

基于SOGI的光伏并网逆变器锁相环的优化研究

李锐¹, 李鹏², 张琦³, 高小娟¹

(1. 国网宁夏电力有限公司宁东供电公司, 宁夏 银川 750411;

2. 西部新能(宁夏)电力工程设计有限公司, 宁夏 银川 750409;

3. 西安理工大学电气工程学院复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 在宁夏的中东部地区, 风光资源良好, 大量光伏电站以及风电场并入大电网, 促进风光资源的有效利用与开发。随着新型光伏材料的出现, 成本不断降低, 转换效率不断提高, 光伏并网得到大量推广。为实现光伏并网逆变器的快速并网, 针对单级式光伏并网逆变器锁相环进行研究, 分析传统的锁相环因存在 $1/4$ 周期的延迟, 导致跟踪性及动态响应不佳, 提出了基于二阶广义积分器 (Second Order Generalized Integrator, SOGI) 的锁相环并进行对比分析, 将 SOGI 引入后, 提高了并网逆变器的并网效率和动态响应, 对于光伏并网逆变系统具有一定的研究意义。

关键词: 化石能源; 清洁能源; 风光资源; 太阳能电池阵列; 单级式光伏并网逆变器; SOGI; 锁相环

Research on optimization of phase locked loop for PV grid-connected inverters based on SOGI

LI Rui¹, LI Peng², ZHANG Qi³, GAO Xiaojuan¹

(1. State Grid Ningdong Power Supply Company, Yinchuan 750411, China;

2. Western New Energy (Ningxia) Electric Power Engineering Design Co., Ltd., Yinchuan 750409, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In the central and eastern regions of Ningxia, there are good wind and solar resources, with a large number of photovoltaic power stations and wind farms integrated into the large power grid to promote the effective utilization and development of wind and solar resources. And with the emergence of new photovoltaic materials, costs continue to decrease, conversion efficiency continues to improve, and photovoltaic grid connection has been widely promoted. In order to realize rapid grid-connection of photovoltaic grid-connected inverters, this paper focuses on the research of single stage photovoltaic grid connected inverters phase-locked loops, and analyzes that the traditional phase-locked loop has a quarter period delay, which leads to poor tracking and dynamic response. And proposes a method based on SOGI for comparative analysis of the Second Order Generalized Integrator's phase-locked loop shows that the introduction of SOGI improves the grid-connected inverter's efficiency and dynamic response, which has a certain research significance for grid-connected photovoltaic inverter systems.

Key words: fossil energy; clean energy; solar energy and wind energy; solar cell array; single-stage grid-connected photovoltaic inverter; SOGI; phase-locked loop

0 引言

目前,常见的并网逆变器系统的锁相环多数用于三相系统,单相系统研究较少,若三相系统的锁相环直接应用于单相系统,会导致参数适应性较弱,跟踪速率慢,跟踪误差大^[1]。对于单相的光伏并网系统,一般单相锁相环(Single-phase Phase Locked Loop, SPLL)算法是模仿三相系统的三相锁相环(Phase Locked Loop, PLL)算法得到。由于单相系统只有一个输入电压信号,若采用与三相系统类似的锁相环控制策略,则必须构造一个虚拟的两相直角静止坐标系($\alpha\beta$ 坐标系),经过同步旋转坐标系(dq 坐标系)变换得到。传统方法中,为获得两相正交的电压信号,需要对输入电压信号进行 90° 相位偏移,即相位延迟 $1/4$ 个周期^[2]。针对这种算法的动态响应并不理想。本文提出了一种并网逆变器锁相环的优化方法,是基于二阶广义积分器进行优化的控制方法,能很好地改善系统的动静态特征。

1 传统锁相环工作原理分析

在光伏并网发电系统中,需要实时检测电网电压的相位和频率以控制并网逆变器,使其输出电流与电网电压相位及频率保持同步,即为同步锁相。

锁相环路是一种反馈电路,简称PLL。因锁相环可以实现输出信号频率对输入信号频率的自动跟踪,所以锁相环通常用于闭环跟踪电路,锁相环在工作过程中,当输出信号的频率与输入信号的频率相等时,输出电压与输入电压保持固定的相位差值,即输出电压与输入电压的相位被锁住,这就是锁相环的由来。

锁相环应用就是将锁相误差信号输入控制器中,将输出值加上初始工频角频率,得到锁相的角频率输出,经过积分得到锁相相位值。为将锁相相位值限制在 $0 \sim 2\pi$ 之间,采用一阶延时,本文采用比例积分(Proportional Integral, PI)控制器调节,PI控制器比例系数为 K_p ,积分系数为

K_i ,通过分析得到PLL控制框图如图1所示。其中,锁相角与电网电压相位同步,直流分量 U_d 为额定值, U_q 为0。将参考值0和实际变换后的 U_q 相减得到误差信号 φ ,再经过PI调节与理论值 $2\pi f$ 相加得到实际角频率 ω ,最后经过积分输出电网电压的相位 θ 。

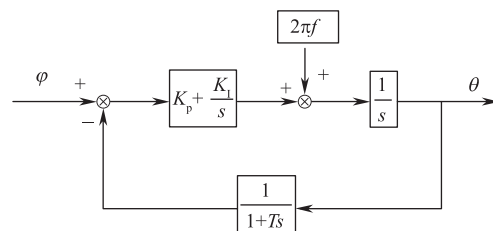


图1 PLL控制框图

Fig. 1 PLL control block diagram

根据坐标系进行锁相环所需的坐标变换,如图2所示,两相静止坐标系-两相同步旋转坐标系的数学矩阵为

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

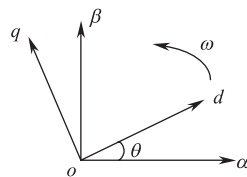


图2 $\alpha\beta$ -dq 坐标系

Fig. 2 $\alpha\beta$ -dq coordinate system

光伏并网发电系统是与电网相连并向电网输送电力的光伏发电系统,经过逆变器逆变转换后,向电网输出与电网电压同频、同相的正弦交流电流,而锁相环的输出就是为并网电流提供相角,即目的是锁相环输出与并网电压同频、同相。

在PSIM仿真环境下,搭建单相单级式光伏并网逆变器系统,应用光伏输出序列加Boost电路构成并网系统的前级系统,如图3所示。该系统包括太阳能电池阵列、DC/DC变换器(直流变换器)、DC/AC逆变器(直流变交流逆变器)和模拟电网等。其中本文DC/DC变换器采用Boost升压电路,因为Boost电路是最常用的能对光伏

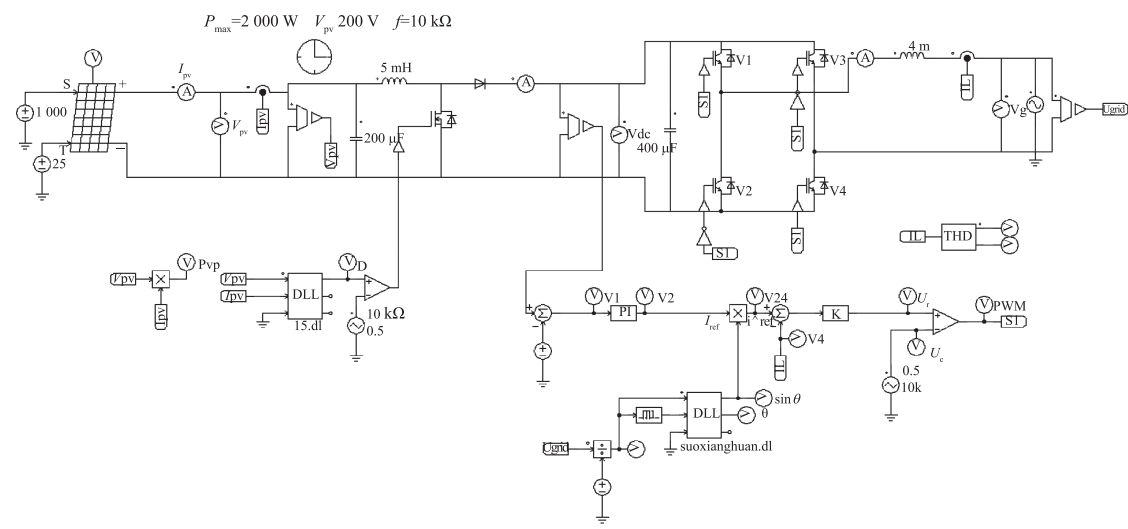


图 3 单相单级式光伏并网逆变器仿真系统

Fig. 3 Simulation system of single phase single stage photovoltaic grid connected inverter

系统最大功率点 (MPPT) 进行跟踪的阻抗变换电路。本系统控制算法采用PI控制, 对并网系统的前级系统输出电压 V_i 进行PI控制后, 逆变器通过锁相环模块并网, 锁相环程序采用.c文件集成到DLL文件 (即动态链接库) 中, 构成锁相环模块。交流网侧电压提出单位信号作为 dq 变换的一个输入, 交流网侧电压提出的单位信号进行1/4个周期延迟, 得到 dq 变换的另一个输入。锁相角与电网电压相位同步, 则直流分量 U_d 为额定值, 而 U_q 为0; 因此可将参考值0与实际变换后的 U_q 相减, 得到锁相环误差信号, 误差信号作为锁相角的函数, 随时间不断跟踪电网相角, 直至同相, 从而实现锁相。传统锁相环模块如图4所示, 通过仿真验证传统锁相环的响应速度。仿真具体参数见下表。

表 仿真参数

Tab. Simulation parameters

光伏板最大功率点输出功率 $P_{\max}/W$	2 000 W
光伏板参考温度 $/^{\circ}C$	25
光伏板光照强度 $/(W/m^2)$	400
光伏系统输出电压 V_{pv}/V	200
系统频率 f/Hz	50
系统周期 $/s$	0.02
开关频率 f_s/kHz	10
采样周期 $T_s(T_s=1/f_s)/\mu s$	100

根据图3搭建的仿真系统进行仿真验证。传统锁相环输出的 θ 波形如图5所示。由图5可以看出, 传统锁相环输出的 θ 波形存在1/4周期的延迟, 误差明显, 导致 $\sin\theta$ 输出的波形也有明显的延迟, 前两个周期跟踪不上, 两个周期后才开始输出正弦波, 这就导致系统动态响应慢, 跟踪准确度低, 如图6所示。为此, 本文提出了基于SOGI的单级式光伏并网逆变器锁相环研究, 解决了延迟问题, 加快了系统的响应速度, 提高了系统的跟踪准确度。

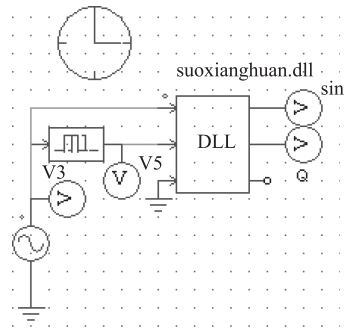


图 4 传统锁相环模块

Fig. 4 Traditional phase-locked loop module

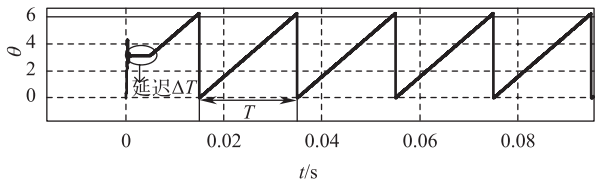
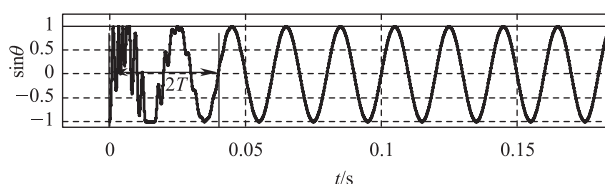


图 5 传统锁相环输出的 θ 波形

Fig.5 Traditional phase-locked loop output θ wave form

图6 传统锁相环输出的 $\sin\theta$ 波形Fig. 6 Traditional phase-locked loop output $\sin\theta$ wave form

2 基于SOGI优化的锁相环研究与分析

本文采用二阶广义积分器 (Second Order Generalized Integrator, SOGI) 模块产生所需的正交信号, 不用进行相位延迟。SOGI是一个二阶的广义积分器, 通过SOGI和传统的PLL结合, 结构上只使用了一个SOGI以及一次虚拟正交变换—— dq 变换, 就可在保证动态响应快速性的同时, 有效地提高锁相环对电网电压的适应性^[5]。单相单级式光伏并网逆变器仿真系统的前级系统, 即Boost电路的输出电压 $V_i(s)$ 经过SOGI中的虚拟正交坐标系后, 分解为两个变量 $V'_d(s)$ 和 $V''_q(s)$ 。

根据图7的虚拟正交信号算法结构框图推导出SOGI的传函数为式(2), 将其应用于控制系统中, 提高系统的动态响应速度。

$$\begin{cases} G_d(s) = \frac{V'_d(s)}{V_i(s)} = \frac{K\omega_0 s}{s^2 + K\omega_0 s + \omega^2} \\ G_q(s) = \frac{V''_q(s)}{V_i(s)} = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + K\omega_0 s + \omega^2} \end{cases} \quad (2)$$

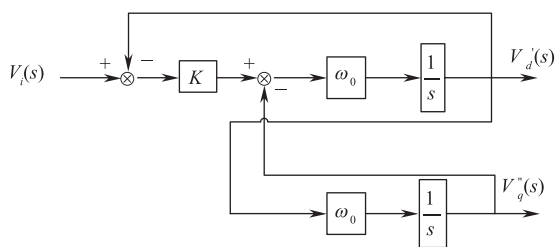


图7 虚拟正交信号算法结构框图 (SOGI 结构)

Fig. 7 Virtual orthogonal signal algorithm structure block diagram (SOGI structure)

$G_d(s)$ 看作是带通滤波器, 可求其品质因数 $Q_d=1/K$, 其性质只与系统增益 K 有关, 与 ω_0 无关。这样得到的 $V''_q(s)$ 不需要相位偏移

90° 。

SOGI在电压畸变、相位突变等非理想情况下有比较好的动态和稳态性能。用SOGI代替传统单相同步旋转坐标系中产生的正交信号的环节, 构成了以SOGI为核心的零延迟单相锁相环, 如图8所示。

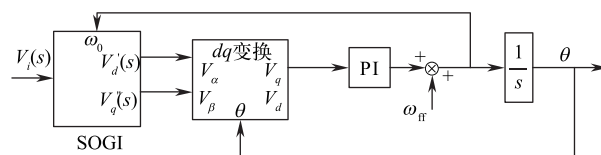


图8 SOGI 单相锁相环

Fig. 8 SOGI single-phase phase-locked loop

由于 dq 变换后, PI 控制器对 q 轴分量进行跟踪, 当相位和频率完全锁定时, 一定有 $V''_q(s)=0$ 。PI 之后加入固有频率, 再将此送回 SOGI 模块中, 作为 SOGI 的谐振频率, 这样就实现了锁相环的频率自适应, 并根据以上推导编写程序, 载入 DLL 模块, 图9为基于 SOGI 锁相环的集成 DLL 模块。

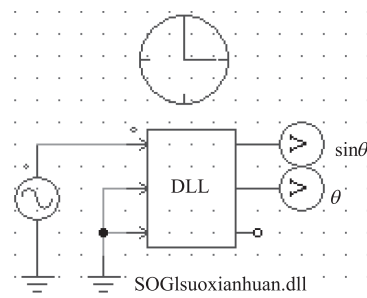
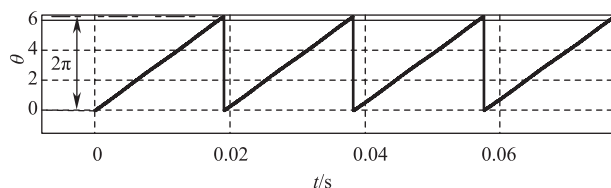


图9 基于 SOGI 优化的锁相环模块

Fig. 9 Phase locked loop module optimized based on SOGI

应用优化后的 SOGI 锁相环模块后, 系统输出的 θ 波形及 $\sin\theta$ 波形如图10、图11所示。

图10 基于 SOGI 优化的锁相环输出的 θ 波形Fig. 10 Output of phase locked loop based on SOGI optimization θ wave form

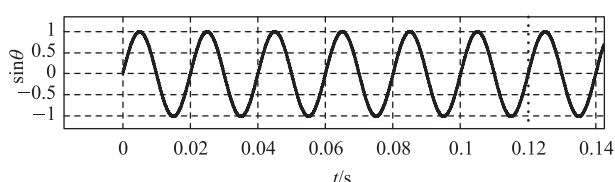


图 11 基于 SOGI 优化的锁相环输出的 $\sin\theta$ 波形

Fig. 11 $\sin\theta$ of phase locked loop output based on SOGI optimization wave form

通过图5与图10、图6与图11两组仿真结果的对比发现，在同一条件下，基于传统锁相环的并网系统因坐标变换产生1/4周期的延迟，导致输出的 θ 与 $\sin\theta$ 存在明显延迟，锁相环输出 $\sin\theta$ 的波形质量明显在一两个周期后好转。而基于SOGI优化后的锁相环因为虚拟正交变换，不存在延迟，输出的波形质量良好，动态响应速度很快。

3 锁相环的应用

为验证锁相环效果，将传统锁相环与基于 SOGI 的优化后锁相环应用于单相单级式光伏并网逆变器仿真系统，参数设置如图12所示。

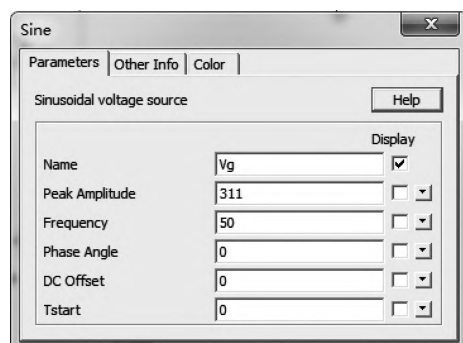


图 12 并网电压 V_g 参数设置

Fig. 12 Grid connected voltage V_g parameter setting

锁相环输出的 $\sin\theta$ 幅值为1，周期为0.02 s，与电网电压周期相同。图12的并网电压 V_g 参数设置中，仿真模拟并网电压220 V的幅值为311，因幅值相对于 $\sin\theta$ 的幅值过大，为对比锁相环输出与并网电压相位跟踪情况，现同比例缩小得到 V_{17} ，与并网电压同频同相，幅值为1，用同频同相的 V_{17} 代表并网电压进行动态性能验证。为验证锁相环效果，将传统锁相环与优化后的锁相环分别载入仿真系统，得到锁相环的输出波形 $\sin\theta_1$

(传统锁相环)与 $\sin\theta_2$ (SOGI锁相环)，如图13所示。由图13可知，传统锁相环明显滞后于 SOGI 锁相环的输出1/4，这会影响跟踪性能与响应时间。

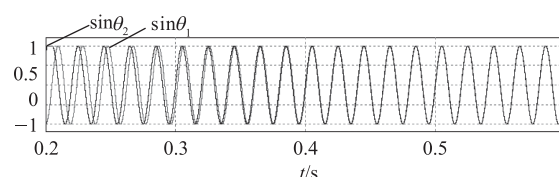


图 13 两种锁相环的输出波形 $\sin\theta_1$ 与 $\sin\theta_2$

Fig. 13 Output waveforms two types of phase-locked loops $\sin\theta_1$ and $\sin\theta_2$

对应用PSIM搭建的光伏并网系统进行仿真，结果如图14、图15所示。图14为传统锁相环输出的 $\sin\theta$ 与电网电压波形对比，发现因为传统锁相环的1/4周期延迟问题，并网电流在跟踪电网电压存在一定的跟踪时间。图15为基于SOGI优化的锁相环输出的 $\sin\theta$ 与电网电压波形对比，可以看出并网电流 ($\sin\theta$) 能快速跟踪电网电压，达到同频同相。

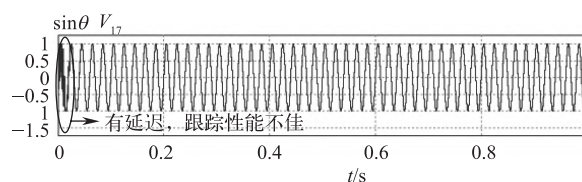


图 14 传统锁相环输出的 $\sin\theta$ 与电网电压波形

Fig. 14 Output of traditional phase-locked loop $\sin\theta$ voltage waveform related to the power grid

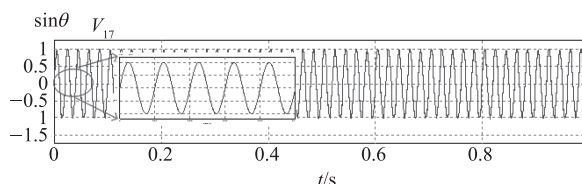


图 15 基于 SOGI 优化的锁相环输出的 $\sin\theta$ 与电网电压波形

Fig. 15 $\sin\theta$ of phase locked loop output based on SOGI optimization voltage waveform related to the power grid

以上分析发现，基于SOGI优化的锁相环的并网系统并网电流跟踪电网电压的速度快于传统锁相环的跟踪速度，这与理论分析出的基于SOGI优化后的系统动态响应速度快的结论

一致。

应用基于SOGI锁相环得到的并网逆变器输出电压与电流波形如图16所示,功率因数相关参数如图17所示。

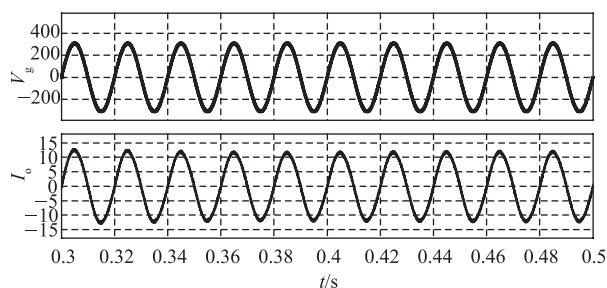


图 16 光伏并网系统输出电流 I_o 和电网电压 V_g 波形
Fig. 16 Waveform of output current I_o and grid voltage V_g of photovoltaic grid connected system

Power Factor		
Time	From	1.8665000e-001
Time	To	2.9980000e-001
Io vs. Vg		9.8267995e-001

图 17 功率因数

Fig. 17 Power factor

由图16可以看出,光伏并网系统的输出电流与并网电压有很好的动态跟踪性,得到的波形质量良好,并网输出电流与电网电压的功率因数达到0.982 67,保持了同相位。

4 结束语

本文针对光伏并网逆变系统中的锁相环快速跟踪的相关问题进行了探讨和研究。论文详细地分析了传统锁相环与基于SOGI优化后的锁相环对光伏并网逆变系统动态跟踪的影响,并对其进行了仿真验证。在相同条件下,传统的锁相环存在1/4的延迟,导致输出特性受到影响,从而并

网电流跟踪并网电压的动态响应速度受到一定影响,而本文提出的基于SOGI优化后的锁相环零延迟,能很好地跟踪并网电压,大大提高了并网电流的动态响应速度。

参考文献

- [1] 曾正,赵荣祥,汤胜清,等.可再生能源分散接入先进并网逆变器研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(24):12-21.
- [2] 崔冠男.我国光伏产业市场绩效研究[D].济南:山东大学,2013.
- [3] 陈学.新能源产业发展现状及传统能源行业战略选择浅析[J].石油商技,2012(2):44-49.
- [4] 江燕兴,潘逸蕊,窦伟,等.一种用于光伏并网逆变器的高性能锁相环设计[J].电工电能新技术,2016,35(7):75-80.
- [5] 郑诗程,马建,李浩,等.电网严重畸变情况下的锁相策略研究[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(3).
- [6] 李锐.LCL型并网逆变器的主动阻尼方法研究[D].西安:西安理工大学,2019.

作者简介

李锐(1992—),女,硕士,工程师,主要研究方向:电网调控,新能源发电。

李鹏(1989—),男,本科,工程师,主要研究方向:电网输电线路设计。

张琦(1982—),男,博士,副教授,主要研究方向:新能源发电。

高小娟(1995—),女,助理工程师,主要研究方向:电网运检。

(收稿日期:2023-08-03)