

高原光伏与储能系统联合运行优化研究

付红印 林剑 刘旭 彭滢麟

四川发展新筑轨道交通技术有限公司 四川成都 610000

摘要: 本文聚焦高原地区光伏与储能系统联合运行优化问题,深入剖析了高原环境下微电网架构、光伏控制策略、并网离网运行模式以及储能控制方法。通过理论分析,提出了针对高原特点的系统优化方案,有效提升了系统稳定性、可靠性和能源利用效率。研究表明,合理配置储能系统和优化控制策略,能显著改善高原光伏系统性能,为高原地区清洁能源的大规模开发利用提供理论支撑和实践指导。

关键词: 高原光伏; 储能系统; 微电网; 并网离网; 控制策略

引言

随着全球对清洁能源需求的不断增长,太阳能作为一种丰富且无污染的可再生能源,受到了广泛关注。高原地区由于其独特的地理优势,如日照时间长、太阳辐射强度高,成为发展光伏发电的理想区域。以青藏高原为例,其平均海拔在 4000 米以上,年日照时数可达 3000 小时左右,年平均太阳辐射量高达 6000 – 8000 MJ/m²,远高于全国平均水平。然而,光伏发电具有间歇性和波动性的特点,这给电力系统的稳定运行带来了挑战。储能系统的引入,能够有效平滑光伏发电的功率波动,提高电力供应的稳定性和可靠性。因此,研究高原光伏与储能系统的联合运行优化,对于促进高原地区清洁能源的高效利用和可持续发展具有重要意义。

从研究现状来看,国内外学者已在光伏与储能系统联合运行领域取得一定成果,但针对高原特殊环境的研究仍相对不足。高原地区的气候、地理条件与常规地区差异显著,使得常规的光伏与储能系统运行策略难以直接适用。因此,深入研究高原环境下的光伏与储能系统联合运行优化,具有重要的理论与实践价值。

1. 高原地区光伏发电的特点

高原地区海拔高,大气稀薄,太阳辐射强度比平原地区高出 10% – 30%。海拔每升高 1000 米,太阳辐射强度约增加 4% – 6%。同时,高原昼夜温差大,对光伏组件性能和寿命要求更高。低温时,光伏组件开路电压升高,短路电流略有增加,但温度过低会影响组件材料物理性能和可靠性。当温度低于 - 20℃,部分光伏组件转换效率下降 5% – 10%。此外,高原沙尘天气频繁,沙尘覆盖光伏组件表面降低透

光率,影响发电效率。研究表明,沙尘频发的高原区域,每次沙尘天气后,光伏组件输出功率一周内平均下降约 8%,且随沙尘覆盖时间延长,发电效率损失增大。

在高海拔地区,环境温度对光伏发电量影响显著。光伏组件有开路电压、峰值功率、短路电流三个温度系数,当温度升高,组件输出功率下降,其峰值功率温度系数在 - 0.35 ~ - 0.50%/℃之间。以 300wp 光伏组件为例,温度变换时输出特性曲线仿真(图 1、图 2)显示,温度升高,光伏电池输出功率降低。

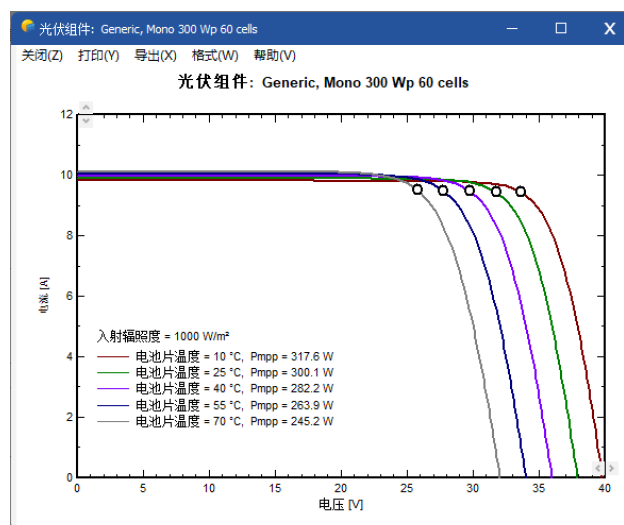


图 1 光伏电池 I-V 输出特性曲线

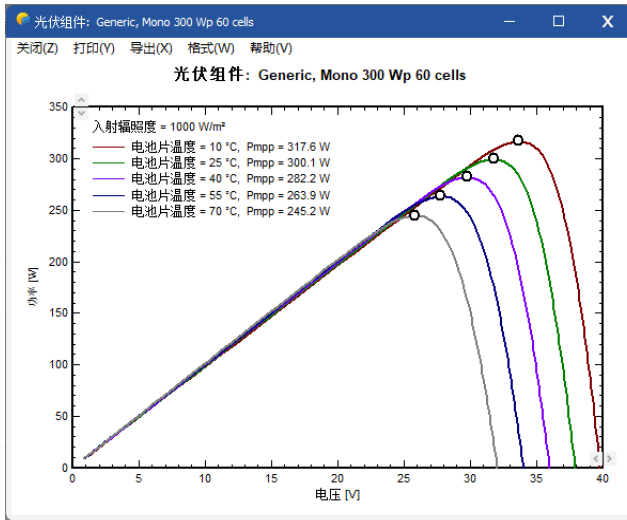


图 2 光伏电池 P-V 输出特性曲线

需注意,这里输入的是电池片温度,与环境温度差距大。实际上,光伏组件运行温度受系统设计、安装方式和气象因素影响。设计因素包括组件技术类型、封装材料类型;安装方式有固定支架安装(敞开式)、屋顶顺坡安装及跟踪支架安装等;气象因素涵盖环境温度、辐射量和风速。所以,环境温度不能代表组件温度,预测户外光伏组件运行温度才能精准计算发电量,这需综合考虑上述因素。

为此,需建立光伏组件热模型量化这些因素并估算运行温度。常见热模型有 Sandia、Faiman、PVsyst 组件热模型等,本研究采用 PVsyst 组件热模型。该模型基于 Faiman 模型发展而来,公式中 T_c 为电池温度, T_a 为环境温度, $EPOA$ 为组件斜面辐照度,是组件实际工况下的转换效率(默认 10%), α 是组件电池的吸收率(默认值 0.9), U_0 、 U_1 为热损失系数, WS 是风速。 U_0 、 U_1 的热损耗系数因安装方式而异,可通过现场设备采集数据并回归分析获得,以此提高发电量仿真准确性。

利用该模型可预测环境温度与组件实际工作温度。估算组件温度时,组件斜面辐照度很关键。借助 pvsyst 软件实现组件温度预测,当其他条件确定,环境温度 20℃、辐照度为 800W/m² 时,实际工作的组件温度为 50℃,组件功率损失达 10.1%。

此外,不同的水平面直射辐照数据和水平面散射数据决定斜面辐射数据。做光伏发电量预测时,通过气象软件获取这三个数据,利用倾斜面散射辐射模型计算倾斜面辐射数据,它是准确设计太阳能利用系统的基础数据,也是计算发

电量准确性的主要参考指标之一。

倾斜面总辐射由倾斜面直接辐射、倾斜面散射辐射和地面反射辐射三部分组成,而水平面总辐射由水平面直接辐射和水平面散射辐射两个分量构成。

1.1 倾斜面直接辐射

倾斜面直接辐射 I_{bt} 计算公式定义为:

$$I_{bt} = I_{bn} \cdot \cos \theta_i$$

$$I_{bh} = I_{bn} \cdot \cos \theta_z$$

I_{bn} 为法向直接辐射量 θ_i 为倾斜面太阳入射角; θ_z 为太阳天顶角。倾斜面直接辐射与水平面直接辐射之间的关系可表示为

$$I_{bt} = R_b \cdot I_{bh}$$

其中 R_b 为直接辐射转换系数,定义为:

$$R_b = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z}$$

太阳天顶角 θ_z 定义为

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \sin \delta \cos \omega$$

当倾斜面正南方向放置(即方位角 $\gamma = 0$)时,倾斜面太阳入射角定义为

$$\cos \theta_i = \sin \varphi \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos \omega \cos(\varphi - \beta)$$

β 为倾斜角, γ 为方位角, φ 为当地纬度, ω 为太阳时角, δ 为太阳赤纬角。

在计算太阳赤纬角 δ 时通常采用经验公式,如

$$\delta = 23.45 \sin(360 \times \frac{284+n}{365})$$

其中, n 为日序数,计算得出的太阳赤纬角只与日序数有关,即,该计算结果代表了每天的平均值,可称为日平均赤纬角。按照式(7)算出一年中各天的太阳赤纬角后,即可计算出直接辐射转换系数 R_b 的近似值。

1.2 倾斜面散射辐射

太阳辐射被大气散射后,向下到达地面的那部分辐射称为散射辐射,亦称天空辐射,基于水平面散射辐射 I_{dh} 求解倾斜面散射辐射 I_{dt} 有多种模型,比如 Klein 模型, Hay 模型, Perez 模型,由于 meteonorm 采用 Perez 模型,本课题也使用该模型, Perez 模型根据前人的计算方法,通过公式

推导出经验系数来表示天空散射、周围环境和地面方向的辐射分量，其计算公式为：

$$I_{dt} = I_{dh} [F_1 A + (1 - F_1) \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right] + F_2 \sin \beta]$$

其中 F_1 、 F_2 分别为环形区域和地平线上方区域的天空亮度系数。

1.3 地面反射辐射

到达地面的总辐射中，有一部分被地面反射回大气，称为地面反射辐射。地面反射辐射量主要与地面反射率有关，可表达为：

$$I_r = \rho I_{gh} \frac{(1 - \cos \beta)}{2}$$

ρ —地面反射率，其大小取决于地面的性质和状态

通过某地经纬度信息从气象站获取该地水平面直射辐照数据、水平面散射辐照数据，利用上述公式计算倾斜面总辐射，通常借助软件完成。进一步计算发电量时，可通过 pvsyst 软件导入同一地点不同的水平面直射辐照数据和水平面散射辐照数据，计算特定角度下斜面辐射数据，分析它们对发电量的实际影响。

2. 高原光伏微电网架构

2.1 微电网的基本组成

高原光伏微电网主要由光伏阵列、储能系统、电力电子变换器、负荷和监控系统构成。光伏阵列将太阳能转化为直流电，经 DC/AC 变换器转换为交流电供负荷使用或并入电网。储能系统通过 DC/DC 变换器与光伏阵列和电网相连，实现电能存储和释放。监控系统实时监测微电网运行状态，包括光伏阵列发电功率、储能系统充放电状态、负荷需求等，依据预设控制策略优化调度系统。从能量流角度，各部分协同工作，实现太阳能捕获、存储、转换与分配，满足负荷用电需求。

2.2 高原环境对微电网架构的影响

高原环境特殊，对微电网架构有特殊要求。高原气候恶劣，光伏组件和储能设备散热问题突出。虽环境温度整体低，但太阳辐射强烈时，光伏组件和储能设备表面温度迅速升高，夏季晴天，光伏组件表面温度可达 70℃ 以上，储能设备内部温度也随之升高。因此，微电网设计需采用高效散热措施，如增加散热片面积、强制风冷或液冷等，确保设备在正常工作温度范围运行。

3. 光伏控制策略

3.1 最大功率点跟踪（MPPT）技术

最大功率点跟踪技术是提高光伏发电效率的关键。常用 MPPT 算法有扰动观察法、电导增量法、模糊逻辑控制法等。扰动观察法是基本算法，通过周期性改变光伏阵列工作电压，观察功率变化判断当前工作点与最大功率点位置关系，进而调整工作电压，使光伏阵列工作在最大功率点附近。设光伏阵列输出功率为 P ，工作电压为 U ，若 $dP/dU > 0$ ，增大电压扰动；若 $dP/dU < 0$ ，减小电压扰动。

高原环境下，太阳辐射强度和温度变化剧烈，传统 MPPT 算法难快速准确跟踪最大功率点。因此，需优化 MPPT 算法，提高响应速度和跟踪精度。采用自适应 MPPT 算法，根据环境参数变化实时调整控制参数，适应高原特殊工况。该算法引入神经网络模型，实时监测分析太阳辐射强度、环境温度、风速等多参数，通过训练好的神经网络模型动态调整 MPPT 算法控制参数，使光伏阵列更快速准确跟踪最大功率点。

4. 并网离网运行模式

4.1 并网运行控制策略

并网运行模式下，高原光伏与储能系统需与电网协调配合，确保电能质量和系统稳定性。光伏发电功率大于负荷需求时，多余电能通过逆变器并入电网；小于负荷需求时，由储能系统补充，储能不足则从电网购电。为实现功率平稳调节，需采用先进控制策略，如功率预测控制、虚拟同步机控制等。功率预测控制通过实时监测预测太阳辐射强度、温度等气象参数，提前预测光伏发电功率，为储能系统充放电控制和电网调度提供依据；虚拟同步机控制模拟同步发电机运行特性，使逆变器具备惯性和阻尼，提高系统稳定性和抗干扰能力。

4.2 离网运行控制策略

离网运行模式下，高原光伏微电网独立为负荷供电，储能系统是维持系统稳定运行的关键。光伏发电功率大于负荷需求时储能系统充电，小于负荷需求时放电。为保证储能系统合理充放电和延长使用寿命，采用基于荷电状态（SOC）的控制策略，根据储能系统 SOC 值调整充放电功率。SOC 值较高时适当增加充电功率，较低时减少放电功率，避免过充或过放。具体控制策略如下表：

表 1 不同 SOC 值下的充放电功率控制策略

SOC 值范围	充电功率控制	放电功率控制
0 – 20%	小功率充电，避免过放，充电功率不超过额定功率的 20%	严格限制放电功率，不超过额定功率的 30%
20% – 80%	正常功率充放电，充放电功率为额定功率的 50% – 70%	正常功率充放电，充放电功率为额定功率的 50% – 70%
80% – 100%	小功率充电，充电功率不超过额定功率的 30%，避免过充	适当降低放电功率，不超过额定功率的 50%

这种基于 SOC 的控制策略能有效减少电池深度充放电次数，降低电池老化速度，延长储能系统使用寿命。从能量平衡角度，该策略确保离网状态下储能系统合理存储与释放能量，保障微电网稳定运行。

5. 储能控制策略

5.1 储能系统的充放电控制

储能系统充放电控制是高原光伏与储能系统联合运行优化的关键环节。除基于 SOC 的控制策略，还可结合负荷需求预测和光伏发电功率预测实现优化调度。通过分析历史负荷数据和气象数据，建立负荷需求预测模型和光伏发电功率预测模型，提前预测未来负荷需求和光伏发电功率。根据预测结果制定储能系统充放电计划，使其在满足负荷需求前提下，充分发挥削峰填谷和功率调节作用。

5.2 储能系统的容量配置

储能系统容量配置直接影响高原光伏与储能系统性能和成本。容量过大增加系统投资成本，过小无法满足系统稳定性和可靠性要求。因此，需综合考虑光伏发电功率、负荷需求、储能系统充放电效率、使用寿命等因素，采用合理方法配置容量。常用方法有解析法、仿真法和优化算法。

解析法通过建立数学模型理论计算储能容量，但模型存在简化，与实际有偏差；仿真法搭建系统仿真模型，模拟不同储能容量下系统运行情况，直观评估系统性能；优化算法构建优化目标函数，如最小化成本或最大化系统可靠性，求解最优储能容量。实际工程中，还需结合当地电价政策、

补贴政策等因素，进一步优化储能系统容量配置，提高系统经济效益。

结语：

综上，本文深入研究了高原光伏与储能系统联合运行优化，分析了高原地区光伏发电特点和储能系统作用，探讨了高原光伏微电网架构、光伏控制策略、并网离网运行模式以及储能控制策略。通过优化控制策略和合理配置储能系统，能有效提升高原光伏与储能系统的稳定性、可靠性和能源利用效率。然而，目前高原光伏与储能系统联合运行仍面临储能技术成本高、系统集成和优化控制技术有待提高等挑战。未来，需加强相关技术研发创新，降低储能系统成本，提高系统智能化水平，推动高原地区清洁能源大规模开发利用。后续研究可进一步探索新型储能技术在高原环境的适用性，以及人工智能技术在系统优化控制中的深度应用，实现高原光伏与储能系统高效、可持续发展。

参考文献：

- [1] 栗刚, 李科峰, 王辉, 郎春雷, 晏小彬. 西藏高原地区光伏配套储能系统设计与运行研究 [J]. 四川电力技术, 2023, 46 (03): 27–34.
- [2] 周朝发, 余首柘, 肖翔江, 李雷, 吴佳豪, 杨艳云, 吴昊, 谢雨岑, 涂洁磊. 光伏助推高原乡村振兴的实践探索 [J]. 云南师范大学学报 (自然科学版), 2023, 43 (02): 15–18.
- [3] 赵斌, 梁告, 姜孟浩, 王力, 孔琴, 王炳强. 高原高寒地区并网光储电站设计与运行研究 [J]. 中国电力, 2022, 55 (12): 51–60.

作者简介：

付红印 (1986.05–) 男, 汉族, 河北承德人, 大学本科。现有职称: 工程师。研究方向: 光伏控制系统设计, 微电网设计。