

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181571

基于参考电流型光伏发电系统变功率输出控制策略

杨明, 鲍靖雯, 高龙将, 黄旭, 孙岩洲

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对两级式光伏并网发电系统变功率输出技术的研究及应用现状, 提出了一种新型的参考电流型变功率输出控制策略。通过光伏功率与指定功率的比较, 实时改变光伏电流, 可以实现最大功率跟踪和指定功率跟踪两种功率输出模式, 并且在日照强度变化情况下能够快速有效地控制光伏功率的输出。所提控制策略对 Boost 变换器进行小信号建模, 详细分析了不同功率下光伏阵列等效阻抗对前级系统稳定性的影响, 并介绍了双模式功率输出的控制器设计。最后仿真和实验结果验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 变功率输出; 参考电流型; 指定功率; 等效阻抗; 前级系统

Variable power output control strategy for photovoltaic power generation system based on reference current mode

YANG Ming, BAO Jingwen, GAO Longjiang, HUANG Xu, SUN Yanzhou

(School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: According to the research and application status of variable power output control in two-stage grid-connected photovoltaic (PV) system, a novel variable power output control strategy based on reference current mode is proposed. By comparing the constant power with the PV power and changing the current of PV, this method is able to realize two PV power output modes, i.e. MPPT mode and constant power generation (CPG) tracing mode, and also can control the PV power output fast and effectively under different solar irradiation. A small signal model of Boost converter is built by using the proposed control strategy. It analyzes the impact of PV array equivalent impedance on pre-stage system stability under different power in detail and introduces the controller design of two modes power output. Finally, the simulation and experiment results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1804143 and No. 61703144) and Key Science and Technology Project of Colleges and Universities of Henan Education Department (No. 17A470010).

Key words: variable power output; reference current mode; constant power; equivalent impedance; pre-stage system

0 引言

随着地球环境的恶化和化石能源的枯竭, 太阳能因其无污染、储量巨大等其它能源所不可比拟的优势而备受青睐^[1-4]。尤其是对于光伏发电系统, 为了提高能量利用效率, 实时输出最大功率, 即实现最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[5-9]。然而, 对于独立的家庭型光伏发电系统, 当储能单元所存储能量已达到峰值, 而且光伏发电系统输出功率又远大于负荷所需求功率时, 多余的

功率将会引起频率偏移、电压越限等问题, 此时应减小光伏输出功率, 根据负荷曲线输出功率。而对于大型光伏电站, 在系统调频、调峰等特定情况下, 调度可能会要求系统按照指定功率发电^[10-12]。不仅如此, 当电网由于系统短路故障而出现短时暂态跌落时, 光伏并网逆变器在故障穿越过程中易出现过流问题甚至烧坏设备, 严重影响系统运行可靠性^[13-15]。因此, 使光伏发电系统具备按照指定功率发电(Constant Power Generation, CPG)的功能对提高电能质量与系统稳定性有着重要作用。

然而有关特定场合需要控制光伏发电系统进行指定功率发电的文献甚少。文献[16]提出的基于

基金项目: 国家自然科学基金资助(U1804143, 61703144); 河南省教育厅高等学校重点科研项目(17A470010)

电导增量法的定功率输出控制策略, 原理简单, 但并未提及若光伏发电系统所发出最大功率未能达到指定功率时系统该如何工作; 文献[17]提出的基于高阶构造函数的功率控制策略, 虽然实现了指定功率之间的平滑切换控制, 但实现过程过于繁琐, 实用性低。

本文针对两级式光伏并网发电系统, 通过分析光伏功率与光伏电流的 $P-i$ 特性曲线关系, 提出了一种新型的参考电流型变功率输出控制策略。将计算得出的光伏功率与指定功率进行比较, 实时改变光伏电流的大小, 能够快速有效地实现最大功率跟踪和指定功率跟踪两种功率输出模式, 并详细分析了不同功率下的光伏阵列等效阻抗对前级系统的影响。最后在 Matlab/Simulink 对所提控制策略进行仿真验证, 并在 RT-LAB 半实物实时仿真平台进行实验研究, 证明了所提控制策略具有良好的跟踪精度和较强的稳定性能, 实现了变功率输出。

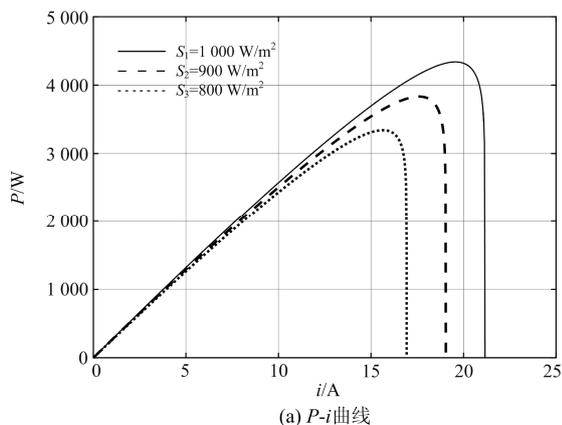
1 光伏阵列模型

光伏电池是利用半导体的光伏效应制成, 用于将太阳能直接转化为电能, 其 $i-u$ 特性曲线方程^[18]可表示为

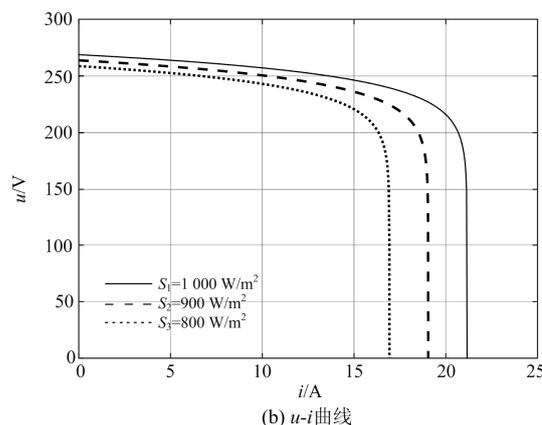
$$i = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(u + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{u + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I_L 表示光电流; I_0 表示反向饱和电流; K 表示波尔兹曼常数, $K=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$; q 表示电子电荷, $q=1.6 \times 10^{19} \text{C}$; T 表示绝对温度; A 表示二极管因子; R_s 表示串联电阻; R_{sh} 表示并联等效电阻。

根据文献[19]对电路模型进行简化处理, 可得到一个较实用的工程用数学模型, 并且基于 Matlab/Simulink 软件建立光伏阵列模型, 可模拟出不同日照强度下的 $P-i$ 和 $u-i$ 输出特性曲线如图 1 所示。



(a) $P-i$ 曲线



(b) $u-i$ 曲线

图 1 光伏阵列特性曲线

Fig. 1 Characteristic curve of photovoltaic

由图 1(a)所示的 $P-i$ 曲线可知, 在光伏电池温度一定时, 光伏阵列最大输出功率随着日照强度的增高而增大, 且随着日照强度不断增高, 光伏阵列的短路电流也在不断增大。由图 1(b) $u-i$ 曲线可知光伏阵列每个输出电流对应着一个输出电压, 并且只存在唯一一个电压与之对应。

2 参考电流型变功率输出控制策略

2.1 两级式光伏并网发电系统

本文所提的变功率输出控制策略以两级式光伏并网发电系统为例进行设计, 其主电路结构框图如图 2 所示。主要由光伏阵列、Boost 变换器、逆变器及 LCL 滤波器等环节构成。其中前级控制系统通过 MPPT/CPG 双模式方案自动计算光伏阵列参考电流并实现按指定功率发电功能, 后级逆变器控制用以维持直流母线电压稳定并实现高质量并网功能。

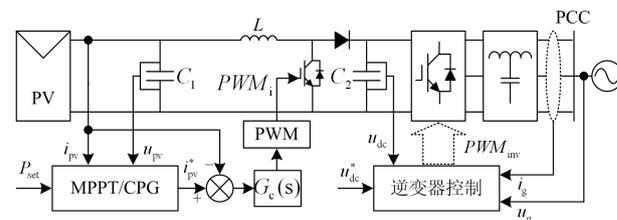


图 2 两级式光伏并网发电系统变功率控制结构

Fig. 2 Control diagram of two-stage PV system with variable power point tracking

图 2 中, C_1 表示输入电容, C_2 表示直流链电容, L 表示 Boost 电感, i_{pv} 和 u_{pv} 分别表示光伏阵列输出电流和实际电压, P_{set} 表示光伏发电系统指定功率, i_{pv}^* 表示光伏阵列参考电流, $G_c(s)$ 表示前级系统控制器, u_{dc} 和 u_{dc}^* 分别表示后级系统直流母线实际电压和参考电压, u_g 表示电网电压, i_g 表示并网电流,

具体参数大小如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model

参数名称	取值及单位
输入电容 C_1	50 μF
Boost 电感 L	3.0 mH
直流链电容 C_2	2 000 μF
直流母线参考电压 u_{dc}^*	500 V
电网电压有效值 u_g	220 V
逆变器开关频率 f_{sw}	10 kHz

2.2 变功率输出控制策略

本文所提出的变功率控制策略，是当光伏发电系统需按照调度分配进行指定功率发电时，通过光伏输出功率与指定功率进行比较，实时改变光伏电流的大小来实现光伏最大功率输出或指定功率输出两种功率输出模式：

- 1) MPPT 模式，当光伏阵列实际输出功率 P 大于此时所要求发出的功率 P_{set} ；
- 2) CPG 模式，当光伏阵列实际输出功率 P 小于或等于此时所要求发出的功率 P_{set} 。

由图 1(a)所示的 $P-i$ 输出特性曲线可知当系统运行在 CPG 模式时，在最大功率点两侧各有一点可使光伏阵列输出指定功率。若跟踪左侧指定功率点，当光伏电流有细微变化时，其对应的光伏输出功率波动较小，即具有功率损失小、跟踪精度高等优点。若跟踪右侧指定功率点，当光伏电流有细微变化时，其对应的光伏输出功率波动较大，且当日照强度下降时，可能会使跟踪点所对应的光伏电流超出新日照强度下光伏阵列的短路电流，影响系统的稳定运行，故选择跟踪左侧指定功率点来实现指定功率输出，其具体算法流程图如图 3 所示。

当系统运行在 MPPT 模式时，其具体算法流程图有相关文献已给出详细阐述^[5-9]，此处不再赘述。需要指出的是，系统实时改变光伏电流进行功率点跟踪，而非光伏电压。

2.3 前级系统控制器设计

2.3.1 小信号建模分析

当光伏发电系统因调度分配进行指定功率发电时，其等效阻抗大小会因功率变化而发生变化，而等效阻抗大小可能会影响前级系统控制器的性能，进而影响到整个系统的稳定运行。故本文对 Boost 变换器在正常运行状态下，即电感电流连续工作模式下进行小信号建模^[20]，对前级系统控制器进行详细设计，其 Boost 变换器小信号模型如图 4 所示。

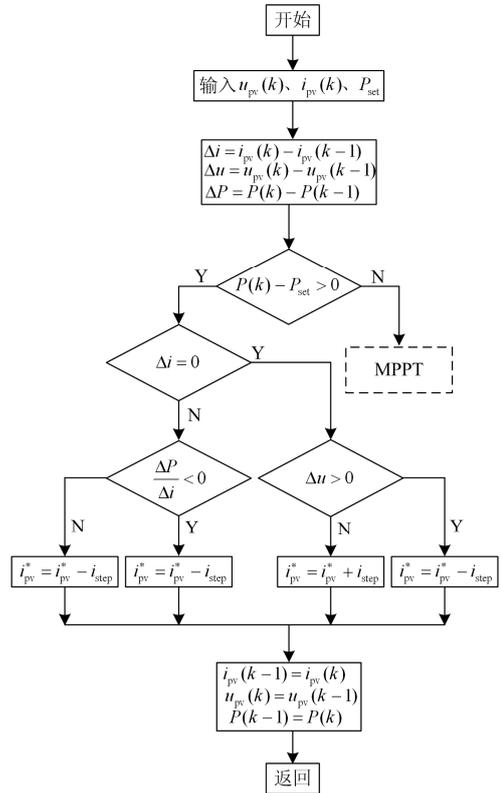


图 3 变功率输出算法流程图

Fig. 3 Flowchart of variable power output

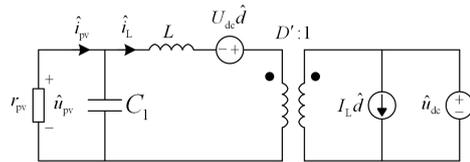


图 4 Boost 变换器小信号模型

Fig. 4 Small-signal model of Boost converter

图 4 中， L 表示电感， C_1 表示电容， u_{dc} 表示稳态直流母线电压， r_{pv} 表示光伏电压与光伏电流的关系，其定义为

$$r_{pv} = \frac{\hat{u}_{pv}}{\hat{i}_{pv}} \quad (2)$$

当 Boost 变换器工作在电感电流连续工作模式，忽略直流母线电压波动 \hat{u}_{dc} ，可得到占空比扰动 \hat{d} 至光伏阵列输出电流 \hat{i}_{pv} 的传递函数为

$$G_d^{i_{pv}} = \frac{\hat{i}_{pv}}{\hat{d}} = \frac{u_{dc}}{LC_1 r_{pv} s^2 + Ls + r_{pv}} \quad (3)$$

将式(3)简化成标准形式，即

$$G_d^{i_{pv}} = G_{d0} \frac{1}{(s/\omega_0)^2 + s/(Q\omega_0) + 1} \quad (4)$$

式中: $G_{d0}=u_{dc}/r_{pv}$; $\omega_0=1/\sqrt{LC_1}$; $Q=r_{pv}\sqrt{C_1/L}$; r_{pv} 表示光伏阵列等效阻抗。通过式(4)可以得出光伏阵列 r_{pv} 的大小对直流侧增益 G_{d0} 与品质因素 Q 有影响, 仅与转折角频率 ω_0 无关。

2.3.2 前级系统稳定性分析

在同一日照强度下, 光伏阵列的输出阻抗随着光伏输出功率的逐渐减小而逐渐增大。当光伏阵列运行在同一日照强度不同功率点时, 其前级系统的传递函数伯德图如图 5 所示。

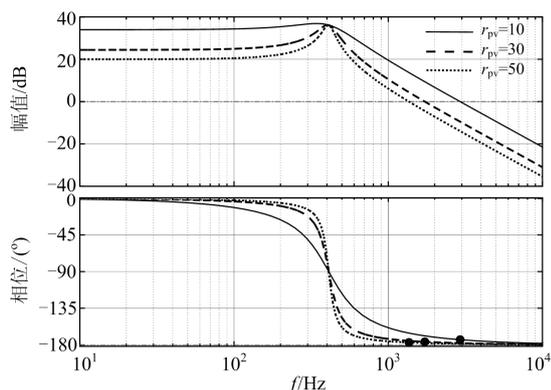


图 5 不同等效阻抗 r_{pv} 下补偿前的前级系统伯德图

Fig. 5 Bode plot of pre-stage before compensation under different r_{pv}

由图 5 所示的前级系统伯德图可知, 等效阻抗 r_{pv} 的大小影响直流侧增益 G_{d0} 与品质因素 Q 的大小, 与前文分析一致。本文采用 PID 控制器对前级系统进行补偿, 其相应的控制器结构为

$$G_c(s) = G_{PID} = k_p \cdot \frac{s + k_i}{s} \cdot \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_2 s + 1} \quad (5)$$

式中控制器参数设计问题相关文献已经给出了详细的设计和实现依据^[21-24], 而直流侧增益 G_{d0} 仅与控制器的比例增益 k_p 相关, 经过不同等效阻抗的计算可得控制器比例增益 k_p 与等效阻抗 r_{pv} 之间的关系为 $k_p=0.09846r_{pv}$, 另外计算出 $k_i=350$, $\tau_1=9.36 \times 10^{-5}$, $\tau_2=1.098 \times 10^{-5}$, 可得不同等效阻抗下采用 PID 控制器时补偿后前级系统伯德图, 如图 6 所示。

当光伏发电系统输出不同功率时, 其等效阻抗也在不断变化, 根据上文所述控制器参数与等效阻抗之间的关系设计控制器, 可得补偿后的系统控制器的截止频率不会因等效阻抗的变化而改变, 补偿后相位裕量为 55.2° , 稳定裕度满足设计要求。因此, 光伏发电系统在变功率输出时, 其控制器采用所述方法对系统的稳定性不会产生较大影响。

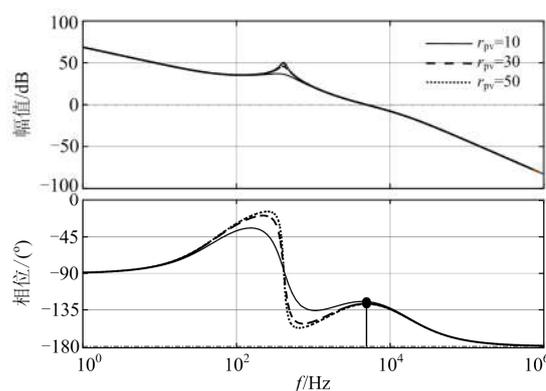


图 6 不同等效阻抗 r_{pv} 下补偿后的前级系统伯德图

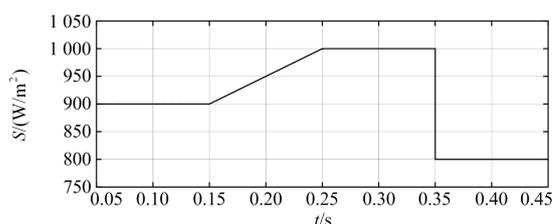
Fig. 6 Bode plot of pre-stage after compensation under different r_{pv}

3 仿真与实验研究

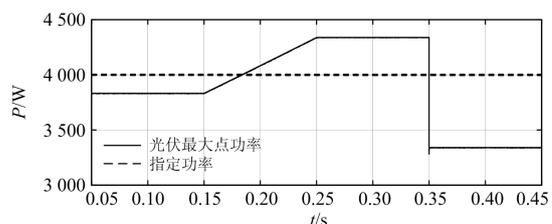
3.1 系统仿真

在 Matlab/Simulink 软件环境下搭建了如图 2 所示的两级式光伏并网系统变功率控制的仿真模型。该模型模拟了两种方案下的参考电流型变功率输出效果。方案一: 当指定功率为恒定值, 日照强度不断变化时的光伏功率跟踪效果; 方案二: 当日照强度恒定, 指定功率变化时光伏功率跟踪效果。

方案一的仿真结果如图 7 和图 8 所示, 其中图 7(a)为日照强度不断变化的仿真图。



(a) 日照强度



(b) 光伏最大点功率和指定功率

图 7 不同日照强度下 MPPT 跟踪

Fig. 7 Maximum power point tracking under different irradiance

在 $t=0.05$ s 时, $S_2=900$ W/m^2 ; $t=0.15$ s 时, 日照强度开始线性增加至 $S_1=1000$ W/m^2 ; $t=0.25-0.35$ s 时, 日照强度为 1000 W/m^2 ; $t=0.35$ s 时, 日照强

度由 $S_1=1000 \text{ W/m}^2$ 骤降到 $S_3=800 \text{ W/m}^2$ 。图 7(b) 为日照强度不断变化时, 光伏发电系统在最大功率点跟踪模式下运行的结果。设定指定功率 $P_{\text{set}}=4000 \text{ W}$, 由图 7(b)可知在 $t=0.18\sim 0.35 \text{ s}$ 时间段内, 因光伏发电系统输出最大功率大于指定功率, 故此段时间内系统将以 CPG 模式运行; 而在其余时间段内光伏系统输出最大功率均小于指定功率, 系统将以 MPPT 模式运行。

图 8(a)、(b)、(c)、(d)分别为模拟方案一条件下跟踪指定功率点的具体实现过程、所对应参考电流、光伏输出电压与光伏实际输出功率仿真图。

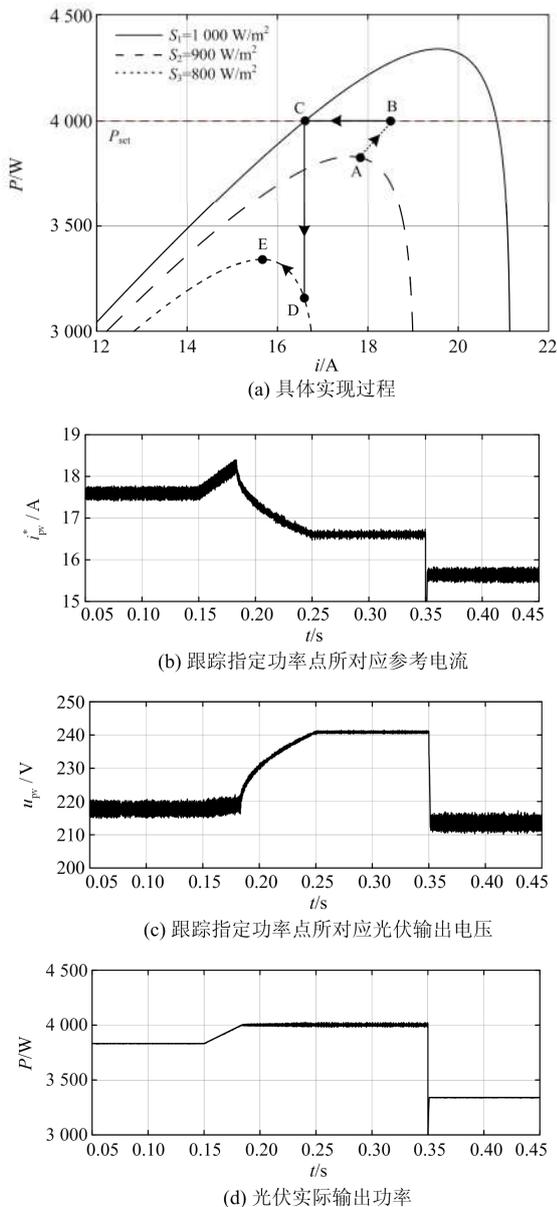


图 8 不同日照强度下变功率输出

Fig. 8 Variable power output under different irradiance

在 $t=0.15 \text{ s}$ 之前, 系统运行在 MPPT 模式下, 即日照强度 $S_2=900 \text{ W/m}^2$ 的最大功率点 A 处, 在 $t=0.15\sim 0.18 \text{ s}$ 时间段内, 日照强度线性增加, 但系统运行在 MPPT 模式, 及系统工作点由 A 点缓慢移向 B 点如图 8(a)所示, 对应参考电流大小约呈线性增加至 18.4 A 如图 8(b)所示。在 $t=0.18\sim 0.25 \text{ s}$ 时间段内, 系统运行在 CPG 模式, 输出功率 $P=P_{\text{set}}=4000 \text{ W}$ 如图 8(d)所示。因日照强度依旧线性增加, 为保持指定功率输出, 系统工作点由 B 点移向 C 点, 对应参考电流大小约呈线性降低至 16.6 A 。在 $t=0.35 \text{ s}$ 时刻, 日照强度由 $S_1=1000 \text{ W/m}^2$ 骤降到 $S_3=800 \text{ W/m}^2$, 系统工作点由 C 点转移至 D 点, 系统运行在 MPPT 模式, 再由 D 点移向 E 点, 输出功率 $P=3300 \text{ W}$ 。

方案二的仿真结果如图 9 所示。图 9(a)与图 9(b)分别为在日照强度 $S_1=1000 \text{ W/m}^2$ 条件下给定的不同指定功率与光伏实际输出功率。

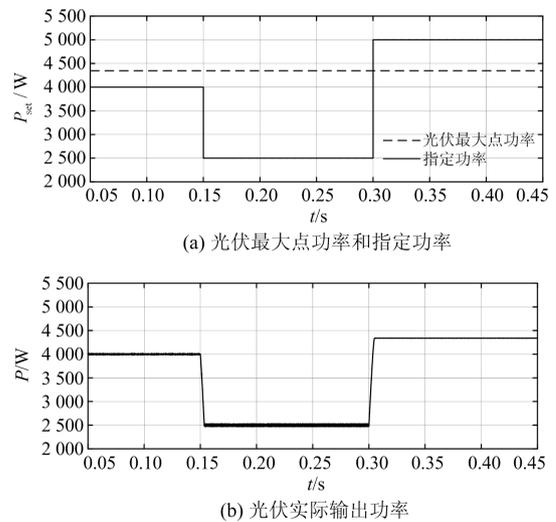


图 9 固定日照强度下指定功率输出

Fig. 9 Different constant power generation under constant irradiance

在 $t=0.15 \text{ s}$ 之前, 指定功率 $P_{\text{set}1}=4000 \text{ W}$, 此时光伏系统所输出的最大功率大于指定功率, 故系统运行在 CPG 模式下, 输出功率 $P=P_{\text{set}1}=4000 \text{ W}$; 在 $t=0.15\sim 0.3 \text{ s}$ 时, $P_{\text{set}2}=2500 \text{ W}$, 与前者相似, 输出功率 $P=P_{\text{set}2}=2500 \text{ W}$; 在 $t=0.3\sim 0.45 \text{ s}$ 时, $P_{\text{set}3}=5000 \text{ W}$, 此时光伏系统所输出的最大功率小于指定功率, 故系统运行在 MPPT 模式下, 输出功率 $P=4400 \text{ W}$ 。

方案一与方案二的仿真结果表明: 当需要光伏发电系统在不同日照强度下进行指定功率输出和在同一日照强度下需要不同的指定功率输出时, 所提

控制策略能够使系统平滑切换至相应的工作模式 (MPPT/CPG), 并具有良好的跟踪精度, 实现了光伏发电系统变功率输出。

3.2 实验结果与分析

本文利用 RT-LAB 半实物实时仿真平台对所提控制策略进行了实验研究。实验系统结构如图 10 所示。

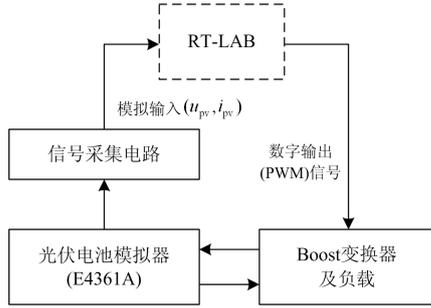


图 10 实验系统结构图

Fig. 10 Structure diagram of experiment system

系统主要包括光伏阵列模拟器、Boost 变换器及负载、电压与电流信号采集模块和 RT-LAB 目标机等。通过采集光伏阵列模拟器的光伏电压与电流, 送入 RT-LAB 光伏发电系统控制器, 发出 PWM 信号送入 Boost 变换器形成闭环; 光伏阵列模拟器型号为 E4361 A, 其参数设定值如表 2 所示。Boost 变换器输入电容 $C_1=200 \mu\text{F}$, 电感 $L=3.5 \text{ mH}$, 开关频率 $f_{\text{sw}}=8 \text{ kHz}$ 。

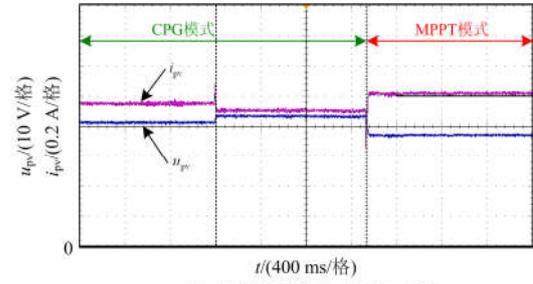
表 2 光伏阵列模拟器设定参数

Table 2 Parameters of solar array simulator

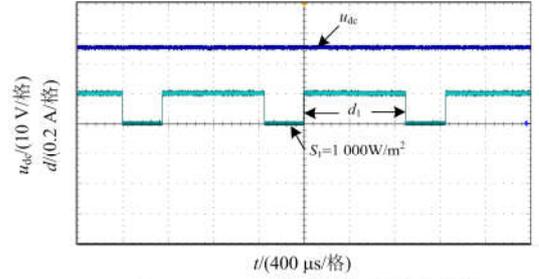
条件	u_{oc}/V	u_m/V	i_{sc}/A	i_m/A	P/W
$S_1=1000 \text{ W/m}^2$	47.5	38.0	1.4	1.3	49.4
$S_2=900 \text{ W/m}^2$	46.62	37.6	1.26	1.15	43.3
$S_3=800 \text{ W/m}^2$	45.72	37.0	1.12	1.03	38.1

图 11 为模拟不同日照强度下变功率输出效果实验波形图。

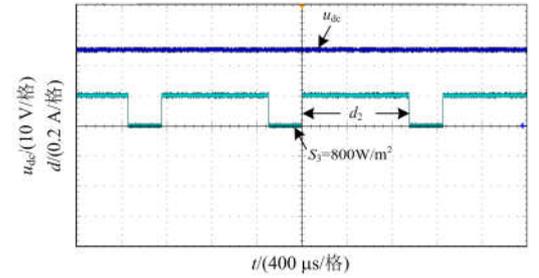
设系统输出指定功率 $P_{\text{set}}=40 \text{ W}$, 日照强度由 $S_2=900 \text{ W/m}^2$ 上升至 $S_1=1000 \text{ W/m}^2$, 一段时间后再下降至 $S_3=800 \text{ W/m}^2$ 。因日照强度为 900 W/m^2 与 1000 W/m^2 时光伏最大点功率大于指定功率, 故系统运行在 CPG 模式, 两种日照强度下的光伏电流分别为 $i_{\text{pv}1}=0.96 \text{ A}$ 和 $i_{\text{pv}2}=0.90 \text{ A}$, 光伏电压分别为 $u_{\text{pv}1}=41.5 \text{ V}$ 和 $u_{\text{pv}2}=43.8 \text{ V}$, 如图 11(a)所示。计算可得输出功率 $P_1=39.84 \text{ W}$ 和 $P_2=39.42 \text{ W}$, 与指定功率 P_{set} 近似相等。当日照强度为 800 W/m^2 时光伏最大点功率达不到指定功率, 故系统运行在 MPPT 模式下, 此时光伏电流 $i_{\text{pv}3}=1.04 \text{ A}$, 光伏电压 $u_{\text{pv}3}=37 \text{ V}$,



(a) 光伏实际输出电压与电流



(b) $S_1=1000 \text{ W/m}^2$ 时直流侧电压与占空比



(c) $S_3=800 \text{ W/m}^2$ 时直流侧电压与占空比

图 11 不同日照强度下变功率输出实验波形

Fig. 11 Experimental results of variable power output under different irradiance

计算可得输出功率 $P_3=38.48 \text{ W}$, 此时 Boost 变换器直流侧电压 u_{dc} 保持恒定, 占空比由 $d_1=0.72$ 上升至 $d_1=0.76$, 如图 11(b)和图 11(c)所示。

图 12 为固定日照强度下指定功率跟踪时实验波形图。

设系统工作在日照强度 $S_1=1000 \text{ W/m}^2$ 下, 指定功率由 $P_{\text{set}1}=30 \text{ W}$ 上升至 $P_{\text{set}2}=60 \text{ W}$, 一段时间后再下降至 $P_{\text{set}3}=40 \text{ W}$ 。由表 2 数据可知在此日照强度下光伏最大点功率为 49.4 W , 大于 $P_{\text{set}1}=30 \text{ W}$ 与 $P_{\text{set}3}=40 \text{ W}$ 而小于 $P_{\text{set}2}=60 \text{ W}$ 。故系统先由 CPG 模式先转换至 MPPT 模式, 此时光伏电流由 $i_{\text{pv}}=0.67 \text{ A}$ 变为 1.28 A , 光伏电压由 $u_{\text{pv}}=45.4 \text{ V}$ 变为 38.5 V , 如图 12(a)所示。可得光伏功率由 $P=30.4 \text{ W}$ 变为 49.28 W 。然后再转换至 CPG 模式, 光伏电流变为 0.92 A , 光伏电压变为 43.7 V , 计算可得输出功率为 40.2 W 。对比图 11(b)和图 12(b)可知, 日照强度相同, Boost 变换器直流侧电压 u_{dc} 保持恒定,

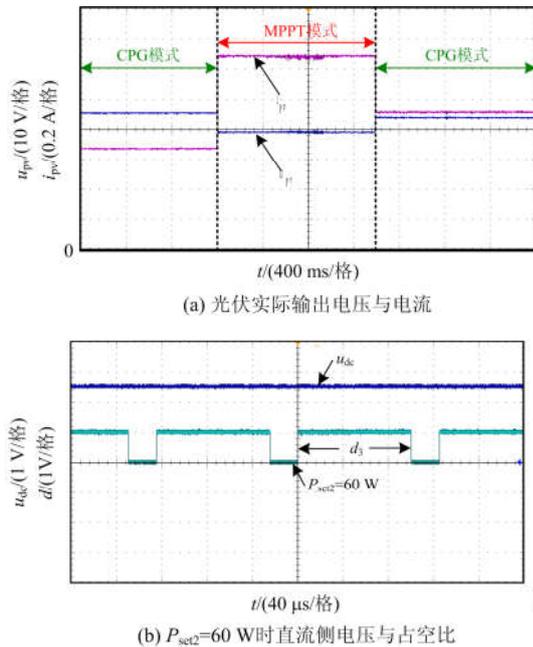


图 12 固定日照强度下指定功率输出实验波形

Fig. 12 Experimental results of constant power generation under constant irradiance

因光伏电流变化较大, 占空比约由原来的 $d_1=0.72$ 上升至 $d_3=0.8$ 。综上可知, 实验结果与理论分析及实验数据几乎一致。

4 结论

1) 针对两级式光伏并网系统指定功率发电功能的不足, 提出一种新型的参考电流型变功率输出控制策略, 所提控制策略实时改变光伏输出电流, 能够在日照强度变化情况下快速且有效地实现最大功率输出和指定功率输出两种功率输出模式。

2) 针对不同环境下所引起的功率不稳定问题, 对不同功率下前级系统控制器的设计方法进行了详细的阐述和分析, 使系统的运行性能更加稳定。

3) 所提控制策略具有良好的跟踪精度和较强的稳定性能, 使系统能够在最大功率输出和指定功率输出两种功率输出模式下根据日照强度变化而平滑切换, 提高了光伏发电系统变功率输出的可靠性。

参考文献

[1] 雷鸣宇, 杨子龙, 王一波, 等. 光/储混合系统中的储能控制技术[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 86-92.
LEI Mingyu, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. Study on control technology of energy storage station in photovoltaic/storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 86-92.

[2] ABAPOUR S, NOJAVAN S, ABAPOUR M. Multi-objective short-term scheduling of active distribution networks for benefit maximization of DisCos and DG owners considering demand response programs and energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 95-106.

[3] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, (1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.

[4] 刘焕磊, 陈冬, 杨天锋, 等. 太阳能燃气轮机发电技术综述[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 6-15.
LIU Huanlei, CHEN Dong, YANG Tianfeng, et al. Solar gas turbine power generation technology: a review[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 6-15.

[5] 吴志程, 江智军, 杨晓辉. 一种基于功率闭环控制的改进全局 MPPT 方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 57-62.
WU Zhicheng, JIANG Zhijun, YANG Xiaohui. An improved global MPPT method based on power closed-loop control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 57-62.

[6] 杨勇, 朱彬彬, 赵方平, 等. 一种电流预测控制的自适应变步长最大功率跟踪方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 855-862.
YANG Yong, ZHU Binbin, ZHAO Fangping, et al. An adaptive and variable step MPPT method based on current predictive controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 855-862.

[7] 李正明, 单晓晨, 徐鹏坤. 基于超螺旋滑模控制光伏 MPPT 的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 32-37.
LI Zhengming, SHAN Xiaochen, XU Pengkun. Super twisting mode controller used photovoltaic system MPPT[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 32-37.

[8] 郑伟, 陈仕彬, 梁福波, 等. 基于 PSO-PSA 的光伏系统最大功率点跟踪技术[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 78-84.
ZHENG Wei, CHEN Shibin, LIANG Fubo, et al. Maximum power point tracking technology based on hybrid algorithm of PSO and PSA for photovoltaic systems[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 78-84.

[9] 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.
- [10] YANG Y, WANG H, BLAABJERG F, et al. A hybrid power control concept for PV inverters with reduced thermal loading[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(12): 6271-6275.
- [11] URSTASUN A, SANCHIS P, MARROYO L. Limiting the power generated by a photovoltaic system[C] // 10th International Multi-Conferences on System, Signals and Devices, March 18-21, 2013, Hammamet, Tunisia.
- [12] YANG Y, BLAABJERG F, WANG H. Constant power generation of photovoltaic systems considering the distributed grid capacity[C] // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 16-20, 2014, Fort Worth, USA.
- [13] 杨超颖, 王金浩, 杨赟磊, 等. 不对称故障下条件并
网光伏逆变器峰值电流抑制策略[J]. *电力系统保护与
控制*, 2018, 46(16): 103-111.
YANG Chaoying, WANG Jinhao, YANG Yunlei, et al.
Control strategy to suppress peak current for grid-connected
photovoltaic inverter under unbalanced voltage sags[J].
Power System Protection and Control, 2018, 46(16):
103-111.
- [14] 郭小强, 刘文钊, 王宝诚, 等. 光伏并网逆变器不平衡
故障穿越限流控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2015,
35(20): 5155-5162.
GUO Xiaoqiang, LIU Wenzhao, WANG Baocheng, et al.
Fault ride through control of PV grid-connected inverter
with current-limited capability under unbalanced grid
voltage conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015,
35(20): 5155-5162.
- [15] 沈霞, 黄文, 帅智康. 基于准 PR 控制的虚拟同步逆变
器故障冲击电流快速抑制方法研究[J]. *中国电机工程
学报*, 2018, 38(16): 4768-4776.
SHEN Xia, HUANG Wen, SHUAI Zhikang. Research on
inrush current restraining strategy based on Quasi-PR
control for synchronverter during grid fault[J]. *Proceedings
of the CSEE*, 2018, 38(16): 4768-4776.
- [16] 原敬磊, 张建成. 光伏发电系统定功率输出模式研究
[J]. *华东电力*, 2012, 40(3): 421-424.
YUAN Jinglei, ZHANG Jiancheng. Constant power output
control of photovoltaic power generation system[J]. *East
China Electric Power*, 2012, 40(3): 421-424.
- [17] 龚宇雷. 微电源并网同步检测与定功率输出控制技术
研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [18] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M].
北京: 机械工业出版社, 2010.
- [19] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳电池工程用数学模
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 Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412.
- [20] 冯玉. 三相光伏并网系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学,
2011.
- [21] 郭小强. 光伏并网逆变器通用比例复数积分控制策略
[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(13): 3393-3399.
GUO Xiaoqiang. Generalized proportional complex integral
control scheme for PV grid-connected inverters[J].
Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3393-3399.
- [22] 邢珊珊, 田素立, 王振华, 等. 光伏 MPPT 系统电压控
制器的优化设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2016,
44(12): 114-118.
XING Shanshan, TIAN Suli, WANG Zhenhua, et al.
Optimized design of the voltage controller of PV MPPT
system[J]. *Power System Protection and Control*, 2016,
44(12): 114-118.
- [23] ROBERT W E, DRAGAN M. *Fundamental of power
electronics*[M]. Second Edition. New York: Kluwer
Academic Publishers, 2001.
- [24] 赵新, 金新民, 周飞, 等. 采用降阶谐振调节器的并网
逆变器锁频环技术[J]. *中国电机工程学报*, 2013,
33(15): 38-44.
ZHAO Xin, JIN Xinmin, ZHOU Fei, et al. A frequency-
locked loop technology of grid-connected inverters based
on the reduced order resonant controller[J]. *Proceedings
of the CSEE*, 2013, 33(15): 38-44.

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-02-28

作者简介:

杨明(1982—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源
并网发电系统等; E-mail: yangming0391@163.com

鲍靖雯(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源
并网发电系统; E-mail: 944256855@qq.com

高龙将(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方
向为新能源并网发电系统。E-mail: gaolongjiang7@163.com

(编辑 张爱琴)