

# 面向碳中和目标的风光互补发电系统规划分析

黄 晓

山东国华时代投资发展有限公司 山东济南 250002

**摘 要：**在全球碳中和目标驱动下，可再生能源替代传统化石能源已成为能源转型的核心方向。风能与太阳能具有资源互补性强、开发潜力大的优势，风光互补发电系统可有效平抑单一能源发电的间歇性与不稳定性，是推动能源结构低碳化的重要技术路径。本文围绕面向碳中和目标的风光互补发电系统规划展开研究，阐述风光互补发电的技术原理与碳中和价值，分析系统规划过程中的关键影响因素，提出包含资源评估、容量配置与选址优化的规划策略，并结合实际案例验证规划方案的可行性，最后展望风光互补发电系统在碳中和进程中的应用前景，为可再生能源发电项目的规划设计与落地实施全流程提供参考。

**关键词：**碳中和；风光互补发电系统；容量配置；选址优化；能源转型

## 引言

碳中和目标的提出，对全球能源体系的低碳转型提出了紧迫要求。我国明确提出“双碳”战略目标，即二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。在这一背景下，大力发展风能、太阳能等可再生能源，逐步降低化石能源在能源消费结构中的占比，成为实现碳中和目标的关键举措<sup>[1]</sup>。

风能与太阳能均属于清洁无污染的可再生能源，但受自然条件影响，单一风能或太阳能发电系统存在明显的间歇性与波动性。例如，太阳能发电依赖光照条件，夜间与阴雨天发电效率大幅下降；风力发电则受风速变化影响显著，存在风速过低无法启动、风速过高需停机保护的问题。这种间歇性不仅会影响发电系统的供电稳定性，还会对电网的安全稳定运行带来挑战。风光互补发电系统通过将风力发电与太阳能发电相结合，利用风能与太阳能在时间与空间上的互补特性，可有效平滑输出功率波动，提升系统供电可靠性。同时，风光互补发电系统可配套储能装置与智能调控系统，进一步增强系统的调峰能力与并网适应性，为电网提供稳定的电力输出。

## 一、风光互补发电系统的技术原理与碳中和价值

### （一）技术原理

风光互补发电系统主要由风力发电机组、太阳能光伏阵列、储能装置、逆变器、控制器及负载等部分组成。其核心工作原理是利用风能与太阳能的互补性，实现能源的协同采集与转化。在光照充足但风速较低的时段，

以光伏发电为主、风力发电为辅；在风速较大但光照不足的时段，以风力发电为主、光伏发电为辅；在光照与风速条件均良好的时段，两者协同发电；在自然能源供应不足的时段，由储能装置释放电能，保障负载的持续供电<sup>[2]</sup>。

控制器是风光互补发电系统的核心控制单元，负责实时监测光伏发电功率、风力发电功率及负载需求，通过智能算法调节各发电单元与储能装置的运行状态，实现能源的优化分配。逆变器则将光伏发电与风力发电产生的直流电转换为交流电，满足交流负载的用电需求或实现并网发电。储能装置通常采用蓄电池组，可在系统发电量大于负载需求时储存多余电能，在发电量不足时释放电能，起到削峰填谷、稳定输出的作用。

### （二）碳中和价值

风光互补发电系统的碳中和价值主要体现在能源生产端的减碳、能源消费端的替代及系统全生命周期的低碳化三个方面。

第一，在能源生产端，风光互补发电系统利用可再生能源发电，不产生二氧化碳等温室气体排放。与传统火力发电相比，每千瓦时风电或光伏发电可减少约0.8千克的二氧化碳排放，随着系统装机容量的提升与运行时间的增加，减排效果将愈发显著。

第二，在能源消费端，风光互补发电系统可直接为工业、农业、居民生活等领域提供清洁电力，替代传统化石能源的消耗。例如，在偏远地区的农牧场、通信基站等场景，风光互补发电系统可独立供电，避免柴油发电机等传统发电设备的碳排放；在并网发电场景，系统

可向电网输送清洁电力，降低电网对火力发电的依赖<sup>[3]</sup>。

第三，在系统全生命周期层面，风光互补发电系统的主要设备如风机、光伏组件等，虽然在生产制造过程中会产生一定的碳排放，但随着技术进步与产业升级，设备生产的碳强度持续降低，且设备的使用寿命较长，通常可达20-25年，在全生命周期内的净减排效益显著。此外，系统退役后，大部分设备材料可回收再利用，进一步降低全生命周期的碳排放。

## 二、风光互补发电系统规划的关键影响因素

### (一) 自然资源禀赋

自然资源禀赋是风光互补发电系统规划的基础前提，直接决定系统的发电潜力与经济效益。风能资源的评估指标主要包括年平均风速、风功率密度、风速频率分布等，通常需要在选址区域设立测风塔，进行至少1年的连续观测，以获取准确的风能资源数据。太阳能资源的评估指标主要包括年平均太阳辐照量、年日照时数、峰值日照时数等，可通过当地气象站数据或卫星遥感数据进行分析。

在风光互补发电系统规划中，需重点分析风能与太阳能资源的互补性。若某地区的风能资源在冬季较为丰富，而太阳能资源在夏季较为充足，则两者的互补性较强，可有效提升系统的年发电效率；若两者的资源峰值出现时间重合度较高，则互补效果不佳，系统的稳定性将受到影响。

### (二) 负荷需求特性

负荷需求特性是风光互补发电系统容量配置的重要依据，包括负荷的功率需求、用电时段分布、负荷类型等。根据负荷需求的不同，风光互补发电系统可分为离网型与并网型两类。离网型系统主要为无电网覆盖的偏远地区供电，负荷需求相对稳定，通常需要配置较大容量的储能装置；并网型系统则接入公共电网，负荷需求可由电网进行调节，储能装置的容量可适当降低，主要起到平抑功率波动的作用。

在规划过程中，需对负荷需求进行精细化分析，明确负荷的峰谷时段、最大负荷与最小负荷等参数，结合风光发电的出力特性，优化发电单元与储能装置的容量配比，确保系统在满足负荷需求的同时，实现能源的高效利用。

### (三) 政策与市场环境

政策与市场环境是影响风光互补发电系统规划与落地的重要外部因素。各国为推动可再生能源发展，出台了一系列补贴政策、电价政策与并网政策。例如，我国

对可再生能源发电项目实行标杆上网电价政策，对分布式光伏发电实行度电补贴政策，这些政策可有效降低项目的投资成本，提升项目的经济效益。

在规划过程中，需密切关注国家及地方的相关政策导向，分析政策的支持力度与可持续性，同时考虑市场上设备的价格波动、电力市场的交易规则等因素，确保项目的规划方案符合政策要求与市场规律。

### (四) 技术与经济可行性

技术可行性主要包括发电技术的成熟度、设备的可靠性、并网技术的兼容性等方面。目前，风力发电与光伏发电技术已日趋成熟，设备的可靠性与效率不断提升，但在高海拔、高纬度等特殊环境下，设备的适应性仍需进一步验证。并网技术方面，需考虑系统的功率调节能力、谐波治理能力等，确保系统并网后不会对电网的安全稳定运行造成影响。

经济可行性是项目规划的核心考量因素，主要包括投资成本、运行维护成本、发电量收益等指标。投资成本包括设备购置费用、土建施工费用、并网接入费用等；运行维护成本包括设备检修费用、人员管理费用等。在规划过程中，需通过经济性分析，计算项目的投资回收期、内部收益率等指标，评估项目的经济可行性<sup>[4]</sup>。

## 三、面向碳中和目标的风光互补发电系统规划策略

### (一) 多维度资源评估与选址优化

风光互补发电系统的选址需综合考虑自然资源禀赋、土地利用规划、电网接入条件等因素。首先，基于气象数据与卫星遥感数据，对选址区域的风能与太阳能资源进行初步评估，筛选出资源互补性强、发电潜力大的区域；其次，结合土地利用规划，避开生态保护区、基本农田等限制开发区域，优先选择荒地、坡地等未利用土地，降低土地征用成本；最后，分析选址区域的电网接入条件，确保系统发电能够顺利并网，减少输电线路的建设成本。

在资源评估方面，可采用地理信息系统（GIS）技术，将风能资源、太阳能资源、土地利用类型、电网分布等数据进行叠加分析，构建多维度评估模型，实现选址的科学化与精准化。同时，需对选址区域的自然灾害风险进行评估，如台风、暴雪、沙尘暴等，采取相应的防护措施，提升系统的抗风险能力。

### (二) 基于负荷需求的容量优化配置

容量优化配置是风光互补发电系统规划的核心环节，目标是在满足负荷需求的前提下，实现系统投资成本与运行成本的最小化。容量配置的主要参数包括风机装机

容量、光伏阵列容量与储能装置容量。

目前,常用的容量优化配置方法包括经验法、优化算法等。经验法主要基于工程经验确定各设备的容量配比,方法简单但精度较低;优化算法法则通过建立数学模型,利用遗传算法、粒子群算法等智能算法求解最优容量配比,精度较高且适用性强。

### (三) 智能化调控系统设计

智能化调控系统是提升风光互补发电系统运行效率与并网适应性的关键。基于物联网、大数据、人工智能等技术,构建风光互补发电系统的智能调控平台,实现对系统运行状态的实时监测、数据分析与智能调控。

智能调控平台的主要功能包括:一是实时监测风机、光伏组件、储能装置的运行参数,如发电功率、电压、电流等,及时发现设备故障并发出预警;二是基于历史数据与实时数据,预测未来一段时间内的风能与太阳能资源出力,结合负荷需求预测,制定最优的发电调度策略;三是实现与电网的智能交互,根据电网的负荷变化与电价波动,调整系统的并网功率,实现峰谷电价套利,提升项目的经济效益。智能化调控系统还可与储能系统协同工作,通过优化储能装置的充放电策略,平抑系统的功率波动,提升系统的供电稳定性。

## 四、案例分析

以某偏远地区的农牧场风光互补发电项目为例,该农牧场位于我国西北内陆地区,电网覆盖难度大,传统供电方式为柴油发电机发电,碳排放较高。为实现碳中和目标,该农牧场计划建设一套离网型风光互补发电系统,满足农牧场的日常用电需求,包括照明、灌溉、饲料加工等负荷,总负荷功率约为50kW,每日用电时长约为12小时。

### (一) 资源评估与选址

通过对该地区的气象数据进行分析,得出该地区年平均风速为5.8m/s,风功率密度为220W/m<sup>2</sup>,风能资源较为丰富;年平均太阳辐照量为6000MJ/m<sup>2</sup>,年日照时数约为2800小时,太阳能资源充足。进一步分析发现,该地区夏季太阳辐照量高但风速较低,冬季风速高但太阳辐照量低,风能与太阳能资源互补性较强。结合农牧场的土地利用情况,选择农牧场西侧的荒地作为项目选址,该区域地势平坦,无遮挡物,且远离居民生活区,适合建设风光互补发电系统。

### (二) 容量优化配置

采用粒子群算法进行容量优化配置,以系统的投资

回收期最短为目标函数,以供电可靠性 $\geq 95\%$ 为约束条件。通过求解模型,得出最优容量配比为:风机装机容量30kW,光伏阵列容量40kW,储能装置容量100kWh。

### (三) 经济效益与减排效益分析

该项目总投资约为80万元,运行维护成本约为每年2万元。根据容量配置方案,系统年发电量约为15万kWh,可完全满足农牧场的用电需求,替代柴油发电机发电每年可减少二氧化碳排放约120吨。经计算,该项目的投资回收期约为8年,内部收益率约为10%,具有较好的经济效益与减排效益。

## 五、结论与展望

### (一) 结论

风光互补发电系统通过整合风能与太阳能资源,可有效解决单一可再生能源发电的间歇性问题,提升供电稳定性与可靠性,在碳中和目标下具有重要的应用价值。在风光互补发电系统规划过程中,需综合考虑自然资源禀赋、负荷需求特性、政策与市场环境等关键因素,通过多维度资源评估与选址优化、基于负荷需求的容量优化配置及智能化调控系统设计,实现系统性能与经济效益的最大化。案例分析表明,合理的规划方案可有效提升项目的减排效益与经济效益,为偏远地区的能源转型提供可行路径。

### (二) 展望

未来,随着可再生能源技术的不断进步与成本的持续下降,风光互补发电系统将迎来更广阔的应用前景。一方面,需进一步加强风光资源的精细化评估技术研究,提升选址与容量配置的精准度;另一方面,需推动储能技术与智能调控技术的创新发展,提升系统的并网适应性与功率调节能力。此外,还需完善相关政策与市场机制,加强风光互补发电系统与电网的协同发展,为实现碳中和目标提供坚实的能源支撑。

## 参考文献

- [1] 张勇,李华,王强.风光互补发电系统容量优化配置研究[J].电力系统自动化,2020,44(12):135-142.
- [2] 国家能源局.可再生能源发展“十四五”规划[R].北京:国家能源局,2021.
- [3] 李明,王丽,张伟.基于碳中和目标的可再生能源发展路径分析[J].中国电力,2022,55(5):67-74.
- [4] 王峰,刘阳,赵宇.风光互补发电系统智能调控技术研究进展[J].太阳能学报,2021,42(8):1-8.