

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190369

# 局部阴影条件下太阳能电池-超级电容器件的充放电控制方法

张宁<sup>1</sup>, 杨洪明<sup>1</sup>, 徐岩<sup>2</sup>, 王懂<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南省电动交通与智能配网工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114;

2. 南洋理工大学电气与电子工程学院, 新加坡 639798)

**摘要:** 局部阴影条件下, 传统光伏阵列中被遮挡光伏组件和未遮挡光伏组件的功率输出特性不一致, 导致光伏阵列的功率输出曲线存在多峰值。为此, 利用太阳能电池-超级电容器件(Solar cell-supercapacitor device, SCSD)的发电-储能双重功能, 构建了以 SCSD 为基本单元的光伏阵列, 并对正常光照和局部阴影下 SCSD 的数学模型及工作特性进行了分析。在此基础上, 提出了一种基于开关网络的充放电控制方法。局部阴影下利用开关网络变换不仅能对 SCSD 进行独立控制, 实现 SCSD 内部的超级电容对本身光伏功率缺额进行补偿, 而且能控制多个 SCSD 的超级电容相互配合, 共同补偿光伏功率缺额。最后基于 Matlab 仿真, 验证了该方法不仅能有效避免储能电池组不均衡问题, 而且能在局部阴影下使光伏阵列输出功率曲线恢复单峰值, 最大限度地降低局部阴影下的光伏功率波动。  
**关键词:** 太阳能电池-超级电容器件; 局部阴影; 功率多峰值; 充放电策略; 功率补偿

## Charge and discharge control method of solar cell-supercapacitor under partial shading condition

ZHANG Ning<sup>1</sup>, YANG Hongming<sup>1</sup>, XU Yan<sup>2</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Hunan Provincial Engineering Research Center of Electric Transportation and Smart Distribution Network, Changsha 410114, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

**Abstract:** Under partial shading condition, the power output characteristics of occluded PV modules and unoccluded PV modules in traditional PV arrays are inconsistent, which results in the total power output curve of the photovoltaic array having multiple peaks. Therefore, this paper uses the power generation-energy storage dual function of Solar Cell-Supercapacitor Device (SCSD) to construct a photovoltaic array based on SCSD, and analyzes the mathematical model and working characteristics of SCSD under normal illumination and partial shading. On this basis, it puts forward a charge and discharge control method based on switch network. Under the partial shading, the switch network transformation can not only independently control the SCSD and realize the compensation of the photovoltaic power deficiency by the supercapacitor of the SCSD, but also control the cooperation of the supercapacitor of multiple SCSD to compensate the photovoltaic power deficiency. Lastly, it is verified by Matlab simulation that the method proposed in this paper can not only effectively avoid the unbalanced problem of energy storage battery pack, but also restore the PV array output power curve to a single peak under the local shadow and minimize the photovoltaic power fluctuation under the local shadow.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71931003), Science and Technology Project of Hunan Province (No. 2019CT5001, No. 2018GK4002, No. 2017CT5015, and No. 2017WK2053), Hunan Key Laboratory of Ubiquitous Power Internet of Things (No. 2019TP1016), and Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (No. CX2018B525).

**Key words:** solar cell-supercapacitor device; partial shading; multi-peak power; charge and discharge strategy; power compensation

## 0 引言

太阳能是一种用之不竭、清洁安全的可再生能

源, 它具有无污染、无噪音等优点, 受到世界各国的重视<sup>[1-3]</sup>。但光伏阵列的输出特性受光照强度的直接影响。在实际运行中, 由于建筑物、树木等遮挡, 会在光伏阵列上产生局部阴影<sup>[4]</sup>, 导致阵列受到的光照强度不均匀, 从而造成光伏组件的输出特性不一致, 即发生阵列失配。阴影严重时, 被遮挡光伏组件发生反向偏置, 作为负载消耗其他光伏组件功率, 从而产生热斑效应, 损坏光伏组件<sup>[5-8]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(71931003); 湖南省科技计划项目资助(2019CT5001, 2018GK4002, 2017CT5015, 2017WK2053); 泛在电力物联网湖南省重点实验室资助(2019TP1016); 湖南省研究生科研创新项目(CX2018B525)

为防止热斑效应,通常在光伏阵列中的每块光伏组件上反向并联旁路二极管<sup>[9]</sup>。当光伏组件上有阴影时,旁路二极管将光伏组件短路,使电流经旁路二极管流出,避免了组件发热。但这种方法不能提高阴影下光伏阵列的输出功率,而且造成光伏阵列输出功率特性曲线呈现多峰值,进而导致光伏阵列输出功率发生波动,并网后对电力系统的稳定运行产生威胁<sup>[10-12]</sup>。因此,如何解决光伏阵列的多峰值问题成为光伏发电大规模并网的重要前提。

针对上述问题,现有两种解决办法。第一种方法是从多峰值问题本身出发,利用开关矩阵对光伏阵列拓扑进行动态重构,将阴影均匀分散到整个光伏阵列中,使光伏阵列重新达到均匀辐照度,从而使光伏阵列输出特性恢复单峰值,最终达到降低阴影影响的目的<sup>[13-16]</sup>。这种方法能有效解决多峰值问题,同时使传统最大功率跟踪算法不会因陷入局部最大功率点而导致光伏输出功率大大降低,但它不能完全解决阴影下的光伏输出功率缺额,且在出现短时阴影(如云层飘过)时,也会动作大量的开关,造成功率损耗。

第二种方法是由多峰值造成的光伏功率波动问题出发,为光伏阵列配置大容量储能电池组,通过储能电池组补偿局部阴影时的光伏输出功率缺额,维持光伏输出功率恒定<sup>[17-18]</sup>。文献[19]为光伏系统配置了由超级电容与蓄电池组成混合储能装置,利用低频滤波器将光伏功率波动分为高频分量和低频分量,并分别用超级电容和蓄电池进行平抑。这种方法虽然能完全补偿阴影下的光伏输出功率缺额,但并没有对光伏阵列输出特性多峰值问题本身进行解决,因此需要在利用复杂最大功率跟踪算法找到最大功率点的前提下,才能实现功率补偿。同时储能电池组会出现不均衡问题,即在使用过程中,由于各储能电池物理结构、电解液密度的变化,造成的储能电池间的容量和电压出现差异,并且随着充放电次数的增加,这种差异越来越大,若没有及时处理,会导致部分储能电池失效,最终造成储能电池组容量过早丧失<sup>[20]</sup>。

针对上述两种方法的不足,本文利用太阳能电池-超级电容器件(solar cell-supercapacitor device, SCSD)的发电-储能双重功能,提出了一种以 SCSD 为基本单元的光伏并网系统架构。首先对正常光照和局部阴影下的 SCSD 的数学模型及工作特性进行了分析,验证了该器件在轻度阴影下可以有效改善光伏输出功率多峰值问题。在此基础上,对阴影下 SCSD 的超级电容充放电策略进行了设计,可以实

现单体 SCSD 独立控制以及多个 SCSD 的超级电容相互配合,有效解决了多峰值问题和储能均衡问题。

## 1 太阳能电池-超级电容器件等效电路及工作特性分析

本节对 SCSD 的架构进行介绍,并对正常光照和局部阴影下 SCSD 的数学模型和工作特性进行分析,证明相比普通光伏组件,SCSD 有更强的局部阴影适应能力。

### 1.1 太阳能电池-超级电容器件架构

太阳能电池-超级电容器件架构与等效电路如图 1 所示。通过将太阳能电池的背电极同时作为超级电容的阳极,将两者融合成一个新型的三端口器件,达到简化系统结构、降低控制复杂度的目的。

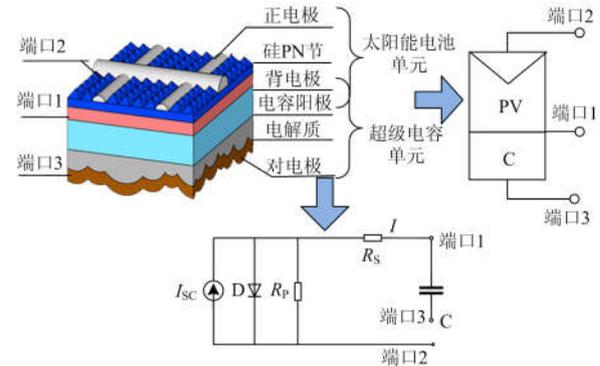


图 1 太阳能电池-超级电容器件等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell-supercapacitor device

### 1.2 太阳能电池-超级电容器件建模及特性分析

已知光照均匀时,  $n$  个串联光伏电池的输出电流工程数学模型<sup>[21]</sup>为

$$\begin{cases} I = I_{sc} \{1 - C_1 [\exp(\frac{V/n}{C_2 V_{oc}}) - 1]\} \\ C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \exp(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}) \\ C_2 = (\frac{V_m}{V_{oc}} - 1) [\ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}})]^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $V$  为光伏电池输出电压;  $I_{sc}$  为光伏电池短路电流;  $V_{oc}$  为光伏电池开路电压;  $I_m$  和  $V_m$  为最大功率点电流和电压;  $n$  为串联的光伏电池数量。

以  $n$  个 SCSD 组成的串联支路为例,对 SCSD 正常和阴影的数学模型和工作状态进行分析。如图 2 所示。

$I$  为串联支路输出电流,  $I_1, \dots, I_n$  和  $I_{c1}, \dots, I_{cn}$  分别为每个 SCSD 的光伏电池输出电流和超级电容输出电流。

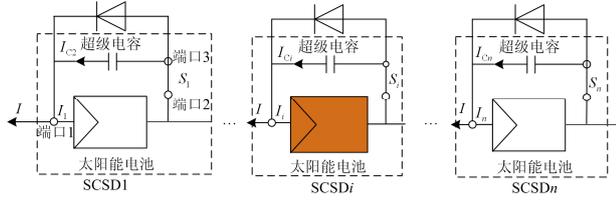


图2 串联太阳能电池-超级电容器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of series SCSD

1) 若  $n$  个 SCSD 都处于均匀标准光照条件 ( $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ) 下, 此时  $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$ ,  $I_{c1} = I_{c2} = \dots = I_{cn} = 0$ , 串联支路的输出电流与输出功率可表示为

$$I = I_{\text{SC1}} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V/n}{C_2 V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

$$P = \sum_{j=1}^n P_j = \sum_{j=1}^n I_j V_j \quad (3)$$

式中,  $P_j$  为第  $j$  个 SCSD 的光伏输出功率。

2) 假设第  $i$  个 SCSD 受到阴影遮挡, 其他 SCSD 未被遮挡。此时 SCSD 本身的超级电容向太阳能电池补偿电流。根据所受阴影遮挡程度分为以下两种情况。

若 SCSD 受到轻度阴影遮挡, 经超级电容补偿后, 第  $i$  个 SCSD 的总输出电流与其他 SCSD 的光伏输出电流相等, 即

$$I_{iS} + I_{ci} = I_j = I \quad (j=1, \dots, n, i \neq j) \quad (4)$$

式中,  $I_{iS}$  和  $I_{ci}$  分别为阴影下第  $i$  个 SCSD 的光伏电池输出电流和超级电容输出电流。

此时串联支路电流保持恒定,  $n$  个 SCSD 仍可以同时正常工作。等到阴影消失后, 恢复成初始运行状态, 其串联支路输出电流和输出功率可表示为

$$I = I_{\text{SCiS}} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V/n}{C_2 V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\} + I_{ci} = \quad (5)$$

$$I_{\text{SC1}} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V/n}{C_2 V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\}$$

$$P = P_1 + \dots + (P_{iS} + P_{ci}) + \dots + P_n =$$

$$P_1 + \dots + P_i + \dots + P_n = \sum_{j=1}^n P_j \quad (6)$$

式中:  $I_{\text{SCiS}}$  为阴影下光伏电池的短路电流;  $P_{iS}$  为阴影下第  $i$  个 SCSD 的光伏电池输出功率;  $P_{ci}$  为第  $i$  个 SCSD 的超级电容输出功率。

这种情形下的光伏阵列的输出特性曲线如图 3(a)和图 4(a)所示。

若 SCSD 受到重度阴影遮挡或多层阴影遮挡 (轻度和重度)时, 超级电容补偿电流后, 第  $i$  个 SCSD

的总输出电流仍无法达到其他 SCSD 的光伏输出电流, 即

$$I_{iS} + I_{ci} < I_j = I \quad (j=1, \dots, n, i \neq j) \quad (7)$$

由于在温度、光照强度和阵列结构确定的条件下, 光伏阵列工作在特性曲线的位置由负载阻抗决定。因此随着外界负载阻抗的变化, 串联支路的光伏输出电流有以下两种情况。

当负载阻抗很小, 即串联支路光伏输出电流  $I$  很大时, 由于  $I_{iS} + I_{ci} < I \leq I_j$  ( $j=1, \dots, n, i \neq j$ ), 此时第  $i$  个 SCSD 并联的旁路二极管两端形成正向偏压, 使旁路二极管导通, 导致 SCSD 被短路。因此该阶段只有  $n-1$  个未被阴影遮挡的 SCSD 对外输出电流, 但临界电流值变为  $I_{\text{SC2}} + I_{c2}$ , 因此其输出电流和输出功率方程可分别表示为

$$\begin{cases} I = I_{\text{SC1}} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V/n-1}{C_2 V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\} \\ P = \sum_{j=1}^n P_j - P_i \end{cases} \quad I_{iS} + I_{ci} < I \leq I_j \quad (8)$$

随着负载阻抗的逐渐增大, 串联支路输出电流  $I$  逐渐减小, 当输出电流减小到等于第  $i$  个 SCSD 的总输出电流, 即  $I = I_{iS} + I_{ci}$  时, 与 SCSD 并联的旁路二极管截止, 所有的 SCSD 同时对外输出电流, 但此时未被遮挡的 SCSD 输出功率与第  $i$  个 SCSD 输出功率相同, 即  $P = P_1 = \dots = P_n = P_{iS} + P_{ci}$ , 因此其串联支路的输出电流和输出功率可表示为

$$\begin{cases} I = I_{\text{SCiS}} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V/n}{C_2 V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\} + I_{ci} \\ P = n(P_{iS} + P_{ci}) \end{cases} \quad 0 \leq I < I_{iS} + I_{ci} \quad (9)$$

式中,  $I_{\text{SCiS}}$  为阴影下第  $i$  个 SCSD 的光伏电池短路电流。

上述情况下的光伏阵列的输出特性曲线如图 3(b)和图 4(b)所示。若上述两种情况同时出现, 即出现多层阴影 (轻度阴影和重度阴影同时出现), 其输出特性曲线图 3(c)和图 4(c)所示。

因此, 串联支路的总输出特性方程为

$$I = \begin{cases} I_{\text{SC1}} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V/n}{C_2 V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\} & I_1 = I_2 = \dots = I_n = I_j \\ I_{\text{SC1}} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V/n}{C_2 V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\} & I_{iS} + I_{ci} = I_j \\ I_{\text{SC1}} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V/(n-1)}{C_2 V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\} & I_{iS} + I_{ci} < I \leq I_j \\ I_{\text{SCiS}} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V/n}{C_2 V_{\text{oc}}}\right) - 1 \right] \right\} + I_{ci} & 0 \leq I < I_{iS} + I_{ci} \end{cases} \quad (10)$$

$$P = \begin{cases} \sum_{j=1}^n P_j & I_1 = I_2 = \dots = I_n = I_j \\ P_1 + \dots + (P_{i,S} + P_{ci}) + \dots + P_n & I_{i,S} + I_{ci} = I_j \\ \sum_{j=1}^n P_j - P & I_{i,S} + I_{ci} < I \leq I_j \\ n(P_{i,S} + P_{ci}) & 0 \leq I < I_{i,S} + I_{ci} \end{cases} \quad (11)$$

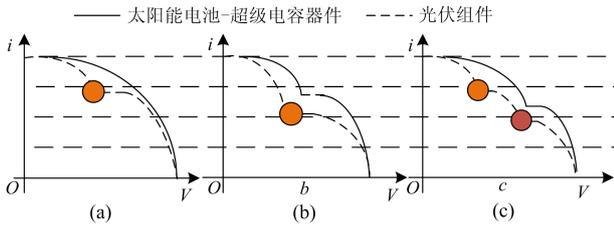


图3 串联器件的 I-V 特性曲线

Fig. 3 I-V characteristic curve of series SCSD

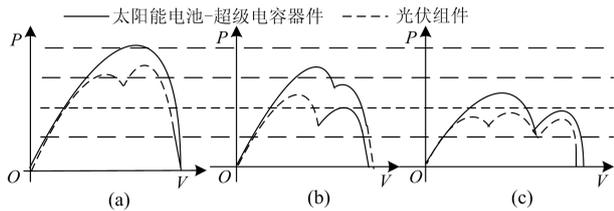


图4 串联器件的 P-V 特性曲线

Fig. 4 P-V characteristic curve of series SCSD

对图3和图4分析可得,对于由太阳能电池-超级电容器件组成的光伏阵列,轻度阴影时,可由SCSD中的超级电容对太阳能电池功率缺额进行全补偿,保持串联支路电流恒定,从而维持光伏阵列输出功率的单峰值。重度阴影时,超级电容只能对太阳能电池功率缺额进行部分补偿,此时阵列输出特性无法恢复单峰值,但提高了重度阴影下光伏全局峰值功率。多层阴影时,阴影较弱的SCSD可利用超级电容进行全补偿,阴影较强的器件只能利用超级电容进行部分补偿,减少了峰值点的数量。

## 2 基于SCSD的光伏阵列充放电控制策略

### 2.1 基于SCSD的光伏并网系统架构

以SCSD为基本单元,设计了 $m \times n$ 的串并联光伏阵列,并通过逆变器和变压器并网,系统结构如图5所示。

光伏阵列中每个SCSD通过控制开关K实现太阳能电池对超级电容充电,同时通过所有SCSD的三端口相互连接构成开关网络,使得每个SCSD的端口1和端口3都可以与任意SCSD的端口1和端口2并联,从而形成超级电容的放电回路,开关网

络结构如图6所示。

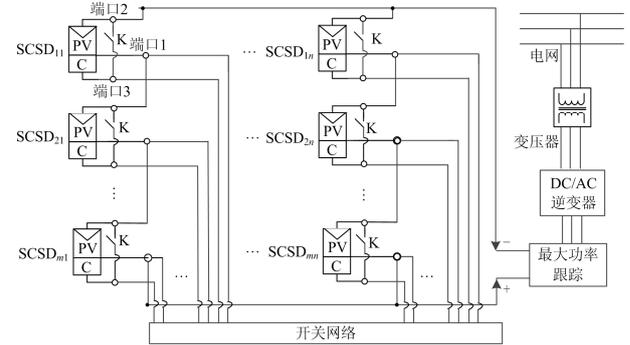


图5 以SCSD为基本单元的光伏发电系统架构

Fig. 5 PV power system structure based on SCSD

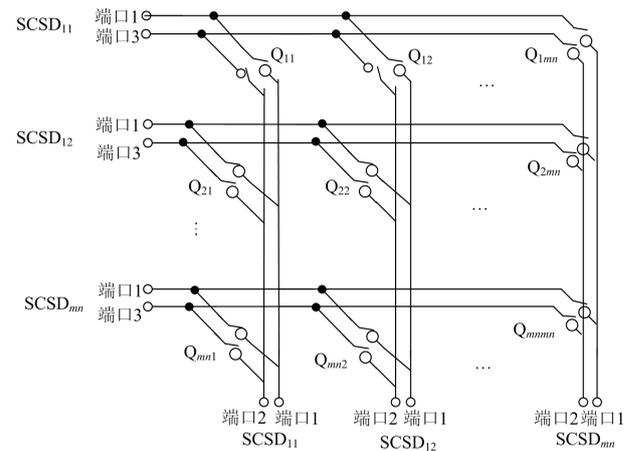


图6 开关网络

Fig. 6 Switch network

对于 $m \times n$ 的光伏阵列,开关网络中共有 $mn \cdot mn$ 个开关。其中,主对角线的开关实际上是指控制每个SCSD内部的超级电容对自身进行功率补偿的Boost变换器,非主对角线开关是指控制超级电容对其他SCSD进行功率补偿的Boost变换器。光伏阵列发生局部阴影时,通过控制开关网络中Boost变换器的状态,不仅可以实现SCSD内部的超级电容对自身补偿光伏功率缺额,也可通过其他SCSD的超级电容配合补偿,有效地解决了SCSD自身在重度阴影和多层阴影下功率不足的问题。

### 2.2 充放电策略

#### 1) 充电控制策略

为简化控制复杂度,采取仅在光照充足的条件下对超级电容充电的原则。通过采集当前时刻太阳能电池的输出电流和电压,计算其输出功率,再根据式(12)计算当前光照强度 $G$ 的大小。最后以标准光照强度为临界值,控制充电开关K的通断。

光照强度的计算表达式为

$$G = \frac{P_G}{\eta S [1 + 0.005(t_0 + 25)]} \quad (12)$$

式中： $\eta$  为转换效率，与光伏板材料有关； $S$  为光伏板的面积； $G$  为光照强度； $t_0$  为温度； $P_G$  为光照强度  $G$  下光伏阵列输出功率。由式(12)可以看出，对于已经安装好的光伏阵列， $\eta$ 、 $S$  为已知参数，不计温度对光伏输出的影响(温度恒定 25 °C)。

开关控制原则为

$$K = \begin{cases} 1 & G > 1000 \\ 0 & G \leq 1000 \end{cases} \quad (13)$$

式中：1 表示开关  $K$  闭合，太阳能电池对超级电容充电；0 表示开关  $K$  断开，太阳能电池不对超级电容充电。

## 2) 放电控制策略

由于超级电容放电需根据光伏功率缺额进行控制，因此本文采用功率反馈的 PWM 控制方法，通过控制 Boost 变换器的开关管通断，实现超级电容放电，其放电电路拓扑结构如图 7 所示。

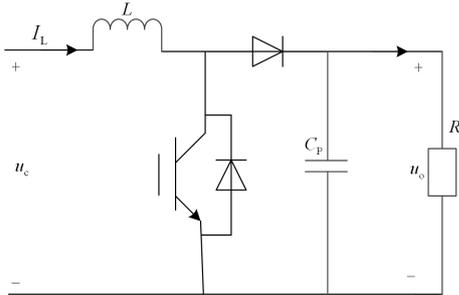


图 7 Boost 变换器电路图

Fig. 7 Boost converter circuit diagram

忽略 Boost 变换器的开关导通损耗、内阻损耗和二二极管压降，其状态空间方程可表示为

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = u_c - (1-D)u_o \\ C_p \frac{du_o}{dt} = (1-D)i_L - \frac{u_o}{R} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $D$  为不同时刻开关管的占空比； $u_c$  为超级电容端电压； $i_L$ 、 $u_o$  分别为在开关周期内电感电流和电容电压的平均值； $L$  为串联电感值； $C_p$  为并联电容值； $R$  为负载电阻。

设在  $t+1$  时刻，第  $i$  个 SCSD 出现阴影遮挡，若仅由器件  $i$  中的超级电容进行功率补偿，其充放电功率目标为

$$P_{\text{cref},i}(t+1) = P_{\text{PV},i}(t+1) - P_{\text{PV},i}(t) = U_c \cdot I_{\text{cref}} \quad (15)$$

若 SCSD 自身超级电容补偿功率不足，则需要其

他器件的超级电容配合补偿，设参与补偿的 SCSD 有  $h$  个，则每个超级电容充放电功率目标为

$$\begin{cases} P_{\text{cref},1}(t+1) = P_{\text{cref},i}(t+1) - P_{\text{cmax},i}(t+1) \\ P_{\text{cref},2}(t+1) = P_{\text{cref},1}(t+1) - P_{\text{cmax},1}(t+1) \\ \vdots \\ P_{\text{cref},h}(t+1) = P_{\text{cref},h-1}(t+1) - P_{\text{cmax},h-1}(t+1) \end{cases} \quad (16)$$

具体控制策略如图 8 所示。

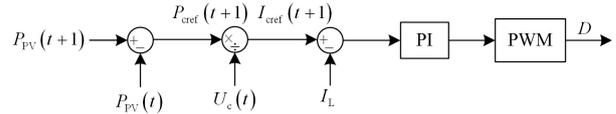


图 8 超级电容放电控制策略

Fig. 8 Supercapacitor discharge control strategy

## 3 算例分析

### 3.1 参数设置

以 12 块 SCSD 组成  $4 \times 3$  的串并联结构光伏阵列作为研究对象。假设初始条件下光伏阵列无阴影遮挡，辐照度均为  $1000 \text{ W/m}^2$ ，温度恒为  $25^\circ\text{C}$ ，太阳能电池-超级电容组件参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 太阳能电池参数

Table 1 Parameters of photovoltaic modules	
太阳能电池参数	数值
功率 $P/\text{W}$	260
短路电流 $I_{\text{sc}}/\text{A}$	9.71
开路电压 $V_{\text{oc}}/\text{V}$	36
最大功率点电流 $I_{\text{mpp1}}/\text{A}$	9.02
最大功率点电压 $U/\text{V}$	30

表 2 超级电容参数

Table 2 Parameters of supercapacitor	
超级电容参数	数值
容量 $F$	15
额定电压 $U_{\text{cref}}/\text{V}$	48
SOC 范围	10%~90%

### 3.2 仿真分析

通过在轻度阴影、重度阴影和多层阴影下，对应用本文所提方法和传统重构<sup>[22]</sup>方法的光伏阵列输出特性进行对比分析，验证了本文方法的可行性，以及相比传统重构方法的优势。

1) 光伏阵列受轻度阴影遮挡。设置 SCSD<sub>21</sub>、SCSD<sub>22</sub>、SCSD<sub>23</sub> 受到阴影遮挡，且光照强度  $700 \text{ W/m}^2$ ，其余 SCSD 单元的光照强度均为  $1000 \text{ W/m}^2$ 。

此时  $SCSD_{21}$ 、 $SCSD_{22}$ 、 $SCSD_{23}$  的光伏功率缺额可由各自的超级电容完全补偿。补偿后的光伏阵列输出功率曲线如图 9 所示。

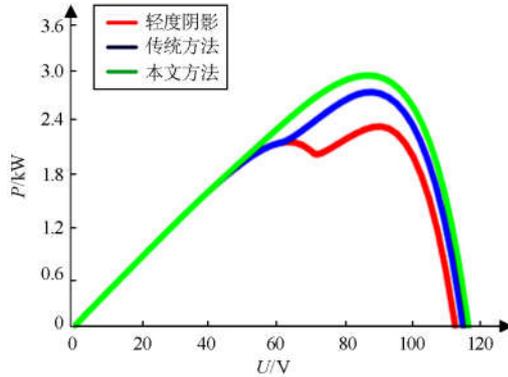


图 9 轻度阴影下光伏阵列 P-V 特性曲线

Fig. 9 P-V characteristic curve of PV array under light shading

由图 9 分析可得,发生轻度阴影后,光伏阵列的 P-V 曲线具有双峰值,最大输出功率降低为 2.4 kW。经传统方法对光伏阵列重构后,光伏阵列 P-V 曲线近似恢复为单峰值,最大输出功率提升到 2.8 kW。采用本文方法后,光伏阵列的 P-V 曲线恢复单峰值,且光伏阵列最大输出功率接近标准光照下的最大功率值 3.12 kW,从而验证了轻度阴影时,SCSD 相比普通光伏电池的具有更强的阴影适应能力。而且相比传统重构方法,本文方法可以通过自身超级电容放电对光伏功率缺额近似完全补偿,彻底消除阴影影响。

2) 光伏阵列受重度阴影遮挡。设置  $SCSD_{31}$ 、 $SCSD_{32}$ 、 $SCSD_{33}$  受到阴影遮挡,且光照强度  $400 \text{ W/m}^2$ ,其余 SCSD 单元的光照强度均为  $1000 \text{ W/m}^2$ 。

由于受重度阴影遮挡, $SCSD_{31}$ 、 $SCSD_{32}$ 、 $SCSD_{33}$  内部的超级电容补偿功率不足。此时  $SCSD_{31}$  的光伏功率缺额由  $SCSD_{31}$ 、 $SCSD_{12}$  和  $SCSD_{21}$  的超级电容共同补偿, $SCSD_{32}$  的光伏功率缺额由  $SCSD_{32}$  和  $SCSD_{11}$  的超级电容共同补偿; $SCSD_{33}$  的光伏功率缺额由  $SCSD_{33}$ 、 $SCSD_{23}$  和  $SCSD_{41}$  共同补偿。补偿后的光伏阵列输出功率曲线如图 10 所示。

由图 10 分析可得,发生重度阴影后,光伏阵列的 P-V 曲线也具有双峰值,最大输出功率降低为 1.95 kW。经传统方法对光伏阵列重构后,光伏阵列 P-V 曲线仍具有双峰值,最大输出功率提升到 2.4 kW。而采用本文方法后,光伏阵列的 P-V 曲线

恢复单峰值,最大输出功率为 3.0 kW。可以看出,本文方法通过多个 SCSD 的超级电容配合补偿功率,相比应用传统重构方法后的光伏阵列最大输出功率提高了 25%,还能使 P-V 曲线恢复单峰值。

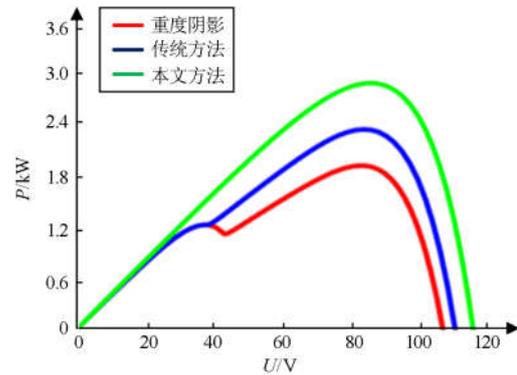


图 10 重度阴影下光伏阵列 P-V 特性曲线

Fig. 10 P-V characteristic curve of PV array under heavy shading

3) 光伏阵列受到多层阴影遮挡。为了便于比较说明,综合上述两种阴影分布,补偿后的光伏阵列输出功率曲线如图 11 所示。

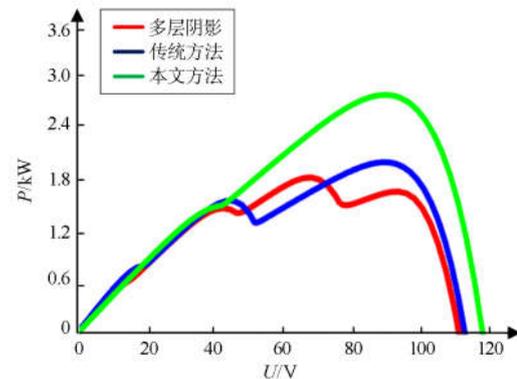


图 11 多层阴影下的光伏阵列 P-V 特性曲线

Fig. 11 P-V characteristic curve of PV array under multi-layers shading

由图 11 分析可得,相对于前两种阴影,多层阴影下光伏阵列最大输出功率显著降低,光伏阵列 P-V 曲线具有三峰值,最大输出功率为 1.8 kW;经传统重构方法对光伏阵列重构后,光伏阵列的 P-V 曲线仍为三峰值,最大输出功率为 2.1 kW;应用本文所提方法的光伏阵列 P-V 曲线成为双峰值,最大输出功率为 2.8 kW。验证了相比传统重构方法,本文方法在多层阴影下可以减少多峰值个数,光伏最大输出功率提高了 33%。

## 4 结论

本文针对局部阴影下光伏阵列的输出功率多峰值问题, 利用太阳能电池-超级电容器件的发电-储能双重功能, 构建了以 SCSD 为基本单元的光伏阵列, 并对正常光照和局部阴影下 SCSD 的数学模型及工作特性进行了分析。在此基础上, 提出了一种基于开关网络的充放电控制方法。通过仿真验证得到如下结论:

1) 与普通光伏电池相比, 本文所提出的太阳能电池-超级电容器件在局部阴影下有更高的输出功率, 对阴影的适应能力更强。

2) 与独立的光储系统相比, 以太阳能电池-超级电容器件组成的光伏阵列可以实现单体器件独立充放电控制, 有效避免了储能电池组不均衡问题。

3) 与传统重构方法相比, 所设计的基于 SCSD 的光伏阵列通过改变开关矩阵状态, 对超级电容动态重构和充放电控制, 不但有效解决了局部阴影下光伏阵列输出功率多峰值问题, 间接提高了最大功率跟踪算法精度, 降低了光伏功率波动对电力系统稳定运行的影响, 而且减少了开关动作数量。

## 参考文献

- [1] SUMATHI S, KUMAR L A, SUREKHA P. Solar PV and wind energy conversion systems[M] // Green Energy & Technology, Springer International Publishing, 2015.
- [2] 李琼慧. 光伏发电并网运行消纳形势及发展展望[J]. 电气应用, 2018, 37(16): 4-6.  
LI Qionghui. Absorption situation and development prospect of grid-connected photovoltaic power generation[J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(16): 4-6.
- [3] 李利娟, 吴军, 刘红良, 等. 计及新能源影响静态结合的电网脆弱节点辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 64-72.  
LI Lijuan, WU Jun, LIU Hongliang, et al. Static and dynamic integration method on identifying vulnerability nodes considering new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 64-72.
- [4] 常志拓, 张雨濛. 用于平抑功率波动的分布式综合能源站储能装置容量计算[J]. 供用电, 2019, 36(2): 73-78.  
CHANG Zhituo, ZHANG Yumeng. Energy storage device capacity calculation of distributed integrated energy station for suppressing power fluctuation[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(2): 73-78.
- [5] ZHU Q, XING Z, LI S, et al. Research and test of power loop based dynamic multi-peak MPPT algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7349-7359.
- [6] OBANE H, OKAJIMA K, OOZEKI T, et al. PV System with reconnection to improve output under nonuniform illumination[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2012, 2(3): 341-347.
- [7] VICENTE P S, VICENTE E M, RIBEIRO E R. A review of solar photovoltaic array reconfiguration methods[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 3-5, 2015, Buzios, Brazil.
- [8] 吴春华, 周笛青, 李智华, 等. 光伏组件热斑诊断及模糊优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 50-61, 9.  
WU Chunhua, ZHOU Diqing, LI Zhihua, et al. Hot spot detection and fuzzy optimization control method of PV module[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 50-61, 9.
- [9] 王秀云, 王见, 田壁源, 等. 基于智能旁路二极管对遮阴影响下的太阳能模组优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 68-75.  
WANG Xiuyun, WANG Jian, TIAN Biyuan, et al. Optimization design of solar module based on intelligent bypass diode under shadow effect[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 68-75.
- [10] SALMAN S, AI Xin, WU Zhouyang. Design of a P-&-O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200 W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [11] 石磊, 侯学良. 并网光伏电站发电效率快速估算实用模型[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 166-171, 177.  
SHI Lei, HOU Xueliang. A practical model for rapid estimation of generation efficiency of grid-connected PV power plants[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(2): 166-171, 177.
- [12] 奚鑫泽, 黄文焘, 张茗沁, 等. 大型光伏电站直流升压汇集接入系统协同控保体系与方案研究[J]. 供用电, 2018, 35(8): 52-60.  
XI Xinze, HUANG Wentao, ZHANG Mingqin, et al. Research on cooperative control and protection system and scheme of DC step-up collection system for large-scale photovoltaic power plants[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(8): 52-60.

- [13] 丁明, 刘盛, 徐志成. 光伏阵列改进优化设计方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 2-9.  
DING Ming, LIU Sheng, XU Zhicheng. An improved optimization design method for solar photovoltaic arrays and engineering application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 2-9.
- [14] KHATOON S, IBRAHEEM, JALIL M F. Feasibility analysis of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions[C] // 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), December 17-20, 2015, New Delhi, India.
- [15] 丁坤, 王祥, 翟泉新, 等. 常见光伏阵列拓扑重构方法综述[J]. 机电工程, 2014, 31(4): 507-511.  
DING Kun, WANG Xiang, ZHAI Quanxin, et al. Review of common PV array topology reconfiguration methods[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(4): 507-511.
- [16] 王刚, 王颖. 太阳照射的辐射采暖房间地板表面温度场动态模拟[J]. 节能技术, 2005(1): 69-72, 93.  
WANG Gang, WANG Ying. Dynamic simulation of floor surface temperature field of radiant floor heating room with the solar irradiation[J]. Energy Conservation Technology, 2005, 23(1): 69-72, 93.
- [17] 杨惠, 晁凯悦, 孙向东, 等. 基于开关序列的光伏储能双向 DC-DC 变换器预测电流控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 300-307.  
YANG Hui, ZHAO Kaiyue, SUN Xiangdong, et al. Predictive current control method of photovoltaic energy storage for bidirectional DC-DC converter based on switching sequence[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 300-307.
- [18] 杨子龙, 宋振浩, 潘静, 等. 分布式光伏/储能系统多运行模式协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2213-2220, 4.  
YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2213-2220, 4.
- [19] 李培强, 段克会, 董彦婷, 等. 含分布式混合储能系统的光伏直流微网能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 42-48.  
LI Peiqiang, DUAN Kehui, DONG Yanting, et al. Energy management strategy for photovoltaic DC microgrid with distributed hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 42-48.
- [20] 许峰, 杨艳. 基于开关矩阵的超级电容器组均衡系统研究[J]. 通信电源技术, 2017, 34(3): 50-52.  
XU Feng, YANG Yan. Research on equalization system for supercapacitor stacks based on switch matrix[J]. Telecom Power Technology, 2017, 34(3): 50-52.
- [21] 刘晓艳, 祁新梅, 郑寿森, 等. 局部阴影条件下光伏阵列的建模与分析[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 192-197.  
LIU Xiaoyan, QI Xinmei, ZHENG Shousen, et al. Model and analysis of photovoltaic array under partial shading[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 192-197.
- [22] 程杉, 苏高参. 基于 CAPSO 的含分布式电源的配电网动态重构[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 27-33, 40.  
CHENG Shan, SU Gaocan. Dynamic reconfiguration of distribution network with distributed generations based on CAPSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 27-33, 40.

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-07-11

作者简介:

张宁(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电并网控制; E-mail: 635149497@qq.com

杨洪明(1972—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yhm5218@163.com

徐岩(1993—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: 1215910409@qq.com

(编辑 姜新丽)