

水利水电与电力工程结合的水轮机优化研究

周邦寨¹, 郭跃煌¹, 高超群², 高久海³, 谢婷霞²

(1. 青岛璟峰泰建筑工程有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 青岛青桥建筑设计有限公司, 山东 青岛 266000;

3. 青岛华宝源通讯工程有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 水利水电与电力工程的深度融合对水轮机的优化提出了更高的要求,其技术革新不仅涉及能量转换效率,还影响电网稳定性、设备可靠性及环境可持续性。本文探讨了水轮机在水利水电与电力工程结合背景下的优化,针对水轮机的复杂运行环境,建议引入多场动态数值仿真、自适应负荷调节、智能控制算法及耐久性材料技术,以提升系统稳定性和调节能力,同时需要在产业链协同及智能运维体系等方面实施外在保障,以期为技术应用的落地与持续优化提供保障。

关键词 水轮机优化; 水利水电; 电力工程; 智能控制; 数值仿真

中图分类号: TV734.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.17.040

0 引言

水轮机作为水电站的核心设备,承担着水能转化为电能的重要功能,其运行性能直接影响发电效率与电网调控能力。传统水轮机主要依赖单一水力学优化设计,在应对电网波动、自适应负荷调整及长期稳定运行等方面存在一定局限。随着电力系统智能化进程的加快,水利水电与电力工程的深度融合,使得水轮机的优化需求进一步凸显。面对复杂水文条件及不断变化的电网负荷,如何提升水轮机的动态调节能力、智能控制水平及结构耐久性,已成为该领域亟待解决的核心问题。

1 水利水电与电力工程结合的水轮机特点

水轮机是把水流的能量转换为旋转机械能的动力机械,它属于流体机械中的透平机械。我国早期就出现了水轮机的雏形——水轮,用于提灌和驱动粮食加工器械。现代水轮机则大多数安装在水电站内,用来驱动发电机发电。在水电站中,上游水库中的水经引水管引向水轮机,推动水轮机转轮旋转,带动发电机发电。水利水电与电力工程结合背景下的水轮机,显现出明显的跨领域融合特征。与传统单一水力机械不同,此类水轮机在设计时综合考虑了水利工程的流体力学特性与电力工程的电气动态特征,形成了机、电、水三者协同耦合的高效运行体系。具体而言,该水轮机结构布局精密化,配合电力系统工况进行动态优化,可实时响应电网负荷波动,维持运行参数在最佳范围内,从而实现对电力质量的精准控制^[1]。由于运行环境的复杂多变性,此类水轮机尤其强调多工况适应性,

具备快速负荷调节能力。依托智能控制算法、分布式监测技术与柔性结构设计,设备能主动捕捉负荷突变信号,并迅速调整导叶开度或桨叶角度,保障电网频率及电压稳定。同时,该水轮机结构选材注重耐久性与稳定性,充分考虑材料在水动力冲击、电磁干扰环境下的长期可靠性,使设备能够在水电联动的苛刻运行条件中长期发挥效能。在系统整合方面,水利水电与电力工程融合的水轮机还体现出较高的并网友好性,具备与新能源发电、电力储能、智能微网等多样化电力系统无缝对接的能力,有效缓解电网调峰、调频难题,提升电力网络整体韧性。

2 水轮机优化的必要性

2.1 能源转换与电网调控角度的必要性

从能源转换与电网调控角度考量,该类水轮机优化具有重要意义。传统设备在水能利用和负荷响应上存在局限,集成水利与电力工程优势后,可实现水流动能与电网动态匹配。采用精密流场仿真和电气特性建模,能准确识别能量损失环节,并借助先进控制策略调节输出功率。智能传感与数据处理系统保障系统可在多变工况下迅速适应,实现能效提升与电网稳定,既降低了损耗,又确保了供电安全。此优化方案不仅显著改善能量利用效率,而且提升了电网调控灵活性,为实现低碳转型奠定了坚实基础。

2.2 设备安全与运行稳定性角度的必要性

从设备安全与运行稳定性角度分析,优化设计为水轮机在严苛工况下提供了可靠保障。传统系统往往

因设计冗余不足而易受振动、热冲击等因素影响,导致故障率上升^[2]。综合水利与电力工程技术后,采用高性能监控模块和故障预测模型,能够实时检测关键部件状态,预防潜在风险。精确参数调控与模块化结构设计使设备具备自适应调节功能,提升抗扰能力。数据融合技术与多层防护机制确保系统在复杂环境中持续稳定运行,有效延长使用寿命,降低维护成本。此举为水电站安全运营提供技术支撑,彰显优化设计的重要性与前瞻性意义。

2.3 生态环境保护与可持续发展角度的必要性

从生态环境保护与可持续发展角度考察,水轮机优化具有深远战略意义。传统设备在运作中易引发水体扰动与噪声污染,不利于生态平衡维持。结合水利水电与电力工程技术后,优化设计注重降低流体扰动和能耗,实现绿色高效运转。采用环境友好型材料和低噪音设计,减缓对水域生态及生物多样性的影响。系统集成监控平台可动态调控运行状态,保障生态参数稳定。此举促使水资源利用与环境保护双赢,实现能源开发与生态文明建设有机协调,为可持续发展提供技术与管理示范。

3 水轮机优化的关键技术应用

3.1 水电耦合多场动态数值仿真技术的应用

水轮机优化涉及水力、机械、电磁等多物理场相互作用,采用多场动态数值仿真技术可实现精确的性能预测与优化。

一方面,需要基于流体力学、结构力学与电磁学构建高精度计算模型。采用计算流体动力学(CFD)分析水流在叶片、导叶及尾水管区域的湍流特性,选取湍流模型(如 SST $k-\omega$ 模型)进行流场求解,以获得压力分布和流动状态。同时,利用有限元方法对水轮机关键部件进行结构分析,计算其在复杂流动环境下的应力变化,并结合电磁场仿真软件(如 ANSYS Maxwell)建立发电机组的电磁特性模型,评估磁场分布与涡流损耗^[3]。

另一方面,要将流体动力学仿真结果作为输入数据,与电磁仿真进行耦合计算,模拟水轮机运行时的电磁感应效应与转矩波动情况。为优化水轮机性能,可运用遗传算法或粒子群优化(PSO)调整叶片形状、流道设计和电磁参数,以减少流体阻力,提高能量转换效率。最后,需借助试验验证数值模拟结果的准确性,对比仿真数据与实测数据,修正模型参数,使仿真更贴合实际运行工况,从而实现水轮机的精准优化。

3.2 智能自适应负荷调节与控制技术的应用

针对水轮机在电网负荷波动条件下的实时响应需求,需采用智能自适应负荷调节技术,以保障设备运行的稳定性。建议在水轮机关键部件(如叶片、导叶、轴承、转轮)安装高精度传感器,包括流量传感器、压力传感器、振动传感器和温度传感器,以实时监测运行状态。数据采集系统需整合各类传感数据,并采用模糊逻辑或深度学习算法进行数据处理,分析负荷变化趋势及系统运行状态。同时,利用模型预测控制方法,根据负荷预测数据动态调整水轮机导叶开度与桨叶角度,优化水能利用效率。控制策略可采用模糊 PID 控制,确保水轮机在负载变化时保持稳定运行,并减少电网频率波动^[4]。为提高响应速度,可结合边缘计算技术,使计算任务在本地设备端完成,减少数据传输延迟,实现毫秒级实时控制。最终,借助闭环控制系统持续优化运行参数,在不同工况下自动调整水轮机运行模式,提高系统适应性,并降低能耗与机械损耗。

3.3 柔性结构设计与材料耐久性技术的应用

水轮机长期运行于高流速、高压力及复杂电磁环境中,可采用柔性结构设计与高性能材料以提高其耐久性。可在水轮机叶片及导叶设计中引入可调节结构,采用变角叶片或变流道设计,使设备可根据水头变化调节工作状态,以减少流体冲击和能量损耗。结构设计优化需结合有限元分析方法,对叶片受力状态进行仿真计算,评估其在不同流体载荷作用下的变形情况,并调整材料厚度与形状参数,以提高抗疲劳能力。材料选择方面,需采用高耐腐蚀性材料,如双相不锈钢、钛合金或碳纤维增强复合材料,以减少水流冲蚀对叶片表面的损害。此外,针对叶片和导叶的耐磨需求,采用热喷涂技术或纳米涂层技术,在表面形成高硬度耐磨层,以降低气蚀与磨损导致的性能衰减。值得强调的是,可结合实验室材料疲劳测试,评估优化后的材料在长期服役条件下的稳定性,并调整制造工艺,以便设备在极端运行环境下具备较高的结构可靠性与耐久性。

3.4 电气自动化与智能并网控制技术的应用

结合水利水电与电力工程优化水轮机的电气控制系统,需采用自动化调节与智能并网控制技术,以确保设备高效运行。首先,建立基于实时数据采集系统的监控平台,采集电压、电流、功率因数、频率及转速等参数,并利用云计算技术进行数据存储与分析。其次,在励磁系统中引入自适应矢量控制算法,使发

电机组能够根据电网需求动态调整励磁电流,从而改善功率因数,提高电能质量。并网控制需采用同步相量测量单元,实时监测发电机与电网之间的相角差,并运用无功功率补偿技术(如静止无功补偿器 SVC 或静止同步补偿器 STATCOM)调整电压水平,减少并网冲击。为降低谐波干扰,逆变器需采用脉宽调制(PWM)控制策略,确保输出波形与电网频率相匹配,提高电能传输效率。此外,在电网发生突发负荷波动或故障时,需引入快速切换机制,使水轮机能够在毫秒级时间范围内完成功率调节,确保电网稳定运行。最后,结合数字孪生技术,构建虚拟水轮机模型,实现远程运维与智能诊断,使设备具备预测性维护能力,减少非计划停机,提高系统整体运行的安全性与可靠性。

4 水轮机优化的外在保障条件

在水轮机系统的优化过程中,除了聚焦于核心技术方面的问题,还必须重视一系列外在保障条件的系统构建与完善。这些条件不仅可以为优化措施的实施提供稳定的平台,也能够保障水轮机长期高效、安全运行中发挥着关键作用。

4.1 资金投入与产业链协同发展

水轮机优化的实施依赖充足的资金支持,同时需要完善的产业链协作体系以确保技术升级的落地。资金投入方面,应构建政府引导、企业主导、多方资本协同的融资模式,以降低单一主体承担的投资风险。政府可设立专项基金,针对水利水电与电力工程结合的水轮机优化项目提供资金扶持,重点支持高效流体动力学设计、新材料研发及智能控制系统集成等关键环节。同时,金融机构可推出绿色信贷、低息贷款等政策,吸引社会资本参与,为水电企业提供长期稳定的资金保障。在产业链层面,建议推动上游制造企业、科研机构与下游电力企业的深度融合,建立高效的协同创新机制^[5]。制造商需加强与高校、研究机构的技术合作,推动先进流体仿真技术、新型耐磨材料的联合攻关,以提升设备的耐久性与运行效率。电力企业则需优化调度策略,以适应水电站运行模式的智能化转型。此外,需建立产业联盟或技术共享平台,使不同企业在数据分析、实验验证及智能运维方面形成互补,提高整体产业链的协同效能。

4.2 运维体系建设与专业人才培养

水轮机优化的长期稳定运行依赖于完善的运维体系与高水平的技术人才支撑,需建立现代化的运维管理体系,并推动专业人才的培养与引进^[6]。在运维体系建设方面,采用智能化管理模式,建立数据驱动的

远程监测平台,实现水轮机状态的实时监控与故障预警。水电企业需引入大数据分析 with 人工智能诊断系统,以提升设备维护的精准度,并降低非计划停机率。同时,应制定严格的巡检机制,明确关键部件的检修周期,并引入风险评估模型,对运行工况进行动态评估,以优化设备维护策略。在人才培养方面,需要加强高校与企业的产学研合作,构建从基础理论研究到工程实践应用的完整培训体系。高校可针对水轮机优化技术设置专项课程,并与水电企业合作建立实验基地,使学生在实践中掌握优化技术的核心要点。企业内部需建立技能提升计划,采用线上线下结合的培训方式,确保运维人员掌握最新的智能化运维工具及优化方法。再者,还应引入国际先进管理理念,鼓励技术人员参与国际学术交流与标准制定,推动水轮机优化技术的发展迈向全球化水平^[7]。

5 结束语

在优化技术层面,本文提出利用多场动态数值仿真技术提高水动力特性分析精度,通过智能控制与自适应调节技术增强负荷响应能力,并结合高性能材料与柔性结构优化,提高设备的长期稳定性与耐久性。为进一步确保优化方案的顺利实施,还需推动产业链协同创新,并构建智能化运维管理体系,培养专业人才。未来研究可进一步深化水轮机优化在极端水文环境下的适应性,提高设备智能化水平,并探索与新型可再生能源的联合调度机制,以提升电力系统整体运行效率。

参考文献:

- [1] 向升,郑静.沙坪水电站水轮机改造优化设计[J].四川水力发电,2022,41(04):103-107,111.
- [2] 刘大庆,柏沁,李贵吉,等.冲击式水轮机常见故障分析及设计制造优化建议[J].红水河,2024,43(06):121-125,130.
- [3] 宋文甲,熊建军,邹茂娟,等.水斗式水轮机导轴承优化设计[J].中国机械,2024(33):49-52.
- [4] 赵亚萍,郑小波,张欢,等.多能互补条件下转轮优化对水轮机低负荷区稳定性能的影响[J].农业工程学报,2023,39(07):67-76.
- [5] 翟宇,李晓超,马夏敏,等.小水电尾水水轮机转轮优化研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(08):93-103.
- [6] 周鹏.水轮机调速器在水电站运行优化与管理策略中的应用研究[J].水上安全,2024(24):121-123.
- [7] 丁占涛,蔡卫江,赵文利,等.基于水轮机运转曲线的调速器调节策略优化与实践[J].水电与抽水蓄能,2023,09(04):92-97.