

# 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计

赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记

(安徽理工大学电气与信息学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 针对光伏并网系统中的传统锁相环在电网电压不平衡的情况下存在的锁相精度不高的问题, 提出了一种能快速、精确地提取电网电压相位的一种双二阶广义积分锁相环(DSOGI-SPLL)。系统通过采用双二阶广义积分和标准的三相锁相环有效地过滤电网电压负序分量, 从而提取出电网电压正序分量, 达到精确检测电网电压正序分量的相位的目的。最后, 对电网电压两相跌落和三相不平衡跌落分别进行仿真, 采用 DSP 样板对仿真进行验证。仿真实验结果表明, 该锁相环能够向并网逆变器提供更精确的控制基准, 提高了并网发电系统并网的稳定性和有效性。

**关键词:** 光伏; 并网; 不平衡; 锁相环; 正序; 负序

## Improved PLL design of PV grid inverter system

ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji

(College of Electric and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** The paper presents a PLL based on double second-order generalized integral (DSOGI-PLL) of abstracting grid voltage phase quickly and accurately for low accuracy and slow dynamic response of traditional PLL in the case of the unbalanced grid voltage in grid-connected PV systems. It can effectively extract the grid voltage positive sequence component, by using generalized integral and standard three-phase locked loop. Finally, the paper builds simulation for two-phase grid voltage drop and three-phase grid voltage unbalanced drop, and then uses DSP to verify it. Simulation results show that the PLL can provide more precise control reference for the grid-connected inverter, by which the stability and effectiveness of grid power generation systems are improved.

**Key words:** photovoltaic; grid-connected; unbalanced; PLL; positive; negative

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0108-05

## 0 引言

随着能源危机的日益加重, 太阳能并网发电技术引起了越来越多的关注。当光伏并网逆变系统向电网馈电时, 并网逆变器是可再生能源并网的重要接口<sup>[1]</sup>。随着可再生能源渗透率的不断提高, 并网逆变器在配电网中的地位越来越突出<sup>[2-3]</sup>, 尤其当电网电压不平衡时, 并网逆变器的控制策略尤为重要。电网电压相位等信息是并网逆变器的参考基准, 锁相环(PLL)是当前使用最广泛的相位检测方法, 对于整个光伏并网控制系统至关重要<sup>[4]</sup>。因而, 锁相环结构的研究具有重要意义。

文献[5]通过低通滤波器分离基波分量, 再利用传统锁相环进行锁相, 这种方法会造成幅值衰减、相角漂移等误差。文献[6]通过增加自适应观测器

(FRF)来锁定电网电压相位, 该方法能有效地克服电网电压不平衡故障, 但算法比较复杂。文献[7]采用基于单d-q变换的锁相环进行锁相, 在电网电压平衡时, 能够精确锁相; 然而在电网电压不平衡时, 锁相产生了振荡, 不能有效地完成锁相。

因此, 针对传统d-q锁相环在电网电压不平衡时不能精确地检测电网电压相位的问题, 文章提出一种基于d-q变换的双二阶广义积分锁相环(DSOGI-SPLL)。系统通过采用两个二阶广义积分(SOGI)单元来提取出电网电压正序分量, 将得到的正序分量作为锁相环的参考基准。

## 1 传统 d-q 锁相环<sup>[8]</sup>

图1为d-q旋转变换电压矢量图, 图2为常用d-q锁相环的系统原理图。

在理想状态下, 设电网电压幅值为 $U_N$ , 由图1、图2可知, a、b、c坐标系的电网电压可表示为式(1)。



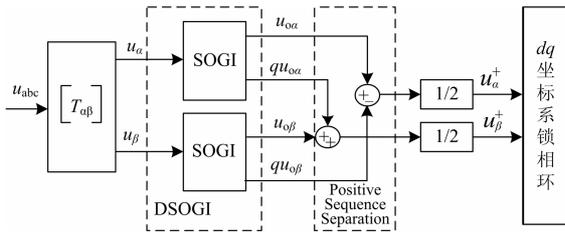


图 4 新型锁相环结构图

Fig. 4 Improved PLL structure diagram

## 4 仿真实验结果

### 4.1 仿真结果

为了验证 DSOGI-SPLL 结构的可行性, 文章在 Matlab / Simulink 环境下搭建了仿真模型, 对传统  $d-q$  锁相环和 DSOGI-SPLL 在电网故障时的并网同步性能分别进行了仿真。假定电网电压基波幅值为 220 V, 在 0~0.05 s 内, 电网电压为理想状态; 在 0.05~0.15 s 内,  $u_b=0.5$  p.u.、 $u_c=0.5$  p.u., 如图 5(a) 所示。传统  $d-q$  锁相环输出电压跌落深度不受并网

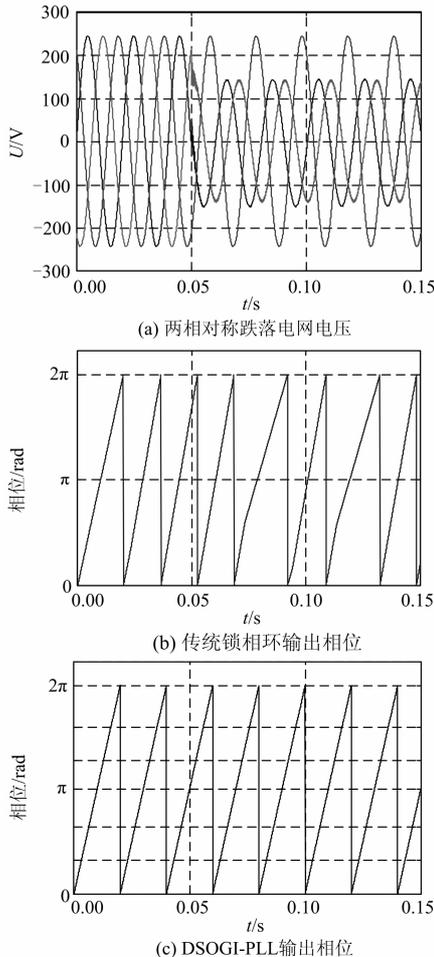


图 5 两相电压跌落仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms of two-phase grid voltage drop

系统控制, 产生了较大误差, 如图 5(b)所示; DSOGI-PLL 依然能够精确地检测到电网电压的相位, 如图 5(c)所示。

同样, 假定电网电压基波幅值为 220 V, 在 0~0.05 s 内, 电网电压为理想状态; 在 0.05~0.15 s 内,  $u_a=1.0$  p.u.、 $u_b=0.5$  p.u.、 $u_c=0.8$  p.u., 如图 6(a) 所示。传统  $d-q$  锁相环锁相失败, 如图 6(b)所示; DSOGI-PLL 仍然能够很好地跟随电网电压相位, 如图 6(c)所示。

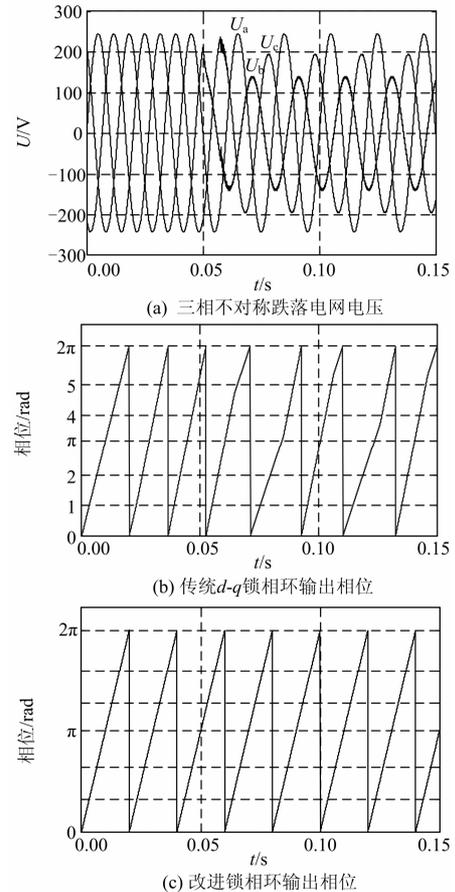


图 6 三相不对称跌落仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of three-phase grid voltage unbalanced drop

由仿真图 5(b)、图 6(b)可知, 传统  $d-q$  锁相环在 0~0.05 s 内能够有效地锁相, 但在 0.05~0.15 s 内出现了抖动, 并且频率也发生了变化; 而仿真图 5(c)、图 6(c)表明, DSOGI-SPLL 在 0~0.15 s 内都能快速、精确地检测到电网电压相位, 几乎不受电网电压跌落故障的影响。总之, (1) 在三相电压平衡条件下, 传统  $d-q$  锁相环和 DSOGI-SPLL 都能准确地检测到电网电压的相位; (2) 在三相电压不平衡(两相跌落、不对称跌落)条件下, 传统  $d-q$  锁相环不能准确锁相, 但 DSOGI-SPLL 依然能够很好地跟踪电网电压相

位, 并且具有较好的动态响应特性。

#### 4.2 实验结果

为了进一步证明 4.1 节中仿真结果的正确性, 文章做了相关实验, 对其进行验证。实验首先采用 TMS320F2812DSP 芯片对电网电压进行采样, 采样周期为  $50\ \mu\text{s}$ , 并网逆变系统的硬件结构, 如图 7 所示。实验波形图 8 中, 设定电网电压幅值为  $750\ \text{mV}$ 、 $u_b=0.5\ \text{p.u.}$ 、 $u_c=0.5\ \text{p.u.}$ , 锁相环输出相位波形验证了仿真图 5 的正确性; 实验波形图 9 中, 设定电网电压幅值为  $750\ \text{mV}$ 、 $u_a=1.0\ \text{p.u.}$ 、 $u_b=0.5\ \text{p.u.}$ 、 $u_c=0.8\ \text{p.u.}$ , 锁相环输出相位波形证明了仿真图 6 的有效性。显而易见, 实验结果再次证明了该结构模型的正确性。

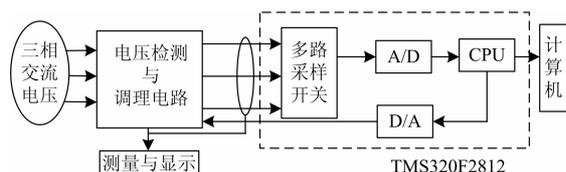


图 7 并网逆变系统结构图

Fig. 7 Grid inverter system structure diagram

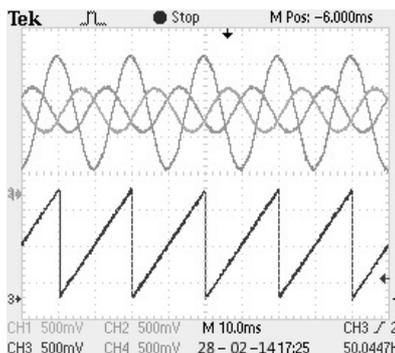


图 8 两相电压跌落实验图

Fig. 8 Experimental figure of two-phase grid voltage drop

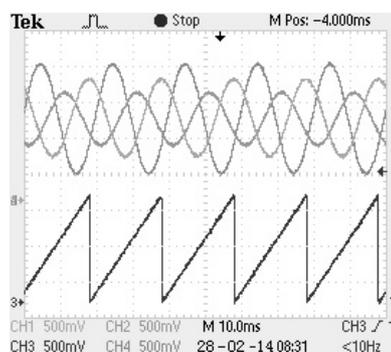


图 9 三相电压不平衡跌落实验图

Fig. 9 Experimental figure of three-phase grid voltage unbalanced drop

## 5 结语

针对传统  $d-q$  锁相环在电网电压不平衡时不能完成锁相功能的问题, 文章提出了 DSOGI-SPLL 技术。首先, 电网电压利用 SOGI 结构进行相序分离, 得到电网电压正分量; 再将正序分量进行滤波; 最后将滤波后的正序分量送入锁相环, 进行锁相。仿真实验波形证明: (1) 不论在三相电压平衡, 还是在单相跌落、两相跌落的条件下, DSOGI-SPLL 都能很好地完成锁相功能, 输出相位波形几乎不受电压不平衡的影响; (2) 动态响应时间快; (3) 结构简单, 无需复杂的算法, 实时性好。一方面, 解决了太阳能并网发电过程中由于电网电压不平衡时必须断开并网逆变器而造成的电网污染问题。另一方面, 提高了并网的稳定性、有效性、可靠性。对于光伏并网发电、风力发电等电力系统的应用控制, 尤其是在孤岛模式或弱电网电压情况时, 为并网逆变器提供相位等信息的 DSOGI-SPLL 结构是一个非常理想的选择。

## 参考文献

- [1] 黄天富, 石新春, 魏德冰, 等. 基于电流无差拍控制的三相光伏并网逆变器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 36-41.  
HUANG Tianfu, SHI Xinchun, WEI Debing, et al. Study on three-phase photovoltaic grid-connected inverter based on current deadbeat control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 36-41.
- [2] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1-12.  
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, TANG Shengqing, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 1-12.
- [3] 顾和荣, 赵清林, 伞国成, 等. 三相并网逆变器有源孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 44-47.  
GU Herong, ZHAO Qinglin, SAN Guocheng, et al. Active islanding detection for three-phase grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 44-47.

- [4] 龚锦霞, 解大, 张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 94-99, 121.  
GONG Jinxia, XIE Da, ZHANG Yanchi. Principal and performance of the three-phase digital phase-locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 94-99, 121.
- [5] CARUGATI I, MAESTRI S, DONATO P G, et al. Variable sampling period filter PLL for distorted three-phase systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 321-330.
- [6] 霍现旭, 胡书举, 许洪华. 电网不平衡下基于自适应观测器的锁相环研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 120-125.  
HUO Xianxu, HU Shuju, XU Honghua. Phase-locked loop algorithm based on adaptive observer under unbalanced grid voltage condition[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 120-125.
- [7] 陈明亮, 肖飞, 刘勇, 等. 一种正负序分离锁相环及其在并网型风力发电系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 28(8): 181-186.  
CHEN Mingliang, XIAO Fei, LIU Yong, et al. A positive and negative-sequence detection PLL and its application in wind power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 28(8): 181-186.
- [8] 王颢雄, 马伟明, 肖飞, 等. 双 d-q 变换软件锁相环的数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 237-241.  
WANG Haoxiong, MA Weiming, XIAO Fei, et al. Study of model of software phase locked-loop based on dual-d-q synchronous transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 237-241.

---

收稿日期: 2014-04-10; 修回日期: 2014-05-08

作者简介:

赵贵龙(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力电子与电力传动研究; E-mail: 562495230@qq.com

曹玲玲(1988-), 女, 硕士研究生, 从事光伏并网和开关电源的研究;

祝龙记(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力电子与电力传动、控制系统计算机仿真研究。