

# 深度调峰对600MW发电机的影响及其检修维护措施

王 磊

国能内蒙古呼伦贝尔发电有限公司 内蒙古 呼伦贝尔 021000

**摘 要：**随着电网峰谷差愈来愈大，大型机组的调峰任务也愈来愈重，电网调度对火电机组“深度调峰”能力的需求日趋凸显，发电企业应积极研究探索，多措并举提升机组深度调峰能力，为保证电网安全运行贡献力量。随着燃煤发电时间的减少，600MW机组越来越多地参加电网的调峰，其最大负载仅为其额定功率的1/3，需要进行深度调峰。600MW规模燃煤电站在实现600MW规模以上的深度调峰过程中，必须保证不出现无计划停电事故，同时又要符合国家环境保护的相关规定，这是所有600MW规模燃煤电站必须考虑的问题。

**关键词：**深度调峰；振动；短路；接地

随着600MW机组越来越多地进入深层调峰，在确保其安全、经济的前提下，实现其在满足节能减排要求的前提下，在满足电网需求的前提下，实现600MW级燃煤电厂的节能减排，是我国所有600MW级火电企业面临的重要问题。

## 1600MW机组振动监测与预警系统介绍

1.1 系统架构与核心功能。多维度监测网络。系统集成电涡流传感器、加速度计和光纤传感器，实时采集轴系振动、定子绕组端部振动及结构共振数据，覆盖轴振（分辨率 $\leq 1\mu\text{m}$ ）、瓦振（精度 $\pm 2\%$ ）等关键参数。针对定子绕组端部振动，部署专用光纤振动传感器，监测频率范围覆盖85-115Hz，防止电磁力引发的悬臂梁结构共振<sup>[1]</sup>。分层式数据平台。采用TDM（振动监测系统）与DCs（分布式控制系统）数据融合架构，通过大数据平台实现每秒万级数据点的实时处理，支持振动频谱、相位角、倍频分量等多维度分析。

1.2 技术要点。振动信号采集：采用加速度传感器或速度传感器，监测轴系、线棒端部等关键部位的振动，避免因电磁力或结构松动引发共振（如100Hz振动需避开94-115Hz的固有频率区间）。智能算法融合：结合大数据分析和人工智能技术，构建故障诊断模型，例如周期分段法、齿轮箱单齿周期分段算法等，提升对叶片断裂、转子裂纹等故障的识别精度。多参数联动分析：除振动数据外，还需整合温度、压力脉动、轴位移等工况参数，实现机组稳定性综合评估及运行优化。

1.3 典型应用场景。轴瓦与轴系振动控制：通过动平衡配重技术解决质量不平衡引起的振动超标问题，确保轴系振动值低于 $70\mu\text{m}$ （国家标准优良指标）。线棒端部监测：安装在线振动检测装置，监测发电机定子线棒因松动导致的固有频率偏移，预防绝缘磨损和绕组故障。

远程与本地协同：支持基于IEEE 802.11的无线传输或485/4G有线通信，实现数据远程传输及本地化实时保护（如报警、跳机逻辑执行）。

1.4 系统优势。高可靠性：通过TSI系统与振动分析仪的多重冗余设计，保障监测精度和实时性。智慧化运维：从传统定期检修转向状态检修，动态掌握设备健康状况，缩短故障停机时间。兼容性与扩展性：支持预留接口扩展（如气隙监测、局部放电监测），适应不同机组的定制化需求。

1.5 行业发展趋势。目前系统正向更高集成度、更智能化的方向发展，例如中央研究院研发的CMS（振动状态在线监测）系统，融合物联网技术实现风机传动链的全面监测与预警，为600MW机组提供可复用的技术方案。

1.6 600MW机组振动监测技术原理。（1）振动信号产生与采集原理。机械振动来源：机组运行中因转子质量不平衡、部件松动、电磁力交变（如发电机线棒端部受100Hz电磁力激励）等因素引发机械振动，形成可测量的振动信号。传感器技术：采用加速度传感器、位移传感器（如轴振、瓦振传感器）将机械振动转换为电信号，其中加速度传感器基于牛顿第二定律测量振动加速度，位移传感器通过位置变化判断振幅。发电机线棒端部安装振动检测装置，监测因松动导致的固有频率偏移（需避开94-115Hz共振区间）。（2）信号处理与分析原理。数据预处理：通过TSI系统（汽轮机保护系统）和振动分析仪（如SK1972型）采集原始振动信号，经滤波、放大和模数转换消除噪声干扰。频谱与波形分析：利用傅里叶变换将时域信号转换为频域信号，识别振动频率分量（如工频、倍频等）。包络分析技术提取高频冲击信号（如滚动轴承故障特征），通过解调算法分离故障谐波。（3）故障诊断与预警机制。阈值与模型判断：结

合历史数据设定振动阈值（如轴振优良值低于 $70\mu\text{m}$ ），当实测值超过阈值时触发报警；同时通过人工智能模型分析频谱特征，识别转子裂纹、动平衡失调等典型故障。多参数联动：整合温度、压力脉动等工况参数，综合评估机组稳定性。例如，电机轴振超标时需分析是否因负荷变化导致轴系动态特性偏移。（4）系统实现架构。实时监控：传感器信号通过有线（如485通信）或无线（IEEE 802.11）传输至本地/云端服务器，实现振动速度、位移等参数的连续记录。动态反馈：根据诊断结果自动触发动平衡配重调整或停机保护逻辑，避免共振和部件损坏。

## 2 600MW 机组深度调峰对发电机定子影响

2.1 热应力与机械损伤。深度调峰过程中，发电机定子绕组需频繁承受负荷剧烈变化引起的温度波动，导致定子铁芯、绕组等部件反复经历热膨胀和收缩。这种交变热应力会加速金属材料的疲劳老化，长期运行可能引发定子铁芯叠片松动或绕组变形<sup>[2]</sup>。

2.2 定子与转子热膨胀差异。低负荷运行时，定子与转子因温度分布不均产生的热膨胀差值显著增大。若差值超过设计阈值，可能导致定子绕组与转子绕组间的气隙不均匀，进而引发局部放电或绝缘磨损，甚至诱发定子绕组匝间短路故障。

2.3 绝缘系统劣化风险。深度调峰时，定子绕组长期处于低负荷工况下，其绝缘材料可能因温度波动频繁而加速老化。此外，低负荷运行导致的发电机冷却能力下降（如氢气冷却系统效率降低）会加剧绝缘材料的热劣化，增加定子绕组接地或相间短路的概率。

2.4 低周疲劳损伤累积。频繁的负荷升降（如从600MW降至240MW或更低）会使定子结构件（如端部固定件、槽楔等）承受周期性机械应力，导致低周疲劳损伤累积。长期运行可能引发定子端部松动或振动加剧，威胁机组安全稳定运行。

2.5 经济性与运行安全平衡。尽管深度调峰可提升电网灵活性并带来调峰收益（如每小时逾6万元补偿），但定子部件的频繁应力损伤会缩短设备寿命，增加维护成本。实际运行中需通过实时监控热膨胀差值和绝缘状态，优化调峰策略以平衡经济性与安全性。600MW机组深度调峰对定子的核心影响集中于热应力损伤、热膨胀差异导致的机械应力、绝缘系统劣化及低周疲劳问题。需通过技术优化（如旁路抽汽改造）和实时监控手段，缓解定子部件的损伤风险，确保调峰安全与经济并存。

## 3 600MW 机组深度调峰对发电机转子影响

3.1 转子绕组变形与机械应力。深度调峰过程中，负

荷频繁波动导致转子绕组承受交变热应力，易引发铜线塑性变形和匝间短路。转子本体与轴柄过渡圆角处因机械应力集中，可能产生裂纹，严重时导致转子报废（如某600MW机组转子曾出现长达1650mm的周向裂纹）。

3.2 绝缘老化加速。频繁的温度变化加速转子绕组绝缘材料的热老化，降低绝缘性能，增加短路风险。长期低负荷运行加剧冷热循环效应，导致绝缘层龟裂或分层。疲劳损伤与裂纹扩展风险。调峰启停次数增多会加重转子转动部件的疲劳损伤，尤其是护环、槽楔等关键部位易出现微裂纹并扩展。典型案例显示，某600MW机组转子因多次调峰启停，护环内侧径向跳动值异常增大至 $600\mu\text{m}$ ，最终引发严重振动故障。附属部件可靠性下降。转子引线压板螺钉等连接件在频繁负荷波动中易发生断裂，可能引发定子短路等连锁故障。励磁系统部件（如集电环）因温度变化导致接触不良或过热，加剧转子系统不稳定性。建议措施：需加强转子绕组温度监测，优化调峰速率以减少热冲击；定期开展转子匝间绝缘检测及裂纹探伤；对长期参与深度调峰的机组，建议进行转子结构强化改造。

## 4 600MW 机组深度调峰对发电机冷却系统氢冷器影响

4.1 温度波动与热应力。负荷频繁变化导致温度波动。深度调峰过程中，发电机负荷频繁变化会引起定子、转子绕组温度快速升降，导致氢冷器需频繁调节氢气温度以适应散热需求。频繁的温度变化易引发氢冷器管束及密封结构的热应力疲劳。低负荷下冷却效率下降。低负荷运行时，发电机内部发热量减少，氢冷器可能因冷却需求降低而处于低效工况。若调节不及时，氢气温度过低可能引发氢气湿度异常，加剧氢冷器内部结露风险。

4.2 氢气参数控制挑战。氢气湿度管理难度增加。深度调峰时，氢气循环量及温度波动可能导致氢气湿度超出设计范围。湿度过高会加速氢冷器金属部件腐蚀（如护环应力腐蚀），湿度过低则可能引发绝缘材料干缩开裂，均需通过氢冷器加强温湿度调节。氢气纯度与压力波动。负荷快速变化时，发电机密封油系统可能出现压力波动，导致氢气泄漏或纯度下降。氢冷器需配合密封系统维持氢气纯度，避免因杂质增多影响散热效率。

4.3 设备可靠性风险。氢冷器堵塞与腐蚀。长期深度调峰下，氢冷器冷却水侧可能因水质控制不当产生结垢或微生物滋生，降低换热效率；氢气侧若湿度控制不佳，易引发内部金属腐蚀，缩短设备寿命。辅助系统联动压力。氢冷器的稳定运行依赖循环水系统、密封油系

统等辅助设备的协调。深度调峰时,若循环水流量或温度调节滞后,可能直接导致氢冷器散热能力不足,威胁发电机安全。

4.4 应对措施建议。优化氢冷器调节逻辑:根据负荷变化实时调整冷却水流量及温度,减少温度突变对氢冷器的冲击。加强氢气参数监测:重点关注氢气湿度、纯度及压力,避免因参数异常导致氢冷器效能下降。定期维护与清洗:针对氢冷器水侧结垢问题,制定化学清洗计划;氢气侧定期检漏及防腐处理。深度调峰对氢冷器的核心影响在于加剧了温度、湿度等参数的动态变化,需通过精细化调节和设备维护保障其可靠性。

### 5 深度调峰发电机检修维护措施

5.1 检修流程与标准。检修前准备。制定专项检修方案,明确人员配置、工具材料清单及安全风险预控措施。对发电机转子、定子绕组、冷却系统等关键部件进行初步状态评估,确定检修优先级。关键部件维护。电气系统:检查绕组绝缘性能、电缆接头紧固度及接地可靠性,避免因频繁负荷变化导致接触不良或放电。润滑系统:定期更换润滑油及滤芯,监测轴承温度及振动参数,确保润滑效果符合低负荷工况需求。冷却系统:清理散热器及风道积灰,校验冷却水循环泵和阀门密封性,防止因低负荷运行导致局部过热。专项试验与验收。完成发电机绝缘电阻测试、耐压试验及空载/负载特性试验,确保电气性能达标。进行连锁保护系统静态调试(如过流、过温保护逻辑),验证动作可靠性。

5.2 深度调峰适应性优化。灵活性改造。结合机组类型(如直流锅炉特性),优化励磁系统响应速度及调频能力,提升变负荷速率。强化转子动态平衡监测,减少因频繁调峰导致的机械应力损伤。低负荷运行保障。加强碳刷与滑环的检查频次,避免因低转速下接触不良引发火花或磨损。优化氢气密封系统(若为氢冷机组),防止漏氢风险,并定期校验氢气纯度。

5.3 安全与质量管理。风险防控。针对调峰期间可能出现的振动突变、局部过热等问题,制定应急预案并开展模拟演练。严格执行检修工序卡制度,落实关键节点

质检记录,避免漏检或误操作。合规性要求。遵循《煤电机组灵活性改造和深度调峰安全管理通知》,确保改造方案符合环保排放、设备寿命等评估要求。检修后需通过水压试验、安全阀校验等强制性验收项目,方可并网运行。

5.4 周期性维护建议。日常巡检:重点关注碳刷磨损、冷却介质泄漏及振动异常。大修周期:结合累计运行小时数及调峰频次,缩短发电机解体检查周期(如每3-4年)。

5.5 600MW机组深度调峰运行风险的处理方法。燃烧稳定性保障措施。燃料优化:掺配高挥发分煤种(挥发分 $\geq 12\%$ ),禁止输煤系统旁路运行,确保煤粉细度。稳燃措施:负荷 $\leq 350\text{MW}$ 时投入油枪(每次2-6支),维持油压 $\geq 2.5\text{MPa}$ ,并关闭炉膛漏风点。锅炉水动力优化。流量控制:负荷 $\leq 280\text{MW}$ 时切换给水旁路运行,通过再循环维持小机流量 $\geq 450\text{t/h}$ ,避免跳泵。温度监测:加强水冷壁壁温监测,避免局部超温或汽水分层。汽温调节技术。燃烧调整:采用分层配风,降低火焰中心高度,增加尾部烟道吸热量。减温水控制:减少喷水量,优先通过风量调整汽温,避免汽温骤降。全负荷脱硝技术。烟气旁路改造:增设SCR入口高温烟气旁路系统,提升低负荷烟温至脱硝投运下限以上。热力系统优化:利用冷段抽汽加热给水,提高锅炉入口水温,间接提升烟温。设备可靠性管理。

总之,深度调峰下600MW机组需重点防范燃烧失稳、水动力失衡及环保超标风险,通过燃料优化、全负荷脱硝改造、控制逻辑迭代等措施提升适应性。同时需加强设备动态监测与维护频次,确保低负荷工况安全稳定运行。

### 参考文献

- [1]吴浩,深度调峰对600MW机组振动特性的影响与维护策略.2023.
- [2]赵海波,浅谈深度调峰对600MW机组振动特性的影响及其维护措施.2022.