

DOI: 10.19666/j.rlfed.202405120

# 基于构网型逆变器的光伏有功备用控制策略

付雪姣<sup>1</sup>, 胡登辉<sup>2</sup>, 刘占彪<sup>1</sup>, 陈来军<sup>2,3</sup>, 张扬帆<sup>1</sup>, 苏小玲<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045;

2. 青海大学新能源电力系统智慧运行教育部重点实验室, 青海 西宁 810016;

3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**[摘要]** 光伏机组采用构网型逆变器并网是戈壁荒漠新能源电网稳定运行的关键。为解决传统光伏减载运行受辐照度影响大、保留功率不精准等问题, 提出了基于构网型逆变器的光伏有功备用控制策略。首先, 设计了含参考阵列和备用阵列的光伏并网结构。其次以双级式光伏拓扑结构为基础, 在前级 DC/DC 引入有功备用控制, 在后级 DC/AC 引入构网型控制策略, 实现光伏机组主动参与电网频率调节; 控制策略引入直流电容电压恒定控制, 维持直流电压的同时, 增强光伏机组的惯量特性。最后建立构网型光伏逆变器小信号模型, 通过根轨迹分析了直流电容值对光伏频率响应的影响。仿真结果验证了所提控制策略的正确性和可行性。

**[关键词]** 光伏有功备用; 构网型控制; 直流电容电压控制; 频率响应; 稳定性控制

**[引用本文格式]** 付雪姣, 胡登辉, 刘占彪, 等. 基于构网型逆变器的光伏有功备用控制策略[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 51-58. FU Xuejiao, HU Denghui, LIU Zhanbiao, et al. Grid forming inverter based standby control strategy for PV generation[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 51-58.

## Standby control strategy for PV generation based on grid-forming inverter

FU Xuejiao<sup>1</sup>, HU Denghui<sup>2</sup>, LIU Zhanbiao<sup>1</sup>, CHEN Laijun<sup>2,3</sup>, ZHANG Yangfan<sup>1</sup>, SU Xiaoling<sup>2</sup>

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China;

2. Key Laboratory of Smart operation of New Energy Power System, Ministry of Education, Qinghai University, Xining 810016, China;

3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The use of grid-forming inverters for grid-connection of photovoltaic units is the key to stable operation of the new energy grid in desert and gobi. The conventional PV load-shedding operation is greatly affected by irradiance and inaccurate power retention. To solve these problems, a PV active standby control strategy based on grid-configuration inverter is proposed. Firstly, a PV grid-connected structure containing reference and backup arrays is designed. Secondly, based on the two-stage PV topology, an active backup control is introduced at the front stage DC/DC and a grid-forming control strategy is introduced at the back stage DC/AC to realize active participation of PV units in grid frequency regulation. The control strategy introduces a constant DC capacitor voltage control to maintain the DC voltage while enhancing the inertia characteristics of the PV unit. Finally, the PV small signal model of the grid-forming inverter is established, and the influence of DC capacitor value on the PV frequency response is analyzed through the root trajectory. The simulation results verify the correctness and feasibility of the proposed control strategy.

**Key words:** PV active standby; grid-forming control; DC capacitor voltage control; frequency response; stability control

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目 (5108-202218280A-2-305-XG)

Supported by: Science and Technology Project of Headquarters of State Grid Corporation of China (5108-202218280A-2-305-XG)

第一作者简介: 付雪姣 (1993), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为构网型换流器并网控制, fuxuejiao2020@163.com.

通信作者简介: 苏小玲 (1986), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电并网稳定性分析及控制, suxiaoling@qhu.edu.cn.

戈壁荒漠地区风光新能源高比例并网导致电力系统等效惯量持续减小, 电网过电压和频率越限风险增加<sup>[1-2]</sup>。同时新能源基地远离交流主网架, 电网相对薄弱, 基于锁相环的跟网型新能源并网逆变器控制存在易失稳、机组难以稳定运行的问题<sup>[3-4]</sup>。另一方面, 新能源机组电压和频率耐受范围有限, 增加了新能源机组的脱网风险。因此新能源机组具备主动支撑能力, 是解决沙漠戈壁荒漠新能源送出的有效手段<sup>[5-7]</sup>。

目前光伏发电参与调频主要有配置构网储能和光伏备用构网控制 2 种模式<sup>[8-10]</sup>。光伏加装储能设备不仅可以抑制辐照度变化所引起的电压波动, 而且能使光伏机组参与一次调频, 但储能设备增加了投资及运维成本<sup>[11-12]</sup>。光伏减载运行通过改变光伏机组最大功率运行点, 使其保留一定的备用容量, 无需配置储能, 即可参与电力系统调频, 经济效益优势明显<sup>[13-15]</sup>。从长期的电力经济考虑及电网侧平复波动来看, 构网型光伏有功备用控制是有效解决方案<sup>[16]</sup>。

光伏机组以有功备用方式并网主要有存在单极式和双级式 2 种模式<sup>[17-18]</sup>。单级式光伏发电主动参与电网调频, 受辐照度波动及控制策略复杂等约束, 直流侧电容电压稳定控制困难, 有功备用控制策略难以实施<sup>[13]</sup>。文献[19-20]改进了光伏逆变器 DC/DC 环节电路, 在调节光伏逆变器偏离最大功率点运行的同时引入虚拟同步机控制, 其控制策略以最大功率运行点设置备用功率, 但单个光伏机组采用有功备用控制时, 其最大输出功率难以获得。

光伏备用模式下采用构网控制策略是保证光伏机组主动调频的关键, 其在频率响应下具有较好的适应性<sup>[4,21]</sup>, 文献[22]将下垂控制应用到双级式光伏发电中, 基于功率环小信号模型分析了频率响应稳定性; 文献[15]分析了引入虚拟惯量的光伏机组频率响应特性; 文献[23]提出了一种光伏最大输出功率估算方法, 并引入虚拟惯量控制和下垂控制为电力系统提供频率支撑。文献[24-26]通过对比分析虚拟同步机与下垂控制, 指出虚拟同步机控制在提高频率稳定性方面性能更优。文献[16]在下垂控制中引入虚拟惯量, 利用光伏  $P-V$  曲线变化规律, 采样直流侧电流来估算光伏最大输出功率, 从而实现光伏有功精准留备用, 但其方法把  $P-V$  曲线近似线性化, 其推导过程相对复杂。上述文献说明了在频率调节方面, 引入惯量的重要性。但无论是下垂控

制还是虚拟同步机控制, 其所输出的有功功率为初始指定功率, 其有功备用量并不能随外部条件如光照强度改变。因此, 需要新的控制策略解决光伏精准备用问题。

为了解决光伏有功备用指令难调整、不随外部环境变化等问题。本文提出了基于构网型逆变器的光伏发电系统精准有功备用控制策略, 在辐照度波动下依然能跟随有功备用比例, 实现精准留备用。构网型控制可实现光伏发电主动参与电力系统频率调节, 为选取最优直流电容, 建立有功备用控制策略的功率环小信号模型, 分析光伏逆变器直流侧电容对构网型有功备用控制频率响应的影响, 最后通过仿真实验验证理论分析与控制策略。

## 1 构网型光伏电站结构

### 1.1 双级式光伏逆变器并网拓扑

双级式光伏并网系统如图 1 所示。由图 1 可见, 该系统主要包括光伏参考阵列、光伏备用阵列、DC/DC 电路、光伏逆变器、滤波电路、送出汇集线路。图中:  $V_r$ 、 $I_r$  和  $V_s$ 、 $I_s$  分别为光伏参考阵列和有功备用光伏阵列的输出电压和电流;  $U_{dc}$  为光伏逆变器直流侧电容电压;  $R_f$ 、 $L_f$ 、 $C_f$  分别为光伏逆变器寄生电阻、滤波电感及电容;  $L_g$  和  $R_g$  分别为线路电感及电阻;  $U_g$  为电网电压;  $e_c$  为交流滤波器电容电压;  $i_f$  和  $i_g$  分别为光伏备用阵列交流滤波器电感电流和电网侧输出电流。

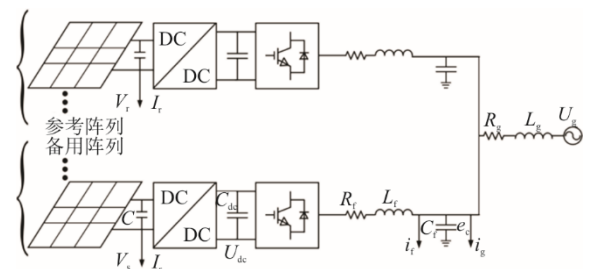


图 1 双级式光伏并网结构

Fig.1 The two-stage photovoltaic grid-connected structure

### 1.2 光伏有功备用工作模式

前级 DC/DC 为 Boost 电路, 光伏参考阵列通常采用最大功率跟踪 (MPPT) 控制, 运行在 MPPT 点, 为光伏备用阵列提供最大功率参考值。图 2 为光伏电源输出  $P-V$  特性曲线。光伏备用阵列偏离 MPPT 点运行, 即运行于减载备用模式, 如图 2 所示, 通常情况下, 运行在 MPPT 点右侧, 以维持直流电压稳定。对于后级 DC/AC 光伏逆变器, 光伏

参考整列可根据需要灵活设计控制策略。光伏备用阵列则采用构网型控制 (grid-forming controlled), 可根据电力系统频率变化实时调节输出功率, 为电力系统提供一定的备用功率, 在电网侧负荷波动及频率变化时, 发出有功功率, 主动支撑电网侧频率, 维持电力系统的稳定。

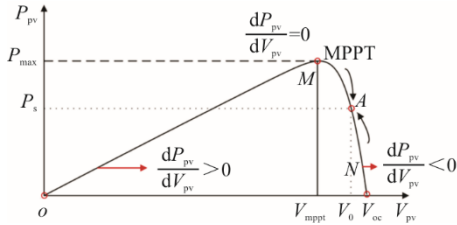


图 2 光伏电源输出 P-V 特性曲线  
Fig.2 The P-V characteristic curve of PV power output

## 2 构网型光伏有功备用控制策略

### 2.1 构网型光伏控制策略

构网型光伏发电以电压源型逆变器 (VSC) 并网, 采用虚拟同步机功率同步控制, 光伏备用阵列控制策略如图 3 所示。

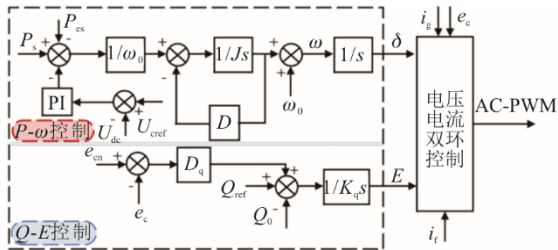


图 3 光伏构网控制策略  
Fig.3 Forming-grid control strategy for PV

构网型光伏控制主要包含 2 个部分: 1) 有功-频率控制引入同步机数学模型中的转子机械方程模拟同步机的惯量阻尼特性, 同时引入直流电容电压控制, 维持直流侧电压稳定; 2) 无功-电压控制模拟同步机励磁特性, 让光伏机组具有电压调节能力。如式(1)和式(2)所示:

$$\begin{cases} J\omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_s - P_{es} - P_U - D\omega_0(\omega - \omega_0) \\ P_U = (k_p + \frac{k_i}{s})(U_{cref} - U_{dc}) \\ \delta = \int (\omega - \omega_0) dt \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $J$ 、 $D$  分别为虚拟惯量和虚拟阻尼;  $\omega$  和  $\omega_0$  分别为 VSC 输出角频率、额定角频率;  $P_s$  为光伏备用阵列有功功率;  $P_{es}$  为 VSC 的电网侧输出有功

功率;  $P_U$  为 VSC 的直流电容电压补偿值;  $k_p$  和  $k_i$  分别为有功环比例积分系数;  $U_{cref}$  和  $U_{dc}$  分别为直流电容电压指令值和实际测量值;  $\delta$  为变流器输出电压相位, 即参考相位。

$$E = \frac{1}{K_q s} [Q_{ref} - Q_0 + D_q(e_{cn} - e_c)] \quad (2)$$

式中:  $K_q$  为无功环积分系数;  $Q_{ref}$  为无功功率指令值;  $Q_0$  为 VSC 输出无功功率;  $D_q$  为无功调压系数;  $e_{cn}$  为电压幅值指令值;  $E$  为逆变器的内电势。

在有功控制环中引入直流电容电压恒定控制维持直流电压恒定, 同时增强系统的惯量特性。根据传统同步机惯性常数计算方法<sup>[27]</sup>, 同步机惯性时间常数  $H_{SM}$  可表示为:

$$H_{SM} = \frac{E_{SM}}{S_N} = \frac{1}{2} \frac{J_{SM} \omega_{SM}}{S_N} \quad (3)$$

式中:  $E_{SM}$  为转子存储的动能;  $J_{SM}$  为转子转动惯量;  $\omega_{SM}$  为转子机械转速;  $S_N$  为发电机的额定容量。

与同步机的惯性定义类似, 电容的惯性时间常数  $H_C$  可表示为:

$$H_C = \frac{E_C}{S_{CN}} = \frac{1}{2} \frac{C_{dc} U_{dc}^2}{S_{CN}} \quad (4)$$

式中:  $E_C$  为电容存储的电能;  $S_{CN}$  为直流电容的额定容量。

分析式(4)可知, 直流电容的惯性常数与电容值相关, 电容值越大, 惯性时间常数就越大, 即系统的惯性就越大。但过大的惯性时间常数在系统频率响应时, 会导致系统有功输出不稳定, 响应时间变慢<sup>[28]</sup>, 对于光伏有功备用系统而言选取合适的  $C_{dc}$  十分重要, 满足频率响应要求的同时, 也要维持频率响应下的稳定性。

为分析  $C_{dc}$  对构网型光伏有功备用控制的稳定性影响, 建立其小信号模型, 构网型光伏备用阵列频率响应小信号传递控制如图 4 所示。

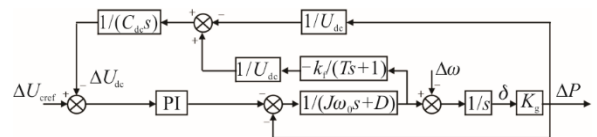


图 4 频率响应小信号传递模型  
Fig.4 Block diagram of the frequency response small signal transmission model

由图 4 解析可得  $\Delta\omega/\Delta P$  的闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2}{a_4 s^5 + a_5 s^4 + a_6 s^3 + a_7 s^2 + a_8 s + a_9} \quad (5)$$

式中： $\alpha_1=J\omega_0C_{dc}U_{dc}K_gT$ ； $\alpha_2=(J+DT)\omega_0C_{dc}U_{dc}K_g$ ； $\alpha_3=D\omega_0C_{dc}U_{dc}K_g$ ； $\alpha_4=J\omega_0C_{dc}U_{dc}T$ ； $\alpha_5=(J+DT)\omega_0C_{dc}U_{dc}$ ； $\alpha_6=C_{dc}U_{dc}K_gT$ ； $\alpha_7=k_pK_gT+C_{dc}U_{dc}K_g-k_gk_p$ ； $\alpha_8=k_pS_E+k_iK_gT-k_gk_i$ ； $\alpha_9=k_iK_g$ ； $T$ 为延迟时间常数； $K_g$ 为功率同步系数。

额定频率为 50 Hz、 $T=0.0015$  s、 $k_f=10^4$ 、 $k_p=60$ 、 $k_i=200$ ，根据  $G(s)$  可绘制直流电容  $C_{dc}$  从 10 mF 增加到 30 mF 的根轨迹。图 5 为直流电容  $C_{dc}$  增大时的极点分布。由图 5 可见，随着直流电容  $C_{dc}$  逐渐增大，极点  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  逐渐远离虚轴，极点  $P_4$  逐渐靠近虚轴，极点  $P_5$  先远离虚轴后靠近虚轴。对比分析  $C_{dc}$  取值对应的极点， $C_{dc}$  取值偏高，尽管  $P_1$ 、 $P_2$  远离虚轴，但虚数过大，容易引发振荡，且  $P_4$ 、 $P_5$  靠近虚轴，进一步降低了控制系统的稳定裕度，极易造成失稳； $C_{dc}$  取值偏小， $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  均有虚部实数，振荡失稳风险依然存在，且  $P_5$  离虚轴更近，稳定性进一步下降。分析计算结果可知  $C_{dc}$  为 20 mF，系统达到最佳运行状态。

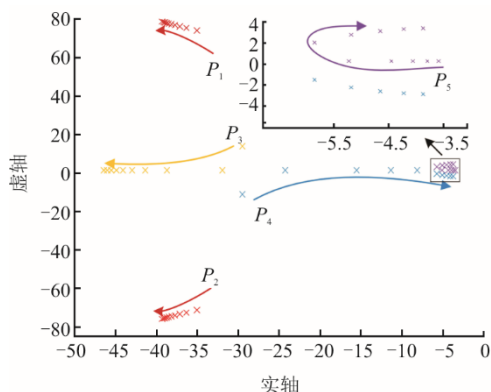


图 5 直流电容  $C_{dc}$  增大时的极点分布  
Fig.5 Pole distribution diagram with increasing DC capacitance  $C_{dc}$

### 2.2 有功备用控制策略

构网型光伏有功备用控制策略通过光伏阵列减载运行，参与电网调频。若电网频率无变化，光伏阵列运行在图 2 所示的有功备用点 A。若电网频率出现偏移，光伏备用阵列调节输出功率参与调频，即：

$$P_d = P_s - P_r(1-k_r) - k_r(f_n - f) \quad (6)$$

式中： $P_d$ 为备用光伏输出电压调节值； $P_r$ 为光伏参考阵列有功功率，一般为最大输出功率； $k_r$ 为有功备用指令值； $k_f$ 为有功-频率下垂系数； $f_n$ 为额定频率； $f$ 为光伏阵列实际输出频率。

图 6 为光伏备用阵列的有功备用控制。若光伏

逆变器无有功备用要求，则闭合开关 S1，光伏备用阵列输出最大功率；否则切换开关到 S2，通过功率计算及备用指令  $k_r$  得到备用阵列输出功率指令值。其中，光伏参考阵列运行于最大功率点，输出功率为  $P_r$ ，光伏备用阵列根据调频需求设定备用容量。

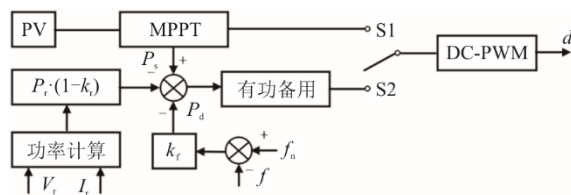


图 6 光伏备用阵列有功备用控制  
Fig.6 PV standby array active standby control frame

根据图 2 所示光伏  $P-V$  曲线实现有功备用控制算法。若光伏备用阵列运行在 0 到  $M$  点之间，此时  $\Delta P/\Delta U > 0$ ，则光伏侧电压还需向电压增大的方向扰动，直到  $M$  点，此时  $\Delta P/\Delta U = 0$ ，为最大功率运行点，若  $A$  点为功率备用点，则光伏侧电压还需继续增加，运行在  $M$  到  $N$  点之间，此时  $\Delta P/\Delta U < 0$ ，需要比较备用功率指令值与实际输出有功值  $P_s(i)$ ，得到扰动方向，调节光伏备用控制输出电压  $V_s$ ，从而得到有功备用控制下占比  $d$ 。图 7 为有功备用控制流程。

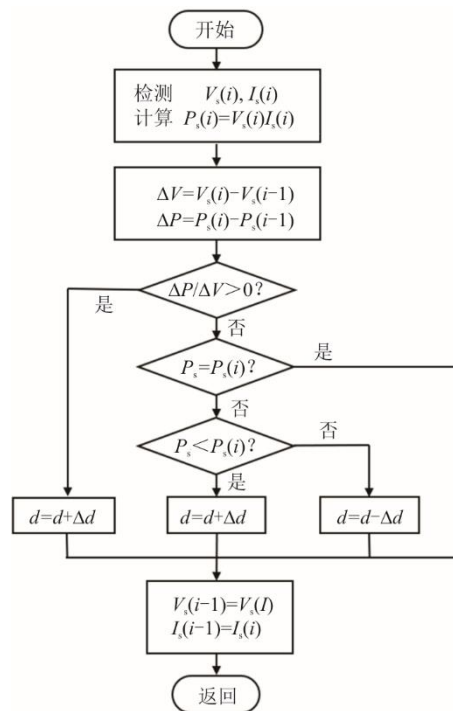


图 7 有功备用算法跟踪流程  
Fig.7 Tracking flowchart of the active standby algorithm

### 3 仿真/实验验证

在 MATLAB/Simulink 中搭建图 1 的双级式有功备用光伏系统，系统主要参数见表 1。

表 1 光伏系统主要参数

Tab.1 Main parameters of the photovoltaic system

| 参数                          | 数值    | 参数                         | 数值  |
|-----------------------------|-------|----------------------------|-----|
| 光照强度/(W·m <sup>-2</sup> )   | 1 000 | 阻尼 D/(Ns·m <sup>-1</sup> ) | 40  |
| 温度/°C                       | 25    | 电压 e <sub>c</sub> /V       | 380 |
| 转动惯量 J/(kg·m <sup>2</sup> ) | 2     | 无功下垂系数 K <sub>q</sub>      | 500 |

设置多种运行工况，验证本文提出的基于构网型逆变器的光伏有功备用控制策略，运行工况包括：通过改变有功备用比例指令，验证备用比例指令的跟踪能力；设定辐照度变化工况，验证有功备用比例的精确性；设定频率扰动，分析不同直流侧 C<sub>dc</sub> 值对光伏有功备用有功输出、频率、直流侧 U<sub>dc</sub> 稳定性的影响；构建典型运行场景，设定参考阵列跟踪型控制，验证本文所提控制策略的频率主动支撑能力。

#### 3.1 有功备用控制策略

图 8 为参考阵列与备用阵列有功输出，其中，P<sub>er</sub>、P<sub>es</sub> 分别为参考阵列和备用阵列输出功率。由图 8a)可见，光伏备用指令在 4 s 时下达备用比例指令为 20%，在 6 s 时下达备用比例指令为 40%，在此过程中，参考阵列稳定输出功率保持不变，备用阵列输出功率随备用比例指令调整输出。由图 8b)可见，有功备用容量可随备用比例指令实时调整。

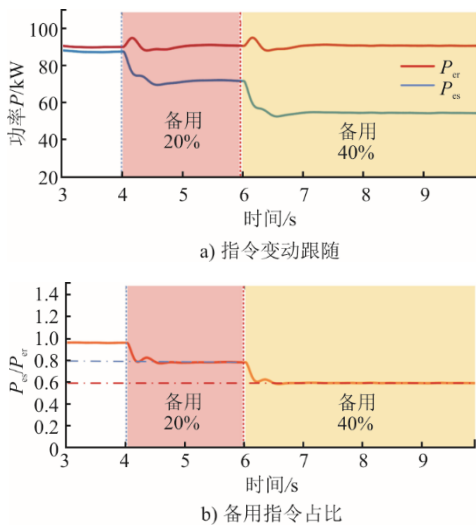


图 8 参考阵列与备用阵列有功输出  
Fig.8 Active power output of reference array and standby array

#### 3.2 辐照度变化工况下备用比例控制

假设外界温度恒定，设定光照强度 4~6 s 内由 1 000 W/m<sup>2</sup> 降低到 500 W/m<sup>2</sup>，图 9 为辐照度变化下有功输出和备用占比。由图 9 可见：在 3~4 s 时辐照度不变，备用阵列保留 20% 的有功功率；4~6 s 时，辐照度逐渐降低，P<sub>er</sub> 和 P<sub>es</sub> 均随辐照度降低而降低，在此期间，备用比例小于 20%；到 6 s 时，辐照度稳定在 500 W/m<sup>2</sup>；在 7 s 时 P<sub>er</sub> 和 P<sub>es</sub> 稳定输出，备用比例始终稳定在 20%。

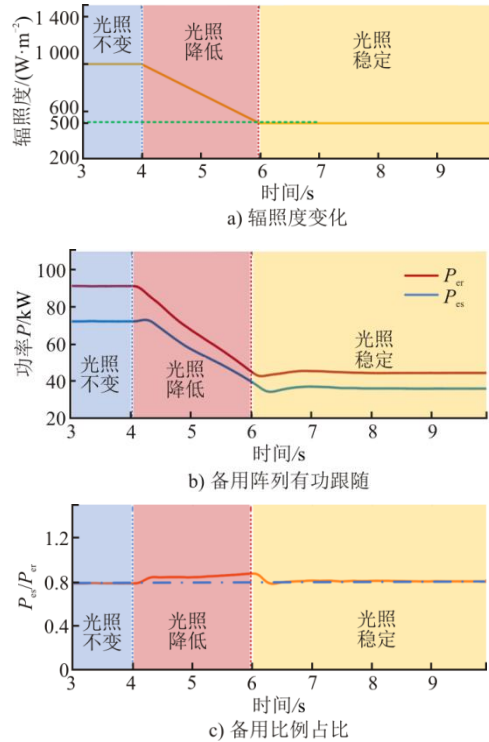


图 9 辐照度变化下有功输出和备用占比  
Fig.9 Active power output and reserve ratio diagram with irradiance variation

#### 3.3 直流电容 C<sub>dc</sub> 频率响应分析

图 10 为不同直流电容参数 C<sub>dc</sub> 的仿真波形，光伏有功备用机组并网运行，备用指令为 20%。在 3.5 s 时电网频率偏移。由图 10a)可知，参考阵列输出功率有波动，但是没有增发有功功率参与调频，C<sub>dc</sub> 对参考功率输出无明显影响；图 10b)为构网型光伏备用阵列输出功率，3.5~6.5 s 时段，电网频率下降，有备用光伏机组增发有功功率参与调频，而且随着 C<sub>dc</sub> 值增大，备用输出功率超调增加，稳定时间延长；图 10c)为光伏系统频率响应曲线，随着 C<sub>dc</sub> 值增加，频率下降的超调量减小，频率变化率降低；图 10d)为光伏备用阵列频率响应下直流电压 U<sub>dc</sub> 波形，随着 C<sub>dc</sub> 值增加，超调量减小，抑制了直流电压纹波。

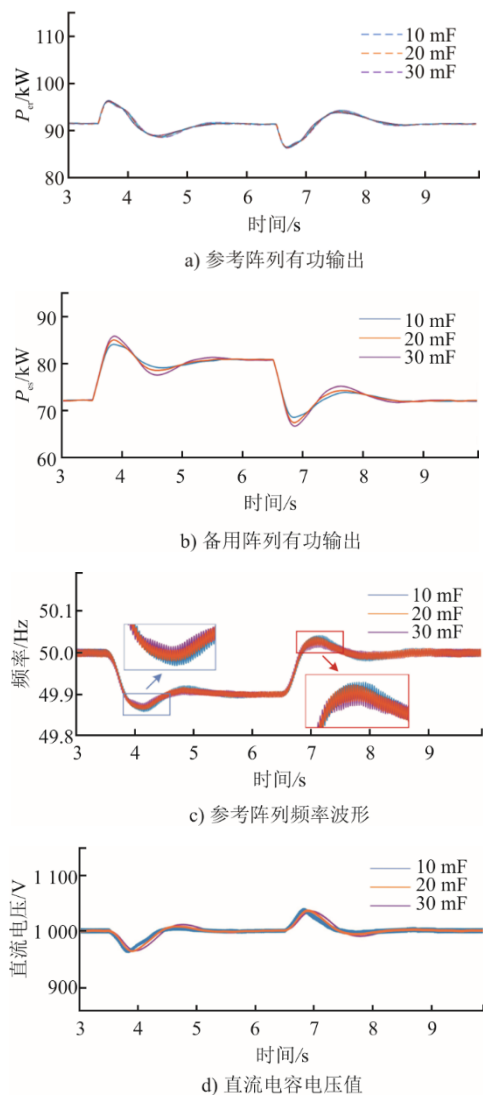


图 10 不同直流电容参数  $C_{dc}$  下波形  
Fig.10 Waveforms with different DC capacitance parameters  $C_{dc}$

### 3.4 电网频率扰动场景

为进一步验证本文控制策略的可行性，在 MATLAB/Simulink 中搭建图 1 所示光伏发电系统。其中，参考阵列前级 DC/DC 为 MPPT 控制，后级 DC/AC 为跟网型控制（电流矢量控制），备用阵列采用构网型光伏有功备用控制，备用指令为 40%。

图 11 为频率扰动下的光伏阵列输出波形。由图 11a)可见，3.5 s 时电网侧频率扰动，备用阵列增发有功功率主动参与调频，而跟网型光伏参考阵列有功功率输出始终保持不变。由图 11b)可见，备用阵列频率偏差及频率变化率均小于参考阵列对应的值。证明基于构网型逆变器的光伏有功备用控制策略适用于电网频率扰动的典型工况。

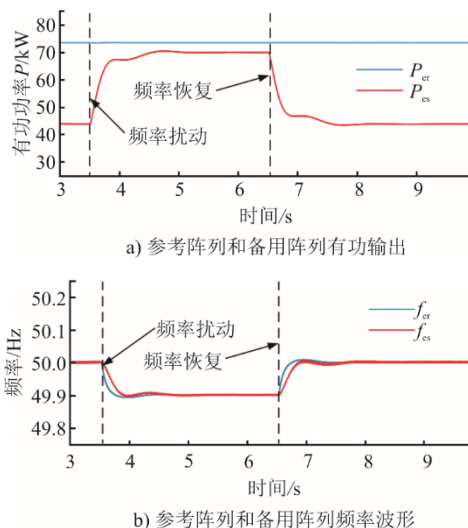


图 11 频率扰动下的光伏阵列输出波形  
Fig.11 The output waveforms of photovoltaic array under frequency disturbance

## 4 结 语

本文提出了基于构网型逆变器的光伏有功备用控制策略，通过光伏参考阵列与备用阵列组合的结构，调整光伏备用阵列在  $P-V$  曲线上的运行工作点，预留部分有功功率参与电力系统调频。此外，构网型光伏逆变器控制系统引入了直流电容电压恒定控制，在提高直流侧电压稳定性的同时，增强光伏备用机组的惯量特性。仿真验证表明，基于构网型逆变器的光伏有功备用控制可保证备用指令和辐照度变化情况下，光伏机组准确预留备用容量，并在电网频率变化工况下主动参与电网调频。

### [参考文献]

- [1] 马晓磊, 李永光, 段鹏飞, 等. 光伏发电参与电网供电功率稳定性调节技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 105-110.  
MA Xiaolei, LI Yongguang, DUAN Pengfei, et al. Research on the technology of photovoltaic power generation participating in power supply stability regulation of power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 105-110.
- [2] 巩宇, 王阳, 李智, 等. 光伏虚拟同步发电机工程应用效果分析及优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 149-156.  
GONG Yu, WANG Yang, LI Zhi, et al. Engineering application effect analysis and optimization of photovoltaic virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 149-156.
- [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] 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. Multi-mode operation control for photovoltaic virtual synchronous generator considering the dynamic characteristics of primary source[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 454-464.
- [5] 鲁宗相, 李佳明, 乔颖, 等. 新能源场站快速频率支撑能力评估研究现状与技术展望[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(10): 1-19.  
LU Zongxiang, LI Jiaming, QIAO Ying, et al. Fast frequency support capability assessment of renewable energy stations: research status and technical prospects[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(10): 1-19.
- [6] SHIM J W, VERBIC G, ZHANG N, et al. Harmonious integration of faster-acting energy storage systems into frequency control reserves in power grid with high renewable generation[J]. *IEEE Transactions Power Systems*, 2018, 33: 6193-6205.
- [7] BAGHERI-SANJAREH M, NAZARI M H. Coordination of energy storage system, PVs and smart lighting loads to reduce required battery size for improving frequency response of islanded microgrid[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2020, 22: 100357.
- [8] 包广清, 谭宏涛, 丁坤, 等. 光伏系统有功功率自备用研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(12): 90-96.  
BAO Guangqing, TAN Hongtao, DING Kun, et al. Research on active power self-reserve of photovoltaic system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(12): 90-96.
- [9] NANOU S I, PAPAKONSTANTINO A G, PAPATHANASSIOU S A. A generic model of two-stage grid-connected PV systems with primary frequency response and inertia emulation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 127: 186-196.
- [10] SANGWONGWANICH A, YANG Y, BLAABJERG F, SERA D. Delta power control strategy for multistring grid-connected PV inverters[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53: 3862-3870.
- [11] BAGHERI-SANJAREH M, NAZARI M H. Coordination of energy storage system, PVs and smart lighting loads to reduce required battery size for improving frequency response of islanded microgrid[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2020, 22: 100357.
- [12] SHIM J W, VERBIC G, ZHANG N, et al. Harmonious integration of faster-acting energy storage systems into frequency control reserves in power grid with high renewable generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33: 6193-6205.
- [13] 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 taking part in grid frequency regulation actively[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(12): 100-110.
- [14] 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(1): 26.
- [15] 严干贵, 张善峰, 贾祺, 等. 光伏发电主动参与电网频率调节的机理分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(8): 191-199.  
YAN Gangui, ZHANG Shanfeng, JIA Qi, et al. Mechanism analysis of PV generation actively participating in power grid frequency regulation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(8): 191-199.
- [16] KAKIMOTO N, TAKAYAMA S, SATOH H. Power modulation of photovoltaic generator for frequency control of power system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, 24(4): 943-949.
- [17] 贾祺, 赵彪, 严干贵, 等. 基于高频链直流变压器的柔性中压直流配电系统分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 90-98.  
JIA Qi, ZHAO Biao, YAN Gangui, et al. Analysis of flexible medium voltage DC power distribution system based on high-frequency-link DC solid state transformer[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(16): 90-98.
- [18] ZARINA P P, MISHRA S, SEKHAR P C. Exploring frequency control capability of a PV system in a hybrid PV-rotating machine-without storage system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 60(6): 258-267.
- [19] 颜湘武, 吕佳伟, 贾焦心, 等. 双级式有功备用光伏虚拟同步机控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(15): 61-68.  
YAN Xiangwu, LV Jiawei, JIA Jiaoxin, et al. Two-stage active standby photovoltaic virtual synchronous machine control strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(15): 61-68.
- [20] 张海峥, 张兴, 李明, 等. 基于变步长功率跟踪的有功备用式 PV-VSG 控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 92-100.  
ZHANG Haizheng, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Adaptive virtual inertia control of DC distribution network based on variable droop coefficient[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 92-100.
- [21] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型逆变器控制技术及其原理综述[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-16 [2024-07-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240509.1704.007.html>.  
LIU Hui, YU Siqu, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 1-16 [2024-07-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240509.1704.007.html>.
- [22] NANOU S I, PAPAKONSTANTINO A G, PAPATHANASSIOU S A. A generic model of two-stage grid-connected PV systems with primary frequency response and inertia emulation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 127(8): 186-196.
- [23] ZHONG C, ZHOU Y, YAN G. Power reserve control with real-time iterative estimation for PV system participation in frequency regulation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 124: 106367.
- [24] 李斌, 周林, 余希瑞, 等. 基于改进虚拟同步发电机算

- 法的微网逆变器二次调频方案[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2680-2687.
- LI Bin, ZHOU Lin, YU Xirui, et al. Secondary frequency regulation for microgrid inverters based on improving virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2680-2687.
- [25] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
- CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [26] 许诤翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3595.
- XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [27] 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.
- [28] 王亚军, 杨立波, 马斌, 等. 虚拟同步机惯量及阻尼系数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 88-98.
- WANG Yajun, YANG Libo, MA Bin, et al. Coordination and optimization strategy of virtual inertia and damping coefficient of a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 88-98.

(责任编辑 杜亚勤)