

Green Construction Evaluation System and Low-Carbon Technology Application Path for Substation Engineering

Xiaohui Zhu Ting Zhao

State Grid Shandong Electric Power Company Zibo Power Supply Company, Zibo, Shandong, 255000, China

Abstract

As global climate change intensifies, countries have prioritized the green and low-carbon transformation of the power industry as a strategic focus. Substation projects play a pivotal role in the power system by facilitating electricity conversion and distribution, yet their construction process leads to significant energy consumption and carbon emissions. Traditional extensive construction methods fail to meet sustainability requirements, while systematic standards for green construction evaluation in substation projects remain lacking. The application of low-carbon technologies also faces challenges such as high costs and insufficient coordination. Against this backdrop, there is an urgent need to develop an evaluation method encompassing the entire lifecycle of planning, construction, and operation, while exploring feasible technical implementation pathways.

Keywords

substation engineering; Green construction; Evaluation system; low-carbon technology

变电工程绿色施工评价体系与低碳技术应用路径

朱晓晖 赵廷

国网山东省电力公司淄博供电公司, 中国·山东 淄博 255000

摘要

因全球气候变化问题不断加剧, 各国已将电力行业绿色低碳转型列为战略重点, 变电工程在电力系统里起着电能转换与分配的关键作用, 而它的施工过程会造成大量能源消耗以及碳排放, 传统的粗放式施工模式无法契合可持续发展要求, 绿色施工评价体系针对变电工程尚未形成系统性标准, 低碳技术应用也面临着成本高、协同配合不足等挑战, 基于这一背景, 迫切需要构建涵盖规划、施工、运维整个周期的评价方法, 并探索切实可行的技术实施路径。

关键词

变电工程; 绿色施工; 评价体系; 低碳技术

1 引言

处于全球碳中和战略大环境下, 作为碳排放重点领域的电力行业, 迫切需要借助绿色施工和低碳技术达成可持续发展, 变电工程是电力系统的关键部分, 施工阶段的资源损耗与环境影响越发突出, 构建科学完备的绿色施工评价体系, 可对能源效率、废弃物管理和生态保护等关键指标开展量化分析, 为施工优化提供支撑, 低碳技术的应用路径包括推广高效设备、实施数字化管控以及集成可再生能源, 可明显降低整个生命周期的碳排放。

2 绿色施工评价体系与低碳技术应用的必要性

在全球加快推进碳中和目标的大背景下, 电力行业作为碳排放的重点领域, 亟须开展系统性变革以减轻环境影

响, 变电工程作为电力系统的核心节点, 施工时资源消耗大、碳排放高的问题十分显著, 传统施工方式往往存在高能耗、高排放和低效率的问题, 这不仅加剧了资源的浪费, 还对电力行业的可持续发展造成阻碍。建立绿色施工评价体系可为变电工程提供科学的环境绩效评估方式, 对能源消耗、废弃物产生、生态影响等关键指标开展量化分析, 找出施工过程中的薄弱之处, 从而推动施工单位对资源分配进行优化、减轻环境负担, 采用低碳技术是实现绿色施工目标的重要途径, 像采用高效节能变压器、低损耗电缆等设备削减运行能耗, 利用建筑信息模型(BIM)优化施工流程以削减材料浪费, 实施光伏一体化设计并运用储能技术提升可再生能源利用率。技术与评价体系相结合, 不仅能切实削减变电工程全生命周期的碳排放强度, 又能凭借标准化管理提高施工效率和工程质量, 从长远的角度考量, 绿色施工和低碳技术协同合作, 可推动电力行业符合日益严格的环保法规标准, 还可利用技术创新塑造新的产业竞争力。随着碳交易市场不断健全, 低碳变电工程的经济效益会愈发凸显, 让投资方得到环

【作者简介】朱晓晖(1992-), 男, 中国浙江淳安人, 硕士, 工程师, 从事电网工程建设研究。

境与经济的双重回报，打造科学完备的绿色施工评价体系并实施切实可行的低碳技术应用模式，成了目前变电工程领域实现高质量发展的必由之路，既贴合国家“双碳”战略要求，也为全球电力基础设施的绿色转型提供了关键实践案例^[1]。

3 变电工程绿色施工评价体系构建路径

3.1 基于全生命周期的评价指标科学化设计

构建绿色施工评价体系的核心要点是构建一套科学、系统且可量化的指标体系，贯穿变电工程从规划直至施工、运维的全生命周期，指标选取时，要综合权衡环境、经济、技术以及管理等多维度的因素，防止陷入单一视角的误区，环境指标需着重关注碳排放强度、能源消耗、水资源利用效率以及废弃物回收率等核心数据，例如计算施工阶段每单位产值所产生的碳排放量，以衡量低碳措施的实际成效。技术指标要涵盖绿色施工工艺的使用比例、数字化管理工具的覆盖程度以及设备的能效水平，例如采用 BIM 技术优化土方开挖计划以缩短机械作业时长，抑或采用装配式建筑技术降低现场的污染程度，经济指标着重考虑绿色施工的额外成本与长远收益，通过全生命周期成本分析（LCCA）对低碳技术的经济可行性加以验证。

为保证指标体系的权威性，可参照国际标准，并依据电力行业特点进行本土化调整，为应对变电站施工时普遍存在的 SF6 气体排放问题，新增“温室气体泄漏监测达标率”专项指标，可运用层次分析法（AHP）与德尔菲法相结合的方式对指标权重分配，经多轮调研明确各指标的相对重要性，避免主观偏差，某特高压换流站项目实践表明，科学的指标体系能让施工阶段碳排放减少 18%，还能减少 15% 的材料浪费，充分彰显了系统性评价对绿色施工的引导意义^[2]。

3.2 多源数据融合的动态评价模型开发

常规静态评价手段无法适应变电工程施工场景的复杂多变，要搭建基于多源数据融合的动态评价模型，实现实时监测与反馈优化，在数据采集环节，应集成物联网传感器、无人机巡检设备及施工机械终端等设备，实时采集能耗、噪声、扬尘等环境数据，且与 BIM 模型里的进度、资源计划实现联动，通过部署智能电表的方式监测临时用电负荷，依据施工计划自动给出能效优化建议，数据处理过程中，可运用机器学习算法检测异常数据，例如突然出现的噪声超标或者材料浪费情况，进而关联责任班组予以预警。

构建动态权重机制是评价模型的核心，根据不同施工阶段的特征来调整指标重要性，土方开挖阶段着重控制扬尘及土方平衡率，设备安装阶段则聚焦吊装作业的能耗效率，某智能变电站项目通过研发“绿色施工驾驶舱”系统，将实时数据和评价模型进行整合，每周生成环境绩效得分并推送优化措施，使施工过程碳足迹可视化水平提升 40%。模型应具备回溯分析功能，通过对比历史项目的数据，找出绿色施工中的普遍瓶颈，例如夜间施工照明能耗过高这一问

题，以此制定有针对性的解决方案，该数据驱动型动态评价手段，既提升了管理精准度，又为后续项目积累了可重复使用的优化经验。

3.3 基于利益相关方协同的标准化实施机制

绿色施工评价体系的有效实施依赖于设计、施工、监理和业主等多主体的协同配合，应建立标准化实施机制以确定各方职责和协作流程，从组织架构角度出发，建议组建跨部门的绿色施工管理团队，由业主单位牵头负责评价标准的制定工作，设计院提供低碳技术解决方案，施工单位承担数据采集和措施实施工作，监理单位对评价过程的合规性予以监督，某生态变电站项目，通过签署绿色施工专项协议，将评价得分和工程款支付关联起来，大幅提升了施工方的配合程度。

标准化实施需配备完善的技术文档与培训体系，应编写《变电工程绿色施工评价手册》，明确数据采集方式、评分准则和改进措施，同时开发简易的移动端应用，方便现场人员快速录入信息，对施工人员实施分层式培训，例如项目经理着重掌握评价体系的管理逻辑，一线工人则聚焦具体操作要点。为确保项目的长期有效性，可引入第三方认证机构，定期对项目开展绿色施工星级评定，且将评定结果归入企业信用评价体系，此协同机制能使评价体系执行效率提高超 30%，还能降低因沟通障碍造成的技术落地偏差，通过制度化、流程化的管理手段，绿色施工评价由理论框架落地为可实施的日常工作，最终实现变电工程环境与经济双重效益的共赢。

4 变电工程低碳技术应用路径

4.1 低碳设备与材料的技术革新与规模化应用

变电工程碳排放主要源于设备运行损耗以及施工材料的生产与运输，因此低碳技术的核心突破方向是高效设备和环保材料的研发与应用，在变压器领域，非晶合金变压器空载损耗比传统硅钢变压器降低 60% ~ 70%，虽说初始投资成本不低，不过全生命周期节能效益明显，非常适合负荷波动大的场景。GIS（气体绝缘开关设备）借助紧凑设计减少占地面积与 SF6 气体使用量，结合新型环保绝缘介质，可完全解决 SF6 引发的强温室效应问题，采用高导电率铝绞线或碳纤维复合芯导线作为导线材料，可在相同输电容量时使线路损耗降低 15% ~ 20%。

施工全程都应融入材料创新，包括用再生骨料混凝土替换传统混凝土，降低水泥生产环节的碳排放；采用预制装配式围墙及钢结构建筑，减少现场浇筑产生的扬尘和能耗，某 ±800kV 特高压工程凭借规模化应用上述技术，使施工阶段建材运输的碳排放降低 23%，设备运行损耗降低 12%，推广上述技术需构建完备的供应链体系，与设备制造商共同制定阶梯式补贴政策，通过 EPC 总承包模式将低碳设备归入标准化采购列表，实现规模效应以降低成本^[3]。

4.2 数字化赋能的施工过程碳足迹精准管控

传统施工管理针对碳排放采用的粗放统计手段，难以契合精准减排需求，应建立基于数字孪生的碳足迹实时监测与优化架构，在施工准备阶段，借助 BIM 模型开展三维场地安排和机械路径谋划，可使土方转运距离降低 30% 以上，从而直接减少柴油消耗。运用物联网技术，为各类施工机械配置燃油监控终端与 GPS 定位装置，依靠北斗卫星高精度的定位本事，即时采集挖掘机、吊车等设备的工况运行数据，自动生成碳排放情况热力图，找出高耗能的作业环节，某换流站项目经数据分析发觉，临时用电总量里夜间施工照明能耗占比达 42%，于是把作业时间调整到自然光充裕的白天，每月让柴油发电机少运转 120 小时。

借助人工智能算法可进一步优化资源调度，根据混凝土浇筑量以及运输距离，动态规划搅拌站供货车辆的最优数目与路径，降低车辆空驶的比例，数字孪生平台需与碳核算体系深度整合，自动把实时收集的用电量、柴油消耗等数据转换为二氧化碳当量，结合施工进度做关联分析，得出分部分项工程碳强度排名，某智能变电站的实践显示，此数字化管控让施工阶段单位产值的碳排放降低了 28%，同时让机械利用率提高 19%，未来可以研究运用区块链技术，确保碳排放数据不可篡改且可追溯，为参与方开展碳资产交易提供坚实支撑。

4.3 可再生能源与储能系统的深度集成

实现变电工程用能结构的绿色转型是降低间接碳排放的核心途径，针对施工临时用电情况，可采用“光伏+储能”微电网替换柴油发电机，在场地周边布置柔性光伏组件，再搭配磷酸铁锂电池储能系统，以满足办公区照明及小型机具用电需求，某高原变电站项目于施工阶段建设了 1.2MW 分布式光伏阵列，通过储能系统实现 80% 临时用电的自主供给，每年约减少 65 吨柴油消耗，针对永久性设施，可在变电站的屋顶和围墙处安装 BIPV（光伏建筑一体化）系统，产生的电量优先满足站用负荷需求，多余电量上网获取收益^[4]。

应用新型储能技术可大幅提高可再生能源消纳比例，

基于全钒液流电池长寿命、大容量的特性，可作为变电站备用电源，取代传统铅酸电池；飞轮储能系统可用来实现瞬时负荷平衡，缓解设备启停引发的电网波动，在风光资源充足的区域，可尝试推广“变电站+可再生能源制氢”模式，利用富余绿电来电解水制氢，氢气储存起来后供工程车辆燃料电池动力使用或周边工业领域。一座 2MW/8MWh 的储能电站为某沿海柔性直流工程配套建设，既缓解了施工高峰的用电负荷压力，投运后又参与电网调频辅助服务，一年可新增收益约 200 万元，技术集成实现经济效益离不开政策支撑，例如将变电站附属新能源设施归入绿色电力证书交易范围，或者允许储能系统参与电力现货市场套利。设计时应预先预留设备接口与空间布局，避免后期改造产生重复投资，通过能源结构的系统优化重构，变电工程可由单纯的电力枢纽升级为“产储用”一体化的低碳节点，为新型电力系统建设筑牢底层根基。

5 结语

绿色施工评价体系与低碳技术协同应用，为变电工程打造环境友好型模式提供系统方案，通过全生命周期指标规划、动态数据整合以及多主体协作机制，评价体系实现了对施工过程碳足迹的精准控制；通过高效设备革新、数字化赋能和可再生能源集成等技术途径，从根源上减少了资源消耗与排放量，伴随碳交易市场的完善和政策扶持的加强，变电工程绿色低碳发展会获得更广阔的发展空间，为构建新型电力系统以及实现全球碳中和目标提供关键支撑。

参考文献

- [1] 王先伟,简齐超.碳管理与绿色技术在建筑施工中的协同路径研究[J].中国建筑装饰装修,2025(10).
- [2] 关雪波.建筑工程绿色施工技术应用与碳排放核算研究[C]//智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(二).2025.
- [3] 崔新昭,马彦.探讨建筑企业可持续发展中的绿色施工技术[J].安家,2024(8):0265-0267.
- [4] 孙健.科技创新下的建筑绿色低碳施工技术研究[J].门窗,2023(4):10-12.