DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.252 中图分类号：TM464 文献标志码：A

面向光储黑启动电源的逆变器改进自同步电压源控制策略

杜博闻[1]，侯川川[2](中国电源学会学生会员)，朱 淼[2](中国电源学会高级会员)，
杨心刚[3]，叶 舒[2](中国电源学会会员)
(1.上海电力大学电气工程学院，上海 200090；2.上海交通大学电子信息与电气工程学院，
上海 200240；3.国网上海市电力公司电力科学研究院，上海 200437)

摘要：分布式电源作为黑启动电源在结构层面展现出更高的灵活性，在反应速度方面也更为快捷。然而，基于自同步电压源控制的光储黑启动电源在系统恢复构建过程中会出现频率波动，存在导致后续电网黑启动过程失败的风险。为增强对于构建过程中的频率波动抑制效果，对光储黑启动电源的接口逆变器提出1种改进的自同步电压源控制策略。该改进控制策略提高了光储黑启动电源的稳定性，为后续黑启动过程的顺利实施奠定了基础。同时进行了仿真分析和实验验证，对所提出的控制策略与理论结果进行证明。

关键词：自同步电压源；逆变器；光储黑启动电源；频率波动；稳定性

Improved Self-synchronous Voltage Source Control Strategy for Inverter in PV-storage Black-start Power Supply

DU Bowen[1], HOU Chuanchuan[2], *Student Member*, *CPSS*, ZHU Miao[2], *Senior Member*, *CPSS*,
YANG Xingang[3], YE Shu[2], *Member*, *CPSS*
(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: As a black-start power supply, distributed generation exhibits higher flexibility in terms of structure, and it is also more rapid in response speed. However, during the system restoration and construction process, the PV-storage black-start power supply based on self-synchronous voltage source control may experience frequency fluctuations, posing a risk of failure in the subsequent black-start process of power grid. To enhance the suppression effect on frequency fluctuations during the construction process, an improved self-synchronous voltage source control strategy for an interface inverter in the PV-storage black-start power supply is proposed. This improved control strategy improves the stability of the PV-storage black-start power supply, laying a foundation for the smooth implementation of subsequent black-start process. Meanwhile, simulation analysis and experimental verification were also presented, providing a detailed validation of the proposed control strategy and theoretical results.

Keywords: Self-synchronous voltage source; inverter; PV-storage black-start power supply; frequency fluctuation; stability

收稿日期：2025-02-06；**修回日期：**2025-04-02，2025-04-25，2025-05-02；**录用日期：**2025-05-11；**网络首发日期：**2025-05-23
基金项目：国家电网上海市电力公司科技项目(52094023001W)
This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company under the grant 52094023001W

随着“双碳”目标的深入推进，我国新型电力系统迅速发展[1]。在“双高”背景下，新型电力系统愈发复杂，潜藏的问题日益凸显[2]。分布式电源大量接入致使系统中传统同步发电机占比下降，系统缺少惯量、阻尼特性，对电力系统的稳定运行带

来恶劣影响，导致停电事故频发。因而以各类电源为核心的电力系统黑启动技术日益受到重视[3]。

黑启动是指电力系统因故障停运处于全“黑”状态后，仅通过系统中有自启动能力的电源启动，带动无自启动能力的电源，逐渐扩大系统恢复范围，最终实现整个系统供电恢复的过程。传统意义的黑启动电源多为水轮机、燃气轮机及柴油发电机等传统发电单元[4]。相较传统黑启动电源，分布式黑启动电源展现出更高的灵活性，能够克服环境限制导致的黑启动受限问题，响应速度也更为快捷[5]。此外，分布式黑启动电源更加清洁环保，有较低的运行成本和维护费用，符合“双碳”目标且更为经济。分布式黑启动电源常包括储能系统，其可与分布式电源组成黑启动电源参与黑启动进程[6-7]。储能系统响应快速且可控性强，能有效改善风光自身的波动性与随机性所造成的黑启动可靠性欠佳的状况[8-9]。

目前，针对黑启动电源中储能系统和分布式电源控制策略的研究已相当丰富。储能系统作为自启动电源参与黑启动电源构建过程时，需为分布式电源提供稳定的电压、频率支持。文献[10-11]令采用恒压恒频 V/F(voltage/frequency)控制的储能系统作为自启动电源参与到新能源黑启动当中，但 V/F 控制缺少惯性和阻尼特性，在黑启动电源构建过程中的频率支撑能力不如自同步电压源控制下的储能系统。文献[12]提出 1 种基于改进下垂的自同步电压源控制，并将该控制同时应用于分布式电源和储能系统，仿真结果证明该控制相比虚拟同步发电机 VSG(virtual synchronous generator)控制在黑启动电源构建过程中有更强的频率支撑能力。然而，改进下垂控制终究缺少惯性和阻尼特性，若针对基于 VSG 的自同步电压源控制进行改进，可进一步提升黑启动电源的频率稳定性。文献[13]对基于 VSG 的自同步电压源控制进行改进，在有功环路中增加 f/P 下垂控制环节，将其应用于双馈风机，使改进的黑启动电源相比传统 VSG 控制的黑启动电源有更强的频率支撑能力。但该控制仅应用在分布式电源，未对储能系统进行改进且受储能系统连接位置限制，存在局限性，有进一步提升的空间。

基于上述问题，本文将以光储黑启动电源作为应用场景和研究对象，提出 1 种适用于光储黑启动电源并网接口逆变器的改进自同步电压源控制策略。对光储黑启动电源进行优化设计，将改进控制同时应用于储能系统和光伏单元，并通过理论分析、仿真和实验，验证了改进自同步电压源控制能够有效抑制光储黑启动电源构建过程中的频率波动。

1　自同步电压源逆变器控制技术

自同步电压源控制策略有多种实现形式，可有效提高新能源发电的并网稳定性[14-15]，在黑启动过程中发挥关键作用[16]。其中，VSG 控制于新型电力系统中的应用最为广泛，本研究将基于 VSG 控制，针对光储黑启动电源展开深入研究。基于 VSG 的自同步电压源逆变器并网拓扑如图 1 所示。图中：V_{dc} 为等效直流电压源；C_{dc} 为直流母线电容；L_f、C_f 为滤波电感和滤波电容；e_{abc} 为逆变器三相桥臂中点的输出电压；i_{abc} 为逆变器的输出电流；v_{abc} 为逆变器的输出电压；u_g 为并网点电压。

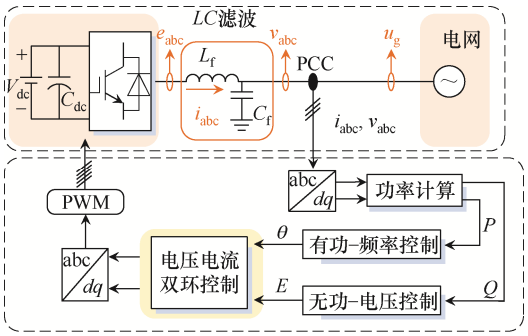


图 1　基于 VSG 的自同步电压源逆变器并网拓扑

Fig. 1 Topology of grid-connected self-synchronous voltage source inverter based on VSG

VSG 的转子运动方程和无功电压方程分别为

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{P_{\mathrm{ref}}-P_{\mathrm{e}}}{\omega_{\mathrm{n}}}-D(\omega-\omega_{\mathrm{n}}) \tag{1}$$

$$E=E_0+D_Q(Q_{\mathrm{ref}}-Q) \tag{2}$$

式中：J 为转动惯量；P_{ref} 为 VSG 机械功率参考值；

P_e为逆变器电磁功率；D为阻尼系数；ω为逆变器电气角速度；ω_n为电网同步角速度；E为VSG的内电势；E_0为空载电势；D_Q为无功调节系数；Q_{ref}为VSG无功功率参考值；Q为VSG输出的瞬时无功功率值。

由式(1)和式(2)可得 VSG 的控制框图如图 2 所示。

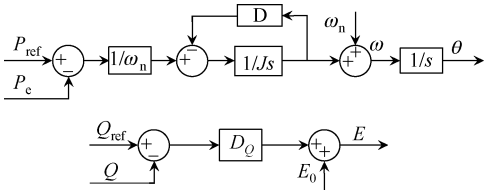


图 2 VSG 控制框图

Fig. 2 Block diagram of VSG control

自同步电压源型新能源控制灵活，具有可独立带负荷、启动速度快的优点，具有支撑电网快速恢复的潜力，通过自主建立频率和电压，可作为辐射状网输变电设备导致局部电网全停时的备用供电电源，在大停电时能够迅速自启动并且作为黑启动电源实现后续电网的恢复，有效降低因停电事故带来的损失。基于以上分析，亟需开展基于自同步电压源控制的黑启动电源关键技术研究，提升新型电力系统的运行可靠性及灵活性。

2 光储黑启动电源设计

相较传统光储系统而言，采用自同步电压源控制的光储系统在电压、频率支撑方面展现出更为强劲的能力，其作为黑启动电源时启动更为迅速，对电网的支撑功效也更为卓越。

2.1 自同步电压源控制的光储系统

在传统光储系统架构中，为实现光伏阵列能量利用效率的最大化提升，光伏发电部分的前级通常接入采用最大功率点跟踪 MPPT(maximum power point tracking)控制的双向 DC-DC 变换器，而后级则连接采用传统电流型 PQ 控制的 DC-AC 并网逆变器。然而，鉴于 MPPT 控制属于被动控制范畴，这一特性决定了光伏发电部分在运行过程中始终依赖大电网的支撑，其自身并不具备在孤岛状态下独立带负载运行的能力。

针对上述问题，文献[17]提出了 1 种基于 VSG 控制的光伏单元。该系统采用单级式结构，在 VSG 控制前端附加光伏控制模块，同时省略了双级式结构中的前级双向 DC-DC 变换器。通过这一设计，该光伏发电系统能够在离网与并网 2 种运行模式下实现稳定运行，并且使光伏单元具备自同步电压源特性。在共交流式光储系统中，储能系统可借助独立的 DC-AC 逆变器接入电网。为提高光储黑启动电源的频率支撑能力，可采用自同步电压源控制，使黑启动电源具备自同步电压源特性，提高光储黑启动电源的稳定性并为后续电网的恢复提供保障。

2.2 光储黑启动电源的构建

基于 2.1 节的分析，构建图 3 所示的光储黑启动电源典型应用场景，包括储能系统、光伏单元、系统负荷、输电线路、辅机、火电机组。其中，光伏单元及储能系统均采用 VSG 控制策略。

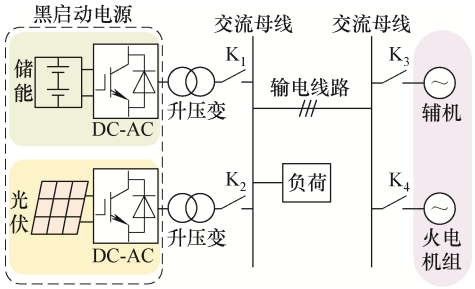


图 3 光储黑启动电源典型应用场景(自同步电压源型控制)

Fig. 3 Typical application scenario of PV-storage black-start power supply(under self-synchronous voltage source control)

光伏单元自身并不具备自启动能力，需要依靠储能系统带动才可启动，二者共同组成光储黑启动电源。开关 K_3、K_4 在黑启动电源未稳定运行之前一直处于断开状态。当光储黑启动电源稳定运行后，开关 K_3 闭合，通过输电线路为火电机组辅机供电，进而恢复火电机组的发电能力。光储黑启动电源的构建过程如图 4 所示。

本文聚焦光储黑启动电源的频率稳定性研究。在光储黑启动电源构建过程中，系统频率稳定性处于关键地位，当光伏单元并入储能系统及系统负荷

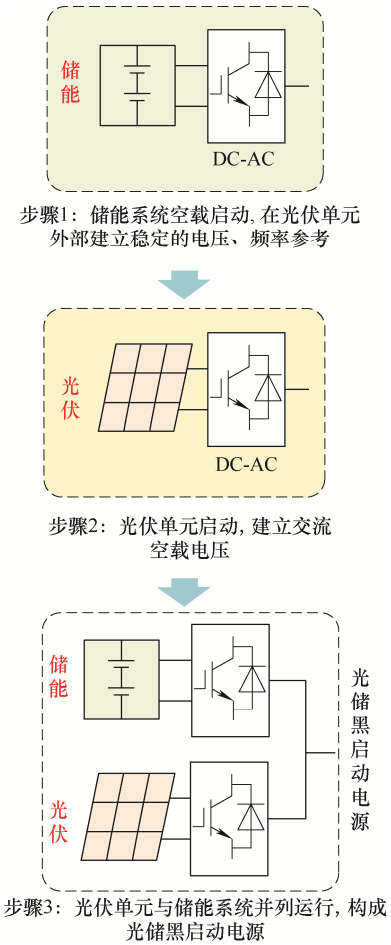


图 4　光储黑启动电源构建过程

Fig. 4 Construction process of PV-storage black-start power supply

突增时，自同步电压源控制能够有效降低光储黑启动电源内部的频率波动程度。为进一步提升光储黑启动电源的频率支撑能力，可针对逆变器的自同步电压源控制策略进行优化改进，强化电网黑启动过程的稳定性与可靠性。

3　改进的自同步电压源型控制策略

根据图 2 控制框图可知，VSG 控制的有功功率调节与频率有关，无功功率调节与电压有关。因此，要想使光储黑启动电源具备更强的频率支撑能力，可针对 VSG 控制的有功环路实施优化改进措施，以增强其对频率波动的抑制作用，保障黑启动过程的平稳运行。

研究表明，VSG 有功环路中转动惯量 J 和阻尼系数 D 会影响 VSG 控制的频率稳定性。为有效提升光储黑启动电源的频率稳定性，赋予其更稳定可靠的黑启动能力，提出 1 种可用于自同步电压源型黑启动电源的改进 VSG 控制策略。

图 5 为改进后的 VSG 有功环路控制框图，其具体实现方式为在传统 VSG 有功-频率控制回路的基础上，并联 1 个 PI 控制器；将此改进控制策略同时应用于储能系统和光伏单元，通过这种改进控制，有望优化光储黑启动电源内部的频率波动问题，进而增强后续电网黑启动过程中的稳定性与可靠性。

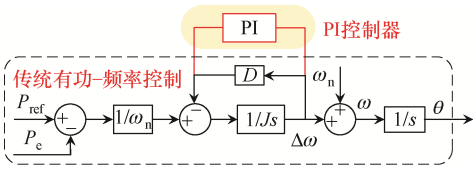


图 5　改进的 VSG 有功环路控制框图

Fig. 5 Block diagram of improved VSG active loop control

其中，并联 PI 控制器的传递函数为

$$K_{\mathrm{PI}}(s)=\frac{(K_{\mathrm{P}}s+K_{\mathrm{I}})}{s}=K_{\mathrm{P}}+\frac{K_{\mathrm{I}}}{s} \tag{3}$$

式中，K_{P}、K_{I} 分别为 PI 控制器的比例和积分系数。

联立式(1)和式(3)，得到改进后的 VSG 有功环路控制方程为

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{P_{\mathrm{ref}}-P_{\mathrm{e}}}{\omega_{\mathrm{n}}}-\left[D+\left(K_{\mathrm{P}}+\frac{K_{\mathrm{I}}}{s}\right)\right](\omega-\omega_{\mathrm{n}}) \tag{4}$$

消除式(4)中的微分算子 s，可得

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{P_{\mathrm{ref}}-K_{\mathrm{I}}\Delta\theta\omega_{\mathrm{n}}-P_{\mathrm{e}}}{\omega_{\mathrm{n}}}-(D+K_{\mathrm{P}})(\omega-\omega_{\mathrm{n}}) \tag{5}$$

式中，$\Delta\theta$ 为相位偏差。

对比式(1)和式(5)，定义改进后的阻尼系数 D' 和有功功率参考值 P'_{ref} 为

$$\begin{cases}D'=D+K_{\mathrm{P}}\\P'_{\mathrm{ref}}=P_{\mathrm{ref}}-K_{\mathrm{I}}\Delta\theta\omega_{\mathrm{n}}\end{cases} \tag{6}$$

由式(6)可得，K_{P} 导致系统阻尼系数增大为 D'，提高了 VSG 的抗干扰能力；$\Delta\theta$ 通过 K_{I} 为有功环路增加反馈项，使有功参考值减小为 P'_{ref}，削弱了有功功率的不平衡，增强了系统稳定性。

由于电磁功率 P_e 与 $\Delta\theta$ 近似成线性关系，假设 $P_e=K\cdot\Delta\theta$，其中 K 为功角-功率增益，将 $\Delta\omega=\omega-\omega_n$ 代入式(5)中得

$$J\frac{\mathrm{d}(\Delta\omega)}{\mathrm{d}t}=\frac{P_{ref}}{\omega_n}-\frac{K\cdot\Delta\theta}{\omega_n}-(D+K_P)\Delta\omega-K_I\Delta\theta \tag{7}$$

定义状态变量 $\boldsymbol{x}=[\Delta\theta \quad \Delta\omega]^T$，得线性状态方程为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -\dfrac{K_I+K/\omega_n}{J} & -\dfrac{D+K_P}{J}\end{bmatrix}\boldsymbol{x}+\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{P_{ref}}{J\omega_n}\end{bmatrix} \tag{8}$$

则系统特征方程为

$$s^2+\frac{D+K_P}{J}s+\frac{K_I+K/\omega_n}{J}=0 \tag{9}$$

系统稳定的充要条件为

$$\begin{cases}\dfrac{D+K_P}{J}>0\\ \dfrac{K_I+K/\omega_n}{J}>0\end{cases} \tag{10}$$

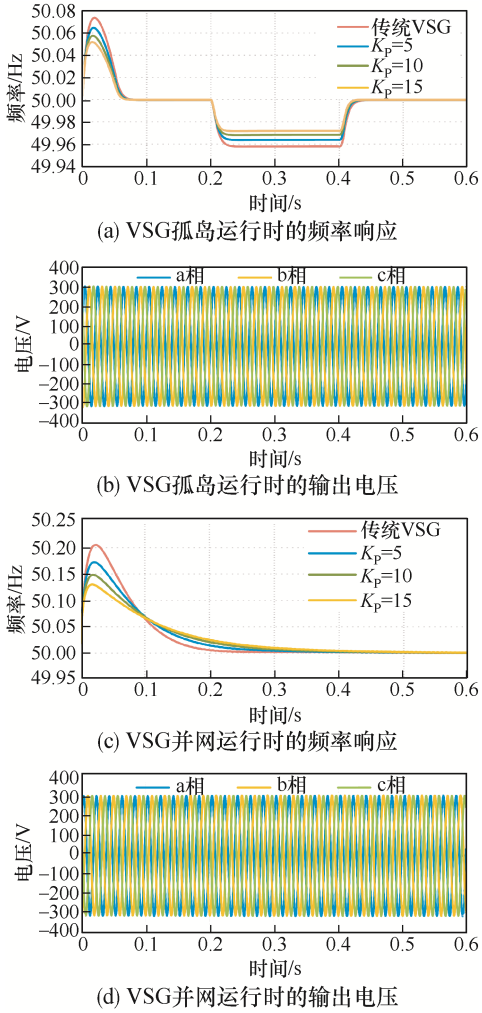
稳定性边界为

$$\begin{cases}K_P>-D\\ K_I>-K/\omega_n\end{cases} \tag{11}$$

在实际设计中，优先选择 $K_P\geqslant 0$、$K_I\geqslant 0$。

前文已分析 K_P 能够影响系统的频率，为判断改进控制策略及参数 K_P 对于系统频率的影响，下面对改进 VSG 控制在孤岛及并网状态下的频率响应进行仿真分析。其中，电压等级为 380 V，转动惯量 J=0.2，阻尼系数 D=5。在允许范围内等差选取 K_P 值为 5、10、15，观测系统频率响应之间的差异。

在孤岛系统中，令 0.2 s 时负荷突增，0.4 s 时突增负荷切除。VSG 孤岛及并网运行时的频率响应及输出电压如图 6 所示。由图 6(a)和(b)可得，VSG 孤岛系统处于正常运行状态。系统负荷突增后，由于系统提供有功功率不足，导致系统频率下降；切除突增负荷后，系统频率恢复稳定状态；改进的 VSG 孤岛系统，随 K_P 的增加，系统最初的频率波动减小；在负荷突增时，随着 K_P 的增加，频率下跌量减小；突增负荷切除后，随着 K_P 的增加，系统频率加速恢复稳定状态。由图 6(c)和(d)可得，VSG 并网系统处于正常运行状态。相比传统 VSG 并网系统，改进 VSG 并网系统的频率波动减小，且随 K_P 的增加，频率波动幅值减小。



(a) VSG孤岛运行时的频率响应

(b) VSG孤岛运行时的输出电压

(c) VSG并网运行时的频率响应

(d) VSG并网运行时的输出电压

图 6 VSG 孤岛及并网运行时的频率响应及输出电压

Fig. 6 Frequency response and output voltage during VSG islanding and grid-connected operation

综上，改进 VSG 控制能有效减少系统的频率波动，具备更强的系统频率恢复能力，可有效提高系统的频率稳定性。故可将改进 VSG 控制同时应用于光伏单元及储能系统中，对其在削减光储黑启动电源内部频率波动方面的有效性予以验证，并对参数 K_P 与光储黑启动电源内部频率波动之间的关联特性展开研究，以进一步优化光储黑启动电源在后续电网黑启动过程中的性能表现。

4　仿真与实验验证

鉴于光伏单元在 VSG 控制前端存在附加的 MPPT 控制部分，而该部分可能对黑启动电源构建过程中的暂态稳定性产生干扰，可对光储黑启动电源模型予以简化处理。将光伏单元简化为 1 个直流电压源，以此模拟光伏单元在稳定运行状态下的输出电压，并设定光伏 VSG 控制的有功、无功参考值。依据已有的研究成果，采用相同控制参数的 VSG 双机并联结构能够达成负荷功率的平均分配。故设定光伏单元与储能系统采用相同的系统参数，见表 1。通过仿真和实验，深入探究改进后光储黑启动电源内部的有功功率分配特性及频率波动状况。

表 1　光储黑启动电源系统参数

Tab. 1 System parameters of PV-storage black-start power supply

参数	数值
额定频率 f/Hz	50
滤波电感 L_f/mH	2
滤波电容 C_f/μF	50
交流电压幅值 U/V	311
电网额定角速度 ω_n/(rad·s^{-1})	314
转动惯量 J/(kg·m^2)	3
阻尼系数 D/(N·m·s·rad^{-1})	30
无功下垂系数 D_Q/(V·kvar^{-1})	2×10^{-3}

光储黑启动电源构建过程中不同时间段光伏单元、储能系统的有功、无功功率参考值及光储黑启动电源所带负荷量见表 2。

表 2　不同时间段的功率参考值和系统负荷量

Tab. 2 Reference values of power and system loads in different time periods

时间/s	储能有功功率参考值/kW	光伏有功功率参考值/kW	无功功率参考值/kvar	负荷/kW
0~2	20	0	0	20
2~4	10	10	0	20
4~6	50	50	0	100

4.1　仿真验证

通过 MATLAB/Simulink 仿真平台针对所提出的光储黑启动电源应用场景及改进控制策略展开仿真验证工作，仿真参数与表 1 和表 2 参数相同，在允许范围内等差选取 K_p 值为 20、40、60，观测系统频率响应，光储黑启动电源结构参照图 3。

光储黑启动电源输出的有功功率如图 7 所示。其中，在 0~2 s 内，储能系统处于单独运行状态，此时系统所承载的 20 kW 负荷完全由储能系统独立承担。当时间推进至 2 s 时，光伏单元成功启动，与储能系统顺利实现并联运行，组成光储黑启动电源。在 2~4 s 内，二者协同作业，共同承担系统的 20 kW 负荷，并且能够达成对负荷的平均分配。4 s 时，由于光伏单元、储能系统的有功功率参考值及系统所带负荷均发生了变化，因此二者各自所承担的负荷量相应增加，不过依然能够满足负荷平均分配的要求，光储黑启动电源整体运行状态保持稳定且有序。

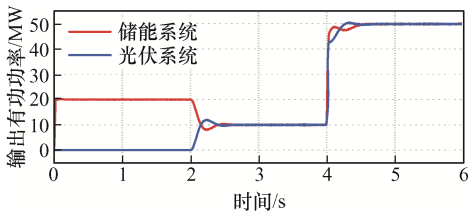
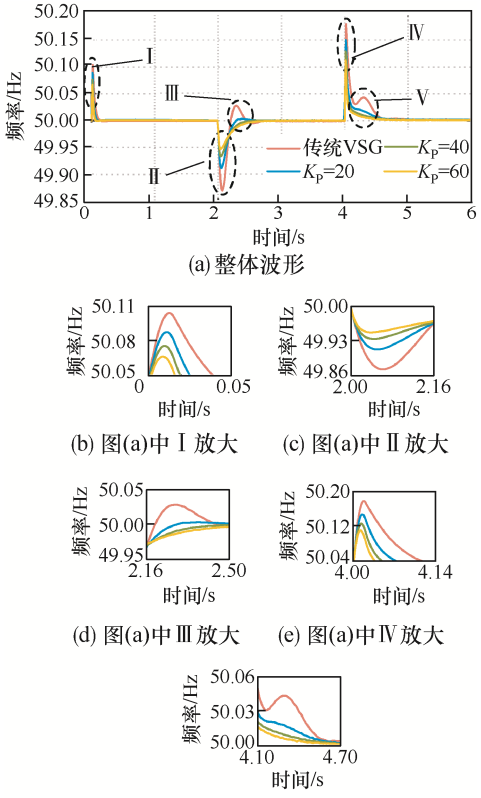


图 7　光储黑启动电源输出的有功功率仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of active power output from PV-storage black-start power supply

图 8 和图 9 为不同 K_p 参考值和传统 VSG 控制下光储黑启动电源构建过程中储能系统和光伏单元的频率响应对比仿真波形。在传统 VSG 控制的光储黑启动电源构建过程中，光伏单元启动完毕并与储能系统并联运行组成黑启动电源瞬间，光伏单元与储能系统二者均会出现一定程度的频率波动现象。此外，系统负荷的突然增加及功率参考值的变动，也会对整个光储黑启动电源的稳定性产生不良影响，在实际工程应用场景下，可能引发后续电网黑启动过程的失败，对电力系统的可靠性和稳定性构成威胁。



(a) 整体波形

(b) 图(a)中Ⅰ放大　(c) 图(a)中Ⅱ放大

(d) 图(a)中Ⅲ放大　(e) 图(a)中Ⅳ放大

(f) 图(a)中Ⅴ放大

图 8　黑启动电源中储能系统的频率响应仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of frequency response of energy storage system in black-start power supply

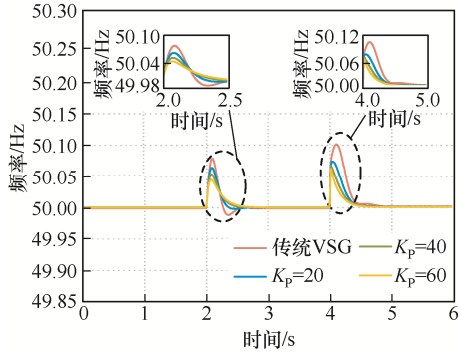


图 9　黑启动电源中光伏系统的频率响应仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of frequency response of PV system in black-start power supply

由图 8 可知，在改进后的光储黑启动电源中，储能系统在开始运行瞬间的频率波动幅度减小，且随着改进控制策略中新增参数 K_p 的逐步增大呈持续减小趋势；当光伏单元启动并与储能系统完成并联运行之后，储能系统的频率下跌幅度显著降低。并且，随着改进控制策略中新增参数 K_p 的逐步增大，频率下跌量呈现出逐渐递减的趋势，频率的波动区间也得到了明显的收窄。在系统面临负荷突增的工况时，伴随着有功功率参考值的提升，储能系统的频率会出现一定程度的波动，随后逐渐恢复至稳定状态。与传统 VSG 控制相比，此时频率的上涨幅度有所减小，而且随着新增参数 K_p 的增大，频率的波动范围同样呈现出缩减趋势。

由图 9 可知，在光伏单元成功启动并与储能系统实现并联运行之后，相较于传统 VSG 控制，改进后光伏单元的频率上涨幅度降低。并且，随着控制策略中参数 K_p 的逐步提高，频率上涨量呈现出逐渐减小的趋势。当系统遭遇负荷突增的情况时，伴随着有功功率参考值的增加，光伏系统的频率会产生一定幅度的波动。但是，与传统 VSG 控制相比，其频率上涨量减少，而且随参数 K_p 的不断提高，频率的波动范围也相应地逐渐缩小。

4.2　实验验证

为确保仿真分析的准确性及改进控制策略的有效性，本研究在完成理论剖析与仿真验证工作的基础上，借助图 10 所示 RT-LAB OP5600 半实物仿真实验平台，针对所提出的拓扑结构与改进控制策略开展实验室环境下的原理性验证工作。为保证实验结论的准确性，采用与仿真相同的实验参数。

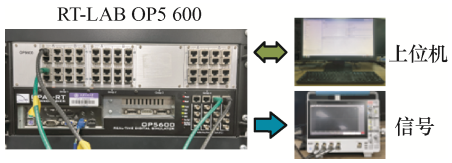


图 10　RT-LAB 仿真实验平台

Fig. 10 RT-LAB simulation experiment platform

为对光储黑启动电源构建过程中光伏单元与储能系统的有功功率变化及分配情形予以有效验证，获取了图 11 所示的光储黑启动电源在构建过程中的有功功率实验波形，图中，P_{PV} 为光伏单元有功功率，P_{ESS} 为储能系统有功功率。由图 11 可知，起始阶段仅由储能系统独立承担系统负荷。待光伏单元成功启动并与储能系统协同运作之后，二者能够对系统所带负荷进行平均分配。而在后续功率参考值发生变动及系统负荷突然增加时，二者所承担的负荷量亦会相应改变，且依旧能够实现功率

的平均分配。此实验结果与图 7 呈现的仿真结果高度吻合，证实了光储黑启动电源在构建过程中的功率变化规律及分配特性。

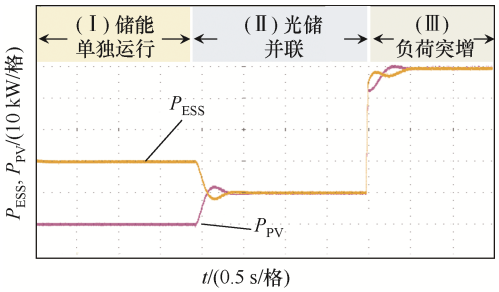


图 11　光储黑启动电源输出的有功功率实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms of active power output from PV-storage black-start power supply

为检验改进自同步电压源控制策略在提升系统频率稳定性方面的有效性，并分析参数 K_P 对系统频率波动的影响，采用与仿真验证阶段相同的控制参数(K_P= 20、40、60)开展实验验证工作。

在光储黑启动电源构建过程中，不同 K_P 值时储能系统的频率波动实验波形如图 12 所示，储能系统在单独运行阶段(Ⅰ)、光伏单元与储能系统并联运行阶段(Ⅱ)、系统负荷突增阶段(Ⅲ)均存在一定的频率波动。

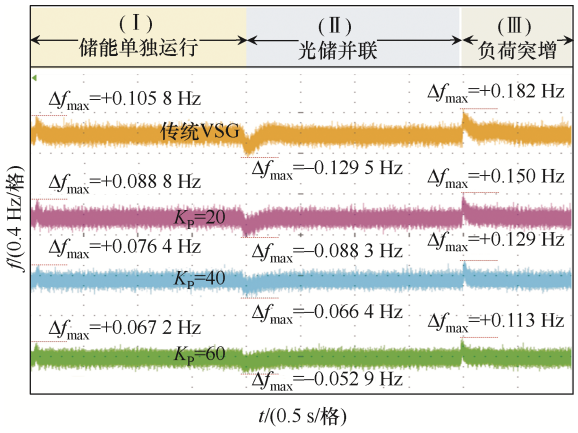


图 12　黑启动电源中储能系统的频率响应实验波形

Fig. 12 Experimental waveforms of frequency response of energy storage system in black-start power supply

不同 K_P 下储能系统的最大频率波动量$|\Delta f_{max}|$如图 13 所示，随着改进自同步电压源控制策略中 K_P 值的增加，储能系统在(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)3 段频率波动区间内的最大频率波动量$|\Delta f_{max}|$均呈现出明显的下降态势。由此可见，经改进后的自同步电压源控制策略可有效削减光储黑启动电源构建过程中储能系统的频率波动程度，从而为光伏单元的顺利启动营造更为稳定的频率环境，提供更为可靠的频率支撑作用，进而有力地提升光储黑启动电源整体的稳定性与可靠性，为光储黑启动电源在黑启动场景下的高效、稳定运行奠定了坚实基础。

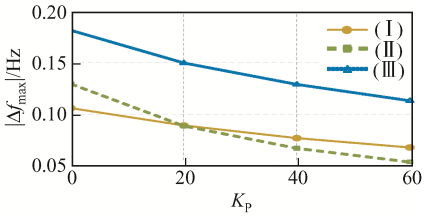


图 13　不同 K_P 参数下储能系统的频率波动量变化

Fig. 13 Changes in frequency fluctuation of energy storage system under different values of K_P

在光储黑启动电源构建过程中，不同 K_P 值下光伏单元的频率波动实验波形如图 14 所示，光伏单元与储能系统并联运行阶段(Ⅱ)、系统负荷突增阶段(Ⅲ)均存在一定的频率波动。

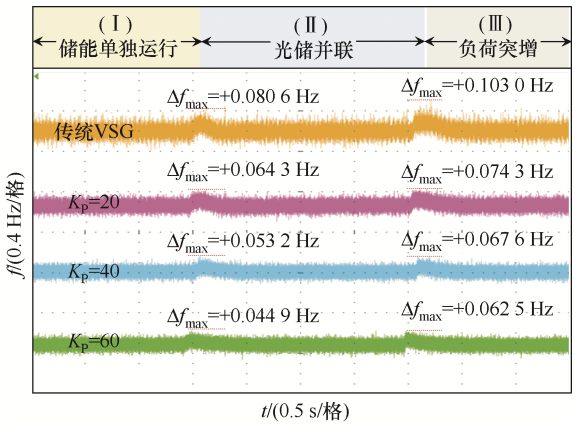


图 14　黑启动电源中光伏系统的频率响应实验波形

Fig. 14 Experimental waveforms of frequency response of PV system in black-start power supply

不同 K_P 下光伏单元的最大频率波动量$|\Delta f_{max}|$如图 15 所示，随着改进自同步电压源控制策略里新增参数 K_P 的逐步增大，光伏单元在(Ⅱ)、(Ⅲ)2 段频率波动区域的最大频率波动量$|\Delta f_{max}|$亦呈现出显著的下降走向。据此可以推断，经优化后的自同步电压源控制策略具备降低光储黑启动电源构建过程中光伏单元频率波动的能力，有效缓解了光伏

单元在启动后对储能系统产生的冲击效应，从而有力地促进了光储黑启动电源整体稳定性的提升，为光储黑启动电源在黑启动作业中的稳定运行与高效协同提供了坚实保障。

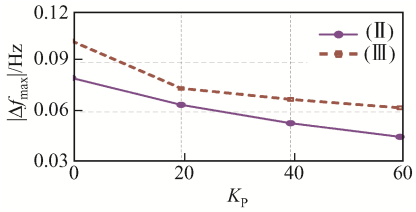


图 15 不同 K_P 参数下光伏单元的频率波动量变化

Fig. 15 Changes in frequency fluctuation of PV units under different values of K_P

以上实验结果验证了仿真分析的正确性及所提改进自同步电压源控制策略在提高光储黑启动电源频率稳定能力方面的有效性；通过对不同 K_P 值下的实验波形进行细致分析，能够精准评估该控制策略及参数对系统频率稳定性的作用效果，进而为后续进一步优化控制策略提供关键的实验依据与数据支撑，助力光储黑启动电源在黑启动应用场景下频率稳定性的持续提升与完善。有助于提升光储黑启动电源在复杂工况下的可靠性与适应性。

5 结论

自同步电压源型光储黑启动电源在构建过程中存在频率波动，可能导致黑启动过程失败，进而使电力系统持续处于停电状态。本文提出 1 种基于 VSG 的改进自同步电压源控制策略，从理论上阐明了该改进控制策略在提高光储黑启动电源稳定性方面的基本原理，并进行了仿真和实验验证，形成如下结论。

(1)在光储黑启动电源构建过程中，随着功率参考值变动及系统负荷突增，储能系统和光伏单元各自所承担的负荷量会发生相应改变，但二者在控制参数相同时依旧能够实现功率的平均分配。

(2)所提改进控制策略可有效减小光储黑启动电源在储能系统初始运行、光伏单元启动、系统负荷突增等不同阶段的频率波动幅度，提升了光储黑启动电源的稳定性。

(3)所提改进控制策略中的参数 K_P 与频率波动之间存在关联特性，随着参数 K_P 的增加，黑启动电源内部频率波动幅值呈现下降趋势。

未来，所提改进控制策略将进一步赋能新能源场站，实现电网故障后的快速响应，大幅提升新型电力系统的可持续性，为构建零碳电力系统提供核心支撑。

参考文献：

[1] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-169.
Xie Xiaorong, Ma Ningjia, Liu Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: Review and prospect [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-169. (in Chinese)

[2] 胡江. 主动限流在电力系统换流器故障诊断中的应用[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 283-289.
Hu Jiang. Application of active current limiting in fault diagnosis of converter in power system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 283-289. (in Chinese)

[3] Zhao Jinquan, Zhang Qiang, Liu Ziwen, et al. A distributed black-start optimization method for global transmission and distribution network [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4471-4481.

[4] 叶茂, 刘艳, 顾雪平, 等. 基于动态风电穿透功率极限的黑启动方案制定[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 744-752.
Ye Mao, Liu Yan, Gu Xueping, et al. Black start scheme formation considering dynamic wind power penetration limit [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 744-752. (in Chinese)

[5] 钟浩, 阮建雄, 王凌云. 考虑源荷依赖度的含分布式电源配电网黑启动策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 65-73.
Zhong Hao, Ruan Jianxiong, Wang Lingyun. Black-start strategy for distribution network with distributed generations considering source-load dependence [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 65-73. (in Chinese)

[6] Zhang Bei, Dehghanian P, Kezunovic M. Optimal allocation of PV generation and battery storage for enhanced resilience [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 535-545.

[7] 李军徽, 尤宏飞, 李翠萍, 等. 风光储支撑黑启动的可行性评估方法[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 30-38.
Li Junhui, You Hongfei, Li Cuiping, et al. Feasibility evaluation for PV-wind-battery system to be black-start power supply [J]. Electric Power Construction, 2020, 41 (9): 30-38. (in Chinese)

[8] Acevedo-Arenas C Y, Correcher A, Sánchez-Díaz C, et al. MPC for optimal dispatch of an AC-linked hybrid PV/wind/biomass/H_2 system incorporating demand response [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 186: 241-257.

[9] 李翠萍, 王艺茗, 李军徽, 等. 考虑可行性评估的光伏黑启动储能配置分析[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 104-112.
Li Cuiping, Wang Yiming, Li Junhui, et al. Analysis of photovoltaic black start energy storage configuration based on feasibility assessment [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 104-112. (in Chinese)

[10] 刘英培, 侯亚欣, 梁海平, 等. 一种适用于黑启动的光储联合发电系统协调控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2979-2986.
Liu Yingpei, Hou Yaxin, Liang Haiping, et al. A coordinated control strategy of PV battery-energy storage hybrid power system for black start [J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2979-2986. (in Chinese)

[11] 刘力卿, 杜平, 万玉良, 等. 储能型风电场作为局域电网黑启动电源的可行性探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 210-216.
Liu Liqing, Du Ping, Wan Yuliang, et al. Feasibility discussion on using storage-based wind farm as black-start power source in local power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 210-216. (in Chinese)

[12] 陈威. 储能风电场作为黑启动电源的控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
Chen Wei. Research on control strategy of energy storage wind farm as black start power source [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[13] 朱凌燕, 潘再平, 许国东. 采用改进虚拟同步控制的双馈型风电场黑启动方案[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 162-167.
Zhu Lingyan, Pan Zaiping, Xu Guodong. Black start scheme of DFIG-based wind farm adopting improved virtual synchronous control [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(4): 162-167. (in Chinese)

[14] 黄全全, 王伟, 邓小君, 等. 构网型光伏自同步电压源控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(4): 87-90.
Huang Quanquan, Wang Wei, Deng Xiaojun, et al. Research on the control strategies of grid-forming photovoltaic self-synchronizing voltage source [J]. Power Electronics, 2023, 57(4): 87-90. (in Chinese)

[15] Liu Ju, Yao Wei, Wen Jinyu, et al. Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of grid-connected DFIG wind farm [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 545-557.

[16] 胡文平, 杨少波, 郭力, 等. 多电平三相电压源逆变器结构优化设计[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 281-286.
Hu Wenping, Yang Shaobo, Guo Li, et al. Structural optimization design of multi-level three-phase voltage source inverter [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 281-286. (in Chinese)

[17] 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. (in Chinese)



杜博闻

作者简介：

杜博闻(2000—　)，男，硕士研究生。研究方向：新能源黑启动。E-mail：dubowensdut@163.com。

侯川川(1991—　)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，博士，助理研究员。研究方向：新能源并网技术。E-mail：chuanchuanhou@sjtu.edu.cn。

朱淼(1979—　)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：交直流混合系统，新能源并网控制。E-mail：miaozhu@sjtu.edu.cn。

杨心刚(1984—　)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源电力系统。E-mail：xingangyang@163.com。

叶舒(1986—　)，女，中国电源学会会员，博士，实验师。研究方向：电力电子变换器控制策略及可靠性。E-mail：shuye@sjtu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)