

基于三角正交法则的SAPF谐波检测方法

陈冬冬,肖龙

(闽南理工学院 电子与电气工程学院,福建 泉州 362700)

摘要:谐波电流检测是有源电力滤波器控制算法生成用于谐波补偿的参考电流的关键环节。提出了一种基于三角正交原理的新型谐波电流检测方法,所提方法与传统的谐波电流检测方法相比,主要优点是结构简单、计算量低和执行时间快。利用电网信号同步的锁相环检测到的相位信号,基于三角正交原理的方法可以提供一种提取参考电流的简便方法。同时,由于所提方法具有更低的实现复杂性和更少的微控制器资源消耗,因此,可以使用低成本微控制器来实现,具有实际工程价值。最后,对提出的方法进行了详细分析,并通过实验结果验证了其有效性和优越的性能。

关键词:并联有源电力滤波器;谐波检测;三角正交原理;谐波补偿

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22640

SAPF Harmonic Detection Method Based on Triangle Orthogonal Principle

CHEN Dongdong, XIAO Long

(School of Electronic and Electrical Engineering, Minnan University of Science and Technology, Quanzhou 362700, Fujian, China)

Abstract: Harmonic current detection is a key issue for shunt active power filter control algorithms, which is to generate reference currents for harmonic compensation. A new harmonic current detection method based on the triangle orthogonal principle was proposed. Compared with traditional harmonic current detection methods, the proposed method has the advantages of simple structure, low calculation, and fast execution time. Using the phase signal detected by the phase-locked loop synchronized with the power grid signal, the method based on the triangle orthogonal principle can provide a simple method to detect the reference current. At the same time, because the method proposed has lower implementation complexity and less microcontroller resource consumption, low-cost microcontrollers can be used to implement, which has practical engineering value. Finally, It analyzes the proposed method in detail and verifies its effectiveness and superior performance through experimental results.

Key words: shunt active power filter (SAPF); harmonics detection; triangle orthogonal principle (TOP); harmonics compensation

由于电力电子技术的进步显著,增加了家庭、商业和工业应用中电力电子变换器的使用,同时也提高电能的利用率。但是,电子电力变换器产生无功和谐波污染电力系统。这种非线性现象会导致大量的功率损耗,不仅会降低电力系统的效率和性能,还会带来其他问题,例如设备过热、敏感设备故障以及共振问题^[1]。并联有源电力滤波器(shunt active power filter, SAPF)被认为是在电力系统中的谐波和无功治理领域中的最佳解决方案^[2]。

图1所示的三相SAPF的控制结构,描述了SAPF的工作过程,该控制系统包括三个主要子系统:谐波电流检测、内环电流控制和外环直流侧电压控制。在这些子系统中,谐波电流检测算法被认为是最关键的模块^[3]。由于参考电流提取是SAPF控制中的第一个算法,因此快速准确地提取谐波电流对于电流控制环路的性能至关重要。精确参考信号的处理使SAPF能够有效地执行谐波和无功补偿。

基金项目:辽宁省自然科学基金重点领域联合开放项目(2019KF2307);泉州市科技计划项目(2020C011R)

作者简介:陈冬冬(1991—),男,博士,副教授,Email:cdd1911@qq.com

通讯作者:肖龙(1988—),男,博士,副教授,Email:584930100@qq.com

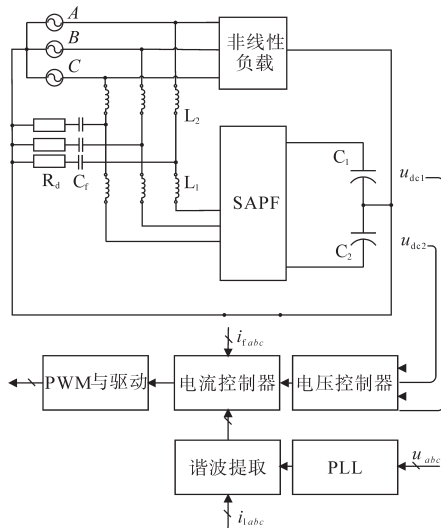


图1 SAPF系统框图

Fig.1 System configuration of SAPF

诸如带通滤波器和低通滤波器之类的模拟滤波器很早就已被应用于谐波电流提取中,但是这些滤波器的输出并不精确,因为它们会引入相位和幅值误差^[4]。现今,谐波电流提取通常在时域或频域二者之一中实现。频域方法往往是基于离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)或升级后的快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)^[5]来实现的。尽管这些方法是准确的,但它们带入系统的延迟使它们对于波动的负载效果并不理想,此外,它们具有的频谱泄漏的缺点也是不能忽略的。另外,基于傅里叶的谐波提取方法在实施中有着复杂的步骤,实现时需要仔细考虑抗混叠滤波器,仔细应用加窗功能,同时基于傅里叶变换的谐波提取算法有着较大的存储和计算能力的要求,以及在基频和采样之间要求进行适当的同步^[6]。时域方法比频域方法更可取,因为它们实现起来简单、快捷,因此基于时域的方法,例如瞬时无功功率理论(instantaneous reactive power theory, IRPT)和同步参考坐标(synchronized reference frame, SRF)^[7]等方法仍然是普遍的谐波电流提取方法。这些经过良好测试的方法实现起来相对简单,但算法中引入的低通滤波器会引起较大的幅值和相位误差。而基于模糊控制、自适应算法、神经网络算法^[8]等谐波提取方法也有着良好的性能,动态响应比基于傅里叶变换的谐波提取算法更好,但是这些方法的实现复杂性仍然是一个问题。

三角正交法则是用于描述两个函数乘积在一定周期内积分等于0的特征,其常用于锁相环、

电力系统谐波分析等应用中,用于在复杂电网电压环境中锁定基波相位^[9-10]。

本文提出了一种时域谐波提取方法,将三角正交原理(triangle orthogonal principle, TOP)用于谐波提取,解决了传统方法的上述问题。所提出的基于TOP的谐波提取方法为参考电流估计提供了更简单的数字实现,并具有较低的计算量。因此,所提出的基于TOP算法是一种结构简单且计算量低的谐波提取方案,该方案可以在低成本微控制器中轻松实现。因此,可以基于此算法设计出高性能和低成本有源电力滤波器谐波检测系统。

1 三角正交谐波提取算法

SAPF的基本原理见图1,其中电网电流可以表示为负载电流和SAPF补偿电流的和,即

$$i_s(t) = i_L(t) + i_C(t) \quad (1)$$

式中: $i_s(t)$ 为电网电流; $i_L(t)$ 为负载电流; $i_C(t)$ 为补偿电流。

非线性负载电流由谐波分量和基波分量组成,由傅里叶级数表示为

$$\begin{aligned} i_L(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ &= I_1 \sin(\omega t) \cos\varphi_1 + I_1 \cos(\omega t) \sin\varphi_1 + \\ &\quad \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ω 为基波频率, $\omega=100\pi$ rad/s; I_1 为负载电流基波分量幅值; I_n 为负载电流 n 次谐波幅值; φ_n 为 n 次谐波的相位。

而第二个等式中的第一项和第二项分别是负载基波电流的有功和无功分量,第三项则代表负载电流的谐波。SAPF的功能是提供负载电流的无功分量和谐波分量,电网电流则仅提供有功分量,如下式:

$$i_{\text{sactive}}(t) = I_1 \sin(\omega t) \cos\varphi_1 \quad (3)$$

因此,电网电流通过SAPF补偿成纯正弦波并与电网电压同相。非线性负载的负载电流由频率不同的谐波成分组成,这些谐波分量彼此正交。基波分量的提取是通过消除叠加的谐波获得的。一种简单的方法是应用三角正交性原理,该原理指出两个正交函数(y_1, y_2)的乘积的积分等于0。在数学上,如果两个三角函数在 $[-\pi, \pi]$ 中正交,则它们积的积分为零。

考虑两个正弦函数及其在 $[-\pi, \pi]$ 中的内积积分:

$$(y_1, y_2) = \int_{-\pi}^{\pi} y_1(t)y_2(t)dt \quad (4)$$

上面的乘积得到一个奇函数,该奇函数在 $[-\pi, \pi]$ 上对称,因此 $\sin(\omega t)$ 和 $\cos(\omega t)$ 彼此正交,并且它们的积分为0,如下式:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \sin(\omega t)\cos(\omega t)d(\omega t) = 0 \quad (5)$$

另外,只要 $n \neq k$,且两者均为整数, $\sin(n\omega t)$ 就与 $\sin(k\omega t + \varphi)$ 和 $\cos(n\omega t)$ 正交。

类似地,负载电流也由具有不同频率的电流分量组成,通常称之为谐波分量。因此,通过应用该原理,可以提取负载电流的任何分量。而在SAPF应用当中,可以用于提取基波分量的有功电流,然后从负载电流中减去基波有功电流以生成参考电流。因此,所获得的参考电流(包括谐波和无功电流分量)用作SAPF的参考电流。

为了提取负载电流中的基波,将 $i_L(t)$ 乘以 $\sin(\omega t)$,得到:

$$i_L(t)\sin(\omega t) = I_1\sin(\omega t + \varphi_1)\sin(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n\sin(n\omega t + \varphi_n)\sin(\omega t) \quad (6)$$

两边积分得到:

$$\int_{-\pi}^{\pi} i_L(t)\sin(\omega t)d(\omega t) = \int_{-\pi}^{\pi} I_1\sin(\omega t + \varphi_1)\sin(\omega t)d(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} I_n\sin(n\omega t + \varphi_n)\sin(\omega t)d(\omega t) \quad (7)$$

根据正交原理,谐波成分乘积的积分等于0,因此得:

$$\int_{-\pi}^{\pi} i_L(t)\sin(\omega t)d(\omega t) = \int_{-\pi}^{\pi} I_1\sin(\omega t + \varphi_1)\sin(\omega t)d(\omega t) = \frac{1}{2}I_1 \int_{-\pi}^{\pi} [\cos\varphi_1 - \cos(2\omega t + \varphi_1)]d(\omega t) \quad (8)$$

由于二次项在1个周期内的积分也为0,因此有:

$$\int_{-\pi}^{\pi} i_L(t)\sin(\omega t)d(\omega t) = \frac{1}{2}I_1 \int_{-\pi}^{\pi} \cos\varphi_1 d(\omega t) = \pi I_1 \cos\varphi_1 \quad (9)$$

类似地,将式(2)乘以两边的 $\cos(\omega t)$,得到:

$$\int_{-\pi}^{\pi} i_L(t)\cos(\omega t)d(\omega t) = \frac{1}{2}I_1 \int_{-\pi}^{\pi} \sin\varphi_1 d(\omega t) = \pi I_1 \sin\varphi_1 \quad (10)$$

合并式(9)和式(10),可以得到负载电流 $i_L(t)$ 的基波分量:

$$i_1(t) = I_1\cos\varphi_1\sin(\omega t) + I_1\sin\varphi_1\cos(\omega t) \quad (11)$$

因此,根据基于正交定理的谐波电流检测原理,瞬时基波电流可以写为

$$i_1(t) = A_1\sin(\omega t) + B_1\cos(\omega t) \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_L(t)\cos(\omega t)d(\omega t) \\ B_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_L(t)\sin(\omega t)d(\omega t) \end{cases} \quad (13)$$

因此负载电流的谐波含量为

$$i_h(t) = i_L(t) - i_1(t) \quad (14)$$

2 基于三角正交原理的谐波提取策略

2.1 谐波提取策略

根据第1章的分析,基于三角正交的谐波提取原理需要提供电网相位信号,该信号可以由SAPF系统控制环中的锁相环中取得,之后再对相应的乘积做积分运算即可得到负载中的基波电流值,进而与负载电流求差值得到谐波参考电流。整个谐波提取流程如图2所示。

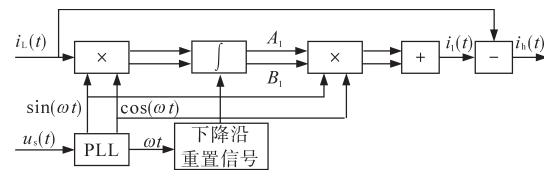


图2 SAPF谐波提取流程

Fig.2 The detection process of SAPF harmonic

如图2所示,本文利用锁相环得到相位和电网同步信号,进行谐波提取,积分环节利用锁相环得到的相位信号进行积分重置,得到每个周期的积分值,得到负载信号中的有功及无功信号幅值,最终合并成为基波电流值。需要指出的是,若SAPF需要补偿无功信号,则可以仅计算负载电流有功值,从而在参考信号中计入基波无功信号作为补偿值以完成负载无功补偿。

2.2 与传统谐波提取方法的比较

效率是评估谐波提取算法的另一个重要标准。为了证明所提出的基于TOP的算法在有源电力滤波器应用中的优越性,与常用的基于SRF的算法进行了比较。

为了进行详细的比较,表1中列出了2种类型的方案所占用的计算资源,其中在SRF方案中

采用运算量较低的二阶低通滤波器作为算法实现所需的低通滤波环节进行公平比较。

表1 算法资源占用比较

Tab.1 Comparison of occupied resources

提取算法	乘法器	加法器
TOP	6	5
SRF	10	8

表1中的数据验证了上述分析,基于TOP的算法在计算资源方面对比传统的SRF算法有着明显的优势。

进一步的,提出的基于TOP的算法的效率也可以通过数字信号处理器中的执行时间来验证。采用DSP(TI-TMS320F28335),基于TOP的算法和传统的SRF算法的提取谐波实际执行时间分别为 $3.2\ \mu\text{s}$ 和 $5.67\ \mu\text{s}$ 。显然,基于TOP的方法在DSP芯片中的算法执行时间更短,执行速度更快。

3 实验验证

为了验证所提出方法的有效性,在实验室中设计了一个三相四线制SAPF样机,以验证提出的谐波电流提取算法。硬件设置的配置如图3所示,样机的主要参数为:电网线电压 $u_s=220\ \text{V}$,电网频率 $f_s=50\ \text{Hz}$,直流侧电容 $C_{dc}=2\ \text{mF}$,逆变侧电感 $L_1=130\ \mu\text{H}$,网侧电感 $L_2=30\ \mu\text{H}$,滤波电容 $C_f=30\ \mu\text{F}$,直流侧电压 $V_{dc}=750\ \text{V}$,SAPF开关频率 $f_{sw}=15\ \text{kHz}$ 。

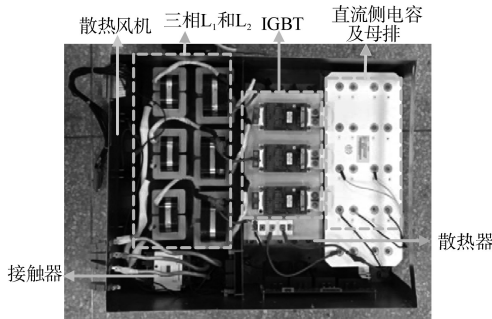


图3 SAPF样机图片

Fig.3 Picture of SAPF

利用所提出的谐波检测方法检测负载电流的基波以及谐波,利用DSP的AD模块进行采样,计算相应基波和谐波值,并通过控制板上的外设DA模块对计算结果进行输出,实验结果如图4和图5所示。图4说明了使用提出的TOP算法提取的负载电流基波分量;负载电流减去所得的基波电流可以得到相应的谐波,如图5所示,它将用作SAPF补偿中的谐波参考电流。

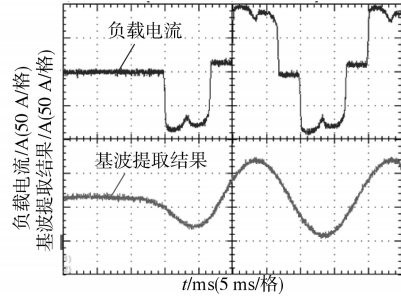


图4 基于TOP的基波电流检测实验结果

Fig.4 Experimental results of fundamental current detection based on TOP

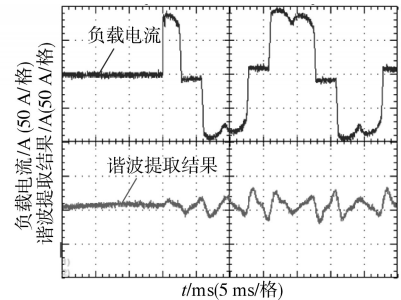


图5 基于TOP的谐波电流检测实验结果

Fig.5 Experimental results of harmonic detection based on TOP

将图5中所提取的谐波参考电流用于SAPF补偿,完成对非线性负载的谐波补偿。补偿稳定后,系统的负载电流、SAPF补偿电流及补偿后的电网电流如图6~图8所示。

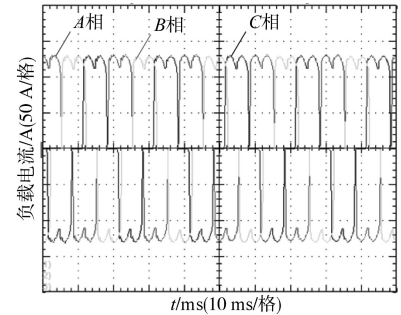


图6 三相负载电流波形

Fig.6 Three-phase load current waveforms

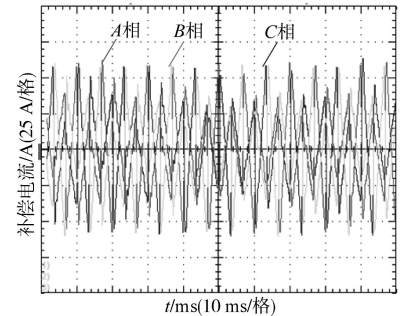


图7 三相SAPF补偿电流波形

Fig.7 Three-phase SAPF compensation current waveforms

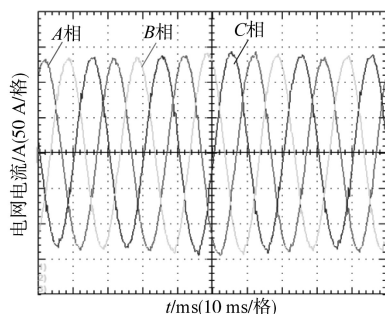


图8 三相补偿后电网电流波形

Fig.8 Three-phase grid current waveforms after compensation

图6~图8显示了利用提出的TOP谐波提取方法的SAPF的补偿性能,其中补偿后电网电流的呈正弦特性且THD低于5%,验证了所提基于TOP的谐波提取方法的有效性。

4 结论

本文提出了一种基于TOP原理的谐波提取新方法。文中详细讨论了TOP用于谐波检测的基本原理,并将所提方法的性能结合SAPF的控制环,提出了相应的谐波提取策略。实验结果验证了该方法在准确性、动态性和易于实现等方面的优越性。但值得注意的是,本方法缺少选择性谐波补偿能力,未来将对该方法选择性谐波补偿能力进行深入研究。

参考文献

[1] Chen Dongdong, Chen Hao, Hu Yaowei, *et al.* A novel serial structure repetitive control strategy for shunt active power filter [J]. *COMPEL International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2019, 38(1): 199-215.

[2] 陈冬冬. 高性能模块化并联有源电力滤波器若干关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.

Chen Dongdong. Research on some key technologies of high performance modular shunt active power filter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[3] 张茂松, 池帮秀, 李家旺, 等. 有源电力滤波器基于准比例谐振的电流协调控制策略研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(5): 1614-1623.

Zhang Maosong, Chi Bangxiu, Li Jiawang, *et al.* Study on quasi-

PR current coordinated control for active power filter[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1614-1623.

- [4] 叶志明, 董伯藩, 钱照明. 谐波电流的提取方法比较[J]. *电力系统自动化*, 1997(12): 21-24, 40.
- Ye Zhongming, Dong Bofan, Qian Zhaoming. Comparison of two approaches for harmonic current extraction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1997(12): 21-24, 40.
- [5] Chen Dongdong. An improved harmonics detection method based on sliding discrete Fourier transform for three-phase grid-tie inverter system[J]. *IEICE Electronics Express*, 2019, 16(3): 20181074.
- [6] 周滢. 基于小波变换和加窗傅里叶的谐波分析[D]. 南京:南京信息工程大学, 2012.
- Zhouying. Harmonic analysis based on wavelet transform and windowed Fourier transform[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Engineering, 2012.
- [7] 王勇, 刘正春, 尹志勇, 等. 抗频率波动的有源电力滤波器谐波补偿控制方法[J]. *高电压技术*, 2019, 45(10): 3290-3299.
- Wang Yong, Liu Zhengchun, Yin Zhiyong, *et al.* Harmonic compensation control methods of active power filter with anti-frequency fluctuation characteristics[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(10): 3290-3299.
- [8] 王硕, 康劲松. 一种基于自适应线性神经网络算法的永磁同步电机电流谐波提取和抑制方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(4): 654-663.
- Wang Shuo, Kang Jinsong. Harmonic extraction and suppression method of permanent magnet synchronous motor based on adaptive linear neural network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(4): 654-663.
- [9] 陈勇, 高玉文, 陈章勇. 一种自适应同步滤波器和正交锁相环相结合的滑模观测器[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(2): 265-274.
- Chen Yong, Gao Yuwen, Chen Zhangyong. Sliding mode observer based on combination of adaptive synchronization filter and quadrature phase locked loop[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(2): 265-274.
- [10] 李华, 杨湘江. 非整数次谐波涉及的三角函数的正交性探讨[J]. *电测与仪表*, 2010, 47(1): 5-8.
- Li Hua, Yang Xiangjiang. Discussion on the integral characteristics of trigonometric function relative to harmonics with non-integer orders[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2010, 47(1): 5-8.

收稿日期:2020-11-06

修改稿日期:2020-12-04