

基于阴影识别的光伏阵列输出特性简化仿真方法^①戚 军^② 叶培佳^③ 李袁超 翁国庆 周 丹

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 准确绘制光伏(PV)阵列输出特性曲线在光伏发电应用中非常必要。然而,目前的输出特性曲线仿真方法通常将局部遮阴组件等效为整块遮阴并以等效辐照度近似。本文首先分析了辐照度等效对光伏阵列局部遮阴组件输出特性仿真引入的误差,提出了一种考虑局部遮阴情况的光伏阵列输出特性简化仿真方法,然后根据光伏阴影图像特点,详细介绍了阴影识别算法的实现流程。针对实际光伏阵列图像的仿真结果表明,基于阴影识别的光伏阵列输出特性简化仿真方法可以准确且快速地绘制出局部遮阴光伏阵列的输出特性曲线。

关键词 光伏(PV)阵列;输出特性;光伏发电;局部遮阴;阴影识别

0 引 言

太阳能作为无污染、易获取的可再生能源^[1-2],光伏(photovoltaic, PV)发电是对其进行有效利用的主要形式^[3-4]。实际光伏发电系统中,由浮云、建筑物等引起的遮阴会在阵列表面形成阴影,这不仅会削弱光伏阵列潜在的最大功率输出能力,甚至可能损坏光伏组件^[5-6]。构成光伏阵列的多种电气连接结构中,串并联(series parallel, SP)是应用最广泛的结构^[7]。该结构中,各串联组件需并联 1 个旁路二极管以避免局部遮阴时的热斑现象^[8],同时各并联子串需串联 1 个防逆二极管用来防止支路电能倒送^[9]。然而,旁路二极管的使用可能导致局部遮阴光伏阵列的 P-V 曲线存在多个峰值^[10]。

为了降低局部遮阴对光伏输出的影响,国内外学者经过细致的研究后有了较多成果。融合了粒子群^[11-13]、人工神经网络^[14,15]等智能算法的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术,能够比较准确地跟踪到光伏阵列的全局最大功率点

(maximum power point, MPP)。但是,这些复杂的 MPPT 算法可能在某些特殊的阴影情况下失效。另一方面,动态调整开关矩阵^[16-18]等结构优化方法能够有效提高遮阴阵列的输出功率。然而这些方法对阴影的检测依赖较多测量元件,或将局部遮阴组件等效为整块遮阴并以等效辐照度近似,导致绘制的阵列输出特性曲线存在不可忽略的误差。

考虑到实际阴影形状的随机多变性,若要精确检测光伏阵列表面的阴影分布,需要安装足够多的辐射传感器。但随着阵列规模的扩大,其数量将会非常大。如果能将数字图像处理技术应用于阴影识别,就可以为阴影检测提供创新性的解决方案。实际上,在光伏发电领域里已有不少应用数字图像处理技术的案例。文献[19]通过识别挡光板在阳光照射时产生的阴影面积,设计了能够实现光伏组件自动进行光敏跟踪的系统。文献[20]根据不同工作状态下光伏组件存在明显温差这一特性,提出了一种基于红外图像识别的光伏阵列工作状态分析方法。文献[21]结合地基云图与径向基函数人工神经网络,提出了一种超短期精确预测光伏功率的方

① 国家自然科学基金(51407160, 51777193),浙江省重点研发计划(2019C01149)和浙江省自然科学基金(LY17E070005)资助项目。

② 女,1981年生,博士,副教授;研究方向:智能电网的分析与控制,新能源发电与并网;E-mail: qijun@zjut.edu.cn

③ 通信作者, E-mail: ybjyebeijia@163.com

(收稿日期:2019-02-07)

法。

本文首先分析了辐照度等效对局部遮阴光伏组件输出的影响,提出了一种考虑局部阴影分布的光伏阵列输出特性简化仿真方法,然后根据局部遮阴光伏阵列图像的特征,详细介绍了阴影识别算法的实现步骤,接着对比了多种方法在阴影识别上的效果,并对基于阴影识别的光伏阵列输出特性简化仿真方法进行准确性与快速性分析,最后得出了几条重要的结论。

1 光伏阵列局部遮阴组件辐照度等效误差分析

1.1 光伏阵列结构

光伏电池是光伏组件的基本单元。由于单个光伏电池端电压较低、输出电流较小,需要将若干个光伏电池串联后封装成光伏组件,再将多个光伏组件经过适当的串并联后形成光伏阵列,才能达到并网电压功率的要求。图 1 为光伏阵列的 SP 连接结构,其中每个子串有 m 块组件串联,阵列共有 n 个子串并联,且各组件并联 1 个旁路二极管,各子串串联 1 个防逆二极管。记位于 x 行 y 列的光伏组件为 M_{xy} ($x = 1, 2, \dots, m; y = 1, 2, \dots, n$)。

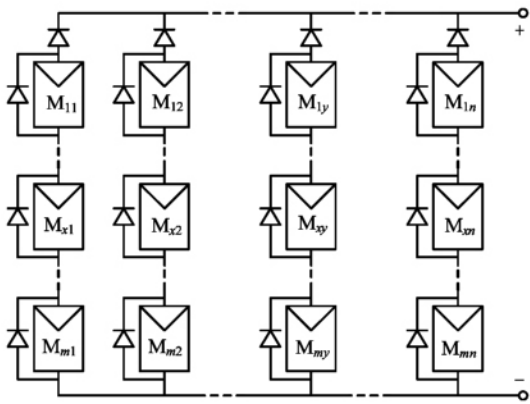


图 1 光伏阵列的 SP 连接结构

光伏阵列遭遇局部遮阴时,假设阴影处的辐照度均匀,阵列中的组件可分为 3 类:无遮阴、局部遮阴以及整块遮阴,其中无遮阴组件与整块遮阴组件的表面仅有 1 种辐照度,而局部遮阴组件的表面存在 2 种不同的辐照度。分别定义遮阴电池个数矩阵

Q , 光照电池个数矩阵 P , 如式(1)和式(2)所示。

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & \cdots & Q_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{1m} & \cdots & Q_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$P = k \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} - Q = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1m} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中, Q_{xy} 表示光伏组件 M_{xy} 中遮阴的电池个数, k 是光伏组件串联的光伏电池总个数, P_{xy} 是组件 M_{xy} 中光照的电池个数。当温度恒定时,光伏电池的短路电流与辐照度成正比^[22]。根据基尔霍夫电流定律,光伏组件中光照电池的短路电流受到遮阴电池短路电流的限制,使得整个局部遮阴组件的短路电流等于其中遮阴电池的短路电流。而光伏电池的开路电压与辐照度存在对数关系^[22],即随着阴影辐照度的下降,遮阴电池的开路电压将略有降低。根据基尔霍夫电压定律,光伏组件的开路电压等于该组件中所有光伏电池的开路电压之和。

因此,在 SP 结构的光伏阵列中,当某条支路包含局部遮阴组件时,遮阴组件的短路电流将小于无遮阴组件的短路电流。此时若支路中流过的电流大于遮阴组件的短路电流,遮阴组件的旁路二极管将导通,引起遮阴组件电压反偏并消耗功率,造成光伏阵列的输出功率损失。由于阵列各条支路的遮阴情况可能存在差异,支路的输出特性曲线不完全相同。尽管 SP 结构中并联支路之间的端电压相等,但是每条支路的输出电流可能并不相同,导致阵列的输出 P-V 特性曲线中出现多个波峰^[10]。

1.2 辐照度等效误差分析

为了简化局部遮阴组件表面的阴影,文献[16-18]将局部遮阴组件等效为整块遮阴组件,并根据式(3)计算等效辐照度作为等效组件表面唯一的辐照度。

$$G_{xy} = \gamma \cdot [I_{xy} + I_0 \cdot (e^{V_{xy}/nV_T} - 1)] \tag{3}$$

其中, G_{xy} 是局部遮阴组件 M_{xy} 表面的等效辐照度, I_{xy} 与 V_{xy} 分别是 M_{xy} 输出端的一组对应的测量电流与电压, γ, I_0, nV_T 是光伏组件的特性参数,可以根据光伏组件在标准测试条件 (standard test condition, STC)

下的开路电压、短路电流与最大功率点电压电流计算获得^[16]。

图 2 展示了 4 块光伏组件,其具体参数见表 1,其中图 2(a)和图 2(b)为具有不同阴影分布的 2 块光伏组件 M_{ab} 、 M_{cd} ,它们阴影处的辐照度均为 500 W/m^2 ,光照处的辐照度均为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 。图 2(c)和图 2(d)分别表示 M_{ab} 、 M_{cd} 的等效组件 M'_{ab} 、 M'_{cd} 。将 M_{ab} 、 M_{cd} 的最大功率点输出电压和电流数据代入式(3)计算可得, M'_{ab} 与 M'_{cd} 表面的等效辐照度分别为 697 W/m^2 、 615 W/m^2 。在 Matlab/ Simulink 平台上对图 2 中的 4 块光伏组件进行仿真,输出特性曲线如图 3 所示,部分关键仿真结果列于表 2 中。

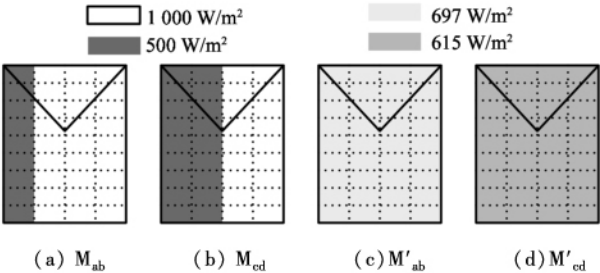


图 2 局部遮阴组件及其等效组件

表 1 光伏组件(GHM10W)在 STC 下的参数

参数	数值
串联个电池个数	36
MPP 功率	10 W
MPP 电压	17.6 V
MPP 电流	0.57 A
开路电压	21.6 V
短路电流	0.67 A

结合图 2 与 1.1 节中的分析可知,等效组件 M'_{ab} 的阴影辐照度大于 M_{ab} 的阴影辐照度,所以 M'_{ab} 的短路电流大于 M_{ab} 的短路电流,这与仿真结果相符。同理, M'_{cd} 的短路电流大于 M_{cd} 的短路电流,而 M_{ab} 与 M_{cd} 的短路电流相等。此外,阴影辐照度相等的 M_{ab} 与 M_{cd} 中,遮阴电池个数较多的 M_{cd} 的开路电压较小;遮阴电池个数相等的 M'_{ab} 与 M'_{cd} 中,阴影辐照度较低的 M'_{cd} 的开路电压较小。

根据表 2 可知,将局部遮阴的 M_{ab} 与 M_{cd} 等效为整块遮阴组件并使用等效辐照度后,在计算组件输出功率时分别产生了 15.69% 与 9.53% 的峰值功率

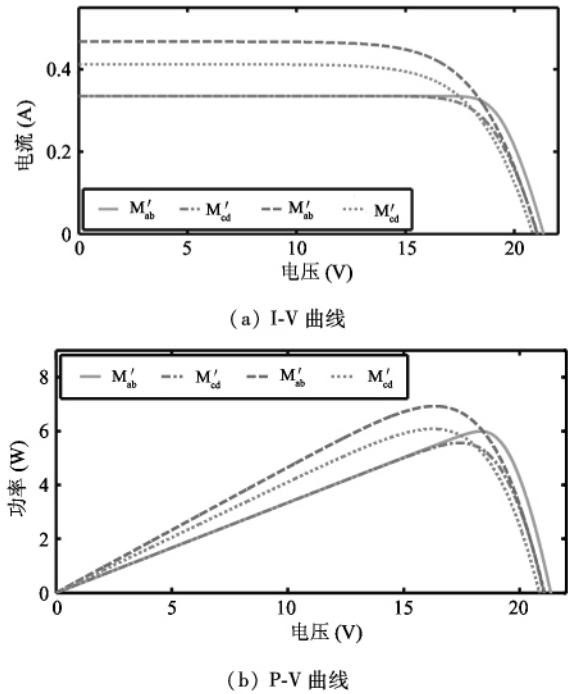


图 3 局部遮阴组件及其等效组件的输出特性曲线

表 2 局部遮阴组件的等效误差

组件	短路电流 (A)	开路电压 (V)	峰值功率 (W)	峰值功率 误差 (%)
M_{ab}	0.335	21.33	5.99	—
M'_{ab}	0.467	21.04	6.93	+15.69
M_{cd}	0.335	21.06	5.56	—
M'_{cd}	0.412	20.85	6.09	+9.53

误差。若将局部遮阴组件设置为整块遮阴并使用等效辐照度进行仿真,其输出功率将存在明显误差,且局部遮阴组件中的遮阴电池个数越少,峰值功率误差将越大。

2 光伏阵列输出特性简化仿真方法

考虑到实际阴影形状的随机性,若要获得光伏阵列准确的输出特性曲线,可在仿真计算时分别设置每个光伏电池单体的辐照度。随着阵列规模的扩大,仿真的计算量将会非常大。根据上一节误差分析可知,光伏组件的输出特性与组件遮阴电池个数有关。当阴影辐照度确定时,若组件中的遮阴电池个数相等,则它们的输出特性将相同。因此,针对共有 $m \times n$ 块组件的光伏阵列,提出了一种光伏阵列

输出特性简化仿真方法。该方法将光伏电池作为最小的仿真单位,按照光伏阵列表面实际的阴影分布,最大限度地还原了每个组件真实的遮阴情况,不仅能够提高输出特性仿真的准确性,而且还适用于任何形状遮阴的光伏阵列。

假设 $I_{\text{cell}}(\alpha)$ 、 $V_{\text{cell}}(\alpha)$ 分别是光伏电池在光照辐照度 $\alpha \text{ W/m}^2$ 下的输出电流与端电压, $I_{\text{cell}}(\beta)$ 、 $V_{\text{cell}}(\beta)$ 分别是光伏电池在阴影辐照度 $\beta \text{ W/m}^2$ 下的输出电流与端电压。根据 1.1 节中的分析,输出特性简化仿真方法将光伏组件的数学模型分为以下 3 种:

(1) 无遮阴组件

若组件 M_{xy} 为无遮阴组件,则组件中所有 k 个串联电池都接收光照辐照度 $\alpha \text{ W/m}^2$ 。因此,无遮阴组件的数学模型可表示如下:

$$\begin{cases} I_{xy} = I_{\text{cell}}(\alpha) \\ V_{xy} = k \cdot V_{\text{cell}}(\alpha) \end{cases} \quad (4)$$

(2) 整块遮阴组件

若组件 M_{xy} 为整块遮阴组件,则组件中所有 k 个串联电池都接收阴影辐照度 $\beta \text{ W/m}^2$ 。因此,整块遮阴组件的数学模型可表示如下:

$$\begin{cases} I_{xy} = I_{\text{cell}}(\beta) \\ V_{xy} = k \cdot V_{\text{cell}}(\beta) \end{cases} \quad (5)$$

(3) 局部遮阴组件

若组件 M_{xy} 为局部遮阴组件,根据该组件实际的遮阴情况,将组件中 k 个串联的光伏电池分为光照部分与遮阴部分,光照部分接收光照辐照度 $\alpha \text{ W/m}^2$,遮阴部分接收阴影辐照度 $\beta \text{ W/m}^2$ 。因此,局部遮阴组件的数学模型可表示为

$$\begin{cases} I_{xy} = \min(I_{\text{cell}}(\alpha), I_{\text{cell}}(\beta)) \\ V_{xy} = P_{xy} \cdot V_{\text{cell}}(\alpha) + Q_{xy} \cdot V_{\text{cell}}(\beta) \end{cases} \quad (6)$$

其中,遮阴部分包含的电池个数 Q_{xy} 与光照部分包含的电池个数 P_{xy} 均由下文的阴影识别算法获取。

3 光伏阵列阴影识别算法

3.1 光伏阴影图像特点

光伏组件大多使用晶硅电池,其表面颜色主要有黑色与深蓝色 2 种。因此,在光伏阵列图像中,固

定组件的浅色边框与深色的光伏电池之间存在明显对比。当光伏组件局部遮阴时,组件遮阴部分的颜色相对光照部分的颜色会变深,且阴影辐照度越低,其颜色越深。基于以上特征,拍摄光伏阵列图像,识别图像中的阴影分布区域是有可能实现的。然而,当光伏阵列图像包含的组件个数较多或者图像像素较低时,阴影识别主要存在以下几个难点:

难点 1:光伏组件浅色的金属边框在图像中不能清晰显示,用于构成电流通路的汇流线在组件表面形成了银白色的栅线,这些因素都将影响每个组件电池区域的准确识别;

难点 2:生产工艺的限制使得不同组件之间颜色有差,同一组件表面的颜色不均匀,不利于图像分割阈值的选取;

难点 3:图像采集过程中,无法避免的环境干扰使拍摄的光伏阵列图像可能存在边缘模糊、噪声较大等问题。

因此,必须结合光伏阵列图像特征,针对可能存在的技术难点,对现有图像识别技术进行合理选择、适当改进后才有可能获得较好的阴影识别效果。

3.2 光伏阴影识别算法流程

为保证阴影识别的顺利开展,针对 3.1 节中的难点 1,可以考虑在不影响封装电池工作特性的前提下,对光伏组件的边框进行处理,例如涂抹颜料或荧光粉。本实验采用将组件边框标红、固定摄像头的方法,提高组件边框与组件电池区域的区分度,并对组件表面银白色的栅线进行平滑处理,减少栅线对组件电池区域识别的干扰。针对 3.1 节中的难点 2,考虑到光伏阵列表面的阴影面积较小时,阴影目标的灰度信息对整幅图像的贡献较小,利用全局阈值将无法分离目标与背景^[23],可以通过局部阈值分割法为每个组件电池区域选择独立的分割阈值,避免组件色差的影响。针对 3.1 节中的难点 3,阴影的干扰使得直接识别遮阴阵列图像中的各个组件较为困难,可以考虑先识别无遮阴阵列图像中组件电池区域的边界,再利用该边界提取局部遮阴阵列图像中相应的组件电池区域,改善遮阴图像的组件识别效果。

假设摄像头拍摄的图像大小为 $I \times J$,其中包含

$M \times N$ 块光伏组件。基于以上分析,提出了如图 4 所示的阴影识别算法流程图。算法分为 2 部分:第 1 部分是组件电池区域识别部分,该部分通过确定光伏阵列无遮阴图像中组件除边框外电池区域的边界,统计无遮阴图像中各组件电池区域包含的像素个数;第 2 部分是遮阴电池区域识别部分,该部分根据第 1 部分确定的电池边界提取局部遮阴图像中的组件电池区域,对组件进行独立阈值分割后确定组件的遮阴电池区域,并统计遮阴电池区域包含的像素个数,计算各组件的遮阴电池个数与光照电池个数。其中,组件电池区域识别仅需在算法首次运行时执行一次即可,遮阴电池区域识别可在每天日出到日落的期间内重复执行。以下是算法的具体实现步骤。

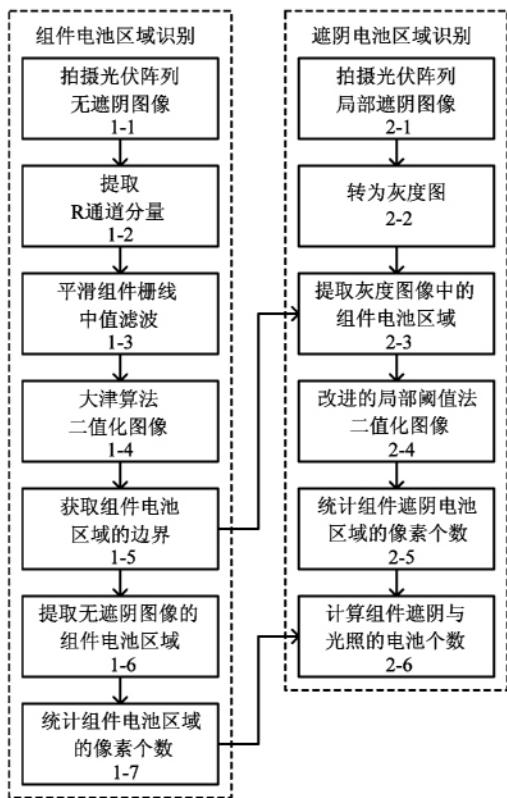


图 4 阴影识别算法流程图

(1) 组件电池区域识别

1-1) 拍摄光伏阵列无遮阴图像;

1-2) 提取无遮阴图像的 R 通道分量,得图像 $h(i, j)$,其中 (i, j) 为图像中各像素点的坐标, $h(i, j)$ 表示点 (i, j) 的灰度值;

1-3) 对图像 $h(i, j)$ 进行组件栅线平滑后,使用

中值滤波器消除其中的孤立噪声点,得图像 $f(i, j)$;

1-4) 根据大津阈值分割法^[24]求取全局阈值 T ,利用 T 对图像 $f(i, j)$ 进行二值化,得二值图像 $b(i, j)$;

1-5) 采用高斯-拉普拉斯算子^[25]对二值图像 $b(i, j)$ 进行边缘检测,去除其中的小连通区域后,得组件电池区域的边界;

1-6) 将光伏阵列无遮阴图像转化为灰度图,根据步骤 1-5) 中的边界提取灰度图中相应的组件电池区域,得组件电池区域的灰度图像 $l(i, j)$;

1-7) 统计图像 $l(i, j)$ 中 $M_{xy}(x=1, 2, \dots, M; y=1, 2, \dots, N)$ 电池区域包含的像素个数 E_{xy} ,绘制 M_{xy} 电池区域的灰度直方图并进行平滑滤波,记录波峰处的灰度值 W_{xy} 。

(2) 遮阴电池区域识别

2-1) 拍摄光伏阵列局部遮阴图像;

2-2) 将光伏阵列局部遮阴图像转为灰度图,得灰度图像 $r(i, j)$;

2-3) 根据步骤 1-5) 中的组件电池区域边界,提取图像 $r(i, j)$ 中相应的组件电池区域,得图像 $s(i, j)$;

2-4) 利用改进的局部阈值分割法对图像 $s(i, j)$ 进行二值化,得组件遮阴电池区域图像 $o(i, j)$;

2-5) 统计图像 $o(i, j)$ 中组件 M_{xy} 遮阴电池区域包含的像素个数 F_{xy} ;

2-6) 结合步骤 1-7) 中的组件 M_{xy} 电池区域的像素个数 E_{xy} ,根据式(7)、式(8)计算 Q_{xy} 与 P_{xy} 。

$$Q_{xy} = \left\lfloor \frac{F_{xy}}{E_{xy}} \cdot k \right\rfloor \quad (7)$$

$$P_{xy} = k - Q_{xy} \quad (8)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整。

3.3 关键步骤说明

步骤 1-3) 中组件栅线平滑方法与步骤 2-4) 中改进的局部阈值分割法对于光伏阴影的识别至关重要,以下将展开说明。

(1) 组件栅线平滑

银白色栅线在图像 $h(i, j)$ 中的 R 通道分量值较大,与组件边框的 R 通道分量值差异不明显,影响后续组件分割。因此,可以通过修正栅线处的 R 通道分量值,使其与组件电池处的 R 通道分量值相

近,达到栅线平滑的效果。具体实现方法如下:

设置平滑窗口的宽度 μ 与平滑阈值 θ ,定义集合 Ω 如式(9)所示。逐行遍历图像 $h(i, j)$ 中横坐标从 $1 + \mu$ 到 $I - \mu$ 、纵坐标从 1 到 J 范围内所有的像素点 (i, j) ,将属于集合 Ω 的点的 R 通道分量值根据式进行修正。

$$\Omega = \{(i, j) \mid h(i, j) \leq \theta \cap h(i - \mu, j) > \theta \cap h(i + \mu, j) > \theta\} \cup \{(i, j) \mid h(i, j) > \theta \cap h(i - \mu, j) \leq \theta \cap h(i + \mu, j) \leq \theta\} \quad (9)$$

$$h(i, j) = \frac{h(i - \mu, j) + h(i + \mu, j)}{2} \quad (10)$$

根据同一原理,逐列平滑栅线。

(2) 改进的局部阈值分割法

局部阈值分割法可以为不同的图像区域选择独立的分割阈值。但是,当某个图像区域完全属于背景或目标时,其灰度直方图只是单峰,普通的局部阈值分割法很难对图像进行有效地分割^[23]。

由于光伏阵列阴影区域的辐照度均匀,单个组件电池区域的灰度直方图波峰个数只能为 1 或 2。其中,波峰个数为 1 的组件可能是无遮阴组件或整块遮阴组件。考虑到这 2 种组件灰度直方图波峰处的灰度值相差较大,可以将组件无遮阴状态下灰度直方图中波峰处的灰度值 W_{xy} 做为参考。因此,在局部遮阴阵列图像中,若组件 M_{xy} 的灰度直方图波峰个数为 1,且波峰处的灰度值 Z_{xy} 大于 W_{xy} ,则可以认为该组件在局部遮阴阵列图像中是无遮阴的,否则为整块遮阴。

基于以上分析,结合光伏阵列图像特点,阴影识别算法采用了一种改进的局部阈值分割法。该方法首先将步骤 2-3) 的图像 $s(i, j)$ 中的每个组件电池区域作为一张子图,然后绘制每张子图的灰度直方图并进行平滑滤波,统计直方图中波峰的个数 D_{xy} ,仅当 $D_{xy} = 1$ 时,记录直方图波峰处的灰度值 Z_{xy} ;接着根据式(11)的阈值计算规则,计算组件 M_{xy} 电池区域的分割阈值 T_{xy} 。

$$T_{xy} = \begin{cases} \text{大津法求取的阈值} & D_{xy} = 2 \\ 0 & D_{xy} = 1 \text{ 且 } Z_{xy} > W_{xy} \\ 255 & D_{xy} = 1 \text{ 且 } Z_{xy} < W_{xy} \end{cases} \quad (11)$$

最后将 T_{xy} 作为分割阈值对灰度图 $s(i, j)$ 中组件 M_{xy} 的电池区域进行二值化。

4 案例分析

4.1 光伏阵列阴影识别结果对比分析

利用参数如附录的光伏组件搭建 3×3 的光伏阵列,其阵列结构如图 5 所示。使用红色纸条突出光伏组件边框,并在阵列正前方安装摄像头。拍摄阵列无遮阴与局部遮阴时的图像如图 6 所示。利用辐射传感器测得光伏阵列光照区域的辐照度为 $1\,037\text{ W/m}^2$,阴影区域的辐照度为 290 W/m^2 。针对以上光伏阵列遭遇的阴影,对比了 3.2 节中的阴影识别算法与其他 2 种算法的阴影识别效果。

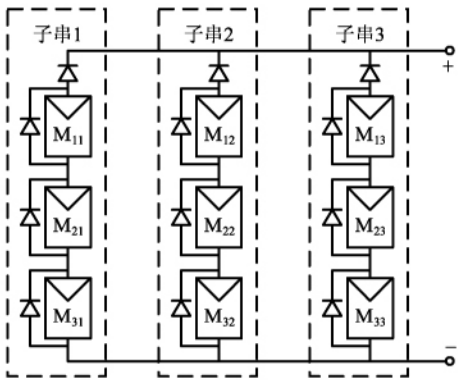


图 5 3×3 光伏阵列 SP 结构图

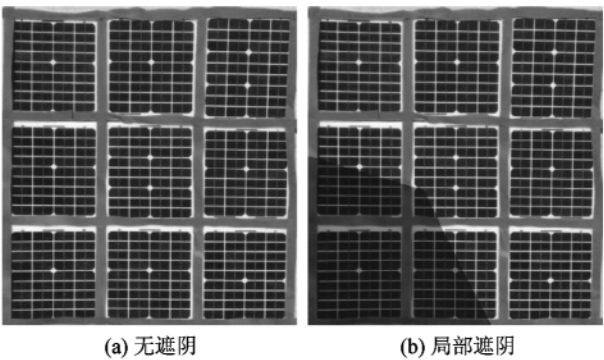


图 6 3×3 光伏阵列图像

算法 1:与文献[20]的图像处理思想大致相同,对遮阴图像进行预处理后利用全局阈值进行分割,具体流程按照图 4 中的步骤 2-1、1-2、1-3、1-4 进行,得到遮阴电池区域识别结果如图 7(a)所示。

算法 2:流程大致与图 4 相同,仅步骤 2-4 不同,该步骤替换为利用大津法^[24]对组件电池区域进行全局阈值分割,得到遮阴电池区域识别结果如图 7(b)所示。

算法 3:采用 3.2 节中的阴影识别算法,具体流程如图 4 所示,首先确定无遮阴阵列图像中组件电池区域的边界,然后根据该边界提取局部遮阴图像中的组件电池区域,对各组件电池区域进行独立阈值分割后,得到遮阴电池区域识别结果如图 7(c)所示。

对比图 7 中的阴影识别结果可知,本文提出的阴影识别算法对光伏阵列局部阴影的识别效果最佳。算法 1 中,虽然对光伏组件进行了栅线平滑处理,但栅线处的灰度值仍不能与深色组件电池区域的灰度值完全相同,加之组件浅色边框的影响,导致大津算法将组件栅线与边框作为背景,将阴影与组件电池区域作为目标进行了图像分割,无法正确区分遮阴组件与光照组件。算法 2 与算法 3 由于首先确定了组件电池的边界,有效地减少了组件边框带来的干扰。但是因为组件之间存在色差,算法 2 不能准确地选取全局阈值,使遮阴电池区域识别结果存在较大的误差。算法 3 利用改进的局部阈值分割法为每块组件电池区域选取独立的分割阈值,有效

地避免了组件色差的影响,获得了较好的识别效果。其中,算法 3 计算的组件除边框外电池区域的像素个数 E_{xy} 以及组件遮阴电池区域的像素个数 F_{xy} 记录于表 3 中。根据式(7)、式(8)可计算各组件的遮阴电池个数 Q_{xy} 与光照电池个数 P_{xy} 。

此外,相比文献[17, 26, 27]为每个光伏组件连接电流电压传感器或者辐照度传感器来分析组件的遮阴情况,阴影识别算法仅需一个摄像头用于采集光伏阵列图像、少数几个辐照度传感器用于检测阴影处与光照处的辐照度,提高了阴影检测准确度的同时,使用的测量元件数量更少,更容易实现工程应用。

表 3 光伏组件阴影区域量化分析结果

组件	E_{xy}	F_{xy}	Q_{xy}	P_{xy}
M ₁₁	56 336	0	0	36
M ₂₁	56 026	28 314	18	18
M ₃₁	55 800	55 800	36	0
M ₁₂	59 369	0	0	36
M ₂₂	57 116	3 738	2	34
M ₃₂	55 292	33 961	22	14
M ₁₃	60 804	0	0	36
M ₂₃	53 563	0	0	36
M ₃₃	53 912	0	0	36

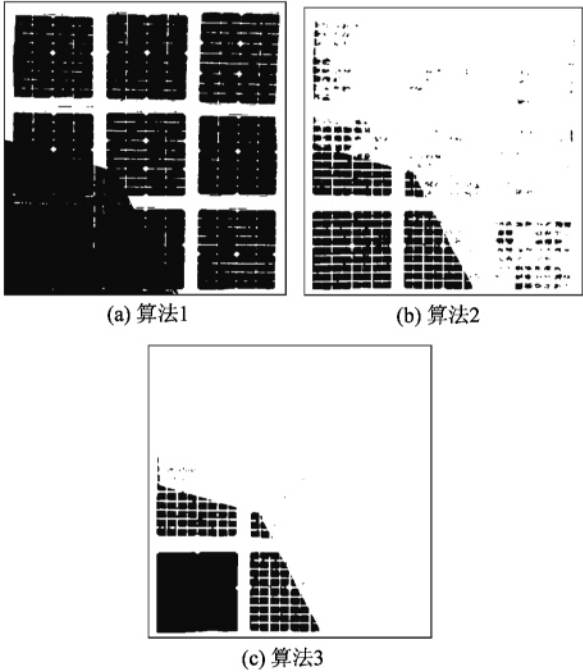


图 7 遮阴电池区域识别结果

4.2 阵列子串输出特性对比分析

为了评估基于阴影识别的光伏阵列输出特性简化仿真方法的性能,针对表 3 中的阴影区域量化分析结果,将该方法仿真的阵列子串输出特性曲线与另外 2 种方法仿真的特性曲线进行了对比。

方法 1:根据光伏阵列实际的阴影分布情况,分别设置每个光伏电池单体的辐照度,即在仿真输出特性曲线时,阵列中每个组件的每个电池都接收一种辐照度,遮阴电池接收阴影辐照度 290 W/m²,光照电池接收光照辐照度 1 037 W/m²。

方法 2:将局部遮阴组件等效为整块遮阴并以等效辐照度近似,即在仿真输出特性曲线时,每个组件只接收一种辐照度,无遮阴组件接收光照辐照度 1 037 W/m²,整块遮阴组件接收阴影辐照度 290 W/m²,局部遮阴组件 M₂₁、M₂₂、M₃₁、M₃₂ 分别接收根据式计算的等效辐照度 399 W/m²、712 W/m²、

290 W/m²、308 W/m²。

方法 3:采用第 2 节中提出的光伏阵列输出特性简化仿真方法,将局部遮阴光伏组件中的电池分为光照部分与遮阴部分,根据表 2 中的阴影区域量化分析结果分别设置 2 部分包含的电池个数,其中光照部分接收光照辐照度 1 037 W/m²,遮阴部分接收阴影辐照度 290 W/m²。

根据以上 3 种方法,仿真的阵列子串输出特性曲线如图 8 所示,部分重要仿真结果记录于表 4 中。由于方法 1 以光伏电池为单位进行仿真,仿真结果精度最高,因此可以将方法 1 的仿真结果作为参考。

分析仿真结果可知,包含遮阴电池的子串 1 与子串 2 的开路电压比不包含遮阴电池的子串 3 的开路电压低,且子串 1 中遮阴电池的数量比子串 2 中遮阴电池的数量多,使得子串 1 的开路电压比子串 2 的开路电压小,这些结果均与 1.1 节中的分析相符。图 5 所示的 SP 光伏阵列中每个组件都并联了 1 个旁路二极管,因此子串的短路电流取决于该串中短路电流最大的组件。由于 3 个子串中都包含至少 1 个无遮阴组件,因此所有子串的短路电流都相等,且与无遮阴组件的短路电流相等,即辐照度 1 037 W/m²对应的短路电流值。

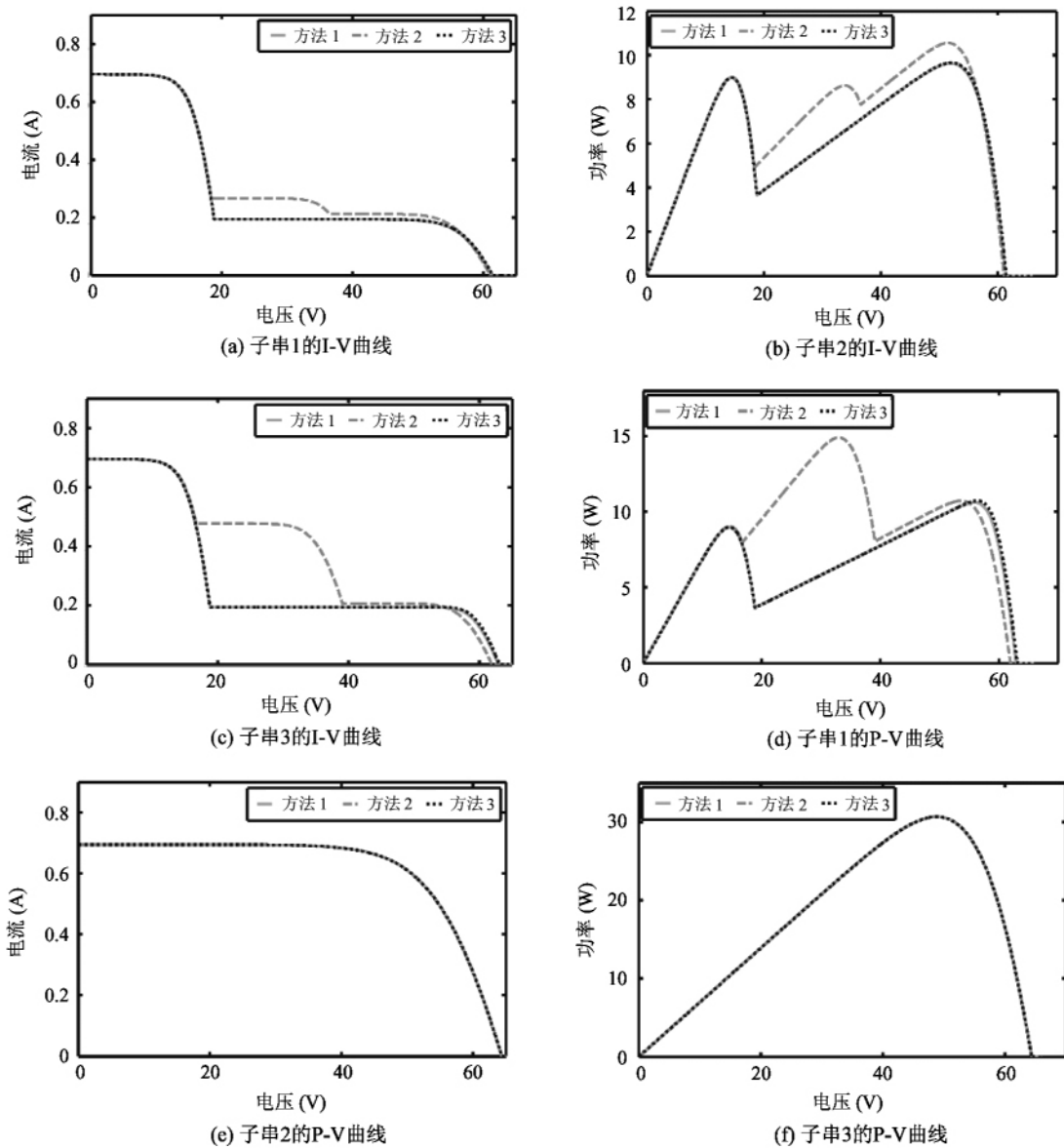


图 8 阵列子串特性曲线图

表 4 采用不同仿真方法的阵列子串仿真结果对比

子串	方法	短路电流 (A)	开路电压 (V)	峰值功率 (W)	峰值功率 误差 (%)	仿真时间 (s)	时间差 (%)
1	1	0.6948	62.002	9.665	—	99.89	—
	2	0.6948	61.646	10.562	+9.28	45.33	-54.620
	3	0.6948	62.002	9.660	-0.05	45.83	-54.120
2	1	0.6948	63.542	10.668	—	102.43	—
	2	0.6948	62.500	14.913	+39.79	47.70	-53.432
	3	0.6948	63.652	10.748	+0.75	47.85	-53.285
3	1	0.6948	64.972	30.6821	—	107.13	—
	2	0.6948	64.972	30.6821	0.0	47.32	-55.829
	3	0.6948	64.972	30.6821	0.0	47.32	-55.829

由于方法 1 与方法 3 是根据实际的遮阴情况设置仿真条件,根据图 6(b)所示,子串 1 与子串 2 中均包含了至少 1 个遮阴组件与光照组件。又因为阴影处的辐照度唯一且均匀,结合 1.1 节中的分析可知,子串 1 与子串 2 的 I-V 曲线存在 2 个台阶,相应地,P-V 曲线存在 2 个波峰。然而在方法 2 的仿真过程中,遮阴组件接收的是各不相同的等效辐照度,即子串中 3 个组件的短路电流互不相等,最终导致子串 1 与子串 2 的 I-V 曲线拥有 3 个台阶,P-V 曲线拥有 3 个波峰。

另一方面,通过对比表 3 中的峰值功率可知,方法 2 的误差最大。对于包含遮阴组件的子串 1 与子串 2,方法 2 的峰值功率误差分别达到了 +9.28% 与 +39.79%。而方法 3 与方法 1 的仿真结果几乎相等,输出特性曲线几乎重合。但因为方法 1 中即使是辐照度相等的光伏电池也需要单独建模仿真,仿真计算量明显较大,而方法 3 通过将组件中辐照度相同的光伏电池进行集中仿真,使仿真计算的时间比方法 1 减少了 50% 以上。

4.3 光伏阵列输出特性对比分析

为了进一步说明光伏阵列输出特性简化仿真方法的有效性 with 快速性,基于表 3 中的阴影区域量化分析结果,利用 4.2 节中的 3 种仿真方法,绘制光伏阵列输出特性曲线如图 9 所示,部分重要仿真结果记录于表 5 中。由于光伏阵列输出特性可以看作是将子串的电流进行叠加,且方法 3 与方法 1 获取的子串输出特性一致,所以这 2 种方法获取的阵列输出特性仿真曲线基本重合;而方法 2 的仿真输出特性曲线,其形状与方法 1 的曲线还是有着明显的差异,且存在 3.80% 的峰值功率误差。此外,随着光伏阵列规模的增加,方法 3 对组件中相同辐照度的光伏电池进行集中仿真的优势更加明显,表 5 的仿真结果表明,方法 3 的仿真时间比方法 1 减少了 75% 以上。

综上所述,当光伏阵列遭遇不规则局部遮阴时,若将局部遮阴组件等效为整块遮阴并采用等效辐照度,不仅会使绘制的特性曲线在形状上与实际曲线有着较大区别,还会使计算的输出功率与真实值之

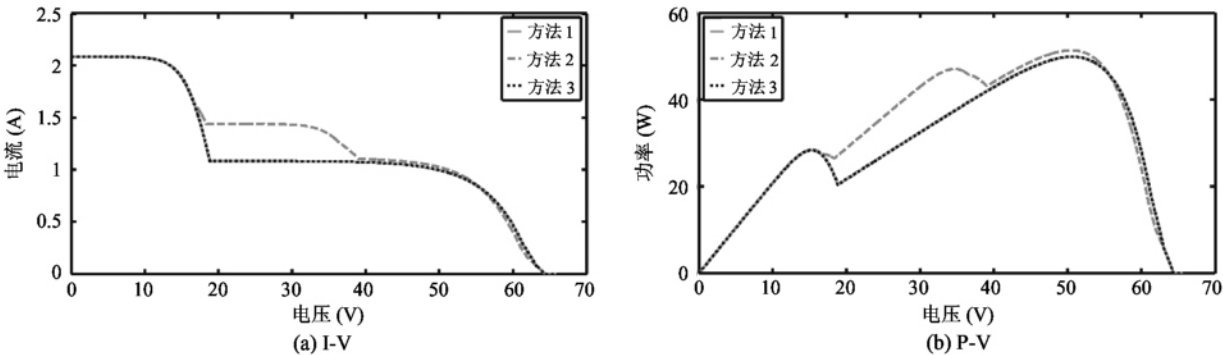


图 9 光伏阵列特性曲线图

表 5 采用不同仿真方法的光伏阵列仿真结果对比

方法	短路电流 (A)	开路电压 (V)	峰值功率 (W)	峰值功率 误差(%)	时间(s)	时间差(%)
1	2.0844	64.372	49.866	—	232.16	—
2	2.0844	64.372	51.761	+3.80	50.55	-78.226
3	2.0844	64.372	49.875	+0.02	51.87	-77.658

间存在不可忽略的误差。光伏电池独立辐照度输入方法虽然能够绘制精确的特性曲线,但是计算量较大、仿真时间较长。本文提出的基于阴影识别的光伏阵列输出特性简化仿真方法,通过阴影识别算法准确识别了光伏阵列表面的阴影分布,有效地减少了电流电压传感器的使用。此外,该方法以光伏电池为最小遮阴单位,在仿真时最大限度地还原了组件实际的遮阴情况,实现光伏阵列输出特性曲线精确快速绘制。由此可知,本文提出的仿真方法不仅能够为光伏阵列结构优化技术选择最优重构目标提供技术支持,还能为 MPPT 技术提供准确的 MPP 信息,在未来的光伏发电技术中具有良好的应用价值与推广前景。

5 结 论

本文提出了一种基于阴影识别的光伏阵列输出特性简化仿真方法。为了避免组件色差与组件边框的影响,该方法使用的阴影识别算法通过改进的局部阈值分割法获取阵列阴影分布信息,并在仿真光伏输出特性曲线时,分别设置各个组件包含的光照电池个数与遮阴电池个数。仿真结果表明,该方法能较好地识别光伏组件表面的阴影,并能准确快速地绘制局部遮阴阵列的输出特性曲线。对于未来的光伏发电技术,该研究成果不仅有助于结构优化方法寻找最优光伏阵列结构,还可以为局部遮阴条件下的 MPPT 技术准确快速地提供 MPP 信息。

参考文献

[1] 岳舟. 基于双闭环控制的光伏发电用 Cuk 逆变器研究 [J]. 高技术通讯, 2015, 25(4): 423-428

[2] Tossa K, Soro Y, Azoumah Y, et al. A new approach to estimate the performance and energy productivity of photovoltaic modules in real operating conditions [J]. *Solar*

Energy, 2014, 110: 543-560

[3] 王林青, 李大虎, 孙建波, 等. 基于线性自抗扰控制器的光伏板旋转定位控制[J]. 高技术通讯, 2018, 28(7): 663-667

[4] Ishaque K, Salam Z, Syafaruddin. A comprehensive Matlab Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode module [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(9): 2217-2227

[5] Pene R, Algora C. Evaluation of mismatch and nonuniform illumination losses in monolithically series-connected GaAs photovoltaic converters[J]. *Progress in Photovoltaic: Research and Application*, 2003, 11(2): 139-150

[6] Mäki A, Valkealahti S. Power losses in long string and parallel-connected short strings of series-connected silicon-based photovoltaic modules due to partial shading conditions[J]. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2012, 27(1): 173-183

[7] 徐勇. 一种光伏阵列故障诊断与定位方法的研究 [D]. 天津:天津大学电气与自动化工程学院, 2012: 10-12

[8] 戚军, 陈怡, 周文委. 局部阴影下光伏阵列自适应 MPPT 方法研究 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(5): 1182-1189

[9] 戚军, 张晓峰, 张有兵, 等. 考虑阴影影响的光伏阵列仿真算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(32): 131-138

[10] Zheng H, Li S, Chaloo R, et al. Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configurations [J]. *Renewable Energy*, 2014, 68(7): 58-66

[11] Miyataka M, Veerachary M, Toriumi F, et al. Maximum power point tracking of multiple photovoltaic arrays: a PSO approach [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System*, 2011, 47(1): 367-380

[12] 丁爱华, 卢子广, 卢泉, 等. 基于改进 PSO 的复杂环境下光伏 MPPT 控制[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2):

408-413

- [13] 贺昱曜, 王宽, 陈金平. AMPSO 闭环控制及在光伏多峰 MPPT 中的应用[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 56-62
- [14] Elobaid L, Abdelsalam A, Zakzouk E. Artificial neural network-based photovoltaic maximum power point tracking technique: a survey[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2015, 9(8): 1043-1063
- [15] 韩丽, 尚仪, 史丽萍. 基于在线自调整神经网络的最大功率跟踪方法研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(8): 1848-1853
- [16] Velasco-Quesada G, Guinjoan-Gispert F, Pique-Lopez 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
- [17] Babu T, Ram J, Dragicevic T, et al. Particle swarm optimization based solar PV array reconfiguration of the maximum power extraction under partial shading conditions[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 74-85
- [18] Storey J, Wilson P, Bagnall D. Improved optimization strategy for irradiance equalization in dynamic photovoltaic arrays[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(6): 2946-2956
- [19] 纪笑晗. 基于图像处理的光伏极板自动跟踪系统设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 2016: 18-33
- [20] 王培珍, 郑诗程. 基于红外图像的太阳能光伏阵列故障分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(2): 197-202
- [21] 陈志宝, 丁杰, 周海, 等. 地基云图结合径向基函数神经网络的光伏功率超短期预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 561-567
- [22] 冯垛生, 宋金莲, 赵慧, 等. 太阳能发电原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 42-48
- [23] 王亮亮, 王黎, 高晓蓉等. 两种改进的局部阈值分割算法[J]. 现代电子技术, 2009, 32(14): 78-80
- [24] 高琪, 冯燕, 梁瑞波. 基于结构化道路的车道偏离实时预警算法[J]. 计算机仿真, 2018, 35(9): 172-178
- [25] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 97-100
- [26] El-Dein M, Kazerani M, Salama M. Optimal photovoltaic array reconfiguration to reduce partial shading losses[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 4(1): 145-153
- [27] 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

A simplified simulation method for PV array's output characteristics based on shadow recognition

Qi Jun, Ye Beijia, Li Yuanchao, Weng Guoqing, Zhou Dan

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

It is desired to plot the output characteristic curves of PV array accurately in photovoltaic (PV) generation. However, in the current simulation methods for obtaining the output characteristic curves, a partially shaded module is usually approximated as totally shaded with an equivalent irradiance. Firstly, the approximation error of irradiance equivalence on a shaded module is analyzed. Then, a simplified simulation method is proposed to get the output characteristic curves of a PV array considering partial shading conditions. According to the features of the PV array images, a shadow recognition algorithm is introduced specifically. Simulation results on actually measured PV array images indicate that the proposed algorithm is feasible in PV shadow recognition, and the output characteristic of PV array under partial shadow can be acquired quickly and accurately by the new simplified simulation technology.

Key words: photovoltaic (PV) array, output characteristic, PV generation, partial shade, shadow recognition