

天然气差压发电技术研究及效益分析

薛天勇

大唐(金华)清洁能源有限公司 浙江金华 321018

摘要: 随着全球对能源需求的日益增加以及环保意识的提高,提高能源利用率、发展清洁能源已成为社会关注的焦点。天然气是一种清洁高效的能源,在世界能源构成中占有举足轻重的位置。然而,在天然气输配过程中,压力调整引起的能量损耗问题一直没有得到有效解决。天然气压差发电技术是利用天然气在输送过程中产生的压差,使之转换成电能,进而达到回收和再利用的目的。该技术在提高天然气能源利用率的同时,降低能源浪费对环境的影响,具有显著的经济效益与环境效益。

关键词: 天然气差压发电技术;效益分析;创新路径;未来发展

天然气压差发电技术的研究和应用,是目前能源领域的重要发展趋势。其核心是将压力差转换成机械能,再由发电机转换成电能,从而实现能量的高效回收和再利用。近年来,我国在天然气压差发电方面取得了长足的进步,但是在技术成熟度、稳定性、成本控制和市场推广上还存在很多问题^[1]。对天然气差压发电技术的原理、应用现状及效益进行深入的研究,对促进天然气压差发电技术的进一步发展与推广具有重要的理论与实际意义。

一、天然气压差发电技术的效益分析

1. 经济性评价

对自然压差发电技术进行经济评价,主要从发电效益、投资回收期 and 运行费用三个方面对其进行分析。以华北地区油田苏桥储气库为例,采用自然压差发电技术,单台发电功率2600千瓦,投产当日可获得3万千瓦时的发电量。预计双机注气循环发电可达2000万千瓦时以上,可节省6000吨标煤。总投资1000万元,年发电量2000万度左右,上网电价每度0.5元,年收益1000万元。每年运行维护费用在100万元左右,主要用于设备保养、更换易损件和运行电费。其投资回收期大概在1年左右,经济效益显著^[2]。为充分展示这一经济效益,可参考表1:

表1 华北油田苏桥储气库的天然气压差发电项目

项目	单位	数据
年发电量	万千瓦时	2000
年发电收益	万元	1000
年运维成本	万元	100
投资回收期	年	1

2. 环境效益

自然压差发电是一项具有环保效益的技术,该工艺采用天然气压力能量发电,不消耗天然气,不产生污水、废气和固体废弃物。以苏桥气库为例,预计一次注气循环可以减少近2万吨的二氧化碳排放量。同时,该技术还可以降低燃煤发电过程中二氧化硫、氮氧化物等其他污染物的排放,对于改善空气质量、降低温室气体排放具有十分重要的意义。

3. 社会效益

自然压差发电技术在提高能源利用率、优化能源结构方面具有社会意义,该技术能够将天然气降压过程中损耗的压力能转换成电能,从而提高能源综合利用效率。如苏桥储气库采用压差发电技术,既能有效回收能源,又能向电网输送洁净电能。这一技术的应用,对于推动天然气工业绿色低碳发展,推动能源结构向清洁高效方向转型具有重要意义,既可降低传统化石能源依赖,又可为有力支撑国家“双碳”目标的实现。

二、天然气差压发电技术的创新路径

1. 高效能量转换技术的突破与优化

① 研发新型膨胀机与涡轮机

在天然气压差发电技术的创新研究中,可侧重膨胀机与涡轮机核心性能的研究,研究适用于中低压差工况的向心膨胀机和小型轴流式透平。如径向膨胀机采用三元流叶轮设计,叶片进口角优化到18-22°,出口宽度增加15%,将工况适应性拓展到0.8-4.0 MPa,单级等焓效率提高到82%。轴流式透平采用可变喷嘴环结构,利用液压伺服机构实时调整喷嘴开度,使其在50%~100%

负荷下的效率波动小于5%^[3]。同时,发展磁轴承支承技术,使其机械摩擦损失降低到传统轴承的1/5,使机组使用寿命超过8万小时。为充分展示这一技术的核心参数情况,可参考表2:

表2 新型膨胀机与涡轮机研发的相关参数

设备类型	核心参数指标	性能提升效果
径流式膨胀机	叶轮进口角18° - 22°	等熵效率≥82%
轴流式涡轮机	可变喷嘴调节范围50%-100%	负荷波动效率差≤5%
磁悬浮轴承系统	摩擦损耗降低80%	运行寿命≥8万小时

②引入智能控制系统

构建基于模型预测控制(MPC)的智能调控系统,可实现压力、流量和温度等参数(200 Hz)的高频率采集。通过建立管网-机组耦合动力学模型,可利用LSTM神经网络对5分钟内的压力波动进行预测,使预测误差小于±3%。利用模糊PID控制算法对机组速度进行调整,可使其响应时间缩短到0.5秒以内,保证管网压力波动±15%的稳定运行。此外,还可设置多层安全连锁逻辑,当出现过压、过温等异常情况时,能在0.3秒内启动应急停机,保证系统的安全性。

③提高系统集成效率

优化“膨胀机-发电-冷却系统”一体化方案,采用直驱结构,取消减速箱,使机械传动损失小于3%。研制高效冷却系统,采用板式换热器,使换热效率提高到90%以上,冷却介质流量随机组负荷自动调节,进而降低能耗。而且还可设计一种紧凑的撬装式一体化装置,使设备占地面积比传统方案得到有效降低,安装时间缩短到72小时。此外,还可通过管道流场模拟方法,优化管径匹配和弯头设计,实现系统压损小于0.05 MPa,进一步提高能量回收效率^[4]。

2. 新材料与新技术的应用

①高性能复合材料的应用

近年来随着科学技术的不断发展,在天然气差压发电技术的创新中,可将碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)应用于膨胀机叶轮和涡轮叶片的制造中,将纤维体积含量≥65%,使其比强度提高到200 MPa·m³,重量比合金叶轮有所减轻,进而减少转动惯量,实现启动能耗的降低。在管路和壳体部件上还可使用玻纤增强聚酰胺,使其抗压强度达到30 MPa,耐温度范围达-40℃-120℃,而且这一材料的耐腐蚀性比金属材料强,使用寿

命可长达15年。此外还可采用聚四氟乙烯(PTFE)/芳纶纤维-纤维布制成的密封件,使密封件的摩擦系数降至0.02,密封泄漏率小于1×10⁻⁶Pa·m³/s。

②纳米技术的应用

采用等离子喷涂技术,在叶轮表面制备出50-80微米(50-80微米)涂层,可使表面硬度达到HV1200(HV1200),耐磨性能提高3倍,降低气流冲刷对叶轮磨损的影响。或者还可将纳米硫化钼(尺寸50-100 nm)添加到润滑油中,使其在润滑油中的含量控制在0.5%以下,使摩擦系数降低40%,使轴承工作温度下降8~10℃,润滑油换油周期达到1200小时。此外,还可研制导热系数≤0.02 W/(m·K)的SiO₂气凝胶复合结构,将设备隔热层厚度降低到传统材料1/3,热损耗降低50%以上。

③3D打印技术的应用

在涡轮叶片中,可采用选区激光熔化技术(SLM)进行涡轮叶片的打印,实现复杂内流道和冷却结构的一体化成形,确保叶片尺寸精度±0.05 mm,表面粗糙度Ra≤1.6 μm。还可对叶片内支撑结构进行拓扑优化设计,使其重量降低的同时,提高疲劳强度。此外,还可采用粘结剂喷涂技术制备多孔金属密封,通过精确控制孔隙率为20%-30%,实现密封性能的自适应补偿,使其密封性得到有效提高^[5]。在此基础上,可利用有限元数值模拟对其力学性能进行仿真验证,使打印合格率达到95%以上,制造周期缩短1/4。

3. 系统集成与优化

①多能源耦合系统的设计

构建“天然气压差发电+光伏+储能”多能耦合系统,利用集中式能源管理系统实现多能协同调控。在实施过程中,通过设计一种双向直流/交流变换器,使转换效率≥96%,可实现差压发电和光伏发电的平滑互补。而且还可采用磷酸铁锂电池储能系统,使充放电效率≥92%,进而有效抑制短时功率波动。并根据实时电价制定最优调度策略,实现峰谷时段优先并网、低谷储能,使综合能源利用率得到有效提高。

②微电网技术的应用

根据IEEE 1547标准,将压差发电系统接入区域性微网,可实现电压波动小于±5%、频率偏差≤0.5 Hz的并网控制。通过开发孤岛运行方式控制算法,可在主电网发生故障时,实现0.2秒内切换到孤岛状态,保证关键负荷的连续供电。或者采用下垂控制策略,可使多台差

压发电机组并联运行，功率均差误差不超过3%。而且通过搭建微网能源管理平台，可实时监测微网中分布式能源的出力和负荷需求，优化调度策略，将微网供电可靠性提高到99.9%以上。

③系统的模块化设计

对发电、控制、制冷和并网等核心功能单元采用模块化结构进行设计，各模块采用标准化接口，互通性 $\geq 95\%$ 。发电模块由膨胀机和发电机组成，重量不超过2.5吨，可支持叉车快速装卸。控制模块采用嵌入式系统设计，体积可减小到600mm \times 400mm \times 300mm，可以随时插入使用。采用模块化维修方案，关键零部件采用抽屉式结构，更换时间不超过30分钟，年维修工时不超过80小时。这种模块化设计可使系统造价得到有效降低，进而提高后期扩展灵活性。

4. 智能化与数字化转型

①大数据与数据分析

构建工业大数据平台，可实现对机组128个运行参数的实时采集，存储容量按3年全量（50 TB）计算。在此基础上，利用随机森林算法建立机组效率评价模型，对机组效率进行分析，识别影响机组效率的关键因素，使机组效率达到92%以上。此外，还可建立包含100多个典型故障模式的故障诊断知识库，利用贝叶斯网络算法对故障根源进行定位，使准确率 $\geq 90\%$ 。通过对数据的分析，可对操作参数进行优化，使机组的平均效率得到提高，降低故障停机时间。

②云计算与远程监控

利用边缘计算节点对实时数据进行预处理，将数据传输延时控制在500毫秒以内。可开发基于IEC62443标准的网络监控界面，实现对机组运行状态、历史曲线和报警信息的实时查看。建立多层次报警机制，将报警的严重性划分为提示、警告和紧急三个等级，并在5分钟内将报警信息推送给相关人员。利用云计算技术对多站点数据进行汇总分析，生成区域性能对比报告，支持优化决策，将远程运行响应时间缩短到2小时以内。

三、天然气差压发电技术研究的未来展望

天然气压差发电是一种高效清洁的能源回收方式，具有广阔的应用前景。随着世界范围内对能源需求的不

断增加以及环保要求的不断提高，压差发电技术在世界范围内的地位日益突出。在此基础上，进一步提高能量转换效率，降低成本，提高系统的稳定性与可靠性，是今后的研究重点^[6]。在未来研究中，可通过将先进材料、智能控制技术与系统集成优化相结合，有望在提高发电效率的同时降低运行成本。例如，采用高性能复合材料可以使设备轻量化，提高疲劳强度，延长设备寿命；智能控制系统能根据实时监控数据对操作参数进行自动调整，以保证设备一直处于最优工作状态。

结束语

综上所述，天然气压差发电技术的研究与效益分析，不仅能有效回收天然气在输送过程中损耗的能源，提高能源利用率，还能降低温室气体排放量，促进环境保护与可持续发展。另外，天然气差压发电技术还可降低运行成本，提高经济效益。但是，要进一步开发这一技术，还需要在技术创新，成本控制，市场推广上下功夫。未来，伴随着新材料和新技术的不断涌现和政策的鼓励，天然气压差发电技术将会在世界范围内推广，对实现能源高效利用与环境保护具有重要意义。

参考文献

- [1] 姚瑞锋. 天然气差压发电及光伏耦合制氢掺氢技术研究[J]. 能源与环境, 2024, (02): 96-98.
- [2] 李尹建. 中国石油西南油气田公司天然气余压发电首套装置投产[J]. 天然气与石油, 2024, 42(01): 92.
- [3] 唐林华, 杨兴飞, 蔡英华. 基于现场总线的天然气计量管理系统在差压式流量计中的适用性分析[J]. 石油化工自动化, 2023, 59(S1): 47-51.
- [4] 陈曦, 文欣, 程晓明. 天然气净化厂差压发电装置的应用[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(03): 46-51.
- [5] 周斯雅, 代娟, 曾思逊, 任挺, 李涛, 王玉琼. 基于人工智能预警天然气净化装置非正常工况[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(08): 61-66+70.
- [6] 代志军, 李小平, 喻松, 饶宇. 差压式孔板流量计的误差来源与控制对策[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(24): 119-121.