

基于高频电源的电除尘器节能减排研究与探讨

刘宇芳^{1,2}, 陈祥¹, 姜斌², 易辉³

(1.南京国电环保设备有限公司, 江苏 南京 210061;

2.南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016;

3.南京工业大学自动化与电气工程学院, 江苏 南京 211816)

摘 要: 针对电除尘器对高压供电电源的节能减排技术要求, 南京国电环保设备有限公司研制了 HF-01 型新一代高频电源, 并在国内多个燃煤电厂成功应用。相比传统工频电源, HF-01 型高频电源节能减排效果显著, 带来了巨大的经济利益和社会效益, 推进了燃煤电厂的可持续发展。

关键词: 高频电源; 电除尘器; 节能减排; 经济效益

0 引言

我国工业锅炉大多采用电除尘器收集粉尘, 其所配套的高压整流电源对电除尘器的除尘效率有着重大影响。目前采用的常规工频电源, 通过多年发展已相当成熟, 其除尘效率及节能效果可提升空间较小。面对日益严格的国家环境保护政策, 如何选用创新性技术实现节能减排成为电除尘器领域技术工作者面临的重要课题和研究热点。

近 10 年来, 随着电力电子和高频逆变技术的快速发展, 高频电源逐步投入电厂运行并以除尘效率高、系统节能效果好、输出纹波小、占用空间少等优点取代常规工频电源, 稳步成为电除尘器领域产业的重要标志, 带来了可观的经济效益。

然而, 我国实现电除尘器供电电源的高频化仍存在较多技术困难。针对我国电除尘器行业现状, 1200mA 以上高频电源的研制开发是当前面临的重大挑战, 也是高频电源产品实现高效运行和获得市场认可的关键。

为推进我国环保产业积极、健康地向前发展, 南京国电环保设备有限公司在大量工程现场试验和技术理论分析的基础上, 于 2008 年成功研制出 HF-01 型新一代高频电源产品, 设备容量从 1200mA 稳步推进至 2000mA, 形成了系列化绿色能源产品。该系列高频电源能够在有效除尘的基础上, 实现除尘系统的大幅节能, 是首例在 300MW、600MW、1000MW 燃煤机组上获得成功应用的国产高频电源。HF-01 型高频电源在实际工程中体现出优秀的现场适应性和可靠性, 其突出的节能效果推进了我国电除尘器供电电源的高频化和国产化进程, 同时

该类电源的广泛运用, 也为电除尘器的节能减排提供了一条新的有效途径。

1 高频电源技术优势

电除尘器通过电能消耗实现除尘效果, 为提高电除尘器效率并降低功耗, 除改进电除尘器电场本体结构外, 高压供电电源是影响电除尘器性能的重要因素^[1]。高频电源对电除尘器性能的改善主要体现在大幅节能和除尘效率提高两个方面。

1.1 节能原理

传统工频电源根据电除尘器电场工况变化调整导通角, 使输出电压始终跟踪在略低于火花闪络电压下运行, 输出电压电流高^[2]。相比于工频电源“大功率高能耗”的工作方式, 电除尘器高压电源通过两个主要途径实现系统的节能: 一是提高转换效率, 二是大幅减少电场的无效电能。

从转换效率角度分析, 工频电源转换效率一般为 75%, 中频电源效率一般可做到 85%, 高频开关电源效率可做到 90% 以上, 高频电源比工频电源固有能耗降低约 20%, 节能指标明显直观。

根据美国学者怀特对电除尘捕集粉尘所需能量的理论研究, 粉尘荷电后克服空气阻力向极板运动, 最后被吸附在极板上, 所需的能量是很小的。其中绝大部分电能电场内部做了无效的空气电离, 白白浪费掉^[3]。大量理论和工程试验证明, 采用高频电源脉冲方式供电, 可以大幅增强烟尘的荷电量, 减少电场内部的无效电能, 降低电除尘器高压电源能耗约 40%~80%。

1.2 提效原理

常规工频电源峰值电压和平均电压相差较大,

若在谷点电压发生闪络，则输出电流会大大减小。而高频电源接近纯直流输出，保证了输出峰值电压与平均电压基本保持在同一数值，提高了供电电压，从而提高除尘效率，高频电源供电波形如图 1 所示。

高频电源可实现纯直流和间歇供电，输出电压可控。相比工频电源只能获得单一的 50Hz 或 100Hz 波形，对电除尘器高比电阻粉尘的工况除尘减排效果很差。高频电源则可根据不同需要，获得各种电流和电压波形，提高粉尘荷电效率和粉尘迁移速度，有效抑制反电晕，对电除尘器高比电阻粉尘的工况除尘减排的效果非常明显，高频电源可减少粉尘排放量 30%~80%^[4]。

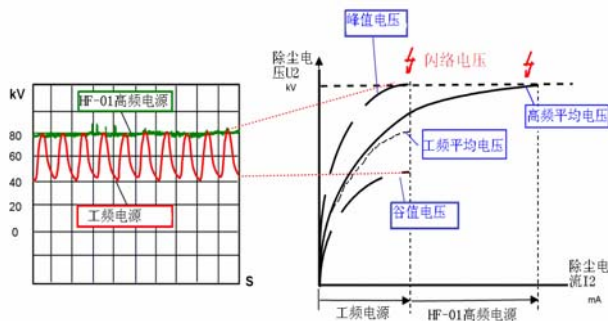


图 1 高频电源供电波形

1.3 工作原理

高频电源一般由输入整流滤波、谐振变换电路、升压整流输出及控制系统四个部分构成，其结构组成如图 2 所示。

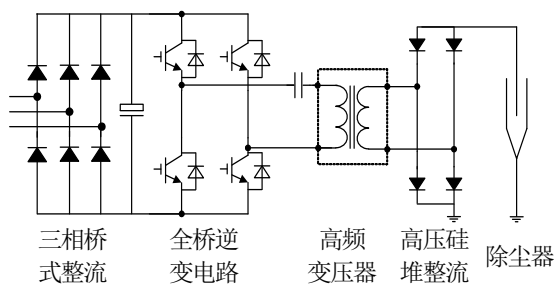


图 2 高频电源电路结构

传统工频电源采用单相工频交流电源，经可控硅移相调压后送至整流变压器升压整流，然后形成 100Hz 脉动电流送至电除尘器^[5]。

高频电源技术则是把三相工频电源通过整流形成直流电，采用逆变电路形成高频交流电，再经整流变压器升压整流后形成高频脉动电流送除尘器，其工作频率范围在 20kHz~50kHz。高频电源供电频率的提升，有效提高了平均工作电压，同时降低了

电能损耗。

高频电源的优越特性，提高了电除尘器整体性能，提升了电除尘器与袋式除尘器的竞争力，具有重要的现实意义。此外，电除尘器对高压供电设备进行改造，与电除尘器本体改造相比，只需较少的经费即可达到目的，无需停产和另增空间，是达到环保节能要求的最佳选择。

2 HF-01 型高频电源关键技术

高频电源的重点技术主要体现在主回路设计、控制系统设计、高频升压变压器特性、散热性能处理这几个方面。

2.1 串联谐振主回路设计

高频电源串联谐振逆变电路的频率变换，主要取决于谐振电容电感的选择。HF-01 型高频电源采用全桥串并联谐振变换器设计，充分利用电路中的寄生参数，使高频升压变压器的漏感和分布电容分别作为谐振电感和并联谐振电容，并与外加的串联谐振电容一起组成逆变回路，减少了元器件的数量，使设备更加小巧。

同时，采用全桥串并联谐振变换器，一方面可以实现开关管的零电压开关或零电流开关，减小 IGBT 开关损耗，减少 IGBT 温升；另一方面，可以减少进入高频升压变压器的高次谐波，减少了变压器的损耗。

2.2 控制技术

HF-01 型高频电源控制系统采用 TMS320F2812 数字信号处理器作为核心控制器，具有速度处理快、可靠性高等优点，是实现电除尘器系统的综合控制和最佳设计选择。控制系统具备功能模块如下：

- (1) 火花闪络检测控制
- (2) 驱动信号发生
- (3) 高速数据采集运算
- (4) 完善的故障保护和报警
- (5) 远程通讯

该电源采用 PWM (脉冲宽度调制) 和 PFM (脉冲频率调制) 混合调制方式，主回路串联谐振，构成恒流器。以 PFM 控制为主，以 PWM 控制为辅，由控制系统根据电除尘器电场工况自动调节输出电压、电流，确保设备始终处于最佳运行状态。

根据现场试验总结，控制系统还设计了浊度自动反馈控制、锅炉负荷自动反馈控制、降压振打、停电振打等功能供用户选择，进一步提升了电源的

运行稳定性和高效性。

2.3 高频升压变压器

高频高压变压器是高压直流电源的关键组成部分，它的优劣直接决定了整个电源系统的性能。它的设计与普通电源中的变压器设计有很大的不同，因此设计高压变压器时必须关注以下 2 个方面。

(1) 磁芯的选取。超微晶材料几乎综合了所有非晶态合金的优异性能：高初始磁导率、高饱和磁感应强度、低矫顽力，低比损耗以及良好的温度稳定性，是大功率开关变压器磁芯的理想材料。因此，本电源选择超微晶材料作为高压变压器的磁芯材料。

(2) 本电源系统中使用油浸式变压器，即将磁芯与绕组浸入变压器油箱里的绝缘油中。绝缘油的比热大，具有较好的冷却作用，变压器运行时，磁芯和绕组产生的热量使其附近的油受热膨胀上升，通过油的上下对流，热量由变压器油箱散热片散出，保证变压器正常运行。同时，绝缘油有很好的电气绝缘性能,它能增加绕组相互之间、绕组与磁芯之间、绕组与变压器油箱外壳之间的绝缘强度。

2.4 散热处理

高频电源的散热设计与电气绝缘性能对能否保持性能稳定、提高工作寿命有显著的影响作用，尤其是高频升压变压器的温升、逆变模块的温升及电子元器件的温升等。

高频电源的常见散热方式有两种：风冷（如 NWL 公司高频电源产品）和液体冷却（如 Alstom 公司高频电源产品）。工程实践表明，采用风冷方式更有利于设备的现场应用和后期维护。

HF-01 型高频电源采用轴流风机强迫风冷方式与散热风道相配合，实现设备在额定输出功率方式下，变压器油温温升、逆变回路各模块温升均小于 30℃，提高了设备的环境适应能力和稳定性。

3 工程验证

目前，国内多家燃煤电厂采用了 HF-01 型高频电源对电除尘器电源装置进行改造，充分挖掘电除尘系统的潜力，在成本、效率最优的情况下实现高效减排和大幅节能。结合上海外高桥第三发电有限责任公司等燃煤机组电除尘器的工程应用实践，探讨高频电源技术改造必要性和经济效益体现。该工程实践为国产高频电源在 1000MW 机组上的首例成功应用。

3.1 改造背景介绍

上海外高桥第三发电有限责任公司总装机容量 2×1000MW，其中 8 号机组每台配备了 2 台德国 Rothemüle 公司设计、浙江菲达环保科技有限公司制造的三室四电场的静电除尘器。

8 号机组电除尘器在技术改造前，其烟尘出口浓度均小于 50mg/m³，不能满足 GB13223-2011 的要求。日常运行期间，电除尘器高压供电电源总功耗约 1400kW，能耗较高，不能满足电厂的经济运行要求。因此，外高桥第三发电有限责任公司采用 HF-01 型高频电源对电除尘器高压供电系统进行改造，旨在大幅降低电能消耗的同时进一步提高除尘效率。

3.2 节能减排改造优化结果

根据华东电力试验研究院对改造前后的电除尘器能耗、除尘效率的测试结果，在机组满负荷（1000MW）情况下，与工频供电相比，电除尘器高压供电功耗下降 71.8%，电除尘器出口烟尘排放浓度 15.8mg/m³，除尘效率达 99.79%。采用高频电源改造前后的电场出口烟尘排放浓度及功耗情况详见表 1 和图 3（图表中，HF-01 型高频电源简写为‘高频电源’）。

表 1 工频供电与高频电源供电下电除尘器性能比较

电源类型	除尘效率(%)	出口排放浓度(mg/m³)
工频电源	99.67	24.25
高频电源	99.79	15.8

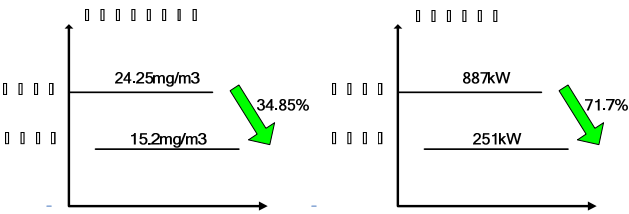


图 3 工频供电与高频电源供电下电除尘器性能比较

高频电源技术改造后，在日常混烧煤种情况下，电除尘器出口烟尘浓度仍保持在 10~23mg/m³，电除尘器高压电源能耗基本在 212~238kW。随着负荷和煤种的波动，电除尘器出口烟尘排放浓度维持稳定，高频电源对煤种具有非常好的适应性。电除尘器的烟尘排放在经过根据国家环保部门及行业普遍认可的脱硫吸收塔(烟尘脱除效率为 40%~50%)后，实际烟尘排放浓度仅在 10mg/m³左右，不能满足 GB13223-2011 环保新标准，在世界范围内也属于先

进水平。

3.3 节能减排环保效益分析

根据 8 号 1000MW 机组电除尘器采用高频电源改造后运行数据分析计算得出：日常运行工况下，电除尘器出口烟尘平均排放浓度由改造前的 $42\text{mg}/\text{m}^3$ 下降至 $17\text{mg}/\text{m}^3$ ，烟尘减排率达到 59.5%，每年烟尘减排量可达 562 t，环保效益非常明显，见表 2。

表 2 工频供电与高频电源供电下烟尘排放情况比较

测试项目	工频电源	高频电源
出口烟尘浓度(mg/m^3)	42	17
烟尘排放量(kg/h)	120	51
年烟尘排放量($\text{t}/\text{年}$)	900	383
改造后减排率/%	--	59.5
年烟尘减排($\text{t}/\text{年}$)	--	562

3.4 节能减排经济效益分析

如果以 8 号机组日常年运行 7500 h 计算，采用高频电源改造后的年节电量达 477 万 kWh，相当于节约标准煤 1500 t，折合每年减排 3500 t CO_2 、15 t NO_x 和 30 t SO_2 ，见表 3。按现行平均电价 0.4 元/(kWh) 计算，每年可节约费用 190 万元，在取得环保效益的同时经济效益十分可观。

表 3 8 号炉电除尘器高频电源改造后经济效益评估

测试项目	工频电源	高频电源
电场总功耗(kWh/h)	887	251
功率因数	0.65	0.90 以上
年总用电量($\text{kWh} \times 10^4/\text{年}$)	665	188
节能/%	--	71.7
年节电量($\text{kWh} \times 10^4/\text{年}$)	--	477
年节电收益($\text{万元}/\text{年}$)	--	190

4 结论

为深化国家节能减排工作要求，南京国电环保设备有限公司采用创新性节能减排技术，并结合优秀的控制系统设计，实现了 HF-01 型新一代高频电源的自主研制。采用该电源进行燃煤机组的电除尘器电源装置改造，能够在保证除尘效率的前提下，大幅降低电除尘器能耗，实现经济效益与环保效益和谐发展，确保了烟尘排放系统满足《火电厂大气污染物排放标准》。

目前，HF-01 型高频电源在国内已有多家燃煤电厂的工程应用实例，如国电蚌埠发电有限公司，国电永福发电有限公司，上海吴泾第二发电有限公司等。电除尘器使用高频电源后均达到了良好的除尘效果，在工程实际中验证了采用该新型电源实现电除尘器节能减排的可行性与有效性。

参考文献：

- [1] 胡志光. 电除尘器运行及维护[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [2] 高维英,傅启文,卢泽锋. 电除尘器高频电源提效节能探讨[J]. 华电技术, 2008, 30(6): 1-4.
- [3] 陈沫,周元龙. 基于效率的电除尘电源节能改造分析及应用[J]. 中国电力, 2008, 41(9): 61-64.
- [4] 孙广鹏,张传成,孙更生. 电除尘节能技术探讨与研究[J]. 电力通用机械, 2009(1): 77-79.
- [5] 张滨渭,祁君田,林心光. 燃煤电厂电除尘器节电技术研究[J]. 电力设备, 2007, 8(6): 42-46.

作者简介：

刘宇芳（1983—），女，博士生，工程师，主要从事电除尘器高频电源节能减排技术研究、控制系统设计等，
E-mail: lyf_gdhh@163.com。