

火电厂电气节能设计

吴家旭

江西赣能股份有限公司丰城发电厂 江西 宜春 336000

摘要: 本文围绕火电厂电气节能设计展开研究,结合火电厂电气系统能耗现状,分析核心设备与供电系统的能耗痛点及影响因素,基于节能理论与相关规范,从设备选型、系统优化、运行调控三方面提出针对性设计方案,涵盖发电机、变压器、辅机等核心设备及供电线路、无功补偿等关键环节。通过理论计算、仿真模拟及现场案例验证,证明方案可有效降低厂用电率,减少能耗浪费,兼顾节能效益与经济性,为火电厂电气节能改造与新建设计提供实用参考,助力火电厂绿色低碳发展。

关键词: 火电厂; 电气节能; 设计

引言: 随着能源结构转型推进与“双碳”目标落地,火电厂作为能源消耗大户,电气系统节能成为实现节能降耗、提升效益的关键抓手。当前部分火电厂存在设备老化、系统设计冗余、运行调控粗放等问题,导致能耗偏高、资源浪费,既增加运营成本,也不符合绿色发展要求。基于此,本文立足火电厂电气系统组成与工作原理,结合行业标准与实际案例,深入探讨电气节能设计路径,旨在优化能耗结构、提升电能利用效率,为火电厂实现节能增效、绿色转型提供技术支撑与实践指导。

1 火电厂电气系统能耗现状及节能理论基础

1.1 火电厂电气系统组成及工作原理

(1) 核心电气系统构成: 主要包括发电机、变压器、高低压配电系统、辅机电气系统四大核心部分。发电机负责将机械能转化为电能,是发电核心; 变压器承担电能升压输送、降压供厂用的功能; 高低压配电系统实现电能的分配与控制; 辅机电气系统为锅炉、汽轮机等主设备提供配套动力,是能耗重点环节^[1]。(2) 各系统工作原理及能量转换过程: 发电机通过汽轮机驱动切割磁感线产生电能,完成机械能向电能的转换; 变压器利用电磁感应原理实现电能的变压传输,存在少量铁损和铜损。辅机系统中,风机(送、引、一次风机)为锅炉燃烧提供空气,水泵(给水泵、循环水泵)保障工质循环,其能耗随负荷波动显著,低负荷时效率下降、能耗占比升高,是电气系统能耗管控的关键。

1.2 火电厂电气系统能耗现状分析

(1) 能耗分布特征: 行业厂用电率基准水平为4%-8%,超超临界机组可低至3%-4%,老旧机组可达8%以上。辅机系统能耗占厂用电的60%以上,其中三大风机占辅机能耗的40%,循环水系统因水泵、冷却塔风机持续运

行,能耗占比达25%,是能耗重点领域。(2) 当前能耗存在的主要问题: 设备老化导致铁损、铜损超标; 系统设计冗余,部分辅机长期满负荷运行却未匹配实际需求; 运行调整不合理,如低负荷时未及时减台运行辅机。机组负荷率低于70%时,煤耗和厂用电率陡升,进一步加剧能耗浪费。(3) 能耗影响因素: 负荷波动导致辅机频繁启停、效率下降; 设备性能衰减降低电能转换效率; 运行方式粗放未实现精细化调控; 煤质差异影响燃烧效率,间接增加辅机能耗负荷,共同导致能耗升高。

1.3 电气节能核心理论与技术依据

(1) 节能基本原理: 基于能量守恒定律,通过控制电能传输、转换过程中的损耗,减少无效能耗,核心是提升电能转换和利用效率,实现“降损耗、提效率”的节能目标。(2) 关键节能技术基础: 变频调速技术通过调节电机转速匹配负荷需求,降低辅机空载损耗; 高效设备选型可减少设备固有损耗; 余热回收技术回收发电过程中的余热,实现能量梯级利用,降低能源浪费。(3) 相关标准与规范: 遵循《燃煤发电机组单位产品能耗限额》(GB21258—2024)、《火力发电厂节能设计规范》(GB/T51106—2015)等,明确能效评价指标和节能设计要求,同时契合环保排放相关规定,推动节能与环保协同推进^[2]。

2 火电厂主要电气设备节能设计

2.1 发电机节能设计

(1) 发电机选型优化: 优先选用高效汽轮发电机,结合超超临界发电技术的参数需求,实现机组参数与发电机性能的精准匹配。重点选用额定容量适配机组装机规模、效率达99%以上的高效机型,充分发挥超超临界机组高参数、高效率的优势,减少发电过程中的能量损耗,同时兼顾机组调峰需求,确保高、低负荷工况下均能保

持较高节能效益。(2) 发电机损耗控制: 针对定子、转子损耗进行优化设计, 采用低损耗硅钢片制作定子铁芯, 优化定子绕组布线方式, 减少定子铜损和铁损; 改进转子绕组结构, 降低转子涡流损耗。对冷却系统进行节能改造, 优先采用水氢氢冷却方式, 替代传统冷却系统, 提升冷却效率, 降低冷却系统自身能耗, 同时有效控制发电机运行温度, 进一步减少损耗。(3) 发电机运行参数优化: 制定适配不同负荷工况的运行调整策略, 避免发电机长期处于低负荷低效运行状态。在高峰负荷时段, 维持发电机额定参数稳定运行, 充分发挥其高效特性; 在低谷负荷时段, 优化励磁系统参数, 调整转子电流, 降低空载损耗, 同时合理协调机组负荷分配, 确保发电机运行在最优效率区间, 提升整体节能效果。

2.2 变压器节能设计

(1) 节能型变压器选型: 优先选用非晶合金变压器等高效节能产品, 其空载损耗较传统硅钢片变压器降低70%以上, 负载损耗也显著下降。结合火电厂厂用电负荷需求, 进行变压器容量精准匹配设计, 避免容量过大导致的空载损耗浪费, 同时预留合理冗余, 防止负荷过载导致损耗激增, 实现容量与负荷的动态适配。(2) 变压器运行损耗控制: 采取针对性措施降低空载损耗与负载损耗, 优化铁芯结构, 采用优质铁芯材料, 减少铁芯磁滞损耗和涡流损耗; 选用截面更大的铜导线, 降低绕组电阻, 减少负载损耗。严格控制变压器变损率在0.2%~0.3%的合理范围, 定期对变压器进行维护检修, 及时处理铁芯松动、绕组老化等问题, 避免损耗异常升高^[1]。(3) 变压器布置与接线优化: 合理规划变压器在厂区内的布置位置, 缩短变压器与发电机、配电装置之间的连接线路, 减少线路传输损耗。优化接线方式, 采用紧凑型接线设计, 减少导线长度和接触电阻, 降低电能传输过程中的损耗; 同时合理配置变压器台数, 实现负荷均衡分配, 避免单台变压器长期满负荷或低负荷运行, 提升整体运行效率。

2.3 辅机电气设备节能设计

(1) 风机、水泵节能设计: 全面推进风机、水泵的变频或永磁调速改造, 通过调节电机转速精准匹配负荷需求, 避免传统定速运行导致的能耗浪费, 低负荷工况下可降低能耗20%~30%。优先选用效率 $\geq 88\%$ 的高效泵型与风机, 优化叶轮、叶片结构, 减少流体阻力, 提升设备运行效率, 同时定期对设备进行清洗、维护, 保障设备处于最佳运行状态。(2) 制粉系统节能设计: 选用高效中速磨煤机, 其磨煤效率较传统球磨机提升15%以上, 且能耗显著降低。应用动态分离器替代传统静态分

离器, 精准控制煤粉细度, 减少磨煤过程中的能量损耗; 采用液压变加载系统, 根据煤质硬度和磨煤需求动态调整加载压力, 避免过度加载导致的能耗增加, 实现制粉系统的节能高效运行。(3) 环保系统辅机节能: 针对脱硫、脱硝系统辅机进行变频改造, 优化风机、循环泵的运行参数, 根据环保排放要求动态调整设备负荷, 避免设备长期满负荷运行造成的能耗浪费。制定科学的运行优化策略, 合理安排辅机启停时间, 减少无效运行时长, 同时加强设备维护, 降低设备故障损耗, 实现环保达标与节能降耗的协同推进^[4]。

2.4 照明及辅助电气设备节能设计

(1) 节能照明系统设计: 全面推广LED节能灯具, 替代传统白炽灯、荧光灯, 其发光效率提升50%以上, 使用寿命延长3~5倍, 能耗大幅降低。安装智能感应控制装置, 实现人来灯亮、人走灯灭, 避免长明灯现象; 合理利用自然光, 优化厂房采光设计, 减少人工照明使用时长, 进一步降低照明系统能耗。(2) 其他辅助设备节能: 优化办公及附属系统用电管理, 选用节能型办公设备, 设置用电定时关闭功能, 避免设备待机能耗。对厂区附属设施的电气设备进行全面排查, 淘汰高耗能老旧设备, 更换为高效节能产品; 加强用电巡检, 及时整改跑冒滴漏等用电浪费问题, 减少非生产性能耗, 助力火电厂整体节能目标实现。

3 火电厂供配电系统节能优化设计

3.1 供配电系统接线方式优化

(1) 主接线系统节能设计: 结合火电厂装机规模与运行可靠性要求, 简化主接线方式, 减少断路器、隔离开关等中间电气设备的数量, 缩短电能传输的中间环节, 从源头降低设备接触损耗和线路传输损耗。优先采用单母线分段、双母线接线等简洁可靠的接线形式, 替代复杂冗余的接线方案, 在保障供电可靠性的前提下, 最大限度减少电能在传输过程中的无效损耗, 提升主接线系统的节能效率。(2) 配电网结构优化: 根据火电厂各生产区域的用电负荷分布特点, 合理划分配电区域, 实现负荷的就近供电, 缩短供电距离, 降低线路电阻损耗。优化高、低压配电网的层级结构, 减少配电级数, 避免多级降压带来的能耗损失; 对负荷集中的区域, 设置专用配电装置, 避免远距离输电导致的电能损耗, 同时均衡各配电区域的负荷分配, 防止单区域负荷过载引发的损耗激增^[5]。(3) 备用电源系统节能: 优化备用电源的配置方案, 结合电厂实际运行负荷和供电可靠性需求, 合理确定备用电源的容量和数量, 避免备用电源配置过量导致的无效能耗。采用智能控制技术, 实现备用电源与主

供电源的高效切换, 仅在主供电源故障时启动备用电源, 减少备用电源长期空载运行带来的能耗浪费; 定期对备用电源进行维护调试, 确保其处于良好备用状态, 同时优化备用电源的运行参数, 降低自身能耗。

3.2 电压等级与无功功率优化设计

(1) 电压等级合理选择: 结合火电厂的装机容量、输电距离和负荷特性, 选择适配的电压等级, 实现电压等级与电厂规模的精准匹配。对于大型火电厂, 优先采用高压输电等级, 减少输电过程中的电流, 根据功率损耗公式, 线路损耗与电流平方成正比, 从而显著降低输电线路损耗; 对于厂内配电系统, 合理划分中、低压等级, 避免电压等级过高或过低导致的能耗损失, 实现电能传输与分配的高效节能。(2) 无功功率补偿设计: 合理选用并联电容器、静止无功发生器 (SVG) 等无功功率补偿装置, 结合电厂用电负荷的无功需求, 优化补偿装置的选型与布置, 确保功率因数提升至 ≥ 0.95 的标准要求。在负荷集中区域和无功损耗较大的环节, 集中布置补偿装置, 实现无功功率的就地补偿, 减少无功功率远距离传输带来的线路损耗; 采用智能补偿控制系统, 根据负荷变化动态调整补偿容量, 避免过补偿或欠补偿导致的能耗浪费, 提升供配电系统的功率因数和节能效益。(3) 电压质量控制: 建立完善的电压质量监测体系, 实时监测供配电系统的电压水平, 采取针对性措施稳定电压, 减少电压波动带来的能耗损失。优化变压器分接头调整策略, 根据负荷变化及时调整电压档位, 确保电压稳定在额定范围之内; 安装电压稳定装置, 抑制电压波动和闪变, 避免因电压过高导致设备损耗增加, 因电压过低导致电机效率下降、能耗升高, 保障供配电系统在稳定电压下高效运行。

3.3 配电线路节能设计

(1) 导线选型优化: 优先选用低电阻、大截面的节能型导线, 如铝合金绞线、钢芯铝绞线等, 相比传统导线, 其电阻值显著降低, 可有效减少线路电阻损耗。结合线路的输电容量和距离, 精准计算导线截面, 避免截面过小导致电阻过大、损耗增加, 同时避免截面过大造成的材料浪费和投资增加, 实现导线选型的经济性与节能性兼顾, 最大限度降低线路传输过程中的电能损耗。(2) 线路敷设优化: 合理规划配电线路的敷设路径, 尽量选择直线敷设, 缩短线路长度, 减少导线用量和传输损耗; 避开地形复杂、环境恶劣的区域, 降低线路敷设难度和后期维护成本, 同时减少线路因环境因素导致的损耗增加。对于厂内配电线路, 优先采用电缆敷设方式, 替代架空线路, 减少线路裸露带来的损耗, 同时优化电缆敷

设间距和路径, 降低电缆之间的相互干扰和损耗, 提升线路敷设的节能效果。(3) 线路维护与损耗监测: 建立定期线路维护机制, 定期对配电线路进行巡检、清扫和检修, 及时处理导线松动、接头氧化、线路老化等问题, 减少接触电阻和线路损耗; 对线路绝缘子进行定期检测和更换, 避免绝缘子漏电导致的能耗浪费。安装线路损耗实时监测装置, 实时采集线路的电流、电压等参数, 计算线路损耗, 及时发现损耗异常区域并采取调整措施, 实现线路损耗的精准管控, 确保配电线路始终处于低损耗运行状态。

4 火电厂电气系统运行调控节能设计

4.1 运行工况优化调控

(1) 全负荷区间协同优化: 针对火电厂高、低负荷不同工况特点, 制定差异化调控策略, 实现全负荷区间节能高效运行。高负荷工况下, 维持主机、辅机设备在额定参数附近稳定运行, 充分发挥设备高效特性, 优化机组燃烧与发电协同, 减少能量损耗; 低负荷工况下, 避免设备长期低效运行, 及时调整辅机运行台数, 优化发电机励磁参数, 降低空载损耗, 同时协调各机组负荷分配, 避免单台机组负荷过低导致的能耗激增, 实现全负荷区间能耗最优。(2) 机组启停阶段节能调控: 优化机组启停流程, 精简不必要的操作环节, 缩短启停时间, 减少启停过程中的能耗浪费。启动阶段, 合理规划辅机启停顺序, 优先启动高效辅机, 避免多台辅机同时启动造成的电网冲击和能耗过载; 采用滑参数启动方式, 降低启动过程中的热损耗和电损耗。停机阶段, 优化停机后的设备保温与余热利用, 及时关闭不必要的辅机设备, 减少待机能耗, 同时做好设备停机后的维护准备, 为下次启动节能奠定基础。(3) 负荷调度优化: 结合电网负荷需求和电厂机组运行特性, 制定科学的负荷调度方案, 合理分配各机组负荷, 提升电厂整体运行效率。建立负荷预测机制, 提前预判电网负荷变化, 动态调整机组负荷分配, 避免机组频繁启停和负荷大幅波动; 优先安排高效机组承担基础负荷, 低效机组承担调峰负荷, 充分发挥高效机组的节能优势, 同时兼顾电网调峰需求, 实现节能与电网调度的协同推进。

4.2 智能控制系统节能设计

(1) 智能监测系统搭建: 搭建覆盖全电气系统的智能监测平台, 实时采集发电机、变压器、辅机等设备的能耗数据、运行参数, 实现数据的实时传输与汇总分析。通过监测系统精准识别设备运行异常和损耗异常, 实现故障预警与损耗溯源, 及时发现设备老化、接触不良等导致的能耗增加问题, 为节能调控提供数据支撑; 同时

建立能耗数据库, 积累运行数据, 为后续节能优化提供参考。(2) 自动化调控系统设计: 推进DCS系统集成优化, 实现主机与辅机设备的联动控制, 提升运行调控的自动化水平。将发电机、变压器、辅机等设备的控制模块接入DCS系统, 实现运行参数的自动调节、设备的自动启停, 减少人工操作误差, 确保设备始终运行在最优参数区间; 优化控制逻辑, 实现辅机负荷与主机负荷的精准匹配, 避免辅机过载或低效运行, 降低能耗损耗^[6]。(3) 大数据与AI技术应用: 引入大数据分析AI智能算法, 基于历史运行数据和实时监测数据, 对电气系统运行参数进行深度分析, 优化运行调控策略。通过AI算法精准预测负荷变化、设备损耗趋势, 自动调整运行参数, 实现精准节能; 利用大数据分析识别节能潜力点, 针对不同运行工况制定最优调控方案, 比如根据煤质变化、负荷波动自动调整辅机转速、发电机励磁参数, 进一步提升节能效益。

4.3 运维管理节能优化

(1) 设备定期维护与检修: 建立完善的设备定期维护与检修机制, 按照设备运行周期和损耗规律, 对发电机、变压器、辅机等核心电气设备进行全面检修维护。及时更换老化部件、处理设备故障, 减少设备故障导致的能耗增加, 同时优化维护工艺, 降低维护过程中的能耗浪费; 定期对设备进行清洁、润滑、校准, 提升设备运行性能, 延长设备使用寿命, 从长期实现节能降耗目标。(2) 节能管理制度建设: 建立健全电气系统节能管理制度, 明确各部门、各岗位的节能责任, 将节能指标分解到具体岗位和个人, 形成“人人有责、层层落实”的节能管理体系。建立完善的能耗统计与考核机制, 实时统计各设备、各环节的能耗数据, 对比分析节能目标完成情况, 对节能成效显著的岗位和个人给予奖励, 对能耗超标的进行考核整改, 倒逼节能措施落地执行。(3) 人员专业培训: 加强运维人员的专业培训, 提升其节能操作技能和节能技术应用能力。定期开展节能技术、智能控制系统操作、设备维护保养等相关培训, 普及节能知识和操作规范, 让运维人员熟练掌握设备节能运行技巧、智能监测系统的操作方法, 能够及时发现并处理能耗异常问题; 培养运维人员的节能意识, 引导其在日常工作中践行节能操作, 主动参与节能优化, 提升整体运维节能水平。

5 节能设计方案验证与案例分析

5.1 节能设计方案验证方法

(1) 理论计算验证: 采用定量核算方法, 明确能耗指标与节能效率的计算逻辑, 确保验证结果精准可靠。

核心核算指标包括厂用电率、设备损耗率、节电量等, 结合前文设计的设备参数、系统优化措施, 通过能耗平衡公式、损耗计算模型, 核算优化后各电气系统的能耗水平, 对比优化前后的能耗差值, 计算节能效率, 验证方案的理论节能潜力, 为后续仿真与现场测试提供基础依据。(2) 仿真模拟验证: 借助MATLAB、PSCAD等专业电气仿真软件, 搭建火电厂电气系统仿真模型, 还原发电机、变压器、辅机及供配电系统的运行场景。将节能设计方案中的设备改造参数、系统优化措施、运行调控策略录入模型, 模拟不同负荷工况下的系统运行状态, 分析节能效果。通过仿真数据对比, 验证方案在各类工况下的适用性, 排查设计漏洞, 优化调整设计参数, 确保方案落地的可行性。(3) 现场测试验证: 制定科学的现场测试方案, 明确测试对象、测试点位及测试周期, 重点针对核心电气设备、供配电系统及运行参数开展测试。布置专用数据采集设备, 实时采集改造后设备的能耗数据、运行参数, 记录不同负荷时段的测试结果; 对采集的数据进行整理、筛选与分析, 剔除异常数据, 对比理论计算、仿真模拟结果, 验证节能设计方案的实际落地效果, 确保方案达到预期节能目标。

5.2 火电厂电气节能设计案例分析

(1) 案例概况: 选取某百万千瓦燃煤机组(超超临界参数)作为案例, 该电厂装机容量1000MW, 投运8年, 原有电气系统存在明显能耗问题: 辅机(三大风机、给水泵)定速运行, 低负荷工况能耗浪费严重; 变压器为传统硅钢片机型, 变损率达0.45%, 超出合理范围; 供配电线路布局不合理, 线路损耗偏高, 整体厂用电率维持在6.8%左右, 高于同类型机组基准水平, 节能改造需求迫切。(2) 节能设计方案实施: 结合前文设计方法, 实施全方位节能改造。设备改造方面, 将辅机全部改为变频调速控制, 选用效率 $\geq 88\%$ 的高效风机、水泵; 更换3台非晶合金变压器, 控制变损率在0.25%以内; 选用低电阻大截面导线, 优化线路敷设路径。系统优化方面, 简化主接线方式, 划分配电区域实现就近供电; 安装SVG无功补偿装置, 将功率因数提升至0.96以上。运行调控方面, 搭建智能监测与DCS自动化控制系统, 优化全负荷区间调控策略, 建立完善的运维管理制度。(3) 节能效果分析: 改造后经现场测试, 该机组厂用电率降至5.2%, 较改造前下降1.6个百分点; 年发电量按50亿千瓦时计算, 年节电量约8000万千瓦时, 折合标准煤约2.56万吨, 年节约电费480万元。本次改造总投资4200万元, 结合年节约成本核算, 投资回收期约8.75年, 改造效果

显著,既降低了能耗,又提升了机组运行稳定性,达到预期节能目标。

5.3 案例经验总结与推广价值

(1) 案例实施中的关键问题与解决措施:实施过程中主要面临两大问题,一是辅机变频改造后与原有DCS系统联动不畅,导致调控滞后;二是线路改造过程中需兼顾机组正常运行,施工难度大。针对前者,优化DCS系统控制逻辑,完成变频装置与主机系统的集成调试,实现联动调控;针对后者,制定分时段施工方案,避开机组高峰负荷时段,采用临时供电措施,确保施工与生产两不误,顺利完成改造。(2) 该节能设计方案的推广适用性:本方案适用于百万千瓦级超超临界、超临界燃煤机组,同时可针对不同类型火电厂进行针对性调整。对于老旧机组,可优先实施辅机变频改造、变压器更换等投资少、见效快的措施,逐步推进系统优化与智能调控建设;对于新建机组,可在设计阶段全面融入本方案的节能理念,优化设备选型、系统布局与控制设计,从源头降低能耗。方案兼顾节能效果与经济性,具有广泛的推广价值,可助力火电厂实现节能降耗、绿色低碳发展。

结束语

火电厂电气节能设计是一项系统性工程,需贯穿设

备选型、系统布局、运行调控及运维管理全流程,核心在于实现“降损耗、提效率”的节能目标。本文提出的设计方案,通过优化核心设备性能、完善供配电系统、强化智能调控,可有效解决火电厂电气能耗痛点,经案例验证具备良好的实用性与经济性。未来需结合新能源融合趋势,持续优化节能技术与设计理念,推动火电厂电气系统向更高效、更节能、更智能方向发展,助力能源行业绿色低碳转型与可持续发展。

参考文献

- [1]陈进,王士学.1000MW火力发电厂汽轮机组节能降耗的策略分析[J].电力设备管理,2022,(4):189-191.
- [2]陈干勇.火力发电厂电气节能降耗的问题与技术措施分析[J].工程技术与管理,2023,7(12):91-93.
- [3]孙一源.火电厂电气节能降耗问题与技术措施实践分析[J].电力设备管理,2024,(7):66-68.
- [4]王会宝.火电厂电气运行优化与节能降耗的技术探索[J].工程与建设,2024,38(4):938-940.
- [5]李晓明,张伟强.火电厂电气节能技术综述与应用进展[J].电力工程技术,2023,42(3):15-19.
- [6]赵明华.智能电网技术在火电厂电气节能中的应用研究[J].电力系统与自动化,2023,45(4):90-94.