

DOI: 10.7667/PSPC161335

基于自适应可控开关矩阵的光伏阵列优化配置策略

王秀云, 田璧源

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对光伏阵列在阴影或者组件故障情况下引起效率降低的问题, 基于自适应粒子群优化算法(SA-PSO)提出将最大功率点跟踪与开关矩阵相结合的控制策略。同时给出了该算法的重启与终止条件, 避免了开关的频繁使用与系统趋于稳定时的功率振荡。首先对算法的重启条件进行判断, 如果是非自然重启, 需要通过优化算法对异常情况下的最优模块阵列连接方案进行识别。然后利用可控开关矩阵实时优化光伏阵列配置方式。最后通过仿真验证了该方法在遮阴或故障情况下均可以快速准确地跟踪到全局最优 MPP, 有效提高光伏阵列的输出功率。

关键词: 光伏系统; 局部遮阴; 可控开关矩阵; 最大功率点跟踪(MPPT); 自适应粒子群

Optimal configuration strategy of photovoltaic arrays based on adaptive and controllable switching matrix

WANG Xiuyun, TIAN Biyuan

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: According to the problem of lower efficiency of PV array in shadow or component fault conditions, based on the adaptive particle swarm optimization algorithm (SA-PSO), this paper proposes a control strategy which combines maximum power point tracking and switch matrix, and gives restart and termination conditions of the algorithm to avoid the frequent use of switch and power swing when the system tends toward stability. First, the restart condition of the algorithm is judged, if it is an unnatural restart, it needs to recognize optimal module array connection scheme under the abnormal situation by using optimization algorithm. And then it uses controllable switch matrix array to real-time optimize photovoltaic array configuration mode. Finally, simulation results verify that the proposed method can quickly and accurately track the global optimum MPP in the shade or fault conditions, and effectively improve the output power of photovoltaic array.

Key words: photovoltaic system; partial shade; controllable switch matrix; maximum power point tracking (MPPT); self-adaptive particle swarm

0 引言

在当今众多的可再生能源中, 太阳能因其分布广泛、易于获得和清洁环保等优点, 使得对太阳能的研究与应用备受关注^[1]。然而, 光伏阵列的发电性能易受到不均匀光照强度的影响, 当浮云、建筑、树木和杆塔等的投影在光伏组件上形成局部阴影遮挡时, 由于组件接收到的辐照度不均匀, 将因失配而造成功率损耗, 甚至对光伏组件造成损坏^[2-3]。因此, 针对如何降低以上不确定因素的影响, 国内外研究人员针对如何提高遮阴及故障情况下光伏阵

列输出功率进行了长时间细致的研究, 以下为几种常见的提高光伏系统输出功率的方法。

(1) 加旁路二极管和阻塞二极管

通常将旁路二极管并联在电池元两端, 避免电池表面接收到的辐照度不一致时引起的热斑效应。而在一串光伏组件的一端串联防逆流二极管, 作用是避免被遮挡的组件中流过反向电流。研究表明, 遮阴或故障情况下, 光伏阵列采用不同的旁路二极管配置方式可以有效降低功率损耗^[4-5]。

(2) 最大功率点跟踪

当光伏阵列受到阴影遮挡或组件故障影响时, 由于旁路二极管和防逆流二极管的加入, 使得系统输出 P-V 特性曲线呈现多峰现象^[6]。然而, 传统的 MPPT 方法, 例如: 恒定电压法、爬山法和电导增

量法等对 P-V 单峰曲线具有良好的跟踪效果，而对多峰 P-V 曲线的跟踪容易受到局部极值的干扰。针对该问题，学者们提出了一些适用于多峰 P-V 曲线的最大功率点跟踪方法。文献[7]提出的基于神经网络的 MPPT 方法对于环境有较好的适应性；因为 MPPT 的本质是寻优问题，可以通过进化算法来实现，而 PSO 算法在非线形曲线寻优上表现良好，因此该寻优算法被很多学者用于多峰状态下的 MPPT 研究^[8]；此外，文献[9]中提出了交流模块概念，将每一行并联的光伏组件与 DC-AC 逆变器集成在一起，实现每行光伏组件的 MPPT 独立控制，该模型的拓扑结构如图 1 所示。

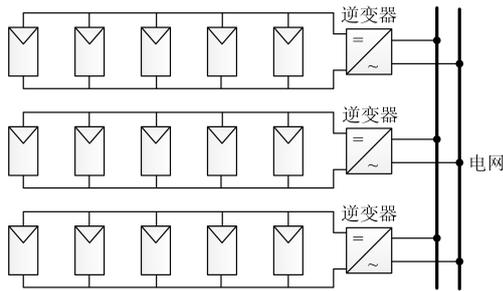


图 1 文献[9]中的光伏阵列拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of photovoltaic array in [9]

(3) 光伏阵列的优化控制策略

传统光伏阵列的配置方式是固定的，不同阵列拓扑结构导致阴影分布也呈现出不同特点。因此，对光伏系统进行组态优化，实时优化光伏阵列的配置方式，可以有效降低因失配而造成的损耗。文献[10]中提出将光伏阵列划分为两个部分：固定部分和可调整部分，两者之间通过可控开关矩阵连接，如图 2 所示。当固定部分中有模块被遮蔽时，可以通过开关矩阵将可调部分中的模块进行并联，降低阴影对整体发电系统的影响。在正常和阴影条件下的模块连接方案分别如图 3 中的(a)、(b)所示。虽然开关矩阵实现了拓扑结构的智能控制，但这种结构的缺点在于：补偿阵列增加了额外成本，并且需要大量的电压、电流传感器以及连接开关将可调整部分连接到固定部分。文献[11]中提出使用多个 DC-AC 逆变器代替单一的 DC-AC 逆变器，降低因局部遮阴或者个别 PV 模块故障给系统输出功率带来的影响。虽然这种方法有效地提高了整体的功率输出，但 DC-AC 逆变器的数量将导致设备成本的增加。文献[12]认为当遮阴或故障发生时，通过开关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，使得每条支路都能工作在 MPP 处。

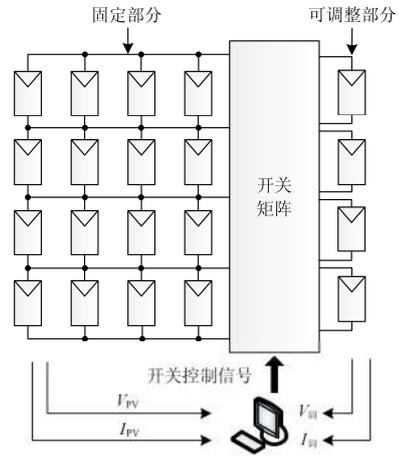
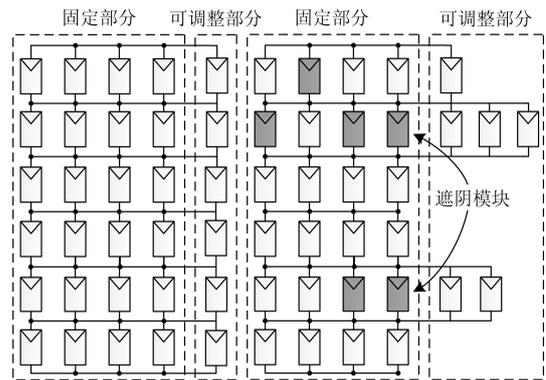


图 2 文献[10]中的光伏阵列拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of photovoltaic array in [10]



(a) 正常情况下的连接方案 (b) 有局部遮阴情况下的连接方案

图 3 正常和阴影条件下的连接方案对比

Fig. 3 Connection scheme comparison under normal and shadow conditions

本文首先对几种典型的光伏阵列优化控制策略进行介绍，总结其优缺点。然后通过仿真分析了局部阴影对采用不同拓扑结构光伏阵列的输出 P-V 特性曲线进行对比分析。最后提出了基于自适应可控开关矩阵的光伏阵列组态优化方法，通过微型 PSO 控制器实现不同遮阴情况下的最优配置，提高遮阴或故障情况下系统的输出功率。

1 光伏阵列拓扑结构

常见的三种光伏阵列的拓扑结构为串并联结构(SP)、桥式结构(BL)和网状结构(TCT)，如图 4 所示。

(1) 串并联(SP)阵列：所有的光伏组件都是先串联，然后再并联，如图 4(a)所示。SP 是运用最广泛的连接方式，其优点是结构简单。当发生局部遮挡时，由于被遮挡组件流过电流减小，使系统输出功率明显降低。

(2) 桥式(BL)阵列: BL 结构与 TCT 类似, 只是减少了并联导线的使用数量, 如图 4(b)所示。当阵列中出现局部遮挡时, 相邻组件也将受到影响, 降低了整体的电压和电流输出。

(3) 网状(TCT)阵列: 所有光伏组件先并联, 然后再串联, 如图 4(c)所示。TCT 结构的优点是降低被遮挡组件对整个阵列的影响, 但增加导线的同时也增加了导线上的损耗。通过减小被遮挡组件中的电流, 使其工作在正向偏压区, 可以获得该组件输出的一部分功率。

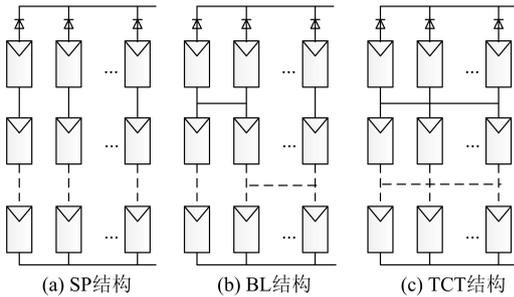


图 4 三种传统的光伏阵列拓扑结构

Fig. 4 Three traditional topological structures of photovoltaic arrays

如图 5 所示, 分别对采用三种结构的 $\{3 \times 2\}$ 阵列进行仿真实验, 分析相同遮阴条件下 3 种配置方式之间的性能差异。正常情况下 6 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 6 所示。

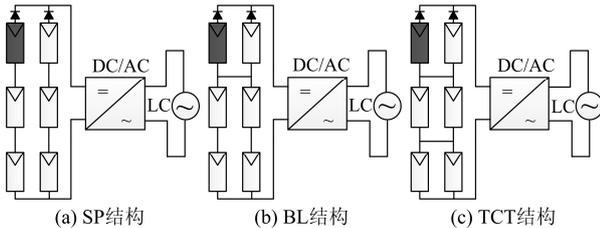


图 5 三种拓扑结构下失配示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mismatch under three topologies

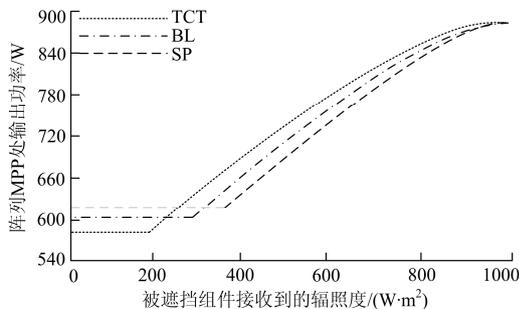


图 6 三种拓扑结构最大输出功率对比

Fig. 6 Maximum output power comparison of three topologies

从图 6 中可以看出, 当被遮挡组件接收到的辐照度在 $400 \sim 1000 W/m^2$ 时, 三种结构输出功率的大小关系为 $TCT > BL > SP$ 。而小于 $400 W/m^2$ 时, 大小关系为 $SP > BL > TCT$ 。从仿真分析的结果可以看出, 不同的阴影情况应采用对应的配置方式, 才能最大程度地提高功率输出。因此, 本文提出了一种优化控制策略, 当阴影或故障发生时, 通过开关矩阵动态改变光伏阵列配置方式, 以提高光伏组件阵列的功率输出。图 7 为光伏阵列优化配置连接方案, 当阵列中有阴影或 PV 模块发生故障时, 控制系统激活开关矩阵, 通过粒子群优化算法(PSO)获得优化配置策略, 控制阵列中开关的闭合与断开, 以增加整个系统的输出功率。

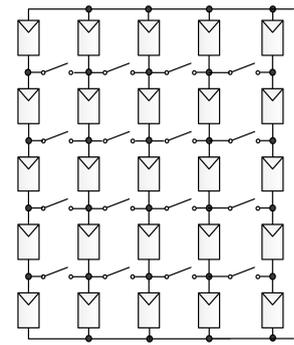


图 7 提出的光伏组件阵列配置方式

Fig. 7 The proposed connection scheme for a PV module array

2 自适应粒子群算法在 MPPT 控制的应用

2.1 SA-PSO 原理

PSO 算法是一种可以有效对多极值函数进行全局优化的方法, 通过群体中粒子间的合作与竞争来获得优化的搜索路径。在 MPPT 应用中, 粒子在每一次迭代中通过两个最优值来更新自己的工作电压和步长, 一个是粒子本身从开始至当前时刻为止找到的工作电压最优值 (P_{best}), 另一个是所有粒子目前为止找到的全局最优值 (G_{best}), 这样, 通过搜索过程中粒子间工作点电压值的相互对比, 使粒子工作电压不断迭代更新, 寻找全局最大功率点电压。第 $t+1$ 次迭代时第 i 个粒子的速度 v_i^{t+1} 和位置 s_i^{t+1} 的更新方程^[13]分别如式(1)和式(2)所示。

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(P_{best} - s_i^t) + c_2r_2(G_{best} - s_i^t) \quad (1)$$

$$s_i^{t+1} = s_i^t + v_i^{t+1} \quad (2)$$

式中: t 为迭代次数; v 为粒子的速度; c_1 、 c_2 为学习因子, c_1 是“自身认知”部分, c_2 是“社会认知”部分; r_1 、 r_2 服从 $[0, 1]$ 的均匀随机数值。

自适应粒子群算法(SA-PSO)是在粒子群算法的基础上加入了自适应调节策略。更新方程(1)中的

惯性权重 ω 取值对 PSO 算法的寻优性能有着很重要的影响。因此, 本文通过自适应调节惯性权重 ω 来更新迭代过程中的权重值, ω 的计算公式如式(3)所示。

$$\omega = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \exp\left(-\left(\tau \times \frac{cur}{Loop}\right)^2\right) + \omega_{\min} \quad (3)$$

式中: cur 为当前迭代次数; $Loop$ 为最大迭代次数; τ 为经验系数。由于 ω 与 cur 的函数关系式中含有负指数部分, 在迭代初期 cur 取值较小, 因而惯性权重 ω 值较大, 此时粒子的速度和位置在整个区域范围内更新; 而在迭代后期, 由于 cur 取值较大, ω 值反而较小, 此时粒子的速度和位置在小范围内更新。因此, 自适应调节策略可以增强粒子群算法在全局搜索与局部搜索之间的协调性。

2.2 SA-PSO 算法在多峰 MPPT 中的应用

(1) 参数初始化

采用粒子群算法对光伏系统进行 MPPT 的过程中, 选取的目标函数值即是光伏阵列输出功率。在算法运行之前, 要对一系列参数进行初始化, 比如粒子的个数、工作电压值、迭代公式中的系数以及最大电压波动值等。按照文献[14], 以 $\{m \times n\}$ 阵列为例, 最多可能有 $n+1$ 个极值点, 因此需要的粒子数为 $n+1$ 个, 粒子工作电压值为 U_1, U_2, \dots, U_N 。为了不丢失极值点, 粒子的初始位置根据 $0.7U_{oc_module} + (n-1)0.8U_{oc_module}$ 确定, 令 Boost 开关管的占空比 $D=0$, 可得 U_{oc_array} 的值, 而 $U_{oc_module} = U_{oc_array} / n$, 粒子点电压搜索范围在 0 与 U_{oc_array} 之间。 ω 由于可以平衡 PSO 算法在全局及局部的搜索能力, 一般在 $(0, 1)$ 取值, 学习因子 c_1 、 c_2 一般在 $(0, 2)$ 取值。

(2) 算法终止策略

由于粒子的初始位置是分散的, 随着迭代次数的增加极值点附近的粒子会十分密集。为了避免因多次迭代而造成的功率长时间波动, 减轻系统趋于稳态时的功率振荡, 本文采取的终止策略为: 当粒子之间的最大电压之差小于 $5\%U_{oc_array}$ 时, 停止迭代, 选取粒子中功率数值最大为 P_m , 其对应的电压为 U_m 。

(3) 重启条件

当出现遮阴、故障或组件表面接收到的辐照度发生改变时, 系统输出的 P-V 特性曲线也随之发生变化, 因此需要重启 PSO 算法, 使得系统稳定工作在新的 MPP 处。

因此, 本文设置两个重启条件: 一是针对辐照度的变化设置自然重启条件, 通过监测发现稳定自然条件下太阳辐照度每分钟变化不大于 20 W/m^2 , 由于不同类型的光伏组件效率不同, 对应的输出功

率变化量 ΔP 的值大概在 0.015 左右。因此, 设定该重启条件为每 1 min 启动一次。功率变化量 ΔP 的计算公式如式(4)所示。

$$\Delta P = \frac{|P_{\text{real}} - P_m|}{P_m} \quad (4)$$

另一种是针对遮阴或故障而设置的突变重启, 仿真研究结果显示, 遮阴或故障造成的功率变化量 ΔP 均大于 0.1 , 因此该重启条件设置为 $\Delta P > 0.1$ 。算法流程图如图 8 所示。

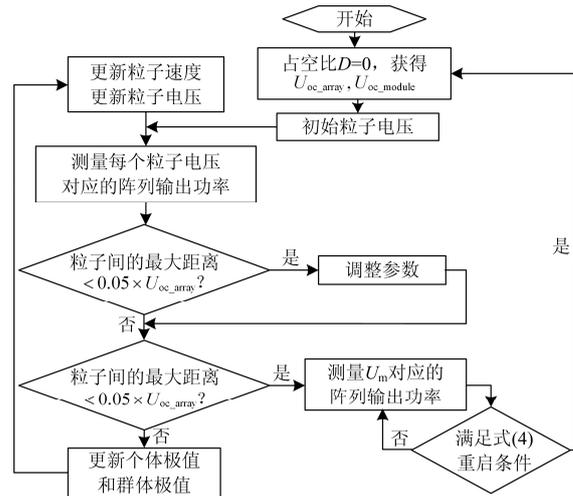


图 8 粒子群算法流程图

Fig. 8 Flowchart of PSO algorithm

3 基于 SA-PSO 的开关矩阵控制

3.1 提出的光伏系统优化模型

本文在 Matlab/Simulink 环境下建立了基于 SA-PSO 算法的 MPPT 与开关矩阵相结合的控制仿真模型。系统包括以下几个部分: PV 阵列、Boost 型 DC/DC 模块、PWM 脉冲信号模块、基于 PSO 的 MPPT 寻优模块、基于 PSO 的最优重构模块和可控开关矩阵模块。系统主电路模型如图 9 所示。

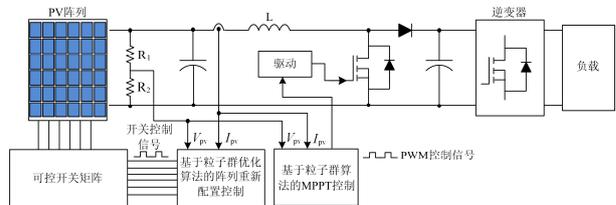


图 9 光伏系统的主电路模型

Fig. 9 Main circuit module of PV system

在无遮挡情况下, 根据本文设定的自然重启条件, MPPT 控制模块每分钟启动一次, 此时优化重构模块处于关闭状态。根据突变重启条件, 当系统检测到相邻两次的功率变化量 $\Delta P > 0.1$ 时, 可以判

断此时阵列中出现局部阴影或个别模块发生故障, 优化重构模块介入, 配合 MPPT 寻优模块, 计算出该遮阴或故障情况下能够产生最佳功率输出的连接方案, 然后控制矩阵中开关的闭合。

3.2 开关控制策略

针对遮阴或故障造成光伏系统输出功率降低的问题, 本文采用 MPPT 与开关矩阵相结合的控制策略, 当 MPPT 的重启来自于突变因素时, 激活优化重构模块, 算法步骤如下。

步骤 1: 初始化粒子群参数及决策变量, 将开关控制信号设置为粒子的位置(s_j^k), 建立目标函数进行优化($P(V, I) = V_{PV} \times I_{PV}$)。

步骤 2: 将粒子控制信号输送到可控开关矩阵, 控制开关的闭合与断开, 接下来等待 MPPT 寻优模块完成最大功率点跟踪。

步骤 3: 跟踪完成后, 通过获得的阵列的输出电压和电流, 通过 $P(V, I) = V_{PV} \times I_{PV}$ 计算出输出功率。

步骤 4: 对比当前的输出功率值和每个粒子的 P_{best} 。如果当前输出的功率值优于 P_{best} , 更新 P_{best} 。将 P_{best} 与 G_{best} 进行比较, 如果 P_{best} 优于 G_{best} , 更新 G_{best} 。

步骤 5: 根据式(1)和式(2), 对每个粒子的速度和位置进行更新。

步骤 6: 重复步骤 2 至步骤 5, 直到达到最大的迭代次数。

步骤 7: 评估阵列中的阴影或者故障是否发生了改变, 如果检测获得 PSO 算法突变重启的条件, 则返回到步骤 1, 如果没有, 就停留在步骤 7。

4 仿真结果及分析

4.1 仿真模型及参数设置

为了验证本文提出优化方法的有效性, 使用 Matlab 软件搭建仿真模型, 系统的主电路结构如图 9 所示。光伏阵列采用 $\{4 \times 3\}$ 的组件阵列构成, 组件参数详见表 1。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: $G=1000 \text{ W/m}^2$ 、 $T=25^\circ\text{C}$; $G=700 \text{ W/m}^2$ 、 $T=20^\circ\text{C}$; $G=500 \text{ W/m}^2$ 、 $T=18^\circ\text{C}$; $G=400 \text{ W/m}^2$ 、 $T=16^\circ\text{C}$ 。针对 $\{4 \times 3\}$ 阵列, 由 2.2 节中的规律可知, 此时 PSO 算法中粒子数应设置为 4。根据算法初始阶段较大的 ω 可以避免算法陷入局部 MPP; 到算法后期, 较小的 ω 可以加快收敛速度, 减轻系统趋于稳态时的功率波动。因此, 算法初期设定 $\omega=1$, $c_1=c_2=1.49445$, 最大收敛速度 V_{max} 为 5; 当粒子间最大电压差值 $<5\%$ 的阵列输出电压时, 设定 $\omega=0.4$, $c_1=1$, $c_2=2$, 最大收敛速度 V_{max} 为 1。通过微型 PSO 控制器实现不同遮阴情况下的最优配置。优化前后的最大输出

功率提高百分比计算公式如式(5)所示。

$$P\% = \frac{(P_{\max}(\text{优化后}) - P_{\max}(\text{优化前}))}{P_{\max}(\text{优化前})} \times 100 \quad (5)$$

表 1 光伏电池组参数

Table 1 Parameters of PV module

参数	数值
辐照度 W/m^2	1000
温度/ $^\circ\text{C}$	25
电流的温度系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	0.0025
电压的温度系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	0.00288
电压的辐照度系数	0.5
峰值功率/W	140
开路电压/V	23.4
短路电流/A	5.04
MPP 电压/V	18.2
MPP 电流/A	4.64

4.2 阴影情况下仿真

在第一个遮阴案例中, 阵列中右上角的三个组件被阴影遮挡, 接收到的辐照度为 700 W/m^2 , 其他组件均为 1000 W/m^2 。图 10(a)为优化前的连接方式, 图 10(b)为通过计算获得的最优连接方案。图 11 为优化前后输出的 P-V 特征曲线, 可以看出优化前后的最大功率输出分别为 1252.55 W 和 1292.85 W , 通过式(5)计算出优化后光伏阵列输出的最大功率提高了 3.22%。图 12 为 PSO 算法搜索全局最优 MPP(G_{best}) 的计算过程, 第 5 代即获得 G_{best} , 说明搜索跟踪速度很快。

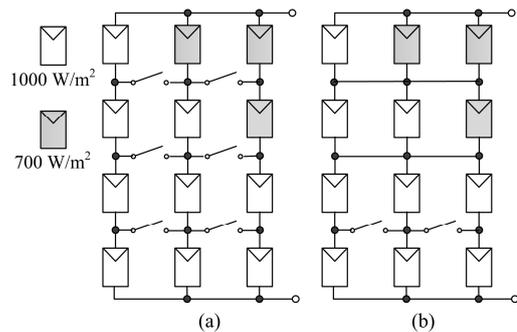


图 10 优化前后的配置方案

Fig. 10 Configuration schemes before and after optimization

在第二个遮阴案例中, 阵列中有三种遮阴组件, 接收到的辐照度分别为 1000 W/m^2 、 700 W/m^2 、 500 W/m^2 和 400 W/m^2 , 优化前后的连接方案如图 13(a)和图 13(b)所示。图 14 为优化前后输出的 P-V 特征曲线, 最大功率输出分别为 978.7 W 和 1041.5 W , 通过式(5)计算出优化后光伏阵列输出的最大功率提高了 6.42%。使用粒子群算法搜索全局最优 MPP(G_{best}) 的计算过程, 如图 15 所示。

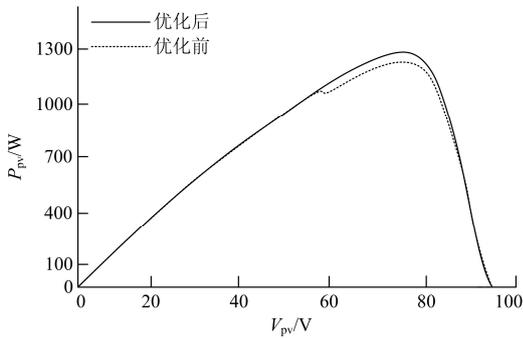


图 11 优化前后的 P-V 特性曲线

Fig. 11 P-V character curves before and after optimization

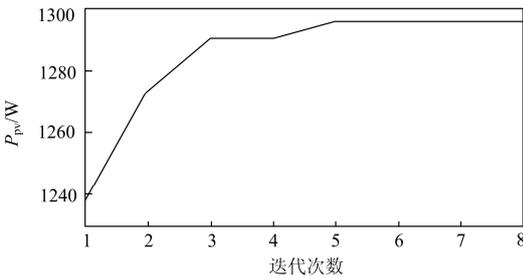


图 12 PSO 算法的寻优变化过程

Fig. 12 Optimization of PSO algorithm in the process of change

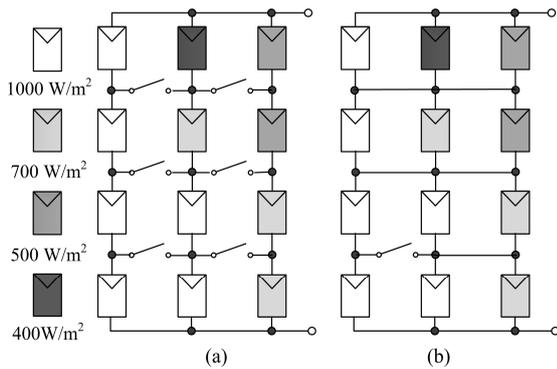


图 13 优化前后的配置方案

Fig. 13 Configuration schemes before and after optimization

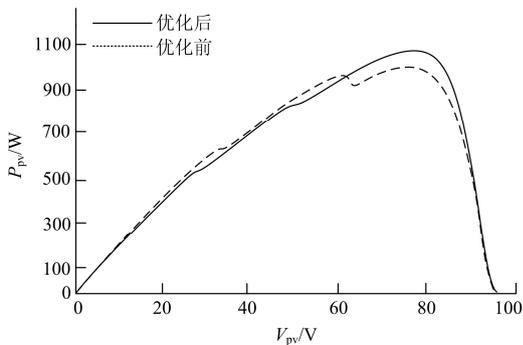


图 14 优化前后的 P-V 特性曲线

Fig. 14 P-V character curves before and after optimization

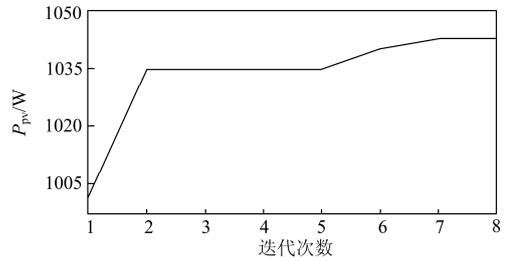


图 15 PSO 算法的寻优变化过程

Fig. 15 Optimization of PSO algorithm in the process of change

4.3 故障情况下仿真

在故障的案例中，位于第二列中间的组件发生故障。优化前后的连接方案如图 16(a)和图 16 (b)所示。图 17 为优化前后阵列输出的 P-V 特征曲线，最大功率输出分别为 1154.45 W 和 1202 W，通过式 (5)计算出优化后光伏阵列输出的最大功率提高了 4.11%。图 18 为采用粒子群算法搜索全局最优 MPP(G_{best})的计算过程。

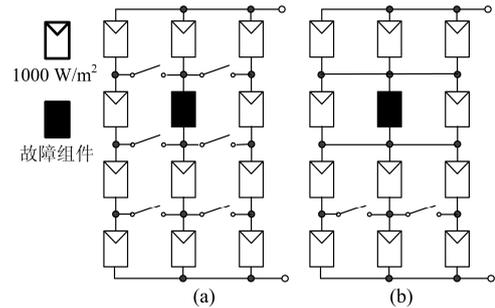


图 16 优化前后的配置方案

Fig. 16 Configuration schemes before and after optimization

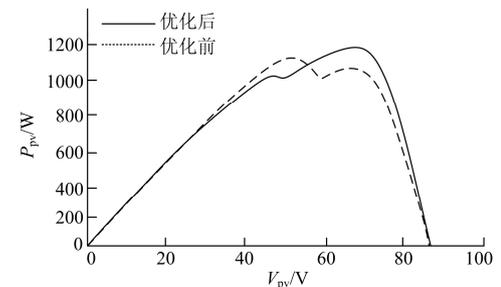


图 17 优化前后的 P-V 特性曲线

Fig. 17 P-V character curves before and after optimization

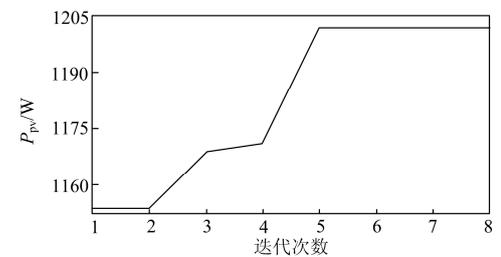


图 18 PSO 算法的寻优变化过程

Fig. 18 Optimization of PSO algorithm in the process of change

5 结论

本文提出了一种优化的光伏阵列配置方案, 当系统通过输出功率变化量(ΔP)监测到组件发生遮蔽或故障时, 激活控制系统, 计算出能够产生最佳输出功率的连接方案, 通过控制开关的闭合, 获得遮阴或故障情况下组件间最优的连接方式, 提高功率输出。本研究还探讨了 SA-PSO 方法在 MPPT 中的使用, 提出了粒子初始位置的设置方案, 同时给出了算法的终止与重启条件, 避免搜索陷入局部极值或多次迭代而造成的功率震荡。通过仿真分析可以得出以下结论:

(1) 提出的算法在遮阴或故障情况下均能快速有效地追踪到全局最优 MPP(G_{best})。

(2) 提出的开关控制策略相较于只在 SP、BL 和 TCT 三种方式间进行切换的方法更为灵活, 而且算法的重启设置有效地避免了开关的频繁操作。

在以后的研究工作中, 需要根据光伏电站的位置, 考虑每天非 9:00—15:00(当地真太阳时)时段内, 光伏阵列间的遮挡等因素, 对光伏发电系统 MPPT 算法重启与终止条件以及开关控制策略的参数设置。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] 霍富强, 王鹏, 龚晓伟, 等. 基于分区分层前推回代法的光伏阵列运行状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 68-72.
HUO Fuqiang, WANG Peng, GONG Xiaowei, et al. Evaluation method of PV array of running status based on layered and divisional forward and backward algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 68-72.
- [2] 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: 9pp. DOI 10.1186/s41601-016-0021-1
- [3] 冯丽娜, 陈阿莲, 杜春水, 等. 光伏阵列组态优化控制策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 101-107.
FENG Lina, CHEN Alian, DU Chunshui, et al. Analysis on control strategy of PV array configuration optimization[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 101-107.
- [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] 高金辉, 李国成. 一种开路电压和短路电流相结合的 MPPT 算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 96-100.
GAO Jinhui, LI Guocheng. Research on MPPT algorithm in combination with open circuit voltage and short circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 96-100.
- [6] 闫凯, 张保会, 瞿继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等效[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [7] SUBRAMANI S, RAMESH B N. RBFN based MPPT algorithm for PV system with high step up converter[J]. Energy Conversion & Management, 2016, 122: 239-251.
- [8] TSANG K M, CHAN W L. Maximum power point tracking for PV systems under partial shading conditions using current sweeping[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 93: 249-258.
- [9] 韩丽, 尚仪, 史丽萍. 基于在线自调整神经网络的最大功率跟踪方法研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(8): 1848-1853.
HAN Li, SHANG Yi, SHI Liping. Research on tracking method based on online adaptive neural network[J]. Acta Energies Solaris Sinica, 2015, 36(8): 1848-1853.
- [10] KOFINAS P, DOUNIS A I, PAPANAKIS G, et al. An Intelligent MPPT controller based on direct neural control for partially shaded PV system[J]. Energy & Buildings, 2015, 90:51-64.
- [11] ALAHMAD M, CHAABAN M A, SU K L, 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.
- [12] 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.
- [13] EL-DEIN M Z S, KAZERANI M, SALAMA M M A. Novel configurations for photovoltaic farms to reduce partial shading losses[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting: IEEE, 2011: 1-5.
- [14] 朱艳伟, 石新春, 但扬清, 等. 粒子群优化算法在光伏阵列多峰最大功率点跟踪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 42-48.
ZHU Yanwei, SHI Xinchun, DAN Yangqing, et al. Application of PSO algorithm in global MPPT for PV array[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 42-48.

收稿日期: 2016-08-18; 修回日期: 2016-12-05

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: 497680751@qq.com

田壁源(1989—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电并网。E-mail: 2528586070@qq.com

(编辑 魏小丽)