



局部遮挡下光伏组件 MPPT 复合算法

葛 强, 李振志, 仇宝云, 徐 金, 徐道帆

(扬州大学 电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 当光伏组件受到局部阴影遮挡时,其最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)过程常出现误跟踪、跟踪速度慢、光伏组件输出功率低等问题.为使局部阴影下光伏组件保持快速、稳定、准确地最大功率输出,基于电导增量法(incremental conductance algorithm, INC),结合全局比较算法(global comparison algorithm, GCA),提出一种基于电导增量/全局比较的复合 MPPT 算法(INC-GCA),并通过搭建 Simulink 仿真模型和设计光伏试验平台,验证该算法的可行性.结果表明:基于电导增量/全局比较的复合 MPPT 算法在光伏组件受到局部阴影遮挡时可准确追踪到最大功率,且跟踪速度快、可靠性高,完全避免了误跟踪问题;相较于电导增量法,该算法可有效提高光伏系统的发电效率,提升光伏电站的经济效益.

关键词: 光伏组件; 电导增量法; 全局比较; 局部遮挡; 最大功率点追踪

中图分类号: TM914.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-7775(2023)05-0547-07

引文格式: 葛 强,李振志,仇宝云,等.局部遮挡下光伏组件 MPPT 复合算法[J].江苏大学学报(自然科学版),2023,44(5): 547-553.

MPPT composite algorithm of photovoltaic modules under partial occlusion condition

GE Qiang, LI Zhenzhi, QIU Baoyun, XU Jin, XU Xiaofan

(College of Electrical and Energy Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

Abstract: When the photovoltaic module is partially shaded, the problems of false tracking, slow tracking speed and low output power usually appear in the process of maximum power point tracking (MPPT). To make the maximum power output process of photovoltaic modules fast, stable and accurate under partial shading condition, a composite MPPT algorithm (INC-GCA) was proposed based on incremental conductivity algorithm (INC) and global comparison algorithm (GCA). To verify the algorithm, a Simulink simulation model was built, and a photovoltaic experimental platform was designed. The results show that when the photovoltaic module is partially shaded, the composite algorithm based on INC algorithm and GCA can accurately track the maximum power with fast tracking speed and high reliability, and the problem of false tracking is completely avoided. Compared with the incremental conductance method, the proposed algorithm can effectively improve the power generation efficiency of the photovoltaic system and improve the economic benefits of the photovoltaic power station.

Key words: photovoltaic modules; incremental conductance algorithm; global comparison; partial occlusion; MPPT

收稿日期: 2021-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679208)

作者简介: 葛 强(1965—),男,江苏南通人,教授(yzgeq@yzu.edu.cn),主要从事光伏发电系统设计与故障诊断的研究.

李振志(1997—),男,山东潍坊人,硕士研究生(1578075102@qq.com),主要从事光伏发电系统设计与故障诊断的研究.

随着当前工业生产向着低碳化方向发展以及绿色生产生活观念的日渐普及,光伏发电作为一种典型的绿色能源,具有广阔的研究空间和市场潜力,预计到本世纪末全球电力供应中光伏发电占比可达60%以上^[1],当前我国光伏发电装机容量世界第一.由于光伏电池的发电效率不高,一般仅为15%~20%^[2],且其输出呈明显的非线性特征,受光照等环境因素影响较大,因此为最大化地利用能量,在硬件方面可通过DC-DC变换电路保持稳定和可控的系统输出,在软件方面可通过改进最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)算法提升系统发电的效率^[3].

传统的MPPT控制方法诸如扰动观察法、电导增量法、固定电压法等^[4],其测量参数少,且控制系统简单,适用于外界条件变化不大的情况^[5],而局部阴影下光伏输出复杂且呈多峰特性,此时传统算法可能陷入局部最大功率点^[6].为此,国内外研究者提出了多种智能控制算法,文献^[6]提出了基于复杂多极值光伏系统的改进粒子群算法;文献^[7-8]提出了功率追踪稳定性高、适合复杂工况的模糊控制算法;文献^[9]进一步提出适用范围广、系统稳定性高的多项式模糊模型算法;文献^[10]将布谷鸟搜索算法与扰动观测法相结合以提升追踪速度、减小功率波动;文献^[11]提出通过引入混沌算法以解决“早熟”问题的改进猫群算法.这些智能控制MPPT算法虽然适合于光伏这种非线性的复杂系统,但通常在仿真中实现,其软硬件结合尚有一定的难度,成本较高,因此实际应用不多.

文中通过研究阴影遮挡下光伏组件的输出特性,针对性地提出一种基于电导增量/全局比较的复合MPPT算法,解决误跟踪及功率损失的问题,提升局部阴影遮挡下光伏组件的发电效率,最后通过

试验验证该算法跟踪速度快、输出效率高、环境适应性强,在工程实际中有较大的研究和应用价值.

1 阴影遮挡下光伏组件的输出特性

1.1 阴影遮挡下光伏组件工作过程

通常情况下光伏组件的输出电流可表示为

$$I = I_{pv} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_c)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_c}{R_b}, \quad (1)$$

式中: U 、 I 、 I_{pv} 、 I_0 分别为光伏组件的输出电压、输出电流、光生电流和反向饱和电流; R_c 、 R_b 分别为串联电阻和并联电阻,常数参量 q 、 n 、 k 、 T 分别为电子电量、二极管因子、玻尔兹曼常数和绝对温度.

为便于分析阴影下光伏组件的工作过程,将任意光照强度 S 和任意温度 T 下的光生电流 I'_{pv} 近似为短路电流 I'_{sc} , 则 I'_{sc} 可表示为

$$I'_{sc} = I'_{pv} = I_{sc} [1 + \lambda(T - T_{ref})] \frac{S}{S_{ref}}, \quad (2)$$

式中: 参考温度 $T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, 参考强度 $S_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$, 温度补偿系数 λ 取 0.0025. 忽略流经并联电阻的电流 I_b , 将串联电阻 R_c 近似为 0, 则式(1)简化为

$$I = I'_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qU}{nkT} \right) - 1 \right]. \quad (3)$$

由式(2)可知任意光强下短路电流 I'_{sc} 与光强 S 成正比, 因此阴影遮挡下光伏组件中各电池串的光强不一致, 导致其可通过的电流范围也不一致, 输出特性较为复杂, 如图1所示. 由于所有电池串串联连接, 各电流范围以其当前光强对应的短路电流 I'_{sc} 为上限, 一旦整体输出电流 I 超过某电池串的上限 I'_{sc} , 则对应的旁路二极管将导通续流, 下面详细分析该工作过程.

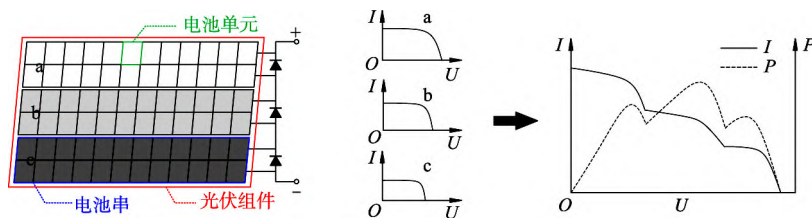


图1 光伏组件多峰输出特性示意图

假设光伏组件由3个电池串a、b、c串联构成, 每个电池串由若干电池单元串联构成, 且均并联一个旁路二极管, 如图1所示. 各电池串的光照强度分别为 S_a 、 S_b 、 S_c , 定义 $S_a > S_b > S_c$, 则对应光照强度下的光生电流与短路电流也应满足: $I'_{pva} > I'_{pvb} > I'_{pvc}$,

$I'_{sca} > I'_{scb} > I'_{sc}$. 则随着光伏组件整体输出电流的增大, 会出现以下3种工作状态.

1) 工作状态1: 3个电池串均输出功率, 如图2所示. 当光伏组件输出电流 I 较小, 即 $0 < I < I'_{sc}$ 时, 此时允许通过电流范围最小的电池串c足以容许电

流 I 通过, 因此 U_a 、 U_b 、 U_c 均大于 0, 二极管尚未达到导通的条件, 此时所有电池串均正常工作, 3 个电池串对外均输出功率. 由于各电池串串联连接, 故整体输出电压 U 为各电池串电压之和, 即

$$U = U_a + U_b + U_c. \quad (4)$$

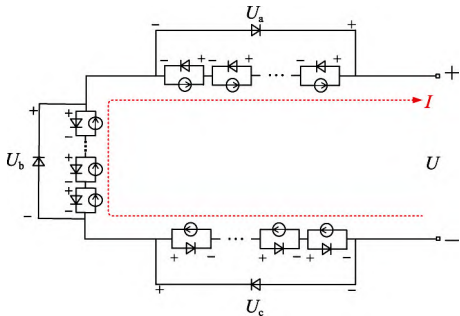


图 2 工作状态 1 示意图

2) 工作状态 2: 仅 2 个电池串输出功率, 如图 3 所示.

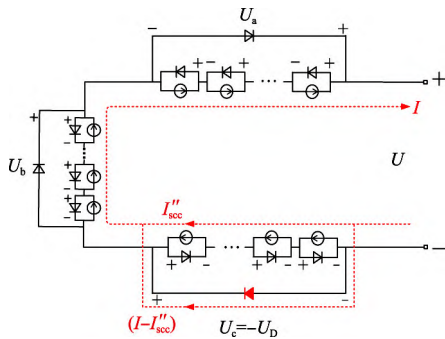


图 3 工作状态 2 示意图

随着光伏组件输出电流 I 的增大, 当 $I''_{scb} < I < I''_{sca}$ 时, 光伏组件的工作状态如图 3 所示. 此时电池串 a、b 可通过的电流范围较大, 足以容纳电流 I 通过, 而电池串 c 无法容许电流 I 中超出 I''_{scb} 的部分通过, 此刻 $(I - I''_{scb})$ 部分将被电池串 c 消耗掉, 此时电池串 c 中的各电池单元相当于负载消耗能量, 其两端的电压将反向且随着电流的增大而反向变大. 直到 $U_c = -U_D$ 时电池串 c 的并联二极管达到导通续流的条件, $(I - I''_{scb})$ 部分将由并联二极管续流, 防止电池串 c 耗能而发热, 实际上该并联二极管的导通过程极为迅速. 此状态下电池串 a、b 正常工作并对外输出功率, 而电池串 c 严格意义上并未被完全旁路, 存在二极管导通压降而产生微功耗, 光伏组件整体输出电压 U 变为

$$U = U_a + U_b - U_D. \quad (5)$$

3) 工作状态 3: 仅 1 个电池串单独输出功率, 如图 4 所示.

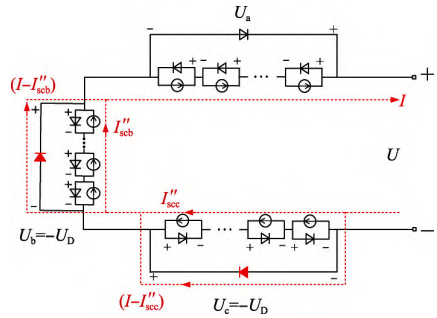


图 4 工作状态 3 示意图

当 $I''_{scb} < I < I''_{sca}$ 时, 工作状态如图 4 所示. 此时电池串 c、b 均无法容许电流 I 通过, 则超出 I''_{scb} 和 I''_{sca} 的部分将被对应电池串消耗, 由此进一步导致电池串 c、b 的并联二极管导通续流. 此状态下仅电池串 a 对外输出功率, 而电池串 c、b 产生较少功耗, 光伏组件输出电压 U 变为

$$U = U_a - U_D - U_D. \quad (6)$$

由以上分析可见, 三串联结构光伏组件随输出电流的增大呈 3 种工作状态, 其中各个工作状态的边界由各电池串电流范围的上限 I''_{sc} 决定, 因为各状态对应不同的输出特性, 由此形成的输出特性曲线呈现多峰特性.

1.2 阴影遮挡下光伏组件输出特性

根据光伏组件等效工程模型, 在 Simulink 平台搭建光伏组件的仿真模型, 其参数如下: 开路电压 $U_{oc} = 43.6 \text{ V}$, 短路电流 $I_{sc} = 8.35 \text{ A}$, 最大工作点电压 $U_m = 34.8 \text{ V}$, 最大工作点电流 $I_m = 7.47 \text{ A}$. 为光伏组件设置 4 种光照强度, 分别为 S_{A0} 强度 (1 000、1 000、1 000 W/m^2)、 S_{A1} 强度 (1 000、1 000、400 W/m^2)、 S_{A2} 强度 (1 000、600、200 W/m^2)、 S_{A3} 强度 (1 000、200、200 W/m^2). 得到不同局部阴影遮挡情况下光伏组件的输出特性曲线如图 5 所示.

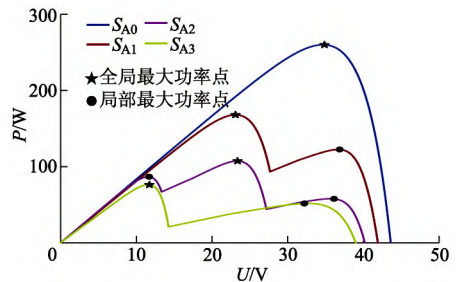


图 5 不同局部阴影遮挡下光伏组件输出特性曲线

由图 5 可见其输出功率 - 电压 ($P-U$) 特性曲线存在多个最大功率点, 且最大功率点的个数与不均匀光照强度有关, 全局最大功率点所处的电压区间也不是固定的.

2 复合 MPPT 算法设计与仿真

2.1 复合 MPPT 算法

电导增量法(incremental conductance algorithm, INC)是一种以输出功率对输出电压微分(dP/dU)的符号为判断依据,通过电压扰动实现 MPPT 过程的控制算法,其工作原理是利用最大工作点处 $dP/dU=0$ 的特性^[12]. 电导增量法跟踪过程平稳、精度高,但主要适用于未受局部遮挡或受轻微遮挡的光伏系统. 如图 5 所示,当受到局部阴影遮挡时系统输出功率呈多峰值特性,存在多个最大功率点,即存在多个 $dP/dU=0$ 的工作点,而电导增量法只能追踪到起始电压附近的最大功率点^[13],且全局最大功率点的位置不固定,如果追踪到的是局部最大功率点,系统将工作在不良状态,既损失输出功率,又对光伏组件产生危害,所以需要优化算法避免此问题. 为解决电导增量法易陷入局部最优的问题,文中提出一种基于电导增量/全局比较的复合 MPPT 算法(INC-GCA),该算法以电导增量法为基础,通过开启全局比较,纠正局部阴影遮挡时电导增量法的跟踪偏差,防止其陷入局部最大功率点,实现高效的最大功率跟踪. 该算法流程如图 6 所示.

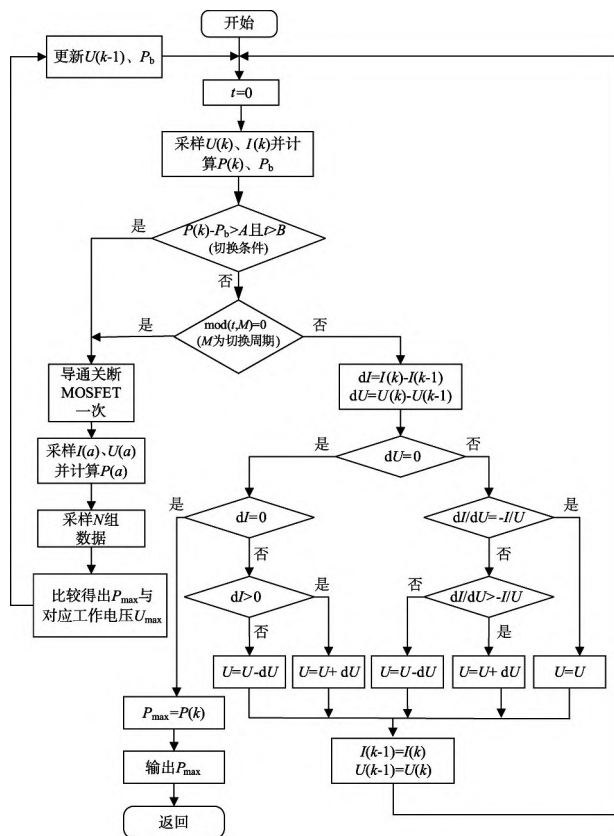


图 6 复合 MPPT 算法流程图

整个算法以时间为轴分为电导增量法和全局比较法两部分. 首先在电导增量法的驱动下,系统进行最大功率点跟踪. 当达到切换条件之后,引入一次全局比较,驱动整个电路实现一个从开路到短路的过程,并采集此过程中的电流与电压数据,经过处理后供下一个周期使用. 该算法具体工作流程如下: ① 系统初始化. 设定算法切换周期 M 、功率波动阈值 A 及对应启动时间阈值 B . ② 算法切换(切换条件). 采样实时电流 $I(k)$ 和电压 $U(k)$, 并计算实时功率 $P(k)$, 当与上一时刻功率差的绝对值超过阈值 B 时,如果此时时间 t 大于启动时间阈值 A ,则启动一次全局比较,否则将继续进行电导增量法来追踪最大功率,直至时间 t 到达算法切换周期 M 时再启动全局比较. ③ 电导增量法过程. 在此过程中,计算电流、电压的变化量 dI 和 dU , 通过判断公式 $dI/dU + I/U$ 的正负,确定下一周期电压的扰动方向,当 $dI/dU > -I/U$ 时,则 $U < U_{max}$, 应减小占空比以增加电压. 如果 $dI/dU + I/U = 0$,证明此时已经追踪到最大功率点,此时的输出功率即为最大功率 P_{max} , 占空比不变. 最后保存此时的工作电压和电流作为参考量 $U(k-1)$ 和 $I(k-1)$, 并开启下一次循环. ④ 全局比较过程. 在此过程中,通过调节占空比 D 的大小,实现 $D=0$ 至 $D=1$ 过程,即控制系统由完全开路至完全短路,采样得到此过程中的 N 组数据,通过比较得出最大输出功率 P_{max} 与对应的工作电压 U_{max} , 并将 U_{max} 作为下一次循环中电导增量法的参考量 $U(k-1)$.

2.2 仿真模型的建立

通常情况下,光伏组件输出电压不稳定、不可控,为实现最大功率输出,需要在光伏系统中加入 DC-DC 变换电路,以实现升压和 MPPT 过程^[14],使得输出电压稳定在最大功率点处. 考虑到 DC-DC 电路的转换效率和硬件成本,文中选取 Boost 升压电路,主要由电容 C 、电感 L 、二极管 D 、电压传感器 VM、电流传感器 CM、场效应管 MOSFET、PWM 波发生模块等组成,其拓扑结构如图 7 所示,其中 U_{PV} 与 U_{LD} 分别为光伏输出电压和负载电压.

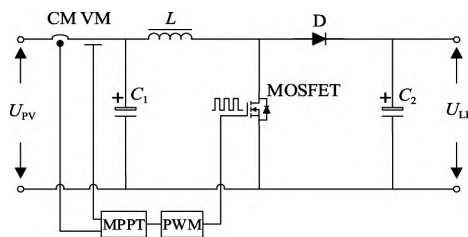


图 7 Boost 升压电路拓扑结构

以 Boost 电路为升压电路,在 Simulink 中搭建 3×1 串联结构光伏组件的 MPPT 仿真模型. MPPT 控制器采用 S 函数,分别将电导增量法和复合算法的程序写入其中进行跟踪性能的仿真,并设计基于 memory 模块的计量系统获取系统输出的电能. 仿真中光伏组件基本参数参照第 1.2 节设置.

2.3 仿真分析

为验证静态局部遮阴情况下复合算法跟踪结

果的准确性,给予光伏组件 3 个电池串不同的光照强度,模拟局部遮阴的情况. 在标准温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,分别在第 1.2 节所列的 S_{A1} 、 S_{A2} 、 S_{A3} 3 种光照强度下进行仿真试验. 同时采用电导增量法和复合算法两种算法作对比,得到其最大功率跟踪结果,仿真时间设为 1.3 s ,初始占空比设为 0.1 . S_{A1} 、 S_{A2} 、 S_{A3} 3 种光照强度下光伏组件输出功率曲线如图 8 所示.

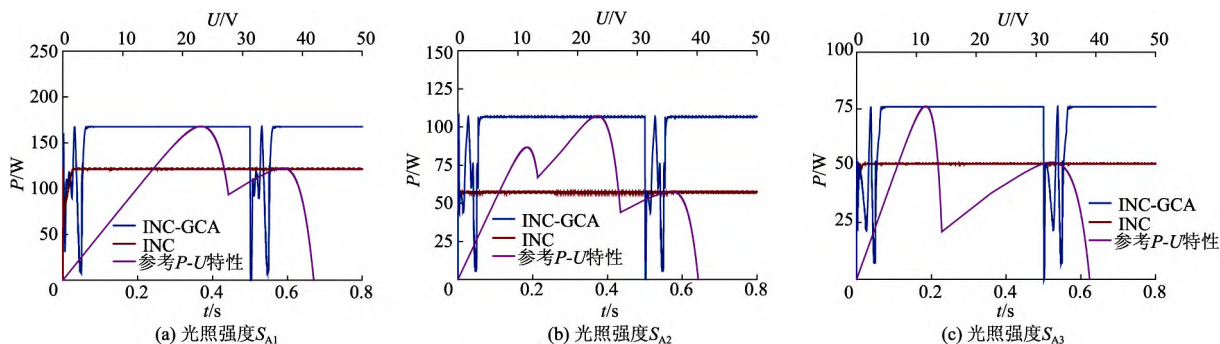


图 8 不同光照强度下光伏组件输出功率

通过比较图 8 中输出功率曲线,可知局部阴影下 INC 算法容易陷入局部最大功率点,而 INC-GCA 算法通过全局比较过程准确追踪到最大功率点. 而在光伏系统实际工作过程中,局部阴影通常是变化的. 为验证局部阴影动态变化情况下复合算法的控制效果,给予光伏组件变化的光照强度: $t = 0\text{ s}$ 时,光照情况为 S_{A0} 强度; $t = 1.3\text{ s}$ 时施加阴影,光照情况变为 S_{A3} 强度; $t = 3.7\text{ s}$ 时撤去部分阴影,光照情况变为 S_{A2} 强度. 仿真中算法切换周期为 1 s ,仿真时间设为 6 s .

在局部阴影动态变化情况下,光伏组件输出功率曲线如图 9 所示. 试验开始时无阴影遮挡,两种算法均跟踪到了最大功率,约为 260 W . 当 $t = 1.3\text{ s}$ 时,由于光照强度突变,两种算法的输出功率均直线下降,由于本次光照突变带来的功率变化超过 INC-GCA 算法设定的阈值,且满足切换条件,故 INC-GCA 算法启动一次全局比较,将输出功率纠正为 75 W 左右,而 INC 算法则跟踪到 50 W 左右. 当 $t = 3.7\text{ s}$ 时,光照强度再次变化,INC 算法跟踪到 60 W 左右,但此次光照突变带来的功率变化较小,不满足切换条件,故未启动全局比较,INC-GCA 算法在原来的基础上进行电导增量法,直到 $t = 4.0\text{ s}$ 时,时间达到 INC-GCA 算法设定的定时时间,启动一次全局比较,将输出功率纠正为 108 W 左右. 通过电能计量系统,得到 INC 算法与 INC-GCA 算法的输出电能分别为 585 和 710 J .

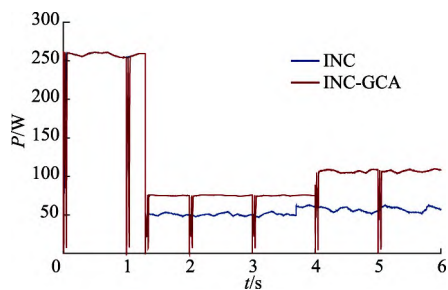


图 9 动态阴影下光伏组件输出功率曲线图

3 试验验证

搭建基于 TMS320C6713 DSP 的光伏试验平台验证复合算法的可行性. 基于对比试验思想,INC 和 INC-GCA 两种算法做横向对比, S_{B1} 和 S_{B2} 两种光照强度做纵向对比. 试验时长为 100.0 s ,试验过程: ① 将光伏组件放在无阴影遮挡的恒光照强度 S_{B1} (S_{B2}) 下进行试验; ② $t = 25.0\text{ s}$ 时,在光伏组件面板施加 $1/6$ 局部阴影遮挡; ③ $t = 55.0\text{ s}$ 时,进一步施加阴影至 $1/3$ 局部阴影遮挡. 试验中光伏组件为 6 行 12 列 72 块电池单元组件,其中 $1/6$ 与 $1/3$ 局部阴影遮挡分别为遮挡右上角 12 块和 24 块电池单元.

光伏组件基本参数: 开路电压 $U_{oc} = 44.0\text{ V}$,短路电流 $I_{sc} = 5.49\text{ A}$,最大工作点电压 $U_m = 24.5\text{ V}$,最大工作点电流 $I_m = 4.14\text{ A}$. 算法中参数设定: 电压扰动步长 $d = 1\text{ V}$,采样频率 $f = 5000\text{ Hz}$,扰动周期

为 1.0 s, 算法切换周期 $M = 30$ s. Boost 电路参数: 电感 $L = 10$ mH, 电容 $C = 470$ μ F, 负载端采用 50 V 恒压电子负载. 环境条件: 光照强度 $S_{B1} = 405$ W/m^2 、

$S_{B2} = 830$ W/m^2 , 环境温度为 33 $^{\circ}C$.

图 10 为不同光照强度下 (S_{B1} 或 S_{B2}) 两种算法最大功率和电压跟踪对比试验结果.

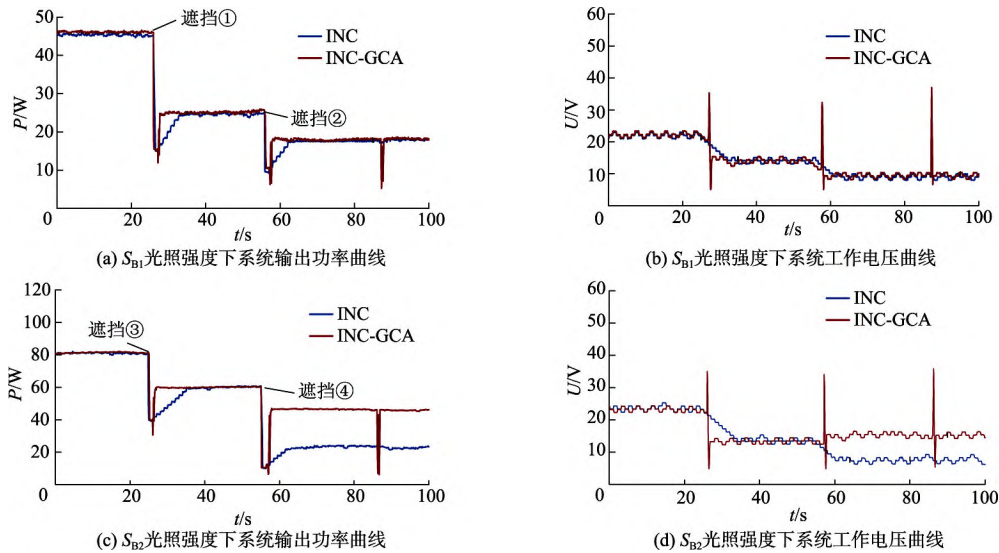


图 10 不同光照强度下两种算法最大功率和电压跟踪对比

不同光照下两种算法的试验数据如表 1 所示.

表 1 不同光照强度下两种算法的试验数据

| 遮挡动作 | 算法 | 数据 | | |
|------|---------|-----------|-----------|---------|
| | | U_o / V | P_o / W | W / J |
| 遮挡① | INC | 14.0 | 24.2 | 118.2 |
| | INC-GCA | 14.1 | 25.0 | 143.6 |
| 遮挡② | INC | 9.1 | 17.6 | 76.3 |
| | INC-GCA | 9.3 | 17.9 | 94.5 |
| 遮挡③ | INC | 13.5 | 59.8 | 460.8 |
| | INC-GCA | 13.4 | 59.5 | 546.3 |
| 遮挡④ | INC | 7.3 | 23.1 | 87.1 |
| | INC-GCA | 15.5 | 46.6 | 216.3 |

注: U_o 为遮挡后追踪到的工作点电压; P_o 为此时对应的输出功率; W 为 INC 算法追踪时间内两者分别产生的电能.

由图 10、表 1 可知: ① 突然施加阴影后 INC 算法以 1 V 的步长缓慢追踪最大工作点, 而 INC-GCA 算法经一次全局比较过程迅速追踪到了最大工作点处. 4 次遮挡中 INC 算法追踪用时 t_1 分别为 5.1、5.1、9.2 和 5.1 s, INC-GCA 算法用时 t_{1c} 均为 0.8 s, INC-GCA 算法追踪更快. ② INC 算法的追踪过程为低功率输出, 输出效率不高. 4 次遮挡的 t_1 时段内 INC-GCA 算法比 INC 算法多产生电能分别为 25.4、18.2、85.5 和 129.2 J, 弥补了 INC 算法追踪过程效率低的不足. ③ 第 4 次遮挡中 INC 算法和 INC-GCA 算法工作电压分别为 7.3 和 15.5 V, 输出功率分别为 23.1 和 46.6 W, 说明此时 INC 算法出现误跟踪.

④ S_{B1} 光照强度下的局部遮阴试验中 INC-GCA 算法产生的电能比 INC 算法提升 5.2%. S_{B2} 光照强度下由于长时间出现误跟踪, INC-GCA 算法比 INC 算法的提升高达 29.5%.

4 结 论

1) 在光伏组件受到局部遮挡时, 利用功率对电压的微分值和光伏工作电压进行扰动调整. 在系统满足切换条件启动全局比较纠正跟踪偏差, 同时兼顾了跟踪过程中的跟踪速度和效率.

2) 局部遮挡下, 系统出现多个最大功率点, 复合算法相较于电导增量法可准确、快速地追踪到全局最大功率点, 避免了误跟踪并提升系统输出效率, 尤其是严重局部遮挡下的效率提升更明显.

3) INC-GCA 复合算法环境适应性较强, 在较宽的光照强度范围内以及变化的光照环境中均有效, 适合于阴影及光照变化较大的复杂情况.

4) INC-GCA 复合算法跟踪速度快且不存在误跟踪问题, 环境适应性强, 在局部阴影遮挡情况下 INC-GCA 复合算法产生的电能比 INC 算法多、输出效率高(长时间误跟踪情况下效率提升更高), 有效提升了光伏电站的发电效率和经济效益.

参考文献(References)

[1] 蔡纪鹤, 孙玉坤, 黄永红. 光伏并网发电与无功补偿

- 的一体化控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 324-328.
- CAI J H, SUN Y K, HUANG Y H. Integrative control of PV grid connected generation and reactive power compensation [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2014, 35(3): 324-328. (in Chinese)
- [2] 王平, 倪磊, 王林泓, 等. 透明隔热膜对改善光伏组件温度和发电效率的研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 396-402.
- WANG P, NI L, WANG L H, et al. Study on transparent insulating film improving temperature and generating efficiency of photovoltaic modules [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(2): 396-402. (in Chinese)
- [3] 徐金, 葛强, 李娟, 等. 基于全局比较的光伏电池MPPT实验研究[J]. 电源技术, 2021, 45(1): 39-42.
- XU J, GE Q, LI J, et al. Experimental study of photovoltaic cell MPPT based on global comparison [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(1): 39-42. (in Chinese)
- [4] MAO M X, CUI L C, ZHANG Q J, et al. Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: a review based on traditional and intelligent control strategies [J]. Energy Reports, 2020, 6(5): 1312-1327.
- [5] 李志军, 张奕楠, 王丽娟, 等. 基于改进量子粒子群算法的光伏多峰MPPT研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 221-229.
- LI Z J, ZHANG Y N, WANG L J, et al. Study of photovoltaic multimodal maximum power point tracking based on improved quantum particle swarm optimization [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(5): 221-229. (in Chinese)
- [6] IBNELOUAD A, KARI A E, AYADH, et al. Improved cooperative artificial neural network-particle swarm optimization approach for solar photovoltaic systems using maximum power point tracking [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, DOI: org/10.1002/2050-7038.12439.
- [7] LI X S, WEN H Q, HU Y H, et al. A novel beta parameter based fuzzy-logic controller for photovoltaic MPPT application [J]. Renewable Energy, 2018, 130(1): 416-427.
- [8] MOSTAFA B, AHMED A, MOSTAFA A, et al. PV systems control using fuzzy logic controller employing dynamic safety margin under normal and partial shading conditions [J]. Energies, 2021, 14(4): 841.
- [9] RAKHSHAN M, VAFAMAND N, KHOOBANM H, et al. Maximum power point tracking control of photovoltaic systems: a polynomial fuzzy model-based approach [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1): 292-299.
- [10] 马永翔, 王雨阳, 闫群民, 等. 基于CSA算法的光伏阵列多峰最大功率跟踪研究[J]. 电源技术, 2021, 45(1): 51-55.
- MA Y X, WANG Y Y, YAN Q M, et al. Research on multi-peak maximum power tracking of photovoltaic array based on CSA [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(1): 51-55. (in Chinese)
- [11] 聂晓华, 王薇. 混沌改进猫群算法及其在光伏MPPT中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6103-6110.
- NIE X H, WANG W. Chaos improved cat swarm optimization and its application in the PV MPPT [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6103-6110. (in Chinese)
- [12] 蔡纪鹤, 孙玉坤, 黄永红. 基于占空比干扰观测法的MPPT控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 75-79.
- CAI J H, SUN Y K, HUANG Y H. MPPT control based on duty cycle perturbation and observation method [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2014, 35(1): 75-79. (in Chinese)
- [13] WIJAYA B H, SUBROTO R K, LIAN K L, et al. A maximum power point tracking method based on a modified grasshopper algorithm combined with incremental conductance [J]. Energies, 2020, 13(17): 4329.
- [14] ZAND S J, HSIA K H, ESKANDARIAN N, et al. Improvement of self-predictive incremental conductance algorithm with the ability to detect dynamic conditions [J]. Energies, 2021, 14(5): 1234-1247.

(责任编辑 祝贞学)