

# Application Analysis of Reactive Power Compensation in Coal Mine Power Supply and Distribution System

Baohai Xi

Xi Liyuan Coal Industry Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi, 036800, China

## Abstract

Underground coal mine power supply and distribution are mainly composed of long-distance cables and inductive motor loads, with high line reactance ratio. Voltage deviation and reactive power backflow issues tend to accumulate and amplify in mining areas. The engineering objectives of reactive power compensation should focus on three main aspects: voltage support, current and loss reduction, and harmonic coupling control, while being constrained by mine explosion-proof and reliable disconnection conditions. This paper combines the requirements of power factor and dynamic compensation in China's underground coal mine power supply technical specifications to provide implementation points for underground hierarchical compensation, filtering compensation, and dynamic reactive power devices. The conclusion suggests that local compensation should be the main approach, supplemented by dynamic regulation, to form a verifiable and testable operational configuration.

## Keywords

Coal mine; Power supply and distribution system; Reactive power compensation; Application; Value; Key points

## 煤矿供配电系统中无功补偿的应用分析

席宝海

下梨园煤业有限公司, 中国·山西 朔州 036800

## 摘要

煤矿井下供配电以长距离电缆和感性电机负荷为主, 线路电抗占比高, 电压偏差与无功倒送问题易在采掘区叠加放大。无功补偿的工程目标, 应围绕电压支撑、降低电流与损耗、控制谐波耦合三条主线展开, 并受矿用防爆与可靠切除条件约束。本文结合中国煤矿井下供电技术规范对功率因数与动态补偿的要求, 给出井下分级补偿、滤波补偿与动态无功装置的实施要点。结论认为, 就地补偿为主体, 动态调节为补充, 形成可校核、可试验的运行配置。

## 关键词

煤矿; 供配电系统; 无功补偿; 应用; 价值; 要点

## 1 引言

现阶段煤矿开采技术逐渐成熟, 开采设备类型逐渐多样, 越来越多大功率电气设备投入到开采工作中, 对供配电系统运行状态提出严格要求<sup>[1]</sup>。同时煤矿井下供电网络电缆距离长、分支多, 牵引电机、风机、泵站等感性负荷占比高, 若无功不就地平衡, 线路电流增大将放大电缆压降与温升, 造成掘进头、采面末端电压偏低, 电机转矩下降并诱发频繁欠压停机, 同时继电保护整定裕度被动压缩。有鉴于此, 文章基于相关文献资料查阅以及结合自身工作实践背景下, 就煤矿供配电系统中无功补偿的应用提出几点看法, 以供参考。

【作者简介】席宝海(1988—), 男, 中国天津人, 本科, 工程师, 从事煤矿井下供电研究。

## 2 无功补偿概述

无功补偿是指在供配电系统内配置并联电容器组、SVC/SVG等装置, 向感性负荷就地提供所需无功或吸收过剩无功, 使母线功率因数与电压运行在合理区间, 从而降低线路电流与损耗、释放变压器容量并改善电压偏差。实践中常按  $Q_c = P(\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$  核算补偿容量, 并结合负荷波动选择集中、分散或电机端就地补偿; 高压侧无功宜由高压电容补, 低压侧由低压电容补, 轻载易过电压时应配置自动补偿以防过补。煤矿井下系统电缆长、感抗大且变频整流多, 补偿宜采用串联电抗的去谐电容或5、7次滤波支路, 避免并联谐振放大谐波。设备需选矿用隔爆/本安并取得MA, 回路配放电阻、残压监测、欠压闭锁, 以及不平衡、过流、过温与接地告警, 确保故障先切补偿支路。

## 3 煤矿供配电系统中无功补偿应用价值

煤矿井下提升、主运带式输送机、泵站与通风机以异

步电动机和变频负荷为主,长距离电缆占比高,天然功率因数偏低、末端电压易下滑。配置隔爆型并联电容器组(配串联电抗去谐)或SVG等装置,首要价值是就地平衡无功,将 $\cos\phi$ 抬升到供电企业考核要求(高压用户通常需 $\geq 0.90$ ),避免无功倒送与功率因数扣费。同时线路电流下降,可明显减小电缆I<sup>2</sup>R损耗与变压器铜损,并延缓接头发热与绝缘老化。其次,电流降低后释放馈线与变压器容量裕度,减少扩容压力,提升大功率电机启动与重载冲击时的电压支撑,降低欠压跳闸、接触器掉闸和设备过热;对采煤机牵引、提升周期性波动负荷,动态补偿还能抑制电压闪变,稳定1140V/660V用电质量。再次,带电抗的补偿支路可下移谐振点,配合滤波抑制5、7次谐波放大风险,避免保护误动。最后,在标准化检查与运行管理上,无功补偿常作为配电室关键配置点,可与电能质量监测联动实现分组投切、越限闭锁与不平衡保护,缩小故障停电范围并提升供电可靠性<sup>[2]</sup>。

## 4 煤矿供配电系统中无功补偿的应用要点

### 4.1 分层定容与末端布点核算

煤矿井下无功补偿定容宜以采区变电所母线为计算边界,按回路实测有功功率P与运行功率因数 $\cos\phi$ 换算无功Q,并将主变短路电压、馈线电抗电阻及电缆长度引起的压降纳入潮流复核,按最不利全工况方式校验6kV、10kV及1140V、660V母线电压偏差满足GB 50070-2020的要求,避免低电压导致电机启动裕度不足与保护灵敏度漂移。补偿分层配置时,高压侧以母线集中电容为主,采用分组投切并按出线负荷差异设定组容量、投切顺序与闭锁条件,使运行方式切换后母线功率因数仍保持在整定区间。低压侧优先在大功率异步电动机端分散补偿,容量按额定电流与空载励磁电流比例核算,并配置串联熔断、放电电阻与机械闭锁,保证停机后端子残压在规定时间内释放。对长距离低压馈线或末端电压敏感设备,补偿点靠近负荷中心或分支末端,结合电缆截面与允许电压降反算所需无功支撑,防止仅在上级母线集中补偿而末端仍欠压。对采煤机、转载机、泵站等波动负荷回路,容量按工况分段核算投入级差,投切设置最低电流门槛与延时锁定,轻载或间歇运行时限制投入量以避免超前功率因数引起母线抬升和电缆绝缘应力增加。容量确定后校核补偿支路投切的合闸涌流倍数、电压阶跃幅值,并对并列电容组计算谐振频率与短路容量匹配,6kV、10kV侧宜串联去谐电抗或分段投入限制冲击,开关电器按动热稳定复核。投运验收按GB/T 12325口径复测电压偏差,并以绝缘电阻、介损与温升记录确认元件满足井下连续运行条件。

### 4.2 隔爆型电容器组与投切回路匹配

煤矿井下补偿装置选型阶段应以取得MA标志的矿用隔爆型或隔爆兼本质安全型补偿装置为边界条件,柜体防爆标志与额定电压需与采区6kV、10kV及低压1140V、660V

系统一致,壳体接合面、紧固件防松与密封圈参数按防爆通用要求验算,并在高温粉尘巷道环境下留足爬电距离与电气间隙,电缆引入采用压紧密封格兰并匹配耐湿终端,端子排采用双螺母防松压接并设置专用接地螺栓。电容器单元宜选自自愈式结构,分相配置内置或外置熔断器,单元额定电流与柜内母排截面按长期温升校核,组内采用等容量或按级差配置以便分组投切,必要时分柜分段布置形成独立风道并降低局部热积聚<sup>[3]</sup>。投切回路宜采用矿用真空接触器或真空断路器,按电容器组总容抗比核算合闸涌流与重燃风险,采用预充电电阻或串联限流电抗,配合分段顺序合闸抑制高频冲击,并对限流元件的短时通流能力与连续损耗复核,避免在采煤机等工况波动回路频繁投切时温升超限。停运后必须设置放电电阻与残压监测,规定时间内将端电压降至安全值后方可二次投入,残压闭锁应与接触器机械闭锁及柜门联锁形成双重约束。保护整定以不平衡电流、三相电压不对称和电容量漂移为主线,不平衡电流互感器宜布置在电容器支路侧以提高灵敏度,对并列多组配置不平衡继电器或差动回路实现单元故障快速切除,并叠加过温与介质损耗告警阈值用于识别劣化趋势。现场布置宜靠近采区变电所母线侧或大型负荷馈线首端,设置可见断开点、接地刀闸与强制联锁,对母排、接触器与电抗器的短时耐受电流和峰值耐受电流按最不利短路方式校核后确定安装间隔与检修空间。

### 4.3 变频整流负荷下的滤波型补偿配置

在井下输送机、提升与泵站等变频整流负荷集中回路,宜以采区变电所母线为边界开展谐波普查,按典型工况记录有功负荷、功率因数、母线电压及5次、7次谐波电流,并在公共连接点与采区母线布点测量以识别注入源与放大点。补偿装置不宜采用单纯并联电容,低压末端可选矿用隔爆型终端补偿器并将电容单元与串联电抗分仓布置,集中补偿则配置带串联电抗的去谐电容组,必要时增设5次、7次单调谐支路并配高通支路覆盖高次分量,以抑制并联谐振引起的谐波电压抬升。滤波参数以母线短路容量、主变短路阻抗及井下长电缆等效电抗为基础,先求系统固有谐振点,再将调谐频率选在目标谐波频率下侧并计入电容容差与电抗温升引起的频率漂移,同时校核基波无功输出在最大负荷与轻载时均不致造成母线电压超限。投切回路采用矿用真空接触器或真空断路器分级投入,并与变频器运行状态做联锁,操作顺序先投滤波支路后投主补偿,停运后通过放电电阻与残压检测实现再投入闭锁,合闸涌流采用预充电电阻或串联限流电抗减小冲击电流。容量校核以滤波支路电流有效值为主线,将基波与谐波分量按热效应叠加,电容器按谐波电压畸变下的允许过电流与耐压校核,串联电抗器按损耗与热点温升核对连续与短时能力,并对阻尼电阻功率损耗与壳体散热条件复核。验收阶段在公共连接点与采区母线分别测量电压总谐波畸变率与谐波电流,并按GB/T 14549规定的限值与测量方法进行对比,同时核查电容器组不平衡电流及保护动

作记录,并在满载运行后复测电抗器温度与端子紧固情况以确认元件不过热且谐波不反弹[4]。

#### 4.4 静止无功装置的动态调节与协同分工

针对采煤机牵引、提升冲击及大功率电动机启动导致的无功快速波动,宜在井下主变电所或采区母线侧配置隔爆兼本质安全型静止无功装置,结构按爆炸性环境设备通用要求控制外壳防护与温升,功率回路与控制回路分腔布线,电缆引入采用压紧密封并加强端子防松以满足潮湿粉尘工况。容量与控制参数以现场实测 $\Delta Q$ 为依据,结合母线短路容量 $S_{sc}$ 反算电压支撑需求,按供电电压偏差及电压波动闪变限值设定电压参考与允许斜率,采用下垂特性与电流限幅约束增益,避免弱短路容量或长电缆末端过补偿引起振荡,并按电机启动与再生制动校核短时过载与持续温升。与电容器组协同时,电容组按班次负荷曲线承担基荷无功并配置去谐电抗,动态装置补偿快速分量并提供无功吸收,分配策略设置死区、延时和斜率交接,使电容组在电压偏差持续越限时分段动作,动态装置保持连续调节以抑制无功往复,同时将并网点谐波约束纳入校核。一次回路配置旁路接触器或旁路开关并完善故障旁路联锁,装置异常时母线快速恢复直供,旁路投入前限制电压差引起的冲击电流,保护覆盖过流、过压、欠压、过温与接地监测,接地回路按短时热稳定选取截面并与主接地网等电位连接以降低高频干扰。投运阶段实施阶跃负荷与连续扰动试验,按采煤机启动、提升机加减速及泵站切换记录电压恢复时间、无功跟踪误差与旁路切换时间,据此调整电压参考、下垂系数、限流阈值与电容投切延时,随后复核紧固、绝缘与散热条件并固化整定与检修要点。

#### 4.5 补偿回路保护配合与投运试验整定

补偿回路保护配合应以采区或井下主变电所母线为整定边界,先核算最大负荷与最小运行方式下的母线电压区间,在母线侧整定过电压与欠电压闭锁并设置投入许可窗,闭锁解除后才允许分组投切,同时支路侧配置速断与反时限过流并把动作时限压在上级馈线后备之前,形成电容支路先切除、馈线后备不越级的选择性。电容器组内部故障应采用单元熔断与不平衡保护协同,不平衡电流或中性点电压门槛按串并联段数和单元失容后的电压再分配计算并留足运行不平衡裕度,外熔断器按被保护单元额定电流与熔断特性配

套选取以保证单元故障可控,同时串联电抗器设置过温与接地故障监视以避免绝缘劣化引发相间短路。投切回路在整定阶段需把开关电器的开合电容能力、预充或限流元件参数与涌流校核作为一体,投切前必须验明放电回路完好并核对残压指示与门禁联锁,严禁带残压重合,且直接向井下供电的高压馈电线严禁装设自动重合闸,补偿回路仅允许人工确认后合闸并配置足够重投延时。投运试验按交接程序完成绝缘电阻、介质损耗角正切、容量偏差与放电时间核校,并对投切装置实施多次合分闸试验,记录涌流峰值、触头温升与端子紧固状态,随后通过模拟母线电压波动验证欠压闭锁、解除条件与重投延时逻辑,使保护动作与操作顺序在现场可复现<sup>[5]</sup>。运行整定复核应结合井下中性点运行方式与漏电保护判据,评估补偿装置引入的对地电容对选线和动作灵敏度的影响,并按煤矿安全规程关于对地电容电流阈值与接地方式的要求校核,必要时对补偿支路实行分段隔离和检修放电验电流程固化,同时对去谐或滤波支路的谐振点进行计算校核并在负荷结构变化后滚动修订定值。

## 5 结语

综上所述,煤矿井下供配电系统中无功补偿的有效实施,关键在于把补偿容量、滤波参数与动态调节能力统一到同一套电压与短路校核框架内,并用防爆型投切与保护体系保证故障可控和检修可隔离。面向含变频与长电缆的复杂工况,应采用分层就地补偿、滤波去谐与动态无功协同的组合配置,并以投运试验与定值复核支撑长期稳定运行,使功率因数与电能质量指标稳定达标。

## 参考文献

- [1] 吴含军.浅谈煤矿供配电系统中无功补偿的应用[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2024(003):000.
- [2] 蒋宇.无功补偿在煤矿供配电系统中的应用[J].电脑高手, 2023(4):2149-2150.
- [3] 周建军.供配电系统中的无功补偿技术分析[J].电子技术, 2024(001):053.
- [4] 竹森.无功补偿技术在供配电系统节能降耗中的应用研究[J].电力设备管理, 2024(21):264-266.
- [5] 栗娟.无功补偿在煤矿供配电系统中的实践研究[J].矿业装备, 2024(3):61-63.