

电除尘器三相工频电源改为高频电源的技术探讨

张荣发, 皋德华

(江苏射阳港发电有限责任公司, 江苏 盐城 224300)

摘 要: 最新颁布的 GB13223-2011 《火电厂大气污染物排放标准》, 对燃煤电厂的烟尘排放浓度作出了更为严格的限制, 重点地区烟尘排放标准由 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 改为 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。目前, 许多火力发电厂已投运的电除尘器很难达到此标准。针对上述问题, 通过几种提高电除尘效率的方法进行对比, 介绍高频电源的工作原理, 分析高频电源替代传统的工频电源方案的可行性, 并以基建实例简要的介绍工频电源改为高频电源改的方案, 实现节约基建成本, 达到节能减排。

关键词: 除尘效率; 高频电源; 改造方案; 节能减排

1 电除尘器工作原理

电除尘器广泛应用于火力发电、水泥、冶金等行业去除烟气粉尘的主要设备, 我国燃煤电厂使用电除尘器已很普遍, 采用静电除尘器的锅炉占总量的 95% 以上。

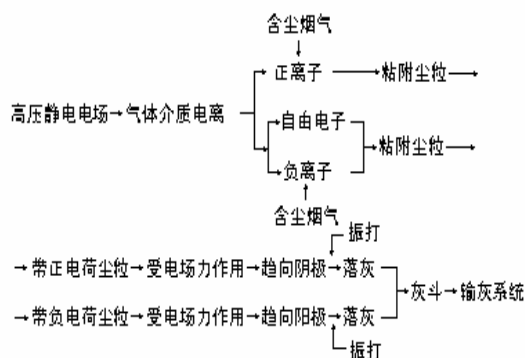


图 1 电除尘除尘原理流程图

电除尘器基本原理是电场接通高压电源后, 阳极板与阴极线 (电晕极) 之间建立一个非均匀的高压静电场, 且电晕极周围电场强度最大。当实际电场强度与空气的击穿电场相近时, 从阴极线与接地的阳极板之间通过的含尘气体, 由于阴极发生电晕放电被电离, 形成大量的正离子和电子, 此时, 在电场力的作用下, 带负电的气体离子向阳极板运动, 在运动的过程中与粉尘中性分子或颗粒发生碰撞, 使尘粒带负电, 荷电后的尘粒在电场力的作用下向阳极板运动, 到达阳极后, 放出所带电子, 尘粒则沉积于阳极板上, 当尘粒积聚到一定厚度时, 通过振打装置的振打, 尘粒从阳极板表面剥离下来, 落

入灰斗, 净化后从烟囱排出^[1]。其原理流程图 1 所示。

2 电除尘器性能影响因素

影响电除尘器性能的因素比较复杂, 但大体上可以分为以下四大类:

(1) 粉尘特性影响, 包括粉尘粒径分布、真密度和堆积密度、黏附性、比电阻等。

(2) 含尘气体性质的影响, 包括含尘气体的流量、流速、浓度、温度和湿度。

(3) 结构因素的影响, 包括电极几何因素、结构特点、振打方式及振打力大小、气流分布的均匀性及电场分布等。

(4) 操作因素的影响, 包括操作电压、振打周期、粉尘二次飞扬, 电晕线肥大等^[2]。

粉尘特性、含尘气体可通过控制锅炉设计燃烧的煤种来控制; 操作因素可通过控制方式设定及对人员培训进行控制; 但结构因素是无法更改的, 要提高除尘效率, 只有对硬件设施进行改造。

3 提高电除尘器效率的几种方法及优缺点

对于在役或已选型的电除尘器, 提高电除尘除尘效率, 大体上有以下几种改造方法:

3.1 电除尘器本体改造

(1) 电除尘器本体增加电场: 在原电场基础上, 靠增加静电除尘器的收尘面积、增加串联的电场数量来提高除尘器效率。该方案优点在设计煤种或煤种相差小的情况下提高效率较为可靠、宽裕量较大;

缺点是燃烧煤种限制、受场地、输灰系统出力的限制、一次性投资较大。

(2) 电除尘器本体改为袋式除尘器：袋式除尘器也称为过滤式除尘器，其作用原理是尘粒在绕过滤布纤维时因惯性力作用与纤维碰撞而被拦截。优点是不受煤种限制都能达到排放标准；缺点是电耗及年维护费用、维护量大、改造工作量大。

(3) 电除尘器本体改造为电袋除尘器：电袋复合除尘器是一种新型的除尘装置，从形式上又可分为一体式与分体式，其第一级为电除尘器，后面一级为脉冲袋式除尘器。基本原理是先用电除尘器除去 80%~90% 的粉尘，降低烟气的含尘量，然后利用布袋除尘器除去烟气中残余 10%~20% 的微细粉尘^[3]。集电除尘器与袋式除尘器优点于一体，能可靠保证达标排放。缺点是年维护费用、维护量大，对场地也有一定的要求。

(4) 电除尘器末级电场改造为旋转电极式：该除尘器一般使用在电除尘器末级电场，阳极部分采取回转的阳极板和旋转的清灰刷，旋转阳极板在驱动轮的带动下缓慢上下移动，粉尘在收尘区域被收集，附着在极板上的粉尘随极板运动到非收尘区域，被正反二把施转清灰刷刷除，粉尘直接落于灰斗中^[4]。优点是避免二次扬尘、不会产生反电晕、不受场地限制、改造费用及工作量较低；缺点是应用业绩较少（包头第一热电厂，300MW 机组），600MW 及以上机组无业绩，是否实用于大机组有待考验。

3.2 调整或改变烟气物理特性

(1) 电除尘器首端加装微粒聚合器：该技术也是一种创新技术，原理是在烟气进入电除尘器前，先采用正、负高压对其进行分电荷处理，将一些小颗粒粉尘有效聚合，形成大颗粒后进入除尘器^[4]。优点是可显著减少烟尘总质量及 PM_{2.5} 颗粒排放；缺点目前只在实验室进行实验研究，无实际应用业绩，同时受烟道长短的限制。

(2) 低低温除尘技术：其原理是在烟气进入电除尘器前，设置热回水装置，使得电除尘器的运行烟气由 130℃ 温度降到约为 90-100℃ 左右，从而使除尘性能提高^[5]。优点是可有效的防止反电晕，同时温度降低后烟气流速也降低，烟气在除尘器内停留时间增加，可以有效的对烟尘进行捕捉；缺点是国内大型机组无实际使用业绩，对整个烟道的改造量也较大。

3.3 新电源技术

电源是电除尘装置的核心部分，为电除尘提供所需的提供所需的高压电场，其性能直接影响除尘效果和效率。传统电除尘器供电电源普遍采用工频可控硅电源，高频电源作为一种创新技术，在实际运用中取得较好的效果。高频电源输出电压波纹通常小于 5%，几乎是平稳的纯直流，运行平均电压为工频电源的 1.3 倍，供电电流由一系列窄脉冲构成，其脉冲幅度、宽度及频率均可以调整，可根据电除尘器的工况提供最合适的电压波形，提高电除尘器的除尘效率，提高供电效率，节约电能。优点是不改变电除尘本体结构，只须将工频电源更换为高频电源装置即可，投资较小，改造工期短。

通过以上几种方案，结合我公司#5 炉电除尘已投运，#6 炉电除尘器已选型及场地限制等因素，确定将#6 炉电除尘器使用高频电源替代工频电源，以提升电除尘器的除尘效率。

4 高频电源原理及主要特点

4.1 高频电源原理

传统的电除尘器供电电源普遍采用工频可控硅电源，其电路结构是两相工频电源经过可控硅移相控制幅度后送整流变压器升压整流后形成 100Hz 的脉动电流送除尘器。高频电源是把三相工频电源通过整流形成直流电，通过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，其工作频率在 20kHz 左右。工频电源与高频电源工作原理如图 2 所示。

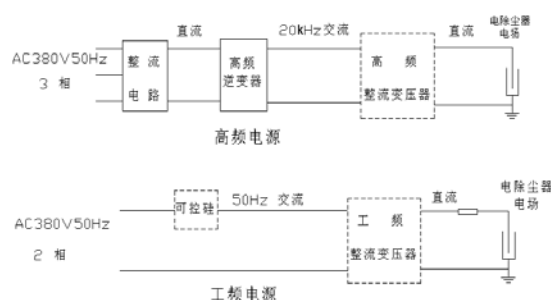


图2 工频电源与高频电源工作原理图

4.2 高频电源的主要特点

南京国电环保设备有限公司生产的HF-01 型高频电源 660MW 以上机组使用业绩较多，故以 HF-01 型高频电源^[6]为例说明其特点：

(1) 与工频电源相比，高频电源可增大电晕功

率，增加电场粉尘的荷电效果。高频电源在纯直流供电方式时有着更小的电压波动 1%（工频电压波动>30%），更高的电晕电压（可达到工频电源二次电压的 130%），更大的电晕电流（峰值电流是工频电源二次电流的 200%）。工频电源与高频电源二次电压、二次电流比较如图 3 所示。

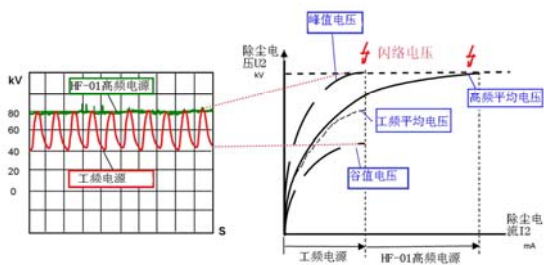
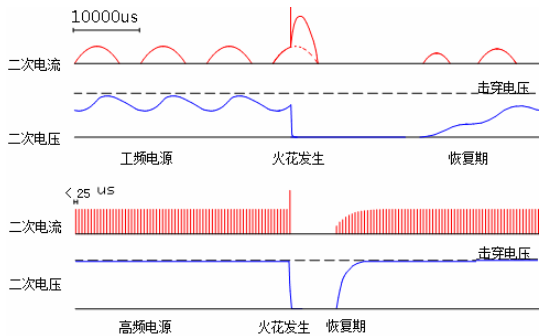
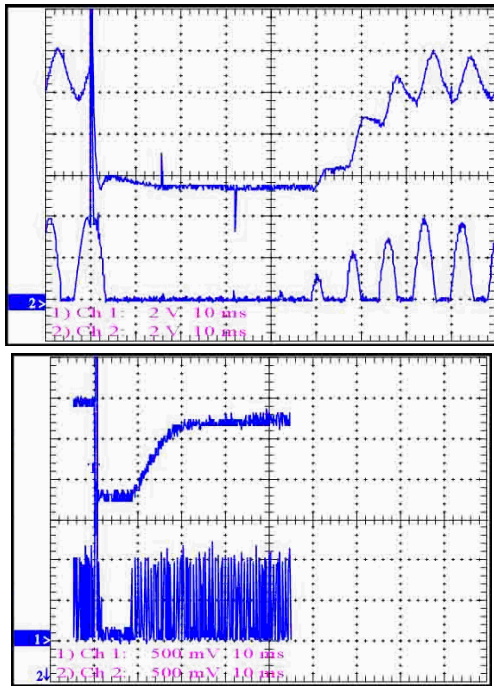


图 3 工频电源与高频电源二次电压、电流比较图



(a) 工频电源与高频电源供电波形比较



(b) 工频电源和 HF-01 高频电源火花后恢复供电对比

图 4 工频电源与高频电源供电波形及发生火花后恢复供电对比

（2）与工频电源相比，高频电源的火花控制特性好，仅需很短时间（<25 μ s，而工频电源需 10000 μ s）即可检测到火花发生并立刻关闭供电脉冲，因而火花能量很小，电场恢复快（仅需工频电源恢复时间的 20%），从而进一步提高了电场的平均电压，同等条件下可提高除尘效率达 40%—70%。工频电源与高频电源供电波形及发生火花后恢复供电对比如图 4 所示。

（3）与工频电源相比，高频电源的供电电流由一系列窄脉冲构成，其脉冲幅度、宽度及频率均可以调整，可以给电除尘器提供各种电压波形，控制方式灵活，因而可以根据电除尘器的工况提供最合适的电压波形。间歇供电时，可有效抑制反电晕现象，特别适用于高比电阻粉尘工况。高频电源转化效率>92%，功率因数>0.92（工频电源的效率<80%，功率因数<0.8），仅电能利用效率上就比工频电源节能 20%以上。其独特的节能控制模式，在保证除尘效率不变的情况下，与工频电源相比节能幅度高达 50—80%以上。不同供电模式供电波形对比如图 5 所示。

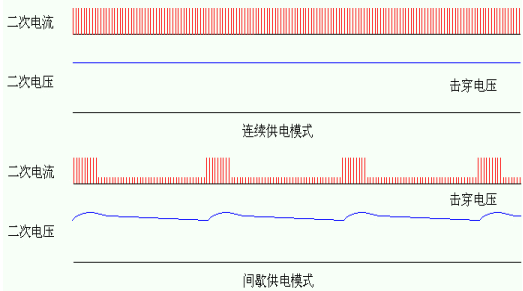


图 5 不同供电模式供电波形对比

（4）一体化设计、体积小、重量轻、安装方便、无需控制室、减少电缆用量。高频电源的配电系统、控制系统、高频整流变压器及振打、加热控制系统集成在一个箱体内，可节省配电室空间，总重量只有工频电源的 1/4。可节省动力、控制及信号电缆，减少安装费用。

表 1 工频电源与高频电源性能对比

参数	工频电源	高频电源
输出电压 U ₂ 脉动	30%	1%
供电频率	50Hz	20kHz
运行模式	少	多种模式
火花熄灭时间	10000 μ s	25s
对电场环境的适应性	一般	好
电源效率	< 80%	> 90%
功率因数	< 80%	> 92%
电源体积、重量	大	小 (1/4)
电源相数	两相 不平衡	三相平衡
控制电路	简单	复杂

综上所述,高频电源性能优势明显,其与工频电源性能对比如表1所示。

5 案例介绍

高频电源在 600MW 以上机组已有成功应用业绩,南京国电环保有限公司生产的 HF-01 型高频电源在国电蚌埠发电有限公司(600MW 机组)、上海外高桥第三发电厂(1000MW 机组)、江苏国信扬州第二发电厂(600MW 机组)等安装投运。以 2012 年 1 月改造的江苏国信扬州第二发电厂 1#炉为例,介绍其改造前后效果。

扬州第二发电厂#1 锅炉本体是浙江菲达环保科技股份有限公司制造的 2FFA4×45M-4×72-145 (2F18-4) 型双室四电场静电除尘器,四个电场共用 HF-O1 型 1.6A/72kV 高频电源 16 套,经江苏方天电力技术有限公司测试,改造后测试结果如表 2 所示。

表 2 #1 炉由工频电源改为高频电源后效果测试

名称	工频电源	高频电源
运行方式	节电模式	节电模式
除尘效率/%	99.4	99.74
烟尘排放/(mg/m ³)	84.7	46.3
高压能耗/kVA	312.914	120
汽机负荷	606MW	609MW

通过表 2 数据计算, #1 炉除尘器的除尘效率同比提高了 0.34%, 烟尘排放由原先的 84.7 mg/Nm³ 降低到 46.3 mg/Nm³, 减排烟尘 45.3%, 高压电能损耗减少 61.7%。

6 #6 炉改高频电源可行性分析

江苏射阳港发电公司机组容量、电除尘器本体与扬州第二发电厂基本相同, #5 机组目前已投运, 江苏方天电力技术有限公司#5 炉电除尘测试表明: 机组负荷 660MW 下阻力 170.3Pa, 漏风 0.64%, 除尘器进口甲、乙侧平均标态浓度为 19323mg/m³、脱硫出口标态浓度 44.1mg/m³, 根据脱硫岛具有 50% 除尘效果的共识, 推算除尘器出口粉尘排放浓度应在 88.2 mg/Nm³ 左右; 对比扬二厂减排烟尘 45.3%, 保守预测改高频电源后排放浓度降低 40% 左右(相比工频电源), 预计除尘器出口粉尘排放浓度在 52.92 mg/Nm³ 左右, 脱硫后排放为 26.46 mg/Nm³, 满足烟尘排放低于 30mg/Nm³ 要求; 在同等级除尘效率的基础上, 电除尘器运行功耗(高压部分)相比 5#炉除尘器, 保守预测可降低 50% 左右, 有效降低

厂用电率。故将在建的#6 炉电除尘工频电源改为高频电源是可行的。

7 #6 炉高频电源改造方案及经济效益

7.1 工频电源电除尘器配置

江苏射阳港发电公司#5 炉(在役)、#6 炉(在建) 本体为浙江菲达环保有限公司生产的 2F4×40M-2×88-150 型双室四电场卧式除尘器; 电源为工频电源, 控制部分为 ALSTOM EPIC-III 高、低压合一控制柜, 共计 16 面柜; 硅堆变压器型号为 ZZDJ02-2.0/72, 一次电压 380V(单相), 二次电压 72kV, 输入功率 123kVA。通过以太网交换机将 16 台 EPIC-III 控制器相连控制 16 电除尘供电分区。其网络拓扑如图 6 所示。

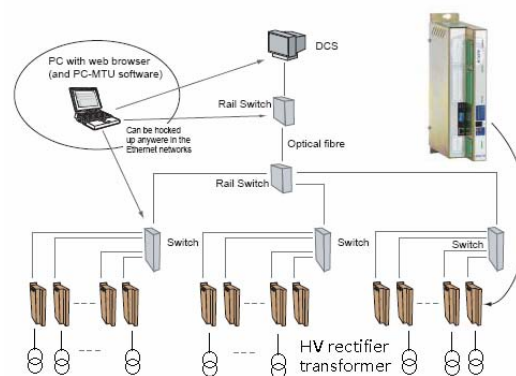


图 6 改造前工频电源网络拓扑图

7.2 改造方案

(1) 保留部分: 电除尘本体及附属的振打、加热等就地设备仍保留。

(2) 取消部分: 16 面控制柜及硅堆整流变压器; 工频电源电缆清册中所列的 48 根(16 个电场, 每电场 3 根) ZRC-YJV22-1-2×150 动力电缆计 6758m; 80 根 ZRC-KVVP2-1-4×2.5 信号电缆 12000m; 因通讯方式不兼容取消原上位机系统。

(3) 增加部分: 从粉尘的收集情况角度来考虑, 一般电除尘第一电场除尘近 80%, 第二电场 10%, 第三电场 6%, 第四电场 4% 以下的共识, 并从本体容量及实际使用负荷来讲, 结合扬二厂改造经验, 我公司在一电场采用 HF-O1 型 1.6A/72kV 高频电源, 第二、三、四电场采用 HF-O1 型 1.4A/72kV 高频电源; 增加工频电源分配柜一面, 16 根 ZRC-YJV22-1--3×95 动力电缆计 2300m。增加一套新上位机系统, 通过以太网直接将 16 台高频电源相

连控制 16 个供电分区。改造后网络拓扑如图 7 所示。

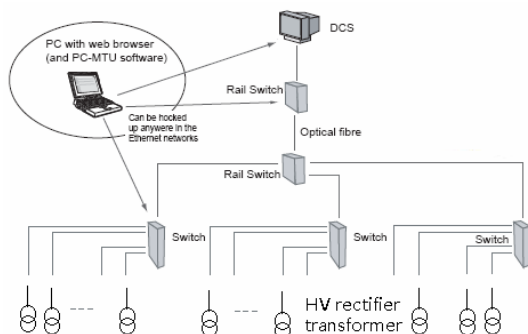


图 7 改造后高频电源网络拓扑图

7.3 经济效益

(1) 节省了基建成本：同等条件下，无论改造或新建项目，减少了电缆用量：以 2012 年 12 月电缆招标价例，ZRC-YJV22-1--2×150 电缆 0.01528 万元/m，6758m 电缆总价 103.26 万元，ZRC-YJV22-1--3×95 电缆 0.01448 万元/m，2300m 电缆总价 33.304 万元，动力电缆节省 70 万元左右；ZRC-KVVP2-1--4×2.5 电缆 0.000846 万元/m，12000m 电缆可节省 10.15 万元。

(2) 避免了投资浪费：我公司#6 机组电除尘器电控设备原选型是工频电源，改高频电源后，与原合同单位磋商，变更电控部分合同，将原电控设备资金改高频电源，同时根据每电场粉尘的收集情况及本体容量，合理的选择各电场高频电源的容量，只增加三分之一费用（涉及商业秘密），避免了投资浪费，节省了基建资金。

(3) 改造后经济效益预测：依据可行性分析结果，保守点预测改高频电源后排放浓度降低 40% 左右，烟囱出口烟尘排放浓度有望达到 26.46 mg/Nm^3 左右，环保效益明显；电除尘器运行功耗（高压部分）降低 50% 左右，以#5 机组电除尘 2012 年 1-12 月消耗电能 7554968 kWh ^①，上网电价按 0.4 元/kWh 计算，每年该机组电除尘可节约运行电费约 151.09 万元，几年可以收回全部投资，节能效果明显。

(注：数据来源于射阳港发电公司计划部 2012 年度每月主要辅机电消耗率。)

8 结束语

(1) 采用电除尘创新技术可大幅提高除尘效率，降低能源消耗，高频电源、电袋除尘器等新技术为电除尘实现 30 mg/Nm^3 及更严格的粉尘排放创造了有利条件，也适应建设环保节约型社会需求。

(2) 高频电源取代工频电源是一种发展趋势，新建电除尘选用高频电源，可节省土建、电缆等基建成本，降低电能损耗效果明显，短周期内即可收回投资。在改造方面，不受场地限制，也是优越性之一。

(3) 因除尘效率提高，收尘量大，应核实出灰能力是否能匹配。

参考文献：

- [1] 原永涛.火力发电厂电除尘技术[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [2] 舒服华.提高电除尘器除尘效率的途径[J].冶金设备,2008(S2):40-44.
- [3] 魏继平, 张永红.电袋除尘应用有关问题探讨[J].山西电力, 2009 (S1): 32-34.
- [4] 王剑波.适应低排放的电除尘技术探讨[J].电力科技与环保, 2012, 28 (1): 25-26.
- [5] 姜雨泽, 宋雨杰. 火电厂除尘技术的发展动态研究[J].环境科学与技术, 2008, 38 (8): 59-64.
- [6] 王强, 曹为民.HF-01 型电除尘高频电源宣[EB/OL].<http://wenku.baidu.com/view/3c1bfd8d680203d8cf2f2405.html>. 2011-11-30.

作者简介：

张荣发（1965-），男，江苏盐城人，工程师，从事电厂基建和设备维护管理工作。