

低负荷工况下火电厂主厂房电气设备经济运行策略优化研究

石 骏

华润电力（湖北）销售有限公司 湖北 武汉 430063

摘 要：针对火电厂深度调峰背景下低负荷工况主厂房电气设备能耗偏高问题，本文分析了给水泵、引风机、循环水泵等关键设备低负荷运行特性，揭示了“大马拉小车”、空载损耗激增、无功失衡等核心能耗痛点。构建以综合能耗最小化为目标的优化模型，采用改进粒子群算法求解，并提出四级负荷分级协同优化策略，覆盖30%~100%全负荷区间，通过变频调节、台数优化、冗余停运等手段，实现主厂房电气系统全工况经济运行，有效降低厂用电率。

关键词：低负荷工况；火电厂；主厂房；电气设备

引言：随着新能源大规模并网，火电机组深度调峰已成常态，低负荷运行时间占比显著增加。主厂房电气系统作为机组核心配套体系，在低负荷工况下面临主力辅机偏离高效区间、输配电设备空载损耗攀升、无功功率失衡等突出问题，厂用电率大幅上升，严重制约机组经济运行水平。本文系统分析关键电气设备低负荷运行特性，构建多目标优化模型，提出基于负荷分级的四级协同优化策略，为火电厂低负荷工况下主厂房电气设备经济运行提供理论依据与工程参考。

1 低负荷工况下主厂房电气系统能耗特征分析

1.1 火电厂主厂房电气系统组成与负荷分布

火电厂主厂房电气系统是机组发电运行的核心配套体系，整体由高压配电系统、低压配电系统、厂用变压器、各类辅机电气设备及无功补偿装置等模块构成，各模块协同完成电能输送、分配与消耗全过程。系统负荷可划分为核心生产负荷与辅助保障负荷两大类，核心负荷包含给水泵、引风机、循环水泵等主力辅机设备，是电能消耗的主体；辅助保障负荷涵盖输煤、照明、控制保护等配套设备，为机组稳定运行提供基础支撑^[1]。在额定负荷工况下，各设备负荷匹配度高，电能传输与利用效率处于最优区间，负荷分布均匀且可控性强。但机组进入低负荷运行状态后，核心辅机负荷大幅下降，辅助负荷基本保持恒定，造成系统负荷分布失衡、空载损耗占比激增，成为低负荷能耗偏高的基础诱因。

1.2 低负荷工况下的核心能耗问题

火电厂机组深度调峰、长期低负荷运行过程中，主厂房电气系统暴露出诸多能耗痛点问题，严重制约机组经济运行水平。首先是主力辅机设备运行偏离高效区间，设备额定参数与低负荷工况不匹配，出现“大马拉小车”现

象，机械损耗与电气损耗大幅增加，运行效率显著降低。其次是变压器、配电线路等输配电设备空载、轻载损耗占比持续攀升，固定能耗无法随机组负荷降低同步削减，系统综合厂用电率大幅上升。同时，低负荷工况下辅机变频调节匹配度不足，部分设备依靠节流、挡板调节工况，产生大量无效能耗。

2 主厂房关键电气设备低负荷运行特性分析

2.1 给水泵系统运行特性

给水泵系统作为火电厂水汽循环核心辅机，其运行状态直接影响主厂房电气能耗水平，低负荷工况下运行特性劣化特征显著。机组高负荷运行时，给水泵出力与锅炉给水需求精准匹配，泵组转速、流量处于高效运行区间，能耗利用率极高。当机组负荷逐步降低，锅炉给水流量需求持续减少，传统定速给水泵需通过节流方式调节流量，造成管路节流损耗大幅增加，泵组有效做功占比大幅降低。配备变频装置的给水泵虽可通过降速调节适配低负荷需求，但在30%~40%极低负荷下，泵组存在转速下限阈值，无法持续降速调节，仍会产生过剩能耗。同时低负荷工况下给水泵水力效率下降，机械摩擦、电机铜损铁损占比提升，整体运行效率大幅衰减，成为低负荷工况下主要能耗损耗设备之一。

2.2 引风机系统运行特性

引风机系统承担炉膛烟气排出、维持炉膛负压稳定的关键作用，低负荷工况下的运行能耗浪费问题较为典型。机组额定负荷运行时，引风机风量、风压与炉膛烟气流高度匹配，风机运行工况点处于高效区，能耗投入与产出成正比。机组进入低负荷工况后，炉膛燃烧煤量减少，烟气生成量大幅下降，引风机所需工作参数同步降低。常规挡板调节模式下，风机维持高转速运行，依

靠挡板节流控制风量,大量电能转化为节流热能损耗,风机运行效率急剧下降。即便采用变频调速技术,低负荷区间风机仍存在运行缺陷,风量调节精度不足,风机易出现喘振、运行不稳定等问题,为保障安全需预留冗余出力,产生无效能耗。且低负荷下风机电机轻载运行,功率因数降低,电气损耗进一步增加。

2.3 循环水泵系统运行特性

循环水泵系统负责机组冷却水循环供给,是主厂房能耗占比较大的辅机设备,低负荷运行特性具备明显的固定能耗特征。高负荷工况下,机组凝汽器冷却需求大,循环水泵满负荷或高负荷运行,冷却效率与能耗匹配度良好,无明显能耗浪费。当机组负荷降低,凝汽器排汽量减少,冷却水量需求同步下降,但循环水泵多为定台数运行模式,低负荷下无法及时停运冗余泵体,单泵运行流量远超实际需求,造成水资源与电能双重浪费。变频调节的循环水泵在极低负荷下受水泵水力特性限制,调速节能效果大幅弱化,电机轻载运行损耗升高。同时低负荷工况下循环水系统管路阻力降低,水泵运行工况点偏离高效区间,水力效率衰减,整体能耗利用率持续走低。

2.4 输煤系统与变压器无功系统运行特性

输煤系统与变压器无功系统的低负荷运行特性,是主厂房整体能耗偏高的重要辅助因素。输煤系统为间歇性运行设备,机组高负荷时输煤频次高、负荷匹配合理,单位输煤能耗稳定;低负荷工况下燃煤消耗量减少,输煤系统启停频次降低、空载待机时间大幅延长,皮带、电机等设备长期空载运行,产生大量固定无效能耗,单位燃煤输送能耗显著上升^[2]。变压器无功系统方面,机组低负荷运行时,厂用变压器长期处于轻载、空载状态,铁芯损耗基本保持恒定,负载损耗虽有所下降,但整体损耗占比大幅提升。同时,各类辅机低负荷轻载运行导致系统无功功率需求失衡,无功损耗激增,功率因数偏低,不仅增加电能损耗,还会降低电网供电质量。

3 低负荷经济运行优化模型构建

3.1 优化目标函数

本次构建的低负荷经济运行优化模型,以火电厂主厂房电气系统综合能耗最小化为核心优化目标,全面覆盖各类关键设备能耗损耗。目标函数整合了给水泵、引风机、循环水泵等主力辅机的可变能耗,变压器、输配电线路的固定损耗,以及系统无功损耗等全部能耗项,精准量化不同负荷工况下系统总能耗水平。模型摒弃单一设备能耗优化的片面性,统筹兼顾各设备运行耦合关系,消除局部优化导致的整体能耗失衡问题。通过量化

各设备能耗与机组负荷、运行参数的关联关系,建立多维度能耗计算方程,精准反映低负荷工况下能耗变化规律,为后续参数优化、策略求解提供核心目标依据,确保优化结果可实现机组全工况低能耗经济运行。

3.2 约束条件

为保障优化模型求解结果贴合机组实际运行工况、兼顾安全性与稳定性,模型设置多维度严苛约束条件。首先设置机组负荷约束,限定机组负荷率区间为30%~100%,匹配机组常规运行及深度调峰工况范围。其次设置设备运行安全约束,包含辅机转速、风量、水压、温度等参数上下限,规避设备超工况、喘振、过载等安全风险。同时增设系统稳定约束,限定母线电压、功率因数、无功功率波动范围,保障电气系统稳定运行^[3]。另外,结合设备启停逻辑、变频调节阈值、辅机台数匹配规则设置运行约束,杜绝不合理的设备启停与参数调节。所有约束条件贴合现场运行规范,确保优化方案具备工程实用性与可行性。

3.3 优化变量与求解算法

本次模型选取主厂房关键辅机运行参数与运行方式为核心优化变量,主要包含各辅机变频运行转速、设备运行台数、挡板开度、无功补偿容量等可调参数,变量可全面覆盖低负荷能耗优化的核心调控维度。针对低负荷工况下电气系统能耗非线性、多变量、强耦合的优化特征,选用改进粒子群优化算法完成模型求解。该算法在传统粒子群算法基础上优化迭代权重与收敛机制,可有效规避局部最优解问题,提升复杂工况下的求解精度与迭代速度。通过算法持续迭代优化各变量参数,对比不同参数组合下的系统总能耗,最终筛选出既定约束条件下的最优运行参数组合,为低负荷协同优化策略提供精准数据支撑。

4 基于负荷分级的协同优化策略

4.1 策略总体框架

基于机组不同负荷率的能耗特征与设备运行特性,构建四级负荷分级协同优化总体框架,实现主厂房电气系统全负荷区间精细化节能优化。框架以负荷率为分级依据,结合各负荷区间设备能耗痛点、运行规律及优化潜力,划分四个差异化优化等级,各级策略相互衔接、层层递进,适配机组全工况运行需求。整体框架遵循“精细化调控、梯度优化、安全节能”的核心原则,高负荷侧重精准优化保效率,中低负荷侧重辅机调控降损耗,极低负荷侧重最小能耗稳运行。通过统筹辅机变频调节、台数组合、冗余设备停运、无功优化等多种手段,打破单一优化模式的局限性,形成全覆盖、差异化、可落地

的低负荷节能优化体系,全面降低机组全工况厂用电率。

4.2 一级策略:精细化优化(80%~100%负荷)

针对80%~100%高负荷区间,机组设备整体运行效率较高、能耗浪费相对较少,核心采用精细化参数优化策略实现节能增效。此负荷区间各主力辅机均处于高效运行区间,无需调整设备运行台数与运行模式,重点通过精准调控设备运行参数实现能耗最优。依托优化模型实时计算最优变频转速、挡板开度、给水流量、引风风量等核心参数,修正设备运行偏差,消除细微工况匹配误差。同时优化系统无功补偿容量,精准调节无功功率输出,维持系统功率因数处于最优区间,降低输配电损耗。通过精细化参数校准与动态微调,在保障机组满发、稳发的前提下,挖掘高负荷工况下的隐性节能潜力,实现系统能耗精准管控。

4.3 二级策略:辅机变频与台数优化(60%~80%负荷)

60%~80%中高负荷区间,机组负荷开始回落,辅机运行效率小幅下降,能耗损耗逐步增加,采用辅机变频精准调节与运行台数优化协同策略。该负荷区间无需停运主力辅机,优先通过变频调速替代传统节流调节,根据机组负荷变化动态微调给水泵、引风机、循环水泵的运行转速,适配实时工况需求,大幅降低节流损耗与设备空载损耗。同时结合系统运行负荷,优化辅机运行台数组合,避免单台设备高负荷运行或多台设备轻载运行的不合理工况。同步配套无功优化调控,平衡系统无功功率,降低电气传输损耗,通过变频调节与台数匹配的双重优化,有效遏制能耗上升趋势,保障中高负荷工况下系统高效经济运行。

4.4 三级策略:辅机停运与变频组合(40%~60%负荷)

40%~60%中低负荷区间,机组能耗损耗显著攀升,设备低效运行问题突出,采用辅机停运与变频调节组合优化策略。此负荷区间机组出力大幅降低,单台辅机出力即可满足系统运行需求,可停运冗余运行的辅机设备,彻底消除冗余设备的空载、轻载能耗。保留运行的主力辅机全部投入变频调节模式,根据实时负荷精准下调设备运行转速,匹配机组低负荷工况需求,解决“大马拉小

车”的能耗浪费问题^[4]。同时优化输煤系统运行逻辑,减少空载待机时长,精准匹配上煤频次与机组燃煤需求。配合变压器无功系统优化调节,降低轻载输配电损耗,通过停运冗余设备、变频精准调控的组合方式,大幅削减系统无效能耗。

4.5 四级策略:最小能耗运行(30%~40%负荷)

30%~40%极低负荷区间为机组深度调峰核心工况,也是能耗浪费最严重的区间,实施最小能耗运行优化策略。该策略以“最大限度削减固定无效能耗、保障机组安全兜底运行”为核心目标,全面精简辅机运行配置,仅保留机组运行必需的核心辅机设备,停运所有可冗余辅机与辅助设备,最大程度减少空载损耗。对运行中的核心辅机,将变频转速调控至安全运行下限,结合工况需求优化最小出力参数,杜绝过剩能耗输出。在满足机组炉膛稳定、水汽循环、电气安全的前提下,最大化压缩无效能耗,实现深度低负荷工况下系统最小能耗经济运行。

结束语

本文系统研究了火电厂主厂房电气设备低负荷经济运行优化问题,明确了各关键设备低负荷能耗特征,构建了综合能耗最小化优化模型,并提出覆盖全负荷区间的四级协同优化策略。研究表明,通过负荷分级精细化调控,可有效解决“大马拉小车”、空载损耗及无功失衡等问题,显著降低厂用电率。后续可结合实际运行数据开展策略验证,并探索智能控制技术与优化模型的深度融合,进一步提升火电厂深度调峰工况下的经济运行水平。

参考文献

- [1]苗毅.基于实测地震动的某土耳其火电厂主厂房抗震分析[J].武汉大学学报(工学版),2023,56(S1):76-81.
- [2]母雪东.火电厂电气设备状态检修技术应用研究[J].科技资讯,2025,23(3):87-89.
- [3]周雷.基于PDCA循环理论的火电厂电气设备故障诊断系统设计[J].电气技术与经济,2025(1):98-100.
- [4]王耀龙.火电厂电气设备运行安全管理技术研究[J].电力设备管理,2025(10):255-257.