

# 含光伏发电系统的配电网谐波责任评定方法

王清亮<sup>1</sup>, 高 梅<sup>1</sup>, 梁佩佩<sup>1</sup>, 王雷刚<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054;  
2. 国网浙江永康市供电有限公司, 浙江 永康 321300)

**摘要:**高渗透率光伏发电使得公共电气连接点的谐波来源复杂化和背景谐波电压不可忽略。为了准确评估各用户与系统侧的谐波责任,提出了一种谐波电流解耦与责任评定方法。在分析谐波在公共电气连接点传播特性的基础上,采用次生背景谐波电压描述用户谐波源之间的相互作用;根据电流物理分量功率理论,从背景谐波电压和其他用户的谐波电流中正交解耦出本用户谐波发射电流。所述方法无需计算系统谐波阻抗,适用于光伏发电引起母线电压畸变的配电网谐波责任评定。  
**关键词:**光伏电源;电能质量;谐波分析;责任;背景谐波

DOI: 10.12067/ATEEE2006033      文章编号: 1003-3076(2020)11-0073-08      中图分类号: TM714.3

## 1 引言

大容量光伏发电通过换流器直接接入 10 kV 或 35 kV 母线,小容量光伏发电一般通过换流器就近接入线路或直接为用户供电。越来越多的用户采用电力电子型可控负载,使得配电网呈现出源-网-荷高度电力电子化的特征,在公共电气连接点(Point of Common Coupling, PCC)所引起的谐波问题日益严重和复杂化<sup>[1-3]</sup>。

PCC 处谐波是系统侧与各用户多谐波源共同作用的结果,依据“谁污染、谁治理”的原则,需首先在 PCC 处分离系统侧与用户侧各自发射的谐波电流,才能科学计算谐波治理装置的容量,实现考核奖励的客观公正。

高渗透率光伏发电对 PCC 点谐波责任评定提出了新挑战<sup>[4]</sup>:①谐波阻抗计算困难,谐波阻抗是谐波责任评定的重要参数,而光伏电源的高可控性使等效输出阻抗呈随机变动特征;②电力电子化特征致使系统短路容量变小,不满足电压源特性,基于诺顿等效电路的谐波责任区分模型不再适用;③系统侧背景谐波电压不可忽略,短路容量变小使得各谐波源在 PCC 点耦合性强,谐波责任区分困难。

目前,PCC 点谐波责任评定方法主要分为 3

类。①以谐波功率为责任指标<sup>[5,6]</sup>,包括谐波有功功率法、谐波无功功率法等,一般采用诺顿等效电路判定 PCC 点的主要谐波责任方,并不能确定另一侧是否也产生谐波,尤其是在 PCC 点两侧谐波贡献率接近时,会掩盖另一方的谐波责任。②以谐波阻抗为责任指标<sup>[7-9]</sup>,主要包括临界阻抗法、波动量法、回归分析法等,这类方法通过比较系统谐波阻抗与负载谐波阻抗的大小来判定主谐波源。以上 2 类方法在应用时需准确计算谐波阻抗,在谐波阻抗波动时该类方法误差较大,不适用于光伏发电渗透率高配电网。③非理想负载指标法<sup>[10,11]</sup>,包括负载畸变功率法、理想电流法等,该类方法通过负载偏离理想负载的程度判定谐波源,无需计算谐波阻抗,但忽略了用户侧谐波电流对 PCC 点谐波电压的影响,只能用于传统配电网的谐波责任评定。

目前谐波责任评定主要是区分系统侧和用户侧分别承担的责任,并没有区分 PCC 处各用户的谐波责任。在光伏发电高渗透率背景下,应将谐波评定延伸到各用户,才能真正实现责任明确。

本文从畸变电压作用下三相电路的功率现象出发,分析谐波在 PCC 点的传播特性,依据电流物理功率理论,将三相系统看作整体,提出了一种谐波电流解耦与责任评判方法。在谐波阻抗未知情况下,

收稿日期: 2020-06-16  
基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究项目(2017JM5138)  
作者简介: 王清亮(1969-),女,山西籍,教授,博士,研究方向为分布式发电的电能质量分析与控制;  
高 梅(1995-),女,河南籍,硕士研究生,研究方向为分布式新能源发电。

通过负载等效电导分离背景谐波电压和用户谐波电流,实现了各方谐波责任量化评定。

## 2 光伏电源谐波发射特性

逆变器将光伏阵列产生的直流电压转换为交流电压时,不可避免地产生了谐波。光伏电源谐波主要由逆变器调制过程和开关死区时间引起。

以双极性 SPWM 调制为例,逆变器调制过程产生的谐波电压  $u_{hh}(t)$  为<sup>[12]</sup>:

$$u_{hh}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} (-1)^{\frac{h}{2}} \left( \frac{4}{n\pi} \right) \sum_{m=2}^{\infty} 2J_0 \left( \frac{hD\pi}{2} \right) \cdot \sin \frac{m\pi}{3} \cos \left[ (h\omega_c \pm m\omega_r) t + m(\varphi - \frac{\pi}{3}) \right] \quad (1)$$

式中,  $\omega_c$  为载波角频率;  $\omega_r$  为调制波角频率;  $J_0$  为第一类贝塞尔函数;  $D$  为调制比;  $h$  为谐波次数;  $m=1, 2, 3, \dots$ ;  $\varphi$  为调制波初相角。

开关死区时间引起的谐波电压  $u_{lh}(t)$  为<sup>[12]</sup>:

$$u_{lh}(t) = \frac{8f_c t_d U_d}{h\pi} \sin[h(\omega t - \varphi)] \quad (2)$$

式中,  $f_c$  为载波频率;  $t_d$  为开关死区时间;  $U_d$  为逆变器直流侧电压;  $\omega$  为基波角频率。

调制产生的谐波频率为  $h\omega_c \pm m\omega_r$ , 由于  $\omega_c \gg \omega_r$ , 载波频率  $f_c$  一般为几万赫兹, 因此调制过程产生的谐波为高次谐波, 主要位于载波频率附近, 含量较低。而开关死区时间引起的谐波频率为基波的整数倍, 主要包括 5、7、11、13 等低次谐波, 含量较高。因此, 光伏电源的谐波主要以  $6k \pm 1$  次谐波为主。

## 3 谐波传播机理分析

分析谐波在配电网 PCC 处传播机理时, 有如下假设: ①由于逆变器控制策略的作用, 并网模式下的逆变器相当于受控电流源, 分析时将光伏电源等效为谐波电流源; ②光伏逆变器一般采用 LCL 型滤波器, 对高次谐波抑制能力强, 分析时只考虑由死区时间引起的谐波; ③逆变器采用重复控制或比例谐振控制可有效削弱电网谐波与逆变器谐波电流的交互影响, 分析时忽略光伏电源谐波与配电网谐波的交互作用。

含光伏发电的配电网拓扑如图 1 所示。在 PCC 处接有大容量的光伏电源, 用户及馈线上接有小容量光伏电源,  $b$  是产权分界点。根据光伏电源所有权不同, 将用户处光伏电源划归到负荷侧, 可与用户负荷合并, 本文称其为广义负荷, 馈线上和母线处的

光伏电源划归到系统侧, 则谐波电流网络等效为图 2 所示。图 2 中,  $Y_0$ 、 $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_i$  分别是系统、含光伏电源的用户 1、谐波用户 2、用户  $i$  的谐波导纳。

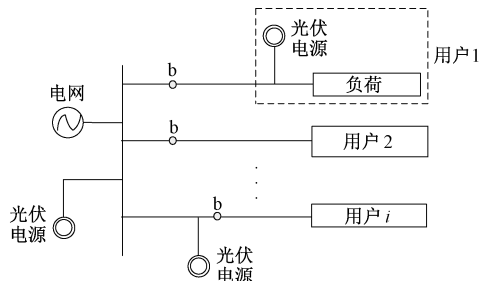


图 1 配电网结构

Fig.1 Structure of distribution network

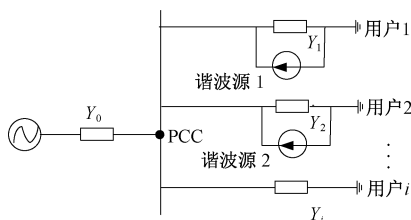


图 2 PCC 处谐波等效电路

Fig.2 Harmonic equivalent circuit in PCC

系统侧背景谐波电压会在各用户上产生谐波电流, 应用叠加定理分析用户 1 的谐波电流在 PCC 处的传播特性, 等效电路如图 3 所示。

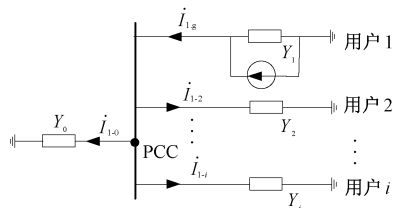


图 3 负荷谐波电流等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of load harmonic current

由于系统谐波阻抗远小于负荷谐波阻抗, 用户发射的谐波电流主要经 PCC 点流向系统侧。记用户 1 发射的谐波电流为  $\dot{i}_{1g}$ , 该谐波电流在 PCC 点产生谐波电压  $\dot{U}_{pcc.1}$  为:

$$\dot{U}_{pcc.1} = \dot{i}_{1g} / \sum_{i=0}^n Y_i \quad i \neq 1 \quad (3)$$

式中,  $\sum_{i=0}^n Y_i$  为其他回路谐波导纳与系统谐波导纳之和。

用户 1 的谐波电流  $\dot{U}_{pcc.1}$  通过对其他用户产生

影响,在第  $p$  个用户上产生的谐波电流为  $\dot{I}_{1-p}$ :

$$\dot{I}_{1-p} = \dot{U}_{pcc,1} Y_p = \frac{Y_p}{\sum_{i=0}^n Y_i} \dot{I}_{1,g} \quad i \neq 1 \quad (4)$$

在各产权分界点  $b$  处,测试到的谐波电流由 3 部分合成,分别是系统侧背景谐波电压产生的谐波电流、本线路用户产生的谐波电流、其他用户产生的谐波电流。

PCC 处谐波电流传播特性为:

(1) 用户侧谐波源发射的谐波电流在 PCC 处经系统阻抗转化为谐波电压,并作用于其他用户,即接在 PCC 点各用户发射的谐波电流经系统阻抗的耦合传递而相互影响。

(2) 非谐波源用户分界点处也有谐波电流,该谐波电流大小由系统侧背景谐波电压和其他线路发射的谐波电流共同决定。

(3) 系统阻抗是各谐波源耦合的重要参数。

## 4 电流物理分量理论

电流物理分量理论 (Currents' Physical Components, CPC) 是由美国 L.S.Czarnecki 于 1985 年提出的功率理论,被认为是主动配电网中最有希望的功率理论之一<sup>[13-15]</sup>。CPC 理论通过集总参数将三相交流负载看作整体,这个特性尤其适用于含整流与逆变器件较多的配电网。在此基础上,对畸变电流采用正交分解方法,所分解的每一个分量都对应电路中一个明确的物理现象。

### 4.1 集总参数

CPC 功率理论定义了三相负载的集总等效电导、集总等效电纳<sup>[15]</sup>。

负载集总等效电导  $G_e$  为:

$$G_e = \frac{\sum_{k \in M} P_{ek}}{\sum_{k \in M} \|u_k\|^2} \quad (5)$$

式中,  $M$  为系统侧谐波集合;  $P_{ek}$  为  $k$  次集总谐波有功功率;  $\|u_k\|$  为  $k$  次集总谐波电压。

负载  $k$  次谐波集总等效电纳  $B_{ek}$  为:

$$B_{ek} = \frac{Q_{ek}}{\|u_k\|^2} \quad (6)$$

式中,  $Q_{ek}$  为  $k$  次集总谐波无功功率。

负载  $k$  次谐波集总等效电导  $G_{ek}$  为:

$$G_{ek} = \frac{P_{ek}}{\|u_k\|^2} \quad (7)$$

$k$  次集总谐波有功功率为:

$$P_{ek} = \text{Re}(\dot{U}_{Ak} \dot{I}_{Ak}^* + \dot{U}_{Bk} \dot{I}_{Bk}^* + \dot{U}_{Ck} \dot{I}_{Ck}^*) \quad (8)$$

$k$  次集总谐波无功功率为:

$$Q_{ek} = \text{Im}(\dot{U}_{Ak} \dot{I}_{Ak}^* + \dot{U}_{Bk} \dot{I}_{Bk}^* + \dot{U}_{Ck} \dot{I}_{Ck}^*) \quad (9)$$

$k$  次集总谐波电压为:

$$\|u_k\| = \sqrt{\|u_{Ak}\|^2 + \|u_{Bk}\|^2 + \|u_{Ck}\|^2} \quad (10)$$

式中,  $\dot{I}_{Ak}^*$ 、 $\dot{I}_{Bk}^*$ 、 $\dot{I}_{Ck}^*$  分别为 A、B、C 三相  $k$  次谐波电流的共轭;  $\dot{U}_{Ak}$ 、 $\dot{U}_{Bk}$ 、 $\dot{U}_{Ck}$  分别为 A、B、C 三相  $k$  次谐波电压;  $\|u_{Ak}\|$ 、 $\|u_{Bk}\|$ 、 $\|u_{Ck}\|$  分别为 A、B、C 三相的  $k$  次谐波电压有效值。

### 4.2 三相电流正交分解

CPC 功率理论将畸变电压作用下的电流正交分解为有功电流、无功电流、杂散电流、发生电流和不平衡电流,各电流分量相互正交<sup>[15,16]</sup>。以 A 相为例,设电源电压为:

$$u_A(t) = \sqrt{2} \text{Re} \left\{ \sum_{k \in M} U_{Ak} e^{jk\omega_1 t} \right\} \quad (11)$$

式中,  $U_{Ak}$  为 A 相  $k$  次谐波电压有效值;  $\omega_1$  为基波频率。

(1) 有功电流

有功电流  $i_a(t)$  与电源电压波形、相位完全一致。电源电压畸变时,有功电流中含有谐波分量。

$$i_a(t) = G_e u_A(t) = \sqrt{2} \text{Re} \left\{ \sum_{k \in M} G_e U_{Ak} e^{jk\omega_1 t} \right\} \quad (12)$$

(2) 无功电流

无功电流  $i_r(t)$  反映负载电流与电源电压的相移。

$$i_r(t) = B_{ek} u_A(t) = \sqrt{2} \text{Re} \left\{ \sum_{k \in M} j B_{ek} U_{Ak} e^{jk\omega_1 t} \right\} \quad (13)$$

(3) 杂散电流

杂散电流  $i_s(t)$  反映负载阻抗的频变特性,只在电源电压畸变时才会出现。

$$i_s(t) = \sqrt{2} \text{Re} \left\{ \sum_{k \in M} (G_{ek} - G_e) U_{Ak} e^{jk\omega_1 t} \right\} \quad (14)$$

(4) 发生电流

发生电流反映负载阻抗的非线性时变特性。

$$i_g(t) = \sqrt{2} \text{Re} \left\{ \sum_{k \in N} j I_k e^{jk\omega_1 t} \right\} \quad (15)$$

式中,  $i_g(t)$  为发生电流;  $N$  为负载谐波集合;  $I_k$  为负载的  $k$  次谐波电流有效值。

(5) 不平衡电流

不平衡电流  $i_u(t)$  反映三相电流的不平衡性。

$$i_u(t) = \sqrt{2} \text{Re} \left\{ Z_k U_{Ak} e^{jk\omega_1 t} \right\} \quad (16)$$

式中,  $Z_k$  为负载  $k$  次谐波不平衡导纳。

## 5 谐波责任量化计算

### 5.1 谐波源辨识原理

为了区分背景谐波电压来源, 首先定义原始背景谐波电压和次生背景谐波电压概念。

(1) 原始背景谐波电压。将由上级电网传递或接在 PCC 处的分布式电源引入的畸变电压定义为原始背景谐波电压。

(2) 次生背景谐波电压。将用户侧非线性负荷谐波电流引起的畸变电压定义次生背景谐波电压。

在 PCC 处区分用户侧不同用户承担的谐波责任时, 由于次生背景谐波电压是由其他馈线所接用户的谐波电流经系统阻抗产生的, 因此不应归为本馈线用户的谐波责任。

采用 CPC 功率理论分解电流, 其有功电流分量和无功电流分量与系统电压 (含谐波) 波形完全相似, 其谐波分量属于系统侧谐波电压引起。杂散电流是背景谐波电压作用在用户负载上产生的电流分量, 次生背景谐波电压和原始背景谐波电压均在负载上引起杂散电流。因此, 杂散电流反映原始背景谐波电压与次生背景谐波电压对用户的综合影响。发生电流反映了负载的非线性时变特性, 属用户产生的谐波责任电流。系统谐波阻抗的波动性由杂散电流值的变化而体现。

不平衡电流包括基波不平衡电流和谐波不平衡电流。负载三相导纳不平衡只产生基波不平衡电流, 逆变器将直流转换为三相交流过程中, 在三相之间所引起的谐波环流以及相间耦合问题会产生谐波不平衡电流。

杂散电流、有功电流和无功电流中的谐波分量综合反映背景谐波电压的畸变程度, 发生电流和谐波不平衡电流反映用户的谐波发射特性, 据此可在 PCC 处的测量电流中分离出用户发射的谐波电流, 分别量化各用户及系统侧的谐波责任。

### 5.2 PCC 点谐波责任量化

在 PCC 点对每条馈线首端的三相电流进行分解。系统侧谐波责任电流为:

$$I_{i,S} = \sqrt{I_{i,ah}^2 + I_{i,th}^2 + I_{i,s}^2} \quad (17)$$

式中,  $I_{i,S}$  为 PCC 处系统侧在第  $i$  个用户上引起的谐波责任电流;  $I_{i,ah}$ 、 $I_{i,th}$ 、 $I_{i,s}$  分别为 PCC 处第  $i$  个用户有功电流中的谐波分量有效值、无功电流中的谐波分量有效值、杂散电流有效值。

第  $i$  个用户在 PCC 处的谐波责任电流为:

$$I_{i,C} = \sqrt{I_{i,g}^2 + I_{i,uh}^2} \quad (18)$$

式中,  $I_{i,C}$  为 PCC 处第  $i$  个用户谐波责任电流;  $I_{i,g}$ 、 $I_{i,uh}$  分别为 PCC 处第  $i$  个用户发生电流有效值、不平衡电流中的谐波分量有效值。

PCC 处第  $i$  个用户的谐波责任  $\rho_i$  为:

$$\rho_i \% = \frac{I_{i,C}}{I_{i,C} + I_{i,S}} \times 100 \quad (19)$$

PCC 处系统侧对第  $i$  个用户谐波责任  $\rho_{i,S}$  为:

$$\rho_{i,S} \% = 100 - \rho_i \% \quad (20)$$

只计算 PCC 处系统侧和用户侧总的谐波责任时, 区别在于需要对 PCC 处三相电流进行分解, 而不是对各馈线首端的三相电流进行分解。

### 5.3 谐波责任评定步骤

(1) 对 PCC 处的三相电压、各馈线首端的三相电流进行频谱分解。

(2) 计算每一条馈线的谐波集总有功功率  $P_{ek}$  和谐波集总无功功率  $Q_{ek}$ 。

(3) 谐波集合分离。当  $P_{ek} \geq 0$  时, 则  $k$  次谐波电流隶属于集合  $M$ , 即  $k \in M$ ; 当  $P_{ek} < 0$  时, 则  $k$  次谐波电流隶属于集合  $N$ , 即  $k \in N$ 。

(4) 根据式(5)计算集总等效电导。

(5) 根据式(6)、式(7)计算谐波集总等效电导、谐波集总等效电纳。

(6) 根据式(14)分解并计算发生电流有效值。

(7) 根据式(12)、式(13)、式(15)计算有功电流、无功电流和杂散电流, 并提取其谐波分量有效值。

(8) 分别计算系统侧和各用户的谐波责任。

## 6 算例分析

算例 1: 搭建如图 1 所示的 0.4 kV 低压配电网模型, 在 PCC 处接有 3 个用户。用户 1 的光伏电源产生  $6k \pm 1$  次谐波, 用户 2 为不平衡阻感性负载,  $z_a = (5+j2) \Omega$ ,  $z_b = (4+j1) \Omega$ ,  $z_c = (3+j2) \Omega$ , 用户 3 为平衡阻性负载。分别对系统侧不含背景谐波、系统侧含背景谐波两种情况进行分析。

当系统侧不含背景谐波时, PCC 处测量电压及其谐波频谱如图 4(a) 所示, 用户 1 的测量电流及其谐波频谱如图 4(b) 所示。由图 4 可知, PCC 处电压有微小畸变, 其频谱与用户 1 的电流频谱一致, 这说明用户侧非线性负载通过系统阻抗产生次生背景谐波电压, 从而对其他用户产生影响。



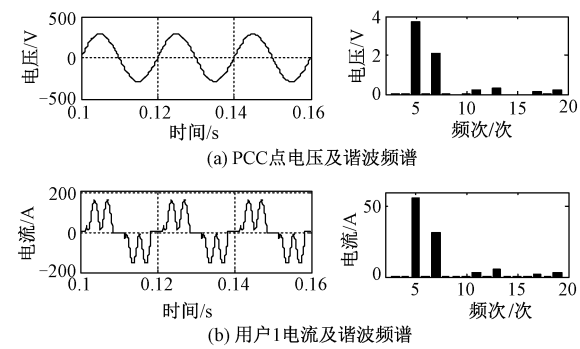


图 4 信号波形及谐波频谱

Fig.4 Waveform and its harmonic spectrum

用户 1、2 电流分解分别如图 5、图 6 所示。3 个用户的有功电流、无功电流规律相似,因此,文中只列出用户 1 的有功电流和无功电流波形。由于原生背景谐波电压为 0,用户的有功电流分量和无功电流分量均不含谐波。用户 1 的发生电流较大,存在谐波不平衡电流和杂散电流;用户 2 的发生电流和杂散电流为 0,由于负载三相导纳不对称,可分解出较大的不平衡电流,但没有谐波不平衡电流;用户 3 只有有功电流,其他电流分量均为 0。这表明用户 1 为谐波源,用户 2、3 为非谐波源,3 个用户的杂散电流和有功电流中的谐波分量微弱,表明系统没有背景谐波电压。

当系统侧含有 8 V 的 11 次谐波电压时,对各用户在分界点 b 处的测量电流进行分解,如图 7~图 9 所示。由于电源电压畸变,各用户的有功电流、无功电流含有谐波。用户 1 的各电流分量均有谐波,用户 2 为非谐波源,发生电流为零,存在杂散电流和基波不平衡电流。用户 3 为阻性平衡负载,尽管有背景谐波电压,但并不产生杂散电流和不平衡电流,只产生有功电流。谐波电流计算如表 1 和表 2 所示。

表 1 无背景谐波条件下的谐波电流分量

Tab.1 Harmonic current component without background harmonics

用户	$I_{i,ah}/A$	$I_{i,th}/A$	$I_{i,s}/A$	$I_{i,g}/A$	$I_{i,gu}/A$
1	2.63	5.15	1.62	55.98	2.41
2	2.56	0.98	1.77	10.00	0.00
3	1.36	0.38	1.27	5.79	0.00

算例 2:用户 2 为不平衡阻感性负载,产生 13 次谐波电流,用户 3 为阻感性平衡负载,产生 5 次和 7 次谐波电流,系统侧有 8 V 的谐波电压,其他数据与算例 1 相同。

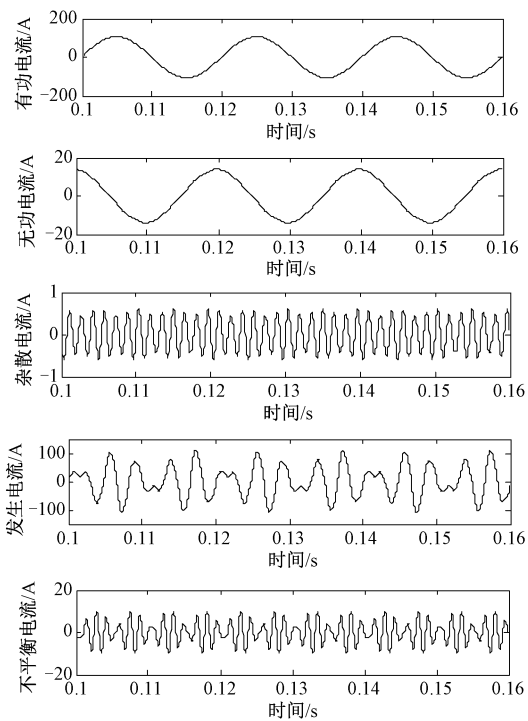


图 5 无背景谐波条件下用户 1 电流分解

Fig.5 Current decomposition of first customer without background harmonics

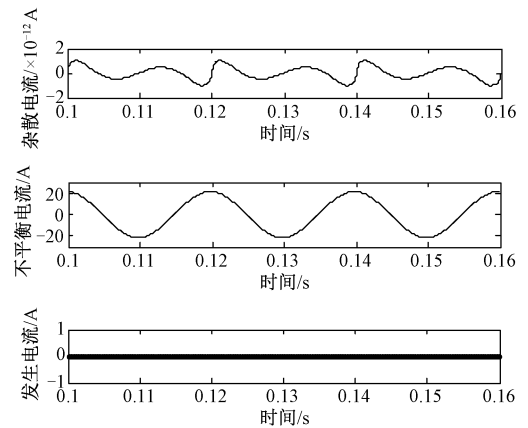


图 6 无背景谐波条件下用户 2 电流分解

Fig.6 Current decomposition of second customer without background harmonics

表 2 含背景谐波条件下的谐波电流分量

Tab.2 Harmonic current component with background harmonics

用户	$I_{i,ah}/A$	$I_{i,th}/A$	$I_{i,s}/A$	$I_{i,g}/A$	$I_{i,gu}/A$
1	2.83	5.51	1.39	64.15	10.39
2	1.92	0.72	1.55	0.00	0.00
3	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00

根据 CPC 功率分解理论计算出的各谐波电流

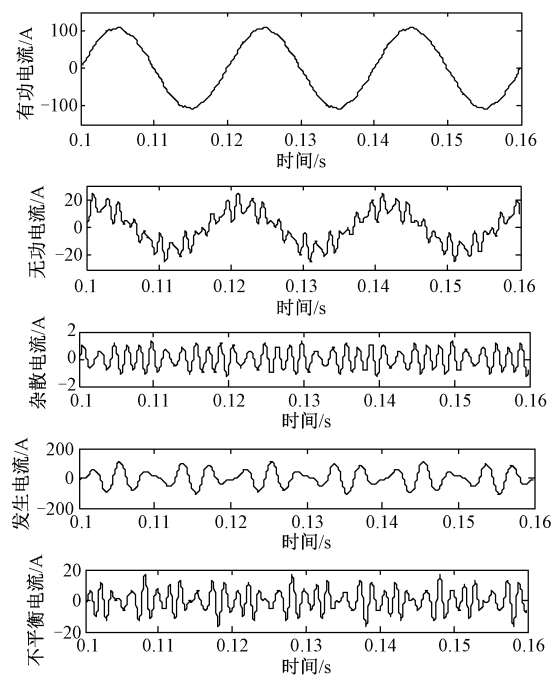


图 7 含背景谐波条件下用户 1 电流分解

Fig.7 Current decomposition of first customer with background harmonics

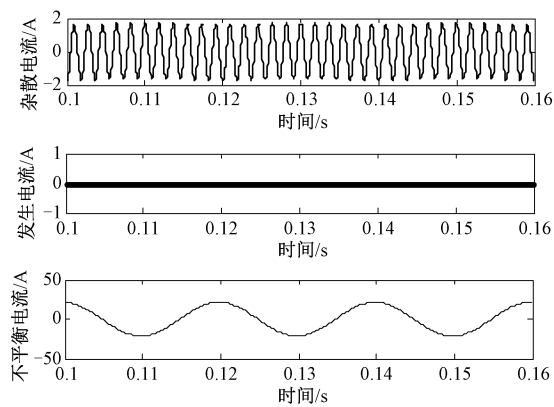


图 8 含背景谐波条件下用户 2 电流分解

Fig.8 Current decomposition of second customer with background harmonics

分量如表 3 所示。

根据表 1~表 3 的数据计算各用户的谐波责任如表 4 所示。

表 3 多谐波源的谐波电流分量

Tab.3 Harmonic current component under multiple harmonic sources condition

用户	$I_{i,ah}/A$	$I_{i,th}/A$	$I_{i,s}/A$	$I_{i,g}/A$	$I_{i,gu}/A$
1	2.63	5.15	1.62	55.98	2.41
2	2.56	0.98	1.77	10.00	0.00
3	1.36	0.38	1.27	5.79	0.00

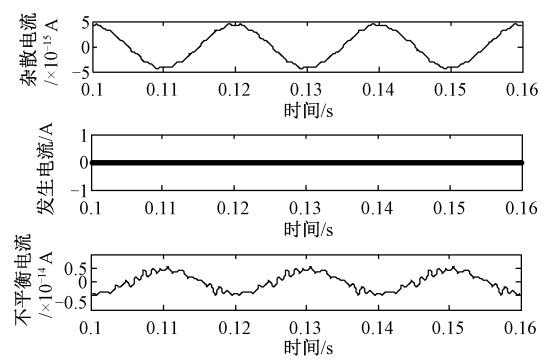


图 9 含背景谐波条件下用户 3 的电流分解

Fig.9 Current decomposition of third customer with background harmonics

表 4 谐波责任评定结果

Tab.4 Harmonic responsibility results

不同条件	$\rho_1$ (%)	$\rho_2$ (%)	$\rho_3$ (%)
不含背景谐波	99.38	0.00	0.00
含背景谐波	91.09	0.00	0.00
多谐波源	90.33	48.43	75.29

以上仿真表明,杂散电流只在背景谐波电压和负载含储能元件同时满足的条件下才会出现;原生背景谐波电压导致有功电流和无功电流畸变;负载三相导纳不相等或电源电压不对称时,只会产生基波不平衡电流,不影响谐波责任评估。

7 结论

针对含高渗透率光伏电源的配电网多谐波源责任评定问题,本文提出了一种 PCC 点谐波责任电流计算方法,结论如下:

- (1) 谐波源用户在 PCC 点以次生背景谐波电压的形式影响谐波电流。原始背景谐波电压与次生背景谐波电压使得用户产生杂散电流。
- (2) 依据电流物理分量理论,对负载电流进行正交分解,发生电流和不平衡谐波电流代表本馈线用户的谐波责任电流,实现背景谐波电压下用户谐波责任电流计算。
- (3) 采用电流物理功率理论通过集总参数分解 PCC 点测量到的畸变电流,避免了对系统谐波阻抗的求解,为解决高渗透率光伏电源对配电网谐波责任评定带来的困难提供了一种解决方案。

参考文献 (References):

[ 1 ] 欧阳森, 梁伟斌, 苏为健, 等 ( Ouyang Sen, Liang Weibin, Su Weijian, et al.). 基于电气外特性的大型光伏电站建模及电能质量预评估方法 ( Modeling and

- power quality pre-valuation method of large photovoltaic power station based on electric external characteristics) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (5): 51-57.
- [2] 赵勇, 杨子龙, 曹笃峰 (Zhao Yong, Yang Zilong, Cao Dufeng). 弱电网中光伏电站并网点谐波分析与抑制 (Harmonic analysis and suppression of photovoltaic power stations in weak current network) [J]. 太阳能学报 (Acta Energiæ Solaris Sinica), 2018, 39 (1): 117-123.
- [3] 李国栋, 庞文杰, 葛磊蛟, 等 (Li Guodong, Pang Wenjie, Ge Leijiao, et al.). 基于改进雷达图法的光伏并网发电系统稳态电能质量综合评估 (Steady-state power quality synthetic evaluation of grid-connected photovoltaic system based on improved radar chart) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (5): 8-12, 35.
- [4] 王攸然, 张逸, 邵振国, 等 (Wang Youran, Zhang Yi, Shao Zhenguo, et al.). 谐波责任划分研究现状及在分布式电源并网条件下的展望 (Current status of harmonic responsibility division and prospects under grid-connected distributed generations condition) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (1): 61-69.
- [5] 肖楚鹏, 李鹏飞, 邱泽晶, 等 (Xiao Chupeng, Li Pengfei, Qiu Zejing, et al.). 谐波责任计算指标的可行性分析 (Feasibility analysis of calculating index of harmonic wave liability) [J]. 电力科学与技术学报 (Journal of Electric Power Science and Technology), 2017, 32 (2): 145-151.
- [6] 艾永乐, 郑建云 (Ai Yongle, Zheng Jianyun). 基于谐波有功功率贡献量的主谐波源定位 (Primary harmonic source localization based on harmonic active power contribution) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 45 (7): 16-22.
- [7] 袁林, 杨洪耕, 王智琦, 等 (Yuan Lin, Yang Honggeng, Wang Zhiqi, et al.). 基于快速近似联合对角化的谐波发射水平评估方法 (A harmonic emission level evaluation method based on fast approximation combined with diagonalization) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (7): 81-87.
- [8] 杨少兵, 吴命利 (Yang Shaobing, Wu Mingli). 基于广义柯西分布的系统侧谐波阻抗估计 (Estimation of system side harmonic impedance based on generalized cauchy distribution) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (7): 1159-1166.
- [9] 陈静, 符玲, 臧天磊, 等 (Chen Jing, Fu Ling, Zang Tianlei, et al.). 考虑系统谐波阻抗改变的谐波责任定量划分方法 (A method for the quantification of harmonic liability considering the change of system harmonic impedance) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2016, 36 (6): 215-222.
- [10] 王莉虹, 肖先勇, 张逸, 等 (Wang Lihong, Xiao Xianyong, Zhang Yi, et al.). 非线性负荷谐波贡献畸变功率评估指标与方法 (Evaluation index and method of nonlinear load harmonic contribution distortion power) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2017, 45 (9): 41-47.
- [11] Pfsjfar T, Blzaic B, Paptic I. Managing and responsibility for harmonic distortion in power networks [J]. Energy Conversion and Mangement, 2008, 49 (10): 2538-2545.
- [12] 谢宁, 罗安, 陈燕东, 等 (Xie Ning, Luo An, Chen Yandong, et al.). 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析 (Dynamic modeling and characteristics analysis on harmonic of photovoltaic power stations) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (36): 10-17.
- [13] Czarnecki L S, Haley P M. Unbalanced power in four-wire systems and its reactive compensation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30 (1): 53-63.
- [14] 肖湘宁, 罗超, 陶顺 (Xiao Xiangning, Luo Chao, Tao Shun). 电气系统功率理论的发展与面临的挑战 (Development and challenges of power theory in electrical power system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (9): 1-10.
- [15] 亚历山大·艾格列斯·伊曼纽尔 (Alexander Eigeles Emanuel). 功率定义及功率流的物理机制 (Power definitions and the physical mechanism of power flow) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2014.
- [16] Czarnecki L S. Effect of supply voltage harmonics on IRP—based switching compensator control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 25 (3): 80-85.

Harmonic responsibility evaluation of distribution network containing  
photo-voltaic power generators

WANG Qing-liang<sup>1</sup>, GAO Mei<sup>1</sup>, LIANG Pei-pei<sup>1</sup>, WANG Lei-gang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of  
Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Grid Zhejiang Power Company Yongkang Power Supply Bureau, Yongkang 321300, China)

**Abstract:** The high permeability photo-voltaic generators complicate the harmonic sources of common coupling points in distribution network. In order to accurately separate the harmonic responsibility of customer and system, a method of harmonic current decoupling and responsibility evaluation is proposed. The propagation characteristics of harmonics at common coupling points are analyzed. According to the Currents' Physical Components theory, the load lumped parameters are defined; the harmonic interaction between customers is described as the secondary background harmonic voltage. Then, the true harmonic current is decomposed orthogonally from the background harmonic voltage and other customer's harmonic current. The proposed method does not calculate the fluctuation system impedance, and is suitable for harmonic responsibility evaluation of bus voltage distortion caused by photo-voltaic power generators.

**Key words:** photo-voltaic generators; power quality; harmonic analysis; responsibility; background harmonic