

宽负荷调峰下电除尘控制系统技术研究

万俊松¹,彭 兴²,喻诗婕¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096;2. 南京瑞松信息科技有限责任公司,江苏 南京 210096)

摘要:随着新一代煤电清洁降碳要求不断提高,电除尘控制系统的高效稳定运行变得尤为重要。文中分析了当前电除尘控制系统在烟尘浓度闭环控制、宽负荷运行适应性、运行参数调整、干湿电协调控制以及系统稳定性等方面存在的关键问题,提出了相应的改进策略与方向,为电除尘系统的优化控制提供理论依据和技术参考。

关键词:电除尘;优化控制;宽负荷运行适应性;改进策略

中图分类号:TM 621 文献标志码:A 文章编号:1006-348X(2025)06-0052-05

0 引言

随着风电、光伏发电等新能源大规模并网,为适应电网调峰需求,燃煤发电机组宽负荷调峰灵活运行已成为常态。机组烟尘浓度变动范围大,部分机组满负荷时电除尘设备出力达到最大,粉尘浓度实时值仍然高于环保要求,小部分机组还需启动所有浆液循环泵配合降低粉尘浓度。此外,新一代煤电要求现役机组30%负荷下供电煤耗增幅≤25%;而电除尘作为高能耗的重要环保设备,在低负荷时因高频电源闪络、控制响应滞后导致能耗占比显著上升,成为煤耗达标的瓶颈。面对燃煤发电机组宽负荷调峰运行工况,电除尘现有控制策略缺乏动态预测与自适应调节能力,未实现对电除尘器出口烟尘浓度的闭环控制,易导致“过控能耗浪费”或“超标风险”。如何提高除尘效率,降低烟尘排放浓度以及降低电除尘的能耗,是当前面临的突出问题^[1]。

李大中等^[2]兼顾电除尘除尘效率和节约厂用电,通过大量实验,建立基于神经网络的除尘效率模型,来预测出口浓度,在排放不超标的基础上,采用GA遗传算法求出最优二次电压,在保证了除尘效率的同时,又兼顾了电除尘的节能问题,其所建立的模型如“出口浓度—供电电压模型”等实际上是静态模型,即没有考虑到变工况运行时,电除尘器入口烟尘浓度可能会发生较大波动,此时静态模型不再满足需求,且这些控制方

法并未实现对电除尘器出口烟尘浓度的闭环控制。国内对电除尘器参数自动控制技术的研究与应用方案的核心思想是实现闭环控制,通过自动调整电场的运行参数,使得电除尘器能够随着工况的变化实时调整,最终降低电除尘厂用电率,提高运行的可靠性^[3]。

1 存在问题分析

电除尘器是燃煤机组必配设备。煤炭燃烧释放热能的同时,会产生大量的颗粒烟雾,该烟尘若是经过排烟道直接排放,会对大气环境造成极大的污染影响。此外,煤渣颗粒在烟气管道冷结积灰会形成堵块,造成锅炉停转或引发生产事故^[4]。电除尘控制系统基于气体电离与粉尘荷电的静电分离原理进行工作,其过程是通过调节高压供电单元,在放电极与收尘极间建立强电场,使烟气中的粉尘荷电,荷电尘粒在电场力作用下向集尘极定向移动并沉积,最终通过振打清灰实现粉尘的捕集与清除。控制系统依据烟气工况与二次电流/电压反馈,智能控制供电参数与振打时序,以期实现除尘效率持续最优。目前,电除尘器使用存在如下一些问题:

1.1 烟尘浓度闭环控制不足

电除尘器在实际运行中面临着严重的建模困难与测量点不足的挑战^[5]。由于除尘效果受到烟气性质、烟气量、高频电源运行参数及振打清灰效果等多

收稿日期:2025-07-10

作者简介:万俊松(1981),男,硕士,高级工程师,从事火力发电厂热工系统控制研究。

重因素影响,难以建立准确的数学模型;更为复杂的是,烟尘浓度测点通常仅布置在出口处,而入口与各级电场分室等关键部位则缺乏监测措施,对系统闭环控制的实现造成了显著障碍。目前,我国燃煤火电厂电除尘系统普遍没有投入浓度闭环控制^[6]。

为了解决这一问题,最新研究提出了前三级电场前馈控制与末二级电场反馈闭环控制相结合的烟尘浓度控制策略^[7],通过这种组合控制方式,在一定程度上改善了系统的响应特性,但仍未完全解决测量不全带来的控制滞后问题。

1.2 机组宽负荷运行适应性不足

在宽负荷运行工况下,机组变负荷速度较快。为保证烟囱出口烟尘浓度不超标,电除尘设备往往被迫保持在中高负荷状态运行。这种保守的运行策略导致了能源浪费和设备损耗。干式电除尘器存在较大迟滞效应,加之入口含尘浓度监测点的缺失,使得操作人员为了安全起见,通常将干式电除尘器出力设置在较大甚至最大值运行。这种运行方式虽然保证了排放达标,却牺牲了运行经济性。

1.3 运行参数调整不及时

高压供电参数直接影响电除尘效率,一般高压供电参数越高、能耗越大^[8]。如1000 MW级机组的干式电除尘和湿式电除尘的高频电源数量通常分别为30个和8个,数量众多且大部分依赖人工手动调节。这种人工主导的调节方式存在工作量大和调节效果有限的双重问题,如表1所示。

表1 电除尘器运行参数调整问题分析

问题类型	表现形式	影响后果
调节滞后	负荷变化时参数调整不及时	高负荷时排放超标,低负荷时能耗过高
人工依赖	大量高频电源依赖人工调节	工作量大,一致性差,优化困难
响应不足	面对粉尘浓度波动反应迟钝	除尘效率不稳定,排放浓度波动

1.4 干电、湿电控制协调不畅

尽管部分电厂已投入闭环控制,但干式电除尘器和湿式电除尘器往往采用独立控制策略,即干式电除尘控制其出口含尘浓度,湿式电除尘也控制其出口含尘浓度,缺乏整体协调。这种孤立控制方式导致了系统响应不匹配和能源效率低下。当部分电场发生故障、闪络、绝缘栅双极晶体管(insulate-gate bipolar transistor, IGBT)温度过高或进行振打时,同一通道的其他电场缺乏有效的联动机制。这不仅影响了整体除尘效果,还可能导致不必要的能源消耗。

1.5 应用控制系统稳定性问题。

当前大部分电除尘控制系统采用VB/C#等编程语言或者PLC的结构化文本进行代码开发,开发人员需要掌握不少编程知识,控制策略调整常需要修改源代码,而且存在着代码复用率低、可移植性不高、软件可靠性一般、开发效率低和维护工作量大等问题,导致系统稳定性差和维护成本高。

2 优化控制策略研究

针对上述问题,文中研究设计一套包含硬件和软件的电除尘优化控制系统。

2.1 硬件系统策略

设计静电除尘器(electro-static precipitator, ESP)优化控制系统如图1,通过网线接入干电的交换机,与干电通过Modbus TCP通信,获取电除尘高频电源现场相关数据,并进行干电的控制,具体控制对象为电场的二次电流设定值。通过串口线与DCS通信,获取机组负荷和湿电相关信息,并控制湿电电场的二次电流设定值,最终实现闭环优化控制。

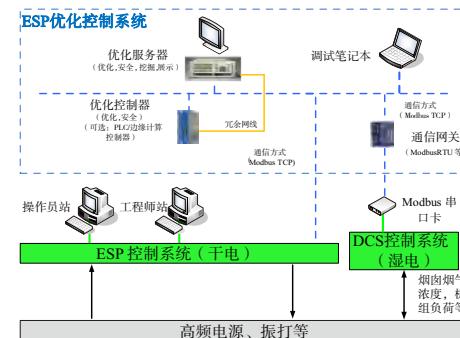


图1 ESP优化控制系统结构图

2.2 控制系统策略

1) 干电闭环控制系统设计:干电传感器在正常情况下,调整各处于自动连续模式下的干电高频电源的二次电流设定值,将干电出口浓度控制在设定值附近;在干电传感器故障情况下,计算干电和湿电各高频电源的二次功率,再计算得到干电总二次功率和湿电总二次功率,进而得到干电二次功率占比系数=干电总二次功率/(干电总二次功率+湿电总二次功率),调整各自动连续模式下的干电高频电源的二次电流设定值,将干电二次功率占比系数控制在设定值附近。

2) 湿电闭环控制系统设计:调整各处于自动连

续模式下的湿电高频电源的二次电流设定值,将湿电出口浓度控制在设定值附近。

3) 干电和湿电协调控制系统设计:如图2—4,从电除尘工艺控制逻辑图可知,在保证烟囱出口粉尘浓度达标这一约束条件下,如何分配干式与湿式电除尘器之间的除尘负荷,是优化系统综合能耗的核心问题。工艺流程上,烟气串联通过干电与湿电,二者在除尘功能上具有等效性,但在能耗特性上却存在竞争关系。提高干电出口浓度设定值(即降低干电除尘率)虽可减少其自身电耗,但会显著增加后续湿电的处理负荷与运行功率,反之亦然。这种此消彼长的关系表明,系统的总运行功率并非在干、湿电均处于极限状态时最低,而是需要通过确定一个最佳的干电浓度设定区间,以实现整个电除尘系统的全局节能优化。

如上所述,干式(ESP)与湿式(WESP)电除尘器串联运行。设系统总能耗为 P_{total} ,它是干电能耗 P_{dry} 与湿电能耗 P_{wet} 之和,即 $P_{total} = P_{dry}(C_{dry}) + P_{wet}(C_{dry})$,其中 C_{dry} 为干电出口浓度。分析表明, P_{dry} 随 C_{dry} 设定值的升高而降低,而 P_{wet} 为保证最终排放达标则随之升高。因此, P_{total} 是关于 C_{dry} 的一个凸函数,存在一个使 P_{total} 取得最小值的优化设定点 C_{dry}^{opt} 。控制系统的目即是探寻此最优设定值。

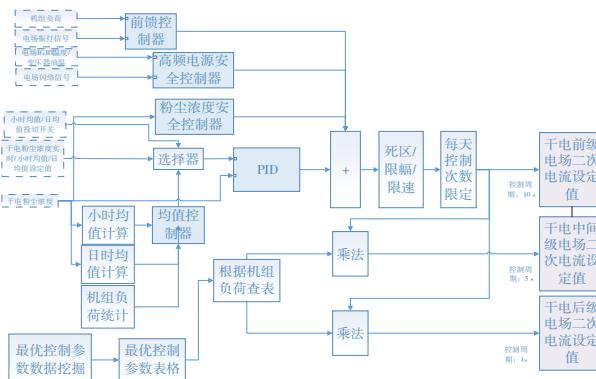


图2 干电控制逻辑图

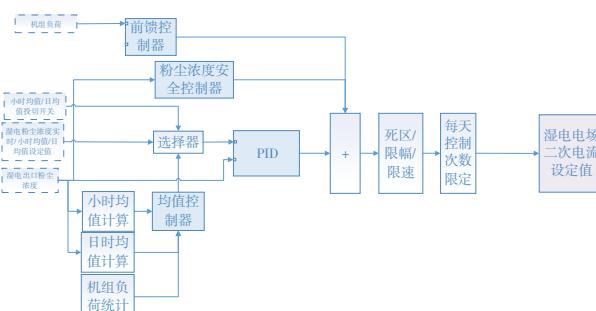


图3 湿电控制逻辑图



图4 电除尘控制逻辑图

4) 小时均值控制:江西省和安徽省的环保局要求:机组排放口烟尘浓度排放小时均值不超过某一约定值(如 3.5 mg/Nm^3)。当发现小时均值可能超标时,根据时段、控制余量等干电和湿电数据,相应增加不同大小的二次电流设定值。当发现小时均值不会超标时,根据时段、控制余量等数据,相应增加干电和湿电的设定值。

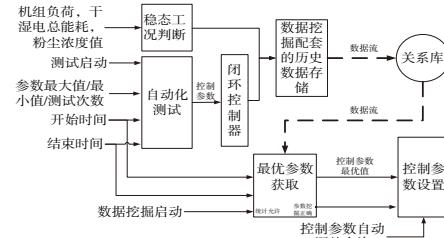
5) 日均值控制:日均值控制策略旨在满足江苏省、浙江省等地环保部门对燃煤机组烟尘排放的严格监管要求(如排放口烟尘浓度排放日均值浓度需稳定低于 $1.8 \sim 2.0 \text{ mg/Nm}^3$)。在实际运行中,机组负荷呈现显著波动性,日均负荷率可能因气候、电网调度等因素在 $50\% \sim 90\%$ 之间变化,最大负荷出现时段亦不固定。

在排放浓度恒定的前提下,机组负荷与电除尘系统能耗呈正相关关系。为满足在日均排放限值的约束条件下,实现干湿电协同系统总能耗最小化的要求,需综合考虑实时机组负荷、历史负荷曲线与当前日均排放水平,动态调整粉尘浓度设定值,从而在环保达标与系统节能之间实现最优平衡。

2.3 宽负荷工况下自寻优策略

干电电场梯度=前级电场二次电流设定值/本级电场二次电流设定值。通过定期性地不断调整该控制参数,将机组负荷、稳态标记、干电电场梯度和干湿电总能耗等存储在关系库表格中,20%、20%~30%一直到100%~110%等10个区间,统计在稳态工况下,相同机组负荷区间在不同控制参数的干湿电总能耗,就可获取各机组负荷的最优控制参数,具体逻辑图如图5。

图5 最优控制参数自动实验和自动调整逻辑图



2.4 基于数据挖掘的图形化组态工具优化

文中采用 OptLab 图形化组态系统,实现电除尘优化控制。以图形化控制策略运行软件、图形化控制策略组态软件为核心,含实时库、实时历史库、通信程序、画面和曲线等程序,详见图 6—8。该系统集成了稳态工况判断、能耗挖掘、闪络控制、振打控制、均值计算、模糊控制、DMC、PID 及数据挖掘等功能模块,所有模块均基于统一基类开发,支持通过拖拽与连线,完成组态配置,无需编程即可实现功能调整。

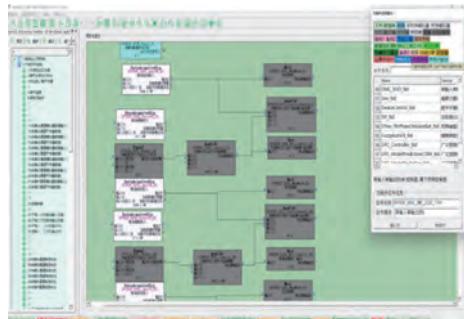


图 6 图形化控制策略组态软件界面

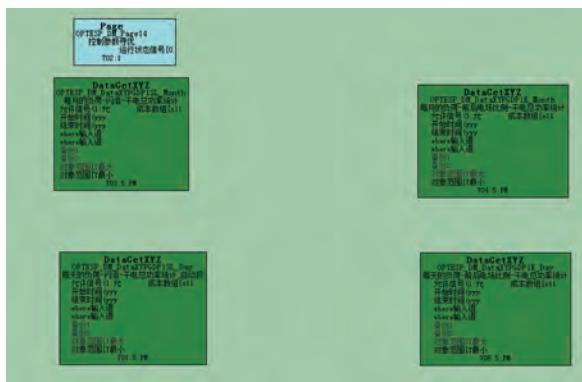


图 7 数据挖掘逻辑图



图 8 数据挖掘功能块属性框

与传统 DCS 相比,该系统具备以下改进:

- 1) 建立全局数据库,无需页间或控制器间引用功能块即可实现数据传递,简化组态与维护流程。
- 2) 引入字符串中间机制,实现布尔、整型、浮点(bool/int/float/double/DateTime)等不同数据类型的自动转换,提升组态灵活性与逻辑图可读性。
- 3) 将数据挖掘过程封装为标准功能块,支持通过图形化方式配置统计与分析任务,结果自动存入规范格式的数据表,显著提高分析效率与可复用性。

图 9、图 10 是优化投入和不投入两种情况下各负荷段电除尘电功率统计逻辑图、功能块属性图,包括统计结果存储表和曲线的显示。

曲线横轴为机组功率,纵轴为电除尘功率,含 2 个曲线,分别显示了优化投入情况下,各负荷段的电除尘功率曲线;优化未投入情况下,各负荷段的电除尘功率曲线。由曲线可见,负荷段越低,优化投入的电除尘能耗比优化没投入情况下能耗越少。

负荷段	优化投入(优化未投入)	优化投入(优化未投入)
1	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000
15	0.000000	0.000000
16	0.000000	0.000000
17	0.000000	0.000000
18	0.000000	0.000000
19	0.000000	0.000000
20	0.000000	0.000000
21	0.000000	0.000000
22	0.000000	0.000000
23	0.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000
25	0.000000	0.000000

图 9 数据挖掘存储结果表

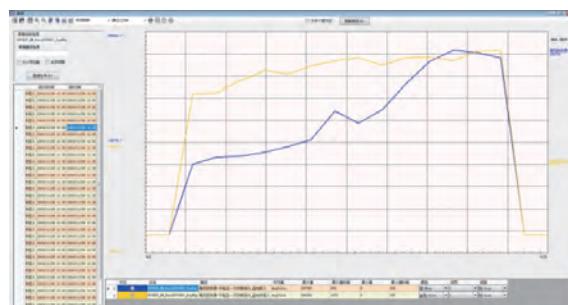


图 10 曲线展示数据挖掘存储结果表

3 应用实施效果

以某电厂 1000 MW 机组为例,优化后的控制系统相比原控制系统,在全负荷区间内实现了自动控制、安全控制和节能控制。自动投入率>95%,设备安全逻辑动作正确,优化退出原因自动显示,平均节能率为 19%,在中低负荷(450~650 MW 之间),节能效

果更加明显,如图5所示。从表2统计结果可见在200 MW负荷下,节电率最高为56.8%。按发电成本0.4元/kWh计算,单台机组每年可节约人民币近89万元。

由图11的优化投入前后粉尘浓度和机组功率对比曲线可见,优化投入后,依靠干湿电协调等一系列控制方式,出口烟尘浓度波动幅度明显降低。

如图12所示,曲线从上到下分别为机组负荷、湿电总功率、干电总功率、干湿电总功率、优化投入开关等曲线。可见,在优化投入之后,机组干湿电总功率、干电总功率、湿电总功率明显降低。

表2 机组负荷-相比原自控系统节能率表

机组功率(MW)	干湿电功率(W)	干湿电功率(W)	除尘功率下降值(kW)	节电率(%)
200	688.90	1 594.78	905.87	56.8
350	1 423.57	1 723.42	299.85	17.4
450	1 499.5	1 744.57	245.07	14.0
550	1 372.18	1 837.18	464.99	25.3
650	1 578.67	1 849.33	270.66	14.6
750	1 676.22	1 836.15	159.92	8.7
850	1 765.15	1 903.36	138.21	7.3
950	1 740.03	1 935.85	195.82	10.1



图11 优化投入前后粉尘浓度和机组功率对比曲线



图12 优化投入前后粉尘浓度/机组功率/干电功率/湿电功率对比曲线

4 结语

电除尘控制系统在实现新一代煤电智能降碳和超低排放中扮演着关键角色。但其当前存在烟尘浓度闭环控制不足、宽负荷运行适应性差、运行参数调整不及时、干湿电控制协调不畅以及系统稳定性问题等挑战。通过采用多模型预测优化控制、时序振打优化、智能故障诊断和先进总线技术等创新方法,能够有效解决这些问题,实现电除尘系统在达标排放前提下的节能优化运行。

未来的研究方向应聚焦于标准化组态和智能控制算法的进一步完善、多系统协同控制的优化以及更可靠硬件平台的开发,以全面提升电除尘控制系统的性能和可靠性,适应日益严格的环保要求和能源效率标准。

参考文献:

- [1] 李建阳.电除尘节能优化控制系统的工作原理与设计[J].中国高新技术企业,2014(09):71-73.
- [2] 李大中,田莉,张政委,等.基于神经网络的电除尘器效率在线确定方法[J].热能动力工程,2005,20(04):390-393.
- [3] 白云.榆林横山电厂1号机组电除尘智慧能量管理系统应用与优化[J].中国设备工程,2025(01):40-42.
- [4] 翟有鹏.电除尘系统的运行优化措施[J].集成电路应用,2022,39(07):304-306.
- [5] 殷东.燃煤电厂静电除尘器除尘效率降低的原因分析以及解决措施研究[J].节能,2021,40(04):71-73.
- [6] 薛钧赢,简冬,顾江其,等.火电机组干式电除尘节能优化控制系统设计及应用研究[J].能源研究与利用,2024(01):8-12.
- [7] 郝勇生,王忠维,朱晓瑾,等.1000 MW燃煤机组干式电除尘器浓度闭环控制[J].华南理工大学学报(自然科学版).2021,49(02):71-24,67.
- [8] 彭宇泉.浅谈电除尘节能技术的应用[J].再生资源与循环经济,2016,9(04):42-44.