

一种基于最小均衡差的光伏阵列重构方案

张明锐¹, 陈喆旸²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 国网上海市电力公司松江供电公司, 上海 201600)

摘要:对于光伏阵列而言,局部阴影是其最常见的导致输出功率损失的原因,由局部阴影导致的功率损失不仅与阴影面积相关,更多地取决于阴影的分布位置以及光伏阵列中各光伏板之间的连接方式。为了提升阴影条件下光伏阵列的输出功率,提出了一种基于网式连接(TCT)结构的光伏阵列重构方法,重点研究了如何根据不同的阴影条件,合理重构光伏板之间的连接关系。所提方法将光伏阵列分为固定结构和自由结构两部分,局部阴影条件下遵循均衡差原则,根据不同的阴影模式调整自由结构部分光伏板的连接方式,确定最佳的连接关系。仿真结果表明,在多种阴影条件下,相较于重构前,重构后光伏阵列的输出功率明显提高,且 $P-U$ 特性曲线更趋向于呈现单峰值特性,更有利于最大功率点跟踪控制的实现。

关键词:光伏阵列;局部阴影;阵列重构;TCT结构;均衡差

中图分类号:TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101020

0 引言

随着光伏度电成本的逐步下降,光伏系统的应用场景越来越广泛,光伏发电在电力系统中扮演的角色也越来越重要^[1-3]。光伏系统通常排布在室外开阔的空间,当周围建筑物对阵列造成阴影遮挡,或灰尘及云层使得阵列表面光照不均时,称光伏阵列处于局部阴影条件PSC(Partial Shading Condition)下。阴影条件通常会给光伏系统带来多个负面影响,不但会使光伏阵列的实际输出功率下降,还会带来热斑效应从而损伤光伏电池^[4]。

为了削弱阴影效应对光伏系统的影响,通常为多个光伏电池并联旁路二极管,当单个或多个光伏电池处于阴影条件下时,电池两端的负电压使得旁路二极管从反向偏置状态转换为导通状态,从而使光伏电池处于被短路的状态,断绝了热斑效应的出现^[5-6]。但旁路二极管的应用不仅会带来额外的导通损耗和旁路损耗,还会导致光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线呈现多峰值特征^[7-8]。为了解决这一问题,通常采用以下2种方案:①通过最大功率点跟踪MPPT(Maximum Power Point Tracking)算法确保光伏阵列可以准确输出最大功率值,但由于阵列的连接方案是固定的,极严重的阴影或故障仍会降低整体的输出功率,且在复杂的阴影条件下光伏阵列对最大功率点跟踪算法的性能有较高的要求^[9-10],可见该方案具有一定的局限性;②通过光伏阵列的重构,改变阴影条件下阵列的 $P-U$ 特性,一方面可以提高最大功率值,另一方面可以使得 $P-U$ 特性曲线重回单峰值特性,为最大功率点跟踪算法的实现提供便利。相较于方案①,方案②的适用范围更广,能为光伏系统带来更高的功率收益^[11-12],尤其在当前分布式光

伏发电越来越盛行的背景下,光伏阵列重构方法的实现越来越简便,成本也得到相应的降低,因此本文的研究重点是光伏阵列的重构设计方法。

文献[13]利用开关矩阵调整光伏组件的串并联关系,以适应阴影分布并减少遮挡的影响。但该方法对整个光伏阵列进行重构,需要大量的开关器件,且开关器件动作次数较多;另外,还需计算每种连接关系下的输出功率并进行对比,计算量较大,从而导致阵列重构时间较长。文献[14]建议将光伏阵列划分为多个子模块,使用多台最大功率点跟踪器来实现最大功率点跟踪,最小化局部阴影对整个系统的影响。虽然该方法有效地增加了总的输出功率,但所需的设备成本也会相应增加。文献[15]提出了一种名为Su Do Ku的重构方法,但该方法实施较为复杂,且只能适用于 9×9 的光伏阵列,所以实用价值较低。文献[16]提出了一种基于模型重构算法的自适应太阳能光伏阵列,通过冒泡排序方法确定阵列的自适应部分与固定部分之间的匹配关系,但在最终确定阵列最优结构之前需要进行多次开关动作并获取阵列每一行的电压,因而算法所需时间较长。

本文提出了一种基于网式连接TCT(Total Cross Tied)结构的光伏阵列重构方法,将光伏阵列划分为固定结构和自由结构两部分,仅需配置1台最大功率点跟踪器,且不需要大量的连接开关。当光伏组件阵列出现局部遮光或故障时,遵循最小均衡差原则,根据阴影模式的不同,调整自由结构部分光伏板的连接方式,从而增加系统的输出功率,并使得光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线更趋向于呈现单峰值特征。

1 光伏阵列的静态结构

局部阴影带来的功率损失并不仅仅与阴影面积相关,更取决于光伏阵列的结构以及阴影模块在阵

列中的位置。光伏阵列采用的静态结构不同,则其输出特性也会不同。串并联 SP(Series-Parallel)结构、TCT 结构以及桥式 BL(Bridge-Linked)结构是光伏阵列最常见、应用最广泛的 3 种静态结构^[17-19],如附录中图 A1 所示。

在光伏阵列辐照度均匀的条件下,基于 SP、TCT 以及 BL 结构的光伏阵列具有相同的输出特性;但在 PSC 下,3 种结构中的 SP 结构对 PSC 最为敏感,其功率损失也最为严重。文献[20]在 6 种测试环境下对 3 种拓扑结构进行了研究,结果显示,局部阴影对基于 TCT、SP 和 BL 结构的光伏阵列都有较为严重的影响,但在多种测试环境下,基于 TCT 结构的光伏阵列均有更优异的输出特性,最大功率的平均值与 SP、BL 结构相比分别提高了 7.8%、2.4%。可见,在 3 种最常见的拓扑结构中,TCT 结构的性能最优,因此本文以 TCT 结构为基础进行重构方案的设计。

2 TCT 结构下的最小均衡差原理

对于光伏阵列而言,串联结构是导致阴影条件下功率损失最主要的原因,本文选取的 TCT 结构在本质上是将 n 个光伏模块并联组成 1 个并联模块,再将 m 个并联模块串联,从而组成 m 行 n 列的光伏系统。所以对于 TCT 结构下的光伏阵列而言,处于阴影条件下的串联模块仍是导致功率损失最主要的原因。最小均衡差原理就是为了平衡局部阴影下光伏阵列的辐照度分布而提出的。阵列第 i 行的平均辐照度 G_i 可表示为:

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^n G_{ij}}{n} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中, G_{ij} 为处于阵列中第 i 行第 j 列光伏模块的辐照度等级。

整个光伏阵列的辐照均衡度 IE (Irradiation Equilibrium) 可由式(2)计算得到。

$$I_{IE} = \frac{\sum_{i=1}^m \left| G_i - \sum_{k=1}^m G_k / m \right|}{I_{st}} \quad (2)$$

其中, I_{IE} 为整个光伏阵列的辐照均衡度; I_{st} 为标准条件下的太阳辐照度,取值为 $1000 \text{ W} / \text{m}^2$;

辐照均衡度表示了 TCT 结构中阵列行与行之间平均辐照度的离散程度, I_{IE} 值越小表示串联模块之间的相互影响越低,阵列有越高的输出功率。那么,最小均衡差原理可表述为:在 TCT 结构的光伏阵列中,若辐照度条件相同,则光伏阵列的 I_{IE} 值越小,其输出功率越大,最小均衡差的目标就是调整光伏阵列的结构使得 I_{IE} 值最小,如式(3)所示。

$$\min \frac{\sum_{i=1}^m \left| G_i - \sum_{k=1}^m G_k / m \right|}{I_{st}} \quad (3)$$

本文以图 1 所示 3×3 的光伏阵列为例,对均衡差原理进行具体说明,以 1—9 对阵列中的 9 块光伏板进行编号,光伏板 1—9 的辐照度分别为 $100、200、300、200、300、400、300、400、500 \text{ W} / \text{m}^2$ 。

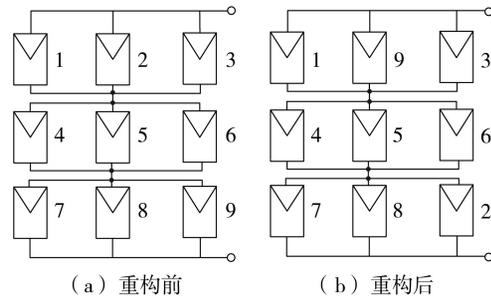


图 1 不均匀光照下的 TCT 结构

Fig.1 TCT structure under nonuniform illumination

TCT 结构中光伏阵列原始的连接方式如图 1(a) 所示,根据最小均衡差原理进行重构后的连接方式如图 1(b) 所示。从图中可以看出,为了满足式(3),调换了光伏板 2 和光伏板 9 的位置。重构前、后光伏阵列的参数如表 1 所示。表中, V_m 为最大功率点的电压值; P_{max} 为最大输出功率。

表 1 重构前、后光伏阵列的参数

Table 1 Parameters of photovoltaic array before and after reconstruction

参数	取值		参数	取值	
	重构前	重构后		重构前	重构后
$G_1 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	200	300	I_{IE}	0.2	0
$G_2 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	300	300	V_m / V	136.6	165.3
$G_3 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	400	300	P_{max} / W	861.8	1006.6

在 MATLAB / Simulink 环境下对上述 2 种结构的光伏阵列进行仿真模拟,设置光伏电池的短路电流为 7.34 A ,开路电压为 0.6 V ,品质因数为 1.5 ,串联电阻为 0 。由表 1 可知,在重构光伏阵列后, $G_1 - G_3$ 均为 $300 \text{ W} / \text{m}^2$,所以 $I_{IE} = 0$,即在重构后的结构下,串联模块之间无任何负面影响,相比于重构前 ($I_{IE} = 0.2$),重构后的最大输出功率提升了 23.7% 。

3 基于 TCT 结构的重构方法

3.1 辐照度的计算与测量

重构光伏阵列的前提条件是阵列中每一个光伏模块的辐照度均是已知的,通常采用以下 2 种方法获取辐照度信息:第一种是利用辐照度传感器;第二种是根据模块的电压、电流计算该模块的辐照度等级,计算公式如式(4)所示。

$$G_{ij} = \alpha \{ I_{ij} + n_{cell} I_0 [e^{V_{ij} / (n k T)} - 1] \} \quad (4)$$

其中, α 为光伏模块电流与辐照度之间的比例系数; I_{ij} 、 V_{ij} 分别为第 i 行第 j 列光伏模块测得的电流、电压; n_{cell} 为光伏模块所包含的光伏电池的数量; I_0 为光伏电池二极管的反向饱和电流; a 为 PN 节的理想因子; T 为温度; q 、 k 分别为电子电荷、波兹曼常数。

在光伏阵列重构方法中,通常选取上述第二种方法获取光伏阵列的辐照度信息,对每个模块都测量电压和电流值,不仅可以用于计算辐照度等级,还可以反映模块出现的相应故障,且通过重构算法可以尽量减少相应的功率损失。

3.2 光伏阵列重构方案设计

3.2.1 光伏阵列的结构

光伏阵列的结构如图 2 所示,阵列分为固定结构和自由结构两部分,两者由开关矩阵进行连接,可以实现将自由结构中部分数量的光伏模块并联到固定结构的任意一行。

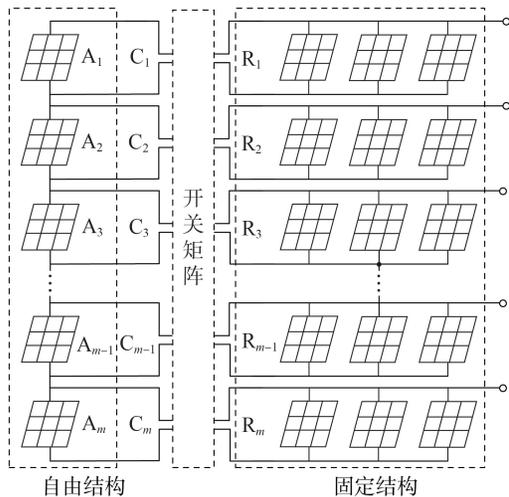


图 2 可重构光伏阵列结构

Fig.2 Reconfigurable photovoltaic array structure

如图 2 所示,对于 m 行的光伏阵列而言,其自由结构仅由 m 个光伏模块 $A_1 - A_m$ 构成, $C_1 - C_m$ 分别为 $A_1 - A_m$ 正负极与开关矩阵之间的接口, $R_1 - R_m$ 分别为固定结构的第 1 - m 行与开关矩阵之间的接口。

3.2.2 开关矩阵的设计

对于可重构的光伏阵列拓扑结构而言,其相应的开关矩阵是必不可少的,承担着改变光伏阵列自由结构与固定结构之间连接关系的功能。对于图 2 所示光伏阵列结构而言,其开关矩阵的结构如图 3 所示。

当开关 $S_{m,n}$ 闭合时,自由结构中的光伏模块 A_m 并联连接到固定结构的第 n 行。假设固定结构为 m 行 n 列的光伏阵列,当光伏系统处于辐照度均匀的环境下,开关 $S_{1,1}$ 、 $S_{2,2}$ 、 \dots 、 $S_{m,n}$ 闭合,其余开关断开,此时整个光伏系统相当于 m 行 $n+1$ 列的光伏阵列。

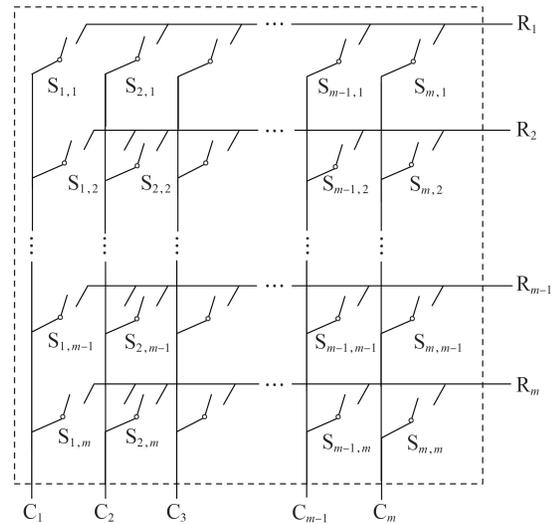


图 3 开关矩阵结构

Fig.3 Structure of switch matrix

3.2.3 基于最小均衡差的重构方案

假设固定结构为 m 行 n 列的光伏阵列,则自由结构由 m 个光伏模块串联组成,通过开关矩阵可以将自由结构中任意的光伏模块并联到固定结构的任意一行,所有的重构方案共有 S_{mn} 种,那么基于最小均衡差的重构方案就是在 S_{mn} 种可能的方案中选择满足式(3)的最优方案,重构方案的施行流程如图 4 所示。

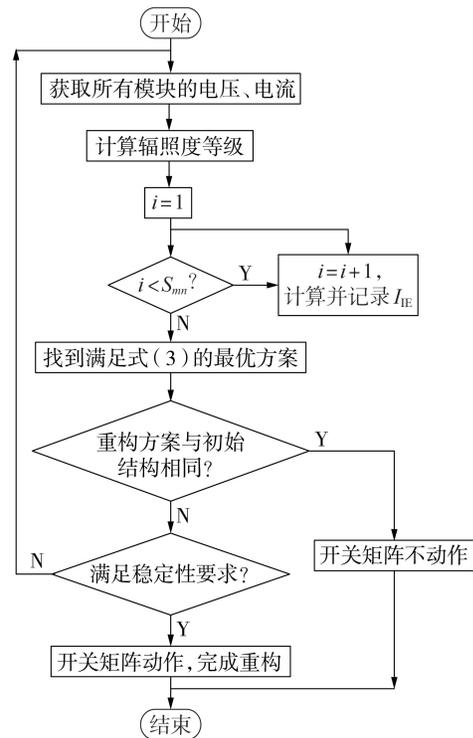


图 4 重构方案的施行流程

Fig.4 Implementation flowchart of reconstruction scheme

由图 4 可知,重构方案的选择和执行必须满足 3 个条件:①最优方案满足式(3),其 I_{IE} 值必须是所有

方案中最小的;②重构方案的结构与阵列初始结构不同;③最优方案满足稳定性要求。即在选择最优方案的过程中,判断整个光伏阵列的辐照度分布是否发生变化,若发生变化,则重新计算辐照度等级;若不发生变化,则控制开关矩阵对光伏阵列进行重构。进行该判断的目的是排除在重构方案的实施过程中,光伏阵列的辐照度分布发生改变,使得原先的最优方案不再满足式(3)。

4 仿真实证

4.1 仿真设置

为了验证基于最小均衡差的光伏阵列重构方法的有效性,本文在 MATLAB/Simulink 中搭建光伏阵列进行仿真,其具体参数如表1所示,光伏阵列的行数 m 设置为6,列数 n 设为7。

4.2 工作情形模拟

本文共设置了5种阴影模式及1种光伏板损毁状态这6种情形,如图5所示,用于模拟实际情况中光伏系统最可能遇到的情况。图5中的1个小方格代表1块光伏板,最左边1列为自由结构,其余部分为固定结构。假定光伏阵列有4个辐照度等级和1种损毁状态,损毁状态下的光伏模块相当于断路。图5(a)~(e)分别为三角形阴影、不规则团状阴影、横向条状阴影、散落分布的点状阴影以及竖向条状阴影模式;图5(f)表示阵列中有2个光伏模块处于损毁状态。

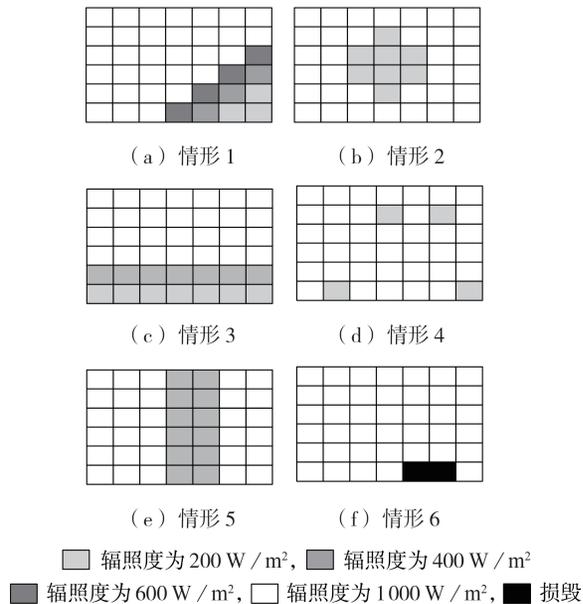


图5 6种工作情形

Fig.5 Six work situations

为了验证基于最小均衡差的光伏阵列重构方案的有效性,本文针对上述6种工作情形进行重构方案设计,并对重构前、后光伏阵列的输出特性进行对比分析。

4.3 仿真结果对比分析

4.3.1 三角形阴影

如图5(a)所示,三角形阴影分布在光伏阵列的右下角, $G_1—G_6$ 分别为1000、1000、942、857、742、628 W/m², $I_{IE}=0.71$ 。在该工作情形下,自由结构部分的所有光伏模块均处于1000 W/m²的辐照度下,为了使得重构方案的设计满足式(3),应通过开关矩阵改变自由结构与固定结构之间的连接方式,将光伏模块 A_1 、 A_2 并联连接到固定结构的第6行,将光伏模块 A_3 连接到第5行,应断开开关 $S_{1,1}$ 、 $S_{2,2}$ 、 $S_{3,3}$,闭合开关 $S_{1,6}$ 、 $S_{2,5}$ 、 $S_{3,5}$,重构后 $G_1—G_6$ 分别为857、857、800、857、885、914 W/m², $I_{IE}=0.15$ 。光伏阵列重构前、后的 $P-U$ 特性曲线和重构后的阵列结构分别如图6和图7所示。

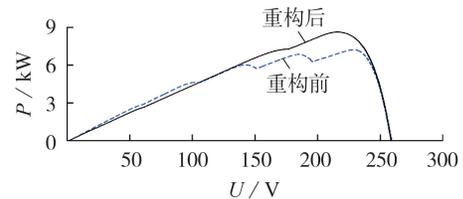


图6 重构前、后光伏阵列的输出特性

Fig.6 Output characteristics of photovoltaic array before and after reconstruction

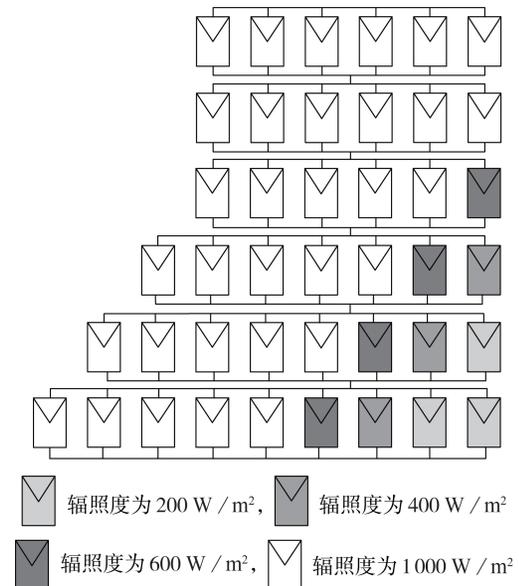


图7 重构后光伏阵列结构

Fig.7 Structure of photovoltaic array after reconstruction

重构前,光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线有4个较为明显的峰值点,最大功率值位于第4个极值点处,为7.3 W,过多的峰值点不利于光伏系统的最大功率点跟踪,使得最大功率点跟踪算法可能收敛在局部最优而不是全局最优。

重构后,光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线呈现单峰值特性,且最大功率值为8.6 kW。可见,当光伏阵列处

于三角形阴影模式下时,基于最小均衡差的重构方案不仅可以提升光伏阵列的输出功率,而且可以消除 $P-U$ 特性曲线的多峰值特性,使得最大功率点跟踪算法的实施更为简便快捷。

4.3.2 其余情形

类似地,对图5(b)~(f)所示情形分别进行重构方案设计,并对比重构前、后光伏阵列的输出特性,结果分别见附录中图A2~A6。

可以看出,重构后光伏阵列的最大功率值都得到了较为明显的提升。对于竖向条状阴影模式而言,重构前光伏阵列的结构已经满足式(3),因此该情形的重构方案与原始结构相同,此时开关矩阵不动作,所以重构前、后光伏阵列的输出特性不变。

4.3.3 6种情形参数对比

针对6种工作情形,根据式(5)计算光伏阵列重构前、后的功率损失 P_{loss} 。6种工作情形下光伏阵列重构前、后的各项参数对比如表2所示。

$$P_{\text{loss}} = \frac{P_{\text{mpp}} - P_{\text{max}}}{P_{\text{mpp}}} \times 100\% \quad (5)$$

其中, P_{mpp} 为光伏阵列在标准条件下的最大功率值,本文中取值为10.3 kW; P_{max} 为不同情形下光伏阵列最大功率的实际值。

表2 6种工作情形下重构前、后光伏阵列的参数对比

Table 2 Comparison of parameter results of photovoltaic array before and after reconstruction under six work situations

工作情形	$P_{\text{loss}} / \%$		$P-U$ 特性曲线极值点个数		I_{IE}		重构过程开关矩阵动作次数
	重构前	重构后	重构前	重构后	重构前	重构后	
1	29.1	16.5	4	1	0.71	0.15	6
2	28.2	17.5	2	1	0.76	0.19	4
3	37.9	27.2	2	2	1.60	0.46	8
4	16.5	10.7	2	1	0.61	0.15	4
5	18.4	18.4	1	1	0	0	0
6	36.9	29.1	2	2	0.47	0.43	4

5 结论

为了提升PSC下光伏阵列的输出功率,本文提出了一种基于最小均衡差的光伏阵列重构方案,将光伏系统分为自由结构和固定结构两部分,并通过开关矩阵相连接。当光伏阵列处于PSC下时,通过最小均衡差原理构建最优的重构方案。仿真结果显示,在PSC下进行重构后,光伏阵列因阴影条件引起的功率损失平均降低了8%, $P-U$ 特性曲线的极值点数量由平均2.2个降低为1.2个;在不同的阴影模式下,重构方案中开关矩阵的动作次数都较少,这也使得重构方案的实施更为便捷。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张明锐,陈喆喏,韦莉. 免疫萤火虫算法在光伏阵列最大功率点跟踪中的应用[J]. 电工技术学报,2020,35(7):1553-1562. ZHANG Mingrui, CHEN Zheyang, WEI Li. Application of immune firefly algorithms in photovoltaic array maximum power point tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1553-1562.
- [2] 彭飞,刘志祥,任敬国,等. 新型无均衡管理光伏锂电储能发电模组及其MPPT控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):73-81. PENG Fei, LIU Zhixiang, REN Jingguo, et al. PV/Li-ion energy-storage power module based on non-balancing cell management and its MPPT control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 73-81.
- [3] 黄涛,王胜利,谢华,等. 光伏逆变器短路电流3次谐波及其对保护的影响分析[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):99-108. HUANG Tao, WANG Shengli, XIE Hua, et al. Analysis of third harmonic current of photovoltaic inverter and its influence on protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 99-108.
- [4] 韩平平,范桂军,孙维真,等. 基于数据测试和粒子群优化算法的光伏逆变器LVRT特性辨识[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):49-54. HAN Pingping, FAN Guijun, SUN Weizhen, et al. Identification of LVRT characteristics of photovoltaic inverters based on data testing and PSO algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 49-54.
- [5] DIAZ-DORADO E, SUAREZ-GARCIA A, CARRILLO C, et al. Influence of the shadows in photovoltaic systems with different configurations of bypass diodes[C]//International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Pisa, Italy: IEEE, 2010: 134-139.
- [6] SILVESTRE S, BORONAT A, CHOUDER A. Study of bypass diodes configuration on PV modules[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1632-1640.
- [7] 薛鹏飞,周海芳,王明军,等. 基于FPA的光伏发电全局MPPT算法的研究[J]. 电气技术,2017(5):1-5,11. XUE Pengfei, ZHOU Haifang, WANG Mingjun, et al. Research of global MPPT algorithm of photovoltaic generation system based on FPA[J]. Electrical Engineering, 2017(5): 1-5, 11.
- [8] JIA Shuran, SHI Daoshen, PENG Junran, et al. Application of back-propagation neural network in multiple peak photovoltaic MPPT[C]//2015 International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration. Wuhan, China: IEEE, 2015: 231-234.
- [9] 杨德友,崔冬晓,蔡国伟. 基于云智能控制器的燃料电池最大功率跟踪策略[J]. 电工技术学报,2018,33(14):3362-3370. YANG Deyou, CUI Dongxiao, CAI Guowei. A maximum power point tracking technology for fuel cells using cloud model based intelligent controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3362-3370.
- [10] 盛四清,陈玉良,张晶晶. 基于差分进化人工蜂群算法的光伏最大功率跟踪策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(11):23-29. SHENG Siqing, CHEN Yuliang, ZHANG Jingjing. Research on maximum power point tracking strategy based on differential evolution artificial bee colony algorithm of photovoltaic system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 23-29.
- [11] CHENG Ze, PANG Zhichao, LIU Yanli, et al. An adaptive solar photovoltaic array reconfiguration method based on fuzzy control[C]//Proceedings of the 8th World Congress on

- Intelligent Control and Automation. Jinan, China: IEEE, 2010: 176-181.
- [12] VELASCO-QUESADA G, GUINJOAN-GISPERS F, PIQUÉLÓPEZ R, et al. Electrical PV array reconfiguration strategy for energy extraction improvement in grid-connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4319-4331.
- [13] SHAMS EL-DEIN M Z, KAZERANI M, SALAMA M M A. Optimal photovoltaic array reconfiguration to reduce partial shading losses[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 145-153.
- [14] 王丰, 孔鹏举, Fred C. Lee, 等. 基于分布式最大功率跟踪的光伏系统输出特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 127-134. WANG Feng, KONG Pengju, LEE F C, et al. Output characteristic analysis of distributed maximum power point tracking PV system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 127-134.
- [15] RANI B I, ILANGO G S, 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.
- [16] NGUYEN D, LEHMAN B. An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2644-2654.
- [17] KUMAR A, PACHAURI R K, CHAUHAN Y K. Experimental analysis of SP/TCT PV array configurations under partial shading conditions[C]//2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). New Delhi, India: IEEE, 2016: 1-6.
- [18] WANG Yunping, JI Xiaoming, RUAN Xinbo. The output property of photovoltaic MS and TCT configurations under partially shaded conditions[C]//2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Edinburgh, UK: IEEE, 2017: 1041-1045.
- [19] PAREEK S, DAHIYA R. Power optimization of TCT configured PS-PV fields by forecasting the connection of modules[C]//2015 Annual IEEE India Conference (INDICON). New Delhi, India: IEEE, 2015: 1-6.
- [20] NAYAK B, MOHAPATRA A, DAS P. Optimal hybrid array configuration scheme to reduce mismatch losses of photovoltaic system[C]//2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). Coimbatore, India: IEEE, 2017: 1-7.

作者简介:



张明锐

张明锐(1971—),男,甘肃民勤人,教授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为分布式发电与微电网技术、电力系统能量管理与优化运行、轨道交通牵引供电系统(E-mail: zmr@tongji.edu.cn);

陈喆旸(1995—),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为光伏发电最大功率跟踪(E-mail: 1343683145@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Reconfiguration scheme of photovoltaic array based on minimum equalization difference

ZHANG Mingrui¹, CHEN Zheyang²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Songjiang Power Supply Company of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 201600, China)

Abstract: For photovoltaic arrays, partial shadow is the most common cause of output power loss. The power loss caused by partial shadow is not only related to shadow area, but also depends more on the distribution of shadow and the connection mode among photovoltaic panels in photovoltaic array. In order to improve the output power of photovoltaic arrays under shading condition, a reconfiguration method of photovoltaic arrays based on TCT (Total Cross Tied) structure is proposed, which focuses on how to reasonably reconstruct the connection relationship among photovoltaic panels according to different shading conditions. The proposed method divides photovoltaic arrays into fixed structure and free structure. According to the equalization difference principle under partial shading condition, the connection mode of partial photovoltaic panel in free structure is adjusted according to different shading modes, and the optimal connection mode is determined. Simulative results show that, under various shading conditions, the output power of the photovoltaic array after reconstruction is significantly improved compared with that before reconstruction, and the $P-U$ characteristic curve tends to show a single peak value characteristic, which is more conducive to the realization of maximum power point tracking control.

Key words: photovoltaic arrays; partial shading; array reconstruction; TCT structure; equalization difference

附录

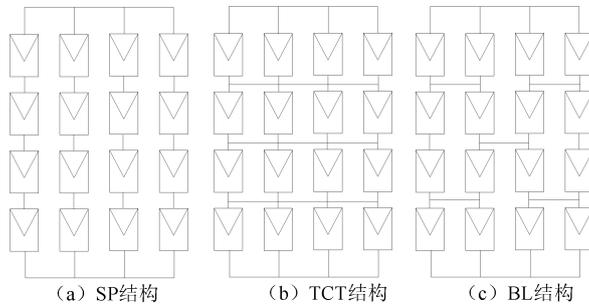


图 A1 光伏阵列常见的拓扑结构

Fig.A1 Common topological structures of photovoltaic array

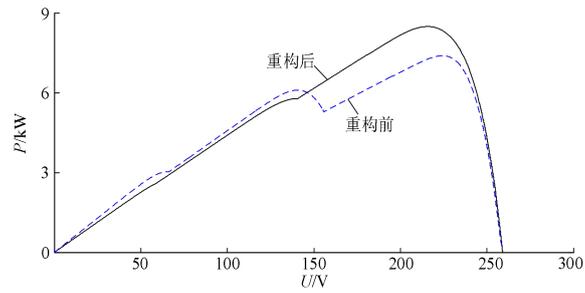


图 A2 工作情形 2 的输出特性

Fig.A2 Output characteristic under work situation 2

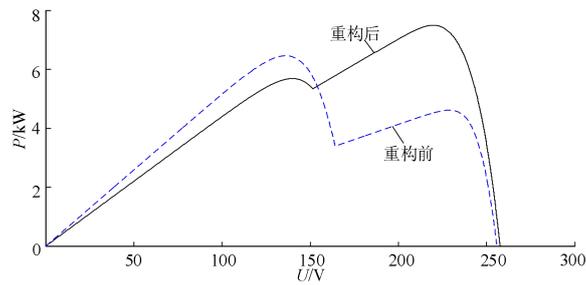


图 A3 工作情形 3 的输出特性

Fig.A3 Output characteristic under work situation 3

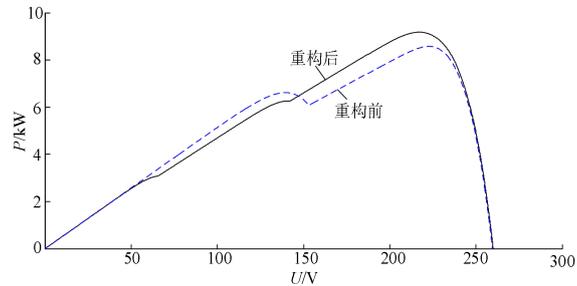


图 A4 工作情形 4 的输出特性

Fig.A4 Output characteristic under work situation 4

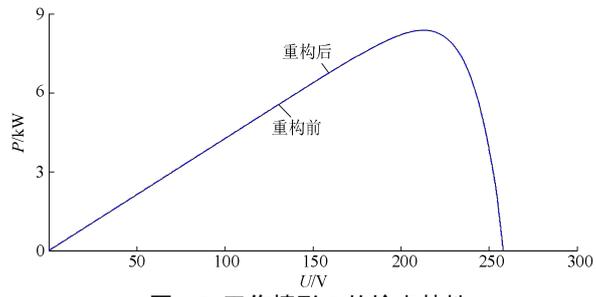


图 A5 工作情形 5 的输出特性

Fig.A5 Output characteristic under work situation 5

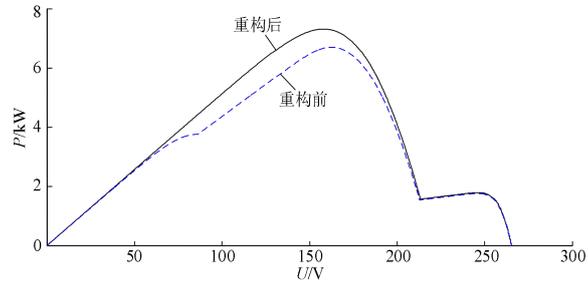


图 A6 工作情形 6 的输出特性

Fig.A6 Output characteristic under work situation 6