 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i8.11457

Practical Research on Energy Saving and Efficiency Improvement of High-Frequency Power Supply for Electrostatic Precipitators in Thermal Power Plants

Yongyun Zhang Weiping Cui Fengrui Gu Qiang Liu Qingbo Cui

Huaneng Rizhao Power Plant, Rizhao, Shandong, 276826, China

Abstract

As a high-energy-consuming industry, thermal power plants face increasingly stringent requirements for energy conservation and emission reduction following the establishment of the "dual carbon" goals. The electrostatic precipitator, serving as the core equipment for flue gas dust removal in thermal power plants, suffers from issues such as high energy consumption and unstable dust removal performance with traditional industrial-frequency power supplies, failing to meet current policy demands for achieving the dual carbon targets and reducing energy consumption. This study focuses on the retrofitting of high-frequency power supplies for electrostatic precipitators in a thermal power plant unit, conducting field comparative experiments and analyzing the results. The findings demonstrate that replacing the high-frequency power supply reduces energy consumption by 18–22%, maintains dust removal efficiency consistently below 5 mg/m^3, and preserves excellent performance even under fluctuating unit loads. This research provides an effective technical solution for energy-saving upgrades of electrostatic precipitators in thermal power plants, offering clear practical guidance for achieving emission reduction objectives.

Keywords

thermal power plant; electrostatic precipitator; high-frequency power supply; energy conservation and efficiency improvement; flue gas purification

火电厂电除尘器高频电源节能提效的实践研究

张永云 崔维平 郭丰瑞 刘强 崔清博

华能日照电厂，中国 · 山东 日照 276826

摘 要

火电厂作为高耗能行业，随着“双碳”目标的提出，行业对其节能减排、节能降耗提出了日益严格的要求。电除尘器作为火电厂烟气除尘的核心设备，传统工频电源存在能耗高、除尘效果不稳定等问题，无法满足现阶段“双碳”目标及节能降耗的政策要求。本文以某火电厂机组电除尘器高频电源改造为对象，开展现场对比试验，并基于试验结果进行分析。试验结果表明，电除尘器更换高频电源后，能耗降低率达18~22%，除尘效果稳定在5mg/m^{3}以下，且在机组负荷波动工况下，除尘效率仍保持较优水平。该研究为火电厂电除尘器节能降耗提供了有效的技术改造路径，对火电厂践行节能减排目标具有明确的实践指导价值。

关键词

火电厂；电除尘器；高频电源；节能提效；烟气净化

1 引言

火电厂作为我国的用电大户，其粉尘排放、能耗等指标是火电行业环境治理与节能减排的重点管控内容。而电除尘器作为火电厂烟气粉尘治理的核心设备，凭借处理量大、运行可靠等优势，成为火电行业粉尘治理的关键装置，其运行效果直接影响电厂的环保水平与能耗表现。传统电除尘器以工频电源为主，存在输出电压波动性高、电场能量利用率低等问题，不仅运行能耗偏高，还易使粉尘产生二次扬尘，导致粉尘治理效果难以稳定。近年来，高频电源发展迅速，其凭借输出电压稳定、可调节等优势，为电除尘器高效节能提供了新途径。高频电源应用背景下，如何有效降低电除尘器功率损耗、提升其运行效率，已成为火电行业绿色发展的新命题。

【作者简介】张永云（1978–），男，中国山东日照人，本科，高级工程师，从事火力发电厂电除尘、脱硫、脱硝等环保设备系统运行维护与检修研究。

2 火电厂电除尘器与高频电源技术原理

2.1 电除尘器工作原理

电除尘器原理主要是通过电场效应使烟气中的粉尘荷

电，然后借助电极力将带电粉尘分离、捕集，从而实现烟气除尘的目的。其工作过程主要分为四个阶段：第一阶段，电晕极与收尘极之间通电，电晕极附近的空气电离而产生电晕，产生大量电子和离子，即“电离阶段”；第二阶段，气流中烟尘粒子进入电场后，与电子和离子碰撞而荷电，即“荷电阶段”；第三阶段，荷电粉尘粒子通过电场力的作用，向极性相反的收尘极运动，即“迁移阶段”；第四阶段，荷电粉尘粒子运动到收尘极后，经振打器（或靠自重）脱落进入灰斗中收集，即“收集阶段”。其中供电电源的特性直接影响电场强度、电离浓度等关键参数，进而直接影响除尘效率与能耗 [1]。

2.2 高频电源技术优势

2.2.1 电压输出稳定

工频电源输出电压频率为 50Hz，电压输出波动幅度较大，导致电场强度波动大；高频电源输出频率为 20kHz~50kHz，输出电压波动幅度小于 5%，电场强度波动小，电压输出相对稳定，粉尘二次扬尘相对较少，除尘效率相对较高。

2.2.2 能量输出精准

高频电源采用高频控制，可根据实时的烟气粉尘浓度、流量等参数，实时控制输出功率，不会出现类似工频电源“大马拉小车”的功率浪费。例如，当烟气粉尘浓度较低时，高频电源会实时减小输出功率，而工频电源无法精准控制，仍会造成大量功率浪费。

2.2.3 能量输出率高

工频电源配套的变压器体积大、漏磁损失大，能量输出率仅 85%~90%；高频电源采用高频变压器，体积小、漏磁损失小，能量输出率可高达 92%~95%，能有效减小自身损耗 [2]。

2.3 高频电源与电除尘器的适配性

高频电源与电除尘器的适配性主要体现在其输出场强可满足电除尘器的电场强度要求。一方面，电厂锅炉因负荷变化会导致烟气量、粉尘量改变，如锅炉负荷从 100% 降至 60% 时，烟气量约减少 30%，粉尘量约减少 25%。此时高频电源可及时调整输出功率，防止因电场过强导致除尘效率下降；且高频电源对电场变化的响应速度快，可有效避免电场过强引发的“返电晕”现象。工频电源则因调整速度慢，易导致电场过强，既造成不必要的电能损耗，同时也会影响除尘效率 [3]。另一方面，粉尘堆积易使电除尘器产生“返电晕”（也称反电晕，即收尘极表面堆积的粉尘层被击穿后产生反向电流），高频电源可实时检测电流变化，并及时调整输出电压以抑制反电晕，待工况恢复后再恢复额定电压；工频电源则因对返电晕的响应速度慢，导致电能损耗较大、除尘效率偏低。因此，高频电源的这一动态调节特征是电除尘器实现节能增效的关键前提。

3 火电厂电除尘器高频电源改造实践

3.1 研究对象与改造方案

本次针对某 300MW 火电锅炉机组配套的电除尘器进行改造，该电除尘器为四电场卧式电除尘器，处理风量 120000m³/h，改造前采用工频电源运行，运行过程中存在以下两方面问题：一是运行能耗较高，平均每台工频电源运行功率 18kW，四电场总功率约 72kW；二是收尘效率偏低，当锅炉负荷不足 80% 时，出口粉尘浓度高于 10mg/m³，远不能满足当前环保排放标准要求。因此改造计划如下：①选择高频电源：型号需满足输出电压 0-72kV、输出功率 0-20kW，具备数字控制功能，可与电厂 DCS 系统联动，实现远程监视与控制。②电除尘器四电场全部更换为高频电源，共 8 台（一电场配置 2 台、按“一台工频电源对应一台高频电源”原则更换，一电场另补充配置 2 台高频电源），同步更换高压电缆与控制柜，确保满足运行要求。③改造分两期实施：一期停机 48h，完成 1#、2# 电场电源更换与接线改造，确保设备正常运行；二期利用机组小修期，改造 3#、4# 电场，避免影响机组正常运行。改造完成后，高频电源输出电压波动不超过 2%，电流冲击小，空电场升压试验正常，与 DCS 系统联动正常。

3.2 数据监测方案

为确保准确监测高频电源的节能降耗效果，现场数据监测周期拟定为 3 个月，检测参数确定为能耗、除尘效率、工况参数，具体包括以下指标：

3.2.1 能耗监测

在每侧高频电源进线侧安装 0.5 级高精度电能表，记录日用电量与日耗水量，对比同一工况下改造前工频电源的用电量；功率数据每小时记录 1 次，总耗水量每天记录 1 次，确保数据记录的连续性与一致性。

3.2.2 除尘效率监测

在电除尘器入口烟道与出口烟道各安装 1 台粉尘含量在线监测仪（执行标准：GB/T16157—1996），实时监测粉尘浓度数据，按公式“除尘效率＝（入口烟道粉尘浓度 - 出口烟道粉尘浓度）/ 入口烟道粉尘浓度 ×100%”计算除尘效率；同时每周进行 2 次手工采样，采用重量平衡法对在线监测仪数据进行校正，确保数据准确性 [4]。

3.2.3 工况监测

从电厂 DCS 系统收集工况数据：机组负荷、烟气温度、烟气流速、烟气含水量等参数，确保监测数据与对比工况条件一致；剔除锅炉负荷变化超过 ±5% 的工况，避免因工况条件差异导致数据偏差，影响对比效果。

监测期设置三种工况，分别为满负荷运行工况（锅炉负荷 90%~100%）、中负荷运行工况（锅炉负荷 70%~80%）、低负荷运行工况（锅炉负荷 50%~60%），每种工况持续时间不少于 30 天，以确保监测结果贴近火电厂真实工况，提

升数据代表性。

3.3 改造过程中的关键问题与解决措施

高频电源改造过程中，面临三项主要问题，通过采取以下应对措施，顺利完成改造，确保设备正常运行：

3.3.1 设备兼容性问题

改造前，因高频电源与原电除尘器控制柜间无匹配通讯协议，DCS 系统无法接收高频电源的运行参数（输出电压、电流）。

对策：协调电源厂家提供通讯协议转换模块，将高频电源输出的 RS485 通讯信号转换为原电除尘器控制柜兼容的 MODBUS 信号，同时重新编写 DCS 系统数据采集程序，实现运行参数实时上传与远程控制；通讯延时控制在 1 秒内，满足监测与控制要求。

3.3.2 电场击穿问题

在 1# 电场调试过程中，当高频电源电压升至 65kV 时，电场反复击穿，导致电源保护停机。经检查，原因是原电除尘器收尘极局部变形，极间距不均匀（最小 150mm、最大 200mm），导致电场击穿。

处理方法：停机后，采用激光测距仪测量极间距，对变形的收尘极板进行校正，并更换损坏严重的极板；校正后极间距误差控制在 5mm 以内，电场击穿问题消失，电场电源可稳定运行，额定输出电压达 70kV。

3.3.3 能耗数据偏差问题

改造初期，高频电源电能表与电厂总电表的数据偏差约 5%，导致用电能耗估算不准确。高频电源电能表安装位置距离高压电缆过近，受电磁干扰影响。

处理方法：将电能表安装位置远离高压电缆，并在电表外加装电磁防护罩；重新调整后，数据偏差控制在 1% 以内，符合监测精度要求。

4 高频电源节能提效效果分析

4.1 节能效果分析

经现场监测，高频电源改造后的节电效果显著，且不受工况变化影响。改造前，工频电源在满负荷、中负荷、低负荷工况下的平均总能耗分别为 72kW、68kW、65kW；改造后，高频电源在相同工况下的平均总能耗分别为 58kW、54kW、52kW，平均能耗降低率分别为 19.4%、20.6%、20.0%，整体平均能耗降低 20.0%。

从能耗波动性来看，工频电源受电网电压波动影响，其能耗波动率为 ±8%；而高频电源可实现稳压调节，能耗波动率控制在 ±3%，能耗稳定性大幅提升。且当锅炉负荷快速下降（100%~60%）时，工频电源需 30min 才能适配新的功率需求，期间额外消耗电能约 1.2kWh；高频电源响应时间仅为 5min，期间消耗电能约 0.2kWh，动态节能效果显著。若按该 300MW 机组年运行 5000h 计算，改造后每年可节约电能约 70000kWh，折标煤 24.5 吨，按照火电煤耗 350g/kWh 计算，节能经济效益显著，环保优势突出 [5]。

4.2 提效效果分析

采用高频电源改造后，电除尘器的除尘效率与运行可靠性均得到提升。从除尘效率来看，改造前工频电源在满负荷、中负荷、低负荷工况下，除尘器平均效率分别为 99.85%、99.78%、99.70%，出口粉尘浓度分别为 8mg/m³、12mg/m³、15mg/m³；改造后高频电源在相同工况下，除尘器平均效率分别提升至 99.92%、99.90%、99.88%，出口粉尘浓度分别降至 4mg/m³、5mg/m³、6mg/m³，均低于国家火电厂烟气粉尘排放标准（≤ 10mg/m³），且低负荷工况下效率提升最为明显，解决了原工频电源在低负荷工况下难以达标的问题。

从效率稳定性对比来看，工频电源运行时，因电压不稳定导致出口粉尘浓度波动范围为 ±3mg/m³；高频电源运行时，出口粉尘浓度波动范围仅为 ±1mg/m³，波动幅度减小 66.7%。且面对烟气参数波动（如烟气湿度从 8% 波动至 12%）时，工频电源需手动调整电压，期间除尘效率下降约 0.1%，恢复至稳定状态需 1 小时；高频电源可自动适配烟气湿度变化，除尘效率仅下降 0.02%，恢复时间小于 10 分钟，抗干扰能力更强。通过电镜观测收尘极粉尘堆积情况发现，粉尘层分布更均匀，厚度下降约 15%，这一现象间接验证了高频电源可减少粉尘二次扬尘，进而提升除尘效率。

4.3 综合效益评估

从投资回报率角度分析，该批高频电源总投资约 80 万元（含设备采购、建设安装及运行调试费用），改造后每年可节电 70000kWh，按每千瓦时电费 0.5 元计算，每年可节省电费 3.5 万元；此外，因除尘器效率提升，降低了粉尘超标排放的罚款风险（当前粉尘超标排放罚款标准为每吨 2 万元），同时可降低收尘极振打机运行功率、延长设备维护周期，每年额外节省维护费用近 2 万元。综合测算，投资回收期约为 14.5 年，而高频电源设计使用寿命为 20 年，综合经济效益显著；若电厂机组台数较多，规模化改造后的经济效益将更为可观。

从环保效益来看，改造后每年可节约标煤 24.5t，对应减排二氧化碳约 61.2t（按 2.5t 标煤排放 61.2t 二氧化碳测算），减少二氧化硫排放约 0.7t（按煤中硫化物含量 1% 测算），对火电厂践行“双碳”目标具有积极意义。同时，出口粉尘浓度降低可减少粉尘对环境的影响，改善区域环境质量，具备良好的社会效益。此外，高频电源的噪声级小于 65dB，比工频电源的噪声级（75dB）低 10dB，有效改善了电厂作业环境，可满足绿色工厂的环境要求。

5 结语

通过火电厂电除尘器高频电源改造实例，验证了火电厂电除尘器工频电源改高频电源后，平均功耗降 20.0%，除尘效率达 99.88% 以上，各工况运行稳定，兼具经济与社会

环保效益。该试验还提供了设备兼容性、电场击穿等改造难题的可复制方案，对电除尘器技改有指导意义。需注意，高频电源效果受电除尘器状态、烟气参数（如尘比电阻）影响，后续可针对不同煤种、机组容量研究适配性。“双碳”目标下，高频电源是火电烟气减排与节能重要方向，将推动行业高效低排放发展。

参考文献

[1] 黄础晓.高频电源在火电厂电除尘改造中的应用[J].黑龙江电力,2022,44(06):553-556+560.

[2] 孙岩,高粉艳.火电厂电除尘器出口烟尘浓度闭环控制在DCS中的实现[J].仪器仪表用户,2020,27(06):85-87+21.

[3] 吴可凡.火电厂电除尘器高频电源电磁干扰研究[D].吉林建筑大学,2024.

[4] 陈敏金.火电厂新建电除尘器的电气优化设计探析[J].中国设备工程,2021,(21):119-120.

[5] 汪鑫.基于DSP控制的高频电源在火电厂电除尘中的研究与应用[D].江苏大学,2023.