

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191068

## 双级式有功备用光伏虚拟同步机控制策略

颜湘武<sup>1</sup>, 吕佳伟<sup>1</sup>, 贾焦心<sup>1</sup>, 何晓洋<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学(保定), 河北 保定 071000; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 大规模光伏并网发电导致电力系统面临惯性下降与调频能力不足的问题, 迫切需要光伏系统主动参与电网频率调节。以双级式光伏拓扑结构为基础, 提出有功备用跟踪的光伏虚拟同步机控制策略。DC\DC 侧根据光伏单元运行的最大功率点确定系统的有功备用点, 使系统运行在有功备用模式; 当电网频率扰动时可调节光伏单元的有功输出来参与一次调频。逆变侧采用与同步机等效的下垂控制方案, 将高压直流侧电容模拟为虚拟转子响应功率动态调节, 并通过 PI 控制维持直流电容电压恒定。建立光伏有功调频的小信号模型, 运用传递函数分析了直流电容参数对动态性能的影响。在辐照度突降、电网频率突变以及不同系统参数下进行仿真分析, 证明了所提方案的有效性。

**关键词:** 有功备用; 双级式; 一次调节

### Two-stage active standby photovoltaic virtual synchronous machine control strategy

YAN Xiangwu<sup>1</sup>, LÜ Jiawei<sup>1</sup>, JIA Jiaoxin<sup>1</sup>, HE Xiaoyang<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071000, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Large-scale photovoltaic grid-connected power generation causes a power system to face the problem of inertia decline and insufficient frequency modulation capability. It is urgent to actively participate in the grid frequency adjustment of the photovoltaic system. This paper adopts a two-stage photovoltaic topology and proposes a photovoltaic virtual synchronous machine control strategy for active standby tracking. The DC\DC side determines the active standby point of the system according to the maximum power point of the photovoltaic unit operation, so that the system operates in the active standby mode. When the grid frequency is disturbed, the active output of the photovoltaic unit can be adjusted to participate in the primary frequency modulation. The inverter side adopts the droop control scheme equivalent to the synchronous machine, and simulates the high-voltage DC side capacitor as the dynamic response of the virtual rotor response power, and maintains the DC capacitor voltage constant through PI control. A small-signal model of photovoltaic active frequency modulation is established, and the transfer function is used to analyze the influence of DC capacitance parameters on dynamic performance. The simulation analysis under sudden irradiance drop, grid frequency sudden change and different system parameters proves the effectiveness of the proposed scheme.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502134) and Science and Technology Project of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. (No. SGLNDK00DWJS1800091).

**Key words:** active standby; two-stage; one adjustment

## 0 引言

到 2020 年, 国家将推动 280 万无劳动能力贫困

基金项目: 河北省自然科学基金(E2018502134); 国网辽宁省电力有限公司科技项目(SGLNDK00DWJS1800091)“考虑源、荷波动特征的电网无功电压优化策略和评价指标研究”

户参与光伏扶贫工程, 扶贫光伏装机容量约占光伏总装机容量的 20%。但是光伏的井喷式发展也给贫困地区的电网造成了巨大负担, 并且存在一定的弃光现象。在大电网中, 光伏容量由于远小于传统电网容量, 对系统的频率影响较小; 而扶贫地区的电网相对薄弱, 大量无序的光伏接入导致电网电压越限、功率波动<sup>[1-2]</sup>, 负荷容量不足且未与光伏出力动

态匹配,以电力电子装置为接口的分布式发电缺乏传统发电机的惯性阻尼特性,在系统频率出现较大扰动时难以保证系统稳定运行等多方面问题<sup>[3]</sup>,影响了扶贫地区电网运行的效率和整体收益。

为了应对这些问题,当前提出了三种降低光伏发电功率输出波动的方法:1)安装储能装置,构成光-储联合发电系统<sup>[4-8]</sup>;2)安装自动减载的负荷,通过甩负荷减少功率波动;3)通过在最大功率点以下运行,留有一定的有功备用,减少功率波动<sup>[9]</sup>。文献[9]从经济性方面比较了这三种不同的削减功率波动的方法,结果表明,通过减载运行比加入储能电池在售电收益中优势明显。从长期的经济角度来看,采用有功备用是一种比加入储能装置更为经济的解决方案。

虚拟同步发电机(VSG)技术是实现有功备用模式的一种有效方案<sup>[10-12]</sup>。VSG通过模拟传统同步电机的外特性,实现逆变器对电网的友好接入,提高系统的稳定性。文献[13]提出不依赖储能装置将光伏电源通过虚拟同步机技术与电网相连,并验证了VSG在离网与并网模式下的运行情况;文献[14-15]提出有功备用运行机制,可以有效实现对系统频率的稳定支撑;文献[16]提出基于离线拟合与在线跟踪相结合的方法,但只考虑了单峰值曲线过程;文献[17]讨论虚拟惯量对电网频率扰动的支撑,但是忽略了光伏电源的动态性能。

本文在当前研究的基础上,以双级式光伏系统为研究对象,利用光伏电源的自身特性,提出一种基于有功备用的PS-VSC控制策略,改进Boost变换器控制中传统的最大功率点跟踪(MPPT)算法使系统在正常运行时为减载状态,工作在有功备用点处,同时引入电网频率-有功( $\omega$ -P)补偿环节响应网侧频率扰动引起的电源侧输出功率的变化,即调节光伏阵列的输出功率,为系统一次调节提供足够的备用有功。

### 1 系统控制框架

本文所提基于有功备用的PS-VSC控制系统框图如图1所示。

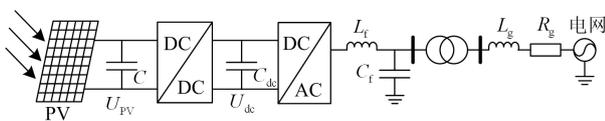


图1 双级式光伏发电拓扑结构

Fig. 1 Two-stage photovoltaic power generation topology

图1中所示的拓扑结构为不加储能的双级式光伏系统,主要由光伏阵列PV、Boost变换器、并网逆变器、LC滤波、线路阻抗、变压器及电网构成。

由于光伏电源受外界环境因素影响较大,其输出具有波动性、随机性,增加Boost电路可使其高压直流侧电压稳定;但是Boost电路通常采用的MPPT<sup>[18]</sup>方法是以恒定功率输出的方式,难以适应当前电网面临的困境,所以需要MPPT控制方法进行改进。

对于网侧逆变器的接口可灵活设计,根据电源属性的不同,有不同的控制方法,如电压源控制(VC-VSC)、电流源控制(CC-VSC)。系统直流侧的能量供应是光伏电源,而光伏面板出力的随机性不能确保VSC在负载突变时有足够的出力,因此,就DC侧能量供应而言,此类VSC被称为PS-VSC(power-source supplied and voltage-source controlled)<sup>[19]</sup>。

### 2 控制策略

根据所提出的拓扑结构,系统的控制策略分为对Boost级的有功备用控制和对逆变侧的改进下垂控制。下面分别对两级控制方法进行详细介绍。

#### 2.1 有功备用PS-VSC控制策略

Boost电路作为光伏电源的接口电路,结构简单、转换效率高,而本文重点研究的就是光伏电源的“电源”属性,加入Boost电路使两级系统分开控制,控制结构简单明确。

研究光伏电源特性主要以图2所示光伏电源的输出特性曲线为基础。由文献[13]可知,光伏电源的稳定运行区域为区域II,本文不再赘述。由图2可知,假设图中A点为光伏系统正常运行时的有功备用点,M点为光伏电源的最大功率点。

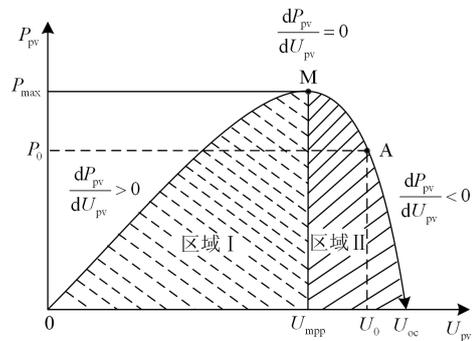


图2 光伏电源输出特性曲线

Fig. 2 Photovoltaic power output characteristics

根据上述有功备用算法理论,系统若要参与一次调频应减载运行,首先需要确定的是有功备用工

作点。当系统处于正常运行状态时, 即电网频率没有波动, 给定电网同步角速度  $\omega_0$  与网侧实际角速度  $\omega$  相等, 则光伏电源应运行在有功备用点处; 如果网侧频率发生变化, 频率-有功( $\omega$ - $P$ )环路发生作用, 根据网侧频率变化的升降, 调节光伏面板的功率输出, 得到有功功率指令  $P_t$ , 即有功备用点, 如式(1)所示。

$$P_t = P_{\max} k_a + (\omega_0 - \omega) k_f \quad (1)$$

系统启动时首先运行最大功率跟踪算法, 即开关 1 闭合, 开关 2 打开, 得到光伏电源运行的最大功率点, 根据最大功率点才能有效确定有功备用工作点; 之后切换到有功备用模式, 即开关 1 打开, 开关 2 闭合, 如图 3 所示。

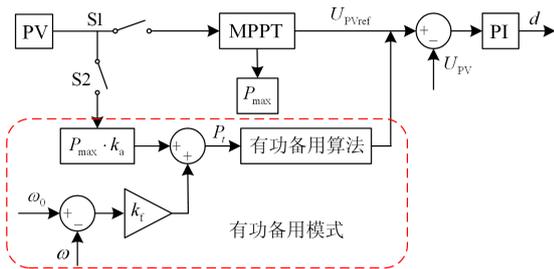


图 3 最大功率跟踪与有功备用模式切换

Fig. 3 MPPT and active standby mode switching

上文中提到光伏电源的稳定运行区域应该在区域 II 中。当系统由 MPPT 模式切换到有功备用模式后, 根据图 2 所示, 对系统运行区域进行判断, 即判断  $\Delta P/\Delta U$  的正负, 当  $\Delta P/\Delta U > 0$  时系统运行在区域 I 中, 光伏侧电压应向电压增大的方向扰动, 直到运行在区域 II 中, 保持系统稳定运行; 当  $\Delta P/\Delta U < 0$  时, 系统运行在区域 II, 通过判断有功备用点功率和当前时刻采样功率  $P_{PV}(k)$  比较得到扰动方向, 通过调节低压侧直流电容的电压  $U_{PV}$ , 向相应方向进行扰动, 最终得出输出的占空比  $d$ , 即可改变光伏面板的输出功率, 参与系统的一次调频。有功备用算法流程如图 4 所示。

由传统发电机组的功频静态特性可知, 机组负荷改变时相应的转速(频率)发生偏移<sup>[20]</sup>。光伏系统模拟传统旋转电机的调速特性, 设置有功备用点。

传统机组的调差系数及功率输出增量如式(2)。

$$\begin{cases} \delta = -\frac{\Delta f}{\Delta P} \\ \Delta P = -\frac{P_{\max} \Delta f}{\delta_* f_N} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta$  为机组静态调差系数;  $\delta_*$  为调差系数的标么

值;  $f_N$  为系统额定频率;  $P_{\max}$  为光伏系统最大功率点。

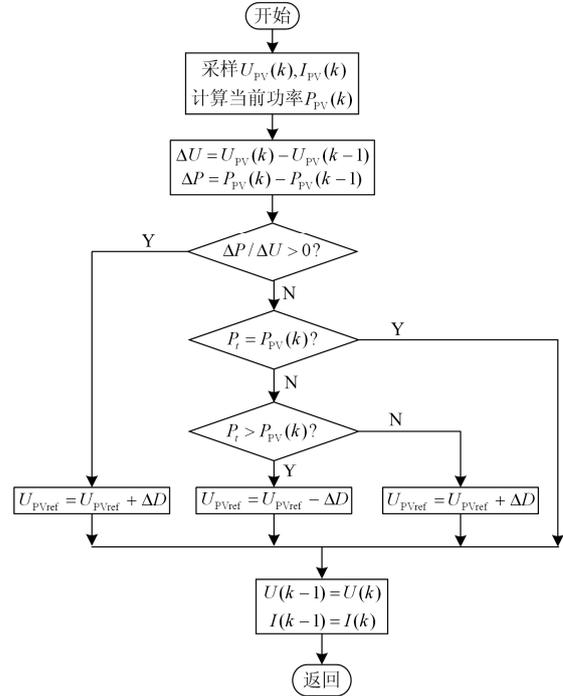


图 4 有功备用算法跟踪流程

Fig. 4 Active standby algorithm tracking process

根据电网中对频率质量的要求, 即允许频率偏移范围为  $\pm 0.2 \text{ Hz} \sim \pm 0.5 \text{ Hz}$ ; 本文取值频率最大偏移量为  $\pm 0.25 \text{ Hz}$ , 即  $\Delta f$  为  $0.25$ <sup>[21]</sup>; 根据传统汽轮机组的调差系数  $\delta_*$  取值范围为  $0.04 \sim 0.06$ , 本文取值  $0.05$ 。由此可推出式(3)。

$$\Delta P = -10\% P_{\max} \quad (3)$$

根据式(3)可知, 系统的备用容量为最大功率点的 10%, 即系统正常运行时的有功备用点为最大功率点的 90%, 则可知  $k_a$  为 0.9。

通过模拟常规发电机组有功下垂曲线, 当网侧频率突变时, 调整机组出力, 根据不同频率时对应的有功输出, 得到频率-有功( $\omega$ - $P$ )环节的下垂系数  $k_f$ , 如式(4)所示。

$$k_f = \frac{P_{\max} - P_0}{2\pi(f_{\min} - f_N)} \quad (4)$$

式中:  $P_0$  为系统有功备用点;  $f_{\min}$  为网侧频率最低点。

由于光伏电源输出的波动性, 会导致最大功率点及有功备用点的变化, 所以系统应定时从 MPPT 模式重新运行, 然后再次切换到有功备用模式, 根据外界环境的变化调整系统的备用容量。

## 2.2 VSC 控制方案

VSC 控制部分采用了下垂控制结合直流电压

环节, 如图 5 所示。

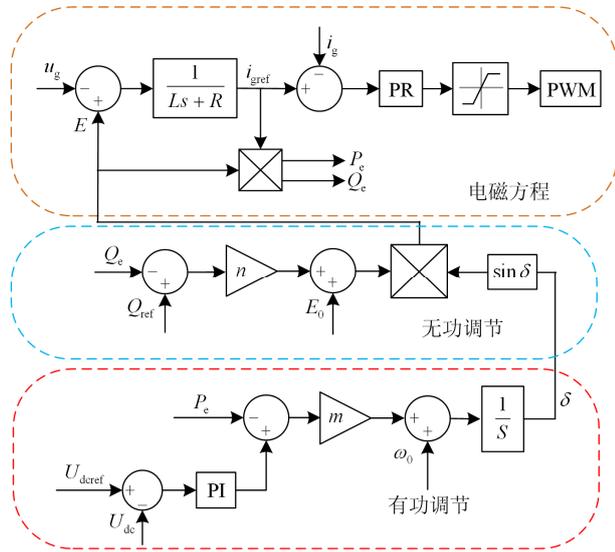


图 5 VSC 控制策略  
Fig. 5 VSC control strategy

图 5 中:  $U_{dcref}$  是高压直流侧给定值;  $U_{dc}$  是高压直流侧实际测量值;  $m$  是有功下垂系数;  $n$  是无功下垂系数;  $\omega_0$  为电网额定角频率;  $E_0$  为 VSC 空载电动势;  $P_c$  和  $Q_c$  分别是 VSC 的电磁功率;  $u_g$  和  $i_g$  分别为电网侧电压和电流;  $L$  和  $R$  分别为 VSC 的等效输出电感和电阻。

对于 PS-VSC 控制, 系统的能量来源为光伏面板, 不是恒压的电压源, 光伏电源的随机性导致高压直流侧电压不能保持恒定, 所以在有功下垂基础上加入直流电压环节, 控制直流侧电压恒定; 由于所提控制策略不加储能装置, 考虑 VSC 的直流动态链路特性模拟传统 SG 的外特性。

文献[22]中证明了传统下垂控制和 SG 的等效性。在本节中, 将对本文提出的下垂控制和 VSG 控制进行比较分析; 图 5 中无功调节和电磁方程与当前提出的传统 VSG 控制策略相同, 因此, 主要分析有功调节控制环路。根据文献[23-25], 采用下垂控制与 VSG 控制的主要区别在于下垂控制没有直接表示出系统的惯量系数。对于旋转设备, 惯量特性可表示为转子动能对频率的支撑, 而在 SSG 中, 可以用直流侧电容代替同步发电机的转子部分, 即利用电容的储能特性体现系统的惯量特性, 正对应带储能的虚拟同步机拓扑的储能部分。

为了将直流链路电容与传统 SM 做等效对比, 各自的惯性时间常数如式(5)所示。

$$\begin{cases} H = \frac{W_{SM}}{S_{SM}} = \frac{0.5J\omega^2}{S_{SM}} \\ H_C = \frac{W_C}{S_{VSC}} = \frac{0.5C_{dc}V_{dc}^2}{S_{VSC}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $W_{SM}$  和  $W_C$  分别为 SM 和直流电容中存储的能量;  $S_{SM}$  和  $S_{VSC}$  分别为 SM 和 VSC 的额定容量。

根据式(5)所示, 直流动态链路下电容惯性时间常数由电容决定, 电容值越大, 电容存储能量越多, 从而惯性时间常数也越大, 即系统惯性越大<sup>[26]</sup>; 但过大的惯量常数也会导致系统的不稳定, 因此选取合适的  $C_{dc}$  对系统稳定性十分重要。

建立有功调节闭环模型框图, 如图 6 所示, 其中  $1/(Ts+1)$  为延时环节,  $S_E$  为同步功率系数。

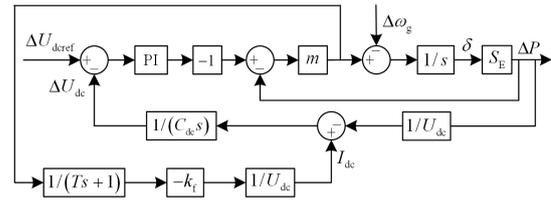


图 6 有功调节小信号模型

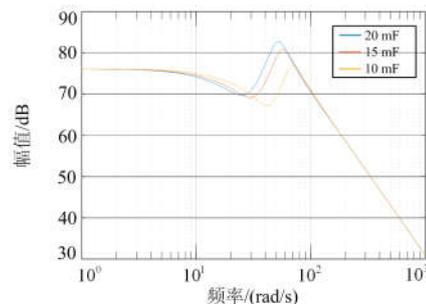
Fig. 6 Active regulation small signal model

根据图 6 所示, 可得  $\Delta \omega_g$  到  $\Delta P$  的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{a_1 s^3 + a_2 s^2}{a_3 s^4 + a_4 s^3 + a_5 s^2 + a_6 s + a_7} \quad (6)$$

式中:  $a_1 = C_{dc} U_{dc} S_E T$ ;  $a_2 = C_{dc} U_{dc} S_E$ ;  $a_3 = C_{dc} U_{dc} T$ ;  $a_4 = C_{dc} U_{dc} + m C_{dc} U_{dc} S_E T$ ;  $a_5 = m k_p S_E T + m C_{dc} U_{dc} S_E - m k_f k_p$ ;  $a_6 = m k_p S_E + m k_f S_E T - m k_f k_i$ ;  $a_7 = m k_i S_E$ 。

根据闭环传递函数, 画出其伯德图如图 7 所示。系统额定频率为 50 Hz,  $T=0.03$  s,  $k_f=6394$ , PI 控制器取值  $k_p=10$ ,  $k_i=200$ 。系统处于并网运行时, 通过比较  $C_{dc}$  的取值, 发现当取值范围高于 20 mF 时, 系统谐振峰值过高, 容易导致系统振荡失稳; 减小电容取值时, 惯性的增加可以有效抑制关注频段的增益, 减缓频率的变化速度; 通过比较最终取值  $C_{dc}$  为 15 mF。



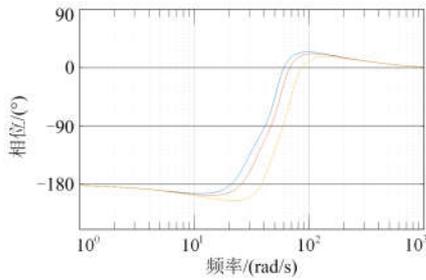


图 7 有功闭环伯德图

Fig. 7 Active closed-loop Bode diagram

### 3 仿真分析

基于 Matlab/Simulink 仿真软件, 搭建了三相两级式光伏有功备用系统的模型, 对所提出的控制策略进行了验证。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
稳压电容 $C/\mu\text{F}$	100
直流母线电容 $C_{dc}/\text{mF}$	15
Boost 电路电感 $L/\text{mH}$	5
滤波电感 $L_f/\text{mH}$	0.25
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	550
有功调差系数 $m/(\text{rad}\cdot\text{W}^{-1})$	$1.57\times 10^{-5}$
无功调差系数 $n/(\text{V}\cdot\text{var}^{-1})$	$4.24\times 10^{-4}$
$G_{PI}(\text{s})$	10 200
额定系统频率 $\omega_0/\text{rad}$	$100\pi$

为验证本文控制策略的有效性, 设定了辐照度突变、电网侧频率扰动以及高压侧直流电容不同参数三种不同的仿真工况。

#### 3.1 辐照度突变

在并网模式下, 通过设定辐照度变化, 分析光伏输出侧电压、电流以及功率输出情况, 高压直流侧  $U_{dc}$  是否稳定, 网侧电压电流的输出特性, 验证两级式光伏有功备用控制能否稳定运行。

假定外界温度恒定, 光伏最大功率点为 100 kW, 对应的  $U_{mpp}$  点为 273 V, 直流侧  $U_{dcref}$  为 500 V, 交流低压侧线电压为 260 V。系统初始运行时刻运行在最大功率跟踪模式, 在 1 s 切换到有功备用模式, 2 s 时外界辐照度变化, 光照强度由  $1000 \text{ W/m}^2$  突降至  $800 \text{ W/m}^2$ 。仿真结果如图 8 所示。

根据所得波形图, 系统起始运行在最大功率跟踪模式, 光伏侧输出功率为 100 kW, 找出最大功率点的输出功率, 在 1 s 时进行模式切换, S1 断开, S2 闭合, 系统转换为有功备用模式; 给定计算的有功备用点功率  $P_{mpp}\times k_a$ , 光伏侧输出功率变为 90 kW,

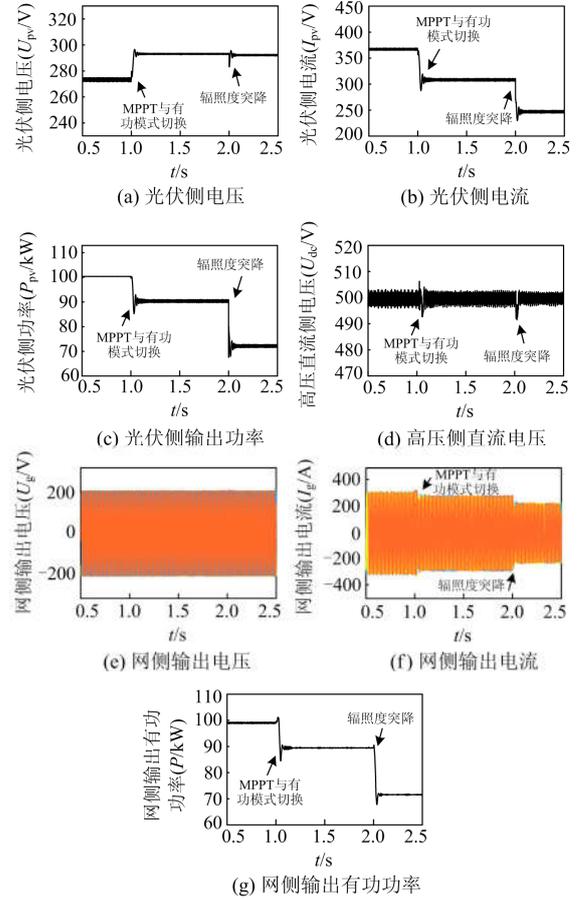


图 8 PS-VSG 算法仿真波形

Fig. 8 PS-VSG algorithm simulation waveform

$U_{pv}$  从  $U_{mpp}$  点升到  $U_0$  点, 此时系统处于有功备用工况, 系统留有用于频率调节的裕量。2 s 时给定外界辐照度突降, 导致光伏侧输入功率降低, 光伏侧电压  $U_{pv}$  基本保持不变, 光伏侧电流  $I_{pv}$  降低; 由于并网功率在辐照度降低时不会突变, 瞬时功率供应不足, 导致直流母线电压跌落。在本文控制策略下直流电压环控制直流母线电压  $U_{dc}$  恒定, 所以当  $U_{dc}$  瞬时跌落时, 能够很快恢复到给定的直流母线值  $U_{dcref}$ 。在整个过程中, 交流电压保持 260 V 恒定输出; 辐照度突变时, 有功功率输出存在较小的波动, 动态响应时间大约为 0.2 s, 然后恢复稳定; 由于光伏侧功率输出降低, 逆变器输出电流也随之减小, 如图 8(f) 所示, 并且没有出现电流阶跃对系统造成冲击的影响; 光伏侧电压  $U_{pv}$  始终大于 273 V, 运行在稳定区域 II 中。根据波形图分析可知, 本文所提控制策略能够使系统始终稳定运行在光伏曲线的稳定运行区域内。

#### 3.2 电网频率扰动

根据南方电网新能源场站一次调频的企业标

准, 通过给定网侧频率扰动, 验证两级式光伏有功备用控制是否能够体现系统的一次调节特性。仿真结果如图 9 所示。

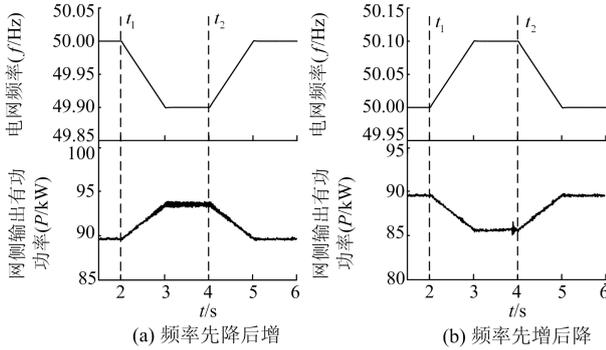


图 9 不同频率变化的有功输出响应

Fig. 9 Active output response with different frequency changes

图 9(a)中  $t_1$  时刻给定网侧频率降低 0.1 Hz, 在 2~3 s 时间中频率逐渐下降, 网侧输出功率逐渐升高, 根据频率-有功( $\omega$ -P)环节可以计算出功率输出增加大约 4.5 kW, 符合图 9(a)中输出曲线;  $t_2$  时刻频率上升 0.1 Hz, 网侧输出功率逐渐下降。图 9(b)的工况与图 9(a)相反, 频率在  $t_1$  时刻先升  $t_2$  时刻再降。由图 9 分析可知, 通过给定电网侧频率波动, 输出的有功功率可以准确响应系统频率的变化, 验证了本文所提控制策略具有一次调频的功能。

### 3.3 直流电容 $C_{dc}$ 影响分析

图 10 为不同直流电容参数  $C_{dc}$  下的仿真, 系统处于并网工况, 运行参数与频率扰动相同。系统正常运行在有功备用点处, 2 s 时, 给定网侧频率阶跃 0.1 Hz, 高压直流侧电压  $U_{dc}$  和网侧输出功率  $P$  如图 10 所示。

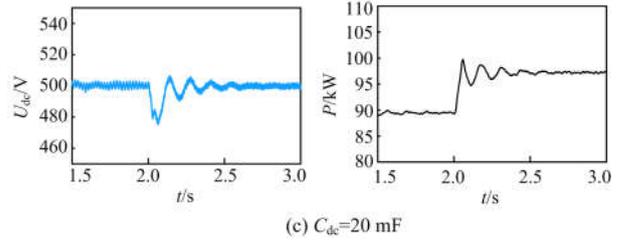
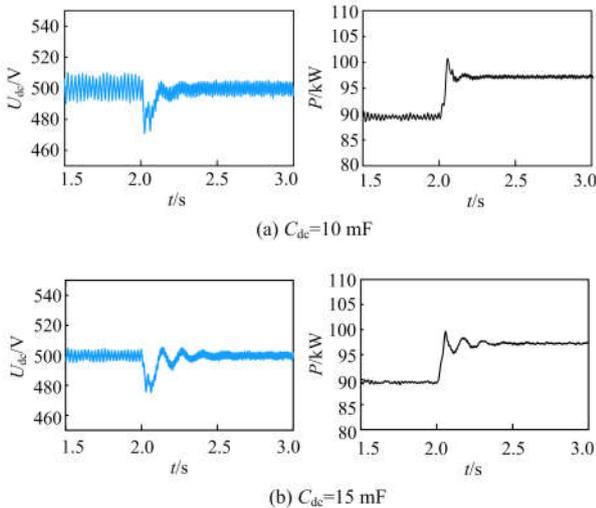


图 10 不同直流电容系数  $C_{dc}$  下波形图

Fig. 10 Waveform of different DC capacitance coefficients  $C_{dc}$

根据本文所提控制策略, 系统运行在有功备用模式, 直流电压  $U_{dc}$  稳定运行在 500 V, 2 s 时给定网侧频率阶跃, 从图 10 中可知,  $U_{dc}$  的震荡幅度随着直流电容  $C_{dc}$  的增大而减小, 输出更加平滑, 电压质量得到明显改善。网侧输出功率随电容系数变大系统的惯量支撑功率越多, 系统震荡幅度减小, 系统暂态时间加长, 功率输出更加平滑, 有利于系统安全稳定运行。因此, 通过以上分析可知, 系统控制方案能够有效地保持直流侧电压  $U_{dc}$  稳定, 当系统出现频率扰动时, 直流电容作为虚拟转子可为系统一次调频提供有效惯量支撑。

## 4 结论

为解决光伏发电系统高渗透率对偏远贫困地区电网造成调频能力不足的问题, 本文提出了双级式光伏有功备用跟踪的控制方法; 在不改变光伏系统拓扑结构的前提下充分考虑了光伏电源自身的特性, 保留一定备用的有功功率来响应电网的频率波动; 逆变侧采用下垂控制等效传统 SG 运行方案, 将高压直流侧电容模拟为虚拟转子响应功率动态调节; 通过仿真分析了所提控制策略可以有效响应系统的频率扰动, 实现光伏系统参与大电网一次调频的功能, 为日后偏远地区大规模分布式电源接入提供了一定参考。

### 参考文献

[1] 李振坤, 鲍新雨, 邵宇鹰, 等. 考虑多种调压措施的分布式光伏消纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 10-16.  
 LI Zhenkun, BAO Xinyu, SHAO Yuying, et al. Studying accommodation ability of distributed photovoltaic considering various voltage regulation measures[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 10-16.

[2] 翟建伟, 张勇军, 刘斯亮, 等. 基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 1-9.  
 ZHAI Jianwei, ZHANG Yongjun, LIU Siliang, et al.

- Active control strategy on photovoltaic-storage systems based on extended PQ-QV-PV node[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(10): 1-9.
- [3] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(15): 179-186.  
ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 179-186.
- [4] 王振雄, 易皓, 卓放, 等. 应用于光伏微网的一种虚拟同步发电机结构及其动态性能分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 444-454.  
WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, et al. A hardware structure of virtual synchronous generator in photovoltaic microgrid and its dynamic performance analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 444-454.
- [5] 田春光, 田利, 李德鑫, 等. 基于混合储能系统跟踪光伏发电输出功率的控制策略[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(14): 75-83.  
TIAN Chunguang, TIAN Li, LI Dexin, et al. Control strategy for tracking the output power of photovoltaic power generation based on hybrid energy storage system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(14): 75-83.
- [6] KABIRI D, SHIANI P, NAEEM B. Improving system frequency in smart grids in presence of wind and PV generation units using flywheel energy storage system[J]. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 2015, 4(1): 116-123.
- [7] 张静炜, 朱想, 赫卫国, 等. 考虑光伏发电和储能系统调压能力的配电网储能容量优化配置[J]. *广东电力*, 2018, 31(7): 30-35.  
ZHANG Jingwei, ZHU Xiang, HE Weigu, et al. Optimized configuration for ess capacity of distribution network considering voltage regulation ability of photovoltaic generation and ESS[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(7): 30-35.
- [8] 张小东, 王宇, 李白, 等. 光储联合运行直流微电网控制策略[J]. *广东电力*, 2018, 31(2): 58-64.  
ZHANG Xiaodong, WANG Yu, LI Bai, et al. Control strategy for DC micro-grid based on photovoltaic and energy storage systems[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(2): 58-64.
- [9] OMRAN W A, KAZERANI M, SALAMA M M A. Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic systems[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(1): 318-327.
- [10] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [11] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(13): 22-31.  
ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage of virtual synchronous generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(13): 22-31.
- [12] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2591-2603.  
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [13] 郑天文, 陈来军, 刘炜, 等. 考虑源端动态特性的光伏虚拟同步机多模式运行控制[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 454-464.  
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, LIU Wei, et al. Multimode operation control for photovoltaic virtual synchronous generator considering the dynamic characteristics of primary source[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 454-464.
- [14] TAFTI H D, SANGWONGWANICH A, YANG Y, et al. An adaptive control scheme for flexible power point tracking in photovoltaic systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(6): 5451-5463.
- [15] SANGWONGWANICH A, YANG Y, BLAABJERG F. Development of flexible active power control strategies for grid-connected photovoltaic inverters by modifying MPPT algorithms[C] // 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia), 2017, Kaohsiung: 87-92.
- [16] 钟诚, 周顺康, 严干贵, 等. 基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5): 1013-1024.  
ZHONG Cheng, ZHOU Shunkang, YAN Gangui, et al. A new frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve level control[J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5): 1013-1024.
- [17] 杨慧彪, 贾祺, 项丽, 等. 双级式光伏发电虚拟惯量控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(10): 87-102.  
YANG Huibiao, JIA Qi, XIANG Li, et al. Virtual inertia

- control strategy for double-stage photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 87-102.
- [18] CHAIBI Y, ALLOUHI A, SALHI M, et al. Annual performance analysis of different maximum power point tracking techniques used in photovoltaic systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 171-180. DOI: 10.1186/s41601-019-0129-1.
- [19] TAN Shulong, GENG Hua, YANG Geng, et al. Modeling framework of voltage-source converters based on equivalence with synchronous generator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(6): 1291-1305.
- [20] 李旭涛, 贾祺, 项丽, 等. 双级式光伏发电主动参与电网频率调节[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 100-110.
- LI Xutao, JIA Qi, XIANG Li, et al. Double-stage grid-connected photovoltaic generation part in grid frequency regulation actively[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 100-110.
- [21] 司家荣, 蔡国伟, 孙正龙, 等. 基于下垂控制逆变器的虚拟发电机建模与特性研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(22): 116-122.
- SI Jiarong, CAI Guowei, SUN Zhenglong, et al. Modeling and virtual synchronous generator characteristics research based on droop-controlled inverters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(22): 116-122.
- [22] D'ARCO S, SUUL J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 394-395.
- [23] MENG X, LIU J, LIU Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [24] 修连成, 熊连松, 康志亮, 等. 运用下垂控制的并网储能系统惯量阻尼特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 112-120.
- XIU Liancheng, XIONG Liansong, KANG Zhiliang, et al. Analysis on damping characteristics of grid-tied energy storage system with droop control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 112-120.
- [25] 陈虹妃, 张宸宇, 缪惠宇, 等. 虚拟同步机控制策略与下垂控制的比较[J]. 电器与能效管理技术, 2018(15): 25-31, 44.
- CHEN Hongfei, ZHANG Chenyu, MIAO Huiyu, et al. Comparison between virtual synchronous and droop control[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(15): 25-31, 44.
- [26] 王毅, 黑阳, 付媛, 等. 基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 116-124.
- WANG Yi, HEI Yang, FU Yuan, et al. Adaptive virtual inertia control of DC distribution network based on variable droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 116-124.

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2020-01-17

作者简介:

颜湘武(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源电力系统分析与控制、现代电力变换; E-mail: xiangwuy@163.com

吕佳伟(1995—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为光伏发电及电力电子变换。E-mail: lvjw1873@163.com

(编辑 魏小丽)