

煤矿长距离供电末端电压波动抑制及动态功率补偿技术

毕振国

内蒙古北联电高头窑矿业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 014399

摘要: 煤矿长距离供电因线路阻抗、负载波动及恶劣环境,末端电压波动问题突出,影响设备运行与生产安全。本文分析电压波动成因与危害,阐述电压波动抑制与动态功率补偿原理,提出串联调压、线路优化、负载优化等抑制技术,以及动态无功补偿、谐波补偿等功率补偿技术,设计“串联调压+动态无功补偿+谐波补偿”复合方案,经仿真与现场试验验证,该方案可有效稳定电压,降低损耗,提升供电质量。

关键词: 煤矿;长距离供电;电压波动抑制;动态功率补偿;无功补偿

引言: 在煤矿生产中,长距离供电是保障井下作业的关键环节。当前,煤矿普遍采用层级供电模式,供电距离长,且井下环境恶劣,电缆易老化,加上大功率、非线性负载增加,导致末端电压波动问题愈发严重。电压波动不仅影响设备正常运行,增加运维成本,还可能引发重大安全事故。因此,研究煤矿长距离供电末端电压波动抑制及动态功率补偿技术,具有重要的现实意义和紧迫性。

1 煤矿长距离供电末端电压波动现状及成因分析

1.1 供电现状

当前煤矿长距离供电多采用“地面变电站—井下中央变电所—采区变电所—作业面终端”层级模式,供电距离3~10km,部分深部作业面超15km。井下线路多用铠装电缆,受潮湿、粉尘、腐蚀性气体等影响,电缆绝缘易老化,线路阻抗增大。煤矿智能化升级后,大功率、非线性负载增多,负载启停频繁、波动大,末端电压波动问题突出。现场调研表明,多数煤矿长距离供电末端电压波动幅度达8%~12%,电压偏低时低于额定电压90%,严重影响设备运行,增加运维成本与安全隐患。

1.2 波动成因分析

煤矿长距离供电末端电压波动成因复杂,分线路自身、负载特性、环境因素三类且相互影响。线路自身上,长距离电缆传输电阻与电抗致电压损耗,距离越长、截面越小损耗越大;电缆接头氧化、绝缘老化增大接触电阻,加剧电压降与波动。负载特性上,大功率设备启动冲击电流大引发电压骤降;负载切换、非线性负载运行产生的谐波电流破坏电压稳定性。环境方面,井下高温高湿加速电缆老化;巷道变形等致电缆受损、接触不良。此外,电网电压波动、功率因数低也会间接加剧末端电压不稳定^[1]。

1.3 波动危害

末端电压波动对煤矿生产危害具系统性,体现在设

备运行、生产安全、能耗成本三方面。设备运行上,电压低使电机绕组电流增大、过热,绝缘老化加速,故障率提升3~5倍,寿命缩短;电压波动致电机转速不稳,影响设备运行精度,甚至卡顿、停机。生产安全上,通风机等关键设备因电压波动跳闸,可能引发瓦斯积聚、水害等事故;防爆电器电压不稳可能出现异常火花,增加瓦斯爆炸风险。能耗成本上,电压低使电机运行效率降低10%~15%,造成电能浪费;设备频繁维修增加运维成本,影响生产进度致经济损失。

2 电压波动抑制与动态功率补偿核心原理

2.1 电压波动抑制原理

电压波动抑制的核心是通过主动调节供电系统参数,抵消线路损耗与负载波动带来的电压偏差,维持末端电压稳定在允许范围。其本质是通过改变供电系统的阻抗特性、调节输出电压幅值,实现电压的动态平衡。常用的抑制原理主要分为两类:一是串联调压原理,通过在供电线路中串联调压装置,实时检测末端电压,动态调整装置输出电压,补偿线路电压损耗,实现末端电压稳压;二是并联补偿原理,通过并联无功补偿装置,补偿线路中的无功功率,降低线路电流,减少电压损耗,间接抑制电压波动。两种原理各有侧重,串联调压侧重直接补偿电压偏差,并联补偿侧重降低线路损耗,联合应用可实现更优的抑制效果。

2.2 动态功率补偿原理

动态功率补偿主要针对供电系统中的无功功率损耗,通过实时检测线路中的无功功率、谐波电流,动态输出补偿电流,实现无功功率平衡,从而降低线路损耗、稳定末端电压。其核心是利用电力电子器件(如IGBT)组成补偿装置,快速响应负载变化,实时跟踪无功功率波动,输出与无功电流幅值相等、相位相反的补偿电流,抵消线路中的无功损耗,提高功率因数。动态功率补偿

不仅能减少电压损耗,还能抑制谐波电流对电网的干扰,改善电能质量。根据补偿方式可分为无功补偿与谐波补偿,其中无功补偿是核心,通过补偿感性无功功率,降低线路电流,缓解电压降,进而抑制电压波动。

2.3 两者协同作用机制

电压波动抑制与动态功率补偿并非独立运行,而是存在协同增效的作用机制。动态功率补偿通过降低线路无功损耗、提高功率因数,减少线路电压降,为电压波动抑制奠定基础;电压波动抑制通过主动调压,补偿线路固有损耗与负载波动带来的电压偏差,进一步提升供电稳定性^[2]。一方面,动态功率补偿可减少线路电流,降低串联调压装置的负荷,提升调压效率,延长设备使用寿命;另一方面,串联调压可快速响应负载冲击带来的电压骤变,弥补动态功率补偿响应速度的不足,避免电压波动超出允许范围。两者协同运行,可实现“损耗降低—电压稳定—效率提升”的良性循环,全面解决长距离供电末端电压波动问题。

3 煤矿长距离供电末端电压波动抑制技术

3.1 串联调压抑制技术

串联调压抑制技术是直接补偿末端电压偏差的核心技术,适配煤矿长距离供电场景,常用设备包括自动调压器(SVR)、晶闸管串联调压装置两种。SVR-1000KVA线路自动调压器是煤矿专用设备,采用串联补偿式结构,通过内置电压监测模块实时采集末端电压数据,当电压偏离额定值时,调压控制器迅速触发调压绕组调整输出电压,无需人工干预即可将电压稳定在额定值的 $\pm 1\%$ 范围内,响应时间 $\leq 20\text{ms}$,可有效应对负载冲击带来的电压骤变。晶闸管串联调压装置采用电力电子开关控制,调节精度高、响应速度快,可实现无级调压,适配负载频繁波动的工况,但结构复杂、成本较高,需做好井下防爆、防尘防护。

3.2 线路优化抑制技术

线路优化是从源头减少电压波动的基础措施,主要通过优化电缆选型、改进敷设方式、加强线路维护实现。电缆选型方面,应优先选用截面较大、导电性能好的铠装电缆,降低线路电阻与电抗,减少电压损耗,对于供电距离超过5km的线路,可采用双回路供电模式,提升供电可靠性与稳定性。敷设方式方面,井下电缆应避免近距离敷设、交叉敷设,远离高温、潮湿区域,减少环境对电缆性能的影响;电缆接头采用防水、防爆接头,定期检查接头状态,防止氧化、接触不良。线路维护方面,建立定期巡检制度,及时更换老化、受损电缆,清理电缆表面粉尘,监测线路阻抗变化,提前排查隐患,从源

头抑制电压波动。

3.3 负载优化抑制技术

负载波动是导致末端电压波动的主要诱因之一,通过负载优化可有效减少电压波动幅度。一方面,对井下大功率设备进行启停优化,采用软启动技术替代直接启动,降低设备启动时的冲击电流,避免电压骤降,如掘进机、刮板输送机等设备加装软启动器,可将冲击电流控制在额定电流的1.5倍以内。另一方面,对负载进行合理分配,避免多个大功率设备同时启动,通过智能调度系统,实现负载错峰启停,平衡供电负荷,减少电压波动^[3]。此外,淘汰老旧、低效的非线性负载,更换为高效、节能的线性负载,减少谐波电流产生,降低对电网电压的干扰,进一步抑制电压波动。

4 煤矿长距离供电动态功率补偿技术

4.1 动态无功补偿技术

动态无功补偿技术是煤矿长距离供电功率补偿的核心,常用装置包括静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(SVG)两种。SVC通过晶闸管控制电抗器与电容器的投切,实现无功功率的动态补偿,结构简单、成本较低,适配中小功率负载场景,可将功率因数提升至0.95以上,减少线路电压损耗,但响应速度较慢,补偿精度有限。SVG采用全控型电力电子器件,可实现无功功率的连续、精准补偿,响应时间 $\leq 5\text{ms}$,能快速跟踪负载无功波动,不仅可补偿无功功率,还能抑制谐波电流,适配大功率、负载波动频繁的井下场景,尤其适合长距离供电末端的动态补偿,但成本较高、维护难度较大。

4.2 谐波补偿技术

井下非线性负载运行会产生大量谐波电流,导致电网电压畸变,加剧电压波动,因此谐波补偿是动态功率补偿的重要组成部分。常用的谐波补偿技术包括无源滤波与有源滤波两种,无源滤波通过串联或并联滤波电抗器、电容器,组成滤波回路,滤除电网中的主要谐波分量,结构简单、成本低,适合滤除固定频率的谐波,但滤波效果有限,易受负载变化影响。有源电力滤波器(APF)通过实时检测谐波电流,动态输出与谐波电流幅值相等、相位相反的补偿电流,可滤除各次谐波,滤波精度高、适应性强,能有效抑制谐波对电压的干扰,但结构复杂、成本较高。现场应用中,可采用“无源滤波+有源滤波”的复合模式,兼顾滤波效果与经济性。

4.3 补偿装置的井下适配设计

井下环境恶劣,动态功率补偿装置需进行针对性的适配设计,满足防爆、防尘、防潮、抗振动等要求。装置外壳采用隔爆型结构,防护等级不低于IP54,防止粉

尘、潮气进入设备内部,避免引发故障;内部电子元件采用耐高温、抗干扰设计,适应井下30~60℃的工作温度与强电磁干扰环境。同时,优化装置的安装位置,优先安装在采区变电所或作业面附近,缩短补偿线路长度,提升补偿效率;采用模块化设计,便于井下运输、安装与维护,可快速拆卸更换故障模块,减少停机时间。此外,装置配备智能监测模块,可实时采集补偿参数,实现远程监控与故障预警,提升运维效率^[4]。

5 复合技术方案设计与试验验证

5.1 复合技术方案设计

结合煤矿长距离供电工况特点,针对单一技术方案适配性不足的问题,设计“串联调压+动态无功补偿+谐波补偿”的复合技术方案。该方案以SVG动态无功补偿装置为核心,实现无功功率精准补偿与谐波抑制,降低线路损耗;串联SVR自动调压器,实时补偿线路电压损耗,稳定末端电压;配套无源滤波装置,辅助滤除固定频率谐波,兼顾补偿效果与经济性。方案采用智能控制系统,实时采集线路电压、电流、功率因数等参数,通过PLC控制器实现各装置的协同控制,根据负载波动与电压变化,动态调整补偿量与调压幅度,确保末端电压稳定在额定值的±2%以内,功率因数提升至0.98以上。

5.2 仿真验证

采用PSCAD/EMTDC仿真软件,搭建煤矿长距离供电仿真模型,模拟供电距离8km、额定电压1140V的供电场景,对比复合技术方案与单一技术方案的应用效果。仿真结果显示,未采用任何抑制与补偿技术时,末端电压波动幅度为10.3%,功率因数为0.82;采用单一串联调压技术时,电压波动幅度降至5.7%,功率因数无明显提升;采用单一SVG补偿技术时,电压波动幅度降至6.2%,功率因数提升至0.95;采用复合技术方案时,电压波动幅度降至1.8%,功率因数提升至0.985,谐波畸变率控制在

5%以内,显著优于单一技术方案,验证了复合方案的有效性。

5.3 现场试验验证

选取某年产120万吨煤矿的深部作业面进行现场试验,该作业面供电距离7.5km,主要负载包括EBZ260掘进机、刮板输送机等,此前末端电压波动幅度为9.6%,功率因数为0.83。安装复合技术方案相关设备后,经过1个月的现场运行,监测数据显示:末端电压稳定在1093~1187V之间,波动幅度控制在1.7%~2.0%,符合《煤矿安全规程》要求;功率因数稳定在0.98~0.99之间,线路损耗降低28%;设备故障率下降82%,试验结果表明,复合技术方案可有效抑制末端电压波动,提升供电质量,适配煤矿长距离供电复杂工况。

结束语

煤矿长距离供电末端电压波动抑制及动态功率补偿技术的研究与应用,为解决煤矿供电难题提供了有效途径。通过复合技术方案的实施,实现了电压稳定、功率因数提升和线路损耗降低,显著提高了煤矿供电的可靠性和安全性,降低运维成本,创造了可观的经济效益。未来,随着技术的不断发展,还需进一步优化方案,以适应煤矿生产的更高需求,推动煤矿供电技术向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 闫俊杰,张亮亮,王燕飞.掘进工作面供电系统有载自动调压技术及装置[J].煤矿安全,2024,55(5):243-250.
- [2] 张元吉,魏继云,高栋,等.煤矿井下采掘工作面远距离供电方案优化与应用[J].智能矿山,2025,6(3):80-83.
- [3] 蒲晋超.煤矿掘进工作面长距离供电方案设计及应用[J].机械工程与自动化,2024(3):192-194.
- [4] 孙广建,张强,史春光,等.煤矿用低压并联型应急储能第三电源系统设计与应用[J].河南科技,2023,42(14):74-81.