钢铁企业供配电系统降损优化措施

袁斌旺
邯郸璞祥环保科技有限公司　河北　邯郸　056200

摘　要：钢铁企业用电成本占生产成本比重持续攀升，供配电系统在变压器、线路、无功传输及谐波环节存在大量电能损耗。本文深入分析了钢铁企业供配电系统的负荷特征与损耗构成，系统梳理了变压器经济运行、无功补偿、谐波治理、网络优化等核心降损技术的原理与应用方法，并从设备配置、运行调度和系统规划三个层面提出了降损优化的实施策略。研究表明，供配电系统降损优化是钢铁企业实现节能降碳和降本增效的重要技术抓手，系统化推进降损工作具有显著的节电潜力和经济效益。

关键词：钢铁企业；供配电系统；电能损耗；降损措施；节能降碳

引言：钢铁工业电力消费占能源消费总量比重持续提高，用电成本已成为影响企业竞争力的关键因素。供配电系统运行效率直接影响吨钢电耗和综合能耗水平，然而钢铁企业供配电系统普遍存在设备配置不合理、功率因数偏低、谐波污染严重、负荷波动剧烈等问题，导致大量电能损耗于传输和变换环节，既增加用电成本，也与“双碳”目标相悖。系统分析供配电系统损耗特性，科学制定降损优化策略，对降低能源成本、提升能效具有重要现实意义。本文旨在构建面向钢铁企业供配电系统的系统性降损优化方案。

1 钢铁企业供配电系统特征与损耗构成

1.1 钢铁企业供配电系统的基本架构

钢铁企业供配电系统采用多电压等级、分层分区的结构模式，由外部电源进线、总降压变电所、分区变电所、车间配电线路和用电设备等部分组成。外部电源一般以110kV或220kV接入总降压变电所，经主变压器降压至35kV或10kV后输送至各分区变电所，再进一步降至6kV或0.4kV供给车间设备。系统要素包括大容量变压器（单台可达数十兆伏安）、长距离输电线路、配电开关设备、无功补偿装置及电能监控系统。钢铁企业供电可靠性要求极高，非计划停电可能造成巨大经济损失甚至安全事故，设计时必须兼顾可靠性与经济性平衡。同时，用电设备类型多样、分布广泛，多级配电导致电能经多次变换和长距离传输，不可避免地产生大量损耗。

1.2 钢铁企业负荷特性分析

钢铁企业用电负荷具有鲜明行业特征，主要设备包括电弧炉、精炼炉、轧钢机及辅助设施。电弧炉是典型的冲击性负荷，熔化期功率剧烈波动，从零迅速升至额定功率，伴随严重谐波注入和三相不平衡。精炼炉负荷相对稳定但功率因数偏低（0.7～0.8），需消耗大量无功功率。轧钢机属周期性冲击负荷，频繁启制动，负荷曲线呈周期性尖峰特征[1]。风机、水泵、除尘等辅助设备属长期连续运行负荷，单台容量不大但运行时间长、总耗电量大。负荷率偏低会降低变压器和线路利用率，增加单位产品电耗中的固定损耗分摊，对供配电系统运行效率产生显著影响。

1.3 电能损耗的主要来源与构成分析

钢铁企业供配电系统电能损耗按机理可分为线路损耗、变压器损耗、无功损耗、谐波附加损耗及其他损耗五类。线路损耗是电流经导线产生的电阻热损耗，与电流平方、导线电阻和长度成正比，是线损主要组成部分。变压器损耗包括空载损耗和负载损耗，空载损耗取决于铁芯材质与负荷无关，负载损耗随负荷电流平方增大而增大。无功损耗源于无功电流传输导致额外发热，功率因数越低视在电流越大，损耗越严重。谐波附加损耗由非线性负荷产生，使集肤效应加剧、导体有效电阻增大，同时在变压器和电容器中产生额外涡流损耗。此外还有表计误差、线路泄漏等零散损耗。不同损耗类型在不同负荷水平下占比各异，轻载时铁损占比上升，重载时铜损占主导。

2 供配电系统降损的技术原理与优化方法

2.1 变压器经济运行技术

变压器总损耗由空载损耗P_0和负载损耗P_k构成，空载损耗取决于铁芯材质，负载损耗与负荷电流平方成正比。变压器效率随负荷率呈抛物线规律，经济负荷区间通常位于额定容量的40%～65%。经济运行的核心策略是使变压器工作在经济负荷区内，避免长期轻载或过载。对于并联变压器，可根据实际负荷自动投切台数：负荷较低时切除冗余变压器以减少空载损耗；负荷升高时投入备用变压器以避免过载损耗增加，切换点基于综合损

耗曲线交叉点计算确定。选型阶段应优先采用一级或二级能效产品，虽初期投资较高，但更低损耗可在全寿命周期内带来显著经济回报。定期进行负荷监测和损耗分析，及时调整偏离工况，是维持变压器经济运行的重要保障。

2.2 无功补偿与功率因数提升

无功电流增加线路和变压器视在电流，加大I^2R损耗。功率因数从0.8提升至0.95时，线路电流可降低约15%，线路损耗降低约30%，还可获得功率因数奖励电费。钢铁企业因大量使用感应电动机、电弧炉等感性设备，自然功率因数偏低，须通过无功补偿改善。补偿原则是“分级补偿、就地平衡”，即在总降变电所母线侧集中补偿改善整体功率因数，同时在大型设备侧就地补偿减少无功长距离传输[2]。负荷稳定场合宜用并联电容器组；电弧炉等剧烈波动负荷需用响应速度达毫秒级的静止无功发生器（SVG）实现动态补偿。补偿容量应综合考虑目标功率因数、负荷波动和系统阻抗等因素，通过优化计算实现最佳投入产出比。

2.3 谐波治理与电能质量改善

钢铁企业中电弧炉、变频装置和整流设备等非线性负荷产生大量谐波电流。谐波主要危害包括：增大线路和变压器附加发热，加速绝缘老化；可能引发电网谐振损坏设备；导致电容器过流过压损坏；引起继电保护误动作；干扰通信和控制系统。谐波治理有无源滤波、有源滤波和混合滤波三种方式。无源滤波器由电抗器和电容器构成，针对特定次数谐波，成本低但适应性差。有源电力滤波器（APF）通过检测谐波并注入反向补偿电流，实现动态多频率治理，精度高、适应性强，适用于谐波频谱快速变化场景。混合型方案兼顾经济性与动态性能，是大型钢铁企业的优选方案。谐波治理不仅能减少附加损耗，还能提高系统安全性和可靠性。

2.4 供配电网络优化与经济运行

网络优化核心目标是缩短供电距离、降低线路电阻、合理分配潮流、减小三相不平衡度。缩短供电半径是最有效降损手段，变电所应尽可能布置在负荷中心，减少长距离低压输电。导线截面选择应进行技术经济比较，适当加大截面虽增加一次性投资，但可有效降低全寿命周期线路损耗，按经济电流密度选型可获得最佳综合效益。三相不平衡时中性线产生较大不平衡电流，造成附加损耗和零序电压偏移，合理分配单相负荷可有效降低此类损耗。供配电网络重构是在保证可靠性和安全约束前提下，调整开关状态改变网络拓扑结构，将负荷转移至更低损耗路径。网络优化通常不需大规模设备投资，属于管理性降损的重要手段。

3 降损优化的系统化实施策略

3.1 设备配置优化层面

设备配置优化是降损工作的物质基础，重点在于淘汰低效设备、更新高能效设备和合理配置系统容量。变压器能效升级是最具代表性的措施，企业应依据GB20052制定更新计划，逐步将三级及以下能效变压器替换为一级或二级能效产品，单台可降低空载损耗约15%～30%，全厂节电量相当可观。大功率电机变频调速改造对风机、水泵、除尘等变工况设备效果显著，加装变频器后节电率一般可达15%～30%，同时改善启动性能和运行寿命。无功补偿装置应优先选用响应速度快、补偿精度高的SVG逐步替换固定电容器组，特别是在电弧炉等冲击性负荷回路中，动态补偿效果显著优于静态补偿。导线和母线槽选型应适当增大截面以降低线路电阻，按经济电流密度选型实现一次性投资与长期节能的优化平衡。此外，应评估分布式光伏在厂房屋顶的建设潜力，通过用户侧就近供电缩短传输距离、降低线损，同时享受清洁能源政策红利[3]。

3.2 运行调度优化层面

运行调度优化是在现有设备条件下通过改进运行方式实现降损的管理性措施，通常投资小、见效快。建立企业级电力负荷监控与调度系统是运行优化的基础平台，通过实时采集全厂各变电所和主要设备的电压、电流、功率因数、负荷率等参数，实现全网运行状态透明化感知，为优化调度提供数据支撑。变压器经济运行调度是根据实时负荷自动调整并联变压器投切状态，使其始终处于经济负荷区间，避免轻载或过载造成的不必要损耗。无功功率动态优化调度利用SVG快速响应能力跟踪负荷无功需求变化，实现补偿容量精准匹配，避免过补或欠补。谐波源协调控制是在多台谐波源设备同时运行时，优化各设备运行参数和时序配合，从源头减少谐波产生量。还应充分利用峰谷分时电价政策，将大功率设备检修或生产工序调整至低谷时段，降低电费支出并缓解高峰供电压力。运行调度优化需建立常态化损耗监测分析机制，形成“监测-分析-改进-验证”的管理闭环。

3.3 系统规划优化层面

系统规划优化是从长远和全局角度构建低损耗供配电系统的顶层设计，决定了降损工作的上限水平。新建或改扩建项目规划阶段，应将“综合线损率”作为供配电系统设计的关键技术指标纳入可行性研究和方案比选，从源头避免高损耗方案。负荷增长预测与供配电能力匹配规划要求根据企业中长期发展规划，科学预测未

来3～5年电力负荷增长趋势，合理预留变电容量和供电走廊，避免临时增容和重复改造，也避免容量过大造成的长期轻载高损耗运行。新能源接入与微电网建设应充分评估厂区光伏、余热余压发电等分布式电源潜力，构建用户侧微电网，优化内部潮流分布，减少从外部电网受电的线路损耗。智能化供配电系统分步建设应确立“数字化、网络化、智能化”演进路线，逐步部署智能开关设备、在线监测终端和高级分析软件，为实时优化控制提供基础设施支撑。系统规划降损策略需生产、设备、能源、规划等多部门协同制定，确保与企业整体发展战略协调一致，形成分阶段、可落地的实施方案。

4 降损效益评估与保障机制

4.1 降损效益的综合评估方法

降损效益的评估应从技术、经济和环境三个维度展开。技术效益评估通过对比降损措施实施前后的综合线损率、功率因数、谐波畸变率等关键指标的变化来量化降损效果，综合线损率每降低0.5个百分点即意味着可观的节电量和电费节约。经济效益评估包括直接效益和间接效益，直接效益为线损降低带来的电费节约与功率因数提升获得的奖励电费之和；间接效益涵盖变压器增容延迟投资、设备寿命延长、维护成本降低等客观存在的收益。投资回收期分析是判断降损措施经济可行性的核心工具，通过计算静态或动态投资回收期，为不同降损方案的比选和决策提供量化依据。环境效益评估将降损节约的电量折算为标准煤减少量和二氧化碳减排量，与企业碳达峰、碳中和目标对接。综合评估应采用全生命周期成本分析法，避免片面追求初始投资最低而忽视长期运行成本，确保降损方案在经济上合理、技术上可行、环境上友好[4]。

4.2 管理制度与能力保障

降损优化的持续推进需要健全的管理制度和专业能力保障。管理体系方面，钢铁企业应按照GB/T 23331建立完善的能源管理体系，将供配电系统线损率纳入关键绩效指标，建立“公司-厂部-车间”三级能耗考核体系，将降损责任分解落实到具体岗位和个人并与绩效考核挂钩。日常运维应建立制度化的巡视检查流程，定期开展红外热成像检测发现电气连接点异常发热，通过预防性试验检验设备绝缘状态，及时发现和处理潜在损耗源。技术能力建设方面，应培养既精通供配电系统运行原理又熟悉节能技术的复合型人才，定期组织培训和学习交流，跟踪行业降损技术最新发展动态。此外，可积极引入第三方节能服务公司开展合同能源管理合作，借助专业机构技术力量实施系统性能效诊断和降损改造，由第三方承担技术风险并分享节能收益，有效降低企业自主推进的风险和压力。管理制度的刚性约束与专业能力的柔性支撑相结合，是降损成果从短期改善走向长期巩固的关键保障。

结束语

供配电系统降损优化是钢铁企业深挖节能潜力、降低用电成本的重要技术路径。本文从负荷特性和损耗构成出发，系统分析了变压器经济运行、无功补偿、谐波治理和网络优化等核心降损技术的原理与方法，从设备配置、运行调度和系统规划三个层面构建了降损实施策略，并从效益评估和管理保障两个维度探讨了常态化推进机制。研究表明，降损工作不是单一措施的简单叠加，而是技术措施与管理措施双管齐下、单项优化与系统优化协调配合的系统工程。建议钢铁企业建立“摸清损耗—分析成因—分类施策—系统优化”的持续改进机制，以高质量供配电支撑绿色低碳转型。

参考文献

[1]高大全,李星,杨余杰.钢铁企业中压供配电系统改低电阻接地方式研讨[J].冶金动力,2024(1):1-4.

[2]杨鹏.炼钢厂新建二次资源生产线的低压供配电系统设计与应用[J].电气技术,2023,24(6):79-88.

[3]赵然,孙晶,宋宁,等.钢铁企业供配电网稳定性分析与改进[J].节能，2022，41(5):19-21.

[4]钟建能.钢铁企业配电系统配电网自动化实现技术分析[J].科学与信息化，2021(1):107-108.