

Safety protection design for high-voltage power Supply circuits of stage special effects equipment in theaters

Yueyang Du

Tianjin Beichen District Workers' Service Center, Tianjin, 300402, China

Abstract

With the increasing complexity of stage special effects equipment, high-voltage power supply is increasingly widely used in theaters. However, the particularity of the theater environment makes it difficult for general industrial standards to adapt, and safety risks such as electric shock and short circuit have become prominent. This article focuses on the high-voltage power supply circuit for stage special effects equipment in theaters. It first analyzes the electrical safety risks (electric shock, short circuit, overvoltage and undervoltage) as well as environmental and operational risks. Then, based on the design principles of safety first, hierarchical protection, adaptability and redundancy, it proposes specific design schemes from four dimensions: hardware protection devices, grounding systems, insulation monitoring and status early warning systems, and software and management measures. The effectiveness of the plan was verified in combination with a case of a provincial grand theater. The research has constructed a multi-dimensional protection system, providing technical references for the safety of high-voltage power supply in theaters. In the future, it can be further optimized through intelligent technologies.

Keywords

Theater stage Special effects equipment High-voltage power supply Safety protection; Circuit design

剧场舞台特效设备高压供电回路的安全保护设计

杜岳阳

天津市北辰区职工服务中心, 中国·天津 300402

摘要

随着舞台特效设备的复杂化, 高压供电在剧场中的应用日益广泛, 但剧场环境的特殊性使通用工业标准难以适配, 触电、短路等安全风险凸显。本文针对剧场舞台特效设备高压供电回路, 先分析电气安全风险(触电、短路、过欠压)及环境与操作风险, 再基于安全优先、分级保护、适应性和冗余设计原则, 从硬件保护装置、接地系统、绝缘监测与状态预警系统、软件与管理措施四个维度提出具体设计方案, 并结合某省级大剧院案例验证了方案的有效性。研究构建了多维度防护体系, 为剧场高压供电安全提供技术参考, 未来可通过智能化技术进一步优化。

关键词

剧场舞台; 特效设备; 高压供电; 安全保护; 回路设计

1 引言

剧场舞台作为艺术呈现的重要载体, 其特效设备的正常运行依赖稳定可靠的供电系统。随着舞台效果的复杂化, 部分特效设备需采用高压供电以满足功率需求, 但其供电回路的安全风险也随之增加。剧场环境具有人员密集、设备集中、空间封闭等特点, 一旦发生漏电、短路、过载等故障, 可能引发触电、火灾等安全事故, 不仅影响演出效果, 更会威胁生命财产安全。目前, 国内剧场舞台供电系统的安全设计多参考工业高压供电标准, 但剧场的特殊性导致通用标准难以完全适配。因此, 针对剧场舞台特效设备高压供电回路

的安全保护设计进行专项研究, 具有重要的现实意义。基于此, 本文将对剧场舞台特效设备高压供电回路的安全保护设计展开相关研究。

2 剧场舞台特效设备高压供电回路的风险分析

2.1 电气安全风险

触电风险是高压供电回路中最直接的安全隐患。高压供电回路若绝缘损坏或接地不良, 易导致设备外壳带电。舞台区域人员流动性大, 涵盖演员、技术人员乃至部分情况下的观众, 且设备操作多为近距离接触, 使得触电风险显著高于普通工业场景。舞台临时线缆敷设过程中, 可能因踩踏、拖拽等操作导致绝缘层破损, 进一步增加了触电隐患的发生概率。短路与过载风险同样不容忽视。舞台特效设备在启动瞬间往往存在较大的冲击电流, 若回路保护装置选型不当,

【作者简介】杜岳阳(1987-), 男, 中国天津人, 本科, 工程师, 从事剧场内电气工程研究。

无法及时响应这种电流波动,就可能引发过载现象。同时,设备在移动过程中,线缆接头可能出现松动,金属异物也可能意外掉落进入设备内部,这些情况都容易造成短路,导致回路电流骤增,进而引发线缆过热、设备烧毁甚至火灾等严重后果。过电压与欠电压风险主要源于电网波动或特效设备自身的运行特性。电网的不稳定波动,以及如大型电机等特效设备的启停过程,都可能导致供电电压出现异常。过电压会加速设备绝缘材料的老化,缩短设备使用寿命,而欠电压则可能导致设备运行异常,例如引发机械卡滞等问题,间接引发电气故障,影响舞台特效的正常呈现。

2.2 环境与操作风险

环境因素对高压供电回路的安全运行有着重要影响。剧场舞台环境复杂多变,烟雾、粉尘的积聚,以及湿度的频繁变化都可能降低电气设备的绝缘性能。同时,灯光设备工作时产生的高温辐射,会加速线缆的老化进程,增加故障发生的概率。人为操作风险在剧场舞台场景中较为突出。舞台设备的安装、调试多为临时作业,若操作人员缺乏系统的高压电气知识,可能在操作过程中出现误接线、违规操作等情况,从而导致回路故障。演出前的快速布景需求,可能使得线缆敷设难以完全遵循规范要求,形成潜在的安全隐患。

3 安全保护设计的基本原则

3.1 安全优先原则

安全优先原则强调以保障人员安全为核心,将保护措施贯穿于供电回路设计、设备选型、施工安装、运行维护的全流程。在设计过程中,需充分考虑各种可能出现的危险情况,确保任何故障情况下都能优先切断危险电源,最大限度减少人员伤亡和财产损失的风险。

3.2 分级保护原则

分级保护原则要求根据回路电压等级、设备重要性设置多级保护,包括主回路保护、分支回路保护、设备终端保护等不同层级。通过这种分级设置,实现故障的精准定位与隔离,避免故障在系统内扩散,保证非故障区域的设备能够正常运行,提高整个供电系统的可靠性。

3.3 适应性原则

适应性原则针对剧场临时布线、设备移动性强的特点,要求保护装置具备抗振动、耐环境干扰的能力。同时,装置的操作需便捷高效,能够适应演出过程中频繁的快速调整需求,确保在设备位置变动、线路更改等情况下,保护功能依然能够稳定发挥作用。

3.4 冗余设计原则

冗余设计原则主要应用于关键特效设备的供电保障,如主演区升降平台等对演出效果起决定性作用的设备,应采用双回路供电方式。同时,保护装置也需设置备份,当主保护装置出现故障时,备份装置能够及时接替工作,确保单一故障不会影响整体运行,保障演出的顺利进行。

4 高压供电回路安全保护的具体设计方案

4.1 硬件保护装置设计

短路与过载保护是硬件保护的重要环节。主回路采用带选择性的高压断路器,其配备的脱扣器需具备瞬时短路保护和反时限过载保护功能^[1]。动作时间根据回路容量分级设置,例如主回路设定为0.1s,分支回路设定为0.05s,通过这种差异化的时间设置,避免故障发生时出现越级跳闸的情况,保证保护的精准性。分支回路则选用高分断能力的熔断器与断路器配合使用,进一步提高保护精度,确保在故障发生时能够快速响应。漏电保护装置在预防触电事故中发挥关键作用。在高压回路中安装剩余电流动作保护器(RCD),考虑到舞台设备的泄漏电流较大,需根据设备类型设置合理的动作阈值,通常在30mA~500mA范围内进行调整。对于人员直接接触的设备(如手持特效装置),采用0.1s以内的快速动作型RCD,以最快速度切断电源,减少触电伤害;对于固定设备(如大型灯光架),可适当放宽阈值,但需与接地系统配合使用,形成双重保护。过电压与欠电压保护旨在稳定供电电压,保障设备正常运行。安装电压监测继电器,当供电电压超出额定值的±10%时,继电器能够自动切断回路并发出报警信号,提醒工作人员及时处理。对于精密控制系统等敏感设备,配置稳压装置或不间断电源(UPS),有效避免电压波动对设备造成损坏,确保设备的稳定运行。隔离保护用于防止高压危险的扩散。高压回路与低压控制系统之间采用隔离变压器或光电耦合器,通过物理隔离的方式,防止高压窜入低压系统,保障低压控制系统的安全和操作人员的人身安全。移动设备的供电线缆选用带屏蔽层的绝缘电缆,屏蔽层采用单端接地的方式,既能减少电磁干扰,又能降低漏电风险,提高设备运行的安全性。

4.2 接地系统设计

保护接地是保障设备和人员安全的基础措施。所有高压设备的金属外壳、机架必须可靠接地,且接地电阻不大于 4Ω ^[2]。采用TN-S系统,将工作零线与保护零线严格分离,避免因零线电位漂移导致设备外壳带电,从根本上消除因接地不良引发的触电隐患。重复接地能够增强接地系统的可靠性。在高压回路的首端、末端及分支点设置重复接地装置,其接地电阻不大于 10Ω 。舞台区域的金属桁架、升降平台等可作为自然接地体,但需与人工接地网可靠连接,确保接地的连续性和稳定性,形成全方位的接地保护网络。等电位联结用于消除电位差带来的风险。将舞台区域内的所有金属构件通过等电位端子箱连接成整体,使各金属构件处于同一电位水平,消除不同设备间的电位差,防止人员在接触不同设备时因电位差而发生触电事故,进一步提升舞台区域的电气安全水平。

4.3 绝缘监测与状态预警系统

实时绝缘监测是及时发现绝缘故障的重要手段。在高压回路中安装绝缘监测装置,通过持续测量回路对地绝缘电

阻实时监测绝缘状态^[3]。当绝缘电阻低于设定值时，系统立即发出预警信号，提示维护人员及时排查故障，避免绝缘性能进一步恶化导致严重事故的发生。对于移动设备，采用便携式绝缘检测仪进行定期检测，确保其绝缘性能符合安全要求。温度监测能够有效预防过热故障。在线缆接头、断路器触点等易发热部位安装温度传感器，通过无线传输模块将温度数据实时发送至监控中心。当监测到的温度超过60℃时，系统自动报警，提醒工作人员及时检查处理，避免因接触不良、过载等原因导致过热起火，保障供电回路的安全运行。智能监控平台是实现综合管理的核心。搭建舞台供电安全监控系统，整合电流、电压、温度、绝缘电阻等多项参数，通过可视化界面实时显示回路状态。系统具备故障自诊断功能，能够快速定位故障点并自动生成维修建议，同时详细记录历史数据，为预防性维护提供数据支持，提高供电系统的运维效率和安全性。

4.4 软件与管理保护措施

操作规程标准化是规范操作行为的基础。制定详细的高压设备操作手册，明确安装、调试、运行、拆卸的具体流程和操作要点，要求操作人员必须持证上岗。在演出前，必须进行供电回路的绝缘测试、接地电阻测试和保护装置联动试验，只有各项测试合格后方可启动设备，从操作流程上确保安全。定期维护制度是保障设备性能的关键。建立完善的设备台账，按季度对高压线缆、接头、保护装置进行绝缘检测和机械性能检查；每年进行一次接地系统全面测试，确保接地电阻符合要求。对检测中发现的老化线缆、损坏部件，及时进行更换，坚决避免设备“带病运行”，通过定期维护及时消除潜在隐患，延长设备使用寿命。应急处置预案是应对突发事件的保障。制定触电、火灾等突发事件的应急处理流程，配备充足的绝缘手套、绝缘靴、高压验电器、灭火器等应急装备。定期组织技术人员进行应急演练，确保他们能够在30秒内切断故障回路电源，在5分钟内启动备用设备，最大限度减少突发事件造成的损失，保障演出的顺利进行和人员安全。

5 案例分析

5.1 案例背景

某省级大剧院新建音乐剧舞台项目，需要为升降舞台（功率500kW）、特效灯光组（总功率300kW）设计10kV高压供电回路。该舞台区域长20m、宽15m，设备移动频繁，且由于存在烟雾特效，导致环境温度波动较大，相对湿度在

40%~80%之间，这对供电回路的安全保护设计提出了较高要求。

5.2 保护方案实施

在硬件配置方面，主回路采用ZW32-12型真空断路器，其额定电流为630A，分断能力达25kA，并配置智能脱扣器以实现短路、过载保护功能；分支回路安装剩余电流动作断路器，动作电流设定为300mA，动作时间为0.05s；线缆选用YJV22-10kV-3×50mm²铠装电缆，敷设时穿镀锌钢管进行保护，有效避免了机械损伤对线缆的影响。

接地系统的设计充分考虑了舞台环境的特点。采用人工接地网，水平接地体选用40×4mm扁钢，垂直接地体选用50×50×2500mm角钢，经测试接地电阻为2.5Ω，符合设计要求；舞台金属结构与接地网可靠连接，等电位联结电阻小于0.5Ω，确保了接地系统的可靠性和安全性。

监测系统的部署为供电安全提供了实时保障。安装高压绝缘监测仪，其监测范围为0~1000MΩ，同时配备无线温度传感器，所有监测数据实时传输至舞台监控中心，当出现异常情况时，系统通过声光报警和短信通知技术人员，实现了对供电回路的全方位实时监控。

6 结语

剧场舞台特效设备高压供电回路的安全保护设计需要充分结合剧场的环境特殊性，从硬件、软件、监测等多个维度构建完善的防护体系。本文提出的分级保护、接地优化、智能监测等方案，在实际应用中有效降低了安全风险，为演出的顺利进行提供了有力保障。未来，随着智能化技术的不断发展，可进一步引入AI故障诊断算法，通过对大量运行数据的分析，预测回路故障趋势，实现更精准的预防性维护；开发无线无源传感器，解决移动设备的监测难题，提高监测的全面性和灵活性；同时，还需加强行业标准的制定，推动剧场高压供电安全设计的规范化、标准化。只有持续创新保护技术、强化管理措施，才能满足日益复杂的舞台特效需求，为演艺事业的安全发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李春莹,王颖,姜海峰,翟强.高压变频器供电回路保护配置设计[J].电力勘测设计,2014,26(6):47-51.
- [2] 曾毅,宋蓬殷.高压断路器控制回路故障分析与处理[J].石油和化工设备,2023,26(4):69-72.
- [3] 陈洪峰.工厂供电高压回路在线监测与保护[J].科技资讯,2008,6(36):87-87.