

# 燃气场站关键设备供电系统的脆弱性评估与 储能增强策略研究

姜 君

(长春天然气集团有限公司, 吉林 长春 130000)

**摘 要:**燃气场站作为城市燃气输配系统的关键节点,其安全稳定运行高度依赖持续、优质的电能供应。文章针对燃气场站(以城市门站和 LNG 调峰站为例)关键设备供电系统的脆弱性问题,结合电力系统可靠性理论与储能技术开展系统性研究。首先,基于典型燃气场站供配电架构与负荷特性,识别压缩机、电驱调压装置、安全仪表系统(SIS)、过程控制系统(PCS)等关键敏感负荷;其次,采用概率风险评估(PRA)与时序蒙特卡罗仿真相结合的方法,构建供电系统脆弱性评估模型,量化分析外部电网故障、内部电气故障及电压暂降等事件对关键负荷的影响概率与后果严重程度;最后提出以储能系统(包括但不限于 UPS、飞轮储能、超级电容及混合储能)为核心的增强策略,建立以供电可靠性、电能质量改善和全生命周期经济性为目标的储能容量优化配置模型,并利用 ETAP 和 MATLAB/Simulink 平台进行仿真验证。

**关键词:**燃气场站;供电系统;储能系统;脆弱性评估;概率风险评估;可靠性优化

中图分类号:TM615

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2026)02-0074-04

## Study on Vulnerability Evaluation and Enhancement Strategies of Energy Storage for Power Supply System of Key Equipment in Gas Station

Jiang Jun

(Changchun Natural Gas Group Co., Ltd., Changchun 130000, Jilin, China)

**Abstract:** As the key node of urban gas transmission and distribution system, safe and stable operations of gas station are highly dependent on continuous and high-quality electric energy supply. In this paper, the systematic research is carried out combining with the reliability theory and energy storage technologies of electrical power system aiming at the vulnerability of power supply system for key equipment in gas station (take the city gas gate station and LNG peak-shaving station as examples). Firstly, identify such key sensitive loads as compressor, electric drive pressure regulating device, safety instrumented system (SIS) and process control system (PCS) based on the architecture of power supply and distribution system as well as load characteristics in typical gas station; secondly, the influence probability and severity of consequences of such accidents as external power grid failures, internal electrical failures and voltage sag on key loads are with quantitative analysis by establishing vulnerability evaluation model of power supply system combining with the probabilistic risk assessment (PRA) and sequential Monte Carlo simulation; finally, the enhancement strategies taking energy storage system (including but not limited to UPS, flywheel energy storage, super capacitor and hybrid energy storage) as the core are proposed, optimum collocation model of energy storage capacity with the targets of power supply reli-

收稿日期:2026-02-04

作者简介:姜 君(1992-),女,吉林省长春市人,工程师,现从事电气电子技术在燃气安全领域的应用研究工作。

bility, power quality improvement and full life cycle economy is established as well as emulation proof is carried out with the platforms of ETAP and MATLAB/Simulink.

**Key words:** gas station; power supply system; energy storage system; vulnerability evaluation; probabilistic risk assessment; reliability optimization

燃气场站(包括城市门站、LNG调峰站、储配站等)是连接长输管线与城市管网的核心枢纽,承担着燃气接收、调压、计量、加臭、储存及输配等关键功能。随着城镇燃气消费量持续增长及“全国一张网”战略推进,燃气场站的规模化、自动化水平不断提高,电驱压缩机、电控调压阀、智能化监控与安全联锁系统等关键设备对供电连续性与电能质量的要求日益严苛。然而,燃气场站多位于城市边缘或负荷末端,其供电网络往往结构相对简单,冗余度低,易受外部电网扰动(如雷击、线路故障、大负荷投切)及内部设备故障影响,存在因停电或电压暂降导致关键设备停运,引发供气中断甚至安全风险。因此,系统评估燃气场站关键设备供电系统的脆弱性,并提出切实可行的储能增强策略,对于保障燃气供应安全、提升能源基础设施韧性具有重要意义。

当前,针对电力用户供电可靠性及电能质量治理的研究已较为丰富<sup>[1]</sup>,但聚焦于燃气场站这一特殊工业场景,综合考虑其工艺负荷特性、安全连锁逻辑与供电系统交互影响的系统性研究尚显不足。现有文献多集中于单一技术(如UPS)的应用介绍,或宏观层面的应急电源配置要求,缺乏从概率风险角度进行定量评估,以及基于全生命周期成本效益的储能优化配置研究。本文旨在填补此研究空白,通过构建融合电力系统可靠性分析与储能技术的综合评估与增强框架,为燃气场站供电系统的规划、设计与改造提供科学依据。

## 1 燃气场站供配电系统与关键负荷分析

### 1.1 典型供配电系统架构

燃气场站供配电系统是维系场站安全稳定运行的核心基础设施。其供电结构一般分为双回路与单回路放射式两类,前者多用于供电可靠性要求严格的大型枢纽场站,能够实现电源的冗余备份与故障快速切换;后者则适用于负荷规模较小的中小型场站<sup>[2]</sup>。

系统的高压电源通常取自区域公共变电站,电压等级多为 10 kV、35 kV。电能进入站内变电室

后,经降压变压器转换为 0.4 kV 低压电,再通过低压配电柜分路输送至压缩机、调压装置、监控系统等各类工艺单元及辅助设施。

针对电网突发停电等极端工况,重要场站普遍配套柴油发电机组作为独立备用电源,以此保障关键负荷的不间断供电。图 1 展示了典型 LNG 调峰站的单线电气接线图,清晰呈现出电源引入、电压变换、负荷分配及备用电源接入的完整系统架构。

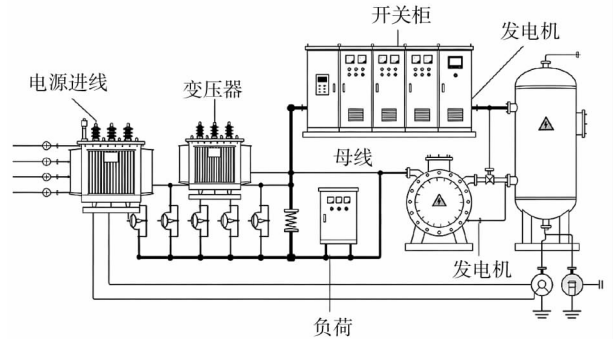


图 1 典型燃气场站供配电系统单线图示例

### 1.2 关键电气负荷分类与特性

依据工艺重要程度及对供电中断、电能质量异常的耐受能力,燃气场站电气负荷可划分为三个等级,具体参见表 1。其中非侵入式负荷时分解算法<sup>[3]</sup>可用于精细化识别各类负荷的运行状态。

一级关键负荷包含安全仪表系统(SIS)、火灾及气体报警系统(F&G)、应急照明、关键阀门执行机构。这类负荷是保障场站安全运行的核心,必须实现不间断供电。一旦发生瞬时断电,或是电压暂降时长超过 20 ms、幅度超过 15%,就有可能触发安全联锁动作,直接造成场站工艺系统紧急关断。

二级重要负荷涵盖电驱压缩机(BOG压缩机、外输泵)、电控调压撬、过程控制系统(PCS/DCS)、通讯系统。此类负荷可耐受秒级至分钟级的短时供电中断,但电压暂降易引发设备驱动器跳闸或控制系统失灵,进而影响场站正常生产运行。

三级一般负荷主要为照明、暖通及各类辅助设备,这类负荷对供电连续性的要求相对较低,短时供电中断不会对场站安全稳定运行造成显著影响。

表 1 燃气场站关键负荷特性及电能质量敏感度

负荷类别	典型设备	额定功率范围	供电连续性要求	电压暂降敏感阈值(幅值/持续时间)	后果严重性
一级关键	SIS 控制器、F&G	1 ~ 5 kVA	不间断	< 85% / > 20 ms	安全联锁触发,全场关断
一级关键	关键电磁阀	0.5 ~ 2 kW	不间断	< 80% / > 30 ms	阀门误动作,流程中断
二级重要	电驱压缩机	100 ~ 500 kW	允许短时中断( < 2 min)	< 75% / > 100 ms	压缩机停机,外输中断
二级重要	电控调压撬	10 ~ 50 kW	允许短时中断( < 1 min)	< 70% / > 200 ms	调压失控,管网压力异常
二级重要	DCS/SCADA	2 ~ 10 kVA	不间断/短时 UPS	< 85% / > 20 ms	监控失灵,操作失控
三级一般	普通照明、暖通		允许中断		影响环境,间接风险

## 2 供电系统脆弱性评估模型

### 2.1 脆弱性定义与评估框架

本文对“供电系统脆弱性”作如下定义:当系统突发内部故障或遭遇外部扰动时,难以保障关键负荷用电需求,既无法维持供电连续性,也不能满足电能质量标准,称之为供电系统脆弱性。其脆弱程度需结合两方面综合判定,一是扰动事件的发生频率,二是事件引发后果的严重程度<sup>[4]</sup>。

供电系统脆弱性评估框架分为三个核心步骤:一是开展危险辨识,全面梳理可能影响系统稳定运行的各类内外部扰动因素;二是实施概率与后果分析,测算各类扰动事件的发生频次,并研判事件对关键负荷供电的具体影响;三是完成风险评估与薄弱环节排序,通过量化分析明确系统风险等级,同时定位亟待优化的薄弱环节<sup>[5]</sup>。

### 2.2 基于 PRA 与时序蒙特卡罗的仿真模型

采用概率风险评估(PRA)构建故障树与事件树,识别从根源故障(如电网侧短路、变压器故障)到最终后果(如关键负荷失电)的链条。结合时序蒙特卡罗模拟,对系统元件(断路器、变压器、线路等)的随机故障(基于历史故障率 $\lambda$ 与修复时间 $\mu$ )及电压暂降事件(基于电网侧故障统计或实测数据)进行长期时序仿真,统计关键负荷的停电频率、平均停电持续时间及电压暂降次数等可靠性指标。

仿真模型主要输入参数包括元件可靠性参数(MTTF、MTTR)、电网侧故障统计数据、负荷敏感度曲线、系统拓扑结构及运行逻辑(如自投动作时序、柴油发电机启动时间)。模型输出包括各负荷点的可靠性指标(如 SAIDI、SAIFI)、系统风险值(可量化为期望损失供气量或经济损失),以及贡献分析以识别薄弱环节。

## 3 储能增强策略与容量优化模型

### 3.1 储能技术选型分析

针对燃气场站不同层级负荷的需求,分析各类储能技术的适用性,主要包括 USP、飞轮、超级电容和锂电池储能。

UPS(不间断电源)响应极快(ms 级),适用于一级关键负荷(SIS、DCS),提供数分钟至数小时的后备,但电池寿命、维护成本及环境温度敏感对其构成挑战。飞轮储能的特点是功率密度高、长寿命、免维护,适用于应对秒至分钟级的电压暂降或短时停电,为柴油发电机启动赢得时间,尤其适合保护大功率敏感负荷(如压缩机)。超级电容功率密度高,充放电循环寿命长,适用于应对毫秒至秒级的瞬时电压跌落,常与 UPS 或飞轮组成混合系统。锂电池能量密度高,适用于较长时间(小时级)的备用电源,并可参与需求侧管理,但需考虑安全性与成本。

表 2 适用于燃气场站的储能技术特性对比

额定功率范围	功率密度	能量密度	响应时间/ms	循环寿命/次	典型后备时间	主要适用场景
1 ~ 5 kVA	中	中	< 5	500 ~ 1 000	分钟/小时	一级关键负荷,控制电源
0.5 ~ 2 kW	高	低	< 5	100 000	秒/分钟	应对电压暂降,大电机缓冲
100 ~ 500 kW	极高	低	< 1	100 000	毫秒/秒	瞬时电压支撑,脉冲负荷
10 ~ 50 kW	中高	高	< 100	3 000 ~ 6 000	小时级	长时间备用,能量管理

### 3.2 储能系统配置优化模型

以提升供电可靠性、电能质量并兼顾经济性为目标,建立混合储能系统容量优化配置模型<sup>[6]</sup>。

所谓目标函数指最小化全生命周期总成本(LTCC),涵盖投资成本、运行维护成本及停电损失成本,即:

$$LTCC_{\text{Min}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{O\&M}} + C_{\text{interruption}} - C_{\text{salvage}}$$

式中:LTCC<sub>Min</sub>为最小化全生命周期总成本;C<sub>inv</sub>为投资成本;C<sub>O&M</sub>为运行维护成本;C<sub>interruption</sub>为停电损失成本;C<sub>salvage</sub>为残值。

其中,停电损失成本结合蒙特卡罗模拟仿真得到的负荷点可靠性指标,以及单位停电损失价值(燃气场站场景下,可折算为单位供气量损失的经济价值或安全罚金)进行计算。

约束条件包括功率平衡与电能质量约束(储能系统需满足关键负荷在特定扰动事件下的功率支撑及供电恢复要求)、储能设备自身运行约束(包含充放电功率、荷电状态上下限、循环寿命折损等约束)、系统拓扑与安装空间约束(需符合场站配电系统拓扑规范及物理安装空间限制)。

求解方法采用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法,基于MATLAB/Simulink平台,或结合ETAP的可靠性计算模块开展协同仿真优化。

## 4 结论与展望

本文针对燃气场站关键设备供电系统的脆弱性评估与增强问题,建立了一套融合概率风险评估、时序蒙特卡洛仿真及储能容量优化的综合研究方法。案例分析表明,外部电网电压暂降和内部电源切换间隙是当前燃气场站供电系统的主要薄弱环节。通过配置与负荷特性相匹配的分层储能系统(如“超

级电容+锂电池”保护控制核心、“飞轮储能”保护大功率动力设备),可有效提升供电可靠性与电能质量,经济上也具有可行性。

未来可进一步深入研究的方向有几个方面,包括考虑极端天气因素对供配电系统故障率的时空影响,使评估模型更贴近实际风险;研究将储能系统与场站内可再生能源(如光伏)相结合,构建局域微电网,提升综合能源效益与韧性;探索基于数字孪生技术的燃气场站供电系统实时风险评估与储能协同控制策略。

### 参 考 文 献

- [1] 王守相,李晓静,肖朝霞,等.含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法[J].电力系统自动化,2007(10):61-65,81.
- [2] 马钊,赵志刚,孙媛媛,等.新一代低压直流供电系统关键技术及发展展望[J].电力系统自动化,2019,43(23):12-22.
- [3] 蔡宇,董树锋,徐航,等.基于行为影响因子的非侵入式负荷实时分解算法[J].电力自动化设备,2021,41(12):193-199.
- [4] 孙华东,徐式蕴,许涛,等.电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J].中国电机工程学报,2022,42(21):7796-7809.
- [5] 肖峻,贺琪博,苏步芸.基于安全域的智能配电网安全高效运行模式[J].电力系统自动化,2014,38(19):52-60.
- [6] 武梦景,万灿,宋永华,等.含多能微网群的区域电热综合能源系统分层自治优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(12):20-29.