

冷轧厂区高压供配电设备电能损耗成因及节能优化方案研究

朱永军

首钢京唐钢铁联合有限责任公司 河北 唐山 063200

摘 要：冷轧厂区高压供配电系统受设备老化、负荷波动及运维粗放影响，存在较为突出的电能损耗问题。本文依托配电损耗相关理论，结合现场实测数据，从设备本体、运行工况、运维管理三方面系统梳理损耗核心成因。针对变压器低效运行、无功失衡、线路损耗偏大等问题，制定设备升级、参数调控、网络优化及智能运维的综合节能方案。经仿真与工程可研测算，方案可有效降低配电系统综合损耗，提升系统运行能效，具备良好的工程应用价值。

关键词：冷轧厂区；高压供配电设备；电能损耗成因；节能优化方案

引言：冷轧生产工况复杂，具有连续作业、冲击负荷大、负荷频繁波动的特征，对高压供配电系统稳定性与能效性要求较高。当前厂区配电系统存在老旧设备能效衰减、负荷分配不均、无功补偿精度不足等问题，造成大量无效电能损耗，增加企业生产成本，制约绿色生产发展。为有效解决配电能耗浪费问题，本文全面分析系统损耗成因，构建适配冷轧生产工况的节能优化体系，助力厂区实现降本增效与节能提质。

1 冷轧厂区高压供配电系统概况与电能损耗理论基础

1.1 冷轧厂区高压供配电系统架构

(1) 厂区高压配电采用 110kV/35kV 进线、10kV/6kV

主配电母线及车间分配子站层级式拓扑结构，如图 1 所示。电能经主变压器降压后输送至各车间高压开关站，再分配至整流变压器、轧机主传电动机及辅助设备，形成“进线—主降—母线分配—终端馈电”完整供电流程。(2) 核心设备包括：高压电力变压器（电压转换与功率传输）、GIS/AIS 开关柜（线路投切与故障隔离）、高压输电电缆/架空线路（节点连接）及高压电动机（驱动轧机主传动与辅助泵站），均配置综合保护与智能监测装置。(3) 冷轧生产具连续作业、冲击负荷大、工况频繁突变特点，要求配电系统具备高可靠性（双路电源备自投）、动态无功快速补偿以抑制电压骤降，同时具备谐波抑制能力，确保电能质量满足工艺控制精度要求^[1]。

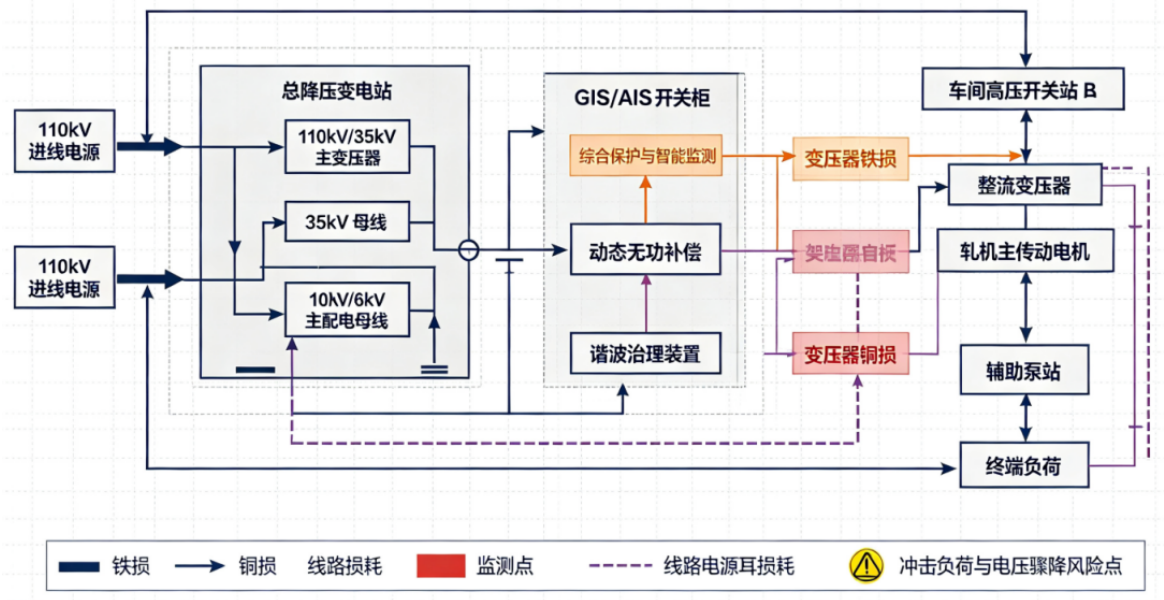


图 1 冷轧厂区高压供配电系统拓扑结构及损耗分布示意图

1.2 高压供配电设备电能损耗分类与理论机理

(1) 变压器损耗由空载铁损(磁滞与涡流效应,正比于电压平方)与负载铜损(绕组焦耳热,正比于电流平方)构成,附加损耗包括漏磁杂散及谐波损耗。(2) 高压线路损耗以电阻损耗(PR_t)为主,电晕损耗在阴雨或污秽条件下显著,与导线表面电场强度及气象条件密切相关。(3) 开关设备接触电阻产生接触损耗,高压电机损耗涵盖定/转子铜损、铁损、励磁损耗及风摩机械损耗。

2 冷轧厂区高压供配电设备电能损耗成因分析与现状测算

2.1 厂区高压配电系统损耗现状实测与数据统计

(1) 现场监测采用分层分区布点,在110kV总降、10kV车间配电室及重点高压设备侧部署在线终端。设备包括电能质量分析仪(谐波、功率、电压同步采集)、无线测温、钳形功率表及红外热像仪,采样周期1分钟,连续监测7天,同步记录轧机运行状态。(2) 数据按空载待机、轻载、额定轧制及过载冲击四类工况归集。采用箱线图法剔除异常值,按换辊停机、正常轧制、加减速过渡划分负荷区间,计算各类工况下变压器铜损/铁损、线路焦耳损耗及开关触头温升附加损耗的平均值与标准差,形成工况-损耗对应表^[2]。(3) 全厂损耗分布:变压器损耗占52%~58%(铁损约40%)、高压线路占20%~25%、开关及高压电机占17%~28%。主传动整流变压器单台年损耗60万~80万kWh,总降主变轻载(负载率<30%)时铁损占比异常突出,呈现“大马拉小车”与冲击负荷复合损耗特征。

2.2 设备本体固有损耗成因分析

(1) 厂区部分高压变压器运行年限超15年,硅钢片材质磁导率下降、绝缘老化导致涡流损耗较出厂值升高8%~12%,绕组直流电阻增大使铜损同比升高5%~7%。高压开关柜真空灭弧室触头表面氧化、弹簧机构疲劳使接触电阻增大,接触损耗可升至初始值的1.5~2倍。(2) 变压器容量选型按远期规划配置,现阶段实际负荷率仅42%~55%,额定负载区间偏离经济运行区间(通常65%~75%),致使铁损占比过高、综合能效偏低。高压电机选型普遍留有15%~20%裕量,轻载时功率因数与效率双双下降。(3) 制造环节中变压器绕组绕制不均匀引起的环流附加损耗、开关柜母排搭接面加工粗糙导致的局部过热、电缆中间接头制作工艺不规范造成的接触电阻离散性偏大等工艺缺陷,使本体附加损耗额外增加3%~5%。

2.3 系统运行工况损耗成因分析

(1) 冷轧机启停频繁(日均轧制道次切换20~30次)、负荷呈剧烈脉冲式波动(冲击倍率达2~3倍额定值),变压器铜损随电流平方关系急剧增大,过载时段

铜损可达额定损耗的4~6倍,同时负载剧烈变化迫使有载调压开关频繁动作,增加过渡电阻附加损耗。(2) 三相负荷不平衡度实测达4%~7%(超出国标 $\leq 2\%$ 要求),导致变压器某一相绕组电流偏大、局部过热,增加额外铜损约2%~3%;全厂功率因数在轧机空载时低至0.72~0.78,大量无功电流在输电线路中流动产生额外 PR_t 损耗,同时增加线路及变压器附加有功损耗。(3) 高压馈线采用放射式与树干式混合结构,部分配电线路迂回长度超1.5km,电阻压降累计达3%~5%,负荷分配未按经济电流密度进行优化,季节性产线调整时缺乏动态切换机制,导致部分线路长期轻载而相邻线路接近满载,线损率较合理分配时高出1.2~1.8个百分点^[3]。

2.4 运维管理层面损耗成因分析

(1) 设备巡检依赖人工定期测温与抄表,缺乏在线实时监测手段,开关柜触头氧化、电缆中间头松动等早期劣化无法及时发现,接触电阻持续增大加剧局部发热损耗。变压器油质劣化、散热片积灰未按周期清理,导致散热效率下降、绕组温升偏高,电阻增大引发额外铜损。(2) 配电运行策略采用固定投切方式,变压器并列运行台数不随季节负荷变化动态调整,轻载季仍维持双台主变并列,单台空载铁损无谓增加;无功补偿电容器组分组容量偏大,调节步长过粗,无法精准跟踪轧机冲击负荷的快速无功波动,造成过补或欠补。(3) 厂区能耗监测系统仅覆盖至车间级总表,未延伸至单台高压设备及馈线回路,损耗异常无法精准定位到具体节点。损耗指标未纳入班组绩效考核体系,缺乏损耗超标预警与根因追溯机制,电能损耗底数不清,隐性损耗长期累积,据估算年损耗电量因管理因素额外增加3%~5%。

3 冷轧厂区高压供配电系统节能优化方案与效果验证

3.1 设备本体能效升级优化方案

(1) 针对服役超过15年、空载损耗超标的S9型及老旧油浸式变压器,采用一级能效SCB18型环氧浇注干式变压器或S22型非晶合金立体卷铁心变压器进行替换,新型变压器空载损耗降低约35%~42%,负载损耗降低约15%~20%。高压开关柜更换为KYN61-40.5型铠装移开式柜体,配真空断路器及复合绝缘母线,触头接触电阻控制在 $40\mu\Omega$ 以下,有效降低接触发热损耗。(2) 依据冷轧实际轧制规程和负荷实测数据,按“整流变压器+动力变压器”分开配置原则重新选型。整流变压器容量按轧机额定功率的1.25~1.35倍选取,并具备2倍过载能力,避免传统“大马拉小车”导致的铁损浪费;辅助动力变按车间实际装机负荷的0.65~0.75倍系数选取,确保常态负载率处于60%~75%的经济区间^[4]。(3) 变压器采用Nomex绝缘纸配合高导热环氧树脂体系,增强绝缘耐热等级至R级(220℃),同时优化气道结构并增设独立风冷辅助散热装置,绕组热点温升降低约8~10K,绕

组直流电阻下降约 2%~3%，从而降低同电流下的焦耳损耗。开关柜母线搭接面采用镀银工艺并涂抹导电脂，减少接触电阻的不稳定性。

3.2 系统运行参数优化方案

(1) 采用静止无功发生器 (SVG) 与电容器组构成混合动态补偿系统, SVG 容量按轧机冲击负荷无功最大波动量的 1.2 倍配置, 响应时间 $\leq 15\text{ms}$, 实现无功功率毫秒级跟踪补偿。同时将功率因数控制目标由 0.90 提升至 0.95 以上, 经测算 10kV 线路电流可降低约 12%~18%, 年减少线路及变压器铜损约 10 万~15 万 kWh。(2) 在 10kV 配电室加装三相不平衡自动调节装置 (SPC), 通过实时检测各相电流并注入补偿电流, 将三相不平衡度由改造前的 4%~7% 降至 2% 以内, 同时消除中性点漂移引起的零序电流。该措施可降低变压器绕组额外铜损约 3%~5%, 延长设备绝缘寿命。(3) 依据变压器经济运行曲线, 制定分段负载调控策略: 当总负荷率 $\geq 60\%$ 时两台主变并列运行, 负荷率介于 45%~60% 时单台运行, $< 45\%$ 时投入小容量备用变或单台减容运行。同时设置负载率预警阈值 ($\geq 80\%$ 自动启动备用变), 确保运行变压器始终处于损耗最低的负载区间。

3.3 配电网络布局与运维优化方案

(1) 对厂区高压电缆路径进行重新踏勘规划, 将主轧线、平整、镀锌等主要负荷中心就近接入总降 10kV 不同母线段, 将最远供电半径由 1.8km 缩短至 0.9km 以内, 线路阻抗压降由 5.2% 降至 2.8%, 年线损电量预计减少 18.6 万 kWh。(2) 构建基于智能电表及无线数传终端的三级能耗在线监测平台, 覆盖总降进线一车间配电室一单台高压设备各层级。平台具备损耗实时计算、异常越限报警及能效对标分析功能, 可精准识别损耗异常节点, 为能耗管控提供数据决策支撑。(3) 制定高压设备周期性检修与检测标准: 每季度开展一次红外热成像普测与开关柜局部放电检测, 每半年进行一次变压器油色谱分析及绕组直流电阻测试, 发现问题及时处理。同时建立设备全生命周期能效档案, 将损耗指标纳入运维人员绩效考核, 使老化损耗降低约 6%~8%^[5]。

3.4 优化方案仿真与可研效果测算

(1) 利用 ETAP20.0 电力系统分析软件建立全厂高压配电系统数字仿真模型, 包含主变压器、馈线电缆、无功补偿装置及各类负荷等效模块。模型中准确录入设备电气参数 (绕组电阻、电抗、铁损曲线) 及典型日负荷波动数据, 仿真步长设为 1 分钟, 潮流计算方法采用牛顿-拉夫逊法, 确保仿真基态损耗与实测值误差在 $\pm 3\%$ 以内。(2) 分别对设备升级、无功补偿、三相平衡、线路拓扑优化四项方案进行单因素仿真, 计算各自节电率: 设备升级约 6.2%、无功补偿约 5.8%、三相平衡约

2.1%、线路优化约 3.5%。四项组合方案的协同仿真结果显示综合损耗降低率约 19.4%, 其中变压器损耗降低 24.3%、线路损耗降低 16.7%、附加损耗降低 12.8%, 各项措施的协同作用原理如图 2 所示。



图 2 节能优化方案协同作用原理图

(3) 在此基础上, 以酸轧车间 10kV 配电系统为典型对象进行可研测算: 按上述组合方案对该车间实施变压器替换、SVG 增设及三相平衡整治, 仿真推算月均损耗可由现状 64.2 万 kWh 降至 51.5 万 kWh, 综合节电率约 19.8%, 预计年节电量约 152 万 kWh, 折合标煤约 498 吨。按当地电价 0.65 元/kWh 计算, 年节约电费约 98.8 万元, 项目投资总额估算约 210 万元, 投资回收期约 2.1 年。上述测算结果充分表明, 该节能优化方案在技术可行性与经济性上均具备良好的工程推广价值。

结束语

本文完成了冷轧厂区高压供配电系统电能损耗的成因分析与节能优化方案设计, 有效解决了设备低效运行、工况参数失衡、配电布局不合理等能耗难题。多项优化措施协同作用, 大幅降低变压器、线路及设备附加损耗, 试点应用节能与经济效益显著。本次研究形成的优化思路与运维策略, 可为同类冶金冷轧厂区供配电系统的节能改造、能效提升提供可靠的参考依据。

参考文献

- [1] 李勇, 王浩, 刘鑫. 冶金工业高压供配电系统电能损耗成因及节能改造研究 [J]. 电力工程技术, 2023, 42(02): 189-195.
- [2] 张超, 赵阳. 钢铁冷轧车间配电系统谐波损耗特性及治理技术 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 156-162.
- [3] 陈建军, 吴峰. 工业企业高压变压器经济运行与损耗控制策略 [J]. 变压器, 2023, 60(07): 45-50.
- [4] 黄斌, 周凯. 重工业厂区高压配电线路损耗精细化分析与节能优化 [J]. 供用电, 2024, 41(03): 78-84.
- [5] 王凯. 冷轧工厂高压供配电设备能耗隐患及节能优化措施 [J]. 冶金电气, 2025, 44(02): 36-40.