

# 基于最小变换功率跟踪的差分功率光伏系统研究

王贻鑫<sup>1</sup>, 阚加荣<sup>1</sup>, 陈小海<sup>2</sup>

(1.盐城工学院 电气工程学院, 江苏 盐城 224051; 2.江苏金风科技有限公司, 江苏 盐城 224100)

**摘要:**以差分功率变换为研究对象,通过对其常用拓扑的讨论,选择光伏-直流母线(PV-BUS)式DPP变换器架构来实现差分功率变换器处理最小变换功率的跟踪控制方法,通过MTALAB/Simulink建立仿真模型,验证了系统输出效率的显著提升。

**关键词:**光伏子串;差分功率处理;最大功率点跟踪;双闭环控制系统;同步整流

**中图分类号:**TM615 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5322(2021)04-0032-04

随着清洁能源的普及,光伏发电技术变得越来越重要。光伏发电系统主要有集中式和组串式发电架构,这两种方式都会受局部阴影<sup>[1]</sup>和光伏电池老化等因素影响产生功率失配问题<sup>[2]</sup>。早期解决失配问题方案主要有光伏直流模块<sup>[3]</sup>与光伏交流模块<sup>[4]</sup>,这两种方案属于全功率变换器(FPP)解决方案,存在效率较低、结构复杂、难于控制和成本高的不足。后来,叶召阳等<sup>[5]</sup>通过分布式最大功率点控制(DMPPT)跟踪,提高了单块光伏电池能量利用率,降低了局部阴影的影响,但成本仍然较高,效率较低<sup>[6]</sup>。为了克服前面几种方案的局限性,差分功率变换(DPP)技术在近年来得到了广泛的研究,并应用于光伏系统<sup>[7]</sup>,实现了高效的功率输出,有效解决功率失配问题<sup>[8]</sup>,并降低了成本。

光伏DPP系统有多种连接方式。其中,在串联DPP结构中,根据DPP变换器输入、输出端连接对象,分为光伏-光伏(PV-PV)结构<sup>[9]</sup>、光伏-隔离端口(PV-IP)结构<sup>[10]</sup>与光伏-直流母线(PV-BUS)结构<sup>[11]</sup>。通过对DPP变换器系统中输入电流(串联型DPP)的调节,可以有效解决光伏电池间的功率失配问题<sup>[12]</sup>,从而保证每块光伏电池均运行于各自的最大功率点(MPP),使整个光伏系统的功率传输损耗更小,进而提高了光伏系统最大功率点跟踪(MPPT)的速度和能量传输效率。下面以PV-BUS式DPP光伏功率变换系统为例阐

述光伏DPP系统如何提高光伏系统的功率和功率获取率。

## 1 PV-BUS式DPP光伏功率变换系统

### 1.1 DPP光伏功率变换系统结构

PV-BUS式DPP光伏功率变换系统由 $n$ 个光伏子串 $PV_1 \sim PV_n$ 、 $n$ 个由反激变换器构成的DPP变换器和1个集中变换器构成,如图1所示。每个DPP变换器的输入端与对应的光伏子串并联,所有DPP变换器的输出端并联后连接到集中变换器的输出端,以减少集中变换器的处理功率。

### 1.2 DPP光伏功率变换系统的控制系统

DPP光伏功率变换系统使用峰值电流控制方式,其传统控制框图如图2所示。由图2可知,控制系统分为两部分,一部分为集中变换器的控制,另一部分为反激变换器(DPP变换器)的控制。

峰值电流型PWM是双闭环控制系统,其电压内环按照周期开通开关管,而电压外环的输出作为电流内环的基准值;当电流超过基准值时关断开关管。在闭环控制中,电流内环只负责电流的动态变换,因而电压外环仅需控制输出电压。

集中变换器控制策略中,由外部装置给定集中变换器输入电流基准值 $I_{ref}^*$ ,经电流闭环后经控制开关管S调节,在集中变换器输出电流一定时,各DPP变换器实现各光伏子串的MPPT。除MPPT控制模块以外,每个DPP变换器的控制

收稿日期:2021-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577164)。

作者简介:王贻鑫(1997—),男,江苏镇江人,硕士生,主要研究方向为光伏微逆变器控制技术。

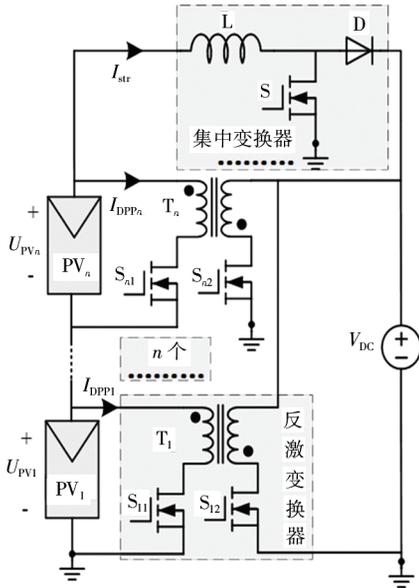


图1 DPP光伏功率变换系统原理图

Fig 1 Schematic diagram of DPP photovoltaic power conversion system

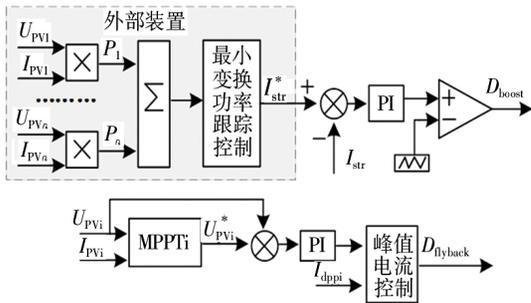


图2 系统控制框图

Fig 2 System control block diagram

器还有电压、电流双闭环控制方式,最终得到各DPP变换器中开关管 $S_{11}$ 、 $S_{12}$ 的控制信号。

各光伏子串在相应DPP变换器控制下可稳定运行在各自最大功率点(MPP),即各单个PV都达到最大功率状态,从而让系统中光伏子串能量(电流)大部分经过集中变换器(Boost变换器)输出,仅有一部分能量通过DPP变换器处理。此外,DPP变换器还可实现能量的双向流动。

### 1.3 DPP光伏功率变换系统数学分析

不同的电流值 $I_{str}$ 对DPP变换器的工作特性产生很大影响,进而直接影响光伏系统的运行效率。若光伏子串在理想条件下运行,光伏子串电流都通过集中变换器,DPP变换器将不运行。但在实际运行中光伏子串存在某种程度的不匹配,从而不能完全达到理想条件,这时就会有部分子串电流经过DPP变换器,此时可以通过DPP变换

器来处理光伏子串的失配功率。

设光伏子串电流为 $I_{PV}$ 、电压为 $U_{PV}$ ( $I_{PV}$ 、 $U_{PV}$ 、 $I_{str}$ 、 $I_{str}^*$ 随光伏系统状态改变而变化),单个DPP变换器处理功率为 $P_d$ ,所有DPP变换器处理功率和为 $P_T$ ,则第 $m$ 个DPP变换器处理的功率为:

$$P_{dm} = (I_{PVm} - I_{str}) \times U_{PVm} \quad (1)$$

当 $I_{PVm} > I_{str}$ 时, $P_{dm} > 0$ ,则第 $m$ 个DPP变换器吸收对应的光伏子串能量;相反,若 $P_{dm} < 0$ ,则第 $m$ 个DPP变换器提供能量补偿相应的光伏子串。

全部DPP变换器处理的功率 $P_T$ 为:

$$P_T = |P_{d1}| + \dots + |P_{dm}| + \dots + |P_{dn}| = \\ |(I_{PV1} - I_{str}) \times U_{PV1}| + \dots + |(I_{PVm} - I_{str}) \times U_{PVm}| + \dots + |(I_{PVn} - I_{str}) \times U_{PVn}| \quad (1 < m < n) \quad (2)$$

由式(2)可知,通过改变 $I_{str}$ 可以影响 $P_T$ ,即存在某个 $I_{str}$ 使得 $P_T$ 最小。当 $P_T$ 达到最小时,系统的损耗变得更小,系统的输出功率就会更高。因此,采用最小变换功率跟踪控制算法寻找最小变换功率状态将变得非常地有意义。

## 2 最小变换功率跟踪控制分析

### 2.1 最小变换功率跟踪控制

最小变换功率跟踪控制算法和MPPT算法核心思想相似,都是通过干扰被控对象分析其变换规律并及时调控的控制方法。MPPT算法是基于光伏电池输出功率特性,对光伏电池工作电压和电流进行调控使其输出到达MPP附近;最小变换功率跟踪是基于 $P_T$ 状态而对 $I_{str}$ 进行调控,使 $P_T$ 达到最小变换功率的状态。

图3是基于2个光伏子串,在 $I_{PV1}$ 、 $I_{PV2}$ 、 $U_{PV1}$ 和 $U_{PV2}$ 为已知的特定值时,DPP光伏功率变换系统处理的功率和 $P_T$ 随串电流 $I_{str}$ 的变化曲线。由图3可知,在光伏子串电压、电流已知的情况下,功率

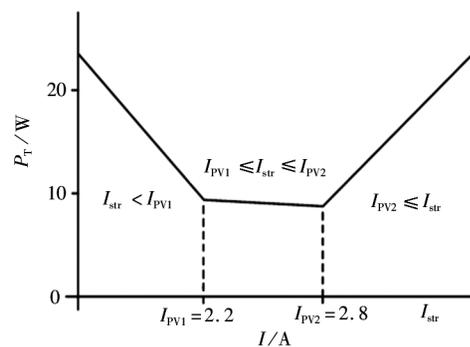


图3 状态变化曲线图

Fig 3 State change curve

和  $P_T$  随着  $I_{str}$  的不同而改变,并且可以追踪到  $P_T$  的最小值点,此唯一的  $I_{str}$  就是 DPP 变换系统追踪的串电流值。

### 2.2 最小变换功率跟踪控制算法

最小变换功率跟踪控制方法流程图如图 4 所示。图 4 是根据光伏子串的瞬时电压和瞬时电流状态来动态跟踪最小变换功率状态的。设第  $i$  个光伏子串处的电压为  $U_{PVi}$ 、电流为  $I_{PVi}$ 、功率为  $P_i$ ,测量光伏电压和相应流过 DPP 变换器的电流,即可计算 DPP 光伏功率变换系统处理的功率并求和,然后进行比较;若  $P_{T(i+1)}=P_{T_i}$ ,则  $P_{T_i}$  即为最小变换功率和,否则,当  $P_{T(i+1)}<P_{T_i}$ ,则算法向更小变换功率方向移动,  $I_{str}$  增加,当  $P_{T(i+1)}>P_{T_i}$ ,  $I_{str}$  减小;最后将改变后的电流值赋于电流基准值  $I_{str}^*$ ,并通过 PI 调节,使  $I_{str}$  追踪参考电流基准值  $I_{str}^*$ 。

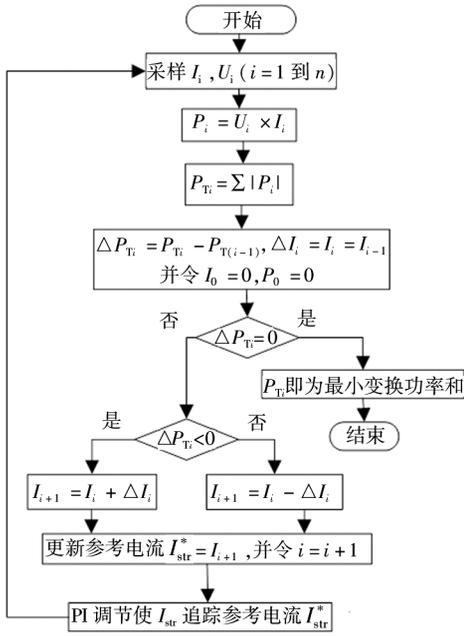


图 4 DPP 变换器处理功率和算法流程图

Fig. 4 Flow chart of DPP converter processing power and algorithm

### 3 模拟仿真

基于 MATLAB 软件,以 2 个光伏子串和 DPP 变换器为例,对 DPP 变换器处理最小变换功率跟踪控制进行仿真,系统仿真参数如表 1 所示。

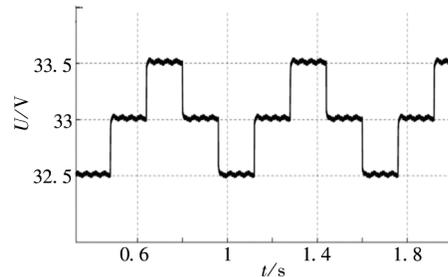
图 5 为最小变换功率控制算法和 MPPT 共同运行时的仿真结果。图 5a、5b 中,最小变换功率控制算法和 MPPT 共同运行时,  $PV_1$  的最大功率点处电压  $U_{PV1}=33\text{ V}$ ,  $PV_2$  的最大功率点处电压  $U_{PV2}=37\text{ V}$ ,表明系统在加入最小变换功率跟踪控制算

法后依然能够使光伏系统稳定地追踪 MPP。此过程中,光伏 DPP 变换系统寻找到一个最优点,这个最优点为光伏子串的 MPP,同时也是  $P_T$  值的最小点。

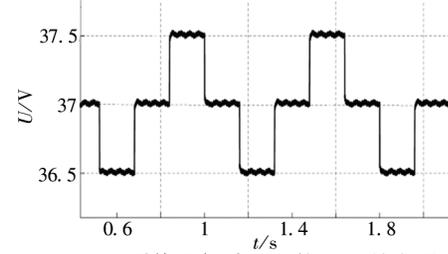
表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

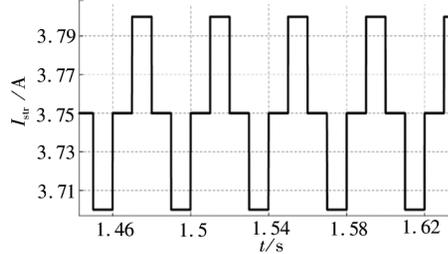
系统参数	数值
输入电压/V	30~75
输出电压/V	110
输出功率/W	150
变压器匝数比	1 : 4
升压变换开关频率/kHz	20
反激变换开关频率/kHz	20
升压变换器电感/ $\mu\text{H}$	500



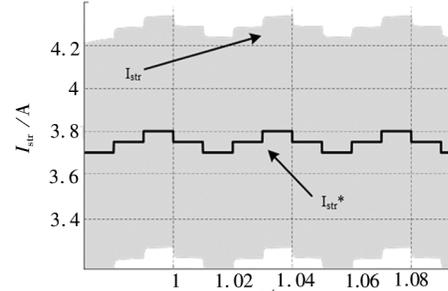
a 系统运行时  $PV_1$  的 MPP 处电压



b 系统运行时  $PV_2$  的 MPP 处电压



c 串电流基准值  $I_{str}^*$  波形图



d 串电流  $I_{str}$  局部波形图

图 5 系统运行仿真波形图

Fig 5 System operation simulation waveform

最小变换功率跟踪控制算法和MPPT同时工作时,由于最小变换功率跟踪控制算法响应时间比MPPT响应时间快得多,即在MPPT进行下一个扰动之前,最小变换功率跟踪控制已进行多次扰动来寻找最佳 $I_{str}$ 以达到新的稳态最优点,表现在图5c中就是MPPT扰动一次,集中变换器串电流基准值 $I_{str}^*$ 多次扰动,并及时追踪新的稳态电流值。

图5d是串电流 $I_{str}$ 波形图的局部截图。由图5d可知, $I_{str}$ 随 $I_{str}^*$ 改变并及时追踪调整。仿真得

出追踪最佳串电流 $I_{str}=3.75\text{ A}$ ,此时系统效率达到最高,损耗得到最大限度地降低,光电转化效率得到显著提升。

#### 4 结论

基于PV-BUS式DPP光伏功率变换系统处理最小变换功率的跟踪控制方法,寻找确定的 $I_{str}$ 值使DPP变换器处理的功率和 $P_T$ 最小,并通过仿真加以验证。仿真结果表明,该方法可以同时实现单个PV在各自的最大功率点工作,系统输出功率得到显著提高。

#### 参考文献:

- [1] KAN J R, WU Y Y, TANG Y, et al. DLFCR reduction based on power predictive scheme for full-bridge photovoltaic microinverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4658-4669.
- [2] JEON Y T, LEE H, KIM K A, et al. Least power point tracking method for photovoltaic differential power processing systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1941-1951.
- [3] JEON Y T, PARK J H. Unit-minimum least power point tracking for the optimization of photovoltaic differential power processing systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 311-324.
- [4] 靳肖林, 文尚胜, 倪浩智, 等. 光伏发电系统最大功率点跟踪技术综述[J]. 电源技术, 2019, 43(3): 532-535.
- [5] 叶召阳, 张灿. 基于PSIM的光伏系统差分功率处理在PV-BUS的研究[J]. 中国战略新兴产业, 2017, (40): 76-77
- [6] WANG F, ZHU T H, ZHUO F, et al. An improved submodule differential power processing-based PV system with flexible multi-MPPT control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1): 94-102.
- [7] 张甲, 席静, 胡久平. 新能源技术的研究综述[J]. 山东化工, 2018, 47(19): 75, 83.
- [8] HUANG Q Y, HUANG A Q, YU R Y, et al. High-efficiency and high-density single-phase dual-mode cascaded buck-boost multilevel transformerless PV inverter with GaN AC switches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7474-7488.
- [9] 胡浩磊, 杨富文. 部分遮阴条件下光伏阵列最大功率点跟踪方法[J]. 电源学报, 2013, 11(2): 23-29.
- [10] 王一金. 低碳背景下能源替代与环境污染研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [11] 周笛青. 光伏组件局部阴影下热斑诊断及优化控制[D]. 上海: 上海大学, 2013.
- [12] 杜士鹏, 王存旭. 太阳能光伏发电技术的发展前景[J]. 大众用电, 2015, 30(7): 24.

## Research on Differential Power Photovoltaic System Based on Minimum Conversion Power Tracking

WANG Yixin<sup>1</sup>, KAN Jiarong<sup>1</sup>, CHEN Xiaohai<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China; )  
 (2. Jiangsu Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Yancheng Jiangsu 224100, China)

**Abstract:** In this paper, DPP is taken as the research object. Through the discussion of its common topology, the PV-bus DPP converter architecture is selected to realize the tracking control method for DPP converter to process the minimum conversion power. The simulation model is established by MTALAB/Simulink to verify the significant improvement of the system output efficiency.

**Keywords:** photovoltaic sub-string; differential power processing; maximum power point tracking; dual closed-loop control system; synchronous rectification

(责任编辑:李华云)