

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

王秀云¹, 王见¹, 田璧源², 车永亮², 马功², 王喆²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 为了避免光伏电池在局部遮挡情况下的热斑效应, 通常在一定数量电池元的两侧并联旁路二极管, 然而由于旁路二极管的反向偏置, 容易造成模组的局部加热现象, 不可避免地导致光伏组件损坏或过早的失效。因此, 提出智能规划旁路二极管的拓扑结构, 结合串并联的光伏阵列拓扑建立了电路模型, 并将太阳能模组电压的大小作为控制二极管拓扑结构的开关状态的判定规则, 降低旁路二极管的导通损耗, 最大限度地提高电池板的输出电能与使用年限。进一步探究了基于智能控制系统的 MPPT 策略, 在计算获得 GMPP 点所在的 UOVSR 区间后, 对该特定的区域采用优化粒子群算法进行最大功率点寻优。仿真结果表明该算法可以快速跟踪到 GMPP。该方法利用小区域搜索代替全局搜索, 具有速度快和准确性高的特点, 可有效降低跟踪过程中的能量损耗。

关键词: 太阳能电池; 阴影效应; 最大功率点跟踪; 智能重构二极管; 旁路二极管

Optimization design of solar module based on intelligent bypass diode under shadow effect

WANG Xiuyun¹, WANG Jian¹, TIAN Biyuan², CHE Yongliang², MA Le², WANG Zhe²

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Urumqi Power Supply Company, Urumqi 830011, China)

Abstract: In order to avoid the hot spot effect of solar panels in local shadow, it usually connects bypass diodes in parallel at both sides of some cells, but the reverse bias of bypass diode causes solar modules to local heating phenomenon easily, which inevitably leads to damage or premature failure of PV modules. Therefore, this paper proposes the topological structure of intelligent planning with bypass diodes, a circuit model combining series and parallel photovoltaic array topology is established, and the value of solar module voltage is taken as the decision rules of controlling switch state of diode topology to reduce conduction loss of bypass diode and maximize the output power and service life of solar panel. The MPPT strategy based on intelligent control system is explored further. After UOVSR interval of the GMPP point is obtained, this paper optimizes the maximum power point in the given area by using particle swarm optimization algorithm. Simulation results show that the algorithm can track GMPP quickly. This method uses small area search instead of global search, has the characteristics of fast speed and high accuracy, and can reduce energy loss in the tracking process effectively.

This work is supported by Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. 20140101079JC) and Jilin Science and Technology Department Project (No. 2014Y124).

Key words: solar cell; shadow effect; maximum power tracking point; smart reconfigurable diode; bypass diode

0 引言

随着近些年来国内外光伏产业的迅猛发展, 安装容量的快速增加, 光伏系统的可靠稳定运行问题也逐渐显露^[1-2]。由于其本身的复杂特性, 而且易受到辐照强度、温度以及寄生阻抗的影响, 特别是因

鸟类、树木、移云等不可预测因素遮挡而产生的非均匀辐照度直接影响光伏阵列的输出功率, 同时由于局部过热会产生热斑效应, 可能对光伏电池及组件的封装材料造成损坏^[3-5]。文献[6]中对美国地区已经运行 1~3 年的约 200 MWp 光伏组件中的异常进行了调研, 总结出造成这些组件失效与衰减的主要原因有电池热斑和旁路二极管失效引起的低电压组件。局部阴影会导致相互串联的光伏电池元产生热斑, 为了避免热斑效应造成的组件损坏, 通常将旁

路二极管反向并联于电池串, 一般为 12~24 个电池元并联一个旁路二极管。在非均匀辐照度情况下, 被遮挡最严重的电池元将变成负载, 旁路二极管可有效降低反偏电压对热斑电池的影响。然而当旁路二极管工作时, 电流流过内部产生热量, 如果二极管结温上升并超过安全温度, 将会造成二极管被破坏或功能参数发生变化, 从而降低光伏组件的使用寿命^[7]。因此, 进一步优化光伏电池旁路二极管的配置方式, 将对提高太阳能电池板的输出功率及使用寿命具有重要的理论和实践意义。

目前, 关于旁路二极管可靠性研究已经受到学术界广泛关注。文献[8]中提出了在动态遮阴影响下的光伏阵列优化设计, 建立了不同光伏阵列拓扑结构下的旁路二极管温度计算模型, 并分析了高温模拟环境冲击下的稳定可靠性变化情况。文献[9]分别从反向长时间耐压、正向长时间耐压等方面展开了旁路二极管的可靠性研究与测试。文献[10]中提出使用多个开关对太阳能电池片的接入状态进行智能重构, 以应对任意遮挡情况。然而, 电源的接通与断开会产生浪涌电流, 该电流的峰值远大于稳态输入电流, 旁路二极管的 PN 结可能在一瞬间被击穿或烧断电阻^[11]。文献[12]中提出一种层叠式旁路二极管配置方法, 通过引入权重因子得到非均匀辐照度条件下的最优配置方式, 这种方法由于切换电路时原电路并不断开, 避免了通断状态突变产生的浪涌电流。文献[13]认为当遮阴或故障发生时, 在出现遮阴或者故障的支路串入电压源, 对支路进行电压补偿, 实现该支路最大功率的优化控制, 虽然该方法使得局部遮阴条件下的阵列输出特性是单峰值的, 但补偿电路的加入导致电路结构复杂, 成本增加。

针对以上问题, 本文运用电路分析方法, 探究了局部遮挡条件下造成光伏阵列输出 $P-V$ 特性曲线呈多峰的原因, 提出了利用算法重新配置二极管的智能控制系统。通过降低旁路二极管的导通损耗, 限制或者避免光伏组件局部过热现象, 以提升非均匀辐照度下的光伏组件的效率以及使用寿命。同时提出的智能控制系统通过在特定区域对 GMPP 进行跟踪, 使最大功率点跟踪更易实现。

1 太阳能电池及旁路二极管回路

太阳能电池板由太阳能电池元串联然后并联组成, 太阳能电池的等效示意图如图 1 所示。 I_{ph} 为光生电流, D 为并联二极管, R_{sh} 为并联电阻, R_s 为串联电阻。

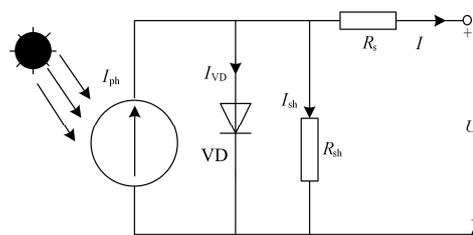


图 1 太阳能电池等效示意图

Fig. 1 Equivalent schematic diagram of solar cells

图 2 为太阳能电池的输出 $I-V$ 特性曲线, 由于光伏电池的性能易受外界因素影响, 光伏组件在非均匀辐照度分布或不同温度下, 其开路电压和短路电流也不同, 输出的最大功率也不同。由于接收到较低辐照的单体太阳能电池输出电流小, 当 $I > I_{ph}$ 时, 二极管和并联电阻都将变为能耗状态, 不仅造成输出功率的下降, 还会在遮挡最严重的电池元上形成热斑效应。如果反向电压继续增大超过 U_{br} 时, 电池元将因被击穿而损坏。对于由多个太阳能电池元串联而成的光伏组件, 性能最差的一块电池元将决定整个光伏组件的输出性能。为了解决上述问题, 通常采用在多个电池元的旁边反向并联旁路二极管的方法来限制太阳能电池进入能耗区的深度。

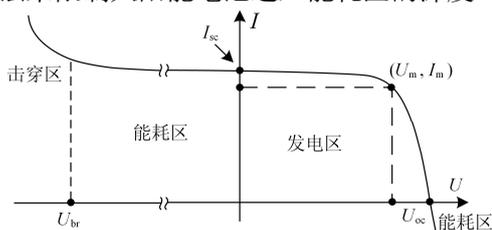


图 2 太阳能电池输出 $I-V$ 特性曲线

Fig. 2 $I-V$ characteristic curve of solar cell output

图 3(a)为无重叠式旁路二极管配置方式, 也是应用最广泛的旁路二极管连接方式。 D 为旁路二极管, C_{cell} 为太阳能电池片, 每个旁路二极管内有多个电池元总计为一个区块。针对典型旁路二极管配置方式不能适应旁路损耗和导通损耗制约关系的问题,

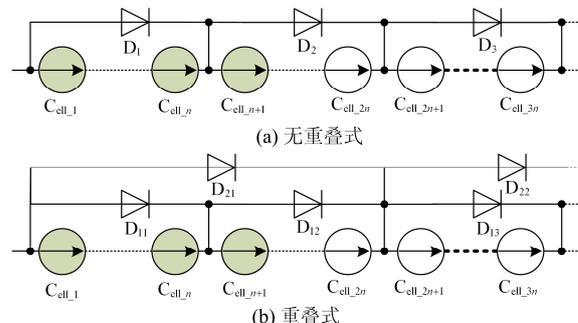


图 3 两种旁路二极管配置结构

Fig. 3 Two kinds of bypass diode configuration structures

文献[14]中提出了重叠式旁路二极管配置方式,如图 3(b)所示。通过对比相同遮阴方式下的两种配置方式可以发现,有重叠结构的通过配置较少的二层旁路二极管来减少导通损耗。

当太阳能电池处于严重反向偏置时,用于保护太阳能电池,防止其产生过高反向偏置电压的旁路二极管将处于正向工作导通状态,其产生大量的热可以使二极管结温达 120 °C 以上,当旁路二极管长期高温运行或电压正向偏置与反向偏置频繁交替运行,使得旁路二极管失去对太阳能电池的保护作用,从而导致电池两端电压升高,产生大量的热,造成严重的太阳能电池击穿或烧毁^[15]。因此,在非均匀辐照度情况下,通过旁路二极管保护电池元的同时,保护旁路二极管也同样重要。

2 旁路二极管对局部阴影下光伏组件的作用分析

2.1 电压工作区间

图 4 为两个 PV 模组串联工作的等效电路图,假设两个模组接收到的辐照度分别为 S_1 、 S_2 且工作温度相同,当 $S_1 \gg S_2$ 时,模组 1 的短路电流 U_{oc1} 小于模组 2 的短路电流 U_{oc2} , 此时该光伏系统输出 $I-V$ 和 $P-V$ 特性曲线分别如图 5 所示。

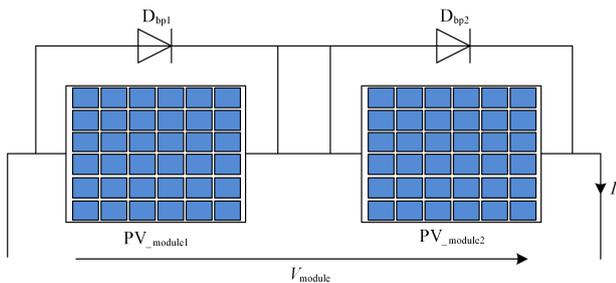


图 4 由两个光伏模组构成的光伏系统

Fig. 4 PV system composed of two PV modules

从图 5(b)中可以明显看出有两个最大功率点(MPP),一个为全局最大功率点(GMPP)一个为局部最大功率点(RMPP)。当系统的工作电压 U 运行在 $[0, U_{sc2}]$ 时,旁路二极管 D_{bp2} 并未导通,因此该工作电流区间被称为安全工作电压区(SOVR)。由于 $U_{oc2} < U_{GMPP} < U_{oc1}$, 为了获取最大输出功率,旁路二极管 D_{bp2} 导通,造成模组的工作温度升高,因此 GMPP 所在的区间 $[U_{oc2}, U_{oc1}]$ 称之为非安全工作电压区(UOVR),而在 UOVR 内有一个重要的子区间 $[U_{e1}, U_{e2}]$ 称之为非安全工作电压子区间(UOVSR), U_{e1} 、 U_{e2} 为过 RMPP 点的切线与 $P-V$ 曲线在区间 $[U_{oc2}, U_{oc1}]$ 内的交点横坐标,从图中可以明显看出 UOVSR 区间内所有点对应的功率均高于 P_{RMPP} 。因

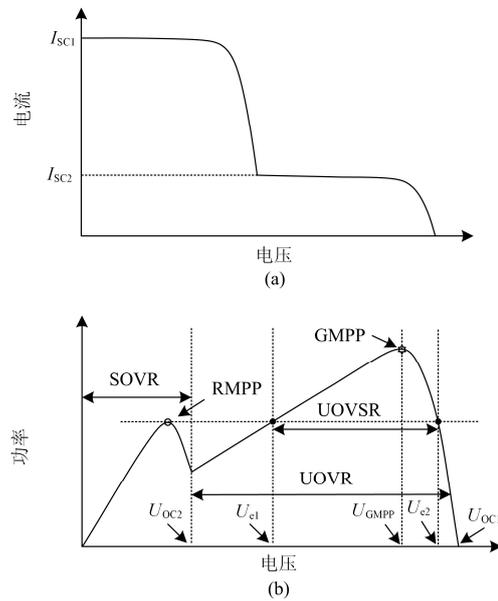


图 5 两模组间严重失配情况下的输出 $P-V$ 特性曲线

Fig. 5 Output $P-V$ characteristic curve under the condition of severe mismatch between two modules

此,在区间 UOVSR 内,获得最大输出功率的同时也应该考虑较高的电流流过 D_{bp2} 所产生的热量所造成的局部发热现象。

2.2 失配情况下 MPP 数量与旁路二极管的关系

通常认为失配情况下局部极值点的数量与旁路二极管导通的数量相同,这并不准确。假设模组 1 中共有 N 个 PVcells,其中 N_s 个接收的辐照度为 S_a ,剩下的 $N-N_s$ 个接收到的辐照度为 S_b ,同理模组 2 中有 N_s 个接收的辐照度为 S_c , $N-N_s$ 个接收到的辐照度为 S_d 。假设 $S_a > S_b > S_c > S_d$, 可能有 4 个 MPPs 出现在系统输出的 $P-I$ 或 $P-V$ 特性曲线上,而这些 MPP 的数量及位置则取决于 $V_{MPPcell}$ 及电池元的击穿电压值 V_{bcell} ($V_{bcell} < 0$)。因为光伏模组中的电池元串联,而且并联了旁路二极管, $V_{module} \geq 0$, 所以有 $(N-N_s) \times |V_{bcell}| \leq N_s \times V_{MPPcell}$, 可以通过加和获得系统在上述失配情况的 $I-V$ 特征,如图 6 所示。

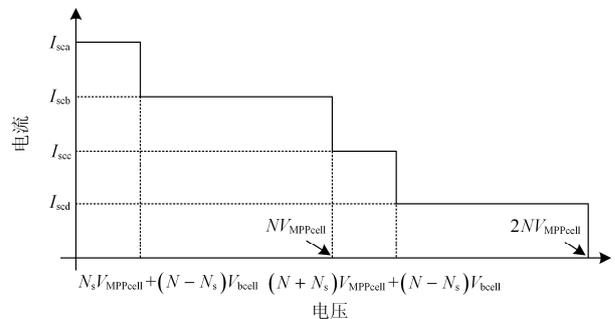


图 6 失配情况下的 $I-V$ 特征

Fig. 6 $I-V$ characteristics in mismatched cases

图 7 为失配情况下的 $P-V$ 特征。从图中可以看出, MPP 的数量取决于 PV 模组内电池元的失配情况, 其数量可能要多于旁路二极管的个数, MPP 的位置主要与 V_{bcell} 、 V_{MPPcell} 以及不均匀辐照度在 PV 模组内电池元上的分布有关, 虽然 V_{MPPcell} 可以通过制造商提供的数据获得, 但 V_{bcell} 则难以获得, 只有当 $|V_{\text{bcell}}|$ 的值足够大时, $(N-N_s) \times |V_{\text{bcell}}| \geq N_s \times V_{\text{MPPcell}}$, MPP 数量才和旁路二极管数量相同, 而且位置也只与 V_{MPPcell} 有关。

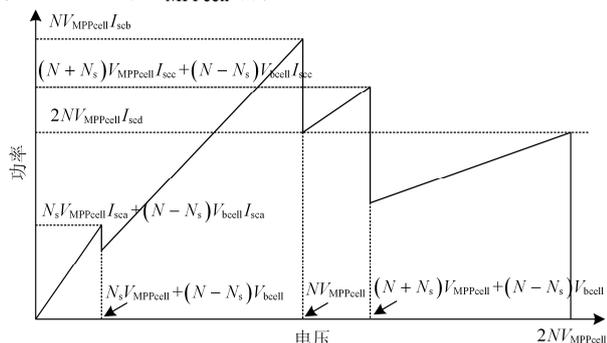


图 7 失配情况下的 $P-V$ 特征

Fig. 7 $P-V$ characteristics in mismatched cases

综上所述, 在非均匀辐照度情况下, 输出功率特性曲线峰值数量与旁路二极管导通数量并不相关, 只有当电池元的击穿电压 $|V_{\text{bcell}}|$ 值足够大时才能保证极值点数量与并联旁路二极管数量一致。因此, 考虑到单体电池反向击穿电压, 采用优化的电池元连接方式及合理的旁路二极管配置对减少局部极值点十分必要。

3 网状光伏阵列拓扑结构

除了传统的将二极管与一串电池元并联的方式外, 文献[16]中提出采用单体电池元先串并联然后再并联交错二极管的结构, 如图 8 所示, 结果表明交错并联组件相比于并联相同数量旁路二极管的非交错结构能更为有效地输出功率, 但该结构存在内部回流问题。因此, 采用适当的连接方式对旁路二极管的数量和位置进行优化对遮阴影响下提高阵列功率输出及降低局部发热十分必要。

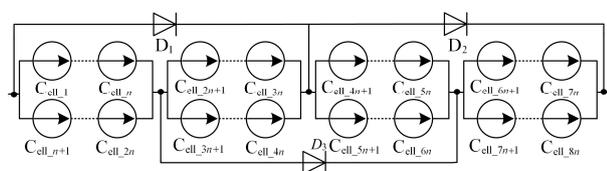


图 8 交错组件结构

Fig. 8 Interleaved component structure

下面对采用三种结构的 $\{3 \times 2\}$ 阵列分别进行仿

真实验, 如图 9 所示, 分析相同遮阴条件下三种配置方式之间的性能差异。正常情况下六个组件均在 STC 下工作, 假设其中一个组件由于被遮挡而处于不同辐照度, 在此情况下利用 Matlab 软件仿真, 获得的输出 $P-V$ 特性曲线如图 10 所示。

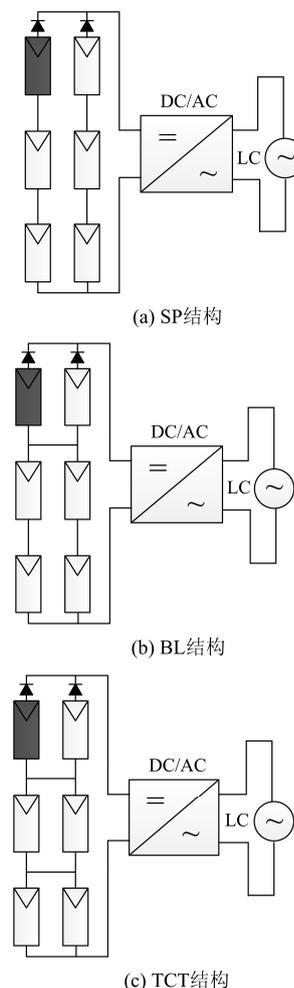


图 9 三种拓扑结构下失配示意图

Fig. 9 Schematic diagram of mismatch under three topologies

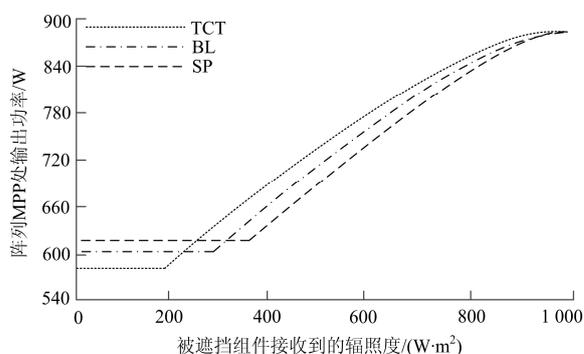


图 10 三种拓扑结构最大输出功率对比

Fig. 10 Maximum output power comparison of three topologies

从图 10 中可以看出,当被遮挡模组接收到的辐照度在 $300\sim 1\,000\text{ W/m}^2$ 范围内时,三种结构输出功率的大小关系为 $TCT > BL > SP$ 。可以看出相同的局部遮挡情况下,光伏阵列采用网状(TCT)拓扑结构相对于串并联(SP)结构具有更好的输出特性,因此,本文以采用 TCT 拓扑结构的光伏阵列为基础,结合智能旁路二极管提出了一种优化控制策略,通过智能控制旁路二极管的导通与断开来减少导通损耗,最终实现旁路损耗和导通损耗制约关系的弱化。

4 智能旁路二极管建模及仿真

4.1 智能旁路二极管的建模

智能重构旁路二极管通过动态的控制开关闭合,获得遮阴影响下的旁路二极管使用处于最优位置和最佳数量,使多列被遮挡模组也可以用同一旁路二极管,改善遮阴影响下的光伏阵列输出特性,提出的智能重构旁路二极管物理模型如图 11 所示。

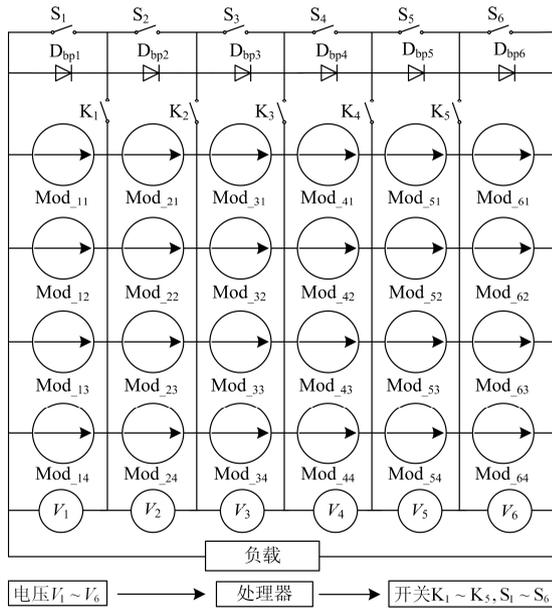


图 11 智能重构旁路二极管物理模型

Fig. 11 Physical model of intelligent reconstruction bypass diode

智能重构旁路二极管物理模型分为三部分,中间部分由 TCT 方式连接的 4×6 的光伏模组构成的光伏阵列,并且对每列四个模组并联一个电压表。上面部分为每列四个模组并联一个旁路二极管,并按图中位置放置开关。下面部分主要有处理器构成,通过对接收到电压数值进行逻辑运算来控制开关的闭合与断开。初始状态采用每列均并联旁路二极管的配置方式,即开关 $K_1\sim K_{n-1}=1$ 处于闭状态,开关 $S_1\sim S_n=0$ 为断开状态。通过电压表获得开路电压向量 $[V_1\ V_2\ V_3\ \dots\ V_n]$,将旁路二极管的反向导通电压设置为 $10\%V_{oc}$ 。当光伏阵列受到局部遮挡影响时,

如果 $90\%V_{max} < V_{min} < V_{max}$ 阵列中的旁路二极管并未发生反向导通,因此并不启动开关控制系统。而当 $V_{min} < 90\%V_{max}$ 时将有旁路二极管发生反向导通,获取此时旁路二极管导通的数量及位置,并计算相邻导通的数量,通过开关的开断获得最优的旁路二极管配置方式。

4.2 智能旁路二极管的仿真与验证

本文在 Matlab/simulink 环境下建立智能旁路二极管控制系统与基于粒子群算法的 MPPT 相结合的光伏系统仿真电路模型,如图 12 所示。仿真也在标准测试条件(Standard Testing Conditions, STC)下进行,由于组件表面的温度随着光强的变化而变化,因此给定组件对应的辐照度及其温度: $G=1\,000\text{ W/m}^2$ 、 $T=25\text{ }^\circ\text{C}$; $G=800\text{ W/m}^2$ 、 $T=21\text{ }^\circ\text{C}$; $G=600\text{ W/m}^2$ 、 $T=18\text{ }^\circ\text{C}$; $G=500\text{ W/m}^2$ 、 $T=16\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于单个电池片输出的电压、电流较小,不易测量,因此将多个电池元串联组成太阳能光伏组件,参数设置采用太阳能电池供应商提供的参数拟合而成,开路电压 17.92 V ,短路电流 1.753 A ,最大输出功率 27.54 W 。旁路二极管参数如表 1 所示。

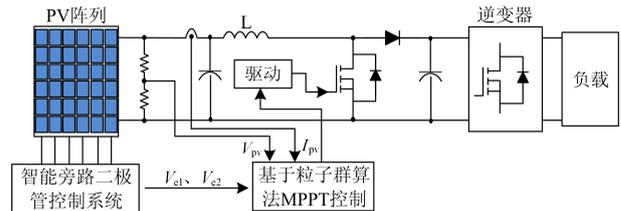


图 12 光伏系统主电路模型

Fig. 12 Main circuit model of photovoltaic system

表 1 旁路二极管参数

Table 1 Bypass diode parameters

符号	说明	数值	单位
V_F	正向直流电压	1.8	V
R_{on}	开启状态电阻	0.9	Ω
G_{off}	关闭状态电导系数	10^{-8}	$1/\Omega$

下面通过仿真方式来验证提出的智能旁路二极管结构在提高光伏阵列输出效率方面的有效性。设开关 $K_1\sim K_5$ 、 $S_1\sim S_6$ 的初始状态为 $[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ 。当光伏阵列发生局部遮挡时,遮挡情况如图 13 所示。

表 2 为局部遮挡后各列电压表的示数, $V_{oc}=V_{max}=17.92\text{ V}$,而且第 1~4 列组件的电压基本相同,第 5、6 列电压较小, V_{min} 远小于 $90\%V_{max}$,说明 D_{bp5} 、 D_{bp6} 将反向导通。处理器接收到电压数值后经过逻辑运算获得智能重构后的开关的闭合与断开状态 $[1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0]$ 。针对这两列被遮挡较严重的组件,仅需要旁路二极管 D_{bp6} 并联在它

们两侧即可, 避免了旁路二极管 D_{bp5} 的内阻损耗阵列的输出功率。

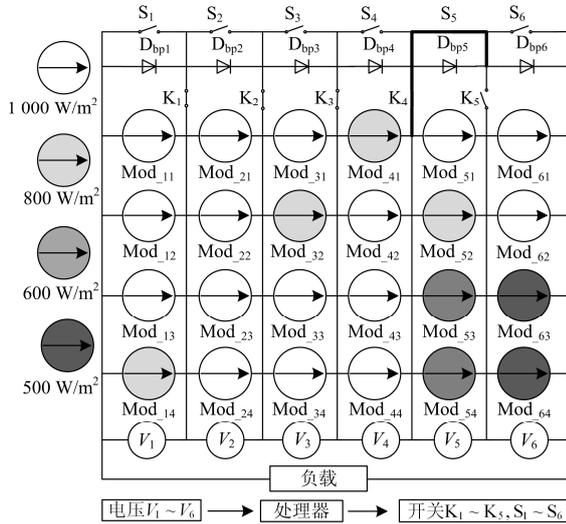


图 13 智能旁路二极管的仿真电路示例图

Fig. 13 Simulation circuit of intelligent bypass diode

表 2 电压表示数

Table 2 Voltage representation

V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
17.15	17.92	17.15	17.15	7.26	8.02

图 14 为光伏阵列在局部遮阴影影响下采用智能旁路二极管的光伏阵列的输出 $P-V$ 特性曲线, 最大输出功率为 $P_{sim}^{smart} = 422.08 \text{ W}$ 。从图 14 中可以看出, 采用智能旁路二极管虽然未明显提高输出功率, 但可以减少旁路二极管的导通数量, 同理可以减少局部遮挡情况下的输出 $P-V$ 特性曲线的局部极值点数量, 提高最大功率点跟踪的速度。

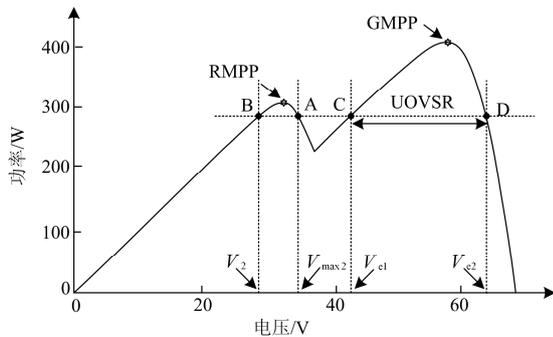


图 14 光伏阵列在局部遮挡情况下的 $P-V$ 曲线

Fig. 14 $P-V$ curve of PV array under local shadow

4.3 UOVSr 区间的快速 MPPT 方法

通常情况下, 光伏阵列的开路电压和峰值点电压跟光照强度的自然对数成正比, 峰值点电压约等于 76% 的开路电压, 即 $V_m = 76\% V_{oc}$ [13]。因此, 在根

据电压表的电压示数获得阵列的输出 $P-V$ 曲线的峰值点 MPPs 数量的同时也可以计算出 GMPP 所在的区域, 在最大功率点所在的区域已知的情况下, 可以在该区域通过传统的 MPPT 算法, 通过小区域搜索代替全局搜索的方法, 从而快速准确地获得 GMPP。根据上面的分析, 可以通过五个步骤获得含智能旁路二极管的串并联式光伏组件电路的优化小区间 MPPT, 步骤如下。

Step1: 首先通过智能旁路二极管控制系统获得开路电压 $[V_1 V_2 V_3 \dots V_n]$, 并按大小顺序排列, 建立开路电压向量。

Step2: 通过智能旁路二极管系统的开断状态, 计算出最大功率点数量。

Step3: 将开路电压乘以固定系数, 近似获得 MPPs 的电压向量, 并按照从大到小的顺序排列 $[V_{max1} V_{max2} V_{max3} \dots V_{maxn}]$ 。

Step4: 按照第 2 节中提及的 UOVSr 区间的获得方法, 过 V_{max2} 点做切线, 因为计算获得的 V_{max2} 与实际所对应的 RMPP 值有误差, 因此 $P-V$ 曲线的交点通常有四个, 横坐标顺序依次为 V_2 、 V_{max2} 、 V_{e1} 、 V_{e2} , 则 $[V_{e1} V_{e2}]$ 即为 UOVSr 区间, 该区间内只有一个极值点, 坐标为 (V_{max1}, P_{GMPP}) 。

Step5: 在 GMPP 所在的 UOVSr 区间内, 运用常规的粒子群优化算法 (PSO) 搜索得到最大功率点的精确位置。

根据文中列举的遮挡模型, 按照上面五个步骤对图 14 给出的光伏阵列输出的 $P-V$ 特性曲线进行 UOVSr 区间计算以及 GMPP 点的跟踪。

1) 通过电压表获得开路电压向量 $[17.15 \ 17.92 \ 17.15 \ 17.15 \ 7.56 \ 8.32]$, 根据智能旁路二极管的开断状态 $[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$, 因为只有一个旁路二极管反向导通, 且阵列采用 TCT 结构, 因此极值点数量为 2。将 1~4 列以及 5、6 列模组的开路电压分别相加和并乘以固定系数, 近似获得 MPPs 的电压向量 $[V_{max1} \ V_{max2}] = [52.72 \ 34.81]$ 。

2) 在图 14 的坐标系中过点 $(38.81, 0)$ 作 X 轴的垂线交 $P-V$ 曲线于点 A, 过点 A 做 X 轴的平行线, 交 $P-V$ 曲线于 A、B、C、D 四点, 其横坐标依次为 V_2 、 V_{max2} 、 V_{e1} 、 V_{e2} , 获得 UOVSr 区间 $(V_{e1} \ V_{e2})$ 。

3) 在已知区间 $(V_{e1} \ V_{e2})$ 内采用简化的粒子群优化算法, 每一个粒子有两个参数分别是工作电压和步长, 通过搜索过程中每个粒子的工作电压不断迭代以及粒子间的工作点电压信息的交流和学习来寻找 GMPP。算法中粒子的工作电压 U_i 和 Δu_i 的迭代公式为

$$\Delta u_i^{t+1} = w \Delta u_i^t + c_1 r_1 (U_{pi}^t - U_i^t) + c_2 r_2 (U_g^t - U_i^t) \quad (1)$$

$$U_i^{t+1} = U_i^t + \Delta u_i^{t+1} \quad (2)$$

$$U_{pi}^t = \begin{cases} U_i^t, f(U_i^t) > f(U_{pi}^{t-1}) \\ U_{pi}^{t-1}, f(U_i^t) \leq f(U_{pi}^{t-1}) \end{cases} \quad (3)$$

$$U_g^t = f^{-1}(\max\{f(U_{p1}^t), f(U_{p2}^t), \dots, f(U_{pm}^t)\}) \quad (4)$$

式中： i 为粒子的数量； t 为迭代次数； i 为惯性权重，决定当前粒子的速度； c_1 、 c_2 为学习因子； n_1 、 n_2 服从[0, 1]间的均匀随机数值； f 为总功率函数。

4.4 仿真结果及分析

本文 PSO 算法中粒子数设置为 4，并均匀地分布在 UOVSr 区间内，依次运行四个粒子的工作电压 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 ，每次迭代不断更新全局的最优值 U_g 。若功率波动满足式(5)，则寻优过程完成，停止迭代。 U_g 当前全局最优值为 GMPP 所对应的电压 U_m ，其功率为最大功率 P_m 。 P_{sim}^{smart} 为当前运行实时输出的功率，PSO 算法参数设置如表 3 所示。

$$\Delta P = \frac{|P_{real} - f(U_m)|}{f(U_m)} < 5\% \quad (5)$$

表 3 PSO 算法参数设置

Table 3 PSO algorithm parameter setting

参数	数值	参数	数值
m	4	U_1/V	$V_{e1}+0.2(V_{e2}-V_{e1})$
w	0.4	U_2/V	$V_{e1}+0.4(V_{e2}-V_{e1})$
C_1	0.6	U_3/V	$V_{e1}+0.6(V_{e2}-V_{e1})$
C_2	1.2	U_4/V	$V_{e1}+0.8(V_{e2}-V_{e1})$
T_g/s	0.02	$\Delta u/V$	0.2~2

跟踪过程的工作电压及功率变化如图 15 所示，仿真得到的 $P_m = 421.82 \text{ W}$ ，与实际 $P_{sim}^{smart} = 422.08 \text{ W}$ 相差 0.26 W，而且 PSO 算法在 0.3 s 左右即可收敛到最大功率点，说明算法可以快速准确地找到最大功率点，降低跟踪过程中的能量损失。

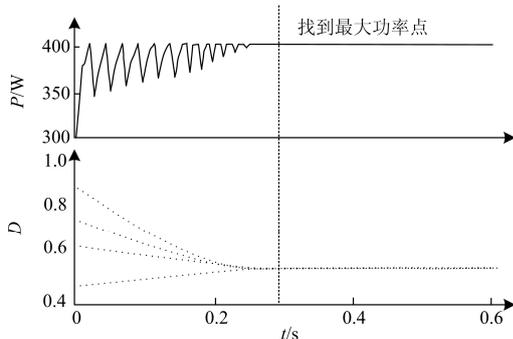


图 15 UOVSr 区间的快速 MPPT 结果

Fig. 15 Fast MPPT results in UOVSr interval

在该方法的优点在于当光伏阵列上出现局部遮挡时，可以通过智能旁路二极管优化控制获得每一列组件的开路电压，即可计算出 MPPs 数量以及

GMPP 所在的区域，对特定的区域采用优化粒子群算法进行最大功率点寻优，相对于全局 MPPT 可以大幅提高搜索速度。

综上，文中智能旁路二极管部分通过开关控制遮阴或故障影响下的旁路二极管投入数量，可有效防止旁路二极管长期高温运行或电压正向偏置与反向偏置频繁交替运行，提高使用寿命。最大功率点跟踪部分通过小区间搜索，避免了搜索陷入局部极值或多次迭代而造成的功率振荡，提高光伏系统的经济效益。

5 结论

本文在分析了传统旁路二极管配置方式的基础上，研究了一种智能优化的旁路二极管配置方案。当光伏阵列出现局部遮挡时，通过测量整列组件电压，控制开关的开断，以智能规划遮阴情况下的旁路二极管拓扑结构，减少遮阴影响下的旁路二极管导通数量，降低导通损耗。进一步探究了遮阴影响下光伏阵列输出的 $P-V$ 特性曲线的 MPPs 数量以及 GMPP 所在的区域，提出了含智能旁路二极管的串并联式光伏组件电路的优化小区间的 MPPT 方法。而且通过对特定的区域采用优化粒子群算法进行最大功率点寻优，减少跟踪 GMPP 的时间，提高效率，仿真结果表明：算法可以快速准确地找到最大功率点，降低跟踪过程中的能量损失。

在以后的研究工作中，应考虑到太阳辐照度的强弱受到季节的变化与地理位置等因素的影响，定期对最优值的参数进行计算更改。并进一步考虑开关类型、成本以及故障率等问题，设计以最大收益为目标的光伏系统。

参考文献

[1] 谭颖, 吕智林, 李捷. 基于改进 ELM 的风/光/柴/储独立微网分布式电源多目标容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 63-70.
TAN Ying, LÜ Zhilin, LI Jie. Multi objective capacity optimization of distributed generation of wind / light / diesel / storage independent microgrid based on improved ELM[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 63-70.

[2] 孙亮, 袁文强, 吴长鹏. 两级式光伏并网系统建模及关键环节的设计[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(2): 26-32.
SUN Liang, YUAN Wenqiang, WU Changpeng. Modeling of two level grid connected PV system and designing the key links[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(2): 26-32.

- [3] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [4] 康成功, 李献伟, 张国军. 分布式电源参与的配电网电能质量控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 99-106.
KANG Chenggong, LI Xianwei, ZHANG Guojun. Research on power quality control strategy incorporating distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(16): 99-106.
- [5] 石磊磊, 胡建昭, 韩胜峰, 等. 提高光伏并网渗透能力的电价激励负荷转移策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(23): 153-157.
SHI Leilei, HU Jianzhao, HAN Shengfeng, et al. Research on electricity price incentive load transfer strategy to improve grid penetration capability[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(23): 153-157.
- [6] 张臻, 王磊, 蔡一凡, 等. 非均匀辐照下光伏组件旁通二极管可靠性研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(2): 355-360.
ZHANG Zhen, WANG Lei, CAI Yifan, et al. Study on reliability of bypass diode of photovoltaic module under non-uniform irradiation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(2): 355-360.
- [7] KIM K A, KREIN P T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, 5(5): 1-7.
- [8] BELHAOUAS N, CHEIKH M S A, AGATHOKLIS P, et al. PV array power output maximization under partial shading using new shifted PV array arrangements[J]. *Applied Energy*, 2017, 187: 326-337.
- [9] 王云平, 阮新波, 李颖, 等. 不均匀光照光伏单元串联电路快速 MPPT 方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(19): 4870-4878.
WANG Yunping, RUAN Xinbo, LI Ying, et al. A rapid tracking method of maximum power point for solar units in series under uneven solar irradiance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(19): 4870-4878.
- [10] BROOKS A E, CORMODE D, CRONIN A D, et al. PV system power loss and module damage due to partial shade and bypass diode failure depend on cell behavior in reverse bias[C] // 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), June 14-19, 2015, New Orleans, USA: 1-6.
- [11] ZHENG H, LI S, CHALLOO 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.
- [12] BALATO M, COSTANZO L, VITELLI M. Reconfiguration of PV modules: a tool to get the best compromise between maximization of the extracted power and minimization of localized heating phenomena[J]. *Solar Energy*, 2016, 138: 105-118.
- [13] 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.
ZHU Wenjie, RONG Fei. Analysis on control strategy of PV array configuration optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(36): 96-103.
- [14] MURTAZA A, CHIABERGE M, SPERTINO F, et al. A maximum power point tracking technique based on bypass diode mechanism for PV arrays under partial shading[J]. *Energy & Buildings*, 2014, 73(2): 13-25.
- [15] VERMA D, NEMA S, SHANDILYA A M, et al. Maximum power point tracking (MPPT) techniques: recapitulation in solar photovoltaic systems[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54(9): 1018-1034.
- [16] 周笛青, 吴春华, 李智华, 等. 局部阴影下光伏组件建模及输出特性研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(11): 2098-2105.
ZHOU Diqing, WU Chunhua, LI Zhihua, et al. Modeling and output characteristics of photovoltaic modules under local shadow[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2014, 35(11): 2098-2105.

收稿日期: 2017-05-27; 修回日期: 2017-10-07

作者简介:

王秀云(1977—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: w-xiu-y@163.com

王见(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行、光伏发电; E-mail: wangjiansdream@163.com

田壁源(1989—), 男, 硕士, 研究方向为继电保护及安全稳定控制、光伏发电。E-mail: 13843226138@163.com

(编辑 周金梅)