

# 一种可适应复杂网压条件的快速锁相环

陈晓彤<sup>1</sup>, 孙正<sup>2</sup>, 罗利文<sup>1</sup>

(1.上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2.上海汽车集团股份有限公司, 上海 200041)

**摘要:** 基于双二阶广义积分器的锁相环(DSOGI-PLL)被广泛应用于逆变器实现同步并网。但是,当电网电压三相不平衡或存在谐波分量和直流偏移,即网压条件较为复杂时,滤波效果不理想,对输入信号的检测出现波动。因此,提出一种改进的二阶广义积分器结构,在分离正负序电压的基础上加入直流分量抑制模块,滤除直流电压,并在锁相环加入低通滤波器,从而提高锁相环抑制谐波电压和直流电压的能力,准确提取电网电压同步信号。在 MATLAB/Simulink 进行仿真研究,实验结果表明,该锁相环在电网电压存在多次谐波和直流电压时能够滤除谐波分量和直流分量,锁频锁相效果较好。

**关键词:** 二阶广义积分器; 锁相环; 谐波; 直流偏移; 电压不对称

中图分类号: TP29; TM464

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222919

中文引用格式: 陈晓彤, 孙正, 罗利文. 一种可适应复杂网压条件的快速锁相环[J]. 电子技术应用, 2022, 48(12): 74-78.

英文引用格式: Chen Xiaotong, Sun Zheng, Luo Liwen. A fast PLL which can adapt to complex grid voltage conditions[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(12): 74-78.

## A fast PLL which can adapt to complex grid voltage conditions

Chen Xiaotong<sup>1</sup>, Sun Zheng<sup>2</sup>, Luo Liwen<sup>1</sup>

(1.School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2.SAIC Motor Corporation Limited, Shanghai 200041, China)

**Abstract:** Phase-locked loop(PLL) based on dual second-order generalized integrator(DSOGI-PLL) is widely used in inverter synchronous grid-connection. However, when the power grid voltage is unbalanced or harmonic components and DC offset exists, namely, when the grid voltage condition is complex, DSOGI-PLL has a large deviation from the frequency. Therefore, an improved structure is proposed. The DC component suppression module is added to filter the DC voltage, and the low-pass filter is added to improve the ability of the PLL to suppress harmonic voltage, and accurately extract the grid voltage synchronization signal. The simulation results in MATLAB/Simulink verify that the PLL can filter out the harmonic component and DC component, and the effect is better.

**Key words:** second-order generalized integrator; phase locked loop; harmonic; DC offset; unbalanced voltage

### 0 引言

随着能源危机的日益严重,太阳能、风能等新能源技术作为应对能源危机和环境污染等问题的重要途径之一,越来越受到重视。可再生能源及分布式发电系统在电网中大量接入,并网逆变器是可再生能源并网的重要接口,对并网逆变器进行控制,保障并网逆变器与电网之间进行高效高质量的能量传输,是将可再生能源接入电网的关键技术<sup>[1-2]</sup>。

锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)技术是实现逆变器与电网同步运行的重要手段。逆变器与电网同步时,需要锁相环对电网电压的频率和相位进行精确的检测<sup>[3-4]</sup>。同步参考坐标系锁相环(SRF-PLL)是目前使用较为广泛的锁相环,结构简单,具有良好的动态性能,在理

想电网情况下能够快速、精确地对电网的频率和相位进行检测和锁定。通过降低带宽,SRF-PLL还可以对具有高次谐波的电网电压进行检测。然而,在实际运行中,存在电网电压三相不平衡、谐波分量和直流分量注入等情况,传统的锁相环已经不能满足这种复杂网压条件下的锁相要求。在电网电压不平衡的情况下,SRF-PLL的检测会出现震荡误差。为了消除传统的 SRF-PLL 的检测误差,克服 SRF-PLL 的不足,国内外学者对锁相环进行深入研究,提出多种新型锁相环技术,有复系数滤波锁相环(CCF-PLL)<sup>[5]</sup>、基于延时信号消除的锁相环(DSC-PLL)<sup>[6]</sup>、自适应陷波器锁相环(ANF-PLL)<sup>[7]</sup>等。基于解耦双同步参考坐标系变换的锁相环(DDSRF-PLL),通过 dq 变换和交叉解耦网络提取电网电压的正负序电压分量,

从而实现了在电网电压不平衡条件下的锁相功能<sup>[8-9]</sup>。双二阶广义积分器(DSOGI-PLL)采用对称分量法,通过两个二阶广义积分(SOGI)器提取电网电压的正序分量<sup>[10-12]</sup>。然而,当电网存在高次谐波时,DDSRF-PLL和DSOGI-PLL检测到的频率和相位存在较大误差,并且DDSRF-PLL存在计算量大、结构复杂等问题。

在电网电压不平衡和谐波含量较低时,DSOGI-PLL能够较为准确地检测同步信号,但是当电网电压存在直流偏移和多次谐波时,受到直流电压和谐波的影响,锁相环检测效果较差,跟踪电网频率和相位时出现波动。本文在二阶广义积分器的基础上,增加直流抑制模块,通过增加一个额外的分支来消除输入SOGI信号的直流偏移;为了提高滤除性能,在锁相环加入低通滤波器,从而实现电网电压频率和相位的精确锁定。

## 1 基于双二阶广义积分器的锁相环

### 1.1 三相电压正序分离

通过对称分量法,可以将三相电网电压分解成正序、负序和零序分量。对于理想电网,由于三相电压对称,负序和零序分量都为零。当系统出现故障时,不平衡的三相电压输入会导致通过锁相环锁定的相位震荡,通过对称分量法,可以从不对称的三相电压中提取出对称的正序分量。正序、负序分量可以表示为:

$$\begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} [T^+] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_a^- \\ v_b^- \\ v_c^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} [T^-] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ \alpha & 1 & \alpha^2 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$  分别为三相电压,  $\alpha = e^{j2\pi/3}$ 。

在两相静止坐标系下的正序分量和负序分量分别为:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha^+ \\ v_\beta^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha^- \\ v_\beta^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $v_\alpha$ 、 $v_\beta$  为两相静止坐标系下的电压分量,  $q = e^{j\pi/2}$  是一个滞后的移相运算。

根据式(3)、式(4)可知,提取三相电压的正负序分量,需要得到输入信号  $v_\alpha$ 、 $v_\beta$  的正交分量。

### 1.2 基于二阶广义积分器的正交信号发生器

基于二阶广义积分器的正交信号发生器(Second-Order Generalized Integrator-Quadrature Signals Generator, SOGI-QSG)多用于锁相环,实现滞后  $90^\circ$  的移相运算,其结构如图1所示,图中  $v'$  和  $qv'$  为输出信号,  $v$  为输入信号。

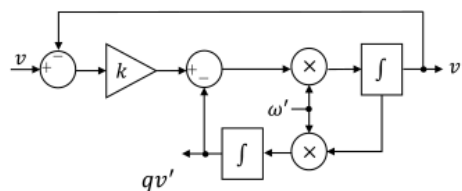


图1 SOGI-QSG 结构图

SOGI-QSG 的传递函数为:

$$D_{\text{SOGI}}(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (5)$$

$$Q_{\text{SOGI}}(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (6)$$

其中,  $\omega'$  和  $k$  分别是谐振频率和阻尼因数。

从式(5)和式(6)可以看出,传递函数  $D_{\text{SOGI}}(s)$  和  $Q_{\text{SOGI}}(s)$  分别具有带通滤波器和低通滤波器特性,能够使电压谐波衰减,谐波抑制和动态性能取决于阻尼系数  $k$ 。当频率  $\omega$  与谐振频率  $\omega'$  相等时,输出信号  $v'$  与输入信号  $v$  同向。另外,无论  $k$ 、 $\omega'$  取值如何,输出信号  $qv'$  总滞后于  $v'90^\circ$ , 即  $v'$  和  $qv'$  始终正交。

### 1.3 双二阶广义积分器锁相环

DSOGI-PLL 由 SOGI-QSG、正序分量计算器(Positive-Sequence Calculator, PSC)和锁相环三部分组成,其结构如图2所示。由两个 SOGI-QSG 组成的 DSOGI,能够抑制输入信号的谐波分量并得到输入信号的正交信号。通过正序分量计算器,提取输入信号在两相静止坐标系下的正序分量。对两相静止坐标系下的正序分量进行 Park 变换,得到同步旋转坐标系下的正序分量  $v_d$  和  $v_q$ 。通过 PI 调节器控制  $v_q = 0$ , 额定电网频率  $\omega_0$  作为前馈实现锁相功能,检测系统的相位角  $\theta_{\text{pll}}$  与频率  $\omega'$ 。

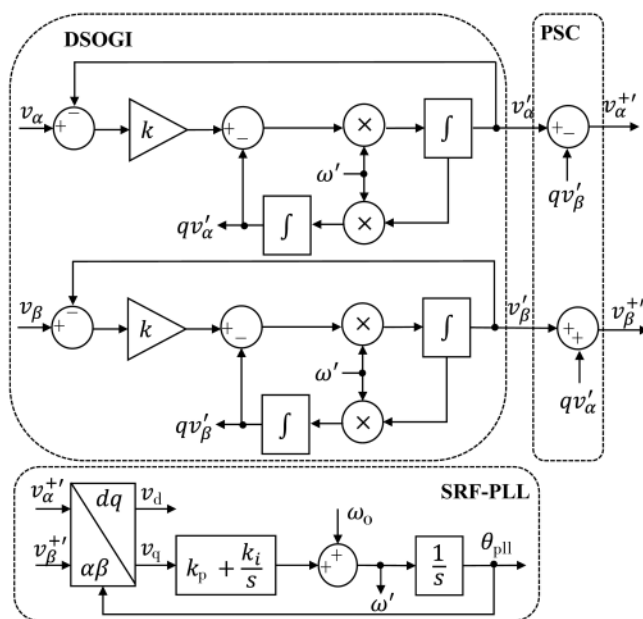


图2 DSOGI-PLL 结构图

## 2 基于新型双二阶广义积分器的锁相环

### 2.1 新型双二阶广义积分器

对于锁相环的研究多集中在电网电压不平衡或存在谐波的情况下。然而,除了电网电压不平衡和存在谐波分量,电网中还存在其他干扰。当系统中存在直流偏移时,锁相环还需要具有很高的直流偏移抑制能力。

由式(5)、式(6)可知,当  $s=0$  时,  $D_{\text{NSOGI}}(s)=0$ , 具有直流分量抑制的能力,能够消除电网电压中的直流分量。而  $Q_{\text{NSOGI}}(s)$  是低通滤波器,不能抑制直流分量,直流分量的引入会对锁相环相位角的锁定产生影响。为了抑制直流分量,提出了一种新型 SOGI 结构,如图 3 所示。

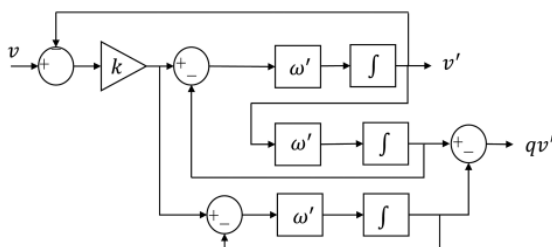


图 3 NSOGI 结构图

新型 SOGI 的传递函数为:

$$D_{\text{NSOGI}}(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (7)$$

$$Q_{\text{NSOGI}}(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega's(\omega'-s)}{(s+\omega')(s^2 + k\omega's + \omega'^2)} \quad (8)$$

传递函数  $D_{\text{SOGI}}(s)$  和  $D_{\text{NSOGI}}(s)$  相同。  $Q_{\text{NSOGI}}(s)$  在  $s=0$  处为零,即在 0 Hz 处为零,因此具有直流分量抑制能力。  $D_{\text{NSOGI}}(s)$  呈现带通滤波器特性,中心频率为  $\omega'$ ,在  $\omega'$  处的幅度衰减为 0,没有相移,但对其他频率信号有很强的衰减。选择  $\omega'$  作为基波频率,可以抑制谐波成分,且基波信号没有衰减和相移。  $Q_{\text{NSOGI}}(s)$  具有带通滤波器特性,在  $\omega'$  处衰减为 0,有  $90^\circ$  相移,与  $D_{\text{SOGI}}(s)$  具有相似的幅频特性。此外,  $Q_{\text{NSOGI}}(s)$  在低频和高频段都有较大的衰减,可以有效消除输入信号中存在的直流偏移和高频谐波。

### 2.2 低通滤波器

为了提高 SRF-PLL 抑制主要谐波分量的效果,将改进的双二阶广义积分器和低通滤波器结合,改进的锁相环结构如图 4 所示。一阶低通滤波器为:

$$\text{LPF}(s) = \frac{\omega_p}{s + \omega_p} \quad (9)$$

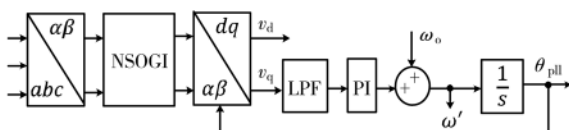


图 4 改进的锁相环结构图

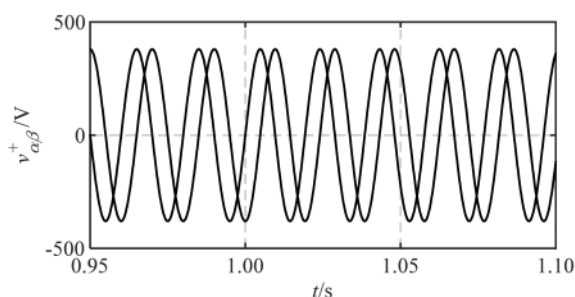
其中,  $\omega_p$  是截止频率。

## 3 实验验证与分析

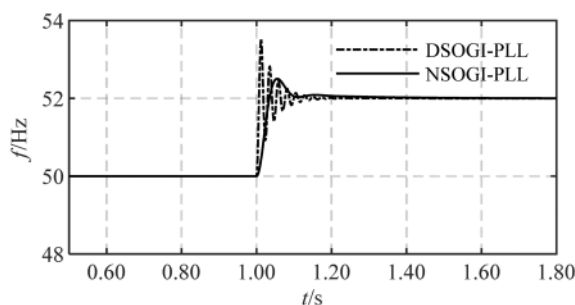
为了验证所提锁相环在频率波动、电压不平衡、谐波电压和直流偏置电压情况下的效果,在 MATLAB/Simulink 中建立仿真模型并进行对比分析。

### 3.1 频率自适应性

为了验证新型锁相环的频率适应性,仿真参数设置如下:380 V 三相平衡电压的频率在 1 s 时由 50 Hz 阶跃到 52 Hz。仿真结果如图 5 所示。如图 5(a)所示,经过 NSOGI 滤波后,  $\alpha\beta$  轴电压仍为对称分量;从图 5(b)可以看出,与 DSOGI-PLL 相比,本文所提出的改进型锁相环在频率改变的情况下,波动更小,频率恢复时间较短。因此,在电网频率出现波动的情况下,改进的双二阶广义积分器锁相环能够更快跟踪电网频率变化,具有频率自适应性。



(a) 滤波后的  $\alpha\beta$  电压



(b) 频率

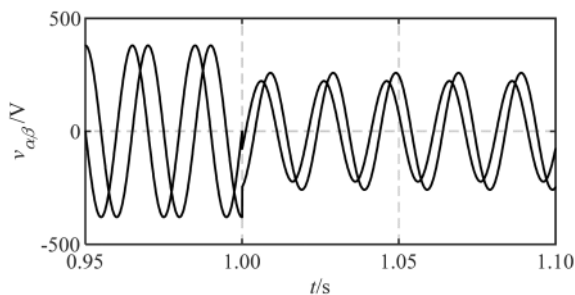
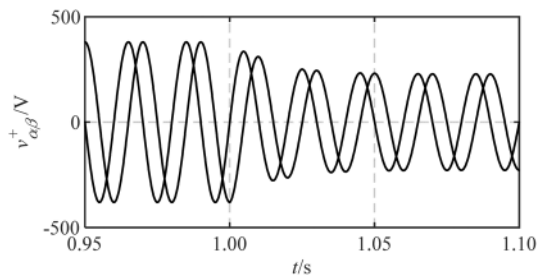
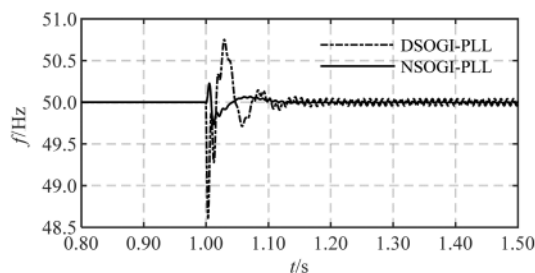
图 5 频率阶跃仿真结果

### 3.2 电压不平衡

为了验证改进后的锁相环在三相电压不平衡条件下的锁相性能,仿真参数设置如下:A 相电压降 50%,B 相电压降 30%。仿真结果如图 6 所示。由图 6(a)、图 6(b)可知,经 NSOGI 滤波后的  $\alpha^+\beta^+$  轴电压为对称分量;由图 6(c)可知,在电压不平衡情况下,改进后的锁相环对暂态过程和稳态过程的频率波动范围较小,抑制电压不平衡的影响更好。

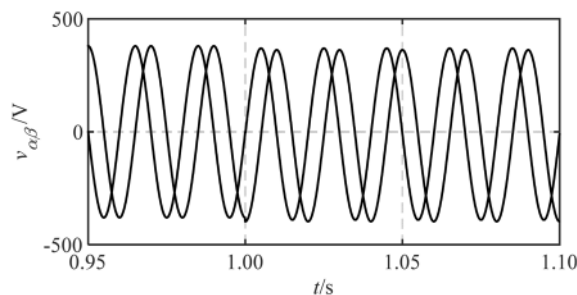
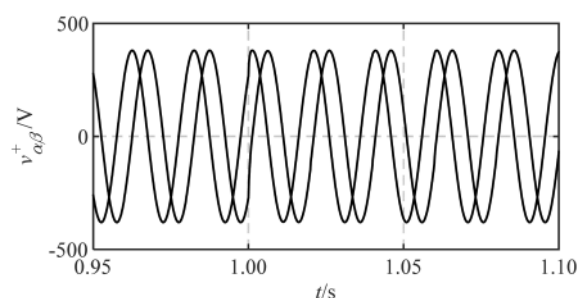
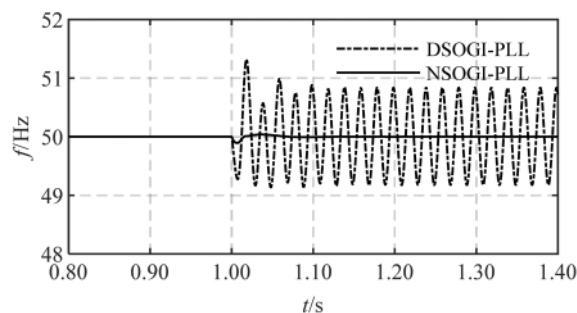
### 3.3 直流偏移

为了验证改进后的锁相环在电压存在直流偏置时的锁相能力,在 A 相位注入 50 V 的直流分量。如图 7(a)、图 7(b)所示,输入信号中存在直流偏置,经 NSOGI 滤波

(a) 滤波前的  $\alpha\beta$  电压(b) 滤波后的  $\alpha\beta$  电压

(c) 频率

图6 三相电压不平衡仿真结果

(a) 滤波前的  $\alpha\beta$  电压(b) 滤波后的  $\alpha\beta$  电压

(c) 频率

图7 直流电压仿真结果

后为对称分量。采用改进的正交信号发生器进行滤波,抑制直流分量,图7(c)显示与传统的双二阶广义积分器锁相环相比,在三相电压存在直流分量的情况下,改进型锁相环能够滤除直流电压分量,锁相环输出频率波动幅度较小,锁相相位偏差较小,锁相效果较好,能够抑制直流电压分量的影响。

### 3.4 谐波注入

为了验证改进后锁相环的谐波抑制能力,仿真参数设置为:注入20%的5次谐波和10%的7次谐波。从图8(b)可以看出,在经过改进的正交信号发生器滤波后,谐波分量得到抑制,滤波效果明显;由图8(c)可知,与传统的双二阶广义积分器锁相环相比,在三相电压存在谐波的情况下,改进的锁相环通过正交信号发生器和低通滤波器的滤波特性,能够滤除谐波分量,锁相环输出频率波动幅度较小,锁相相位偏差较小,锁相效果较好。

## 4 结论

传统的双二阶广义积分器锁相环在电网电压存在直流分量和多次谐波分量时锁相存在较大波动,针对此

问题,本文提出一种改进的双二阶广义积分器锁相环模型。在双二阶广义积分器锁相环的基础上,增加直流抑制模块和低通滤波器模块,从而消除直流分量和多次谐波分量的影响。仿真结果表明,改进的双二阶广义积分器锁相环在电网含有直流和谐波电压时,能够有效滤除直流和多次谐波成分,较为精确地检测到电网电压频率和相位,满足并网要求。

### 参考文献

- [1] 伞国成,漆汉宏,魏艳君,等.基于复功率的电网电压不平衡条件下并网逆变器控制策略[J].电工技术学报,2017,32(8):229-236.
- [2] 许津铭,卞申一阳,钱浩,等.弱电网下单相并网逆变器延时锁相环的鲁棒控制及优化方法[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2062-2070.
- [3] PARK Y, SUL S K, KIM W C, et al. Phase-locked based on an observer for grid synchronization[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1256-1265.



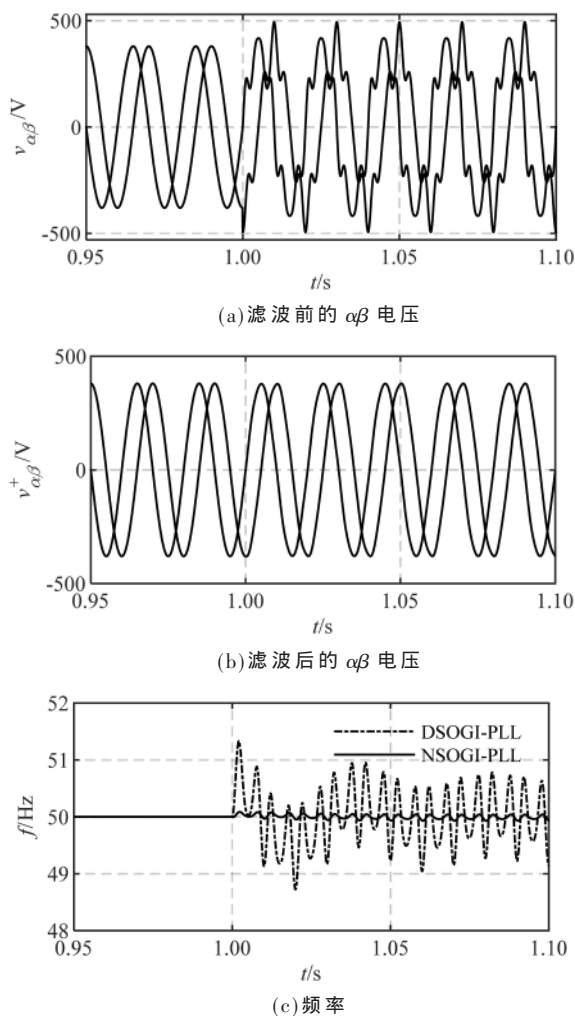


图8 谐波电压仿真结果

[4] GOLESTAN S, MONFARED M, FREIJEDO F D, et al. Design-oriented study of advanced synchronous reference frame phase-locked loops[J]. IEEE Transactions on Power

Electronics, 2013, 28(2): 765-778.

- [5] 何宇, 漆汉宏, 邓小龙, 等. 基于全复数型滤波器的三相锁相环技术[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2115-2126.
- [6] 程勇, 张怡龙, 毕训训, 等. 基于复系数-延时信号消除法的锁相环设计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(15): 123-128.
- [7] 杜雄, 郭宏达, 孙鹏菊, 等. 基于 ANF-PLL 的电网电压基波正序分离方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 28-35.
- [8] LUNA A, ROCABERT J, IGNACIO C, et al. Grid voltage synchronization for distributed generation systems under grid fault conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2015, 51(4): 3414-3425.
- [9] 高文森, 樊艳芳, 王一波, 等. 优化型 DDSRF-PLL 在不平衡和畸变电网电压下的仿真研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(5): 714-720.
- [10] 涂娟, 汤宁平. 基于改进型 DSOGI-PLL 的电网电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2350-2356.
- [11] XIAO F, LEI D, LI L, et al. A frequency-fixed sogi based pll for single-phase grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1713-1719.
- [12] 李生民, 肖亚敏, 梁吉宁, 等. 弱电网环境下光伏并网逆变器锁相环研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(7): 95-97.

(收稿日期: 2022-04-27)

#### 作者简介:

陈晓彤(1997-), 女, 硕士, 主要研究方向: 分布式新能源技术。

孙正(1966-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 汽车工程与质量管理。

罗利文(1968-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 分布式新能源技术、先进电气测量技术。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所