

1 000 MW级火电发电机灵活性运行改造技术研究

谢俊杰

(国家能源集团永州发电有限公司, 湖南 永州 425913)

摘要: 随着新型电力系统的构建及“双碳”目标的推进, 新能源在电力系统中的占比大幅提升, 1 000 MW 级汽轮发电机面临从传统稳定运行模式向灵活性运行的转变, 以适应电网调峰、频繁起停等需求。围绕 1 000 MW 级汽轮发电机灵活性运行改造技术展开研究, 分析其在灵活性运行下的挑战, 阐述了从本体结构优化、控制策略调整到监测系统升级等一系列改造技术, 为提升发电机在新型电力系统中的适应性和可靠性提供技术支撑, 为提升煤电机组灵活性提供参考。

关键词: 发电机; 灵活性运行; 改造技术; 电力系统

Research on flexibility operation transformation technology of 1 000 MW thermal power generators

XIE Junjie

(State Energy Group Yongzhou Power Generation Co., Ltd., Yongzhou 425913, China)

Abstract: With the construction of a new-type power system and the advancement of the “dual-carbon” goals, the proportion of new energy in the power system has significantly increased. 1 000 MW steam turbines are facing a transformation from the traditional stable operation mode to flexible operation to meet the needs of power grid peak regulation and frequent start-ups and shutdowns. This paper focuses on the research of flexibility operation transformation technology for 1 000 MW steam turbines, analyzes the challenges under flexible operation, and expounds a series of transformation technologies ranging from the optimization of the structure, adjustment of control strategies to the upgrading of monitoring systems. It provides technical support for improving the adaptability and reliability of generators in the new-type power system and offers references for enhancing the flexibility of coal-fired power units.

Keywords: generator; flexible operation; transformation technology; power system

0 引言

近年来, 全球范围内风电、光伏等新能源装机容量迅猛增长。2023年, 全球新增新能源发电装机容量超过250 GW, 部分国家新能源发电量占比已接近或超过50%。在我国, 新能源的快速

发展也改变了电力系统的电源结构。2023年底, 我国风电和光伏发电累计装机容量达8.1亿kW, 占全国发电装机容量的31.6%。在此背景下, 作为传统主力电源的1 000 MW级汽轮发电机, 需要具备更强的灵活性运行能力, 以保障电力系统的安全稳定运行。传统的1 000 MW级汽轮发电

机设计侧重于长期稳定工况运行，而灵活性运行要求其能适应负荷快速波动、深度调峰以及频繁启停等复杂工况，这给发电机的运行可靠性和寿命带来了严峻挑战。因此，对其进行灵活性运行改造技术研究迫在眉睫。

1 1 000 MW级汽轮发电机灵活性运行面临的挑战

1.1 机械应力问题

在传统稳定运行模式下，1 000 MW级汽轮发电机各部件处于相对稳定的受力状态。然而，在灵活性运行，尤其是频繁起停和负荷快速升降过程中，发电机转子、定子等部件会因温度急剧变化产生热胀冷缩。以转子为例，启动时转子表面迅速升温，而中心部位升温较慢，形成较大的温度梯度，导致热应力产生。汽轮发电机转子在快速启停或负荷变化时，表面与中心的温度差 ΔT 主要引发径向温度梯度，此时转子的应力状态更接近厚壁圆筒的平面应变问题（轴向应变 $\varepsilon_z \approx 0$ ，径向和周向应力为主）。对于厚壁圆筒，当内壁温度高于外壁时，内壁受压、外壁受拉，其热应力计算需结合拉梅公式与热传导方程，具体表达式为：

径向应力为

$$\sigma_r = r^2 C_1 + C_2 (1 + \ln r) + 4(1 - \nu) \alpha E \Delta T (1 - R^2 r^2) \quad (1)$$

周向应力为

$$\sigma_\theta = -r^2 C_1 + C_2 (3 + \ln r) + 4(1 - \nu) \alpha E \Delta T (1 + R^2 r^2) \quad (2)$$

式中， C_1 、 C_2 为边界条件确定的常数； r 为径向位置； R 为转子半径。

在一次快速负荷变化中，若转子温度变化达到100℃，对于常见的转子材料，热应力可高达数百兆帕，长期作用下易导致转子疲劳裂纹，威胁发电机安全运行。

1.2 绝缘性能下降

灵活性运行时，发电机内部电磁环境复杂多变。深度调峰工况下，定子绕组端部电场分布发生畸变，局部电场强度显著增加。同时，频繁的

负荷变化使发电机内部产生高频振动，定子线棒在槽内发生相对位移，磨损绝缘层。相关研究表明，在灵活性运行1 000 h后，部分发电机定子线棒绝缘电阻下降了30%~50%，局部放电量增加了数倍，大大降低了绝缘可靠性，增加了绝缘击穿风险。

1.3 热管理困难

灵活性运行打破了发电机原有的稳定热平衡。深度调峰时，发电机负荷降低，冷却介质带走的热量减少，但部分部件因损耗特性仍产生一定热量，导致局部过热。例如，在20%额定负荷深度调峰时，部分发电机的定子铁心齿部温度比满载时升高了20~30℃，若热管理问题未有效解决，将加速绝缘老化，缩短发电机使用寿命。同时，局部过热还可能导致部件材料性能下降，影响整体结构稳定性。

1.4 控制系统响应延迟

在灵活性运行中，电网负荷需求变化迅速，要求发电机控制系统快速响应。但传统控制系统存在一定响应延迟，难以实时精准调整励磁电流、蒸汽流量等参数，影响机组对负荷变化的跟踪能力，降低电网调频效果。

2 1 000 MW级汽轮发电机灵活性运行改造技术

2.1 转子结构优化

为提高转子抗热应力能力，采用新型高强度、低膨胀系数的转子材料，如改良型镍铬钼钒合金钢，其线膨胀系数相比传统材料降低了10%~15%，可有效减小热应力。同时，优化转子绕组设计，采用高精度的绕组制造工艺，确保绕组匝间绝缘均匀、可靠，降低匝间短路风险^[1]。在转子端部结构方面，设计新型的可自适应调节的阻尼绕组，在负荷变化时能自动调整阻尼力，抑制转子振动，提高运行稳定性。发电机内部结构如图1所示。

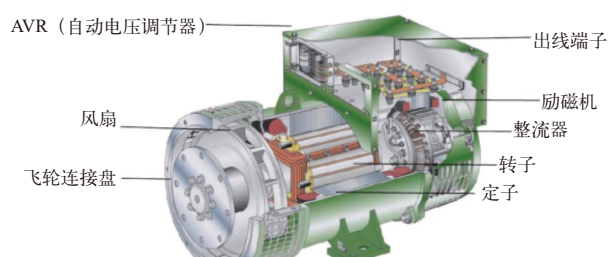


图1 发电机内部结构

Fig. 1 Generator internal structure diagram

2.2 定子结构优化

对于定子铁心，采用高导磁、低损耗的硅钢片，并优化叠片工艺，减小铁心磁滞和涡流损耗。在定子绕组端部，安装新型的绝缘支撑结构，增强线棒的固定强度，减少因振动引起的绝缘磨损^[2]。同时，改进定子槽楔设计，采用具有良好弹性和绝缘性能的材料，确保线棒在槽内紧密固定，避免因相对位移损坏绝缘。对于定子线圈与铁心热膨胀差引发的轴向相对伸缩问题，通过斜楔后加径向波纹板改善。

2.3 控制策略调整技术

(1) 负荷快速响应控制

引入先进的模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 算法，根据电网负荷需求预测和发电机实时运行状态，提前优化调节励磁电流、蒸汽流量等控制参数。通过建立发电机动态模型，MPC算法可在数毫秒内计算出最优控制策略，使发电机在负荷快速变化时能快速、平稳地响应。例如，负荷阶跃变化 $\pm 20\%$ 额定负荷时，采用MPC的发电机可在10~15 s内稳定新负荷，相比传统控制方式响应速度提高30%~40%。其具体应用步骤为：首先采集发电机实时运行数据，包括电压、电流和温度等；然后将数据输入动态模型，预测未来一段时间内的运行状态；最后根据预测结果和负荷需求，计算并调整控制参数^[3]。

(2) 深度调峰控制

针对深度调峰工况，制定专门的控制策略。在低负荷时，优化燃烧系统控制，确保锅炉稳定燃烧，同时调整汽轮机进汽方式，采用滑压运行

结合顺序阀控制，提高汽轮机低负荷效率。通过精确控制发电机励磁电流，维持机端电压稳定，保证发电机在深度调峰时的无功输出能力，满足电网电压调节需求。

2.4 监测系统升级技术

(1) 关键部件状态监测

利用光纤光栅传感技术，对发电机转子、定子绕组、铁心等关键部件进行实时温度监测。光纤光栅传感器具有精度高、抗电磁干扰能力强等优点，可精确测量部件温度变化，分辨率可达0.1℃。同时，在传感器布置上，转子表面按一定间距布置多个传感器，定子绕组每相布置若干传感器，铁心不同部位也合理布置。同时，采用振动监测系统，通过安装在轴承座、定子机座等位置的加速度传感器，实时监测发电机振动情况，利用频谱分析等技术及时发现异常振动，预测故障隐患。数据通过专用传输线路传至中央控制系统，进行实时分析和处理，当监测值超过设定阈值时，系统自动发出预警。

(2) 绝缘状态监测

升级绝缘监测系统，采用局部放电在线监测技术，通过安装在发电机内部的高频传感器，实时监测定子绕组局部放电情况。结合大数据分析和人工智能算法，对局部放电信号进行特征提取和模式识别，准确评估绝缘状态，提前预警绝缘故障，当局部放电量超过设定阈值时，系统立即发出报警信号，提示运维人员检修。同时，系统还能记录放电信号变化趋势，为绝缘状态评估提供长期数据支持^[4]。

3 1 000 MW级发电机灵活性运行改造案例分析

3.1 案例电厂概况

某电厂有两台1 000 MW级汽轮发电机，于2015年投产。随着当地新能源装机容量的快速增长，电厂面临着深度调峰和负荷快速响应的任务。为提升机组灵活性，电厂于2022年对两台机组进行了灵活性运行改造。

3.2 改造内容实施

对转子关键部件进行无损检测,以评估金属材料适用性。转子绝缘系统每10~15年返厂全面检查并更换,轴瓦、动叶片等每20年更换。升级转子端部绝缘系统,以及槽衬和楔下垫条滑移层材料,提升滑移顺畅性。采用高强度、高滑移匝间绝缘,接缝搭接增强强度。端弧位匝间绝缘用高性能黏接胶,提高可靠性。转子导电杆与端部垫块升级,导电杆由刚性改为柔性连接,端部垫块升级为全支撑结构,增强整体性与固定可靠性,适应频繁调峰。

改造前,通过多项试验评估定子状态,试验项目及标准见下表。

表 试验项目及试验标准
Tab. Test items and test standards

试验项目	试验标准
整机绕组交直流耐压	DL/T 596—2021
介损测量	温度 20℃时, $\tan\delta \leq 0.03$
局部放电	放电量 ≤ 10 pC
吸收比	吸收比 ≥ 1.3
电晕检测	无明显电晕现象
定子铁心 ELCID 试验	无多点接地故障

对定子线圈、端部固定、铁心等关键部位进行检查,定子线圈槽内固定,需增加检查频次,必要时采用带空间补偿量的改进槽楔结构。

深度调峰时,定子线圈与铁心热膨胀差引发轴向相对伸缩,导致槽内松动。通过斜楔后加径向波纹板改善,热膨胀差计算公式为

$$\Delta L = L(\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2) \quad (3)$$

式中, L 为线圈长度; α_1 、 α_2 分别为线圈与铁心的线膨胀系数; ΔT_1 、 ΔT_2 分别为线圈与铁心的温度变化量。

优化定子端部绕组结构,将原绑扎式固定结构改为锥环加压板固定的端部整体灌注结构,如图2、图3所示。原结构存在绕组松动、电晕放电隐患,新结构消除隐患,提高可靠性。



图2 绑扎式端部绕组结构

Fig. 2 Binding type end winding structure



图3 整体灌注式端部绕组结构

Fig. 3 Integral casting type end winding structure

定冷水绕组水路原理如图4所示。改造定子绕组水路,原水路每槽上下层线棒并联,进水共用绝缘引水管,导致引线棒出水温度升高。改为每根线棒独立水路,增设励端小汇流管,并增加汇流管对地绝缘系统^[5]。用压板式替代绑扎式,降低磨损,绕组鼻端电连接改为水电分离结构,焊接面为平面,实现“可检、可探”,气隙挡板结构外移,安装于定子绕组端部压板,采用铜屏蔽双面通风,使铜屏蔽最热点温度从80.5℃降至68.0℃。

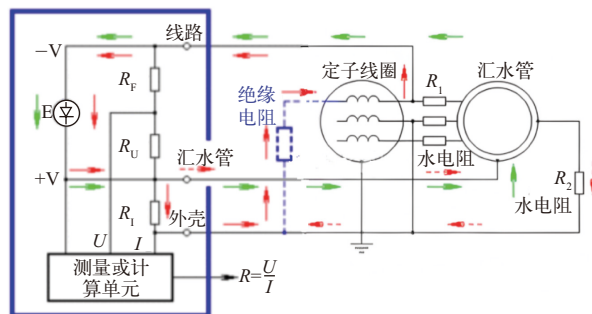


图4 定冷水绕组水路原理

Fig. 4 Stator cooling water winding water circuit principle

为实现智能化状态监测与维护,加装在线监测装置,包括局部放电、转子线圈匝间短路、定子线圈光纤测振等监测装置,构建智慧化远程运维系统,实时监控机组状态,提前预警故障。

3.3 改造效果评估

(1) 运行可靠性提升

改造后,机组在灵活性运行过程中的故障次数明显减少。据统计,改造前一年因机械、绝缘等问题导致的非计划停机次数为3次,改造后两年内仅发生1次,且为外部电网故障引发,发电机本体可靠性显著提高。改造前后部分参数对比如下:转子热应力从改造前的数百兆帕降至200 MPa以下;定子线棒绝缘电阻下降幅度从30%~50%收窄至10%~15%;局部放电量控制在改造前的1/3以内;定子铁心齿部温度在20%额定负荷时,比改造前降低15~20℃^[6]。

(2) 灵活性指标改善

机组负荷响应速度大幅提升,在负荷变化速率要求为每分钟±3%额定负荷时,改造前实际响应速率仅能达到每分钟±1.5%额定负荷,改造后可稳定达到每分钟±3%额定负荷,满足了电网快速调峰需求。同时,机组深度调峰能力增强,最低稳燃负荷从原来的35%额定负荷降至25%额定负荷,有效提高了机组在低负荷工况下的运行稳定性。

(3) 经济效益分析

通过提高运行可靠性和灵活性,增强机组参与电网辅助服务市场的能力。以调峰补偿为例,改造后每年因参与深度调峰获得的补偿收入增加了约1 000万元。根据机组调峰容量和实际调峰时间计算调峰补偿,改造后调峰容量增加,响应速度加快,获得的补偿相应提高。同时,由于故障停机次数减少,设备维修成本降低,每年可节约维修费用约200万元,经济效益显著。维修费用节省主要体现在零部件更换减少、维修人工成本降低等方面。

4 核心物理模型

4.1 拉梅公式与热传导方程

拉梅公式应用前提是:转子为均质、各向同性的弹性体,满足小变形假设。采用一维非稳态热传导模型描述转子温度场变化,公式为

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\alpha}{r} \times \alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

式中, α 为材料热扩散系数($\alpha=k/\rho c_p$, k 为导热系数, ρ 为密度, c_p 为比热容); t 为时间。

结合边界条件

$$q=h(T_s-T_0) \quad (5)$$

式中, h 为对流换热系数,可通过有限元法求解瞬态热应力分布。

在实际应用中,将计算值与实际测量值对比,发现两者偏差较小,验证了模型的准确性。但该模型未考虑材料非线性和复杂边界条件,未来可进一步改进以提高准确度^[7]。

4.2 热膨胀差定量模型

给出定子线圈与铁心的热膨胀差公式,补充工程应用修正,考虑材料非线性,当温度超过500℃时,线膨胀系数需引入温度修正系数 $k_T=1+0.001(T-500)$;实际安装中,通过斜楔+波纹板补偿量计算 $\Delta L_{\text{补偿}}=k_{\text{安全}}\Delta L$,其中 $k_{\text{安全}}=1.2\sim 1.5$ (根据运行工况动态调整)。经实际验证,该模型计算的补偿量能有效解决热膨胀差带来的问题。

4.3 MPC算法预设模型

MPC算法依赖的预设模型核心是基于发电机动态特性构建的状态空间方程,是MPC算法实现负荷快速响应的基础。通过对状态向量和控制向量的实时计算,提前优化励磁电流、蒸汽流量等参数,使发电机在负荷快速变化时能在10~15 s内稳定新负荷,相比传统控制方式响应速度提升30%~40%。该模型在实际应用中,通过大量试验数据进行校准,确保了预测的准确性和控制的有效性^[8]。

5 结束语

1 000 MW级汽轮发电机的灵活性运行改造技术是适应新型电力系统发展的关键。通过本体结构优化、控制策略调整和监测系统升级等一系列改造技术的应用,可有效提升发电机运行时的可靠性、灵活性和经济性。从实际案例来看,改造后的发电机在运行可靠性、灵活性指标和经济效益方面均取得显著成效。

未来,还需在如下方面进一步深入研究:材料方面,研发更先进的材料(如碳纤维复合材料),因其具有高强度、低膨胀系数等优点,有望进一步降低热应力影响;控制策略方面,探索更智能的控制策略,如将深度学习应用于负荷预测和控制参数优化,实现发电机与电网的深度互动;监测系统方面,利用物联网技术整合监测数据,实现远程诊断和预测性维护,提高监测效率和准确性;此外,政策支持和行业标准的完善将推动改造技术的发展,未来应加强相关标准制定,规范改造过程和效果评估,促进技术推广应用。

参考文献

[1] 闫帅. 论发电机冷却装置技术的改造[J]. 科技传播, 2011(2): 146.

- [2] 高文富, 刘云飞, 厉英涛. 浅谈小型火电厂发电机断路器设计选型[J]. 河南建材, 2013(2): 148-149, 151.
- [3] 万安国. 火电厂发电机组功率振荡事件与应对措施分析[J]. 新型工业化, 2022, 12(12): 52-54.
- [4] 祝翰兴, 叶华, 高磊. 基于振荡能量消耗的发电机阻尼评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 41-50.
- [5] 康宇. 火电厂发电机出口断路器的选择与设计分析[J]. 硅谷, 2014, 19(7): 154-163.
- [6] 邢得富. 火电厂发电机典型缺陷的原因分析及应对措施[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(3): 114-117.
- [7] 母雪东. 火电厂电气设备状态检修技术应用研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(3): 87-89.
- [8] 周雷. 基于PDCA循环理论的火电厂电气设备故障诊断系统设计[J]. 电气技术与经济, 2025(1): 98-100.

作者简介

谢俊杰(1997—), 男, 助理工程师, 研究方向为火电运行。

(收稿日期: 2025-06-18)