

基于电极锅炉的火电机组热电解耦技术研究

刘念栋 马东森 彭延阁 李旭东
华能莱芜发电有限公司, 山东 济南 271100

[摘要] 新能源大规模并网之后, 火电机组深度调峰能力欠缺和供热刚性约束之间的矛盾愈加明显, 热电解耦成了提高火电灵活性的重要技术途径。文中以电极锅炉为研究对象, 对电极锅炉的工作原理、结构类型及运行调节特性进行分析, 在此基础上提出基于电极锅炉的热电解耦系统集成方案, 阐述了电热转换和热能梯级利用机理, 设计了多能源协调控制策略, 给出了关键设备选型原则和参数匹配方法。在此基础上又从机组调峰能力、热效率、经济性、安全性四个方面对热电解耦的效果进行综合评价。

[关键词] 电极锅炉; 火电机组; 热电解耦; 深度调峰; 运行灵活性

DOI: 10.33142/hst.v9i6.20082

中图分类号: TM621

文献标识码: A

Research on Thermoelectric Decoupling Technology for Thermal Power Units Based on Electrode Boilers

LIU Niandong

Huaneng Laiwu Power Generation Co., Ltd., Ji'nan, Shandong, 271100, China

Abstract: After the large-scale integration of new energy into the grid, the contradiction between the lack of deep peak shaving capability of thermal power units and the rigid constraints of heating has become increasingly apparent. Thermal power decoupling has become an important technical approach to improve the flexibility of thermal power. The article takes the electrode boiler as the research object, analyzes the working principle, structural type, and operation regulation characteristics of the electrode boiler, and proposes an integrated scheme of thermoelectric decoupling system based on the electrode boiler. The mechanism of electric thermal conversion and thermal energy cascade utilization is explained, and a multi energy coordinated control strategy is designed. The selection principles and parameter matching methods of key equipment are given. On this basis, a comprehensive evaluation of the effect of thermal electric decoupling was conducted from four aspects: unit peak shaving capacity, thermal efficiency, economy, and safety.

Keywords: electrode boiler; thermal power units; thermoelectric decoupling; deep peak shaving; operational flexibility

随着风电、光伏装机的持续增长, 电力系统对于常规电源调峰的能力要求也越来越高。火电机组是电力系统的基本组成, 火电机组的运行灵活性同新能源消纳水平和电网安全稳定息息相关。传统的热电联产机组受“以热定电”的刚性约束, 在供暖期供热和发电是高度耦合的, 机组最低技术出力一般要大于 50% 额定负荷, 不能满足深度调峰的要求。热电解耦就是打破热电联产机组供热和发电刚性耦合, 在保证供热的前提下灵活调节发电出力, 是提高火电灵活性的主要途径。主流技术路线有低压缸切缸供热、高低压旁路联合供热、储热罐供热和电锅炉供热等。电极锅炉技术由于系统独立性好、对原机组改造小、响应快、热电解耦彻底, 已经成为火电灵活性改造的重要方向。

1 热电解耦技术概述

热电解耦就是利用技术手段把热电联产机组的供热和发电两个过程解耦, 保证机组对外供热能力的同时可以灵活调节发电出力。本质上就是打破传统的热电联产机组“以热定电”的运行限制, 扩大机组的安全运行区间。

从技术实现途径来讲, 热电解耦可以分为两类。一类是汽机侧的改造技术, 即低压缸切缸供热、高低压旁路联合供热等, 改变汽轮机蒸汽分配方式来达到热电解耦的目的。低压缸切缸技术在低负荷供热需求小的时候有优势, 但是热电解耦幅度小; 高低压旁路供热虽然解耦能力强, 但是热经济性差。另一类就是增设外部设备技术, 储热罐供热、电锅炉供热等^[1]。储热罐在热负荷低谷时储存热量,

在高峰时释放热量以平抑热负荷波动,但是它的调峰响应速度受到储热介质换热速率的限制。

电极锅炉技术属于增设外部设备的技术路线,其基本思想就是把机组部分发电量转换成热能对外供热,在不降低甚至提高供热能力的基础上降低上网电功率。电极锅炉比储热罐响应速度快、调节范围大,汽机侧改造比电极锅炉对原机组主系统影响小,系统独立性强,故障时可以快速解列。从热电解耦的彻底性、系统可靠性和工程实施方便程度来说,电极锅炉技术比其他技术有明显的优势。

2 电极锅炉技术特性

2.1 电极锅炉工作原理与结构类型

电极锅炉是利用水的导电性,把电能直接转化成热能的一种电热转换设备。其工作原理是中高压电源接入锅炉内部的电极系统,电流经过具有一定电导率的炉水形成回路,利用水的电阻热效应把电能转化为热能,加热后的水以热水或者蒸汽的形式输出。具体而言,当带电电极浸没于除盐水后,由于炉水具有特定的电导率,三相电流在工质中形成了一个“纯电阻电路”,在此电路中电能将全部转化为热能。由于电热转换在水体内进行,没有传统的电阻加热元件表面热传递损失,电能几乎全部转化为热能。该技术的能源转化率高于 99.5%,部分产品实测热效率可达到 99.9%。

根据电极与炉水的接触方式,电极锅炉分为浸没式和喷射式两种结构类型。浸没式电极锅炉的电极直接浸没在炉水中,炉水和锅炉金属筒体之间用绝缘隔离。该种三相电极基本对称布置,对于进线电源没有特殊要求,炉水电导率一般控制在 $100\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右。青达环保 DQG 系列产品采用浸没式炉水调节电极加热技术,锅炉全钢结构,采用中心筒负荷调节和工业纯氮气稳压/保护。锅炉外筒具有绝缘性,外壳不带电,不需要设置隔离房。锅炉内筒位于本体上部,是电极产热的工作区域;中心筒位于内筒内部,用于调节内筒水位实现负荷调整;电极棒位于内筒上部,采用阵列式电极棒组,分别对应 10kV 三相电源。喷射式电极锅炉是将炉水喷射到电极上进行加热,电极和筒体之间相对隔离,但是需要三相四线中心点接地的电源配置,炉水电导率要求较高,一般为 $1700\mu\text{S}/\text{cm}$ 。目前工程上使用较多的为浸没式电极锅炉,系统简单、运行稳定、维护方便。

电极锅炉的负荷调节与电极浸没液位高度成正比——负荷越高内筒液位越高;当内筒液位与电极脱离后,负荷为 0。锅炉的实时产热能力取决于电极与工质的接触面积,该接触面积由内筒液位决定,而调节内筒液位的装置

是中心筒。在自动运行模式下,逻辑控制器根据负荷指令通过伺服电机驱动中心筒,将内筒水位保持在一定位置,由于反馈控制精度高,锅炉可在 0~100%的范围内实现负荷平滑升降。锅炉具备快速升降负荷能力:冷态从 0MW~20MW 仅需 10~70min,热态仅需 30~180s。在锅炉无需产热时,中心筒开度调至最大、内筒液位降至电极以下,工质与电极之间不发生接触,可实现零功耗在线待机和快速启停。

2.2 电极锅炉运行特性与调节性能

电极锅炉运行特性表现在三个方面。首先就是极高的电热转换效率。电极锅炉热效率可以达到 98%以上,部分产品实测热效率超过 99.5%。由于没有燃料燃烧的烟气损失以及传统电阻加热的接触热阻,电极锅炉在寿命期内的系统热效率可以保持在 98%以上。同时,锅炉采用零功耗待机设计,停炉期间可保持 10kV 断路器闭合,保证快速启停。其次就是很好的调节性。电极锅炉的加热功率可以由电极投入段数、电极浸没深度和炉水电导率来快速调节。其调节精度高,采用新型智能负荷控制系统,负荷变化可控制在 0.5%~1%。负荷调节响应速度可以达到毫秒级,可以很好地满足电网调峰对功率响应速度的要求。以某 200MW 热电联产机组联合电极锅炉试验为例,电极锅炉调节性能可以满足深度调峰工况下负荷响应速率的要求。仿真试验结果表明,改变电极锅炉功率可以增大机组的上网负荷变化率,并且使上网负荷降低。第三就是系统独立性和安全性。电极锅炉属于独立的外挂设备,接入机组后发生故障时可以迅速解列,不会影响到机组主系统的正常运行。锅炉运行时没有明火、没有燃烧、没有高温烟气,炉体没有热疲劳损伤的风险,使用寿命长。锅炉设计有可靠的高压电隔离机械装置,无论是热水锅炉还是蒸汽锅炉,外壳都不带电。每台锅炉除正常电控测点外,还设有两个机械安全阀作为最终安全保障。

3 基于电极锅炉的热电解耦系统设计

3.1 电极锅炉在火电机组中的系统集成方案

系统集成采用的是“独立接入、灵活投切、安全隔离”的方式。典型方案是从发电机出线母线引接电能,经降压变压器供给电极锅炉,电极锅炉产热水或蒸汽通过分汽缸或换热器接入热网,可配置蓄热装置缓冲热负荷波动。系统核心部分为电源接入、电热转换、热能输配、蓄热缓冲。电源接入部分从厂用电母线或者发电机出口取电,经过专用降压变压器降压到电极锅炉额定电压;DQG 系列产品默认工作电源为 10kV 三相交流电,电源从高压配电室接出,沿电缆桥架敷设至炉顶高压接线盒内的三个接线铜排

上。电热转换部分是电极锅炉产热水或饱和蒸汽；热能输配部分是通过分汽缸或者汽水换热器将热能送到热网或者工业供汽管网；蓄热缓冲部分根据需要设置球形或者常压储热罐，调峰时段储存热能，高峰时段释放。电极蒸汽锅炉系统由电极锅炉、循环装置、过热器、控制装置、加药装置、补水装置、排污和排气装置以及相关管路阀门等部件构成。水汽炉的循环泵用于负荷保证、负荷调节和水质均布；给料泵用于锅炉补水；加药泵用于调节炉水电导率。电加热器用于将锅炉产生的饱和蒸汽二次加热为过热蒸汽。沧州 2×330MW 机组改造工程中配置 2×70MW 电极蒸汽锅炉和 4 台 850m³ 球形储罐，产生的饱和蒸汽经过分汽缸对外供热，不改变主蒸汽系统，弥补了 318 万 m² 供热缺口，供暖可靠性提高了 13%。

3.2 控制策略与多能源协调机制

控制策略的核心就是实现供热和发电的精准解耦。采用分层协调架构，上层接收电网调峰指令，确定机组目标发电功率和电极锅炉目标功率，中层协调汽轮机抽汽供热和电极锅炉供热分配，下层执行电极锅炉功率调节、阀门控制、蓄热罐充放热控制^[2]。电网要求降低上网功率的时候，评价当前热负荷需求，如果热负荷不变或者增大，就启动电极锅炉，把部分电量转变成热能补充供热，削减汽轮机抽汽。电极锅炉功率设定为“目标发电功率=当前发电功率-电极锅炉消耗功率”。热负荷变化时，根据电极锅炉功率、蓄热罐充放热速率进行调节以达到跟踪目的。综合考虑电网调峰、热网负荷、机组运行约束，建立多目标优化模型，在保证供热安全、调峰的前提下，使运行成本最小化，加入预测功能提前优化运行计划。锅炉默认采用自动控制模式，基于 PLC 逻辑控制系统和 DCS 控制系统及工业通信网络实现全自动控制。锅炉设置有独立的安全保护系统，一旦某设备或参数出现异常，安保系统将向上游控制终端发送报警信息，并根据故障等级向锅炉发送降负荷、故障跳闸、故障停机指令。锅炉在自动运行模式下，内筒液位和循环泵调节均由内置的系统控制器自动调节，二者协同工作，使锅炉具备负荷升降和零负荷能力。

3.3 关键设备选型与系统参数匹配

电极锅炉容量配置为关键。需要考虑机组的额定容量、目标调峰深度、供热负荷以及电网调峰要求。容量越大，热电解耦能力就越强，但是投资和占地会增大。工程上一般配置为机组额定容量的 15%~30%。330MW 机组采用 2×70MW 电极锅炉，能实现 20%额定负荷深度调峰。降压变压器选择满足电极锅炉额定电压和功率。50MW 以上的大型机组一般使用加热电压为 10kV~20kV 的变压

器，其容量不小于电极锅炉额定功率的 1.1 倍，并留有余量。蓄热装置的容量要根据热负荷调节的需求和调峰的持续时间来确定，常压储热罐单位容积蓄热约为 0.25~0.30GJ/m³ 球形蒸汽罐更高。沧州项目 4 台 850m³ 球形罐和 2×70MW 电极锅炉相配合，达到数小时的热能缓冲。管道设计要考虑到蒸汽参数和输送距离，远距离或者高参数要求可以增设电加热过热器来提高过热度。

4 热电解耦效果评估

4.1 机组调峰能力与运行灵活性分析

电极锅炉对于机组调峰能力的提高表现在两个方面。其一就是减小机组最小技术出力。传统的热电联产机组在供热期的最小技术出力一般为 50%额定负荷，而配用电极锅炉之后，通过把部分发电量转化为热能，机组可以在保持供热同时把上网功率降到 20%以下。江阴苏龙热电 5 号机组经过电极锅炉改造之后，调峰深度可以达到额定负荷的 13.03%，是省内最低的水平。其二就是提高负荷变化率。仿真试验结果表明，改变电极锅炉功率可以有效地提高机组上网负荷变化率，使机组更及时地响应电网调度指令。电极锅炉对于运行灵活性的改善，还表现在热电解耦范围的扩大上。从理论上讲，配置电极锅炉之后机组的热电解耦负荷可以达到接近 100%的程度。这就意味着机组在任何的发电负荷下都可以保持额定供热能力，从根本上消除了以热定电的刚性限制。

4.2 热电解耦对机组热效率的影响

电极锅炉热电解耦方案对机组热效率的影响要从系统角度来综合考虑。电极锅炉本身具有很高的电热转换效率，但是电能是高品位能源，把电能转化为低品位热能会存在“高品低用”的能量品位损失。从一次能源利用角度来讲，电极锅炉方案的热经济性比集成热泵方案低。但是需要放在电网调峰的背景下重新审视。如果不做热电解耦，机组为了满足供热需要而不得不保持较高的发电出力，会造成更大的可再生能源浪费^[3]。从全社会能源利用效率角度来说，电极锅炉热电解耦方案把原本不能上网的“受限电量”消纳掉，防止可再生能源的无谓浪费，综合能效收益比局部热效率下降要高得多。此外，电极锅炉蒸汽品质高，气泡均布系数高达 71%~85%，电导率均布系数≥87%，可保证稳定的供热品质。锅炉采用工业纯氮气稳压/保护，可有效避免气体在炉水中长期循环对锅炉系统造成腐蚀等潜在危害。

表 1 给出了典型的热电解耦技术方案的调峰特性和能耗指标的比较。从热电解耦深度、调峰幅度来看，电极锅炉方案具有明显的优势，虽然热经济性指标稍低于一些

方案,但是考虑到系统的独立性、实施的便利性以及调峰的效果,仍然是大规模工程应用中的一种较好的技术路线。

表1 不同热电解耦技术方案对比

技术方案	热电解耦深度	调峰幅度	热经济性	系统独立性	投资成本
低压缸切缸	较低	20%30%	较好	依赖主系统	较低
高低压旁路	中等	30%40%	较差	依赖主系统	较低
储热罐	中等	20%30%	较好	较好	中等
电极锅炉	高(近100%)	30%50%	较差	独立	较高
吸收式热泵	中等	20%30%	最好	依赖主系统	高

4.3 系统经济性评估

电极锅炉热电解耦系统经济效益从收益和成本两方面体现出来。收益主要是调峰辅助服务收益、新能源消纳带来的环境效益。以某 350MW 机组为例,抽汽改造加电极式锅炉水蓄热系统方案比单纯的抽汽改造方案调峰收益要高得多。国网江苏电力某电极锅炉辅助调峰项目,2 台电极锅炉每年可以发出调峰电量 2688 万 kWh。沧州项目每年可减少二氧化碳约 7.8 万 t。成本就是设备投资、安装调试、运行维护费用之和。电极锅炉单台造价随着容量的增大而增大,但是单位功率造价随着容量的增大而减小。50MW 级电极锅炉的设备投资为 500 万元到 800 万元一台。降压变压器、管道系统、蓄热装置和控制系统等配套投资占设备投资的 30%~50%。综合测算得出电极锅炉热电解耦系统的静态投资回收期一般为 3~6 年,与当地调峰辅助服务市场价格和机组利用小时数有关。

4.4 安全性与可靠性分析

电极锅炉热电解耦系统安全性有三个方面的体现。第一,电极锅炉作为一个独立的外挂设备接入系统,与原机组主系统之间有明显的电气隔离、热力隔离,设备发生故障时可以快速解列而不影响机组的正常运行。第二,电极锅炉运行没有明火燃烧,炉内最高温度一般不超过 300℃,没有传统锅炉的燃烧爆炸危险和炉体热疲劳损伤问题。第三,电极锅炉具有完善的多重保护装置,有过流保护、缺相保护、短路保护、三相不平衡保护和超温超压保护等^[4]。

浸没式电极锅炉的结构比较简单,运动部件少,故障率低。炉水循环系统为闭式循环,水质可控制,电极寿命长。根据实际工程运行数据可知,电极锅炉年可用率可以达到 95%以上,可以满足火电机组长周期调峰运行的要求。

5 结束语

本文对基于电极锅炉的火电机组热电解耦技术进行了系统的分析。电极锅炉依靠水的导电性来完成电能到热能的直接转换,热效率可以达到 98%以上,调节响应快,系统独立性好。在此基础上设计出的热电解耦系统集成方案,用电源接入、电热转换、热能输配和蓄热缓冲等环节的有机组合来实现供热和发电的深度解耦。控制策略采取分层协调结构,达成电网调峰需求,热网负荷需求以及机组运行约束的多目标优化契合。基于电极锅炉的热电解耦技术可以把机组最小技术出力从 50%降到 20%以下,理论上可以达到近 100%的热电解耦深度,大大提高了火电机组的运行灵活性。虽然存在高品低用的能量品位损失,但是从全社会能源利用效率和新能源消纳的宏观角度来衡量,该技术有很高的工程应用价值。伴随着电力辅助服务市场不断发展和完善,以及碳交易机制的逐步深入,电极锅炉热电解耦技术的经济性也会得到进一步的提高,在火电机组灵活性改造方面也会有更广泛的使用。

[参考文献]

- [1]陆明媚,张启连,王宏伟,等.提升热源侧调峰能力的热电解耦技术[J].煤气与热力,2024,44(1):39-42.
- [2]郑淇薇,王华霆,陈衡,等.深度调峰背景下火电机组热电解耦技术路径对比分析[J].发电技术,2024,45(2):207-215.
- [3]赵强.热电解耦提升机组灵活性研究[J].煤炭科技,2024,45(1):64-67.
- [4]郭馨,赵广播,张鑫莆,等.锅炉高效灵活性调峰及节能减排关键性技术[J].锅炉制造,2024(1):1-3.

作者简介:刘念栋(1987—),男,汉族,山东鄄城人,工程师,本科,毕业于哈尔滨理工大学热能与动力工程专业,研究方向/现从事工作:现任莱芜电厂生产部汽机专工。