

新能源电站总图布局生态影响最小化设计研究

蔡君嘉良

(中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司, 山西 太原 030001)

摘要 为减少新能源电站建设对生态环境的影响, 实现生态影响最小化设计, 本研究分析不同类型新能源电站的生态影响特点, 提出生态影响评估方法及最小化设计原则, 并探讨政策响应显著与不显著电站的布局优化与调整策略, 研究智能优化算法、多目标规划等生态影响最小化技术路径, 提出管理策略。实证研究选取代表性电站案例, 量化分析优化前后生态指标变化, 探讨生态与经济效益平衡及可持续性。研究结果表明, 科学布局可显著减少生态影响, 促进电站可持续发展。

关键词 新能源电站; 总图布局; 生态影响最小化; 多目标规划

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.040

0 引言

生态承载力限制背景下的能源开发模式转型, 在全球可持续发展战略中成为核心议题。新能源电站总图布局作为空间资源配置的关键环节, 其设计合理性直接影响土地利用效率、生态廊道连通性及区域生物群落稳定性^[1]。传统布局模式常忽视微地形水文特征与物种迁徙路径的耦合关系, 导致生态服务价值损耗率高达30%~45%^[2]。基于生态位理论的空间占用模型表明, 不合理布局会使区域生态系统服务价值衰减速度提升2.3倍^[3]。引入景观生态学中的斑块—廊道—基质模型, 再结合地理信息系统(GIS)的空间分析功能, 能够做到新能源设施与生态敏感区的动态避让。构建的生态影响最小化设计框架, 融合了环境流理论里物质和能量的流动规律, 以及工业生态学的循环利用原理, 能为新能源电站空间规划提供量化决策依据。

1 新能源电站总图布局生态影响分析

1.1 新能源电站类型与生态影响特点

新能源电站类型包括风力发电、太阳能光伏发电以及地热能开发等, 其生态影响在不同区域和类型间差异明显。风力发电站占用土地资源、改变地表覆盖, 可能造成局部生物栖息地破碎, 影响区域生物多样性; 太阳能光伏电站遮蔽地表、改变微气候, 会间接影响土壤湿度、植被生长和昆虫群落结构; 地热能开发扰动地下水循环系统, 可能改变水文地质条件, 致使周边生态系统服务功能退化。这些影响方式都经由能量流动与物质循环途径对生态系统产生作用, 我们要根据不同电站类型来做具体分析。

1.2 生态影响评估方法

生态足迹分析是衡量人类活动生态压力的关键工具, 算出新能源电站建设与运营时土地占用、水资源

消耗及碳排放这些指标, 能清楚地看出其对生态系统的占用情况。该方法构建类似生态面积计算模型, 进而把不同类型生态影响整合成标准化指标, 为总图布局优化提供可比性依据。生态服务价值评估聚焦用经济方式衡量生态系统功能损失, 运用市场价值法、替代成本法和条件价值评估法等方法, 把生物多样性保护、水源涵养以及碳汇功能等生态服务换算成货币价值。该方法先构建生态服务价值当量因子表, 再把遥感影像解译和地面调查数据结合起来, 能对新能源电站影响范围内的生态系统服务价值进行时空动态评估。智能化管理策略通过集成生态足迹与生态服务价值评估结果, 可构建多维度生态影响预警体系, 为总图布局动态调整提供决策支持^[4]。

1.3 生态影响最小化设计原则

环境友好性原则要求新能源电站总图布局严格遵守生态保护红线管理要求, 避开自然保护区、水源涵养区及生物迁徙通道等生态敏感区, 从而做到空间布局与生态系统相互协调。资源节约性原则注重土地、水资源及材料的高效使用, 采取紧凑式布局减少单位装机容量占地, 运用节水型设备与循环用水系统降低水耗, 同时选用可回收材料与模块化结构让资源利用更高效。可持续性原则要求总图布局兼顾好近期建设需求和远期生态修复, 预留生态廊道、构建复合生态系统等措施, 让新能源开发与生态保护相互协调。上述原则需通过多目标优化模型实现量化集成, 形成具有可操作性的设计导则。

2 新能源电站总图布局生态影响最小化设计方法

2.1 政策响应显著电站布局优化

政策响应显著型新能源电站需要借助总图布局优化, 实现政策目标与生态保护的双赢。这类电站常常

选址在生态敏感地带或是政策重点扶持的地区，布局必须严格依照生态红线管控要求进行。基于生态阻力成本理论，通过构建空间阻抗模型量化不同布局方案对生态系统的干扰程度，结合政策导向下的开发强度约束，形成多目标优化框架^[5]。随着生态补偿政策持续完善，电站运营方要定期评估自身布局方案与最新政策的契合程度。在此基础上，构建政策—生态响应数据库，实时关注生态补偿标准、碳排放配额等政策参数变动，借助地理信息系统（GIS）技术对总图布局持续优化。

2.2 政策响应不显著电站布局调整

政策响应不显著型新能源电站布局出现的问题，主要归因于规划初期对生态因素考虑不足。这类电站大多处在政策管控相对宽松的地区，布局往往有土地利用效率不高以及生态屏障缺乏等问题。引入生态服务价值评估方法，分析不同布局方案对区域生态系统服务功能的影响，找出关键生态节点与廊道。对于已建电站出现的生态问题，可通过本土植物群落重建、微地形改造等方法来修复受损的生态系统。规划阶段，结合生态与经济的优化方案，并把生态修复成本纳入总图布局决策考量。

2.3 生态影响最小化技术路径

通过运用多目标粒子群优化（MOPSO）算法，能够同时应对发电效率、生态干扰、建设成本等多个冲突目标。通过构建融合地形坡度、植被覆盖度、动物活动轨迹等生态限制因素的数学模型，算法可以自动找到满足所有条件的最佳布局方案。多目标规划技术借助构建层次化决策框架，实现生态—经济综合优化。该方法把总图布局问题分成生态保护、发电效率、投资回报等子目标，采用权重分配法来平衡各目标间的冲突。在规模达数百兆瓦的大型风光储一体化电站中，多目标规划能精确定风机、光伏板、储能装置的最优空间布局，不仅可满足用电高峰时电网的调峰需求，还能维持区域生态系统的完整。

2.4 生态影响最小化管理策略

政策引导是推动生态影响最小化设计的核心动力。在此基础上，制定新能源电站生态准入标准，确定总图布局需保留的生态缓冲区及连通性廊道。以风电场情况来说，规定场内风机间距不得小于一个合适的距离数值，以此维持鸟类迁徙通道的完整性。在此基础上，建立生态补偿机制，电站运营方需根据发电量比例缴纳相应生态修复基金，资金专项用于周边生态系统保护与恢复。这种政策框架通过制定生态准入标准、建立补偿机制等具体措施，可形成“开发—补偿”的

良性循环，助力电站建设与生态保护长期平衡。通过推行绿色电力证书交易制度，给采用生态影响最小化设计的电站额外配发证书，增强其市场竞争力。开发一种生态保险产品，把电站布局引发的生态风险纳入保险范畴，企业就能通过优化布局来减少保险支出。光伏领跑者计划里，项目评选时把生态影响评估结果当作重要参考，促使企业提升总图布局生态合规性。

3 新能源电站总图布局生态影响最小化设计实证研究

3.1 案例选择与数据收集

我国西部生态脆弱区的某大型太阳能电站，总装机容量达 500 MW，占地面积约为 12 km²，且其所在区域生态类型复杂，涵盖荒漠化土地、湿地边缘及农田过渡带等。数据收集采用多源异构数据融合方法，包括电站设计图纸、环境影响报告书、卫星遥感影像（分辨率 0.5 m）、地面生态监测数据（2018–2023 年）及政策文件。在数据维度方面，涉及土地利用类型（依据《土地利用现状分类》GB/T 21010—2017），同时涵盖植被覆盖度（NDVI 指数），还有土壤侵蚀模数（RUSLE 模型计算），此外还包括鸟类迁徙路径（GPS 追踪数据）以及碳排放强度（IPCC 2006 指南）。数据预处理阶段，具体操作时先利用空间插值（Kriging 算法），再通过时序分析（ARIMA 模型）填补缺失数据，保证数据连续。该案例生态敏感，因为同时涉及《全国生态功能区划》中的荒漠化防控区与生物多样性保护优先区，从而为评估总图布局生态影响提供理想场景。

在数据收集时，主要打造了“空间—时间—属性”三维数据模型。在数据收集时，构建了三维数据模型，就空间方面来说，借助 GIS 技术把电站区域分成 100×100 m 的网格单元，并给每个单元标注土地利用类型、高程、坡向等属性；从时间角度看，按季度收集植被指数、土壤湿度等动态指标；就属性而言，包含政策约束（如生态保护红线）、技术参数（如光伏板倾角）以及经济指标（如单位面积发电量）。通过搭建数据库管理平台（DBMS），可更便捷地实现多源数据结构化存储与快速检索。

3.2 生态影响评估与布局优化实施

生态影响评估运用了“压力—状态—响应”（PSR）模型框架，并融合了生态足迹分析（EFA）与生态系统服务价值评估（ESV）方法。在生态影响评估中，借助空间分析明确电站建设给生态系统带来的直接压力。在土地占用方面，光伏阵列区大约占到了总面积的三分之二，植被清除致使 NDVI 值下降 0.32，地表硬化让透水率降低至 15%；在此基础上评估状态变化，土壤侵

蚀模数增长了近两倍,鸟类迁徙路径偏移率达18%,进而量化响应效果,算出生态修复成本占项目总投资的7.3%。布局优化实施阶段,采用综合规划模型,目标是让生态影响最小、发电效率最高、建设成本最低,约束有生态保护红线、地形坡度($< 25^\circ$)和日照时数($> 5 \text{ h/d}$)。

在优化过程中,重点应用了智能优化算法中的遗传算法(简称GA)和粒子群算法(简称PSO)。运用编码手段,把总图布局转变成染色体结构,每个基因位如同功能单元(如光伏阵列、升压站、道路)的“定位标签”,标明其位置。评估时,综合考虑了生态影响指数(EII)、发电量($\text{GW} \cdot \text{h}$)和建设成本(万元),各项指标权重通过层次分析法(AHP)来明确。最终结果显示,与初始方案相比,最优方案使生态影响指数降低41%,发电量提升5.2%,建设成本增加3.7%。采取了以下优化措施:调整光伏阵列布局,从集中式变为分散式,降低连续硬化面积;在湿地边缘设置至少50 m宽的生态缓冲带;优化道路走向,避开鸟类迁徙通道。将这些方面调整后,生态系统连通性得到明显提升,鸟类栖息地碎片化指数降低了约四分之一。

3.3 设计效果评估与改进建议

从量化评估结果来看,优化后电站的生态指标得到明显提升。生物多样性指数(Shannon-Wiener指数)由优化前的2.1升至2.8,本地植物物种数显著增长,增加了15种(占总物种数的32%),同时昆虫多样性指数提高0.45,二者共同推动了该指数的提升。在土地利用效率方面,单位发电量占地相较于优化前,由 $2.4 \text{ hm}^2/\text{MW}$ 降至 $1.8 \text{ hm}^2/\text{MW}$,这一数据标志着已达行业先进水平。其中,尤为显著的是,土壤侵蚀模数从优化前的 $8\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 下降到 $3\,200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,已接近自然背景值。在光伏阵列下种植固氮植物(如紫花苜蓿)后,土壤有机质含量有了小幅提升,年均大约提升0.12%,形成了“上光下草”的生态修复模式。从这些变化可以看出,总图布局优化可以很好地重构受损生态系统,推动生态功能恢复。

生态影响最小化设计给电站经济效益带来的影响,不是一条直线式的变化。初期数据显示,生态优化措施使建设成本有约8%的增长(主要因生态缓冲带建设及植被恢复工程),运营期成本则下降了约一成多(源于土壤侵蚀减少,设备维护费用降低)。运用成本效益分析,发现生态优化措施在项目25年生命周期内的净现值(NPV)为正,内部收益率达到了9.8%,比行业标准的8%还要高。进一步分析表明,生态效益的经济转化率(生态服务价值/投资成本)达1.32,即生态建设

资金每投入1元,便能带来1.32元的生态服务价值回报。政策补贴(如生态补偿金)和市场机制(如绿色电力证书交易)一起作用,促成了这种平衡机制的形成。

优化后电站总图布局的可持续性表现在多个维度。在资源利用效率方面,光伏组件转换效率跃升至22.3%,单位面积发电量达 $1.2 \text{ MW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$,相当于每年多生产出可供数十户家庭使用的电量,较优化前提升18%。在环境适应性方面,模拟极端气候条件(如50年一遇沙尘暴)测试发现,优化布局使设备故障率显著降低近四成,运维成本降幅达四分之一以上,这主要得益于布局优化后设备散热效率提升和沙尘侵入减少。在社会可持续性层面,项目带来了多达120个长期的就业机会,在这120个岗位里,有30%是提供给当地居民的,还通过生态教育基地建设增强了公众环保意识。从制度能否长久运行角度看,项目采用“建设—运营—移交”(BOT)模式制定了生态监测长期有效的办法,保障生态影响持续追踪。这些指标共同显示,优化后的总图布局在技术上切实可行,经济上十分合理,生态上安全可靠,三者很好地结合在一起,为新能源电站持续发展提供了可借鉴的模式。

4 结束语

基于生态位理论与景观生态学原理,搭建了新能源电站总图布局生态影响最小化设计框架,利用GIS空间分析技术结合斑块—廊道—基质模型,设定优化目标为提升土地利用效率、生态廊道连通性及生物群落稳定性,最终达到量化优化效果。未来研究要进一步优化生态评估指标,增强不同气候与地貌条件下布局优化模型的适用性,此外,还要推动政策、市场及公众参与机制的共同创新,为全球能源转型下生态友好型电站建设提供科学指导。

参考文献:

- [1] 谢善琴. 环境税与碳税双重政策下混合能源发电产业生产布局优化研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- [2] 闫伟. 电动汽车充电与光储电站协同运行策略研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- [3] 吴丹子, 黄冬蕾, 石健, 等. 拉萨羊八井地热电站地热能景观概念规划[J]. 风景园林, 2014, 21(06): 74-77.
- [4] 陈述, 陈琼, 任康, 等. 考虑新能源消纳的黄河上游水电站群生态优化调度研究[J]. 水资源保护, 2024(03): 20-27.
- [5] 周步祥, 宁冲, 陈实, 等. 计及生态阻力成本的新能源基地风光电站容量规划与布局优化方法[J]. 电力自动化设备, 2024(07): 141-148.