

一种火电厂电除尘高频电源谐振电容 在线检测与智能维护系统研究

李宏元 李福祥 蒙学英 冯栋

华能兰州热电有限责任公司 甘肃兰州 730104

摘要：针对火电厂电除尘高频电源谐振电容在高温、高压、高频及闪络冲击等恶劣工况下易发生老化、容量衰减及局部击穿等问题，导致电源停机、除尘效率下降的现状，本文提出一种谐振电容在线检测与智能维护系统。该系统融合动态阻抗分析与波形特征识别，构建双维度诊断模型，结合分数阶 PID 自适应补偿控制策略，有效抑制电容老化引发的频率漂移与输出波动；并采用分布式监测架构，实现电容状态实时感知、故障预警与寿命预测。工程应用表明，该系统可将电容故障率降低 80%，谐振频率稳定性提升 83.3%，输出电流纹波降低 65%，除尘效率提高至 99.8%，年均维护成本下降约 40%，具备良好的工程适用性与推广价值。

关键词：高频电源；谐振电容；在线检测；动态阻抗分析；分数阶 PID 控制；智能维护；电除尘器

1. 引言

随着国家“双碳”战略推进和环保排放标准持续加严，火电厂烟尘排放限值已普遍控制在 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下，部分重点区域要求达到 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。在此背景下，电除尘器（ESP）作为燃煤机组烟气净化的第一道防线，其运行稳定性与效率备受关注。高频电源作为现代电除尘系统的核心供电装置，凭借其高电压稳定性、高转换效率和小体积优势，已逐步取代传统工频电源，成为主流配置。

高频电源通常采用 LCC 串联谐振拓扑结构，其中谐振电容是决定电源输出特性与能量传输效率的关键元件。然而，由于其长期运行于高温、高压、高频（ $20 - 50\text{kHz}$ ）及频繁闪络冲击的恶劣工况下，谐振电容容易发生介质老化、容量衰减、局部击穿等故障，严重时导致电源停机，影响除尘效率甚至引发电网扰动。据某大型火电集团统计数据显示，近五年因高频电源故障导致的环保设备异常退运事件中，谐振电容相关故障占比高达 43%，年均维护成本较正常水平增加 30% 以上。

尽管当前研究多聚焦于高频电源的拓扑优化、软开关技术及节能控制策略，但对谐振电容本身的健康状态在线监测与故障预警机制仍缺乏系统性解决方案。现有检测手段多依赖定期离线测试或运行人员经验判断，难以实现实时感知与精准诊断。尤其在寄生参数干扰、电流波形畸变等复杂工况下，传统过零检测与阻抗估算方法误判率高，无法满足智

能化运维需求。

针对上述问题，本文提出一种融合动态阻抗分析、分数阶控制补偿与分布式监测架构的谐振电容健康状态评估体系，构建集“感知—诊断—调控—预测”于一体的智能检测系统，旨在实现电容劣化趋势的早期识别、故障类型的精准判别及系统性能的自适应调节，为火电厂电除尘高频电源的安全可靠运行提供技术支撑。

2. 谐振电容关键技术瓶颈

2.1 工况特殊性带来的检测挑战

2.1.1 高频高应力运行环境

谐振电容工作频率通常在 $20 - 50\text{kHz}$ 之间，远高于传统电力设备，导致介质损耗 ($\tan \delta$) 显著增加。长期运行下，电容内部温度可达 80°C 以上，加速电解液干涸与介质老化，容量逐年衰减（年均下降约 2%~5%）。此外，电除尘器在工作过程中频繁发生的电场闪络会产生瞬态大电流冲击（峰值可达数千安培），造成电容内部微放电累积，进一步加剧绝缘劣化。

2.1.2 寄生参数耦合干扰严重

实际系统中，高频变压器存在不可忽略的寄生电容（实测典型值约 $0.8\mu\text{F}$ ），与谐振电容（典型值 $1\mu\text{F}$ ）形成并联耦合关系。同时，线路分布电感与电容漏感 (L_s) 构成杂散谐振回路，导致系统实际谐振频率偏离理论设计值。测试表明，当寄生电容变化 $\pm 0.1\mu\text{F}$ 时，谐振频率漂移可达

± 3kHz，严重影响电容参数反演精度。

2.2 现有检测方法的局限性

序号	检测方法	原理简述	主要缺陷	备注
1	离线电桥测量	停机后使用 LCR 表测量电容值	无法反映运行状态，存在检测盲区	
2	过零信号检测法	检测谐振电流过零点判断谐振状态	易受电流畸变、噪声干扰，工程实测误报率达 15%	
3	固定频率扫频法	注入小信号进行频率响应测试	影响主电路运行，难以在线实施	
4	温度监测	通过外壳温度判断热积累情况	滞后性强，无法直接反映电容电气性能	

综上，现有技术难以实现对谐振电容状态的实时、准确、非侵入式在线监测，亟需构建新型检测机制以突破瓶颈。

3. 创新点与技术方案

3.1 动态阻抗波形融合诊断模型

为克服单一参数检测的局限性，本文提出“动态阻抗+波形特征”双维度融合诊断模型，提升故障识别准确率。

理论基础：

在传统火花故障诊断系统基础上，扩展电容参数辨识维度，建立包含主谐振电容、寄生电容与漏感的等效电路模型。动态阻抗表达式如下：

$$Z_c(f) = \frac{1}{2\pi f C} + j \left(2\pi f L_s - \frac{1}{2\pi f C_p} \right)$$

其中：

- C ：主谐振电容（待测）；
- C_p ：变压器及线路寄生电容（0.8 μF）；
- L_s ：回路漏感（实测约 1.2 μH）；
- f ：实际谐振频率。

实现方式：

通过高频罗氏线圈（频响 1kHz – 200kHz）采集谐振电流波形，同步获取直流母线电压信号，采样频率设定为 200kHz。采用加窗 FFT 算法提取基波及主要谐波分量，结合相位差计算动态阻抗模值与相角。通过最小二乘法拟合多频点阻抗曲线，反演实际电容值 C 。

容错机制：

引入波形畸变度（THD）、电流上升率（di/dt）作为辅助判据。当 C 偏离初始值超过 10% 或 THD>8% 时，系统触发预警，若两者同时超标，则判定为电容严重劣化或局部击穿。

3.2 分数阶 PID 自适应补偿控制

为抑制电容老化引发的谐振频率漂移与输出波动，设计基于电容状态反馈的分数阶 PID 控制器，实现系统性能的动态补偿。

算法设计：

改进传统 PID 控制结构，引入分数阶微积分算子，增强系统对非线性、时变特性的适应能力。控制律表达式为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D_t^{-\lambda} e(t) + K_d D_t^{\mu} e(t)$$

其中：

- $e(t)$ ：输出电压误差；
- $\lambda \in (0,1)$ 、 $\mu \in (0,1)$ ：分数阶次，通过模糊规则在线调整；
- K_p 、 K_i 、 K_d ：比例、积分、微分增益。

状态反馈机制：

控制器接收来自电容状态评估模块的实时 C 值与温升数据（通过红外测温模块获取），动态调整动态调整 λ 与 μ 。例如，当 C 下降 5% 时，适当增大 λ 提高积分作用，补偿频率偏移；当温升速率 >2°C/min 时，减小 K_d 避免过调。

控制效果：

实验表明，该算法可将谐振频率漂移控制在 ±1% 以内，输出电流纹波由改造前的 >10% 降至 <5%，显著提升电源稳定性。

3.3 分布式电容监测架构

构建“边缘感知—集中处理—云端协同”的三级监测体系，实现全生命周期管理。

硬件设计：

在每台高频电源的谐振回路中加装高频电流互感器（CT），采样频率 200kHz，精度 0.5 级；

信号经隔离放大后，通过 CAN 总线（传输速率 1Mbps）上传至现场 DSP+FPGA 处理核心；

FPGA 负责高速数据预处理（FFT、特征提取），DSP 执行诊断算法与控制逻辑。

软件功能：

构建电容寿命预测模型：基于 Arrhenius 老化模型与累积损伤理论，综合温升、累计工作时间、闪络次数等因素，估算剩余使用寿命（RUL）；

- 预测公式：

$$RUI = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \cdot N^{-\beta}$$

其中: T 为工作温度, N 为闪络次数, E_a 为活化能, A、 β 为材料常数。

支持 ModbusTCP 协议与厂级 DCS/SIS 系统对接, 实现报警推送、数据存储与远程诊断。

4. 实验验证与工程应用

在某 300MW 燃煤机组电除尘系统中部署本方案, 对 6 台高频电源进行改造升级, 连续运行 12 个月, 数据统计如下:

4.1 性能指标对比

序号	指标	改造前(平均值)	改造后(平均值)	提升幅度	备注
1	电容故障次数	5 次 / 年	1 次 / 年	- 80%	
2	二次电压波动	± 15%	± 5%	- 66.7%	
3	谐振频率稳定性	± 3kHz	± 0.5kHz	+ 83.3%	
4	除尘效率	99.2%	99.8%	+ 0.6%	
5	输出电流纹波	12%	4.2%	- 65%	

注: 数据来源于电厂运行日志与第三方环保监测报告。

4.2 经济效益分析

维护成本降低:

年均更换电容数量由 3.2 组降至 0.5 组, 维修工时减少 60%, 综合维护成本下降约 40% (年节约费用约 28 万元)。

节能增效:

因电压稳定性提升, 电晕功率利用率提高, 单位烟气处理能耗下降 8.3%; 同时电晕强度增强, 使粉尘驱进速度提升, 除尘效率提高 0.6 个百分点, 满足超低排放要求。

5. 结论

1. 本文首创“动态阻抗波形融合诊断 + 分数阶 PID 自适应控制 + 分布式监测架构”三位一体的技术体系, 有效解决了火电厂电除尘高频电源谐振电容在线检测难题, 实现了从“事后维修”向“事前预警”的转变。

2. 所提方案已在实际工程中验证, 显著提升了高频电

源的运行可靠性与电除尘效率, 电容故障率下降 805%, 维护成本降低 40%, 具备良好的经济与环保效益。

3. 系统通过 GB/T7595《运行中变压器油质量》标准下的绝缘强度与耐压测试, 兼容现有分体式高频电源改造, 具备广泛的推广应用价值。

4. 本研究成果可为《环境工程》《电力系统自动化》《高电压技术》等国内核心期刊提供技术创新范例, 也为火电厂智能化运维体系建设提供了可复制的技术路径。

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, 42(3):215219.
- [2] 仇家胜, 张代润, 王志峰. 基于分数阶 PID 的高频除尘电源控制 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12):102107.
- [3] 钟和清, 徐至新, 陈坚. 寄生电容对谐振电容充电特性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14):5459.
- [4] 陈颖. 谐振电流过零信号检测设计 [C]// 中国电除尘学术会议论文集. 2011:8892.
- [5] 李志刚, 王伟. 基于谐振软开关的静电除尘电源控制研究 [D]. 华中科技大学, 2025.
- [6] GB/T75952017, 运行中变压器油质量 [S].
- [7] Liu Y, Wang H, Li Z. Fractional order control in power electronics: A review [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6):50235035.
- [8] Zhang X, Chen Y. Online condition monitoring of DC link capacitors in power converters: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134:110326

作者简介: 李宏元, 男, 1991 年 1 月生, 甘肃省武威市凉州区人, 本科学历, 工程师, 汉族, 从事火电厂电气设备检修维护及电气专业管理工作。