

# 特定次谐波滤除锁相在有源电力滤波器中的应用

黄海宏<sup>1</sup>, 魏阳超<sup>1</sup>, 王海欣<sup>1</sup>, 陈洋<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 国网日照供电公司, 山东 日照 276826)

**摘要:**针对电网电压不平衡和网侧电压特定次谐波含量较高的情况,在传统的基于双二阶广义积分器的锁相环(DSOGI-PLL)前级加入谐波滤除级,可完全滤除特定次谐波,并且在电网电压不平衡的情况下,能准确检测网侧电压的频率和相位信息。将该锁相方法应用于有源电力滤波器(APF)中,提出了一种电流特定次谐波检测算法。该算法简化了计算,省去对滤波器的设计,能准确检测出电流特定次谐波。最后,通过仿真和实验验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:**特定次谐波;锁相环;有源电力滤波器;双二阶广义积分器;谐波检测;谐波分析

**中图分类号:**TN 713

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201912028

## 0 引言

谐波检测是有源电力滤波器(APF)算法研究<sup>[1-3]</sup>中的重要环节,目前广泛应用的谐波检测算法<sup>[4-6]</sup>很大一部分依赖于锁相的准确性。但是电网由于谐振、故障等外界因素干扰,会出现电网电压不对称和电网电压畸变等情况,APF需要在这些工况下准确锁相。

常用的锁相方法有单同步坐标锁相(SSRF-PLL)<sup>[7]</sup>,该方法能够准确检测电网电压的频率和相位,但是当电网出现电压不平衡和谐波干扰时,会产生频率和相角波动。基于双同步旋转坐标系的软件锁相(DDSRF-PLL)能够在电网电压不对称的情况下完成锁相,但是当电网谐波含量较多时需引入低通滤波器来抑制谐波,这会影响系统的动态性能并大幅增加运算量。基于双二阶广义积分器的锁相环(DSOGI-PLL)<sup>[8]</sup>能够在电网电压不平衡和含谐波干扰时完成锁相,但是若特定次谐波含量过高时依然会产生频率和相位的波动。本文在DSOGI-PLL前级加入谐波滤除级,提出了一种特定次谐波滤除锁相方法,该锁相环可在电网电压不平衡情况下分离正负序,并且能在电网电压含特定次谐波时根据要求完全滤除特定次谐波,同时抑制频率、相位和电压各种分量的波动。

在很多高电压大容量的场合经常先用无源滤波器进行滤波,剩余特定次谐波用APF滤除<sup>[9-10]</sup>。此时若仍采用传统的全谐波补偿模式将会增加滤波装置的负担,因此本文提出一种电流特定次谐波检测算法,其简化了计算,省去对低通滤波器滤波器的设计,能准确检测出电流特定次谐波。

收稿日期:2018-02-10;修回日期:2018-08-10  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177037)  
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177037)

## 1 特定次谐波滤除锁相

### 1.1 基于二阶广义积分器的正交发生器

当电网电压不平衡时,需对其进行正负序分离,再对电网基波正序电压进行锁相。图1为基于二阶广义积分器的正交发生器(SOGI-QSG),其主要通过构建基于内模原理的自适应滤波器来产生和输入信号相差90°的信号以实现正负序分离,此外SOGI-QSG还具有一定的谐波滤除功能。图中 $v$ 为系统输入信号, $v'$ 为系统输出信号, $\hat{\omega}$ 为系统的谐振角频率, $q=e^{-j\pi/2}$ 。

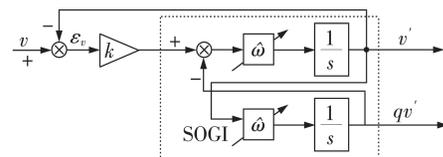


图1 基于二阶广义积分器的正交发生器

Fig.1 Quadrature signal generator based on SOGI

由文献[11]知二阶广义积分器具有带通滤波特性, $k$ 越小,滤波效果越佳,但动态响应速度会变慢,兼顾滤波效果和动态性能可取 $k=1.414$ 。因二阶广义积分器为带通滤波器,当高次谐波或特定次谐波含量过高时,SOGI-QSG并不能很好地滤除该谐波,因此需要寻找一种能完全滤除特定次谐波的改进模块。

### 1.2 谐波滤除级

当电网电压不平衡且输入信号中含有 $m$ 次特定谐波时,可将输入信号表示为:

$$\begin{cases} v_{\alpha} = v_{\alpha}^{+} + v_{\alpha}^{-} + v_{\alpha}^m \\ v_{\beta} = v_{\beta}^{+} + v_{\beta}^{-} + v_{\beta}^m \end{cases} \quad (1)$$

其中, $v_{\alpha}^{+}$ 、 $v_{\beta}^{+}$ 为输入信号的正序基波分量; $v_{\alpha}^{-}$ 、 $v_{\beta}^{-}$ 为输入信号的负序基波分量; $v_{\alpha}^m$ 、 $v_{\beta}^m$ 为输入信号的 $m$ 次谐波分量。

已知当SOGI-QSG的谐振频率与输入信号的基

波频率相等即  $\hat{\omega} = \omega$  时,系统能无静差地跟踪频率为  $\hat{\omega}$  的输入信号。故式(1)中的输入信号经过 SOGI-QSG 模块后基波正序和负序分量的幅值和相位都不会发生变化,而  $m$  次谐波分量经过 SOGI-QSG 模块后依然会存在,但幅值和相位都发生了变化,如式(2)和式(3)所示。

$$\begin{cases} v'_\alpha = v_\alpha^+ + v_\alpha^- + v_\alpha'^m \\ qv'_\alpha = v_\beta^+ - v_\beta^- + v_\beta'^m/m \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} v'_\beta = v_\beta^+ + v_\beta^- + v_\beta'^m \\ qv'_\beta = -v_\alpha^+ + v_\alpha^- - v_\alpha'^m/m \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $v_\alpha'^m$ 、 $v_\beta'^m$  为与  $v_\alpha^m$ 、 $v_\beta^m$  幅值相同、相位不同的输出谐波分量。观察可知,虽然谐波分量的幅值和相位都发生了改变,但谐波分量的幅值仅随谐波次数发生改变。并且分析各式谐波分量的关系可知,  $m$  倍的

$qv'_\beta$  与  $v'_\alpha$  相加可消去对应次谐波分量,  $v'_\beta$  减去  $m$  倍的  $qv'_\alpha$  也可消去对应次谐波分量,因而得到:

$$\begin{cases} v''_\alpha = v'_\alpha + mqv'_\beta = (1-m)v_\alpha^+ + (1+m)v_\alpha^- \\ v''_\beta = v'_\beta - mqv'_\alpha = (1-m)v_\beta^+ + (1+m)v_\beta^- \end{cases} \quad (4)$$

观察式(4)可知,适当的数学运算可消除被控信号的谐波分量,而基波分量的幅值虽发生变化,但可通过系数进行校正,基波分量的相位不发生偏移。若将此数学运算加入 DSOGI-PLL 的前级便可滤除特定次谐波,并且不影响对被控信号的锁相,由此得到了滤除级,如图2中左侧虚框部分所示。

### 1.3 特定次谐波滤除锁相结构

将谐波滤除级加入传统 DSOGI-PLL 的前级,组成特定次谐波滤除锁相,其完整结构如图2所示。

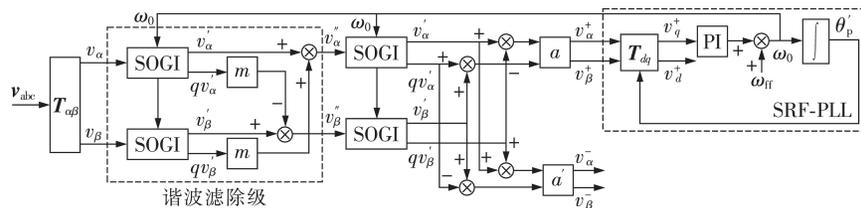


图2 特定次谐波滤除锁相

Fig.2 Specific harmonic filtering phase lock

锁相环由谐波滤除级、SOGI-QSG级、正负序分离级和锁相级组成。其中谐波滤除级用于滤除网侧电压特定次谐波;SOGI-QSG级和正负序分离级用于产生正交信号以实现网侧电压的正负序分离;锁相级是利用帕克变换将网侧正序基波电压变换到  $dq$  坐标系下,通过无功分量跟踪0来实现锁相<sup>[12]</sup>。锁相环中将电网电压角速度  $\omega_{\text{ref}}$  作为前馈是为了提高锁相的动态性能。

可知,谐波滤除级中电网电压的幅值发生了改变,故要计算校正系数以保证正负序分离级输出的电压幅值不变。分析式(4)得校正系数的计算公式如式(5)所示。

$$\begin{cases} a = \frac{1}{1-m} \\ a' = \frac{1}{1+m} \end{cases} \quad (5)$$

将正负分离后的正序电压乘以  $a$  可得实际正序电压,正负分离后的负序电压乘以  $a'$  可得实际负序电压。

## 2 特定次谐波检测算法

在很多高电压大容量的场合经常先用无源滤波器进行滤波,剩余的特定次谐波用 APF 滤除。此时,为避免增加滤波装置的负担,需设计一种能够检测特定次谐波的检测算法。本文在特定次谐波滤除锁

相的基础上提出一种特定次谐波检测算法,其计算量小,可省去对低通滤波器的设计,并且在电网电压不平衡和含特定次谐波时都能有良好的检测效果。

下面以电网负载电流  $i_a(t)$  的4次谐波为例,推导4次谐波分量的检测方法。 $i_a(t)$  的通用表达式如式(6)所示。

$$\begin{aligned} i_a(t) &= I \cos(\omega t + \phi) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \phi_n) + \\ &\sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) = I \cos(\omega t + \phi) + \\ &I_4 \cos(4\omega t + \phi_4) + I_4 \sin(4\omega t + \phi_4) + I_{h(n \neq 4)} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $I$ 、 $I_4$ 、 $I_n$  和  $\varphi$ 、 $\varphi_4$ 、 $\varphi_n$  分别为负载电流基波分量、4次谐波分量、 $n$ 次谐波分量的幅值和相角。

电网电流的4次余弦分量为:

$$\begin{aligned} I_{s \cos 4}(t) &= i_a(t) \cos(4\omega t) = [I \cos(\omega t + \phi) + \\ &I_4 \cos(4\omega t + \phi_4) + I_4 \sin(4\omega t + \phi_4) + \\ &I_{h(n \neq 4)}] \cos(4\omega t) = \\ &\frac{I}{2} [\cos \phi_4 + \cos(10\omega t + \phi_4) + \\ &\sin(10\omega t + \phi_4) + \sin \phi_4] + [I \cos(\omega t + \phi) + \\ &I_{h(n \neq 4)}] \cos(4\omega t) \end{aligned} \quad (7)$$

同理可得电网电流的4次正弦分量为:

$$\begin{aligned}
 I_{s \sin_4}(t) = i_a(t) \sin(4\omega t) = & \left[ I \cos(\omega t + \phi) + \right. \\
 & I_4 \cos(4\omega t + \phi_4) + I_4 \sin(4\omega t + \phi_4) + \\
 & \left. I_{h(n \neq 4)} \right] \sin(4\omega t) = \frac{I}{2} \left[ \sin(8\omega t + \phi_4) - \right. \\
 & \left. \sin \phi_4 + \cos \phi_4 - \cos(8\omega t + \phi_4) \right] + \\
 & \left[ I \cos(\omega t + \phi) + I_{h(n \neq 4)} \right] \sin(4\omega t) \quad (8)
 \end{aligned}$$

在一个基波周期  $T$  内分别对电网电流的4次余弦分量和正弦分量求平均值,得:

$$\bar{I}_{s \cos_4} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{s \cos_4}(t) dt = \frac{I_4}{2} (\cos \phi_4 + \sin \phi_4) \quad (9)$$

$$\bar{I}_{s \sin_4} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{s \sin_4}(t) dt = \frac{I_4}{2} (\cos \phi_4 - \sin \phi_4) \quad (10)$$

结合式(9)和式(10)有:

$$I_4 = \sqrt{2(\bar{I}_{s \cos_4}^2 + \bar{I}_{s \sin_4}^2)} \quad (11)$$

$$\phi_4 = \arctan \frac{I_{s \sin_4}}{I_{s \cos_4}} \quad (12)$$

由此得到负载电流4次谐波分量的幅值和相角,即可对检测到的特定次谐波进行相应的补偿<sup>[13-14]</sup>。虽然本文中仅以4次谐波分量进行分析,但该方法可在电网电压不平衡的情况下对其他任意次谐波检测使用,并且计算量小,准确度高。

### 3 仿真与实验分析

#### 3.1 仿真分析

为进一步验证上述分析的正确性及可行性,在 MATLAB / Simulink 平台搭建了 APF 仿真系统。系统主要仿真参数如下:网侧线电压 380 V;交流侧电感 2 mH;直流侧电压 750 V;直流侧电容 2.5 mF;系统采样频率 18 kHz。

仿真过程中,网侧电压给定单相40%电压跌落。分别以4次、5次谐波为例,每组每相电压分别加入12%的4次和5次谐波进行对比分析。考虑到网侧电压谐波对线性负载和非线性负载的影响不同,仿真采用2组负载进行实验:一组是网侧接入50 Ω三相对称纯阻性负载;另一组是网侧接入三相不控整流桥,整流桥直流侧为50 Ω电阻和4 mH电感串联。在0.12 s前采用DSOGI-PLL,在0.12 s后采用特定次谐波滤除锁相环,含4次谐波时仿真波形如图3所示,含5次谐波时仿真波形如附录A中的图A1所示。

由图3可见,当网侧电压含4次谐波时,改进的锁相环能准确跟踪网侧电压的频率和相位,并能准确分离网侧电压的正序分量和负序分量。0.12 s前各仿真量有明显波动,当0.12 s采用特定次谐波滤除锁相环后,波动被明显抑制。当网侧电压含5次谐波时,相较于4次谐波,0.12 s前各仿真量的波动频率明显更高,但采用特定次谐波滤除锁相环后,仍

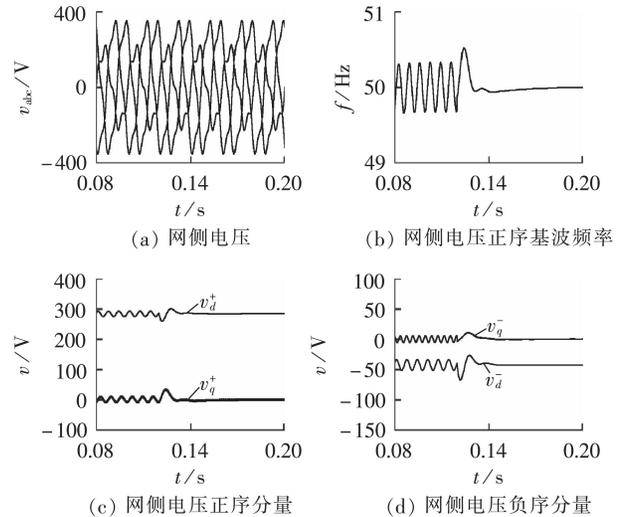


图3 4次谐波时2种锁相环仿真波形对比

Fig.3 Comparison of two phase-locked loop simulation waveforms under fourth harmonics

能抑制波动并同步电网电压信息。

图4为采用特定次谐波检测算法对网侧电流补偿前后的对比,同样分别以4次和5次谐波为例,0.15 s后开始进行补偿。由图4可以看出,无论是4次谐波或5次谐波,无论线性或非线性负载,特定次谐波检测算法都能准确地检测指定次谐波并进行补偿。

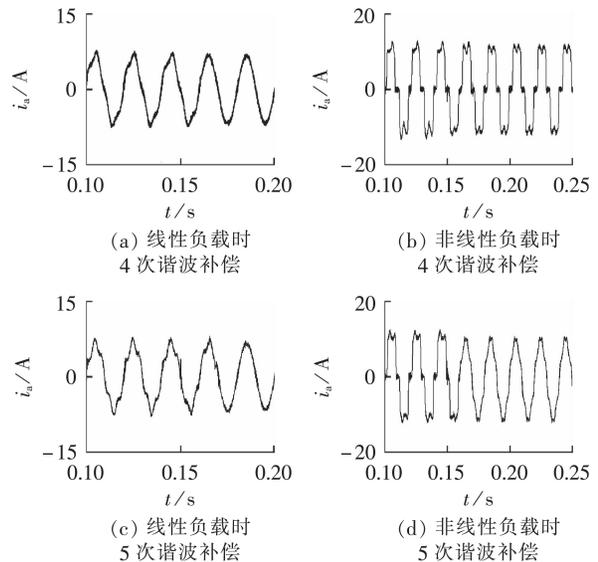


图4 采用特定次谐波检测算法补偿的网侧电流

Fig.4 Grid current compensated by specific harmonic detection method

#### 3.2 实验验证

搭建实验平台以进一步验证特定次谐波滤除锁相环在 APF 中的应用效果。系统采用 TI 公司的 TMS320F2812 系列 DSP 芯片进行核心控制,采用三相可编程电源提供网侧不平衡电压和谐波电压, APF 实验平台的主要参数取值和仿真中的主要参数

取值一致。

在电网电压不平衡且含4次谐波的情况下,采用2种锁相的实验波形对比如图5所示。可以看出,DSOGI-PLL虽能大致检测到网侧电压信息,但频率和电压的各种分量还是存在明显波动。而特定次谐波滤除的锁相能完全滤除特定次谐波,有效地抑制了频率和电压各种分量的波动。

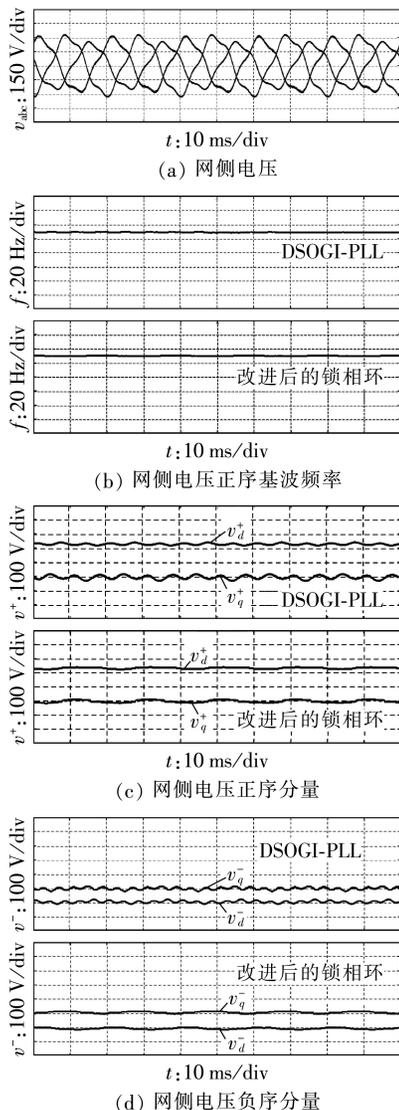


图5 4次谐波时实验波形

Fig.5 Experiment waveforms under fourth harmonic

当网侧电压含5次谐波时,采用2种锁相的实验波形对比如附录A中图A2所示。可以看出,含5次谐波时,采用DSOGI-PLL的各个量的波动频率更高,但采用特定次谐波滤除的的锁相环后,仍能抑制各个量的波动并同步电网电压信息。

图6为采用特定次谐波检测算法补偿的网侧电流波形。由电流补偿效果可知,在对电压频率和相位进行准确检测的前提下,无论是线性和非线性负载或者4次和5次谐波,都能按要求准确检测出特定

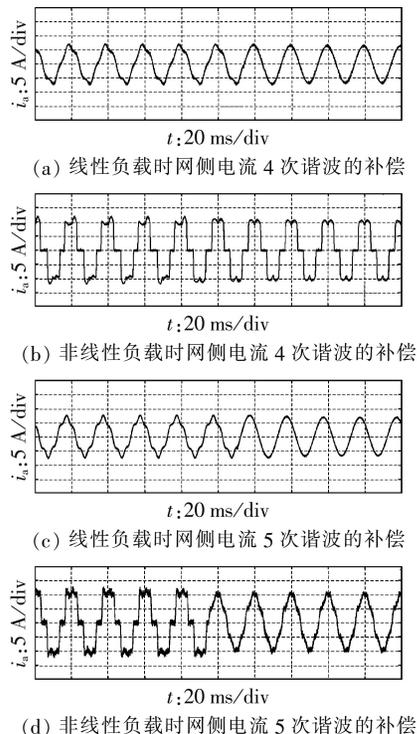


图6 采用特定次谐波检测算法补偿的网侧电流

Fig.6 Experimental waveforms of specific harmonic detection method

次谐波。

## 4 结论

本文提出一种特定次谐波滤除锁相,该锁相环是在DSOGI-PLL前级加入谐波滤除级,以消除特定次谐波对锁相的影响。仿真和实验结果表明在电网电压不平衡和含谐波的情况下,该锁相环确实能有效抑制频率和电压各种分量的波动。将该锁相环应用于APF,并提出了一种特定次谐波检测算法,该算法可在电网电压不平衡的情况下对任意次谐波进行检测,并且计算量小,准确度高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 侯桂兵,涂春鸣,罗安,等. 微电网中APF接入位置与容量优化配置方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):29-33. HOU Guibing, TU Chunming, LUO An, et al. Optimal configuration of APF in microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 29-33.
- [2] ZHANG C Z, DU S W, CHEN Q F. A novel scheme suitable for high-voltage and large-capacity photovoltaic power stations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 6(9): 3775-3783.
- [3] QUAN Y, NIAN H. Improved control of the grid-connected converter under the harmonically distorted grid voltage conditions [C] // IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Incheon, South Korea: IEEE, 2010: 204-209.
- [4] 黄海宏,王钰,许若冰,等. 双环重复控制三相四线制有源电力

- 滤波器[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4):40-44.  
HUANG Haihong, WANG Yu, XU Ruobing, et al. Three-phase four-wire active power filter with dual-loop repetitive control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4):40-44.
- [5] 孟珺遐, 周子冠, 李光辉, 等. 基于  $i_p-i_q$  方法的畸变电流检测及其实现[J]. 电网技术, 2012, 36(5):125-131.  
MENG Junxia, ZHOU Ziguan, LI Guanghui, et al. Detection of distorted current based on  $i_p-i_q$  method and its physical realization[J]. Power System Technology, 2012, 36(5):125-131.
- [6] 周林, 孟婧. 基于瞬时无功理论的谐波和无功电流检测方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(2):385-392.  
ZHOU Lin, MENG Jing. Based on the instantaneous reactive power theory of harmonic and reactive current detection method [J]. High Voltage Technology, 2009, 35(2):385-392.
- [7] 黄海宏, 张庭茂, 魏亚坤, 等. 电压不平衡时单同步坐标系锁相环的改进算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6):937-944.  
HUANG Haihong, ZHANG Tingmao, WEI Yakun, et al. Improved algorithm for phase-locked loop of single synchronous coordinate system under unbalanced three-phase voltage [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(6):937-944.
- [8] 薛尚青, 蔡金锭. 基于二阶广义积分器的基波正负序分量检测方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11):69-73.  
XUE Shangqing, CAI Jinding. Detection of fundamental positive and negative sequence components based on second-order generalized integrator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11):69-73.
- [9] 周明磊, 游小杰, 王琛琛. 特定次谐波消除调制方式的谐波特性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9):11-20.  
ZHOU Minglei, YOU Xiaojie, WANG Chenchen. Harmonic analysis of selected harmonic elimination pulse width modulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9):11-20.
- [10] 杨秋霞, 高金玲, 赵晔. 有源电力滤波器的特定次谐波控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3):119-123.  
YANG Qiuxia, GAO Jinling, ZHAO Ye. Research on specific harmonic control strategy for active power filter [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3):119-123.
- [11] 梁莹玉, 张涛, 刘建政, 等. 基于降阶矢量比例积分器的 MMC-HVDC 不平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13):3521-3533.  
LIANG Yingyu, ZHANG Tao, LIU Jianzheng, et al. An unbalanced control strategy of MMC-HVDC based on the reduced order vector proportional integrator [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13):3521-3533.
- [12] 杨仁增, 张光先. 谐波畸变电网下的频率自适应锁相方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16):144-152.  
YANG Renzeng, ZHANG Guangxian. Frequency adaptive PLL under distorted grid condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):144-152.
- [13] 张宸宇, 梅军, 郑建勇, 等. 无负载侧谐波检测的有源滤波器自适应预测算法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6):55-61.  
ZHANG Chenyu, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Adaptive forecasting algorithm without load-side harmonic detection for active power filter control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):55-61.
- [14] 李国华, 张影, 汪玉凤, 等. 基于预测控制的有源电力滤波器选择性谐波补偿方法[J]. 电网技术, 2014, 38(10):2938-2942.  
LI Guohua, ZHANG Ying, WANG Yufeng, et al. A predictive control based selective harmonic compensation for active power filter [J]. Power System Technology, 2014, 38(10):2938-2942.

#### 作者简介:



黄海宏

黄海宏(1973—),男,江西清江人,教授,博士,主要研究方向为电力电子技术(E-mail: hhh@ipp.ac.cn);

魏阳超(1993—),男,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术;

王海欣(1976—),女,河南南阳人,高级实验师,硕士,主要研究方向为DSP应用技术;

陈洋(1986—),男,山东青岛人,工程师,硕士,主要研究方向为电能质量。

(编辑 李育燕)

## Application of specific harmonic filtering phase lock in APF

HUANG Haihong<sup>1</sup>, WEI Yangchao<sup>1</sup>, WANG Haixin<sup>1</sup>, CHEN Yang<sup>2</sup>

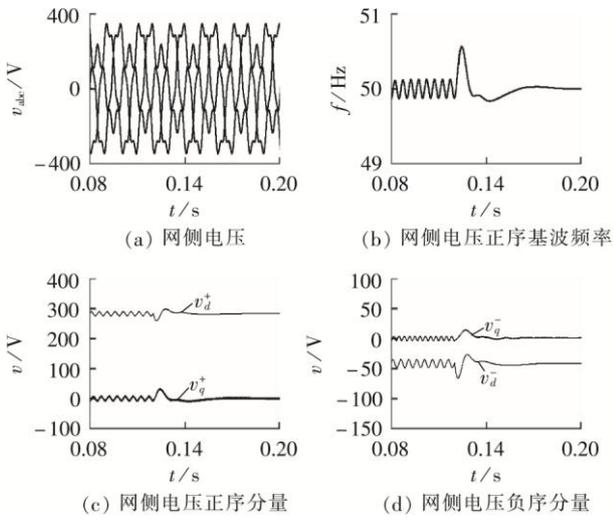
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. State Grid Rizhao Power Supply Company, Rizhao 276826, China)

**Abstract:** Aiming at the condition of unbalanced grid voltage and high specific harmonic content of the grid voltage, a harmonic filtering stage is added in front of the traditional DSOGI-PLL (Dual Second-Order Generalized Integrator PLL), which can not only completely filter out the specific harmonics, but also accurately detect the frequency and phase information of the grid voltage in the case of unbalanced grid voltage. Applying the phase lock method in APF (Active Power Filter), a new specific current harmonic detection method is proposed. The method simplifies the calculation, eliminates the design of the filter, and can accurately detect the harmonic current. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed method are verified by simulation and experiment.

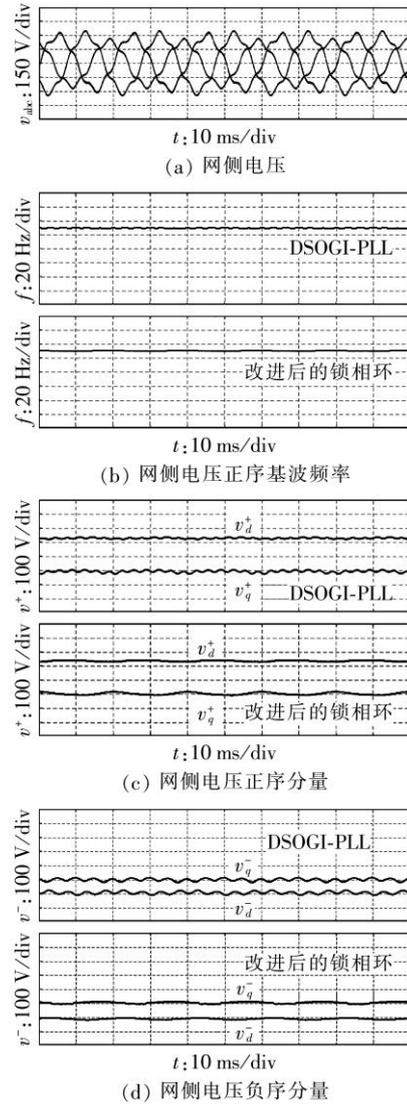
**Key words:** specific harmonic; phase-locked loop; active power filter; DSOGI; harmonic detection; harmonic analysis

附录A:



图A1 5次谐波时2种锁相环仿真波形对比

Fig.A1 Comparison of two phase-locked loop simulation waveforms under 5th harmonic



图A2 5次谐波时实验波形

Fig.A2 Experiment waveforms under 5th harmonic