristics of the thyristor controlled reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 267-273.
- [7] 周林, 张凤, 栗秋华. 配电网中谐波源定位方法综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 103-108.
ZHOU Lin, ZHANG Feng, LI Qiu-hua. Methods for localizing the harmonic source in power distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 103-108.
- [8] XU W, LIU X, LIU YL. An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination[J]. IEEE Transactions on PWRD, 2003, 18(1): 214-219.
- [9] LI C, XU W, TAYJASANANT T. A critical impedance based method for identifying harmonic sources[J]. IEEE Transactions on PWRD, 2004, 19(2): 671-678.
- [10] 龚华林, 肖先勇. 非线性度法在配电网谐波源探测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 30-34.
GONG Hualin, XIAO Xianyong. Application of non-linearity degree method in harmonic source detecting in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 30-34.
- [11] 蔡明, 唐昆明, 张太勤. 基于参数辨识方法的谐波源定位[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 134-138.
CAI Ming, TANG Kunming, ZHANG Taiqin. Harmonic source localization based on parameter identification[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 134-138.

- [12] LIU Yamei, GONG Hualin, XIAO Xianyong, et al. Harmonic source location at the point of common coupling based on the nonlinearity index of load[C] // Power and Energy Engineering Conference, March, 2009: 1-5.
- [13] 马宏忠, 徐刚, 宋树平, 等. 配电网中谐波电流责任划分定量分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 44-49.
MA Hongzhong, XU Gang, SONG Shuping, et al. Quantitative analysis of harmonic current responsibility in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 44-49.
- [14] 华回春, 贾秀芳, 曹东升, 等. 电能质量数据交换格式下的谐波责任估计[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 1-8.
HUA Huichun, JIA Xiufang, CAO Dongsheng, et al. Harmonic contribution estimation under power quality data interchange format[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 1-8.
- [15] BLAŽIĆ B, PFAJFAR T, PAPIĆ I. A modified harmonic current vector method for harmonic contribution determination[J]. IEEE Transactions on Power System Conference and Exposition, 2004, 3: 1470-1475.
- [16] PFAJFAR T, BLAŽIĆ B. Harmonic contributions evaluation with the harmonic current vector method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 425-433.
- [17] 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.
- [18] 许加柱, 庞丽忠, 张志文, 等. 多谐波源用户的谐波责任分摊的定量分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 38-42.
XU Jiazhu, PANG Lizhong, ZHANG Zhiwen, et al. Quantitative analysis for harmonic responsibility proration among multiple harmonic sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 38-42.

收稿日期: 2014-07-03

作者简介:

艾永乐(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事交流多相电机新颖控制策略研究和电能质量检测与提高研究; E-mail: aiyongle@hpu.edu.cn

郑建云(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统谐波分析与检测。E-mail: zhengjianyun@126.com

(编辑 魏小丽)