

永胜高扬程山区梯级光伏电站经济运行调度策略研究

冯 坤 王 蓓 范 卓

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710000

摘 要: 云南省永胜县地处金沙江干热河谷,大规模建设的光伏提水泵站面临高扬程、梯级布置、光伏出力波动与灌溉需水季节性等多重约束,其经济运行调度是亟待解决的关键问题。本文立足永胜县光伏提水工程实际,系统分析高扬程山区梯级光伏电站的系统特征与运行约束,提出以“源-荷匹配”为核心的经济运行调度策略框架。研究从光伏出力预测、梯级水量平衡、机组组合优化和源储荷协同四个维度构建调度策略体系,建立了考虑光伏不确定性、电价信号与供水保障的多目标调度模型,并提出了日前计划与日内修正相结合的多时间尺度滚动调度方法。研究表明,通过光伏出力与提水负荷的时序匹配优化、梯级泵站间的水量均衡调度以及光储协同的灵活调节,可显著提升系统运行经济性与供水可靠性。本文提出的调度策略框架对干热河谷地区大规模光伏提水工程具有理论参考价值。

关键词: 永胜县;光伏电站;梯级调度;经济运行;源荷匹配;多目标优化

引言

云南省永胜县位于金沙江干热河谷区,年均降雨量不足800毫米,蒸发量却高达2000毫米以上,“临水缺水”的矛盾长期制约当地农业发展与生态改善。为破解这一困境,永胜县抢抓金沙江绿色经济走廊建设机遇,规划建设78座光伏提水泵站,目前已建成投用30座,总投资7.61亿元,年均供水3730万立方米,累计新增和改善灌溉面积近7.45万亩。这些泵站沿金沙江沿线的大安、顺州、涛源、片角、鲁地拉、仁和等乡镇梯级布设,形成从江边取水向山顶灌区逐级提水的复杂系统。然而,永胜光伏电站的运行调度面临多重挑战。其一,光伏出力具有显著的日间波动性和季节性差异,与灌溉需水规律之间存在时序错配——光伏午间出力高峰恰与农田需水低谷重叠,而傍晚需水高峰时光伏出力已大幅衰减。其二,梯级泵站之间的水力耦合复杂,下级泵站的出水直接决定上级泵站的进水条件,任一环节的调度偏差均可能引发级联影响^[1]。其三,高扬程提水意味着巨大的能耗需求,单个泵站扬程可达数百米,如何在满足供水要求的前提下最大限度降低运行成本、提高光伏利用率,是经济运行的核心命题。

1 永胜梯级光伏电站系统特征与运行约束

1.1 系统结构与梯级布置特征

永胜县光伏提水泵站沿金沙江沿岸呈梯级布设,形成了从低海拔取水点向高海拔灌区逐级提升的“接力式”提水格局。以宣威市小江光伏提水项目为参照——该项目一级泵站扬程472米、光伏容量4.596MWp,二级泵站扬程350米、光伏容量3.378MWp——永胜县各泵站同样面临数百米的单级扬程和兆瓦级的光伏装机规模。

梯级布置在结构上形成了“串联供水、并联光伏”的独特拓扑:水流方向为单向串联——下级泵站将水提升至中间调节池,上级泵站再从中间池取水继续提升;而电力供应则为分布式并联——各泵站独立配置光伏阵列,彼此之间无电气连接。这一结构决定了调度决策必须在“水力串联约束”与“电力并联独立”之间寻求平衡。

1.2 光伏出力特性与不确定性

光伏出力是调度决策的核心变量,其具有三个层次的波动特征。在秒级至分钟级尺度上,云层遮挡导致光伏输出功率的快速随机波动;在小时级尺度上,日出日落形成典型“钟形”出力曲线——正午达到峰值,早晚趋近于零;在季节尺度上,永胜县干湿季分明,雨季(5—10月)云量较多但需水量相对充足,旱季(11—4月)日照充沛但需水量最大,形成“光-水”资源的逆向分布。光伏出力的不确定性是调度面临的另一核心挑战。日前预测误差通常在10%—25%之间,日内实际出力可能显著偏离计划值。对于完全依赖光伏供电的离网型泵站,这种不确定性直接威胁供水的连续性与可靠性。

1.3 灌溉需水规律与供水要求

永胜县光伏提水主要用于沃柑等经济作物的灌溉。灌溉需水具有明显的季节性——旱季为集中需水期,日均提水量需求远高于雨季;同时具有日内波动性——傍晚和夜间通常是灌溉作业的高峰时段,这与光伏出力的日间峰值形成错位。此外,不同高程灌区的需水时序也存在差异,高位灌区因输水距离长、沿途损失大,对供水的稳定性要求更高。供水保障是调度必须满足的硬约束。农业灌溉的中断可能导致不可逆的减产损失,因此调度策略必须在追求经济性的同时,将供水可靠性置于

首位。

1.4 经济运行的核心矛盾

综上,永胜梯级光伏电站的经济运行面临三重核心矛盾:其一,光-荷时序错配——光伏出力峰值在正午,而灌溉需水峰值在傍晚,时间上的不匹配导致光伏发电的直接利用率受限;其二,梯级水力耦合——上下游泵站的流量必须匹配,否则将导致中间调节池溢流或抽空,任何单站的最优调度未必是系统全局最优;其三,经济性与可靠性的权衡——过度追求光伏利用率可能牺牲供水保障,而过度保守的调度则增加运行成本。这三重矛盾的精妙平衡,正是经济运行调度策略设计的核心命题。

2 经济运行调度策略的理论框架

2.1 “源-荷匹配”的核心逻辑

本文提出以“源-荷匹配”作为调度策略设计的核心逻辑。所谓“源”,指光伏发电的可利用功率;所谓“荷”,指泵站提水所需的电功率与水量需求。经济运行的实质,是在满足供水约束的前提下,使光伏发电与提水负荷在时序上尽可能吻合,从而最大化光伏直驱利用率、最小化储能充放损耗与可能的备用电能消耗^[2]。

“源-荷匹配”包含三个层次:功率匹配——泵站运行功率应尽量跟踪光伏出力的变化曲线;能量匹配——日累计提水能耗不应超过日累计光伏发电量(离网场景)或应在经济最优范围内使用网购电(并网场景);水量匹配——提水量需满足灌区需水计划,且梯级各站提水量需保持平衡。

2.2 多时间尺度调度架构

鉴于光伏出力的多时间尺度波动特征和灌溉需水的长周期规律,调度策略应采用多时间尺度架构。本文提出“年度计划一月旬修正一日前计划一日内调整”的四级时间尺度框架。年度计划层面,根据灌区种植结构、气象长期预报和光伏资源评估,确定全年各月的目标提水总量与蓄水计划。月旬修正层面,根据中期天气预报和实际来水、耗水情况,对月度提水计划进行滚动调整。日前计划层面,基于次日光伏出力预测和需水预测,制定各泵站24小时的逐时运行计划,确定各时段的开机台数、运行频率和目标流量。日内调整层面,根据光伏实际出力和需水实时变化,对日前计划进行滚动修正,采用模型预测控制(MPC)方法实现分钟级的动态优化。

2.3 多目标优化模型

经济运行调度本质上是一个多目标优化问题。本文构建的目标函数包括三个维度:经济性目标——最小化

日运行总成本。对于离网型泵站,主要表现为储能系统的折旧与损耗成本;对于并网型泵站,则包括网购电费用与余电上网收益的差值。可靠性目标——最大化供水保证率,即实际供水量与计划需水量的比值,体现为各时段蓄水池水位不低于最低安全水位的约束。光伏利用率目标——最大化光伏发电的直接消纳比例,减少弃光。三个目标之间存在冲突:追求极致经济性可能要求减少储能配置和网购电,但可能降低供水可靠性;追求高光伏利用率可能要求负荷完全跟随光伏出力,但可能与需水时序冲突。因此,模型采用约束法或加权求和法求解Pareto最优解集,供调度人员根据实际场景选择。

2.4 约束条件体系

调度模型需满足以下约束条件:功率平衡约束:任一时刻,光伏出力、网购电、储能放电之和等于泵站负荷、储能充电与余电上网之和。梯级水量平衡约束:中间调节池的水位变化等于上级泵站进水与下级泵站出水之差,水位需维持在安全区间内。泵站运行约束:各泵站的开机台数、运行频率、扬程-流量特性需在其可行域内,机组启停次数受寿命限制。灌区需水约束:各灌区在调度周期内的累计供水量不低于最低需水要求。储能约束:储能系统的荷电状态需在安全范围内,充放电功率受额定值限制。

3 调度策略的关键技术方法

3.1 光伏出力预测方法

准确的日前光伏出力预测是制定合理调度计划的前提。针对永胜干热河谷的气候特点,本文建议采用基于数值天气预报(NWP)与历史数据校正相结合的混合预测方法。NWP提供次日各时段的光照辐射强度、温度、云量等基础气象参数;在此基础上,利用永胜当地光伏电站的历史出力数据,通过人工神经网络或支持向量回归模型进行误差校正,将NWP的粗粒度预报转化为电站级的精细功率预测。对于日内滚动修正,可采用超短期预测——基于实时气象监测数据(如天空成像仪、辐照仪)和最近一小时的实际出力趋势,利用时间序列外推或深度学习模型预测未来1—4小时的出力变化,为日内调度调整提供依据^[3]。

3.2 梯级水量平衡调度方法

梯级泵站的水量平衡调度是区别于单级泵站的核心难点。其基本思路是“以中间调节池水位为调控目标,以上下游流量匹配为约束条件”。具体而言,将梯级系统视为一个串联水库群——每个中间调节池可视作一个“微型水库”。调度目标是在满足各灌区需水的前提下,使所有中间池水位维持在目标区间内。为此,可采

用逆序递推法：从最高级泵站（最靠近灌区）开始，根据灌区需水确定其出水流量；然后根据该级泵站的进水需求，反推下一级泵站的出水流量；以此类推，直至最低级泵站（取水口）。这种逆序递推确保了“以需定供”，避免了下级泵站提水过多导致中间池溢流或过少导致上级泵站无水可抽。在日前调度中，若逆序递推得到的某级泵站所需流量超出了其光伏供电能力范围，则需要通过储能放电补充、调整该级泵站的运行时段或微调上游泵站的提水计划来协调解决。

3.3 机组组合与变频优化

光伏泵站的机组调度包括两个层面：机组组合（确定哪些机组开机）和工况优化（确定开机机组的运行频率或转速）。对于多机组并联的光伏泵站，机组组合决策需考虑光伏出力的时变特性。在光伏出力充足的正午时段，可开启较多机组满负荷运行，将水提升至高位蓄水池储存；在光伏出力不足的早晚时段，则减少开机台数或降低运行频率^[4]。变频调速技术的应用使泵站能够在较宽的功率范围内调节流量，更好地匹配光伏出力的变化。机组组合优化的数学模型可表述为：在给定光伏可用功率和需水流量的条件下，求解最优的开机台数和各机组的运行频率组合，使总提水量满足要求的同时泵站效率最高（即单位电量的提水量最大）。由于不同机组的效率曲线存在差异，这一优化问题通常需采用动态规划或智能优化算法（如遗传算法、粒子群算法）求解。

3.4 光储协同调度策略

储能系统是缓解“光-荷时序错配”的关键手段。永胜光伏泵站若配置电池储能或蓄水池储能（即通过提前提水将电能转化为水的势能储存），则可实现能量的时间搬移——将正午富余的光伏发电转化为傍晚可用的提水能力。光储协同调度的核心是储能充放电策略的优化。基本规则可概括为“光伏充足时充电/蓄水，光伏不足时放电/放水”。具体充放电阈值需根据次日光伏预测、需水预测和储能容量综合确定。在日前计划中，可采用动态规划方法优化储能的全天充放电曲线；在日内调整中，则根据实际光伏出力和需水的偏差，实时修正

充放电功率。需要特别指出的是，对于梯级泵站系统，“蓄水储能”具有独特的优势——利用高差蓄水池储存的水量本身就是一种“势能电池”，既无自放电损耗，也无循环寿命限制。因此，在梯级泵站的调度中，应优先利用各级中间调节池和高位蓄水池的调蓄能力，将“电储能”与“水储能”统筹考虑。

4 结语

永胜县大规模光伏提水工程是“光伏+提灌”模式在干热河谷地区的创新实践。本文针对该工程高扬程、梯级布置、光伏出力波动与灌溉需水季节性错配等特征，系统提出了以“源-荷匹配”为核心的经济运行调度策略框架。阐述了光伏出力预测、梯级水量平衡、机组组合优化和光储协同调度等关键技术方法，并从信息化平台建设和管理制度完善两方面探讨了实施保障。通过源侧预测、荷侧响应与梯级协同的有机结合，可在保障供水可靠性的前提下显著提升光伏利用率与系统运行经济性。随着永胜县规划78座光伏泵站的陆续建成投运，本文提出的调度策略框架可为工程运行管理提供理论参考，也为同类干热河谷地区的光伏提水工程调度优化提供借鉴。未来研究可进一步结合人工智能方法，探索数据驱动的自适应调度策略，以及考虑碳减排效益的多目标扩展模型。

参考文献

- [1]李芹,陈金明,赵登忠,等.风光水储多能互补技术在云南高原高扬程泵站中的应用[J].长江技术经济,2025,9(5):69-76.
- [2]申建建,王月,程春田,等.水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J].中国电机工程学报,2022,42(11):3871-3885.
- [3]张俊涛,程春田,于申,等.水电支撑新型电力系统灵活性研究进展、挑战与展望[J].中国电机工程学报,2023.
- [4]鲁宗相,林弋莎,乔颖,等.极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J].电力系统自动化,2022,46(16):3-16.