

火电厂超临界直流锅炉参数波动对汽轮机效率与发电机稳定运行的影响及调控措施

王 剑

陕西华电榆横煤电有限责任公司榆横发电厂 陕西 榆林 719000

摘 要: 超临界直流锅炉蓄热能力小、参数耦合强,变负荷运行时蒸汽参数频繁波动,直接影响汽轮机效率与发电机稳定性。本文系统分析了直流锅炉参数波动的特征与成因,揭示了主蒸汽温度、压力及再热蒸汽参数偏离设计值对汽轮机热耗率的影响规律,阐明了参数波动通过轴系扭转振动和励磁系统调节对发电机稳定运行的传导路径。在此基础上,提出了锅炉侧给水-燃烧协同控制、汽机侧调节阀特性优化及机组级协调控制优化的三级调控架构,从全链条视角实现了对参数波动的系统抑制,为超临界机组深度调峰安全高效运行提供了理论依据与技术支撑。

关键词: 超临界直流锅炉; 参数波动; 汽轮机效率; 发电机稳定性; 协调控制

引言: 超临界直流锅炉凭借启停灵活、负荷响应快的优势,已成为深度调峰的主力炉型。然而,直流锅炉蓄热能力小、工质一次性通过,变负荷过程中给水-燃料配比的微小失调即可引发主蒸汽温度与压力的显著波动,该波动沿能量传递链传导至汽轮机,改变各级焓降分配并导致热耗率升高;进一步传递至发电机侧,则表现为轴系扭转振动加剧和电磁功率振荡,影响发电品质与电网稳定性。本文从参数波动特性出发,分析其对汽轮机效率与发电机稳定性的影响,提出三级协同调控措施。

1 超临界直流锅炉的参数波动特性

1.1 超临界直流锅炉参数波动特征与特殊性

超临界直流锅炉参数波动具有三个典型特征:响应快速性,燃料量扰动约2~3min即可传导至主蒸汽出口;多参数耦合性,单一扰动常引发压力、温度等多参数连锁波动;非线性传递性,参数沿传递路径发生幅值与相位畸变,动态放大系数可达1.2~1.5。直流锅炉运行边界更为严苛,水冷壁入口欠焓须维持在30~50kJ/kg安全区间,可用调节裕度较汽包锅炉压缩约40%,对控制品质提出更高要求。

1.2 引起参数波动的主要因素

引起超临界直流锅炉参数波动的因素可分为外部扰动和内部扰动两类。外部扰动主要包括电网AGC变负荷指令(速率1.5%~3%/min),以及煤质波动(收到基低位发热量变化 $\pm 5\%\sim\pm 10\%$)等,此类扰动具有不可控性。内部扰动是参数波动的可控来源,主要包括三类:给水-燃料配比失调,变负荷过程中给水流量响应快于燃料热量释放约2~3min,二者速率不匹配会形成主蒸汽温度的“欠调-超调”振荡,波动周期约4~6min;减温水调节品

质不良,减温水流量滞后于主蒸汽温度变化约30~60s,过调易诱发温度的二次波动;受热面吸热不均,炉膛火焰中心高度偏移和炉膛出口烟温偏差导致各段过热器吸热比例偏离设计值,在70%负荷附近偏差可达8~10℃,形成基本偏差叠加调节波动的复合型参数扰动^[1]。

2 参数波动对汽轮机效率的影响

2.1 主再热蒸汽参数偏离对效率的影响

主蒸汽参数偏离设计值可通过热耗率变化定量评估。主蒸汽压力每降低1MPa,高压缸可用焓降减少约25~30kJ/kg,热耗率升高0.2%~0.4%。主蒸汽温度每偏离10℃,热耗率升高0.3%~0.5%,超温带来的安全性代价远超效率损失。再热蒸汽温度偏离影响更为显著,每降低10℃中低压缸效率下降约0.4%~0.6%,对热耗率影响约为主蒸汽的1.5倍,因其直接决定中压缸焓降与排汽干度,参数偏离过大还会改变推力轴承载荷平衡状态。

2.2 参数波动频率与幅度对效率的累积影响

参数波动对效率的累积影响体现在两个层面。主蒸汽温度周期性波动使各缸效率时变值围绕设计值呈正态分布,波动幅度超设计值 $\pm 5\%$ 时内效率较稳态下降0.8~1.2个百分点。材料性能层面,高压缸进汽区域金属温度循环波动使管材老化速率较稳态加快约30%~50%。深度调峰机组年变负荷次数由1000次增至3000次后,主蒸汽温度波动标准差由 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 扩大至 $\pm 5.5^\circ\text{C}$,热耗率升高1.2%~1.8%,折合煤耗增加3.5~5.0g/kWh。

3 参数波动对发电机稳定运行的影响

3.1 频率波动对发电机的影响

汽轮机转速变化直接决定发电机输出频率。调速系统频差死区通常为 $\pm 2\text{r/min}$,当功率波动超限时调速动作

改变调节阀开度,形成“功率波动→频率偏差→调速动作→功率再波动”的闭环。频率波动对发电机产生两方面影响:频率偏低时磁通密度升高、励磁电流增大、转子温升上升;频率波动时AVC频繁动作调整无功功率,可控硅元件导通角反复变化增加热循环应力与寿命消耗。长期交变电磁力还可能导致转子护环与本体过盈配合松动,危及转子安全^[2]。

3.2 蒸汽参数波动对轴系稳定性的影响

蒸汽参数波动通过改变汽轮机各级的焓降分配和轴向推力,对轴系稳定性构成直接威胁。主蒸汽压力的瞬时升高使调节级后压力同步上升,高压缸各级压差和轴向推力增大;再热蒸汽温度的波动则改变中压缸的做功能力,引起各轴承载荷的重新分配。额定工况下推力轴承承受约±100kN的轴向力,当主汽压力波动±0.5MPa时,轴向推力变化约±8~±12kN。参数波动对轴系稳定性的深层影响表现为扭转振动的激励,蒸汽转矩的谐波分量(特别是与电网工频2倍频相关的100Hz分量)与轴系固有频率接近时可能激发共振,不仅威胁联轴器安全,还会在发电机转子护环和槽楔等关键部位产生过大的交变应力,长期累积影响转子的疲劳寿命。

3.3 参数波动对发电机励磁系统的影响

蒸汽参数波动引起的发电机有功功率变化通过电磁功率平衡关系直接影响励磁系统的工作状态。当汽轮机功率波动幅度约2~3MW时,发电机端电压随之变化约±0.2%~±0.3%额定电压,励磁调节器的AVC通道开始动作以维持电压恒定。在变负荷过程中,因主汽温度波动引发的功率波动频率约0.05~0.2Hz,恰好处于励磁调节器响应带宽(0.1~1.0Hz)的下限范围内,AVC的连续调节导致励磁电流出现与功率波动同频的振荡成分。励磁变压器和旋转整流盘的附加损耗按励磁电流波动幅度的平方增长,一个AGC变负荷周期内(约15~20min),励磁系统因附加损耗产生的温升约3~5℃,虽不立即触发报警,但多个变负荷周期叠加后,可控硅元件和整流二极管的累积热循环次数明显增多,降低了电力电子器件的运行可靠性。

4 参数波动对系统耦合稳定性的综合影响

4.1 锅炉-汽轮机-发电机能量传递链的耦合关系

超临界机组的能量传递链由“燃料化学能→炉膛热能→蒸汽焓→机械轴功→电能”五个环节串联而成,各环节间的耦合关系呈现双向传导和逐级放大特征。锅炉侧2%~3%的燃料量偏差首先表现为炉膛出口烟气温度15~20℃的变化,经过热器传递至主蒸汽温度约8~12℃的波动,该温度波动使汽轮机高压缸输出功率变化约

1.5~2.0MW,最后表现为发电机有功功率的相应振荡。参数波动的传递不是等比例传导——炉膛热负荷的微小扰动在水冷壁-过热器长流程传递中被各级受热面的动态特性逐级整形和放大,约1%的燃料量波动最终可造成发电机功率2%~3%的变化量。耦合关系的双向性意味着发电机的电磁功率扰动也会反向传导至汽轮机和锅炉,当电网频率波动0.1Hz时,汽轮机转速相应变化6r/min,调速系统动作改变调节阀开度,反过来引入新的主蒸汽压力扰动,形成跨环节的耦合振荡^[3]。

4.2 参数波动的非线性放大效应

参数波动在能量传递链中的非线性放大效应主要源于三个机制。首先是工质热物性的非线性,超临界压力下水蒸气的比热和密度在临界点附近剧烈变化,亚临界区约300~400℃温区内的热物性变化率可达超临界区的3~5倍,相同燃料量扰动在亚临界区造成的主汽温度波动幅度显著大于超临界区。其次是调节系统的非线性,给水调节阀和减温水调节阀在小开度区(<20%)的流量增益仅为大开度区(>60%)的30%~40%,不同负荷段同一指令对应的实际流量变化不同。第三是环节间的相位叠加,锅炉、汽轮机和发电机的动态响应时间常数分别为100~150s、10~20s和0.1~1s,时间尺度的差异使得各个环节的波动波形在叠加时出现相位错位,在特定频段(0.05~0.1Hz)形成波峰叠加,导致该频段内的参数波动幅值被放大至单一环节的1.5~2.0倍。

4.3 参数波动对机组安全运行边界的影响

参数波动对机组安全运行边界的压缩效应体现在热力参数和机械参数两方面。热力参数方面,当主蒸汽温度持续偏离设计值±5℃以上时,为保障过热器管材安全,需将主蒸汽压力上限下调0.5~1.0MPa,压力-温度的联合降参数运行使汽轮机实际出力较设计值降低约1.5%~2.5%。机械参数方面,轴向推力的周期性波动对推力轴承钨金层的安全余量构成持续消耗,当轴向推力波动幅度超过设计值的±15%时,推力瓦块温度平均值升高约5~8℃,安全运行窗口压缩约30%。参数波动的累积效应还表现为金属热疲劳损伤的非线性加速,热应力循环每增加一个数量级,管材疲劳裂纹萌生寿命约缩短至原来的40%~50%。深度调峰条件下参数波动幅值和频次的同时增加,使机组安全运行边界从设计稳态的±10%允差压缩至±5%~±7%的窄带区间。

5 调控措施与技术方案

5.1 锅炉侧燃烧与给水精准控制

锅炉侧精准控制的核心是消除给水-燃料-减温水之间的响应时间差异。在水煤比控制方面,引入煤质在线校

正系数,将入炉煤热值变化实时引入燃料主控设定值,校正更新周期不超过60s;变负荷过程中采用动态前馈补偿策略,升负荷时燃料量超前给水流量20~30s动作,利用水冷壁蓄热吸收初期热负荷增加,使主蒸汽温度过冲幅度降低约40%。在减温水控制方面,建立两级减温喷水量的超前控制逻辑,以一级减温器出口温度偏差的一阶微分作为前馈信号,减温水调节阀响应滞后由原40~60s缩短至15~20s。在制粉系统运行优化方面,维持各磨煤机出力均衡,同层燃烧器一次风速偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内,出口煤粉细度R90维持在18%~22%的设计区间,从源头上消除燃料侧不均匀性对蒸汽参数的扰动^[4]。

5.2 汽机侧调节策略优化

汽机侧调节策略优化的重点在于消除调节阀动作对主蒸汽压力的反向扰动。在调节阀特性曲线整定方面,通过现场流量特性试验重新标定各调节阀的升程-流量关系,消除因长期运行磨损导致的阀芯特性偏移,使总阀位指令与实际进汽流量的线性度偏差控制在 $\pm 1.5\%$ 以内。在滑压运行曲线优化方面,根据主蒸汽压力与热耗率的关系,对40%~100%负荷段的分段滑压定值进行逐一优化,在50%~70%常用负荷段,将滑压运行压力设定值较原曲线提高0.3~0.5MPa,增加调节阀开度约5%~8%,减少节流损失约0.3%~0.5%,同时降低主蒸汽压力的波动敏感度。在调节阀动态参数整定方面,对调节阀油动机的响应速率和伺服阀增益进行现场调试整定,使调节阀动作对主蒸汽压力的冲击扰动幅度降低约30%。

5.3 机组协调控制系统优化

机组级协调控制优化的目标是在满足电网AGC响应要求的同时最小化参数波动幅度。负荷指令预处理方面,引入非线性滤波器滤除AGC指令中的高频噪声,避免锅炉侧执行机构对无效指令的跟踪响应。功率分配策略方面,采用“锅炉主控调压、汽机主控调功”的协调模式,主蒸汽压力偏差大于 $\pm 0.2\text{MPa}$ 时锅炉主控优先修正

燃料量,偏差小于 $\pm 0.2\text{MPa}$ 时恢复机跟炉模式,减少汽机调门频繁动作对蒸汽参数的扰动。变负荷前馈控制方面,根据负荷变化幅度与速率计算给水流量和燃料量的预加量,使锅炉侧在汽机调门动作前提前蓄热,抵消调门扰动对主蒸汽压力的影响。深度调峰工况下(负荷 $< 50\%$),投入滑压-定压联合运行模式,变负荷速率超过 $2\%/min$ 时自动切换为定压运行,由汽机调门承担负荷调节任务,避免大幅度变负荷过程中锅炉侧参数的大幅度波动。

结束语

超临界直流锅炉参数波动是深度调峰运行中制约机组安全性与经济性的核心问题。本文从直流锅炉蓄热小、参数耦合强的本质特性出发,系统分析了参数波动沿能量传递链对汽轮机效率和发电机稳定性的传导规律,揭示了主蒸汽参数偏离设计值的能耗惩罚机制与轴系稳定性影响路径。在此基础上提出了锅炉侧给水-燃烧协同控制、汽机侧调节阀特性与滑压曲线优化、机组级协调控制参数整定的三级调控架构,实现了从单一参数控制向全链条协同控制的升级。建议后续研究在锅炉侧引入基于预测控制的动态前馈算法,进一步提升机组在深度调峰工况下的自适应能力。

参考文献

- [1]张顺民,吴超,王浩.电厂超超临界直流锅炉协调控制技术[J].电力设备管理,2025(23):62-64.
- [2]冯福媛,郑淇薇,陈衡,等.深度调峰背景下火电机组变负荷过程蒸汽参数反馈特性[J].洁净煤技术,2023,29(6):59-64.
- [3]朱建平.某超临界660MW机组直流锅炉深度调峰实践[J].中国设备工程,2021(2):111-112.
- [4]王杨."双碳"背景下的火电机组灵活性运行技术[J].电力设备管理,2025(20):93-95.