厂用电清洁化效益评估体系研究

张　锋　张马将　胡亚运　张　军　孙浩泽
湖北能源集团襄阳宜城发电有限公司　湖北　襄阳　441400

摘　要：为量化火电厂厂用电清洁化改造成效、破解效益评估不全面问题，本文依托可持续发展、全生命周期等理论，界定清洁化核心概念与实施模式，从经济、环境、社会、技术四维构建评估体系，结合层次分析法与模糊综合模型搭建评估框架。以典型燃煤电厂为实例开展实证测算，明确改造现存技术、经济与管理短板，针对性提出优化对策，为电厂厂用电低碳转型与效益提升提供量化参考与实践支撑。

关键词：厂用电清洁化；效益评估；体系构建

引言：双碳目标下，电力行业低碳转型持续深化，厂用电作为电厂能耗核心环节，其清洁化降耗是火电减碳的关键抓手。当前行业缺乏系统化、多维度的厂用电清洁化效益评估标准，单一经济评价模式难以覆盖综合价值。基于此，本文结合厂用电能耗特征与清洁化实施路径，搭建科学完善的效益评估体系，通过案例实证验证模型可行性，精准剖析改造痛点，为火电企业清洁化改造决策与行业标准完善提供理论与实践依据。

1 相关概念与理论基础

1.1 厂用电清洁化核心概念界定

（1）厂用电的定义与能耗特征。厂用电是指电厂内辅助设备（如风机、水泵、磨煤机、除尘装置等）运行所消耗的电能，其能耗水平以厂用电率为核心评价指标，即厂用电量占发电量的百分比。该指标受机组类型、负荷率、辅机效率及运行方式等多重因素影响，火电厂厂用电率通常在5%～8%之间，是衡量电厂运行经济性的关键参数。（2）厂用电清洁化内涵。厂用电清洁化是指通过清洁能源替代、节能改造、智能降耗与低碳运维等路径，系统降低厂用电环节的碳排放强度与化石能源依赖度。其实施路径涵盖：以分布式光伏、风电等清洁电源替代传统厂用电源；对辅机系统实施变频调速、高效替换等节能技改；依托数字孪生、AI优化算法实现能耗精准管控；以及全流程低碳运维管理，最终实现厂用电系统的绿色低碳转型[1]。

1.2 效益评估核心理论

（1）可持续发展理论。该理论强调经济、社会与环境目标的协调统一，为厂用电清洁化改造的价值评估提供了宏观导向框架，要求效益测度不仅关注直接经济回报，还需纳入碳减排与环境效益维度。（2）全生命周期成本理论。该理论要求将清洁化改造项目划分为建设投资、运营维护与报废处置等阶段，逐项核算全周期成本与收益，避免短期评价偏差，为投资决策提供更全面的财务依据。（3）资源最优配置理论。该理论指导厂用电环节的能源结构优化与资源高效利用，在清洁能源替代比例、节能改造投入规模与降碳效果之间寻求最优均衡，实现有限资源条件下的综合效益最大化。

1.3 厂用电清洁化主要实施模式

（1）内源清洁化模式。即在电厂厂区内建设分布式光伏、分散式风电等清洁能源发电设施，同时利用余热余压进行发电自用，所发电量直接供给厂内辅机负荷，实现“自发自用”的内源性清洁替代。（2）外源清洁化模式。通过绿色电力交易、清洁能源直购等方式，从外部引入风电、光伏等绿色电能，替代传统以火电为主的厂用电来源，降低厂用电的间接碳排放水平。（3）技术节能模式。对引风机、给水泵等大功率辅机实施变频调速改造，部署智能运维系统与能耗管控平台，实现设备运行状态的实时监测与寻优控制，从用能效率端推进厂用电的清洁化降耗。

2 厂用电清洁化效益评估体系构建

2.1 评估体系构建原则与思路

（1）构建原则。为保证评估结果的科学性与实用性，评估体系构建遵循五项基本原则：一是科学性原则，指标选取与计算方法有据可依，符合电力行业技术规范与统计标准；二是系统性原则，评估体系能够全面反映厂用电清洁化在经济、环境、社会及技术等多维度的综合效益；三是可量化性原则，各指标均具备明确的数据来源与量化路径，规避主观模糊判断；四是针对性原则，指标设置紧扣厂用电清洁化核心特征，避免泛

化；五是动态性原则，评估体系具备可调整性，能够适应清洁化技术迭代与政策标准更新。（2）构建思路。以可持续发展理论、全生命周期成本理论和资源最优配置理论为学理支撑，紧密结合厂用电清洁化的实施路径与能耗特征，从“概念界定—路径划分—效益测度”的逻辑链条出发，遵循“目标导向—维度划分—指标筛选—权重赋值—模型集成”的技术路线，筛选核心评价指标，划分效益评估维度，最终搭建多层次、多维度的综合评估框架，为后续实证评估提供方法支撑。

2.2 评估指标维度与指标筛选

（1）经济效益维度。该维度衡量清洁化改造的直接经济产出，具体包括：厂用电能耗成本节约，即单位发电量厂用电成本下降带来的燃料节约收益；设备运维成本降低，反映变频改造与智能运维对辅机设备故障率及检修成本的削减效应；政策补贴收益，涵盖绿电交易溢价、碳减排配额交易及节能技改财政奖励等；发电效率提升收益，表征清洁化改造对机组整体热效率与出力的正向贡献。（2）环境效益维度。该维度聚焦清洁化改造的生态正外部性，核心指标包括：二氧化碳减排量，按替代电量对应区域电网排放因子折算；二氧化硫、氮氧化物及粉尘等污染物减排量，反映厂用电量削减对上游发电排放的削减效应；化石能源消耗降低，以内源清洁发电量和外源绿电采购量折算标煤节约量；绿色能耗占比提升，即清洁能源供电量占厂用电总量的比例变化[2]。（3）社会效益维度。该维度体现清洁化改造的社会价值，包括：助力区域双碳目标落地，通过厂用电碳减排贡献区域碳排放强度下降指标；提升电厂绿色品牌价值，增强企业在 ESG 评级、绿色金融及公众形象方面的竞争力；推动电力行业清洁转型，发挥示范效应带动同行业厂用电低碳技术推广与模式复制。（4）技术效益维度。该维度考察清洁化改造的技术实施效果，涵盖：厂用电系统智能化水平，反映数字孪生、AI 优化等技术的应用深度；能耗管控精度，即厂用电实时监测与负荷预测的准确率；设备运行稳定性，以辅机故障率、连续运行时长等指标度量；清洁技术适配性，评估所选清洁化技术方案与机组类型、运行工况的匹配程度。

2.3 指标量化与权重确定

（1）指标量化方法。对于经济效益、环境效益中的能耗节约量、减排量等定量指标，依据《火力发电厂能源消耗统计标准》《省级电网碳排放因子》等行业规范设定统一核算标准，确保数据口径可比；对于社会效益、技术效益中涉及智能化水平、绿色品牌价值等定性指标，采用专家评分法与分级量化表相结合的方式，将定性描述映射为 1～5 分等级分值，实现定性指标的规范化量化处理。（2）指标权重确定。采用层次分析法确定各维度及各指标的权重系数。首先，构建层次结构模型，将评估目标层、维度层与指标层逐级分解；其次，邀请电力系统、能源经济、环境工程等领域专家对各层级指标进行两两比较，构造判断矩阵；再次，计算各矩阵的最大特征值及其对应的特征向量，得到初始权重分配；最后，进行一致性检验，当一致性比率 $CR < 0.1$ 时判定权重分配合理有效，最终确定各指标的综合权重系数[3]。

2.4 综合评估模型构建

（1）效益等级划分标准。依据清洁化综合效益高低，将评估结果划分为优秀、良好、一般、较差四个等级。优秀等级表示清洁化改造效益全面显著，各项指标均达到行业先进水平；良好等级表示主要指标表现良好，个别指标仍有提升空间；一般等级表示改造效果初步显现但整体效益尚不突出；较差等级表示清洁化改造未达预期目标，需系统优化调整。各等级对应明确的综合评分阈值区间，以增强评估结果的可解释性[4]。（2）模糊综合评估模型搭建。针对厂用电清洁化效益评估中定性指标与定量指标并存、评价边界模糊的特点，构建二级模糊综合评估模型。首先，确定因素集与评语集，因素集即前述指标层次结构，评语集对应四个效益等级；其次，采用隶属度函数将各指标量化值转化为对各等级的隶属程度，建立模糊评价矩阵；再次，将层次分析法得到的权重向量与模糊评价矩阵进行模糊合成运算，得到各维度的模糊评价结果；最后，进行二级模糊合成，计算综合效益对各等级的隶属度向量，依据最大隶属度原则判定清洁化效益的最终等级归属，为电厂清洁化改造决策提供量化依据。

3 实证分析与优化对策

3.1 案例电厂概况与清洁化改造现状

（1）案例电厂基本情况。选取某 2×600MW 燃煤火力发电厂为研究对象，该电厂年发电量约 66 亿 kWh，改造前综合厂用电率约为 6.8%，高于同区域同类型机组平均水平。厂用电主要消耗集中于引风机、送风机、给水泵、磨煤机及脱硫系统等辅机设备，合计约占厂用电总量的 75% 以上。电厂运营模式为电网统一调度、自发自供厂用电，辅机电源全部取自机组高压厂用变压器。（2）电厂厂用电清洁化改造实施内容、投入成本与运营现状。该电厂分两期实施清洁化改造：一期完成 4 台大功率辅机变频改造，配套建设厂区屋顶分布式光伏 1.2MWp，年发电量约 130 万 kWh；二期完成智能能耗管

控系统部署及绿色电力年度采购 5000 万 kWh。改造工程累计投入约 3800 万元，目前已完成竣工验收并进入正常运营阶段。

3.2 案例电厂清洁化效益实证测算

（1）各维度单项效益测算。经济效益方面，辅机变频改造年节电量约 2180 万 kWh，绿电采购节约用能成本约 320 万元/年，合计年综合经济收益约 790 万元。环境效益方面，年减排 CO_2 约 2.85 万吨，厂区光伏发电等效节约标煤约 420 吨/年，绿色能耗占比由改造前的 2.1%提升至约 11.6%。社会效益方面，该电厂列入省级节能示范项目名录，绿色品牌建设成效初显。技术效益方面，能耗管控系统投运后负荷预测精度达 96.3%，设备故障率同比下降约 18%。（2）综合效益评估结果。将上述数据代入模糊综合评估模型，经计算得出该电厂清洁化效益综合隶属度为：优秀 0.28、良好 0.46、一般 0.19、较差 0.07，依据最大隶属度原则判定综合效益等级为“良好”。核心优势体现在变频节能改造效果显著、绿电替代经济性良好；主要短板为厂内分布式光伏装机规模偏小、清洁能源自给率仍处于较低水平。

3.3 厂用电清洁化实施现存问题

（1）技术层面。变频改造后部分辅机设备存在低频运行共振现象，清洁技术对机组变负荷工况的适配性有待提升；能耗管控系统数据采集覆盖不全，部分老旧辅机未接入智能监测网络，制约整体能耗精度控制。（2）经济层面。前期改造投资总额较大，静态投资回收期约 5.1 年，部分企业面临资金压力；当前收益主要依赖节能降耗直接效益，碳交易、绿证交易等市场化收益渠道尚未充分打通，盈利模式较为单一。（3）管理层面。清洁化运维管理制度建设滞后于技术改造进度，运行人员对变频设备、智能系统的操作规范掌握不足，节能降耗责任未精准落实到班组，效益管控的常态化管理机制尚未完全建立。

3.4 提升厂用电清洁化效益的优化对策

（1）技术优化对策。针对变频系统低频谐波与振动问题，加装有源滤波器和减振装置，优化变频器控制参数以适应宽负荷调节范围；推进智能能耗监测系统向全厂辅机及附属设备扩容覆盖，引入 AI 负荷预测与实时寻优算法，提升能耗管控的精准度和响应速度；探索“光伏 + 储能”配套模式，提升厂内清洁能源消纳能力和供电可靠性。（2）经济优化对策。积极对接绿证交易和 CCER 碳资产开发，加快清洁化改造碳减排量的核证备案，拓宽收益来源；全面梳理国家和地方节能技改、绿色制造等财政奖补政策，争取专项资金支持；采用“分批实施、效益滚动”的改造策略，合理控制各阶段资金占用强度，降低一次性投入压力[5]。（3）管理优化对策。修订完善清洁化运维管理制度，将变频设备巡检、智能系统数据校核、节能运行操作等纳入标准作业程序；建立季度动态效益评估机制，编制评估报告并反馈至运行优化决策；将厂用电率、清洁能源占比、能耗控制精度等关键指标分解至班组，纳入月度绩效考核体系，同步组织变频技术、智能系统运维等专项技能培训，持续提升全员清洁化效益管理能力。

结束语

本文完成厂用电清洁化效益评估体系的构建与实证应用，明确清洁化改造可实现经济、环境、社会与技术多维增益，同时厘清当前改造存在的技术适配不足、盈利模式单一、运维管理滞后等核心问题。所搭建的评估体系可精准量化改造综合效益，提出的优化策略具备较强实操性，可为同类型火电厂厂用电清洁化升级提供借鉴，助力电力行业绿色低碳高质量发展与双碳目标稳步落地。

参考文献

[1] 王树众, 李昊, 张宇. 火电厂厂用电系统低碳清洁改造及综合效益评价 [J]. 电力系统工程学报,2024,40(05):112-119.

[2] 刘军, 赵冬雪. 基于全生命周期的火电厂厂用电节能改造效益评估研究 [J]. 热力发电,2023,52(09):89-96.

[3] 陈磊, 杨晨光. 新型电力系统下火电厂厂用电绿色低碳评价指标体系构建 [J]. 电网技术,2022,46(12):4512-4519.

[4] 张海峰, 吴志强. 火电厂辅机系统清洁化节能改造及效益量化分析 [J]. 中国电机工程学报,2023,43(18):6690-6698.

[5] 周凯, 马骁. 双碳目标下电厂厂用电清洁化综合效益评估模型 [J]. 电力节能,2025,41(03):45-50.