DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.116 **中图分类号**：TM615 **文献标志码**：A

大规模光伏基地柔直外送系统送端故障恢复后光伏逆变器直流侧电压跌落机理分析

沈枢昊[1]，钟 庆[1](中国电源学会会员)，冯俊杰[2,3]，李海锋[1]，汪隆君[1]，王 钢[1]
(1.华南理工大学电力学院，广州 510641；2.直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院)，广州 510663；3.强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学)，武汉 430074)

摘要：大规模光伏基地柔直外送系统范围广，电气距离长，送端短路故障恢复后，光伏逆变器直流侧会出现电压跌落现象，该现象是新型电力系统面临的1种新的电能质量问题。针对该问题，首先分析光伏阵列输出功率与逆变器输出功率间平衡状态对逆变器直流侧电压的影响，主要考虑了光伏阵列的电压功率特性和逆变器在不同控制策略下的输出功率特性；然后根据光伏阵列运行点位置和光伏逆变器的控制策略，构建了逆变器的4种运行工况，并分别分析了不同工况下逆变器直流侧电压的演化特性，从而分析得出系统故障恢复过程中，逆变器功率不平衡导致的光伏阵列运行点变化与逆变器控制策略切换是造成逆变器直流侧电压跌落的根本原因；最后通过仿真验证了机理分析的正确性。

关键词：电能质量；直流侧电压跌落；大规模光伏基地；柔直外送系统

Mechanism Analysis of DC-side Voltage Dip of PV Inverters After Fault Recovery at Sending End of Large-scale PV Base Transmission via VSC-HVDC

SHEN Shuhao[1], ZHONG Qing[1], *Member, CPSS*, FENG Junjie[2,3], LI Haifeng[1], WANG Longjun[1], WANG Gang[1]
(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: There are extensive ranges and long electrical distances in the sending-end system of the large-scale photovoltaic (PV) base transmission by VSC-HVDC. A voltage dip will occur on the DC side of PV inverters after the short-circuit fault recovery at the sending-end, which is a new power quality problem the new power system faces. Aimed at this issue, the impact of the balance between output powers from PV arrays and inverters on the DC-side voltage is analyzed at first, and the voltage-power characteristics of PV arrays and the output power characteristics of inverters under different control strategies are mainly taken into consideration. Second, four kinds of operating conditions for inverters are formulated according to the operating point of PV arrays and the control strategies for PV inverters, and the evolution characteristics of DC-side voltage of inverters under each operating condition are also analyzed. It is revealed the mechanism is combined effects of movements of the operation point of PV arrays and the changes of control strategies of the inverter because of the power imbalance during the fault recovery. Finally, simulations are performed, and results verify the correctness of the mechanism analysis.

Keywords: Power quality; DC-side voltage dip; large-scale photovoltaic (PV) base; VSC-HVDC transmission system

收稿日期：2024-11-20；**修回日期**：2025-01-09，2025-02-02；**录用日期**：2025-02-28；**网络首发日期**：2025-03-05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52077082)；南方电网公司科技资助项目(YNKJXM20222288)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52077082; the Science and Technical Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. under the grant YNKJXM20222288

为实现“双碳”战略目标，我国正在加速能源转型，逐步提高风能和太阳能等可再生能源的比重，构建新型电力系统[1-2]。大规模新能源基地经柔性直流送出至东部经济发达地区是解决我国发电资源与电力负荷中心地理分布不平衡的重要举措[3-4]。大规模光伏基地柔直外送系统具有新能源与电力电子占比高，送端交流系统范围广，电气距离长等特点[4-6]。受电力电子设备控制特性的影响，系统故障后的动态响应过程更加复杂，容易引发逆变器直流侧电压跌落现象。该现象是新型电力系统面临的 1 种新的电能质量问题，开展其机理研究对于构建新型电力系统具有重要意义。

目前针对光伏场站电压跌落问题的研究主要分为交流侧电压跌落问题和直流侧电压跌落问题。针对交流侧电压跌落问题，文献[7]基于光伏电源的拓扑结构和低电压穿越策略，利用光伏电源故障电流的理论，求解出电压跌落深度、控制参数和光伏负载水平等多个因素对光伏电源的影响；文献[8]分析了电压跌落幅值检测模块导致低电压穿越控制延时投入的机理，建立了考虑控制切换延时及电压检测影响的故障暂态分阶段的电流解析计算模型。为避免光伏逆变器在电压跌落时出现大面积脱网，GB/T 19964—2024《光伏发电站接入电力系统技术规定》[9]要求光伏电站在交流侧出现电压跌落时，必须具备低电压穿越能力。通过对光伏逆变器的低电压穿越方法进行改进，可以进一步满足不同场景下故障穿越需求[10-13]。然而在大规模光伏基地柔直送出系统场景下，送端交流系统地理范围广，光伏基地与送端柔直换流站之间的距离远，当故障发生在距离光伏基地较远的位置时，逆变器并网点电压并不会出现跌落现象。直流电压跌落问题作为直流系统中的 1 种新型电能质量问题，也是当下的研究热点之一。现有对于直流侧电压跌落的研究主要集中在直流配用电系统[14-15]和直流输电系统[16]，其更多关注的是由交直流系统故障引发的直流电压短时跌落现象。然而由于直流电压的变化反映了换流器交直流侧的有功功率平衡状态[17]，当系统中交直流两侧的功率失衡时，也会引发直流电压短时跌落的问题。通常情况下，交流系统故障恢复后，由于逆变器控制的动态响应，交直流侧也将出现有功功率的剧烈变化，引起直流电压的快速变化[18]。在大规模光伏基地柔性直流外送系统中，受逆变器控制特性及光伏阵列电压功率特性的影响，其故障恢复阶段可能会出现交直流两侧功率的不平衡，进而导致直流电压短时低于额定电压的问题，从而影响电力系统的安全稳定运行。这一现象属于新型电力系统构建过程中引发的新的电能质量问题，尚未引起广泛关注。

为此，本文以大规模光伏基地柔直外送系统为研究对象，对送端交流系统故障恢复后光伏逆变器直流侧电压跌落机理开展研究。首先研究了故障恢复过程中光伏阵列输出功率与逆变器输出功率不平衡对逆变器直流侧电压的影响，分别分析了光伏阵列在最大功率点两侧的电压功率特性和低电压穿越控制策略对光伏逆变器输出功率特性的影响。然后基于上述分析，研究了光伏阵列运行点位置和逆变器是否进入低电压穿越状态 2 个因素共同构成的 4 种运行工况下，逆变器直流侧电压在功率不平衡状态下的演化特性，重点分析了光伏阵列运行点在最大功率点左侧且逆变器进入低电压穿越状态工况下，逆变器直流侧电压跌落的问题，从而全面揭示了送端系统故障恢复后光伏逆变器直流侧电压跌落的机理。最后基于 PSCAD/EMTDC 开展大规模光伏基地柔直送出系统的电磁暂态仿真实验，验证了机理分析的正确性。

1　光伏逆变器功率平衡及其对直流侧电压的影响

1.1　光伏阵列的电压功率特性

光伏阵列工作时，其端口电压 u_{pv} 和电流 i_{pv} 存在非线性关系[19]，电流与电压满足

$$i_{\mathrm{pv}}=i_{\mathrm{g}}-i_0\left[\mathrm{e}^{\frac{u_{\mathrm{pv}}+i_{\mathrm{pv}}R_{\mathrm{sr}}}{nkT_{\mathrm{c}}/q}}-1\right]-\left(\frac{u_{\mathrm{pv}}+i_{\mathrm{pv}}R_{\mathrm{sr}}}{R_{\mathrm{sh}}}\right)\tag{1}$$

式中：i_g 为光电流，其与太阳辐照强度以及温度有关；i_0 为二极管的反向饱和电流；R_{sh} 和 R_{sr} 为光伏发电过程的损耗；n 为二极管的理想因子；k 为玻尔兹曼常数(Boltzmann constant)；T_c 为光伏模块的工作温度；q 为电子电荷。

根据光伏阵列输出的电压电流关系，可得光伏阵列输出功率 P_{pv} 的计算式为

$$P_{pv}=u_{pv}i_{pv} \tag{2}$$

由此可以得到光伏阵列端电压及输出功率之间的关系曲线如图 1 所示。图中：M 点为光伏阵列的最大功率点；u_{mpp} 为最大功率点对应的直流电压；P_{max} 为光伏阵列所能发出的最大功率。当光伏阵列运行在最大功率点左侧时，光伏阵列输出的有功功率随着端口电压的增大而增大，两者呈正比关系；当光伏阵列运行在最大功率点右侧时，光伏阵列输出的有功功率随着端口电压的增大而减小，两者呈反比关系。通常情况下，在光伏逆变器最大功率跟踪模块及定直流电压控制策略控制下，光伏阵列运行在最大功率点附近。

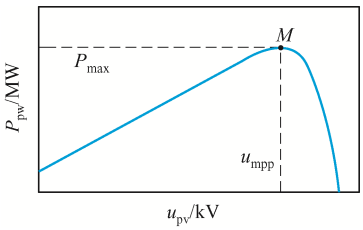


图 1 光伏阵列端电压与输出功率的关系曲线

Fig. 1 Curve of relationship between terminal voltage and output power of photovoltaic array

1.2 光伏逆变器输出功率特性

光伏逆变器正常运行时采用以直流电压和无功功率为控制目标的双闭环控制，实现有功功率和无功功率的解耦控制，其控制框图如图 2 所示。图中：MMPT 为最大功率跟踪模块；u_{dcref} 和 u_{dc} 分别为直流电压的参考值和实际值；Q_{ref} 和 Q 分别为无功功率参考值和实际值；i_{dref}、i_{qref} 和 i_d、i_q 分别为 d、q 轴电流的参考值和实际值；u_{dref}、u_{qref} 和 u_d、u_q 分别为换流站 d、q 轴电压的参考值和实际值；L 为逆变器的滤波电感；ω 为角频率。

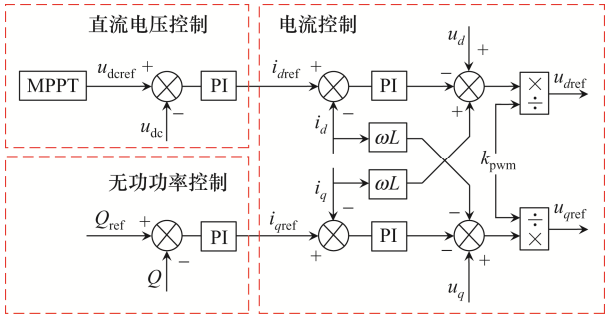


图 2 光伏逆变器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of photovoltaic inverter

逆变器通常利用锁相环将系统正序电压定向于 d 轴[20]，根据瞬时功率理论，光伏逆变器交流侧输出有功功率 P_g 为

$$P_g=\frac{3}{2}(u_di_d+u_qi_q)=\frac{3}{2}u_gi_d \tag{3}$$

式中：u_d 和 u_q 分别为逆变器并网点 d 轴和 q 轴电压分量；i_d 和 i_q 分别为逆变器输出电流的 d 轴和 q 轴分量；u_g 为光伏逆变器并网点电压标幺值。

当并网点电压跌落至标准规定阈值以下时，逆变器将切换成定电流控制，光伏逆变器根据电压跌落程度向系统注入动态无功电流。根据 GB/T 19964—2024《光伏发电站接入电力系统技术规定》[9]要求，光伏电站向电网注入的无功电流应为电压跌落前正常运行时的无功电流输出值 I_{qref} 与动态无功电流增量 ΔI_{qref} 之和，与并网点电压满足

$$\begin{cases}\Delta I_{qref}\geqslant 1.5\cdot(0.9-u_g)I_N & 0.2<u_g\leqslant 0.9\\ \Delta I_{qref}\geqslant 1.05I_N & u_g\leqslant 0.2\\ \Delta I_{qref}=0 & u_g>0.9\end{cases} \tag{4}$$

式中，I_N 为额定电流。故障期间由于光伏逆变器的过流能力有限，其有功电流值由其最大电流允许值与无功电流大小决定。最大有功电流允许值为

$$I_{drefmax}=\sqrt{I_{max}^2-I_{qref}^2} \tag{5}$$

式中，I_{max} 为光伏逆变器最大电流限制。因此低电压穿越期间有功电流参考值为

$$I_{dref}=\min(I_{dref1},I_{drefmax}) \tag{6}$$

式中，I_{dref1} 为故障前有功电流参考值。

当逆变器并网点电压保持在规定阈值以上时，其控制为定直流电压控制及定无功功率控制。通常

情况下，无功功率参考值 $Q_{\mathrm{ref}}=0$，此时逆变器优先输送有功，而送出的有功功率大小由逆变器定直流电压控制决定。在最大功率跟踪模块控制下，逆变器能根据直流电压的大小，不断调整有功电流 i_d 的给定值，从而调整逆变器输出的有功功率。而当逆变器进入低电压穿越状态时，逆变器则需要根据并网点电压跌落程度优先向系统中注入相应的无功功率，逆变器输出的有功功率受逆变器额定容量及输出无功功率的约束，始终小于光伏阵列所能发出的最大有功功率。在这种情况下，一旦光伏阵列运行点偏离最大功率点，就无法在控制的调节下重新恢复至最大功率点运行。

1.3 光伏逆变器功率平衡状态对直流侧电压的影响

光伏发电单元结构一般分为集中式和组串式，集中式光伏适用于大规模光伏电站，具有系统成本低且电网接入友好的优势[6]，因此本文以集中式光伏发电单元作为研究对象。集中式光伏发电单元由光伏阵列、直流侧电容、逆变器、采样环节及控制部分等组成，其结构如图 3 所示。图中：U_{dc} 为逆变器直流侧电压；P_{g} 为交流侧输出功率；u_{g} 为逆变器交流侧出口电压；i_{g} 为逆变器交流侧电流。

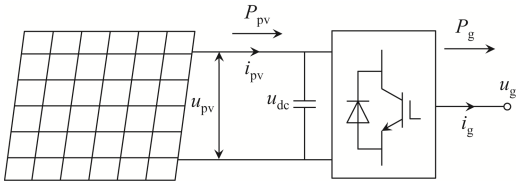


图 3　光伏发电单元简化结构

Fig. 3 Simplified structure of photovoltaic power generation unit

光伏逆变器正常运行时，忽略逆变器的功率损耗，其交流侧输出功率等于直流侧发出功率。但在故障发生后，由于功率不平衡将导致直流侧电压发生变化，直流侧电压与光伏阵列发出功率及逆变器输出功率之间的关系可表示为

$$CU_{\mathrm{dc}}\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{pv}}-P_{\mathrm{g}} \tag{7}$$

式中，C 为直流侧电容。

由式(7)可知，光伏逆变器直流侧电压水平由功率平衡状态决定。当交直流两侧功率保持平衡，直流侧电压保持不变。当光伏逆变器输出功率大于光伏阵列发出功率时，光伏逆变器直流侧电压将下降；当光伏逆变器输出功率小于光伏阵列发出功率时，光伏逆变器直流侧电压将上升。光伏逆变器直流侧电压变化与光伏阵列的电压功率特性和光伏逆变器的输出功率特性密切相关。

2　光伏逆变器直流侧电压跌落机理分析

通过对光伏阵列的电压功率特性分析及光伏逆变器输出功率特性分析，可以得出光伏阵列运行点的位置和光伏逆变器是否进入低电压穿越这 2 个因素会对逆变器交直流两侧的功率平衡状态产生影响，进而影响逆变器的直流侧电压。根据光伏阵列的运行点在最大功率点左侧还是右侧及逆变器是否进入低电压穿越状态组合可以将系统运行工况分为 4 种：工况①，光伏阵列运行在最大功率点的右侧且逆变器保持定直流电压控制；工况②，光伏阵列运行在最大功率点的左侧且逆变器保持定直流电压控制；工况③，光伏阵列运行在最大功率点的右侧且逆变器进入低电压穿越状态；工况④，光伏阵列运行在最大功率点的左侧且逆变器进入低电压穿越状态。不同工况对于逆变器直流侧电压的影响不同，以上 4 种工况下直流电压的变化情况如图 4 所示。

系统正常稳态运行时，如图 4(a)所示，光伏阵列运行点处于最大功率点，交直流两侧功率保持平衡，逆变器输出的有功功率 P_{g} 等于光伏阵列的最大功率 P_{max}，直流侧电压保持不变。

当逆变器输出的有功功率减小时，如图4(b)所示，由于直流侧电压无法突变，因此光伏阵列输出的有功功率在很短的时间内将保持不变，交直流侧出现功率不平衡，光伏阵列发出的有功功率与光伏逆变器输出的有功功率之间的差额转移至直流侧电容，电容充电，直流电压上升。随着直流侧电压的升高，光伏阵列运行点将会向最大功率点的右侧移动，光伏阵列发出的有功功率随之降低，交直

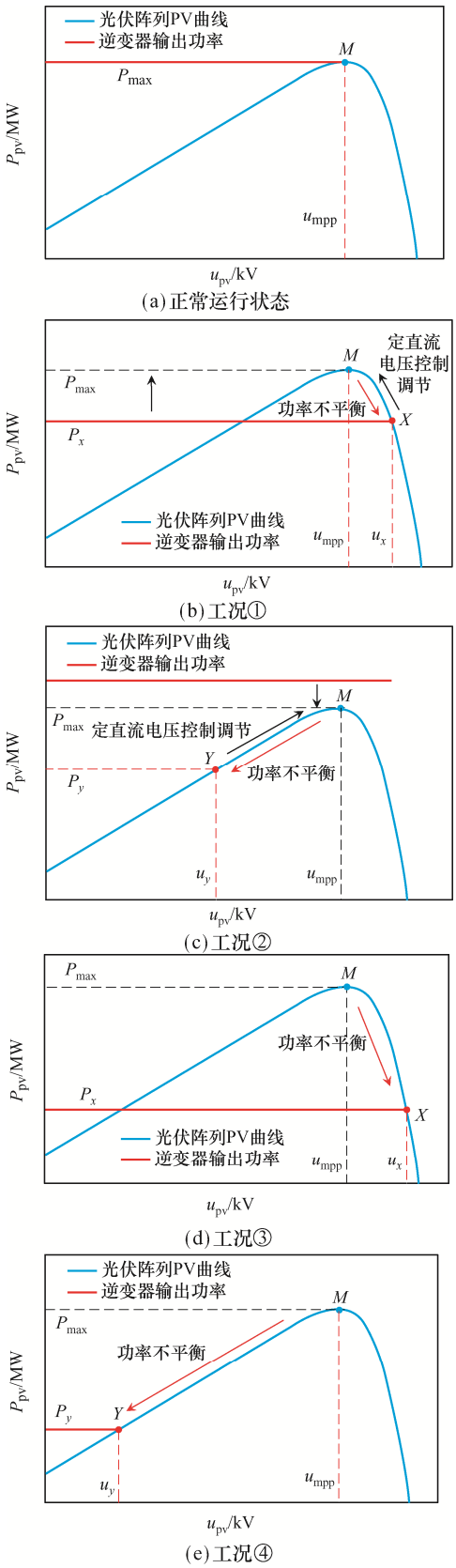


图 4 不同工况下的直流电压变化

Fig. 4 Variation in DC voltage under different operating conditions

流两侧功率重新平衡，由于逆变器采用定直流电压控制，光伏逆变器运行在工况①，此时直流电压外环将会增加逆变器输出的有功功率，并在 MPPT 的作用下，光伏阵列重新运行在最大功率点，交直流侧功率恢复平衡状态，直流电压随之恢复。

当逆变器输出的有功功率增大时，如图 4(c)所示，逆变器输出的有功功率将大于光伏阵列所能输出的最大功率，交直流两侧出现功率不平衡，此时逆变器输出的有功功率与光伏阵列发出的有功功率之间的差额将由直流侧电容提供，直流侧电容存储的能量将会释放，直流侧电压下降，导致光伏阵列的运行点向最大功率点的左侧移动。由于逆变器采用定直流电压控制，系统处于工况②，此时直流电压外环将会降低逆变器输出的有功功率，并在 MPPT 的作用下，光伏阵列重新运行在最大功率点，交直流侧功率恢复平衡状态，直流电压也随之恢复。

对于工况①和工况②，当逆变器保持定直流电压控制时，无论光伏阵列运行在最大功率点的哪一侧，直流侧电压始终能在最大功率跟踪模块和定直流电压控制的作用下，通过控制系统调节输出的有功功率恢复至最大功率点对应的参考电压值。

当逆变器输出的有功功率小于光伏阵列发出的有功功率时，如图 4(d)所示，光伏阵列运行点向最大功率点的右侧移动，若此时光伏逆变器进入低电压穿越状态，逆变器将处于工况③，尽管直流侧电压无法在逆变器控制的调节下恢复至最大功率点对应的电压值，但由于低电压穿越状态下，逆变器优先输出无功功率，逆变器输出的有功功率始终小于光伏阵列所能发出的最大有功功率，直流侧电容不会放电，因此光伏阵列的运行点也将始终保持在最大功率点的右侧，直流侧电压会略偏高。

当逆变器输出的有功功率大于光伏阵列发出的有功功率时，如图 4(e)所示，直流侧电压由于电容放电而降低，光伏阵列运行点向最大功率点的左侧移动，此时光伏阵列发出的有功功率随着直流侧电压的下降而减小，功率不平衡加剧，直流侧电压持续下降。若此时光伏逆变器进入低电压穿越状

态，光伏逆变器将运行在工况④。由于低电压穿越状态下，直流侧电压不再受定直流电压控制的调节，将无法恢复至最大功率点，因此此时由于低电压状态下逆变器输出的有功功率减少，逆变器两侧功率将处于动态平衡状态，直流侧电压持续维持在一个较低水平。直到低电压穿越控制退出后，逆变器恢复定直流电压控制，系统运行进入到工况②，逆变器直流侧电压才能在控制器调节作用下，恢复到给定值。

综上，光伏逆变器直流侧电压跌落现象的产生机理如下。故障发生及恢复后逆变器交直流两侧将处于功率不平衡状态，由式(7)可知直流侧电压将出现变化，在这种状态下，若光伏阵列运行点的变化和逆变器控制策略的切换导致光伏逆变器运行于工况④，逆变器将出现直流侧电压跌落现象。

3　仿真验证

本文基于某地区大规模光伏基地柔直外送工程前期规划方案[21]，建立了大规模光伏基地柔直送出系统的 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真模型，其结构如图 5 所示。在该系统中送端光伏汇集系统包括了 5 个容量约 3 000~4 000 MW 的 500 kV 光伏基地：PV1，PV2，PV3，PV4，PV5。其中 PV1 和 PV2 与送端柔直换流站的电气距离最大，PV4 与送端柔直换流站的电气距离最小。送端柔直换流站采用构网控制，光伏逆变器采用跟网型控制。

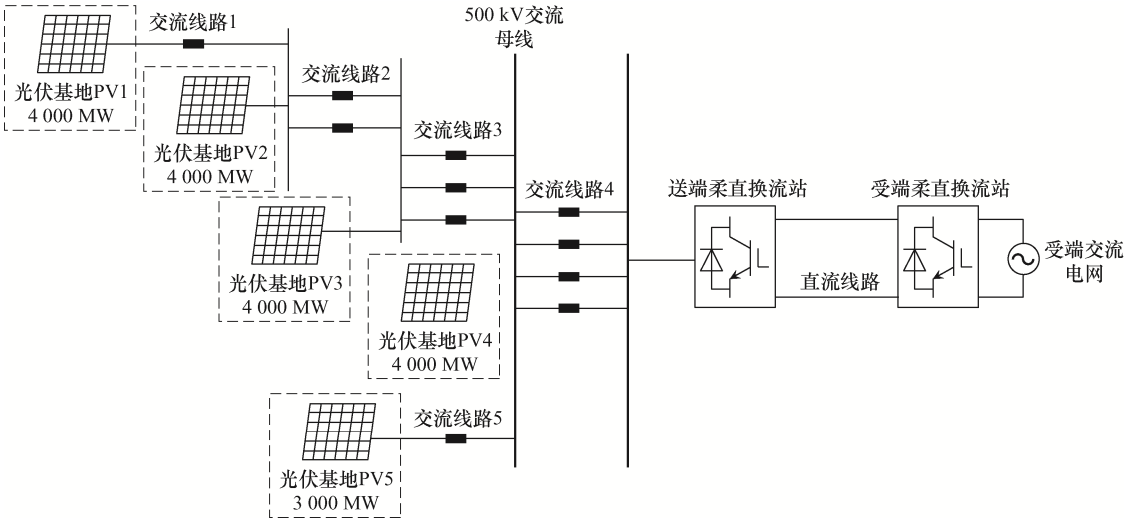


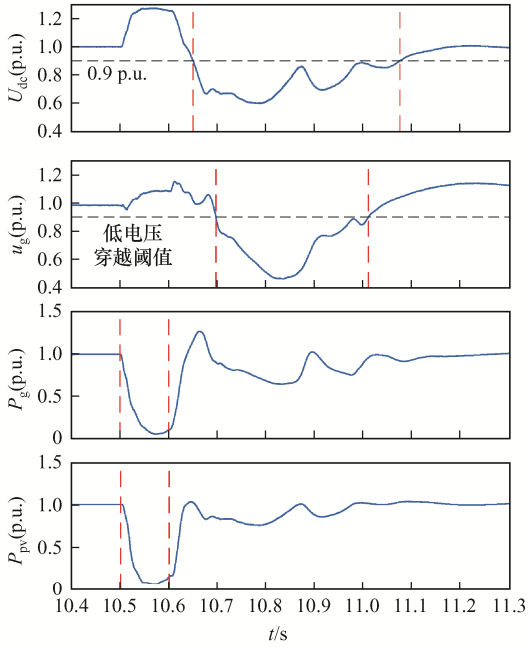
图 5　大规模光伏基地柔直外送系统示意

Fig. 5 Schematic of VSC-HVDC transmission system for large-scale photovoltaic bases

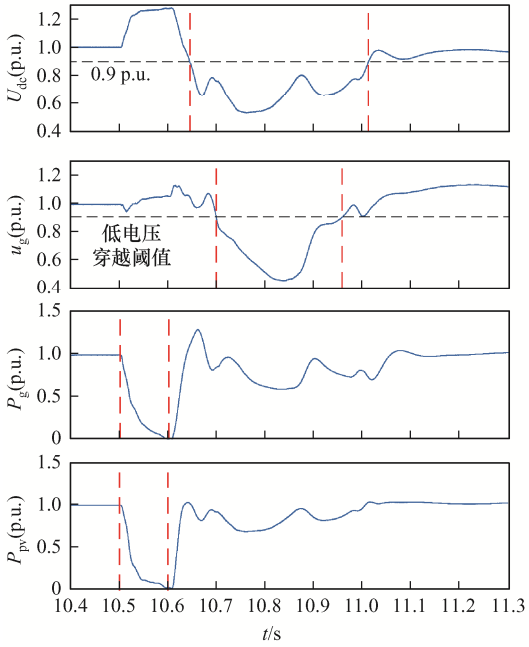
在送端换流站交流母线设置三相金属性短路故障，故障开始时间为 10.5 s，持续时间为 0.1 s。故障恢复后，PV1 和 PV2 的光伏逆变器直流侧电压出现跌落现象，直流侧电压最小值分别为 0.60 p.u. 和 0.53 p.u.，并且无法在短时间内迅速恢复，而其余 3 个光伏基地光伏逆变器直流侧电压未出现跌落现象。PV1、PV2 和 PV4 的逆变器交直流侧电压、逆变器输出功率及光伏阵列发出功率的波形如图 6 所示，光伏阵列运行点如图 7 所示。

以 PV1、PV2 运行工况的变化及直流侧电压跌落情况和 PV4 为例说明光伏逆变器直流侧未发生电压跌落的情况，验证跌落机理分析的正确性。送端交流系统故障期间，各光伏逆变器功率无法输出，出现了功率不平衡状态，光伏逆变器输出功率小于光伏阵列发出功率，直流侧电压均上升，光伏阵列运行点向最大功率点的右侧移动，以减少光伏阵列输出功率，维持功率平衡。由于 PV1 和 PV2 距离故障电气距离较大，PV1 和 PV2 的交流侧电压始终保持大于规定阈值，未进入低电压穿越状态，因此故障期间，PV1 和 PV2 均运行在工况①。故障消失后，由于 PV1 和 PV2 逆变器直流侧电压高于给定值，将在控制下产生较大的有功电流 i_d，

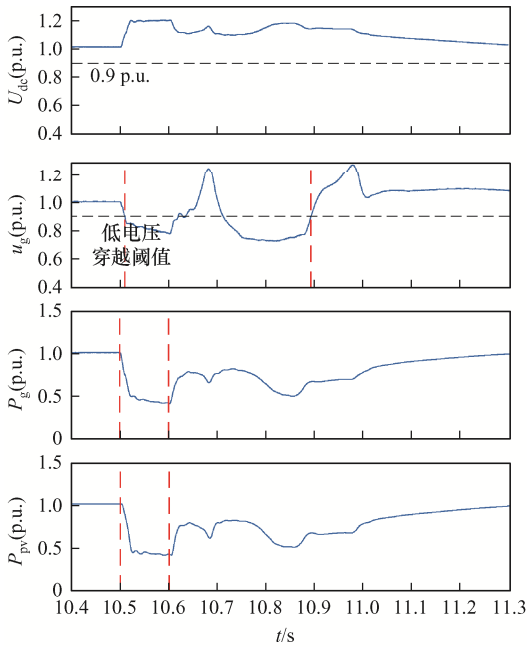
PV1 和 PV2 逆变器输出有功功率迅速升高，大于光伏阵列输出的功率，导致直流侧电容持续放电，直流侧电压持续下降。当光伏逆变器输出功率超过光伏阵列的最大功率值时，光伏阵列运行点向最大功率点的左侧移动，从而进入工况②。之后，受直流侧电压下降的影响，PV1 和 PV2 的逆变器交流侧电压下降，并小于低电压穿越的阈值，使得逆变器进入低电压穿越状态，PV1 和 PV2 进入工况④，直流侧电压维持较低水平。当交流侧电压恢复至低



(a) 光伏基地PV1



(b) 光伏基地PV2

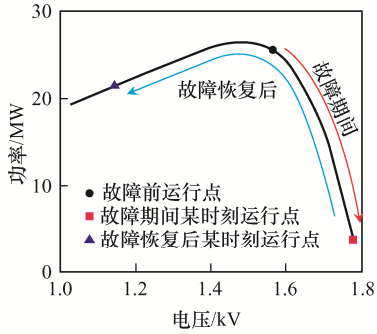


(c) 光伏基地PV4

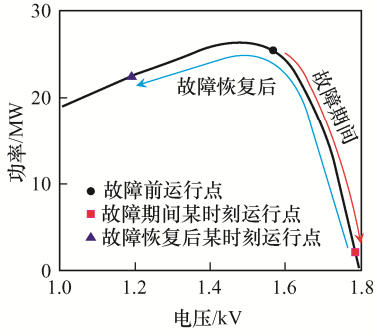
图 6 PV1、PV2 和 PV4 仿真结果

Fig. 6 Simulation results of PV1, PV2 and PV4

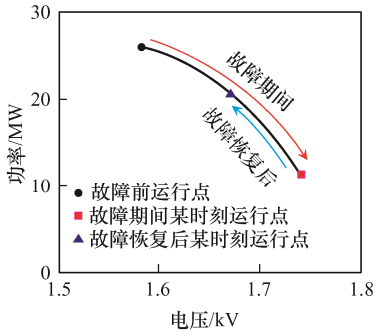
电压穿越的阈值，低电压穿越状态退出，PV1 和 PV2 重新恢复定直流电压控制，直流侧电压逐渐恢复。PV4 距离故障点电气距离较近，因此交流侧电压会下降至规定阈值以下，从而进入低电压穿越状态，此时逆变器直流侧电压较高，光伏阵列运行点



(a) 光伏基地PV1



(b) 光伏基地PV2



(c) 光伏基地PV4

图 7　PV1、PV2 和 PV4 的电压功率曲线及运行点变化

Fig. 7 Voltage-power curves for PV1, PV2 and PV4, and variation in operating point

位于最大功率点的右侧，因此 PV4 运行于工况③直流侧电压会维持在一个较高水平，不会出现直流侧电压跌落问题。

综上，仿真结果与分析一致，验证了本文机理分析的正确性。在送端交流系统故障恢复后，PV1 和 PV2 由于有功功率迅速恢复并超过光伏阵列所发出的最大功率，直流侧电容放电，直流电压下降至满足使光伏阵列运行点移至最大功率点左侧和使交流侧电压小于规定阈值 2 个条件时，运行工况将由工况①切换为工况②，并最终进入了工况④，从而导致光伏逆变器直流侧电压在送端交流系统故障恢复后产生跌落现象。

4　结论

针对大规模光伏基地柔直送出系统故障恢复后光伏逆变器的直流电压跌落问题，本文从光伏阵列电压功率特性及逆变器不同控制状态下的输出功率特性出发，基于功率平衡原则研究了光伏阵列运行点位置及逆变器是否进入低电压穿越 2 个因素对直流侧电压的影响，揭示了直流侧电压跌落的机理，并通过仿真实验验证了分析的正确性。主要结论如下。

(1)送端交流系统故障恢复后，由于光伏阵列运行点的改变及逆变器控制模式的切换，将会造成直流侧电压跌落现象，其原因为：当光伏逆变器输出的有功功率大于光伏阵列发出的有功功率时，直流侧电压由于电容放电而降低，光伏阵列运行点移至最大功率点的左侧，若此时光伏逆变器切换为低电压穿越控制，将使光伏逆变器直流侧电压维持在一个较低水平，产生直流侧电压跌落现象。

(2)直流侧电压跌落现象一般发生在距离故障点电气距离较远的光伏逆变器中，而距离故障点电气距离较近的光伏逆变器由于受交流电压跌落的影响，在故障期间会进入低电压穿越状态，因此不会在故障恢复后出现直流侧电压跌落的问题。

本文只对故障恢复后光伏逆变器直流侧电压跌落机理进行了研究，后续研究将针对跌落原因和仿真结果进行分析，从限制故障恢复后光伏逆变器有功功率恢复速度的角度出发，改进光伏逆变器的低电压穿越策略，从而避免光伏逆变器进入工况④，达到解决故障恢复后的直流侧电压跌落问题的目的。

参考文献：

[1] 辛保安，郭铭群，王绍武，等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化，2021, 45(22): 1-8.
Xin Baoan, Guo Mingqun, Wang Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8. (in Chinese)

[2] 蔡希鹏，黄伟煌，李桂源，等. 大规模光伏集群经柔性直流构网送出的运行控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8734-8745.
Cai Xipeng, Huang Weihuang, Li Guiyuan, et al. Research on operation control strategy of large-scale photovoltaic cluster transmission via grid-forming VSC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8734-8745. (in Chinese)

[3] Wang Weisheng, Li Guanghui, Guo Jianbo. Large-scale renewable energy transmission by HVDC: Challenges and proposals [J]. Engineering, 2022, 19: 252-267.

[4] Sun Jian, Li Mingjie, Zhang Zhigang, et al. Renewable energy transmission by HVDC across the continent: System challenges and opportunities [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 353-364.

[5] 张哲任, 徐政, 黄莹, 等. 藏东南光伏基地全直流汇集送出方案及其控制策略研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(6): 23-32.
Zhang Zheren, Xu Zheng, Huang Ying, et al. Research on the full DC collection and transmission scheme for the photovoltaic base in Southeast Tibet and its control strategy [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(6): 23-32. (in Chinese)

[6] 黄碧月, 辛清明, 赵晓斌, 等. 大规模光伏电站孤岛经柔性直流送出的电压特性[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 3-13.
Huang Biyue, Xin Qingming, Zhao Xiaobin, et al. Voltage characteristics of large-scale islanded PV station transmission via VSC-HVDC [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 3-13. (in Chinese)

[7] 徐可寒, 张哲, 刘慧媛, 等. 光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 359-371.
Xu Kehan, Zhang Zhe, Liu Huiyuan, et al. Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 359-371. (in Chinese)

[8] 郑涛, 陈颖, 李紫肖, 等. 计及控制切换延时及电压跌落检测影响的逆变型新能源电源故障暂态电流解析计算[J/OL]. 高电压技术, 1-12. (2024-05-30)[2025-02-02]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GDYJ2024052800C&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
Zheng Tao, Chen Ying, Li Zixiao, et al. Analytical calculation of fault transient current of inverter new energy source considering the influence of control switching delay and voltage drop detection [J/OL]. China Industrial Economics, 1-12. (2024-05-30)[2025-02-02]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GDYJ2024052800C&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ. (in Chinese)

[9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2024 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
National Standardization Administration, State Administration for Market Regulation. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2024 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024. (in Chinese)

[10] Yu Jialin, Zhong Weidong, Wu Qinfang, et al. Research on low voltage ride through control strategy of grid-connected photovoltaic power generation system [C]// 2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE). Chengdu, China, 2023: 2362-2366.

[11] 彭星, 姜飞, 涂春鸣, 等. 不对称故障下光伏逆变器的最优电压支撑策略[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4259-4268.
Peng Xing, Jiang Fei, Tu Chunming, et al. Optimal voltage support strategy for photovoltaic inverters under asymmetric faults [J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4259-4268. (in Chinese)

[12] 李红, 粟时平, 唐铭泽, 等. 不对称故障下考虑电压跌落程度的新能源逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 21-32.
Li Hong, Su Shiping, Tang Mingze, et al. Control strategy of renewable energy inverter considering voltage sag degree under asymmetric faults [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 21-32. (in Chinese)

[13] 陈璐, 张溪, 党晓圆, 等. 采用新型模型预测的光伏虚拟同步机低电压穿越控制[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 163-172.
Chen Lu, Zhang Xi, Dang Xiaoyuan, et al. Low-voltage ride-through control of photovoltaic virtual synchronous generator using novel model prediction [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 163-172. (in Chinese)

[14] 张祥宇, 薛炎, 付媛. 基于电压跌落安全需求的直流微电网多端协同支撑技术[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(10): 107-115.
Zhang Xiangyu, Xue Yan, Fu Yuan. Multi-terminal cooperative support technology for DC microgrid based on voltage drop safety demand [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(10): 107-115. (in Chinese)

[15] 曹善康, 魏繁荣, 林湘宁, 等. 网侧电压跌落下计及无功支撑效能的直流微电网多目标优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5759-5772.
Cao Shankang, Wei Fanrong, Lin Xiangning, et al. Multi-objective optimization strategy of DC microgrid based on reactive power support efficiency during voltage sag [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5759-5772. (in Chinese)

[16] 马文轩, 李斌, 王一振, 等. 受端混联型 LCC-MMC 直流输电系统的自适应电压协调控制方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4518-4527.
Ma Wenxuan, Li Bin, Wang Yizhen, et al. Adaptive voltage coordinated control method of receiving end hybrid LCC-MMC HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4518-4527. (in Chinese)

[17] 张野, 李凌, 杨子千, 等. 大规模光伏经柔性直流送出系统交流侧故障穿越特性分析及参数优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 14-25, 92.
Zhang Ye, Li Ling, Yang Ziqian, et al. AC fault ride-through characteristics analysis and parameters optimization of large-scale photovoltaic power transmission system via VSC-HVDC [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 14-25, 92. (in Chinese)

[18] 贾焦心, 杨添淇, 邓晓洋, 等. 故障穿越期间光伏机组直流电压动态响应机理及改进方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6): 2230-2242.
Jia Jiaoxin, Yang Tianqi, Deng Xiaoyang, et al. Influence mechanism of voltage dynamics of photovoltaic DC bus during fault ride-through and its improve strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2230-2242. (in Chinese)

[19] 刘聘凭，程若发，许立斌，等. 基于光伏 MPPT 采样电流的自适应变步长 INC 算法[J]. 电源学报，2023, 21(5): 58-66.
Liu Pinping, Cheng Ruofa, Xu Libin, et al. Adaptive variable-step INC algorithm based on PV MPPT sampling current [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 58-66. (in Chinese)

[20] 张楠, 徐政, 张哲任. LCC-FHMMC 混合直流输电系统受端交流系统故障穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 39-45, 53.
Zhang Nan, Xu Zheng, Zhang Zheren. Receiving-end AC system fault ride-through control strategy of LCC-FHMMC hybrid HVDC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 39-45, 53. (in Chinese)

[11] 冯俊杰, 辛清明, 赵晓斌, 等. 大规模新能源超远距离送出的柔性直流系统集成设计方案[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 34-44.
Feng Junjie, Xin Qingming, Zhao Xiaobin, et al. Integrated design scheme of VSC-HVDC system for large-scale renewable energy ultra-long-distance transmission [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 34-44. (in Chinese)



沈枢昊

作者简介：

沈枢昊(2000—　)，男，硕士研究生。研究方向：电能质量分析与控制。E-mail：1494795180@qq.com。

钟庆(1978—　)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电能质量分析与控制。E-mail：epqzhong@scut.edu.cn。

冯俊杰(1994—　)，男，博士研究生，工程师。研究方向：柔性直流输电技术。E-mail：feng_jj@foxmail.com。

李海锋(1976—　)，男，博士，教授。研究方向：电力系统故障分析与继电保护。E-mail：lihf@scut.edu.cn。

汪隆君(1982—　)，男，博士，讲师。研究方向：电力系统可靠性与规划。E-mail：epwlj@scut.edu.cn。

王钢(1966—　)，男，博士，教授。研究方向：电力系统保护，控制与自动化。E-mail：wangg@scut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)