

基于PV-BUS结构的最小功率点跟踪研究

卞佳龙¹, 阚加荣¹, 陈鹤鸣², 徐苏东¹, 李炎¹, 陈威威¹

¹盐城工学院电气工程学院, 江苏 盐城

²国网南京供电公司, 江苏 南京

收稿日期: 2023年7月10日; 录用日期: 2023年8月30日; 发布日期: 2023年9月6日

摘要

差分功率处理结构在提升光伏电池有效输出功率方面具有巨大的优势, 变换器仅处理光伏模块之间的功率差额, 就可以保证光伏阵列实现全局最大功率点跟踪。通过数学分析可以得到, 在光伏-直流母线式差分功率处理结构中, 差分功率变换器处理的总功率的最小功率点具有唯一性。文中所研究的最小功率点跟踪控制方法其目的是减小光伏系统中差分功率变换器处理的功率。最后在MATLAB/Simulink搭建了仿真模型进行验证, 仿真结果表明集中变换器中的最小功率点跟踪与差分功率处理变换器中的最大功率点跟踪可以同时工作, 有效提升系统的输出效率。

关键词

功率失配, 差分功率处理, 最小功率点跟踪, 最大功率点跟踪

Research on Least Power Point Tracking Based on PV-BUS Structure

Jialong Bian¹, Jiarong Kan¹, Heming Chen², Sudong Xu¹, Yan Li¹, Weiwei Chen¹

¹School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

²State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing Jiangsu

Received: Jul. 10th, 2023; accepted: Aug. 30th, 2023; published: Sep. 6th, 2023

Abstract

The differential power processing structure has enormous advantages in improving the effective output power of photovoltaic cells. The converter only processes the power difference between photovoltaic modules, which can ensure that the photovoltaic array achieves global maximum power point tracking. Through mathematical analysis, it can be concluded that in the pho-

photovoltaic DC bus differential power processing structure, the least power point of the total power processed by the differential power converter is unique. The least power point tracking control method studied in the article aims to reduce the power processed by differential power converters in photovoltaic systems. Finally, a simulation model was built in MATLAB/Simulink for verification. The simulation results showed that the least power point tracking in the centralized converter and the maximum power point tracking in the differential power processing converter can work simultaneously, effectively improving the output efficiency of the system.

Keywords

Power Mismatch, Differential Power Processing, Least Power Point Tracking, Maximum Power Point Tracking

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于可再生能源的可持续性和环保性,其利用受到了越来越多的重视。在各种可再生能源中,由于光伏组件成本的降低,政府的激励措施,太阳能光伏系统的发电量在过去20年里每年增长20%~25% [1]。为了提高光伏发电效率,光伏系统的串并联结构和控制技术得到了广泛的研究。光伏系统的第一类串并联结构为集中式结构,其具有设计简单的优点。但是,当光伏阵列出现部分遮光情况时,集中式结构的输出功率会存在多个峰值。如果采用传统的最大功率点跟踪(MPPT)算法对集中式结构进行控制,光伏系统可能会运行在局部最大功率点,会很大程度影响系统效率[2] [3] [4] [5]。光伏系统的第二类串并联结构是分布式结构。在该结构中,每个光伏模块都连接一个功率微逆变器。与集中式架构相比,虽然该结构解决了部分遮阳问题,消除了光伏组件间不平衡的影响,但是由于使用的变换器数量较多,存在功率损耗较大的缺点[6] [7] [8]。为了解决两种架构的问题,提出了差分功率处理(DPP)结构。

光伏系统 DPP 结构有多种连接方式。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[9]、光伏-隔离端口(PV-IP)结构[10]-[15]与光伏-直流母线(PV-BUS)结构[16] [17] [18]。对比失配场景下的 MPP 结果,所有 DPP 结构的功率相较于传统串联结构提高了10.5%~18.1%,其中 PV-BUS 结构比 PV-PV 结构和 PV-IP 结构的功率提高幅度大[19]。本文主要研究了利用双向反激拓扑实现的 PV-BUS 式 DPP 结构光伏系统的最小功率点跟踪(LPPT)控制,相较于传统 PV-BUS 结构,其所有 DPP 变换器输出端并联后与集中变换器输出端直接相连,可以进一步减小变换器的功率损耗。

2. PV-BUS 式 DPP 光伏系统

2.1. PV-BUS 式 DPP 光伏系统结构

如图1所示, PV-BUS 式 DPP 光伏系统包含了 n 个光伏模块 PV1~PVn、 n 个双向反激变换器构成的 DPP 变换器和 1 个升压变换器构成的集中变换器。

每个 DPP 变换器的输入连接光伏模块,其可以向对应光伏模块注入电流或光伏模块向其输出电流,以保证每个光伏模块运行在最大功率点。集中变换器的输入连接光伏阵列,通过调节集中变换器输入侧

的电流，可以保证光伏系统运行于优化状态。其中 U_{PV1} , U_{PV2} , \dots , U_{PVn} 分别是光伏模块 PV1, PV2, \dots , PVn 输出电压, I_{PV1} , I_{PV2} , \dots , I_{PVn} 分别是光伏模块 PV1, PV2, \dots , PVn 输出电流, I_{DPP1} , I_{DPP2} , \dots , I_{DPPn} 分别是变换器 DPP1, DPP2, \dots , DPPn 输入电流, I_L 是电感电流。

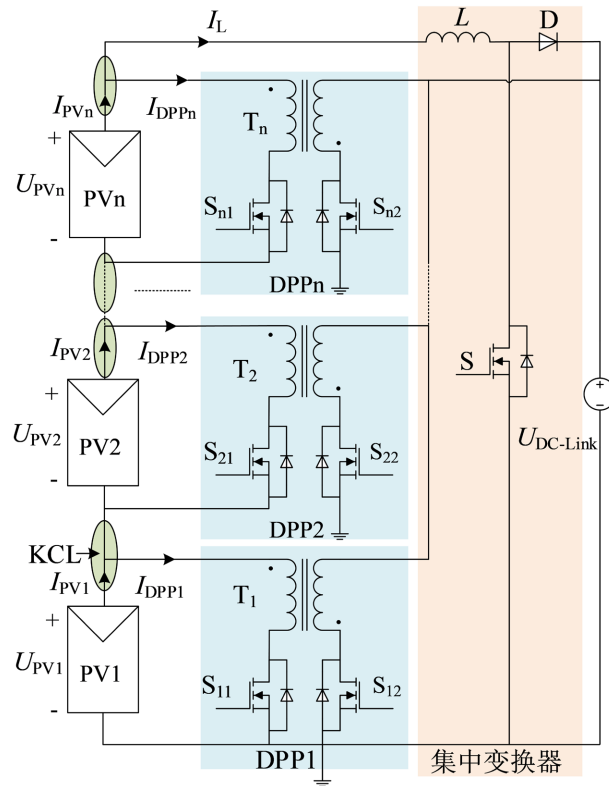


Figure 1. System schematic diagram
图 1. 系统原理图

2.2. DPP 光伏系统数学分析

如图 1 所示，在光伏阵列与 DPP 变换器的连接点处应用基尔霍夫电流定律(KCL)可得矩阵：

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 1 & -1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{DPP1} \\ I_{DPP2} \\ \vdots \\ I_{DPP_{n-1}} \\ I_{DPPn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{PV1} - I_{PV2} \\ I_{PV2} - I_{PV3} \\ \vdots \\ I_{PV_{n-1}} - I_{PVn} \\ I_{PVn} - I_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

该矩阵表示一个待定系统。理论上，对于任意电感电流 I_L ，每个光伏模块都可单独实现其 MPP。同时，存在一个电感电流 I_L ，使得 DPP 变换器处理功率最小。

单个 DPP 变换器所需处理功率为：

$$P_k = U_{PVk} \times |I_{PVk} - I_L| \quad (2)$$

其中， P_k 为第 k 个 DPP 变换器处理功率， $k = 1, 2, \dots, n$ 。

通过 n 个 DPP 变换器处理的总功率表达式为：

$$P_T = \sum_{k=1}^n |P_k| = \sum_{k=1}^n (U_{PVk} \times |I_{PVk} - I_L|) \tag{3}$$

其中, P_T 为 n 个 DPP 变换器处理功率总和。

假设光伏模块和对应的 DPP 变换器按光伏模块电流增大的顺序进行编号, 所有光伏模块工作在 MPP 处, 则电感电流 I_L 与光伏模块电流 I_{PV} 存在三种情况。当电感电流 I_L 小于任意光伏模块电流, 即 $I_L < I_{PV_i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 时, (3) 式可以改写为:

$$P_T = -\left(\sum_{k=1}^n U_{PVk}\right) I_L + \sum_{k=1}^n U_{PVk} I_{PVk} \tag{4}$$

由于 $U_{PVk} > 0$, 所以此时的功率曲线的斜率是负值。

当电感电流 I_L 位于 I_{PV} 的最大值与最小值之间, 即 $I_{PV_j} \leq I_L \leq I_{PV_{j+1}}$ 时, (3) 式可以改写为:

$$P_T = \left(\sum_{k=1}^j U_{PVk} - \sum_{k=j+1}^n U_{PVk}\right) I_L - \sum_{k=1}^j U_{PVk} I_{PVk} + \sum_{k=j+1}^n U_{PVk} I_{PVk} \tag{5}$$

功率曲线斜率的正负由 $\sum_{k=1}^j U_{PVk} - \sum_{k=j+1}^n U_{PVk}$ 的大小决定。

当电感电流 I_L 大于任意模块电流, 即 $I_L > I_{PV_i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 时, (3) 式可以改写为:

$$P_T = \left(\sum_{k=1}^n U_{PVk}\right) I_L - \sum_{k=1}^n U_{PVk} I_{PVk} \tag{6}$$

由于 $U_{PVk} > 0$, 所以此时的功率曲线的斜率是正值。

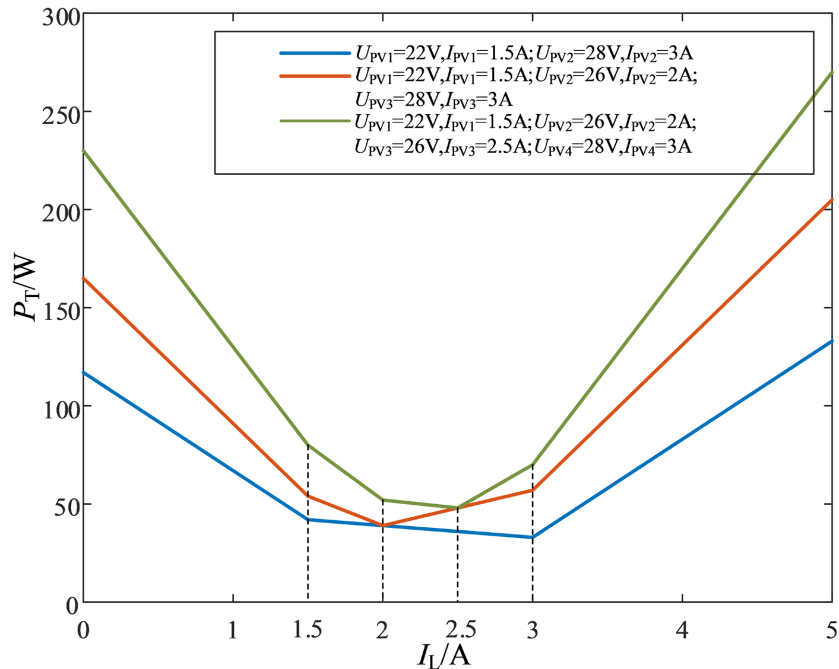


Figure 2. Power curve
图 2. 功率曲线

以两个光伏模块、三个光伏模块、四个光伏模块为例，其中，两个光伏模块中 $U_{PV1} = 22\text{V}$, $I_{PV1} = 1.5\text{A}$, $U_{PV2} = 28\text{V}$, $I_{PV2} = 3\text{A}$ ；三个光伏模块中 $U_{PV1} = 22\text{V}$, $I_{PV1} = 1.5\text{A}$, $U_{PV2} = 26\text{V}$, $I_{PV2} = 2\text{A}$, $U_{PV3} = 28\text{V}$, $I_{PV3} = 3\text{A}$ ；四个光伏模块中 $U_{PV1} = 22\text{V}$, $I_{PV1} = 1.5\text{A}$, $U_{PV2} = 26\text{V}$, $I_{PV2} = 2\text{A}$, $U_{PV3} = 26\text{V}$, $I_{PV3} = 2.5\text{A}$, $U_{PV4} = 28\text{V}$, $I_{PV4} = 3\text{A}$ 。根据系统的数学分析，可得其功率曲线如图 2 所示。

由于功率曲线是一个凹曲线，所以其存在一个电感电流 I_L 使得 DPP 变换器处理的总功率 P_T 最小，进而降低系统损耗，使系统工作在最优点。因此，如何控制 DPP 变换器处理总功率保持在最低点将有着十分重要的意义。

3. 最小功率点跟踪控制分析

3.1. DPP 光伏系统控制策略

为确保光伏系统运行的稳定性，本文拟设计 MPPT 与 LPPT 结合的控制策略，系统控制框图如图 3 所示。在 MPPT 控制中，采用传统扰动观察法将检测到的光伏模块的电压、电流进行计算，最终得到互补波形占空比对各个 DPP 变换器两个开关管进行控制，使得其对应的光伏模块工作于 MPP，并保持稳态运行。

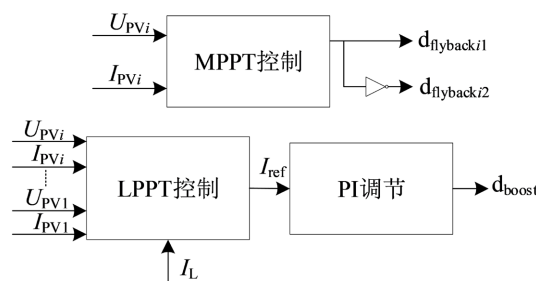


Figure 3. System control block diagram

图 3. 系统控制框图

在 LPPT 控制算法中，采样光伏模块的电压、电流和电感电流 I_L ，通过 LPPT 控制算法调整基准电流 I_{ref} 的大小，PI 调节器通过控制集中变换器开关管的开通与关断，使得电感电流 I_L 跟随基准电流 I_{ref} 的变化。

LPPT 和 MPPT 算法必须同时工作，但系统是高度耦合的，因此必须考虑两种算法的时间尺度。动态时间响应的设计应该使其中一种算法相对于另一种算法明显较慢。在本文研究中，LPPT 算法的速度明显快于 MPPT 算法。在 MPPT 算法的每一个扰动步骤之后，需要多个 LPPT 步骤使电感电流在稳态下达到新的最优点，然后再进行 MPPT 算法的下一步。

3.2. 最小功率点跟踪控制

本文所研究的最小功率点跟踪控制算法的流程图如图 4 所示。通过采样得到每个光伏模块的电压、电流以及电感电流，计算得到每个 DPP 变换器所需要处理的功率，通过绝对值求和得到所有 DPP 变换器处理的总功率。当前 DPP 变换器处理的总功率与上一时刻做差得到其变化趋势 ΔP_T 。当前电感电流与上一时刻做差得到电感电流的变化趋势 ΔI_L 。如果总功率与电感电流的变化趋势相同，则减小基准电流，使的电感电流向 LPP 移动；反之，如果总功率与电感电流的变化趋势相反，则增大基准电流，使的电感电流向 LPP 移动。通过 PI 调节控制集中变换器开关管的导通与关断，使电感电流不断跟随基准电流相匹配。LPPT 控制算法循环进行，即使外部光照强度发生变化，电感电流也会跟踪新的 LPP。

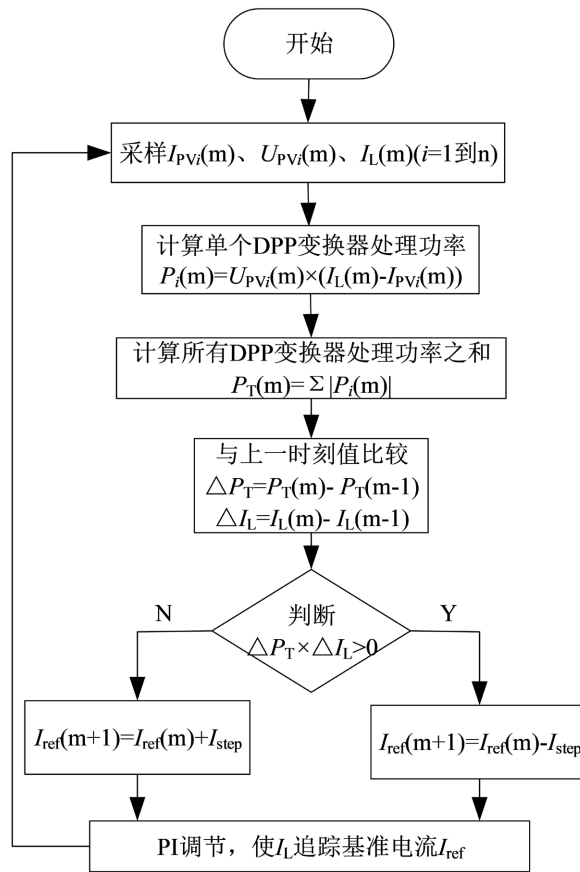


Figure 4. Flow chart of minimum power point tracking control algorithm
图 4. LPPT 控制算法流程图

4. 仿真及结果分析

基于 MATLAB 软件，以 2 个光伏模块和 DPP 变换器为例，对 DPP 变换器最小功率点跟踪控制进行仿真，系统仿真参数如表 1 所示。

Table 1. System simulation parameters
表 1. 系统仿真参数

系统参数	数值
输入电压	20~60 V
输出电压	110 V
输出功率	130 W
升压变换器开关频率	30 kHz
反激变换器开关频率	30 kHz
变压器匝数比	1:4
励磁电感	50 μH
升压变换器电感	300 μH

MPPT 算法在每个 DPP 变换器中实现。MPPT 算法扰动步长设置为 0.15 s。LPPT 算法在集中变换器中实现，LPPT 算法扰动步长设置为 0.01 s，比 MPPT 扰动快 15 倍。

4.1. 静态光照下仿真验证

在静态光照下系统稳态运行的仿真结果如下图所示。图 5 是 PV1、PV2 最大功率点电压波形，其中 $U_{PV1} = 26 \text{ V}$ ， $U_{PV2} = 28.2 \text{ V}$ 。图 6 是电感电流 I_L 与基准电流 I_{ref} 局部波形，电感电流 I_L 通过 PI 调节可以跟随基准电流 I_{ref} 的变化。图 7 是基准电流与光伏模块电流波形，其中 $I_{PV1} = 2.2 \text{ A}$ ， $I_{PV2} = 2.8 \text{ A}$ ，且 I_{ref} 跟随 I_{PV2} 变化，与数学分析一致，跟踪 DPP 变换器处理功率最小点对应的电流值。

4.2. 动态光照下仿真验证

在动态光照下系统稳态运行仿真结果如下图所示。图 8 是 PV1、PV2 最大功率点电压波形，其在光照变化后 $U_{PV1} = 24 \text{ V}$ ， $U_{PV2} = 26.2 \text{ V}$ 。图 9 电感电流与基准电流波形，在光照变化后电感电流基本依旧可以跟随基准电流的变化。图 10 是基准电流与光伏模块电流波形，在光照变化后基准电流依旧可以跟随 I_{PV2} 的变化，进而 DPP 变换器处理功率趋近于 LPP。

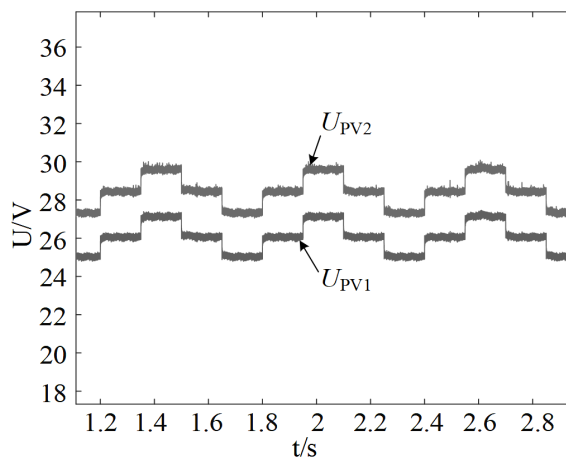


Figure 5. Maximum power point voltage waveform of PV1 and PV2

图 5. PV1、PV2 最大功率点电压波形

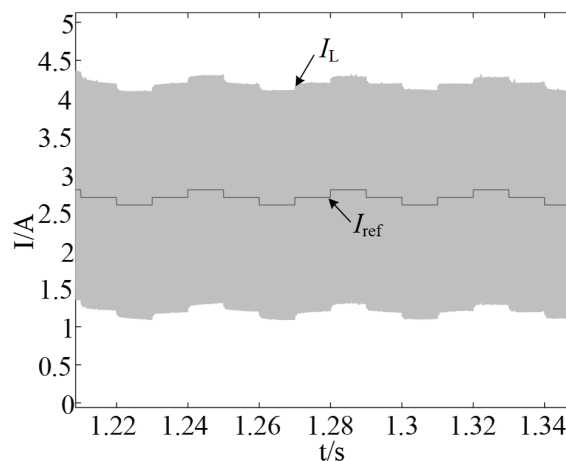


Figure 6. Partial waveform of inductance current and reference current

图 6. 电感电流与基准电流局部波形

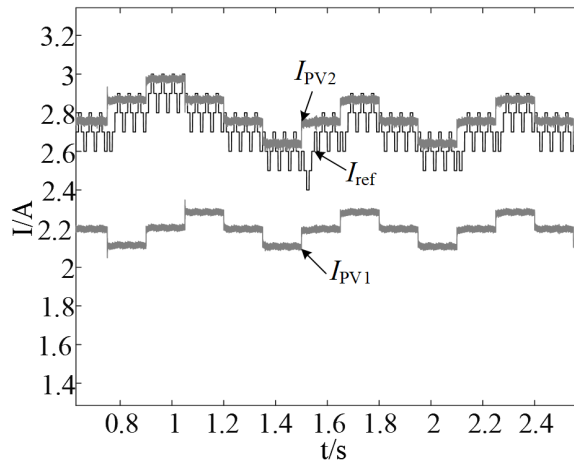


Figure 7. Reference current and PV module current waveform
图 7. 基准电流与光伏模块电流波形

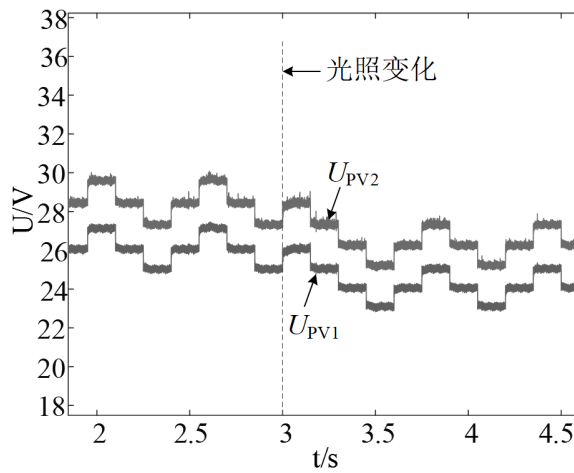


Figure 8. Maximum power point voltage waveform of PV1 and PV2
图 8. PV1、PV2 最大功率点电压波形

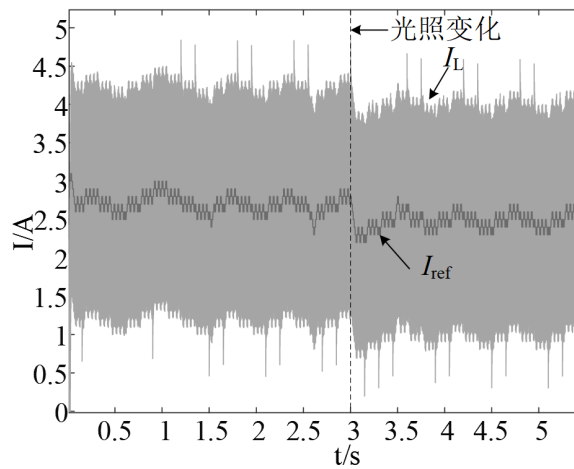


Figure 9. Inductive current and reference current waveform
图 9. 电感电流与基准电流波形

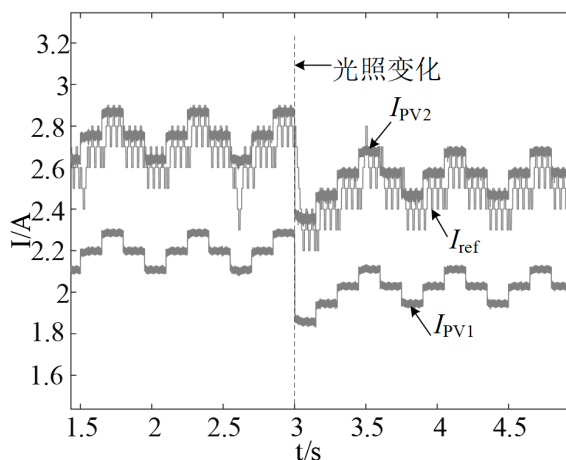


Figure 10. Reference current and PV current waveform
图 10. 基准电流与光伏模块电流波形

5. 结论

本文介绍了一种用于 PV-BUS 式 DPP 结构的 LPPT 控制算法，其目的是最大限度地减少光伏系统中 DPP 变换器所处理的功率。通过对理想情况进行数学分析，其电感电流 I_L 存在一点使得 DPP 变换器处理功率最小，并进行仿真验证。仿真结果表明，在静态光照与动态光照情况下，在光伏模块分别实现 MPPT 的同时，该控制算法可以跟踪 DPP 变换器处理功率的最小值。通过上述研究表明，LPPT 控制可以有效降低 DPP 变换器处理功率，使得系统运行于优化状态，具有一定应用价值。

参考文献

- [1] 韩春雷. 太阳能光伏发电技术现状与发展探讨[J]. 光源与照明, 2022(3): 95-97.
- [2] Başoğlu, M.E. (2019) An Improved 0.8 VOC Model Based GMPPT Technique for Nodule Level Photovoltaic Power Optimizers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **55**, 1913-1921. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2885216>
- [3] Xenophontos, A. and Bazzi, A.M. (2018) Model-Based Maximum Power Curves of Solar Photovoltaic Panels under Partial Shading Conditions. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **8**, 233-238. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2764488>
- [4] Biswas, J., Kamath, A.M., Gopi, A.K. and Barai, M. (2018) Design, Architecture, and Real-Time Distributed Coordination DMPPT Algorithm for PV Systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, **6**, 1418-1433. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2756698>
- [5] Kumar, N.B. and Mounika, M.N. (2018) Implementation of Differential Power Processing to Optimize the Solar Power Generation. 2018 *International Conference on Current Trends towards Converging Technologies(ICCTCT)*, Coimbatore, 1-3 March 2018, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICCTCT.2018.8551034>
- [6] Li, C. and Cobos, J.A. (2019) Differential Power Processing Architectures Accounting for the Differential Power of the Converters. 2019 *IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy (CPERE)*, Aswan, 23-25 October 2019, 88-93. <https://doi.org/10.1109/CPERE45374.2019.8980018>
- [7] Zhang, T. and Jiang, J. (2020) A Review on Differential Power Processing for PV Submodule DMPPT. 2020 *IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*, Jinan, 4-6 December 2020, 1012-1017. <https://doi.org/10.1109/SCEMS48876.2020.9352300>
- [8] 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.
- [9] Chu, G., Wen, H., Yang, Y. and Wang, Y. (2020) Elimination of Photovoltaic Mismatching with Improved Submodule Differential Power Processing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67**, 2822-2833. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2908612>
- [10] Jeong, H., Lee, H., Liu, Y. and Kim, K.A. (2019) Review of Differential Power Processing Converter Techniques for Photovoltaic Applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **34**, 351-360.

<https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2876176>

- [11] 胥杰, 刘超, 阚加荣. 基于 PV-IP 结构的差分功率处理光伏系统研究[J]. 电子设计工程, 2022, 30(1): 27-31, 36.
- [12] 章文龙, 肖文波, 郁纪, 吴华明. 局部遮荫下 12 种光伏阵列结构的输出特性研究[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(3): 70-79.
- [13] Lee, D.I., Hyeon, Y.J., Choi, J.H. and Youn, H.S. (2022) Differential Power Processing Converter with an Integrated Transformer and Secondary Switch for Power Generation Optimization of Multiple Photovoltaic Submodules. *Energies*, **15**, Article 1210. <https://doi.org/10.3390/en15031210>
- [14] Luz, C.M.A., Tofoli, F.L. and Ribeiro, E.R. (2021) Novel Differential Power Processing Topology for the Mitigation of Mismatch in Photovoltaic Systems. *Electronics Letters*, **58**, 67-69. <https://doi.org/10.1049/ell2.12364>
- [15] Elkeiy, M.A., Abdelaziz, Y.N., Hamad, M.S., AbdelKhalik, A.S. and Abdelrahem, M. (2023) Multiport DC-DC Converter with Differential Power Processing for Fast EV Charging Stations. *Sustainability*, **15**, Article 3026. <https://doi.org/10.3390/su15043026>
- [16] Lee, H.J. and Shon, J.G. (2022) Voltage Sensorless MPPT in a Differential Power Processing Photovoltaic System. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **18**, 687-696. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01204-1>
- [17] Park, S.H., Lee, H.J., Moon, H.R. and Shon, J. (2021) High Efficiency Operation of Photovoltaic System with Differential Power Processing Based on Voltage Reference Model. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **16**, 1175-1183. <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00627-y>
- [18] Faiad, A.A., Hamdan, E., Hamad, M.S., Abdel-Khalik, A.S. and Hamdy, R.A. (2020) Differential Power Processing for Data Centers Applications: A Comprehensive Review. *Alexandria Engineering Journal*, **59**, 1833-1846. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.002>
- [19] Uno, M., Yamamoto, M., Sato, H. and Oyama, S. (2020) Modularized Differential Power Processing Architecture Based on Switched Capacitor Converter to Virtually Unify Mismatched Photovoltaic Panel Characteristics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **35**, 1563-1575. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2922504>