

# 天然气站场 UPS 电源系统配置与运行稳定性研究

易同旭 霍海晓 李永朋

国家管网集团北京管道有限公司河北输油气分公司 河北 廊坊 065700

**摘要:** 不间断电源 (Uninterruptible Power Supply, UPS) 系统作为保障关键负荷持续、稳定供电的核心设备,在天然气站场自动化控制、安全连锁、通信及监控等系统中发挥着不可替代的作用。本文围绕天然气站场对供电可靠性的特殊需求,系统分析了UPS电源系统的功能定位、典型配置方案及其关键技术参数,并深入探讨影响其运行稳定性的主要因素,包括设备选型不当、维护缺失、环境适应性不足及负载特性复杂等问题。在此基础上,提出一套基于全生命周期管理理念的UPS系统优化配置策略与运行维护体系,涵盖前期规划、中期实施与后期运维三个阶段。通过引入智能监控、状态评估与预防性维护等先进技术手段,有效提升UPS系统的可用性与可靠性。研究成果可为天然气行业UPS系统的设计、选型、部署与运维提供理论支撑与工程参考。

**关键词:** 天然气站场; UPS电源; 系统配置; 运行稳定性; 可靠性; 预防性维护

## 引言

我国能源结构优化与“双碳”目标推进,使天然气在国家能源体系中的地位愈发重要。天然气站场设施是输送网络关键节点,普遍采用高度自动化控制系统、安全仪表系统等,对供电连续性与质量要求严苛。市电中断或电压波动若无效后备电源,会致控制系统失灵等,威胁管道与公共安全。配置高可靠性不间断电源(UPS)系统,是保障站场核心负荷“零中断”供电的必要手段。但实际工程中,部分站场UPS系统存在配置不合理、运行不稳定等问题,未充分发挥保障作用。这既因设计阶段对负载特性和运行环境考虑不足,也因运维阶段缺乏科学管理策略。因此,系统研究天然气站场UPS电源系统配置原则与运行稳定性提升路径,具有重要理论与现实意义。

### 1 天然气站场对UPS电源系统的需求分析

#### 1.1 负载特性与供电要求

天然气站场的关键用电负荷主要包括:(1)控制系统(如PLC、RTU、DCS):要求供电连续、电压稳定、波形纯净,通常允许中断时间小于10ms。(2)安全连锁系统(SIS):涉及紧急关断(ESD)功能,对供电可靠性要求极高,需满足SIL等级认证要求。(3)通信系统(光端机、路由器、交换机):保障数据传输不间断,防止通信中断导致远程监控失效。(4)监控与安防系统(CCTV、门禁、周界报警):在事故状态下仍需维持基本功能,支持应急响应。(5)部分执行机构(如电动调节阀的控制回路):虽主动力可能来自其他电源,但其控制信号依赖稳定直流或交流电源。上述负荷多为容性或非线性负载,对UPS输出波形失真度(THD)、频率稳定性、瞬态响应能力等指标有较高要求。同时,根据《石油天然

气工程设计防火规范》(GB50183)及《供配电系统设计规范》(GB50052)等相关标准,关键负荷的供电连续性应达到一级负荷中特别重要负荷的标准,即“双重电源+应急电源”配置,而UPS正是实现“应急电源”功能的核心设备。

#### 1.2 运行环境特点

天然气站场多位于偏远地区,环境条件复杂:一是温度范围宽:冬季严寒(-30℃以下),夏季高温(40℃以上);二是湿度变化大:沿海或南方地区湿度高,易导致设备凝露;三是粉尘与腐蚀性气体:部分区域存在盐雾、硫化氢等腐蚀性介质;四是电磁干扰强:大型电机、变频器、雷电等产生强电磁干扰<sup>[1]</sup>。这些环境因素对UPS设备的散热、绝缘、抗干扰能力提出更高要求,直接影响其长期运行的稳定性。

## 2 UPS电源系统典型配置方案

### 2.1 系统架构选择

根据站场规模、负荷等级及投资预算,常见UPS配置方案包括:(1)单机系统:适用于小型站场或非核心负荷。结构简单、成本低,但无冗余,单点故障风险高,可靠性较低(可用性约99.5%),一般不推荐用于关键控制系统。(2)N+1并机冗余系统:主流配置方案。由N台UPS并联运行,承担全部负载,另加1台作为冗余备份。当任一模块故障时,其余模块自动均担负载,系统持续运行。该方案显著提升系统可用性(可达99.999%),且支持在线扩容与维护,适用于中大型站场。(3)双总线(2N)系统:最高可靠性配置。两套完全独立的UPS系统分别供电给双电源输入的负载(如服务器、核心交换机)。任意一路UPS故障或维护,另一路仍可独立支撑全部关键

负荷。适用于超大型枢纽站或对供电连续性要求极高的场景,但成本高昂、占地面积大<sup>[2]</sup>。(4)模块化UPS系统:采用功率模块化设计,支持热插拔。可根据负载增长灵活增减模块,实现“按需部署”。具备N+X冗余能力,维护便捷,空间利用率高,是当前技术发展趋势。

## 2.2 关键技术参数选型

(1)额定功率:需考虑负载总额定功率、启动冲击电流(如电机类负载)、未来扩容裕量(建议预留20%~30%)。(2)后备时间:通常配置15~30分钟,确保在市电中断期间有足够时间启动备用发电机或完成安全停机程序。(3)输入/输出特性:输入功率因数>0.99,输入电流谐波<5%;输出电压稳定度 $\pm 1\%$ ,频率稳定度 $\pm 0.1\text{Hz}$ ,THD<3%(线性负载)。(4)电池类型:阀控式铅酸蓄电池(VRLA)为主流,成本低、技术成熟;锂离子电池能量密度高、寿命长、温域宽,但成本高、需专用BMS管理。(5)拓扑结构:双变换在线式(Double Conversion Online)为首选,可实现完全隔离电网干扰,提供纯净正弦波输出。

## 3 影响UPS系统运行稳定性的关键因素

### 3.1 设备选型与配置不当

在实际工程中,部分项目为压缩初期投资,往往低估负载容量,未充分考虑非线性负载产生的谐波电流、电动执行机构启动时的冲击电流以及未来可能的扩容需求,导致UPS长期处于过载或接近满载状态运行,加速内部元器件如电解电容、功率模块的老化与失效。更有甚者,为节省成本采用单机无冗余配置,使整个关键控制系统暴露于单点故障风险之中,一旦UPS发生故障,将直接导致控制系统断电。此外,电池系统的配置也常被忽视,例如未根据当地最低环境温度校正电池容量,或混用不同品牌、批次、新旧程度的电池单体,造成电池组内电压与内阻严重不均衡,不仅大幅缩短整体使用寿命,还可能在放电过程中引发个别电池反极、过热甚至热失控,严重威胁系统安全。

### 3.2 运维管理缺失

许多天然气站场缺乏系统化、标准化的UPS维护制度,日常运维仅依赖人工定期巡检,难以及时发现诸如电容鼓包、风扇轴承磨损、接线端子松动等潜在隐患。电池作为UPS系统中最易损耗的部件,若未按照规程定期进行内阻测试、浮充电压校准和深度放电试验,其健康状况无法准确评估,往往在市电中断的关键时刻因容量不足而提前失效。同时,故障预警机制薄弱,多数系统未接入集中监控平台,告警信息依赖本地声光提示,运维人员无法远程掌握设备实时状态<sup>[3]</sup>。此外,备件管理

混乱,关键元器件如IGBT、主控板、继电器等无合理库存,一旦发生故障,需等待厂家发货,导致平均修复时间(MTTR)显著延长,系统可用性大幅降低。

### 3.3 环境适应性不足

环境适应性不足同样是制约UPS系统长期稳定运行的重要因素。UPS机房若通风设计不合理或空调系统故障,内部温度持续升高,将触发设备过热保护甚至烧毁功率器件;在风沙严重的地区,若未安装高效防尘滤网,粉尘会大量积聚在散热片和风扇叶片上,阻碍空气流通,进一步加剧温升。在沿海或工业污染区域,空气中含有的盐雾、硫化氢等腐蚀性气体会侵蚀电路板铜箔、焊点及连接器,导致接触电阻增大、绝缘性能下降,最终引发间歇性故障或永久性损坏。此外,接地系统施工不规范、接地电阻过大,或未按要求安装多级电涌保护器(SPD),使得雷击或电网浪涌极易通过电源线路侵入UPS内部,造成输入/输出端口乃至主控单元的不可逆损伤。

### 3.4 负载特性复杂

天然气站场负载特性的复杂性也对UPS系统构成独特挑战。站场内广泛使用的变频器、开关电源、LED照明等非线性设备会产生大量高次谐波电流,这些谐波会反灌至UPS输出端,干扰其逆变器的控制环路,影响输出电压的稳定性与波形质量。更严重的是,当多个电动调节阀或执行机构在控制系统指令下同时动作时,会在极短时间内形成数倍于额定值的冲击电流,对UPS的瞬态响应能力提出极高要求。若UPS动态性能不足,输出电压可能出现短暂跌落或过冲,导致下游敏感设备如PLC、通信模块发生复位、死机甚至数据丢失,破坏整个控制系统的连续性与安全性。

## 4 提升UPS系统运行稳定性的优化策略

### 4.1 规划设计阶段:精准匹配需求

在规划设计阶段,必须摒弃经验主义,开展精细化的负荷调研与供电可靠性分析。应逐项统计所有关键负荷的额定功率、功率因数、启动特性、电源制式(AC/DC)及未来三年内的扩容计划,建立详尽的负载清单,并据此计算UPS的最小容量需求。同时,应采用FMEA(故障模式与影响分析)或RAM(可靠性、可用性、可维护性)建模方法,对不同配置方案(如单机、N+1、2N)进行量化评估,明确其MTBF(平均无故障时间)与MTTR(平均修复时间),为架构选择提供数据支撑。此外,必须强化环境适应性设计,UPS机房应配备恒温恒湿精密空调、高效防尘新风系统及防腐涂层;电池室需独立设置,避免与UPS主机同室以防止酸雾腐蚀;完善多级SPD防雷保护与等电位接地系统,确保接地电阻小于 $1\Omega$ ,

全面提升系统在恶劣环境下的生存能力。

#### 4.2 设备选型与安装阶段：优选高可靠产品

在设备选型与安装阶段，应优先选用工业级UPS产品，其通常具备更宽的工作温度范围（如 $-20^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ ）、更高的防护等级（IP21及以上）以及更强的抗电磁干扰能力，能够适应天然气站场的严苛环境。系统架构推荐采用模块化+N+1并机冗余方案，在保障高可用性的同时兼顾灵活性与可维护性。电池系统必须配套智能电池管理系统（BMS），实现对每节电池电压、内阻、温度的实时监测与健康状态（SOH）精准评估，避免因个别电池劣化拖累整组性能<sup>[4]</sup>。安装施工过程必须严格遵循规范，确保输入/输出电缆截面充足、接线端子紧固可靠、相序正确无误，并做好屏蔽与接地处理，杜绝因施工质量问题埋下运行隐患。

#### 4.3 运行维护阶段：构建智能运维体系

进入运行维护阶段，应着力构建以“状态检修”为核心的智能运维体系。首先，通过SNMP、Modbus TCP等标准通信协议，将UPS运行参数（包括输入/输出电压电流、负载率、电池状态、告警信息等）实时接入站场SCADA系统或专用能源管理平台，实现 $7\times 24$ 小时远程监视与微信/短信告警推送。其次，推行预防性维护策略：每季度进行一次电池内阻与浮充电压测试，每年开展一次深度放电试验以校验实际后备能力；利用红外热成像仪每年至少巡检一次，检测母排、接线端子是否存在过热隐患；基于设备运行小时数、环境温度、负载率等大数据，运用算法预测电解电容、冷却风扇等易损件的剩余寿命，提前安排更换。同时，编制《UPS系统运维手册》，明确日常巡检、定期保养、应急处置等标准化操作流程，并对运维人员进行专业培训与考核。最后，建立科学的备件全生命周期管理制度，对关键元器件实施ABC分类库存管理，

确保常用件随时可用，长周期采购件提前储备，最大限度缩短故障修复时间。

### 5 结语

本文系统研究了天然气站场UPS电源系统的配置原则与运行稳定性提升路径。研究表明：合理配置是基础，应根据站场负荷特性、环境条件及可靠性要求，科学选择UPS系统架构（推荐N+1并机或模块化方案），并精准计算容量与后备时间；全生命周期管理是关键，从规划设计、设备选型到运行维护，需贯彻“预防为主、智能运维”理念，避免“重建设、轻运维”的误区；智能化技术是趋势，通过远程监控、状态评估、寿命预测等手段，可实现UPS系统从“被动维修”向“主动预防”转变，显著提升运行稳定性与经济性。未来，随着锂电技术成本下降、数字孪生与AI预测性维护技术的发展，天然气站场UPS系统将向更高能效、更长寿命、更强自愈能力的方向演进。建议行业加快制定UPS系统智能化运维标准，推动老旧站场UPS改造升级，为国家天然气管网安全高效运行提供坚实电力保障。

### 参考文献

- [1]张伟.UPS电源在石油化工领域中应用的安全和环境影响[J].石油化工自动化,2025,61(02):17-21.
- [2]牛国轩,李亮.UPS电源原理性能分析及安全使用维护方法[C]//中国机电一体化技术应用协会.第七届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛入选论文集.中国石化长庆石化公司运行保障部,2024:106-111.
- [3]刘风明,吕开钧,范文涛,等.天然气管道压缩机组DCP/UPS电源的安全环保节能改造[J].石油化工安全环保技术,2023,39(04):30-34+6.
- [4]周越.UPS电源及其可靠性研究[J].光源与照明,2022,(07):107-109.