

[光伏组件]

分布式光伏系统中组件运行状态判断

文/杨旭

沈阳航空航天大学电子信息工程学院

设计一种适用于分布式光伏系统的模块化级联结构，各发电模块由光伏组件和独立的功率变换单元构成。当模块有限的调节能力不能完全解决光伏组件失配问题时，利用模块化级联结构对发电模块的下行控制，获取各发电模块对系统发电性能的实际增益，对组件运行状态进行分类判断，并进行系统控制，有助于提高分布式光伏电站的发电能力。

近年来，随着我国光伏新能源产业快速发展，分布式光伏电站占国内光伏电站总装机量的58.5%，已经成为光伏产业的重要组成部分。分布式光伏产业在提高经济效益，改善生态的同时，也产生一些问题。

分布式光伏电站主要是依托商用或民用的建筑物表面建设的小型光伏电站。在电站运行过程中易受邻近建筑物阴影间歇性遮盖、光伏组件老化速率快、污染和温度等复杂因素的影响，导致光伏组件运行差异较大。分布式光伏电站中，单个光伏组件电压较低，一般通过多个光伏组件串联形成高压直流母线后，经汇流逆变输出。但是传统的后级逆变器集中优化结构会产生高额的失配损失。

根据国际标准NEC690.12—2020《组件级自我关断解决方案》标准要求，光伏系统必须具备快速关断的功能。以距离到光伏矩阵外305 mm为界限，在快速关断装置启动后30 s内，界限范围外电压降低到30 V以下，界线范围内电压降低到80 V以下，要求光伏系统对光伏组件具有下行控制能力。

模块化级联结构中，光伏组件和功率变换单元构成最小发电模块，进行组件级输出调整，并实时监测模块的运行状态，在一定程度上可以降低分布式光伏电站中组件运行差异带来的失配损失。但是

当组件运行状态差异较大，各光伏发电模块间仍存在较高失配损失，此时部分模块对母线总发电量产生负面影响。

因此，本文基于模块化级联结构，对分布式光伏系统发电模块中组件的运行状态进行正常状态、低效状态和异常状态三种分类判断，减小光伏组件对系统的负面影响，提高分布式光伏电站的发电量。

模块化级联光伏组串系统

1. 模块化级联结构

模块化级联的光伏组串结构如图1所示，由光伏组件、直流变换器和后级单元组成最小发电模块。其中后级单元是有较高载流能力的肖特基二极管， N 个发电模块通过后级单元级联后形成直流母线。

各个模块相互独立工作，同时当单个模块无法工作时，不能影响其他模块的正常工作，后级单元有两种工作模式：模式1为导通状态，如图2a所示。此时二极管DK处于截止状态，模块K中的光伏组件通过直流变换器为直流母线提供并传输电能；模式2为旁路状态，如图2b所示。此时二极管DK处于导通状态，模块K不为直流母线提供电能；直流母线从二极管流通，模块K的光伏组件及直流变换器旁路。

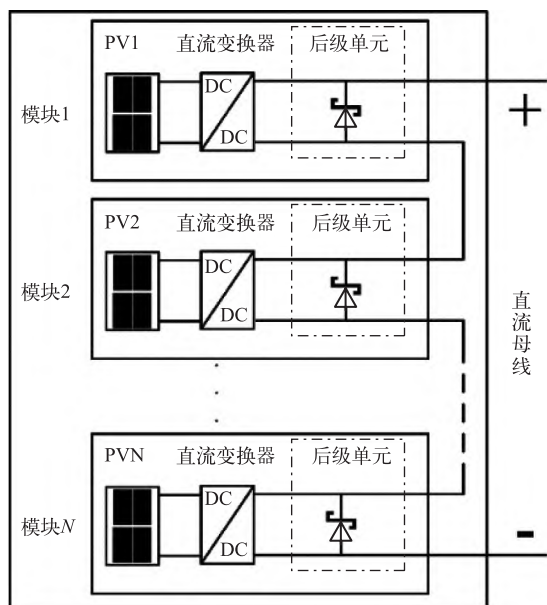
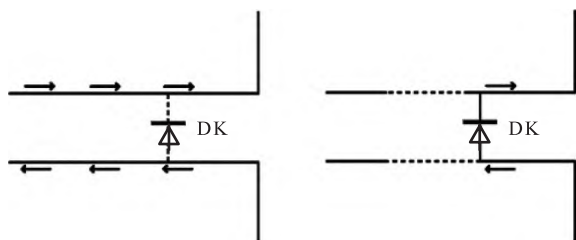


图1 模块化级联结构



(a) 导通状态

(b) 旁路状态

图2 后级单元工作模式

2. 组件运行状态分析

光伏组串中每个光伏组件都有其独特的电特性曲线，同时组串中的光伏组件可能受内在因素和外界环境的影响，功率点处的输出电压和输出电流也不同。如果直接对组串进行集中处理，组串中的部分光伏组件发电量会降低。模块化级联结构对单个光伏组件进行输出调整，将固定的功率点转换成恒功率曲线，模块级联形成的母线在一定的电压调节区间不再存在功率制约。

模块转移特性曲线如图3所示。虚线为光伏组件的 I - V 特性曲线，功率点为 M_0 ，实线为模块中直流变换器调整后的输出 I - V 特性曲线， V_L 、 V_H 分别为直流变换器的输出电压的阈值下限、阈值上限，点 M_1 和 M_2 间曲线为恒功率曲线（即该功率曲线上任意一点对纵横坐标轴做垂线形成的矩形的面积与阴影部分面积相等）。

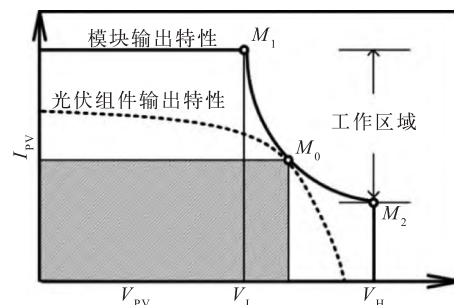


图3 模块转移特性曲线

为计算方便，假设直流变换器无损耗，则式（1）中，模块输出功率 P_{OK} 等于第 K 个模块中光伏组件的最大功率 P_{MPPK} ， V_{PVK} 和 I_{PVK} 是组件功率点的电压和电流，记为 (V_{MPPK}, I_{MPPK}) 对应图3中的点 M_0 处； V_{OK} 和 I_{OK} 是模块的输出电压和输出电流，记为 (V_{OK}, I_{OK}) 对应图中恒功率曲线上任意一点， I_{OK} 范围如式（2）

$$P_{OK} = P_{MPPK} = V_{PVK} I_{PVK} = V_{OK} I_{OK} \quad (1)$$

$$\frac{P_{MPPK}}{V_H} \leq I_{OK} \leq \frac{P_{MPPK}}{V_L} \quad (2)$$

模块化级联结构中各模块输出工作点 (V_{OK}, I_{OK}) ， V_{OK} 累加形成母线电压 V_{BUS} ，各 I_{OK} 相等于母线电流 I_{BUS}

$$\sum_{K=1}^N V_{OK} = V_{BUS} \quad (3)$$

$$I_{O1} = I_{O2} = \dots = I_{OK} = I_{BUS} \quad (4)$$

在满足式（2）和式（4）的情况下，组串中的发电模块均能输出最大功率值，模块内的光伏组件处于正常运行状态。

但是对于单个运行功率较低的光伏组件，经过直流变换器改变输出工作区域，无法同时满足式（2）和式（4），由于木桶效应，母线电流只能以低功率模块的输出电流范围调整，导致母线电流不在其他模块的恒功率工作范围，光伏组串功率大幅度下降。

通过系统对发电模块的导通和旁路控制，获取该模块对分布式光伏系统的发电功率的实际增益，对发电功率较低的光伏组件进行运行状态判断，旁路对发电量有负面影响的光伏组件，有助于提高光伏组串的发电功率。

3. 组件状态判断

光伏组串连接状态如图4所示。 N 个模块构成的光伏组串中，当光伏组件同时发电时，各组件功率

分别为 P_{MPPK} ，组串母线功率为 P_{BUS} 。利用模块化级联结构中系统对模块的下行控制，将其中一个虚线代表的模块 K 旁路后，由该模块后级单元的肖特基二极管提供母线流通过路，主机获取此时各模块中光伏组件的发电功率为 P_{MPPK_C} ，母线功率为 P_{BUS_C} 。

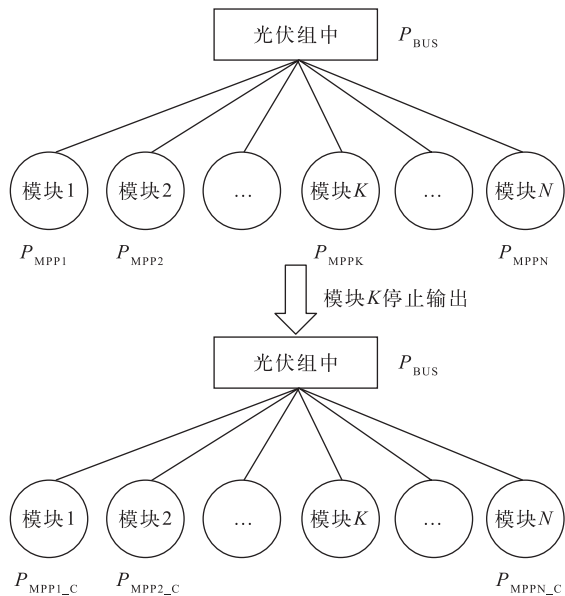


图4 光伏组串连接状态

模块状态见表1。根据 P_{BUS} ， P_{MPPK} ， P_{BUS_C} 三者之间的关系可以判断模块 K 对光伏组串的实际发电增益，并将组件运行状态分为三种情况：正常状态、低效状态和异常状态。其中，正常状态表示光伏组件导通和旁路时，母线功率的变化量等于该光伏组件的发电功率，即发电模块能够和光伏组串进行完全的功率叠加；低效状态表示光伏组件导通和旁路时，母线功率的变化量小于该光伏组件的发电功率，即发电模块能够和光伏组串进行部分功率叠加，发电效率较低；而异常状态表示光伏组件导通时的母线功率小于光伏组件旁路时的母线功率，此时该光伏组件对母线发电量产生负面影响。

表1 模块状态

模块状态	状态条件
正常状态	$P_{BUS} - P_{BUS_C} = P_{MPPK}$
低效状态	$0 \leq P_{BUS} - P_{BUS_C} < P_{MPPK}$
异常状态	$P_{BUS} - P_{BUS_C} < 0$

这种判断母线中光伏组件运行状态的方法，以主机对各个发电模块的下行控制为核心，主机通过控制发电模块的导通和旁路，获取各个发电模

块的运行参数，进行简单的功率对比，不需要复杂的算法分析，就能得到组件的运行状态。主机可以旁路低效状态模块和异常状态模块，提高光伏组件的健康性，提高光伏系统发电功率。

发电模块硬件设计

通过对发电模块的设计要求进行分析，发电模块硬件电路应该包含：光伏组件的输出工作点的调整，光伏组件的运行参数的监测，功率调整控制，与主机的信息和命令交互。

1. 功率电路拓扑选择

由于成本和效率的要求，直流变换电路通常选择无隔离拓扑电路，如Boost、Buck和Buck-Boost。其中，Boost电路通过升压完成工作点位电压的向右移动，适用于组串中光伏组件较少的情况，而Buck电路通过降压完成工作点位电压的向左移动，适用于组串中光伏组件多的情况。而传统Buck-Boost电路虽然可以双向改变工作点位，拥有更广的范围，但输出电压和输入电压极性相反，在控制和安全性上较为复杂。

为不失一般性，本文选用图5所示级联型Buck-Boost拓扑电路作为直流变换器基本电路，在实现双向寻优的同时也能避免传统Buck-Boost电路的输出倒相问题。使用同步整流法，以功率MOSFET开关管代替整流二极管，降低电路损耗。四个开关管通过协调配合，在升压模式、降压模式和直通模式间切换，见表2。

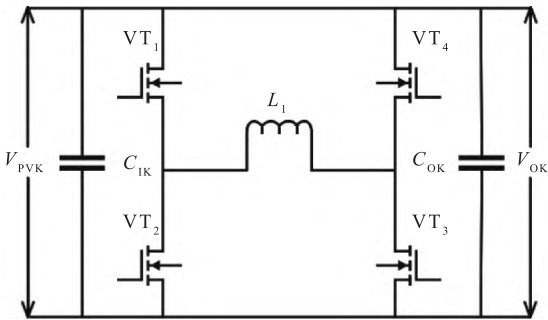


图5 功率电路拓扑

表2 直流变换器工作模式

模式	条件
升压	VT_1 导通 VT_2 截止， VT_3 和 VT_4 交替导通
降压	VT_1 和 VT_2 交替导通， VT_3 截止 VT_4 导通
直通	VT_1 和 VT_4 导通， VT_2 和 VT_3 截止

2. 模块内部系统设计

模块化级联结构下，光伏组串由多个发电模块构成，模块内系统主要包括光伏组件单元和信息采集单元、功率电路单元、控制模组单元和通信模组单元。系统结构如图6所示。信息采集单元获取光伏组件的电压、电流数据并传输给控制模组，控制模组将获取的信息代入功率优化算法，改变四路开关管的PWM占空比，开关驱动电路将PWM信号转换为可以控制直流转换电路的开关驱动信号。同时通信模组单元实时上传模块的运行信息，并接收系统的控制指令。图7为依照图6模块系统，自主设计的模块实物， V_L 、 V_H 分别为20 V、50 V。

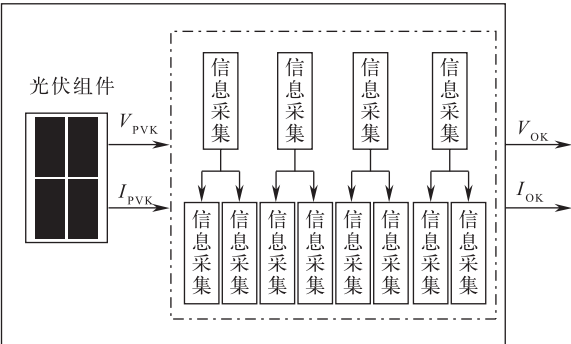


图6 模块系统

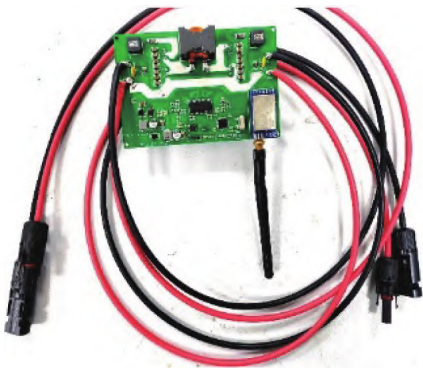


图7 模块实物

试验

为通过试验验证所提出的模块化级联光伏组串结构中的组件运行状态判断方法，搭建试验平台，包含如下部分。

(1) 光伏组件

选用三块LR6-72BP-355M型号光伏组件，具体

参数见表3。并对其中一个受测光伏组件进行不同程度的阴影遮盖，改变该模块的发电功率。

表3 光伏组件参数

光伏组件型号	LR6-72BP-355M
额定最大功率/W	355
额定电压/V	39.2
额定电流/A	9.06
开路电压/V	48.10
短路电流/A	9.54

(2) 发电模块

模块采用本文上节自主设计的发电模块系统，使用MC4接口连接光伏组件形成最小发电模块。

发电功率见表4。以两个不受阴影遮盖的发电模块和一个受不同程度阴影遮盖的发电模块组成的母线同时工作时的发电功率为 P_{BUS} ，其中阴影遮盖的模块发电功率为 P_{MPPK} ，再测得阴影遮盖的发电模块旁路后的母线发电功率 P_{BUS_C} 。

表4 发电功率

阴影遮盖率 (%)	P_{BUS}/W	P_{MPPK}/W	P_{BUS_C}/W	$P_{BUS}-P_{BUS_C}/W$	运行状态
5	843.56	260.35	586.32	257.24	正常
10	789.64	214.67	579.51	210.13	正常
15	759.17	185.15	580.34	178.83	正常
20	715.48	147.35	587.18	128.30	低效
25	654.39	113.69	578.69	75.70	低效
30	563.76	85.47	582.38	-18.62	异常
35	543.41	80.36	576.52	-33.11	异常

从表4中数据可知：受阴影遮盖的光伏组件随着阴影遮盖面积的增大，发电模块自身发电功率减小，当阴影遮盖率在5%~15%之间，阴影遮盖的发电模块导通和旁路时，母线功率变化量基本等于该模块发电功率；阴影遮盖率增大至20%~25%，阴影遮盖的发电模块导通和旁路时，母线功率变化量小于该模块发电功率，说明该发电模块导通时，会降低其他模块的发电功率，总体上母线功率会提高，但是各发电模块不能以最大功率点输出；阴影遮盖率继续增大至30%以上，该发电模块导通时，光伏组串时的母线功率因此下降，系统发电功率降低，此时发电模块对光伏组串发电能力产生负面影响。EA

(收稿日期：2024-01-22)