

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018.09.001



# 不同无功控制方式下光伏并网的影响及应对策略

梅文明<sup>1</sup>, 李 偲<sup>1</sup>, 杨立滨<sup>2</sup>, 李春来<sup>2</sup>, 郝文康<sup>1</sup>,  
Saif Mubaarak Abdulrahman Abd<sup>1</sup>, 刘文健<sup>1</sup>, 吉 平<sup>2</sup>, 张 鑫<sup>2</sup>, 李美成<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学可再生能源学院 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海 西宁 810008)

**摘 要:** 为解决由于光照强度等扰动因素产生的有功出力波动、并网点电压越限、保护动作投切频繁等问题, 该文对光伏系统并网时的无功和电压管理策略进行研究。对比目前光伏电站中普遍运用的定功率因数与定电压两种无功控制方式, 并利用 Matlab 对并网光伏发电系统进行建模, 研究光照强度扰动下不同无功控制方式对功率特性的影响规律, 证明定电压控制方式在电压支撑能力与系统稳定性方面优于恒功率因数控制方式。最后通过青海地区的光伏并网实例进行相关验证并提出应对策略, 通过安装 SVG 等动态无功补偿装置可以提高系统动态调节能力。该研究可为解决大规模光伏并网带来的实际问题提供一定理论和实证参考。

**关键词:** 光伏发电系统; 无功控制方式; 光照强度扰动; 功率特性

中图分类号: TM85

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)09-0001-08

## Influence of grid connection and countermeasures in different photovoltaic reactive power control methods

MEI Wenming<sup>1</sup>, LI Cai<sup>1</sup>, YANG Libin<sup>2</sup>, LI Chunlai<sup>2</sup>, XI Wenkang<sup>1</sup>,  
SAIF Mubaarak Abdulrahman Abd<sup>1</sup>, LIU Wenjian<sup>1</sup>, JI Ping<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>, LI Meicheng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Research Institute, Xining 810008, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of active power fluctuation due to disturbance factors such as illumination intensity, the limit of the grid voltage, and the frequent switching of protection actions, it is necessary to study the reactive power and voltage management strategies when the photovoltaic system is connected to the grid. The article compares the two methods of the fixed power factor control method and the constant voltage control method, which are commonly used in photovoltaic power plants, and uses Matlab to model the grid-connected system of photovoltaic power generation system. The influence of different reactive

收稿日期: 2018-06-05; 收到修改稿日期: 2018-07-14

基金项目: 国网青海省电力公司科技项目(522807160015); 北京节能与电力技术开发基金会项目(J2017001)

作者简介: 梅文明(1987-), 男, 浙江金华市人, 高级工程师, 主要从事新能源技术研究工作。

通信作者: 李美成(1973-), 男, 山东菏泽市人, 二级教授, 博士生导师, 研究方向为太阳能电池及太阳能综合利用技术、锂/钠离子电池及新型储能技术、传感器及微源自供电技术等。

power control modes on the power characteristics under the intensity disturbance is studied. It is proved that the constant voltage control mode is superior to the constant power factor control method in terms of voltage support capability and system stability. Finally, through the example of photovoltaic grid-connected in Qinghai, the related verification is carried out, and the countermeasure strategy is proposed that the dynamic reactive power compensation device such as SVG can be installed to improve the dynamic adjustment capability of the system. This research can provide a theoretical and empirical reference for solving the practical problems brought by large-scale photovoltaic grid connection.

**Keywords:** photovoltaic power generation system; reactive power control method; light intensity disturbance; power characteristics

## 0 引言

近年来,随着全球范围内的能源转型发展,我国正在逐渐建立包含大规模新能源在内的清洁、低碳、高效的电网系统,进而降低石油、煤炭等传统能源的利用比重。光伏发电系统作为典型代表之一,其技术发展日趋成熟,大规模集中并网成为其重要利用形式之一。

由于负荷与电源分布不均衡等原因,大量的光伏电力需要高压长距离输电线路外送<sup>[1]</sup>。光照强度的变化会引起有功波动,从而导致并网点电压波动甚至越限<sup>[2]</sup>。而且,随着装机比重的逐年上升,光伏发电系统并网对电力系统深层次的影响愈加凸显,例如对有功平衡造成冲击,电压越限、恶化电网的功角稳定性等。光伏发电系统并网对输配电网的影响也越来越显著,如有功出力穿越近区电网以及远距离输电通道时,其随机波动的特性将影响到电网无功平衡特性;光伏电源的无功支撑能力较弱,使并网点电压发生电压越限的风险加大<sup>[3]</sup>;光伏接入改变了电网已有的辐射状网架结构,使电网潮流分布大小、方向等复杂多变,变得更加难控,进而影响配电网的电压质量等<sup>[4-6]</sup>。可见,光伏发电系统无功和电压的管理问题已成为大规模集中式光伏并网面临的难题之一。

本文在分析并网光伏发电系统不同无功控制方式的基础上,通过 Matlab 对光照强度扰动下不同控制方式的光伏发电系统功率输出特性进行建模与仿真研究,并通过实例研究了青海地区在大规模光伏送出情况下,光照强度产生波动时的不同控制方式对系统稳定性的影响,进一步给出应对措施及策略。

## 1 光伏发电系统动态建模

光伏电站大规模接入电网时,由于其出力特性

跟随太阳辐照度而变化,所以光照强度的突变会直接对接入系统造成冲击。在光伏渗透率高的电网中,这种冲击会使光伏发电单元的运行特性发生较大变化,有造成光伏出力下降、脱网、部件过压及并网点电压越限的风险<sup>[7]</sup>,严重时甚至可能导致系统失稳。因此,有必要对光伏发电系统进行建模与仿真,为下一步更为详细的分析奠定理论基础。

### 1.1 光伏发电单元模型

光伏发电单元是并网光伏电站的基础组成部分,其拓扑结构如图 1 所示,主要包括光伏阵列、升压电路、电压源逆变器及其控制系统、滤波器、变压器等。

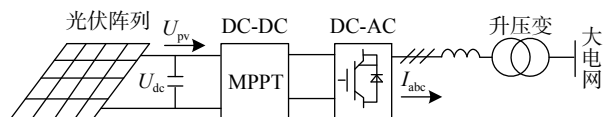


图 1 光伏发电单元拓扑结构

由于单级式结构控制都要在一级电路中完成,逆变系统控制较为复杂,并且没有升压功能,电压输入范围较窄,所以在此选择双级式结构。

如图 1 所示,光伏阵列在光生伏打效应下,接收光能并输出直流电,然后通过前级 DC-DC 变换器进行升压。此处母线电容用于维持逆变器直流侧电压的稳定。升压后的直流电提供给三相 VSC 逆变器,它将直流电转换为工频的交流电,保持中间直流母线的电压稳定,同时控制其与交流电网交换的无功功率;然后经滤波器滤波和变压器升压接入电网。

双级式结构由两部分电路组成,两个变换器之间分工明确、控制功能分散到两个功率环节中,便于分开设计,进行独立控制。前级 DC-DC 升压环

节可以使光伏阵列工作在一个宽泛的电压范围内,实现系统电压的预调整,扩宽系统的输入范围,直流侧光伏电池组件的电压配置也变得更加灵活。同时还可以完成光伏电池的最大功率跟踪过程,并通过适当的控制策略减少升压变换器输入端的电压波动,提高最大功率点跟踪的精度。在一定程度上,还可以稳定 DC-AC 环节的输入,提升输入的直流电压与逆变环节的转换效率。

## 1.2 光伏电池输出特性

在实际中,由于不能确切得知光伏电池的物理参数(如禁带宽度能量等),所以为了便于研究,本文采用简化后的光伏电池数学模型进行仿真。文献[8]提出了标准条件(光照强度  $R_{\text{ref}}=1\ 000\ \text{W/m}^2$ , 温度  $T_{\text{ref}}=25\ \text{℃}$ )下用于 Matlab 建模的简化光伏电池数学模型。但经研究发现其模型存在问题,修正错误后,给出如下公式:

$$I = I_{\text{sc}}\{1 - C_1[e^{(U_{\text{op}} - dv)/(C_2 U_{\text{oc}})} - 1]\} + di \quad (1)$$

$$C_1 = (1 - I_m/I_{\text{sc}})e^{-U_m/(C_2 U_{\text{oc}})} \quad (2)$$

$$C_2 = (U_m/U_{\text{sc}} - 1)\ln(1 - I_m/I_{\text{sc}}) \quad (3)$$

$$di = a(R/R_{\text{ref}})dt + (R/R_{\text{ref}} - 1)I_{\text{sc}} \quad (4)$$

$$dv = -bdt - R_s di \quad (5)$$

$$dt = T_c - T_{\text{ref}} \quad (6)$$

其中,  $a$ 、 $b$  分别为电流、电压变化温度系数,  $I$ 、 $U_{\text{op}}$ 、 $U_m$  分别为光伏模块的输出电流、工作电压、最大功率点电压,  $R_s$  为串联电阻,  $T_c$  为当前环境温度,  $R$  为当前太阳辐射强度。短路电流  $I_{\text{sc}}$ 、开路电压  $U_{\text{oc}}$ 、最大功率点电流  $I_m$  与电压  $U_m$  为电池板的测试参数,需要实际提供数据。

在标准条件下,假设  $I_{\text{sc}}=5.63\ \text{A}$ ,  $U_{\text{oc}}=45.1\ \text{V}$ ,  $I_m=5.28\ \text{A}$ ,  $U_m=37.0\ \text{V}$ , 在此情况下的光伏电池的输出特性曲线如图 2、图 3 所示。

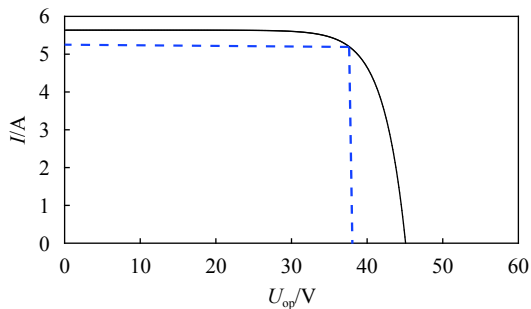


图 2 光伏电池  $U-I$  特性曲线

由图 2、图 3 可以看出,光伏电池的输出功率随

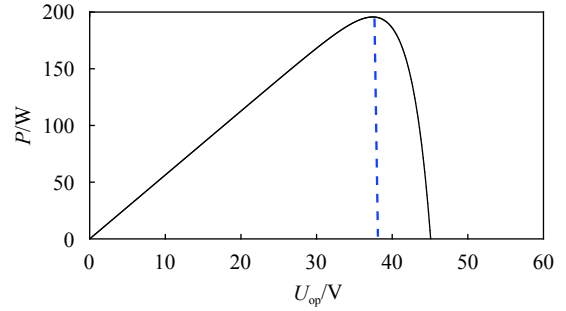


图 3 光伏电池  $U-P$  特性曲线

着工作电压的升高而升高,到达最大功率点处输出功率最大,在最大功率点处可以保证最大限度地发挥太阳能电池性能。之后,输出电流随着工作电压的持续增大而迅速减小。这可以为下一步的相关研究提供理论支持。

## 1.3 逆变器控制策略

逆变器作为光伏发电系统并网逆变控制最重要的一部分,其主要功能是将发出的直流电变为与电网同频、同相的正弦交流电,同时控制其与公网交换的有功、无功功率。其输入方式可分为电流源和电压源输入。若输入方式为电流源,则需要通过串联电感来稳定直流输入,但会降低系统响应速度,所以目前并网逆变器主要以电压源输入为主。

在电压源型逆变器输入的情况下,经常会搭配  $dq0$  坐标系下的电压电流双环控制方案。相较于单环控制,双环控制可以加快系统的动态响应过程,并且具有更强的抗扰动能力,在非线性负载条件下可以保证良好的输出波形。双环控制指的是以电流环为内环,以电压环为外环进行并网的一种控制方式。在仿真过程中,双环可形成  $dq$  轴相互独立的两个模拟回路,分别进行控制,其原理框图 4 所示。其中,内环电流控制器按照电流指令进行精细调节,减少电压谐波的输出,提高输出电能的质量,使整个双闭环系统更加稳定;外环电压控制器针对控制直流侧输出电压,控制无功功率或交流电压等目的,在内环电流解耦控制器产生内环参考信号,输出目标电流值[9]。

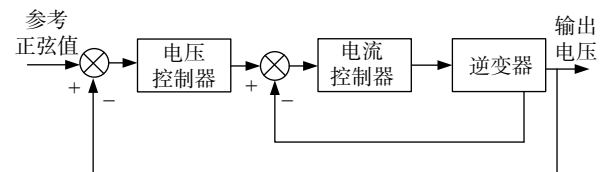


图 4 逆变器双环控制原理框图



## 2 并网光伏发电系统无功控制方式

无旋转惯量的光伏发电间歇性出力会直接造成电网稳定裕度的下降,危害电力系统的安全。关于无功控制策略,目前针对风电与分布式光伏发电的研究较多,但对于大规模并网型光伏发电系统的研究甚少,有必要针对相关内容作进一步研究。

### 2.1 无功电压控制相关标准与措施

目前,我国电网中实际存在着电压普遍偏低的情况,分析其中的主要原因,包括以下方面:电网结构初期规划不合理、部分线路送电距离长、导线截面小、造成线路上的电压损失,以及无功电源不足或无功补偿设备管理不善等<sup>[10]</sup>。此外,用电负荷增多、负荷功率因数低、变压器容量不足、线路故障及设备检修等,均可导致电网电压降低情况的产生。

为规范光伏电站并网管理,针对光伏电站接入电网的无功电压控制制定了相应标准。光伏电站要充分利用并网光伏逆变器无功容量及其调节能力,应满足功率因数在超前 0.95 到滞后 0.95 的范围内动态可调。并网逆变器还应具有无功容量及其调节能力,当其无功容量不能满足系统电压调节需要时,应在光伏发电站升压变压器低压侧配置无功补偿装置,无升压变压器光伏电站可在汇集点安装无功补偿装置。光伏发电站的无功电源应能够跟踪光伏出力的波动快速响应,以满足电压调节要求。

目前,进行无功控制的措施有:安装无功补偿设备、逆变器控制、安装储能、调节有载调压变压器分接头等<sup>[11-12]</sup>。一般对于光伏并网点附近出现电压越限的情况,通过变压器分接头进行有载调压,此时变压器调节地点没有针对性,有载调压有一定的调节频率和次数限制,调节过程中机械开关滞后时间长,也不能连续光滑调节,所以目前不常采用此类方式。目前常采用的方式主要是:首先利用逆变器进行无功调节,若不能满足需求,再利用无功补偿装置。目前无功控制方式主要有恒功率因数、恒电压、有功和无功解耦控制 3 类<sup>[13]</sup>。本文只针对前两种方式,也是光伏电站中主流的最常用的两种无功控制方式进行分析研究。

### 2.2 恒功率因数控制模式

在实际中,光伏电站在正常工作的一般运行在恒功率因数控制模式。恒功率因数控制模式指的是:不论光伏发电系统出力的大小,都保证光伏发电系统送出线路上的功率因数恒定,以调整无

功补偿装置无功容量的大小<sup>[14]</sup>。

在功率因数控制模式下,光伏逆变器功率因数  $\cos\varphi$  为无功参考值与光伏有功出力的比值,且为恒定值,光伏逆变器输出无功的大小取决于输出的有功功率<sup>[15]</sup>,其表达式为

$$\cos\varphi = \cos \arctan \frac{Q}{P} \quad (7)$$

在此种控制策略下,一般根据功率因数  $\cos\varphi$  来自动投切无功补偿设备。若低于下限则投入无功补偿设备,高于上限则切除无功补偿设备。其设计框图如图 5 所示。

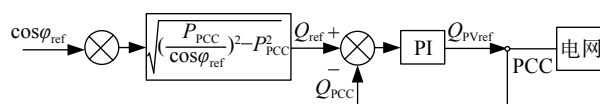


图 5 定功率因数控制方式框架

其中,  $P_{PCC}$  和  $Q_{PCC}$  分别为并网点处的有功、无功功率,  $\cos\varphi_{ref}$  为功率因数参考目标值,  $Q_{ref}$  为将功率因数维持在目标值所需的无功参考值,  $Q_{PVref}$  为光伏电站需要发出的无功参考值。PI 控制器根据参考值与实际值之间的偏差,将成比例的偏差值作为控制量,对光伏发电系统的有功和无功进行控制。

此种控制策略较为简单,但在低光照、低温度环境下,光伏有功出力很小,会造成线路电压沿馈线潮流方向逐渐降低,为了维持功率因数不变,光伏系统需要发出一定无功功率,增加了电网有功损失。并且由于功率因数易受到系统负荷的影响,当系统带小负荷时,较小的无功功率的变化会引起功率因数较大的变化,容易造成投切动作频繁,还会带来电压控制不准确等影响。

### 2.3 恒电压控制模式

恒电压控制模式指的是:不论光伏发电系统出力的大小,都将系统关键节点电压作为控制目标,根据关键节点的电压偏差情况,整定出光伏电站输出无功功率,将并网点电压控制在一定的范围内,从而实现光伏电站的无功电压控制<sup>[16]</sup>。

在恒电压控制中,为了进行交流电压控制,首先要测量出母线电压,而电压高、低限值则在换流工作站进行调整。当并网点电压升高越上限时,通过切除无功补偿设备来调节光伏电站发出的无功功率,降低并网点电压;当光伏电站发出感性无功达到最大限值而并网点电压仍然不满足要求时,此时需要降低发出的有功功率,直至电压恢复正常。当

并网点电压降低超出下限时,需要采取投入交流滤波器等措施,增大光伏电站发出的无功功率,直至电压满足要求或光伏电站发出容性无功达到最大值。其设计框图如图6所示。

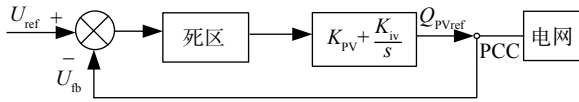


图6 定电压控制方式框架

首先,测量出并网点处的电压,  $U_{fb}$  作为反馈值与PI控制器的调节电压参考目标值  $U_{ref}$  进行比较,将它们间的差值称为电压误差值。再通过电压误差值进行无功整定,将并网点处的电压变化情况转化为整个光伏发电系统需要发出的无功参考值  $Q_{PVref}$ ,以支撑并网点处的电压。其中,死区用来处理电压误差值,  $K_{pV}$ 、 $K_{iV}$  为PI控制器比例系数,决定系统的反应力度。若误差值小于死区宽度,则输出值为零;若误差值大于死区宽度,则死区的输入、输出为线性关系,用PI控制器的控制策略进行正常控制。

采用此类控制方式,可以通过支持系统无功,提高运行电压,减少有功损耗,从而减少系统有功功率缺额,间接地支持系统频率<sup>[7]</sup>,但是对功率因数的改善没有进行充分的考虑。

### 3 光照强度扰动下不同无功控制方式的并网模型与仿真

为分析光照强度扰动下的不同控制方式的光伏系统暂态输出特性,在Matlab软件中构建光伏发电系统并网系统如图7所示。图中,光伏发电单元经汇集升压后接入换流站,光伏换流站采用VSC进行换流,最后经并网线路接入无穷大系统。 $P$ 为光伏发电系统向电网输送的有功功率, $Q_m$ 为补偿无功功率, $U_s$ 为并网点电压。

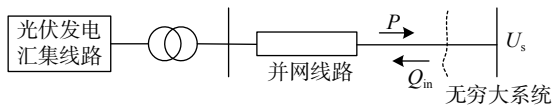


图7 光伏发电并网系统等效拓扑结构

假设给光伏发电系统添加光照强度扰动如图8所示,即光强在第3s时进行骤降,观察在受到光照扰动下不同控制方式并网产生的影响,换流母线有功功率、无功功率以及光伏并网母线电压分别如图9~图11所示。

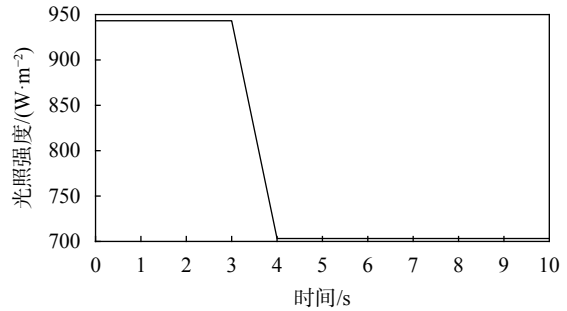


图8 光照强度波动曲线图

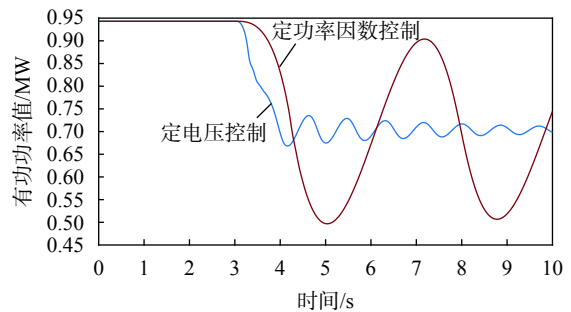


图9 换流母线有功功率

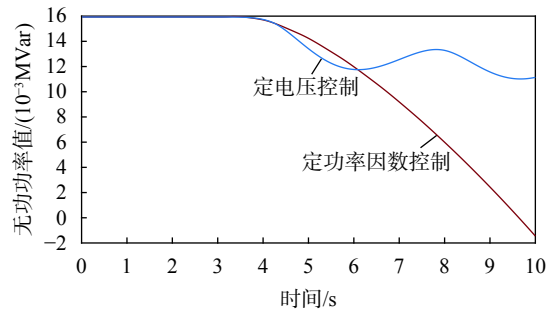


图10 换流母线无功功率

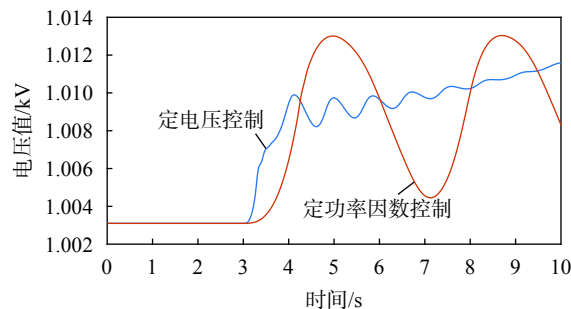


图11 光伏并网母线电压

由图可知,在受扰动变化过程中,换流母线的有功功率在定电压控制下产生小幅波动,换流器输出无功也可基本保持恒定,并网母线电压将逐渐升高。由于换流器具有一定的无功支撑作用,光伏并网线路注入大电网的无功可以抑制电压跌落。而在

定功率因数控制下,光照强度的波动使换流器有功输出降低,出力特性产生较大起伏,而由于无功电压的弱支撑,无功功率也大幅降低,并网处的母线电压波动也较为强烈。

综合光伏定功率因数和定电压两种控制模式下受扰后的并网功率特性,可以看出,针对光照强度的扰动引起的并网稳定问题,采用定电压控制方式明显优于定功率因数控制,利用定电压控制方式下并网线路的无功电源特性,可以有效提升系统稳定水平。

#### 4 案例分析

青海省太阳能资源丰富,光伏电站建设规模不断扩大。根据“十三五”电力规划,青海省要构建以交流 1 000 kV 和直流  $\pm 800$  kV 特高压电网为核心、750 kV 超高压电网为主干网架的电网空间布局。光伏通过主干网架送出,若光照强度产生波动,必然会对整个电网的电压、频率稳定产生一定的影响。而光伏发电控制模式作为其中重要的一环,不同的控制模式势必会起到不同的作用。有必要针对光照波动下,不同光伏控制方式下的光伏系统并网影响进行分析。在此主要分析其对 750 kV 及以上主架结构的影响。

##### 4.1 不同控制方式在应对光照波动时的暂态输出特性影响

在此案例中,光伏的有功功率控制按照定直流侧电压控制,无功功率控制分别用定功率因数和定电压两种无功控制模式进行控制。按照光伏恒功率因数为 1 的控制模式,且不配置无功补偿装置,即光伏与系统之间的无功支撑较弱,的情况下,若光照强度波动引发无功缺乏,由于其不从系统吸收或发出无功,因此电压也会变化。光伏功率的波动也会影响换流母线电压,从而对系统可靠运行产生影响。若换流母线电压降低,则送出功率也会产生相应波动;若换流母线电压升高,则有可能导致直流系统各装置设备绝缘的破坏,严重时甚至导致保护系统的误动,对光伏的可靠外送造成影响<sup>[18-19]</sup>。

本文以海南换流站为研究点,分析接入海南汇的光伏发电系统在受到光照强度扰动下对光伏阵列、直流输送系统及其他光伏电站受到的影响。光伏电站受到光照扰动 1 s 时光照强度从  $820 \text{ W/m}^2$  开始下降,在 3 s 内功率下降至  $0 \text{ W/m}^2$ ,光照强度波动曲线如图 12 所示。

受光照强度影响的光伏阵列输出电压、直流输送系统响应曲线分别见图 13、图 14。

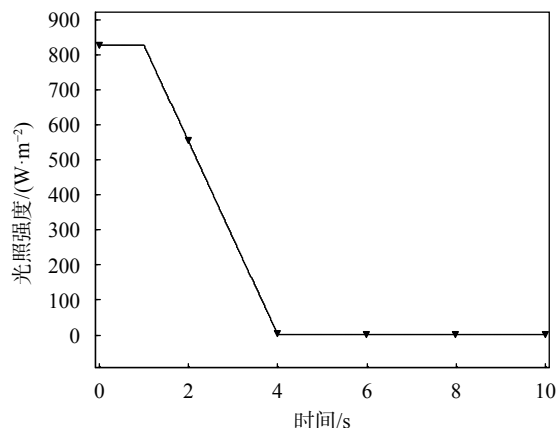


图 12 光照强度波动曲线

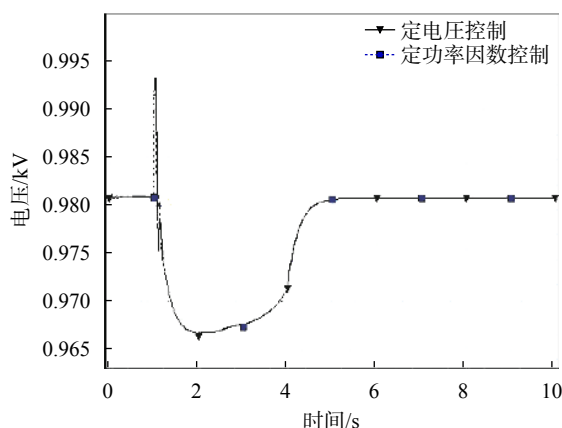
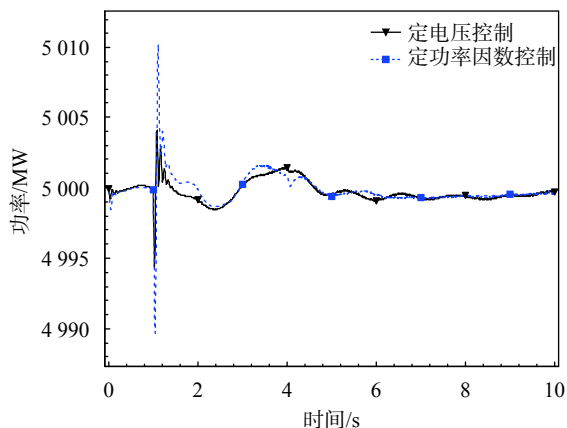


图 13 受光照强度影响的光伏阵列输出电压

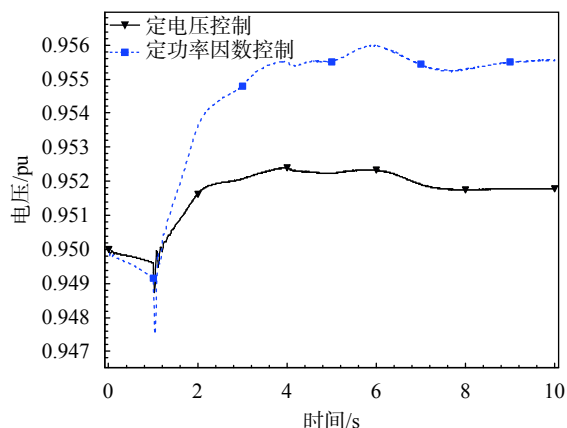
可以看出,在发生光伏功率波动时,随着光照强度的快速下降,光伏有功出力逐渐减小,光伏阵列输出电压瞬时升高后下降,4 s 左右恢复到原水平。

观察输送系统的直流功率曲线与直流换流母线电压可以看出:直流功率略有波动,而由于定功率因数模式下光伏发电无功电压的弱支撑,无法保持其换流器输出电压为恒定值,所以直流换流母线电压随换流器输出电压的升高而升高。按照直流系统自身控制模式,随着换流母线电压升高,直流为了保证可靠送出,增大触发滞后角来保证整流侧电压为稳定值,直流输出功率保持稳定。相较于定功率因数控制而言,在光照强度变化过程中,采用光伏定电压控制的换流器可以输出少量的无功,对无功电压特性有一定的改善作用。因此,光伏定电压控制下的输出电压的变化、换流母线电压波动程度均略小于定功率因数控制。在整个扰动过程中,两种控制方式下直流均能可靠送出。

总体来说,光伏系统在受到扰动后的恢复过程



(a) 直流功率曲线



(b) 直流换流母线电压

图 14 直流输电系统响应曲线

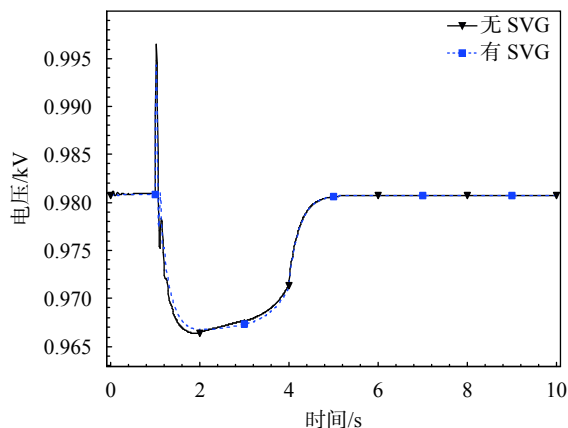


图 15 光伏阵列母线电压变化曲线

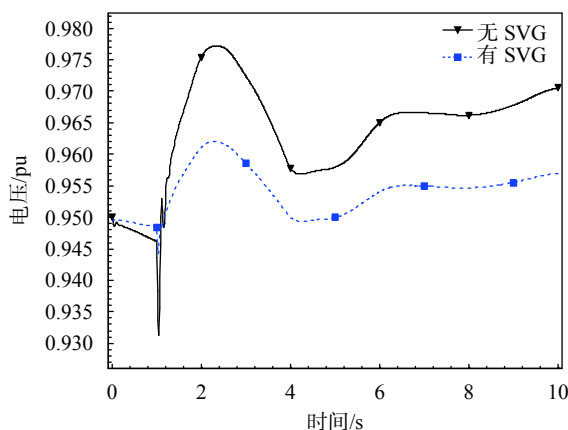


图 16 直流换流母线电压变化曲线

中, 定电压控制方式下的光伏电源可作为无功源支撑电压, 其稳定性优于定功率因数控制方式。

#### 4.2 光伏发电稳定性影响的改善措施

针对以上影响, 需要采取一定方式进行改善。按照《光伏电站接入电力系统技术规定》规定, 需要在光伏电站中配置一定容量的动态无功补偿装置, 本文采用相对先进又应用广泛的静止无功发生器 SVG。在此, 动态无功补偿容性容量为光伏装机容量容量的 25%。

光伏采取定功率因数控制, 功率因数为 1, 直流采取定功率控制, 光伏出力率为 0.8, 分别对光伏有无配置 SVG 两种情况下进行模拟, 分析在相同光伏功率波动下, 光伏 SVG 对直流可靠送出的影响。光照强度波动曲线如图 12 所示, 仿真结果如图 15~图 17 所示。

随着光照强度的下降, 光伏有功出力也会随之减小, 是否配置 SVG 造成的结果大不相同。由图可知, 发生光伏功率波动后, 若采取定功率因数控

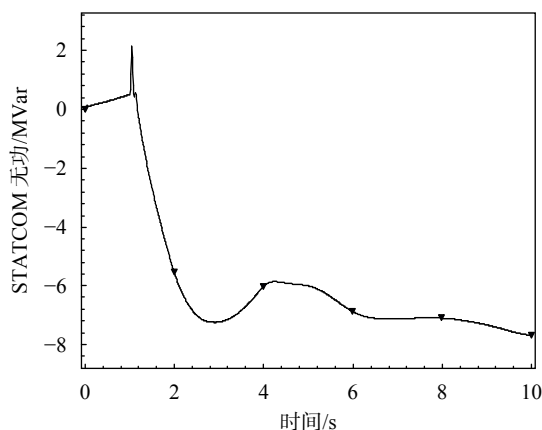


图 17 SVG 输出无功变化曲线

制, 在光伏电站不安装 SVG 时, 由于无功调节能力较弱, 光伏阵列输出电压不能维持在恒定值。由于有功出力减小, 直流换流母线电压随之升高, 此时直流系统增大触发滞后角来保证维持整流侧电压保持不变。

在光伏电站安装 SVG 的前提下, 若发生光伏



功率波动, SVG 将主动吸收无功功率, 动态调节能力有明显的增强, 为电压的快速恢复提供了有利的条件。

## 5 结束语

当光照强度发生波动时, 光伏发电系统侧的直流电压会随之变化, 从而影响换流站输出侧电压的改变, 输送系统的稳定性受到影响。随着电压持续性下降, 光伏电站所吸收的最大无功功率显著上升。相比较而言, 定功率因数控制方式下, 由于光伏送出系统在收到光强扰动的情況下电压降低, 会从电网吸收无功功率, 使其送端系统暂态稳定水平发生显著变化。而采取定电压控制方式, 换流器输出电压变化小于恒功率因数模式, 系统的电压支撑能力稍强, 系统的稳定性更好。在受到光照强度波动等扰动时, 系统应该提供足够的动态无功支撑, 防止并网点电压进一步下降, 从而导致脱网事故的发生。在光伏电站中安装 SVG 等动态无功补偿装置, 动态调节能力有明显的增强, 对于改善光照强度波动下的系统电压恢复有明显作用。

利用 Matlab 建立了光伏发电系统的并网模型, 分析了目前光伏电站中普遍运用的两种无功控制方式: 定功率因数控制方式与定电压控制方式, 对光照波动下两种不同的控制方式产生的不同影响进行了仿真。同时以青海省海南换流站为例, 研究了光照强度波动下, 利用不同控制方式的光伏电站并网影响及措施, 为今后的研究提供借鉴。

## 参考文献

- [1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- [2] 裴玮, 孔力, 齐智平. 光伏发电参与配电网电压调节的控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(11): 1629-1635.
- [3] SHAFIULLAH G M, OO A M T, ALI A B M S, et al. Experimental and simulation study of the impact of increased photovoltaic integration with the grid[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2014, 6(3): 1-20.
- [4] PAATERO J V, LUND P D. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks[J]. Renewable Energy, 2007, 32(2): 216-234.
- [5] WIDEN J, WACKELGARD E, PAATERO J, et al. Impacts of distributed photovoltaics on network voltages: stochastic simulations of three Swedish low-voltage distribution grids[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(12): 1562-1571.
- [6] TAKAHASHI K, NAKANISHI R, OKADA K, et al. Load flow method for distribution system and its application for high penetration of pv generation[C]//Proceeding of the International Conference on Electrical Engineering, 2009
- [7] 田春笋, 蒋小亮, 丁岩, 等. 考虑电压波动和光照变化的并网光伏发电系统暂态特性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(5): 680-685.
- [8] 王琴, 姜丰, 钟清瑶. 光伏电池建模及其输出特性仿真[J]. 电器与能效管理技术, 2011(10): 10-12.
- [9] 陈波, 朱晓东, 朱凌志, 等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012(17): 6-12.
- [10] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.
- [11] 赵伟然, 汪海蛟, 李光辉, 等. 分布式光伏并网电压和功率因数协调控制策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 20-26.
- [12] CHOI J H, KIM J C. Advanced voltage regulation method at the power distribution systems interconnected with dispersed storage and generation systems[C]//2000 Power Engineering Society Summer Meeting, 2002.
- [13] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52.
- [14] 罗晨, 晁勤, 王新刚, 等. 风电场电压-恒功率因数控制方式研究[J]. 电源技术, 2015, 39(8): 1742-1743.
- [15] 常进, 张曾科. 感应电机恒功率因数控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 70-74.
- [16] CRACIUN B I, SERA D, MAN E A, et al. Improved voltage regulation strategies by PV inverters in LV rural networks[C]//IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. IEEE, 2012.
- [17] 肖春, 韩肖清, 王康宁. 并网运行风电机组电压稳定性分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 47-51.
- [18] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [19] 郑超, 李媛, 吕盼, 等. 规模化光伏并网对暂态稳定影响及应对措施[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3403-3411.

(编辑: 商丹丹)