文章编号：1008－8857(2025)03－0159－09 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2025.03.005

基于静态电压补偿及衰减评估的逆变器能效优化方法

王 雷[1,2]，邹 健[1,2]，徐亦淳[1,2]，霍 勇[1,2]，董昕昕[1,2]，薛明华[1,2]
（1. 上海电力新能源发展有限公司，上海 200010；2. 上海明华电力科技有限公司，上海 200090）

摘 要：光伏组件随着投运时间增长会发生老化，导致发电能力下降，且工作点左移，使得逆变器直流侧输入电压下降，逐渐偏离额定电压。探讨采用直流侧补偿方式优化光伏组串发电效能的可行性，并对光伏组件和光伏逆变器的工作特性进行了研究。在此基础上，结合前期直流微网和直流末端适配技术研究成果，研制了直流电压补偿装置，并将其应用于某光伏电站逆变器下属汇流箱的输入端。利用全功率段逆变器有功转换效率评估模型评估不同时间周期内逆变器效率衰减情况。结果表明，该直流电压补偿装置能够有效补充光伏组串的发电能力，且在一定程度上抑制了设备性能衰减以及积灰等因素带来的效率降低的影响，使低负载运行下效率提升显著。

关键词：光伏发电；直流补偿；全功率段逆变器效率评估；提质增效
中图分类号：TM615 **文献标志码**：A

Research on inverter efficiency optimization method based on static voltage compensation and degradation assessment

WANG Lei[1,2], ZOU Jian[1,2], XU Yichun[1,2], HUO Yong[1,2], DONG Xinxin[1,2], XUE Minghua[1,2]
(1. Shanghai Electric Power New Energy Development Co., Ltd., Shanghai 200010, China; 2. Shanghai Minghua Electric Power Science Co., Ltd., Shanghai 200090, China)

Abstract: With increasing operation time, photovoltaic (PV) modules undergo aging, leading to reduced power generation capacity and a leftward shift of the operating point. This causes a decrease in the inverter's DC-side input voltage, gradually deviating from the rated voltage. This study explores the feasibility of optimizing PV string power generation efficiency through DC-side voltage compensation. The operating characteristics of PV modules and inverters are theoretically analyzed. Based on this, and combined with previous research on DC microgrid and DC terminal adaptation technologies, a DC voltage compensation device was developed and applied at the input end of the combiner box associated with an inverter in a PV power plant. An inverter efficiency

收稿日期：2024－05－22
第一作者：王 雷(1982—)，男，硕士。研究方向：新能源、电气工程、电力市场营销。
E-mail：xmh2000@126.com

degradation assessment model covering the full power range was used to evaluate efficiency decay over different time periods. Results show that the DC voltage compensation device can effectively supplement the power generation capacity of the PV strings and partially offset efficiency losses caused by equipment degradation and soiling. Significant efficiency improvements were observed under low-load operation.

Keywords: photovoltaic power generation; DC compensation; full-range inverter efficiency assessment; quality and efficiency improvement

维护存量光伏电站、提高电站发电能效是光伏领域的重要课题。数字化与太阳能光伏系统的集成优化研究具有重要的理论和实践意义[1]。目前在平价上网背景下，通过数字化转型降低成本、提高效率是光伏产业提高竞争力的重要途经之一。提高光伏发电效率的方法主要包括优化最大功率点追踪 (maximum power point tracking, MPPT) 算法、优化光伏逆变器控制策略和改善光伏逆变器拓扑结构等。这些方法应用于光伏电站建设前的设备选型过程中。对于已建成运行的光伏电站，则主要通过更换衰减设备的方式增加发电量，但该方式新增投资高，回收周期长。

本文通过“软硬结合”的方式。硬件上，通过增设增压补偿装置，探讨采用直流电压补偿装置补充光伏组串发电能力，以解决光伏组件衰减导致的逆变器直流侧输入电压降低和有功转换效率下降问题的可行性。软件上，利用大数据分析手段，提出了光伏逆变器全功率段效率量化方法和发电效率衡量指标，用于验证直流电压补偿装置对光伏电站能效的提升效果，以及评估逆变器能效水平，从而为场站提质增效提供技术支撑。

1 光伏组件能效提升发展现状

1.1 利用硬件改造提升光伏电站能效

目前组件匹配及线路和直流转换为交流等因素均会影响光伏电站效率。运行年限较长的光伏电站可通过硬件设备升级改造进行提质增效。升级改造主要针对组件、逆变器、集控系统、汇流箱、无功补偿等。目前光伏电站技改主要分为 3 个方面：一是效益型技改，包括电站增容改造、老旧设备更换、电势诱导衰减（potential induced degradation，PID）效应抑制装置改造等；二是生产型技改，包括自动电压控制（automatic voltage control, AVC）系统升级改造、无功补偿改造、监控系统升级技改；三是安全性技改[2–6]。

1.2 利用智能算法提升光伏电站能效

光伏电站的数据一般容量较大且冗杂繁多，且光伏电站本身的不稳定性、区域性和分散性，给光伏电站的监控、通信和运行管理带来了巨大挑战[7]。通过对光伏设备运行状态的监控大数据进行统计、分析，形成有针对性的数据模型，从而对光伏电站进行有效的智能管理，并及时发现运行中存在的问题，为光伏电站的运维及提质增效的解决方案提供数据支撑[8]。

目前光伏发电系统优化主要采用智能算法提高光伏发电系统发电效率和可靠性[6]。国内外研究的优化方案主要包括：

(1)针对光伏发电系统发电量的优化。例如由于不同天气条件下光伏发电量存在差异，将智能算法引入光伏发电系统中，模拟各种天气条件下的光照条件，使光伏发电系统的发电量最大化。优化电站光功率预测系统算法，从而提高光功率预测准确性[9–11]。

(2)针对光伏发电系统发电效率的优化。由于传统的光伏发电系统效率低下，研究人员通过引入智能算法、调整太阳能电池板的布局和安装角度以提高系统的光吸收效率等方式，提高光伏发电系统发电效率[12–13]。

(3)针对光伏发电系统控制策略的优化。固定的控制策略未考虑太阳能光照不稳定性等问题，而智能算法可进行主动控制，使系统优化控制策略更加灵活和自适应。

2　逆变器直流电压补偿理论

2.1　光伏逆变器有功转换效率影响因素

逆变器有功转换效率与其直流侧输入功率息息相关。当负载率较低时，有功转换效率呈上升趋势。当负载率达到一定水平后，有功转换效率几乎不再发生变化。负载率取决于光伏组串的输出功率，也即取决于太阳辐射强度和光伏组件的转换效率[14]。

另一方面，逆变器直流侧输入电压也是有功转换效率的影响因素。一般情况下，逆变器额定直流输入电压约等于最大交流输出电压的 1.414 倍。以交流输出电压最高 253 V 为例，（253×1.414）V=358 V，所以额定直流电压定义为 360 V。不同电压下逆变器有功转换效率有明显区别[[15]]。额定直流输入电压 360 V 下有功转换效率最高。因此，如果将逆变器直流侧电压设计在额定电压附近，则逆变器有功转换效率较高[16]。

2.2　直流电压补偿装置

基于前期直流微网研究成果和直流末端适配技术，研发光伏直流补偿实验验证装置。该装置串联接入光伏组串，并通过设定输出电压使其所在光伏组串的整体输出电压保持在最优工作电压。当光伏组串因老化原因输出电压下降时，可通过调整直流电压补偿装置的输出电压补充光伏组串的发电能力，同时提高电网稳定性[17]。图 1 为本文所提的直流电压补偿装置拓扑结构图。

直流电压补偿装置理论上对于光伏场站提升发电量具有如下益处：

一是通过叠加低功率段光伏组串输出功率，增大了清晨和傍晚时段逆变器输入功率，使逆变器提前并网并延后离网，从而增加发电时长；

二是提升了光伏组串输出电压，补充了因光伏组串衰减造成的电压下降，有利于逆变器工作在额定电压附近，从而使有功转换效率保持在较高水平[18–20]。

3　实验过程

某光伏电站分为 50 个区，每区设置 A 逆变器和 B 逆变器，每台逆变器额定输出功率为 500 kW。

29 区 A、B 逆变器各设置 8 台直流汇流箱，A、B 逆变器下分别有 108、120 个光伏组串。按光伏组件铭牌计算，组串理论最大发电能力为 4 804.8 W。

实验分为两个阶段：第一阶段将直流电压补偿装置安装于 29 区 A 逆变器的 7 号（A7）直流汇

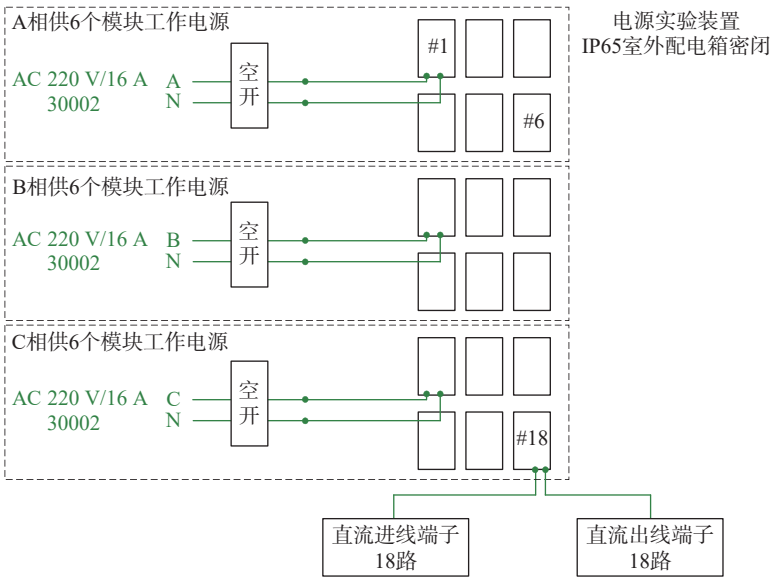


图 1　直流电压补偿装置拓扑结构

Fig. 1　Topology of the DC voltage compensation device

流箱的输入端；第二阶段受现场环境因素及安装条件限制，将直流电压补偿装置分别安装于 29 区 A 逆变器剩余的 7 台（A1～A6，A8）直流汇流箱的输入端。各阶段实验装置安装点位如图 2 所示。

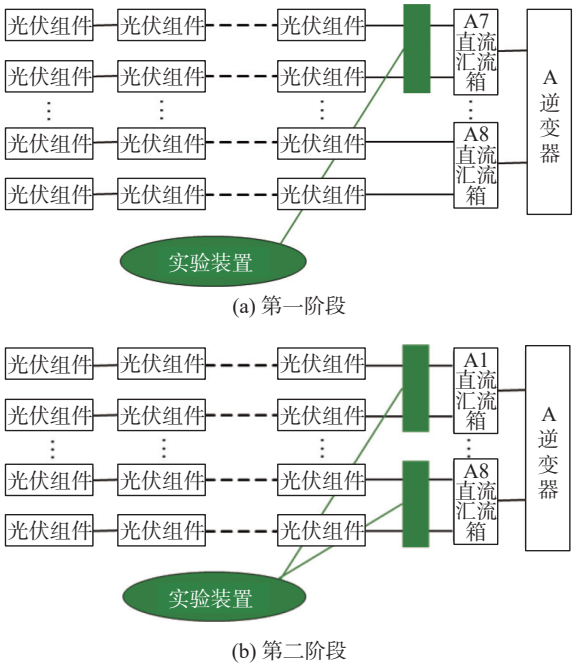


图 2 各阶段实验装置安装点位

Fig. 2 Installation locations of experimental devices at various stages

同时，为 29 区两台逆变器安装远程数据采集系统，如图 3 所示，其中：DTU 为数据传输单元；HTTP 为超文本传输协议。采集数据包括 16 台直流汇流箱的输出电流、逆变器直流侧输入电压以及逆变器交流侧输出功率。

4 数据分析

4.1 逆变器有功转换效率评价方法

该电站逆变器有功转换效率特性如图 4 所示。由图可见，逆变器有功转换效率散点图存在 1 条“主线”，但是受测量误差和外部环境等因素的影响，“主线”周围分布着异常点，若直接对数据进行回归分析会产生较大误差，因此首先对数据进行清洗。清洗步骤为：

第一步：初始化有效样本点集 A 为空，并观察逆变器运行数据范围，确定滚动初始点 P_s 和滚动终止点 P_e（以 29 区 A 逆变器为例，P_s 为 50 kW，P_e 为 500 kW）；

第二步：设定切片长度 l 和滚动步长 s，$l \geqslant s$；

第三步：以 P_s 为起点、l 为切片长度划分第一个切片，利用 k−means 聚类寻找第一个切片的簇中心，将与簇中心的有功效率相差不超过 1% 的点作为第一个切片的有效样本点，放入有效样本点集 A 中；

第四步：以 P_s+s 为起点划分第二个切片，筛选有效样本点，并将其放入有效样本点集 A 的尾部，依此类推，直至 P_e 纳入切片范围并筛选出有效样本点为止；

第五步：当 $l>s$ 时，切片之间存在重叠，即一个样本被多次存放于 A 中，此时需要删除 A 中重复的数据，从而得到最终有效样本点集。

有效样本点集中样本的数目定义为“有效样本数”。对经数据清洗后的有功转换效率散点进

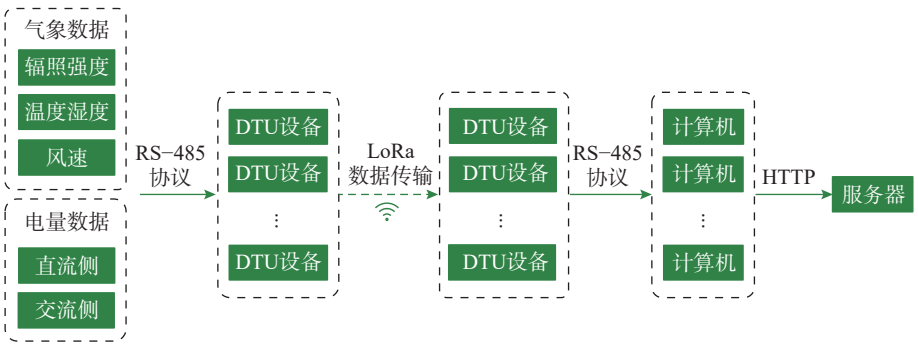


图 3 远程数据采集系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the remote data acquisition system

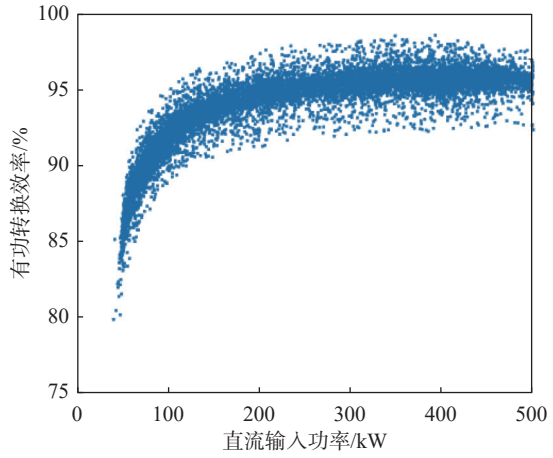


图 4　逆变器有功转换效率特性散点图

Fig. 4　Scatter plot of original efficiency characteristics

行回归分析，得到逆变器全功率段有功转换效率，如图 5 所示。

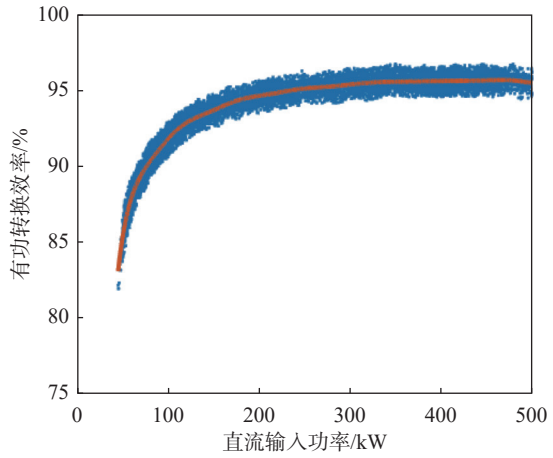


图 5　经数据清洗和拟合后的有功转换效率

Fig. 5　Efficiency after data cleaning and fitting

逆变器的综合发电效率定义为不同负载率下有功转换效率的加权和，权重由光资源分布决定。计算步骤为：

(1)以 5 kW 为间隔，计算直流输入功率数值分别在 [0，5]、(6，10]、(11，15]…(496，500] 范围的概率，记为向量 $\boldsymbol{a}$；

(2)计算每个直流输入功率区间中点的有功转换效率，记为向量 $\boldsymbol{b}$；

(3)逆变器综合发电效率 $\eta = \boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}$。

4.2　实验数据分析

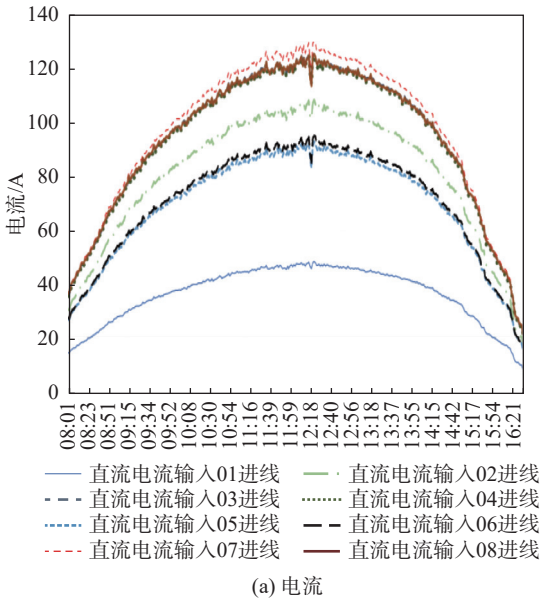
4.2.1　第一阶段实验结果分析

第一阶段实验仅在 A7 直流汇流箱的输入端安装实验装置。为排除环境因素影响，选取安装实验装置后某晴天一天内的 A 逆变器运行数据，将 A7 直流汇流箱数据与 A 逆变器剩余未安装实验装置的 7 台直流汇流箱数据进行对比。

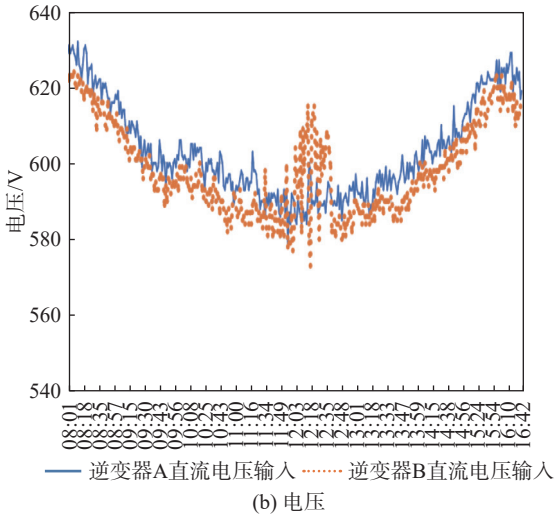
A 逆变器直流侧电流、电压、功率对比如图 6 所示。由图 6 可知：

(1)第一阶段实验中仅于 A 逆变器单条进线安装增压装置，故 A 逆变器直流侧电压略高于 B 逆变器的，平均增幅为 0.82%，但仍可确定增压装置具有一定的增压效果；

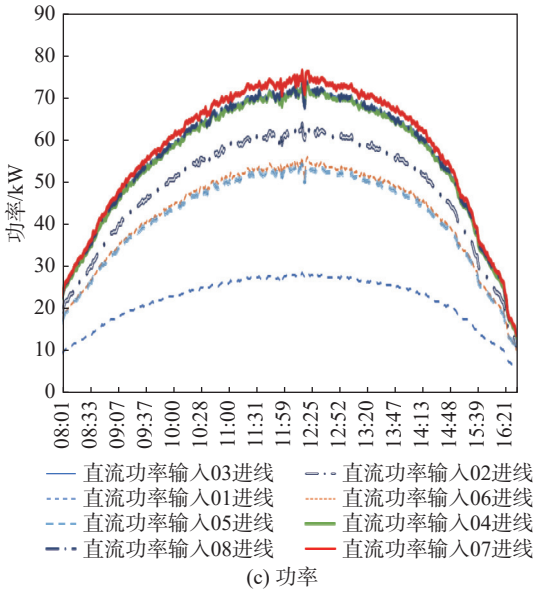
(2)安装直流电压补偿装置的 A7 直流汇流箱的电流显著高于具有相同组件数的 A3、A4、A8 直流汇流箱的。由图 6(a)可知：A7 直流汇



(a) 电流



(b) 电压



(c) 功率

图 6 A 逆变器直流侧电流、电压、功率对比

Fig. 6 Comparison of DC-side current, voltage and power of inverter A

流箱电流比 A4 直流汇流箱的大 4.28%；A7 直流汇流箱单支路组串最大日实时平均增发功率为 2.38 kW，最大时刻增发功率为 4.12 kW。可见，该补偿装置有效补充了光伏组串的发电能力。

4.2.2 第二阶段实验结果分析

为更好地对比增加增压补偿装置对光伏发电能力及逆变器效率增益的影响，第二阶段实验在 A 逆变器除 A7 直流汇流箱以外的剩余 7 台直流汇流箱的输入侧均安装了实验装置。

为排除环境因素影响，选取安装实验装置前、后峰值发电功率在近似晴天的一天内的 A、B 逆变器运行数据进行对比。

图 7 为 A、B 逆变器输入功率对比。图 8 为安装电压补偿装置前、后，A、B 逆变器平均 MPPT 电压对比。图 9 为安装电压补偿装置前、后逆变器有功转换效率对比。表 1 为 29 区 A、B 逆变器上报发电量对比。

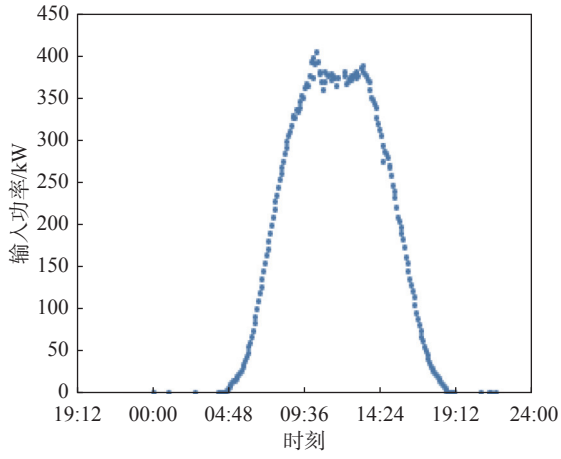
由以上对比可知：

(1) 对比 A、B 逆变器 MPPT 电压可看出，安装增压补偿装置前，A 逆变器平均 MPPT 电压与 B 逆变器的相近，而安装增压补偿装置后，A 逆变器平均 MPPT 电压较 B 逆变器的约提升 10%，证明此时增压补偿效果显著。

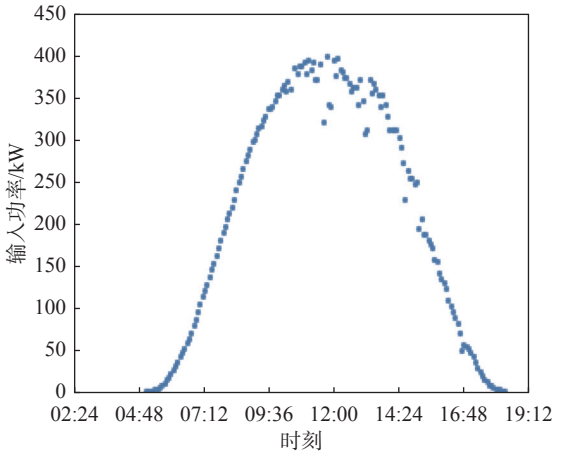
(2) 对比 A、B 逆变器在不同功率下的有功转换效率可看出，安装增压补偿装置后，在低功率下 A 逆变器有功转换效率相对于 B 逆变器的有一定提升。

(3) 由输入功率曲线可看出，所选安装增压补偿装置前、后两个典型日输入功率曲线近似，且光照强度等环境因素近似。由日峰值输入功率并对比 A、B 逆变器上报的日发电量可看出，安装增压补偿装置前，A、B 逆变器因下属组串容量不同，发电量差值约为 300 kW·h，但安装增压补偿装置后，A 逆变器的发电量较 B 逆变器的提升约 50 kW·h。可见，该补偿装置有效提升了光伏组串的发电能力。

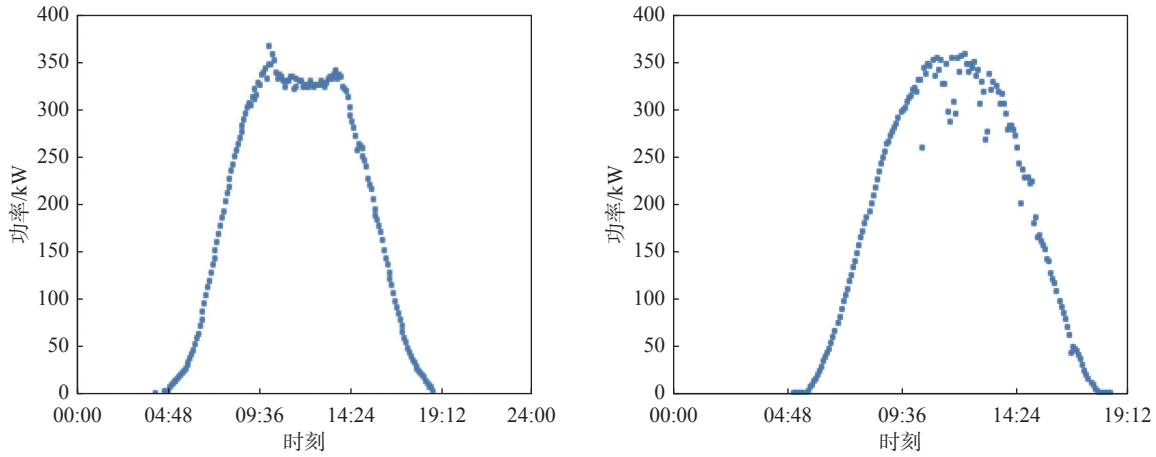
对逆变器的有功转换效率进行计算。取增压实验装置安装前 3 个月和安装后 3 个月的数据进



(a) A逆变器, 补偿前



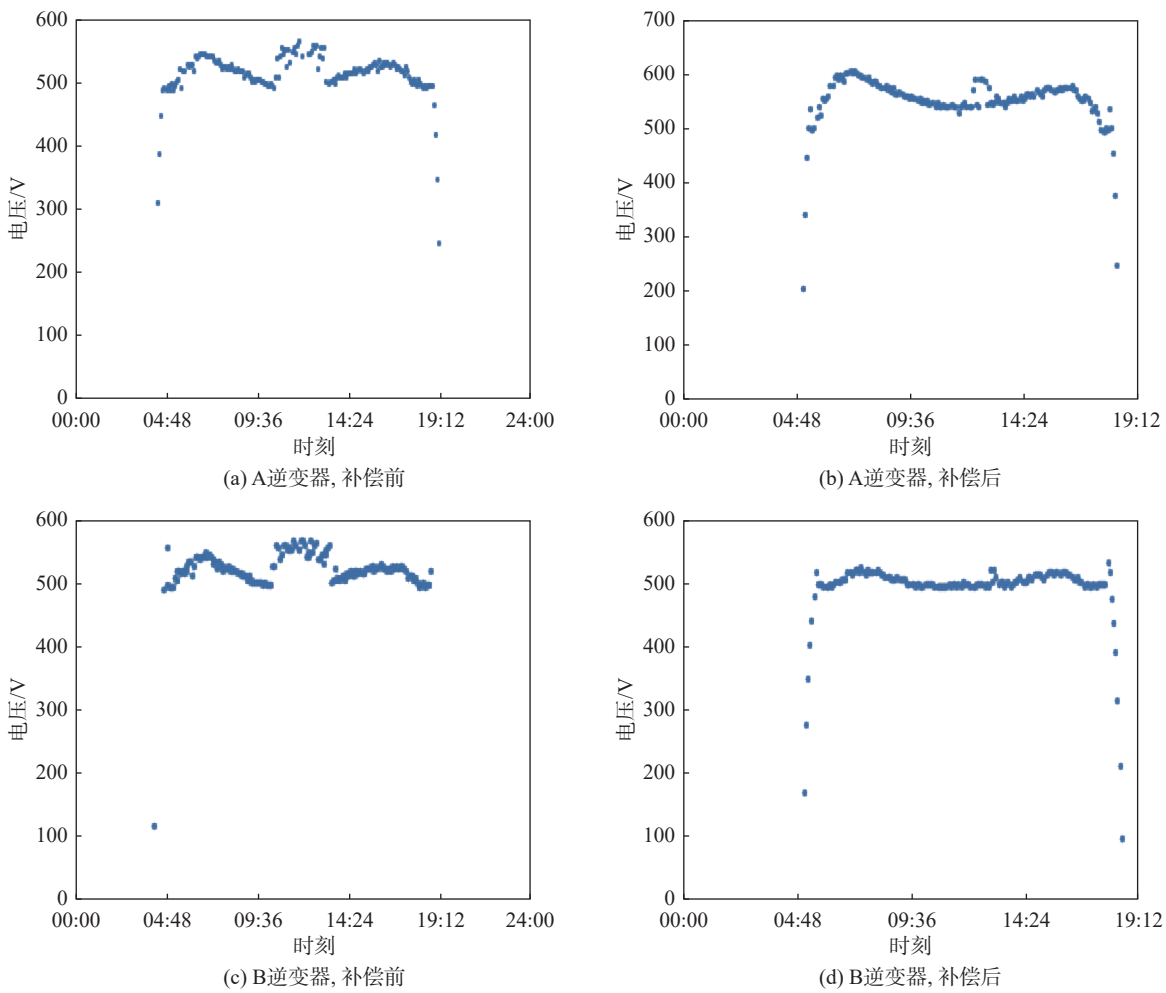
(b) A逆变器, 补偿后



(c) B逆变器, 补偿前　　(d) B逆变器, 补偿后

图 7　A、B 逆变器输入功率对比

Fig. 7　Comparison of input power levels of inverters A and B



(a) A逆变器, 补偿前　　(b) A逆变器, 补偿后

(c) B逆变器, 补偿前　　(d) B逆变器, 补偿后

图 8　A、B 逆变器平均 MPPT 电压对比

Fig. 8　Comparison of average MPPT voltage levels of inverters A and B

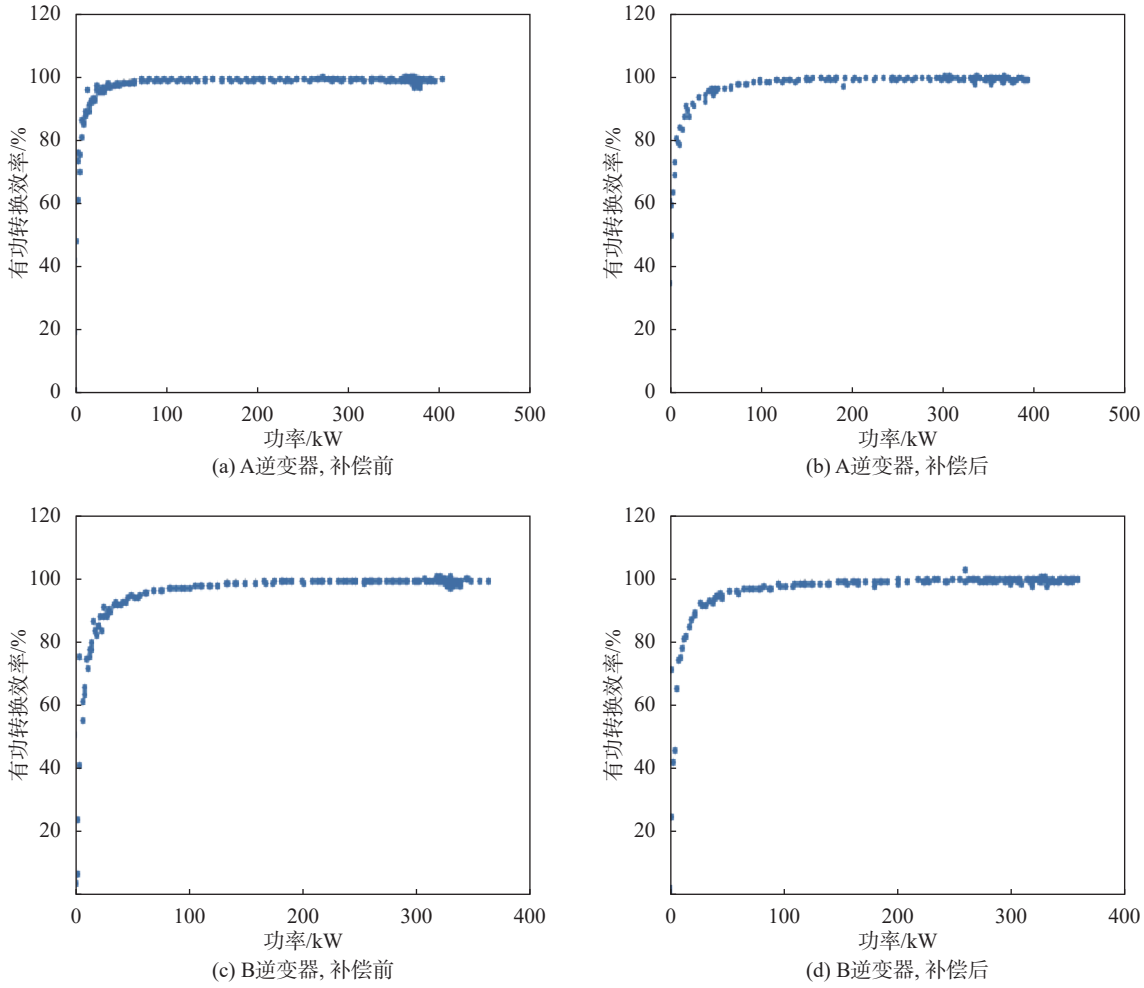


图 9 A、B 逆变器有功转换效率对比

Fig. 9 Comparison of active power conversion efficiency of inverters A and B

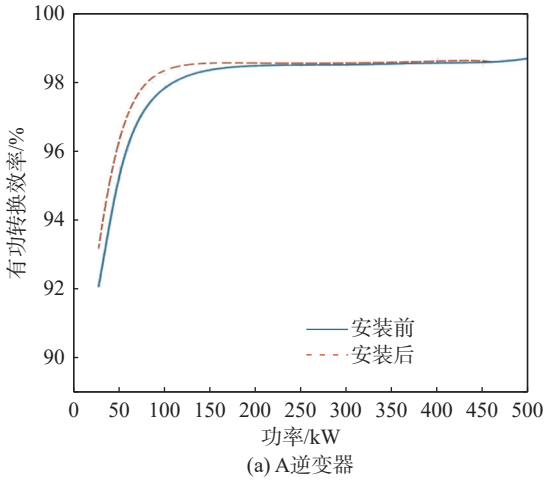
表 1 29 区 A、B 逆变器上报发电量对比

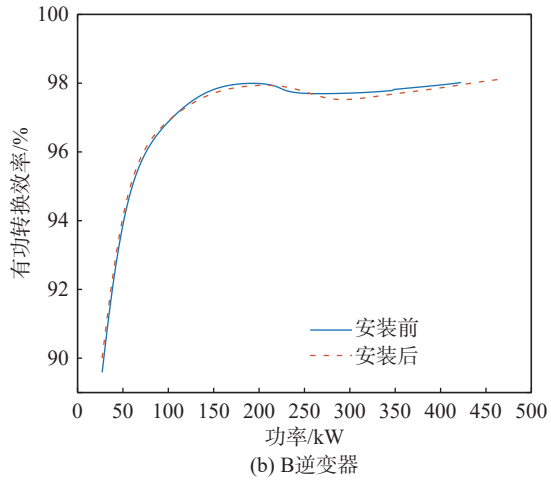
Tab. 1 Comparison of reported power generation of inverters A and B in district 29

对象	发电量/(kW·h)		
	安装前	安装后	差值
29区A逆变器	3 095.3	2 842.3	253.0
29区B逆变器	2 777.0	2 473.8	303.2

行分析。在不同功率下，A、B 逆变器有功转换效率对比如图 10 所示。表 2 为增压实验装置安装前、后 A/B 逆变器有功转换效率量化表。

由图 10 可知，未安装增压补偿装置的 B 逆变器受自身存在衰减以及积灰等因素影响，其综合发电效率比安装 3 个月后的整体下降 0.1 个百分点；在 25% 负载率下有功转换效率下降尤为明显，下降 0.07 个百分点。而安装增压补偿装





(b) B逆变器

图 10　增压实验装置安装前、后 A/B 逆变器有功转换效率对比

Fig. 10　Comparison of efficiency of inverters A and B before and after installation of the experimental device

表 2　增压实验装置安装前、后 A/B 逆变器有功转换效率量化表

Tab. 2　Quantitative comparison of conversion efficiency of inverters A and B before and after installation of the experimental device

逆变器	安装前/后	不同负载下有功转换效率/%				综合发电效率/%
		25%	50%	75%	100%	
A	安装后	98.49	98.54	98.58	98.57	98.44
	安装前	98.17	98.49	98.54	98.68	98.31
B	安装后	97.39	97.75	97.78	98.13	97.13
	安装前	97.46	97.70	97.88	98.02	97.23

置的 A 逆变器的综合发电效率比安装前的提升 0.13 个百分点，且在 25% 负载率下运行时效率提升尤为明显，提升 0.32 个百分点。对比 A、B 逆变器在安装增压补偿装置后的有功转换效率可知，在 25% 负载率下 A 逆变器有功转换效率相较 B 逆变器的提升 1.1 个百分点， A 逆变器综合发电效率相较 B 逆变器的提升 1.31 个百分点。说明安装增压补偿装置后，在一定程度上抑制了设备性能衰减以及积灰等因素带来的效率降低的影响，且在低负载运行时有功转换效率提升更为显著。

5　结论

在新能源平价上网的背景下，通过在场站逆变器进线端增设增压补偿装置，研究采用直流电压补偿装置补充光伏组串发电能力，解决由于光伏组件衰减导致逆变器直流侧输入电压降低和有功转换效率下降问题，并通过实验证明该方法对场站提质增效具有一定可行性。主要结论为：

(1)增加直流电压补偿装置可有效提升电压。排除环境因素影响后，日平均提升电压可达 10%。

(2)增加直流电压补偿装置可有效提升发电量。排除环境因素影响后，日平均发电量有一定提高。

(3)安装增压补偿装置后，在一定程度上抑制了设备性能衰减以及积灰等因素带来的效率降低的影响，且在低负载运行时有功转换效率提升更为显著，可达 0.32 个百分点。

本方法为光伏场站提质增效提供了一种有效的技改路径，如未来应用于光伏场站时可考虑将补偿装置内化于汇流箱或设备硬件中以降低成本。本方法对场站全寿命周期经济效益提升效果显著。

参考文献：

[1] 张基凯. 光伏与数字化输电系统的集成优化分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(11)：150 − 151.

[2] 蔡玮. 光伏电站增容改造工程技术分析 [J]. 电工技术, 2022(8)：26 − 27, 30.

[3] 徐亮, 缪冬青, 喻晶, 等. 光伏组件电势诱导衰减效应的解决方法研究 [J]. 通信电源技术, 2022, 39(11)：19 − 21.

[4] 郭永刚, 罗康, 曾庆钟, 等. 光伏电站基于 PID 抑制和 PID 补偿提升发电效能研究 [J]. 电力设备管理, 2022(11)：75 − 77.

[5] 周玉, 王忠东, 赵双双, 等. 计及源荷时序特性的低压台区分布式光伏接入分布鲁棒优化方法 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2023, 15(5)：592 − 603.

[6] 陈堃, 蔡德胜, 居正山. 光伏发电站多源无功电压控制新技术研究 [J]. 机电信息, 2022(5)：19 − 21.

(下转第 176 页)

不稳定流动的数值研究 [J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(3)：284 − 292.
[7] ISLAM M F, VEITCH B, LIU P F, et al. Gap effect on performance of podded propulsors in straight-ahead and azimuthing conditions[J]. Marine Technology and SNAME News, 2010, 47(1)：47 − 58.
[8] AKINTURK A, ISLAM M F, VEITCH B, et al. Performance of dynamic azimuthing podded propulsor [J]. International Shipbuilding Progress, 2012, 59(1−2)：83 − 106.
[9] ZHAO D G, GUO C Y, WU T C, et al. Hydrodynamic interactions between bracket and propeller of podded propulsor based on particle image velocimetry test[J]. Water, 2019, 11(6)：1142.
[10] 黄红波, 吴颖昕, 王建芳, 等. 大型循环水槽吊舱推进器空泡性能试验研究 [J]. 船舶力学, 2017, 21(4)：396 − 406.
[11] SHAMSI R, GHASSEMI H. Numerical investigation of yaw angle effects on propulsive characteristics of podded propulsors[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2013, 5(2)：287 − 301.
[12] SHAMSI R, GHASSEMI H. Hydrodynamic analysis of puller and pusher of azimuthing podded drive at various yaw angles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2014, 228(1)：55 − 69.
[13] 黄胜, 解学参, 胡健. 鳍对拖式吊舱推进器水动力性能的影响 [J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(2)：50 − 54.
[14] 汪小翔. 推力鳍对吊舱推进器水动力性能的影响 [J]. 船海工程, 2015, 44(6)：158 − 163.
[15] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. New York: Wiley, 1995.
[16] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8)：1598 − 1605.
[17] LIU P F. The design of a podded propeller base model geometry and prediction of its hydrodynamics[R]. St. John's, Newfoundland: Institute for Ocean Technology, National Research Council of Canada, 2006.
[18] FAKHRUL ISLAM M, VEITCH B, AKINTURK A, et al. Performance study of podded propulsor in static azimuthing conditions[J]. International Shipbuilding Progress, 2009, 56(3-4)：135 − 157.

(上接第 167 页)

[7] 宋举, 张艳锋, 杨超, 等. 数字化、信息化、智能化光伏电站建设 [C]//2023 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集 (上册). 南宁: 中国电力技术市场协会, 2023.
[8] 李磊, 贾真山. 数字孪生技术在光伏场站设备运行维护关键技术及其应用展望 [J]. 中国设备工程, 2023(22)：15 − 17.
[9] 王玉庆, 徐飞, 刘志坚, 等. 基于动态关联表征与图网络建模的分布式光伏超短期功率预测 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20)：72 − 82.
[10] 王思懿, 盛万兴, 刘科研, 等. 基于天气分类的改进 CNN-LSTM 区域光伏功率单值和概率预测方法 [J]. 新型电力系统, 2023, 1(3)：283 − 292.
[11] 刘刚, 韦向忠, 金心竹. 基于 LSTM 神经网络的光伏发电功率预测分析 [J]. 电力设备管理, 2022(5)：141 − 143.
[12] 姚丹. 复杂地形区域内光伏阵列布置方案优化 [J]. 电工技术, 2022(4)：55 − 57.
[13] 贺坤, 龚震. 基于不同电价模式的屋顶光伏项目优化设计研究 [J]. 电力系统装备, 2023(6)：22 − 25.
[14] 王玟苏. 考虑光伏不确定性的综合能源系统优化调度方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
[15] 张宏候. 数字化运营在光伏发电行业的实践探究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(11)：119 − 121.
[16] 王萌, 范旭日. 微型光伏逆变器最大功率点自动跟踪方法 [J]. 自动化应用, 2023, 64(21)：81 − 83.
[17] 程昱舒. 三相级联 H 桥光伏逆变器的功率均衡控制策略 [J]. 电力电子技术, 2022, 56(1)：88 − 91.
[18] 刘召杰, 管必萍, 戴人杰, 等. 光伏逆变器多场景性能测试平台与实验研究 [J]. 电子世界, 2021(17)：11 − 12.
[19] 陈斌, 王俊江, 王敬华, 等. 基于电压补偿的定直流电压及无功控制的光伏系统 [J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9)：134 − 142.
[20] 张斌荣, 王晶, 马浩, 等. 二次谐波注入的光伏逆变器直流电压补偿研究 [J]. 电力电子技术, 2023, 57(1)：83 − 87.