

Ultra-supercritical double reheat unit steam turbine vibration control technology

Mingxiao Zhao

Huaihe Energy Huainan Panji Power Generation Co., Ltd., Huainan, Anhui, 232000, China

Abstract

This paper presents a systematic analysis of the vibration control technology for steam turbines in ultra-supercritical double reheat units. First, it analyzes the main causes of steam turbine vibration, including mechanical and thermal factors such as rotor dynamic unbalance and misalignment, steam flow excitation and bearing bush instability, as well as thermal deformation and restricted expansion. Second, it introduces vibration monitoring and diagnosis technologies, namely the methods for constructing online monitoring systems, extracting and identifying fault features, and conducting diagnosis by fusing multi-source data. Finally, it proposes the corresponding vibration control and treatment measures, such as on-site rotor dynamic balancing, stabilization improvement of bearings and shafting, operation adjustment and maintenance. Comprehensive treatment can effectively improve the operational safety and economic efficiency of the units.

Keywords

Turbine vibration; fault diagnosis; stability optimization

超超临界二次再热机组汽轮机振动治理技术

赵明晓

淮河能源淮南潘集发电有限责任公司, 中国 · 安徽 淮南 232000

摘要

本文对超超临界二次再热机组汽轮机振动治理技术进行了系统的分析。先对汽轮机振动的主要原因进行分析, 即转子动不平衡和不对中、汽流激振和轴瓦失稳、热变形和膨胀受阻等机械及热力因素。其次就是介绍了振动监测和诊断技术, 即对在线监测系统构建、提取并识别故障特征及融合多源数据进行诊断的方法。最后给出相应的振动控制和治理措施, 如转子现场动平衡、轴承及轴系稳定化改进、运行调节和维护等。经过综合治理之后可以提高机组的运行安全性和经济性。

关键词

汽轮机振动; 故障诊断; 稳定性优化

1 引言

本文主要对本类机组振动原因进行系统的分析, 综述先进的监测诊断技术, 提出有效的治理措施, 给工程实践提供理论依据和技术支持, 促使机组振动管理由被动应对转向主动预防, 保证电力系统可靠、高效运行。

2 汽轮机振动原因分析

2.1 转子动不平衡与不对中

转子系统机械缺陷是引起强迫振动的主要原因, 动不平衡和不对中问题最为突出。动不平衡即转子的质量中心和几何中心不重合, 在高速旋转的时候会产生周期性的离心力, 振动频率与转子的工频 ($1\times$) 相同, 在轴承座上表现为径向振动为主导。对于超超临界二次再热机组, 其高中低

压转子大、结构复杂, 在制造、安装 (叶片装配误差)、长期运行 (叶片结垢、脱落、不均匀磨损) 等过程中都会产生或者加剧不平衡。不对中是指相邻转子之间 (用联轴器相连) 或者转子和汽缸、轴承之间中心线有偏移, 分为平行不对中、角度不对中以及综合不对中。不对中会引起工频及其二倍频 ($2\times$) 为主的径向振动, 也会产生明显的轴向振动, 使联轴器附加应力增大、轴承偏磨和油膜失稳。二次再热机组因为汽缸数量多、轴系长, 在启停过程中容易出现不均匀热膨胀、基础沉降等动态不对中现象, 使问题更复杂、更隐蔽。

2.2 汽流激振与轴瓦失稳

随着机组参数的增大以及效率的改善, 流体动力激振的影响越来越大。汽流激振主要在高压转子的部位, 特别是调节级、高压缸的密封处。当蒸汽以非对称的方式流经叶栅或者密封齿时, 就会产生垂直于转子偏移方向的一个切向力 (即 Alford 力), 该力在一定的条件下会对转子做正功, 提供能量, 可能会引起转子的低频自激振动, 其频率一般为

【作者简介】赵明晓 (1987-), 男, 中国山东泰安人, 本科, 助理工程师, 从事火电厂集控运行研究。

转子一阶临界转速的0.4到0.5倍。当超超临界二次再热机组处于高负荷运行状态时,该种激振力可以造成转子产生较大的、突然的振动,危及安全。轴瓦失稳主要是由轴承的油膜动力特性造成的。转轴在滑动轴承中转动时会产生承载油膜,在高速、轻载或者某些轴承几何参数下,油膜会存在造成转子涡动的力,引起油膜振荡或者油膜涡动。它的典型特征就是会出现低于工频(一般为 $0.42-0.48 \times$ 工频)并且几乎恒定的振动成分,当转子转速大于二阶临界转速的一倍时,油膜振荡会突然发生,并且振幅急剧增大。此类自激振动是由转子初始不平衡引起的,不属于系统的稳定性丧失。

2.3 热变形与膨胀受阻

热力因素引起的振动在启停机、变负荷时更加明显。热变形主要是指转子或者汽缸在非均匀温度场中所发生的一种弯曲现象。转子在启动暖机不充分的时候,上下缸温差或者转子内部温差会造成临时性的热弯曲,引起以工频为主的较大振动;停机后盘车不当也会造成永久性弯曲。对于使用二次再热技术的机组,它的再热蒸汽管路系统庞大、复杂,如果蒸汽温度控制不当或者管道布置不合理的话,就会加大转子受热不均的程度^[1]。膨胀受阻是大型机组安装和运行中经常出现的问题,是指汽缸、轴承座等在受到热胀冷缩作用时,由于滑销系统卡涩、管道推力过大会造成不能按照设计方向自由移动。这样就会造成机组中心发生变化,产生动态不对中,有可能使轴承座抬起,改变轴承的荷载分配,从而引发以工频为主的一种振动,振动值与负荷的变化关系明显呈滞后性,一般有明显的滞后现象。另外,由于转子与静止部件(汽封、隔板等)存在膨胀差而产生的碰磨现象,也是典型的一种热-机械耦合故障,它的振动特性比较复杂,会含有较多的次谐波和低频分量。

3 振动监测与诊断技术

3.1 在线监测系统构建

创建起高可靠、高精度的在线监测系统,这是振动治理的基本工作。该系统要对机组的所有重要部位进行全方位的监测,使用分布式结构的设计,在每一个轴承的位置安装完整的传感器网络。电涡流位移传感器用来检测轴颈相对于轴承座的相对振动,是评价转子动态行为的直接参数;速度或者加速度传感器用来测量轴承座的绝对振动,反映的是机械结构的振动状况。对于超超临界二次再热机组来说,监测系统更加复杂,需要在超高压缸、高压缸、中压缸、两个低压缸以及发电机等所有的旋转部件上布置大量的测点。尤其是轴向振动监测点的设置,对判断推力轴承异常、轴向窜动有很重要的作用。

监测系统硬件配置要符合严格的技术工程标准。数据采集单元需要有高的采样率以及宽频带的响应特性,可以准确地捕捉到由低频的油膜振荡、高频的叶片通过频率等所有的频段的振动信号。在实际的运行环境中,采集系统还要有

较强的抗干扰能力,在复杂的电磁环境里依然可以得到纯净、可靠的数字信号。数据传输网络使用的是工业级的通信协议,保证监测数据可以实时、稳定的传送到中央处理单元,为后面分析提供及时的数据支持。

软件平台的创建也是十分重要的。先进的监测软件要能实时地显示出各个测点的振动幅值、相位等主要参数,并且应该有完善的数据库管理系统,包含历史数据存储、趋势分析、报警处理等功能^[2]。系统应能支持多级报警阈值的设置,可以依据振动变化率、频谱特征等各方面的信息来进行智能报警。在软件平台上需要有基本的频谱分析、波形显示、轴心轨迹绘制等诊断工具,给运行人员提供一个好的状态监测界面。整个监测系统的设计要考虑到可扩展性和兼容性,保证以后功能升级和技术改进方便。

3.2 故障特征提取与识别

从大量的监测数据里准确地提取出故障特征,是振动诊断的技术环节。该过程要同时使用各种各样的信号处理方法,把原始的振动数据转换成有明确物理意义的故障指标。时域分析法主要研究振动信号在时间上的波形特征以及统计特性,通过对峰峰值、有效值、峭度、歪度等参数的分析来大致判定振动的性质及严重程度。尤其是峭度指标对早期的冲击型故障很敏感,在振动幅值明显增大之前就能发出预警信号,给预防性维护留出宝贵的时间窗口。

频域分析是最主要的振动诊断技术,也是最复杂的一种。用傅里叶变换把时域信号转到频域谱图上,就可以清楚地看出振动能量的频率分布特点。不同的故障在频谱上会显示出不同的频率成分,不平衡故障的主要特征就是工频分量比较明显,不对中故障一般伴随着明显的二倍频分量,油膜涡动会发出低于工频的特殊频率分量,摩擦故障可能会产生丰富的分数倍频和谐波分量。对于超超临界二次再热机组来说,要重点考虑气流激振所引起的低频振动成分,该类振动通常和负荷的变化有关,在频谱上表现为接近半频的特征峰。

轴心轨迹分析是从几何形态的角度来发现故障的一种方法。用轴心在轴承间隙内画出的运动轨迹来直观地看出转子的运动状态和受力状况。不同的故障会使得轨迹呈现出不同的几何形态,正常的轨迹接近于椭圆,严重的不平衡会造成轨迹增大但仍然保持着椭圆的形状,不对中故障会使轨迹变成香蕉形或者外八字形,油膜涡动会产生双环或多环的轨迹。通过对频谱分析、轨迹分析来提高故障诊断的准确性和可靠性。在实际的应用中还要考虑到各种故障特征之间存在的耦合作用,不能只依靠一个指标来做出判断。

3.3 多源数据融合诊断方法

随着人工智能技术的发展,以机器学习为基础的智能诊断方法正逐渐成为新的技术方向。创建历史故障案例库,用神经网络、支持向量机等算法来训练诊断模型,可以达到对故障模式进行自动识别和分类的目的。智能算法可以处理

多维特征数据,发现人工无法察觉到的微小故障征兆,达到早期预警的目的。专家系统技术的发展使领域专家的诊断经验可以用规则库的形式保存并传承下来,用推理机来实现自动化的故障诊断。未来,伴随着数字孪生技术在电力行业中的应用,以物理模型与数据驱动相结合的方式进行混合诊断的方法会越来越先进,给超超临界二次再热机组的稳定运行给予更强大的技术支持。

依靠建立完善的监测诊断体系,超超临界二次再热机组的振动管理由原来的被动应对转变为现在的主动预防。该体系可以及时发现并处理已经发生或者即将发生的故障,并且还可以对可能出现的危险进行预测,给机组的优化运行以及计划性的检修提供科学依据,从而达到安全性和经济性相统一的目的。

4 振动控制与治理措施

4.1 转子现场动平衡技术

当确定振动主要是由转子不平衡造成的时,现场动平衡就是最直接、最有效的治理方法。核心就是不在揭缸的情况下,在转子的两端或者中间平面(通过平衡槽)试加配重,来抵消不平衡量。传统的办法是使用影响系数法或者试重法,通过启停机或者在线采集加重前后的振动幅值及相位的变化来计算需要平衡的质量以及方位。对超超临界二次再热机组的长轴系、多转子系统,一般都需要做多平面、多转速(工作转速和过临界转速等)的综合平衡,保证各个轴承振动以及过临界时的振动峰值都能满足要求。近几年来,以永久性在线监测系统为基础的“无试重”动平衡技术和“慢速”自动平衡技术(如安装在线可调平衡头),利用历史数据或者慢转速下振动的信息来进行计算,可以在运行时自动调节配重的位置,大大减少了平衡所用时间以及启停次数,提高了经济性和安全性。

4.2 轴承与轴系稳定性优化

对于气流激振、油膜失稳等问题的解决办法就是加强轴承设计和轴系动力学性能。对滑动轴承而言,可以改变其几何参数来提高稳定性,采用可倾瓦轴承代替圆筒瓦或者椭圆瓦,因为可倾瓦块可以自动调节角度从而抑制油膜涡动,稳定性非常好;调整轴承的长径比、间隙比、油楔的设计等也可以改变油膜的刚度和阻尼。检修过程中保证轴承座接触刚度好、标高正确、荷载分布合理,属于基础工作。对于汽

流激振的治理,主要是对汽封结构进行改进,如将原来的迷宫式汽封换成蜂窝式汽封、篦齿式汽封或者刷式汽封等新型汽封,可以有效地减小蒸汽激振力,并且提高密封性^[1]。

4.3 运行调整与维护策略

科学的运行操作和预防性维护属于控制振动的第一道防线。启停阶段必须严格按规程执行,控制上下缸温差、转子上下温差在允许范围之内,保证有足够的暖机时间来消除热弯曲,使盘车装置正常运转。在变负荷运行中,尤其是经过容易诱发气流激振的负荷区的时候,要平稳操作,不能使参数发生剧烈变化。运行人员要密切注意振动趋势的变化,一旦发现异常增大,就应对有关参数进行分析,必要时采取降低负荷、调节轴封供汽等措施。在维护策略上应该创建起以状态监测为基础的预测性维修制度。定期检查滑销系统有无卡涩现象,清除积垢,保证汽缸与轴承座自由膨胀;检查管道支吊架的状态,消除不必要的应力;监测通流部分结垢的情况,适时进行在线或者离线清洗,防止由于结垢不均而引起不平衡。通过对长时间振动数据的趋势分析,可以预知轴承磨损、松动等故障的发展情况,提前做好检修工作,把故障消灭在萌芽状态,达到长效、主动治理振动的目的,保证该技术密集型660MW超超临界二次再热机组一直处在最佳状态。

5 结语

超超临界二次再热机组汽轮机的振动治理属于综合性工程,必须依靠从故障机理分析、智能监测诊断和有针对性的治理这三个方面共同推动。依靠建立准确的在线监测系统、采用多源数据融合诊断的方法,并且采取转子动平衡、轴承优化和科学的运行维护措施来达到对振动的控制。下一步随着人工智能和数字孪生技术的深入融合,振动治理会更智能、更精准,给机组长期安全经济运行打下坚实的基础,推动清洁高效火电机组技术不断向前发展。

参考文献

- [1] 殷凌超,方超,杜镇宇. 某电厂660 MW汽轮发电机振动突升问题分析及处理[J]. 电机技术, 2025, (06): 50-53+61.
- [2] 李建生,胡庆权. 660MW汽轮发电机轴承振动大原因分析及处理措施[J]. 电工技术, 2025, (11): 1-3.
- [3] 徐国生,周天旺. 某660MW汽轮机振动原因分析及处理[J]. 能源研究与管理, 2019, (01): 92-94.