

# 基于 TCT 结构及开关控制的光伏阵列重构

夏永洪<sup>1</sup>, 李梦茹<sup>1</sup>, 曾繁鹏<sup>2</sup>, 刘 坤<sup>3</sup>, 余运俊<sup>1</sup>

(1. 南昌大学信息工程学院, 南昌 330031; 2. 江苏林洋能源股份有限公司, 启东 226200;

3. 国网江西省电力公司检修分公司, 南昌 330096)

**摘 要:** 为了提高局部阴影下光伏阵列的发电量,提出一种基于TCT结构的重构方法。该方法从构成光伏阵列的小型方阵内部结构出发,对光伏组件的摆放位置进行调整,推导并计算调整后每一方阵的全局最大功率点。基于开关控制技术,针对重构后由4个方阵构成的不同串并联关系的光伏阵列进行计算,分析光伏阵列受失配效应的影响,确定光伏阵列最佳的连接关系。借助仿真软件,计算重构后的光伏阵列在局部阴影情况下的输出性能,与重构前的光伏阵列进行比较,结果表明:重构后的光伏阵列的输出功率得到较大提高。

**关键词:** 光伏阵列; 局部阴影; 阵列重构; 开关控制; TCT结构

**中图分类号:** TM615

**文献标识码:** A

## 0 引 言

随着化石能源的日益短缺,太阳能作为一种可再生能源,在电力系统中扮演了重要角色。现今大多数光伏电站采用串并联(series-parallel, SP)阵列结构,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,组件产生不同大小的电流,但串联连接的光伏组件将流过相同的电流。当流经组件的电流大于被遮挡组件的光生电流时,被遮挡组件将成为负载消耗支路功率,造成热斑效应。通常通过并联旁路二极管来防止光伏组件的损坏,但当旁路二极管导通时,光伏组件被短路,导致光伏阵列的输出功率大幅降低。文献[1,2]提出每个光伏组件配备一个 DC-DC 变换器,通过独立的最大功率点跟踪实现每块组件的最大输出,但需大量的控制芯片,成本较高。文献[3,4]利用矩阵开关调整光伏组件的串并联关系,适应阴影分布,减少遮挡影响。但由于光伏组件的连接方式较多,需要配置相应数量的开关器件,并计算每种连接关系下的输出功率进行对比,导致计算量较大。文献[5]基于电池元补偿阵列的思想,将太阳电池组分为固定部分和可调整部分,阴影时将可调整部分开路电压最大的电池元并联

到固定部分电压最小的一行,以提高输出功率。该方法需要多个传感器不断对电池元进行监测,同时需要大量继电器开关,控制策略复杂。文献[6,7]认为遮阴时采用网状连接(total-cross-tied, TCT)结构能减轻失配影响,较 SP 结构输出更为稳定。文献[8~10]提出一种静态配置方法,通过调整 TCT 阵列每列光伏组件摆放次序,均衡每行组件受阴影遮挡的数量,可有效增强阴影条件下光伏阵列的发电能力。但由于光伏阵列的连接方式固定,导致适应阴影分布的能力有限。因此,本文基于 TCT 拓扑结构,使用静态配置与开关控制相结合的方法,通过改变小型方阵内部组件的摆放次序,对多个小型方阵之间采用开关进行连接,实时调整光伏阵列的连接关系。针对 4 个 6×6 的小型方阵进行重构分析,借助仿真软件对重构后光伏阵列的输出性能进行仿真验证。

## 1 TCT 重构模型

在 TCT 结构中,同一列的光伏组件串联连接,同一行的组件并联连接。每个光伏组件以“ $mn$ ”表示其所在的行及列。例如,编号 23 的组件表示其位于阵列中的第 2 行第 3 列。6×6 小型方阵的 TCT 电气连接,如图 1a 所示。

收稿日期: 2017-05-15

基金项目: 国际科技合作专项(2014DFG72240)

通信作者: 夏永洪(1978—),男,博士、副教授、硕士生导师,主要从事电机及其控制、分布式发电及微网方面的研究。yhxia@ncu.edu.cn

TCT 结构的静态配置是保持光伏阵列第 1 列不变,将从第 2 列开始的光伏组件重新排布,把光伏组件下移,使得新结构中的行组件均来自其他行,如图 1b 所示。这种配置方式不改变原来光伏组件的电气连接,仅改变其位置。从图中可看出,光伏组件 42(第 4 行,第 2 列)放置在第 1 行第 2 列上,但依旧与组件 41 并联。

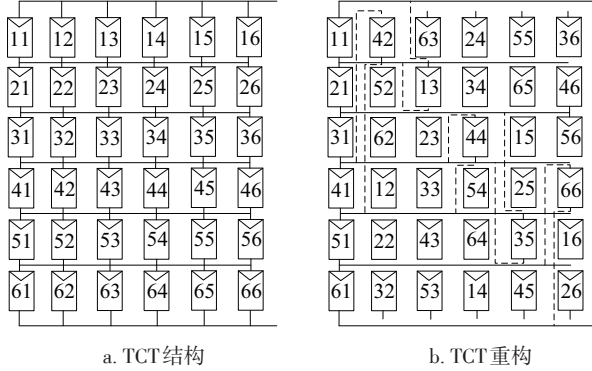


图 1 电气连接图

Fig. 1 Electrical connection

针对静态配置后的结构,考虑用 4 个同样的方阵将其组合成 2×2 的 TCT 结构的光伏阵列,并将方阵分别编号为 1、2、3、4。由于光伏阵列每行输出电流为行中方阵输出电流和,阵列总电压为每行输出电压之和,因此调换行间上下位置及每行方阵的左右位置输出均不变,则共有 3 种组合形式,如图 2 所示。

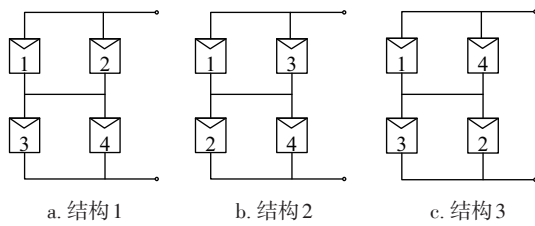


图 2 光伏方阵布置图

Fig. 2 PV layout

## 2 光伏方阵静态重构工作特性

当方阵出现局部遮阴现象时,组件工作在失配状态,出现多个功率极值点。而经静态配置的 TCT 结构能使集中在某几行的阴影分散到方阵的每一行中,起到均匀辐照度的作用,减少被旁路二极管短路的组件数量。静态配置后的光伏方阵中有  $p$  个组件受阴影遮挡时,方阵实际分布的行最大阴影

组件数为  $k$ ,其余行无阴影组件存在或阴影组件数量少于  $k$ ,为  $k-1$  (极少数情况下出现  $k-2$ ,在此不予以考虑)。此时  $P$ - $V$  特性曲线将出现单峰值、双峰值及三峰值 3 种情况。

以静态重构后的 6×6 方阵为例,对于  $P$ - $U$  特性曲线仅有一个全局最大功率点 (global maximum power point, GMPP) 的情况,每行被遮挡组件数量相同,  $k=p/6$ 。标准测试条件下光伏组件最大功率点电流为  $I_m$ ,最大功率点电压为  $U_m$ 。由于局部阴影下光伏组件的最大功率点电流与当前辐照度  $G$  成正比,比例系数为  $I_m/1000$ ,则每行最大电流值为:

$$I = k \times \frac{G}{1000} I_m + (6-k) I_m \quad (1)$$

此时光伏方阵中无组件被旁路二极管短路,但阴影导致方阵最大电压在  $6U_m$  附近,在此近似取值为  $6U_m$ ,则最大功率近似为:

$$P_{\max} = 6U_m \left[ k \times \frac{G}{1000} I_m + (6-k) I_m \right] \quad (2)$$

对于  $P$ - $U$  特性曲线呈现双峰的情况,假设光伏方阵中存在行阴影组件数  $k$  的行数为  $m$ ,剩余的  $6-m$  行有 2 种情况:每行均无遮挡;每行阴影组件数为  $k-1$ 。第 1 种情况下 2 个功率极值点分别为:

$$P_1 = 6I_m \times (6-m)U_m = (36-6m)I_m U_m \quad (3)$$

$$P_2 = 6U_m I_m \left[ k \times \frac{G}{1000} + (6-k) \right] \quad (4)$$

为判断全局最大功率点的位置,引入功率极值点差:

$$\Delta P_1 = P_2 - P_1 = 6U_m I_m \left[ m - k \left( 1 - \frac{G}{1000} \right) \right] \quad (5)$$

当  $\Delta P_1 > 0$  时,GMPP 在  $P$ - $U$  特性曲线的右侧,此时:

$$G > 1000 \times \left( 1 - \frac{m}{k} \right) \quad (6)$$

当  $\Delta P_1 < 0$  时,GMPP 在  $P$ - $U$  特性曲线的左侧,此时:

$$G < 1000 \times \left( 1 - \frac{m}{k} \right) \quad (7)$$

因此,可通过测量阴影处辐照度的大小,判断 GMPP 出现的位置,决定最大功率跟踪点算法搜索的方向,避免搜索陷入局部最大功率点的误区,简化出现多峰值时的搜寻难度。

第 2 种情况下 2 个功率极值点分别为:

$$P_3 = (6-m)U_m I_m \left[ (k-1) \frac{G}{1000} + (7-k) \right] \quad (8)$$

$$P_4 = 6U_m I_m \left[ k \frac{G}{1000} + (6-k) \right] \quad (9)$$

$$\Delta P_2 = P_4 - P_3 = \left[ (6+mk-m) \frac{G}{1000} + (7-k)m - 6 \right] U_m I_m \quad (10)$$

当 GMPP 在  $P-U$  特性曲线右侧时, 阴影处辐照度应满足:

$$G > \frac{6+(k-7)m}{6+mk-m} \times 1000 \quad (11)$$

对于  $P-V$  特性曲线呈现三峰的情况, 假设光伏方阵中存在行阴影组件数  $k$  的行数为  $m$ , 存在行阴影组件数  $k-1$  的行数为  $r$ , 无阴影遮挡的行数为  $6-m-r$ , 3 个功率极值点分别为:

$$P_1 = 6U_m I_m (6-m-r) \quad (12)$$

$$P_2 = (6-m)U_m I_m \left[ (k-1) \frac{G}{1000} + 7-k \right] \quad (13)$$

$$P_3 = 6U_m I_m \left( k \frac{G}{1000} + 6-k \right) \quad (14)$$

当 GMPP 出现在  $P-U$  特性曲线最左边时, 阴影处辐照度应同时满足:

$$G < 1000 \frac{k-m-r}{k} \quad (15)$$

$$G < 1000 - \frac{6000r}{6k-mk+m-6} \quad (16)$$

当 GMPP 出现在  $P-U$  特性曲线中间时, 阴影处辐照度应同时满足:

$$G > 1000 \frac{m(7-k)-6}{m-mk-6} \quad (17)$$

$$G > 1000 - \frac{6000r}{6k-mk+m-6} \quad (18)$$

当 GMPP 出现在  $P-U$  特性曲线最右边时, 阴影处辐照度满足:

$$1000 \frac{k-m-r}{k} < G < 1000 \frac{m(7-k)-6}{m-mk-6} \quad (19)$$

此静态重构方法可通过确定受遮挡组件的数量及位置预判出  $P-U$  输出特性的峰值状况, 再根据相应状况下辐照度不等式确定 GMPP 的大小及位置。

### 3 光伏阵列动态重构与仿真分析

当方阵均无遮挡时, 每个方阵输出性能一致, 光伏阵列最大输出功率为 4 个方阵的最大功率和。而当方阵均处在不同的阴影遮挡状况时, 每个方阵的全局最大功率点对应的输出电压、电流不

同, 串并联时将导致某个方阵工作在最大功率点时, 其余方阵的输出偏离最大功率点, 光伏阵列的总输出功率减小。为了削弱阴影发生时引起的光伏阵列失配效应的影响, 利用开关器件对光伏阵列进行了重构, 实现图 2 所示的 3 种结构的相互转换, 使每个方阵尽可能的工作在最大功率点附近, 减小功率损失。图 3 为设计的开关电路示意图, 共 12 个开关。当开关 2、4、5、7、9、11 闭合时, 方阵以结构 1 的形式连接; 当开关 1、3、6、8、9、11 闭合时, 方阵以结构 2 的形式连接; 当开关 1、3、5、7、10、12 闭合时, 方阵以结构 3 的形式连接。

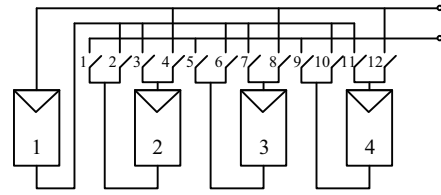


图3 开关电路示意图

Fig. 3 Switch circuit diagram

光伏阵列共有 144 块光伏组件, 每 36 块组件组成一个  $6 \times 6$  方阵, 每个方阵配有独立的全局最大功率点跟踪。假设初始时光伏阵列无阴影遮挡, 辐照度均为  $1000 \text{ W/m}^2$ , 随后出现遮阴现象, 部分组件辐照度降为  $100 \text{ W/m}^2$ , 阴影在方阵 1、2、3、4 上的分布情况如图 4 所示, 在重构光伏阵列上的实际分布如图 5 所示。仿真所用光伏组件参数见表 1。

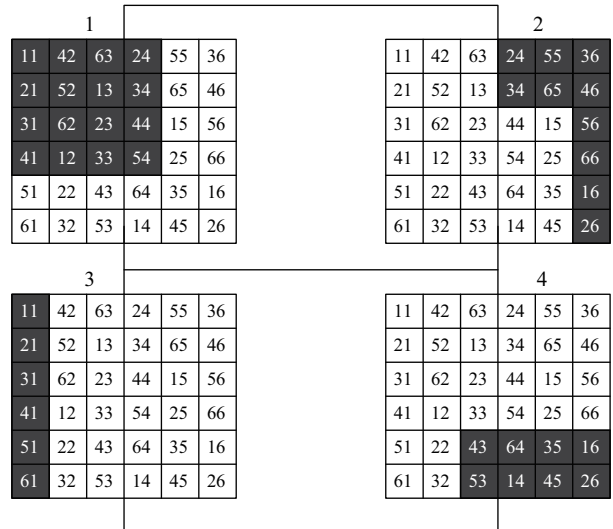


图4 光伏阵列阴影分布

Fig. 4 Shadows distribution on PV array

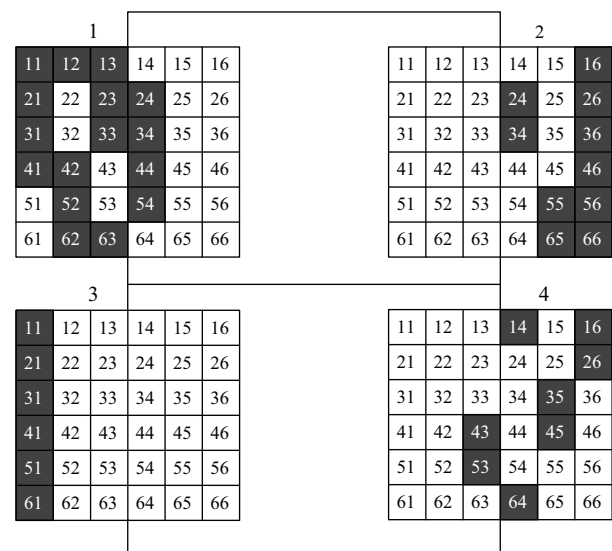


图5 重构阵列实际阴影分布

Fig. 5 Actual shadow distribution on reconstructed PV array

表1 光伏组件参数	
Table 1 PV module parameters	
参数	数值
功率 $P/W$	245
短路电流 $I_{sc}/A$	8.74
开路电压 $U_{oc}/V$	37.1
最大功率点电流 $I_{mpp}/A$	8.17
最大功率点电压 $U_{mpp}/V$	30

根据静态重构后方阵每行被阴影遮挡数量,可得出方阵 1、2、4 被阴影遮挡时均处于  $P-U$  特性曲线双峰值的情况,利用式(11)进行局部最大功率点位置的判断,可迅速判断出 GMPP 均出现在  $P-U$  特性曲线的右侧峰值处。而方阵 3 因每行被遮挡组件数量相同,仅有一个最大功率点,可由式(2)计算得出。通过理论计算,可得方阵 1 的 2 个局部最大功率点近似值分别 2058.8 和 4853.0 W,方阵 2 的近似值分别为 2500.0 和 6176.5 W,方阵 3 的近似值为 7500.1 W,方阵 4 的近似值分别为 5000.0 和 6176.5 W。

借助仿真软件,建立光伏方阵模型,仿真各个方阵的  $P-U$  输出特性曲线,如图 6 所示。由图 6 可知,未遮挡时方阵的最大功率为 8820.0 W,遮挡时经过静态配置的方阵 1~4 的最大功率分别为 4791.9、6209.7、7374.9、6519.6 W。GMPP 位置与理

论推导一致,而遮挡导致每个方阵实际的 GMPP 处电压与理论 GMPP 电压产生偏差,从而使得仿真 GMPP 值与理论计算值稍有差异,但最大误差在 3.9%内。

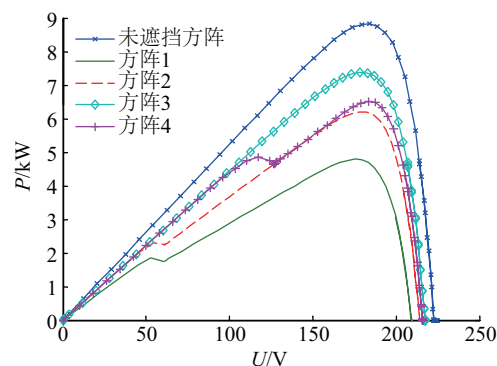


图6 光伏方阵 $P-U$ 输出特性曲线

Fig. 6  $P-U$  curve of PV array

静态重构前方阵 1~4 受图 4 所示阴影遮挡时的最大功率分别为 3573.5、5257.0、7374.9、5785.2 W,  $P-U$  特性曲线如图 7 所示。除方阵 3 重构前后输出相同,其他方阵重构后的输出功率分别比重构前提高 13.8%、10.8%和 8.3%。

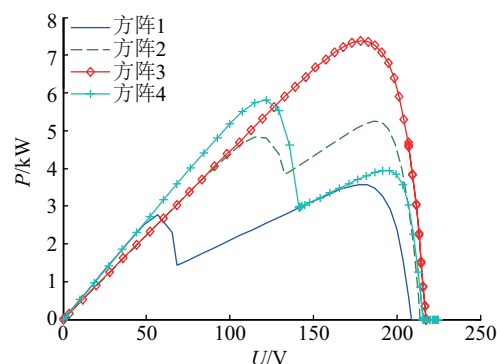


图7 未重构方阵 $P-U$ 输出特性曲线

Fig. 7  $P-U$  curve of initial PV array

重构后的方阵 1~4 最大功率点对应的电压分别为:174.2、178.5、178.1 和 183.3 V,对应的电流分别为:27.5、34.8、41.4 和 35.6 A。4 个方阵共有 6 种并联关系,分别为:方阵 1 和 2 并联、方阵 1 和 3 并联、方阵 1 和 4 并联、方阵 2 和 3 并联、方阵 2 和 4 并联,以及方阵 3 和 4 并联。方阵并联后的最大功率点及其对应的电压电流,2 个并联方阵在各自最大功率点时的电压差 $\Delta U$ ,以及因失配造成的损耗如表 2 所示。



表2 方阵并联最大输出功率					
Table 2 Maximum output power of PV array in parallel					
并联 关系	$P_{\text{mpp}}/$ W	$U_{\text{mpp}}/$ V	$I_{\text{mpp}}/$ A	$\Delta U/$ V	损耗/ W
1和2	10994.3	178.6	61.6	4.3	7
1和3	12156.3	179.2	67.8	3.9	10.5
1和4	11247.0	178.6	63.0	9.1	64.5
2和3	13583.3	178.2	76.2	0.4	1.3
2和4	12698.6	183.4	69.3	4.8	30.7
3和4	13875.4	181.1	76.6	5.2	19.1

由表2可知,当2个方阵并联,且最大功率点电压接近相等时,输出功率近似于2个方阵的最大功率点之和。当最大功率点处电压相差较远时,会造成较高的失配损耗。

将2组并联后的方阵串联,分别得到结构1、结构2和结构3的 $P$ - $U$ 输出特性,同时仿真相同阴影下TCT结构的输出特性,如图8所示。

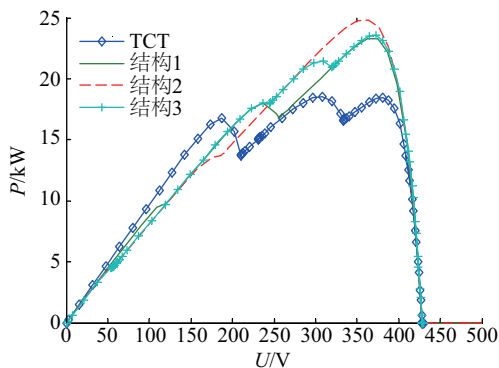


图8 光伏阵列 $P$ - $U$ 输出特性曲线  
Fig. 8  $P$ - $U$  curve of PV array

由图8可知,结构2输出功率最高,为24816.1 W,其次是结构3,为23497.9 W,结构1的最大输出功率为23286.8 W,未重构的TCT结构光伏阵列的输出功率最低,为18532.9 W。

并联的方阵1和方阵3的最大功率点电流为67.8 A,并联的方阵2和方阵4最大功率点电流为69.3 A,二者电流值相差较小,因此在串联时,并联的方阵均可工作在其最大功率点附近,光伏阵列总功率仅比二者最大功率之和低了38.8 W。而结构1和3由于内部方阵串联时偏离自身最大功率点,导致功率降低。

当仅改变光伏方阵内部组件摆放位置时,输出比未静态配置的TCT结构高13.5%,而当改变光伏

阵列的连接,即从结构1变为结构2时,输出提高了4.3%,则重构的光伏阵列输出总共提升17.8%。

## 4 结 论

利用TCT结构可平衡阴影时辐照度的能力,对光伏阵列进行内外部的重构。内部调整组成光伏阵列的4个6×6的小型方阵组件的摆放位置,使得处在同一行中的阴影被分散到不同行中,减小同一时刻被旁路二极管短路的组件数量。外部利用开关器件改变了光伏阵列的连接关系,降低方阵间的失配损耗。该重构方法有效提高阴影下光伏阵列的输出功率,且控制简单,无需大量开关器件,易于扩容,适用于各种规模的光伏电站。

### [参考文献]

[1] 王 丰,孔鹏举, Lee Fred C, 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.

[1] Wang Feng, Kong Pengju, Lee Fred 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.

[2] 王 丰,吴新科, Lee Fred C, 等. 嵌入式智能光伏模块的最大功率输出统一控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 81—89.

[2] Wang Feng, Wu Xinke, Fred C. Lee, et al. Application of unified output MPPT control in DMPPT PV systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 81—89.

[3] 李锐华,闫宇星,胡 波. 阴影遮蔽条件下光伏阵列的可重构优化配置方法[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(7): 38—44.

[3] Li Ruihua, Yan Yuxing, Hu Bo. Reconfigurable optimization arrangement method of photovoltaic arrays in partial shade condition[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(7): 38—44.

[4] 王志刚,姚秀萍. 基于Matlab的光伏阵列全局重构系统的研究[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 628—630.

[4] Wang Zhigang, Yao Xiuping. Research on globale reconfiguration system of photovoltaic arrays based on Matlab[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 628—630.

[5] 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.
- [6] 丁 坤, 顾鸿烨, 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—503.
- [6] Ding Kun, Gu Hongye, Chen Fudong, et al. Output characteristics of TCT structure PV array under the non-uniform irradiation[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(4): 500—503.
- [7] Wang Yawjuen, Hsu Pochun. Analysis of partially shaded PV modules using piecewise linear parallel branches model [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2009, 3 (12) : 2354—2360.
- [8] Indu Rani B, Saravana 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 Sustain Energy, 2013, 4(3): 594—601.
- [9] Sahu H S, Nayak S K. Extraction of maximum power from a PV array under nonuniform irradiation condition [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63 (12): 4825—4831.
- [10] Sahu H S, Nayak S K. Power enhancement of partially shaded PV array by using a novel approach for shade dispersion[A]. Innovative smart grid technologies Asia (ISGT Asia) [C], Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2014: 498—503.

## RECONSTRUCTION OF PV ARRAYS BASED ON TCT STRUCTURE AND SWITCH CONTROL

Xia Yonghong<sup>1</sup>, Li Mengru<sup>1</sup>, Zeng Fanpeng<sup>2</sup>, Liu Kun<sup>3</sup>, Yu Yunjun<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Jiangsu LinYang Energy CO., LTD., Qidong 226200, China;

3. State Grid Jiangxi Maintenance Company, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** In order to improve the power generation of PV array under partial shadows, a reconstruction method based on TCT structure is proposed. The method adjusts the position of the PV module from the internal structure of the small square array which makes up the PV array. The global maximum power point of each array is deduced and calculated after adjustment. Based on the switching control technology, the PV array restructured by four square arrays in different series-parallel connection is calculated. The influence of the mismatch effect on the PV array is analyzed, and the optimal connection relation of the PV array is determined. The simulation software is used to calculate the output performance of the reconstructed PV array under partial shadow and compare with the PV array before reconstruction. The results show that the output power of the reconstructed PV array is greatly improved.

**Keywords:** PV array; partial shading; array reconstruction; switch control; TCT configuration