

# Design and Optimization of Photovoltaic Power Generation System

Yuancheng Fan

China Electric Construction Group Guizhou Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550003, China

## Abstract

This paper focuses on the design principles and optimization strategies of photovoltaic power generation system. The design principles include system efficiency maximization, reliability, economy and security. The optimization strategy covers the selection and layout of photovoltaic modules, such as the selection of efficient modules according to illumination conditions, optimization of layout and improvement of illumination utilization rate; the selection of inverter and system matching, the need to do a good job in power matching and performance parameter optimization; the selection of battery and the design of energy storage system involving the selection of battery type, parameter setting and formulation of charging and discharging strategy. The application and effectiveness of each strategy in actual projects are demonstrated through examples.

## Keywords

photovoltaic generation; system design; optimization

## 光伏发电系统设计与优化研究

范圆成

中国电建集团贵州工程有限公司, 中国·贵州 贵阳 550003

## 摘要

本文围绕光伏发电系统设计原则与优化策略展开。设计原则包括系统效率最大化、可靠性、经济性与安全性。优化策略涵盖光伏组件选型与布局, 如依据光照条件选高效组件、优化布局提升光照利用率; 逆变器选择与系统匹配, 需做好功率匹配、性能参数优化; 蓄电池选型与储能系统设计, 涉及电池类型选用、参数设置及充放电策略制定, 通过实例展示了各策略在实际项目中的应用及成效。

## 关键词

光伏发电; 系统设计; 优化

## 1 引言

随着能源需求增长与环保要求提高, 光伏发电作为清洁能源备受关注。然而, 光伏发电系统的高效、稳定运行面临诸多挑战。合理的系统设计原则与优化策略, 对于提升系统性能、降低成本至关重要。本文旨在探讨光伏发电系统的设计原则, 以及从光伏组件、逆变器、蓄电池等方面提出具体优化策略, 为光伏发电系统的发展提供参考。

## 2 光伏发电系统设计原则

光伏发电系统的设计需遵循一系列科学合理的原则, 以确保系统高效、可靠、经济且安全地运行。在此过程中, 设计师应首先奉行系统效率最大化原则, 这就要求对高效组件进行合理选用, 具体可挑选那些转换效率高且质量可靠的

光伏组件, 以此提高系统的整体发电效率; 同时, 必须充分考虑组件的衰减率, 选择衰减率较低的组件, 从而保持系统长期稳定运行。

其次, 设计师需奉行系统可靠性原则, 对光伏发电系统进行冗余设计和备份, 对关键设备如逆变器、控制器等进行冗余设计优化, 以提高系统的可靠性, 并且同步配备备用电源或储能系统, 以应对突发的电网故障。

最为关键的是, 设计师还应当奉行经济性原则, 在系统设计阶段进行全面的成本效益分析, 涵盖设备成本、安装成本、维护成本等, 进行设计优化, 选择性价比较高的设备和方案, 以保证系统的投资回报率。

最后, 设计师需奉行安全性原则, 从电气安全、结构安全、防雷与防火安全等诸多角度来完成对光伏系统的设计规划, 提高系统的使用安全性<sup>[1]</sup>。

【作者简介】范圆成(1990-), 男, 中国四川绵阳人, 本科, 工程师, 从事风力发电、光伏发电等研究。

### 3 光伏发电系统设计与优化策略

#### 3.1 光伏组件的选型与布局设计

##### 3.1.1 选型

在光伏发电系统的设计与优化中,设计师需切实做好光伏组件的选型与布局工作,因为这直接影响到系统的发电效率。设计师应采取经济可靠的设计方案,重点在于如何根据光照条件优化光伏组件的布局设计,并为此做好精细化保障工作。在初期,工程师需做好基础数据的搜集与分析,包括对目标区域的光照条件进行评估,从年总辐射量、日照时长、太阳高度角、云层覆盖率等诸多角度分析光照的时空分布特性,涵盖季节性变化、日变化以及地理纬度对太阳路径的影响,从而确定当地最佳倾角范围;同时,需测量安装场地的朝向、坡度、障碍物分布以及阴影遮蔽等情况,评估场地的承重能力、排水条件和地质稳定性,以保证结构安全。之后,工程师需做好光伏组件的选型与适配,根据光照条件选取高效组件,一般情况下,高辐照地区可选用单晶硅或多晶硅组件,而弱光条件区域可选取弱光性能更好的单晶硅或双面发电组件,但需充分考虑组件的温度系数,解决高温环境下组件功率的衰减问题<sup>[2]</sup>。

##### 3.1.2 布局

基于上述的选型规划,设计师需做好整体布局优化,首先要做好朝向与倾角的优化,可根据光照条件计算最佳倾角,使组件全年能够接收最大的辐射量;如果场地开阔且预算充足,设计师可采用单轴或双轴跟踪支架,动态调整组件角度以跟随太阳运行轨迹,提升发电量。除此之外,设计师还需要在结构布局层面重点把控间距与排列设计,这一环节主要是根据组件高度和太阳高度角计算前后排组件的最小间距,防止前排遮挡后排,其中可采用交错排列或优化行列间距等方式,减少行间遮挡,以此来提高整体光照利用效率。最后,针对场地内光照不均匀等问题,设计师可调整组件密度和分区布局方式,例如在高辐射区密集安装,低辐射区稀疏安装,并同步利用反射面来增强低角度光照的利用率。总体来说,设计师需全面做好光伏组件的选型和布局设计,使光伏发电系统得到优化革新<sup>[3]</sup>。

例如,基于选型结果,设计师团队运用光伏系统设计软件 PVsyst 进行了三维建模,首先开展朝向与倾角的优化工作。他们以正南朝向为基准,模拟了 15°、20°、25°、30° 四种倾角下的年发电量,发现 25° 倾角时年总发电量达 98.5 万 kWh,较 15° 倾角提升 12%,而 30° 倾角因冬季积雪遮挡风险增加,发电量反而下降 5%,因此将 25° 确定为最佳安装倾角。考虑到园区后续可能扩大用电需求,在预算允许的情况下,设计师为其中 500 块组件配备了单轴跟踪支架,该支架可根据太阳方位角自动调整,经模拟测算,这部分组件的发电量较固定支架提升了 18%,尤其在春秋季节太阳高度角变化较大时,跟踪系统的优势更为明显。在结构布局的间距与排列设计中,工程师以冬至日

9:00-15:00 无遮挡为原则,通过公式计算得出前后排组件间距需达 3.2 米——计算公式为  $D=H \times \cot(\theta - \delta)$ ,其中 H 为组件高度 1.2 米,θ 为冬至日正午太阳高度角 28°,δ 为 5° 的安全裕度。为进一步提升土地利用效率,设计师采用了交错排列方式,将相邻两行组件的横向间距缩小至 0.5 米,同时保持纵向间距不变,经光照模拟软件验证,这种排列方式使行间遮挡率从 15% 降至 8%,整体光照利用率提升了 7%。

#### 3.2 逆变器的选择与系统匹配

对逆变器进行合理布局规划也是重中之重,工程师需围绕着功率匹配进行优化,以提高系统运行效率。在此过程中,工程师需做好系统功率需求的分析与计算,这些环节需严格参照组件选型和布局设计需求,计算光伏阵列的总功率以及最高峰时功率,考虑组件衰减、温度系数以及实际工作条件的影响,估算系统在不同工况下的输出功率范围,基于此来确定负载功率需求。紧接着,基于上述的功率计算,工程师需做好逆变器功率规格的选用,一般情况下,逆变器额定功率应当大于或等于光伏阵列总功率,以避免过载风险;而离网系统则需要额外考虑负载启动电流和峰值功率需求,选取更高容量的逆变器。接着,在逆变器功率规格选型层面,工程师需基于光伏阵列朝向差异或布局阴影的实际状况,选取支持多路 MPPT 的逆变器,提升不同组件的功率输出效率,并根据组件串联数量和布局,合理确定 MPPT 通道数,以提高整体发电效率。

之后,工程师需优化各项性能参数,优先选择标称转换效率高的逆变器,检测直流-交流转换损耗,并关注逆变器在不同负载下的效率曲线,以保证常用工况下效率最大化;同时,设计师也需要做好动态响应能力的评估,验证逆变器的最大功率点跟踪速度和精度,以确保快速适应光照变化,并且同步检查逆变器对电网波动的适应性,提升并网的稳定性。

#### 3.3 蓄电池选型与储能系统设计

##### 3.3.1 蓄电池选型

蓄电池选型与储能系统的设计主要围绕充放电效率展开,目的是提升充放电效率、延长储能时长、减少能量损耗、降低系统成本。在此过程中,工程师需进行储能需求分析,明确系统负载类型,如离网系统需覆盖全天候用电,并网系统可调节峰谷参数等,并计算负载的日均耗电量、峰值功率以及用电时间分布,确定储能系统需满足的功率需求和能量需求。之后再设立充放电效率目标,基于上述的负载需求评估,设定系统最佳的充放电效率指标,作为蓄电池选型与系统设计的基准。在完成对以上需求的分析之后,工程师需做好电池类型的选用,一般情况下,可选用锂电池,其充放电效率高、循环寿命长,适合高频充放电场景;而铅酸电池成本低、技术成熟,但充放电效率相对较低,适合低成本、低频次的使用场景;如果有需求,还需要选取具备快速充放电性能的电池技术,如钛酸锂电池<sup>[4]</sup>。

例如,在上述项目中,工程师团队设立了充放电效率不低于95%、循环寿命超过3000次的技术目标,开始对比不同电池类型的适用性:铅酸电池虽初期成本低(约0.8元/Wh),但充放电效率仅85%且循环寿命不足500次,无法满足高频次充放电需求;钛酸锂电池虽具备10C快充性能,但其能量密度低(仅50Wh/kg)且成本高达3元/Wh,超出项目预算;最终选择了磷酸铁锂电池作为储能主体,其型号为BYD-FDZ-100Ah,额定电压3.2V,充放电效率达96.5%,循环寿命超过4000次,尽管初期成本为1.5元/Wh,但全生命周期成本较铅酸电池降低30%。工程师团队并未直接采用常规选型,而是建立了包含电池成本、效率、寿命及维护费用的LCC(全生命周期成本)模型,通过模拟15年运行周期内的充放电场景,验证了该选型在经济性与可靠性上的双重优势。

### 3.3.2 参数设置

紧接着,工程师需做好电池关键参数的匹配,其大致囊括三个部分:第一是充放电倍率,即选择高倍率电池以缩短充电时间,但需要平衡电池使用寿命与成本;第二是自放电率,这类指标旨在减少能量储存的损耗;第三个部分是深度充放电能力,需确保电池支持设计范围内的深度充放电,以提升储能的利用效率。

例如,在电池关键参数匹配环节,工程师首先确定充放电倍率为0.5C——即50A充电电流、2小时充满50kWh电池组,这一参数既避免了1C高倍率对电池寿命的影响(经测算0.5C下电池寿命延长20%),又能在谷时段(23:00-5:00)利用电网低价完成充电。针对自放电率指标,所选磷酸铁锂电池在25℃环境下自放电率仅2%/月,配合电池管理系统(BMS)的定期均衡维护,可将年能量损耗控制在5%以内,较同类产品降低3个百分点。在深度充放电能力方面,系统设计放电深度(DOD)为80%,即每50kWh电池组实际可用容量40kWh,这一参数既符合磷酸铁锂电池安全工作区间(建议DOD≤85%),又通过预留10%的容量裕度,有效避免了过度放电导致的电池衰减,经实测在80%DOD下电池循环寿命较90%DOD时提升15%。

### 3.3.3 充放电策略

在完成对蓄电池性能参数的设定之后,需做好储能系统拓扑与充放电策略优化。在拓扑结构设计中,设计师需采取DC耦合或AC耦合的架构,该架构主要是根据光伏逆变器与负载的电压等级选取最优拓扑,并配置DC/DC转换器

以匹配电池组与光伏系统的电压,减少充放电过程中的能量损耗。

而在充电策略制定过程中,设计师可采用恒压恒流的充电算法,避免过充导致效率下降,其中需根据光伏预测数据来动态调整充电功率以匹配光照强度。

在放电策略层面,设计师则需要设置放电截止电压阈值,防止过度放电损坏电池,并且需优先使用储能电量满足负载需求,减少电网购电成本,以实现参与峰谷套利的目标来优化放电策略。总之,设计师在对光伏发电系统进行设计优化过程中,需做好对蓄电池规格型号的选用,并做好储能设计优化,提高系统使用水平。

例如,放电策略则以峰谷套利为核心目标,通过BMS实时监测电网电价信号——当园区电价进入峰时段(8:00-22:00,1.2元/度)时,优先释放储能电量满足负载需求,放电功率根据实时负载动态调整,最大不超过500kW;谷时段(22:00-8:00,0.5元/度)则停止放电并启动充电。为保护电池寿命,系统设置放电截止电压为2.5V/节(对应DOD80%),当电池组电压低于该阈值时自动切断放电回路,同时预留20%容量用于应对突发负载。经3个月试运行,该策略使园区峰时段电网购电量减少40%,储能系统日均充放电效率稳定在95%以上,相较于传统固定策略提升了5%的经济效益。

## 4 结语

总体来说,通过对光伏发电系统设计原则与优化策略的深入研究,明确了系统高效、可靠、经济、安全运行的关键点。从光伏组件的精准选型与布局,到逆变器的合理选择与匹配,再到蓄电池的科学选型与储能系统设计,各个环节相互关联、相互影响。实际案例表明,遵循这些原则与策略,能有效提升光伏发电系统的性能与效益。

### 参考文献

- [1] 申毅. 光伏发电电气系统设计优化研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(05): 72-74.
- [2] 蒋博,李建东. 风电—光伏互补发电系统优化设计与运行策略研究[J]. 电力设备管理, 2024, (23): 113-115.
- [3] 陈登峰. 分布式光伏发电系统电气设计与性能优化研究[J]. 光源与照明, 2024, (03): 99-101.
- [4] 贾如宾,刘泉,付凯歌. 基于50kW逆变器替换100kW逆变器的分布式光伏发电系统设计方案优化分析[J]. 电工技术, 2023, (24): 47-50.