

# 局部阴影条件下的光伏阵列插空列循环静态重构方法

李峰<sup>1,2</sup>, 孟少飞<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学 物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏沙漠信息智能感知重点实验室, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**对于光伏发电系统,局部阴影会导致光伏组件失配和热斑效应形成,采用重构方法可以降低局部阴影影响,减小损耗,提高输出功率。针对网状(TCT)结构光伏阵列,提出一种插空列循环(ICL)静态重构方法。在典型局部阴影类型和奇偶阵列类型情况下,给出了传统TCT结构和3种静态重构方法优化后的阴影分布图,计算了对应的阵列行电流。在MATLAB/Simulink软件中搭建了TCT结构光伏阵列模型,对所提方法和现有静态重构方法进行仿真和对比分析。结果表明,采用所提方法可使受遮蔽光伏组件在整个阵列中的分布更加均衡,有效提高光伏阵列平均输出功率,明显减少输出特性曲线上的峰值个数。所提方法还具有原理简单、易于实现、成本较低等优势,可为光伏电站建设时阵列结构和重构方法的选择提供参考。

**关键词:**光伏阵列;局部阴影;插空列循环;静态重构;TCT结构

中图分类号:TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107016

## 0 引言

随着常规能源的消耗,寻求可替代的可再生能源并提高其使用效率成为重要研究方向。太阳能是可以轻易获取到的可再生能源,然而局部阴影对光伏发电系统的影响极大,会导致光伏组件失配和热斑效应形成,进而损坏太阳能电池。目前常见的光伏阵列结构有网状TCT(Total Cross Tied)、串并联SP(Series & Parallel)、桥式BL(Bridge-Linked)、蜂巢HC(Honey Comb)等结构。文献[1-3]对光伏阵列的上述4种结构进行比较和仿真,证明了局部阴影条件下,TCT结构优于其他几种结构,其平均输出功率更高,损耗更小,且更稳定。所以在解决由局部阴影带来的光伏组件损耗问题时,如何优化TCT阵列结构更具研究价值。文献[4]在理论上改进空间向量模型,将工作情况更接近的光伏组件连接在一起,使得光伏阵列输出功率得到提高并减小了失配度。这一结论已作为后续光伏阵列重构的主要原则之一。文献[5-6]对光伏阵列多峰最大功率点的特点进行总结,并对最大功率点跟踪算法进行改进,证明局部阴影越复杂,跟踪算法的精度、速度和性能越差。

采用重构方法对光伏阵列各行进行均衡,可为跟踪最大功率点提供便利,为进一步提高光伏发电系统的效率奠定基础。目前光伏阵列重构方法通常分为动态重构和静态重构。文献[7]和[8]分别提出动态电气DES(Dynamic Electrical Scheme)和改进的电路重构MCR(Modified Circuit Reconfiguration)光伏阵列动态重构方法,可以对阵列进行快速、灵活

的重构,有效提高阵列平均输出功率和转换效率,但存在重构电路复杂、成本高等不足。文献[9]提出光伏阵列自适应动态重构方法,利用开关矩阵改变补偿电池组与光伏阵列的连接,以提高光伏阵列在局部受遮蔽时的输出功率。文献[10]提出光伏阵列串联电压源动态重构方法,采用支路串联电压源对光伏阵列支路进行电压补偿,使得每条支路都能工作在最大功率点,提高了光伏阵列的最大输出功率。然而以上重构方法需要在光伏阵列中加入附加补偿设备,无疑会增加系统的复杂程度、功率损耗和工程成本。为了克服以上动态重构方法存在的问题,并考虑到实际工程应用的便利性,静态重构方法逐渐成为研究热点。如文献[11]和[12]分别提出数独拼图SDK(Su Do Ku)静态重构方法和魔方拼图MS(Magic-Square)静态重构方法。对于对称类型光伏阵列,在典型局部阴影条件下,采用以上2种静态重构方法可有效分散局部阴影并提高局部阴影情况下TCT结构行阵列光辐射的匹配度。考虑到不对称类型光伏阵列在实际应用中较为普遍,文献[13]和[14]分别提出“之”字形ZZ(Zig-Zag)和奇偶OEC(Odd Even Configuration)重构方法。这2种针对不对称阵列的静态重构方法均可在一定程度上提高光伏阵列的平均输出功率。

为了解决局部阴影条件下光伏阵列辐照度不均导致功率损耗过大的问题,并进一步提高其平均输出功率,本文针对TCT结构不对称类型光伏阵列,提出一种局部阴影条件下的光伏阵列插空列循环ICL(Interpolation & Column Loop)静态重构方法。通过给出传统TCT结构以及采用3种静态重构方法优化后的阴影分布图、计算对应的阵列行电流、在MATLAB/Simulink软件中搭建TCT结构光伏阵列模型进行仿真分析,证明了相比于ZZ和OEC方法,

收稿日期:2021-01-02;修回日期:2021-05-14

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BDE03003)

Project supported by the Key Research and Development Project of Ningxia Hui Autonomous Region(2020BDE03003)

本文所提方法不仅能够更加均衡地分配局部受遮蔽光伏组件,有效提高行电流之间的匹配度,而且还能够明显提高光伏阵列平均输出功率,减少峰值个数。仿真结果从多方面验证了所提方法的有效性。

## 1 局部阴影情况下TCT结构光伏阵列的输出特性及重构方法

理想情况下光伏组件的输出特性( $P-U$ 特性)曲线为一条单峰值曲线。若整个阵列中所有光伏组件的参数相同,且工作在相同状态下,则通过线路连接和最大功率点跟踪技术便能够得到阵列的最大输出功率。然而实际情况并非如此,光伏阵列的工作状态受到诸多因素影响,其中局部阴影使得受遮蔽光伏组件的光生电流变小。由于光伏组件具有类似二极管的PN结结构,具有反向击穿现象,根据基尔霍夫电流与电压定律,当被遮蔽的光伏组件所能产生的最大电流小于电路的电流时,该光伏组件带负压,成为电路中的负载,并以热量形式消耗其他组件产生的功率,产生热斑效应<sup>[15]</sup>。热斑效应会降低光伏组件输出功率,使其表面温度急剧升高甚至因过热而损坏。为防止出现热斑效应,目前主要采用旁路二极管技术来限制光伏组件两端的负压范围<sup>[16]</sup>。图1(a)为一个 $3 \times 3$ 的TCT结构光伏阵列,由9块光伏组件构成,并将它们按照1—9排序。假定存在4种不同的局部阴影情况:第1种为无组件遮蔽,第2种为组件3受遮蔽,第3种为组件2、3、6受遮蔽,第4种为组件1、2、3、5、6、9受遮蔽。假设正常工作的光伏组件光辐射照度为 $1000 \text{ W/m}^2$ ,受遮蔽的光伏组件光辐射照度为 $500 \text{ W/m}^2$ ,那么可得图1(b)所示4种情况下的 $P-U$ 特性曲线,可知随着受遮蔽组件数量的增加,光伏阵列的输出功率逐渐下降,同时峰值

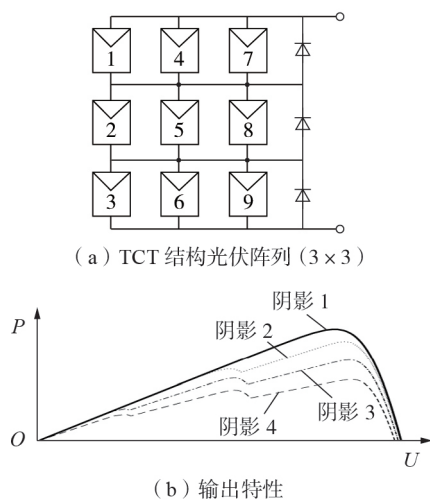


图1 TCT结构光伏阵列及不同阴影下的输出特性( $3 \times 3$ )

Fig.1 TCT structure photovoltaic array and its output characteristics under different shadow types( $3 \times 3$ )

个数逐渐增加。根据以上热斑效应成因可知受遮蔽组件会作为支路的负载,消耗其他正常工作组件所产生的能量,使该支路的旁路二极管导通,受遮蔽组件被短路,进而降低整体阵列的输出功率。此外,光伏阵列中各行光辐射照度不均衡还会导致各支路电流不同,那么当光伏阵列负载电压改变时,就会出现多峰值现象,并且光辐射照度的情况越复杂,峰值个数越多。由此可见,采用旁路二极管无法提升阵列输出功率,而阵列重构方法可以很好地解决此问题。

光伏阵列动态重构方法根据阴影不同变换相应的组件连接方式,以达到提升光伏阵列输出功率的目的。但这种方法需要使用大量传感器定位阴影遮蔽位置,使用开关切换回路提升功率,不仅对重构算法的实时性要求高,而且大量传感器与开关的使用还会增加光伏阵列的功率损耗。因此动态重构方法目前并不适合在实际光伏阵列中推广使用。而静态重构方法无需使用开关和传感器,不改变光伏组件的电气连接,仅改变光伏组件在阵列中的物理位置。通过采用预设阵列重构的方法,可实现阵列在不同局部阴影情况下的优化,且成本较低,易于实现,更适宜在实际光伏阵列中推广使用。

## 2 TCT结构光伏阵列静态重构方法

### 2.1 ZZ和OEC重构方法概述

近年来,针对在工程实际中使用较多的不对称类型TCT结构光伏阵列,多位学者对其静态重构方法展开深入研究。从现有方法的重构效果来看,以下2种静态重构方法具有优势。

1) Vijayalekshmy S等学者在2017年提出ZZ重构方法<sup>[13]</sup>。如图2(a)所示,取6行4列为例进行说明。第1步,将原TCT结构光伏阵列中第1列分为奇数行组件和偶数行组件,奇数行组件在上,偶数行组件在下,并按顺序连接在一起,重构后组件的行排列为1、3、5、2、4、6;第2步,除第1列外,将执行第1步后得到的阵列的其他列分为偶数列和奇数列,偶数列第2列向上循环1行,奇数列第3列向下循环2行,偶数列第4列向上循环3行重新连接,循环后第2列的行排列为3、5、2、4、6、1,第3列的行排列为4、6、1、3、5、2,第4列的行排列为2、4、6、1、3、5;第3步,将原TCT结构光伏阵列中的第1行组件与执行第2步得到的阵列对角线上的组件交换位置,如欲使组件12位于重构后阵列对角线位置,将其与组件52交换位置,得到最终优化阵列第2列的行排列为3、1、2、4、6、5。

2) Karan Y等学者在2020年提出OEC重构方法<sup>[14]</sup>。如图2(b)所示,取6行4列为例进行说明。第1步,与ZZ重构方法相同,则第1列中的6个组件

重构后的行排列为1、3、5、2、4、6;第2步,在第1列的基础上,整体将奇数行和偶数行的组件上下交换位置连接,并向上循环1行得到最终优化阵列新的一列,由于第1列奇数行组件在上,偶数行组件在下,所以第2列偶数行组件在上,奇数行组件在下,连接后行排列为组件2、4、6、1、3、5,将这些组件依次向上循环1行得到第2列最终行排列为组件4、6、1、3、5、2,第3列的行排列为5、2、4、6、1、3,第4列的行排列为1、3、5、2、4、6。

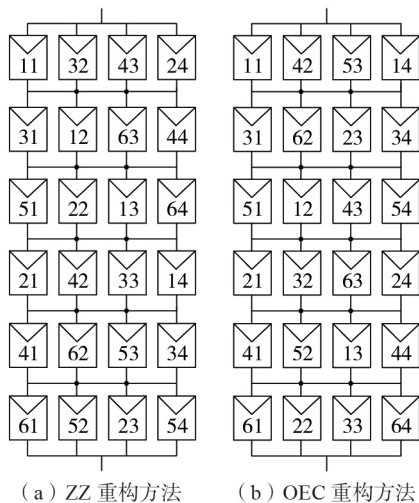


图2 ZZ和OEC重构方法

Fig.2 ZZ and OEC reconstruction methods

## 2.2 局部阴影情况下的光伏阵列ICL静态重构方法

TCT结构光伏阵列静态重构应遵循以下2条原则:①不改变光伏组件所在列的位置;②将同行光伏组件尽可能多地分散到不同行中,从而最大限度地均衡阵列每行光辐射照度,并简化模块之间的连接。ZZ重构方法虽然能够分散原TCT结构光伏阵列中受遮蔽的组件,但不能达到完全分散的目的。例如图2(a)中,经过静态重构后的组件52和组件54依然处于同一行位置,无法更大程度地均衡各行光辐射照度。OEC重构方法为尽可能在小阵列中分散光伏阵列的行组件,循环过快。例如图2(b)中,经过静态重构后第4列和第1列的行排列相同,若局部阴影超过4列,则无法实现阵列优化的效果。

由以上分析可知,ZZ重构方法列循环较好,但同列光伏组件分散不够开,若采用插空方式,则能够更均匀地分散同列光伏组件,而使用OEC重构方法,可将同列光伏组件分散得较为均匀,但列之间循环较快。因此,本文综合ZZ和OEC重构方法各自的优点,将插空方式与列循环方式相结合,提出一种局部阴影情况下的光伏阵列ICL静态重构方法。该方法不仅能够获得更佳的重构效果,而且还具有对奇数行和偶数行阵列均适用的优点。考虑到奇数行和偶数行光伏阵列采用ICL方法得到的优化结果不

同,以下将分别进行讨论(为方便起见,奇数行阵列取5行6列,偶数行取6行7列)。

### 2.2.1 针对奇数行阵列的ICL静态重构方法

对于奇数行阵列的ICL静态重构方法,以图3(a)左图所示的5行6列光伏阵列为例,主要采用以下2个步骤实现。第1步,将5行阵列第1列的所有行分为前3行和后2行两部分,即1、2、3行和4、5行,并将后2行依序逐个插入前3行之间,即4、5行依次插入1、2、3行之间,则最终优化后第1列行排序为1、4、2、5、3,如图3(a)右图所示;第2步,其余每列依次为前1列的所有行向下循环1行,得到第2列的行排序为3、1、4、2、5,如图3(a)右图所示,剩余4列在第2列基础上按照第2步方法排列。最终经过ICL方法重构后的5×6光伏阵列的实际电气连接图见附录A图A1。

### 2.2.2 针对偶数行阵列的ICL静态重构方法

对于偶数行阵列的ICL静态重构方法,以图3(b)左图所示的6行7列光伏阵列为例,主要采用以下2个步骤实现。第1步,将6行阵列第1列的所有行分为前3行和后3行两部分,即1、2、3行和4、5、6行,并将后3行依序逐个插入前3行之间,即4、5、6行依次插入1、2、3行中间,则最终优化后第1列的行排序为1、4、2、5、3、6,如图3(b)右图所示;第2步,其余每列依次为前一列的所有行向下循环1行,得到第2列的行排序为6、1、4、2、5、3,如图3(b)右图所示,剩余5列在第2列基础上按照第2步方法排列。最终经过ICL方法重构后的6×7光伏阵列实际电气连接图见附录A图A2。

## 3 局部阴影情况下光伏阵列的性能对比分析

局部阴影造成的光伏组件输出功率损耗主要取决于阵列配置、阴影类型和受遮蔽组件的物理位置。因此,分别针对奇数行和偶数行阵列,选取短窄型、长宽型、长窄型和对角线型4种典型阴影情况,绘制传统TCT结构以及采用ZZ、OEC和本文提出的ICL重构方法优化后的阴影分布图。为了便于进行对比分析,将这些分布图采用表格的方式列出,其中短窄型和长宽型局部阴影情况下的结果见表1,长窄型和对角线型局部阴影情况下的结果见附录A表A1。设定白色模块为正常工作状态下的光伏组件,光辐射照度为 $1000 \text{ W/m}^2$ ,灰色模块为受遮蔽的光伏组件,光辐射照度为 $500 \text{ W/m}^2$ 。可见,采用ZZ、OEC和ICL重构方法优化后均可将原TCT阵列中聚集在一起的局部阴影分散到不同行中。特别对于短窄型阴影情况下的奇数行和偶数行阵列、长宽型阴影情况下的奇数行阵列,相比于ZZ和OEC方法,采用ICL方法进行重构后,受遮蔽光伏组件在整个阵列中的分布更加均衡,更有利于减小行间局部最大功

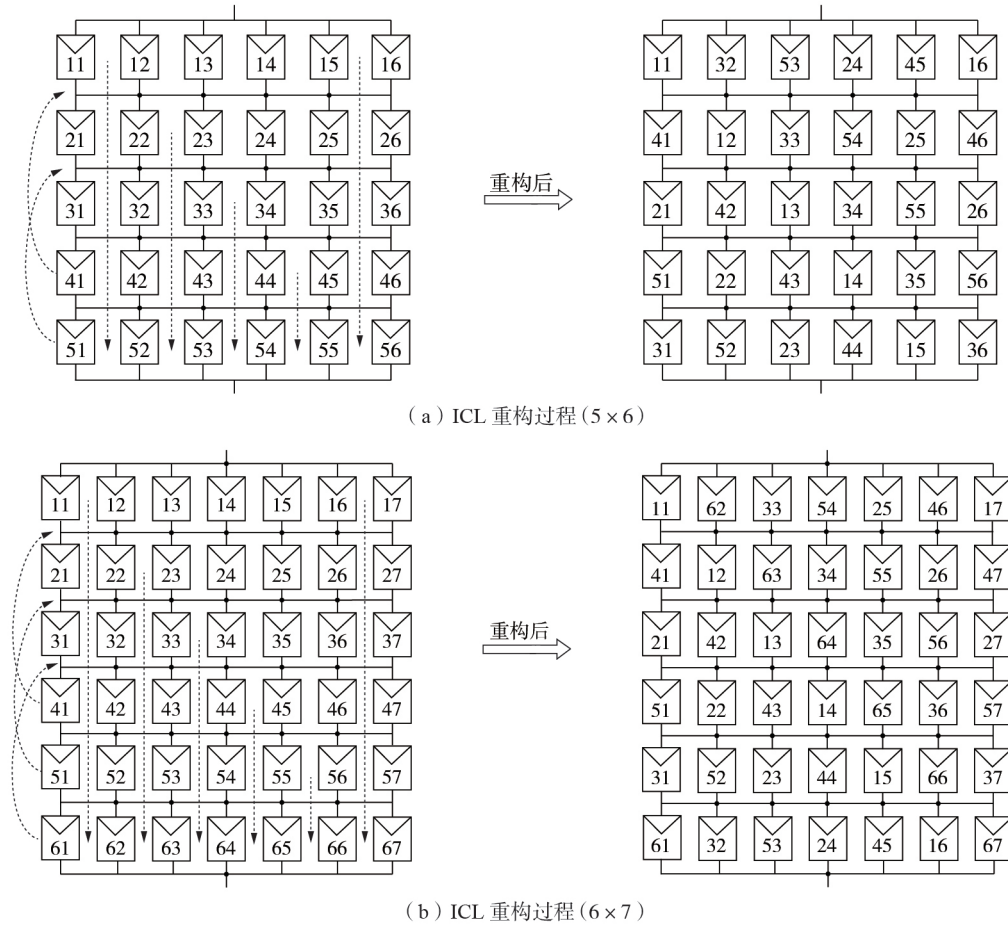


图 3 ICL 重构过程

Fig.3 Reconstruction process of ICL method

表 1 不同情况下采用各种重构方法优化后的阴影分布

Table 1 Shadow distribution optimized by various reconstruction methods in different situations

情况	奇数行阵列				偶数行阵列			
	TCT	ZZ	OEC	ICL	TCT	ZZ	OEC	ICL
短窄型阴影								
长宽型阴影								

率差额,提高行电流之间的匹配度。

短窄型和长宽型局部阴影情况下,采用各种重构方法优化后的行电流分布见表 2,长窄型和对角线型局部阴影情况下的结果见附录 A 表 A2。表中,光伏阵列的行电流可以由式(1)确定。

$$I_m = \sum_{k=1}^n \frac{G_{m,k}}{G_{STC}} I_{STC} \quad (1)$$

其中,  $I_m$ 、 $G_{m,k}$  ( $k=1,2,\dots,n$ ) 分别为实际情况下光伏阵列  $m$  行的输出电流、 $m$  行  $k$  列光伏组件的光辐射照

度;  $G_{STC}$ 、 $I_{STC}$  分别为标准条件下光伏组件的光辐射照度(取为  $1000 \text{ W/m}^2$ )、输出电流。

此外,光伏阵列的行电压可以由式(2)确定<sup>[17]</sup>。

$$V_m = V_{m,1} = V_{m,2} = \dots = V_{m,n} \quad (2)$$

其中,  $V_m$  为光伏阵列  $m$  行的输出电压;  $V_{m,k}$  ( $k=1,2,\dots,n$ ) 为  $m$  行  $k$  列光伏组件的输出电压。

由表 2 可知,采用 3 种重构方法优化后均可将同一行受遮蔽的光伏组件分配到不同行中,有效提高了行电流之间的匹配度。尤其对于短窄型阴影情况

表2 不同情况下采用各种重构方法优化后的  
行电流分布

Table 2 Row current distribution optimized by various  
reconstruction methods in different situations

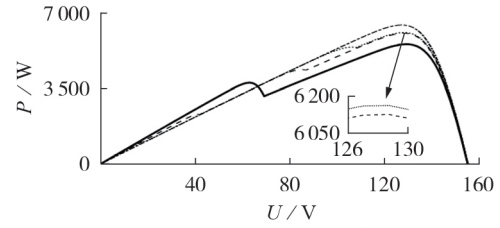
情况	$m$	$I_m/A$			
		TCT	ZZ	OEC	ICL
短窄型阴影情况下的 奇数行阵列	1	$6I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	2	$6I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5I_{STC}$
	3	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5I_{STC}$
	4	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$
	5	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5I_{STC}$
短窄型阴影情况下的 偶数行阵列	1	$7I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$
	2	$7I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6.5I_{STC}$	$6I_{STC}$
	3	$7I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$6I_{STC}$
	4	$5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6.5I_{STC}$	$6I_{STC}$
	5	$5I_{STC}$	$6.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$6I_{STC}$
	6	$5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$
长宽型阴影情况下的 奇数行阵列	1	$6I_{STC}$	$5I_{STC}$	$4I_{STC}$	$4.5I_{STC}$
	2	$6I_{STC}$	$4I_{STC}$	$5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$
	3	$3.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$
	4	$3.5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$4I_{STC}$	$4.5I_{STC}$
	5	$3.5I_{STC}$	$4I_{STC}$	$5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$
长宽型阴影情况下的 偶数行阵列	1	$7I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	2	$7I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	3	$7I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	4	$4I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	5	$4I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	6	$4I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$5.5I_{STC}$

下的奇数行阵列、偶数行阵列以及长宽型阴影情况下的奇数行阵列,采用ICL重构方法优化后,行电流种类均少于ZZ和OEC方法,可见采用ICL重构方法,不仅可使同一行受遮蔽的光伏组件分配到不同行中,而且还可实现更均匀的行电流分布。

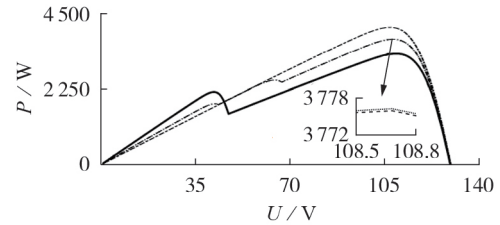
采用MATLAB/Simulink软件搭建TCT结构光伏阵列模型,针对典型阴影情况和奇偶光伏阵列类型,分别采用ZZ、OEC和ICL重构方法进行仿真和对比分析。为了方便起见,默认所有光伏组件均工作在25℃的条件下。采用BYD公司生产的由36个太阳能电池组成的光伏组件,型号为BYD(Huizhou) Battery BYD 140P6-18,主要参数见附录A表A3。

图4为采用不同重构方法对TCT结构光伏阵列优化后的输出特性。由表2可知,对于短窄型阴影情况下的偶数行TCT结构光伏阵列,其行电流类型有 $7I_{STC}$ 和 $5I_{STC}$ 这2种,所以在图4(a)所示的输出特性曲线上对应应有2个峰值,且因行电流差别过大导致平均输出功率(峰值输出功率)最低;采用ZZ和OEC重构方法优化后均有3种行电流,所以在输出特性曲线上均对应应有3个峰值,采用2种重构方法优化后阵列行电流类型均有 $5.5I_{STC}$ 、 $6I_{STC}$ 和 $6.5I_{STC}$ 这3种,其中采用ZZ重构方法对应的个数分别为1、4、1,采用OEC重构方法优化后对应的个数分别为2、2、2。而采用ICL重构方法优化后,光伏阵列所有行电流均为 $6I_{STC}$ ,因此在输出特性曲线上仅有1个峰值,并

且相较于TCT结构光伏阵列以及ZZ和OEC重构方法而言,其平均输出功率(峰值输出功率)最大。



(a) 短窄型阴影情况下偶数行阵列的输出特性



(b) 长宽型阴影情况下奇数行阵列的输出特性

— TCT, — ZZ, ---- OEC, -·-·- ICL

图4 采用不同重构方法对TCT结构光伏阵列  
优化后的输出特性

Fig.4 Output characteristics of TCT structure  
photovoltaic array after optimization by using  
different reconstruction methods

同样地,由表2可知,对于长宽型阴影情况下的奇数行TCT结构光伏阵列,其行电流类型有 $3.5I_{STC}$ 和 $6I_{STC}$ 这2种,数值差别大,所以在图4(b)所示的输出特性曲线上对应应有2个峰值且平均输出功率(峰值输出功率)最低。采用ZZ和OEC重构方法优化后得到的阵列行电流类型均为 $4I_{STC}$ 、 $4.5I_{STC}$ 和 $5I_{STC}$ 这3种,所以它们的输出特性曲线也近似相同。由表2可知,采用ICL重构方法优化后光伏阵列所有行电流均为 $4.5I_{STC}$ ,因此在输出特性曲线上仅有1个峰值,并且相较于TCT结构光伏阵列以及ZZ和OEC重构方法而言,其平均输出功率(峰值输出功率)最大。

表3为典型阴影情况下不同重构方法优化后的阵列输出最大功率值 $P_{max}$ 、阵列最大功率点对应的电压值 $U_m$ 和阵列峰值个数 $N_p$ 。分析表3可知:①在典型阴影和奇偶光伏阵列情况下,相比于TCT结构光伏阵列,采用ICL重构方法均能很好地提升光伏阵列的平均输出功率(峰值输出功率),峰值输出功率提升率可达0.48%~31.01%,特别对于长窄型阴影情况下的偶数行阵列、短窄型阴影情况下的奇数行阵列、短窄型阴影情况下的偶数行阵列、长宽型阴影情况下的奇数行阵列和长宽型阴影情况下的偶数行阵列,峰值输出功率提升率分别为8.58%、9.31%、16.02%、24.32%和31.01%,效果尤为显著;②相较于ZZ和OEC重构方法,采用ICL重构方法优化后,光伏阵列的峰值功率在多数情况下明显更高,其中在5种情况下高于ZZ重构方法,在3种情况下与ZZ

表 3 不同情况下各种重构方法优化后的  $P_{\max}$ 、 $U_m$  和  $N_p$ Table 3 Values of  $P_{\max}$ ,  $U_m$  and  $N_p$  after optimization by various reconstruction methods in different situations

情况	TCT			ZZ			OEC			ICL		
	$P_{\max}/W$	$U_m/V$	$N_p$	$P_{\max}/W$	$U_m/V$	$N_p$	$P_{\max}/W$	$U_m/V$	$N_p$	$P_{\max}/W$	$U_m/V$	$N_p$
短窄型阴影情况下的奇数行阵列	4210	108	2	4255	108	3	4255	108	3	4602	107	2
短窄型阴影情况下的偶数行阵列	5613	129	2	6160	127	3	6125	127	3	6512	127	1
长宽型阴影情况下的奇数行阵列	3327	109	2	3774	109	3	3774	109	3	4136	108	1
长宽型阴影情况下的偶数行阵列	4569	131	2	5986	128	1	5572	128	2	5986	128	1
长窄型阴影情况下的奇数行阵列	4194	107	3	4214	107	3	4214	107	3	4214	107	3
长窄型阴影情况下的偶数行阵列	5593	129	4	5652	129	4	6073	127	2	6073	127	2
对角线型阴影情况下的奇数行阵列	4215	108	3	4215	108	3	4239	107	2	4239	107	2
对角线型阴影情况下的偶数行阵列	6133	127	3	6170	127	3	6170	127	3	6170	127	3

重构方法相同,另外在 4 种情况下高于 OEC 重构方法,在 4 种情况下与 OEC 重构方法相同;③除极个别情况外,采用 ICL 重构方法进行优化,输出特性曲线上的峰值个数均最少。综上所述,在典型阴影和奇偶光伏阵列情况下,采用 ICL 重构方法可有效提高阵列的平均输出功率(峰值输出功率),并减少输出特性曲线峰值个数。

#### 4 结论

本文针对不同典型阴影和奇偶阵列情况,给出了传统 TCT 结构以及采用 ZZ、OEC 和 ICL 重构方法优化后的阴影分布图,并计算了对应的阵列行电流,可知在多数情况下采用 ICL 重构方法不仅可使受遮蔽光伏组件在整个阵列中的分布更加均衡,而且有助于减少阵列中行电流的种类,有效提高了行电流之间的匹配度。在 MATLAB/Simulink 软件中搭建了 TCT 结构光伏阵列模型,分别采用 ZZ、OEC 和 ICL 重构方法进行仿真和对比分析,结果表明,在多数情况下,采用 ICL 重构方法优化,不仅可有效提高光伏阵列的平均输出功率,而且可明显减少输出特性曲线上的峰值个数,为后续寻找全局最大功率点提供了便利。此外,采用 ICL 重构方法对传统 TCT 结构光伏阵列进行优化,原理简单,易于实现,成本较低,可为光伏电站建设时的阵列结构和重构方法的选择提供参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] 丁明,陈中. 遮阴影响下的光伏阵列结构研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):1-5.  
DING Ming, CHEN Zhong. Reconfiguration of partially shaded photovoltaic array[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10):1-5.
- [2] 丁坤,顾鸿焯,陈富东,等. 非均匀辐照下 TCT 结构光伏阵列输出特性研究[J]. 可再生能源,2016,34(4):500-504.  
DING Kun, GU Hongye, CHEN Fudong, et al. Research on output characteristics of TCT structure photovoltaic array under non-uniform irradiation[J]. Renewable Energy, 2016, 34(4): 500-504.
- [3] 卢泉,韦雪菲,张玉,等. 局部阴影情况下不同结构光伏阵列输

出特性研究[J]. 太阳能学报,2019,40(4):1003-1010.

LU Quan, WEI Xuefei, ZHANG Yu, et al. Research on output characteristics of photovoltaic arrays with different structures under partial shadow[J]. Journal of Solar Energy, 2019, 40(4): 1003-1010.

- [4] 李志刚,田盛. 局部阴影下光伏阵列结构优化[J]. 太阳能学报,2016,37(12):2999-3004.  
LI Zhigang, TIAN Sheng. Optimization of photovoltaic array structure under partial shadow[J]. Journal of Solar Energy, 2016, 37(12):2999-3004.
- [5] 戚军,翁国庆,章旌红. 光伏阵列多峰最大功率点分布特点研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):132-137.  
QI Jun, WENG Guoqing, ZHANG Jinghong. Multi-peak MPP distribution of photovoltaic array[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3):132-137.
- [6] 孙博,梅军,郑建勇. 局部阴影条件下最大功率点跟踪改进算法[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):115-119.  
SUN Bo, MEI Jun, ZHENG Jianyong. Improved MPPT method under partial shading conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1):115-119.
- [7] PIETRO R, ROBERTO C, MARZIA C, et al. Optimization of photovoltaic energy production through an efficient switching matrix[J]. Energy Water Environ, 2013, 1(3):227-236.
- [8] HUANG Yupei, CHEN Xiang, YE Chengen. Implementation of a modified circuit reconfiguration strategy in high concentration photovoltaic modules under partial shading conditions [J]. Solar Energy, 2019, 194:628-648.
- [9] 刘艳莉,庞志超,程泽. 基于遮荫度模型的光伏阵列自适应重构系统[J]. 电力电子技术,2010,44(6):48-50.  
LIU Yanli, PANG Zhichao, CHENG Ze. An adaptive reconfiguration system of photovoltaic array based on shading degree model[J]. Power Electronics, 2010, 44(6):48-50.
- [10] 朱文杰,荣飞. 局部阴影条件下基于支路串联电压源的光伏阵列结构设计[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):96-103.  
ZHU Wenjie, RONG Fei. Structural design of photovoltaic arrays based on series-voltage source under partial shading[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36):96-103.
- [11] RANI B, ILANGO G, NAGAMANI C. Enhanced power generation from PV array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku configuration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3):594-601.
- [12] YADAV A, PACHAURI R, CHAUHAN Y, et al. Performance enhancement of partially shaded PV array using novel shade dispersion effect on magic-square puzzle configuration[J]. Solar Energy, 2017, 144:780-797.
- [13] VIJAYALEKSHMY S, BINDU G, IYER S. A novel Zig-Zag scheme for power enhancement of partially shaded solar arrays [J]. Solar Energy, 2016, 135:92-102.
- [14] YADAV K, KUMAR B, SWAROOP D. Mitigation of mismatch power losses of PV array under partial shading condition

- using novel odd even configuration[J]. Energy Reports, 2020, 6:427-437.
- [15] 伊纪禄, 刘文祥, 马洪斌, 等. 太阳能电池热斑现象和成因的分析[J]. 电源技术, 2012, 36(6):816-818.  
YI Jilu, LIU Wenxiang, MA Hongbin, et al. Analysis of solar cell hot spot phenomenon and cause[J]. Power Technology, 2012, 36(6):816-818.
- [16] 张明锐, 陈喆旸. 一种基于最小均衡差的光伏阵列重构方案[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2):33-38.  
ZHANG Mingrui, CHEN Zheyang. Reconfiguration scheme of photovoltaic array based on minimum equalization difference[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2):33-38.
- [17] SRINIVASAN A, DEVAKIRUBAKARAN S, MEENAKSHI B.

Mitigation of mismatch losses in solar PV system-two-step reconfiguration approach[J]. Solar Energy, 2020, 206:640-654.

#### 作者简介:



李峰

李峰(1979—), 男, 宁夏银川人, 副教授, 博士, 主要研究方向为新能源发电技术、电力电子与电子传动(E-mail: peakily@126.com);

孟少飞(1997—), 男, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术(E-mail: 106117154@qq.com)。

(编辑 李莉)

## ICL static reconstruction method of photovoltaic array under partial shadow condition

LI Feng<sup>1,2</sup>, MENG Shaofei<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Electrical and Electronic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Ningxia Key Lab of Intelligent Sensing for Desert Information, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** For photovoltaic power generation system, partial shadow leads to mismatch of photovoltaic modules and formation of hot spot effect. Using reconstruction method can reduce the impact of partial shadow and the losses, and increase the output power. For the TCT (Total Cross Tied) structure photovoltaic array, an ICL (Interpolation & Column Loop) static reconstruction method is proposed. In the case of typical partial shadow types and odd-even array types, the shadow distribution diagram of the traditional TCT structure and the optimized diagrams with three static reconstruction methods are given, and the corresponding array row currents are calculated. A TCT structure photovoltaic array model is built in MATLAB/Simulink software, and the proposed method and the existing reconstruction methods are simulated and compared. The results show that, the proposed method can make the distribution of shaded photovoltaic modules in the entire array more balanced, which effectively increases the average output power of photovoltaic array, and significantly reduces the number of peaks on the output characteristic curve. The proposed method also has the advantages of simple principle, easy implementation and low cost, which can provide reference for the selection of array structure and reconstruction method during the construction of photovoltaic power plants.

**Key words:** photovoltaic arrays; partial shadow; ICL; static reconstruction; TCT structure

附录 A

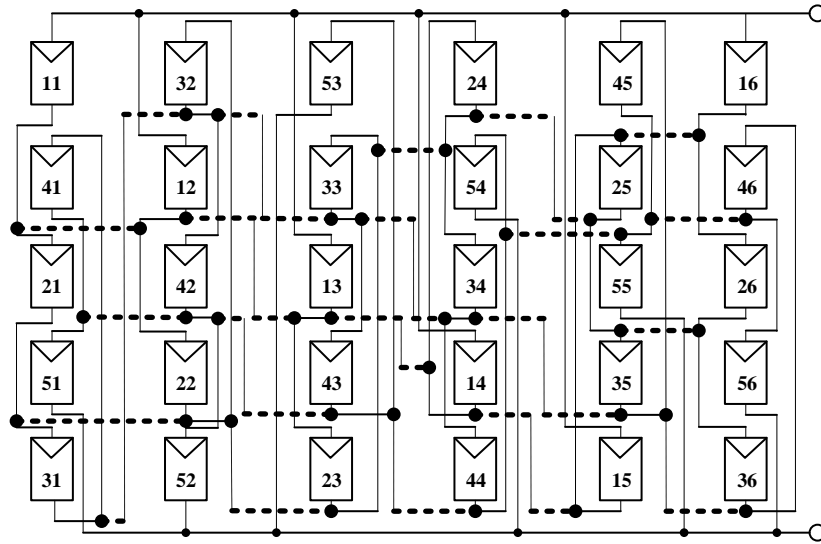


图 A1 采用 ICL 法重构的电气连接图(5×6)

Fig.A1 Electrical connection diagram reconstructed by ICL method (5×6)

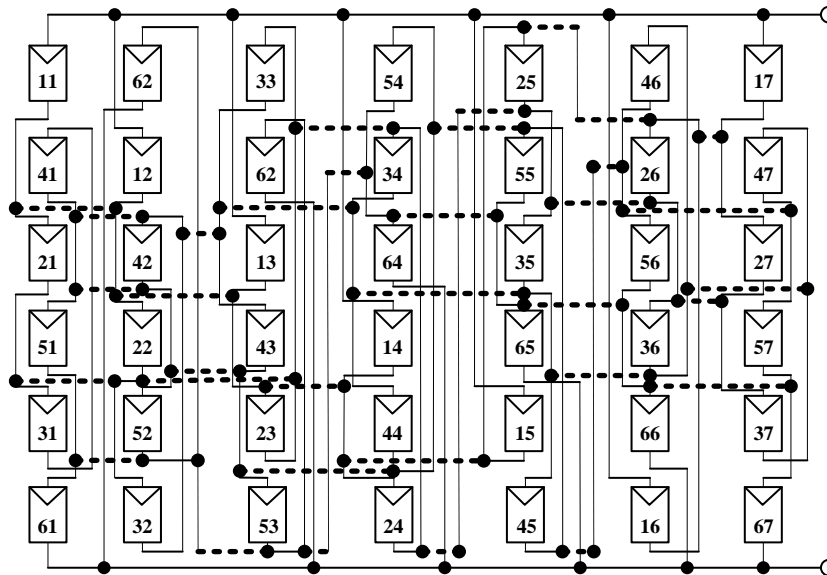


图 A2 采用 ICL 法重构的电气连接图(6×7)

Fig.A2 Electrical connection diagram reconstructed by ICL method (6×7)



表 A1 不同情况下采用各种重构方法优化后的阴影分布

Table A1 Shadow distribution optimized by various reconstruction methods in different situations

情况	奇数行阵列				偶数行阵列			
	TCT	ZZ	OEC	ICL	TCT	ZZ	OEC	ICL
长窄型阴影								
对角线型阴影								

表 A2 不同情况下采用各种重构方法优化后的行电流分布

Table A2 Row current distribution optimized by various reconstruction methods in different situations

情况	$m$	$I_m / A$			
		TCT	ZZ	OEC	ICL
长窄型阴影情况下的奇数行阵列	1	$6I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	2	$5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$
	3	$4.5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$
	4	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$
	5	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5I_{STC}$
长窄型阴影情况下的偶数行阵列	1	$7I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$
	2	$6.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$
	3	$6I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	4	$5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	5	$5I_{STC}$	$6.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
	6	$5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$
对角线型阴影情况下的奇数行阵列	1	$5.5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5I_{STC}$
	2	$5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5I_{STC}$
	3	$4.5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$
	4	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$4.5I_{STC}$	$5I_{STC}$
	5	$5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$5I_{STC}$	$5I_{STC}$
对角线型阴影情况下的偶数行阵列	1	$7I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6.5I_{STC}$
	2	$6.5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6.5I_{STC}$	$6I_{STC}$
	3	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$
	4	$5.5I_{STC}$	$6.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$	$6.5I_{STC}$
	5	$5.5I_{STC}$	$6.5I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$
	6	$6I_{STC}$	$6I_{STC}$	$6.5I_{STC}$	$5.5I_{STC}$

表 A3 BYD (Huizhou) Battery BYD 140P6-18 的光伏组件参数

Table A3 BYD (Huizhou) Battery BYD 140P6-18 PV module parameters

参数	数值
STC 条件下最大输出功率 $P_{\max}$	140 W
最大功率点电压 $U_{\text{mp}}$	18 V
最大功率点电流 $I_{\text{mp}}$	7.78 A
开路电压 $U_{\text{op}}$	23.4 V
开路电流 $I_{\text{sc}}$	9.1 A
电压温度系数	-0.32 °C
电流温度系数	0.04 °C