

# 基于改进锁频器频率偏差检测的光伏逆变器 快速频率响应控制

官 成<sup>1</sup>, 王 卫<sup>1</sup>, 赵正奎<sup>2</sup>, 董 楠<sup>1</sup>, 刘慧珍<sup>1</sup>, 韩民晓<sup>2</sup>

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100031;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:**光伏电站高比例接入电网造成电力系统结构持续性改变,导致电网可调节资源存量不断下降,抵御故障扰动的能力减弱,电网频率越限风险增加。为提高光伏电站快速频率响应能力,本文根据现有新能源调频政策,设计了光伏逆变器有功-频率下垂特性,提出了基于改进二阶广义积分锁频器的光伏逆变器快速频率响应控制策略,使光伏逆变器具备主动调频的功能。采用改进二阶广义积分锁频器快速检测系统频率,并将频率偏差直接反馈给光伏逆变器控制系统,克服了传统锁相环在电网频率突变时相位偏差大、时延等问题。仿真和实验证明了光伏逆变器快速频率响应控制的正确性与可行性。

**关键词:** 光伏逆变器; 二阶广义积分; 锁频器; 下垂控制; 快速频率响应

**DOI:** 10.12067/ATEEE2104005

**文章编号:** 1003-3076(2021)09-0010-08

**中图分类号:** TM76

## 1 引言

光伏发电具有随机性、间歇性、波动性特征,大规模光伏电站并网,导致电力系统“双高”“双峰”的特性非常明显,电网安全稳定运行和电力电量平衡将面临极大考验。为此,新修订的《电力系统安全稳定导则》规定了新能源并网点的电网短路容量应满足一定的要求,同时提出新能源应具备惯量支撑、一次调频以及高/低电压穿越能力,配合传统机组提升电网安全防控水平<sup>[1-7]</sup>。

目前,光伏逆变器通常通过响应(Automatic Generation Control, AGC)调度指令参与电网快速频率响应,而这种集中式控制存在通信延迟,同时对通信系统的可靠性要求高;另一方面,大规模光伏并网造成网络节点规模大,严重增加了通信网络负担,进一步威胁通信系统的可靠性。因此,光伏逆变器应具备状态感知能力,主动参与电网调频<sup>[8,9]</sup>。即,光伏逆变器主动检测并网点频率信号,利用下垂控制或虚拟同步机技术模拟传统机组频率响应特性参与

电网调频。

基于同步参考坐标系的锁相环技术(Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop, SRF-PLL)是光伏逆变器最常用的频率检测与同步技术。SRF-PLL采用单同步坐标系锁相控制结构,通过Clark和Park变换,将三相静止坐标系下的检测信号转换到dq同步旋转坐标系,并通过闭环控制使q轴变量趋近于零,实现锁相<sup>[10,11]</sup>。在理想电网情况下,SRF-PLL的准确度高,动态性能良好。但在电网频率变化量和变化率较大时,SRF-PLL的准确度降低,动态性能恶化,无法满足光伏系统控制需求<sup>[12-14]</sup>。

锁频环具备:①锁频环中有陷波滤波器,可以起到谐波抑制的作用;②锁频环同步技术在相角跳变的情况下更具备优势;③锁相环中压控振荡器环节在锁频环中被省略,更便于应用和设计。基于二阶广义积分器的锁频环(Second Order Generalized Integrator Frequency-Locked Loop, SOGI-FLL),其带通滤波器可滤除电压高频成分,有效抑制噪声,动态性

收稿日期: 2021-04-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900505)

作者简介: 官 成(1987-),男,山东籍,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统稳定性分析;

王 卫(1970-),女,北京籍,高级工程师,硕士,研究方向为电网调控网源协调技术。

能明显优于 SRF-PLL<sup>[15,16]</sup>。但 SOGI-FLL 对并网点电压扰动抑制能力有限,输出频率信号易受电网电压谐波和直流分量干扰而存在高频分量,进而影响功率控制能力。

此外,二阶广义积分器的锁频环输出的频率微分信号在动态下微分信号误差较大将引起虚拟惯量控制的输出功率超调量过大,造成后续锁相计算偏差过大<sup>[17]</sup>。文献[18]提出通过对锁相环检测到的频率信号进行微分运算并经低通滤波器滤波后作为功率变换器的电流指令反馈量。文献[19]提出利用 SOGI-FLL 检测电网频率微分信号,并用于逆变器输出功率虚拟惯量控制。采用嵌入式结构,其滤波性能会得到有效增强,其动态响应速度会稍显迟缓<sup>[20-23]</sup>。

本文针对光伏逆变器调频控制策略改进了 SOGI-FLL,给出了改进的二阶广义积分锁频器频率偏差检测方法,通过小信号模型分析完成了锁频器参数设计,提高了光伏逆变器并网点频率及频率偏差检测的动态特性和精度。

## 2 光伏逆变器快速频率响应控制

### 2.1 光伏逆变器控制架构

并网光伏逆变器控制架构如图 1 所示。通常光伏逆变器运行于最大功率跟踪模式(Maximum Power Point Tracking, MPPT),若电网频率偏差  $\Delta f$  超过阈值  $f_H$ ,光伏逆变器调整输出功率,主动参与电网调频。

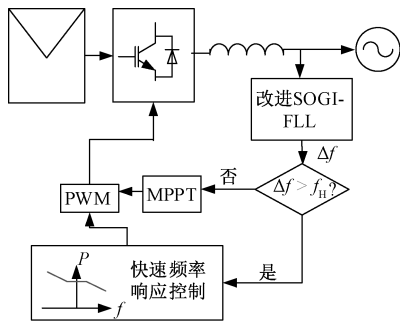


图 1 光伏逆变器控制架构

Fig.1 Block diagram of PV inverter

### 2.2 光伏逆变器调频策略

为充分发挥光伏逆变器的快速频率响应功能,同时避免电网高频扰动情况下,光伏逆变器出力频繁变化,参考常规水、火电机组一次调频死区参数,设定光伏逆变器一次调频死区。在调频死区内,光伏逆变器不触发调频功能,若电网频率大于调频阈

值,光伏逆变器根据有功-频率下垂特性调整输出功率,主动参与电网频率调节。光伏逆变器有功-频率下垂特性如图 2 所示。

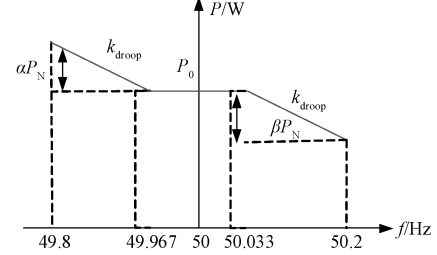


图 2 光伏逆变器有功-频率下垂特性曲线

Fig.2 P-f droop characteristic of PV power station

光伏逆变器输出有功功率指令变化  $\Delta P$  由初始功率  $P_0$  和频率偏差  $\Delta f$  共同确定,即

$$\Delta P = \frac{\Delta P_0 k_{\text{droop}} EU - \Delta f EU (s + \omega_c)}{X_{\text{eq}} s^2 + X_{\text{eq}} s + k_{\text{droop}} EU \omega_c} \quad (1)$$

式中,  $\Delta P_0$  为光伏逆变器初始功率偏差值;  $k_{\text{droop}}$  为调整系数;  $E$  为并网点电压;  $U$  为逆变器输出电压;  $\omega_c$  为低通滤波器截止频率;  $X_{\text{eq}}$  为逆变器并网等效阻抗。

## 3 SOGI-FLL 光伏逆变器频率检测

光伏逆变器 SOGI-FLL 的如图 3 所示。  $u_{\text{in}}$  为光伏逆变器交流侧电压,  $u_d$ 、 $u_q$  为输出同步信号和滞后输入信号 90° 的正交信号,  $\omega$  为输入电压频率,  $\omega_0$  为积分器谐振频率,  $\lambda$ 、 $\gamma$  为增益系数。

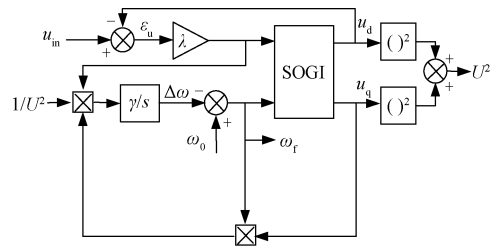


图 3 SOGI 锁频器原理图

Fig.3 Block diagram of SOGI-FLL

根据 SOGI 原理,输出电压  $u_d$ 、 $u_q$  与输入电压  $u_{\text{in}}$  间的关系可表征为:

$$D(s) = \frac{u_d(s)}{u_{\text{in}}(s)} = \frac{\lambda s \omega_0}{s^2 + \lambda \omega_0 s + \omega^2} \quad (2)$$

$$Q(s) = \frac{u_q(s)}{u_{\text{in}}(s)} = \frac{\lambda s \omega_0^2}{s^2 + \lambda \omega_0 s + \omega^2} \quad (3)$$

若输入电压  $u_{\text{in}}$  的频率为无阻尼自然频率 (即  $\omega = \omega_0$ ), SOGI 电路就表现为一个具有无穷大增益的积分器,通过调节增益系数  $\lambda$  就可以调节

传递函数  $D(s)$ 、 $Q(s)$  的频率响应特性。根据式 (2) 和式 (3) 的传递函数特性即可构造正交信号发生器。

在基于 SOGI 形成正交信号发生器中, SOGI 的固有谐振特性使正交信号发生器可作为压控振荡器工作, 系统自动调谐。则输入电压和误差信号的传递函数可表示为:

$$H(s) = \frac{\varepsilon_u}{u_{in}}(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \lambda\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon_u$  为输入电压  $u_{in}$  与输出同相电压  $u_d$  的误差。

由式 (2)、式 (3) 可知, 稳态情况下锁频器处于捕获状态, 频率变化率等于零, 则输入电压频率等于锁频器输出频率 ( $\omega = \omega_f$ ), 则:

$$u_d = u_{in} = U \cos(\omega t + \theta) \quad (5)$$

若输入电压频率不等于锁频器输出频率,  $\omega \neq \omega_f$ , 则输出同相电压和正交电压信号分别为:

$$\begin{cases} u'_d = U |D(j\omega)| \cos(\omega t + \theta + \angle D(j\omega)) \\ u'_q = \frac{\omega_f}{\omega} U |D(j\omega)| \sin(\omega t + \theta + \angle D(j\omega)) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} |D(j\omega)| = \frac{\lambda\omega\omega_f}{\sqrt{(\lambda\omega\omega_f)^2 + (\omega^2 - \omega_f^2)^2}} \\ \angle D(j\omega) = \arctan \frac{\omega_f^2 - \omega^2}{\lambda\omega\omega_f} \end{cases} \quad (7)$$

根据式 (6) 和式 (7), SOGI 锁频器的电压误差  $\varepsilon_f$  可表示为:

$$\varepsilon_f = u'_q (u_{in} - u'_d) \quad (8)$$

在积分环节作用下, 忽略其中的交流分量, 则系统动态平均模型可整理为:

$$\dot{\omega}_f = \frac{\gamma U^2}{\lambda \omega_f} (\bar{\omega}_f - \omega) \quad (9)$$

采用传递函数  $G_f(s)$  表征系统工作特性, 则:

$$G_f(s) = \frac{U^2 \gamma}{\lambda \omega_f s + U^2 \gamma} \quad (10)$$

系统的频率响应特性可近似为一阶惯性环, 然而该一阶模型忽略了电压的相位和幅值动态特性。在光伏逆变器快速频率响应控制系统中, 锁频器阻尼系数较小的情况下, 频率检测精度和速度都难以满足控制系统需求。

## 4 改进 SOGI-FLL

### 4.1 锁频环小信号模型

光伏逆变器并网点电压相角  $\theta$  和幅值  $U$  可表示为:

$$\begin{cases} \theta = \arctan \frac{u_q}{u_d}, \dot{\theta} = \frac{\dot{u}_q u_d - \dot{u}_d u_q}{U^2} \\ U = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}, \dot{U} = \frac{\dot{u}_d u_d + \dot{u}_q u_q}{U} \end{cases} \quad (11)$$

同时

$$\begin{cases} \dot{u}_d = \omega_f (\lambda u_{in} - \lambda u_d - u_q) \\ \dot{u}_q = \omega_f u_d \end{cases} \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (11), 可得:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega_f + \frac{\lambda}{\gamma} \omega_f \dot{\omega}_f \\ \Delta \dot{\theta} \approx \Delta \omega_f + \frac{\lambda}{\gamma} \omega_n \Delta \dot{\omega}_f \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $\omega_n$  为系统额定频率。根据式 (9) 和式 (13), 则系统频率闭环传递函数为:

$$G_f = \frac{\omega(s)}{\omega_0(s)} = \frac{\gamma/2}{s^2 + (\lambda\omega_n/2)s + \gamma/2} \quad (14)$$

### 4.2 改进 SOGI-FLL

传递函数式 (14) 表明系统响应特性由参数  $\lambda$ 、 $\gamma$  共同决定。为避免并网点背景谐波、直流分量等扰动对光伏逆变器频率检测的干扰, 本文利用 SOGI 的自适应滤波特性, 通过在输入电压信号后续环节中加入二阶广义积分模块, 并合理设计增益参数可改进光伏逆变器频率检测效果。为配合图 1 所示快速频率响应下垂控制策略, 需要准确检测并网点频率的偏差信号, 在锁频器频率信号输出前端直接获得频率偏差信号生成下垂控制环节的有功参考值变化量, 改进后锁频器控制结构图如图 4 所示。

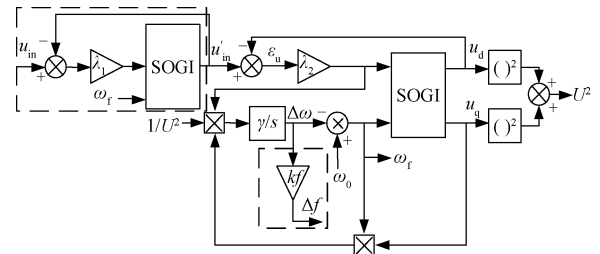


图4 改进 SOGI-FLL

Fig.4 Block diagram of enhanced SOGI-FLL

由图 4 设计的系统可得系统小信号模型, 如图 5 所示。

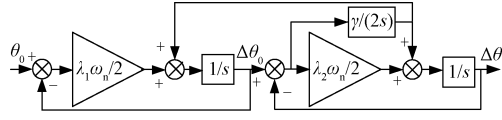


图 5 改进 SOGI-FLL 小信号模型

Fig.5 Small-signal model of enhanced SOGI-FLL

改进 SOGI-FLL 闭环传递函数为：

$$G_{\text{fnew}} = \frac{\lambda_1 \omega_n \gamma / 4}{s^3 + \frac{(\lambda_1 + \lambda_2) \omega_n}{2} s^2 + \frac{\lambda_1 \lambda_2 \omega_n^2}{4} s + \frac{\lambda_1 \gamma \omega_n}{4}} \quad (15)$$

有特征多项式为：

$$s^3 + \frac{(\lambda_1 + \lambda_2) \omega_n}{2} s^2 + \frac{\lambda_1 \lambda_2 \omega_n^2}{4} s + \frac{\lambda_1 \gamma \omega_n}{4} = (s + \omega_c)(s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2) \quad (16)$$

此时,对应选取阻尼系数  $\xi=0.707$  和系统带宽  $\omega_c=314.16$  以保证系统频率检测时间和性能,控制环节中增益系数  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\gamma$  亦对应确定。

## 5 算例分析

### 5.1 仿真算例

#### 5.1.1 锁频器频率检测

为对比验证本文频率偏差信号检测方法的可行性和响应特性,利用 Matlab 仿真软件建立图 1 所示的光伏逆变器主动调频仿真模型,模型参数见表 1。首先验证在电网电压出现 0.05 pu 负序分量扰动时,频率变化检测效果如图 6 所示。

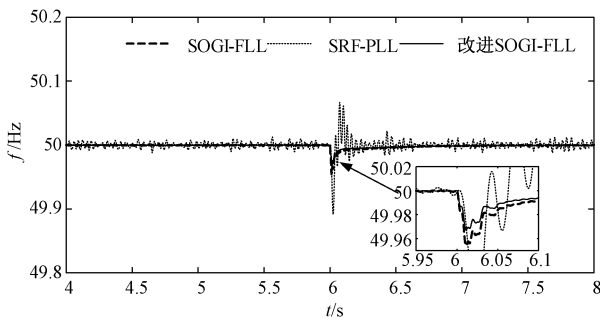


图 6 扰动情况下频率检测仿真结果

Fig.6 Simulation results of frequency detection

当系统发生频率扰动时,由图 6 仿真结果可知, SOGI-FLL、SRF-PLL 及本文所提出改进方法三种方式下,本文所提改进 SOGI-FLL 静态误差小、动态响应速度快,频率检测效果明显优于前述两种频率检测方法。

#### 5.1.2 主动调频

参考常规水、火发电机组一次调频死区参数,设定光伏逆变器一次调频死区为  $\pm 0.033$  Hz,并设定调整系数  $k_{\text{droop}}$  为 0.15。

表 1 仿真模型参数

Tab.1 Parameters of simulation model

参数	数值	参数	数值
额定相电压/V	220	滤波电容/ $\mu\text{F}$	80
额定频率/Hz	50	$\alpha$	0.5
采样频率/kHz	500	$\beta$	0.5
开关频率/Hz	12 800	$k_{\text{droop}}$	0.15
滤波电感/mH	1		

为了测试不同频率扰动信号下光伏逆变器功率响应特性,设置了 4 种不同的运行工况,并假设在这 4 种工况下,光伏板的辐照度和温度保持恒定。

工况 1:电网频率在 2 s 时升高,光伏逆变器由 MPPT 模式切换至调频模式,仿真结果如图 7 所示。

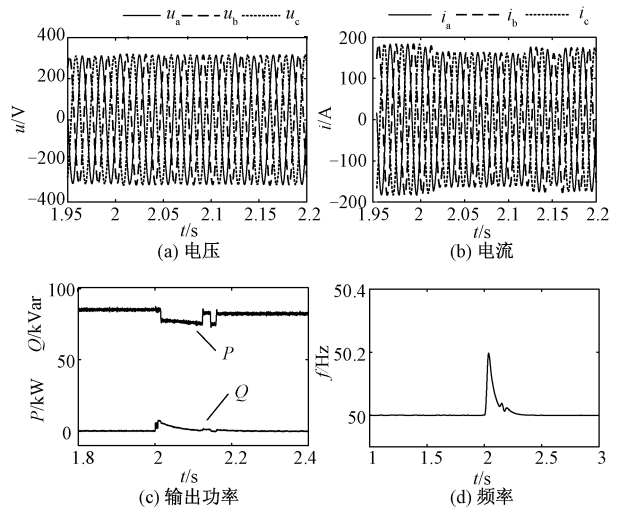


图 7 工况 1 仿真结果

Fig.7 Simulation results of Mode 1

工况 2:电网频率连续波动且超过光伏逆变器调频阈值,光伏逆变器在 MPPT 模式与调频模式间切换,仿真结果如图 8 所示。

工况 3:电网电压含有奇次谐波,谐波电压幅值为:  $u_5=0.01$  pu,  $u_7=0.01$  pu,电网频率在 1 s 至 1.5 s 持续增加,仿真结果如图 9 所示。

工况 4:电网电压含有幅值为 0.05 pu 的负序、零序分量,电网频率在 1 s 至 1.5 s 持续增加,仿真结果如图 10 所示。

由图 7 可知,初始状态下电网频率的额定值, PV 运行于 MPPT 模式;光伏逆变器检测到电网频率



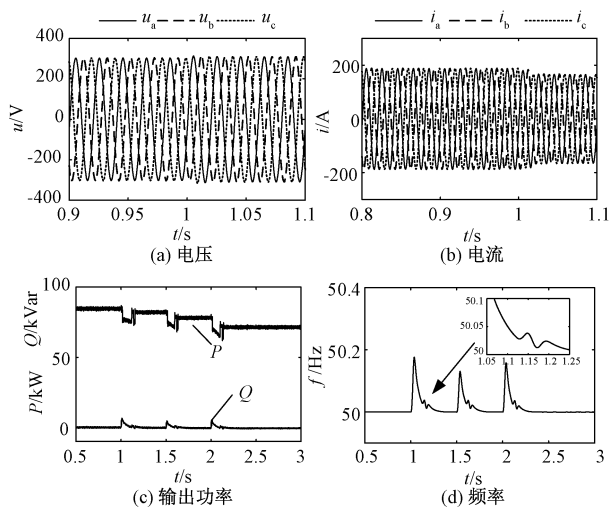


图8 工况2仿真结果

Fig.8 Simulation results of Mode 2

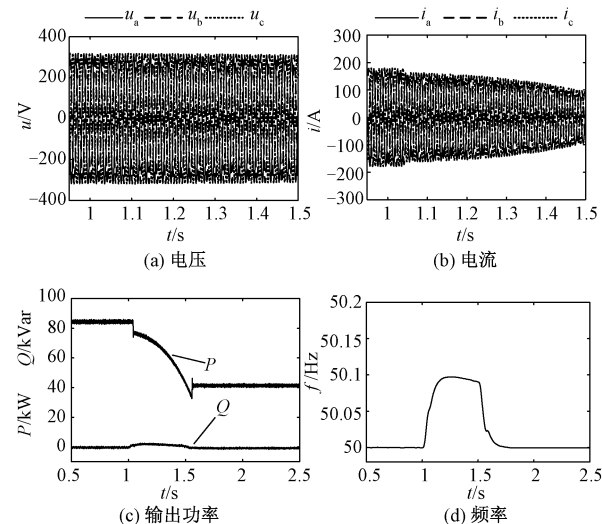


图9 工况3仿真结果

Fig.9 Simulation results of Mode 3

大于其调频阈值后,由MPPT模式切换至调频模式,频率下降;电网频率偏差小于调频阈值后,光伏逆变器提高其输出功率,频率增加并再次大于调频阈值,光伏逆变器再次减小出力。由图8可知,电网频率连续波动且超过光伏逆变器调频阈值,光伏逆变器在MPPT模式与调频模式间切换,减小出力,主动调频。由图9可知,电网频率在1 s至1.5 s持续增加,光伏逆变器持续减小出力调频,电网背景谐波对运行特性无影响。由图10可知,电网频率在1 s至1.5 s持续增加,光伏逆变器持续减小出力调频,电网正序、零序分量对运行特性无影响。

## 5.2 实验算例

图11为容量3 kV·A实验平台,其他主电路元件参数与仿真模型相同。

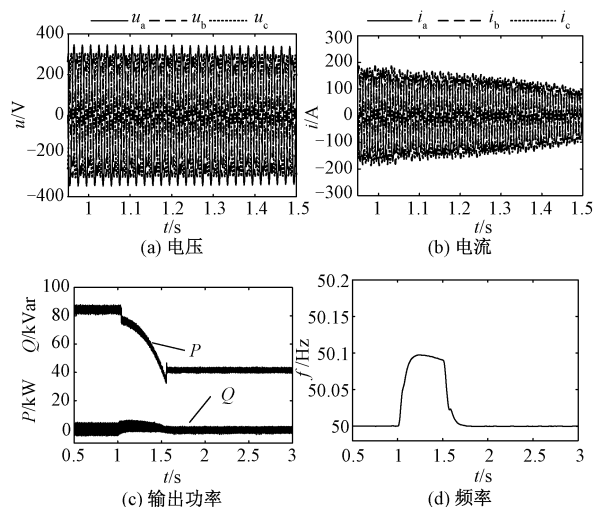


图10 工况4仿真结果

Fig.10 Simulation results of Mode 4

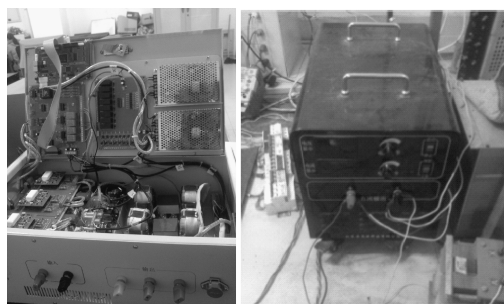


图11 实验平台

Fig.11 Laboratory setup

图12为光伏逆变器运行于MPPT模式时A相输出电压、电流波形。此时逆变器输出功率为2 kW。

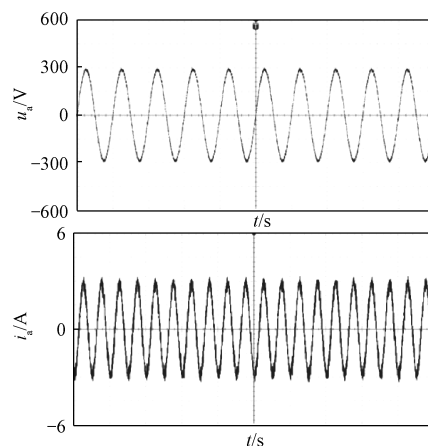


图12 光伏逆变器电压电流波形(2 kW)

Fig.12 Experimental voltage and current waveform (2 kW)

图13为光伏逆变器运行于调频模式后A相输出电压、电流波形,逆变器输出功率由2 kW下降到1 kW。

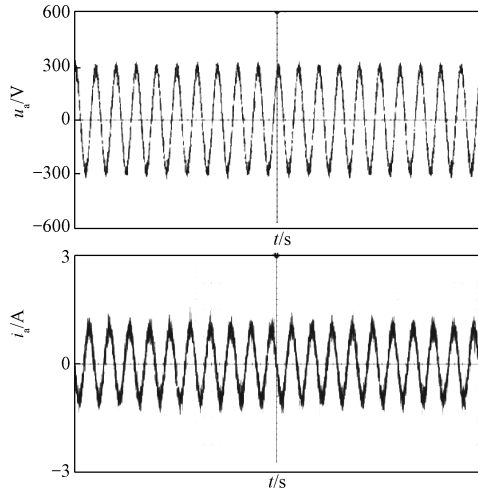


图 13 光伏逆变器电压电流波形(1 kW)

Fig.13 Experimental voltage and current waveform (1 kW)

在实验过程中:光伏逆变器运行于 MPPT 模式输出功率为 2 kW;通过频率扰动装置模拟电网频率升高,光伏逆变器运行于调频模式输出功率降为 1 kW。在整个实验过程中电流波形平滑没有出现冲击;电压波形在实验过程中没有出现暂降或波动。证明光伏逆变器可以根据电网频率的变化,主动在 MPPT 模式或调频模式。

## 6 结论

为实现光伏逆变器快速频率响应控制,本文根据典型 SOGI-FLL 的频率检测原理,分析了广义锁频器结构。在此基础上提出了改进 SOGI-FLL 及控制参数的设计方法,形成了基于改进 SOGI-FLL 频率偏差检测的光伏逆变器快速频率响应控制策略。

仿真及实验结果表明,改进 SOGI-FLL 静态误差小、动态响应速度快,基于该方法的光伏逆变器快速频率响应策略满足光伏逆变器快频响应控制需求,有效提高了光伏逆变器的控制能力,提高了系统的频率稳定性。

## 参考文献 (References):

[1] 孙晓强, 刘鑫, 程林, 等 (Sun Xiaoqiang, Liu Xin, Cheng Lin, et al.). 基于多调频资源协调控制的西北送端大电网新能源快速频率响应参数设置方案 (Parameter setting of rapid frequency response of renewable energy sources in northwest power grid) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2019, 43 (5): 1760-1765.

[2] 马晓伟, 徐海超, 刘鑫, 等 (Ma Xiaowei, Xu Haichao, Liu Xin, et al.). 适用于西北送端大电网新能源场站快速频率响应功能的入网试验方法 (A test method for

fast frequency response function of renewable energy stations in Northwest) [J]. 电网技术 (Power Grid Power System Technology), 2020, 44 (4): 1384-1391.

[3] 陈国平, 李明节, 许涛, 等 (Chen Guoping, Li Mingjie, Xu Tao, et al.). 关于新能源发展的技术瓶颈研究 (Study on technical bottleneck on new energy development) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (1): 20-26.

[4] 马进, 赵大伟, 钱敏慧, 等 (Ma Jin, Zhao Dawei, Qian Minhui, et al.). 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述 (Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly synchronized sending-end DC power grid) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (10): 3112-3120.

[5] 肖立业, 刘怡, 夏孝天 (Xiao Liye, Liu Yi, Xia Xiaotian). 高比例可再生能源接入条件下的输电骨干网架结构探索 (Investigation on architecture of backbone transmission system for renewable-energy-dominant power grid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (1): 1-4.

[6] 王维洲, 刘茜, 但扬清 (Wang Weizhou, Liu Qian, Dan Yangqing). 大规模新能源接入电网连锁故障预防控制策略研究 (Study of strategy to prevent and control power grid cascading failure connecting large-scale new energy) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (3): 12-17.

[7] Su Xiaoling, Zhao Zhengkui, Si Yang, et al. Adaptive robust SMC-based AGC auxiliary service control for ess-integrated PV/wind station [J]. Complexity, 2020, 4: 1-10.

[8] 钟诚, 周顺康, 严干贵, 等 (Zhong Cheng, Zhou Shunkang, Yan Gangui, et al.). 基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略 (New frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve level control) [J]. 电工技术学报, (Transactions of China Electrotechnical Society) 2019, 34 (5): 1013-1024.

[9] 孙铭爽, 贾祺, 张善峰, 等 (Sun Mingshuang, Jia Qi, Zhang Shanfeng, et al.). 面向机电暂态分析的光伏发电参与电网频率调节控制策略 (Single-stage grid-connected photovoltaic generation takes part in grid frequency regulation for electromechanical transient analysis) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2019, 47 (18): 28-37.

[10] 杨旭红, 郭凯 (Yang Xuhong, Guo Kai). 光伏发电并网同步锁频环技术研究 (Research on synchronization frequency locked loop of PV power system) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control),

- 2018, 46 (5): 54-61.
- [11] 涂娟, 汤宁平 (Tu Juan, Tang Ningping). 基于改进型DSOGI-PLL的电网电压同步信号检测 (Synchronizing signal detection for grid voltage based on modified DSOGI-PLL) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (9): 2350-2356.
- [12] 陈国栋, 朱淼, 蔡旭, 等 (Chen Guodong, Zhu Miao, Cai Xu, et al.). 一种软件锁相环和电压跌落检测新算法 (A new algorithm for software phase locked-loop and voltage sag detection) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (25): 4385-4394.
- [13] 辛振, 赵仁德, 陈晨, 等 (Xin Zhen, Zhao Rende, Chen Chen, et al.). 基于双二阶广义积分器-锁频环的异步电机同步角频率估计方法 (New induction motor synchronous angular frequency estimation method based on dual second order generalized integrator-frequency locked loop) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (27): 4676-4682.
- [14] 李练兵, 郭向尚, 王增喜 (Li Lianbing, Guo Xiangshang, Wang Zengxi). 基于多重二阶广义积分的电网谐波分量检测 (Harmonic detection of power grid based on multiple second order generalized integrators) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (9): 33-37.
- [15] 康成伟, 顾诚博, 李伟杰, 等 (Kang Chengwei, Gu Chengbo, Li Weijie, et al.). 基于SOGI单相锁相环的列车辅助逆变器并联技术 (Train auxiliary inverter parallel technology based on SOGI single phase PLL) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (5): 68-73.
- [16] Suul J A, Luna A, Rodríguez P, et al. Virtual-flux-based voltage-sensor-less power control for unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (9): 4071-4087.
- [17] 余永奎, 李华, 刘俊峰 (Yu Yongkui, Li Hua, Liu Junfeng). 基于固定频率二阶广义积分器的单相锁频环 (Single phase frequency locked loop based on fixed frequency second order generalized integrator) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSS), 2020, 32 (9): 86-93.
- [18] Daniel Duckwitz, Boris Fischer. Modeling and design of  $df/dt$ -based inertia control for power converters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5 (4): 1553-1564.
- [19] Golestan S, Guerrero J M, Vasquez J C. An open-loop grid synchronization approach for single-phase applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (7): 5548-5555.
- [20] Xin Z, Zhao R, Wang X, et al. Four new applications of second-order generalized integrator quadrature signal generator [A]. IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition [C]. 2016.
- [21] Fang J Y, Zhang R Q, Li H C, et al. Frequency derivative based inertia enhancement by grid-connected power converters with a frequency-locked-loop [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10 (5): 4918-4927.
- [22] 闫朝阳, 张青山, 杨丽君, 等 (Yan Zhaoyang, Zhang Qingshan, Yang Lijun, et al.). 电网故障时基于双自调谐SOGI锁频环同步方法 (A novel frequency locked loop method based on selftuning SOGI under distorted grid condition) [J]. 太阳能学报 (Acta Energetica Solaris Sinica), 2017, 38 (7): 1908-1909.
- [23] 钟永洁, 翟苏巍, 孙永辉 (Zhong Yongjie, Zhai Suwei, Sun Yonghui). 孤岛模式下互联微电网的自适应同步频率控制 (Adaptive synchronization frequency control for interconnected micro-grids in island mode) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2019, 40 (10): 94-96.

## Fast frequency response control strategy for PV inverter based on improved frequency lock loop

GONG Cheng<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, ZHAO Zheng-kui<sup>2</sup>, DONG Nan<sup>1</sup>,  
LIU Hui-zhen<sup>1</sup>, HAN Min-xiao<sup>2</sup>

(1.State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China;

2.State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** With the increasing share of photovoltaic power station, the frequency regulation ability based on conventional resources such as synchronous generators decreases accordingly. This brings smaller equivalent short circuit ratio, power system frequency challenge and safety operation risk. This paper developed a fast frequency response control strategy based on improved second order generalized integrator frequency lock loop to support the photovoltaic plant frequency regulation. The droop control strategy for PV converter based on the PV output performance and the primary frequency regulation of conventional generators is proposed. The proposed SOGI-FLL detects system frequency and its variation swiftly without time-delay and serves as a feed to the PV converter control system. The simulation and experimental case studies validate the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** photovoltaic inverter; second order generalized integrator; frequency lock loop; droop control; fast frequency response