

Research on Power Quality Optimization and Reactive Power Compensation Technology in Hydropower Station Operation

Shixu Tao

Honghe Guanyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 662400, China

Abstract

To address critical challenges in hydropower station operations where abnormal power quality compromises equipment safety and grid stability, this study focuses on the practical application of power quality optimization and reactive power compensation technologies. The research identifies key power quality issues including voltage deviation, frequency fluctuation, and harmonic pollution, while analyzing their specific impacts on power generation equipment aging, relay protection malfunctions, and increased operational costs. Through comprehensive comparison of SVC, SVG, and hybrid compensation technologies, the study proposes a compensation capacity calculation method based on load characteristics and harmonic correction. By developing an integrated optimization scheme combining reactive power compensation and harmonic suppression, the proposed solution demonstrates through parameter tuning and field validation that it can elevate voltage compliance rates to over 99.5% while reducing equipment maintenance costs by 15%. This provides a viable technical pathway for improving power quality in hydropower stations.

Keywords

hydropower station; power quality; reactive power compensation technology; application scheme

水电站运行中电能质量优化及无功补偿技术应用研究

陶仕旭

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南红河州 662400

摘要

为解决水电站运行中,为解决电能质量异常制约设备安全、电网稳定的突出问题,本文将聚焦电能质量优化与无功补偿技术的应用实践。研究中识别了电压偏差、频率波动、谐波污染等典型电能质量问题,深度剖析其对发电设备老化、继电保护误动及运维成本增加的具体影响。同时全面对比SVC、SVG及混合补偿装置技术特性,提出了基于负荷特性与谐波修正的补偿容量计算方法。在此基础上,研究通过构建无功补偿与谐波抑制的综合优化方案,经参数调试与现场验证,表明方案可将电压合格率提升至99.5%以上,功设备运维成本降低15%,由此为提升水电站电能质量提供可行的技术路径。

关键词

水电站; 电能质量; 无功补偿技术; 应用方案

1 引言

水电站作为清洁能源体系的核心组成,在保障电网供电稳定性与能源结构转型中发挥着关键作用。当前电网互联程度持续加深,间歇性负荷接入增多,该过程中水电站运行面临电压波动、谐波干扰等电能质量问题。若仍沿用传统的无功补偿技术,因响应速度慢、适应性不足,难以满足复杂工况下优化需求。若电能质量问题长期存在,将直接影响机组安全运行,还会制约电网整体调节能力^[1]。因此,下述将

深入剖析水电站电能质量优化及无功补偿技术应用实践,于提升发电系统可靠性、降低运行损耗具有重要现实意义。

2 水电站运行中电能质量问题识别与影响分析

2.1 水电站典型电能质量异常类型及特征

目前来看,水电站运行中电能质量异常主要集中于电压偏差、频率波动与谐波污染等方面。其中电压偏差表现为过电压与欠电压交替出现,机组启停阶段因负荷骤增骤减,电压波动幅度可达额定值的 $\pm 5\% \sim \pm 8\%$,持续时间2~5秒;丰水期机组满负荷运行时,升压站母线易因无功盈余出现3%~5%的过电压,枯水期单机带负荷则常因无功不足引发2%~4%的欠电压。频率波动多与水轮机调速系统响应滞后相关,负荷突变如甩负荷、紧急增容时频率偏差可达

【作者简介】陶仕旭(1987-),男,傣族,中国云南元阳人,本科,助理工程师,从事水电站运行中电能质量优化及无功补偿技术应用研究。

$\pm 0.2\sim\pm 0.5\text{Hz}$ 。间歇性抽水蓄能工况切换还会引发电压闪变,闪变值(P_{st})常超1.0,影响周边用电设备稳定性^[2]。谐波污染主要源于励磁系统整流装置与导叶变频调速设备,3次、5次、7次谐波占比最高,总谐波畸变率(THD)在机组低负荷时可达6%~10%,远超GB/T14549中“ $\text{THD}\leq 5\%$ ”的标准要求,且会随并网线路电感参数放大。

2.2 电能质量问题对水电站运行的多维度影响

电能质量异常对水电站运行的影响贯穿设备安全、电网稳定与经济效益等多个维度。从设备安全层面来看,电压偏差会加速发电机定子绕组老化,过电压时绕组绝缘层击穿风险提升30%~40%,欠电压则导致电磁转矩波动,引发水轮机主轴振动幅值增加0.1~0.3mm,加剧疲劳损伤;谐波电流会导致变压器铁芯产生附加损耗,局部温度升高5~10℃,绝缘寿命缩短1/3。

从电网稳定层面出发,无功不足引发电压跌落,可能触发连锁反应。2023年某流域水电站因电压偏差导致regional电网电压崩溃,造成3小时停电。谐波污染还会干扰继电保护装置,使差动保护误动率上升15%~20%,影响并网可靠性^[3]。经济效益层面,电能质量不达标导致并网罚款年均可达电站营收的2%~3%,设备异常损耗使运维成本增加10%~15%,同时电压闪变导致周边精密制造企业投诉率上升,间接影响电站社会声誉与合作稳定性。

3 水电站运行中无功补偿技术选型与应用设计

3.1 水电站常用无功补偿装置的技术特性与适用场景

在水电站无功补偿装置选型中,需紧扣其运行需求,重点围绕传统SVC、新型SVG及混合补偿三类设计相应的应用方案,匹配不同电站的规模与工况特点。在传统静止无功补偿装置(SVC)中,同步调相机凭借稳定的基荷无功支撑能力,适合老电站改造场景。例如某1980年代投运的中型水电站,通过加装同步调相机较好地解决机组老化导致的无功不足问题,无需大规模改造原有系统^[4];并联电容器组(FC)因成本低、操作简便等多方面优势,多用于中小型径流式水电站(装机容量 $< 50\text{MW}$)的基础无功补偿。其实际应用中往往依照“机组出力分段”设计投切方案,避免负荷波动时补偿过量。晶闸管控制电抗器(TCR)适合负荷波动小的坝后式电站,通过连续调节感性无功,弥补FC阶梯补偿不足。

表1 水电站常用无功补偿装置的技术特性

装置类型	技术特性	适用场景
同步调相机	基荷无功支撑稳定	老电站改造,无需大规模改造原有系统
并联电容器组(FC)	成本低、操作简便,基础无功补偿	中小型径流式水电站(装机容量 $< 50\text{MW}$),机组出力分段投切
晶闸管控制电抗器(TCR)	连续调节感性无功,弥补FC阶梯补偿不足	负荷波动小的坝后式电站

新型静止无功发生器(SVG)凭借动态响应快、功能集成等优势,现已成为大型水电站的主流选择。在百万千瓦级电站如白鹤滩应用中,SVG直接接入升压站母线,可快速响应机组负荷突变的无功需求,亦可同步治理谐波,无需额外加装滤波设备,进一步简化了系统架构。混合无功补偿系统(如“SVG+FC”)主要针对丰枯水期负荷差异大的季调节水电站设计,当丰水期负荷高时,FC承担大部分基荷无功,SVG补充动态调节;枯水期负荷低时,仅启动SVG即可满足需求,大幅提升补偿灵活性^[5]。

3.2 水电站无功补偿容量的精准计算方法

补偿容量计算中,主要以满足实际应用需求为核心,简化复杂演算,聚焦关键逻辑与辅助计算。基础容量依照功率因数法确定核心逻辑,例如根据发电机额定有功功率(P)、补偿前功率因数(通常0.8~0.85)及目标功率因数(按规范 ≥ 0.9),借助公式 $Q_{基} = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$ 初步估算。某100MW水电站补偿前功率因数0.83,目标0.92,仅需简单计算便可得出基础容量约18~20Mvar,再结合近1~2年负荷数据引入波动系数(丰水期取1.1~1.2,枯水期取0.8~0.9),修正后即可得适配基础容量^[6]。

谐波修正环节无需复杂推导,重点考虑实际应用中电容器组的安全。根据电站实测谐波总畸变率(THD,通常3%~8%),在基础容量上适当增加5%~10%作为缓冲,同时预留15%~20%容量分配给滤波支路,避免谐波放大损坏设备。极端工况校核亦可简化为关键场景适配,当电网电压跌落或机组满发时,在修正容量基础上额外预留10%~15%冗余,确保特殊工况下补偿有效。整体计算以辅助应用方案落地为最终目标,无需过度地追求数值精度,重点保障容量与实际工况相匹配。

3.3 无功补偿系统的控制策略设计与协调优化

针对水电站运行中无功补偿系统控制策略设计,需聚焦实际运行协调,突出应用方案可操作性。分层控制架构按“职责清晰”原则设计:站级总控单元根据电网调度指令如电压目标、功率因数要求,将无功需求分配给各装置。例如全站需补充50Mvar时,指令SVG承担20Mvar动态调节,FC承担30Mvar基荷补偿,避免单装置过载。装置级控制单元针对不同设备设计简易逻辑:SVG跟踪电压偏差实时调节,FC通过电压阈值控制分组投切,无需复杂闭环参数调试;设备级仅需加装基础保护如过流、过压跳闸,确保运行安全。

针对水电站运行中无功补偿动态响应优化,主要围绕解决实际问题设计相应的控制方案。针对FC投切频繁问题,可尝试设置 $\pm 0.3\%$ 的电压调节死区,偏差小时仅靠SVG微调,偏差超 $\pm 1\%$ 再联动FC投切;面对负荷突变,提前采集机组出力变化信号,预调SVG容量,避免电压波动^[7]。多系统协同侧重实操交互,发电机励磁系统约定“无功互补”规则。励磁系统已提供80%额定无功时,补偿系统仅补剩

余部分防止无功倒送；与水轮机调速系统配合，频率偏差超 $\pm 0.1\text{Hz}$ 时，优先保障频率稳定，暂降补偿系统调节优先级；与电网调度通过简单数据交互，接收紧急无功支撑指令。

4 水电站电能质量综合优化方案及效果验证

4.1 基于无功补偿的电能质量综合优化方案构建

围绕水电站电能质量核心问题，以无功补偿为核心、多场景适配为目标构建综合优化方案，重点解决电压波动、谐波污染及工况适配性问题。方案采用分层补偿与功能协同架构，发电机端配置小型 SVG，针对性解决机组启停时的瞬时无功缺口。例如机组开机阶段，SVG 提前介入补充 5%~8% 额定无功，避免电压骤降；升压站母线采用“SVG+FC 混合补偿系统”，丰水期机组满负荷时，FC 承担 70%~80% 基荷无功，SVG 动态响应负荷突变如弃水调整、电网指令变化，快速平抑电压波动；并网线路侧加装无源滤波支路，与 SVG 协同治理谐波，重点抑制 3 次、5 次特征谐波，逐步形成“源头抑制+中间补偿+末端治理”的全链条优化^[8]。

在电能质量综合优化方案中，还针对特殊工况设计应急策略。当电网电压跌落时，SVG 立即切换至无功支撑模式，100ms 内输出额定容量的 90%，防止电压崩溃；枯水期单机运行时，停用 FC 以减少空载损耗，仅靠 SVG 维持电压稳定。某中型坝后式电站应用该方案时，结合自身丰水期满发、枯水期低负荷特点，进一步优化补偿装置启停逻辑。丰水期每日 7:00-22:00 投入 FC，其余时段仅运行 SVG，保障电能质量的同时又降低能耗，实现针对性优化与场景适配的双重目标。

4.2 优化方案分析与参数调试

研究从工况适配性与运行稳定性双维度分析方案合理性，同步简化参数调试流程，聚焦关键指标落地。方案分析阶段重点验证两点：一方面为补偿装置与电站工况匹配度，例如某电站机组最大出力 150MW，设计的混合补偿系统总容量 60Mvar。经负荷模拟测试，在 100%~110% 额定出力区间，补偿系统可稳定维持功率因数 0.92 以上，无过补或欠补现象。另一方面为多装置协同安全性，通过仿真模拟 SVG 与 FC 切换过程，确认两者动作时序差设置为 200ms 时，可避免母线电压冲击，符合设备安全运行要求^[9]。

参数调试聚焦核心控制指标，着力简化复杂演算。SVG 电压调节阈值按“电网规范+实际需求”设定，将电压偏差控制范围确定为额定电压的 $\pm 1.5\%$ ，超出时 SVG 启动调节，避免频繁动作；FC 分组投切按“机组出力分段”设置，当机组出力 $< 50\text{MW}$ 时投 1 组 FC，50~100MW 时投 2 组， $> 100\text{MW}$ 时投 3 组，无需复杂算法；滤波支路参数根据电站实测谐波数据调试，将 3 次谐波滤波电容容量设定为 8Mvar，实测谐波总畸变率（THD）可从 6.5% 降至 3% 以下，满足 GB/T14549 标准。

4.3 现场应用效果评估与经济性分析

针对水电站电能质量优化，以“量化改善+成本节约”

为核心，结合现场实际运行数据评估方案效果。电能质量改善效果可通过关键指标直观体现：某电站应用优化方案后，电压合格率从优化前的 95.2% 提升至 99.7%，电压波动幅度从 $\pm 3.2\%$ 降至 $\pm 1.1\%$ ，完全符合电网对水电站“电压偏差 $\leq \pm 2\%$ ”的要求；谐波污染得到有效控制，发电机出口 THD 从 7.1% 降至 2.8%，变压器因谐波导致的过热现象消失，设备运行温度平均下降 8℃。此外，方案还提升电网适应能力。在某次电网电压跌落事故中，SVG 快速提供 45Mvar 无功支撑，使电站电压恢复时间从 1.2s 缩短至 0.4s，未造成机组跳闸。

经济性分析聚焦直接成本节约与间接效益提升。从直接成本来看，因电能质量达标，电站年均减少并网罚款约 28 万元；补偿系统优化后，FC 与 SVG 按需启停，年均降低能耗约 12 万度，折合电费 8.4 万元；设备故障率下降，变压器、电容器组等设备的运维费用年均减少 15 万元，总直接成本年均节约 51.4 万元。间接效益方面，电能质量改善后周边工业用户投诉率下降为 0，电站与电网公司的合作稳定性提升，同时延长发电设备使用寿命，整体验证方案经济与实用价值。

5 结论

综上所述，研究针对水电站电能质量问题，以无功补偿技术为核心展开应用研究。通过识别电压偏差、谐波污染等问题及多维度影响，确定 SVC、SVG 及混合装置的适配场景，构建“分层补偿+场景应急”的综合优化方案。经调试验证，电压合格率提升至 99.7%、THD 降至 2.8%，年均节约成本超 51 万元。研究为水电站电能质量提升提供可行技术路径，对同类工程具有实践参考价值。

参考文献

- [1] 韦钢明,程旭轩,王嘉敏.梯级水电站架空线路分布电容对功率因数的影响[J].水电站机电技术,2025,48(10):51-53.
- [2] 陈齐峰.基于谐波抑制技术的变压器电能质量优化方法研究[J].电气技术与经济,2025,(09):398-401.
- [3] 常春辉,白建民.光伏逆变器在配电网智能降损与电能质量优化中的应用[J].光源与照明,2025,(08):153-156.
- [4] 赵世展,鲁鑫,周新.基于光伏电站并网的电压控制与电能质量优化[J].光源与照明,2025,(07):171-173.
- [5] 孙亮亮.基于电力电子信息融合的智能电网电能质量动态监测与优化控制研究[J].中国品牌与防伪,2025,(08):191-192.
- [6] 陶剑,周志东,朱晓壘.基于电能质量优化的低压无功功率补偿柜应用研究[J].电工技术,2025,(S1):7-9.
- [7] 沈红万,李琛,魏扬,等.水电站低压交直流混合系统架构设计与电能质量治理[J].电力安全技术,2025,27(05):27-33.
- [8] 侯博武.智能配电网中负荷均衡与电能质量问题的优化研究[J].家电维修,2025,(05):131-133.
- [9] 屈万林.汤峪水电站利用无功补偿设施增发有功电量的计算分析[J].小水电,2022,(03):27-29.