

# 天然气站场供配电系统可靠性分析与改进措施

李永朋 易同旭 霍海晓

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:** 天然气作为清洁能源,在国家能源战略中占据重要地位。天然气站场(包括门站、分输站、压气站、LNG接收站等)是天然气输配系统的关键节点,其安全稳定运行直接关系到能源供应的连续性和公共安全。供配电系统作为站场运行的核心支撑系统,其可靠性对整个站场的安全至关重要。本文首先阐述了天然气站场供配电系统的基本构成与运行特点,深入分析了影响其可靠性的主要因素,包括设备老化、外部电网故障、设计缺陷、运维管理不足及自然灾害等。在此基础上,从电源配置优化、设备选型与冗余设计、智能化运维、防雷接地系统完善以及应急预案强化等方面,提出了系统性的改进措施。研究结果可为提升天然气站场供配电系统的可靠性提供理论依据和实践指导。

**关键词:** 天然气站场; 供配电系统; 可靠性分析; 故障树分析; 改进措施; 智能运维

## 引言

天然气站场作为连接上游气源与下游用户的枢纽,承担着接收、计量、调压、加臭、分输乃至增压等关键功能。这些功能的实现高度依赖于稳定、可靠的电力供应。一旦供配电系统发生故障,轻则导致站场工艺中断,影响区域供气;重则可能因关键安全仪表(如ESD紧急关断系统、可燃气体报警器、消防泵等)失电而引发安全事故,后果不堪设想。近年来,国内外因电力系统故障导致的天然气站场事故时有发生,凸显了供配电系统可靠性研究的紧迫性。然而,现有研究多集中于大型电网或通用工业配电领域,针对天然气站场这一特殊应用场景的系统性可靠性分析与针对性改进策略尚显不足。因此,本文旨在通过深入剖析天然气站场供配电系统的薄弱环节,并提出一套科学、可行的改进方案,以期为保障国家能源动脉的安全畅通贡献力量。

## 1 天然气站场供配电系统概述

### 1.1 系统基本构成

天然气站场供配电系统由多个核心部分构成:(1)外部电源引入:多数站场采用双或多回路高压线路从地方电网引电,偏远站场可能辅以自备柴油发电机组。(2)变配电所:含高压开关柜、变压器等设备,将高压电能降压至站场所需电压等级(如380V/220V)。(3)站内配电网:由电缆、配电箱等构成,负责电能分配。(4)关键负荷:分三级,一级负荷包括ESD系统、FGS系统等,要求供电不中断;二级负荷有压缩机、主要工艺泵等,允许短时停电;三级负荷为办公、生活用电等普通负荷。(5)不间断电源(UPS)与应急电源(EPS):为一级负荷中的关键系统提供毫秒级切换的后备电源,柴油发电机则作为长时间停电的最终保障。

### 1.2 运行特点

天然气站场供配电系统具有以下鲜明特点:一是高可靠性要求:安全相关负荷必须保证“零中断”。二是负荷特性复杂:既有连续运行的控制负荷,也有大功率、间歇性启动的电机负荷(如压缩机),对系统冲击较大。三是环境特殊:站场多位于野外或工业区,面临雷击、盐雾、沙尘、高低温等严苛环境考验。四是无人值守趋势:现代站场普遍采用自动化、数字化管理,对供配电系统的远程监控和自诊断能力提出更高要求。

## 2 供配电系统可靠性影响因素分析

### 2.1 设备因素

设备自身的健康状况是决定供配电系统可靠性的内在基础。随着时间推移,设备不可避免地发生老化与性能劣化。例如,电力变压器的绝缘材料在长期电、热、机械应力作用下会逐渐脆化、龟裂,导致绝缘强度下降,极易在过电压或操作冲击下发生击穿;高压开关设备的触头在频繁分合闸过程中产生电弧侵蚀与机械磨损,接触电阻增大,引发局部过热甚至熔焊;电缆的外护套与绝缘层在紫外线、化学腐蚀或鼠害作用下可能出现破损或老化,埋下短路或接地故障隐患。许多早期投运的天然气站场,其核心电气设备已接近甚至超过设计寿命,故障率显著攀升<sup>[1]</sup>。此外,若在建设或改造阶段选用了不符合国家标准或质量控制不严的元器件,即便在初期运行正常,其潜在缺陷也可能在后期运行中集中爆发,成为系统不可靠的根源。更为关键的是,如果缺乏科学、规范的预防性试验与状态检修机制,诸如绝缘电阻下降、继电保护装置灵敏度漂移等渐进性故障征兆就难以被及时捕捉,最终演变为突发性停电事故。

### 2.2 外部电网因素

尽管站场内部系统可以精心设计，但其可靠性始终无法脱离外部电网环境的制约。地方公用电网的稳定性是站场外部电源可靠性的前提。现实中，电网因设备故障、线路过载、雷击、人为误操作或计划检修等原因导致的停电事件屡见不鲜。对于仅依赖单回路或虽有双回路但同源（即引自同一上级变电站）的站场而言，一次区域性电网故障就足以造成全站失电。即使配置了双回路独立电源，若地方电网整体薄弱，频繁的电压波动、闪变、谐波污染等电能质量问题同样会对站场内敏感的电子控制系统构成威胁。这些非停电类的电能质量问题可能导致PLC、DCS控制器等设备逻辑紊乱、数据丢失甚至硬件损坏，间接引发工艺异常或安全联锁失效，其危害性有时甚至超过单纯的断电。

### 2.3 设计与配置因素

供配电系统的先天“基因”——即其初始设计与配置方案，从根本上决定了其可靠性上限。一些历史遗留站场或早期项目，受限于当时的技术认知、投资预算或规范标准，存在明显的可靠性短板。例如，电源配置过于单一，未能严格执行一级负荷必须由双重电源供电的强制性规范；或者虽然形式上具备双回路，但两路电源在物理路径或上级电源点上并未真正隔离，本质上仍是“伪冗余”。在系统保护方面，上下级断路器或继电保护装置的定值配合不合理，容易在局部故障时引发越级跳闸，将本可局限的小范围停电扩大为全站或大面积失电。此外，初期设计容量预留不足，未充分考虑未来工艺扩容或新增负荷的需求，导致系统长期处于重载甚至过载状态运行，不仅加速设备老化，也大大增加了因过热引发故障的风险。

### 2.4 运维管理因素

再先进的硬件系统，若缺乏科学高效的运维管理，其可靠性也会大打折扣。当前部分天然气站场在供配电系统运维方面仍存在明显短板。管理制度体系不健全，巡检、操作、缺陷处理、应急响应等关键流程缺乏标准化和闭环管理，导致隐患发现滞后、处置随意。运维人员的专业技能与知识结构更新未能跟上设备智能化、数字化的发展步伐，面对新型智能断路器、微机保护装置或综合自动化系统时，往往只能进行简单的启停操作，而无法进行深层次的故障诊断与参数优化<sup>[2]</sup>。同时，信息化手段应用不足，大量依赖人工抄表和纸质记录，使得海量运行数据无法得到有效整合与分析，错失了通过数据驱动实现预测性维护、提前干预故障的宝贵机会。

### 2.5 自然灾害与外部破坏

天然气站场作为地面固定设施，不可避免地暴露于

各种自然与人为风险之中。雷电是导致户外电气设备（如架空线路、变压器、避雷器）损坏的常见自然因素，一次强烈的直击雷或感应雷过电压就可能造成设备绝缘击穿、电子元件烧毁。台风、暴雨、洪水、暴雪、冰冻等极端天气事件，可能引发倒杆断线、设备浸水、覆冰闪络等次生灾害。此外，随着城市建设和基础设施施工活动的日益频繁，第三方施工不慎挖断地下电缆、重型车辆撞击电杆等外力破坏事件也成为不可忽视的威胁。这些偶发但破坏力巨大的外部事件，对供配电系统的物理韧性提出了严峻考验。

## 3 供配电系统可靠性改进措施

### 3.1 优化电源配置，构建多重保障

应坚决摒弃任何形式的“伪冗余”，确保为一级负荷供电的两路外部电源在物理路径和上级电源点上完全独立，真正实现N-1甚至N-2的安全准则。对于地处电网末梢或可靠性极差地区的站场，应提升自备应急电源的战略地位，不仅配置足够容量的柴油发电机组，还应考虑采用N+1冗余配置，并建立严格的定期带载测试制度，确保其在关键时刻“拉得出、顶得上、带得动”。面向未来，还可积极探索“源-网-荷-储”一体化的新型供电模式，在站场屋顶或空地建设分布式光伏发电系统，并配套储能电池，形成微电网。该微电网在正常工况下可自发自用、余电上网，在外部电网故障时可迅速孤岛运行，为关键负荷提供绿色、可靠的补充电力，显著增强站场的能源韧性和自主保障能力。

### 3.2 强化设备选型与系统冗余设计

在硬件层面，应坚持“质量优先、适度超前”的原则。在设备采购环节，严格选用符合国际（如IEC）和国家（如GB）最新标准、具有高可靠性记录和良好售后服务的品牌产品，尤其要关注其在恶劣环境下的适应性指标。对于关乎全站安全命脉的核心回路，如ESD、FGS及主控系统，必须实施供电回路的双重化甚至三重化设计。这意味着它们应分别由两套（或更多）相互独立的UPS系统和低压配电母线供电，任何一路电源的故障都不应影响另一路的正常工作，从而将单点故障的风险降至最低<sup>[3]</sup>。与此同时，必须对全站的继电保护系统进行精细化整定计算与校验，充分利用现代微机保护装置的强大功能，确保各级保护之间在动作时限和灵敏度上实现完美配合，做到故障精准隔离、影响范围最小化，杜绝因保护失配导致的无谓扩大停电。

### 3.3 推进智能化运维，实现主动防御

从“人防”向“技防”与“智防”转变是提升运维效能的核心路径。应全面部署智能配电监控系统（PMS），

将其深度集成到站场的SCADA平台中,实现对全站高低压设备运行状态的7×24小时全景感知。该系统不仅能实时采集传统的电气量(电压、电流、功率),更能接入温度、局放、绝缘状态等非电量信息,构建起设备的多维健康画像。在此数据基础上,运用大数据分析和机器学习算法,建立设备故障预测模型,实现从“故障后维修”到“状态检修”乃至“预测性维护”的跨越。当系统预判某台变压器存在过热风险或某段电缆绝缘正在加速劣化时,可自动发出预警,指导运维人员提前介入,将故障消灭在萌芽状态。更进一步,可构建供配电系统的数字孪生体,通过虚拟仿真对各种运行工况和故障场景进行推演,为人员培训、预案优化和应急决策提供强大的数字化支撑。

#### 3.4 完善防雷与接地系统

针对雷电这一高频自然威胁,必须采取系统性、全方位的防护策略。应依据现行国家防雷设计规范,对站场现有的防雷体系进行全面复核与升级。这包括检查避雷针、避雷带等接闪器的保护范围是否全覆盖,引下线的截面与连接是否可靠,以及最为关键的浪涌保护器(SPD)的选型、分级安装与状态监测是否到位。SPD是抵御感应雷过电压侵入室内设备的最后一道防线,其性能优劣直接决定了控制系统的安危<sup>[4]</sup>。同时,全站共用接地网是所有防雷与安全措施的基石。必须确保接地网的接地电阻常年稳定在安全限值(通常不大于4欧姆)以内,并建立定期测试与维护机制。一个低阻抗、高导通性的接地网,不仅能有效泄放雷电流,更能保障人身安全,防止跨步电压和接触电压的危害。

#### 3.5 健全应急管理体系

再完善的预防措施也无法做到万无一失,因此,一套高效、务实的应急管理体系是保障极端情况下损失最小化的最后一道屏障。必须针对供配电系统可能发生的各类典型故障场景,如单电源失电、双电源失电、UPS故障、发电机启动失败等,编制详细、具体、可操作的专项

应急预案。预案内容应明确各岗位人员的职责分工、处置流程、联络方式及所需资源。更重要的是,要将预案从纸面落到实战,通过定期组织无脚本、突击式的应急演练,真实检验预案的可行性与人员的协同作战能力。演练后必须进行复盘总结,不断迭代优化预案。此外,应建立关键备品备件的动态库存管理机制,特别是对于那些采购周期长、对恢复供电至关重要的核心元器件,如特定型号的断路器、接触器、UPS功率模块等,确保在故障发生后能够实现“即坏即换”,最大限度地缩短平均修复时间(MTTR),快速恢复供电。

#### 4 结语

天然气站场供配电系统的可靠性是保障国家能源安全的生命线。本文通过系统梳理其构成与特点,深入剖析了设备、电网、设计、运维及自然环境等多维度的影响因素。在此基础上,提出的“优化电源配置、强化设备冗余、推进智能运维、完善防雷接地、健全应急管理”五位一体的改进策略,具有较强的系统性和可操作性。未来,随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的深度融合,天然气站场供配电系统将向更智能、更韧性、更自主的方向发展。通过持续的技术创新和管理优化,我们有信心构建起能够抵御各种风险挑战的高可靠供配电体系,为我国天然气事业的高质量发展筑牢坚实的电力基石。

#### 参考文献

- [1]刘朋.天然气输气站场站控系统供电可靠性设计研究[J].石油化工自动化,2020,56(01):13-18.
- [2]黄亚军,曾登高.石油天然气站场配电线路检验批探讨[J].石油工业技术监督,2025,41(01):36-39.
- [3]高进,邱斌,张伟,等.天然气净化厂DCS/ESD供配电优化[J].油气田地面工程,2020,39(04):60-65.
- [4]王仲刚,谭金山,吴自峰.基于智能变电站的石油天然气站场照明节能研究[J].中国照明电器,2025,(08):162-164.