DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.277 **中图分类号**：TM615 **文献标志码**：A

一种面向5G基站具备直流母线电压感知能力的限最大功率点跟踪算法

邾玢鑫[1](中国电源学会高级会员)，李 炀[1]，佘小莉[1]，覃团发[2]，胡永乐[3]
(1.三峡大学电气与新能源学院(湖北省微电网工程技术研究中心)，宜昌 443002；2.广西大学计算机与电子信息学院，南宁 530004；3.润建股份有限公司，南宁 530007)

摘要：分布式光伏直流汇入5G基站直流侧负荷不仅可提高光伏PV(photovoltaic)自身利用效率，也可降低其对末端配电网的不利影响。面向5G基站，针对传统扰动观察P&O(perturb and observe)法抗干扰能力较差及因PV出力波动或基站负荷变化而易引起直流母线电压越限的问题，提出了一种具备直流母线电压感知能力的限最大功率点跟踪LMPPT(limit maximum power point tracking)算法。一方面通过改进传统P&O法的扰动观察过程提高了算法的抗干扰能力；另一方面通过引入电压分层限功率控制策略确保了直流母线电压不越限，以维护基站设备的安全稳定运行。此外，采用全国产化器件搭建了额定功率为600 W的高效率、高功率密度PV直流汇流模块，功率密度达到了135.2 W/in^3，最高效率为98.9%，实验测试结果较好地验证了理论分析和设计思路。

关键词：光伏；5G基站；限最大功率点跟踪；直流汇流模块

Limit Maximum Power Point Tracking Algorithm with DC Bus Voltage Sensing Capability for 5G Base Stations

ZHU Binxin[1], *Senior Member*, *CPSS*, LI Yang[1], SHE Xiaoli[1], QIN Tuanfa[2], HU Yongle[3]
(1. School of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University (Hubei Provincial Research Center on Microgrid Engineering Technology), Yichang 443002, China; 2. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Runjian Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: The integration of distributed photovoltaic (PV) power into the direct current (DC) load within 5G base stations can enhance the efficiency of PV utilization and mitigate its adverse impact on the terminal distribution network. Aimed at the issues of poor anti-interference capability in traditional perturb and observe (P&O) methods and the DC bus voltage limit violations caused by PV output fluctuations or changes in load at base stations, a limit maximum power point tracking (LMPPT) algorithm with DC bus voltage sensing capability for 5G base stations is proposed in this paper. On one hand, the algorithm's anti-interference capability is enhanced by improving the perturbation and observation process of the traditional P&O method. On the other hand, the introduction of a voltage-tiered power limiting control strategy ensures that the DC bus voltage remains within limits, thereby maintaining the safe and stable operation of base station equipment. Additionally, a high-efficiency and high-power-density PV DC combiner module with a rated power of 600 W was built using domestic components, achieving a power density of 135.2 W/in^3 and a peak efficiency of 98.9%. Experimental results effectively validated the theoretical analysis and design ideas.

Keywords: Photovoltaic (PV); 5G base station; limit maximum power point tracking (LMPPT); DC combiner module

收稿日期：2024-05-20；**修回日期**：2024-06-28；**录用日期**：2024-08-01；**网络首发日期**：2024-09-02
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51707103)；广西壮族自治区重点研发计划资助项目(桂科 AB23026037)
This work is supported by the National Natural Science Foundation of China under the grant 51707103; the Guangxi Zhuang Autonomous Region Key Research and Development Plan under the grant AB23026037

5G基站全域布设是实现我国“新基建”战略的重要基础[1]。截至2025年底，我国累计建成5G基站483.5万个[2]。随着5G基站数量的快速增长，电力需求也随之大幅增加，带来了巨大的碳排放问

题[3]。光伏发电受光照强度、环境温度等自然因素的影响，其出力具有波动性和随机性[4-5]，大规模分布式光伏就地并网容易造成谐波污染、配电网电压波动和电能质量降低等问题，从而影响末端配电网的安全稳定运行[6]。将分布式光伏与 5G 基站直流侧负荷直接相连，既能解决光伏并网给电网带来的安全隐患，又能减少 5G 基站对配电网的电能需求和碳排放，已成为统筹推进我国“新基建”战略和“双碳”战略落地实施的有效途径[7-8]。

现阶段，针对 5G 基站与分布式光伏相结合的研究主要集中在光伏参与 5G 基站供电、5G 基站光储能源优化配置及调度策略等方面。文献[9-10]提出了 5G 基站光储系统容量优化配置方法，利用光伏发电解决 5G 基站用电成本高的问题，提高了 5G 基站运行的经济性；文献[11-13]提出了 5G 基站光储资源参与电网市场的协同优化调度策略，提高了基站能源利用率。然而，光伏直流汇流变换器作为连接光伏与 5G 基站的关键设备，目前鲜有研究立足工程实际应用场景——从软硬件的落地实现维度开展深层次探究，大多集中在最大功率点跟踪 MPPT (maximum power point tracking)算法的优化。文献[14]提出了一种具有超宽输入电压范围的新型光伏优化器，采用耐局部阴影 MPPT 算法实现了优化器在不同局部阴影场景下从光伏电池高效获取能量；文献[15]提出了一种基于双耦合电感的光伏直流变换器，采用改进扰动观察法提高了光伏系统的发电效率；文献[16-17]提出了适用于光伏直流串联系统的改进型 Boost 全桥隔离功率模块拓扑及多模式 MPPT 控制策略，实现了大功率高电压光伏功率变换功能，但系统结构复杂、功率密度低；文献[18]分析了通信数据信号通过光伏优化器的功率控制环路进行调制的可行性，提出了一种将数据通信和功率转换集成一体的高密度优化器设计方法；文献[19-20]提出了具备软启动控制策略的光伏直流变换器模块化设计方案，实现了对光伏电池的 MPPT 控制和输出端口的电压控制；文献[21]提出了一种模块化 DC-DC 变换器的自主控制方法，以直流母线电压水平作为信息载体，模块化 DC-DC 变换器可在恒压模式和 MPPT 模式切换，使其具有直流母线电压调节能力，但未考虑当直流母线电压处于不同模式控制区间的分界点时，可能出现在不同模式间来回切换的波动现象。上述文献提出的光伏直流汇流变换器采用不同的 MPPT 算法实现了光伏电池的最大功率输出，但未考虑光伏最大出力无法被基站负荷完全消纳时，易导致直流母线电压抬升越限造成基站设备损坏的问题。

针对上述问题，本文提出了一种面向 5G 基站具备直流母线电压感知能力的限最大功率点跟踪 LMPPT (limit maximum power point tracking)算法。一方面通过改进传统扰动观察法的扰动观察过程提高了算法的抗干扰能力；另一方面通过引入电压分层限功率控制策略确保直流母线电压不越限，以维护基站设备的安全稳定运行。此外，基于该算法本文提出了一种高效率、高功率密度的光伏直流汇流模块设计方案，且硬件电路所采用的器件实现了全国产化替代，面对日益复杂的国际局势可有效保障相关设备制造的供应链稳定。

1 系统结构及 LMPPT 算法实现思路

1.1 系统结构

本文所提 5G 基站光伏直流汇流系统结构如图 1 所示，光伏电池输出经所提光伏直流汇流模块直接接入直流母线，5G 基站直流负载消耗的总功率由光伏电池和基站开关电源提供。在光照条件不足、光伏出力无法满足基站直流负荷需求时，开关电源的输出功率将会增大以弥补系统功率缺额，确保直流母线电压不越下限；当光伏出力高于基站负荷需求时，所提 LMPPT 算法能够对光伏出力进行控制，将直流母线电压限制在安全范围内，确保直流母线电压不越上限。相较于传统分布式光伏交流并网，该结构减少了能量变换级数，有利于提高系统转换效率和降低基站建设成本。

1.2 具备直流母线电压感知能力的 LMPPT 算法实现思路

扰动观察法因控制相对简单、可低成本部署到

常用嵌入式平台，被广泛应用于实际工程中。然而传统扰动观察法一方面抗干扰能力较差，对硬件采样电路精度要求较高，电压电流采样信号一旦受到高次谐波信号干扰产生误差，将直接影响算法对光伏电池最大功率点的方向判断，使得光伏电池输出波动幅度较大甚至最大功率跟踪失效(采用国产器件时该现象较为明显)；另一方面，传统扰动观察法只能工作在最大功率跟踪状态，当光伏出力因天气等因素波动或 5G 基站负荷切换时，易出现光伏出力高于基站负荷需求的情况，导致直流母线电压上升越限，造成 5G 基站设备损坏。

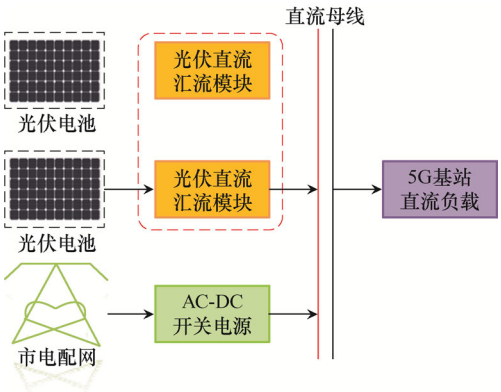


图 1　5G 基站光伏直流汇流系统结构

Fig. 1 Structure of 5G base station photovoltaic DC combiner system

本文通过改进传统扰动观察法的扰动观察过程来提高该算法的抗干扰能力，改进的扰动观察过程见表 1。周期性地给光伏电池的输出电压施加 2 次正向小扰动，并分别比较光伏电池当前输出功率变化量 ΔP_1 与前一周期的功率变化量 ΔP_2 的变化趋势：若 2 次功率变化量均增加，则正向追踪光伏电池最大功率点；若 2 次功率变化量均减小，则反向追踪光伏电池最大功率点；若 2 次功率变化趋势不一致，则保持光伏电池原输出功率状态。该方法

表 1　改进的扰动观察过程

Tab. 1 Improved perturbation and observation process

功率变化量 ΔP_1	功率变化量 ΔP_2	功率追踪方向
增加(+)	增加(+)	正向追踪
增加(+)	减小(−)	保持原功率
减小(−)	增加(+)	保持原功率
减小(−)	减小(−)	反向追踪

可有效改善传统扰动观察法因采样电路精度不足或采样信号受到干扰产生误差后，光伏电池输出出现较大幅波动使追踪精度变差的问题。

将 5G 基站直流母线电压分为额定电压 53.5 V 和留有安全裕量的最高电压 58.0 V 2 层，所提光伏直流汇流模块可在 MPPT 模式、LMPPT 模式及闭锁模式之间自主切换，以确保直流母线电压不越限，维护基站设备安全稳定运行。LMPPT 算法程序流程如图 2 所示，首先采集光伏电池的电压 u_{pv}、电流 i_{pv} 及直流母线电压 U_{Bus}，计算光伏电池的输出功率 P_{pv}。定义光伏电池功率追踪方向系数 K，其中：K=1 表示汇流模块正向追踪光伏电池最大功率点；K=−1 表示反向追踪光伏电池最大功率点；K=0 表示保持光伏电池原输出功率状态。接着将光伏当前输出功率与上周期输出功率作差得到当前输出功率变化量 ΔP_1，将光伏上周期输出功率与上上周期输出功率作差得到上周期的功率变化量 ΔP_2。ΔU 表示母线电压变化趋势，其中，ΔU>0 表示母线电压呈升高趋势；ΔU<0 表示母线电压呈下降趋势。传统电压分层控制未考虑直流母线电压运行于不同模式控制区间的分界点时，控制系统易在不同模式间来回切换的波动问题。然后，由于考虑了采样电路的精度，本策略取各模式分界点电压的±0.5 V 作为缓冲区，额定电压 53.5 V 处的缓冲区 δ_1 为 53.5±0.5 V，其上边界 δ_{1max} 为 54.0 V、下边界 δ_{1min} 为 53.0 V；最高安全电压 58.0 V 处的缓冲区 δ_2 为 58.0±0.5 V，其上边界 δ_{2max} 为 58.5 V、下边界 δ_{2min} 为 57.5 V。接着检测当前直流母线电压 U_{Bus} 所属电压区间，当光伏直流汇流模块最大功率点输出电压位于 δ_{1min} 区域内时，汇流模块将以 MPPT 模式全功率运行，其占空比调节量 ΔD 的初始值取 0.01。最后当光伏出力高于基站负荷需求，导致 U_{Bus} 上升超过 δ_{1max} 时，汇流模块将由 MPPT 模式切换至以 $U_{Bus,ref}$ 为参考电压的 LMPPT 模式限功率运行；当汇流模块由 LMPPT 模式再次切换回 MPPT 模式时，需满足下降到 δ_{1min}，否则维持当前运行模式；当 U_{Bus} 超过 δ_{2max} 时，汇流模块立即闭锁停止光伏出力，防止基站内设备损坏；当

汇流模块由闭锁模式再次切换回 LMPPT 模式，需满足 U_{Bus} 下降到$\delta_{2\min}$，否则维持当前运行模式。缓冲区的存在使得每个电压分层交界点处模式切换的电压上、下边界不同，有效避免了 U_{Bus} 位于电压分层临界点处出现 2 种模式来回切换的波动现象。

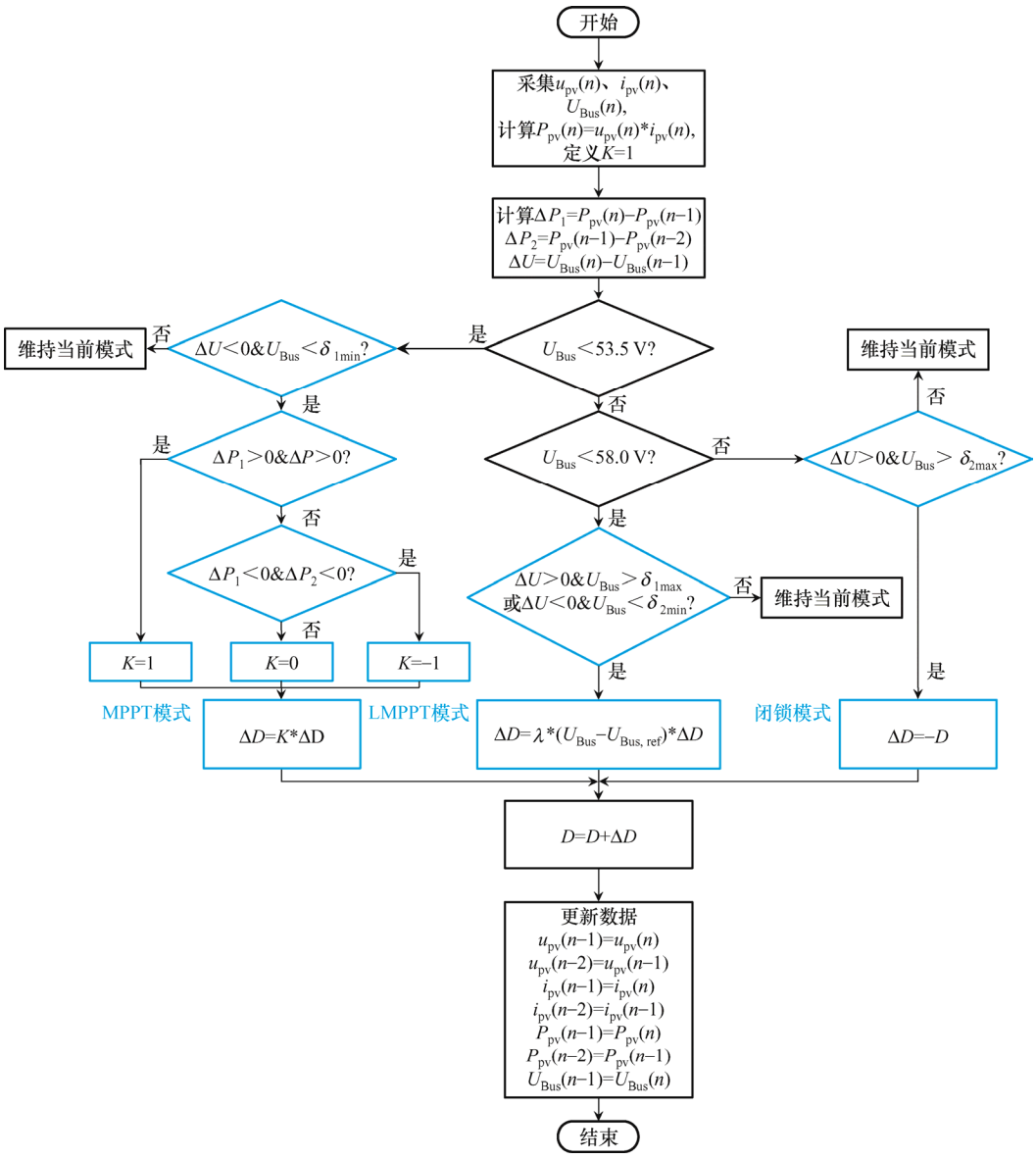


图 2 LMPPT 算法程序流程

Fig. 2 Flow chart of program for LMPPT algorithm

2 光伏直流汇流模块设计

2.1 光伏直流汇流模块结构

本文所提光伏直流汇流模块主要由主功率电路、辅助电源电路、采样电路、驱动电路、控制及保护部分构成，其结构如图 3 所示。主功率电路是光伏直流汇流模块的核心部分，负责调节光伏电池的输出电压和电流，以满足 5G 基站直流负载的功率需求，所采用的拓扑结构为同步 Buck 电路，具体如图 4 所示。辅助电源用于给电路其他部分提供稳定的电源，可确保即使光伏电池电压处于变化情况，汇流模块也能正常工作。光伏电池电压经辅助电源下降到驱动电路所需电压 12.0 V，再由线

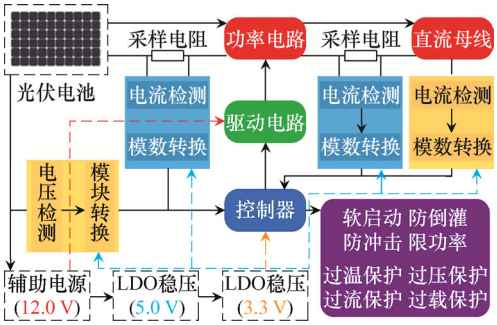


图 3　光伏直流汇流模块结构框图

Fig. 3 Block diagram of structure of photovoltaic DC combiner module

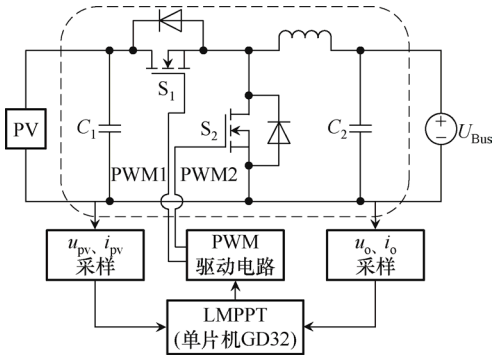


图 4　主功率电路

Fig. 4 Main power circuit

性 LDO 芯片输出 5.0 V 和 3.3 V 电压分别给电压、电流采样电路和控制器供电。采样电路可监测光伏电池的 u_{pv}、i_{pv}及汇流模块的输出电压 u_o、电流 i_o，用于给控制器提供参量，该参量是汇流模块对当前状态感知及进行精确控制的重要依据。其中，电压采样电路通过分压电阻对输入的高电压进行分压处理，电流采样电路则通过合金采样电阻将电流信号转换为电压信号，两者得到的衰减电压信号被差分运算放大器放大，经有源滤波电路将滤波后的电压信号进行模数转换，输入到控制器中。相较于传统采用电压电流霍尔传感器的方案，本文采用以国产运放为核心的采样电路，可在提高功率密度的同时降低成本。驱动部分采用具有自举能力的半桥驱动芯片 ID7S625 实现控制器对主功率开关管 S_1、S_2 的同步驱动。控制器采用 GD32 单片机，可根据采样电路提供的电压、电流数据进行 LMPPT 等运算处理，并为驱动产生互补的脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)控制信号，以实现对整个系统的控制。保护部分，主要由过温保护、过压保护、过流保护、过载保护、软启动、防倒灌、防冲击及限功率保护构成，用于在监测到温度、电压、电流等参数出现异常情况时及时切断电路，防止光伏直流汇流模块损坏。

2.2　主功率电路参数设计

2.2.1　功率电感

电感 L 的设计主要考虑电感电流的纹波，一般取值不超过流经电感平均电流的 20%，其计算公式为

$$L \geqslant \frac{(1-D)u_o}{2\alpha i_o f_s} \tag{1}$$

式中：D 为占空比；　α为电流纹波系数，本文取 15%。考虑成品电感的感值种类，L 采用感值为 47 μH 的铁硅铝磁环电感。

2.2.2　输入侧电容

若同步 Buck 电路输入端不添加储能电容，则光伏电池工作在断续状态，未处于最佳工作状态，因此需要接入输入电容 C_1 进行储能和减小输入电压纹波，C_1 的计算公式为

$$C_1 \geqslant \frac{D(1-D)i_o}{\beta u_{pv} f_s} \tag{2}$$

式中：u_{pv} 为输入电压；β为电压纹波系数，本文取 0.15%。考虑电容的耐压及等效串联电阻 ESR (equivalent series resistance)，C_1 选择 4 个耐压为 250 V、电容为 100 μF 的多层片式陶瓷电容器 MLCC(multi-layer ceramic capacitor)并联的方式来减小 ESR，以达到减小输入电压纹波、降低损耗的目的。

2.2.3　输出侧电容

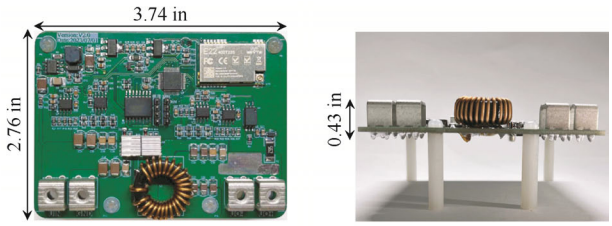
输出电容 C_2 的设计主要考虑输出电容电压的纹波，其计算公式为

$$C_2 \geqslant \frac{(1-D)u_o}{8\Delta V_p L f_s^2} \tag{3}$$

式中，ΔV_p 为输出电压纹波系数，本文取 0.1 V。由式(3)可得 C_2 为 70 μF，故选择 7 个耐压为 100 V、电容为 10 μF 的 MLCC 并联。

3 实验验证

为验证理论分析及参数设计的正确性，采用全国产化器件搭建了一台额定功率为 600 W 的工程样机，如图 5 所示。样机体积大小为 3.74 in×2.76 in×0.43 in，功率密度约为 135.2 W/in^3，具体样机参数见表 2。



(a) 正面 (b) 侧面

图 5 工程样机

Fig. 5 Engineering prototype

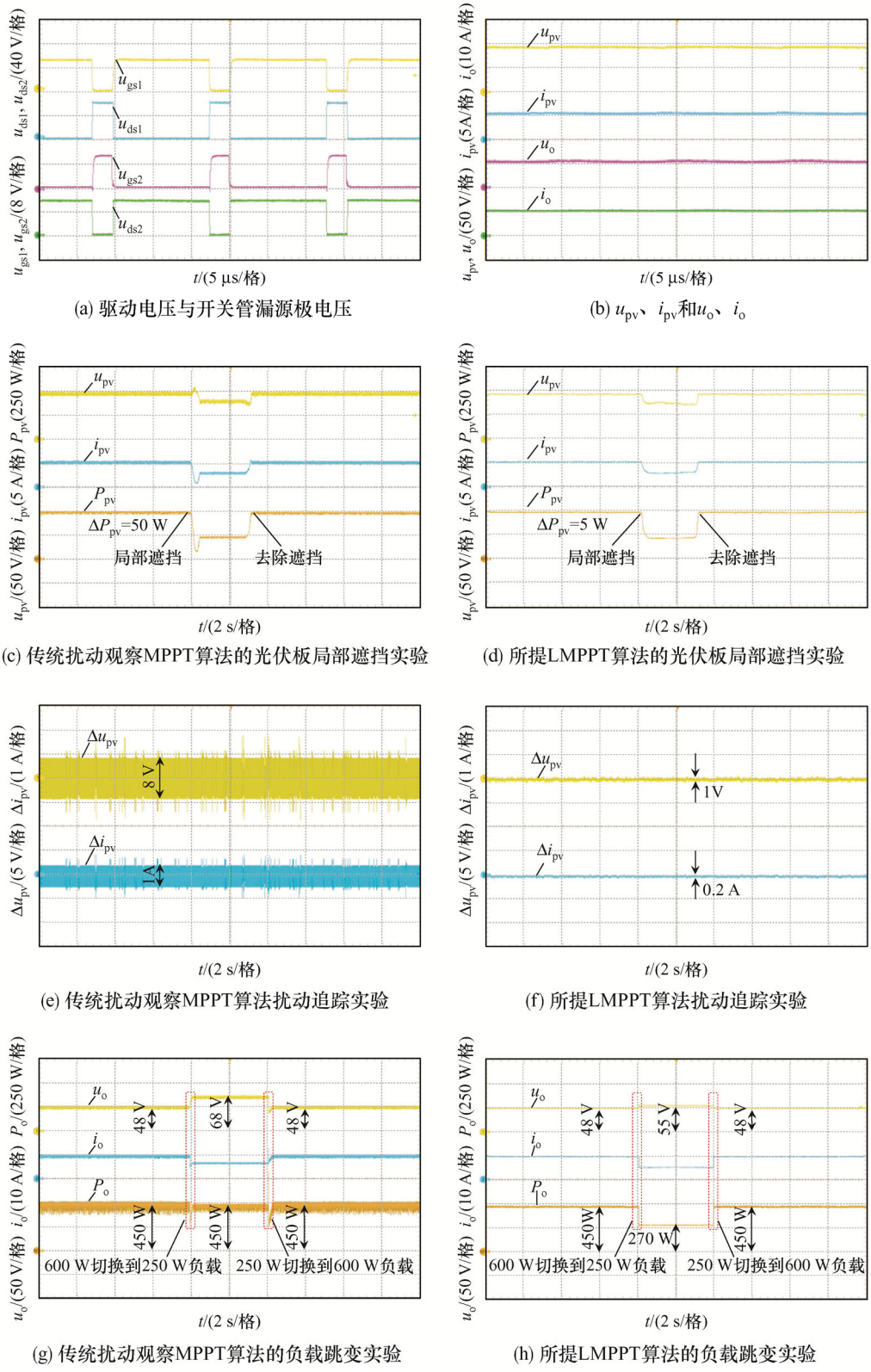
表 2 样机参数

Tab. 2 Prototype parameters

参数	数值(型号)
输入电压 u_{pv}/V	60~120(额定 60)
输出电压 u_o/V	48~58(额定 48)
输出功率 P_o/W	600
开关频率 f_s/kHz	65
开关管 S_1,S_2	VSP003N10HS
电感 L/μH	47
电容 C_1/μF	400
电容 C_2/μF	70

图 6 为样机的实验波形。其中图 6(a)为驱动电压和开关管漏源极电压波形图，图 6(b)为所提样机追踪到光伏电池最大输出功率时 u_{pv}、i_{pv} 与 u_o、i_o 的波形图。传统扰动观察 MPPT 算法和所提 LMPPT 算法运算周期均为 2.5 ms。图 6(c)和图 6(d)为本样机分别采用传统扰动观察 MPPT 算法和所提 LMPPT 算法在对光伏电池进行局部遮挡后再次去除遮挡的实验波形图。从图 6(c)中可以看出，传统 MPPT 算法在光伏电池最大功率点附近的功率波动幅度 ΔP_{pv}=50 W，当对光伏电池进行局部遮挡后有明显的功率下冲。相比之下，图 6(d)所示的采用所提 LMPPT 算法的样机在光伏最大功率点功率波动幅度 ΔP_{pv} 较小，为 5 W，且对光伏电池进行局部遮挡后功率无下冲。图 6(e)和图 6(f)为本汇流模块分别采用传统扰动观察法和所提算法在功率追踪过程中，光伏电池输出电压、电流波动峰峰值的波形图。为便于观察分析，示波器切换到交流耦合档位时过滤直流分量，只显示交流分量。从图 6(e)可以看出，传统扰动观察法受采样误差干扰，光伏最大工作点追踪精度差，光伏电池 Δu_{pv}≈8 V、Δi_{pv}≈1 A；而从图 6(f)可以看出，采用本文所提算法追踪过程中受采样误差影响较小，Δu_{pv}≈1 V、Δi_{pv}≈0.2 A，有效验证了所提算法具有较强的抗干扰能力，受采样电路误差影响较小，且无需采用高精度的电压、电流传感器即可实现较高的追踪精度，有利于国产器件的替代使用。

为了验证所提 LMPPT 算法的限功率特性，进行负载跳变实验，对样机 u_o、i_o 及 P_o 的波形进行了测量。初始条件的直流负载总功率为 600 W，其中光伏电池最大功率点输出功率为 450 W，基站开关电源提供 150 W。当负载从额定功率 600 W 切换到 250 W 后，从图 6(g)可以看出，传统 MPPT 算法会继续追踪到光伏电池最大输出功率 450 W，导致光伏出力远高于负载需要的功率 250 W，出现光伏电池最大出力无法完全被负载消纳的情况，此时母线电压从 48 V 升高到 68 V，远超直流母线安全电压上限，将烧毁 5G 基站直流母线上的设备。相比之下，从图 6(h)可以看出，本文所提 LMPPT 算法在负载跳变后，直流母线电压从 48 V 升高到 55 V，母线电压仍处于安全电压范围内，对应此时光伏最大出力由 450 W 限功率到 270 W，验证了所提 LMPPT 算法可有效保障直流母线电压不越限，维护基站设备的安全。为了验证所提光伏直流汇流模块具备的直流母线电压感知能力，约 4 s 后再次将负载由 250 W 切换回初始的 600 W。从图 6(h)可以看出，本直流汇流模块立即再次追踪到光伏最大输出功率 450 W，有效验证了所提光伏直流汇流模块在感知直流母线电压变化后可以在 MPPT 模式和 LMPPT 模式之间平滑无过冲切换，动态性能更优。



(a) 驱动电压与开关管漏源极电压　(b) u_{pv}、i_{pv}和u_o、i_o

(c) 传统扰动观察MPPT算法的光伏板局部遮挡实验　(d) 所提LMPPT算法的光伏板局部遮挡实验

(e) 传统扰动观察MPPT算法扰动追踪实验　(f) 所提LMPPT算法扰动追踪实验

(g) 传统扰动观察MPPT算法的负载跳变实验　(h) 所提LMPPT算法的负载跳变实验

图 6　实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms

图 7 为样机实测的效率曲线，所搭建的样机在不同输出功率等级的效率均在 98%以上。其中，工

作在 300 W 时效率最高，约为 98.9%；在额定功率 600 W 运行时效率约为 98.5%。图 8 为样机工作在额定功率 600 W 室温条件下拍摄的热成像图，最高温度为开关管温度 57.8 ℃。

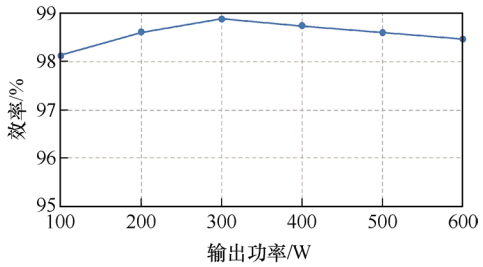


图 7 效率曲线

Fig. 7 Efficiency curve

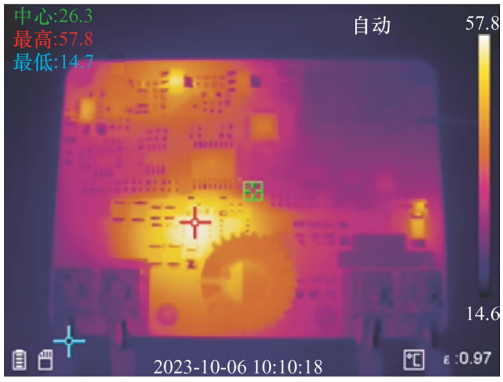


图 8 热成像图

Fig. 8 Thermal image

图 9 为样机在额定功率 600 W 运行时各部分的损耗分布。由图可知，主开关管和同步整流管总损耗为 4.19 W、电感损耗为 3.07 W、辅助电源及其他损耗为 1.73 W、电容损耗为 0.02 W。

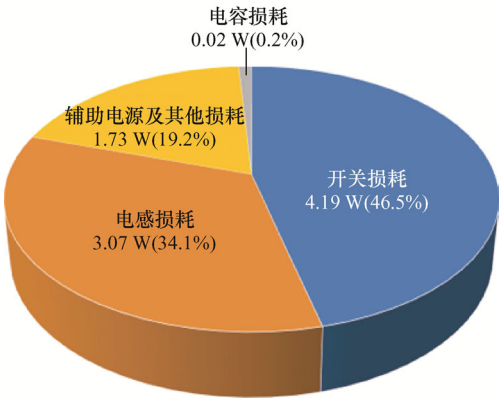


图 9 样机损耗分布

Fig. 9 Loss distribution of prototype

4 结论

本文面向 5G 基站光伏直流汇流的现实需求，提出了一种面向 5G 基站具备直流母线电压感知能力的 LMPPT 算法，理论与实验结果表明如下结论：

(1)所提算法可有效提升传统扰动观察法的抗干扰能力，有利于国产器件的替代使用；

(2)所提电压分层限功率控制策略可确保直流母线电压不越限，维护基站设备的安全稳定运行；

(3)硬件电路所采用的器件实现了全国产化，功率密度达到了 135.2 W/in^3，最高工作效率为 98.9%。

参考文献：

[1] 梁永亮, 吴跃斌, 马钊, 等. 新一代低压直流供用电系统在“新基建”中的应用技术分析及发展展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 13-24, 394.
Liang Yongliang, Wu Yuebin, Ma Zhao, et al. Application and development prospect of new generation of LVDC supply and utilization system in “new infrastructure” [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 13-24, 394. (in Chinese)

[2] 我国 5G 基站数达 483.8 万个[N/OL]. 中华人民共和国中央人民政府, 2026-01-28[2026-06-17]. https://www.gov.cn/lianbo/202601/content_7056423.htm.

[3] 李昆, 方家琨, 艾小猛, 等. 考虑通信与配套设备协调优化的大规模 5G 宏基站网络能量管理模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5391-5403.
Li Kun, Fang Jiakun, Ai Xiaomeng, et al. Energy management model of large-scale 5G macro base station network considering the coordinated optimization of communication equipment and standard equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5391-5403. (in Chinese)

[4] 刘宝宏, 陈斌, 钱立峰, 等. 改进 LGWO 和变步长 P&O 的光伏阵列功率跟踪策略[J]. 电源学报, 2026, 24(4): 110-121.
Liu Baohong, Chen Bin, Qian Lifeng, et al. Photovoltaic array power tracking strategy with improved Levy-flight grey wolf optimization and variable-step perturbation & observation [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(4):

110-121. (in Chinese)

[5] Zhu Binxin, Wang Huihui, Zhang Yao, et al. Buck-based active-clamp circuit for current-fed isolated DC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4337-4345.

[6] 郭景宇, 苏津毅, 刘佳, 等. 计及动态响应提升与二倍频功率解耦的单相构网型光伏-超级电容系统优化控制方案[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 168-181.
Guo Jingyu, Su Jinyi, Liu Jia, et al. Optimized control scheme for single-phase grid-forming photovoltaic-supercapacitor system considering dynamic response improvement and double-line frequency power decoupling [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 168-181. (in Chinese)

[7] 麻秀范, 刘子豪, 王颖, 等. 考虑通信负载迁移及储能动态备电的5G基站光伏消纳能力研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5832-5845, 5922.
Ma Xiufan, Liu Zihao, Wang Ying, et al. Research on photovoltaic absorption capacity of 5G base station considering communication load migration and energy storage dynamic backup [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5832-5845, 5922. (in Chinese)

[8] 邾玢鑫, 杨浴金, 黄煜, 等. 适用于基本DC/DC变换器的“外衣电路”拓扑家族研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4151-4161.
Zhu Binxin, Yang Yujin, Huang Yu, et al. Research on family of “coat circuit” topology for basic DC/DC converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4151-4161. (in Chinese)

[9] 韩子颜, 王守相, 赵倩宇, 等. 计及分时电价的 5G 基站光储系统容量优化配置方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 8-15.
Han Ziyan, Wang Shouxiang, Zhao Qianyu, et al. A capacity optimization configuration method for photovoltaic and energy storage system of 5G base station considering time-of-use electricity price [J]. Electric Power, 2022, 55(9): 8-15. (in Chinese)

[10] Zhang Xiang, Wang Zhao, Liao Haijun, et al. Optimal capacity planning and operation of shared energy storage system for large-scale photovoltaic integrated 5G base stations [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 147: 108816.

[11] 张禄澳, 范一芳, 王宇轩, 等. 光储式 5G 通信基站集群灵活性聚合与协同调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 101-110.
Zhang Luao, Fan Yifang, Wang Yuxuan, et al. Flexible aggregation and coordinated scheduling strategy for renewable powered 5G communication base station clusters [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 101-110. (in Chinese)

[12] 陈实, 郭正伟, 周步祥, 等. 考虑 5G 基站储能可调度容量的有源配电网协同优化调度方法[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5225-5237.
Chen Shi, Guo Zhengwei, Zhou Buxiang, et al. Coordinated optimization scheduling for active distribution networks considering schedulable capacity of energy storage for 5G base stations [J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5225-5237. (in Chinese)

[13] 毛安家, 张丽婧, 盛倩倩. 考虑通信可靠性的 5G 基站储能聚合商优化调度研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2364-2374.
Mao Anjia, Zhang Lijing, Sheng Qianqian. Research on optimal scheduling of 5G base station energy storage aggregators considering communication reliability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2364-2374. (in Chinese)

[14] Vinnikov D, Chub A, Liivik E, et al. Solar optiverter—A novel hybrid approach to the photovoltaic module level power electronics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3869-3880.

[15] Forouzesh M, Shen Yanfeng, Yari K, et al. High-efficiency high step-up DC-DC converter with dual coupled inductors for grid-connected photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5967-5982.

[16] 黄欣科, 王环, 卢俊龙, 等. 光伏中压直流变换器串联系统控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2327-2338.
Huang Xinke, Wang Huan, Lu Junlong, et al. Series system and its control strategy of photovoltaic medium voltage DC converter [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2327-2338. (in Chinese)

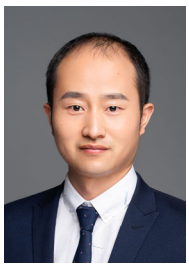
[17] 黄欣科, 王环, 周宇, 等. 兆瓦级光伏中压直流并网变换器研制及实证应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 150-157.
Huang Xinke, Wang Huan, Zhou Yu, et al. Development and empirical application of megawatt-level medium-voltage DC photovoltaic grid-connected converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 150-157. (in Chinese)

[18] Zhu Yue, Wu Jiande, Wang Ruichi, et al. Embedding power line communication in photovoltaic optimizer by modulating data in power control loop [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3948- 3958.

[19] 杨晨, 王烨, 毛玲, 等. 基于电流源半桥变换器的光伏直流模块研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 314-319.
Yang Chen, Wang Ye, Mao Ling, et al. Study on DC photovoltaic module based on current-fed half bridge converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 314-319. (in Chinese)

[20] 朱小全, 侯鹏辉, 侯锦涛, 等. 带有 LC 串联谐振功率自均衡单元的模块化光伏直流升压变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1087-1102.
Zhu Xiaoquan, Hou Penghui, Hou Jintao, et al. A modular photovoltaic DC-DC Boost converter with LC series resonant self-power balancing unit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1087-1102. (in Chinese)

[21] Sun Kai, Zhang Li, Xing Yan, et al. A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 3032-3045.



邾玢鑫

作者简介：

邾玢鑫(1986—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：新能源电力变换技术，高效率 DC-DC 变换器拓扑及控制。E-mail：zhubinxin40@163.com。

李炀(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：高效率高功率密度 DC-DC 变换器拓扑及控制。E-mail：1941514572@qq.com。

佘小莉(1988—)，女，通信作者，硕士，讲师。研究方向：电力电子技术在电力系统中的应用，柔性直流输电。E-mail：463935184@qq.com。

覃团发(1966—)，男，博士，教授。研究方向：无线多媒体通信，智能电网信息技术。E-mail：tfqin@gxu.edu.cn。

胡永乐(1980—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：移动通信，智能电网信息工程。E-mail：huyongle@runjian.com。

(责任编辑：孙美菊)