

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211434

背景谐波电压环境下的负载谐波电流检测方法

王清亮, 宋曦, 王旭东, 李泓朴

(西安科技大学, 陕西 西安 710699)

摘要: 针对现有谐波电流检测方法未考虑公共连接点处谐波电流的耦合现象而导致谐波治理效果不理想的问题, 提出了一种有效解决该问题的负载谐波电流检测方法。在分析现有检测方法不足的基础上, 借鉴德国 DIN40110-2 标准分解电流的思想, 以谐波电压为基准, 依据等效前后负载消耗有功功率不变的原则, 定义了谐波等效电导、集总谐波电压和集总谐波有功功率。利用希尔伯特变换对谐波电压进行移相。进而定义了集总谐波无功功率和谐波等效电纳, 分解出由背景谐波电压产生的谐波电流。据此, 可检测出负载谐波电流, 实现背景谐波电压环境下对负载谐波电流的补偿。仿真分析及实测数据验证结果表明: 采用所提方法对检测到的谐波电流进行补偿, 可有效提高公共连接点的谐波治理效果。

关键词: 背景谐波电压; DIN 标准; 谐波; 补偿; 谐波等效电导; 谐波等效电纳

A load harmonic current detection method in a background harmonic voltage environment

WANG Qingliang, SONG Xi, WANG Xudong, LI Hongpu

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710699, China)

Abstract: There is a problem in that the existing harmonic current detection method does not consider the coupling phenomenon of the harmonic current at the common connection point. This leads to the unsatisfactory harmonic control effect. Thus this paper proposes a load harmonic current detection method to effectively solve the problem. Having analyzed the shortcomings of existing detection methods, this paper draws on the idea of decomposing current in the German DIN40110-2 standard, takes the harmonic voltage as the benchmark, and according to the principle that the active power consumption of the load before and after the equivalent is unchanged, the harmonic equivalent conductance, the lumped harmonic voltage and the lumped harmonic active power are defined. The Hilbert transform is used to shift the phase of the harmonic voltage. Then the lumped harmonic reactive power and harmonic equivalent susceptance are defined, and the harmonic current generated by the background harmonic voltage is decomposed. Accordingly, the load harmonic current can be detected, and compensation of the load harmonic current in the background harmonic voltage environment can be realized. Simulation analysis and measured data verification results show that the proposed method can effectively improve the harmonic control effect of the public connection point by compensating the detected harmonic current.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777166).

Key words: background harmonic voltage; DIN standard; harmonic; compensation; harmonic equivalent conductance; harmonic equivalent susceptance

0 引言

近年来, 变频调速、软启动类负载以及用户小容量分散式光伏发电的广泛应用, 使得配电网公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)负载侧谐波

电流不断增大^[1-3], 其所产生的谐波主要集中在 20 次以下。与此同时, 在双碳目标背景下, 可再生能源发电将得到大力发展, 大容量光伏、风力发电采用基于 PWM 变流技术直接接入 10 kV 或 35 kV 母线, 由于 PWM 调制频率较高, 所产生的谐波频谱较宽, 造成母线电压畸变, 在 PCC 处产生较高的背景谐波^[4-7]。以上特点使得配电网不仅谐波电流较

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777166)

大, 而且系统电源也出现谐波电压, 两者在 PCC 处通过系统阻抗相互影响和耦合, 导致谐波治理效果不理想。

有源滤波器(Active Power Filter, APF)作为一种动态抑制谐波装置, 是目前中低压配电网谐波治理的常用手段。APF 一般并联接入配电网, 通过检测 PCC 处的谐波电流, 然后注入与谐波电流幅值相等、方向相反的补偿电流, 将电流波形补偿为正弦波形, 达到降低谐波的目的。因此, 谐波电流检测方法是影响补偿效果的关键环节^[8-10], 研究背景谐波电压环境下适用于谐波治理的谐波检测方法对提高配电网安全运行具有重要意义。

目前, 应用 APF 的谐波电流检测方法主要有 3 类: ① 基于傅里叶变换的检测方法^[11-14], 该方法将电流信号分解成各次谐波分量, 进而得到所需的补偿电流信号。② 基于小波变换的检测方法^[15-18]通过将电流信号与小波基函数进行卷积, 对各次谐波信息进行提取。这两类方法的共同点是需首先计算各次谐波分量的幅值和相位, 适用于对低频次主导谐波电流的单次补偿, 但无法满足变流器类谐波电流频谱宽泛的要求。③ 基于瞬时无功功率理论的 $i_p - i_q$ 谐波检测法, 通过坐标变换可以检测出谐波电流总量, 无需分解各次谐波电流信息, 是目前应用最为广泛的谐波检测方法^[19-22], 在非理想电源条件下 $i_p - i_q$ 检测法仍能准确地检测出总谐波电流, 但该方法忽略了背景谐波电压的影响。

本文在分析背景谐波电压环境下现有谐波电流检测方法不足的基础上, 提出一种负载谐波电流检测方法。该方法借鉴德国 DIN40110-2 标准对电流分解的思路, 采用集总等效参数反映负载特性, 结合希尔伯特(Hilbert)变换法, 通过计算谐波等效导纳直接分离背景谐波电压产生的总谐波电流, 达到提高并联型 APF 对配电网谐波补偿效果的目的。

1 现有检测方法分析

APF 通过并联或串联方式接入配电网, 电流源型的谐波治理采用并联方式, 电压源型的谐波治理采用串联方式。负载产生的谐波电流只与自身的非线性特性和运行工况有关, 属谐波电流源, 只有采用并联 APF 才能防止谐波电流注入到配电系统中, 而来自于系统的背景谐波电压属于谐波电压源, 需通过串联 APF 的阻断才能防止谐波电压对负载的影响。本文主要研究并联型 APF 的谐波电流检测方法。

电网对用户的谐波考核点一般设在 PCC 处。图 1 是接有并联型 APF 的配电网谐波等值电路, \mathcal{U}_{sh} 表示含背景谐波电压的非理想电源, k 是 APF 补偿点,

\mathcal{I}_{sh} 表示背景谐波电压产生的谐波电流, \mathcal{I}_{Li} 是由负载产生的谐波电流, \mathcal{I}_{APF} 是 APF 的谐波补偿电流。

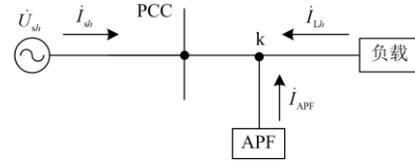


图 1 接有 APF 的配电网谐波等值电路图

Fig. 1 Harmonic equivalent circuit diagram of distribution network with APF

现有的 APF 是以考核点电流波形尽可能接近正弦波形为补偿目标, 即把考核点电流补偿为基波电流。

当系统侧不含背景谐波电压, 只有非线性负载产生谐波电流时, APF 谐波补偿电流为 $\mathcal{I}_{APF} = \mathcal{I}_{Li}$, 考核点的电流就可补偿为正弦波形。此时, 考核点的电流波形和电压波形一致, 从考核点看, 非线性负载被补偿为等效线性负载。

当系统侧含背景谐波电压, 负载是线性负载, APF 需要补偿背景谐波电压作用在线性负载产生的谐波电流, 则谐波补偿电流为 $\mathcal{I}_{APF} = \mathcal{I}_{sh}$ 。经过 APF 补偿后, 考核点的电流被补偿成正弦波形, 但是考核点电压是畸变的, 电压波形和电流波形并不一致, 从考核点看, 相当于将线性负载补偿为一种非线性负载。

当系统侧含背景谐波电压, 负载是非线性负载, APF 需要补偿由非线性负载产生的谐波电流以及背景谐波电压产生的谐波电流, 则谐波补偿电流为 $\mathcal{I}_{APF} = \mathcal{I}_{Li} + \mathcal{I}_{sh}$ 。APF 补偿后, 考核点电压波形是畸变的, 而电流被补偿为基波电流, 从考核点看, 实际上是将非线性负载补偿为另一种非线性负载。

综上所述, 含背景谐波电压条件下, 现有谐波电流检测方法的不足有:

(1) 谐波治理效果不理想。APF 并联到配电网的补偿点处, 只能对考核点的负载谐波电流进行补偿, 对背景谐波电压没有治理作用。按照现有检测方法对谐波电流进行补偿, 实际补偿的是非线性负载及背景谐波电压共同产生的谐波电流, 存在补偿电流过大, 但不具有改善背景谐波电压的效果。

(2) 不符合谐波治理原则。按现有检测方法得到的谐波电流不区分谐波电流来源, APF 虽然将考核点处电流补偿为正弦波形, 但是不满足“谁污染, 谁治理”和“就近治理”的原则, 存在谐波补偿目标不合理的问题。

因此, 背景谐波电压环境下的谐波补偿目标应

调整为考核点电流波形与母线电压波形一致。根据新补偿目标,需探寻合适的负载谐波电流检测方法,以分离由背景谐波电压和负载各自产生的谐波电流。

2 DIN40110-2 标准电流分解方法

德国标准化协会于 2002 年颁布了《交流电理论数值-第二部分:多线电路》标准,即 DIN40110-2 标准。DIN40110-2 标准严格聚焦于负载,其基本思路是:把三相负载等效为以星形连接至参考点的阻值相同的电导,根据等效电导对负载电流进行分解,无论供电电压是否畸变,由此定义的负载集总参数仅由负载性质决定^[23-25]。

DIN40110-2 标准首先建立一个虚拟等效负载,据此定义了三相负载的有功等效电导,有功等效电导在相同时间内吸收的有功功率与三相负载实际吸收的有功功率相等,则有

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T Gu(t)^2 dt \quad (1)$$

式中: P 为有功功率; T 为周期; $p(t)$ 为瞬时功率; G 为有功等效电导; $u(t)$ 为瞬时电压。

为了计算有功等效电导, DIN40110-2 标准将三相系统看作一个整体,定义了集总电压和集总有功功率,分别为

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2} \quad (2)$$

$$P_{\Sigma} = \sum_{k=a,b,c} P_k \quad (3)$$

式中: U_{Σ} 为集总电压; U_a 、 U_b 、 U_c 分别表示各相电压的有效值; P_{Σ} 为集总有功功率; P_k 为各相有功功率。

有功等效电导为

$$G = \frac{P_{\Sigma}}{U_{\Sigma}^2} \quad (4)$$

流过有功等效电导的电流称为有功电流,则

$$i_{kp} = Gu_k \quad (5)$$

式中: i_{kp} 为各相有功电流; u_k 为各相电压。

有功电流是与电源电压波形相似、大小成比例的电流分量,其包含的谐波分量仅和电源电压特性有关。当电源为正弦电压时,无论负载是否为非线性,有功电流均只包含基波分量;在非正弦电压作用下,有功电流也是非正弦波形。

在此基础上,其余电流被分解为对称电流分量、不对称电流分量和正交电流分量。

尽管 DIN40110-2 标准分解得到的电流分量具有明确的物理意义,但侧重于解决负载与电源的

不平衡问题,并未对其余分量进一步分解,也未研究各电流分量的谐波特性。

因此,本文借鉴 DIN40110-2 标准通过集总等效电导实现严格聚焦于负载的思想,对背景谐波电压条件下的 PCC 处谐波电流进行分解,以分离由负载产生的谐波电流、实现考核点电流波形与电压波形一致的谐波补偿目标。

3 负载谐波电流检测方法

根据 DIN40110-2 标准聚焦于负载的思想,本文以 PCC 点谐波电压为基准,在定义谐波等效电导和谐波等效电纳的基础上,对 PCC 处的谐波电流进行分解。

3.1 谐波有功电流计算

将三相负载等效为谐波等效电导,等效原则为相同时间内谐波等效电导吸收的有功功率与负载吸收的有功功率相等,据此将电流分解为两个分量,分别是非谐波有功电流分量和作用于谐波等效电导的谐波有功电流分量。

首先定义集总谐波电压和集总谐波有功功率。集总谐波电压由各相谐波电压构成,集总谐波有功功率是各相谐波有功功率之和,表达式分别为

$$U_{\Sigma h0} = \sqrt{U_{ah0}^2 + U_{bh0}^2 + U_{ch0}^2} \quad (6)$$

$$P_{\Sigma h} = \sum_{k=a,b,c} P_{kh} \quad (7)$$

式中: $U_{\Sigma h0}$ 为集总谐波电压; U_{ah0} 、 U_{bh0} 、 U_{ch0} 分别表示各相谐波电压的有效值; $P_{\Sigma h}$ 为集总谐波有功功率; P_{kh} 为各相谐波有功功率。

由式(6)、式(7)可得谐波等效电导为

$$G_h = \frac{P_{\Sigma h}}{U_{\Sigma h0}^2} \quad (8)$$

式中, G_h 为谐波等效电导。

以 A 相为例,电流被分解为谐波有功电流和非谐波有功电流。

$$i_{aph} = G_h u_{ah0} \quad (9)$$

$$i_{au} = i_{ah} - i_{aph} \quad (10)$$

式中: i_{aph} 为 A 相谐波有功电流; u_{ah0} 为 A 相谐波电压; i_{au} 为 A 相非谐波有功电流; i_{ah} 为 A 相谐波电流。

由上式可知,基于谐波等效电导分解出的谐波有功电流和非谐波有功电流,其物理含义如下:

(1) 谐波有功电流是与背景谐波电压成比例的电流分量,用以反映背景谐波电压在负载上产生的谐波有功电流。谐波有功电流和背景谐波电压波形一致。

(2) 非谐波有功电流包括两部分分量, 一部分是谐波无功电流, 该分量是背景谐波电压导致负载产生的谐波无功电流; 一部分是负载自身产生的谐波电流, 反映负载自身的非线性特性。

3.2 谐波无功电流计算

要完全体现背景谐波电压在 PCC 处所产生的谐波电流, 还需对非谐波有功电流进一步分解。

同样, 以 A 相为例, PCC 处谐波电流可分解为谐波有功电流、谐波无功电流和负载谐波电流, 如图 2 所示, 图中 u_{ah} 表示 A 相的背景谐波电压, i_{aqh} 表示 A 相的谐波无功电流, i_{alh} 表示负载的 A 相谐波电流。

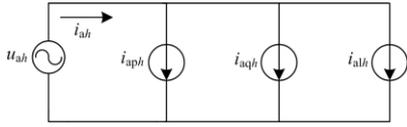


图 2 APF 补偿前谐波电流分解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of harmonic current decomposition before APF compensation

谐波有功电流分量和谐波无功电流分量是由背景谐波电压引起, 这两个电流分量综合反映背景谐波电压作用在负载上引起的谐波电流, 代表了电源电压的畸变程度。

首先计算谐波等效电纳, 进而从非谐波有功电流中分解出谐波无功电流。

(1) 谐波等效电纳

Hilbert 变换相当于一个移相器, 能对电压信号的各频率分量进行准确的 90° 移相, 使得变换后的电压与原电压有相同的振幅谱和功率谱, 适用于计算无功功率^[26-27], 因此本文选取 Hilbert 变换, 从非谐波有功电流中分解出谐波无功电流。

首先定义谐波等效电纳。等效原则是相同时间内谐波等效电纳产生的无功功率与背景谐波电压作用下负载实际消耗的无功功率相等, 即有

$$Q_{\Sigma h} = \frac{1}{T} \int_0^T B_h u_h(t)^2 dt \quad (11)$$

式中: $Q_{\Sigma h}$ 为集总谐波无功功率; B_h 为谐波等效电纳; $u_h(t)$ 为变换后的瞬时谐波电压。

为此, 对谐波电压进行 Hilbert 变换:

$$H[u_h(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u_{h0}(t-\tau)}{t} d\tau = u_{h0}(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (12)$$

式中: $H[u_h(t)]$ 是 $u_{h0}(t)$ 和 $\frac{1}{\pi t}$ 的卷积运算; $u_{h0}(t)$ 为

原瞬时谐波电压。

Hilbert 变换前后电压有效值相同, 则有

$$U_{h0}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T H^2[u_h(t)] dt \quad (13)$$

式中, U_{h0} 是原谐波电压的有效值。

变换后的谐波电压和谐波无功功率的集总表达式分别为

$$U_{\Sigma h} = \sqrt{U_{ah}^2 + U_{bh}^2 + U_{ch}^2} \quad (14)$$

$$Q_{\Sigma h} = \sum_{k=a,b,c} Q_{kh} \quad (15)$$

式中: $U_{\Sigma h}$ 为变换后集总谐波电压; U_{ah} 、 U_{bh} 、 U_{ch} 表示变换后各相谐波电压有效值; Q_{kh} 为各相谐波无功功率。

因此, 谐波等效电纳为

$$B_h = \frac{Q_{\Sigma h}}{U_{\Sigma h}^2} \quad (16)$$

(2) 谐波无功电流

以 A 相为例, 谐波无功电流为

$$i_{aqh} = B_h u_{ah} \quad (17)$$

式中, u_{ah} 为变换后 A 相谐波电压。

3.3 负载谐波电流检测

通过谐波等效电导和谐波等效电纳得到的谐波有功电流和谐波无功电流仅与背景谐波电压有关。则背景谐波电压在 PCC 处产生的谐波电流为

$$i_{ash} = i_{aqh} + i_{aph} \quad (18)$$

PCC 处的负载谐波电流为

$$i_{alh} = i_{ah} - i_{aph} - i_{aqh} \quad (19)$$

由此可得并联型 APF 的谐波电流检测原理, 如图 3 所示。

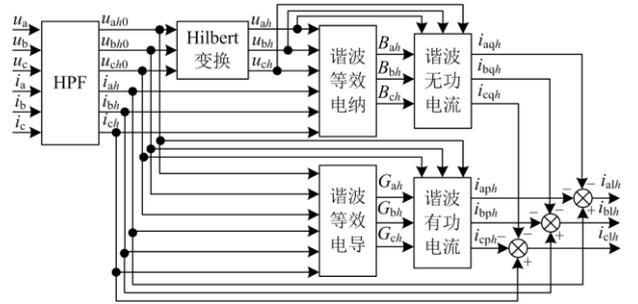


图 3 负载谐波电流检测方法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of load harmonic current detection method

PCC 处的三相电压和三相电流经过高通滤波器(High Pass Filter, HPF)后获得谐波电压和谐波电流, 计算谐波等效电导和谐波等效电纳, 通过谐波

等效导纳可分解出由背景谐波电压产生的谐波有功电流和谐波无功电流,总谐波电流减去背景谐波电压产生的谐波电流后获得负载谐波电流。

4 实验分析

本文采用补偿后考核点的电流畸变率 THD_i 、电压畸变率 THD_u 、谐波补偿电流 ΣI_h 、补偿容量 S_{APF} 及补偿经济性指标 λ_{APF} 来验证检测方法的应用效果。

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1} \times 100\% \quad (20)$$

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1} \times 100\% \quad (21)$$

式中: I_h 为第 h 次谐波电流; I_1 为基波电流; U_h 为第 h 次谐波电压; U_1 为基波电压。

采用谐波补偿电流与负载电流之比表征 APF 补偿的经济性, λ_{APF} 增大表示经济性降低, 即

$$\lambda_{APF} = \frac{\Sigma I_h}{I_L} \times 100\% \quad (22)$$

式中, I_L 为负载电流。

4.1 仿真分析

配电网电压为 380 V, 在 PCC 处接有并联型 APF 和非线性负载, 母线电压含 5、7、13 次背景谐波, 其中 5 次谐波电压为 15 V, 7 次谐波电压为 10 V, 13 次谐波电压为 12 V。在 PCC 处接有两路负载, 负载 1 是非线性负载, 阻抗参数为 $R = 10 \Omega$ 、 $L = 10 \text{ mH}$, 负载 1 产生 5、7、11 次谐波, 5 次谐波电流为 4 A, 7 次谐波电流为 3 A, 11 次谐波电流为 2 A; 负载 2 是线性负载, 负载阻抗参数为 $R = 30 \Omega$ 、 $L = 10 \text{ mH}$ 。

下面以 A 相为例进行分析, APF 补偿前考核点电压和电流波形及频谱如图 4 所示。为了突出谐波分量, 图 4(b)、图 4(d) 中的基波分量没有按实际值标注。受母线背景谐波和负载侧谐波的共同作用, 考核点测试电流包含 5、7、11、13 次谐波。

4.1.1 谐波电流检测分析

根据式(8)、式(16)计算出的谐波等效电导和谐波等效电纳分别是 $G_h = 0.04 \text{ S}$ 、 $B_h = 0.052 \text{ S}$, 据此可分离出由背景谐波电压在补偿点产生的谐波有功电流和谐波无功电流, 如图 5(a)、图 5(b) 所示, 则背景谐波电压在补偿点所产生的总谐波电流如图 5(c) 所示, 对背景谐波电压产生的谐波总电流进行频谱分解, 如图 5(d) 所示。由图 5 可看出, 分解出的谐波电流只含有与背景谐波电压同频次的谐

波分量, 分别是 5、7 和 13 次, 没有 11 次谐波, 这表明根据谐波等效电导和谐波等效电纳计算出的谐波电流只与系统背景谐波电压有关, 不受非线性负载谐波的影响。

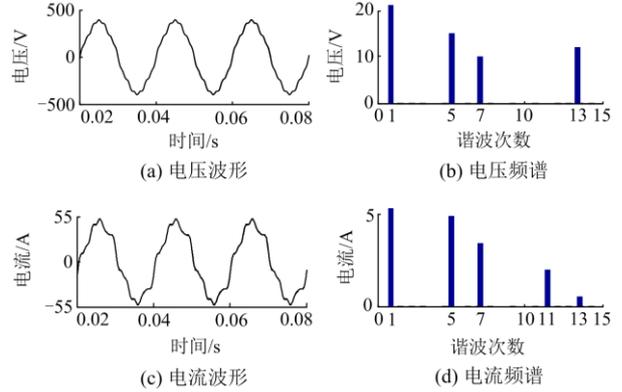


图 4 补偿前考核点电压、电流波形及频谱图

Fig. 4 Diagram of voltage and current waveform and frequency spectra at assessment point before compensation

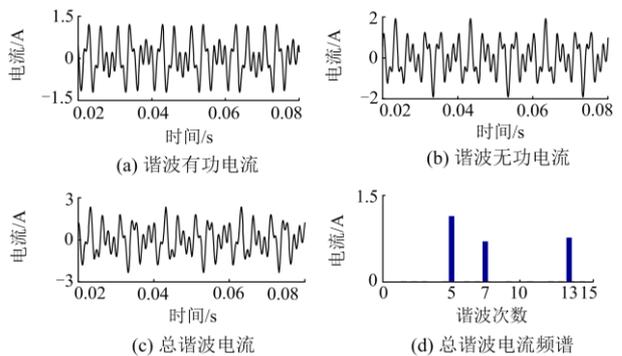


图 5 背景谐波电压产生的谐波电流波形及频谱图

Fig. 5 Waveform and spectrum of harmonic current generated by background harmonic voltage

图 6 所示是检测出的负载谐波电流及其频谱分析。由图 6(b) 可以看出, 分解出的负载谐波电流不含 13 次谐波, 负载谐波电流中的 5 次谐波电流为 4.01 A, 7 次谐波电流为 2.99 A, 11 次谐波电流为 2.01 A, 分别与仿真所设置的各次谐波电流大小一致, 这表明本文方法计算出的负载谐波电流不受背景谐波电压影响。

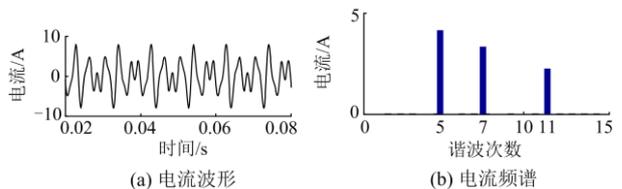


图 6 负载谐波电流波形及频谱分析

Fig. 6 Waveform and spectrum analysis of load harmonic current

因此, 本文所提方法可以将背景谐波电压和负载各自在 PCC 处产生的谐波电流进行分离, 而且直接可检测出需要补偿的谐波电流总量, 为并联型 APF 进行负载谐波电流补偿提供客观的数据依据。

4.1.2 APF 补偿效果分析

图 7 为 APF 补偿后考核点电压与电流波形对比图, 为了表现出对比关系, 图中电压波形按 1:5 的比例缩小, 由于负载呈阻感性, 图中的电流相位滞后于电压相位。

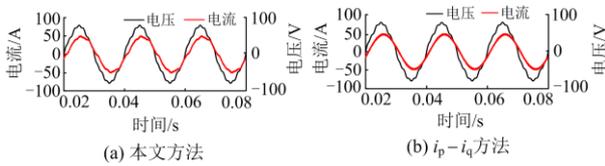


图 7 补偿后考核点电压与电流波形对比图

Fig. 7 Contrast diagram of voltage and current waveform at assessment point after compensation

由图 7(a)可知, 采用本文方法的 APF 进行补偿后, 考核点的电流波形与系统电压波形相似, 表明该电流含有与系统电压相同的谐波成分, 补偿后非线性负载呈线性阻抗特点, APF 只需提供补偿非线性负载产生的谐波电流。

由图 7(b)可知, 采用传统 $i_p - i_q$ 检测法的 APF 进行补偿后, 考核点的电流波形为正弦波形, 电流波形与电压波形不一致, 实际上是将非线性负载补偿为另一种形式的非线性负载, APF 需提供非线性负载的谐波电流和背景谐波电压在负载上产生的谐波电流, 存在过补偿现象, 但对系统侧背景谐波电压并没有改善效果。

表 1 是 APF 分别根据本文方法和 $i_p - i_q$ 方法检测出的谐波电流进行补偿后考核点的指标计算值, 表中的 ΣI_h 代表的是单相补偿电流。采用本文方法进行补偿后, 考核点 THD_i 值与仿真设置的背景谐波电压 THD_u 值接近。相比于 $i_p - i_q$ 法, 采用本文方法 APF 提供的每相补偿电流明显减小, 三相补偿容量减少了 858.00 VA; 本算例负载电流为 27 A, APF 经济性提高了 19.69%, 避免了 APF 过补偿现象。

表 1 考核指标计算值(算例 1)

检测方法	$THD_i / \%$	$THD_u / \%$	$\Sigma I_h / A$	S_{APF} / VA	$\lambda_{APF} / \%$
本文方法	5.47	5.70	5.31	3504.60	19.66
$i_p - i_q$ 法	0.81	5.70	6.61	4362.60	24.48

4.2 实测数据分析

采用某企业谐波电流实测数据进一步验证检测

方法的有效性。该企业供电电压为 6 kV, 系统侧背景谐波电压 THD_u 值为 4.66%, 在母线上有 3 路负载, 负载电流为 31 A, 主要为变频调速类异步电动机, 负载产生 $6k \pm 1$ 次谐波, 其中 5 次谐波电流为 8.3 A, 7 次谐波电流为 2.5 A, 11 次谐波电流为 1.5 A, 13 次谐波电流为 1.1 A。采用 Fluke 1760 电能质量记录仪测试 PCC 处电压、电流, 如图 8 所示。图 9 是采用不同方法补偿后考核点电流波形, 表 2 是 APF 补偿后的指标计算值。

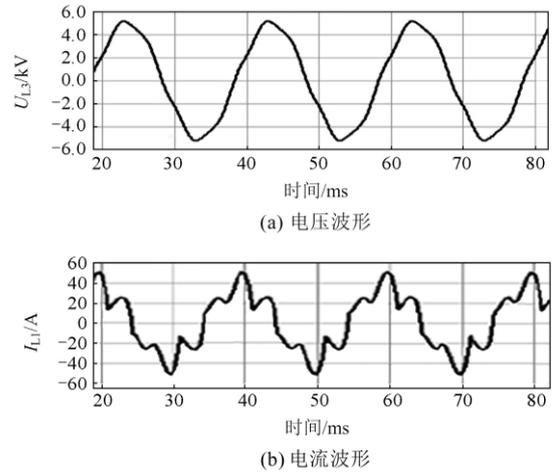


图 8 补偿前测试信号波形

Fig. 8 Signal waveform before compensation

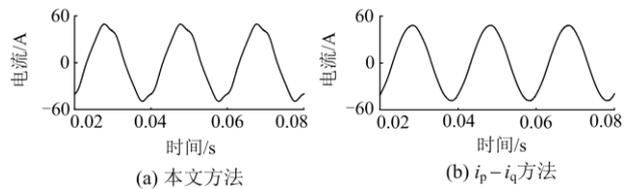


图 9 补偿后考核点电流波形图

Fig. 9 Diagram of current waveform at assessment point after compensation

表 2 考核指标计算值(算例 2)

检测方法	$THD_i / \%$	$THD_u / \%$	$\Sigma I_h / A$	S_{APF} / VA	$\lambda_{APF} / \%$
本文方法	4.34	4.66	8.57	89 062.05	27.64
$i_p - i_q$ 法	0.88	4.66	10.31	107 144.67	33.26

根据图 8、图 9 和表 2 可知, 采用本文方法进行补偿后, 考核点的电流 THD_i 值为 4.34%, 与背景谐波电压 THD_u 值接近, 补偿后考核点电流与电压波形一致, 达到了只补偿负载谐波电流的目标, 与采用 $i_p - i_q$ 法相比, 采用本文方法的 APF 提供三相补偿容量减少了 18 082.61 VA, APF 经济性提高了 19.89%。

5 讨论

本文方法也适用于串联型 APF。串联型 APF 可等效为一个受谐波电流控制的受控电压源,其补偿原理是根据检测到的谐波电流,乘比例系数后获得需要补偿的谐波电压,再通过 PWM 逆变器产生相应的补偿电压。本文分解出的背景谐波电流 i_{ash} 作为 PWM 逆变器产生补偿电压的信号,可克服现有串联型 APF 容量偏大、补偿效果不佳的缺陷。

本文计算出了系统侧背景谐波电压和用户的负载分别在 PCC 处产生的谐波电流,可直接用于区分系统和用户各自的谐波责任,对于减少电能质量纠纷事件、实现依质定价和定制电力服务等提供了依据。

6 结论

本文在分析现有谐波补偿电流检测方法不足的基础上,提出了一种适用于含背景谐波电压的谐波补偿电流检测方法,得到以下结论:

(1) 在背景谐波电压环境下,由于 PCC 处的谐波电流存在耦合现象,按照现有检测方法进行谐波电流补偿时,存在不符合谐波治理原则以及谐波治理效果不理想的问题。

(2) 借鉴 DIN40110-2 标准聚焦于负载电流的思想,引入 Hilbert 变换,通过定义谐波等效电导和谐波等效电纳,对 PCC 点处谐波电流进行解耦,实现了并联型 APF 对负载谐波电流检测的目的。

(3) 本文将考核点电流波形与母线电压波形一致作为 APF 补偿目标,在降低补偿容量的基础上,进一步提高了谐波补偿的效果。

参考文献

- [1] 邵振国, 许昊铂, 肖颂勇, 等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in a new energy power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187.
- [2] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] 阴晓晴, 易皓, 杨泽斌, 等. 基于 SAPF 的电网多节点电压谐波优化补偿方法[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 2-10.
YIN Xiaoqing, YI Hao, YANG Zebin, et al. Optimal compensation method for multi-node voltage harmonics based on SAPF[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 2-10.
- [4] 王晓兰, 侯天玉, 宫玮丽, 等. 基于 Tube 不变集的直流微电网鲁棒模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 9-17.
WANG Xiaolan, HOU Tianyu, GONG Weili, et al. Robust model predictive control of a DC microgrid based on a Tube invariant set[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 9-17.
- [5] NIAN H, BO P. Stability and power quality enhancement strategy for DFIG system connected to harmonic grid with parallel compensation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 1010-1022.
- [6] 年珩, 周骐, 吴超, 等. 双馈风电机组并网运行下谐波电流建模与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5037-5048, 5285.
NIAN Heng, ZHOU Qi, WU Chao, et al. The modeling and characteristic analysis of harmonic current of DFIG based wind turbine in grid-connected mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5037-5048, 5285.
- [7] ESPOSITO G, ZANINELLI D, LAZAROIOU G C, et al. Impact of embedded generation on the voltage quality of distribution networks[C] // 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, October 9-11, 2007, Barcelona, Spain: 1-6.
- [8] 张建忠, 耿治, 徐帅, 等. 一种有源电力滤波器的改进自适应谐波检测算法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4323-4333.
ZHANG Jianzhong, GENG Zhi, XU Shuai, et al. An improved adaptive harmonic detection algorithm for active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4323-4333.
- [9] 李振华, 胡廷和, 杜亚伟, 等. 基于窗函数和谱线插值理论的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 78-88.
LI Zhenhua, HU Tinghe, DU Yawei, et al. Harmonic detection method based on the theory of windows and spectrum line interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 78-88.
- [10] 王雪, 高云广, 齐伶俐, 等. 有源电力滤波器的研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 177-186.
WANG Xue, GAO Yunguang, LIN Lingyan, et al. Research status and prospect of active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 177-186.
- [11] 黄建明, 李晓明. 结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 43-50.
HUANG Jianming, LI Xiaoming. Detection of harmonic in power system based on short-time Fourier transform and spectral kurtosis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 43-50.
- [12] 李得民, 何怡刚. 基于 Nuttall 窗四谱线插值 FFT 的

- 电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 64-71.
- LI Demin, HE Yigang. Harmonic analysis of power system based on Nuttall window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 64-71.
- [13] PLATAS-GARZA M A, DE LA O SERNA J A. Polynomial implementation of the Taylor-Fourier transform for harmonic analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(12): 2846-2854.
- [14] 欧阳瑾, 王钢, 曾德辉. 基于全相位快速傅里叶变换和人工神经网络的电网谐波检测组合优化算法[J]. 广东电力, 2021, 34(3): 98-105.
- OUYANG Jin, WANG Gang, ZENG Dehui. A combined optimization algorithm for power grid harmonic detection based on APFFT and ANN[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(3): 98-105.
- [15] 郭成, 尹轲, 张艳萍, 等. 一种基于综合 DFT 和 Prony 算法的谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 1-9.
- GUO Cheng, YIN Ke, ZHANG Yanping, et al. A harmonic and interharmonic analysis method based on integrated DFT and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 1-9.
- [16] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.
- WU Jianzhang, MEI Fei, CHEN Chang, et al. Harmonic detection method in power system based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 136-143.
- [17] BARROS J, DIEGO R I. Analysis of harmonics in power systems using the wavelet-packet transform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(1): 63-69.
- [18] 王娟, 张尔东, 于广艳. 基于加窗 FFT 和 HWT 算法的谐波检测系统设计[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 189-194.
- WANG Juan, ZHANG Erdong, YU Guangyan. Design of harmonic detection system based on FFT and HWT algorithms[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 189-194.
- [19] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [20] 尹春杰, 王芳, 石磊, 等. 基于瞬时电压矢量定向的有源电力滤波器补偿电流检测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 112-118.
- YIN Chunjie, WANG Fang, SHI Lei, et al. A novel compensation current detection method for APF based on transient voltage space vector orientation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 112-118.
- [21] 张俨, 彭志炜, 雷章勇, 等. 微电网谐波源危害及谐波检测技术[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(6): 27-35, 41.
- ZHANG Yan, PENG Zhiwei, LEI Zhangyong, et al. Harmonic source hazard and harmonic detection technology in microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(6): 27-35, 41.
- [22] MA Wenchuan, ZHANG Shuo, WANG Shuwen, et al. Improved detection method of current component based on instantaneous reactive power theory[C] // 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 27-29, 2012, Shanghai, China: 1-4.
- [23] 亚历山大·艾格列斯·伊曼纽尔. 功率定义及功率流的物理机制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [24] 何学农. 现代电能质量测量技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [25] SPATH H. A general purpose definition of active current and non-active power based on German standard DIN 40110[J]. Electrical engineering, 2007, 89(3): 167-175.
- [26] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁. 基于 Hilbert 变换的非正弦电路无功及瞬时无功率定义[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 35-39.
- XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren. Average and instantaneous reactive power of non-sinusoidal circuit based on Hilbert transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12): 35-39.
- [27] 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.

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2021-12-05

作者简介:

王清亮(1969—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电能质量分析与检测; E-mail: 738423403@qq.com

宋曦(1996—), 男, 硕士, 研究方向为谐波检测与治理。E-mail: 2430540599@qq.com

(编辑 魏小丽)