

低负荷工况下锅炉再热汽温调节策略优化

安柠灿

贵州西电电力股份有限公司鸭溪发电运营分公司

DOI:10.12238/pe.v3i3.13580

[摘要] 在当下,电力系统因新能源大规模接入,对灵活性的需求与日俱增。在此背景下,锅炉处于低负荷工况运行的时间占比持续攀升。再热汽温的稳定调节,对保障锅炉安全、经济运行起着决定性作用,也是确保汽轮机高效工作的关键所在。但在低负荷工况时,再热汽温调节遭遇诸多棘手难题,像燃烧工况改变、蒸汽与烟气流量波动以及受热面积灰结渣等问题,都极大地增加了调节难度。本文围绕这些情况,深度剖析了低负荷工况下影响锅炉再热汽温的各类因素,并在此根基上,系统地探讨了切实可行的再热汽温调节策略优化路径,期望能为提高低负荷工况下再热汽温调节的精准度与稳定性,提供坚实的理论支撑。

[关键词] 低负荷工况; 锅炉; 再热汽温; 调节策略

中图分类号: TK223 **文献标识码:** A

Optimization of boiler reheat steam temperature regulation strategy under low load conditions

Ningcan An

Guizhou Xidian Electric Power Co., Ltd., Yaxi Power Generation Operation Branch, Zunyi City

[Abstract] At present, the power system has an increasing demand for flexibility due to the large-scale access of new energy sources. In this context, the proportion of boiler operation under low load conditions continues to rise. The stable regulation of reheat steam temperature plays a decisive role in ensuring the safe and economical operation of the boiler, and is also the key to ensuring the efficient operation of the steam turbine. However, under low load conditions, the reheat steam temperature adjustment encounters many thorny problems, such as the change of combustion conditions, the fluctuation of steam and flue gas flow, and the ash slag formation in the heating area, which greatly increases the difficulty of adjustment. Focusing on these conditions, this paper deeply analyzes the various factors affecting the reheat steam temperature of boilers under low load conditions, and systematically discusses the optimization path of practical reheat steam temperature regulation strategy on this basis, hoping to provide solid theoretical support for improving the accuracy and stability of reheat steam temperature regulation under low load conditions.

[Key words] low-load condition; Boiler; reheat steam temperature; Moderation strategies

在现代电力生产中,为适应电网负荷的频繁波动以及可再生能源并网带来的冲击,火电机组需要具备良好的变负荷运行能力,这使得锅炉经常处于低负荷工况下运行。再热蒸汽温度作为锅炉运行的关键参数之一,其稳定控制直接关系到机组的热效率、安全性和可靠性。当锅炉处于低负荷工况时,由于燃烧强度减弱、烟气流量减少、蒸汽流量降低等一系列因素的影响,再热汽温的调节难度显著增加。若再热汽温调节不当,不仅会导致机组热效率下降,增加燃料消耗,还可能引起汽轮机末级叶片湿度增大,威胁汽轮机的安全运行。因此,深入研究低负荷工况下锅炉再热汽温调节策略的优化具有重要的现实意义。

1 低负荷工况下影响锅炉再热汽温的因素

1.1 燃烧工况变化

在低负荷工况时,锅炉为适配负荷需求,大幅削减燃料输入量,同时调整燃烧器运作模式,比如减少燃烧器投入数量或降低单个燃烧器出力。这一系列操作致使炉膛内火焰温度显著降低,火焰能量减弱,辐射传热的主导地位下降,对流受热面的吸热量占比相应上升。再热器多处于对流烟道区域,传热特性的这一转变,直接冲击再热汽温调节。燃烧中心下移后,靠近炉膛下部的再热器区域烟气流速加快,而上部区域流速减缓,流速不均使得再热汽温偏差增大。此外,低负荷下燃烧工况不稳定,燃料与空气混合不充分,极易引发不完全燃烧,未燃尽的燃料无法充分释

放热量,导致烟气整体热量减少,且传热过程紊乱,这些复杂状况给再热汽温调节带来诸多棘手难题^[1]。

1.2 蒸汽流量与烟气流量变化

随着负荷降低,锅炉产汽量大幅下滑,再热器内蒸汽流速随之锐减。蒸汽比热容在流速降低时相对变小,这表明单位吸热量会引发蒸汽温度更大幅度的波动。与此同时,烟气生成量因燃料量减少而降低,烟气流速变缓。对流换热系数与烟气流速成正比,流速减慢致使对流换热系数减小,进而削弱再热器的对流吸热量。蒸汽流量与烟气流量变化还会联动再热器进出口的蒸汽焓值和烟气焓值改变。例如,蒸汽流量减少,其携带的热量总量降低,而烟气流量减少又使得传递给蒸汽的热量减少,二者相互耦合,进一步干扰再热汽温调节特性,让再热汽温调节在低负荷工况下陷入复杂困境。

1.3 受热面结渣与积灰

低负荷工况下,炉膛温度整体偏低,燃烧生成的灰分因未充分熔融,粘性增加,更易附着在受热面上。再热器作为对流受热面,受烟气流冲刷,表面极易出现结渣和积灰现象。结渣和积灰形成的热阻层,阻碍热量从烟气向蒸汽传递,直接导致再热器吸热量锐减,再热汽温随之降低。而且,灰分在再热器表面的沉积往往并不均匀,某些区域积灰或结渣严重,而其他区域相对较轻,这就造成再热器不同部位吸热量差异增大,进而加剧再热汽温偏差。长时间低负荷运行,结渣和积灰问题持续累积,对再热汽温调节的负面作用愈发凸显,严重影响锅炉运行稳定性与经济性^[2]。

2 传统再热汽温调节策略在低负荷工况下的局限性

2.1 喷水减温调节的不足

喷水减温是锅炉再热汽温调节中常用的一种手段。在正常负荷工况下,喷水减温能够较为有效地调节再热汽温。然而,在低负荷工况下,喷水减温存在明显的局限性。由于低负荷时蒸汽流量较小,少量的喷水量就可能引起再热器内蒸汽温度急剧下降,甚至出现水塞现象,影响再热器的安全运行。此外,喷水减温会增加汽轮机的凝结水损失,降低机组的热经济性。而且,喷水减温的调节响应速度相对较慢,难以快速适应低负荷工况下再热汽温的快速变化,容易导致再热汽温波动较大^[3]。

2.2 烟气挡板调节效果不佳

烟气挡板调节是通过改变烟气流量在不同受热面之间的分配来调节再热汽温。在低负荷工况下,由于烟气流量本身较小,烟气挡板的调节裕度有限。即使大幅度调整烟气挡板开度,对再热汽温的影响也不明显。同时,烟气挡板在低负荷时容易出现卡涩、动作不灵活等问题,导致调节不准确。而且,烟气挡板调节存在较大的惯性,从调节动作到再热汽温发生变化需要较长时间,这在低负荷工况下再热汽温变化较快的情况下,难以满足实时调节的要求。

2.3 燃烧器摆角调节的限制

燃烧器摆角调节是通过改变燃烧器的倾角来调整火焰中心位置,从而影响再热汽温。在低负荷工况下,燃烧器摆角调节同

样面临诸多限制。一方面,为了维持稳定燃烧,燃烧器的摆角调整范围不能过大,否则可能导致燃烧不稳定甚至熄火。另一方面,低负荷时炉膛内气流扰动减弱,燃烧器摆角调整对火焰中心位置的影响不如高负荷时显著,再热汽温的调节效果大打折扣。此外,长期频繁调节燃烧器摆角还可能引起燃烧器机械部件磨损,影响其使用寿命^[4]。

3 低负荷工况下锅炉再热汽温调节策略的优化方向

3.1 基于智能控制算法的调节策略

在低负荷工况下,传统控制策略难以应对再热汽温调节的复杂多变性,引入智能控制算法成为提升调节性能的关键路径。模糊控制以模糊集合理论为基础,当获取再热汽温的偏差及偏差变化率等实时信息后,依据预先设定的模糊推理规则,能迅速且灵活地调整调节量。这种控制方式不依赖精确的数学模型,对于低负荷工况下诸如燃烧不稳定、参数波动大等不确定性因素,展现出强大的鲁棒性,能有效减少外界干扰对调节效果的影响。神经网络控制则借助其强大的自学习能力,对海量运行数据进行深度挖掘与分析。通过构建再热汽温与燃料量、蒸汽流量、烟气参数等众多影响因素间复杂的非线性关系模型,可实现对再热汽温未来变化趋势的精准预测,进而提前调整控制参数,达成精确控制。模糊-神经网络复合控制策略更是融合二者所长,模糊控制负责在汽温变化初期快速响应,初步稳定汽温;神经网络控制则在后续阶段,依据持续学习更新的模型,对调节量进行精细优化,从而更好地适应低负荷工况下再热汽温调节过程中呈现的不确定性和高度复杂性,大幅提升调节的准确性与稳定性^[5]。

3.2 优化受热面结构与布置

再热器受热面的结构和布置情况,对其在低负荷工况下的传热性能有着决定性影响。传统的垂直管屏再热器在低负荷时,由于蒸汽流量和烟气流速大幅降低,易出现汽温偏差较大的问题。而新型的螺旋管圈再热器,其独特的螺旋管圈结构使得蒸汽在管内流动更为均匀,能更好地适应低负荷工况下蒸汽流量的变化。同时,在面对烟气流速降低时,螺旋管圈结构可增强烟气与受热面的扰动,强化传热效果,有效减少汽温偏差。在烟道中合理调整再热器的位置同样关键,通过精确计算和模拟分析,将再热器布置在既能充分吸收低负荷工况下烟气热量,又能避免因烟气冲刷不均匀导致局部磨损和结渣的区域。此外,在再热器表面采用特殊的涂层技术,如陶瓷涂层,该涂层具有良好的耐高温、耐腐蚀性能,能显著提高再热器抗结渣和积灰的能力。结渣和积灰减少后,热阻降低,热量传递更为顺畅,进而为再热汽温的稳定调节提供坚实保障。

3.3 加强燃烧优化与调整

低负荷工况下,燃烧工况的不稳定是影响再热汽温调节的重要因素之一,因此加强燃烧优化与调整至关重要。采用先进的低氮燃烧器技术,其通过特殊的燃烧结构设计和燃烧过程控制,在有效降低氮氧化物排放、满足环保要求的同时,能够显著提升燃烧的稳定性与效率。在低负荷时,稳定的燃烧状态可确保炉膛

内热量释放均匀,为再热汽温调节提供稳定的热源。优化燃烧器的配风方式是燃烧优化的关键环节,依据负荷变化实时、精确地调整二次风、三次风等的风量和风速。在低负荷阶段,适当增加二次风的比例,可促进燃料的充分燃烧;合理控制三次风的风速和角度,能有效调整火焰形状和中心位置。通过精准的配风,使燃料与空气实现充分混合,确保燃烧过程完全且火焰中心处于理想位置。如此一来,炉膛内的温度场和烟气流动得以稳定,避免了因燃烧工况剧烈变化对再热汽温产生的不利影响,极大地提高了再热汽温调节的可靠性,保障了锅炉在低负荷工况下的稳定运行^[6]。

4 低负荷工况下再热汽温调节系统的协同优化

4.1 多调节手段的协同控制

在低负荷工况下,为实现再热汽温的精准调节,需将喷水减温、烟气挡板调节、燃烧器摆角调节等多种手段有机融合,达成协同控制的高效模式。每种调节手段各具特性,喷水减温调节响应相对迅速,但过多喷水会显著降低机组热经济性,甚至在低负荷蒸汽流量小的情况下,极易引发水塞风险。烟气挡板调节通过改变烟气流量分配来调节再热汽温,不过其调节存在一定惯性且在低负荷时调节裕度有限。燃烧器摆角调节能调整火焰中心位置影响再热汽温,然而低负荷时摆角调整范围受限且效果减弱。因此,依据再热汽温的实际变化状况,合理分配调节任务极为关键^[7]。当再热汽温偏差处于较小范围时,优先启用燃烧器摆角与烟气挡板调节,充分利用二者在微调方面的优势,降低喷水减温的使用频率,从而减少热经济性损失。而一旦再热汽温偏差较大且急需快速调节时,可适当投入喷水减温,但必须严格把控喷水量,同时紧密结合燃烧器摆角和烟气挡板调节,利用它们的辅助调节作用,有效规避水塞等安全隐患,全方位提升再热汽温调节的整体性能^[8]。

4.2 调节系统与机组整体运行的协同优化

再热汽温调节系统并非独立存在,其运行状态与机组整体运行状况紧密相连、相互影响。在低负荷工况下,将再热汽温调节系统与机组的负荷控制系统、给水控制系统等进行协同优化,是保障机组稳定运行的关键举措。以机组负荷变化为例,当负荷发生变动时,其变化速率和幅度会对再热汽温产生直接影响。此时,借助先进的监测与分析技术,根据负荷变化的实时数据,提前对再热汽温调节系统的相关参数进行精准调整,使调节系统能够快速、有效地适应负荷变化带来的扰动,维持再热汽温的相对稳定^[9]。同时,再热汽温调节系统与给水控制系统的协同配合也不可或缺。通过二者的紧密协作,确保蒸汽流量在低负荷工况下能够平稳变化,避免蒸汽流量的大幅波动对再热汽温调节造成干扰,为再热汽温调节营造良好的蒸汽侧条件。通过这种调节

系统与机组整体运行的深度协同优化,能够切实保障机组在低负荷工况下实现安全、经济且稳定的运行,提升机组的综合性能与运行可靠性^[10]。

5 结论

低负荷工况下锅炉再热汽温的稳定调节是保障火电机组安全、经济运行的关键环节。本文通过对低负荷工况下影响再热汽温的因素进行分析,明确了传统调节策略存在的局限性。在此基础上,从智能控制算法应用、受热面结构优化、燃烧优化以及调节系统协同等多个方面提出了再热汽温调节策略的优化方向。通过这些优化措施的实施,有望提高低负荷工况下再热汽温调节的精准性和稳定性,减少再热汽温波动,降低机组运行成本,提高机组的整体性能和灵活性,以更好地适应现代电力系统对火电机组变负荷运行的要求。未来,随着技术的不断发展,还需进一步深入研究和探索更先进、更有效的再热汽温调节策略,为电力行业的可持续发展提供有力支持。

[参考文献]

- [1] 马达夫,刘欢,何翔,等.超低负荷下660MW塔式锅炉低氧工况下燃烧过程数值模拟研究[J].锅炉技术,2024,55(05):43-51.
- [2] 谢卓时.锅炉低负荷及停炉工况下受热面及联箱凝结水形成及应对[D].华北电力大学(北京),2024.
- [3] 张文祥,徐文韬,黄亚继,等.不同负荷工况下660MW循环流化床锅炉脱硝特性研究[J].电力科技与环保,2024,40(1):60-67.
- [4] 陈国庆,王春波,洪迪昆,等.燃煤锅炉低负荷工况下焦炭N向NO的转化机理分析[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),1-9[2025-04-11].
- [5] 张良,刁云鹏,赵树龙,等.电站锅炉低负荷工况下水平烟道积灰治理[J].锅炉制造,2020,(05):34-36.
- [6] 裴顺,杨桂.燃煤机组低负荷工况下安全稳定运行研究[J].南方能源建设,2018,5(S1):19-24.
- [7] 刘雲鹏,许彤.660MW超临界锅炉低负荷运行工况下再热器汽温偏低原因分析及改造、运行措施探讨[J].工程技术研究,2017,(11):110+112.
- [8] 罗江勇,吕新乐.锅炉低负荷工况下脱硝系统投运率提高的改造技术[J].中国电力,2015,48(11):138-141.
- [9] 陈国华.锅炉不同负荷工况下的优化调整[J].科技传播,2012,4(13):33.
- [10] 陈志刚,毛富杰,张旭,等.工业锅炉低负荷工况节能分析与对策[J].应用能源技术,2011,(09):22-25.

作者简介:

安柠灿(1992--),男,土家族,贵州省凤冈县人,大学本科,工程师、注册安全工程师,火力发电厂锅炉检修。