

局部阴影遮挡下太阳能电池-超级电容器件阵列建模及其缺失电流协同补偿方法

杨洪明¹, 陈博文¹, 王 懂², 尹邦哲¹, 周任军¹

(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
教育部基于分布式光储的能源互联网运行与规划国际合作联合实验室, 湖南 长沙 410114;
2. 国网安徽省电力有限公司 宿州供电分公司, 安徽 宿州 234000)

摘要:在局部阴影条件下, 太阳能电池-超级电容器件(SCSD)阵列中被遮挡器件与未被遮挡器件的功率输出特性不一致, 导致SCSD阵列输出功率曲线存在多峰值, 需要建立局部阴影遮挡下SCSD阵列的数学模型, 并解决局部阴影导致的功率多峰值问题。为此, 建立了正常均匀光照、局部轻度阴影遮挡、局部重度阴影遮挡下SCSD阵列的数学模型, 详细刻画了不同阴影遮挡条件下SCSD阵列的输出特性; 在此基础上, 提出了控制SCSD阵列中超级电容充放电以补偿阴影遮挡器件缺失电流的方法。MATLAB仿真和实验室实验结果表明: 通过分段函数形式能准确描述局部阴影遮挡下SCSD阵列的数学模型; 所提超级电容电流补偿方法不但能使局部阴影遮挡下SCSD阵列的输出功率恢复单峰值, 而且有效提高了局部阴影遮挡下SCSD阵列的总输出功率。

关键词:太阳能电池-超级电容器件; 局部阴影遮挡; 功率多峰值; 缺失电流; 充放电补偿

中图分类号: TM 615

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202105013

0 引言

太阳能具有无污染、便于采集等优点, 是一种取之不尽、用之不竭、清洁安全的可再生能源, 如何高效利用太阳能资源受到全世界的高度重视^[1]。光伏发电并网运行已成为太阳能大规模开发利用的重要途径^[2]。光伏阵列是由多个太阳能电池板根据负载容量要求, 采用串并联方式所构成的大功率发电装置^[3]。光伏发电的输出功率与当地的气候条件、天气状况以及局部阴影条件下的太阳光遮挡等因素密切相关。鸟类的羽毛和粪便、电线与护栏、建筑物的遮挡、光伏组件上的杂物、光伏组件表面日积月累的灰尘等都是局部阴影遮挡的具体展现方式。阴影遮挡处光照强度的变化不但导致光伏阵列的输出功率波动, 而且使被遮挡器件由功率输出(电源)变成功率输入(负载), 导致光伏阵列出现热斑效应^[4]。热斑效应一方面导致受阴影遮挡的器件无法正常向并网系统输出功率, 另一方面还会使光伏组件受损。

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2021-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71931003, 72061147004); 湖南省科技项目(2019WK2011, 2019GK5015, 2018GK4002, 2019CT5001, kq1907086, 2020GK1014); 泛在电力物联网湖南省重点实验室项目(2019TP1016)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71931003, 72061147004), the Science and Technology Projects of Hunan Province(2019WK2011, 2019GK5015, 2018GK4002, 2019CT5001, kq1907086, 2020GK1014) and the Program of Hunan Province Key Laboratory of Ubiquitous Power Internet of Things(2019TP1016)

光伏阵列的热斑效应会导致组件过流发热, 可以通过为组件并联旁路二极管加以避免^[5]。当阵列处于局部阴影遮挡时, 电流经旁路二极管流出。该方法以牺牲受阴影遮挡器件的输出功率为代价, 造成光伏阵列的总输出功率特性曲线呈现多峰形。传统的最大功率点跟踪算法, 如恒定电压法、扰动观察法、电导增量法^[6]等都是应对单峰特性的有效方法, 在多峰情况下容易陷入局部最优值。部分最大功率点跟踪方法, 如扫描法^[7]、粒子群优化算法^[8]、遗传算法^[9]等虽然能在一定程度上追踪到局部阴影遮挡下光伏阵列的最大功率点, 但并未从根本上解决多峰值问题, 光伏阵列的最大输出功率仍小于各器件最大输出功率之和。

为了提高局部阴影遮挡下光伏阵列的输出功率, 学者们开展了一系列研究工作, 主要集中在改变光伏阵列结构、并联补偿单元2种方法。改变光伏阵列结构方法利用开关改变光伏阵列的物理连接状态, 将局部阴影均匀分布在整個光伏阵列中, 使光伏阵列的输出特性恢复至单峰值, 达到降低热斑效应的目的^[10-11]。该方法在一定程度上削弱了局部阴影的影响, 使功率-电压特性曲线呈现单峰特性, 但仍无法有效提高阴影遮挡器件的输出电流和功率, 且需要控制大量开关动作, 功率损耗大。并联补偿单元方法通过为光伏器件并联功率补偿单元^[12-13], 利用正常均匀光照器件或者储能电池组补偿受阴影遮挡器件的输出功率, 从而应对光伏阵列局部阴影遮挡下的功率降低问题。该方法在一定程度上使光伏

阵列的输出特性曲线只有一个峰值点,具有后续控制简单的优点。但是,当有多个器件同时受到阴影遮挡时,需要较多的功率补偿单元,所需成本高。同时,储能电池在使用时通常采用电池单体直接串并联构成电池组的形式,电池单体之间存在均衡问题^[14],也存在一定的安全隐患。

为了有效补偿光伏发电的波动性和实际功率需求,基于太阳能电池和储能电池设备不同特性,学术界提出了光伏发电-储能一体化器件的概念^[15]。文献[16]提出了一种太阳能电池-超级电容器(SCSD),该装置以太阳能电池的铝电极同时作为超级电容器的阳极衬底,将太阳能电池和超级电容器集成为一个三端口器件,不但简化了制作工艺,而且减小了电荷转移造成的能量损失,同时提高了超级电容的能量密度,使超级电容兼顾高功率和高能量输出,全生命周期成本相较于蓄电池也大幅降低^[17]。文献[18]提出了阴影遮挡下SCSD阵列避免光伏输出功率多峰值的充放电控制框架,但缺乏SCSD阵列在各种光照强度下的准确数学建模,也未给出应对阴影遮挡下缺失电流的定量补偿方法。

为此,本文建立了正常均匀光照、局部轻度阴影遮挡、局部重度阴影遮挡下SCSD阵列的电特性数学模型,并提出了一种基于双向DC/DC变换器的超级电容充放电控制方法。通过设计SCSD的超级电容充放电策略,实现对单个SCSD器件的独立控制及多个SCSD器件之间的协同控制,有效解决局部阴影遮挡下光伏阵列输出功率的多峰值问题,使光伏系统的发电效率得以提高。

1 SCSD等效电路及阵列工作特性分析

针对SCSD的物理结构,建立无阴影遮挡、局部阴影遮挡下SCSD阵列的等效电路数学模型。通过分析SCSD的工作特性,从理论上证明,相比于传统的光伏组件,SCSD阵列具有更强的局部阴影适应能力。

1.1 SCSD的物理结构

SCSD结构见附录中图A1。在该器件中,太阳能电池的正、负极分别与端口1、端口2相连,超级电容的正、负极分别与端口1、端口3相连,两者在端口1处通过共用铝电极相连。SCSD的等效电路模型见图1,超级电容通过开关与太阳能电池并联。图中,

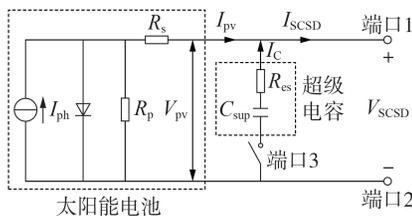


图1 SCSD的等效电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of SCSD

I_{ph} 为太阳能电池的光生电流; R_p 、 R_s 分别为太阳能电池的等效串联电阻、旁漏电阻; V_{pv} 、 I_{pv} 分别为太阳能电池的输出电压、输出电流; C_{sup} 、 R_{es} 分别为超级电容的电容值、等效串联电阻; I_c 为超级电容的输出电流; I_{scSD} 、 V_{scSD} 分别为SCSD的输出电流、输出电压。

太阳能电池的工程数学模型^[19]为:

$$I_{pv} = I_{sc} \{1 - C_1 [e^{V_{pv}/(C_2 V_{oc})} - 1]\} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_1 = (1 - I_m/I_{sc}) e^{-V_m/(C_2 V_{oc})} \\ C_2 = (V_m/V_{oc} - 1) [\ln(1 - I_m/I_{sc})]^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

其中, V_{oc} 、 I_{sc} 分别为太阳能电池的开路电压、短路电流; V_m 、 I_m 分别为太阳能电池最大功率点的电压、电流。

由图1可知,单个SCSD的输出电流为太阳能电池的输出电流与超级电容的输出电流之和,且 $V_{scSD} = V_{pv}$,则有:

$$I_{scSD} = I_{pv} + I_c = I_{sc} \{1 - C_1 [e^{V_{scSD}/(C_2 V_{oc})} - 1]\} + I_c \quad (3)$$

1.2 无阴影遮挡下SCSD阵列建模及特性分析

SCSD阵列是根据负载容量要求,由若干SCSD通过串并联方式组成的大功率、具有发电-储能双重功能的装置。串并联阵列结构见附录中图A2(a),其由 M 个SCSD串联组成器件串(称为单串阵列,结构见附录中图A2(b)),每个器件串串联一个防逆流二极管 D_j ;然后将 N 个单串阵列并联构成SCSD阵列。图中,SCSD $_{i,j}$ 表示处于第 i 行第 j 列的SCSD; Ω_1 为处于正常均匀光照无阴影遮挡下的SCSD集合; Ω_2 为处于局部阴影遮挡下的SCSD集合。

当SCSD阵列不受阴影遮挡时,所有阵列器件处于均匀光照下,阵列中所有太阳能电池输出相同的电压、电流,超级电容无需对太阳能电池进行补偿,即 $I_c = 0$ 。此时,SCSD的输出电流为太阳能电池的输出电流,即 $I_{scSD} = I_{pv}$ 。

均匀光照下SCSD阵列的输出电压为单串阵列中各SCSD的输出电压之和,输出电流为各单串阵列的输出电流之和。因此,均匀光照下串并联SCSD阵列的输出电压、输出电流、输出功率与单个SCSD的输出电压、输出电流、输出功率之间具有如下关系:

$$\begin{cases} V_o = V_{s,j} = \sum_{i=1}^M V_{scSD,i,j} \\ I_o = \sum_{j=1}^N I_{s,j} = \sum_{j=1}^N I_{scSD,i,j} = \\ \sum_{j=1}^N I_{sc,i,j} \{1 - C_1 [e^{V_{scSD,i,j}/(C_2 V_{oc,i,j})} - 1]\} \\ P_o = V_o I_o = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M V_{scSD,i,j} I_{scSD,i,j} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M P_{scSD,i,j} \end{cases} \quad (4)$$

其中, V_o 、 I_o 、 P_o 分别为SCSD阵列的输出电压、输出电流、输出功率; $I_{s,j}$ 、 $V_{s,j}$ 分别为第 j 个单串阵列的输出

电流、输出电压; $V_{SCSD,i,j}$ 、 $I_{SCSD,i,j}$ 、 $P_{SCSD,i,j}$ 分别为 SCSD_{*i,j*} 的输出电压、输出电流、输出功率; $V_{oc,i,j}$ 、 $I_{sc,i,j}$ 分别为 SCSD_{*i,j*} 中太阳能电池的开路电压、短路电流。

1.3 局部阴影遮挡下 SCSD 阵列建模及特性分析

当 SCSD 阵列受到鸟类的羽毛和粪便、电线与护栏等遮挡时,阵列处于局部阴影下,阵列中太阳能电池输出不同的电压、电流,超级电容需对 SCSD 进行补偿。此时,SCSD 的输出电流为太阳能电池与超级电容的输出电流之和,即满足式(3)。根据超级电容能补偿的程度,将阴影状态分为轻度阴影、重度阴影。若 SCSD 自身的超级电容能够完全补偿阴影遮挡所导致的太阳能电池电流缺失,则称为轻度阴影;若 SCSD 自身的超级电容不能完全补偿太阳能电池的电流缺失,则称为重度阴影。此外,当轻度阴影遮挡下 SCSD 自身的超级电容因能量有限无法继续补偿太阳能电池的电流缺失时,SCSD 处于自身的超级电容不能完全补偿太阳能电池电流缺失状态,此时重新定义为重度阴影状态。利用阴影遮挡和无阴影遮挡下 SCSD 的超级电容协同补偿控制方法,可实现 SCSD 的持续电流补偿,具体补偿方法介绍见第2节。

1.3.1 轻度阴影遮挡下 SCSD 阵列的数学模型

当 SCSD 单串阵列处于轻度阴影遮挡下时, Ω_2 中的 SCSD 受到遮挡, SCSD_{*i,j*} ($SCSD_{i,j} \in \Omega_2$) 中太阳能电池的输出电流 $I_{pv,i,j}$ 小于无阴影遮挡 SCSD_{*i',j'*} ($SCSD_{i',j'} \in \Omega_1$) 中太阳能电池的输出电流 $I'_{pv,i',j'}$, 即:

$$I_{pv,i,j} < I'_{pv,i',j'} \quad SCSD_{i',j'} \in \Omega_1, SCSD_{i,j} \in \Omega_2 \quad (5)$$

此时, Ω_1 中 SCSD 的超级电容不需要对太阳能电池实施电流补偿,超级电容的输出电流为0; Ω_2 中 SCSD 的超级电容需要对太阳能电池实施缺失电流补偿,且能完全补偿阴影遮挡所导致的缺失电流,超级电容的输出电流如式(6)所示。

$$I_{C,i,j} = I'_{pv,i',j'} - I_{pv,i,j} \quad SCSD_{i',j'} \in \Omega_1, SCSD_{i,j} \in \Omega_2 \quad (6)$$

其中, $I_{C,i,j}$ 为 SCSD_{*i,j*} 中超级电容的输出电流。此时, Ω_1 和 Ω_2 中 SCSD 的输出电流相等。经超级电容补偿后, SCSD 单串阵列的输出电流和输出电压为:

$$\begin{cases} I_{S,j} = I_{sc,i,j} \{1 - C_1 [e^{V_{SCSD,i,j}/(C_2 V_{oc,i,j})} - 1]\} + I_{C,i,j} \\ V_{S,j} = \sum_{i=1}^M V_{SCSD,i,j} \end{cases} \quad (7)$$

对比式(4)、(7)可知,经超级电容补偿后,轻度阴影遮挡下 Ω_2 中 SCSD 的输出电流恢复至 Ω_1 中 SCSD 的输出电流。超级电容对轻度阴影遮挡下的 SCSD 阵列补偿后, SCSD 阵列的输出电流和电压表示为:

$$\begin{cases} I_o = \sum_{j=1}^N \{I_{sc,i,j} \{1 - C_1 [e^{V_{SCSD,i,j}/(C_2 V_{oc,i,j})} - 1]\} + I_{C,i,j}\} \\ V_o = \sum_{i=1}^M V_{SCSD,i,j} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,轻度阴影遮挡下 SCSD 阵列

的输出特性与均匀光照下 SCSD 阵列的输出特性一致。可见,相比于传统的仅由太阳能电池组成的光伏阵列, SCSD 阵列具有更强的阴影适应能力。

1.3.2 重度阴影遮挡下 SCSD 阵列的数学模型

当 SCSD 单串阵列处于重度阴影遮挡时, Ω_2 中 SCSD 的超级电容输出电流无法完全补偿遮挡所导致的太阳能电池缺失电流, 即:

$$I_{pv,i,j} + I_{C,i,j} < I'_{pv,i',j'} \quad SCSD_{i',j'} \in \Omega_1, SCSD_{i,j} \in \Omega_2 \quad (9)$$

SCSD 单串阵列的输出电压由光照强度决定,当光照强度不变时,输出电压保持不变,输出电流大小由外部负载阻抗决定。当外部负载阻抗较小, SCSD 单串阵列的输出电流较大,满足式(10) (即 SCSD 单串阵列的输出电流大于 Ω_2 中经超级电容补偿后 SCSD 能够输出的最大电流)时, Ω_2 中 SCSD_{*i,j*} 的旁路二极管 $D_{i,j}$ 形成正向偏压,旁路二极管导通,则太阳能电池和超级电容两端的电压 (即旁路二极管的压降) 较小,对外输出功率约为0。

$$I_{pv,i,j} + I_{C,i,j} < I_{S,j} \leq I'_{pv,i',j'} \quad SCSD_{i',j'} \in \Omega_1, SCSD_{i,j} \in \Omega_2 \quad (10)$$

在此情形下,仅 Ω_1 中 SCSD 对外输出功率, SCSD 单串阵列的输出电流和输出电压为:

$$\begin{cases} I_{S,j} = I_{sc,i,j} \{1 - C_1 [e^{V_{SCSD,i,j}/(C_2 V_{oc,i,j})} - 1]\} \\ V_{S,j} = \sum_{SCSD_{i,j} \in \Omega_1} V_{SCSD,i,j} \end{cases} \quad (11)$$

随着负载阻抗不断增大, SCSD 单串阵列的输出电流逐渐变小。当单串阵列的输出电流满足式(12) (即 SCSD 单串阵列的输出电流不大于 Ω_2 中经超级电容补偿后 SCSD 能够输出的最大电流)时, Ω_2 中 SCSD 的旁路二极管形成反向偏压,旁路二极管截止, Ω_2 中 SCSD 恢复对外输出功率。

$$0 \leq I_{S,j} \leq I_{pv,i,j} + I_{C,i,j} \quad SCSD_{i,j} \in \Omega_2 \quad (12)$$

在此情形下, Ω_1 和 Ω_2 中的 SCSD 均对外输出功率, SCSD 单串阵列的输出电流和输出电压为:

$$\begin{cases} I_{S,j} = I_{sc,i,j} \{1 - C_1 [e^{V_{SCSD,i,j}/(C_2 V_{oc,i,j})} - 1]\} + I_{C,i,j} \\ V_{S,j} = \sum_{i=1}^M V_{SCSD,i,j} = \sum_{SCSD_{i',j'} \in \Omega_1} V_{SCSD,i',j'} + \sum_{SCSD_{i,j} \in \Omega_2} V_{SCSD,i,j} \end{cases} \quad (13)$$

综上所述,式(10)和式(12)所示条件下 SCSD 单串阵列的输出电流/电压分别为式(11)和式(13),可见重度阴影遮挡下 SCSD 单串阵列的输出电流/电压表现为随负载阻抗变化的分段函数形式。此时,超级电容虽然无法完全补偿受阴影遮挡器件的缺失电流,但有效提高了二极管导通的电流临界值 (体现为阴影遮挡下太阳能电池与超级电容的输出电流之和,即 $I_{pv,i,j} + I_{C,i,j}$)。局部阴影遮挡下的 SCSD 与正常均匀光照下的 SCSD 在外部负载阻抗变化的较大范围内,都可以对外输出功率。

故重度阴影遮挡下 SCSD 阵列的输出电流和输出电压如式(14)和式(15)所示。

(1) 如果 $0 \leq I_{S,j} \leq I_{pv,i,j} + I_{C,i,j}$ ($SCSD_{i,j} \in \Omega_2$), 则有:

$$\begin{cases} I_o = \sum_{j=1}^N I_{S,j} = \sum_{j=1}^N \{ I_{sc,i,j} [1 - C_1 [e^{V_{SCSD,i,j}/(C_2 V_{oc,i,j})} - 1]] + I_{C,i,j} \} \\ V_o = \max \{ V_{S,j} \} = \max \left\{ \sum_{SCSD_{i',j'} \in \Omega_1} V_{SCSD,i',j'} + \sum_{SCSD_{i,j} \in \Omega_2} V_{SCSD,i,j} \right\} \end{cases} \quad (14)$$

(2) 如果 $I_{pv,i,j} + I_{C,i,j} < I_{S,j} \leq I'_{pv,i',j'}$ ($SCSD_{i',j'} \in \Omega_1$ 以及 $SCSD_{i,j} \in \Omega_2$), 则有:

$$\begin{cases} I_o = \sum_{j=1}^N I_{S,j} = \sum_{j=1}^N I_{sc,i,j} \{ 1 - C_1 [e^{V_{SCSD,i,j}/(C_2 V_{oc,i,j})} - 1] \} \\ V_o = \max \{ V_{S,j} \} = \max \left\{ \sum_{SCSD_{i',j'} \in \Omega_1} V_{SCSD,i',j'} \right\} \end{cases} \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可以看出, 重度阴影遮挡下 SCSD 阵列的输出特性与外部负载阻抗有关。当负载阻抗较大时, SCSD 阵列的输出特性与正常均匀光照条件下 SCSD 阵列的输出特性一致; 当负载阻抗较小时, SCSD 阵列的输出特性与正常均匀光照条件下 SCSD 阵列的电流输出特性不同。相比于传统仅有太阳能电池的光伏阵列, 无论外部负载阻抗大小, SCSD 阵列都具有更强的阴影适应能力。

2 阴影遮挡和无阴影遮挡下 SCSD 中超级电容协同补偿控制方法

SCSD 阵列中的各器件都具有发电-储能双重功能。当 SCSD 处于轻度阴影遮挡下时, 其超级电容能完全补偿自身太阳能电池的缺失电流; 当 SCSD 处于重度阴影遮挡下时, 会出现自身超级电容不能完全补偿缺失电流的情况。为了综合利用 SCSD 阵列中所有超级电容的储能特性, 最大化利用超级电容的补偿能力, 本节提出了阴影遮挡下 SCSD 超级电容与无阴影遮挡下 SCSD 超级电容的协同补偿控制方法。

为了实现 SCSD 阵列中所有超级电容的充放电协同控制, 各器件的太阳能电池连接端口 1 和端口 2 构成行向量端子排, 各器件的超级电容连接端口 1 和端口 3 构成列向量端子排。每个行向量端子出口处连接开关 $Q_{i,j}$, 每个列向量端子出口处连接双向 DC/DC 变换器。对于 $M \times N$ 的 SCSD 阵列而言, 其共有 $M \times N$ 个开关, 协同补偿网络的具体结构见图 2。

2.1 阴影遮挡下 SCSD 自身的超级电容补偿控制

为了协调 SCSD 中超级电容与太阳能电池的出力, 设计超级电容的充放电控制方法如图 3 所示。当器件 $SCSD_{i,j}$ 受到阴影遮挡时, 控制自身的超级电容放电进行缺失电流补偿。根据式(16)计算当前的光照强度 G , 获得光照强度 G 与标准光照强度 G_{ref} (1000 W/m^2) 之差 ΔG 。当 $\Delta G > 0$ 时, 理想开关导通, 偏差 ΔG 通过 PI 控制器, 确定 SCSD $_{i,j}$ 中超级电容

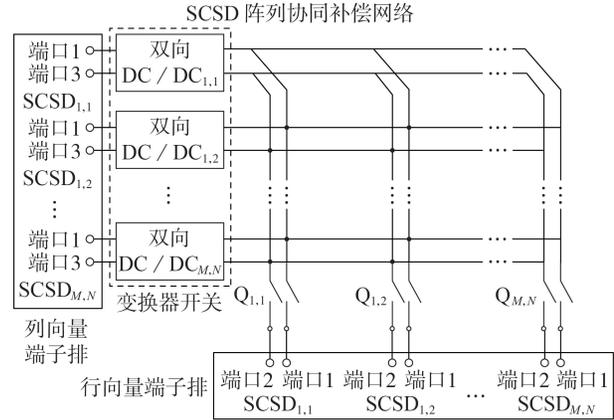


图2 SCSD阵列的协同补偿网络

Fig.2 Cooperative compensation network of SCSD array

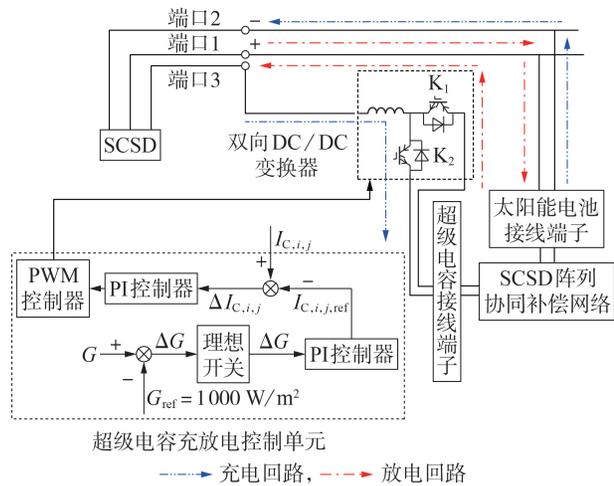


图3 SCSD中超级电容的充放电控制

Fig.3 Charging and discharging control of supercapacitor in SCSD

的放电参考电流 $I_{C,i,j,ref}$, 并将其与超级电容的实际放电电流 $I_{C,i,j}$ 进行比较, 获得放电电流偏差 $\Delta I_{C,i,j}$ 。 $\Delta I_{C,i,j}$ 经 PI 控制器和脉宽调制 (PWM) 控制器后, 生成 PWM 开关信号, 控制双向 DC/DC 变换器中开关 K_1 、 K_2 的通断。此时, SCSD 阵列协同补偿网络中的开关 $Q_{i,j}$ 导通, 双向 DC/DC 变换器中开关 K_2 截止, 开关 K_1 受 PWM 信号控制实时改变。

$$G = \frac{P_{o,G}}{\eta S [1 + 0.005(t_o + 25)]} \quad (16)$$

其中, $P_{o,G}$ 为光照强度 G 下 SCSD 的输出功率; t_o 为温度; η 为太阳能电池的转换效率, 其值与光伏材料相关, S 为 SCSD 的面积, 这 2 个参数不计温度 (恒定为 25°C) 对阵列输出功率的影响。

2.2 阴影遮挡和无阴影遮挡下 SCSD 中超级电容的充放电协同补偿控制

当 $SCSD_{i,j} \{ SCSD_{i,j} \in \Omega_2 \}$ 处于重度阴影遮挡下, 自身超级电容不能完全补偿太阳能电池的缺失电流时, 通过控制无阴影遮挡器件 $SCSD_{i',j'} \{ SCSD_{i',j'} \in \Omega_1 \}$

的超级电容,再次补偿阴影遮挡下器件的缺失电流。

若SCSD阵列中无阴影遮挡的器件能够完全补偿所有阴影遮挡器件的缺失电流,当 Ω_1 中单个无阴影遮挡器件提供的最大补偿电流 $I'_{C,i,j',\max}$ 大于等于 Ω_2 中单个阴影遮挡器件自身超级电容补偿后仍缺失的电流,即 $I'_{C,i,j',\max} \geq I'_{pv,i,j'} - (I_{pv,i,j} + I_{C,i,j})$ 时,无阴影遮挡器件直接对单个阴影遮挡器件进行补偿,补偿电流大小 $I'_{C,i,j'}$ 见式(17);当 Ω_1 中单个无阴影遮挡器件提供的最大补偿电流 $I'_{C,i,j',\max}$ 小于 Ω_2 中单个阴影遮挡器件自身超级电容补偿后仍缺失的电流,即 $I'_{C,i,j',\max} < I'_{pv,i,j'} - (I_{pv,i,j} + I_{C,i,j})$ 时,无阴影遮挡器件对单个阴影遮挡器件进行 $I'_{C,i,j',\max}$ 补偿后,仍需额外无阴影遮挡器件继续补偿,补偿电流大小 $I''_{C,i,j'}$ 见式(18)。

$$I'_{C,i,j'} = I'_{pv,i,j'} - (I_{pv,i,j} + I_{C,i,j}) \quad (17)$$

$$I''_{C,i,j'} = I'_{C,i,j',\max} - (I_{pv,i,j} + I_{C,i,j}) - I'_{C,i,j',\max} \quad (18)$$

依此类推,当根据式(18)计算所得补偿电流小于等于0时,无阴影遮挡器件能完成对该单个阴影遮挡器件的完全补偿。此时SCSD阵列的输出电流和输出电压如式(8)所示。

若SCSD阵列中无阴影遮挡器件不能完全补偿阴影遮挡器件的缺失电流时, Ω_1 中所有SCSD的超级电容都对 Ω_2 中阴影遮挡器件提供最大补偿电流, Ω_2 中的SCSD分为被完全补偿SCSD和未被完全补偿SCSD,此时的SCSD阵列输出电流和输出电压如式(14)和式(15)所示,其中重度阴影遮挡器件集合 Ω_2 为未被完全补偿的SCSD集合。

3 算例分析

3.1 SCSD阵列的参数设置

以9块SCSD组成的3×3 SCSD阵列作为研究对象。设SCSD阵列的初始条件为无阴影遮挡,光照强度为 1000 W/m^2 ,温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$;当SCSD阵列处于轻度阴影遮挡时,光照强度为 950 W/m^2 ,温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$;当SCSD阵列处于重度阴影遮挡时,光照强度为 800 W/m^2 ,温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。不同阴影遮挡条件下SCSD的具体参数见附录中表A1。

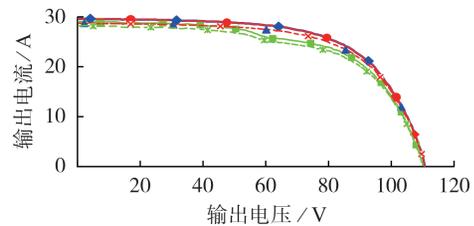
为了验证所提SCSD数学模型的正确性,对3×3 SCSD阵列分别通过MATLAB/Simulink仿真、实验室实验进行对比分析。设置器件SCSD_{3,1}(即SCSD阵列中第3行第1列的器件)分别受到轻度阴影和重度阴影遮挡,只有其自身的超级电容对SCSD_{3,1}进行缺失电流补偿,而阵列中其他无遮挡器件均不对SCSD_{3,1}进行额外的电流补偿。

3.2 SCSD阵列的仿真与实验结果验证

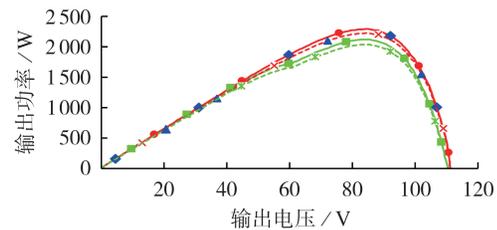
3.2.1 轻度阴影遮挡下SCSD阵列的输出特性

轻度阴影遮挡下SCSD阵列的电流-电压和功率-电压曲线见图4。由图可知,当SCSD受到局部

轻度阴影遮挡时,超级电容能够完全补偿遮挡器件自身的缺失电流,SCSD阵列的电流-电压曲线恢复单阶梯状,功率-电压曲线恢复单峰值特性,超级电容的电流补偿提高了SCSD阵列应对阴影遮挡情况的能力;同时,轻度阴影遮挡下SCSD阵列的输出特性曲线与无阴影遮挡下SCSD阵列的输出特性曲线重合,这验证了本文所提轻度阴影遮挡下SCSD阵列数学模型(式(8))的准确性。



(a) 电流-电压曲线



(b) 功率-电压曲线

— 超级电容未补偿(仿真), — 超级电容补偿(仿真)
— 无阴影遮挡(仿真), — 超级电容未补偿(实验)
— 超级电容补偿(实验), — 无阴影遮挡(实验)

图4 轻度阴影遮挡下SCSD阵列的仿真与实验曲线

Fig.4 Simulative and experimental curves of SCSD array under light shadow

3.2.2 重度阴影遮挡下SCSD阵列的输出特性

重度阴影遮挡下SCSD阵列的电流-电压和功率-电压曲线见附录中图A3。由图可知,在重度阴影遮挡下SCSD自身的超级电容无法完全补偿太阳能电池的缺失电流,功率-电压特性曲线不能完全呈现无阴影遮挡下SCSD输出特性曲线的单峰值特性,但超级电容减弱了阴影遮挡对SCSD阵列输出特性曲线的影响程度,有效提升了SCSD阵列的最大输出功率。仿真特性曲线验证了所推导的重度阴影遮挡下SCSD阵列数学模型(式(14)、(15))具有较高的适用性。

3.3 SCSD阵列中超级电容协同补偿控制效果分析

为了进一步地验证重度阴影遮挡下本文所提SCSD阵列中超级电容充放电控制方法的有效性,以SCSD_{3,1}为例,假设除其自身的超级电容对器件进行缺失电流补偿外,阵列中无遮挡器件根据不同的情况对该器件再次实施电流补偿。为了对比分析重度阴影遮挡下超级电容对SCSD_{3,1}进行补偿的控制效果,设置以下3种方案:方案1,当SCSD_{3,1}自身的超级电容无法完全补偿时,由超级电容荷电状态(SOC)

为25%的SCSD_{1,2}参与补偿;方案2,当SCSD_{3,1}自身的超级电容无法完全补偿时,由超级电容SOC为50%的SCSD_{1,3}参与补偿;方案3,当SCSD_{3,1}自身的超级电容无法完全补偿时,由超级电容SOC为20%的SCSD_{2,1}和超级电容SOC为30%的SCSD_{2,2}共同参与补偿。

假设 $t = 0.3$ s时,SCSD_{3,1}处于重度阴影遮挡状态。 $[0, 0.3)$ s内,SCSD阵列在无阴影遮挡的正常均匀光照强度条件下运行; $[0.3, 0.6]$ s内,SCSD阵列处于超级电容补偿后的运行状态。SCSD阵列的输出功率曲线如图5(a)所示,3种方案中参与补偿的超级电容SOC变化曲线如图5(b)所示。

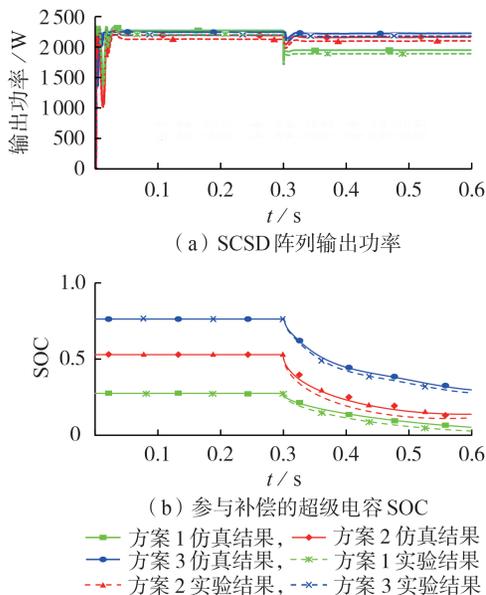


图5 SCSD阵列中超级电容协同补偿仿真与实验曲线

Fig.5 Simulative and experimental curves of cooperative compensation of supercapacitor in SCSD array

由图5知,方案1中SCSD_{3,1}自身超级电容无法完全补偿缺失电流,且参与额外补偿的SCSD_{1,2}超级电容的SOC较小,故SCSD_{3,1}的缺失电流无法被完全补偿,呈现“欠补偿”状态,导致SCSD阵列输出功率下降近300 W(13%);方案2、3中SCSD阵列的超级电容能完全补偿SCSD_{3,1}的缺失电流,使整个SCSD阵列输出功率与无阴影遮挡时的输出功率基本保持相同,且方案2比方案3少启动一个超级电容进行补偿。

4 结论

基于SCSD的发电-储能双重功能,提出了轻度阴影遮挡、重度阴影遮挡下SCSD阵列输出特性的分段函数形式,并通过基于双向DC/DC变换器的超级电容协同充放电控制,实现阴影遮挡器件的缺失电流补偿。通过对比MATLAB/Simulink仿真结果和实验室实验结果可以得出以下结论:

(1)相比于传统的光伏阵列,所构建的SCSD阵

列具有更强的阴影遮挡适应能力,当受到局部阴影遮挡时,能够显著提升输出功率;

(2)基于双向DC/DC变换器的超级电容补偿控制方法有效实现了单体SCSD的独立控制及多SCSD间的协同控制,通过准确补偿阴影遮挡下太阳能电池的缺失电流,能实现SCSD阵列的单峰值输出特性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32,39.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [2] 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.
- [3] 鲍建宇,鲍卫兵,李玉玲. 光伏并网三相电流型多电平变流器拓扑与控制[J]. 电工技术学报,2016,31(8):70-75.
BAO Jianyu, BAO Weibing, LI Yuling. Topology and control of three-phase multilevel current-source converter for photovoltaic grid-connection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 70-75.
- [4] 韩平,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] 张兴,李善寿. 局部遮挡时光伏阵列失配特性建模与分析[J]. 太阳能学报,2014,35(9):1592-1598.
ZHANG Xing, LI Shanshou. Modeling and analysis of mismatch characteristics of PV array under shading conditions[J]. Acta Energetica Sinica, 2014, 35(9): 1592-1598.
- [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):115-119,127.
SUN Bo, MEI Jun, ZHENG Jianyong. Improved MPPT method under partial shading conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 115-119, 127.
- [7] 葛俊杰,赵争鸣,袁立强,等. 基于模拟定位电路的多峰值MPPT方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):16-21.
GE Junjie, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Multi-peak MPPT method based on analog locating circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 16-21.
- [8] 韩鹏,李银红,何璇,等. 结合量子粒子群算法的光伏多峰最大功率点跟踪改进方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(23):101-108.
HAN Peng, LI Yinong, HE Xuan, et al. Improved maximum power point tracking method for photovoltaic multi-peak based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 101-108.
- [9] MOHAMED A A S, BERZOY A, MOHAMMED O A. Design and hardware implementation of FL-MPPT control of PV systems based on GA and small-signal analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 279-290.
- [10] 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.
- [11] 王秀云,田璧源. 基于自适应可控开关矩阵的光伏阵列优化配置策略[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(17):77-83.
WANG Xiuyun, TIAN Biyuan. Optimal configuration strategy of photovoltaic arrays based on adaptive and controllable switching matrix[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 77-83.
- [12] 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.
- [13] 徐云飞,肖湘宁,孙雅旻,等. 级联双极型大容量电池储能系统及其控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):103-109.
XU Yunfei, XIAO Xiangning, SUN Yamin, et al. Large-capacity cascaded bipolar BESS and its control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 103-109.
- [14] 刘征宇,严鹏,武银行,等. 基于任意单体间能量转移的高效均衡策略[J]. 电工技术学报,2019,34(21):4572-4579.
LIU Zhengyu, YAN Peng, WU Yinhang. An efficient equilibrium strategy based on the energy transfer among arbitrary cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(21): 4572-4579.
- [15] SCHMIDT D, HAGER M D, SCHUBERT U S. Photo-rechargeable electric energy storage systems[J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6(1): 1500369.
- [16] OUYANG Z, LOU S N, LAU D, et al. Monolithic integration of anodic molybdenum oxide pseudocapacitive electrodes on screen-printed silicon solar cells for hybrid energy harvesting-storage systems[J]. Advanced Energy Materials, 2017, 7(9): 1602325.
- [17] LU Z, OUYANG Z, GRANT N, et al. Manipulation of stored charge in anodic aluminium oxide/SiO₂ dielectric stacks by the use of pulsed anodisation[J]. Applied Surface Science, 2016, 363: 296-302.
- [18] 张宁,杨洪明,徐岩,等. 局部阴影条件下太阳能电池-超级电容器器件的充放电控制方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(4):72-79.
ZHANG Ning, YANG Hongming, XU Yan, et al. Charge and discharge control method of solar cell-supercapacitor under partial shading condition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 72-79.
- [19] ABE C F, DIAS J B, NOTTON G, et al. Computing solar irradiance and average temperature of photovoltaic modules from the maximum power point coordinates[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, 10(2): 655-663.

作者简介:



杨洪明

杨洪明(1972—),女,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: yhm5218@163.com);

陈博文(1997—),男,江西吉安人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: cbw9708@163.com);

王懂(1994—),男,安徽淮南人,硕士,主要研究方向为光伏发电最大功率跟踪控制技术(E-mail: 2195945843@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Modeling of solar cell-supercapacitor device array under local shadow and its cooperative compensation method of missing current

YANG Hongming¹, CHEN Bowen¹, WANG Dong², YIN Bangzhe¹, ZHOU Renjun¹

(1. International Joint Laboratory of Ministry of Education for Operation and Planning of Energy Internet based on Distributed Photovoltaic Storage Energy, Hunan Provincial Engineering Research Center for Electric Transportation and Smart Distribution Network, School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Suzhou Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Suzhou 234000, China)

Abstract: Under the local shadow condition, the power output characteristics of occluded devices and unoccluded devices in the SCSD (Solar Cell-Supercapacitor Device) array are inconsistent, which leads to the existence of multiple peak values in the output power curve of SCSD array. It is necessary to establish a mathematical model of SCSD array under local shadow and solve the problem of multiple power peaks caused by local shadow. Therefore, the mathematical models of SCSD array under normal uniform illumination, local light shadow and local severe shadow are established, and the output characteristics of SCSD array under different shadow conditions are described in detail. On this basis, a method is proposed to control the charging and discharging of supercapacitor in SCSD array to compensate the missing current of occluded devices. MATLAB simulative results and laboratory experimental results show that the mathematical model of SCSD array under local shadow can be accurately described by piecewise function. The proposed supercapacitor current compensation method can not only restore the output power of SCSD array under local shadow to single peak value, but also effectively improve the total output power of SCSD array.

Key words: SCSD; local shadow; multiple power peak values; missing current; charging and discharging compensation

附录

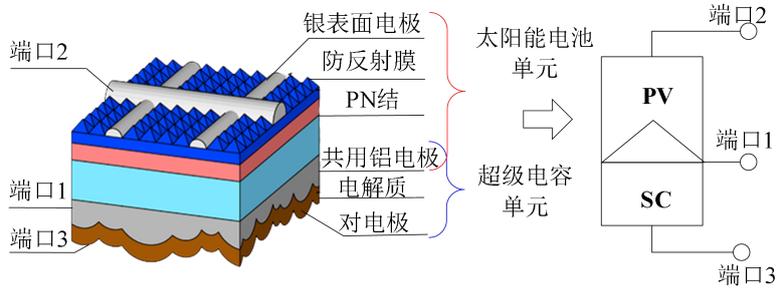
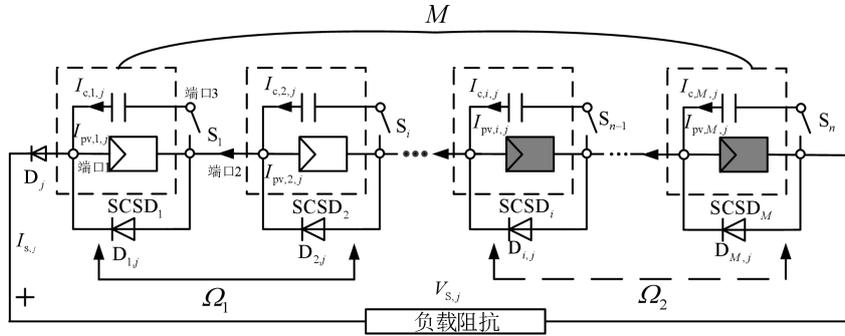
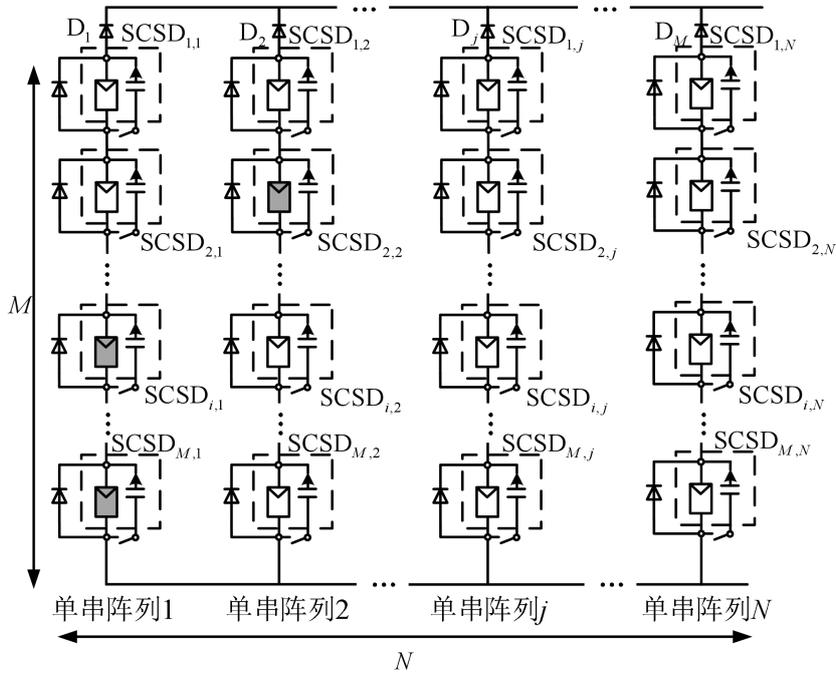


图 A1 SCSD 的等效电路

Fig.A1 Equivalent circuit of SCSD



(a) SCSD 单串阵列



(b) $M \times N$ 串并联 SCSD 阵列

—|— 超级电容, \square 太阳能电池

图 A2 SCSD 单串和串并联阵列

Fig.A2 Single series and series-parallel arrays of SCSD

表 A1 不同阴影遮挡状态下 SCSD 参数

Table A1 SCSD Parameters under different shaded occlusion states

太阳能电池参数	取值			超级电容参数	取值		
	无阴影遮挡	轻度阴影遮挡	重度阴影遮挡		无阴影遮挡	轻度阴影遮挡	重度阴影遮挡
功率 P/W	255	239	210	容量 C_{sup}/F	1.5	1.5	1.5
短路电流 I_{sc}/A	9.7	9.4	8.9	额定电压 U_C/V	48	48	48
开路电压 V_{oc}/V	36	35	33	SOC 范围	10%~90%	10%~90%	10%~90%
最大功率点电流/A	9.11	8.84	8.39	循环寿命/次	500000	500000	500000
最大功率点电压/V	28	27	25				

注：SOC 为标定当前超级电容容量的状态参数。

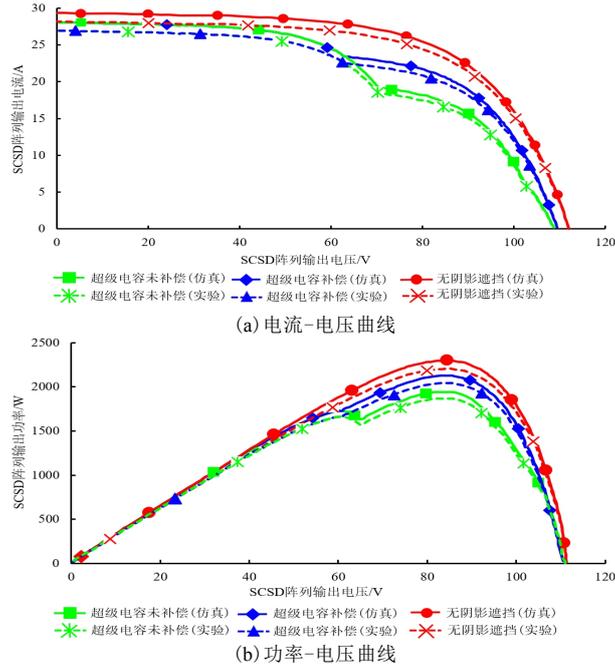


图 A3 重度阴影遮挡下 SCSD 阵列仿真与实验曲线

Fig.A3 Simulative and experimental curves of SCSD array under severe shadow