Mechanism Analysis of Mechanical Faults in Francis Turbine Generating Units

Songhang Jiang[1]　Yunping Jiang[2]

1. Taipingwan Power Plant of Lüyuan Hydropower Generation Company, Northeast Branch of State Grid Corporation of China, Dandong, Liaoning, 118000, China
2. Yunfeng Power Plant of Lüyuan Hydropower Generation Company, Northeast Branch of State Grid Corporation of China, Tonghua, Jilin, 134200, China

Abstract

As core equipment in the hydropower industry, Francis turbine generating units account for more than 60% of the total installed capacity of global hydropower generating units, and undertake the tasks of power supply as well as functions including peak shaving, frequency regulation and emergency standby for power grids. With the continuous improvement of power system requirements for flexibility and reliability, frequent start-stop operations and load regulation pose higher challenges to the mechanical reliability of units. Mechanical faults account for 40%-50% of all faults of the units, and can trigger a series of chain reactions, resulting in major equipment damage and casualties. This paper comprehensively analyzes the fault mechanism of each major system of the unit, investigates the typical faults of the rotor, bearing, runner and auxiliary systems respectively, and summarizes the inducing factors, operation characteristics and hazards of the faults, so as to provide theoretical support for fault diagnosis and safe operation and maintenance of the units.

Keywords

francis turbine generating unit; mechanical fault; fault mechanism

混流式发电机组机械故障机理分析

蒋松航[1]　蒋云平[2]

1. 国网东北分部绿源水力发电公司太平湾发电厂，中国·辽宁 丹东 118000
2. 国网东北分部绿源水力发电公司云峰发电厂，中国·吉林 通化 134200

摘　要

混流式水轮发电机组作为水电行业的核心设备，约占全球水轮发电机组总装机容量的60%以上，承担着电力供应任务及电网调峰、调频和应急备用等功能，随着电力系统对灵活性和可靠性要求的不断提高，频繁启停和负荷调节对机组的机械可靠性提出了更高的挑战。机械故障占机组总故障的40%-50%，会引发一系列连锁反应，造成重大设备损坏和人员伤亡事故。本文全面剖析机组各系统故障机理，分别研究转子、轴承、转轮及辅助系统的典型故障，总结其诱因、运行特征及危害，为故障诊断与安全运维提供理论支撑。

关键词

混流式发电机组；机械故障；故障机理

1 引言

1.1 混流式发电机组在水电行业中的重要地位

混流式水轮发电机组在全球电力系统中占据着举足轻重的地位，广泛应用于中低水头水电站，单机容量可达1000MW 以上。在中国巨型水电站均采用混流式机组，其技术特点决定了其在水电行业的重要地位[1]。该类机组具有结构紧凑、运行稳定、效率高、适用水头范围广（通常为20-700 米）等优势，能够适应不同的水文条件和电网需求。

1.2 机械故障对机组安全运行的影响

机械故障会干扰混流式发电机组安全平稳工作，轴承、转轮裂纹、主轴损伤这类常见问题会直接危害机组运行。这类问题带来多重不良后果：机组工作效率降低，发电量与收益受损；振动、噪声加剧设备损耗，缩减设备使用时长；严重故障易引发机组停机，扰乱电网运行；故障检修消耗各类资源，提升运维开支。相关数据表明，重大机械故障维修花费可达数百万元，停机造成的损失无法估算。

【作者简介】蒋松航（1998–），男，中国辽宁丹东人，本科，助理工程师，从事水轮发电机机械检修研究。

2 混流式发电机组机械故障机理分析

2.1 转子系统故障机理

2.1.1 转子不平衡故障

转子不平衡是混流式发电机组最常见的机械故障之一，是指转子质量分布相对于旋转轴线存在偏心或不对称，导致机组运行时产生周期性的离心力，引起振动加剧。根据不平衡的性质，可分为静不平衡和动不平衡两种类型。

静不平衡是指转子的质心偏离旋转轴线，在静止状态下即可表现出来。其形成原因包括转轮叶片长期受到空蚀和磨损导致质量分布发生变化；叶片表面结垢或附着异物，破坏了原有的质量平衡；转轮制造过程中存在质量偏差，检修过程中未进行动平衡校验。

动不平衡则是指转子的惯性主轴与旋转轴线不重合，且两轴线平行，在旋转状态下产生周期性的不平衡力和力矩。动不平衡形成原因还包括转子部件松动或脱落，主轴发生弯曲变形；转子热变形导致的临时性不平衡等因素。

转子不平衡故障的危害体现在引起机组振动超标，严重时导致轴承损坏、机座裂纹等次生故障；增加轴承负荷，加速磨损；产生噪声污染；降低机组效率，增加能耗。其振动能量主要集中在转频及其倍频上，通过振动频谱分析可以准确识别。

2.1.2 转子不对中故障

转子不对中是指发电机组的各转子之间的轴线在空间上不重合或不平行，导致轴承承受额外的载荷和力矩。分为平行不对中、角度不对中和综合不对中三种形式。

平行不对中代表两根转子轴线保持平行，但存在径向偏移；角度不对中是两根转子轴线相交形成夹角。综合不对中同时包含以上两种状况。转子发生不对中时振动表现复杂：振动幅值随载荷上升，轴向振动显著加剧，联轴器位置会多出弯矩与扭矩。不对中问题严重时会造成轴承升温、油膜失效、轴颈磨损加重，极端情况下轴承会出现烧损。

2.1.3 转子裂纹与断裂

转子裂纹及断裂属于混流式发电机组的高危机械故障，极易引发重大安全事故。裂纹大多产生于设备应力集中位置，并随运行持续延展，最终造成转子断裂失效。

转子裂纹的产生由多重因素导致：机组长期承受交变载荷会造成材料疲劳，催生微裂纹并持续扩张；轴肩、键槽等结构易出现应力集中问题；锻造残留的气孔、杂质等材质缺陷；水锤冲击、甩负荷等突发工况带来的异常载荷；同时设备腐蚀、磨损问题也会削弱材料强度，诱发裂纹产生。

转子裂纹的演化主要分为萌生、扩展与断裂三个阶段，裂纹扩展至临界尺寸后，转子便会突发性断裂。相关研究证实，裂纹扩展速率符合 Paris 定律。工程中可依托振动分析、声发射、超声波、磁粉及渗透检测等技术，实现裂纹故障的早期识别，有效排查设备表面裂纹。

2.2 轴承系统故障机理分析

2.2.1 推力轴承故障

推力轴承作为混流式发电机组核心构件，承担转子自重与轴向水推力，其工况直接决定机组能否稳定运行。推力轴承故障极易造成机组停机，常见问题包含巴氏合金磨损烧蚀、轴温超标、润滑油变质、冷却回路失效，以及推力头和镜板贴合不佳。

推力轴承升温多由供油不足、供油中断引发，也可能是油品劣化、粘度下降削弱承载性能，或是冷却水量不够、冷却器堵塞、负荷波动加大轴向推力所致。巴氏合金磨损、烧蚀属于推力轴承严重故障，油膜无法成型、油内杂质刮伤接触面、轴承长期过载、冷却散热失效，均会造成合金层烧损。

推力轴承故障会引发严重后果：轴承本体发生损毁，转子下沉易使水轮机触碰固定构件；剧烈振动会破坏机座与基础；润滑油泄漏甚至存在起火风险，长时间停机也会造成高额经济损失。

2.2.2 导轴承故障

导轴承能够约束转子径向偏移，维持转子对中运转，承受径向载荷以及少量轴向力。一旦出现故障，机组运行安全将受到严重威胁。实际运行中多见瓦面磨损、烧瓦、振动超限、润滑系统故障、轴承间隙失调等问题。

轴承间隙调配失当极易诱发各类故障，转子摆度、振动随之加剧，润滑油易发生外泄，轴颈与轴承摩擦加剧后大量生热，严重时引发烧瓦。间隙大小也受温度影响，机组运行升温会使轴承间隙收缩。

润滑失效也是一大诱因。供油短缺、油品变质、油液进水或掺有杂质，都会削弱润滑效果。水体携带泥沙、有机物会加重轴承磨损。导轴承故障发展是一个渐进过程，做好状态监测能够尽早捕捉异常，及时处置，防止故障持续恶化造成轴瓦烧毁、轴颈受损，保障机组平稳运行。

2.3 转轮系统故障机理

2.3.1 空化与空蚀故障

空化与空蚀是混流式水轮机危害突出的水力问题，严重制约机组稳定运行与发电收益 [2]。流体低压环境下汽化生成气泡称为空化；气泡转入高压区快速溃灭，冲击构件表面形成损伤即为空蚀。水流流经转轮叶片时，受叶型曲面影响，局部压力会有所下降。

空蚀会在叶片表面留下蜂窝凹坑，严重时出现贯通孔洞，这类损伤多集中在叶片吸力面，金属表层还会出现光亮受损痕迹。空蚀的产生受多重条件制约，包含机组运行工况、转轮设计加工水平、水体水质、现场运行环境，另外补气装置故障难以抑制空化也会加剧该问题。

空蚀会降低水轮机工作效率，伴随振动与噪声干扰机组稳定运转，缩短设备使用年限并抬高检修开支；情况恶劣时叶片会发生断裂，引发重大安全事故。相关研究显示，空蚀损伤存在累积特性，其发展快慢受空化强度、材质特性、

运行时长等条件影响。

2.3.2 磨损与泄漏故障

磨损是构件相对运动过程中表层材料持续损耗的现象，泄漏则代表流体从密封位置向外渗出。混流式发电机组内部，两类问题相互影响，一同劣化机组工作性能。

机组磨损多出现在转轮叶片长期接触含沙水流的表层、导叶与其套筒相对运动位置、主轴密封和轴套接触面，以及轴颈与轴承配合区域。磨损一般分为磨粒、粘着、腐蚀磨损几类，含沙水流是主要诱因。泥沙含量越高、颗粒尺寸越大，磨损越剧烈；材料硬度越高，抵御磨损的能力越好。

泄漏故障包括主轴密封泄漏，造成油质劣化；导叶密封泄漏，影响机组效率；顶盖与底环之间的间隙泄漏；真空破坏阀、补气阀等阀门泄漏等。泄漏的原因包括密封件老化、变形或损坏；安装质量不良，密封间隙过大；运行中部件变形，破坏密封面；泥沙磨损，降低密封效果。磨损和泄漏的危害不容忽视，要采取有效的防磨和密封措施，对提高机组的经济效益和安全性具有重要意义。

2.3.3 裂纹与断裂故障

转轮裂纹与断裂是混流式发电机组极具破坏性的机械故障，能够引发重大安全事故。裂纹多在应力集中位置萌生、延展，最终造成转轮结构失效。转轮裂纹的产生机制较为复杂，成因涉及多个方面：

材料属性是裂纹产生的内在诱因，结构设计缺陷与制造工艺问题则属于重要外部因素。材料的疲劳强度、韧性、硬度等参数，直接影响裂纹的扩展速度。转轮结构复杂，本身存在多处应力集中区域，加之焊接瑕疵、热处理不当、装配残余应力等问题，极易形成裂纹源头。若结构设计不合理，局部应力将超出材料疲劳极限，诱发裂纹萌生。

裂纹的萌生与扩展具备明显的阶段性特征。运行初期产生的裂纹尺寸微小，可通过常规无损检测手段检出。随着机组持续运转，裂纹会不断向外延伸，长度与深度同步增大。待裂纹扩展至临界尺寸后，转轮整体承载性能会急剧衰减，最终引发突发性的结构断裂故障。

该故障会造成机组非计划停机，干扰电网稳定；断裂碎块易损毁周边设备，检修开支与停机带来的经济损失都十分可观。由此可见，常态化开展转轮检测监测，尽早排查裂纹并及时处置，是保障机组安全运转的核心手段。

2.4 辅助系统故障机理分析

2.4.1 制动系统故障

制动系统作为混流式发电机组的核心辅助装置，主要用于机组停机阶段快速降速，规避机组低速长时间运转引发的轴承损伤，同时可在设备检修时锁定机组静止状态。该系统常见故障包含制动机构失效、制动耗时过长导致制动效果变差、制动部件严重磨损、油路泄漏引发制动压力不足，以及控制装置异常、无法按照预设程序正常工作等问题。

制动系统出现故障会拉长停机耗时，延误检修工作；轴承低速运转时长增加，极易发生损坏。制动带来的冲击振动还会损伤其余构件，若制动失效，检修期间机组意外转动会直接危及工作人员。因此定期维护检修制动系统，保障其工作可靠，对机组安全运行十分关键。

2.4.2 润滑系统故障

润滑系统保障机组各类运动构件正常运转，能够减小摩擦磨损，同时起到冷却、清洁与防锈作用。系统常见故障有：油箱缺油、油泵故障或油路渗漏引发供油不足；油品受氧化、污染、高温影响发生变质；散热不足造成系统温升过高；过滤器堵塞限制油液流通；油泵工作异常难以建立油压；水分、异物混入润滑油内部。

润滑系统故障会带来诸多严重后果：轴承升温加剧、磨损加重，严重时出现烧瓦问题；机组振动与噪声随之增大，缩短设备使用周期并抬高维护开销，极端情况下还会诱发火灾隐患。由此，搭建完备的润滑油监测机制，定期检验油品状态、快速排查处置异常，是保障机组安全运转的重要手段 [3] 。

2.4.3 机座与基础故障

机座与基础承担机组整体自重与各类动载荷，维持设备安装精度与运行平稳性，一旦出现故障会直接威胁机组安全。机座常见问题有本体变形、产生裂纹、连接螺栓松动或断裂以及二次灌浆层开裂；基础故障则包含混凝土裂缝、不均匀沉降、内部钢筋锈蚀，还有基础和机座贴合不紧密等情况。

机座与基础故障会引发严重后果：机组轴线发生偏移，伴随振动与噪音；各轴承受力失衡，磨损速度加快；连接螺栓额外承受剪切荷载，易疲劳断裂；若基础沉降问题严重，整套机组甚至直接报废。为此，设计与安装阶段应当充分考量基础承载力与稳定性能，设备运行期间做好常态化监测，及时排查并处理各类隐患。

3. 结论与展望

本次研究针对混流式发电机组的各类机械故障机理、故障判别技术以及设备运维方案，开展了系统且深入的分析探究。

梳理了转子、轴承、转轮及各辅助系统典型故障与其产生机制。相关研究显示，转子不平衡、对中偏差、构件裂纹等问题，大多源于加工安装疏漏、长期运行磨损以及疲劳损伤；轴承各类故障常受润滑缺失、散热失效、装配精度不足等条件影响；转轮产生空化空蚀、磨损与裂纹，和水力工况、材料本身特性存在紧密联系；各类辅助系统故障多由设计缺陷、维护保养滞后引发。对上述故障机理的分析，可以为设备故障判别与事前防控提供理论支撑。

参考文献

[1] 刘大恺. 水轮机[M]. 北京：中国水利水电出版社,1997.

[2] 陈启卷，南海鹏. 水电机组状态监测与故障诊断[M]. 北京：中国水利水电出版社,2025.

[3] 冯雁敏，常洪军，张恩博. 混流式水轮发电机组振动故障机理及稳定性试验研究[J]. 水电能源科学,2016,34(7):178-182.