



引用格式:吴振军,杨凯,秦方圆. 基于双二阶广义积分器锁频环的基波正序分量检测方法[J]. 轻工学报,2017,32(2):91-96.

中图分类号:TM615 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.2.014

文章编号:2096-1553(2017)02-0091-06

# 基于双二阶广义积分器锁频环的 基波正序分量检测方法

Detection method of fundamental positive sequence components based on  
double second-order generalized integrator frequency-locked loop

吴振军<sup>1</sup>,杨凯<sup>1,2</sup>,秦方圆<sup>1</sup>

WU Zhen-jun<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>1,2</sup>, QIN Fang-yuan<sup>1</sup>

## 关键词:

双二阶广义积分器;  
锁频环;三相电压不  
平衡;基波正序分量

## Key words:

double second-order  
generalized integrator  
(DSOGI); frequency-  
locked loop (FLL);  
three-phase voltage  
unbalance; fundamental  
positive sequence  
component

1. 郑州轻工业学院 电气与信息工程学院,河南 郑州 450002;

2. 国家电网河南省电力公司 安阳供电公司,河南 安阳 455000

1. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry,  
Zhengzhou 450002, China;

2. Anyang Power Supply Company, State Grid He'nan Electric Power Company, Anyang 455000,  
China

**摘要:**针对电网电压三相不平衡问题,设计了双二阶广义积分器锁频环(DSOGI-FLL),利用DSOGI-FLL的角频率反馈代替双二阶广义积分器锁相环(DSOGI-PLL)的频率反馈,实现了对输入电压频率的自适应控制。在Matlab/Simulink平台对电压不对称跌落、谐波污染、相位突变、频率突变4种情况进行仿真,并与DSOGI-PLL进行性能对比,结果表明,DSOGI-FLL比DSOGI-PLL有更好的频率与相位追踪特性,尤其在相位突变和频率突变时效果更为明显。

收稿日期:2015-11-19;修回日期:2016-09-26

基金项目:河南省基础与前沿技术研究计划项目(132300413213)

作者简介:吴振军(1971—),男,河南省郑州市人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为电工理论和电工新技术。

**Abstract:** In view of the problem of three-phase voltage unbalance, the double second-order generalized integrator frequency-locked loop (DSOGI-FLL) was designed. It used DSOGI-FLL angular frequency feedback instead of the second order generalized integrator phase-locked loop (DSOGI-PLL) frequency feedback, and realized the adaptive control of the input voltage frequency. Four conditions including asymmetric voltage drop, harmonic pollution, phase mutations, frequency mutations were simulated in Matlab/Simulink platform, and its performance was compared with DSOGI-PLL. The results showed that DSOGI-FLL had the better characteristics in tracking phase and frequency in all kinds of cases; especially so when the phase variation and frequency variation happened.

## 0 引言

并网逆变器是分布式发电系统的重要组成部分,其性能直接影响电网电压的电能质量.当电网电压处于三相不平衡,如谐波污染、频率畸变和相位突变等状态时,要求锁相环 PLL (phase-locked loop) 实时追踪电网电压的相位和频率,以减小对电力系统的影响.因此,并网逆变器系统对低电压穿越 LVVRT (low voltage ride through) 技术有严格的要求<sup>[1]</sup>.

并网逆变器控制系统中常用的是基于同步旋转坐标系的锁相环 (SRF-PLL)<sup>[2]</sup>. SRF-PLL 通过跟踪同步旋转坐标系达到相位锁定的目的,在电网电压理想状态下可以很好地锁相.当电网电压出现畸变或者其他不平衡时,则需要以基波正序电压分量作为参考,但因其带宽较窄无法有效滤除负序分量,不能实现准确锁相,可能导致锁相失败<sup>[3]</sup>. 针对上述问题,有学者对 SRF-PLL 进行了改进研究<sup>[4-6]</sup>:改进型数字锁相环 (EPLL)<sup>[4]</sup>、双同步旋转坐标系解耦锁相环 (DDSRF-PLL)<sup>[5]</sup> 等实现了频率自适应,能够准确获取电网电压的频率和相位,但算法结构比较复杂;基于双二阶广义积分器的锁相环 (DSOGI-PLL)<sup>[6]</sup> 能够通过二阶广义积分器 (SOGI) 产生相角差为 90° 的正交信号,实现相序分离锁相,但 DSOGI-PLL 在频率和相位突变情况下有动态响应速度慢等缺点. 鉴于此,本文拟在 DSOGI 的基础上加入有频率自适应环节的锁频环 FLL (frequency-locked loop),设计基

于双二阶广义积分器的锁频环 (DSOGI-FLL),用于检测基波正序分量,以期在信号发生突变时提高频率和相位追踪速度,降低频率和相位的超调量.

## 1 DSOGI-FLL 结构与工作原理

当电网电压处于不平衡状态时,电网电压没有恒定的幅值,也没有恒定的旋转频率,不能直接用 PLL 来跟踪电网电压. 通常情况下,需要检测正序分量的相位和频率来代替电网电压<sup>[7]</sup>. 电网电压的正序分量可以表示为

$$u_{abc}^+ = [T^+] U_{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} u_{abc}$$

其中,算子  $a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ ,  $e$  为常量参数.

电压正序分量经 Clarke 变换得

$$u_{\alpha\beta}^+ = [T_{\alpha\beta}^+][T_+] u_{abc} = [T_{\alpha\beta}^+][T_+][T_{\alpha\beta}^+]^{-1} u_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} u_{\alpha\beta}$$

其中,  $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$  是一个滞后于初始相位 90° 的相移算子. 因此,需要引入一个正交信号发生器 QSG (quadrant signal generator) 来实现 90° 的相移. 常见的方法有自适应陷波器 ANC (adaptive notch filtering) 法、延迟  $T/4$  法、反 Park 变换 IPT (inverse park transform) 法<sup>[8-9]</sup>. 但这些方法在实现过程中都要使用正弦或余弦函数,使算法结构变得复杂,不但增加系统的反应时间,还可能引入噪声误差<sup>[10]</sup>. SOGI 结构更加简单,其核心是一个移相电路,结构如图 1 所示.

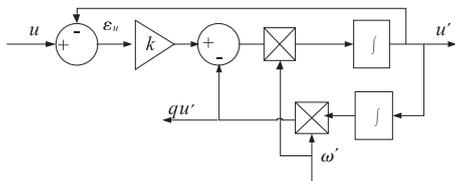


图1 SOGI 结构示意图

Fig. 1 Mathematical model of the SOGI

图1中输入  $u$  为旋转电压  $u_\alpha$  (或  $u_\beta$ ), 利用  $90^\circ$  的相位位移, 输出  $u'$  和  $qu'$  为相互正交的电压,  $\varepsilon_u$  为输入信号  $u$  和输出信号  $u'$  的误差,  $\omega'$  为估值角频率. 其传递函数如下:

$$G(s) = \frac{u'}{k\varepsilon_u}(s) = \frac{\omega' s}{s^2 + \omega'^2}$$

$$D(s) = \frac{qu'}{u}(s) = \frac{k\omega' s}{s^2 + k\omega' s + \omega'^2}$$

$$Q(s) = \frac{qu'}{u}(s) = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega' s + \omega'^2}$$

其中,  $G(s)$  为系统传递函数;  $D(s)$  和  $Q(s)$  分别为正交输出信号的带通滤波器和低通滤波器传递函数, 其带宽与输入角频率无关, 只取决于参数  $k$ , 因此 SOGI 具有频率自适应性, 适用于频率突变的场合.

在三相不平衡电网中, 正序、负序分量的频率相同, 而 SOGI 只能实现滤波作用, 无法实现正序、负序分量之间的解耦. 因此, 要通过并联、拓展构成双二阶广义积分器 (DSOGI), 实现正、负相序的分离. 电网电压经 Clarke 变换得到  $u_\alpha$  和  $u_\beta$ , 分别经过 SOGI 滤波后得到其正交电压信号, 最后利用正序、负序计算法实现分离, 得到电网电压的正序分量和负序分量.

当电压出现不平衡或相位和频率出现跳变时, 为更快追踪相位和频率, 引入 FLL 环节, DSOGI-FLL 可用来处理电压成分  $U_{\alpha\beta}$ . FLL 由 SOGI 和频率自适应单元构成, 其结构如图2所示.

与 SOGI 相比, 加入 FLL 环节后, SOGI 将电压误差  $\varepsilon_u$  和正交电压  $qu'$  输出到 FLL, 得到

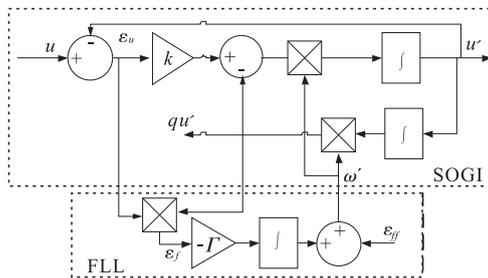


图2 SOGI-FLL 结构示意图

Fig. 2 Mathematical model of the SOGI-FLL

频率误差  $\varepsilon_f$ ,  $\varepsilon_f$  经过增益为  $-\Gamma$  的控制器和积分器输出系统估值角频率  $\omega'$ , 再反馈给 SOGI, 形成闭环控制回路, 从而得到准确的系统频率. 采用闭环回路, 可以有效地消除角频率的累积, 并不断调整  $\omega'$ , 使误差信号  $\varepsilon_f = 0$ , 从而实现频率锁定.

DSOGI-FLL 结构如图3所示, 其工作特性与 DSOGI-PLL 类似, 都存在频率反馈和相位反馈环节, 所以 DSOGI-PLL 和 DSOGI-FLL 都能在电网电压频率突变和相位突变的情况下准确地追踪电网电压的频率和相位.

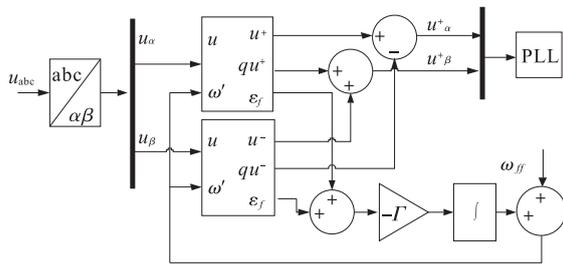


图3 DSOGI-FLL 结构示意图

Fig. 3 Mathematical model of the DSOGI-FLL

## 2 仿真结果与分析

为验证 DSOGI-FLL 的可靠性, 在 Matlab/Simulink 环境下, 建立 DSOGI-FLL 模型. 分别对电网电压发生不对称跌落、谐波污染、频率突变和相位突变等情况进行仿真, 仿真时电网电压真实值  $U = 310 \text{ V}$ , 额定基波频率  $f = 50 \text{ Hz}$ , 初始相角  $\varphi = 0$ . SOGI 系统参数  $k = 1.414$ , FLL 的

参数  $\Gamma = 100$ , 前馈角频率  $\omega_{ff} = 100\pi$ . 对电网电压相位追踪和频率追踪特性进行分析, 并与 DSOGI-PLL 算法结果进行对比.

### 2.1 电网电压发生不对称跌落

电网电压在 0.1 s 时跌落至  $U_a = 50$  V,  $U_b = 60$  V,  $U_c = 70$  V, 图 4 给出了两种方法的仿真结果. 从图 4 可看出, 当电网电压产生不对称跌落时, DSOGI-FLL 方法能够在 2 个周期内完成对电网电压相位的精确追踪, 而 DSOGI-PLL 方法则需要 4 个周期, 且 DSOGI-FLL 的相位波动为 0.1 r/min, 小于 DSOGI-PLL 的 0.19 r/min, 说明 DSOGI-FLL 方法比 DSOGI-PLL 方法具有更快的动态响应速度. 在频率追踪方面, 电压跌落动态响应过程中 DSOGI-FLL 在 2 个周期内完成对频率的锁定, 而 DSOGI-PLL 则需要 4 个周期, 且 DSOGI-FLL 的频率波动更小, 动态响应曲线更加平滑.

### 2.2 电网电压含有 5 次谐波

电网电压在 0.1 s 时注入 5 次谐波, 幅值分别为  $U_{a1} = 12$  V,  $U_{b1} = 15$  V,  $U_{c1} = 20$  V, 图 5 给

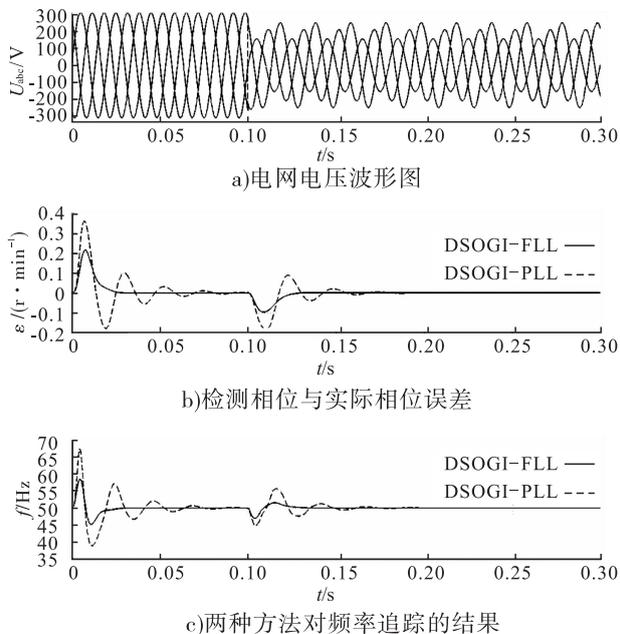


图 4 电网电压不对称跌落时的仿真结果

Fig. 4 Simulation result in asymmetric voltage drop

出了两种方法的仿真结果. 从图 5 可看出, 当不存在谐波时, 两种方法都能很好地追踪电压信号相位, 但 DSOGI-FLL 具有更好的动态特性. 加入谐波后, 两种方法相位追踪能力都有所下降, 出现了误差波动, DSOGI-FLL 的相位波动为 0.002 r/min, PLL 的相位波动为 0.004 r/min, 说明 DSOGI-FLL 方法追踪特性更好. 出现谐波后, 两种方法频率追踪能力都有明显的降低, 频率出现了波动, 但 DSOGI-FLL 方法频率波动范围为 0 ~ 0.4 Hz, 波动相对较小, DSOGI-PLL 的频率波动范围为 0 ~ 0.5 Hz. 因此两种方法对谐波污染的处理能力都不强.

### 2.3 电网电压相位突变

电网电压在 0.1 s 时相位发生  $30^\circ$  突变. 图 6 给出了两种方法的仿真对比结果.

由图 6 可知, 当电网电压发生相位突变时, DSOGI-FLL 在 2 个周期内实现了对电网电压相位的追踪, 相位波动幅值为 0.12 r/min; DSOGI-PLL 在 5 个周期内实现相位追踪, 相位波动幅

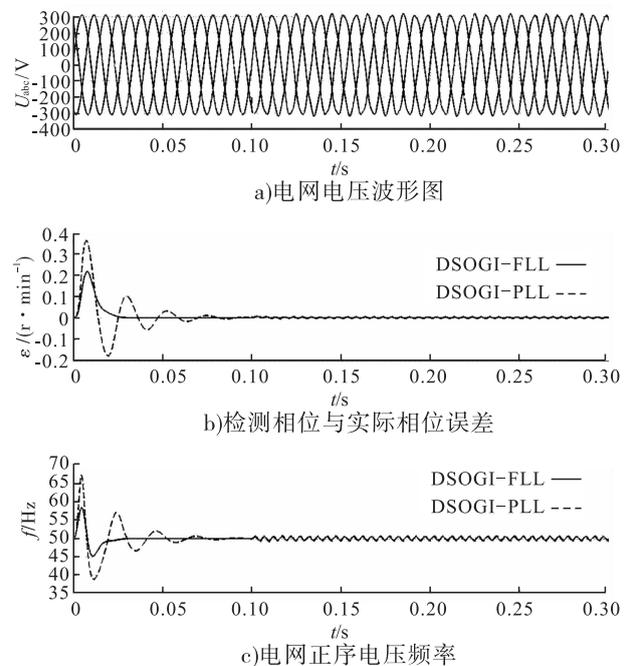


图 5 电网电压含 5 次谐波的仿真结果

Fig. 5 Simulation result in condition that fundamental voltage has fifth harmonic

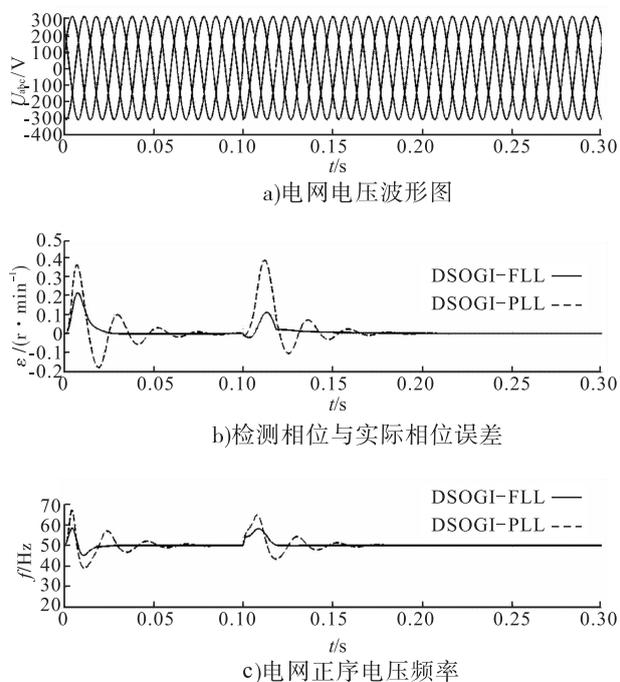


图6 电网电压相位突变的仿真结果

Fig. 6 Simulation result in  
voltage phase mutation

值为  $0.39 \text{ r/min}$ , 说明 DSOGI-FLL 动态响应速度更快. 在相位突变情况中, DSOGI-FLL 可在 1 个周期内完成对电网频率的锁定, 而 DSOGI-PLL 则需要 5 个周期, 且 DSOGI-FLL 频率波动明显小于 DSOGI-PLL, 说明 DSOGI-FLL 动态响应速度快、超调量小.

## 2.4 电网电压频率突变

在  $0.1 \text{ s}$  时, 电网电压频率从  $50 \text{ Hz}$  突变为  $48 \text{ Hz}$ , 图 7 给出了电网电压频率突变时的仿真结果.

由图 7 可知, 当电网电压频率发生突变时, DSOGI-FLL 在 2 个周期内实现了对电网电压相位的追踪, 优于 DSOGI-PLL 的 4 个周期, 且 DSOGI-FLL 的相位波动为  $1.2 \text{ r/min}$ , 小于 DSOGI-PLL 的  $1.25 \text{ r/min}$ . 在频率突变动态响应过程中, DSOGI-FLL 在 1 个周期内完成对电网频率的锁定, 而 DSOGI-PLL 需要 5 个周期, 且 DSOGI-FLL 频率波动明显小于 DSOGI-PLL,

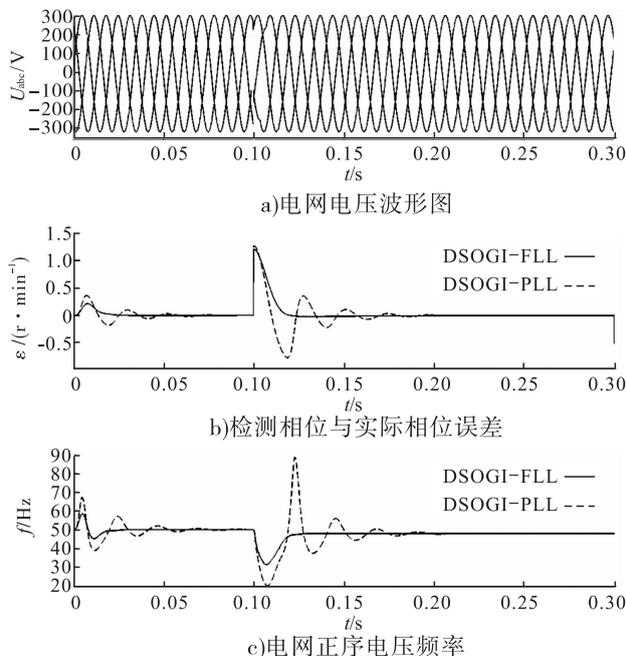


图7 电网电压频率突变的仿真结果

Fig. 7 Simulation result in the voltage  
frequency mutations

说明 DSOGI-FLL 动态响应速度快、超调量小.

对以上 4 种情况的仿真分析可知, DSOGI-FLL 和 DSOGI-PLL 都具有良好的频率自适应性, 能够较精确地检测电网电压不平衡时的相位和频率信息. 但在系统的动态响应过程中, DSOGI-FLL 的相位和频率波动明显小于 DSOGI-PLL, 具有超调量小、平滑性好的优点.

## 3 结语

针对电网电压三相不平衡问题, 设计了 DSOGI-FLL 用于检测基波正序分量, 并在 Matlab/Simulink 平台进行了仿真. 仿真结果表明, 电网电压处于不平衡状态时, 利用 DSOGI-FLL 的角频率反馈代替 DSOGI-PLL 的频率反馈, 实现对输入电压频率的自适应控制, 在电网电压相位和频率发生突变时, 能够快速准确地追踪电压相位和频率. 该方法运用于并网逆变器控制系统中的相位检测, 能够提高光伏并网逆变器的动态响应速度和系统稳态精度, 满足逆变

器控制系统的需求.

参考文献:

[1] BEST R E. 锁相环设计仿真与应用[M]. 李永明,译.5版.北京:清华大学出版社,2007.

[2] 黄建明,吴春华,许富强.基于相序解耦谐振控制器的基波正序电压相位检测方法[J].电网技术,2013,37(3):667.

[3] 吴晓波,赵仁德,马帅.电网畸变条件下基于滑动平均自适应陷波滤波器的基波相位提取[J].电网技术,2013,37(12):3528.

[4] 王建勋,刘会金,韩丰收,等.用于谐波、间谐波在线监测的时频混合方法[J].电网技术,2012,36(10):229.

[5] 王颢雄,马伟明,肖飞,等.双dq变换软件锁相环的数学模型研究[J].电工技术学报,2011,26(7):237.

[6] 赵贵龙,祝龙记,曹玲玲,等.基于光伏并网低

电压穿越的改进锁相环设计[J].低压电器,2014,6:28.

[7] 黄建明,吴春华,许富强.基于相序解耦谐振控制器的基波正序电压相位检测方法[J].电网技术,2013,37(3):667.

[8] WIDROW B, GLOVER J R, MCCOOL J M, et al. Adaptive noise cancelling: principles and applications [ J ]. Proceedings of the IEEE, 1975,63(12):1692.

[9] SAITOU M, MATSUI N, SIMIZU T. A control strategy of single-phase active filter using a novel d-q transformation[C]//38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference. Piscataway: IEEE, 2003:1222.

[10] 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.