

DOI: 10.7667/PSPC151316

# 级联式光伏电站直流并网拓扑及其控制策略

罗宇强<sup>1,2</sup>, 谭建成<sup>1</sup>, 董国庆<sup>3</sup>

(1. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西水利电力职业技术学院, 广西 南宁 530004;  
3. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为解决光伏电站远距离输送并网问题, 同时提高光伏电站并网系统稳定性, 将光伏电站与电压源型高压直流(Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)输电系统相结合, 设计了一种光伏电站通过级联直流变换器经 VSC-HVDC 输电线路并网拓扑方案。研究了光伏发电模块均压特性, 分析了光伏发电模块控制策略和 VSC 换流站直流电压控制策略, 提出了改进的直流电压-功率偏差斜率控制策略。在 PSCAD/EMDTC 电磁暂态软件下进行了不同光照强度仿真分析。仿真结果验证了系统可行性, 表明了所提出控制策略有效保持光伏电站系统电压稳定性。

**关键词:** 光伏电站; 电压源型高压直流输电系统; 直流并网; 直流电压偏差; 直流电压斜率

## Topology of direct-current connecting cascaded photo-voltaic power station to power grid and its control strategy

LUO Yuqiang<sup>1,2</sup>, TAN Jiancheng<sup>1</sup>, DONG Guoqing<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;  
2. Guangxi College of Water Resources and Electric Power, Nanning 530004, China;  
3. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan NARI, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to solve long-distance integration of photovoltaic (PV) power station to power grid, and improve the system stability of grid-connected PV power station, the PV power station is integrated with voltage source converter high voltage direct current (VSC-HVDC) system, a topology of direct-current connecting cascaded photovoltaic power station to power grid via VSC-HVDC system is proposed. The voltage characteristics of PV module and the control strategy for PV module and DC voltage control strategy for VSC station are analyzed, thus, an improved control strategy of DC voltage margin & droop is put forward. The system and proposed control strategy are simulated under PSCAD/EMDTC electromagnetic transient software by different irradiation conditions. Simulation results show the feasibility of the system, indicating that the proposed control strategy can effectively maintain the system voltage stability of PV power station.

**Key words:** photovoltaic station; voltage source converter high voltage direct current (VSC-HVDC); DC integration; DC voltage margin; DC voltage droop

## 0 引言

随着能源危机问题日益严重, 对太阳能、风能等新能源的开发与利用越来越受到各国的重视, 在新能源研发上的投入逐渐加大, 目前我国在政策上仍对太阳能光伏电站保持鼓励推动建设趋势, 各地集中型和分布式光伏电站不断建立起来<sup>[1]</sup>。对于集中型光伏电站而言, 其选址通常在人迹罕至之地, 尤以西北偏远地区为集中型光伏电站开发区, 然而, 本地负荷并不能消纳大规模光伏电站集中建设, 光

伏电站往往需通过远距离输送至负荷中心消纳。而大规模光伏电站接入电网, 因其不同的特性对电网的运行与规划产生影响<sup>[2-3]</sup>。

高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)技术的发展与应用, 尤其是电压源型高压直流(Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)输电技术在分布式电源输电方面的应用, 为新能源发电站的开发、外送及消纳提供了新的通道。VSC-HVDC 系统具有输电经济性好、中间无落点、可控性好、具有动态无功补偿特

性等优点<sup>[4]</sup>, 在风电场输电上得到了较为广泛的应用。VSC-HVDC 优越的可控性体现在其电压协调控制上, 目前具有典型的电压协调控制为直流电压偏差控制<sup>[5]</sup>和直流电压斜率控制<sup>[6]</sup>, 可考虑将其电压协调控制优势应用于光伏电站电能输送方面。

文献[7]提出光伏电站串联组成直流模块组拓扑方案在光伏建筑一体化应用, 此方案在光伏建筑一体化应用中不断改进优化<sup>[8]</sup>; 文献[9]提出一种模块化多电平换流器的大型光伏电站并网结构, 直流侧电压为子模块经 DC/DC 变换后电容串联组成, 有效提高直流侧电压等级; 文献[10]采用简单直流变换器组成光伏发电单元级联提高直流电压等级方法, 但光伏发电单元端电压随输出功率而变化, 稳定性不高, 随着光伏发电单元输出功率波动变化易导致部分光伏发电单元端电压过高, 从而损坏该部分光伏发电单元, 其级联式提高直流电压等级思想可作为参考建立光伏电站组建直流并网系统。

本文设计了光伏电站通过级联直流变换器经 VSC-HVDC 输电线路并网拓扑方案, 将光伏电站经

Boost-全桥变换电路输出级联, 解决电压升高问题, 然后并入 VSC-HVDC 输电系统, 在 VSC 换流站采用改进电压协调控制策略, 保证光伏电站稳定功率输出和均压一致。仿真结果表明, 该系统具有较好的控制特性, 光伏电站均压稳定性较好。

## 1 光伏电站直流并网拓扑方案

### 1.1 系统架构

本文设计的光伏电站通过级联直流变换器经 VSC-HVDC 输电线路并网拓扑方案如图 1 所示。其中, 光伏发电模块由串联光伏电池组件、Boost 型升压电路、隔离型全桥直流变换器构成, 如图 2 所示。光伏发电模块组成结构完全一致, 具有相同的电气特性, 且在输出端形成输出串联结构, 以均分直流线路电压。通过级联直流变换器后的光伏电站可输出电压等级较高的直流电压, 连接至电压源型变换器高压直流输电线路, 经过受端换流站逆变换后送入电网。

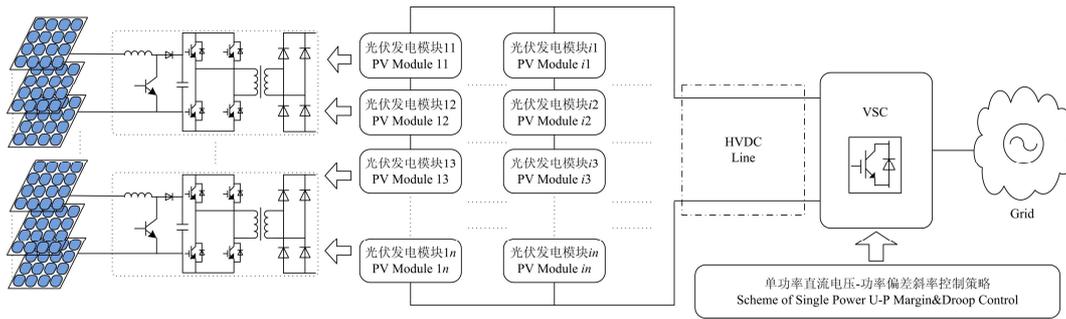


图 1 光伏电站通过级联直流变换器经 VSC-HVDC 并网拓扑

Fig. 1 Topology of connecting cascaded photovoltaic power station to power grid via VSC-HVDC system

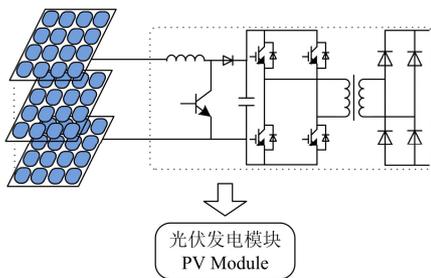


图 2 光伏发电模块电路拓扑结构

Fig. 2 Circuit topology of PV module

### 1.2 级联式光伏发电模块

#### 1.2.1 光伏电池组件串联

为能够最大传输光伏电站功率, 同时提高输入电压, 光伏发电模块的光伏电池采用串联结构, 考虑到光伏组件最大 1 000 V 耐压值, 故将串联光伏

电池组件电压控制在 600~800 V 之间, 再对串联光伏电池组件进行最大功率跟踪控制, 以保证其最大功率输出, 提高发电效率。

#### 1.2.2 Boost 型变换电路

光伏发电模块的最大功率跟踪控制由 Boost 型变换电路完成<sup>[11]</sup>, 同时实现一次升压变换, Boost 型变换电路输入输出电压关系为

$$U_{o\_bot} = \frac{U_{i\_bot}}{1 - D_{bot}} \quad (1)$$

其中:  $U_{i\_bot}$  为 Boost 型电路输入电压;  $U_{o\_bot}$  为 Boost 型电路输出电压;  $D_{bot}$  为 Boost 型电路占空比。因此, 通过调节占空比, 即可改变输出电压值, 也是实现最大功率跟踪控制的参考量。

#### 1.2.3 隔离型 DC/DC 全桥变换电路

隔离型 DC/DC 全桥变换器可以应用于大功率

传输场合,且电压增益较高,其电压增益为

$$U_{o\_n} = 2N_n D_n U_{i\_n} \quad (2)$$

其中:  $U_{i\_n}$  为全桥电路输入电压;  $U_{o\_n}$  为全桥电路输出电压;  $D_n$  为全桥占空比。通过调节合适的变比和占空比,改变输出电压与功率传输。占空比  $D_{bot}$ 、 $D_n$  取值在 0~0.5 之间,预留一定电压增益裕度。

#### 1.2.4 均压特性分析

光伏发电模块的输出端采用串联拓扑,隔离型 DC/DC 全桥变换电路为光伏发电模块级联终端,起到了电压转换和电气隔离作用,有效保护光伏电池组件。全桥变换器的输出端器件为二极管整流结构,形成多二极管串联电路,如图 3 所示。

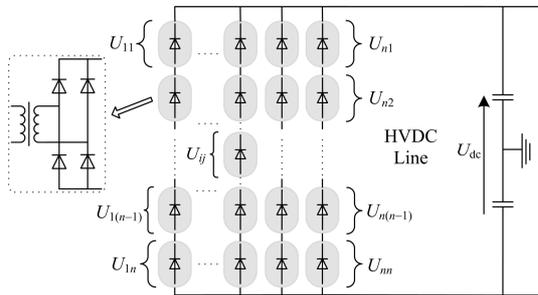


图 3 光伏发电模块输出端级联结构

Fig. 3 Cascaded structure of PV module output

从 VSC-HVDC 侧方向看,多二极管串联电路为高阻抗、耐压特性相同模块,每个模块电压又均分至模块串联二极管上,形成稳定均压结构。由于 VSC-HVDC 采用电压源型变换控制方案,直流电压线路极性保持不变,且受端换流站采用单功率控制策略,功率潮流向单个方向传输,电流传输方向与串联二极管方向一致。

假设直流电压为  $U_{dc}$ ,各个均压光伏发电模块电压为  $U_{ij}$ ,下标  $i, j$  表示位于第  $i$  个串组的第  $j$  个光伏发电模块,根据前述分析,各个光伏发电模块电压为

$$U_{ij} = n_{ij} \cdot \frac{U_{dc}}{n_{out} \cdot n_{in}} \quad (3)$$

其中:  $n_{out}$  为每个串组光伏发电模块数目;  $n_{in}$  为每个光伏发电模块输出端串联二极管个数;  $n_{ij}$  为第  $i$  个串组的第  $j$  个光伏发电模块输出端串联二极管个数。

## 2 直流并网控制策略

本文设计的光伏电站通过级联直流变换器经 VSC-HVDC 输电线路并网拓扑方案涉及到的控制内容有光伏电池最大功率跟踪控制、光伏模块直流电压控制、VSC-HVDC 输电线路直流电压-功率控

制。

### 2.1 光伏发电模块控制策略

光伏发电模块最大功率跟踪控制由 Boost 型变换电路完成,其控制策略采用电压外环-电流内环双环控制策略,电压参考值为最大功率点跟踪算法输出电压。最大功率点跟踪算法常用方法为扰动观察法和电导增量法<sup>[12]</sup>,考虑光伏发电系统功率波动较大,这里采用电导增量法。

光伏发电模块直流电压输出端全桥电路采用开环控制,优点是不受外部影响,实现输出电压稳定在预设值。

### 2.2 VSC-HVDC 控制策略

VSC-HVDC 系统常用的控制技术为矢量控制,即将 VSC 输出的三相交流电压和电流分别用正交同步旋转坐标系的两个分量表示和控制<sup>[13]</sup>。在矢量控制方法中,采用直流电压-功率控制策略是近几年 VSC-HVDC 控制系统研究热点。

#### 2.2.1 直流电压-功率控制策略

##### (1) 直流电压-功率斜率控制策略

直流电压-功率斜率控制策略也称为直流电压下垂控制,最初应用于多端电流源型直流输电系统,因其控制的独立性与下垂斜率的动态性等优势,随后逐渐研究并应用至电压源型直流输电系统。双向功率直流电压-功率斜率控制特性如图 4 所示。

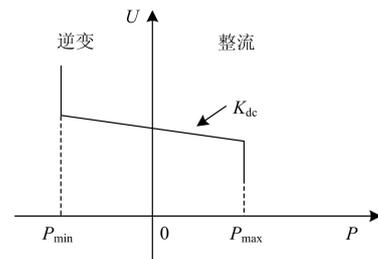


图 4 VSC 直流电压-功率斜率控制特性

Fig. 4 Characteristics of DC voltage-power droop control for VSC

斜率控制可使换流站工作在两种运行模式:

① 斜率控制模式:也是斜率控制运行主模式,实现直流电压的有差控制,在不同功率流向阶段,无论换流站处于逆变还是整流工作状态,斜率控制可以按照一定的斜率  $K_{dc}$  的下降方式运行。② 限流模式:当功率超过最高限值或最低限值时,换流站立即进入限流工作状态,此状态也非正常工作状态。

通过改变斜率  $K_{dc}$  的设定值,以直流电压、功率、电流等参数进行调节,可实现动态斜率控制策略,也可在功率转向点处或分阶段设定不同斜率值,实现多段斜率控制方式,使得斜率控制策略更多样化、更具适应性。

## (2) 直流电压-功率偏差控制策略

直流电压-功率偏差控制策略最初在双端 VSC-HVDC 控制系统使用, 图 5 为 VSC 直流电压-功率控制特性, 在电流源变换控制系统中, 基本控制对象为直流电流, 功率的反转是通过改变直流电压方向实现; 而在电压源变换控制系统中, 基本控制对象为直流电压, 功率的反转是通过改变直流电流流向实现。

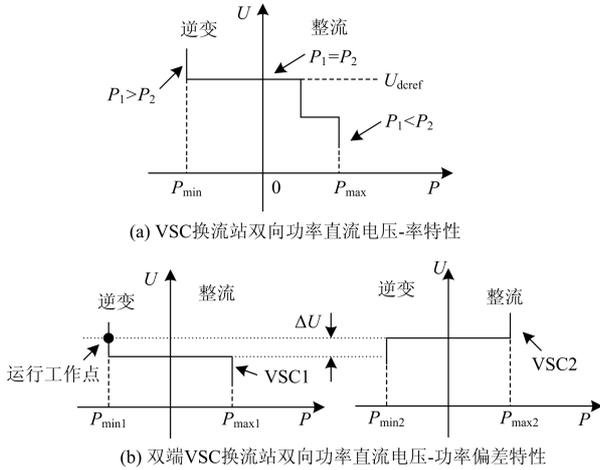


图 5 VSC 换流站直流电压-功率偏差控制特性  
Fig. 5 Characteristics of DC voltage-power margin control for VSC converter station

图 5(a)中,  $P_1$  为 VSC 换流站直流侧功率,  $P_2$  为直流线路侧功率,  $P_{\max}$  为功率控制最高限值,  $P_{\min}$  为功率控制最低限值,  $U_{\text{dcref}}$  为直流电压设定值。在 VSC-HVDC 控制系统中, 直流电压控制器目的是保持直流电压稳定在设定的参考值, 直流电压的调整是通过改变功率  $P_1$  实现, 直至功率达到最高限值  $P_{\max}$  和最低限值  $P_{\min}$ 。若直流电压较低时, 通过直流电压控制器提高功率  $P_1$ , 直至最高限值  $P_{\max}$ , 以保持直流电压稳定, 然而, 当功率  $P_2$  高于最高限值  $P_{\max}$  时, 直流电压进一步下降。反之, 若直流电压高于参考值  $U_{\text{dcref}}$  时, 通过直流电压控制器, 控制功率  $P_1$  进一步降低, 以降低直流电压至参考值, 然而, 当功率  $P_2$  低于最低限值  $P_{\min}$  时, 直流电压进一步上升。

当双端换流站共同运行时, 如图 5(b)所示, 两个换流站的参考电压差值  $\Delta U$  即为电压偏差。此时, 两个换流站的参考电压交汇点为系统运行工作点, 一个换流站工作在逆变状态, 另一个换流站工作在整流工作状态, 通过在不同换流站设定不同的电压参考值, 可调整换流站运行工作点, 实现功率转换与准确调节功率的特点, 此方法可拓展至多个换流站共同运行, 即多端直流输电系统中使用。

## 2.2.2 改进直流电压-功率偏差斜率控制策略

本文结合偏差控制与斜率控制策略, 即直流电压-功率偏差斜率控制策略, 并针对光伏电站输出功率不稳定性特点, 引入带有功率死区的直流电压-功率偏差斜率控制策略。对于单端 VSC-HVDC 系统, 光伏电站功率具有不可反转性, 加上本方案光伏发电模块终端为二极管串组构成, 电流具有不可逆性, 故在 VSC 换流站采用单向有功功率的直流电压-功率偏差控制策略, 其运行特性如图 6 所示。

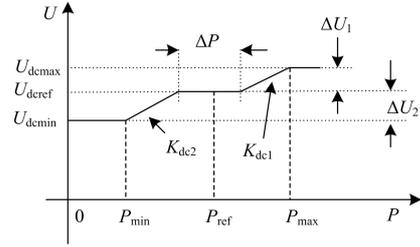


图 6 单向功率改进直流电压-功率偏差斜率控制特性  
Fig. 6 Characteristics of improved DC voltage-power margin & droop control for VSC single power converter station

图 6 中,  $\Delta P$  为有功功率死区带,  $\Delta U_1$  为直流电压高限值偏差,  $\Delta U_2$  为直流电压低限值偏差,  $K_{\text{dc}1}$  为高限值斜率,  $K_{\text{dc}2}$  为低限值斜率。对于各个串组光伏发电模块, 部分光伏发电模块光照强度降低, 或部分光伏组件温度不均衡导致输出功率波动, 均会造成该串组光伏发电模块总输出功率发生变化, 有时影响输出功率的降低因素是临时性的, 如乌云、临时遮罩等。因此, 具有功率死区直流电压控制策略可以避免因临时性功率变化导致直流电压反复波动变化, 影响系统稳定性。

有功功率死区带  $\Delta P$  可根据光伏电站最大功率设定, 取值为

$$\Delta P = \alpha \eta P_{\text{pvmax}} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为死区系数;  $\eta$  为光伏发电模块效率;  $P_{\text{pvmax}}$  为光伏组件最大输出功率。

当光伏电站输出功率逐渐降低时, 超过了有功功率死区带, 则系统运行在低限值斜率控制模式, 直流电压按照斜率  $K_{\text{dc}2}$  缓慢降低, 降低至安全运行直流电压最低值  $U_{\text{dcmin}}$ , 保证系统安全稳定性。

考虑光伏电站扩容, 或投入新增光伏电站, 需设置有功功率最高限值, 当光伏电站功率增加时, 超过有功功率死区带后, 系统进入高限值斜率控制模式, 直流电压按照斜率  $K_{\text{dc}1}$  缓慢升高, 升高至直流电压最高限值  $U_{\text{dcmax}}$ , 最高电压限值保证在各个光伏发电单元均压耐压范围, 同时保留一定裕度, 以防部分光伏发电模块短路故障导致电压偏高。

为保证直流电压斜率变化安全范围,尤其是当电压升高控制时,更须保证在尽可能缓慢的范围变化,可取高限值斜率  $K_{dc1}$  为

$$0 < K_{dc1} < \min \left[ \frac{(U_{dcmax} - U_{\delta}) - U_{dcref}}{P_{max} - (P_{ref} + \frac{\Delta P}{2})}, \frac{(U_{dcmin} + U_{\delta}) - U_{dcref}}{P_{min} - (P_{ref} - \frac{\Delta P}{2})} \right] \quad (5)$$

式中,  $U_{\delta}$  为直流电压安全裕度系数,取值为直流电压参考值的 0.5% 左右。

低限值斜率控制危险风险相对较低,其值可等于或略高于高限值斜率值。

### 3 仿真分析

#### 3.1 系统模型搭建

根据图 1 所示光伏电站通过级联直流变换器经 VSC-HVDC 输电线路并网拓扑方案,在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中搭建该方案仿真模型,以验证本设计光伏电站直流并网拓扑方案及其控制策略的有效性。

本方案仿真中,光伏电站设计容量为 5 MW,光伏发电模块为 1 MW, VSC 换流站直流电压参考值为 30 kV,  $U_{\delta} = 0.15$  kV,  $U_{dcmin} = 26$  kV,  $U_{dcmax} = 34$  kV,  $\alpha = 0.15$ ,  $\eta = 0.85$ ,  $P_{ref} = 4.6$  MW,  $\Delta P = 0.7$  MW,  $K_{dc1} = 0.75$  kV/MW。  $K_{dc2} = K_{dc1}$ 。

#### 3.2 光伏电站光照强度变化仿真分析

##### 3.2.1 局部光照强度轻微变化仿真分析

初始时刻,光伏电站温度为 25℃,光照强度为 1000 W/m<sup>2</sup>。光伏发电模块 1 光照强度从 1000 W/m<sup>2</sup> 跌落至 800 W/m<sup>2</sup>,光伏发电模块 1 输出功率下降 20%,光伏发电模块温度保持 25℃ 不变,光伏电站整体输出功率跌落值未超过死区功率, VSC 控制系统保持直流电压不变,仿真状态如图 7 所示。光伏发电模块 1 经过一个下降过程,逐渐达到新的稳定值。光伏发电模块输出功率发生变化,各个发电模块因串组二极管特性使得模块端电压保持均压稳定,避免了因串组中个别光伏发电模块输出功率变化自身电压降低导致其他光伏发电模块端电压过高的危险。

##### 3.2.2 局部光伏强度严重变化仿真分析

初始时刻,光伏电站温度为 25℃,各个光伏发电模块光照强度均为 1000 W/m<sup>2</sup>。光伏发电模块 2、3、4、5 光照强度从 1000 W/m<sup>2</sup> 跌落至 800 W/m<sup>2</sup>,而光伏发电模块 1 光照强度从 1000 W/m<sup>2</sup> 跌落至 700 W/m<sup>2</sup>,温度保持 25℃ 不变,总串组光伏发电模块输出功率超过死区功率, VSC 换流站从死区功率

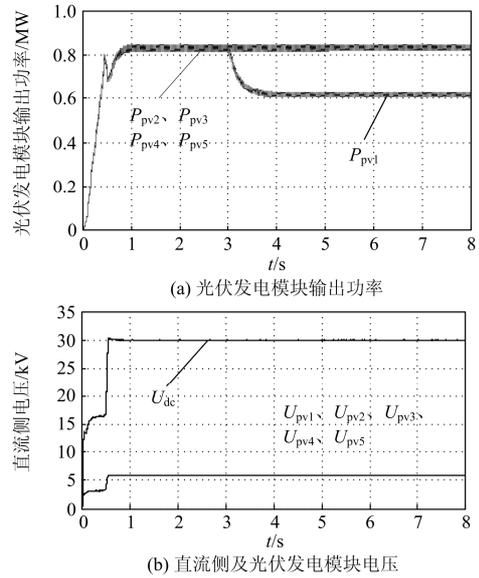


图 7 局部光照强度轻微变化光伏电站直流并网方案仿真  
Fig. 7 Simulation of DC connecting PV power station to power grid under partial slightly changed irradiation

定电压控制方式进入斜率控制运行方式,直流侧电压按照斜率  $K_{dc2}$  调节下降,当光伏电站输出功率稳定时, VSC 换流站运行工作点在斜率控制曲线对应直流电压-功率点处,直流电压保持稳定,直流电压稳定在 29.2 kV。串组各个光伏发电模块随着线路直流电压的变化均压相应下降,且电压稳定较好,呈现较好电压控制效果。如图 8 所示。

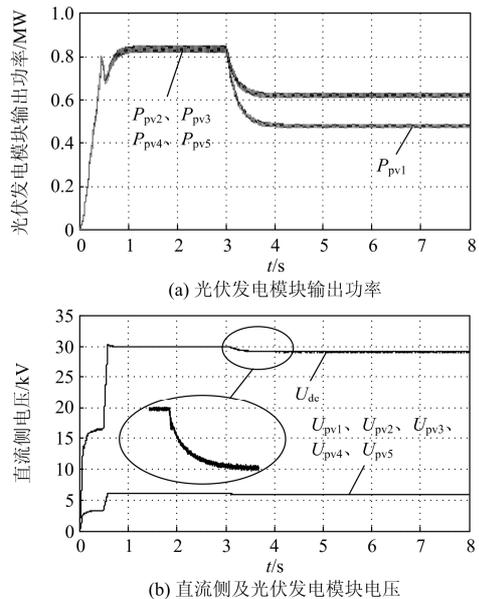


图 8 局部光照强度严重变化光伏电站直流并网方案仿真  
Fig. 8 Simulation of DC connecting PV power station to power grid under partial seriously changed irradiation

## 4 结论

本文设计了光伏电站通过级联直流变换器经 VSC-HVDC 输电线路并网拓扑方案, 并提出了单向功率带功率死区直流电压-功率偏差斜率改进控制策略对 VSC 换流站控制直流电压稳定, 保持了串组光伏发电模块均压稳定, 并采用了 PSCAD/EMTDC 电磁暂态软件对本方案控制策略进行了验证, 主要结论如下:

(1) 串组光伏发电模块输出端为二极管串构成, 二极管反向高阻抗特性使得光伏发电模块均压保持稳定, 有效避免了光伏发电模块因输出功率不同导致承受电压不均, 出现过高压情况。

(2) 本文提出了单向功率带功率死区直流电压-功率偏差斜率改进控制策略, 既保证了光伏电站因临时性遮挡造成输出功率跌落对直流电压影响, 又能在光伏电站整体输出功率跌落后按照斜率控制直流电压均匀下降, 使得光伏发电模块保持最大功率输出, 以及均压特性一致。

(3) 本文提出的改进直流电压-功率偏差斜率控制策略, 对于拓展至多光伏电站组成直流电网系统的多端 VSC-HVDC 控制系统提供一定的参考。

## 参考文献

- [1] MASTERS G M. Renewable and efficient electric power systems[M]. Hoboken. NJ: Wiley. 2004.
- [2] ALQUTHAMI T, RAVINDRA H, FARUQUE M O. Study of photovoltaic integration impact on system stability using custom model of PV arrays integrated with PSS/E[C] // North American Power Symposium (NAPS), Arlington, 2010.
- [3] 熊远生, 俞立, 徐建明. 光伏发电系统多模式接入直流微电网及控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 37-43.  
XIONG Yuansheng, YU Li, XU Jianming. Multimode of photovoltaic generation system connected to DC microgrid and control methods[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 37-43.
- [4] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统的影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.  
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [5] NAKAJIMA T, IROKAWA S. A control system for HVDC transmission by voltage sourced converters[C] // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Edmonton, Alta, 1999: 1113-1119.
- [6] HAILESELAASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop

- control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(31): 1441-1449.
- [7] WALKER G R, SERNIA P C. Cascaded DC-DC converter correction of photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4): 1130-1139.
- [8] 刘邦银, 段善旭, 康勇. 尚能效直流模块式光伏发电系统性能评估[J]. 太阳能学报, 2008, 29(9): 1107-1111.  
LIU Bangyin, DUAN Shanxu, KANG Yong. Performance evaluation of high efficiency DC-module-based photovoltaic power systems[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(9): 1107-1111.
- [9] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [10] 赵伟然, 李光辉, 何国庆, 等. 光伏电站经 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 41-45.  
ZHAO Weiran, LI Guanghui, HE Guoqing, et al. Topology of connecting photovoltaic power station to power grid via VSC-HVDC and its control strategy[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 41-45.
- [11] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 48-54.  
SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 48-54.
- [12] 杭凤海, 杨伟, 朱文艳. 光伏系统 MPPT 的扰动观测法分析与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 110-114.  
HANG Fenghai, YANG Wei, ZHU Wenyan. Analysis and improvement of MPPT disturbance observer method for PV system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 110-114.
- [13] BRUNNER C. IEC 61850 and the PSR committee protection[C] // Automation and Control (PAC) World Magazine, 2010(3): 25.

收稿日期: 2015-07-29; 修回日期: 2015-09-17

作者简介:

罗宇强(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电技术与智能输电技术; E-mail: lyq0129best@163.com

谭建成(1963-), 女, 博士, 教授, 研究方向为智能输电技术、智能变电站技术等;

董国庆(1987-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源发电技术、继电保护。

(编辑 周金梅)