

doi: 10.3788/gzxb20164501.0135001

# 自适应遗传算法在光伏发电系统中的应用

胡克用<sup>1,2</sup>, 胥芳<sup>1</sup>, 艾青林<sup>1</sup>, 欧阳静<sup>1</sup>, 徐红伟<sup>1</sup>

(1 浙江工业大学 机械工程学院 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310014)

(2 杭州师范大学钱江学院, 杭州 310018)

**摘 要:**针对光伏阵列在受到阴影遮挡时光伏发电系统总功率大幅下降的问题,采用分布式光伏阵列与光伏逆变器的群控方法,通过开关矩阵将多个光伏阵列与多台光伏逆变器相连,形成灵活多变的光伏发电网络拓扑结构,并根据该网络拓扑结构的工作原理,提出了相应的自适应遗传算法来实现分布式光伏阵列与光伏逆变器之间的群控管理.仿真及实验结果表明,光伏阵列受到阴影遮挡时,该算法使得光能的转换效率明显优于常规典型的分布式光伏发电方式,为有效利用光能提供了思路.

**关键词:**光伏发电;遗传算法;群控;光伏阵列;逆变器

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)01-0135001-9

## Adaptive Genetic Algorithm in the Application of Photovoltaic Power Generation System

HU Ke-yong<sup>1,2</sup>, XU Fang<sup>1</sup>, AI Qing-lin<sup>1</sup>, OU Yang-jing<sup>1</sup>, XU Hong-wei<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of E&M, Ministry of Education&Zhejiang Province, College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

(2 Hangzhou Normal University Qianjiang College, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** For the problem that the total power of photovoltaic power system declines sharply, when the photovoltaic array is affected by the partial shading, the group control method was adopted to connect PV array and inverters by the switch matrix. The flexible topology structure of photovoltaic power generation network was formed. Then, the working principle of topology structure was introduced and the corresponding adaptive genetic algorithm to realize the group management between distributed photovoltaic array and inverters was proposed. The simulation and experiment results show that the conversion efficiency of optical energy used by the algorithm is much better than that of conventional distributed photovoltaic power for the shade of photovoltaic array, and providing a way for the effective use of optical energy.

**Key words:** Photovoltaic power; Genetic algorithm; Group control; Photovoltaic array; Inverter

**OCIS Codes:** 350.6050; 040.1240; 250.1345; 040.1880; 040.5350

## 0 引言

在光伏发电实际过程中,天气的不断变化,特别是云团飘过给地面光伏阵列带来的阴影遮挡,导致光伏发电系统输出功率大大降低<sup>[1-2]</sup>.提高光伏阵列的输出功率,主要有 3 种方式:1)加旁路及防逆流二极管<sup>[3]</sup>,避免局部阴影条件下电池元的热斑效应;2)提出最大

功率点跟踪算法<sup>[4-5]</sup>,避免 P-V 曲线在多峰条件下陷入局部峰值;3)优化光伏阵列的连接关系<sup>[6]</sup>,使各个阵列组合与逆变器之间最佳匹配.针对第 3 种方式,国内外学者提出的优化方案<sup>[7-9]</sup>归纳起来主要有两种方式:1)基于电池元补偿的局部优化方案,这类控制算法及电路实现比较容易,然而,如果光伏阵列大面积受阴影覆盖,补偿的电池元数量可能不够,使得提供补偿的活动

**基金项目:**国家“863 计划”项目(No. 2013AA050405)、国家自然科学基金(No. 51275470)、教育部博士点基金(No. 20123317110004)和 International Science and Technology Cooperation Project (Nos. 2014DFE60020, 2014DFA70980, S2013ZR0609)资助

**第一作者:**胡克用(1978-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为光伏发电技术. Email: hukeyong@yeah.net

**导师(通讯作者):**胥芳(1964-),女,教授,博士,博导,主要研究方向为新能源技术. Email: fangx@zjut.edu.cn

**收稿日期:**2015-10-15; **录用日期:**2015-11-04

<http://www.photon.ac.cn>

电池元与固定电池元之间的数量比例如何进行最佳配置难以确定;2)基于任意组合的全局优化方案,由于组合的任意性,这类控制方法实现起来比较复杂,很多文献只提出了构建阵列的思想,并没有形成系统的全局优化控制算法。

另一方面,对于由许多光伏组件串、并联所构成的光伏阵列群,当阴影遮挡发生时,整个光伏系统的输出功率总是比各自独立输出时的功率之和的小很多;如果让每列串联的光伏组件都单独接一台逆变器,则可以避免这个问题<sup>[10]</sup>。所以在工程应用中会控制光伏组件串、并联的数量,即使是大面积的光伏发电也常采用多台不同功率等级的光伏逆变器,以提高在低光照下的转换效率<sup>[11]</sup>。究其原因是因为光伏逆变器的转换效率与它的输入功率有关,当输入功率比逆变器额定功率小很多时,其转换效率会急速下降<sup>[12]</sup>,从而造成光伏发电系统总的发电效率降低。

鉴于此,本文借鉴工业自动化领域中已成熟运用的开关矩阵控制技术,架构出分布式光伏阵列及逆变器的网络拓扑结构来灵活调整光伏阵列与光伏逆变器之间的组合关系,使光伏阵列的输出功率尽可能接近于光伏逆变器的额定功率;同时,在控制过程中采用自适应的遗传算法来实现多组光伏阵列与多台光伏逆变器之间的群控管理。

## 1 分布式网络架构

### 1.1 典型分布式光伏发电网络

目前分布式光伏发电系统的典型结构如图1<sup>[13]</sup>。图1中典型的分布式光伏发电系统是由 $n$ 组光伏阵列和 $n$ 台并网逆变器构成。为了提升光伏阵列的输出功率,通常需要先将其 $K$ 串光伏组件进行串联,再将 $R$ 组串联后的组件进行并联从而提升光伏阵列的整体功率。然而这种典型的分布式网络拓扑结构由于阵列与阵列之间、阵列与逆变器之间连接关系固定,当遇到阴影遮挡时,很难自由调整最佳的功率匹配。

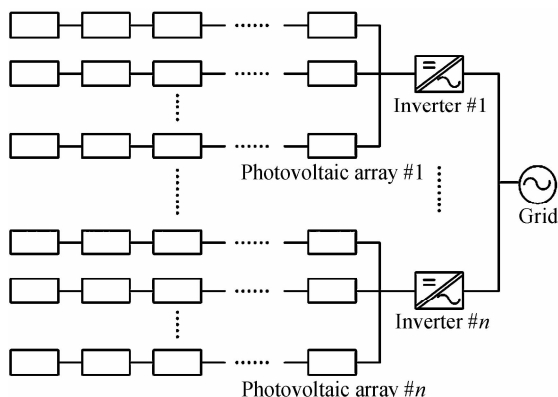


图1 典型分布式光伏发电系统的基本构架

Fig. 1 Basic structure of distributed photovoltaic power generation system

### 1.2 开关网络拓扑

本文研究的分布式开关网络拓扑结构如图2,该网络上连接了 $m$ 组光伏阵列和 $n$ 台逆变器。

图2中光伏阵列由 $PV_1, PV_2, \dots, PV_m$ 构成,不同功率等级的逆变器由 $INV_1, INV_2, \dots, INV_n$ 构成( $m > n$ ),两者之间通过串联和并联开关矩阵相连,串联开关由 $PS_1, PS_2, \dots, PS_m$ 和 $TS_1, TS_2, \dots, TS_m$ 组成, $PS$ 和 $TS$ 的矩阵形式表示为

$$PS = [PS_1, PS_2, \dots, PS_m]_{(m-1) \times m} = \begin{bmatrix} 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \\ 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \end{bmatrix}_{(m-1) \times m} \quad (1)$$

$$TS = [TS_1, TS_2, \dots, TS_m]_{1 \times m} = [0/1, 0/1, \dots, 0/1]_{1 \times m} \quad (2)$$

同时,进一步把 $PS$ 和 $TS$ 组合,就构成了串联开关矩阵 $S$ ,即

$$S = \begin{bmatrix} PS \\ TS \end{bmatrix}_{m \times m} = \begin{bmatrix} 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \\ 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \\ 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (3)$$

串联开关矩阵 $S$ 中的0/1代表了开关的连接状态,“0”表示断开,“1”表示连接。

图2中各组光伏阵列的正负极依次相靠排列,且 $PS$ 的开关个数从阵列 $PV_1 \dots PV_m$ 依次递减。要实现任意光伏阵列的串联组合,只要控制串联开关即可。例如要串联首尾2个光伏阵列,只要将 $PS_1$ 行向量中的最后1个开关接通,同时接通开关 $TS_1$ 和 $TS_m$ 对应的正负极,就可以实现首尾阵列的串接关系。

与此对应,并联开关由 $P_1, P_2, \dots, P_m$ 组成,并联开关 $P$ 的矩阵形式可表示为

$$P = [P_1, P_2, \dots, P_m]_{m \times n} = \begin{bmatrix} 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \\ 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0/1 & 0/1 & \dots & 0/1 \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4)$$

矩阵 $P$ 中的列向量代表不同功率等级逆变器上挂载的光伏阵列,行向量代表光伏阵列与各个光伏逆变器的连接状态,“0”表示断开,“1”表示连接。这样,经过开关矩阵的分布式网络连接之后,光伏阵列 $PV_1, PV_2, \dots, PV_m$ 就可以灵活组合,匹配接入相应功率等级的光伏逆变器,实现群控管理。

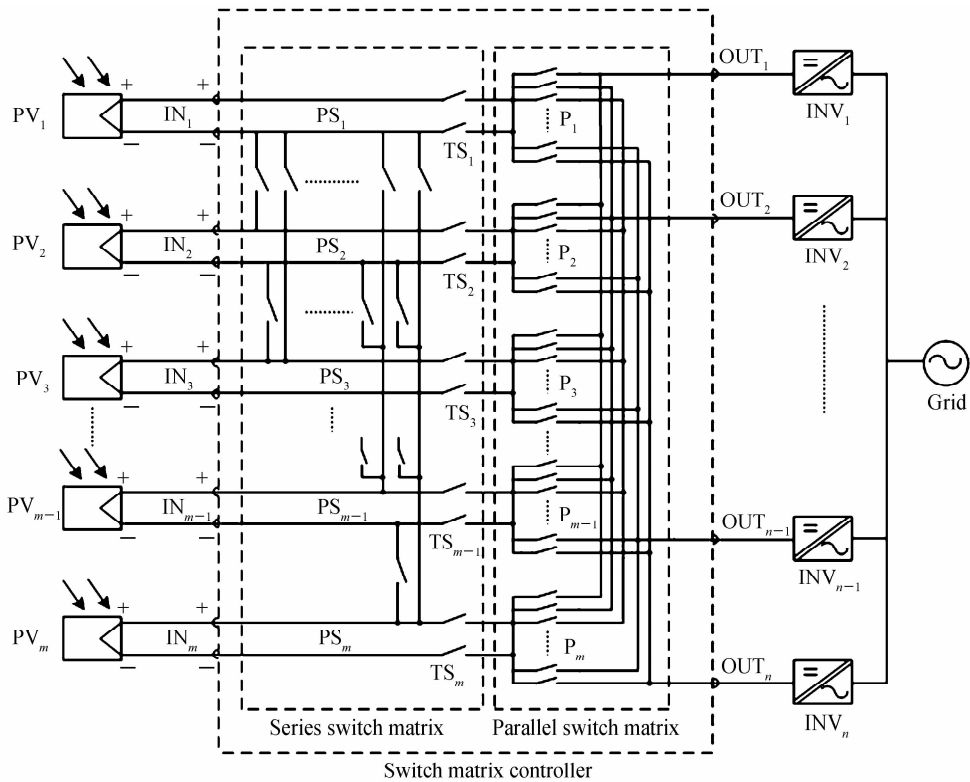


图2 分布式开关拓扑结构

Fig. 2 Distributed switching topology

## 2 自适应遗传算法对开关控制

### 2.1 算法描述

对于含多组光伏阵列与多台光伏逆变器的光伏发电系统群控管理是一个复杂的多约束、非线性的优化问题<sup>[14-15]</sup>,运用传统的优化方案很难获得理想的解决方法.本文采用自适应遗传算法对开关矩阵进行控制,优化光伏发电网络结构,达到功率的合理配置,从而实现分布式光伏阵列与光伏逆变器之间群控管理的目的.

#### 1) 目标函数

网络重构的目标是为了使光伏系统的输出功率最大化,因此算法的目标函数设为

$$\max(P_{out}) = \sum_{i=1}^n (P_{in_i} \cdot \epsilon_i) = \sum_{i=1}^n (\mathbf{PV}_{1 \times m} \cdot \mathbf{S}_{m \times m} \cdot \mathbf{P}_{m \times n}) \cdot \epsilon_{n \times 1} \quad (5)$$

式中, $P_{in_i}$ 表示接入各个逆变器时的光伏输入功率, $\epsilon_i$ 表示各个光伏逆变器的转换效率, $P_{out}$ 表示光伏发电系统的输出功率; $\mathbf{PV}_{1 \times m}$ 表示为m组光伏阵列产生功率的行向量形式, $\epsilon_{n \times 1}$ 表示为n台光伏逆变器转换效率的列向量形式; $\mathbf{S}_{m \times m}$ 、 $\mathbf{P}_{m \times n}$ 分别表示串行和并行开关矩阵向量.

#### 2) 约束条件

经过串、并组合后的光伏阵列接入不同功率等级

的光伏逆变器,必须满足输入电流小于光伏逆变器的额定电流,与此同时输入电压必须在光伏逆变器的额定区间范围之内.

电流限制

$$I_i = \sum_{j=1}^k I_{ij} \leq I_{i \max}, k = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

电压约束

$$V_{i \min} \leq V_i = \sum_{j=1}^k V_{ij} \leq V_{i \max}, k = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中,n台光伏逆变器的最大输入电流表示为 $I_{1 \max}$ ,  $I_{2 \max}, \dots, I_{m \max}$ ,其输入的直流电压范围为 $[V_{1 \min}, V_{1 \max}]$ ,  $[V_{2 \min}, V_{2 \max}] \dots [V_{m \min}, V_{m \max}]$ ;  $I_i$ 表示为第i台光伏逆变器的输入电流,由j组光伏阵列 $I_{ij}$ 并联组合而成; $V_i$ 表示为第i台光伏逆变器的输入电压,由j组光伏阵列 $V_{ij}$ 串联组合而成.

#### 3) 编码

光伏发电网络重构原理的实质就是通过改变开关的状态以改变网络中的拓扑结构,从而达到某种目标最优,编码操作就是遗传算法在搜索之前将解空间的数据阵列成遗传空间的基因型串数据的过程.由于开关在网络关系中起到通断作用,一旦确定由哪几个光伏阵列串、并联组合接入指定的逆变器中,则与之对应的开关必然被选定.因此本文以光伏阵列网络中的开关为基因,对于阵列连接关系中每个开关进行编码,每个开关占据染色体的一位;若某个开关被接通,则在染

染色体中用“1”表示;反之则用“0”表示.网络中每组串、并联开关的状态组合在一起,就形成了一条染色体.在实现过程中,分为串联矩阵编码和并联矩阵编码两种结构.当光伏发电网络由  $m$  组光伏阵列和  $n$  台光伏逆变器构成时,串联编码就由  $m \times m$  矩阵形式组成,并联编码就由  $m \times n$  矩阵形式组成.

4) 旋轮法选择

选择操作采用择优策略,每次按照旋轮法选择执行遗传算法,以适应度函数值  $f(x)$  为标准,适应度函数定义为光伏发电系统输出功率总量,即式(5)所表示的目标函数.选择的概率  $p_u(x_i)$  设为

$$p_u(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=0}^N f(x_i)} \quad (8)$$

式中,  $N$  为种群个体数,产生  $0 \sim 1$  之间的随机数  $q$ ,当  $p_u(x_{i-1}) \leq q$  且  $p_u(x_i) > q$  时,则种群中的第  $i$  个个体才能被选中,将个体信息遗传到下一代群体中.

5) 自适应的交叉和变异

本文采用一种自适应的交叉和变异概率,其操作原理为:交叉率  $P_c$  和变异率  $P_m$  是根据个体的适应度值来自适应地加以改变.当群体有陷入局部最优解的可能趋势时,就自适应提高  $P_c$  和  $P_m$ ,当群体在解空间中发散时,就自适应降低  $P_c$  和  $P_m$ ,从而达到克服过早收敛及加快收敛速度的目的,具体计算公式为

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{P_{c1} - P_{c2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} \cdot (f' - f_{\text{avg}}), & f' \geq f_{\text{avg}} \\ P_{c1}, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} + \frac{P_{m2} - P_{m1}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} \cdot (f_{\max} - f), & f \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m1}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $f_{\max}$  为群体中最大的适应度值,  $f_{\text{avg}}$  为群体的平均适应度值,  $f'$  为要交叉的2个个体中较大的适应度值,

$f$  为要变异个体的适应度值,  $P_{c1}$  及  $P_{c2}$  分别表示交叉率取值的上、下限,  $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$  分别表示变异率取值的上、下限.

6) 终止条件

终止判决条件为保持最优解连续不变的最大迭代 MAX,或满足遗传算法最大迭代次数 MAXGEN.只要满足两个条件中任何一条搜索就结束,具体算法流程图见图 3.

2.2 开关切换的控制

文中采用自适应遗传算法对开关矩阵的切换进行控制,通过开关矩阵的切换来优化各组光伏阵列与各台光伏逆变器之间的连接关系,达到各组光伏阵列输出功率与各台逆变器工作功率之间的合理配置,以解决当光伏阵列上被阴影遮挡时,其输出功率远低于光伏逆变器的额定功率,从而导致光伏发电系统输出总功率下降的问题.

2.2.1 开关切换的条件

算法的启动运行会直接引起开关的切换,同时光伏电池上的输出功率会经常波动<sup>[16]</sup>,为了减少开关的动作次数,也就是说要减少算法不必要的启动(例如光伏面板上日照强度的轻微波动等情况),文中定时设置每隔 10 min,将光伏阵列上的电压电流数据汇聚到群控器,进行算法自适应的启动判别,即

$$\left| \frac{I_i^{k+1} - I_i^k}{I_i^k} \right| \geq \epsilon_1 \quad (11)$$

$$\left| \frac{V_i^{k+1} - V_i^k}{V_i^k} \right| \geq \epsilon_2 \quad (12)$$

式中,  $I_i^k$  和  $V_i^k$  分别表示为第  $k$  次采样第  $i$  块光伏阵列的电流和电压值;  $I_i^{k+1}$  和  $V_i^{k+1}$  分别表示为第  $k+1$  次采样第  $i$  块光伏阵列的电流和电压值;  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  为启动因子,一般情况下  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  取值分别为 0.1 和 0.2,取该数值的原因在于,根据经验光伏电池在均匀光照下  $I_{\text{MPP}}$  (最大功率点电流)和  $V_{\text{MPP}}$  (最大功率点电压)分别出现在大约 90% 的  $I_{\text{SC}}$  (短路电流)和 80% 的  $V_{\text{oc}}$  (开路电压)附近.

当式(11)、(12)条件同时满足时,只是触发了算法准备启动,而要真正达到算法启动,还要等待功率监测系统延迟 60 s 之后,再去获取光伏阵列上的电气参数,当式(11)、(12)条件仍然同时满足,即光伏阵列上的阴影遮挡得到了再次确认之后,这时才真正启动算法开始优化操作,开关矩阵开始切换.这样做的目的是为了减少短时阴影遮挡形成的干扰(例如云团的快速飘过给光伏阵列上形成的阴影遮挡),当光伏阵列上的输出功率变化小于 60 s,就不会启动算法运行,进行开关切换,从而大大减少了开关动作的次数.

2.2.2 开关切换的原理

在工程实践应用中,把算法的遗传优化过程,具体

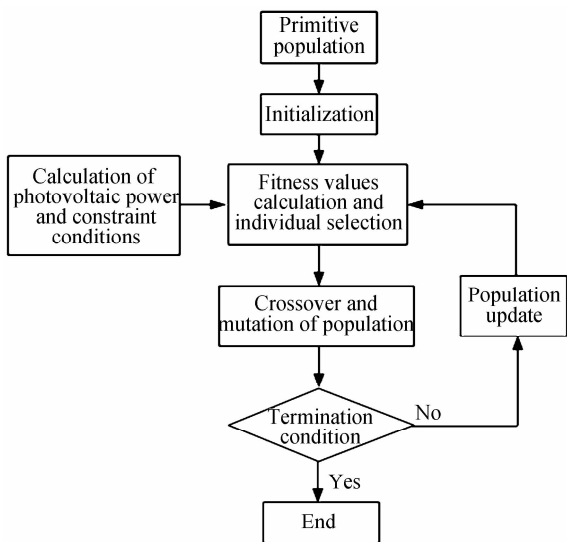


图 3 算法流程图  
Fig. 3 Flow chart of algorithm

分为了图 2 中串联开关矩阵  $S$  与并联开关矩阵  $P$  两种切换控制部分. 通过对串联开关矩阵  $S$  的切换控制来完成光伏阵列的串联关系灵活组合, 通过对并联开关矩阵  $P$  的切换控制来完成光伏阵列的并联关系灵活组合.

当光伏阵列的子串组件进行串联组合时, 其光伏阵列整体的对外输出电流 ( $I_o$ ) 受限于其内部所有子串组件输出电流 ( $I_i$ ) 中的那个最小值, 即

$$I_o = \min(I_i), i = 1, 2, 3 \dots \quad (13)$$

因此, 在算法的遗传优化过程中, 通过串联开关切换, 把输出电流值尽可能接近的子串组件串联在一起形成光伏阵列.

同时, 并联开关的切换是为了实现光伏阵列到逆变器的电气接入, 于是要求并联组合在一起的光伏阵列输出电压 ( $V_i$ ) 相等, 即

$$V_o = V_i, i = 1, 2, 3 \dots \quad (14)$$

并且, 由于并联光伏阵列要接入逆变器, 所以算法的遗传优化过程必须满足, 所有并联在一起的光伏阵列输出电流 ( $I_o$ ) 之和要小于逆变器的最大输入电流 ( $I_{max}$ ), 输出电压 ( $V_o$ ) 要小于逆变器的最大输入电压 ( $V_{max}$ ), 即

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k I_{oi} < I_{max}, k = 1, 2, \dots, m \\ V_o < V_{max} \end{cases} \quad (15)$$

图 4 为群控器控制开关切换及逆变器的框图. 为了保证在开关切换时, 光伏发电系统输出功率不发

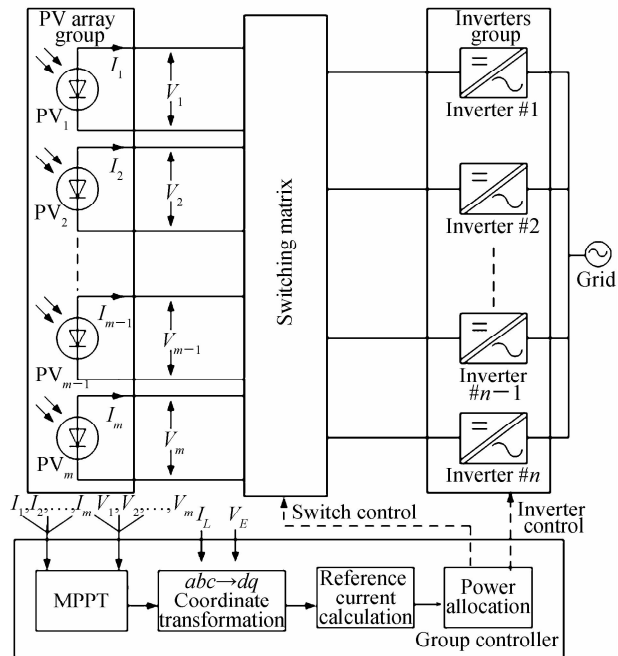


图 4 群控器的控制框图

Fig. 4 Control diagram of group controller

生较大波动, 研究中采用群控器来进行功率跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 以及开关协同切换. 首先, 在并联开关合上之前, 监测开关两侧的电电压电流信息, 由群控器进行 MPPT, 判断哪些逆变器需要投入, 哪些逆变器需要退出. 其次, 将采样的电网电压 ( $V_g$ )、负载电流 ( $I_L$ ) 及 MPPT 的跟踪电流, 经过  $dq$  坐标变换计算出参考电流, 进行功率分配. 最后, 将控制指令发送到开关矩阵以及各台逆变器, 控制开关的切换及逆变器的启停操作.

### 3 算例仿真分析

为了验证分布式的网络拓扑结构及自适应遗传算法对于输出功率优化的有效性, 采用 Matlab 2011b 软件建立了一个约 300 kW 的光伏发电系统, 该发电系统是由 20 个光伏阵列和 6 个不同功率等级的光伏逆变器组成.

光伏阵列模型采用 Canadian Solar CS5P-220M 的电气参数, 在现实的环境中, 20 个光伏阵列由于日照强度、温度等条件不同, 输出的  $P-V$  特性会有一些的差异, 为了模拟这种情况, 可以通过改变光伏阵列的输入参数来加以实现, 20 个光伏阵列输入的气象参数如表 1.

表 1 光伏阵列气象参数

Table 1 Meteorological parameters of PV array

Array number	1	2	3	4	5
Temperature/°C	12.0	12.1	12.2	12.3	8.0
Radiation/W · m <sup>-2</sup>	520	521	522	523	70
Array number	6	7	8	9	10
Temperature/°C	12.5	12.6	12.7	12.8	8.1
Radiation/W · m <sup>-2</sup>	525	526	527	528	71
Array number	11	12	13	14	15
Temperature/°C	13	13.1	13.2	13.3	8.2
Radiation/W · m <sup>-2</sup>	530	531	532	533	72
Array number	16	17	18	19	20
Temperature/°C	13.5	13.6	13.7	13.8	8.3
Radiation/W · m <sup>-2</sup>	535	536	537	538	73

由于光伏阵列所处的区域范围内, 会受到自然环境中的辐射场及温度场的干扰, 为了模拟实际情况, 本文对每一个阵列上的日照强度及温度都设置了一定幅度的波动, 同时对于序号为 5、10、15、20 的阵列进行阴影遮挡模拟.

6 个逆变器模型的电气参数分别选取 100 kW, 80 kW, 50 kW, 30 kW, 20 kW, 10 kW 功率等级, 当所有逆变器全部开启, 则光伏发电系统输出总的功率约为 300 kW, 输入的电气参数如表 2.

表 2 不同规格的逆变器电气参数

Table 2 Electrical parameters of different inverters

Number	Rated power /kW	Maximum input voltage/V	Minimum input voltage/V	Maximum input current/A
1	100	880	220	250
2	80	880	220	200
3	50	450	220	150
4	30	450	220	130
5	20	450	220	100
6	10	450	220	50

第 1 步先采用图 1 典型的分布式发电拓扑结构来仿真光伏发电系统的出力情况,仿真结果如图 5。由图 5 可以看出,20 个光伏阵列被分成 6 组并接入 6 个逆变器,由于光伏阵列上存在阴影遮挡,部分 P-V 曲线上呈现出多峰状态,取其最大功率点  $PV_1 = 49 \text{ kW}$ ,  $PV_2 = 38 \text{ kW}$ ,  $PV_3 = 34 \text{ kW}$ ,  $PV_4 = 31 \text{ kW}$ ,  $PV_5 = 28 \text{ kW}$ ,  $PV_6 = 17 \text{ kW}$ ,分别作为 6 个逆变器的输入功率;对比表 2 中的逆变器的电气参数,由于部分输入功率与其额定功率相差较大,故而光伏逆变器总体的转换效率较低。

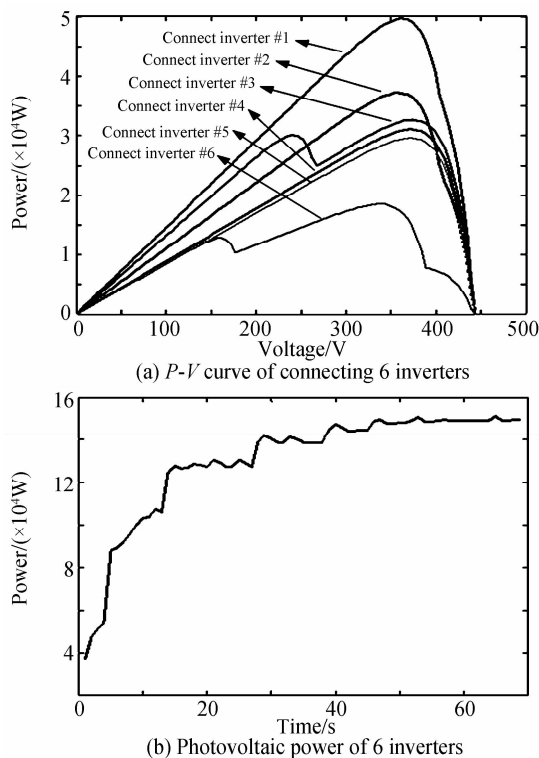


图 5 控制前的光伏发电状况

Fig. 5 PV power generation status before group control

此时 6 个光伏逆变器总的输入功率为  $PV_1 + PV_2 + PV_3 + PV_4 + PV_5 + PV_6 = 197 \text{ kW}$ ,经过逆变器的 DC-AC 转换之后输出功率为  $150 \text{ kW}$ ,光伏逆变器的转换效率为

$$\frac{150}{197} \times 100\% = 76\% \quad (16)$$

第 2 步在同样的仿真环境下,采用图 2 所示的分布式开关拓扑结构及自适应遗传算法控制来模拟光伏发电系统的出力情况,仿真结果如图 6。此时光伏阵列经重新组合分成 5 组,分别对应挂接到逆变器 1~5,而逆变器 6 被关停。由图 6 的 P-V 曲线看出,这时  $PV_1 = 73 \text{ kW}$ ,  $PV_2 = 57 \text{ kW}$ ,  $PV_3 = 29 \text{ kW}$ ,  $PV_4 = 22 \text{ kW}$ ,  $PV_5 = 16 \text{ kW}$ ,对比表 2 中逆变器的电气参数,此刻的逆变器输入功率比较接近于其额定功率,故而光伏逆变器总体的转换效率得到迅速提高。

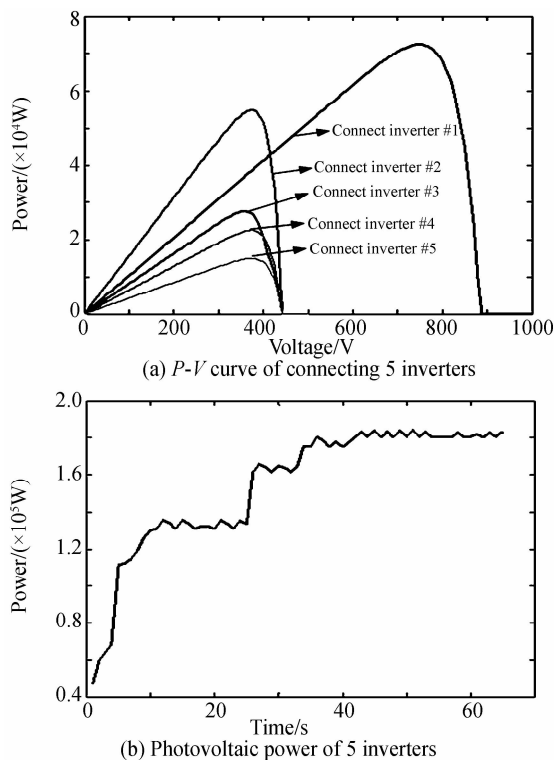


图 6 控制后的光伏发电状况

Fig. 6 PV power generation status after group control

此时 5 个光伏逆变器的输入功率为  $PV_1 + PV_2 + PV_3 + PV_4 + PV_5 = 197 \text{ kW}$ ,经过逆变器的 DC-AC 转换之后输出功率为  $182 \text{ kW}$ ,光伏逆变器的转换效率为

$$\frac{182}{197} \times 100\% = 92\% \quad (17)$$

经过分布式光伏阵列及光伏逆变器在群控前后 2 次对比,在相同阴影遮挡环境下,光伏逆变器的转换效率提高了 21%,大大提升了在多变外界环境下的光伏能源利用率,控制前后的数据变化情况如表 3。

另一方面,从图 5、6 中光伏阵列的输出特性曲线上看,控制之前由于阴影遮挡,当未被遮荫的与被遮荫的光伏组件经串联组合在一起,因日照强度的不同而导致输出电压产生多峰,从而造成光伏阵列整体的输出功率产生多个峰值点<sup>[17]</sup>。所以接入逆变器 3 和逆变器 6 的光伏阵列 P-V 曲线出现了多个功率峰值,这样会造成光伏最大功率跟踪 (MPPT) 过程变得复杂<sup>[18]</sup>,极大增加了处理器的计算开销;而控制之后由于光伏

阵列经过了重新组合,大大减少了被遮荫的光伏组件与其他未被遮荫组件的组合,所以其输出特性更接近于理想状态,减少了多峰的数量,这让光伏系统更容易追踪到最大功率点,降低了最大功率跟踪易陷入局部峰值的可能性。

表 3 控制前后的逆变器变化对比

Table 3 Changes of inverters before and after group control

Inverter number	Before control			After control		
	Input power/kW	Switch status	Output power/kW	Input power/kW	Switch status	Output power/kW
1	49	On		73	On	
2	38	On		57	On	
3	34	On	150	29	On	182
4	31	On		22	On	
5	28	On		16	On	
6	17	On		0	Off	

## 4 实验验证与分析

为了保证算法的实际可行性,研究中搭建了一套小功率光伏发电跟踪实验平台,装置连接关系如图 7。

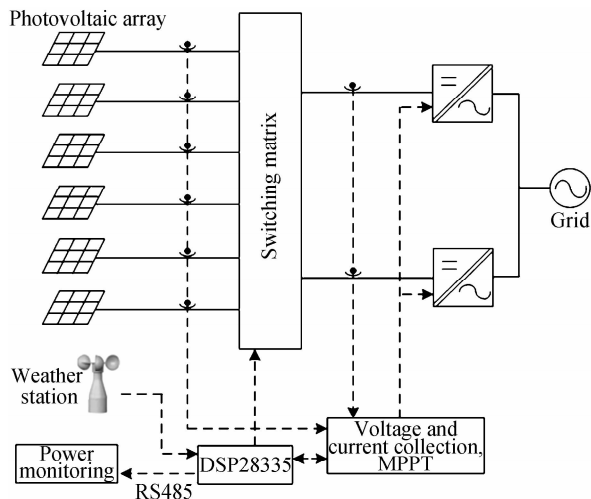


图 7 实验平台示意图

Fig. 7 Sketch map of experimental platform

该实验平台的硬件环境由 6 块 100W 的光伏电池板(输出电压 18VDC)、200W/400W 光伏逆变器各 1 个(输入电压范围 15-60VDC,输出电压 220VAC/50Hz)、MPPT 控制电路、继电器开关矩阵、DSP28335 控制板、上位机监测器构成;软件集成环境由 DSP 自带的 CCS4 开发软件和基于 VC++ 编写的功率监测控件构成,软硬件之间的通信联系采用 RS485 串口。

由于光伏组件与一个规模光伏阵列具有类似的结构特性,受实验条件限制,研究中采用 6 块 100 W 的光伏组件来模拟光伏阵列的组合,通过手动遮挡光伏组件中部分单元的方式,来模拟光伏阵列被遮挡的状态。当实验环境搭建完毕之后,写入自适应遗传算法给 DSP28335,使 DSP28335 采用该算法进行阵列的串并

联优化组合,然后由 RS485 串口来实时采集输出的功率数据,传输至上位机进行动态绘图,从而得到在阴影遮挡环境下光伏发电系统的功率变化曲线,如图 8。

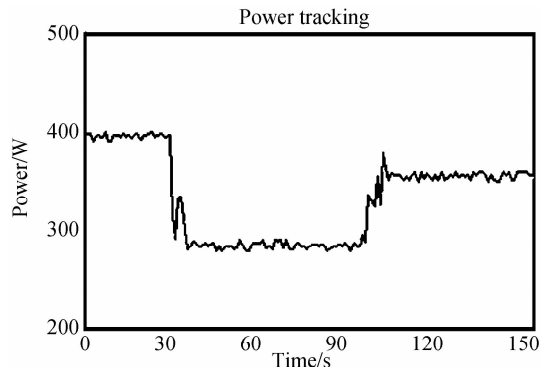


图 8 功率跟踪曲线

Fig. 8 Power tracking curve

从图 8 中可以看出,刚开始前 30 s 采用图 1 典型的分布式发电结构,电气连接关系是固定的:2 块 100 W 的光伏电池连接 200 W 的光伏逆变器,4 块 100 W 的光伏电池连接 400 W 的光伏逆变器,光伏发电系统输出功率 395 W;在功率监控运行 32 s 时,采用人工方式进行了阴影遮挡,这时光伏系统的输出功率瞬间跌落到 286 W,已满足了算法启动运行的条件,但为了避免开关的频繁切换,例如云团的快速飘过,就没有必要启动算法的运行,因此算法经过约 60 s 的延迟之后,进行了再次确认,肯定了光伏电池上阴影遮挡的长期存在,接下来才启动自适应遗传算法进行阵列的组合优化,程序大约又运行了 10 s 之后优化完成,此时光伏发电系统的输出功率提升至 351 W,输出功率增幅为

$$\frac{351-286}{286} \times 100\% = 23\% \quad (18)$$

图 9、10 为实验中 200 W 及 400 W 光伏逆变器输出的电压电流波形。

图 9 为 2 个光伏逆变器在群控前后的电压变化情况,算法运行之后,由于及时关闭了 200 W 的光伏逆变器,使得其输出电压变为 0,此时 400 W 光伏逆变器的输出电压幅度及频率仍然维持稳定。

图 10 为 2 个光伏逆变器在群控前后的电流变化情况,算法运行之后,由于及时关闭了 200 W 的光伏逆变器,所有光伏电池产生的功率集中输向了 400 W 的光伏逆变器,使得它的输出电流幅度明显提高,此时电流频率仍然维持稳定。

综上所述,本文研究的分布式拓扑结构及自适应遗传算法,在光伏阵列遇到阴影遮挡环境下,对于光伏发电出力提升的效果较为明显。在群控期间,会自动调节光伏阵列与逆变器功率之间的优化匹配。此控制方法的可行性在小功率光伏发电试验中得到验证,证明可以推广至一般的光伏发电网络。

伏逆变器相连,形成分布式光伏阵列及逆变器的拓扑网络结构,并提出相应的自适应遗传算法,来实现光伏发电网络的群控管理.该控制方法在当光伏阵列遇到阴影遮挡时,可以有效提高光伏发电系统的输出功率.

#### 参考文献

- [1] XIAO Wen-bo, HU Fang-yu, DAI Jin. Establishment and research of a photovoltaic module performance prediction model under different operating conditions [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11):1125002.
- [2] 肖文波, 胡方雨, 戴锦. 全工况下光伏组件输出特性的预测建模与研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(11):1125002.
- [3] RENAUDINEAU H, HOUARI A, MARTIN J P, *et al.* A new approach in tracking maximum power under partially shaded conditions with consideration of converter losses[J]. *Solar Energy*, 2011, **85**(11): 2580-2588.
- [4] ACCIARI G, GRACI D, LA SCALA A. Higher PV module efficiency by a novel CBS bypass[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, **26**(5): 1333-1336.
- [5] HSIEH G C, HSIEH H I, TSAI C Y, *et al.* Photovoltaic Power-Increment-Aided Incremental-Conductance MPPT With Two-Phased Tracking [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, **28**(6): 2895-2911.
- [6] KUMARI J S, BABU D C S, BABU A K. Design and analysis of P&O and IP&O MPPT technique for photovoltaic system [J]. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2012, **2**(4): 2174-2180.
- [7] MAKI 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 Transactions on Energy Conversion*, 2012, **27**(1): 173-183.
- [8] BASTIDAS-RODRIGUEZ J D, RAMOS-PAJA C A, SAAVEDRA-MONTES A J. Reconfiguration analysis of photovoltaic arrays based on parameters estimation [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2013, **35**(6): 50-68.
- [9] WILSON P R, STOREY J, BAGNALL D M. Improved optimization strategy for irradiance equalization in dynamic photovoltaic arrays [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, (6), 2946-2956.
- [10] ALAHMAD M, CHAABAN M A, SHI J, *et al.* An adaptive utility interactive photovoltaic system based on a flexible switch matrix to optimize performance in real-time[J]. *Solar Energy*, 2012, **86**(3): 951-963.
- [11] SCHIMPF F, NORUM L E. Grid connected converters for photovoltaic, state of the art, ideas for improvement of transformerless inverters[C]//Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE/2008), June 9-11, 2008, Espoo, Finland. Helsinki University of Technology, 2008.
- [12] ZHAO Zheng-ming, LEI Yi, HE Fan-bo, *et al.* Overview of Large-scale Grid-connected Photovoltaic Power Plants[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, **35**(12): 101-107.
- [13] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. *电力系统自动化*, 2011, **35**(12):101-107.
- [14] ISHIKAWA T. Grid-connected photovoltaic power systems: survey of inverter and related protection equipments[R]. Report IEA-PVPS T5-05, 2002.
- [15] WANG Zhen, LU Zong-xiang, DUAN Xiao-bo, *et al.* Reliability model and indices of distributed photovoltaic power

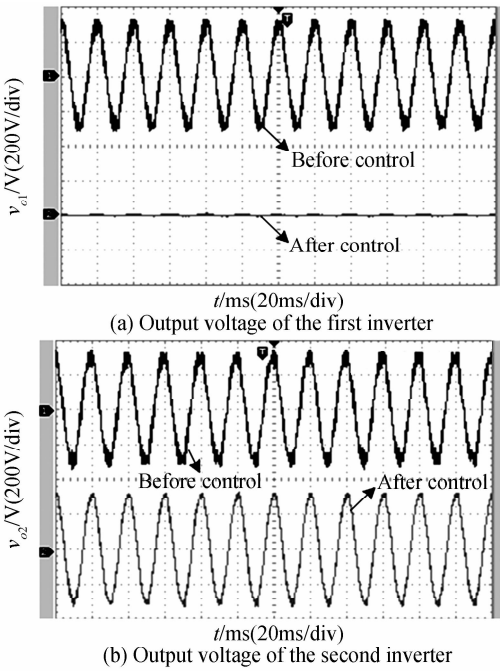


图9 群控前后逆变器输出电压波形

Fig.9 Output voltage waveform of inverters before and after group control

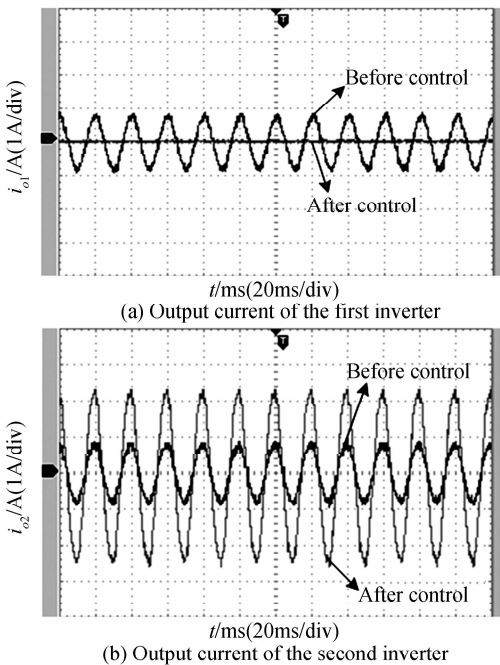


图10 群控前后逆变器输出电流波形

Fig.10 Output current waveform of inverters before and after group control

## 5 结论

阴影遮挡是在光伏阵列上经常发生的现象,在这种不均匀光照的条件下,会产生光伏发电输出功率急剧下降的问题.针对此类问题,本文设计了一套光伏发电网络的群控系统,采用工业自动化领域中已经成熟可靠的开关矩阵控制技术,将多个光伏阵列与多台光



- system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, **35**(15):18-24.
- 王震,鲁宗相,段晓波,等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系[J]. *电力系统自动化*, 2011, **35**(15):18-24.
- [14] CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, CAI Tao, *et al.* Microgrid energy management model based on improved genetic arithmetic [ J ]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, **28**(4): 196-201.
- 陈昌松,段善旭,蔡涛,等. 基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J]. *电工技术学报*, 2013, **28**(4): 196-201.
- [15] BOLOGNANI S, ZAMPIERI S. A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrids [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, **58**(11): 2818-2833.
- [16] ZHOU Jian, LI Hong-fei, LIU Yu-cheng, *et al.* A comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic module under natural environment [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9):1077-1082.
- 周健,李红飞,刘毓成,等. 基于改进型双二极管模型的户外模组电量预测技术研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(9):1077-1082.
- [17] KOUTROULIS E, BLAABJERG F. A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2012, **2**(2):184-190.
- [18] JIAN Xian-zhong, WEI Kai, GUO Qiang. Artificial bee swarm algorithm in the application of photovoltaic cell five-parameter double-diode model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1):0125001.
- 简献忠,魏凯,郭强. 蜂群算法在光伏电池双二极管五参数模型中的应用[J]. *光子学报*, 2015, **44**(1):0125001.