

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210214

一种优化的光伏全局最大功率点追踪方法

宁平华^{1,2}, 张庆丰¹, 冯德仁², 丁鑫龙², 夏兴国¹, 潘小波¹

(1. 马鞍山职业技术学院电气工程系, 安徽 马鞍山 243031; 2. 安徽省高校电力电子与运动控制重点实验室
(安徽工业大学), 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 当前的光伏最大功率点追踪技术存在以下不足: 在局部阴影工况下, 易陷入局部功率峰值; 在负载波动时, 系统容易出现振荡甚至失稳。针对上述问题, 提出一种自适应的光伏全局最大功率点追踪设计方案。该方案将光伏输出端电压-功率扫描电路与 Zeta 斩波电路有机结合, 通过单开关管的简单电路拓扑, 既可实现光伏输出端电压-功率特性快速扫描, 定位全局最大功率点位置, 又能根据后级电路需要, 实现升降压斩波直流调节。在光照等输入或负载发生突变后, 所述系统均能进行开关管占空比自适应调整, 确保稳定工作在全局最大功率点附近, 避免出现大幅振荡与失稳。经过 PSCAD-EMTCD 仿真与样机实验验证, 结果表明该方案能在包括局部阴影等各种复杂工况下自适应地快速追踪与锁定当前光伏全局最大功率点。

关键词: 自适应; 光伏; Zeta 斩波电路; 最大功率点跟踪技术; PSCAD-EMTCD

An optimized photovoltaic global maximum power point tracking method

NING Pinghua^{1,2}, ZHANG Qingfeng¹, FENG Deren², DING Xinlong², XIA Xingguo¹, PAN Xiaobo¹

(1. Department of Electrical Engineering, Ma'anshan Technical College, Ma'anshan 243031, China; 2. Anhui Key Laboratory of Power Electronics and Motion Control (Anhui University of Technology), Ma'anshan 243002, China)

Abstract: Current photovoltaic (PV) maximum power point tracking (MPPT) technology has the following shortcomings: it is easy for the system to fall into a local power peak under the working condition of partial shadow; it is easy for the system to oscillate and even be unstable when the load fluctuates. In order to solve these problems, an adaptive design scheme of PV global MPPT technology is proposed. The scheme combines a PV output voltage scanning circuit and a Zeta chopper circuit organically. Through the simple circuit topology of single switch tube, not only can the voltage power characteristic of photovoltaic output terminal be quickly scanned and the position of global maximum power point can be located, but also, according to the needs of the post-circuit, the DC regulation of voltage buck or boost chopping can be realized. After a sudden change of irradiance or load, the system can adjust the duty cycle of the switch tube adaptively to ensure stable operation near the global maximum power point and avoid large oscillation and instability. Through PSCAD-EMTCD simulation and a prototype test, the results show that the scheme can track and lock the current PV global maximum power point adaptively and quickly under various complex conditions including partial shadow.

This work is supported by the Intercollegiate Key Project of Nature Science of Anhui Province (No. KJ2019A1244, No. KJ2019A1245, and No. KJ2020A0928), the Outstanding Young Talents in Colleges and Universities of Anhui Province (No. gxyq2019202) and the Program for Special Support of Top-Notch Professionals of Anhui Province (No. gxbjZD59).

Key words: adaptive; photovoltaic; Zeta chopper circuit; maximum power point tracking technology; PSCAD-EMTCD

0 引言

串联的光伏阵列如处在同温度同辐照的理想环

基金项目: 安徽省高校省级自然科学基金研究重点项目资助 (KJ2019A1244, KJ2019A1245, KJ2020A0928); 安徽省高校优秀青年人才项目资助 (gxyq2019202); 安徽省高拔尖人才项目资助 (gxbjZD59)

境下, 则其输出功率呈单峰特性。此时, 采用电压扰动观察法或功率爬山法等常规 MPPT 算法就能追踪到最大功率点^[1-5]。而多数情况下, 光伏阵列^[6-7]通常会遭遇局部阴影, 其输出功率则呈多峰特性。此时, 仍使用常规的光伏最大功率追踪方法, 则易将某一局部功率峰值点错当成全局功率峰值点, 影响光伏电站的发电效率。因此, 近年来, 局部阴影工况下的最大功率跟踪技术一直是学者研究的热

点。文献[8-10]提出使用硬件补偿电路使多峰特性变成单峰特性；但补偿电路的加入会使系统结构更复杂，导致成本大幅增加。一些学者提出粒子群算法^[11-17]、模糊算法^[18-22]、神经网络等智能算法^[23-25]来解决以上问题，智能算法在多峰状态下比常规算法有更好的快速性和准确性；但智能算法存在参数复杂、设置需依靠经验、移植性困难等不足。此外，由于光伏电源的输出特性较“软”，在负载发生波动时，系统容易失稳，产生波动和振荡，导致光伏出力低。针对以上情况，本文提出自适应的光伏全局最大功率点追踪方案，具体方案如下文所述。

1 光伏阵列输出特性仿真分析

在 PSCAD-EMTCD 中建立小型光伏电站的仿真模型如图 1 所示。PV₁~PV₄为串联的同参数光伏阵列；每个阵列包含 25 串 200 并的光伏模块；每一光伏模块均由 9 个串联的光电池单元构成，表 1 为仿真中单个光电池所使用的参数。光伏电站出口处开路电压 $U_{oc} = U_{oc}^* \times 9 \times 25 \times 4 = 751.5 \text{ V}$ ，短路电流 $I_{sc} = I_{sc}^* \times 200 = 500 \text{ A}$ 。Rad₁~Rad₄分别为 PV₁~PV₄阵列区的光照强度对应数值，单位均为 W/m^2 。为方便与后续仿真及实验研究进行数据对比，特取 4 组典型光照分布值如表 2 所示，并通过仿真计算出全局最大功率点的电压和功率值，表中分别用符号 P_{gmpp} 和 U_{mpp} 表示。图 2 为典型光照分布 $S_0 \sim S_3$ 下对应的电压-电流曲线分别为 $I_0 \sim I_3$ ，电压-功率曲线分别为 $P_0 \sim P_3$ 。从功率曲线形状可知，仅在光伏面板都处于同一辐照的理想状态下功率曲线才为单一峰值；而实际情况下功率曲线多存在数个峰值点，这是最大功率点追踪技术的难点所在。

表 1 仿真中单个光电池的参数

Table 1 Parameters of single photocell in simulation

参数	数值
短路电流 I_{sc}^*/A	2.5
开路电压 U_{oc}^*/V	0.835
参考光照强度 $S_0/(\text{W/m}^2)$	1 000
串联电阻 R_s/Ω	0.002

表 2 典型光照分布对应全局功率最大值的仿真数据

Table 2 Simulation data of global maximum power corresponding to typical illumination distribution

光照强度	Rad ₁	Rad ₂	Rad ₃	Rad ₄	P_{gmpp}/kW	U_{mpp}/V
S_0	1 000	1 000	1 000	1 000	286.52	609.76
S_1	1 000	1 000	1 000	500	213.87	455.56
S_2	1 000	1 000	500	250	140.64	300.16
S_3	1 000	750	500	250	119.01	487.76

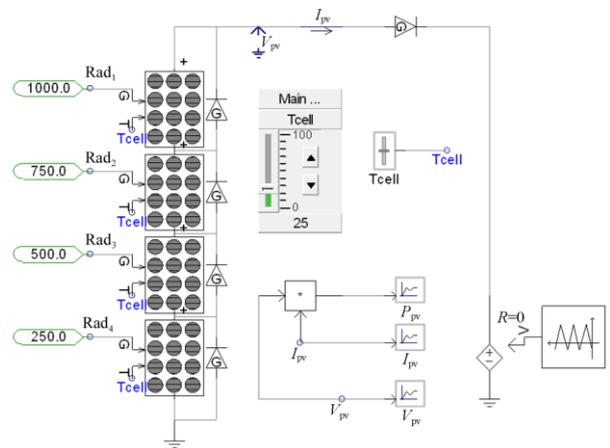


图 1 光伏阵列输出仿真电路

Fig. 1 PV array output simulation circuit

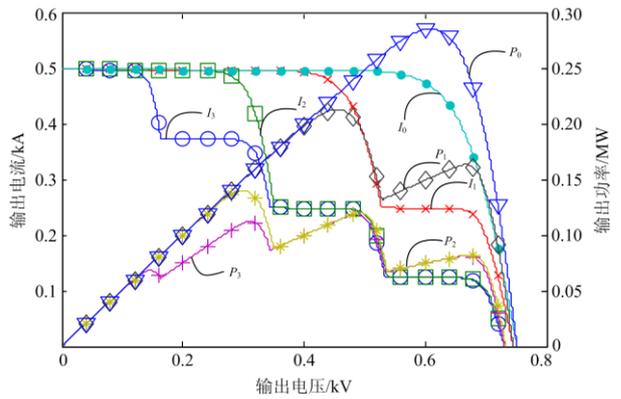


图 2 典型光照时电流和功率相对电压的仿真曲线

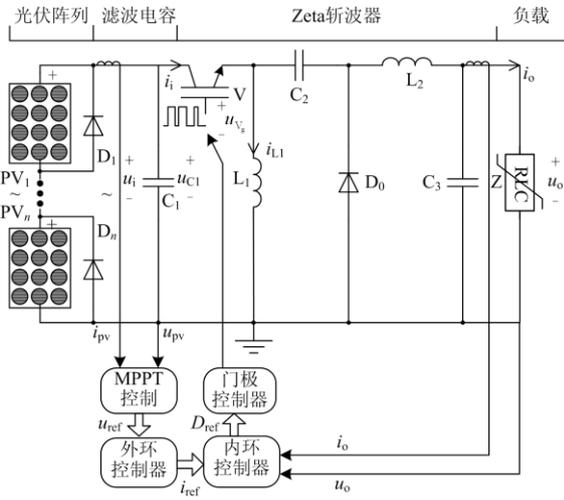
Fig. 2 Simulation curves of current and power VS voltage under typical illumination

2 总体设计

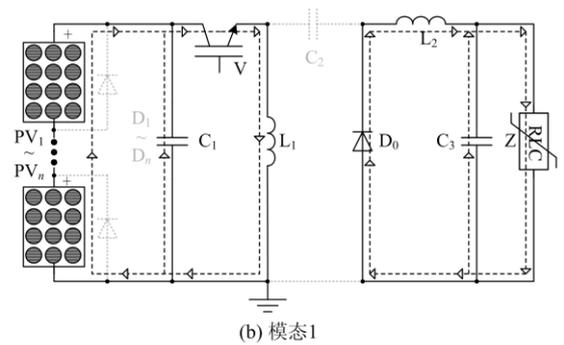
图 3(a)为所设计系统的主电路拓扑及控制电路框图。图中上部为主电路，左侧 PV₁~PV_n表示若干个光伏面板、D₁~D_n表示若干个防“热斑”二极管、C₁为光伏输出端的并联电容，以上元件组成光伏电源；中间为 Zeta 斩波器；右侧为可变负载，使用可调阻抗 Z 来表示。图 3(a)下部为控制电路框图，工作过程中，控制电路需要实时采集光伏阵列输出端口的电压 u_{pv} 和电流 i_{pv} 以及负载端的电压 u_o 和电流 i_o 。首先通过 MPPT 控制算法得到当前工况下全局最大功率点对应电压，将其作为电压外环的参考电压，经过电压外环控制器、电流内环控制器及门极控制器的控制得到开关管 V 的电压控制信号。

该电路包含四个工作模式，各模式时电路工作状态如图 3(b)~3(d)所示，其中半消隐虚线表示该时段中未激活的元件和线路，带剪头虚线表示该时

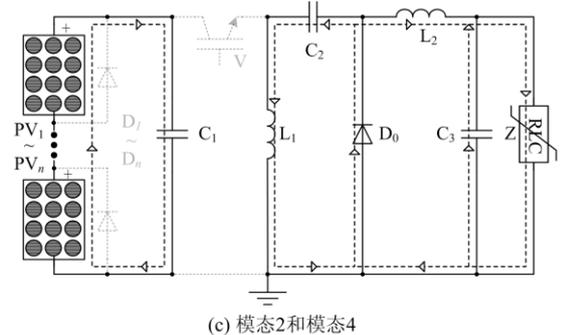
段工作回路中电流参考方向, 各阶段中关键信号的波形如图 4(a)所示, 模态转换图如图 4(b)所示。系



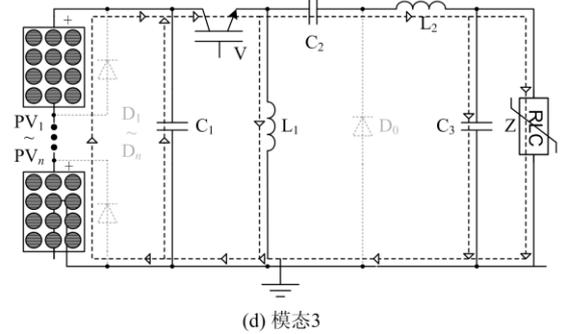
(a) 主电路拓扑及控制电路框图



(b) 模态1



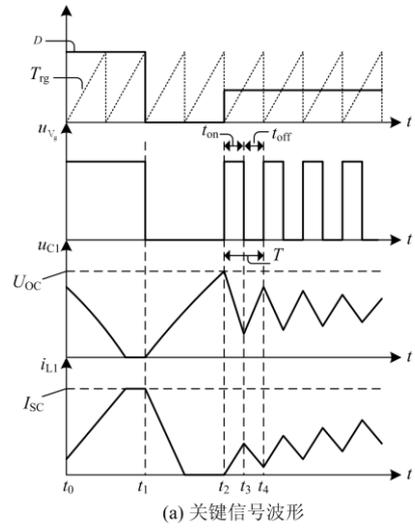
(c) 模态2和模态4



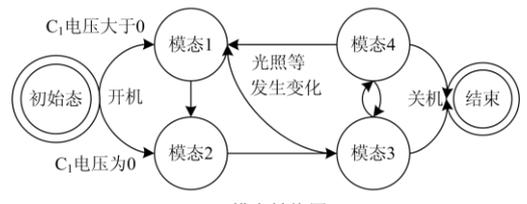
(d) 模态3

图 3 系统硬件电路及各模态工作状态

Fig. 3 System hardware circuit and working states



(a) 关键信号波形



(b) 模态转换图

图 4 关键信号波形及模态图

Fig. 4 Waveform of key signals and modal diagram

统开机后, 若 C_1 电压大于 0, 则进入模态 1 进行放电; 待 C_1 电压为 0 时进入模态 2 电压功率扫描得到现况全局最大功率点信息; 随后, 依次进入模态 3 和模态 4 进行 PWM 开关控制, 并在两模态间循环; 当现况外部条件如光照或温度发生变化时, 则退出 PWM 状态重新扫描新的全局最大功率点。

3 电路分析与参数计算

3.1 模态 1 扫描准备阶段 t_0-t_1

该模态中工作元件和线路如图 3(b)所示。此时 V 导通, 光伏阵列和 C_1 向 L_1 充电, L_1 的电流增大, C_1 电压逐渐减小至 0 V。 C_1 电压接近 0 V 时, 该模态结束进入模态 2。该模态是为模态 2 扫描光伏阵列电压功率特性做准备, 若 C_1 未充电, 则此过程直接跳过。

3.2 模态 2 电压扫描阶段 t_1-t_2

该模态各元件和线路的工作状态如图 3(c)所示, V 关断, C_1 仅与光伏阵列相连, 其电压被光伏阵列逐渐充到 U_{oc} 。充电过程中, 实时采集光伏阵列输出端的电压与电流, 并计算出瞬时功率。通过比较可得现况下全局最大功率点 P_{gmpp} 及其对应的电压 U_{mpp} 。因此, 该模态是实现全局 MPPT 的基础, 决定后续的追踪目标设定是否准确。当 C_1 电压充至

接近 U_{oc} 时, 该模态结束, 进入模态 3。

3.3 模态 3 PWM 导通阶段 t_2-t_3

该模态各元件和线路的工作状态如图 3(d)所示, V 导通, 光伏阵列与 C_1 、 C_2 一起给 C_3 、 L_1 、 L_2 等储能元件及负载 Z 供电。光伏吸收的太阳能除供负载消耗掉外, 其余部分转换成 C_3 中的电场能和 L_1 、 L_2 中的磁场能。若光照等外部环境因素不变, 则经过 t_{on} 时间后进入模态 4; 否则进入模态 1。

$$t_{on} = D \times T = D / f \quad (1)$$

式中: D 为 PWM 阶段时开关管 V 的占空比; T 和 f 分别为开关周期和频率。

3.4 模态 4 PWM 关断阶段 t_3-t_4

该模态各元件和线路的工作状态如图 3(c)所示, V 关断, 光伏阵列给 C_1 充电, L_1 通过 D_0 给 C_2 充电, C_3 和 L_2 一起给负载 Z 供电。光伏吸收的太阳能转换为 C_1 中的电场能存储起来, L_1 中的磁场能转换成 C_2 中的电场能。若光照等外部环境因素不变, 则经过 t_{off} 时间后进入模态 3; 否则进入模态 1。

3.5 自适应占空比 D 的计算

由文献[26-27]可知, Zeta 变换电路输出电压 U_o 与输入电压 U_i 的变比公式如下, 其中 D 为开关管 V 的控制脉冲占空比。

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{I_i}{I_o} = \frac{D}{1-D} \quad (2)$$

由图 4(a)可知, 光伏阵列与 C_1 并联后接到 Zeta 输入端, 因此, 光伏阵列输出电压瞬时值 u_{pv} 、电容 C_1 端电压瞬时值 u_{C1} 、Zeta 斩波电路输入电压瞬时值 u_i 三者相等。在稳态下, 若不考虑 C_1 及 Zeta 变换电路的损耗, 则在一个 PWM 周期内, 光伏平均输出功率 $P_{pv}=U_{pv} \cdot I_{pv}$ 、Zeta 平均输入功率 $P_i=U_i \cdot I_i$ 、输出功率 $P_o=U_o \cdot I_o$ 三者相等, 即

$$U_{pv} \cdot I_{pv} = U_i \cdot I_i = U_o \cdot I_o \quad (3)$$

为方便说明, 假设在模态 2 已扫描出当前工况下, 光伏阵列的电流和功率相对电压的特征曲线如图 5 所示, 从图可知, 现况下全局最大功率点 $P_{gmpp}=0.119 \text{ MW}$, 对应电压为 $U_{mpp}=0.4875 \text{ kV}$, 则可计算出对应电流 $I_{mpp}=0.2441 \text{ kA}$ 。进一步可计算出光伏阵列的输出阻抗为

$$Z_{mpp} = \frac{U_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{1}{Y_{mpp}} \quad (4)$$

式中, Y_{mpp} 为全局最大功率点对应的光伏输出导纳, 即图 5 中过电流-电压直角坐标系原点的直线 Y_2 所对应的导纳。当为其他导纳值时, 则系统偏离最大功率点, 如取 Y_1 和 Y_3 对应导纳时, 则陷入局部极值点。

为使电路工作于全局最大功率点, 则必须使 Zeta 变换器输入阻抗和等效输出阻抗(从输入端看)与前述阻抗匹配, 即三者相等。由此可得

$$Z_{mpp} = Z_i = Z_{o-eq} \quad (5)$$

综合式(2)和式(5)可得

$$\frac{U_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_o}{I_o} \times \left(\frac{1-D}{D} \right)^2 \quad (6)$$

由式(6)可得

$$\frac{1-D}{D} = \sqrt{\frac{U_{mpp} \cdot I_o}{I_{mpp} \cdot U_o}} \quad (7)$$

解得

$$D = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{U_{mpp} \cdot I_o}{I_{mpp} \cdot U_o}}} \quad (8)$$

由式(8)可知, D 由光伏阵列的输出特性及负载情况确定, 如果光伏阵列所处外部环境因素发生变化, 则进入模态 1 和模态 2, 通过电压扫描确定新的光伏阵列输出特性及全局最大功率点; 若外部环境因素不变, 则进入并保持在模态 3 或模态 4 时, U_{mpp} 和 I_{mpp} 保持不变, 而负载可能因为用电器的切入和切出发生波动, 若要使工作点锁定在全局最大功率点, 则必须采集能反应负载情况的输出端电压和电流, D 应根据负载情况由式(8)确定。

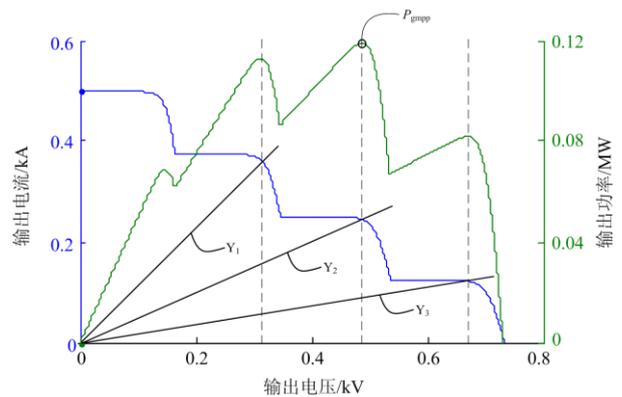


图 5 光伏系统工作点的导纳平衡
Fig. 5 Conductance balance of photovoltaic system operating point

4 算法设计与仿真

4.1 算法设计

主程序流程、瞬时功率软件滤波处理和光伏电压功率扫描算法参见文献[28], 在此重点介绍优化后的 PWM 算法。

如图 6 所示, 首先通过光伏电压功率扫描算法获得全局最大功率点对应的光伏阵列工作电压 U_{mpp} , 将该电压作为电压控制外环的参考值 U_{pvref} , 它与光伏实际电压值 U_{pv} 进行比较, 产生电压偏差量 ΔU_{pv} , 将此偏差量送入电压 PI 控制器进行调节, 得到内环电流参考值 I_{pvref} ; 该值与光伏实际电流值 I_{pv} 进行比较, 产生电流偏差量 ΔI_{pv} , 将此偏差量送入电流 PI 控制器进行调节, 得到门极控制环占空比参考值 D_{ref} ; 该值与式(8)计算得到的计算占空比 D_{clc} 进行比较, 得到占空比偏差量 ΔD , 将该值再送到占空比 PI 控制器进行调节, 得到占空比目标值, 该值与锯齿波进行比较, 得到开关管门极控制信号。

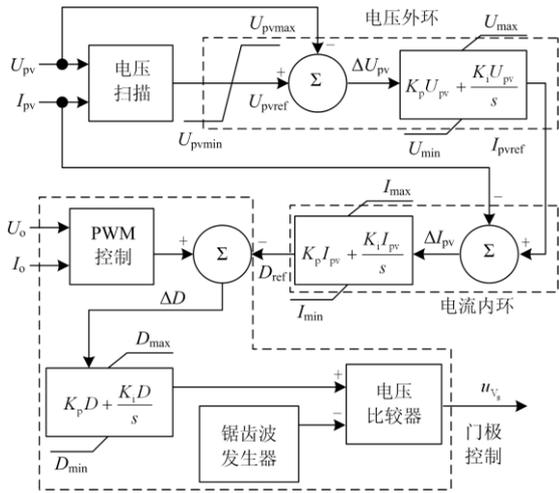


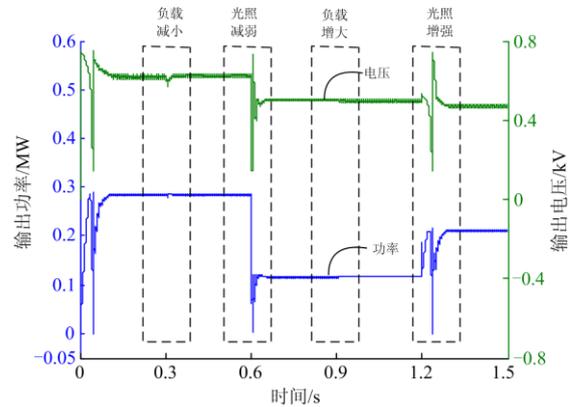
图 6 PWM 算法结构图

Fig. 6 Algorithm flow chart of PWM

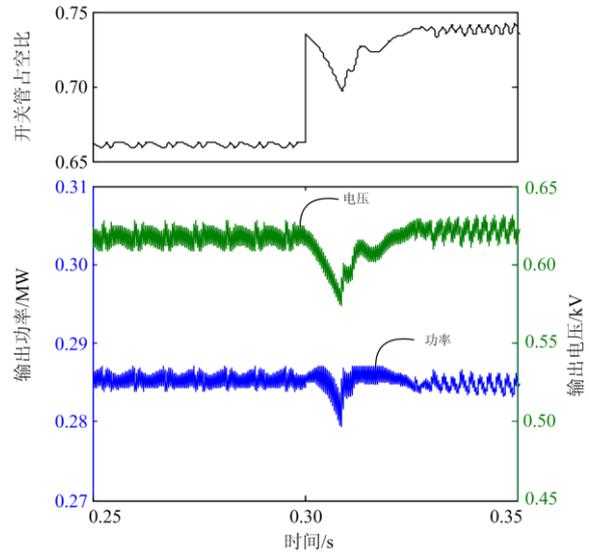
4.2 仿真研究

为验证算法的可行性, 按前述设计思路在 PSCAD-EMTCD 软件中建立仿真模型。总仿真时间 1.5 s, 初始光照为表 2 中 S_0 组合, 在 0.6 s 时光照减弱至 S_3 组合, 在 1.2 s 时增强至 S_1 ; 初始负载阻抗为 5Ω , 在 0.3 s 时负载阻抗突变为 10Ω , 在 0.9 s 时负载再次突变为 7.5Ω 。图 7(a) 为整个仿真过程中光伏电站出口电压和功率的变化波形曲线。图 7(b) 和图 7(c) 分别为负载突降和突增时, 光伏电站出口电压和功率的局部放大图, 从图中可以看出, 负载变化时, 系统能在 0.03 s 内快速自适应调整开关管占空比, 抑制电压大幅波动, 使系统重新进入稳态平衡, 且调整前后系统单位时间内的平均输出功率为全局最大功率的 97.5% 以上。图 7(d) 和图 7(e) 分别为光照减弱和增强时, 光伏电站出口电压和功率的局部放大图, 从图中可以看出, 光照发生变化时, 系统能在 0.05 s 内快速扫描确定光伏系统新的全局最大功率点, 并在 0.05 s 内将系统锁定到该工作点,

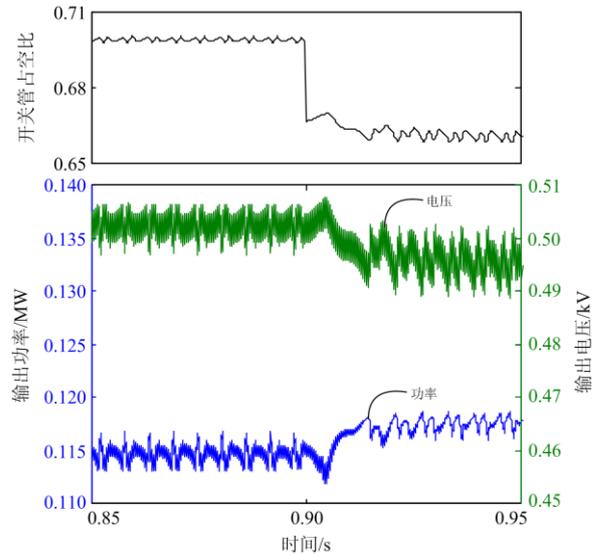
使新的稳态下平均输出功率为当前全局最大功率的 95% 以上。各时间段实际功率平均值与全局最大功率的比值如表 3 所示。



(a) 负载和光照变化时电压和功率曲线



(b) 负载减小



(c) 负载增大

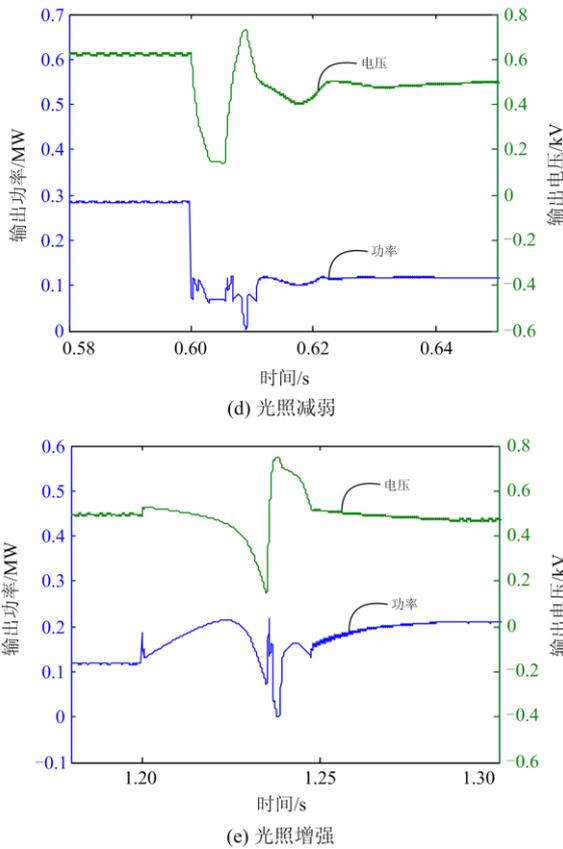


图7 系统仿真结果

Fig. 7 System simulation results

表3 仿真数据分析

Table 3 Simulation data analysis

时间/s	光照组合	最大功率 P_{gmax}/kW	实际平均值 P/kW	$\frac{P}{P_{gmax}}$
0.1~0.6	S_0	286.52	284.85	99.42%
0.7~1.2	S_3	119.01	116.49	97.88%
1.3~1.5	S_1	213.87	210.83	98.58%

5 实验结果与数据分析

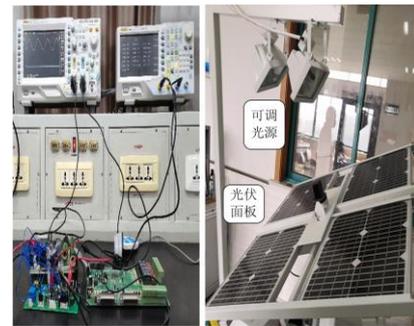
为进一步验证设计方案, 制作的样机主要参数如表4所示。

表4 样机关键参数

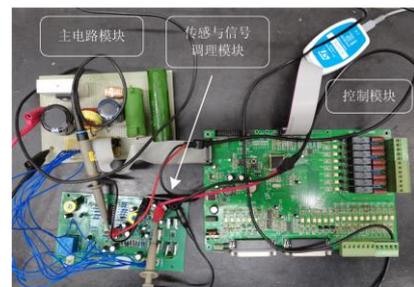
Table 4 Key parameters of prototype

元件名称	参数值或型号
PV ₁ —PV ₄	$P_{mpp}=300\text{ W}$, $U_{oc}=39.28\text{ V}$, $I_{sc}=10\text{ A}$, $U_{mpp}=32.1\text{ V}$, $I_{mpp}=9.35\text{ A}$
C ₁ 、C ₂ 、C ₃	100 μF 、4.7 μF 、22 μF
L ₁ 、L ₂	50 mH、20 mH
Q、开关频率	IPB50R140CP、20 kHz
主控芯片	STM32F407ZE

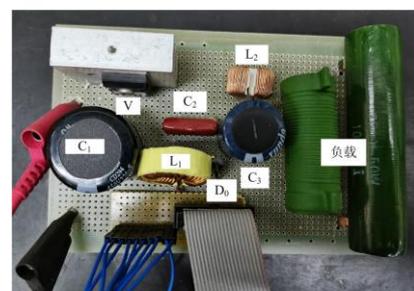
图8(d)中波形为光照强度取 S_1 , 负载阻抗由 $5\ \Omega$ 突变为 $10\ \Omega$ 前后70 ms内, 光伏阵列输出端的电压、功率和电流波形; 图8(e)中波形为光照强度取 S_3 , 负载阻抗由 $10\ \Omega$ 突变为 $7.5\ \Omega$ 时, 光伏阵列输出端的电压、功率和电流波形; 从上述波形图可以看出, 不管是均匀光照还是局部阴影工况下, 系统均能在10 ms内重新进入稳态平衡, 且调整过程中各参量的波动幅度均能控制在10%内, 避免了系统剧烈波动与振荡, 减小了开关管的开关应力。图8(f)为负载阻抗等于 $10\ \Omega$, 光照由表2中 S_1 组合减弱至 S_4 组合时, 光伏阵列输出端的电压、功率和电流波形; 图8(g)为负载阻抗等于 $7.5\ \Omega$, 光照由表2中 S_4 组合增强至 S_2 组合时, 光伏阵列输出端的电压、功率和电流波形; 从上述波形图可以看出, 无论是光照增强还是减弱, 系统均能在5 ms内实现新全局最大功率点的追踪, 在下一个5 ms内实现该全局最大功率点的锁定。且通过实验数据测算, 在稳态状态下, S_0 、 S_1 和 S_3 三种实验光照组合下, 10 min的实际能量捕获效率均不低于99.95%。



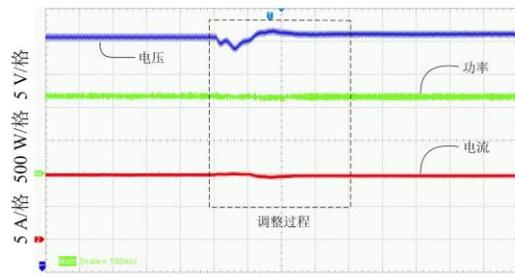
(a) 试验平台实物图



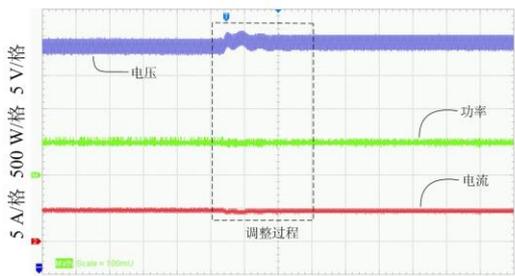
(b) 试验平台主要硬件模块



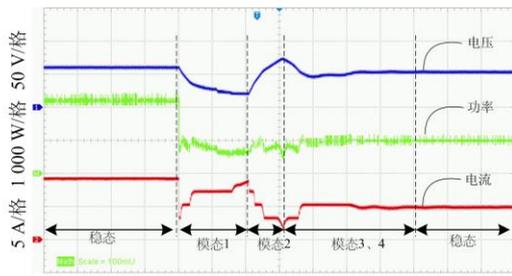
(c) 主电路模块



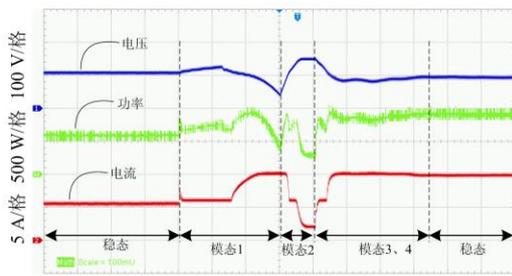
(d) 负载减小



(e) 负载增大



(f) 局部光照减弱



(g) 局部光照增强

图 8 样机实验波形

Fig. 8 Prototype test waveform

6 方案对比分析

为聚焦局部阴影工况下最大功率点追踪这个关键问题，现重点研究提供该问题解决方案的 3 篇文章，将这些方案与本文所述方案进行对比研究，从文献原文中提取了各解决方案的仿真及实验数据，对各方案在主电路拓扑、算法复杂程度、追踪时间及能量捕获效率方面进行对比，具体数据见表 5，

其中同时提供仿真和实验数据的以实验数据为准，仅提供仿真数据的采用仿真数据，并以括号中的“仿真”字样进行标注。

表 5 方案性能对比研究

Table 5 Performance comparison of different schemes

方案	主电路	算法复杂程度	追踪时间/s	效率/%
文献[16]	Boost	复杂	0.25~0.92(仿真)	99.4(仿真)
文献[17]	Buck-Boost	复杂	0.5~0.6	99.8(仿真)
文献[29]	Boost	中等	0.025~0.050	99.97
本文	Zeta	简单	0.007~0.008	99.95

文献[16]采用差分进化人工蜂群算法，文献[16]采用粒子群算法，以两者为代表的智能算法，在均匀光照和局部阴影工况下均能实现全局最大功率点的追踪，但上述文献中的算法均采用带负载扰动逐次逼近最大功率点，因为在算法收敛到目标位置前，目标始终未确定，迭代与扰动次数多，且为带负载扰动，由于电路中的电容与电感等储能元件的影响，单次扰动后达到稳态的过渡时间长，导致追踪目标的总时间较长，通常都为 100 ms 级以上。与其相比，本文所述算法简单可靠，仅需要录入光伏阵列的开路电压一个参数，具有参数设置简单，不需要依靠经验等优点。且本文所述方案扫描过程不带负载，确定全局最大功率点电压的时间短，虽然 PWM 调节过程是带负载工作，但是因为调整的电压目标确定，因此整个追踪过程的时间短，通常为 10 ms 以下。从表 5 中的数据对比可以看出，本方案相对于文献[16]和文献[17]代表的智能算法在能量捕获效率方面大致相当，但在算法实施难度和追踪的速度方面，优势明显，速度有 10 倍左右提升。

文献[29]先采用扫描法确定全局最大功率点所在位置，再用粒子群算法实现追踪，既然通过扫描过程已经确定了全局最大功率点的电压，使用粒子群算法是否还有意义值得商榷，因为粒子群算法的主要功能为搜寻最大功率点。本方案与其相比，相同之处为两者均通过扫描法确定最大功率点。但两者存两个主要区别，其一为主电路硬件拓扑，文献[29]为 Boost 斩波电路，而本系统采用 Zeta 斩波电路，在扫描过程中，本方案将开关设为关断状态，光伏阵列和 C_1 组成的电压-功率扫描电路与 Zeta 斩波及负载等后级电路隔离，避免后级电路中电容、电感等储能元件影响该扫描过程，加快了扫描的速度及数据的真实性，而文献[29]无论开关管状态如何均无法实现这种隔离，扫描过程为带负载扫描，既费时又影响扫描数据的准确性。其二为前述

PWM 阶段的算法, 本文采用三环 PI 控制算法, 相对于粒子群算法, 计算量小, 对控制器要求不高, 易于推广。从表 5 数据可以看出, 二者能量捕获效率方面也大致相当, 但本方案在追踪速度方面提高 3~5 倍。

7 结语

为实现包括局部阴影等复杂工况下光伏阵列全局最大功率点的快速追踪, 将电压-功率扫描方法和 Zeta 斩波电路进行结合, 形成一种快速光伏全局最大功率点追踪方案。该方案具有以下优点。

1) 相对现有光伏全局最大功率点追踪技术, 追踪速度可提高 3 倍以上。

2) 在负载发生突变时能自适应调整开关占空比, 抑制电压和电流过大波动, 锁定全局最大功率点, 实现光伏能量稳定高效转换。

3) 算法简单, 对控制器性能要求低, 易于推广。

参考文献

- [1] SHANG Liqun, GUO Hangchen, ZHU Weiwei. An improved MPPT control strategy based on incremental conductance algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 176-163. DOI: 10.1186/s41601-020-00161-z.
- [2] MAZEN A S, MOHAMED-THARWAT E M, MOHAMED G. An improved perturb-and-observe based MPPT method for PV systems under varying irradiation levels[J]. Solar Energy, 2018, 171: 547-561.
- [3] 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. ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107.
- [4] SALMAN S, AI Xin, WU Zhouyang. Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200 W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [5] 张开, 石季英, 林济铿, 等. 基于自适应滑模层极值搜索的光伏发电最大功率跟踪方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 33-37. ZHANG Kai, SHI Jiying, LIN Jikeng, et al. Maximum power point tracking method for photovoltaic systems using adaptive extremum seeking control based on sliding layer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 33-37.
- [6] 吴登盛, 王立地, 刘通, 等. 基于神经网络的光伏阵列多峰 MPPT 的研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(7): 69-74. WU Dengsheng, WANG Lidi, LIU Tong, et al. Research on multi-peak MPPT of PV array based on neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(7): 69-74.
- [7] 薛家祥, 陈海峰. 基于卷积神经网络的光伏阵列污染报警系统[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 54-59. XUE Jiaxiang, CHEN Haifeng. Photovoltaic array pollution alarm system based on convolution neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 54-59.
- [8] VILLA L F L, PICAULT D, RAISON B, et al. Maximizing the power output of partially shaded photovoltaic plants through optimization of the interconnections among its modules[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2012, 2(2): 154-163.
- [9] VILLA L F L, HO T P, CREBIER J C, et al. A power electronics equalizer application for partially shaded photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 1179-1190.
- [10] MISHIMA T, OHNISHI T. Power compensation system for partially shaded PV array using electric double layer capacitors[C] // IEEE Annual Conference on Industrial Electronics Society, November 5-8, 2002, Seville, Spain: 3262-3267.
- [11] 葛双治, 杨凌帆, 刘倩, 等. 基于改进 CPSO 的动态阴影环境下光伏 MPPT 仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 151-157. GE Shuangye, YANG Lingfan, LIU Qian, et al. Research on photovoltaic MPPT simulation under dynamic shadow environment on modified CPSO[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 151-157.
- [12] 孙立明, 杨博. 基于自适应罗盘搜索的集中式温差发电系统 MPPT 设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 140-148. SUN Liming, YANG Bo. MPPT design of centralized thermoelectric generation system using adaptive compass search[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 140-148.
- [13] HARRAG A, MESSALTI S. PSO-based SMC variable step size P&O MPPT controller for PV systems under fast changing atmospheric conditions[J]. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 2019, 32(5): 1-24.
- [14] MAO Mingxuan, DUAN Qichang, DUAN Pan, et al. Comprehensive improvement of artificial fish swarm algorithm for global MPPT in PV system under partial shading conditions[J]. Transactions of the Institute of

Measurement and Control, 2018, 40(7): 2178-2199.

[15] 韩鹏, 李银红, 何璇, 等. 结合量子粒子群算法的光伏多峰最大功率点跟踪改进方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 101-108.
HAN Peng, LI Yinhong, HE Xuan, et al. Improved maximum power point tracking method for photovoltaic multi-peak based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 101-108.

[16] 盛四清, 陈玉良, 张晶晶. 基于差分进化人工蜂群算法的光伏最大功率点跟踪策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 46(1): 23-29.
SHENG Siqing, CHEN Yuliang, ZHANG Jingjing. Research on maximum power tracking strategy based on differential evolution artificial bee colony algorithm of photovoltaic system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 46(1): 23-29.

[17] ISHAQUE K, SALAM Z. A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3195-3206.

[18] KIM J C, HUH J H, KO J S. Improvement of MPPT control performance using fuzzy control and VGPI in the PV system for micro grid[J]. Sustainability, 2019, 11(21).

[19] HASSAN T U, ABBASSI R, JERBI H, et al. A novel algorithm for MPPT of an isolated PV system using push pull converter with fuzzy logic controller[J]. Energies, 2020, 13(15).

[20] 李兴鹏, 石庆均, 江全元. 双模糊控制法在光伏并网发电系统 MPPT 中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 55-60.
LI Xingpeng, SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Application of double fuzzy control in MPPT of grid-connected photovoltaic generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 55-60.

[21] 吴国沛, 张行, 王红斌, 等. 用户可中断负荷特性模糊综合评估策略研究[J]. 供用电, 2020, 37(3): 78-83.
WU Guopei, ZHANG Hang, WANG Hongbin, et al. Research on fuzzy comprehensive evaluation strategy of user interruptible load characteristics[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(3): 78-83.

[22] 袁晓燕, 陶钰磊, 何飞宇. 基于模糊聚类的配电网极限线损率计算方法[J]. 供用电, 2019, 36(11): 71-77.
YUAN Xiaoyan, TAO Yulei, HE Feiyu. Method for estimating limit line loss rate of distribution network based on FCM[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(11): 71-77.

[23] 阳同光, 桂卫华. 神经网络反推控制在光伏最大功率点跟踪中的应用[J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3030-3036.
YANG Tongguang, GUI Weihua. Maximum power point tracking of PV system based on neural network back stepping control[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(12): 3030-3036.

[24] 王志豪, 李自成, 王后能, 等. 基于RBF神经网络的光伏系统 MPPT 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 85-91.
WANG Zhihao, LI Zicheng, WANG Houneng, et al. MPPT study of solar PV power system based on RBF neural network algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 85-91.

[25] ALMUTAIRI A, ABO-KHALIL A G, SAYED K, et al. MPPT for a PV grid-connected system to improve efficiency under partial shading conditions[J]. Sustainability, 2020, 12(24).

[26] 李磊, 仲庆龙. Zeta式三电平交流斩波器的控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(6): 56-57.
LI Lei, ZHONG Qinglong. Control strategy of zeta mode three-level AC chopper[J]. Power Electronics, 2012, 46(6): 56-57.

[27] 王立乔, 李占一, 杨彬. 一种新型无电解电容的单级 Zeta 逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4221-4230.
WANG Liqiao, LI Zhanyi, YANG Bin. A novel single-stage zeta inverter with non-electrolytic capacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4221-4230.

[28] 宁平华, 胡雪峰, 陈乐柱, 等. 基于电压-功率扫描的光伏多峰快速 MPPT 方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 23-30.
NING Pinghua, HU Xuefeng, CHEN Lezhu, et al. Photovoltaic multi-peak fast MPPT method based on voltage-power scanning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(11): 23-30.

[29] SELVAKUMAR S, MADHUSMITA M, KODALSAMY C, et al. High-speed maximum power point tracking module for PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1119-1129.

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-04-30

作者简介:

宁平华(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子与光伏发电技术; E-mail: 124946232@qq.com

张庆丰(1974—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为智能电网控制技术; E-mail: 827207969@qq.com

冯德仁(1967—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子技术与控制技术、脉冲功率技术. E-mail: fdr@ustc.edu.cn

(编辑 许威)