

不同旁路二极管配置下光伏组件 阴影耐受性定量计算

张明锐, 陈喆旸, 韦 莉

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘 要: 不同旁路二极管配置方案在阴影效应下的输出特性差异较大,为优化旁路二极管配置,在建立仿真模型的基础上,针对不同配置方案的串联太阳能电池组进行阴影耐受性定量计算。仿真结果表明当出现点状阴影模式的概率较低时,定量的阴影耐受性能较为准确地衡量不同旁路二极管配置方式的优劣,即使点状阴影模式的概率较高也能准确选出二极管的最优配置方案。

关键词: 太阳能电池; 辐照; 阴影效应; 旁路二极管; 优化配置

中图分类号: TM914.4

文献标识码: A

0 引 言

随着建筑一体化光伏系统及太阳能道路的日渐普及^[1,2],光伏发电在日常生活中的应用越来越广泛,对此类使用环境较为复杂多变的光伏系统来说,静态阴影(建筑物、树木等)最为常见且几乎不能被消除^[3,4],动态阴影(云层、鸟类、车辆等)同样不可避免。如何妥善解决阴影效应带来的光伏阵列功率失配问题越来越受到关注。为减少失配损失,通常为光伏组件配置旁路二极管,以消除功率不平衡带来的热斑效应^[5,6]。

在不同旁路二极管配置方案下,光伏组件的表现差异性较大^[7,8],例如文献[7]比较了2种配置方案下光伏组件的最大输出功率,发现相差近1.5倍。所以准确衡量不同配置方式下光伏组件在阴影效应下的表现,从而选择最优配置就十分重要。文献[9]利用权值等效功率计算不同旁路二极管配置方式下光伏组件的最大输出功率,以此选择旁路二极管的最优配置方案,直观有效,但权值因子的不确定性带来了计算结果的差异,因而无法建立一个通用、统一的标准。

本文针对不同配置方案的串联太阳能电池组进

行阴影耐受性(shading tolerability, ST)定量计算,该方法消除了权值因子的多样性,不仅易于推广使用,且较全面考虑了光伏组件的工作状态,可为挑选旁路二极管的最优配置方案提供理论依据。

1 旁路二极管的作用和影响

在局部阴影条件下,阴影电池最大输出电流小于与其串联电池的工作电流,具有负载特性。阴影电池持续消耗能量不仅会减少输出功率,更会导致光伏组价局部发热,若温度过高则会对太阳能电池产生不可逆损害,称为热斑效应,为解决上述问题,可在多个太阳能电池两端并联一个旁路二极管。

如图1所示,对于6个串联的太阳能电池,当1~3号电池均被阴影遮挡时,二极管 D_1 导通,粗实线为电流路径,此时阴影电池被旁路二极管短路,不再消

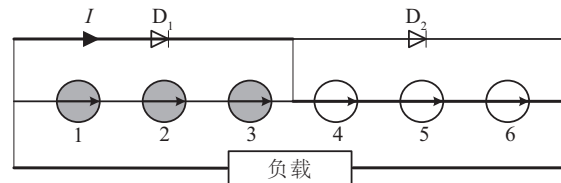


图1 旁路二极管理想工作方式

Fig. 1 Ideal mode of bypass diode

收稿日期: 2018-03-21

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAG19B02)

通信作者: 张明锐(1971—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事分布式发电与微网、电力系统能量管理与优化运行、轨道交通牵引供电方面的研究。zmr@tongji.edu.cn

耗功率,负载仍可获取近一半的电压,同时 D_1 的内阻也会占一部分电压,带来一部分导通损耗。

图 2 表明了旁路二极管的第 1 种缺陷。与图 1 相比,二极管配置数量有所差异,同样是 1~3 号电池均被阴影遮挡,但此时二极管 $D_1 \sim D_3$ 均为导通状态,导通损耗为图 1 的 3 倍。这表明旁路二极管配置数量过多会带来不必要的功率损耗,减少太阳能电池的输出功率。

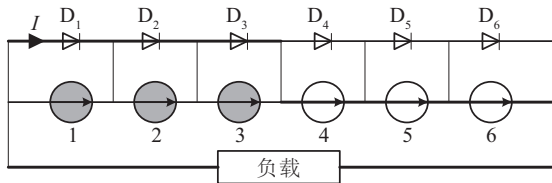


图2 旁路二极管导致额外导通损耗

Fig. 2 Bypass diodes lead to extra conduction loss

图 3 表明了旁路二极管的第 2 种缺陷。与图 1 相比,只有 1 号电池处于阴影条件下,此时旁路二极管 D_1 导通,使得原本可正常工作的 2、3 号电池被短路,称这种损耗为旁路损耗。此时若旁路二极管能避开正常的电池片,则可提高在此阴影条件下太阳能电池的输出功率。这表明旁路二极管的配置数量过少可能会影响正常电池片的功率输出。

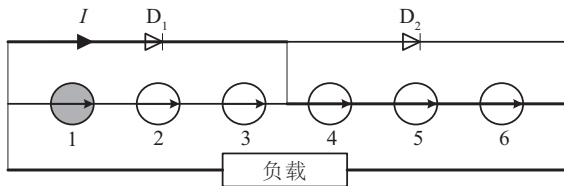


图3 旁路二极管导致旁路损耗

Fig. 3 Bypass diodes lead to shunt loss

所以,调整旁路二极管的位置和数量,是提高阴影下太阳能电池最大输出功率的关键。

2 阴影问题的数学建模

光伏组件在阴影条件下的最大输出功率有越高的数学期望,那么该组件的表现越优异,最大输出功率的数学期望值可表示为:

$$E(x) = \sum_{k=1}^n x_k p(x_k) \quad (1)$$

式中, n ——光伏组件的 n 种阴影模式; x_k ——光伏组件在阴影模式下的最大输出功率; $p(x_k)$ ——该

阴影模式发生的概率, $p(x_k)$ 的不同取值对 $E(x)$ 有较大影响。

在式(1)的基础上,为消去变量 $p(x_k)$ 的不确定性,作以下假设:1)在太阳电池的表面辐射是均匀的,所有可能辐射值发生的机会相等。2)将模块划分为多个单元,各个单元被阴影遮挡的可能性与单元在模块中的位置无关。

由此可得到 ST 的定量表达^[10],如式(2)所示。 ST 区别于 $E(x)$,是一个无量纲的常数,取值位于区间 $[0, 1]$, ST 值越高代表光伏组件在阴影条件下有越好的表现。

$$ST(i, c) = \frac{1}{P_{mpp}} \sum_{k=1}^c P_k \left(\frac{1}{i^c} \right) \quad (2)$$

式中, c ——单元的数量; i ——太阳辐照度划分的等级数; P_k 、 P_{mpp} ——光伏组件在所有可能的工作状态下和无阴影遮挡时的输出功率最大值。

3 算法仿真与验证

3.1 仿真模型设计

本文利用 Matlab 自带的 solar cell 搭建仿真模型,采用 36 个太阳能电池串联组成太阳电池组,配置旁路二极管数量为 $N=[1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 18, 36]$ 。太阳辐照度分 2 个等级,无阴影遮挡和有阴影遮挡时分别为 $S_1=1000 \text{ W/m}^2$, $S_2=250 \text{ W/m}^2$ 。

将光伏组件分为 6 个单元,每个单元包含 6 个串联的太阳能电池,这样既降低了仿真次数,又便于将整个光伏模型划分为 2×3 的阵列。在 $i=2$ 的情况下,共有 64 种工作状态,电路模型及组件所有工作状态如图 4 所示。以图 4 中红圈标注的 1 种工作状态为例,此种情况下,第 2 行第 2 列的光伏单元被阴影遮挡,太阳辐照度为 250 W/m^2 ,其余单元正常工作,辐照度为 1000 W/m^2 。

对于本文搭建的光伏模型,最理想的工作情况是:各单元之间互不影响,所有单元均工作在最大功率点,有无阴影遮挡时,各单元的最大输出功率之比为 1/4,据此, ST 理论上的最大值可由式(3)计算得到,并且由式(3)得 $ST_{\max}=0.6223$ 。

$$ST_{\max} = \left[\sum_{n=0}^c (c-n) C_c^n + \frac{1}{4} \sum_{n=0}^c n C_c^n \right] / i^c \quad (3)$$

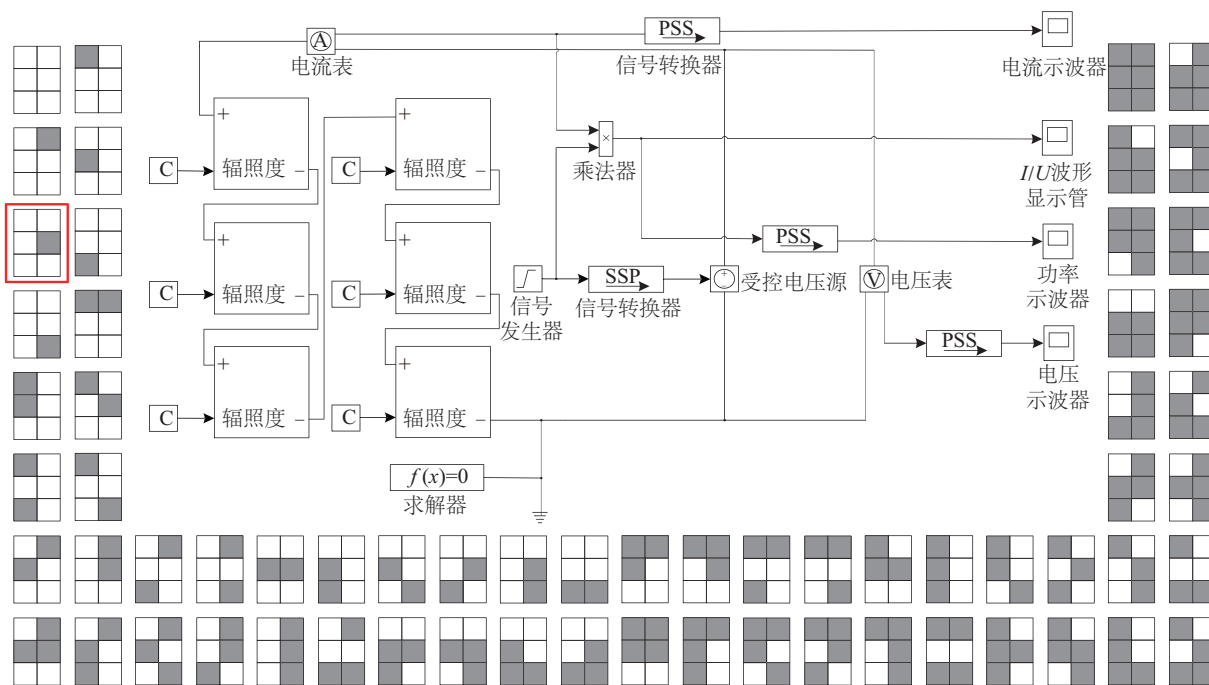
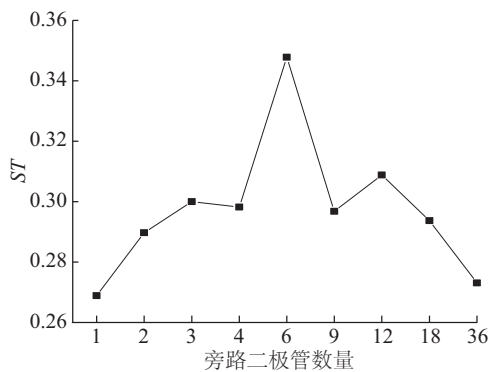


图4 光伏仿真模型及所有工作状态

Fig. 4 Photovoltaic simulation model and all working states

3.2 仿真结果

在仿真实验的基础上,根据式(2)得到不同旁路二极管配置方案下,光伏模型的 ST 值分布如图 5 所示。

图5 不同配置方案的 ST 值Fig. 5 ST values of different configuration schemes

从图 5 中可看出对于仿真模型,当旁路二极管配置数量为 6 时,阴影耐受性明显高于其他配置方案,即最优的旁路二极管配置数量为 6。为更直观区别光伏组件在不同配置方案下的表现,利用支持向量算法(support vector machine, SVM)在最大化几何间隔(geometrical margin)的基础上对 ST 进行

分级,计算得到满足条件的边界为 0.2814、0.3283,对边界值取近似,结果如表 1 所示。

表1 ST 分级边界值Table 1 Graded boundary value of ST

ST	[0,0.28]	[0.28,0.33]	[0.33,0.63]
级别	3级	2级	1级

3.3 仿真结果验证

为验证 ST 计算结果的准确性,引入权值等效功率的概念,通常把阴影模式分为 6 种,如图 6 所示。图 6a 代表小面积点状阴影;图 6b、图 6c 代表小面积线状阴影;图 6d、图 6e 代表不同方向较大面积阴影;图 6f 代表整个光伏组件处于阴影条件下。

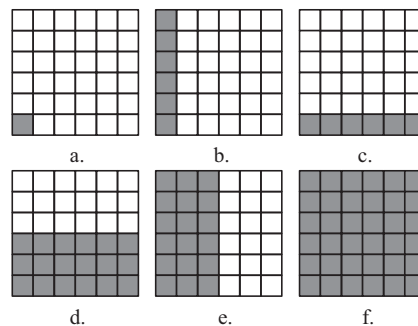


图6 阴影模式示意图

Fig. 6 Diagrammatic of shadow pattern

权重因子为每种阴影模式发生的概率,本文用 $P_{sh}^a \sim P_{sh}^f$ 表示图 6a~图 6f 这 6 种阴影模式的权值因子,参考式(1)可得到权值等效功率 E_{sh} 的表达式:

$$E_{sh} = \sum x_i P_{sh}^i \quad (4)$$

其中, x_i 代表第 i 种阴影模式下的最大输出功率。利用 SVM 算法对权值等效功率的计算结果进行分级,定义 ST 定量计算与每种权值方案计算结果的匹配度为 M_p :

$$M_p = \sum_{i=1}^6 f(x)/6, \quad f(x) = \begin{cases} 1, & L_{st} = L_w \\ 0, & L_{st} \neq L_w \end{cases} \quad (5)$$

其中, L_{st} 、 L_w 为不同旁路二极管配置方案在 ST 、权值等效功率计算结果中所处的级别。

为确定各阴影模式的权值对匹配度的影响,将图 6a~图 6f 这 6 种阴影模式的权值因子 $P_{sh}^a \sim P_{sh}^f$ 分别从 0 开始取值,取值间隔为 0.01,其余权重因子随机取值,根据式(6)计算平均匹配度 M 。计算流程如图 7 所示。

$$M = \sum_{i=1}^n M_p / n \quad (6)$$

式中, n ——运算循环次数。

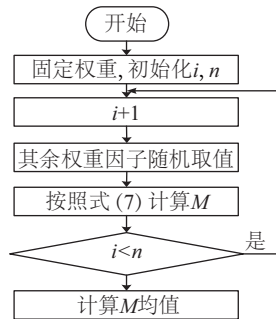


图 7 平均匹配度计算流程图

Fig. 7 Average match degree calculation flow chart

当 $n = 10^5$ 时, M 的计算精度达到 10^{-3} , 即算法重复运行 10^5 次后得到的平均匹配度 M 误差在 10^{-3} 以内, 此时认为结果是准确的。计算结果如图 8 所示, 图中曲线表示 $P_{sh}^a \sim P_{sh}^f$ 为定值时 M 的变化趋势。由图 8 可知, 当 P_{sh}^a 为定值, 其余权值因子随机取值时, 平均匹配度 M 明显高于其他曲线。把 M 看作是 $P_{sh}^a \sim P_{sh}^f$ 的六元函数, 即 $M = f(P_{sh}^a \sim P_{sh}^f)$, 则图 8 中各曲线的斜率则可看作是对 $P_{sh}^a \sim P_{sh}^f$ 求得的导数, 所以可得到结论: P_{sh}^a 的取值相较其余阴影模式权重对平均匹配度有较大影响, 在 P_{sh}^a 取值较低时, M 保持在较高水平。

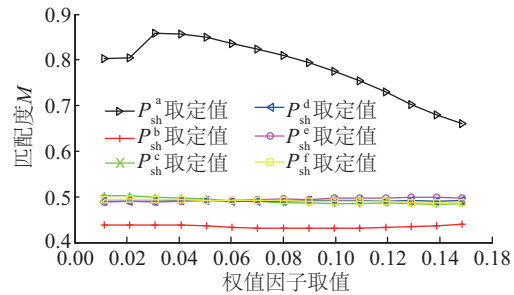


图 8 平均匹配度趋势图

Fig. 8 Trend chart of average match

为进一步确定 ST 定量计算的适用范围, P_{sh}^a 从 0 开始取值, 取值间隔为 0.01, 算法循环次数仍为 10^5 , 计算结果如表 2 所示。 P 表示二极管配置数量为 6 的配置方案处于第 1 等级的概率。从表 2 中可看出, 当 $n = 10^5$, P_{sh}^a 处于区间 $[0, 0.13]$ 时, 匹配度 M 均在 70% 以上, 同时 P 始终保持在 90% 以上, 所以当出现点状阴影模式的概率在 0.13 及以下时, ST 可准确衡量不同旁路二极管配置方案的光伏组件在阴影条件下的表现。当 P_{sh}^a 的取值扩大到区间 $[0, 0.30]$, P 依然保持在较高水平, 所以即使点状阴影模式的概率较高, 达到 0.30, 也能准确选出二极管的最优配置方案。

表 2 平均匹配度计算结果

Table 2 Average matching degree calculation result

P_{sh}^a	M	$P/\%$	P_{sh}^a	M	$P/\%$
0.01	0.802	99.23	0.16	0.639	89.47
0.02	0.804	99.46	0.17	0.611	88.48
0.03	0.857	99.85	0.18	0.587	87.53
0.04	0.856	99.32	0.19	0.574	86.93
0.05	0.848	98.69	0.20	0.560	85.88
0.06	0.836	97.89	0.21	0.548	84.87
0.07	0.823	96.77	0.22	0.535	84.03
0.08	0.809	96.04	0.23	0.522	82.78
0.09	0.793	95.44	0.24	0.510	82.78
0.10	0.776	94.77	0.25	0.498	80.85
0.11	0.754	94.31	0.26	0.486	79.88
0.12	0.730	93.08	0.27	0.475	78.73
0.13	0.703	92.32	0.28	0.466	77.56
0.14	0.680	91.21	0.29	0.459	76.37
0.15	0.662	90.15	0.30	0.453	75.01

4 结 论

ST 的定量计算与权值功率相比忽略了权值因子的不稳定性,易于推广使用。对建筑一体化光伏系统及太阳能道路等使用环境较为复杂多变的光伏系统,块状及线状阴影占主导因素, ST 定量计算方法可为选择旁路二极管的最优配置提供理论依据,有助于提高光伏组件在阴影条件下的输出功率,减少失配损失。

[参考文献]

- [1] Zhang Zhen, Xiao Taoyun, Shen Yanping, et al. A method to test operating cell temperature for BIPV modules[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 1(6): 272—277.
- [2] Celik T, Kusetogullari H. Solar-powered automated road surveillance system for speed violation detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 9(57): 222—235.
- [3] 刘邦银, 段善旭, 康 勇. 局部阴影条件下光伏模组特性的建模与分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(2): 188—192.
- [3] Liu Bangyin, Duan Shanxu, Kang Yong. Modeling and analysis of the characteristics of PV module with partial shading [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2008, 29(2): 188—192.
- [4] 吴小进, 魏学业, 于蓉蓉, 等. 复杂光照环境下光伏阵列输出特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(Z1): 162—167.
- [4] Wu Xiaojin, Wei Xueye, Yu Rongrong, et al. Study of output characteristics of photovoltaic array under complex illumination environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(Z1): 162—167.
- [5] Herrmann W, Wiesner W, Vaassen W. Hot spot investigations on PV modules—New concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes [A]. Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovohaic Specialists Conference [C], Anaheim, CA, USA, 1997: 1129—1132.
- [6] Tsugutomo Kudoh, Fumihiko Sugawara, Hirotaka Tsushima. A study of electrical properties when low-loss, self-biased channel diodes are used as bypass diodes for photovoltaic panels [A]. Japan, 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2017) [C], Nagoya, Japan, 2017.
- [7] 张明锐, 蒋利明, 欧阳丽. 局部阴影条件下光伏阵列旁路二极管和阻塞二极管的影响和作用[J]. 电气技术, 2017, (8): 1—5.
- [7] Zhang Mingrui, Jiang Liming, Ouyang Li. The influences and effects of photovoltaic array's bypass diode and string diode under partially shaded conditions [J]. Electrical Engineering, 2017, (8): 1—5.
- [8] 曹 哲, 尤 政, 何 磊, 等. 智能重构旁路二极管对阴影下太阳能电池的输出功率提升[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(4): 557—562.
- [8] Cao Zhe, You Zheng, He Lei, et al. Output power improvement of solar panels under partial shading with smart-diode structure [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(4): 557—562.
- [9] 李善寿, 张 兴, 谢 东, 等. 阴影条件下光伏组件旁路二极管优化配置研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(10): 1768—1774.
- [9] Li Shanshou, Zhang Xing, Xie Dong, et al. Research on optimal configuration of bypass diodes diodes in PV module under shading conditions [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2013, 34(10): 1768—1774.
- [10] Ziar H, Asaei B, Farhangi S, et al. Quantification of shading tolerability for photovoltaic modules [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2017, 7(5): 1768—1774.

QUANTITATIVE CALCULATION OF SHADOW TOLERABILITY FOR PHOTOVOLTAIC MODULES UNDER DIFFERENT BYPASS DIODE CONFIGURATIONS

Zhang Mingrui, Chen Zheyang, Wei Li

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: PV models with different bypass diode configurations show large differences in shadow effects. In order to optimize the bypass diode configuration, this paper presents quantitative calculations of shading tolerability for tandem photovoltaic cells with different configurations based on the simulation model. The simulation results demonstrate that ST can accurately measure the merits of different bypass diode configurations when the probability of spot shadow mode is low. Even there is a high probability of spot shadow mode, the optimal diode configuration can still be accurately selected.

Keywords: solar cell; irradiation; shading effect; bypass diodes; optimization