

电除尘器电控提效节能技术在大唐国际吕四港发电公司的应用

刘效东, 董志江, 范玉军

(江苏大唐国际吕四港发电公司, 江苏 启东 226246)

摘 要: 电除尘器运行效果依赖于本体和电控系统的有效配合, 当本体正常运行时, 电控系统对除尘器的运行效果起着决定性作用。本文结合吕四港电厂 3、4 号机组电除尘电控设备提效节能的改造实例, 介绍了高频电源技术、提效节能控制技术在现场的应用。

关键词: 电除尘器; 高频电源; IPEC 控制系统; 提效节能

0 引言

近年来, 国家在大气污染防治和节能减排方面的工作力度持续加大。面对日趋严格的大气污染物排放标准和严峻的节能减排形势, 电除尘器如何提高除尘效率和降低运行能耗已成为发电企业面临的实际问题, 同时“挖掘内部潜力, 降低发电成本, 争取更大利润”也是每一家发电企业面临的迫切任务。

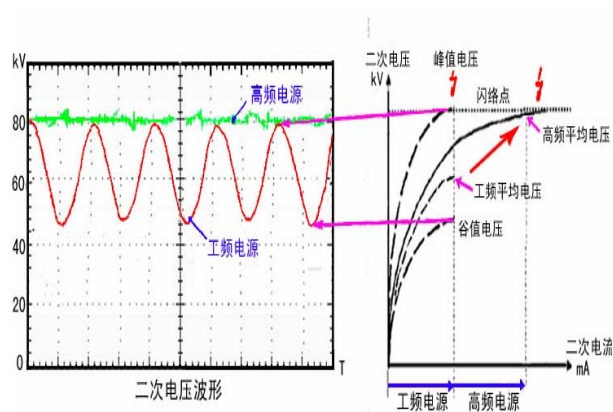
众所周知, 电除尘器是燃煤电厂的最主要烟气净化设备, 具有处理烟量大、除尘效率高、运行稳定可靠、维护费用低等优点。电除尘器运行效果依赖于本体和电控系统的有效配合, 当本体设备正常时, 电控系统技术水平的高低就尤为重要, 尤其在电除尘的提效节能方面, 先进的电源配置技术及科学有效的优化控制技术起着关键性的作用。吕四港电厂#3、4 机组装机容量为 660MW 国产超超临界燃煤机组, 除尘设备本体为静电除尘器, 电控配套 20 台高压设备、4 台振打/加热控制设备及 1 套上位机系统, 阴阳极采用侧部电机振打, 保温箱和灰斗采用恒温控制电加热。运行性能正常, 2013 年初委托江苏省电科院进行电除尘器性能测试, 出口烟尘排放浓度为 55.1 mg/m^3 , 基本符合安装时的设计标准要求, 但无法满足“十二五”环保要求的排放标准。为了#3、4 炉电除尘器稳定达标排放, 就必须进行技术升级改造, 通过多方调研考察, 参考各种可研改造方案, 最终选择高频电源等提效节能改造方案。

1 提效节能型电控系统简介

在电除尘器运行过程中, 除尘效率与电晕功率有着直接的关系, 一般情况下, 电晕功率越高, 除

尘效率越高, 吕四港发电公司的入炉煤种较为稳定, 灰份比电阻较适宜捕集, 在合适的供电方式下, 适当增加电晕功率, 可有效降低除尘器出口排放, 理论和实践证明高频电源具有提效节能的优越性能。

高频电源输出二次电压接近工频电源电压峰值, 高频电源能提供约为工频电源 1.3 倍的二次电压和约为 2 倍输出的二次电流, 特殊设计的火花检测技术, 对高频条件下的火花检测十分有效, 对微弱火花也捕捉无遗, 采用串并联混和谐振变换器, 具有恒流特性, 可以有效抑制电场火花的冲击, 30us 内迅速熄灭火花。火花熄灭后快速恢复电场能量, 电场电压恢复很快, 损失极小。图 1 为高频源与工频电源输出对比图。



经过多年理论研究和应用实践, 龙净公司研发的工况特性分析诊断的数学模型, 基于该模型可以准确地判断电场工况, 量化电场电晕的状况。同时结合电控最佳运行方式实验研究和工业应用经验总结, 根据高压电气参数映射出电除尘内部工况变化, 以现场工况分析为基础, 辅以锅炉负荷、烟气温度、

排放浓度等多种信号反馈，开发出 IPEC 电除尘器节能优化控制系统。该 IPEC 控制系统将高频电源、EIVC-3200 型工频电源、DDJX 低压控制系统等有机融合在一起，可根据电除尘工况自动调整高频电源、EIVC-3200 工频电源、DDJX 低压系统运行参数，快速找到一个高效节能的运行模式，并逐渐趋于稳定运行模式，实现提效节能。

传统的电除尘电控系统，将电除尘器的高压供电、低压设备单独控制，人为割裂各台高压设备的控制和低压设备之间的内在联系，制约了除尘效率的提升。IPEC 控制系统，按照除尘室对高低压设备进行统一调度，根据同一除尘室不同电场对除尘效率不同贡献度，划分不同供电权限，根据加权配置不同运行参数，并结合先进的“复合功率振打策略”，将除尘器除尘室的各电场高压供电和振打控制有机结合起来，统一调度高压供电参数和振打工作时序，统筹优化各电场高压设备运行参数和振打时序、复合功率振打频度、工作时长，将电除尘运行在最佳状态，有效提高除尘效率，提升电除尘系统对特殊复杂工况的适应能力。

同时 IPEC 系统为系统节能提供数据管理、分析，并优化高低压设备、振打设备、电加热设备运行参数，并对大量高、低压设备采集的数据进行分析处理和长期存储，具有友好的人机界面，操作简单、方便。

2 吕四港发电公司#4 炉电除尘器提效节能改造应用

由于吕四港发电公司#3、4 炉机组电除尘出口排放偏高，无法满足国家日益严格的环保要求。为了实现达标排放目标，利用#3、4 炉机组检修机会，吕四港发电公司将#3、4 机组电除尘电控系统的升级改造作为 2013 年的提效节能技改项目，改造后除尘器出口排放目标为低于 30mg/m³。

表 1、表 2、表 3 为吕四港发电公司#4 炉改造前江苏方天电力技术有限公司所做测试的情况。

由测试结果可看出，改造前吕四港电厂#4 炉的除尘效率在 99.73%左右，整炉的烟尘排放浓度在 51 mg/m³左右。针对以上试验检查情况，制定出了对应的高频电源改造的方案并实施。具体如下：

表 1 #4 除尘器除尘效率计算表

位置	采样	烟道	烟尘	标准状态	实态烟气	标态烟气	除尘器
----	----	----	----	------	------	------	-----

		灰量	截面积	流量	烟气量	含尘浓度	含尘浓度	效率
	符号	G	F	G	Q	C	C	η
	单位	g	m ²	kg/h	Nm ³ /h	mg/m ³	mg/Nm ³	%
第一遍	A1 进	5.1302	17.64	12803.0	616193	13087.0	20777.6	99.71
	A1 出	0.0149	17.64	37.2	620541	37.8	59.9	
	A2 进	5.0333	17.64	12561.2	603888	13104.1	20800.6	99.73
	A2 出	0.0136	17.64	33.9	608283	35.2	55.8	
	B1 进	4.9952	17.64	12466.1	600409	13110.8	20762.8	99.73
	B1 出	0.0137	17.64	34.2	604776	35.7	56.5	
	B2 进	5.1415	17.64	12831.2	617006	13133.1	20796.0	99.76
	B2 出	0.0124	17.64	30.9	619170	31.6	50.0	
第二遍	A1 进	5.1661	17.64	12892.6	622316	13050.2	20717.2	99.72
	A1 出	0.0145	17.64	36.2	626627	36.4	57.7	
	A2 进	4.9005	17.64	12229.8	593355	12983.5	20611.3	99.72
	A2 出	0.0139	17.64	34.7	597818	36.6	58.0	
	B1 进	5.0727	17.64	12659.5	606674	13176.7	20867.1	99.74
	B1 出	0.0133	17.64	33.2	611031	34.3	54.3	
	B2 进	5.0965	17.64	12718.9	610815	13148.8	20822.9	99.76
	B2 出	0.0121	17.64	30.2	615114	31.0	49.1	

表 2 #4 除尘器阻力及漏风率计算表

位 置		平均 动压	平均 静压	除尘器 阻力	烟气中 氧含量	除尘器 漏风率
符 号		P	P	ΔP	O	Δα
单 位		Pa	Pa	Pa	%	%
第一 遍	A1 进	106.5	-3090	158.6	4.85	1.45
	A1 出	108.0	-3250		5.08	
	A2 进	102.3	-3070	168.6	4.89	0.82
	A2 出	103.7	-3240		5.02	
	B1 进	100.9	-3090	188.6	4.87	0.88
	B1 出	102.3	-3280		5.01	
	B2 进	106.5	-3280	209.3	4.88	0.82
	B2 出	107.4	-3290		5.01	
第二 遍	A1 进	108.7	-3080	158.6	4.83	1.39
	A1 出	110.1	-3240		5.05	
	A2 进	98.8	-3080	168.6	4.90	0.82
	A2 出	100.2	-3250		5.03	
	B1 进	103.0	-3090	178.6	4.88	0.88
	B1 出	104.4	-3270		5.02	
	B2 进	104.4	-3090	188.6	4.88	0.95
	B2 出	105.8	-3280		5.03	

表 3 #4 炉主要测试结果

序号	参数名称	符号	单位	A 侧	B 侧	整炉
1	除尘器效率	η	%	99.72	99.75	99.73
2	除尘器阻力	ΔP	Pa	163.6	191.3	177.4
3	除尘器漏风率	Δα	%	1.12	0.88	1.00
4	烟尘排放量	G	kg/h	71.0	64.3	135.3
5	烟尘排放浓度	C	mg/Nm ³	57.9	52.5	55.2
6	烟尘排放浓度 (标干, 6%O ₂)	C	mg/Nm ³	54.4	49.2	51.8

2.1 改造方案

经过跟踪 4 台机组电除尘设备的各种运行工况，结合龙净环保公司电除尘控制系统的优越性能，

综合考虑各种因素，本着“花小钱办大事”的原则，双方技术人员进行了详细讨论并制定了如下改造方案：

1) 一、二电场 8 台高频电源改造：拆除除尘器顶部的 8 台工频变压器，升级改造为 8 台绿色环保节能的高频电源，保留原有的高压隔离开关柜，实现高频电源与本体的无缝连接；

2) 将配电室内一、二电场 8 工频控制柜改造成高频电源配电柜（二相变成三相），满足高频电源配电要求；

3) 将三、四、五电场 12 套原工频高压控制系统升级改造成龙净新型节能型 EIVC-3200 型电控系统；

4) 低压控制系统改造：将原有的低压控制系统升级为龙净最新 DDJX 系统，优化电加热恒温控制、增加复合功率振打功能；

5) 敷设高频电源柜、EIVC-3200 系统和低压控制柜之间复合功率振打联动控制信号电缆，高频电源柜、EIVC-3200 系统与智能前端机之间的通讯电缆，DDJX 系统与智能前端机之间的通讯电缆；

6) 从 DCS 电子间敷设机组负荷信号（4-20 mA）电缆至智能前端机箱，给 IPEC 系统提供负荷控制信号源；

7) 敷设 IPEC 网络，增加智能前端机箱，实现智能节能；

8) 图 2 为改造后的 IPEC 系统结构图。

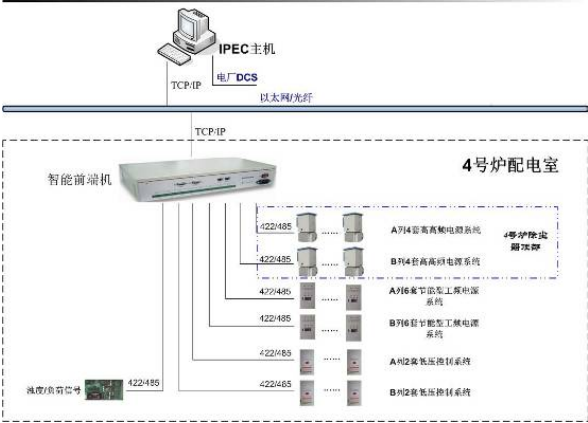


图 2 改造后的 IPEC 系统结构图

改造于 2013 年 5 月 1 日开始至 5 月 28 日调试完毕，历经 28 天的时间。

2.2 改造后的运行情况

#4 炉机组电除尘器经过严格的安装和精细的调试，改造工作已经顺利完成。#4 机组电除尘器重

新投运后，调试人员参考脱硫入口在线检测仪粉尘信号，结合高频电源、节能型工频电源和 IPEC 系统强大的数据采集、分析功能和 DDJX 低压控制系统的“复合功率振打策略”、结合振打正交化试验，优化振打工作时序，IPEC 控制系统工况自动控制数学模型，深入调节不同负荷、不同工况的运行参数，最终确定不同节能等级的节能控制模式，满足不同煤种、不同负荷的高效节能运行参数。

通过改造，吕四港发电公司#4 炉机组电除尘器实现了以机组负荷信号、出口浓度等多参量为闭环反馈，根据机组工况变化自动选择高低压设备的最佳运行参数，避免人为因素对电除尘运行造成的影响，提高了设备运行的可靠性和安全性。同时，IPEC 系统根据不同工况和选择的节能模式自动快速找到最佳的运行参数，较好地实现了能耗小、排放低的最佳效果。图 3 为高压设备运行参数表。

T/R运行表 2013-05-03 11:30:34														
T/R名称	电除尘名称	电除尘类型	工作模式	电除尘控制方式	电除尘控制方式	电除尘控制方式	电除尘控制方式	电除尘控制方式	电除尘控制方式	电除尘控制方式	电除尘控制方式	电除尘控制方式	电除尘控制方式	电除尘控制方式
A411-001	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-002	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-003	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-004	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-005	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-006	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-007	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-008	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-009	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-010	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-011	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-012	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-013	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-014	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-015	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-016	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-017	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-018	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-019	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-020	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-021	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-022	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-023	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-024	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-025	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-026	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-027	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-028	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-029	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-030	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-031	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-032	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-033	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-034	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-035	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-036	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-037	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-038	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-039	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-040	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-041	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-042	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-043	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-044	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-045	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-046	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-047	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-048	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-049	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-050	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-051	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-052	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-053	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-054	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-055	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-056	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-057	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-058	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-059	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-060	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-061	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-062	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-063	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-064	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-065	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-066	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-067	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-068	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-069	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-070	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-071	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-072	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-073	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-074	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-075	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-076	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-077	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-078	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-079	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-080	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-081	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-082	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-083	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-084	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-085	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-086	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-087	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-088	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-089	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-090	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-091	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-092	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-093	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-094	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-095	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-096	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-097	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-098	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-099	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A411-100	7#	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 3 高压设备运行参数表

2013 年 7 月，江苏省方天电力技术有限公司对 #4 炉电除尘器进行了提效节能改造后的性能测试，在 660MW 负荷时除尘器出口烟尘排放浓度仅为 29.5mg/m³，比改造前大幅度下降了 46%，电除尘耗电量 344kWh，也比改造前下降了 39kWh，同时电除尘系统运行稳定可靠，圆满达到改造的预期目标。

具体参数见表 4、表 5、表 6、表 7。

表 4 主要测试结果

<

位 置	平均 动压	平均 静压	除尘器 阻力	烟气中 氧含量	除尘器 漏风率
符 号	P	P	ΔP	O	Δα
单 位	Pa	Pa	Pa	%	%
第一 遍	A1 进	109.4	-3470	4.88	1.20
	A1 出	110.8	-3650	5.07	
	A2 进	103.0	-3450	4.89	1.01
	A2 出	104.4	-3640	5.05	
	B1 进	102.3	-3470	4.87	1.01
	B1 出	103.0	-3660	5.03	
	B2 进	108.0	-3460	4.88	1.07
	B2 出	109.4	-3660	5.05	
第二 遍	A1 进	110.1	-3460	4.86	1.20
	A1 出	111.5	-3640	5.05	
	A2 进	100.2	-3460	4.90	1.01
	A2 出	101.6	-3650	5.06	
	B1 进	103.0	-3470	4.88	1.14
	B1 出	104.4	-3660	5.06	
	B2 进	106.5	-3460	4.88	1.07
	B2 出	108.0	-3660	5.05	

表 6 #4 除尘器除尘效率计算表

位置	采样 灰量	烟道截 面积	烟尘 流量	标准状 态烟气 量	实态烟气 含尘浓度	标态烟气 含尘浓度	除尘器 效率
符号	G	F	G	Q	C	C	η
单位	g	m ²	kg/h	Nm ³ /h	mg/m ³	mg/Nm ³	%
第一 遍	A1 进	5.5345	17.64	13812.0	604984	13503.8	22830.4
	A1 出	0.0070	17.64	17.5	609042	17.0	28.7
	A2 进	5.4301	17.64	13551.5	587218	13652.7	23077.4
	A2 出	0.0066	17.64	16.5	591358	16.5	27.9
	B1 进	5.3888	17.64	13448.4	585843	13610.4	22955.7
	B1 出	0.0080	17.64	20.0	587992	20.1	34.0
	B2 进	5.5467	17.64	13842.5	601818	13638.7	23001.1
	B2 出	0.0086	17.64	21.5	605844	21.0	35.4
第二 遍	A1 进	5.5732	17.64	13908.6	606964	13555.3	22915.0
	A1 出	0.0071	17.64	17.7	611010	17.2	29.0
	A2 进	5.2867	17.64	13193.6	579088	13477.4	22783.4
	A2 出	0.0065	17.64	16.2	583282	16.5	27.8
	B1 进	5.4724	17.64	13657.0	587860	13774.1	23231.8
	B1 出	0.0081	17.64	20.2	592006	20.3	34.1
	B2 进	5.4981	17.64	13721.2	597872	13608.5	22950.1
	B2 出	0.0083	17.64	20.7	601923	20.4	34.4

表 7 660MW 机组改造前后小时电量统计

3 月 14 日	10:30	11:30	1 小时用电量	总和
4A 电除尘变	1820257	1820392	135	383
4B 电除尘变	3525615	3525863	248	
7 月 2 日	15:00	16:00	1 小时用电量	总和
4A 电除尘变	133948	134085	137	344
4B 电除尘变	194346	194553	207	

由上表可以看出,改造后吕四港发电公司#4 炉的除尘效率提高到了 99.85%左右,整炉的烟尘排放浓度在 29 mg/m³左右,达到了国家的要求,整炉的功耗也比改造前降低了不少,达到了此次改造的目

标。

3 结束语

本次改造采用了整套 IPEC 提效节能型电控系统,充分挖掘了电控系统的潜力,节约了电除尘改造费用,降低了电除尘出口排放浓度,降低了电除尘运行电耗,达到了提效节能改造的目的,对今后火电企业采用电控系统实施提效节能改造具有积极

参考文献:

[1] 福建龙净环保股份有限公司.除尘设备使用与维护[Z].
[2] 福建龙净环保股份有限公司.DDPX 低压设备使用说明书[Z].
[3] 福建龙净环保股份有限公司.高频高压电源设备使用说明书[Z].2006.
[4] 江苏方天电力技术有限公司.江苏大唐国际吕四港发电有限责任公司#4机组除尘器电源改造后性能试验报告[R].2013.
[5] 黄炬彩,毛春华,卢刚.高频电源在电除尘器中的应用特点[A].中国硅酸盐学会环保学术年会论文集.2012.
[6] 郑国强.一种基于最优控制和多参量反馈的节能系统开发与应用[A]. 第11届国际电除尘会议论文集[C].2008.

作者简介:

董志江(1965-),男,河北人,高级工程师,从事电力系统及自动化技术研究, E-mail: dongzhijiang@163.com;
范玉军(1972-),男,河北人,助理工程师,从事发电厂电气设备点检工作。