

# 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究

孙航, 杜海江, 季迎旭, 杨博

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 采用目前常用的光伏电池模型对光伏阵列进行建模时, 或者需要多个模块进行串并联, 仿真电路规模较大, 增加了仿真复杂性, 或者由于参数简化影响精度。将建立光伏阵列模型的方法分为计算法和查表法, 计算法容易收敛, 但需要明确的光伏阵列输出电压电流方程, 查表法比较灵活, 只需知道输出电压电流的数据源, 可以仿真任意规模的光伏阵列。之后基于查表法和实际产品数据实现与功率变换器进行组合连接的电路仿真, 并解决建模过程的若干技术问题。结合模型和阻抗分析, 对单模块、组串和阵列等典型配置分布式 MPPT 机理进行分析, 并得出相应控制表达式。最后针对相应配置分别设计算例进行仿真研究, 并与集中式 MPPT 结果进行对比分析, 为显著提高光伏阵列输出效率建立理论基础。

**关键词:** 光伏模型; 计算法; 查表法; 最大功率

## Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study

SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, YANG Bo

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The simulation circuit of PV arrays can be complex or even features low accuracy, due to the series or parallel connection of photovoltaic cells that are usually modeled by conventional models. In this paper, the PV arrays modeling methods are divided into two categories, namely, calculation method and look-up table method. The calculation method easily falls into convergence, yet needs definite PV output voltage and current equation. The look-up table method is more flexible as the modeling of PV array only requires current and voltage data. A look-up table method is proposed to verify the correctness of modeling PV arrays in a solar power converter. In this process, a few key problems are solved. According to the proposed model and the impedance analysis results, the mechanisms of distributed maximum power point tracking (MPPT) of single, series, and multiple PV arrays are investigated and the corresponding equations are obtained. Calculation cases of corresponding configurations are simulated and the results are compared with that of centralized MPPT, which provides solid theoretical foundations for improving the efficiency of PV arrays.

**Key words:** photovoltaic model; calculation method; look-up table method; maximum power point tracking (MPPT)

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0048-07

## 0 引言

光伏电池作为光伏发电系统中的核心部件, 其输出特性对光照强度和温度变化非常敏感, 仅通过物理实验对由光伏电池组成的光伏组件和阵列进行各种工况的物理实验研究很不方便, 也提高了研究成本。通过对光伏电池进行建模, 利用计算机软件仿真实验, 是目前通用的方法, 也为最大功率跟踪算法等其他后续深入工作提供了基础<sup>[1]</sup>。目前常用的光伏电池模型有电路模型<sup>[2-7]</sup>和工程模型<sup>[8-11]</sup>。电路模型以光电效应和肖克利二极管方程建立单体光伏电池模型, 其仿真精度高, 当用此模型组成仿真电路规模较大时, 仿真速度慢, 且很难模拟实际产

品特性, 影响使用。另外在对单体光伏电池进行仿真时, 负载取值不当很容易导致不收敛。工程模型经过对电路模型变换并综合厂商典型参数建立, 其数学方程比较直观, 实用性较好, 但是忽略了电路模型中的串并联阻抗, 仿真精度受到影响。

将上述光伏模型用于仿真应用时, 应用方式可分为两类: 计算法和查表法。计算法建模方式是根据光伏对象的电压电流数学方程(电路模型或者工程模型的电压电流方程)仿真光伏模块的输出特性, 该建模方式的使用前提是已知电压电流输出方程, 具有较大的局限性。查表法建模方式是依据光伏对象的电压电流离散数据源, 仿真光伏模块的输出特性。查表法数据源可以通过三种方式获得: 对输出

电压区间离散化处理, 利用电路模型或者工程模型的电压电流方程, 计算得到对应的电流数据源; 通过实际的物理实验测试, 得到光伏模块的输出电压电流数据源; 利用生产厂商提供的光伏模块输出特性曲线, 对曲线进行数据处理, 得到电压电流数据源。查表法建模方式避免了计算法的局限性, 只需获得光伏模块的电压电流数据源, 可对任意规模的光伏阵列以及较复杂的工况进行仿真, 具有很好的灵活性。文献[12-13]利用查表法建模方式, 对光伏系统在不同工况下的输出特性进行了建模研究, 但是仅局限在光伏模块输出特性的研究, 没有和其他电力电子器件进行连接实现电路仿真。文献[14]做了进一步研究, 把光伏模型与变流器进行连接, 实现了电路仿真, 但是在使用查表法建模方式时, 数据源利用电路模型简化处理得到的新电压电流方程获得, 精确受限; 光伏模型和变流器连接实现最大功率控制(MPPT)时, 使用集中式 MPPT 研究了光伏组串的输出, 考虑工况较简单。文献[15]对光伏阵列在阴影遮挡时存在功率损失问题进行了分析, 但是没有给出具体的解决方法。目前 TI、ST 等公司推出了光伏分布式 MPPT 控制芯片, 但是其控制算法机理有待深入分析。

综上所述, 本文对利用计算法和查表法建模方式实现光伏模块建模存在的问题进行了研究分析, 实现了光伏模块与电力电子变换器连接进行电路仿真, 并对使用分布式 MPPT 实现光伏阵列最大功率输出问题进行了机理分析, 最后给出详细仿真算例, 并对分布式与集中式 MPPT 控制进行对比分析。

## 1 建模原理分析

图 1 为一般光伏并网系统的构成示意图, 光伏模块经斩波器和并网逆变器实现电能输出, 其中一般由斩波器实现 MPPT 控制, 而由逆变器实现定直流母线电压和并网功率因数控制。图 2 为光伏模块结构, 后面的斩波器逆变器及电网等电路可等效用负载阻抗表示。

光伏模块模型核心由受控电流源及其控制函数表示, 采样光伏模块的输出电压作为控制函数输入, 控制函数根据已知的光伏模块特性, 得到受控电流源值。控制函数可以使用算法或者查表法建

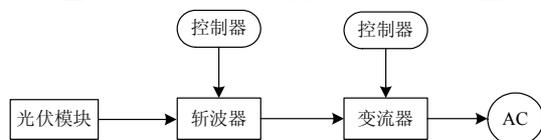


图 1 光伏并网系统的拓扑结构示意图

Fig. 1 Topology of the photovoltaic grid-connected system

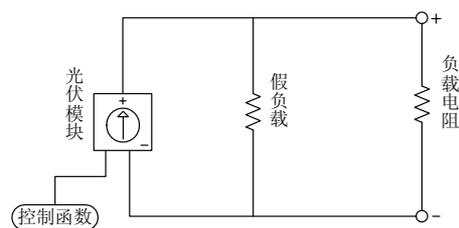


图 2 光伏模块建模电路图

Fig. 2 Circuit diagram of photovoltaic module modeling

模方式实现, 计算法则依据已知遮挡率、短路电流、开路电流等参数建立特性方程。数据源是利用查表法建模的前提, 采用前述三种数据源获取方式外, 针对不同规模的光伏单元(单体光伏电池、基本组件、组件、组串、阵列), 其数据源的获取可利用数值法, 已另文论述<sup>[16]</sup>, 其主要思想是, 光伏阵列通常由光伏电池、组件、组串、组串并联逐层构成, 考虑到构成光伏阵列的不同单元均有各自的输出特性, 而高层次单元的输出特性可以根据构成机理由低层次单元的输出特性得到, 因此, 把最低层构成单元光伏电池的输出特性由离散的电压电流数据源呈现, 并作为基准数据源, 通过算法推演, 可以逐层得到组件单元、组串单元、阵列的电压电流数据源, 即高层次单元的电压电流数据源可以由次级低层次单元求得。

光伏模块模型通常与功率变换器如斩波器或逆变器连接再接至负载或电网, 如图 1 所示, 以连接升降压斩波器及电阻负载(当接其他负载时总可以等效为电阻)为例, 通过计算和控制, 选择升压或降压斩波器并选择合适的占空比  $D$ , 可以使光伏模块输出最大功率。在对斩波器进行建模时, 如果采用实际的 Boost 或者 Buck 电路并采用 PWM 控制时, 仿真速度很慢, 为了忽略实际电路开关管的开关暂态过程, 提高仿真速度, 采用开关状态平均模型<sup>[17]</sup>对斩波器进行建模, 斩波器模型如图 3(a)、图 3(b)所示。

两个模型中受控源电压、电流所用公式相同, 如式(1)所示, 其中电流  $I$  代表的物理含义不同, 图中对  $I$  进行了标示。

$$\begin{aligned} I_1 &= D \cdot I \\ V_1 &= D \cdot V \end{aligned} \quad (1)$$

## 2 模型组合应用分析

MPPT 是光伏系统应用的关键问题, 为验证所建光伏模块及所连接斩波器电路模型有效性, 将分三类应用进行分析。

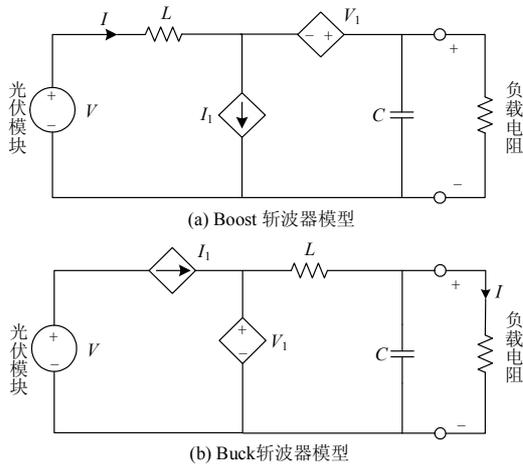


图3 斩波器模型  
Fig. 3 Chopper model

### 2.1 单模块的MPPT应用

单模块是指用一个光伏模块经斩波器连接负载，斩波器由图3电路组合构成，并由控制器实现Boost和Buck切换，将斩波器后续电路用等效电阻表示，如图4所示。利用查表法建模方式，光伏模块可以灵活表示单个光伏电池、组件、组串、阵列。根据负载电阻值的大小，控制器通过适当的MPPT算法控制斩波器使得光伏模块输出最大功率值。当采用常规爬山法算法时只对光照均匀无遮挡光伏模块即单峰工况有效。

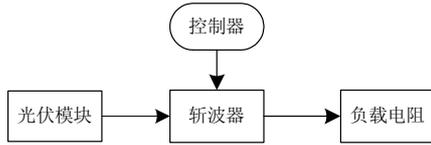


图4 单模块模型应用拓扑示意图  
Fig. 4 Topology diagram of single module model application topolog

根据负载电阻与最大功率点处电阻的比较关系，由控制器动态选择升压型或者降压型斩波器，图5给出了光伏模块的负载阻抗特性图。

对于给定的光伏模块工况，对应确定的峰值电压和峰值电流，可得等效峰值电阻为

$$R_m = \frac{V_m}{I_m} \quad (2)$$

当负载电阻  $R_0$  大于最大功率点处电阻  $R_m$  时，控制器选择斩波器为 Boost 电路，增大占空比  $D$ ，负载电阻线  $R_0$  逆时针旋转靠近最大功率电阻线  $R_m$ 。当光伏模块工作在最大功率点时，负载电阻  $R_0$ 、最大功率点处电阻  $R_m$ 、占空比  $D$  有如下关系。

$$R_m = (1 - D)^2 R_0 \quad (3)$$

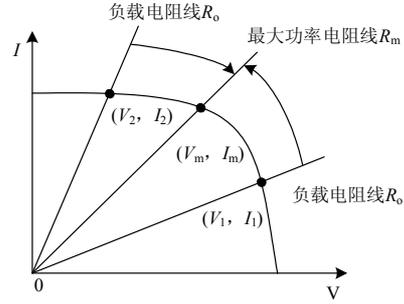


图5 光伏模块负载阻抗特性图  
Fig. 5 Load impedance characteristics figure of photovoltaic module

当负载电阻  $R_0$  小于最大功率点处电阻  $R_m$  时，控制器选择斩波器为 Buck 电路，增大占空比  $D$ ，负载电阻线  $R_0$  逆时针旋转靠近最大功率电阻线  $R_m$ 。当光伏模块工作在最大功率点时，负载电阻  $R_0$ 、最大功率点处电阻  $R_m$ 、占空比  $D$  又有如下关系。

$$R_m = \frac{1}{D^2} R_0 \quad (4)$$

上述过程斩波器由 Boost 和 Buck 电路组合而成，实现升降压作用，根据负载电阻  $R_0$  和最大功率点处电阻  $R_m$  的大小关系，由控制器选择斩波器为 Boost 电路或者 Buck 电路。当然，斩波器也可以采用 Buck-Boost 电路实现其升降压作用，当光伏模块工作在最大功率点时，负载电阻  $R_0$ 、最大功率点处电阻  $R_m$ 、占空比  $D$  有如下关系如式(5)所示。

$$R_m = \left( \frac{1 - D}{D} \right)^2 R_0 \quad (5)$$

当负载电阻  $R_0$  等于最大功率点处的电阻  $R_m$  时，斩波器占空比  $D = 0.5$ ，负载电阻线  $R_0$  即为最大功率电阻线  $R_m$ ；当负载电阻  $R_0$  大于最大功率点处的电阻  $R_m$  时，斩波器工作在 Boost 状态，占空比  $D$  从 0.5 开始增加，负载电阻线  $R_0$  逆时针旋转靠近最大功率电阻线  $R_m$ ；当负载电阻  $R_0$  小于最大功率点处的电阻  $R_m$  时，斩波器工作在 Buck 状态，占空比  $D$  从 0.5 开始减少，负载电阻线  $R_0$  顺时针旋转靠近最大功率电阻线  $R_m$ 。

### 2.2 组串功率优化分析

在光照不均匀工况下，由于旁路二极管的作用，光伏组串和阵列的输出功率特性存在多峰现象。传统的集中式 MPPT 所得到的最大功率其实小于真正峰值功率，只有采用分布式 MPPT 控制，才有可能

得到真正峰值输出。

基于所建光伏模块模型和斩波器模型, 建立组串分布式功率优化结构如图 6 所示。

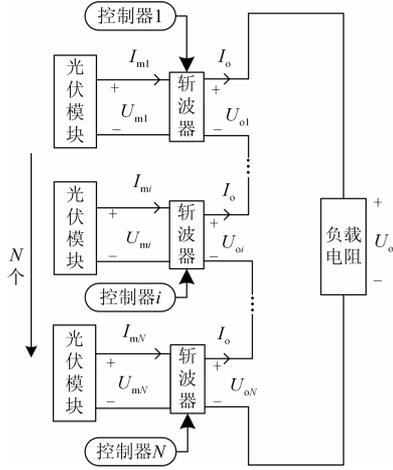


图 6 光伏组串的分布式功率优化拓扑结构示意图  
Fig. 6 Topology diagram of PV string distributed power optimization

光伏组串中的每一个光伏模块都配有一个斩波器(要求具有升降压功能, 其拓扑不局限于图 3(a)、图 3(b), 斩波器的输出端串联后和负载电阻连接, 经各模块分布式控制可实现光伏组串的输出功率等于每个光伏模块的输出功率之和, 下面给出在每个光伏模块工况确定时斩波器类型和占空比  $D$  计算方法。

给定负载电阻  $R_0$ , 每个控制器通过 MPPT 算法得到一个合适的占空比  $D$  控制斩波器中开关管的通断, 使得对应的光伏模块输出最大功率, 从而整个光伏组串的输出功率最大。光伏组串中第  $i$  个光伏模块经 MPPT 控制后斩波器输出电压  $U_{oi}$  与光伏模块输出电压  $U_{mi}$  的关系可用式(6)表达,  $U_{mi}$ 、 $I_{mi}$  分别是光伏模块在最大功率点处的电压、电流。

$$U_{oi} = k_i U_{mi} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (6)$$

$k_i$  的值可由公式(7)确定。

$$k_i = \frac{I_{mi}}{\sqrt{P_o/R_0}} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (7)$$

式中,  $P_o$  是光伏组串的输出功率, 等于每个光伏模块最大输出功率之和, 即  $P_o = \sum_{i=1}^N P_{mi}$ 。

当  $k_i > 1$  时, 即  $U_{oi} > U_{mi}$ , 斩波器采用 Boost 电路, 占空比  $D_i$  的值可由式(8)确定。

$$D_i = 1 - \frac{1}{k_i} \quad (8)$$

当  $k_i < 1$  时, 即  $U_{oi} < U_{mi}$ , 斩波器采用 Buck 电

路, 占空比  $D_i$  的值可由式(9)确定。

$$D_i = k_i \quad (9)$$

当  $k_i = 1$  时, 即  $U_{oi} = U_{mi}$ , 如斩波器采用升压电路, 占空比  $D_i = 0$ ; 如斩波器采用降压电路, 占空比  $D_i = 1$ 。

### 2.3 阵列功率优化分析

对于一个  $M \times N$  结构的光伏阵列, 同样可经各模块分布式控制可实现光伏阵列的输出功率等于每个光伏模块的输出功率之和, 拓扑结构如图 7 所示, 并推导阵列时在每个光伏模块既定工况时对应斩波器类型和占空比  $D$  计算方法, 使得每个模块工作于 MPPT 状态, 同样斩波器需具备升降压功能, 其拓扑不局限于图 3。

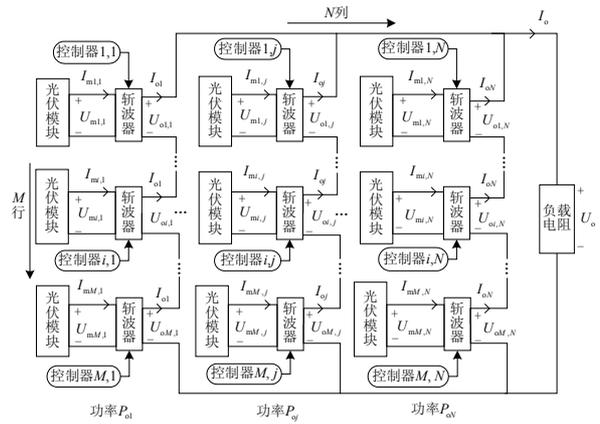


图 7 光伏阵列的分布式功率优化拓扑结构示意图  
Fig. 7 Topology diagram of PV array distributed power optimization

给定负载电阻  $R_0$ , 通过对光伏阵列中每一个光伏模块使用 MPPT 控制器, 使得光伏阵列的输出功率等于每个光伏模块最大输出之和。

光伏阵列中第  $j$  列光伏组串中的第  $i$  个光伏模块经 MPPT 控制后斩波器输出电压  $U_{oi,j}$  与光伏模块输出电压  $U_{mi,j}$  的关系可用式(10)表达,  $U_{mi,j}$ 、 $I_{mi,j}$  分别是光伏模块在最大功率点处的电压、电流。

$$U_{oi,j} = k_{i,j} U_{mi,j} \quad (i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,N) \quad (10)$$

$k_{i,j}$  的值可由式(11)确定。

$$k_{i,j} = \frac{I_{mi,j} \cdot \sqrt{P_o \cdot R_0}}{P_{oj}} \quad (i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,N) \quad (11)$$

式中:  $P_{oj}$  是第  $j$  列光伏组串的输出功率, 等于组串中每个光伏模块最大输出功率之和, 即

$P_{oj} = \sum_{i=1}^M P_{mi,j}$ ;  $P_o$  是整个光伏阵列的输出功率, 等于

每个光伏组串最大输出功率之和, 即  $P_o = \sum_{j=1}^N P_{oj}$ 。

当  $k_{i,j} > 1$  时, 斩波器采用 Boost 电路, 占空比  $D_{i,j}$  的值可由式(8)确定; 当  $k_{i,j} < 1$  时, 斩波器采用 Buck 电路, 占空比  $D_{i,j}$  的值可由式(9)确定。当  $k_{i,j} = 1$  时, 即  $U_{oi,j} = U_{mi,j}$ , 如斩波器采用 Boost 电路, 占空比  $D_{i,j} = 0$ ; 如斩波器采用 Buck 电路, 占空比  $D_{i,j} = 1$ 。

假定负载是定值电阻, 在使用分布式 MPPT 控制时, 可以采用上述机理得到每个光伏模块的获得最大功率时对应的占空比。同样, 当负载电压确定时, 可以根据最大功率和定值电压的关系, 得到一个等效的定值电阻, 即  $R_o = U_o^2 / P_m$ , 仍可利用上述机理进行分布式 MPPT 控制。

综上, 所建光伏模型可以单模块应用, 该单模块可表征单个光伏电池、基本组件(一个旁路二极管)、组件(若干基本组件及旁路二极管)、组串甚至阵列; 也可以多模块应用, 分别连接功率变换器以实现分布式功率优化。针对组串和阵列工况, 给出了分布式优化控制斩波器选择及占空比计算式。

### 3 模型仿真算例分析

本算例中使用的光伏组件由天合光能厂家生产, 型号为 TSM-290 PD14<sup>[18]</sup>, 利用数据处理软件对  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $800\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $400\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $200\ \text{W}/\text{m}^2$  四种光照强度下的  $I-V$  输出特性曲线进行取值, 获得基本组件在相应光照强度下的数据源, 并给出典型参数值如表 1 所示。

表 1 不同光照强度下基本组件的典型参数值

Table1 Typical parameters of basic module under different light intensity

光照强度/ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$V_{oc}/\text{V}$	$I_{sc}/\text{A}$	$V_m/\text{V}$	$I_m/\text{A}$	$P_m/\text{W}$	$R_m/\Omega$
1 000	22.42	8.55	18.44	7.90	145.90	2.33
800	22.17	6.85	18.26	6.32	115.56	2.88
400	21.26	3.43	17.38	3.17	55.22	5.47
200	20.36	1.71	17.16	1.52	26.05	11.30

#### 3.1 光伏单模块应用

利用单模块模型均可以实现不同规模的光伏阵列仿真。以  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $400\ \text{W}/\text{m}^2$  两种光照强度下基本组件的串联为例, 由查表法得到组串的数据源, 其中  $V_{oc} = 43.57\ \text{V}$ ,  $V_m = 18.44\ \text{V}$ ,  $I_m = 7.73\ \text{A}$ ,  $P_m = 142.5\ \text{W}$ ,  $R_m = 2.38\ \Omega$ , 组串的输出特性曲线如图 8 所示。

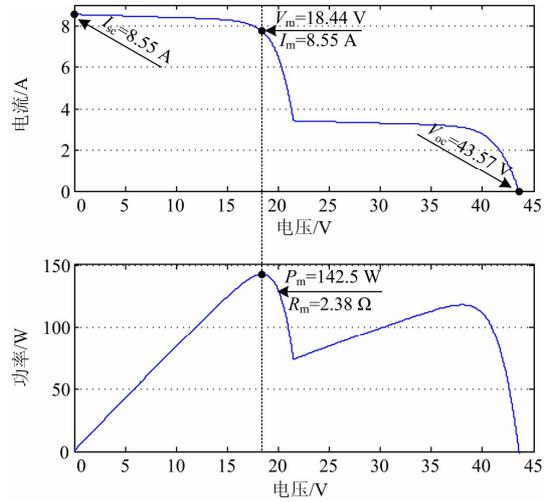


图 8 单模块仿真光伏组串输出特性曲线

Fig. 8 Output characteristic curve of a PV string by use of single module simulation

假设给定负载为  $R_o = 3\ \Omega$ , 可以利用式(3)求得占空比  $D = 0.108$ , 可采用 Boost 斩波器使得该光伏组串发出最大功率为  $142.5\ \text{W}$ 。

#### 3.2 多模块应用—光伏组串的功率优化

通过光伏模块及斩波器的串联可以仿真组串级分布式优化效果, 以  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $800\ \text{W}/\text{m}^2$  两种光照强度下基本组件的串联为例, 数据源参考文献[18]和表 1, 利用查表法建模方式得到组串的输出特性曲线如图 9 所示。

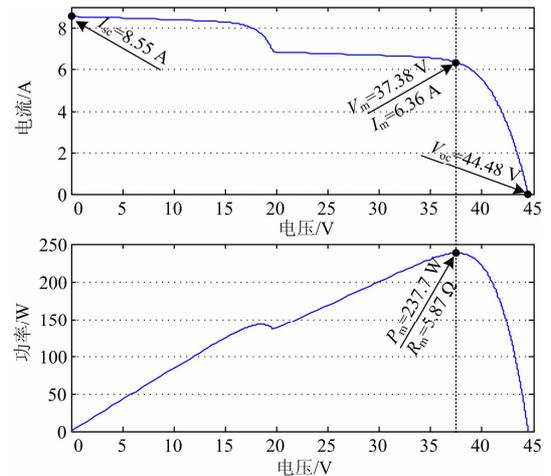


图 9 查表法建模光伏组串输出特性曲线

Fig. 9 Output characteristic curve of a PV string by use of look-up table method simulation

假设光伏组串负载电阻  $R_{load} = 8\ \Omega$ , 如果对整个组串进行集中式 MPPT 控制, 利用式(3), 求得占空比  $D = 0.1434$ , 可以使其输出最大功率  $237.7\ \text{W}$ 。现对组串中的每一个光伏组件进行分布式

MPPT 控制, 利用式(7)、式(8), 可以得到使其输出最大功率的占空比分别为  $D_1 = 0.2764$ ,  $D_2 = 0.0954$ , 表 2 给出两种 MPPT 控制方式光伏组串功率输出对比。

表 2 不同光照强度下光伏组串的典型参数值

集中式 MPPT	分布式 MPPT	功率提高比例
237.7 W	261 W	9.8%

### 3.3 多模块应用—光伏阵列的功率优化

同样, 对于一个光伏阵列, 也可以利用光伏模块进行串并联进行仿真。假设一个  $2 \times 2$  结构的光伏阵列, 组串 1 由  $1000 \text{ W/m}^2$ 、 $400 \text{ W/m}^2$  两种光照强度下的基本组件串联构成, 组串 2 由  $800 \text{ W/m}^2$ 、 $200 \text{ W/m}^2$  两种光照强度下的基本组件串联构成。四个组件的电压电流数据源已知, 利用查表法建模方式可以得到该阵列的输出特性曲线, 如图 10 所示。

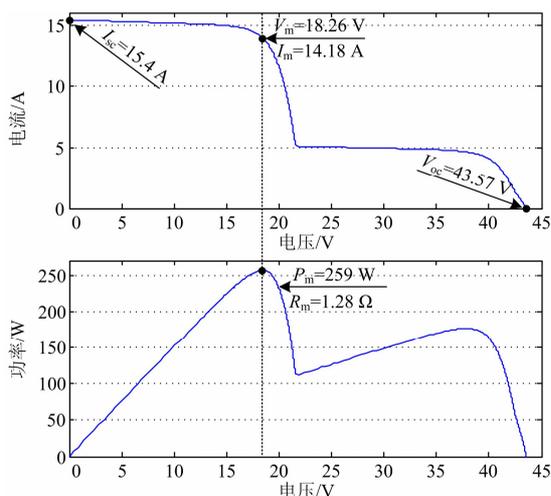


图 10 查表法建模光伏阵列输出特性曲线

Fig. 10 Output characteristic curve of a PV array by use of look-up table method simulation

假设光伏阵列的负载电阻  $R_{load} = 100 \Omega$ , 如果对整个阵列进行集中式 MPPT 控制, 利用式(3)求得占空比  $D = 0.886$ , 可以使其输出最大功率 259 W。现对阵列中的每一个光伏组件进行分布式 MPPT 控制, 利用式(7)、式(8), 可以得到使其输出最大功率的占空比分别为  $D_{1,1} = 0.8627$ 、 $D_{1,2} = 0.6579$ 、 $D_{2,1} = 0.8791$ 、 $D_{2,2} = 0.4961$ , 两种 MPPT 控制方式光伏阵列功率输出对比如表 3 所示。

综上, 使用集中式 MPPT 控制方式得到的最大功率点实际上是假的最大功率点, 采用分布式 MPPT 控制方式, 可以优化光伏阵列的功率输出,

充分发挥光伏阵列的发电潜能。

表 3 不同光照强度下光伏阵列的典型参数值

集中式 MPPT	分布式 MPPT	功率提高比例
259 W	342 W	32%

## 4 结论

光伏模型的建模应用方式主要是计算法和查表法, 计算法需知道输出电压和电流的数学方程, 局限性大, 查表法有灵活的数据获取方式, 可以方便仿真不同规模的光伏模块。对光伏模块进行建模时, 可以根据需要选择合适应用方式。本文对光伏模块建模时存在的问题进行了分析和解决, 实现模型与功率变换器组合电路仿真, 并给出算例, 得到以下结论:

1) 无论使用计算法和数值法建模, 都采用受控源表示光伏模块的输出, 为了保证仿真过程收敛, 系统运行稳定, 需并联假负载, 另外在控制函数中还要对采样输出电压值进行限值, 以免出现计算结果过大, 发生溢出现象。

2) 对单个光伏模块进行 MPPT 控制时, 斩波器选择何种电路, 取决于遮挡工况和负载阻值。当负载电阻大于最大功率点处电阻时, 斩波器选择 Boost 电路; 当负载电阻小于最大功率点处电阻时, 斩波器选择 Buck 电路。

3) 所建光伏模型可以单模块应用, 也可以多模块应用。针对组串和阵列工况, 给出了分布式优化控制斩波器选择及占空比计算式。

4) 通过模型的应用仿真算例, 发现采用集中式 MPPT 得到的光伏阵列最大功率并不是真正的最大功率, 当采用分布式 MPPT, 使得光伏阵列中的每个单元输出最大功率, 可发挥光伏阵列最大输出潜力。

## 参考文献

- [1] 李富国, 孙以泽, 彭乐乐. 太阳电池组件的仿真方法[J]. 可再生能源, 2011, 29(3): 112-114.  
LI Fuguo, SUN Yize, PENG Lele. Simulation methods of photovoltaic array[J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(3): 112-114.
- [2] CHATTERJEE A, KEYHANI A, KAPOOR D. Identification of Photovoltaic Source Models[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 883-889.
- [3] 高志强, 王建曠, 纪延超, 等. 一种快速的光伏最大功率点跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8):

- 105-109.  
GAO Zhiqiang, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. A fast method of maximum power point tracking for PV[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 105-109.
- [4] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 229-234.  
YANG Yongheng, ZHOU Keliang. Photovoltaic cell modeling and MPPT control strategies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 229-234.
- [5] 胡义华, 陈昊, 徐瑞东, 等. 光伏电池板在阴影影响下输出特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 123-128.  
HU Yihua, CHEN Hao, XU Ruidong, et al. PV module characteristics effected by shadow problem[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 123-128.
- [6] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于扰动观察和二次插值的光伏发电最大功率跟踪控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 62-66.  
QIU Peichun, GE Baoming, BI Daqiang. MPPT control for PV power generation system based on P & O algorithms and quadratic interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 62-66.
- [7] 孔祥雨, 徐永海, 曾雅文, 等. 一种求解光伏电池 5 参数模型的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 46-50.  
KONG Xiangyu, XU Yonghai, ZENG Yawen, et al. A parameter extraction method for five-parameter model of photovoltaic cells[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 46-50.
- [8] 王晓雷, 王卫星, 路进升, 等. 光伏阵列特性仿真及其在光伏并网逆变器测试系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 70-73.  
WANG Xiaolei, WANG Weixing, LU Jinsheng, et al. Modeling of PV array characteristic and application in testing system of PV grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 70-73.
- [9] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.  
SU Jianhui, YU Shijie, ZHAO Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412.
- [10] 傅望, 周林, 郭珂, 等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 211-216.  
FU Wang, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Research on engineering analytical model of solar cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 211-216.
- [11] 任海鹏, 郭鑫, 杨彧, 等. 光伏阵列最大功率跟踪变论域模糊控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 13-18.  
REN Haipeng, GUO Xin, YANG Yu, et al. Maximum power point tracking of photovoltaic array using variable universe fuzzy controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 13-18.
- [12] 陈如亮, 崔岩, 李大勇, 等. 光照不均匀情况下光伏组件仿真模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7): 1681-1685.  
CHEN Ruliang, CUI Yan, LI Dayong, et al. Study on simulation model of PV module under non-uniform insolation[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(7): 1681-1685.
- [13] 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.  
QI Jun, ZHANG Xiaofeng, ZHANG Youbing, et al. Study on simulation algorithm of PV array considering shade effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(32): 131-138.
- [14] DING K, BIAN X G, LIU H H, et al. A MATLAB-Simulink-Based PV module model and its application under conditions of nonuniform irradiance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 864-872.
- [15] CHAINTREUIL N, BARRUEL F, PIVERT X L, et al. Effects of shadow on a grid connected PV system[C]// 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2008: 3417-3421.
- [16] 张卫平, 陈亚爱, 关晓菡, 等. 开关变换器的建模与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [17] [http://www.trinasolar.com/HtmlData/downloads/us/products/multi/The\\_Utility\\_Module\\_PD14\\_Datasheet\\_Feb13\\_US\\_EN.pdf](http://www.trinasolar.com/HtmlData/downloads/us/products/multi/The_Utility_Module_PD14_Datasheet_Feb13_US_EN.pdf)
- [18] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 适用不同尺度光伏阵列的数值建模方法[J]. 电力系统及自动化, 2014, 38(16): 35-40.  
SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. The numerical modeling method of PV array at different scales[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 35-40.

收稿日期: 2014-04-11; 修回日期: 2014-07-27

作者简介:

孙航(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电; E-mail: sunhang\_syy@163.com

杜海江(1971-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电; Email: duhaijiang@cau.edu.cn

季迎旭(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电。