

DOI: 10.7667/PSPC160588

非线性负荷谐波贡献畸变功率评估指标与方法

王莉虹¹, 肖先勇¹, 张逸², 汪颖¹, 陈飞宇¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350000)

摘要: 以谐波电压或谐波电流为依据的现有谐波贡献度评估指标对电网侧和用户侧阻抗参数敏感, 对特定情况有效, 但普适性不强。针对这一问题, 从电力系统是电能量转换和传输系统的实质出发, 研究电压或电流畸变条件下电功率流的物理机制。基于坡印廷矢量分析法, 比较现有不同畸变功率的定义, 提出一种基于非基波视在功率的多谐波源贡献度量化指标, 并结合电流矢量法进行了求解算法研究。通过理论仿真和实验测试, 并与传统的电压、电流指标评估结果进行比较, 证明了所提贡献度评估指标的合理性和可行性。

关键词: 坡印廷矢量; 畸变功率; 谐波贡献; 评估指标; 电流矢量法

A distortion power based assessment index and method of harmonic contribution of nonlinear loads

WANG Lihong¹, XIAO Xianyong¹, ZHANG Yi², WANG Ying¹, CHEN Feiyu¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Company Electric Power Research Institute, Fuzhou 350000, China)

Abstract: Current harmonic voltage or current based assessment index of harmonic contribution is sensitive to harmonic impedance of utility side and customer side and it's available only for special cases. In order to solve this problem, this paper, which bases itself on the fact that the essence of power system is electric energy conversion and transmission, studies the physical mechanism of power flow when voltage and current are distorted and uses Poynting vector to compare different definition of distortion power. Then a nonfundamental apparent power based index is proposed to assess harmonic contribution of multi-harmonic sources and detail studies on calculating algorithm are explored with the help of current vector method. The proposed index is verified by theoretical simulation and laboratory test, and the assessment results of harmonic contribution by the proposed index are compared with those by conventional index with voltage and current. Comparison results show that the proposed index in this paper is rational and feasible.

This work is supported by the State Grid Corporation of China (No. SGRI-DL-71-15-006).

Key words: Poynting vector; distortion power; harmonic contribution; assessment index; current vector method

0 引言

随着非线性负荷、分布式电源等越来越多地接入电网, 非线性元件或负荷(统称非线性负荷)的谐波贡献度量化成为了学术界和工业领域关注的重点^[1-3]。非线性负荷从电网吸收有效基频正弦电能, 由于其V-A特性非线性, 通过谐波形式将部分有效基频电能转换成非有效畸变电能。电网的根本职责是电能有效转换和传输, 非线性负荷产生的谐波通过非有效畸变功率形式给非线性负荷、电网元件和其他用户造成影响。因此, 从非线性负荷畸变功率的产生

和在电网内传播的物理机制出发, 研究非线性负荷的谐波贡献度评估指标和方法, 很有吸引力^[4-6]。

国内外学者对谐波贡献度评估指标和方法已开展了大量研究^[7-11]。现有评估指标主要有谐波电压、谐波电流和谐波功率; 评估方法主要有随机矢量法和^[12]、实测阻抗^[8,14-16]和参考阻抗^[7]等方法。其中, 文献[9]基于诺顿等效和叠加原理, 提出了谐波电压和谐波电流评估指标; 文献[10]基于谐波电压和电流矢量贡献在公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)谐波电压、电流方向上的投影, 提出一种判断出主导谐波源的标量贡献度指标。实际上, 由于谐波起源于非线性负荷将部分有效基频电能转换为非有效畸变电能, 以非有效能量形式给设备和

电网造成影响。文献[11, 13]分别以谐波有功功率、视在功率为指标估计谐波贡献量。为了解上述评估指标, 国内外展开了大量研究。文献[7]提出了谐波贡献评估的参考阻抗法, 可计及谐波源或谐波阻抗变化对 PCC 点谐波电压、电流的影响; 文献[10]进一步提出了一种可确定参考阻抗的电流矢量谐波贡献评估方法。文献[12]提出了随机矢量求和法, 但样本需求量大。文献[8, 14-16]提出的实测阻抗法把重点放在系统谐波阻抗估计, 在进行 PCC 点测试样本筛选的基础上, 不同类型的非线性元件还需再选择相应算法。可见, 现有方法中大多采用谐波电压和电流作为评估指标, 尚未分析非线性负荷非有效畸变功率产生和传播的物理机制。

事实上, 评估非线性负荷谐波贡献度的根本目的在于度量非线性负荷产生的谐波所导致的损失和危害程度, 这些损失和危害大多以非有效电能形式出现。因此, 从非线性负荷引起的畸变电功率入手, 研究谐波贡献度评估指标和方法, 能更好地刻画谐波贡献度, 使评估方法更加满足工程应用需要。

根据电磁感应定律: 电压畸变会引起电场畸变, 进而引起磁场畸变; 电流畸变会引起磁场畸变, 进而引起电场畸变; 磁场和电场畸变的能量流可用坡印廷矢量分析。本文基于 IEEE Std.1459-2010^[17]定义的畸变功率, 研究电压畸变和电流畸变时电能量流的物理机制, 在对比研究不同畸变功率定义的基础上, 提出一种基于非基波视在功率的非线性负荷谐波贡献度评估指标。在谐波阻抗参数未知的情况下, 利用电流矢量法的基本思想, 提出谐波贡献评估方法。最后通过仿真数据和实验室测试数据验证所提出的方法, 结果证明了本文方法的合理性和可行性。

1 畸变能量流与畸变功率

1.1 畸变电能量流物理机制

电能以电磁波形式进行传播^[18]。时变电磁场中, 变化电场与磁场相互激发, 其能量过程可用坡印廷矢量 $\boldsymbol{\rho}$ 进行解释。 $\boldsymbol{\rho}$ 为空间上任一点的电磁能量流密度。

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{H} 为磁场强度。

坡印廷矢量与单位时间内导体吸收或传输的电能量大小密切相关。以理想圆形平行板电容器 C 为例, 基于坡印廷矢量, 对电压或电流畸变下的能量流进行分析, 建立圆柱坐标系 (x, r, θ) , 如图 1 所示。图 1 中, g 为平行板间距, a 为平行板半径。

设板间媒介磁导率为 μ , 介电常数为 ε 。当电路

中不存在电压或电流畸变时, 电容器仅由基频电压 v_1 供电, 设

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中: V_1 为基波电压的有效值; ω 为基波角频率。

根据电磁感应定律, 仅有正弦电压供电下的坡印廷矢量 $\boldsymbol{\rho}_1$ 为

$$\boldsymbol{\rho}_1 = \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_1 = -v_1 \frac{\varepsilon a}{2g^2} \frac{dv_1}{dt} \mathbf{I}_r \quad (3)$$

正弦供电电压下流入电容器的瞬时功率 p_1 为

$$p_1 = \int_{s_1} \boldsymbol{\rho}_1 \cdot d\mathbf{s}_1 = v_1 \frac{\varepsilon \pi a^2}{g} \frac{dv_1}{dt} = v_1 i_1 \quad (4)$$

式中, i_1 为流入电容器的基波电流。

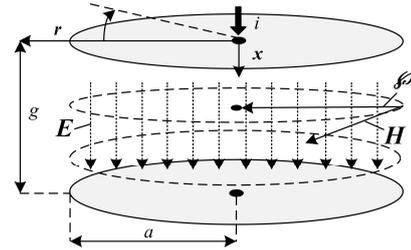


图 1 圆形平行板电容器板间坡印廷矢量

Fig. 1 Poynting vector of circular parallel-plate capacitor

1.1.1 电压畸变电能量流

当背景谐波电压畸变时, 假设谐波电压为 v_H 。

$$v_H = \sum_{h=2} \sqrt{2}V_h \sin(h\omega t) \quad (5)$$

式中, V_h 为第 h 次谐波电压有效值。

类比正弦电压供电时能量流的分析, 可得电压畸变下流入电容的瞬时功率 p_2 为

$$p_2 = \int_{s_1} \boldsymbol{\rho}_2 \cdot d\mathbf{s}_1 = (v_1 + v_H) \frac{\varepsilon \pi a^2}{g} \frac{d(v_1 + v_H)}{dt} = \quad (6)$$

$$v_1 i_1 + v_H i_1 + v_1 i_H + v_H i_H$$

式中: $\boldsymbol{\rho}_2$ 为电压畸变下的坡印廷矢量; i_H 为电场畸变导致的磁场畸变感应出的谐波电流。

1.1.2 电流畸变电能量流

假设供电电压未畸变, 非线性负荷接入电网造成的谐波电流 i_H 为

$$i_H = \sum_{h=2} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (7)$$

式中, I_h 和 θ_h 分别为第 h 次谐波电流有效值和相位。

根据电磁感应定律, 电流畸变下的坡印廷矢量 $\boldsymbol{\rho}_3$ 为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\rho}_3 = & (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_i) \times (\mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_i) = \\ & -\left(\frac{v_1}{g} - \frac{\mu}{2\pi} \frac{di_H}{dt}\right) \left(\frac{\varepsilon a}{2g} \frac{dv_1}{dt} + \frac{i_H}{2\pi a}\right) \mathbf{I}_r \end{aligned} \quad (8)$$

此时, 电容器吸收的瞬时功率 p_3 为

$$p_3 = \oint_{s_1} \boldsymbol{\rho}_3 \cdot d\mathbf{s}_1 = \boldsymbol{\rho}_3 \cdot 2\pi a g = v_1 \frac{\varepsilon \pi a^2}{g} \frac{dv_1}{dt} - \frac{\mu \varepsilon a^2}{2} \frac{di_H}{dt} \frac{dv_1}{dt} + v_1 i_H - \frac{g \mu}{2\pi} i_H \frac{di_H}{dt} = v_1 i_1 + e_H i_1 + v_1 i_H + e_H i_H \quad (9)$$

综上可知, 电压或电流畸变电路中均可测得谐波电压和谐波电流。分析式(6)和式(9)可知, 电压或电流畸变时, 瞬时功率均由 4 个分量组成: 第 1 个分量为基波视在功率; 第 2、3 个分量是异次谐波电压和电流耦合, 根据三角函数的正交性, 这两个分量均为瞬时值不为 0 的振荡功率; 第 4 个分量展开后包含同次和异次谐波电压、电流的耦合。因此, 第 2、3、4 个分量均与电压或电流畸变有关, 为谐波贡献度评估提供了机会。上述分析同样适用于电压或电流畸变下的阻感性负载。

1.2 基于坡印廷矢量的畸变功率

根据电能量流的物理机制可对功率进行分解, 代表性功率理论有: Budeanu、Fryze、Czamecki 以及 IEEE Std.1459-2010 推荐的 Emanuel 理论。视在功率分解原理如图 2。

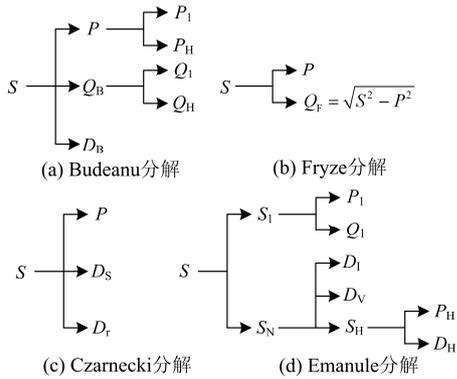


图 2 视在功率分解

Fig. 2 Power component of apparent power

Budeanu 理论^[19]将视在功率 S 分解为有功功率 P 、无功功率 Q_B 和畸变功率 D_B ; P 进一步分解为基波有功功率 P_1 和谐波有功功率 P_H ; Q_B 进一步分解为基波无功功率 Q_1 和谐波无功功率 Q_H 。遗憾的是, 该理论对 D_B 缺少物理解释。Frye 理论^[20]将视在功率 S 分解为有功功率 P 和 Frye 无功功率 Q_F , 简化了无功电流分析和测量^[21], 但未做出物理解释。Czamecki 理论将电流正交分解, 对 Frye 理论进行改进^[22], 将 Frye 无功电流分解为正交无功电流和杂散电流, 把视在功率 S 分解为有功功率 P 、无功功率 D_r 和杂散功率 D_s 。值得注意的是, D_r 不同于 Budeanu 理论中的 D_B , 为集总无功功率; D_s 的瞬时

值由不同频率瞬时有功功率组成, 各分量均值为 0, 但缺少理论支撑。

针对上述理论的缺陷, Emanuel 教授指出, 功率分解在考虑分离出基波有功功率 P_1 的同时, 各分量应有明确物理意义。为此, Emanuel 将畸变条件下的视在功率分解为基波视在功率 S_1 和非基波视在功率 S_N , 核心思路是将电压有效值 V 和电流有效值 I 值分开^[17]。

$$\begin{cases} V^2 = V_1^2 + V_H^2 = V_1^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 \\ I^2 = I_1^2 + I_H^2 = I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: V_1, V_H, V_h 分别为基波电压、畸变电压和第 h 次谐波电压有效值; I_1, I_H, I_h 分别为基波电流、畸变电流和第 h 次谐波电流。

视在功率 S 为

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = S_1^2 + S_N^2 = S_1^2 + D_1^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (11)$$

式中, D_1, D_V, S_H 分别为电流畸变功率、电压畸变功率、谐波畸变功率。

比较式(6)、式(9)和式(11)可知, S_N 的 3 个分量分别与电压或电流畸变下的瞬时无功功率的非基频分量相对应。 S_N 描述了非线性负荷存在时系统非有效电能的传递、转换情况, 因此本文将 S_N 作为指标用于量化非线性负荷的谐波贡献度。

2 以非基波视在功率为指标的谐波贡献评估方法

图 3 为多非线性负荷(NL)的配电网诺顿等效模型^[23]。图中, a, b, \dots, m 为负荷编号; $I_{aH}, I_{bH}, \dots, I_{mH}$ 和 I_{sH} 为根据负荷或元件非线性特性等效的谐波电流源; $R_a, L_a; \dots; R_m, L_m$ 和 R_s, L_s 为以线性电阻和电感表示的负荷和系统侧等效谐波阻抗; $I_{LaH}, I_{LbH}, \dots, I_{LmH}$ 和 I_{pccH} 为测得的负荷电流和 PCC 点电流。假设非线性负荷相互独立, PCC 点谐波电压 V_{pccH} 和负荷谐波电流为各谐波源的加权矢量叠加。

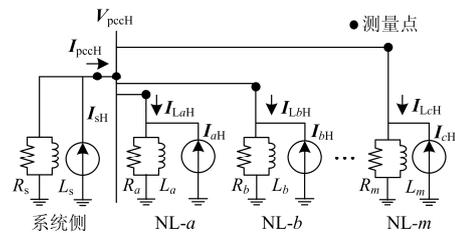


图 3 配电网等效谐波源模型

Fig. 3 Norton equivalent circuit for power distribution network

电流矢量法是在参考阻抗法基础上发展而来的一种可估计等效谐波源的方法,其推荐了一种参考阻抗的选择思路:用户侧参考阻抗选择为其基波阻抗的实部,系统侧参考阻抗选择为系统短路阻抗与PCC点之前最后一节变压器阻抗之和;参考阻抗与实际阻抗之差等值为附加谐波电流源并入原有谐波源,作为新的谐波源^[10]。针对图3中的等效电路,结合电流矢量法,以NL-a为例说明以非基波视在功率作为指标的非线性负荷谐波贡献评估过程。根据PCC点基波电压 V_1 和非线性负荷基波电流 I_{La1} 可得非线性负荷NL-a对应的参考阻抗 Z_a 为

$$Z_a = \frac{|V_1|}{|I_{La1}| \cos \varphi_{a1}} \quad (12)$$

式中, φ_{a1} 为 V_1 与 I_{La1} 之间的相位差。

假设 I_{aH} 含有 h 次谐波源,则利用测得的第 h 次谐波电流和电压 I_{Lah} 、 V_{pccH} 可估计 I_{aH} 中包含的第 h 次谐波电流 I'_{ah} 为

$$I'_{ah} = \frac{V_{pccH}}{Z_a} - I_{Lah} \quad (13)$$

同时,仅由 I'_{ah} 造成的PCC点谐波电压为

$$V'_{ah} = I_{La} (Z_s \parallel Z_a \parallel \dots \parallel Z_m) \quad (14)$$

式中, Z_a, \dots, Z_m 和 Z_s 分别表示非线性负荷NL-a, ..., NL-m和系统侧对应的参考阻抗。

对应的非基波视在功率为

$$S_{Na} = \sqrt{D_{La}^2 + D_{Va}^2 + S_{Ha}^2} = \sqrt{V_1^2 I_{aH}^2 + I_1^2 V_{aH}^2 + I_{aH}^2 V_{aH}^2} \quad (15)$$

式中, I_{aH} 、 V_{aH} 分别为根据估计的 I'_{ah} 和 V'_{ah} 按式(10)计算得到的畸变电流、电压。

同理,可计算其他非线性负荷产生的非基波视在功率,并进行谐波贡献度比较。

考虑到公用电网通常满足谐波限值标准,且系统侧谐波阻抗通常远大于负荷谐波阻抗,从电网流向线性负荷的谐波电流通常很小。因此,当检测到谐波电流从PCC点流向负荷时,定义其方向为负,可认为负荷不发射谐波,对应的谐波贡献度为负,用“-”表示;反之,负荷对应的谐波贡献度为正,用“+”表示。

综上所述,以非基波视在功率 S_N 为评估指标的非线性负荷谐波贡献度评估流程如图4所示。可见,采用以 S_N 为指标时,谐波贡献评估过程中综合考虑了各次谐波电压、电流的影响,同时根据检测的电流方向定义了谐波贡献的符号。

3 方法验证

3.1 理论仿真分析

为验证所提出的方法,本节将3个非线性负荷

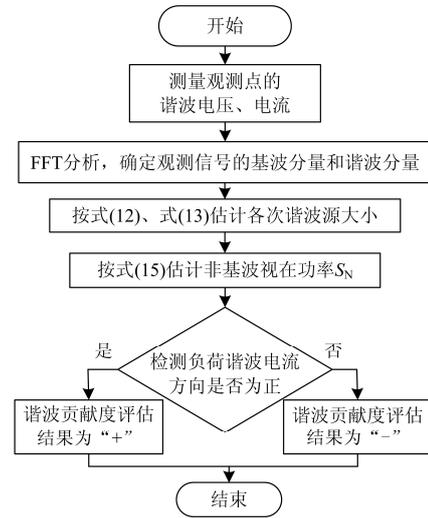


图4 谐波贡献度评估流程

Fig. 4 Process of harmonic contribution assessment

接入PCC点,在DIGSILENT系统中进行仿真,模型如图5。图中:非线性负荷NL-a、NL-b、NL-c分别用恒功率负载La、Lb、Lc和等效谐波电流源 I_{Ha} 、 I_{Hb} 、 I_{Hc} 并联来刻画。假设非线性负荷产生5、7次谐波,公用110kV电网经110/35kV变压器向非线性负荷供电。仿真参数如表1所示。其中,变压器Tr参数中, S_k 为额定容量, u_k 为短路电压。

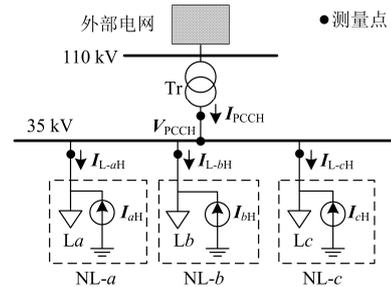


图5 三个非线性负荷接入PCC的系统

Fig. 5 System with three non-linear loads

表1 主要元件基本参数设置

Table 1 Parameters of main elements for simulation

元件	参数	数值	元件	参数	数值
Tr	S_k	200 MVA	I_{aH}	I_{a5}	18 A $\angle 0^\circ$
	u_k	6%		I_{a7}	15 A $\angle 0^\circ$
La	P_L	20 MW	I_{bH}	I_{b5}	0
	$\cos \varphi_{e1}$	0.95		I_{b7}	15 A $\angle 0^\circ$
Lb	P_L	40 MW	I_{cH}	I_{c5}	22.5 A $\angle 0^\circ$
	$\cos \varphi_{e1}$	0.95		I_{c7}	15 A $\angle 0^\circ$
Lc	P_L	50 MW	—	—	—
	$\cos \varphi_{e1}$	0.97	—	—	—

表2 为仿真得到的各非线性负荷电流 I_{L-aH} 、 I_{L-bH} 、

I_{L-cH} 和 PCC 点谐波电压 V_{pccH} 结果。其中, NL-*b* 的 5 次谐波电流相位为正且测得的 5 次谐波电流幅值明显小于 7 次谐波电流, 说明谐波从电网流向负荷且 NL-*b* 不含 5 次谐波源, 这与表 1 中参数设置保持一致。此外, 比较表 2 和表 1 可知, 测得的负荷电流与输入的谐波电流源不等, 说明恒功率负载要吸收部分谐波电流。

表 2 测得的负荷电流和 PCC 点谐波电压

谐波次数	1 次	5 次	7 次
I_{L-aH}/A	321.49 \angle 18.2°	17.78 \angle -90.73°	14.87 \angle -84.39°
I_{L-bH}/A	642.98 \angle 18.19°	2.55 \angle 58.68°	12.15 \angle -96.03°
I_{L-cH}/A	787.16 \angle 14.07°	19.4 \angle -93.61°	10.97 \angle -91.43°
I_{pccH}/A	1750.51 \angle -163.66°	34.97 \angle 89.79°	37.85 \angle 89.85°
V_{pccH}/kV	37.81 \angle 0°	0.27 \angle 0°	0.41 \angle 0°

表 3 为参考阻抗计算结果, 可见负荷侧参考阻抗均为阻性, 系统侧参考阻抗为阻感性。表 4 为等效谐波源的估计结果。比较表 4 与表 1 中设置的谐波源可知, 谐波源估计误差较大, 这是由于估计的谐波源是真实谐波源与一个附加谐波源之和。

表 3 系统侧和各非线性负荷参考阻抗计算结果

谐波次数	1 次	5 次	7 次
Z_a/Ω	123.80	123.80	123.80
Z_b/Ω	61.90	61.90	61.90
Z_c/Ω	49.52	49.52	49.52
Z_s/Ω	0.02+j0.9	0.02+j4.52	0.02+j6.32

表 4 谐波源估计值

Table 4 Harmonic source estimation

谐波次数	5 次	7 次
I'_{aH}/A	17.94 \angle 82.38°	14.91 \angle 82.93°
I'_{bH}/A	3.74 \angle -35.68°	14.43 \angle 56.89°
I'_{cH}/A	20.48 \angle 71.06°	13.90 \angle 52.10°

按照第 2 节方法估计不同非线性负荷产生的畸变功率如表 5 所示。可知, 尽管电流矢量法在估计的谐波源与其理论值相差较大, 但用其估计得到的非基波视在功率与仿真计算的理论值十分接近。这是由于式(15)计算的非基波视在功率包含了非线性负荷自身吸收和在系统各元件中转移的非有效电能。同时, 表 5 说明, 以非基波视在功率为指标时, 可以明确 NL-*a*, NL-*b*, NL-*c* 中, NL-*c* 的谐波污染贡献最大, NL-*a* 产生的谐波污染略小于 NL-*c*, NL-*b* 谐波污染最小; 结合表 1 中恒功率负荷设置可以看出, 本文指标确定的谐波贡献主要取决于谐波源的大小而与负荷大小无关。

表 5 以畸变功率为指标的谐波贡献

Table 5 Harmonic contribution based on distortion power index

	$S_N(NL-a)/MVA$	$S_N(NL-b)/MVA$	$S_N(NL-c)/MVA$
估计值	+0.88	+0.55	+0.94
理论值	+0.89	+0.57	+1.04

为进一步比较本文提出指标与传统电压、电流指标的差异, 对图 5 所示的仿真模型按叠加原理计算各非线性负荷对 PCC 点谐波电压 V_{pccH} 、电流 I_{pccH} 的标量贡献的理论值^[9], 结果如表 6。可知, 同一非线性负荷对同次谐波电压、电流贡献度评估结果往往不统一, 因此用于谐波责任划分往往在用户与系统之间造成争议^[11]; 同时, 表 6 结果仅直接反映了各非线性负荷对 PCC 点电压和电流的影响程度, 而不考虑彼此之间的相互影响。

综上所述, 本文提出的谐波贡献度指标, 结果统一且能从畸变能量产生、转换与传递角度综合反映出非线性负荷对自身和其外部网络的影响程度。

表 6 以电压、电流为指标的谐波贡献

Table 6 Harmonic contribution based on harmonic voltage and current index

指标	$V_{pccH}(\%)$		$I_{pccH}(\%)$	
	5 次	7 次	5 次	7 次
NL- <i>a</i>	44.44	33.34	42.37	33.34
NL- <i>b</i>	0	33.34	0	33.34
NL- <i>c</i>	55.56	33.34	55.56	33.34

3.2 物理实验验证

为进一步验证本文方法, 用横河 DL750 录波仪对电冰箱、个人电脑和制热空调进行 24 h 实验测试, 原理如图 6 所示。为保证电流矢量法计算精度, 测试时, 电脑和空调基波功率因数均大于 0.99, 冰箱基波功率因数约为 0.8。假设仅考虑 19 次以内的谐波, 对监测数据每分钟做一次 FFT, 24 h 得到各观测点各次谐波分别对应 1440 个样本。

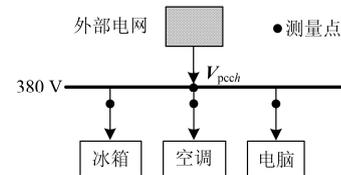


图 6 物理验证原理图

Fig. 6 Schematic for physical verification

采用本文所提的指标与方法估计 24 h 内冰箱、电脑和空调平均谐波贡献度, 结果分别约为+16.43 VA、+63.37 VA 和+347.52 VA。可见, 正常运行时, 上述 3 种设备均会向电网注入一定的谐波, 且谐波污染强度呈现空调最强、电脑次之及冰箱最弱的规律。

图 7 为以电压标量贡献为指标的谐波贡献度评

估结果。可见,电脑是主要的谐波源,其对PCC点19次以内谐波电压均有明显贡献;空调谐波贡献较小;冰箱的各次谐波贡献近似为0。由非基频视在功率估计结果可知,空调产生了较大的非基频视在功率,说明其对应的谐波电流源较大,但其造成的谐波电压标量贡献很小;冰箱实际上产生了较小谐波电流,但以电压作为指标时,无法识别其产生谐波污染,这种情况下显然该指标具有缺陷。此外,该指标评估结果仅反映了3个设备对PCC点谐波电压影响程度,并未计及三者之间存在的相互影响。

综上所述,本文所提指标能够有效地进行谐波贡献估计,且更直观地比较不同负荷造成的谐波污染程度。

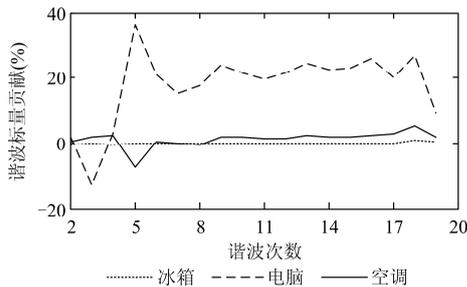


图7 平均谐波电压标量贡献度

Fig. 7 Average harmonic voltage scalar contribution

4 结语

1) 多非线性负荷接入时,PCC点测量所得谐波电流和谐波电压是多谐波源共同作用的结果,因此,各非线性负荷和系统均会遭受影响。以非基频畸变功率作为非线性负荷谐波贡献度评估指标,物理意义明确,结果符合实际。

2) 基于电磁感应定律,从电压畸变和电流畸变时电能量流物理机制出发提出的谐波贡献度评估方法,仅需测量所得电压和电流值,评估原理和算法简单,易于工程应用。

3) 理论仿真和实验测试均表明本文提出的贡献度评估指标能够从畸变能量产生、转换与传递角度综合反映出非线性负荷对自身和其外部网络的影响程度。

本文仅对基于畸变功率理论的谐波贡献度评估指标和方法进行了探索性研究,针对工程应用,还需开展更多研究。

参考文献

[1] MCEACHERN A, GRADY W M, MONCRIEF W A, et al. Revenue and harmonics: an evaluation of some proposed

rate structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 474-482.

- [2] 代双寅, 杨君超, 李琼林. 基于谐波功率分解的奖惩性电能计量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 111-116.
- DAI Shuangyin, YANG Junchao, LI Qionglin. An incentive energy measurement method based on harmonic power decomposition strategy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 111-116.
- [3] DAVIS E J, EMANUEL A E, PILEGGID J. Harmonic pollution metering: theoretical considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 19-23.
- [4] EMANUEL A E. Poynting vector and the physical meaning of nonactive powers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(4): 1457-1462.
- [5] SLEPIAN J. Energy and energy flow in the electromagnetic field[J]. Journal of Applied Physics, 1942, 13(8): 512-518.
- [6] BALCI ME, HOCAOGLU MH, AKSOY S. Transition from Poynting vector to instantaneous power[C] // Proceedings of the 12th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Cascais, Portugal, 2006.
- [7] XU W, LIU Y. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [8] 龚华麟, 肖先勇, 刘亚梅, 等. 基于主导波动量筛选原理的用户谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 22-27.
- GONG Hualin, XIAO Xianyong, LIU Yamei, et al. A method for assessing customer harmonic emission level based on the dominant fluctuation filtering principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 22-27.
- [9] LI C, XU W. On defining harmonic contributions at the point of common coupling[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(7): 44-45.
- [10] PFAJFAR T, BLAZIC B, PAPIC I. Harmonic contributions evaluation with the harmonic current vector method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 425-433.
- [11] 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.
- [12] TANG B, MA S, CHEN G, et al. The superposition of the random harmonic phasors based on the cloud model[C] // The 16th IEEE Conference on International Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bucharest, Romania, 2014: 194-198.
- [13] 叶晶. 基于谐波功率法的污染责任分摊[J]. 电力学报, 2010, 25(3): 210-213.
YE Jing. A responsibility sharing method based on harmonic power[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(3): 210-213.
- [14] 艾永乐, 王玉栋, 都静静, 等. 基于 LTS 初值的稳健回归的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 99-105.
AI Yongle, WANG Yudong, DU Jingjing, et al. A method for assessing harmonic emission level based on robust regression of LTS initial value[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 99-105.
- [15] 惠锦, 杨洪耕, 林顺富, 等. 基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 27-31.
HUI Jin, YANG Honggeng, LIN Shunfu, et al. Assessment method of harmonic emission level based on covariance characteristic of random vectors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 27-31.
- [16] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平估计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 73-80.
HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Assessing harmonic emission level based on the impedance gathering trend discrimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 73-80.
- [17] IEEE-SA Standards Board. IEEE Std 1459™-2010. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions[S]. New York: Power System Instrumentation and Measurements of IEEE Power and Energy Society, 2010.
- [18] POYNTING J H. On the transfer of energy in the electromagnetic field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1884, 175: 343-361.
- [19] EMANUEL A E. Power definitions and the physical mechanism of power flow[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [20] FRYZE S. Effective, wattless and apparent power in circuits with nonsinusoidal waveforms of current and voltage[J]. Elektrotechnische Zeitschrift, 1932, 53(25): 596-599.
- [21] FILIPSKI P. A new approach to reactive current and reactive power measurement in nonsinusoidal systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1980, 29(4): 423-426.
- [22] CZARNECKI L S. Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1985, 34(3): 399-404.
- [23] AU M T, MILANOVIĆ J V. Development of stochastic aggregate harmonic load model based on field measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 323-330.
-
- 收稿日期: 2016-04-25; 修回日期: 2016-07-11
作者简介:
王莉虹(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为谐波贡献评估与责任划分; E-mail: 903494702@qq.com
肖先勇(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电能质量及其经济损失评估、绿色友好智能电网等;
张逸(1984-), 男, 博士, 研究方向为电能质量分析与控制系统开发;
汪颖(1981-), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量及其控制。E-mail: 769429505@qq.com
(编辑 魏小丽)