

电厂电气设备节能改造关键技术与能效提升路径分析

贾二平 赵涛 宋笑宇 关志成
华能集团公司北方联合电力达拉特发电厂
DOI:10.12238/etd.v6i8.17138

[摘要] 在“双碳”目标与能源结构转型背景下,电厂作为能源生产核心枢纽,其电气设备能效水平直接影响能源利用效率与碳排放强度。当前,我国电厂存量电气设备普遍存在技术老化、能耗偏高问题,风机、水泵等辅机及变压器、电机等核心设备能效差距显著,节能改造潜力巨大。本文系统研究变压器、电机、照明系统等专项节能技术及多系统协同优化方案,提出设备升级、运行管理优化、智能电网融合的三维能效提升路径,并构建科学的评估指标体系与持续优化机制,为电厂降低能耗、提升效益提供实践指导,助力电力行业实现节能降碳与高质量发展。

[关键词] 电气设备节能; 能效提升; 关键技术; 改造路径

中图分类号: TM621 **文献标识码:** A

Analysis of Key Technologies and Energy Efficiency Improvement Paths for Energy-saving Retrofits of Power Plant Electrical Equipment

Erping Jia Tao Zhao Xiaoyu Song Zhicheng Guan
China Huaneng Group, North United Power Dalad Power Plant

[Abstract] Against the backdrop of the "dual carbon" goals and energy structure transformation, power plants, as core hubs of energy production, have electrical equipment whose energy efficiency levels directly impact energy utilization efficiency and carbon emission intensity. Currently, the stock of electrical equipment in China's power plants generally suffers from technological aging and high energy consumption, with significant energy efficiency gaps in auxiliary equipment such as fans and pumps, as well as core equipment like transformers and motors, indicating substantial potential for energy-saving retrofits. This paper systematically studies specialized energy-saving technologies for transformers, motors, lighting systems, and multi-system collaborative optimization solutions. It proposes a three-dimensional energy efficiency improvement path encompassing equipment upgrades, operational management optimization, and smart grid integration. Additionally, a scientific evaluation index system and a continuous optimization mechanism are established to provide practical guidance for power plants to reduce energy consumption and enhance benefits, thereby supporting the power industry in achieving energy conservation, carbon reduction, and high-quality development.

[Key words] Electrical Equipment Energy Saving; Energy Efficiency Improvement; Key Technologies; Retrofit Paths

引言

电力行业是能源消耗与碳排放的重点领域,电厂电气设备作为能源转换与传输的核心载体,其运行能效直接影响生产效益与行业节能目标达成。随着一次能源价格波动加剧及环保政策趋严,电厂面临降本增效与减排的双重压力。当前,我国大量电厂仍使用服役超15年的老旧设备,这些设备设计标准低、运行损耗大,辅机电耗占厂用电比例高,输变电设备损耗高于现行标准。本文聚焦电厂电气设备节能核心问题,挖掘关键技术与实践路径,为能效升级提供理论与实操支持。

1 电厂电气设备及能耗现状剖析

1.1 电厂电气设备概述

电厂电气设备是保障发电流程顺畅运行的核心基础设施,涵盖发电、输变电、辅机及控制四大类关键设备。发电设备包括汽轮机、发电机等能量转换核心装置,其性能直接决定发电效率;输变电设备由变压器、开关柜、电缆等组成,承担电力传输与电压变换功能,是能量损耗的关键环节;辅机设备包含风机、水泵、空压机等,为机组运行提供冷却、通风等支撑,运行时间长、能耗占比高;控制设备则通过PLC、监控系统等实现设备运

行状态的实时调控。这些设备分工明确又协同联动,形成完整的电力生产与传输体系,其技术水平与运行状态共同决定电厂整体能效表现,任何一类设备的低效运行都将引发连锁性能耗增加。

1. 2能耗现状分析

当前我国电厂电气设备能耗呈现多维度突出问题,不同类型设备能耗短板各异。火电厂中,200MW以下机组的发电机效率普遍低于97%,汽轮机热耗率较设计值高出5%-8%;输变电领域,运行超15年的硅钢片变压器空载损耗是新型设备的3倍以上,老旧电缆因绝缘老化导致线损增加10%以上。辅机设备“大马拉小车”现象普遍,风机、水泵负载率常低于50%,此时能效较额定工况下降40%。水电厂启闭设备、新能源电厂逆变器也存在能耗问题,部分光伏逆变器转换效率已降至93%以下^[1]。整体来看,电厂综合厂用电率平均为6%-8%,较国际先进水平高出1-2个百分点,节能改造空间显著。

2 电厂电气设备节能改造关键技术探究

2. 1变压器节能技术

变压器节能改造以降低铁损与铜损为核心,形成设备替换与技术升级双重路径。设备替换方面,推广应用非晶合金铁芯变压器,其采用铁基非晶合金材料,原子排列无序性使磁滞损耗大幅降低,空载损耗较传统硅钢片变压器减少70%-80%,尤其适用于负荷波动大的场景。立体卷铁芯变压器通过三维立体绕制工艺,减小铁芯接缝处漏磁损耗,负载损耗降低15%-20%,且抗短路能力更强。技术升级上,对有改造价值的老旧变压器实施铁芯加固、绕组换线等改造,采用铜箔绕组替代传统导线,降低电阻损耗;配套安装智能温控系统,根据负载变化调节冷却方式,避免过度冷却造成的能源浪费,实现变压器全工况高效运行。

2. 2电机节能技术

电机节能改造围绕高效设备应用与运行调控优化展开,覆盖风机、水泵等核心辅机。高效电机替换是基础手段,采用永磁同步电机替代传统异步电机,其利用永磁体励磁减少励磁损耗,效率提升至95%以上,且功率因数接近1,降低无功损耗;高压电机优先选用高效节能型号,通过优化定子绕组结构与材料,减少铜损与铁损。变频调速技术是运行调控核心,针对变负载电机安装高压或低压变频器,根据实际负载需求调节电机转速,负载率低于50%时节能效果达30%-50%。此外,电机系统联动优化技术通过PLC控制器实现多电机运行协同,使电机输出与主机工况精准匹配,避免单台设备低效运转,系统整体能效提升15%-20%。

2. 3照明系统节能技术

电厂照明系统节能改造以“高效光源替换+智能控制”为核心,兼顾功能性与节能性。光源替换方面,将传统白炽灯、高压汞灯全面替换为LED节能灯具,LED灯发光效率达100-150lm/W,是白炽灯的5-7倍,寿命延长10倍以上,且启动速度快、耐振动,适配电厂多粉尘、高振动的环境^[2]。针对主厂房、控制室等不同区域,选用不同功率与色温的LED灯具,在保障照度达标的同时避免能源浪费。智能控制体系建设中,安装人体感应、光感传

感器与智能开关,实现“人来灯亮、人走灯灭”及根据自然光强度自动调节亮度;通过中央控制系统对全厂区照明进行集中管控,实时监测灯具运行状态,及时更换故障灯具,避免无效能耗,整体照明系统能耗可降低60%以上。

2. 4其他节能技术

除核心设备专项技术外,多系统协同与余热利用技术为电厂节能提供补充支撑。输变电系统中,采用SVG静止无功发生器替代传统电容器组,实现无功功率动态补偿,将功率因数提升至0.95以上,降低线路损耗;优化电网拓扑结构,减少迂回供电,缩短供电距离。余热利用技术通过在火电机组配套低温省煤器,回收锅炉排烟余热加热凝结水,降低汽轮机抽汽量,使发电效率提升2%-3%;利用发电机冷却系统余热为厂房供暖或加热生活用水,实现能源梯级利用。智能监测技术则通过部署物联网传感器,实时采集设备能耗数据,结合大数据分析识别能效异常点,为精准节能提供数据支撑,形成“技术改造+智能管控”的完整节能体系。

3 电厂电气设备能效提升路径分析

3. 1设备升级改造路径

设备升级改造需构建“精准评估-分级实施-闭环验收”的全流程管理体系。前期开展全口径能效审计,通过设备性能测试、历史数据追溯与现场运行核查相结合的方式,建立覆盖设备型号、运行年限、负载特性及能耗参数的动态数据库,运用能效诊断模型量化各设备节能潜力。基于“节能潜力-投资成本-回收周期”三维评估模型,优先筛选辅机变频改造、高效光源替换等投资回收期短、技术成熟度高的项目,再逐步推进变压器能效等级提升、发电机定子绕组优化等资本密集型改造。实施阶段采用“停机改造+在线改造”复合模式,对核心设备如主变压器实施停机升级以确保改造质量,对辅机系统如循环水泵采用在线旁路改造减少生产中断。改造过程中严格执行施工标准与质量管控流程,通过第三方监理单位对关键工序进行验收。改造完成后开展全性能测试与能效对标,对比改造前后单位产能能耗、设备效率等核心指标,形成包含能效提升率、投资回报率、环境效益的综合评估报告,构建“评估-实施-验收-反馈”的闭环管理机制,确保改造实效可量化、可追溯。

3. 2运行管理优化路径

运行管理优化通过制度创新与人员能力建设实现能效持续提升,建立覆盖设备全生命周期的能效管理制度,编制《电气设备节能运行操作手册》,明确风机、水泵等设备在不同工况下的最优转速、流量及压力参数,制定标准化启停流程与负载调整策略。实施分级能效考核机制,将设备单位产量能耗、峰谷电价利用率等指标纳入运维部门绩效考核体系,设立节能专项奖励基金,对提出有效节能方案或实现超额节能目标的团队给予物质激励^[3]。构建“状态监测+预防性维护”双轨体系,通过振动分析、红外测温等技术手段实时监测设备健康状态,制定基于设备劣化趋势的预防性维护计划,定期开展变压器油色谱分析、电机绝缘电阻测试等专项检测,及时消除设备隐患。开展“理论+实

操”复合型节能培训,通过仿真系统模拟变频器参数设置、智能控制器调试等操作场景,提升运维人员根据生产需求动态调整设备运行状态的能力,推动节能操作从经验驱动向数据驱动转变。

3.3 智能电网融合路径

智能电网融合通过数字技术赋能实现能效管理的主动优化,构建电厂智能能效管理平台,集成设备运行数据、电网调度指令、气象信息等多元异构数据,运用机器学习算法建立动态能效优化模型,实现设备运行参数的实时自适应调整。基于AI的负荷预测系统可分析历史用电数据与电网负荷曲线,智能生成发电机组出力计划与辅机设备启停策略,在保障供电安全的前提下降低厂用电率。通过参与电网需求响应机制,电厂可在用电高峰时段自动降低非核心设备功率,在低谷时段利用储能装置存储电能,既缓解电网压力又获取峰谷电价差收益。部署数字孪生技术构建电气设备虚拟镜像,通过仿真模拟不同运行工况下的能效表现,提前识别设备改造需求与运行优化空间。例如,模拟变压器负载率变化对损耗的影响,为容量升级提供数据支撑;模拟照明系统智能控制策略对节能效果的影响,优化传感器布点方案。智能电网融合使电厂能效管理从被动响应转向主动预测,显著提升能源利用效率。

4 电厂电气设备能效评估与持续优化

4.1 评估指标体系

构建覆盖设备、系统与整体三个层级的立体化能效评估指标体系,是实现精准评价与持续优化的基础。设备层聚焦单台设备能效表现,设置变压器负载损耗率、电机效率、LED灯具光效等核心指标,通过对比设备实测数据与国家标准或行业标杆值,量化单台设备节能效果。系统层强调设备间协同效能,选取输电系统线损率、辅机系统综合能效比、无功功率补偿率等指标,评估系统运行优化水平,例如通过分析辅机系统输入功率与输出有效功的比值,判断变频改造对系统能效的提升作用。整体层以电厂综合能效为核心,设置发电煤耗、综合厂用电率、单位发电量碳排放量等战略指标,直接关联电厂节能降碳目标。指标选取遵循科学性(数据可获取、计算方法规范)、可操作性(指标量化、评价标准明确)原则,形成“设备层反映技术细节、系统层体现运行效率、整体层关联战略目标”的递进式评估框架,为全面诊断能效短板、精准定位改造方向提供数据支撑。

4.2 评估方法

采用定量与定性结合、动态与静态互补的复合评估方法,确保评估结果全面精准。定量评估以数据驱动为核心,通过智能监测系统实时采集设备运行参数,运用统计分析计算设备效率

提升率、能耗降低量等量化结果,例如通过对比改造前后变压器空载损耗数据,计算节能率;采用层次分析法(AHP)确定各指标权重,结合模糊综合评价法对多维度指标进行加权评分,得出能效等级(如优秀、良好、合格、待改进)。定性评估通过专家评审与现场核查,分析设备运行稳定性、操作便捷性、维护成本等非量化因素,判断节能改造的实用性与可持续性,例如评估变频器改造后对设备寿命的影响^[4]。动态评估建立指标变化趋势模型,跟踪月度/年度能效数据,分析改造效果的长效性;静态评估对比改造前后某一时点的指标数据,明确短期节能成效。两种模式结合形成“短期见效与长期跟踪、数据量化与经验判断”的立体化评估体系,为能效优化提供科学依据。

4.3 持续优化机制

建立“评估-改进-迭代”的持续优化机制,保障能效水平稳步提升。基于评估结果形成问题清单,针对能效未达标的设备与环节,分析原因并制定改进方案,如对低效运行的电机重新调试参数,对能耗超标的系统补充节能技术。建立技术迭代储备机制,跟踪国内外超导变压器、永磁电机等先进技术发展动态,结合电厂实际需求适时引入新技术,避免改造技术落后。构建常态化监测与反馈体系,通过智能平台实时跟踪能效指标变化,每月形成能效分析报告,为优化决策提供依据。加强行业交流合作,与其他电厂、设备厂商共享节能经验,参与行业能效标准制定,推动电厂能效管理水平持续升级。

5 结束语

电厂电气设备节能改造是电力行业落实“双碳”目标、实现高质量发展的必然选择,不仅能降低能源消耗与碳排放,更能显著提升电厂经济效益与市场竞争力。未来随着智能技术与节能装备的不断发展,电厂电气设备能效管理将向更精准、更智能的方向迈进。电厂需立足自身实际,积极推进技术改造与管理创新,以能效提升驱动绿色转型,为构建清洁低碳的能源体系贡献核心力量。

[参考文献]

- [1]张仕其.电厂电气设备检修方法分析[J].模具制造,2023,23(5):238-240.
- [2]曹洋.电力设备运行优化与能效提升策略研究[J].科技资讯,2024,22(07):72-74.
- [3]劳大实,孔凡迪.新建项目设计中电气设备选型及能效分析[J].建筑电气,2025,44(03):3-6.
- [4]张良虎.电厂电气设备运行安全管理与故障处理分析[J].电力设备管理,2024(3):211-213.