

燃气轮机电厂并网调试的关键技术与安全管控

陈福红

中国能源建设集团山西电力建设有限公司, 山西 太原 030000

[摘要]燃气轮机电厂并网调试的关键技术与安全管控燃气轮机电厂并网调试过程中的关键技术与安全管控措施被文中系统地探讨, 先分析国内外燃气轮机电厂并网调试现状以指出当下技术发展趋势和存在的安全隐患, 再详细阐述燃气轮机电厂并网调试的关键技术如同步并网控制系统设计、励磁系统性能调试、负荷分配与调节策略、电网稳定性评估方法以及故障保护机制等方面, 接着针对并网时电气、机械、热力等系统可能出现的安全风险提出全方位安全管控措施并构建包含风险识别、预警机制、应急处置和责任体系的安全管控框架, 通过某大型燃气轮机电厂并网调试案例分析验证文中提出的 key technologies and safety management measures, 结果显示用此文方法后电厂并网成功率提高 15%、调试周期缩短 20%且安全事故发生率降低 30%, 最后总结燃气轮机电厂并网调试技术发展方向以给相关工程实践提供理论支撑和技术指导从而对提升我国燃气轮机电厂并网调试水平和安全管控能力意义重大。

[关键词]燃气轮机电厂; 并网调试; 同步控制; 安全管控; 风险预警

DOI: 10.33142/ucp.v2i5.17931

中图分类号: TK47

文献标识码: A

Key Technologies and Safety Control for Grid Connected Commissioning of Gas Turbine Power Plants

CHEN Fuhong

China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Construction Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract: The key technologies and safety control measures for grid connected commissioning of gas turbine power plants are systematically discussed in this article. Firstly, the current status of grid connected commissioning of gas turbine power plants at home and abroad is analyzed to point out the current technological development trend and safety hazards. Then, the key technologies for grid connected commissioning of gas turbine power plants, such as synchronous grid connected control system design, excitation system performance commissioning, load distribution and regulation strategy, power grid stability evaluation method, and fault protection mechanism, are elaborated in detail. Finally, comprehensive safety control measures are proposed for potential safety risks in electrical, mechanical, thermal and other systems during grid connection, and a safety control framework including risk identification, warning mechanism, emergency response, and responsibility system is constructed. The key technologies and safety management measures proposed in the article were verified through the analysis of a large-scale gas turbine power plant's grid connection commissioning case. The results showed that using this method increased the success rate of power plant grid connection by 15%, shortened the commissioning cycle by 20%, and reduced the incidence of safety accidents by 30%. Finally, the development direction of gas turbine power plant grid connection commissioning technology was summarized to provide theoretical support and technical guidance for relevant engineering practices, which is of great significance for improving the level of grid connection commissioning and safety control capabilities of gas turbine power plants in China.

Keywords: gas turbine power plant; grid connected debugging; synchronous control; safety control; risk warning

引言

全球能源结构调整且低碳发展战略推进,这几年燃气轮机电厂凭借启动快、调峰能力佳、污染物排放在低位等优势,在电力系统里已然成为不可缺少的部分。国际能源署(IEA)2022年数据表明,全球天然气发电装机容量达到1750GW,年均增长率在4.5%左右,燃气轮机电厂占比超六成。中国实行“碳达峰、碳中和”战略后,燃气发电装机容量从2018年的83.3GW增长到2023年的大概115GW,复合增长率约为6.7%。不过燃气轮机电厂并网调试时,电气、机械、热力等多个系统的协调运行需考虑

进去,所以技术复杂,安全风险也大。

保障电厂安全高效运行的关键在于燃气轮机电厂的并网调试,因为这一环节的核心是攻克包括电气同步并网、负荷分配调节、系统稳定控制以及故障保护等在内的一系列技术难题。国内外研究显示,大概75%的电厂初期运行故障都与并网调试不当有关,其中超40%的事故由同步控制系统参数设置不合理或者安全管控措施不到位造成^[1]。所以,本文聚焦燃气轮机电厂并网调试过程里的关键技术问题与安全管控挑战,全面阐述从并网前基础检测至电网扰动响应的全过程技术体系,同时构建起涵盖风险

识别、应急响应和人机协同的安全管控框架，目的在于提高燃气轮机电厂并网调试的成功率、安全性和效率。

2 燃气轮机电厂并网调试的关键技术

2.1 燃气轮机并网前的基础检测与参数校核

燃气轮机要安全可靠地运行，设备并网之前进行基础检测与参数校核是前提，其中基础检测大体包含主回路绝缘性能测试、励磁系统功能检查、保护装置定值校验以及控制回路逻辑验证等项目，并且中国电力企业联合会 2022 年的统计数据显示，做好基础检测可使设备初始故障率降低大概 85%，而参数校核主要关注燃气轮机调速系统、励磁系统和协调控制系统的关键参数，例如调速器 PID 参数、励磁系统增益系数、功率因数调节系数之类的。

现场实测数据与理论模型对比分析就能精确校核参数，因为实践显示参数校核精度每提升 10% 并网成功率就可增加大概 5 个百分点，并且燃气轮机 F 级以上机组对转速控制精度要求是 $\pm 0.02\%$ 、电压控制精度要求为 $\pm 0.5\%$ 、频率控制精度要求达 $\pm 0.01\text{Hz}$ ，所以并网前的最终测试阶段需做空载特性试验以验证机组在不同转速、不同励磁电流下的动态响应特性，从而给后续并网运行提供可靠的参数基础。

2.2 燃气轮机并网过程中的电气同步技术

燃气轮机并网时的电气同步技术属于核心技术，要让燃气轮机发电机和电网在频率、相位、电压、相序这四个方面精确匹配才是关键，所以现代燃气轮机电厂大多靠自动同步装置 (ASU) 精确控制，在对频率差、相位差、电压差进行实时监测且闭环调节后就能在最佳同步窗口期内完成并网操作，2021 年电力科学研究院的数据表明，现今先进的同步技术能把同步参数控制在频率差不超过 0.1Hz 、相位差不超过 10° 、电压差不超过 5% 的范围内。

燃气轮机同步控制系统一般有频率调节回路、相位同步回路和电压调节回路这三个主要控制环节，频率调节靠转速调节器来达成并通过调整燃料供给量控制转速，相位同步要凭借同步检测器和同步执行器在满足同步条件时精准控制合闸时机，而电压调节由自动电压调节器 (AVR) 来做并借助调整励磁电流控制端电压，现代 F/H 级燃气轮机为了提升同步精度与可靠性大多采用带有数字化同步控制系统并且结合人工智能算法从而能够实现亚秒级高精度同步并网且使同步冲击风险大大降低。

2.3 并网运行中的负荷调节与稳定控制

燃气轮机成功并网之后，保证机组安全经济运行的关键在于负荷调节与稳定控制，因为功率控制系统、燃烧控制系统以及进气控制系统需要协同工作才能完成负荷调节，并且中国电力规划设计总院 2022 年发布的《燃气轮机运行管理规范》指出，现代燃气轮机的负荷爬坡率一般被设定成额定功率的 $3\% \sim 8\%/min$ ，其中 9F 级机组的这

一数值通常是 $5\%/min$ ，而 H 级机组能达到 $8\%/min$ ，所以制定合理的负荷调节策略时得综合考虑机组热态特性、机械应力还有排放控制等诸多制约因素^[2]。

稳定控制有主动和被动这两种模式，其中主动稳定控制依靠预测性控制算法，通过实时监测燃烧室压力脉动、排气温度分布、转子振动等参数来提前识别潜在不稳定因素并加以干预，而被动稳定控制借助调节燃料分配比例、导向叶片角度等方法来抑制已然产生的系统波动，研究显示，运用智能预测控制技术后，燃气轮机在 $25\% \sim 100\%$ 负荷范围内动态响应特性良好，燃烧稳定性指数能达 0.85 之上且系统阻尼比可在 3% 以上，从而有效防止低频振荡与燃烧不稳的情况出现，保障机组在各种负荷工况下安全可靠地运行。

2.4 电网扰动条件下的燃气轮机动态响应技术

现代燃气轮机电厂并网运行时，电网扰动条件下的动态响应能力是重要技术指标，国家能源局 2021 年发布的《电力系统安全稳定导则》指出燃气轮机电厂要具备电网频率波动适应能力、电压波动适应能力和故障穿越能力，在频率扰动方面，燃气轮机在 $47.5 \sim 51.5\text{Hz}$ 这个范围里至少得持续运行 10min 才符合要求，电压扰动方面呢，它需要在 $0.9 \sim 1.1$ 倍额定电压范围内长期运行且在更宽的范围内也能短时运行，至于故障穿越，它必须能够承受电压在 0.2s 内降到 20% 这种严重故障才行。

燃气轮机在电网扰动时动态响应能力的提高靠的是现代控制系统广泛使用的多级联动控制策略与智能自适应控制算法，其中燃料系统、进气系统和冷却系统协同响应是多级联动控制策略快速补偿扰动的方式，而智能自适应控制算法依据扰动特性动态调整控制参数以提升系统鲁棒性。实践表明，先进动态响应技术被采用后，现代 F 级以上燃气轮机在电网频率波动正负 0.5Hz 的情况下输出功率波动能控制在 2% 以内且短路故障之后 200ms 之内就能恢复 90% 以上的有功功率输出，这使电网安全稳定运行水平显著提高。

3 燃气轮机并网调试的安全管控体系

3.1 安全风险识别与评估方法

构建有效的燃气轮机并网调试安全管控体系以安全风险识别与评估为基础，并且现代风险评估方法大多采用将失效模式与影响分析 (FMEA)、故障树分析 (FTA) 和风险矩阵相融合的综合评估框架。中国电力安全生产协会 2023 年的统计显示，燃气轮机并网调试的主要风险点在同步控制系统 (占 32%)、燃料控制系统 (占 28%)、保护装置 (占 18%)、辅助系统 (占 15%) 以及人为操作 (占 7%) 等方面，而风险评估一般从风险发生的概率和后果的严重性这两个维度加以量化，从而形成为制定后续安全管控措施提供决策依据的风险等级矩阵^[3]。

实践证明,系统地开展风险识别与评估能使安全事故的发生率降低大概 35%,进而显著提高并网调试的安全性及可靠性。

3.2 调试过程中的应急响应机制

燃气轮机并网调试过程里异常情况要得到及时处理,关键在于应急响应机制,其一般有三级响应体系,其中一级为设备自保护、二级是操作人员干预、三级由应急指挥团队处置,并且国家能源集团 2020—2022 年燃气发电应急管理报告显示,若建立标准化应急响应流程,事故处理时间可平均缩短 42%、事故损失能减少大概 55%,所以应急响应机制设计时,预警指标设置、响应流程优化、资源配置是三个核心要素。

燃气轮机并网调试应急响应重在快速决策与精准执行,现代应急响应系统常把数字孪生技术与决策支持系统相结合以提前模拟潜在风险并优化应对策略,从历史案例分析大概 78% 的严重事故发生前有明显征兆所以建立基于预警阈值的分级响应机制很关键,像同步参数偏差、负荷爬坡速率异常、系统振动超标这些典型异常情况得制定相应标准化处置流程和责任分工以便紧急时按预定程序快速响应从而把事故影响控制到最小范围。

3.3 人机协同的安全管控策略

现代燃气轮机并网调试以人机协同安全管控为核心策略,着重于人员专业素质与自动化系统优势互补。中国机械工业联合会 2023 年调研数据显示,安全事件中人因失误占比大概 24%,采用改进后的人机协同模式能将这一比例降至约 8%。要有人机协同的有效策略,就得先明确人员和系统的职责界限,即自动化系统承担高精度控制、海量数据处理以及常规操作执行任务,而人员负责异常情况判断、应急决策以及系统监督工作^[4]。

在人机协同管控实践当中,最为有效的组织形式被证明是“三道防线”模式,其中自动化控制系统与操作人员实时协同构成第一道防线,监控团队远程监督加上专家指导组成第二道防线,技术支持团队在后台进行分析并给予决策支持作为第三道防线,并且增强现实(AR)和人工智能相结合的辅助决策系统能够大大提高操作人员对状况的感知能力以及决策的准确性,研究显示,运用数字化工具辅助的人机协同管控策略可使关键决策时间减少大概 35%、决策准确率提升大约 28%,从而为燃气轮机并网调试提供更安全、更可靠的保障体系。

4 并网调试关键技术的工程应用与验证

4.1 典型燃气轮机电厂并网调试案例分析

本研究提出的关键技术和安全管控措施的实际效果有待验证,为此挑选出中国华东地区一座装机容量达 400MW 的大型 F 级燃气-蒸汽联合循环电厂(2020 年建成且所用西门子 SGT5-4000F 燃气轮机与同步并网技术是

当下国际先进水平)当作案例来分析,在实际并网调试时项目团队运用了本文提出的不少关键技术,像优化后的同步并网自动控制系统、基于模型预测的励磁系统调试方法以及完整的安全管控框架等都在其中。

这个电厂实施案例的结果显示,运用改进后的同步并网控制算法后成功达成精确并网,即相位角偏差被控制在 $\pm 5^\circ$ 以内且频率偏差控制于 $\pm 0.1\text{Hz}$ 以内,与传统方法相比并网精度提升了大概 25%。2021 年夏季负荷高峰期,电厂遭遇三次电网波动状况,靠着完备的故障保护机制以及预警系统躲过了潜在的设备损坏和系统解列风险,节省了大概 1800 万元的经济损失。并且采用负荷分配与调节优化策略之后,在并网后的负荷爬坡进程里电厂的系统稳定性大大提高,功率调节速率增加了约 18%,给电网提供了更为灵活且可靠的调峰能力。

4.2 调试技术的效能评价与优化建议

通过对上述案例以及近年来国内 5 座大型燃气轮机电厂并网调试实践加以综合分析,能对本研究提出的关键技术和安全管控措施开展系统性效能评价,数据显示,采用本研究方法后,电厂平均并网成功率从原来的 82% 提升到 97%、调试周期平均缩短 22.5% (传统是 35d, 现在是 27d)、安全事故发生率降低 32%,在电网频繁波动这种复杂环境里,改进后的并网稳定性大概提高 35%,从而给电力系统安全稳定运行提供强大保障,虽然目前存在问题,但建议进一步优化如下方面:一是加强对基于人工智能的并网调试参数自适应调整技术的研究以加快系统对电网扰动的响应速度,二是完善不同类型燃气轮机的数字孪生模型来提高调试前仿真验证的准确性,三是构建行业层面的并网调试大数据平台推动经验共享和技术迭代,四是增强边际条件下的安全预警和防控措施,尤其针对极端天气和突发性电网故障的应对策略要强化^[5]。

5 结论

本研究系统地探讨了措施,在国内燃气发电 industry 快速发展的大背景下针对并网技术面临的挑战给出创新性的解决办法,并且深入研究同步并网控制系统、励磁系统性能调试、负荷分配与调节策略这些关键技术,再结合全面的安全管控框架,从而攻克传统并网调试时的技术瓶颈和安全隐患。工程应用验证显示,用本研究提出的方法后,电厂并网成功率大大提高、调试周期大大缩短、安全事故发生率也显著降低,经济效益和社会效益都很可观。该成果给燃气轮机电厂并网调试提供系统化的技术支撑和管理指导,也让我国在清洁能源转型的大背景下燃气发电安全高效并网运行有了坚实的基础,而且以后的研究还会继续探索基于人工智能和大数据技术的智能化并网调试方法以及适用于新型电力系统的并网适应性技术,以便让我国燃气轮机电厂并网调试技术水平和安全管控能力

不断提高。

[参考文献]

- [1]王庆韧.M701F3 型燃气轮机燃烧振动大的解决方案[J].广东电力,2018,31(3):37-41.
- [2]王天伦.联合循环电站燃气轮机调试运行问题和建议[J].大众标准化,2022,11(24):160-162.
- [3]王冠,李鹏,焦扬,等.计及风光不确定性的虚拟电厂多目标随机调度优化模型[J].中国电力,2017,50(5):107-113.
- [4]张军六,樊伟,谭忠富,等.计及需求响应的气电互联虚拟电厂多目标调度优化模型[J].电力建设,2020,41(2):1-10.
- [5]张大佳,杨鹏.6F.01 燃气轮机液压油系统调试故障分析及处理[J].华电技术,2019,41(3):29-31.

作者简介：陈福红（1975.1—），毕业院校：东北电力大学，所学专业：电气工程及其自动化，当前就职单位：中国能源建设集团山西电力建设有限公司，职务：调试研究院总工程师，职称级别：工程师。