

压气站大功率机组电压暂降治理及供电可靠性提升

蔡永根 刘庆 周希骥 史作训 李帅琦

国家管网集团西气东输公司苏北输气分公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21072

[摘要] 长距离天然气输送系统中,压气站是核心动力节点。站内高功率压缩机组具备设备容量大、启动冲击负荷高、需连续稳定运行的特征,对供电系统的电能质量与供电稳定性要求较高。电压瞬时跌落是影响压气站机组运行平稳性、保障输气连续性的关键电能质量问题,易触发机组变频器保护跳闸、设备停运,最终导致输气中断,直接制约油气管道输送的安全性与稳定性。为提升压气站供电保障能力,本研究结合大功率机组电气运行特性,分析电压暂降的产生机制与量化评估方法,构建标准化治理技术框架,最终形成适配压气站运行环境的电压暂降治理工艺与供电可靠性增强策略,可为同类油气场站高功率机电设备的电能质量提升及供电系统优化提供参考。

[关键词] 压气站; 大功率机组; 电压暂降; 无功补偿; 供电可靠性

中图分类号: U263.12 **文献标识码:** A

Mitigation of voltage sags and improvement of power supply reliability for high-power units in compressor stations

Yonggen Cai Qing Liu Xiji Zhou Zuoxun Shi Shuaiqi Li

National Pipeline Network Group West-East Gas Transmission Company, Subei Gas Transmission Branch

[Abstract] In long-distance natural gas transmission systems, compressor stations serve as critical power nodes. The high-power compressor units within these stations feature substantial equipment capacity, high startup load peaks, and require continuous stable operation, imposing stringent demands on power system quality and stability. Voltage sags represent a pivotal power quality issue that compromises operational stability of compressor units and jeopardizes gas supply continuity; they can trigger protection tripping in frequency converters and equipment shutdowns, ultimately leading to gas supply interruptions and significantly compromising pipeline safety and reliability. To enhance power supply reliability at compressor stations, this study examines the operational characteristics of high-power units, analyzes voltage sag mechanisms and quantification methods, establishes a standardized mitigation framework, and develops tailored voltage sag control strategies and power supply reliability improvement measures tailored to compressor station environments. These findings provide valuable references for improving power quality and optimizing power systems for high-power electromechanical equipment in similar oil and gas facilities.

[Key words] Compressor station; High-power unit; Voltage sag; Reactive power compensation; Power supply reliability

引言

和普通工业负荷相比,压气站大功率机组对电网电压波动、瞬时电压跌落、谐波干扰的容忍度极低,轻微电压暂降就可能触发变频器系统低电压保护与停机联锁,造成站内设备停运、输气流程中断,最终影响管网运行稳定性。电网日常运行、负荷切换、邻近设备启停或线路出现瞬时扰动时,都容易引发短时间电压暂降,这类暂降持续时间通常为几十毫秒到几百毫秒,属于发生频率高、隐蔽性强、危害较大的电能质量问题。当前压气站输

气负荷持续增长,大功率机组投用数量不断增加,电网侧与负荷侧的电压扰动交互影响愈发明显,对站内供电系统的稳定性、可靠性与抗扰动能力提出了更高要求。

1 压气站大功率机组电压概况

以某长距离输送管道系统的典型压缩机站为分析对象,该站配置多台兆瓦级大功率变频压缩机组,供电系统接入10千伏高压电源,电气接线采用外部电网双回路进线、站内双母线分段运行模式,全站用电负荷集中,总用电量较大。机组常规启停、

负荷调峰及运行工况切换操作频繁,易产生瞬态无功功率冲击,引发站内母线电压动态波动。该场站地处电网末端,系统短路容量偏小,电网抗扰动能力不足,叠加大型机组负荷频繁变动的扰动,易出现短时电压暂降问题。站内全部机组对电压稳定性、瞬时电压跌落耐受能力均有明确要求,常态化电压波动会直接降低变频设备工作精度,影响机组平稳运行,需实施针对性的优化治理措施。

2 压气站机组运行特性与电压暂降评价体系

2.1 大功率机组电气运行特性

压气站内大功率压缩机组多采用高压变频驱动方式,单台机组额定功率可达兆瓦级,运行过程具备高精度、连续性强、响应灵敏的电气特性。变频控制系统包含整流、逆变、滤波、稳压及联锁保护等多个精密模块,对母线电压幅值、波动范围、电压暂降持续时间均有严格限制标准。机组启动、停机、负荷调整及工况切换过程中会瞬时产生无功冲击与负荷突变,易造成站内母线电压短时波动;外部电网的瞬时扰动传入站内供电系统后,会与内部波动叠加引发电压暂降,直接威胁机组平稳运行。压气站普遍采用无人或少人值守的运维模式,设备自动联锁保护优先级较高,瞬时电压波动无人工介入缓冲空间,对供电系统抗干扰性能有明确且严格的要求^[1]。

2.2 电压暂降量化评价标准与计算公式

根据国家标准《电能质量 电压暂降和短时中断》(GB/T 30137-2013)规定,电压暂降评价以系统标称电压为参考基准,量化评估主要依据暂降深度与持续时间两个核心参数。暂降深度直接体现电压下降的严重程度,是制定治理方案、选择设备容量的核心依据,通用计算公式如下:

$$\Delta U = \frac{U_N - U_{min}}{U_N} \times 100\%$$

式中: ΔU 为电压暂降深度,%; U_N 为系统标称电压,kV; U_{min} 为电压暂降过程中的母线最低瞬时电压,kV。该公式可精准量化不同工况下电压跌落幅值,为治理设备选型、补偿参数设定提供数据支撑。

为匹配压气站动态无功扰动特性,精准核算动态补偿设备装机容量,本文结合SVG动态治理设备参数设计要求,引入适配性的无功补偿容量核算公式,具体如下:

$$Q = \frac{S_d \times \Delta U}{1 - \Delta U}$$

式中: Q 为所需动态无功补偿容量,Mvar; S_d 为站内供电系统短路容量,MVA; ΔU 为目标治理电压暂降深度,小数形式。该公式可根据场站电网参数与治理目标,精准计算最优补偿容量,避免设备容量冗余或不足,保障治理效果与工程经济性平衡。

2.3 电压暂降对机组运行的适配影响

大功率变频机组在压气站中配置响应迅速的低压穿越功能与联锁保护机制,电网出现轻微电压暂降时,变频系统可自动调整运行参数,保持工况平稳;电压暂降幅度超过10%且持续时间

达到20毫秒以上时,可能激活系统稳压保护,导致机组转速下降、负荷波动;暂降幅度超过15%或持续时间超出设定阈值时,将立即启动停机联锁程序,中断输气过程。频繁电压暂降冲击会加速变频模块、电机绕组及接触器等电气元件的疲劳老化,缩短设备使用年限,推高场站运行维护费用,稳定的电压条件是保障机组长期连续稳定运行的重要前提^[2]。

3 电压暂降综合治理技术方案设计

3.1 SVG动态无功补偿治理配置

针对压气站大功率机组运行过程中负荷变化快、瞬时扰动强的特征,本文选取静止无功发生器(SVG)作为核心治理装置,替代常规静态无功补偿设备。SVG响应速度达毫秒级,可实现无功功率双向连续调控,能精准应对机组启停及负荷变化产生的瞬时无功冲击,快速缓解电压跌落与波动问题。该装置采用三相全控桥式逆变拓扑,可实时监测母线电压与负荷电流的动态变化,灵活输出容性或感性无功功率,及时补足系统瞬时无功缺额,有效抑制电网侧与负荷侧双向扰动引发的电压暂降。SVG同时具备谐波抑制、电压稳定及功率因数校正功能,可同步提升站内整体电能质量。结合前述容量计算公式,匹配场站短路容量及实际电压扰动测量结果,本站最终选配额定容量12Mvar的SVG动态补偿装置,满足全站大功率机组同时运行时的扰动治理要求^[3]。

3.2 站内供电回路结构优化设计

为减少线路阻抗引起的电压下降、抑制瞬时干扰传播,本研究对压气站高压供电回路及机组进线回路开展结构优化设计。首先统一规范高压母线接线形式,采用双母线分段加联络的运行方式,实现机组负荷按区域供电、故障按区域隔离,避免单一回路扰动引发全站电压波动。其次改进机组电缆的选型与布置方法,降低线路阻抗,减少正常工况及瞬时干扰下的电压损失;在功率较大的机组进线侧加装专用稳压电抗器与浪涌抑制设备,缓冲瞬时电压冲击,阻止干扰传递至机组核心控制系统。最后优化站内接地系统,降低接地电阻,提升系统抗干扰性能,在电网结构层面夯实电压稳定基础。

3.3 机组稳压联锁控制策略优化

本次研究基于站内PLC控制系统,优化大功率机组的电压耐受逻辑与联锁保护策略,构建设备自适应稳压运行机制。在设备保护阈值范围内调整机组变频系统的低压穿越参数,延长其应对短时电压扰动的耐受时间,避免毫秒级瞬时电压暂降引发非计划停机。研究构建了SVG设备与压缩机组的联动控制逻辑,系统监测到电压波动趋势后可提前启动动态无功预补偿,实现扰动预判、提前补偿、动态稳压的协同运行,能够在电压暂降发生前完成有效抑制,从控制策略层面提升机组运行稳定性^[4]。

4 治理效果与供电可靠性数据对比分析

为验证综合治理方案的应用成效,对压气站治理前后的电能质量指标、机组运行指标、供电可靠性指标开展连续3个月的常态化监测统计,形成标准化对比数据,治理效果可通过表1直观呈现。

表1 治理效果与供电可靠性数据对比

监测指标	治理前状态	治理后状态	优化提升效果
月度电压暂降次数(次)	18	2	减少 88.9%
平均电压暂降深度(%)	12.6	3.2	降低 74.6%
机组瞬时扰动停机次数(次/月)	4	0	彻底消除扰动停机故障
站内供电功率因数	0.86	0.98	提升 13.9%
机组连续运行时长(h)	216	720	实现全月连续稳定运行
供电可靠率(%)	99.26	99.98	提升 0.72 个百分点

本次综合治理方案成效可通过监测数据得到验证。实施SVG动态无功补偿、优化供电网架、升级控制策略后,站内电压暂态发生频率与跌落幅度均显著下降,直接解决了电压扰动引发的机组停机问题。全站功率因数稳定维持在理想区间,供电损耗较治理前有所降低,机组可长期连续稳定运行,供电可靠率满足油气场站高标准运行要求,最终达成电能质量优化与供电可靠性提升的治理目标。该治理系统响应速度快、运行稳定性高、环境适应性好,可适配压气站大功率机组的长期连续运行需求。

5 长效供电可靠性提升保障体系

5.1 设备常态化运维管控机制

针对SVG补偿装置、高压供电系统、机组变频器,需建立定期运维体系,制定月度、季度、年度分级检修方案。定期校验无功补偿参数、电压采样准确度与联锁控制逻辑,保证治理设备长期维持高精度运行状态;常态化开展设备除尘、接线端子紧固、设备温升检测,保障电力电子设备工作环境稳定。同步建立设备运行记录档案,系统留存电压波动数据、设备补偿参数与机组运行状况,实现问题可追溯、参数可优化、运行状态可监控,为设备稳定运行提供硬件支撑^[5]。

5.2 电能质量实时监测预警体系

构建全站电能质量在线监测平台,可实时采集母线电压、电流、功率因数、电压暂降、谐波含量等关键参数,实现电压扰动的即时监测、自动分析与预警。系统可自动识别电压波动趋势,预测瞬时扰动风险,联动SVG设备开展预补偿调控,在电压暂降发生前完成主动治理。配套的数据可视化模块可直观呈现全站电能质量的实时变化情况,为后续参数优化、设备更新、运行调度提供可靠数据支撑。

5.3 运行调度协同优化机制

改进压气站机组启停调度策略,合理安排机组负荷调节时序,避免多台机组同步启停引发的集中无功冲击,从源头上降低电压扰动风险。规范电网联络运行模式,保持站内供电系统与外电网的稳定耦合,减少外部电网瞬时扰动向站内系统的传播。结合季节性负荷波动与管网输气需求,动态调整无功补偿设备运行参数,使治理设备与机组运行工况动态匹配,提升治理效果。

6 结论

长输天然气管道安全输送的核心是压气站内大功率机组的平稳运转,电压暂降是影响场站电能质量与供电可靠性的主要干扰因素,可通过专业化技术手段实现有效防控。本文结合压气站机组的电气运行特点,采用电压暂降深度和无功补偿容量两套通用计算公式,为治理方案的参数设计提供精确依据,通过部署SVG动态无功补偿设备、优化供电网络架构、改进机组联锁控制策略,构建电压暂降综合治理体系。实际测试结果显示,该方案可降低电压暂降的发生频率与幅度,完全避免电压波动引发的机组停机问题,同时提升站内功率因数和供电可靠率,保障大功率机组长期连续稳定运行。后续可通过建立常态化运维机制、实时监测预警系统、调度协同优化体系,形成电压暂降治理与供电可靠性提升的长效管理机制。

参考文献

- [1]徐方维,唐佳飞,郭凯,等.基于机理模型和数据驱动融合的电压暂降响应特性分析[J].电力工程技术,2026,45(5):3-14.
- [2]杨丽茹,张啟超,邹涛,等.大功率电驱离心式压缩机组电压暂降问题分析与治理[J].四川电力技术,2022,45(6):35-43.
- [3]马骏,景源,易见,等.敏感用户工业过程的过程免疫时间曲线刻画方法[J].四川电力技术,2023,46(4):63-68,84.
- [4]吕开钧,王维斌,贺淘,等.天然气管道电驱压缩机抗晃电技术应用研究[J].天然气与石油,2024,42(4):126-132.
- [5]张逸,赵微,李传栋,等.基于图卷积网络的电网电压暂降评估[J].电力自动化设备,2026,46(5):191-198,207.

作者简介:

蔡永根(1998--),男,汉族,江苏省盐城市人,硕士,毕业于东北石油大学,助理工程师,主要从事天然气、电气方面研究。