

煤矿井下高压供电系统谐波抑制与电能质量优化策略分析

李 毕 闫艳超

陕西彬长大佛寺矿业有限公司 陕西 咸阳 712000

摘 要: 煤矿井下高压供电系统里,非线性负载设备是谐波主要源头,且谐波与电压波动等问题相互耦合。本文分析了谐波产生机制、传播特性及电能质量劣化诱因,阐述谐波抑制核心技术体系与电能质量优化策略,介绍系统集成与运行保障措施,通过综合治理提升煤矿井下高压供电系统电能质量,保障煤矿生产稳定。

关键词: 煤矿井下; 高压供电系统; 谐波抑制; 电能质量优化

引言: 煤矿生产对电力供应的稳定性与质量要求极高。井下高压供电系统因存在大量非线性负载设备,谐波问题突出,同时电压波动、三相不平衡等问题也影响电能质量。这些电能质量问题不仅会降低设备使用寿命、增加能耗,还可能引发安全事故。因此,深入分析谐波产生机制,研究谐波抑制与电能质量优化策略,对保障煤矿安全生产具有重要意义。

1 煤矿井下高压供电系统谐波产生机制与电能质量核心影响因素

1.1 高压供电系统主要谐波源的产生原理

在煤矿井下高压供电系统里,非线性负载设备是引发谐波产生的主要源头。以变频器为例,它借助电力电子器件的开关动作达成频率调节功能。不过,这种开关过程并非理想的线性状态^[1]。在电流从正半周过渡到负半周或者反向过渡时,器件的导通与关断存在时间差,这致使电流波形出现畸变,不再遵循正弦规律,进而产生以特定次数为主的特征谐波,像5次、7次谐波等。整流装置亦是如此,在将交流电转换为直流电的过程中,由于二极管具备单向导电特性,电流波形被截断,形成脉冲状电流,这种非正弦电流包含着丰富的谐波成分。另外,电弧炉、电焊机等设备在运行期间,电弧的不稳定燃烧会引发电流波动,进而产生谐波。这些非线性负载设备在煤矿井下得到广泛应用,使得谐波问题愈发突出。

1.2 谐波在高压供电网络中的传播特性

一旦谐波产生,便会借助高压电缆、母线等传输环节在供电网络中扩散。电缆的分布参数对谐波传播有着显著影响,其电感、电容特性会使谐波电流在传输过程中出现相位变化以及幅度衰减。不同频率的谐波在电缆中的传播速度与衰减程度存在差异,低次谐波传播距离较远,衰减相对缓慢;高次谐波传播距离较短,衰减较快。母线作为供电网络的枢纽,谐波电流在母线处会发生叠加与分流现象。若母线设计不合理,例如截面积过

小、布局紧凑,会加剧谐波的放大效应,导致局部谐波电压升高,对供电质量产生不良影响。

1.3 除谐波外电能质量劣化的关键诱因

电压波动与闪变是导致电能质量劣化的重要因素。煤矿井下大型设备启停较为频繁,像提升机、通风机等,这些设备功率的变化会引发电网电压的瞬时波动。当电压波动幅度超出一定范围时,会造成照明设备闪烁、电子设备工作异常等情况。三相不平衡问题同样不容小觑,由于单相负载分布不均或者设备故障,使得三相电压、电流幅值不一致,相位差偏离标准值,这不仅会增加线路损耗,还会影响电机等设备的正常运行。

1.4 谐波与其他电能质量问题的耦合作用机制

谐波与电压波动、三相不平衡等问题并非相互独立,而是相互耦合、相互影响。谐波的存在会加剧电压波动,谐波电流在电网阻抗上产生的压降会叠加在基波电压上,导致电压波动范围进一步扩大。谐波还会影响三相不平衡的测量与判断,谐波电流在三相系统中的分布不均会掩盖真实的三相不平衡程度,使得故障诊断与治理变得更加复杂。三相不平衡也会反过来影响谐波的传播与分布,不平衡的电压、电流环境会改变谐波的相位与幅值,进一步恶化电能质量。

2 煤矿井下高压供电系统谐波抑制核心技术体系

2.1 无源滤波抑制技术的结构与参数匹配

无源滤波技术是煤矿井下高压供电系统谐波抑制的基础手段。单调谐滤波器是常用的结构之一,由电容器与电抗器串联构成。其设计核心在于精确匹配电容与电感参数,让滤波器在特定谐波频率下呈现低阻抗特性,为谐波电流开辟通路,从而将谐波从电网中分流出去。参数匹配需要综合考虑系统阻抗、谐波次数以及负载特性,若参数偏差过大,会导致滤波器失谐,无法有效抑制目标谐波。对于5次谐波抑制,单调谐滤波器的电容值通常设计为50~100微法,电感值设计为2~5毫亨。高通滤波器

用于抑制高次谐波,其结构通常包含多个电容器与电抗器,通过合理设计元件参数,使滤波器对高于某一截止频率的谐波呈现低阻抗,实现宽频带谐波抑制。高通滤波器的截止频率一般设定在15次谐波以上,其电容值总和约为20~50微法,电感值总和约为0.5~2毫亨。在实际应用中,需依据电网谐波分布特点,将单调谐与高通滤波器组合使用,形成多支路滤波器组,以此提升谐波抑制效果。一个包含3个单调谐滤波器和1个高通滤波器的滤波器组,可有效抑制5、7、11次等低次谐波以及15次以上的高次谐波。

2.2 有源电力滤波器的拓扑选型与控制逻辑

有源电力滤波器通过实时监测谐波电流并生成补偿电流,实现动态谐波抑制。拓扑选型是关键环节,并联型有源电力滤波器直接并联在电网与负载之间,适用于补偿电流型谐波源,具有响应速度快、补偿精度高的优点。串联型有源电力滤波器则串联在电网中,主要用于补偿电压型谐波,可有效改善电压波形质量。控制逻辑方面,需采用先进的谐波电流检测算法,如基于瞬时无功功率理论的检测方法,快速准确地提取谐波电流成分。通过闭环控制策略调节补偿电流发生器的输出,确保补偿电流与谐波电流幅值相等、相位相反,实现谐波的精准抵消。

2.3 混合滤波系统的协同工作机制与构建方式

混合滤波系统结合了无源滤波与有源滤波的优势,通过协同工作提升谐波抑制性能。无源滤波器承担大部分谐波补偿任务,降低有源滤波器的容量需求与成本;有源滤波器则用于补偿无源滤波器无法处理的部分谐波及动态谐波,提高补偿精度。构建混合滤波系统时,需合理设计无源与有源部分的连接方式,确保两者在谐波补偿过程中互不干扰。通过优化控制策略,实现无源与有源滤波器的能量交互与动态分配,使混合系统在不同工况下均能保持高效稳定的谐波抑制效果。

2.4 基于供电设备优化的谐波源头抑制技术

从谐波产生的源头进行抑制是提升电能质量的有效途径。通过优化供电设备设计,可降低设备运行过程中的谐波发射水平。例如,采用多脉波整流技术,增加整流脉波数可显著减少谐波电流含量;选用低谐波电机,优化电机绕组结构与电磁设计,降低电机运行时的谐波电压与电流;对变频器等电力电子设备,采用先进的控制算法与调制技术,改善开关特性,减少谐波产生^[2]。这些源头抑制技术可从根本上减少谐波对电网的污染,提升供电系统整体性能。

3 煤矿井下高压供电系统电能质量优化关键策略

3.1 电压偏差与波动的调控策略

在煤矿井下高压供电系统中,电压偏差与波动直接影响设备运行稳定性。针对电压偏差,可通过调整变压器分接头位置实现电压调节。依据电网实时监测数据,精准判断电压偏高或偏低状况,合理选择分接头档位,使输出电压维持在合理区间。对于电压波动问题,需从抑制波动源与增强电网缓冲能力两方面着手。大型设备启停是引发电压波动的主要因素,可采取软启动技术,让设备在启动过程中电流缓慢上升,避免电流突变对电网造成冲击。在电网中合理配置动态无功补偿装置,如静止无功补偿器,能快速响应电网无功功率变化,及时补偿无功缺额,稳定电压水平,减小电压波动幅度。

3.2 功率因数提升与无功功率补偿策略

功率因数过低会导致电网传输效率下降、线路损耗增加。提升功率因数关键在于无功功率补偿。并联电容器是常用的无功补偿方式,通过在电网中并联适当容量的电容器,提供超前无功功率,抵消负载产生的滞后无功功率,从而提高功率因数。为提高补偿效果,可采用分组自动投切电容器装置,根据电网无功功率需求实时调整投入电容器组数,实现无功功率的精准补偿。此外,同步调相机虽成本较高,但具有调节范围大、响应速度快等优点,适用于对无功功率补偿要求较高的场合。

3.3 三相不平衡的治理策略

三相不平衡会导致设备发热增加、损耗上升,影响设备使用寿命。治理三相不平衡,首先要对负载进行合理分配,尽量使三相负载均衡。对于单相负载,可采用交叉换相的方法,将不同相的单相负载进行重新组合,降低三相不平衡度。同时,安装三相不平衡调节装置,如三相不平衡自动调节器,能实时监测三相电压、电流参数,通过内部算法计算出需要补偿的无功功率与不平衡电流,并生成相应的补偿信号,驱动补偿装置进行动态补偿,使三相系统恢复平衡状态。

3.4 谐波抑制与多维度电能质量优化的协同策略

谐波抑制与电压偏差、功率因数、三相不平衡等电能质量问题相互关联。在谐波抑制过程中,需综合考虑其他电能质量指标。例如,有源电力滤波器在抑制谐波的同时,可兼顾无功功率补偿,提升功率因数。混合滤波系统结合无源与有源滤波优势,不仅能有效抑制谐波,还能对电压波动、三相不平衡等问题起到一定改善作用^[3]。通过建立多维度电能质量监测与控制系统,实时采集电网各项参数,运用智能算法分析各指标间的耦合关系,制定综合优化策略,实现谐波抑制与其他电能质量问题的协同治理,全面提升煤矿井下高压供电系统电能质量。

4 高压供电系统谐波抑制与电能质量优化的系统集成与运行保障

4.1 优化方案的系统集成设计原则

高压供电系统谐波抑制与电能质量优化方案的系统集成,需遵循整体性、兼容性与前瞻性原则。整体性要求将谐波抑制、电压调节、功率因数提升及三相不平衡治理等各项功能视为一个有机整体,确保各子系统间协同工作,避免出现功能冲突或互补不足的情况。兼容性体现在系统集成要充分考虑到现有供电设备的特性与参数,使新集成的优化系统能与原有设备无缝对接,减少对现有系统的改造工作量。前瞻性则强调在设计时要预留一定的扩展空间,以适应未来供电负荷增长及新技术应用的需求,确保系统在较长时间内保持先进性与适用性。

4.2 核心设备的选型适配与布置规范

核心设备的选型需依据供电系统的实际工况与优化目标。对于谐波抑制设备,如无源滤波器、有源电力滤波器等,要根据谐波源特性、谐波含量及频率分布进行精准选型,确保设备能有效抑制目标谐波。无功补偿装置的选型要考虑功率因数提升需求及电网无功波动情况。设备布置方面,要遵循就近补偿原则,将无功补偿装置与谐波抑制设备尽量靠近谐波源与无功负荷中心布置,减少线路损耗,提高补偿效率。同时,要考虑设备间的电磁干扰问题,合理规划设备间距,确保系统稳定运行。

4.3 系统运行过程中的动态调控机制

建立动态调控机制是实现系统高效运行的关键。通过实时监测供电系统的各项参数,如电压、电流、功率因数、谐波含量等,运用智能算法对系统运行状态进行评估与分析。依据评估结果,动态调整谐波抑制设备的投入容量、无功补偿装置的补偿量等,使系统始终处于最佳运行状态。例如,当检测到谐波含量突然增大时,及时增加有源电力滤波器的输出电流,增强谐波抑制效果;当

功率因数下降时,自动投入或切换无功补偿装置,提升功率因数。

4.4 长期稳定运行的维护保障策略

为确保系统长期稳定运行,需制定完善的维护保障策略。定期对核心设备进行巡检与维护,检查设备运行状态、参数设置及连接情况,及时发现并处理潜在故障隐患。设备巡检周期应根据设备的重要程度和使用频率确定,一般重要设备每1-2周巡检一次,普通设备每1-2个月巡检一次。建立设备维护档案,记录设备运行数据、维护时间及维修内容,为设备寿命评估与更新提供依据。同时加强对运维人员的培训,提高专业技能水平与故障处理能力,确保在系统出现故障时能迅速响应并有效解决,保障供电系统安全稳定运行。运维人员每年应接受不少于40小时的专业培训,培训内容包括设备原理、故障现象、处理方法等。

结束语

煤矿井下高压供电系统谐波抑制与电能质量优化是一项复杂且长期的工作。通过构建完善的谐波抑制核心技术体系,实施多维度的电能质量优化策略,并做好系统集成与运行保障,能够有效提升供电系统电能质量。这不仅保障煤矿设备稳定运行,降低能耗与运维成本,还能为煤矿安全生产提供坚实的电力支撑,推动煤矿行业可持续发展。

参考文献

- [1]闫秀军.煤矿井下高压供电保护整定分析及应用[J].当代化工研究,2022,(21):177-179.
- [2]庞伟.煤矿井下高压供电系统故障安全作业流程分析[J].能源与节能,2022,(04):185-187.
- [3]夏阳,赵亮,王竞.煤矿井下高压供电保护整定分析及应用研究[J].电力设备管理,2025,(13):227-229.