

光伏电池反向模型仿真分析及实验研究

田琦, 赵争鸣, 邓夷, 袁立强, 贺凡波

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Simulation and Experimental Study About Reverse Model of Photovoltaic Cells

TIAN Qi, ZHAO Zhengming, DENG Yi, YUAN Liqiang, HE Fanbo

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The Bishop reverse sub-circuit model of photovoltaic cell was built up in the simulation platform of MATLAB. The accuracy of the model under different insolation and temperature was verified by the comparison between the simulated and experimental results. The influence of the parameters in the model to the electrical characteristics of PV module was analyzed, offering guidance to the parameter extraction and PV array designing. Hot-spot effect might happen to mass PV array. The reason and condition of the formation of hot spot effect were analyzed with the reverse model of photovoltaic (PV) cell. The inhibition to the hot-spot effect by both overlap and non-overlap bypass diode was simulated, offering an accordance for the choice of the topologic structure of paralleling bypass diode. Besides, multi-peak characteristics of commercial PV array when it was shadowed was simulated, and the protection effect of bypass diode to the PV array was verified.

KEY WORDS: photovoltaic (PV) module; parameter sensitivity; reverse characteristics; hot-spot

摘要: 以 MATLAB 软件为仿真平台, 建立了光伏电池反向 Bishop 子电路模型, 不同光照和不同温度下光伏电池电气特性的仿真和实验结果对比证明了该模型的有效性。分析了光伏组件模型各个参数对光伏电池电气特性的影响, 对模型的参数提取和实际光伏阵列设计具有指导意义。大面积光伏阵列可能会出现热斑效应, 利用光伏电池反向模型, 分析了热斑效应形成原因、形成条件以及旁路二极管对热斑效应的进行了仿真分析, 为并联旁路二极管拓扑结构的选择提供了依

据。此外, 仿真分析了实际商用光伏阵列在遮挡情况下所出现的多波峰特性, 验证了旁路二极管对光伏阵列的保护效果。

关键词: 光伏组件; 灵敏度; 反向特性; 热斑

0 引言

光伏电池具有与二极管相似的 P-N 结结构, 因而也具有反向特性和雪崩击穿现象。光伏电池的反向特性到目前为止还没有一个统一的最优模型, 针对不同应用有不同的模型, 如 Hartman 模型, Lopez Pineda 模型和 Bishop 模型等^[1-3]。

本文采用 Bishop 模型在 MATLAB 中建立了光伏电池反向子电路模型, 与实验结果相对比, 证明了仿真模型的有效性。利用仿真模型, 本文定性分析了模型中各个参数对光伏电池电气特性的影响; 并利用反向模型, 分析热斑效应形成原因、形成条件以及旁路二极管对热斑效应的抑制作用, 并对旁路二极管不同拓扑结构进行分析; 此外, 对实际光伏阵列的遮挡情况进行了仿真。

1 光伏电池的反向模型和实现

1.1 光伏电池的反向模型

本文采用目前在工业界使用最广泛的 Bishop 模型模拟光伏电池反向特性。光伏电池反向模型的等效电路如图 1 所示。图中: I_{ph} 为光生电流; I_d 为

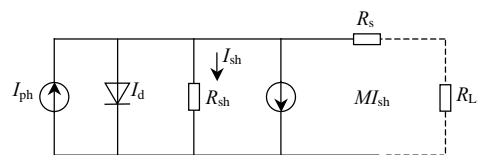


图 1 光伏电池 Bishop 模型等效电路

Fig. 1 Bishop equivalent circuit model of PV cells

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50737002); 台达环境与教育基金会电力电子科教发展计划重大项目(DREM200902)。

Project Supported by National Science Foundation of China (50737002); Sponsored by Grants From the Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Environmental & Educational Foundation (DREM200902)。

暗电流; R_{sh} 为并联电阻; R_s 为串联电阻。

光伏电池 Bishop 模型的基本方程如下:

$$I = I_{ph} - I_{os} \left\{ \exp \left[\frac{q}{AkT} (U + IR_s) \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \left[1 + a \left(1 - \frac{U + IR_s}{U_b} \right)^{-n} \right] \quad (1)$$

其中:

$$I_{os} = I_{or} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_{go}}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

$$I_{ph} = [I_{SCR} + K_1(T - 273.15 - 25)]\lambda / 1000 \quad (3)$$

式中: I 为电池输出电流; U 为电池端电压; I_{ph} 为光生电流; λ 为光照强度; q 为电子电量; T_r 为参考温度; T 为电池温度; E_{go} 为能带系能量; k 为波尔兹曼常数; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为并联电阻; A 、 B 为曲线拟合常数, 二者相等; I_{os} 为短路电流; I_{or} 为二极管反向电流; K_1 为温度系数; a 为曲线拟合系数; U_b 为结击穿电压; n 为曲线拟合系数^[2-8]。

1.2 仿真模型及实验验证

在 MATLAB/SIMULINK 中建立光伏电池的仿真模型, 如图 2 所示^[9-11]。

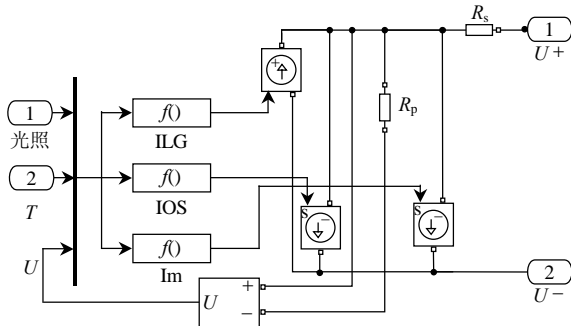


图 2 MATLAB/SIMULINK 中的光伏电池子电路模型
Fig. 2 PV cell circuit model in MATLAB/SIMULINK

基于实验室 HBM(3.2)2020p 光伏电池, 开路电压为 0.58 V, 短路电流为 7.56 A 进行实验验证, 实验仪器为 SONY371A 高功率曲线示踪仪。模型参数设置如表 1 所示。

在光照强度分别为 0, 92, 204, 297, 424 W/m²,

表 1 光伏电池参数设置

Tab. 1 PV cell parameters

$k/(J/K)$	A	q/C	B	$K_1/(mA/K)$	E_{go}/V
1.380 650 5×10 ⁻²³	1.6	1.6×10 ⁻¹⁹	1.6	0.001 7	1.35
R_{sh}/Ω	R_s/Ω	I_{or}/A	I_{scr}/A	N_s	N_p
75	0.09	0.228 7×10 ⁻⁶	8	1	1
n	U_b/V	a	T_r/K		
4	-27	0.15	298.15		

温度为 26.5 °C 时, 仿真得到光伏组件的反向特性与试验结果对比如图 3 所示。

温度分别为 15, 72 °C, 光照强度为 0 W/m² 时, 仿真得到光伏组件反向特性与试验结果对比如图 4 所示。

从图 3 可以直观的看到, 光伏组件具有二极管的反向特性和雪崩击穿现象, 随着光照的增加, 短路电流迅速增加, 雪崩击穿后反向特性逐渐趋于重合。仿真结果与实验结果趋于一致^[4,12]。从图 4 可以看到, 温度升高, 反向电流略有减小, 仿真模型反向特性对温度不敏感, 由于温度对光伏电池反向特性影响较小, 该模型仍能满足工程精度要求^[13-14]。

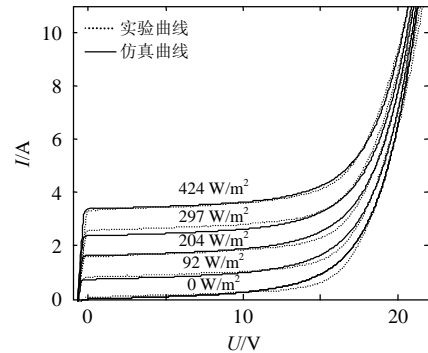


图 3 不同光照下光伏电池反向特性仿真与实验对比
Fig. 3 Comparison between simulative and experimental reverse characteristics of PV cell under different insolation

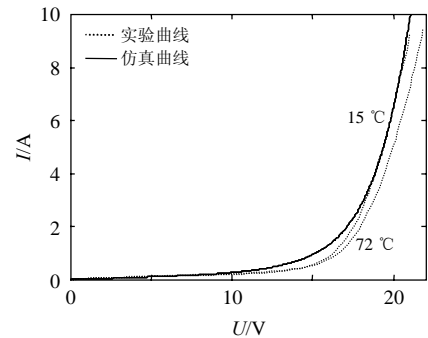


图 4 不同温度下光伏电池反向特性仿真与实验对比
Fig. 4 Comparison between simulative and experimental reverse characteristics of PV cell under different temperature

2 光伏电池反向模型中各参数的影响分析

2.1 参数分析意义

光伏电池反向模型是一个包含众多参数的复杂非线性方程, 分析模型中各个主要参数对光伏电池电气特性的影响, 可以预估参数范围、辅助参数提取、提高模型求解效率、指导光伏阵列设计, 对于实际工程应用具有重要意义。以下分析中光伏组

件参数根据实际典型组件设置^[15]。

2.2 系数 a 对光伏电池反向基本特性的影响

系数 a 分别取 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 温度为 25 °C, 光照为 1 000 W/m² 时光伏电池 $U-I$ 曲线如图 5 所示。

由图 5 可见, a 对反向特性有较大影响, 反向曲线为一簇平行曲线, 对正向特性几乎没有影响。雪崩击穿后, 在相同电流条件下, 系数 a 大的电池反向电压绝对值小。

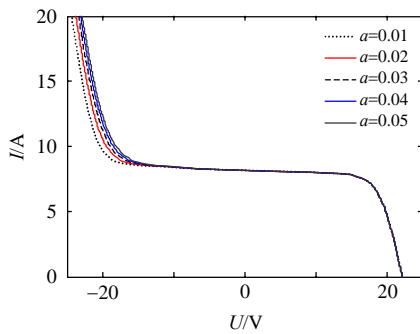


图 5 不同系数 a 下的光伏电池反向 $U-I$ 特性

Fig. 5 Reverse $U-I$ characteristics of photovoltaic cells

2.3 系数 n 对光伏电池反向基本特性的影响

系数 n 分别取 3, 5, 7, 9, 温度为 25 °C, 光照为 1 000 W/m² 时光伏电池 $U-I$ 曲线如图 6 所示。

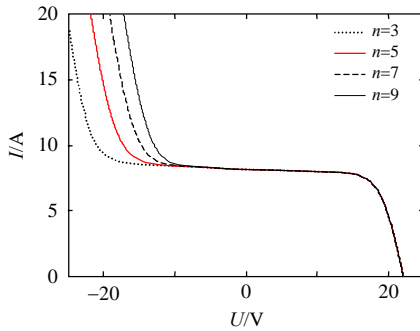


图 6 不同系数 n 下的光伏电池反向 $U-I$ 特性

Fig. 6 Reverse $U-I$ characteristics of photovoltaic cells under different value of parameter n

由图 6 可见, n 对反向特性具有较大影响, 反向曲线为一簇平行曲线, 对正向特性几乎没有影响。雪崩击穿后, 相同电流下, 系数 n 大的电池反向电压绝对值小。

2.4 串联电阻 R_s 对光伏电池反向基本特性的影响

系数 R_s 分别取 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 温度为 25 °C, 光照为 1 000 W/m² 时光伏电池 $U-I$ 曲线如图 7 所示。

R_s 对曲线形状有较大的影响, R_s 越大, 正向开路电压附近光伏电池恒压特性越好, 反向电池击穿

后电流上升越块, 曲线越陡, 击穿电压绝对值越大。

2.5 并联电阻 R_{sh} 对光伏电池反向基本特性的影响

并联电阻 R_{sh} 分别取 35, 45, 55, 温度为 25 °C, 光照为 1 000 W/m² 时光伏电池 $U-I$ 曲线如图 8 所示。

R_{sh} 主要影响反向特性。随着 R_{sh} 的增大, 开路电压几乎不受影响, 短路电流略有增大, 雪崩击穿后, 相同电流下, 并联电阻 R_{sh} 大的电池反向电压绝对值小。

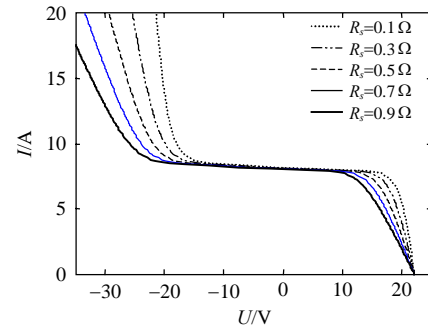


图 7 不同 R_s 下的光伏电池反向 $U-I$ 特性

Fig. 7 Reverse $U-I$ characteristics of photovoltaic cells under different value of R_s

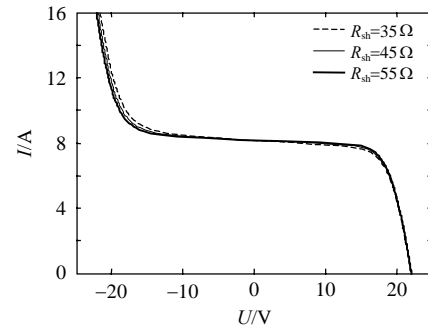


图 8 不同 R_{sh} 下的光伏电池反向 $U-I$ 特性

Fig. 8 Reverse $U-I$ characteristics of photovoltaic cells under different value of R_{sh}

3 旁路二极管对光伏电池的影响

3.1 热斑效应及并联旁路二极管的必要性

当光伏组件通过串并联形成光伏阵列时, 可能会出现反向偏压的组件。在大面积光伏阵列中如果某电池被遮挡, 当该块电池所能提供的最大电流比电池短路电流还要大时, 被遮挡的电池就会带负压, 相当于负载, 会随着能耗的增加产生大量的热量, 形成局部热点, 即热斑效应。热斑效应有可能导致光伏电池出现轻微的永久性功率输出损失或者永久性的开路失效, 这取决于环境温度和反向偏压的大小。某些光伏电池受到高温、高反压和高功耗综合作用可能会发生永久性短路^[4,12,16-18]。

图9为光伏组件组合例，不加旁路二极管，第1块光伏组件被遮挡，其他不被遮挡。改变负载，仿真结果如图10所示。

可以看到被遮挡电池在总输出电压较小时输出功率为负，即光伏电池由电源变成负载，可能形成局部热点，损坏光伏电池。

避免光伏阵列失配现象和产生热斑效应最有效的方式之一就是在光伏电池两端并联旁路二极管。

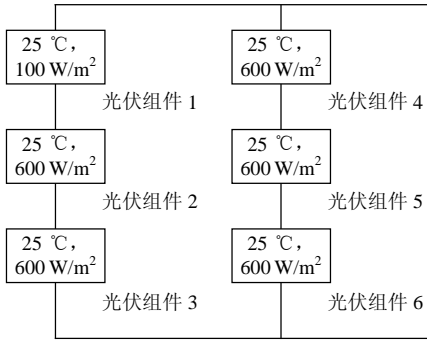


图9 无旁路二极管光伏组件遮挡情况

Fig. 9 PV module without bypass diode occlusion

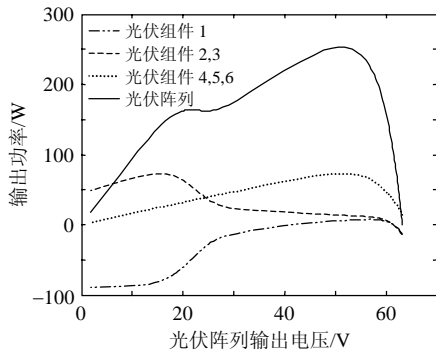


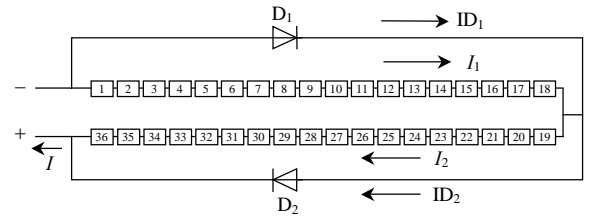
图10 无旁路二极管光伏组件遮挡情况下U-P图

Fig. 10 U-P characteristics of photovoltaic cells under the PV module without bypass diode occlusion

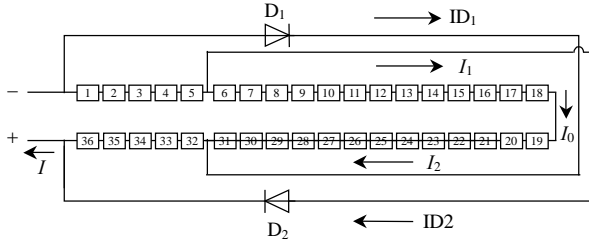
3.2 不同旁路二极管连接方式对光伏组件的影响

大部分商用光伏组件都在内部集成了旁路二极管。通常并不在每一个电池两端都并联一个二极管，而是多个单体光伏电池共用一个旁路二极管。如图11所示，本文将以36块单体光伏电池串联组成的光伏组件为例，对旁路二极管不同拓扑结构的影响进行仿真分析。旁路二极管无重叠拓扑结构如图11(a)所示，旁路二极管重叠拓扑结构如图11(b)所示。

经过推导易得，这两种结构光伏组件的最大输出电流不同。旁路二极管无重叠时，当某些电池被遮挡后，该电池所能输出的最大电流降低，光伏组件所能输出的最大电流即为单体电池的短路电流。



(a) 光伏组件内置旁路二极管无重叠拓扑结构



(b) 光伏组件内置旁路二极管重叠拓扑结构

图11 光伏组件的不同旁路二极管连接方式

Fig. 11 Different topologic structures of bypass diode on PV module

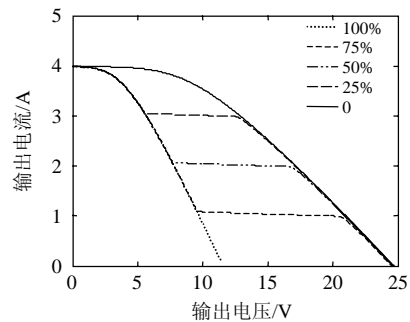
旁路二极管重叠时，若 $I_1 \neq I_0$ ，且 $I_2 \neq I_0$ ，两个二极管均导通，光伏组件所能输出的最大电流为2倍的单体电池短路电流；若 $I_1 = I_0$ ，或 $I_2 = I_0$ ，则只有一个二极管导通或者两个二极管都不导通光伏组件所能输出的最大电流即为单体电池的短路电流^[18]。

3.3 不同旁路二极管连接方式仿真结果

对上述两种结构进行仿真分析，基本条件设置如下：温度为25°C，光照为500 W/m²，单体光伏电池开路电压为0.68 V，短路电流为4 A，36个串联后开路电压为24.7 V，短路电流为4 A。

仿真分析二极管无重叠拓扑结构。现将18、19号电池遮挡，遮挡率分别为0，25%，50%，75%，100%，其余电池均为标准光照500 W/m²，仿真结果如图12所示。

可以看到旁路二极管无重叠情况下部分电池遮蔽情况下的U-I、U-P曲线与无遮蔽情况下的曲线形状相比，部分凹陷，二极管中通过的电流较小，短路电流为4.5~5 A。当光伏组件能输出功率时，输



(a) 光伏组件U-I曲线

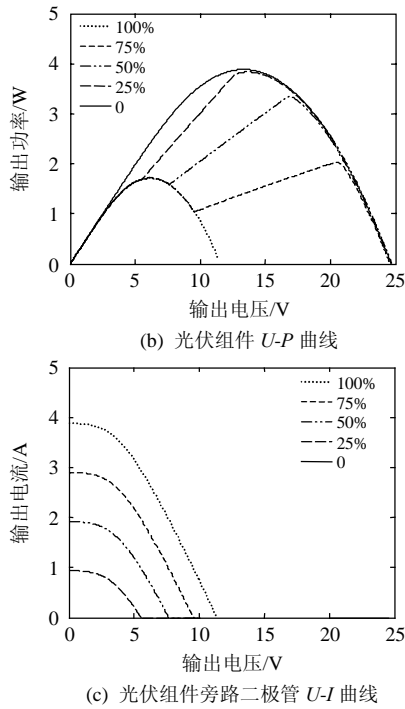


图 12 18、19 号电池遮挡，旁路二极管不重叠时光伏组件和旁路二极管电气特性

Fig. 12 Electrical characteristics of PV module and bypass diodes under the situation that the 18th and 19th batteries are shadowed and the bypass diodes are non-overlap

出的最大电流即为光伏组件短路电流。

仿真分析二极管重叠拓扑结构。现将 6、7 号电池遮挡，遮挡率分别为 0, 25%, 50%, 75%, 100%，其他电池均为标准光照 500 W/m^2 ，仿真结果如图 13 所示。

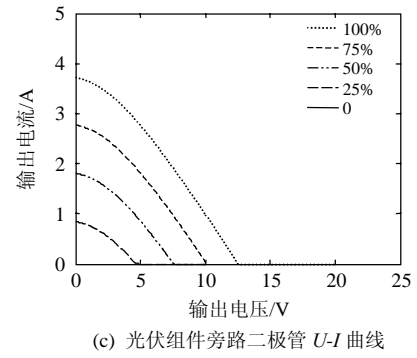
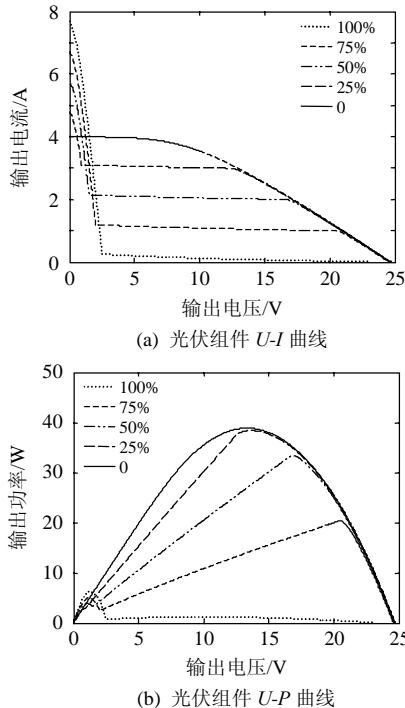


图 13 6 号、7 号电池遮挡，旁路二极管重叠时光伏组件和旁路二极管电气特性

Fig. 13 Electrical characteristics of PV module and bypass diodes under the situation that the 6th and 7th batteries are shadowed and the bypass diodes are overlap

现将 4、5 号电池遮挡，遮挡率分别为 0, 25%, 50%, 75%, 100%，其他电池均为标准光照 500 W/m^2 ，仿真结果如图 14 所示。

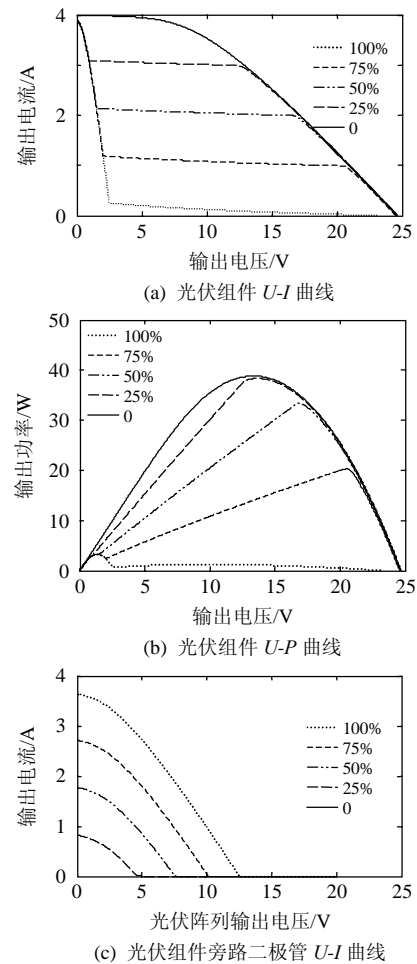


图 14 4 号、5 号电池遮挡，旁路二极管重叠时光伏组件和旁路二极管电气特性

Fig. 14 Electrical characteristics of PV module and bypass diodes under the situation that the 4th and 5th batteries are shadowed and the bypass diodes are overlap

可以看到旁路二极管重叠情况下未被重叠的电池被遮蔽与旁路二极管无重叠情况下部分电池遮蔽情况两种情况类似,有遮蔽情况下的 $U-I$ 、 $U-P$ 曲线与无遮蔽情况下的曲线形状相比,部分凹陷,二极管中通过的电流较小,短路电流约为 4 A。旁路二极管重叠情况下被重叠的电池遮蔽情况与上述两种情况有所不同,曲线形状部分增加,二极管中通过的电流较大,与电池板短路电流相当,短路电流最大值可达 8 A,此时最大功率点出现在低电压区。旁路二极管重叠情况拓扑结构能输出的最大电流为 2 倍的短路电流,与之前的理论分析相符合。

3.4 旁路二极管连接方式的选择

通过以上分析可知旁路二极管重叠的拓扑结构能输出最大电流为 2 倍的短路电流。但一个二极管不能无限制的并联单体电池,存在一个最大可旁路的电池数 N 。选择旁路二极管连接方式时必须考虑这一点。

设定单体电池两端电压大于 $-0.8U_b$ 为单体电池的安全工作区。如图 15 所示, $N-2$ 号电池被遮蔽,反偏电压为 U_s 。

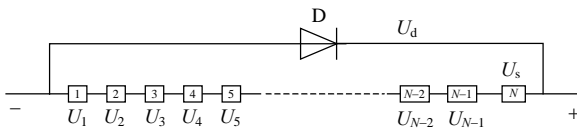


图 15 旁路二极管旁路 N 块单体光伏电池
Fig. 15 N piece of single photovoltaic cells bypassed by diode bypass

旁路二极管最大可旁路电池数分析
如果二极管导通,则有:

$$U_s \geq U_d + \sum_{i=1}^{N-1} U_i \quad (4)$$

考虑到单体光伏电池所能达到的最大电压为开路电压 U_{oc} , U_s 最大值为 $0.8U_b$, 则有:

$$U_s \geq U_d + (N-1)U_{oc} \quad (5)$$

$$N_{max} \leq 1 + \frac{0.8U_b - U_d}{U_{oc}} \quad (6)$$

当 $U_b=15V$, $U_{oc}=0.6V$, $U_d=1V$ 时, $N_{max}=16$ ^[9]。

综上,二极管重叠连接可以有效地减少失配损失,增加最大输出电流,但同时它可能导致光伏组件最大功率点出现在低压区,填充系数降低。此外一个二极管不能无限并联光伏电池,而有最大可旁路电池数限制。

因此,当需要较大的短路电流且最大旁路电池数 N 能满足要求时,可以选择旁路二极管重叠的拓扑结构,如果不需要很大的短路电流,并且考虑到追求较大的填充系数,并减少电路冗余,应当选择二极管无重叠的拓扑结构^[16,19]。

4 实际应用中光伏阵列遮挡条件下的仿真分析

目前实际应用中最常见的拓扑结构是无重叠方式。

对无重叠方式并联了旁路二极管的光伏阵列遮挡情况进行仿真。其中光伏组件 1 被遮挡,光照强度为 $100 W/m^2$,其他组件光照强度均为 $500 W/m^2$ 。连接方式如图 16 所示。

仿真结果如图 17 所示。

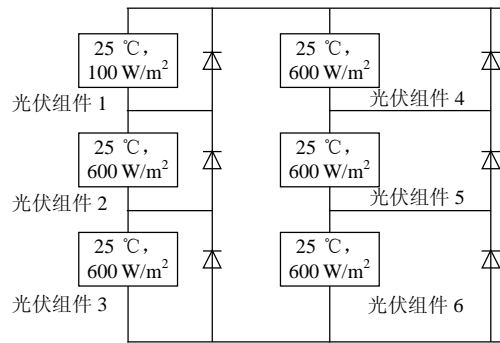


图 16 内置旁路二极管的商用光伏组件遮挡情况
Fig. 16 Situation of commercial PV modules with built-in bypass diodes

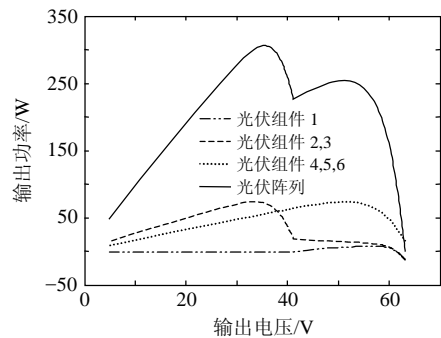


图 17 内置旁路二极管的商用光伏组件遮挡情况 $U-P$ 图
Fig. 17 UP characteristics of shadowed commercial PV modules with built-in bypass diodes

可以看到,由于内部集成了旁路二极管,光伏电池的两端不会出现大的反偏电压。正常情况下二极管反向偏置,不导通,也不产生功率损耗。当光伏电池被遮挡短路电流小于所要通过的电流时,二极管导通,光伏电池两端的电压被二极管嵌位,保护了被遮挡的电池,使其不会承受过大的反向电压

和过大的功率损耗。

同时, 遮挡情况下光伏阵列出现了功率失配的现象, 光伏阵列 $U-P$ 图出现了多波峰的复杂情况, 对最大功率点追踪等控制算法提出了更高的要求^[20]。

5 结论

本文在 MATLAB 仿真平台上实现了光伏电池反向 Bishop 模型及其阵列子电路模型, 通过与实验数据对比, 充分证明了模型的有效性。定性分析了光照强度、温度以及模型中各个参数对光伏组件反向特性的影响; 利用光伏电池反向模型, 分析得出当光伏电池的短路电流小于流经电池的电流时就会发生热斑效应的结论。并联旁路二极管对于抑制热斑效应、减轻热斑效应危害具有显著作用。旁路二极管的连接拓扑有重叠形式和不重叠形式两种, 通过对旁路二极管不同拓扑结构进行仿真分析, 为并联旁路二极管拓扑结构的选择提供了依据; 实用光伏阵列的模型在遮挡情况下出现了多波峰特性, 旁路二极管对光伏阵列起到较好的保护效果。

参考文献

- [1] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 34-35.
Zhao Zhengming, Liu Jianzheng, Sun Xiaoying, et al. Generation and application of solar photovoltaic power [M]. Beijing: Science Press, 2005: 34-35(in Chinese).
- [2] Iñonso-García M C, Ruizb J M, Chenlo F. Experimental study of mismatch and shading effects in the $I-V$ characteristic of a photovoltaic module[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(3): 329-340.
- [3] 吴财福, 张建轩, 陈裕凯. 太阳能光伏并网发电及照明系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 9-25.
Wu Caifu, Zhang Jianxuan, Chen Yukai. Solar photovoltaic power generation and lighting[M]. Beijing: Science Press, 2009: 9-25(in Chinese).
- [4] Meyer E L, Ernest van Dyk E. Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004, 53(1): 83-92.
- [5] Jaboori M G, Hanafy S M. A contribution to the simulation and design optimization of photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(3): 401-406.
- [6] Koutroulis E, Kalaitzakis K, Voulgaris N C. Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(1): 46-54.
- [7] Bose B K, Szczesny P M, Teigerwald R L. Microcomputer control of a residential photovoltaic power conditioning system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 1A-21(5): 1182-1191.
- [8] 杜慧, 林永君, 张少伟. 太阳能光伏电池输出特性分析与仿真研究[C]//中国科学技术大学出版社, 山西太原, 2008.
Du Hui, Lin Yongjun, Zhang Shaowei. Analysis and simulation about PV cell output characteristics [C]//University Press of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi, 2008(in Chinese).
- [9] Chihchiang Hua, Jongrong Lin, Chihming Shen. Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(1): 90-107.
- [10] 周德佳, 赵争鸣, 吴理博, 等. 基于仿真模型的太阳能光伏阵列特性的分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007(7): 1109-1112, 1117.
Zhou Dejia, Zhao Zhengming, Wu Libo, et al. Analysis characteristics of photovoltaic arrays using simulation [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007(7): 1109-1112, 1117(in Chinese).
- [11] 邓夷. 适用于复杂电路的 IGBT 模型及大面积光伏阵列建模研究[D]. 北京: 清华大学, 2010: 23-52.
Deng Yi. Complex circuits for IGBT model and modeling of large photovoltaic arrays[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 23-52(in Chinese).
- [12] Simon M, Meyer E L. Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells[J]. Solar Energy Material & Solar Cells, 2010, 94(2): 106-113.
- [13] 邓志杰. 非晶硅太阳能电池进展和展望[J]. 电源技术, 1999, 23(1): 29-32.
Deng Zhijie. Recent progress and prospect of a Si solar cells[J], 1999, 23(1): 29-23(in Chinese).
- [14] 张利. 光伏电池特性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008: 13-15.
Zhang Li. Research on photovoltaic cell characteristics [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008: 13-15(in Chinese).
- [15] 劳申巴赫 汉斯 S. 太阳能电池阵列设计手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1987: 22-76.
Rauschenbach H S. Solar cell array design handbook [M]. Beijing: Astronautical Press, 1987: 22-76(in Chinese).

- [16] 刘素梅. 光伏方阵失配现象研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2008: 15-22.
Liu Sumei. The study of mismatch in PV array [D]. Shantou: Shantou University, 2008: 15-22(in Chinese).
- [17] 刘宏, 吴达成, 杨志刚, 等. 家用太阳能光伏电源系统 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 24-27.
Liu Hong, Wu Dacheng, Yang Zhigang, et al.. Household solar photovoltaic power system[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2007: 24-27(in Chinese).
- [18] Silvestre S, Boronat A, Chouder A. Study of bypass diodes configuration on PV modules[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1632-1640.
- [19] Karatepe E, Boztepe M, Colak M. Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells[J]. Solar Energy, 2007, 81(8): 977-992.
- [20] 周德佳, 赵争鸣, 袁立强, 等. 具有改进最大功率跟踪算法的光伏并网控制系统及其实现[J]. 中国电机工程学

报, 2008, 28(31): 94-100.

Zhou Dejjia, Zhao Zhengning, Yuan Liqiang, et al. Implementation of a photovoltaic grid-connected system based on improved maximum power point tracking[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 94-100 (in Chinese).



田琦

收稿日期: 2011-01-20。

作者简介:

田琦(1988), 女, 硕士研究生, 主要从事太阳能光伏发电系统研究, tqtianqi@yahoo.com.cn;

赵争鸣(1959), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大容量电力电子变换器、太阳能光伏发电系统。

(责任编辑 张媛媛)