

基于 STM32 的光伏储能 DC-DC 变换器设计

刘一儒¹ 王 宇¹ 孟丽因¹
LIU Yiru WANG Yu MENG Linan

摘 要

为满足光伏储能系统中宽范围输入与稳定输出的电力转换需求，文章设计了一种基于 STM32F103C6T6 的高效光伏储能双向 DC-DC 变换器，采用 Buck-Boost 拓扑和全桥同步整流技术，结合 PID 闭环控制与 MPPT 扰动观察算法，实现了输入 25~50 V 宽范围、输出 30 V/5 A 的稳定转换。通过优化 IR2184S 驱动电路，系统效率超过 90%，动态响应速度达 80 μ s，输出电压波动小于 ± 0.03 V。测试结果表明，在负载变化和输入电压波动条件下，系统电压调整率仅为 0.033%，验证了设计方案的有效性和稳定性，为光伏储能系统提供了可靠的电力转换解决方案。

关键词 双向直流变换器；嵌入式系统；PID 算法；最大功率跟踪

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.08.020

0 引言

随着可再生能源的普及，光伏发电系统在分布式能源领域愈发受瞩目。鉴于 DC-DC 变换器对提升光伏系统能量利用效率与稳定性举足轻重，其设计优化至关重要。本文聚焦基于 STM32 的光伏发电系统 DC-DC 变换器，以 STM-32F103C6T6 单片机为核心，借双向 DC-DC 电路实现电能转换，利用单片机生成的 PWM 信号驱动电路以保障负载电压稳定。设计融入 PID 与 MPPT 算法，依电流、电压反馈达成

恒压闭环控制、最大功率点跟踪及电池组充放电管理。经模拟光伏发电实验，系统直流电压输出稳定，效率超 90%，通过优化电路与算法，为光伏系统提供了高效可靠方案。

1 总体设计

本系统以 STM32 单片机为核心，构建了基于 PWM 控制的高效 DC-DC 变换器。引入 PID 与 MPPT 算法，实现恒压输出、最大功率点跟踪及电池充放电管理。系统由双向 DC-DC、辅助电源、驱动、电流采样与显示模块组成，在模拟光伏条件下运行稳定、效率超 90%，整体结构如图 1 所示。

1. 辽宁工业大学电子与信息工程学院 辽宁锦州 121000

surface: joint placement and passive beamforming design with 3D beam flattening[J].IEEE transactions on wireless communications, 2021,20(7):4128-4143.

[13] KHALILI A, MONFARED E M, ZARGARI S, et al.Resource management for transmit power minimization in UAV-assisted RIS HetNets supported by dual connectivity[J]. IEEE transactions on wireless communications,2022,21(3): 1806-1822.

[14] PAN Y J, WANG K Z, PAN C H, et al.UAV-assisted and intelligent reflecting surfaces-supported terahertz communications[J].IEEE wireless communications letters, 2021,10(6):1256-1260.

[15] HUA M, YANG L X, WU Q Q, C. et al.UAV-assisted intelligent reflecting surface symbiotic radio system[J].IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(9): 5769-5785.

[16] XU Y, ZHANG T K, LIU Y W, et al. Computation capacity enhancement by joint UAV and RIS design in IoT[J]. IEEE internet of things journal, 2022, 9(20): 20590-20603.

[17] GE M X, WANG L Y, ZHANG G L, et al. Joint optimization of task offloading and resource allocation in UAV-assisted mec networks[C]//2021 China Automation Congress (CAC). Piscataway:IEEE, 2021: 1879-1884.

[18] LIU C J, ZHONG Y L, WU R L, et al. Deep reinforcement learning based 3D-trajectory design and task offloading in UAV-enabled MEC system[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024,74(2):3185-3195.

【作者简介】
高航(2000—)，男，辽宁大连人，硕士研究生，研究方向：无线与移动通信技术。
(收稿日期：2025-02-28 修回日期：2025-07-29)

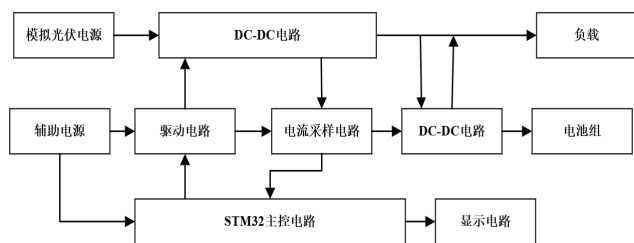


图 1 整体结构框图

2 系统硬件设计

为了实现光伏能量的高效转换与智能控制，系统设计以 STM32F103C6T6 单片机为核心，结合双向 DC-DC 变换电路及多个功能模块，完成对能量流动的管理与系统运行状态的实时监测^[1]。其硬件结构包括主控模块、电源变换模块、驱动与检测模块等。

2.1 主控电路设计

主控模块采用 STM32F103C6T6 单片机，该芯片基于 ARM Cortex-M3 内核，主频最高达 72 MHz，具备较强的运算能力和丰富的外设资源，适用于光伏控制系统中对多任务调度与算法处理的需求。系统最小化设计包括晶振时钟、复位电路、电源滤波电容及串口下载接口等，保障主控芯片稳定运行与程序调试。在供电方面，系统由 12 V 电源通过线性稳压器 JW5018 降压至 3.3 V，为主控芯片及低压模块供电，确保系统长期稳定运行^[2]。

本次设计采用 STM32F103C6T6 单片机作为主控芯片，3.3 V 电源通过滤波电容 C4、C5、C6、C7、C8 给单片机供电。主控电路原理图如图 2 所示。

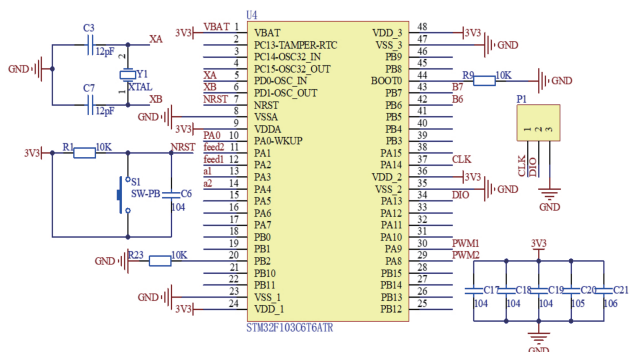


图 2 主控电路原理图

2.2 DC-DC 全桥整流电路设计

本系统采用双向 Buck-Boost 拓扑结构，实现光伏电能与储能电池之间的双向转换。主控芯片通过输出 PWM 信号控制 MOSFET 开关状态，从而调节输出电压，实现升压（Boost）或降压（Buck）功能^[3]。全桥同步整流结构进一步提升了转换效率并减小功率损耗。在典型运行场景下，系统输入电压范围为 25~50 V，输出稳定在 30 V，满足锂电池组的充放电控制要求。该拓扑结构具备转换效率高、动态响应快及结构

紧凑等优点，适用于分布式储能系统^[4]。本设计中，DC-DC 电路输出稳定至 30 V。DC-DC 全桥整流电路如图 3 所示。

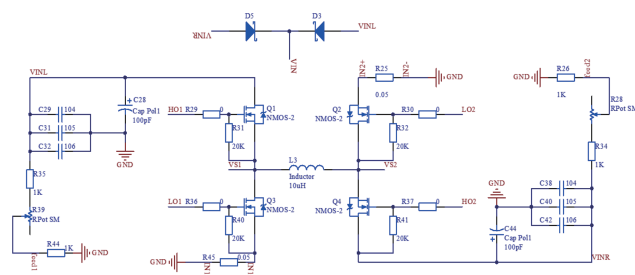


图 3 DC-DC 全桥整流电路图

2.3 MOS 驱动与采样电路设计

为提升 MOSFET 开关控制的精度与可靠性，系统驱动部分选用 IR2184S 高低边双路驱动芯片，具备欠压保护、死区时间控制等功能，能有效防止上下桥臂直通。该芯片接收主控芯片输出的 PWM 信号，驱动功率 MOS 管实现高效切换。电流采样部分选用 TPH5201-TR 霍尔电流传感器，其具备非接触测量、高灵敏度与线性输出特性，能够实时检测系统输出电流变化，为 PID 控制与 MPPT 算法提供有效数据支撑^[5]。MOS 驱动电路原理图如图 4 所示。

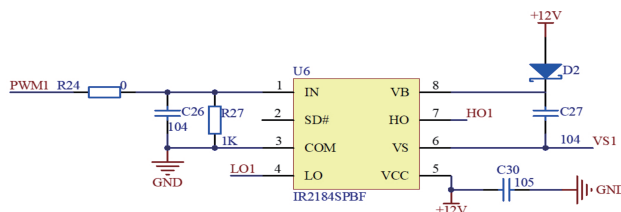


图 4 电源电路原理图

3 系统软件设计

3.1 主程序设计

系统以 STM32F103C6T6 为主控模块，通过 PWM 调节输出占空比，利用多通道 ADC 实现采样，采用模块化编程提升程序可读性与可维护性，可实现 PWM 占空比调节、多通道 ADC 采样与 OLED 显示等功能。程序初始化后持续检测 IO 信号变化，快速响应中断并调整输出，确保直流电压稳定与 MPPT 功能的实现。主程序流程如图 5 所示。

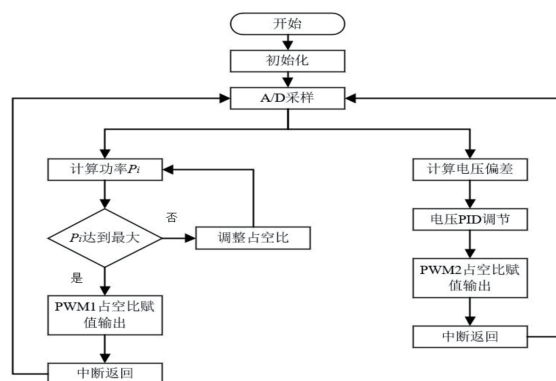


图 5 主程序流程图

3.2 MPPT 算法程序设计

MPPT（最大功率点追踪）技术广泛应用于太阳能发电系统，以最大化太阳能电池板输出功率。MPPT 控制系统通过实时监测电压和电流，动态调整电池板工作状态，提升能量转换效率和系统性能。结合 STM32 等控制器及算法，可以实现高效稳定的光伏变换器 MPPT 控制^[6]。扰动观察法是最常用的 MPPT 算法，操作简单、实现方便、对检测精度要求低。其原理是采样光伏输出电压 U_o 和电流 I_o ，计算输出功率 P_o ；引入扰动电压 ΔU 后再次采样 U_o' 、 I_o' 和 P_o' 。若输出功率增加，表明位于最大功率点左侧，继续正向扰动；若输出功率减小，则位于右侧，进行反向扰动。本文在该算法基础上引入动态步长调节策略，提升了系统的跟踪效率与响应速度，更好地适应实际光照条件变化。MPPT 算法实现流程图如图 6 所示。

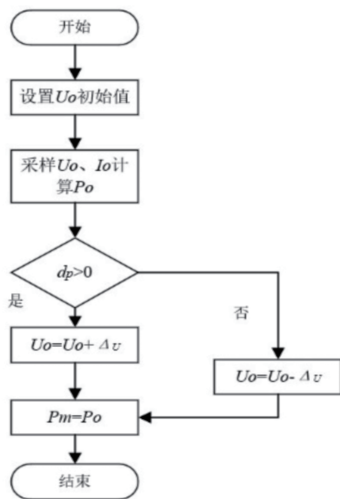


图 6 MPPT 流程图

4 系统测试

4.1 算法性能测试

在相同光照条件下，对比传统扰动观察法（P&O）与本文优化的动态步长 MPPT 算法性能（基于 STM32 实时调整步长）。测试在恒定光照强度约为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 条件下进行，环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。通过可编程电源模拟太阳能电池板特性，STM32 的 ADC 模块以 10 kHz 频率采样电压、电流信号，控制周期为 10 ms 。每组数据统计 100 次扰动周期的平均值，测试结果如表 1 所示。

表 1 MPPT 算法效率对比

算法类型	平均跟踪效率 /%	响应时间 /s	电压波动率 /%	平均输出功率 /W
传统 P&O	92.1	1.2	± 1.5	23.8
动态步长	96.7	0.4	± 1.8	25.2

由表 1 可见，本文提出的动态步长扰动观察法在平均跟

踪效率、响应速度及电压稳定性方面均优于传统算法，特别是在稳定性方面表现更佳，验证了改进算法在动态光照条件下的适应性和优越性。

4.2 数据采集与分析

为验证系统在负载突变时的动态响应性能，通过 STM32 输出 PWM 控制信号，并结合 ADC 模块采集负载变化下的输出电压 / 电流信号，记录其瞬态变化过程^[7]。PWM 信号频率设置为 20 kHz ，占空比范围 $0\%\sim 100\%$ ，用于驱动 DC-DC 变换器主功率器件，实现闭环稳压控制。图 7 为正常工况下的 PWM 驱动波形图。

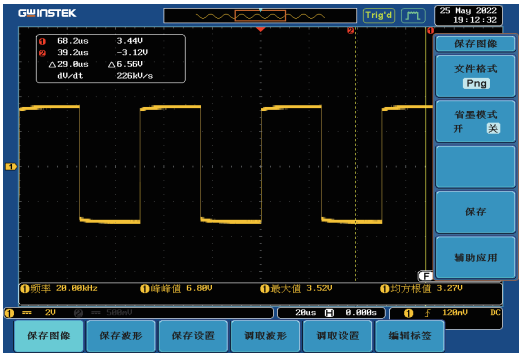


图 7 PWM 驱动波形图

采集的动态响应数据导出至 MATLAB，进行时域及频域分析，结果如图 8 所示。

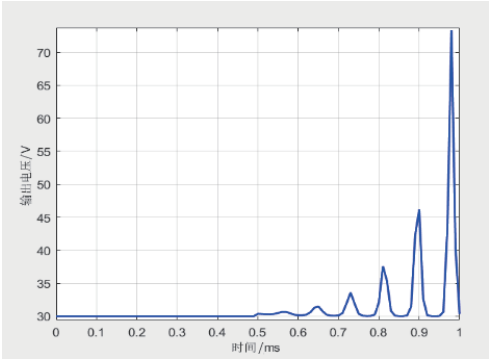


图 8 时域 / 频域分析图

由图 8 可见，系统电压能在短时间内相对稳定，响应无过冲，振荡幅度较小，说明所设计控制策略具有良好的快速性与稳定性。

4.3 效率 - 负载特性测试

本设计采用滑动变阻器作为负载，当整个光伏储能变换器开始运行，输入电压存在波动时，锂电池和输入电压同时给负载供电；当输入电压稳定时，输入电压同时给锂电池和负载供电。在不同负载电流下记录输入 / 输出功率，计算效率并生成曲线^[8]。效率测试数据如表 2 所示。通过对不同负载电流下的输入和输出功率进行记录，可以有效评估光伏储能变换器的性能。根据测试数据，计算出系统在各负载条件

下的转换效率。这些结果为理解系统在实际应用中的表现提供了重要依据。效率曲线如图9所示。

表2 负载效率测试数据

负载电流 /A	输入功率 /W	输出功率 /W	效率 /%
1.0	32.1	30.0	93.5
2.5	80.3	75.0	95.2
5.0	160.5	150.0	90.8

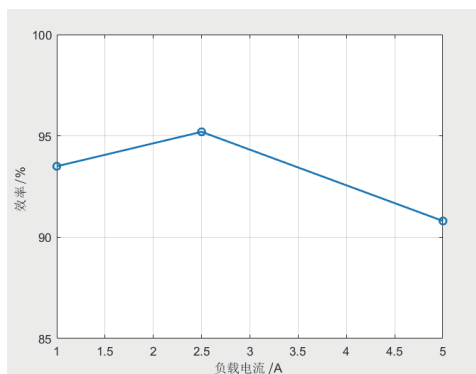


图9 效率曲线图

4.4 测试结果分析

在各部分电路测试完成后，对整个光伏储能DC-DC变换器进行集成测试。在输入电压范围从25~50V变化的条件下，连接恒定阻性负载（6Ω），使用多功能数字万用表对系统输入电压、输出电压和输出电流进行多次测量（每组电压下测量5次取平均值），以评估系统稳压与供电能力。测试结果如表3所示。

表3 测试结果表

次数	电源电压 U_i/V	输出电压 U_o/V	输出电流 I_o/A	输出功率 P_o/W
1	25	30.04	5.08	152.6
2	35	30.03	5.06	153.3
3	50	30.05	5.05	154.0

根据多次测量的数据可知，基于STM32的光伏储能变换器电路可以将范围为25~50V输入电压，输出电压稳定在30V，同时将输出电流稳定在5A的范围。此时通过测试结果表可以计算系统的电压调整率，计算公式为：

$$S_u = \left| \frac{U_{o2} - U_{o1}}{U_{o1}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

当 U_{o2} 为50V的输出电压，当 U_{o1} 为25V的输出电压，此时的电压调整率通过计算 $S_u = 0.033289\%$

在输入电压 $U_i = 25 \sim 50V$ ，输出电压30V，输出电流5A的条件下，计算公式为：

$$\eta = \frac{P_o + P_B}{P_i} \quad (2)$$

由计算效率的公式可知，在多次测量的数据中计算的效率均大于90%。

5 结论

本文设计了一种基于STM32F103C6T6的光伏储能双向DC-DC变换器，采用Buck-Boost拓扑和全桥同步整流技术，结合PID闭环控制与MPPT算法，实现了25~50V宽输入范围下30V/5A的稳定输出，系统效率超过90%。通过优化驱动电路和集成实时监测模块，动态响应速度达到80μs，电压调整精度±0.03%。测试结果表明，系统在负载变化和输入电压波动时均能保持稳定输出，电压调整率仅为0.033%，验证了设计的高效性和可靠性，为光伏储能系统提供了切实有效的电力转换解决方案，具有重要的应用价值与推广前景。

参考文献：

- [1] 杨川, 余坤蓉, 牟琪琦, 等. 光伏发电三端口DC-DC变换器设计[J]. 电子制作, 2022, 30(6):7-10.
- [2] 陶慧, 赵世彬, 贾春华. 光伏发电最大功率点跟踪Boost变换器动力学特性[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(5): 26-34.
- [3] 王丙元, 姜建. 基于滑模预测控制的光伏储能双向DC/DC变换器[J]. 电气自动化, 2022, 44(4):29-33.
- [4] 史永胜, 余强, 李雷, 等. 光伏混合储能双向DC/DC变换器非线性控制[J]. 电力电子技术, 2019, 53(12):28-31.
- [5] 戴寅松, 徐长帅, 马思宇. 基于STM32的太阳能充电系统设计[J]. 信息技术与信息化, 2019(2):43-46.
- [6] 关志艳. 三端口DC-DC变换器的设计与实现[J]. 山西电子技术, 2022(4):12-14.
- [7] 张大磊, 李媛媛. 光伏模拟器的设计[J]. 电子技术与软件工程, 2023(3):99-102.
- [8] 方子文, 窦英华, 杨亚红, 等. 基于Superbuck变换器的光伏MPPT调节器控制策略[J]. 电源学报, 2022, 20(5): 22-30.

【作者简介】

刘一儒（2000—），女，辽宁辽阳人，硕士，研究方向：电子与通信技术及其应用。

王宇（1974—），男，辽宁锦州人，学士，研究方向：传感器技术与传动应用。

孟丽园（1967—），女，辽宁锦州人，硕士，研究方向：电力电子与电力传动。

（收稿日期：2025-04-15 修回日期：2025-08-06）