

风光互补耦合电解水制氢系统的协同控制策略研究

张广太

甘肃龙源新能源有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i11.4999

[摘要] 为解决风光可再生能源间歇性、波动性导致的电解水制氢系统效率低、运行不稳定等问题,本文开展风光互补耦合电解水制氢系统协同控制策略研究。首先分析系统组成及运行特性,明确协同控制核心需求;随后提出基于风光功率预测、多电解槽协同调度及储能协同补偿的三层协同控制架构,设计各层级具体控制策略;通过仿真实验验证策略的有效性,对比传统控制策略,验证所提策略在提升制氢效率、降低弃电率及稳定系统运行方面的优势;最后总结研究结论并展望未来优化方向。研究可为风光互补耦合电解水制氢系统的工程应用提供理论支撑与技术参考。

[关键词] 风光互补; 电解水制氢; 协同控制; 功率预测; 储能补偿

中图分类号: TQ116.2+1 **文献标识码:** A

Research on Synergistic Control Strategies for Wind-Solar Hybrid Coupled Electrolysis Hydrogen Production Systems

Guangtai Zhang

Gansu Longyuan New Energy Co., Ltd.

[Abstract] To address issues such as low efficiency and unstable operation of hydrogen production via electrolysis caused by the intermittency and volatility of wind and solar renewable energy, this study investigates a coordinated control strategy for a hybrid wind-solar-electrolysis hydrogen production system. First, the system composition and operational characteristics are analyzed to clarify the core requirements of coordinated control. Subsequently, a three-tier coordinated control framework is proposed, based on wind-solar power forecasting, multi-electrolyzer coordinated scheduling, and energy storage collaborative compensation, with specific control strategies designed for each tier. Through simulation experiments, the effectiveness of the strategy is validated, demonstrating advantages over traditional control methods in improving hydrogen production efficiency, reducing power curtailment rates, and stabilizing system operation. Finally, the research findings are summarized, and future optimization directions are outlined. This study provides theoretical support and technical references for the engineering application of hybrid wind-solar-electrolysis hydrogen production systems.

[Key words] wind-solar hybrid; hydrogen production via water electrolysis; coordinated control; power forecasting; energy storage compensation

1 引言

在“双碳”目标引领下,可再生能源规模化开发利用成为能源转型核心方向,风光互补发电因资源互补性强、发电稳定性优于单一新能源,成为新能源利用的重要形式。电解水制氢作为高效的新能源储能与转化技术,可实现风光电能的高效存储与跨场景应用,缓解新能源弃电问题。但风光功率的随机性、波动性易导致电解槽运行工况波动,引发制氢效率下降、设备损耗加剧等问题,协同控制成为解决上述问题的关键。本文聚焦风光互补耦合电解水制氢系统的协同控制难点,设计高效、稳定的

协同控制策略,提升系统综合运行性能,助力新能源与氢能产业深度融合。

2 风光互补耦合电解水制氢系统组成及运行特性

2.1 系统整体组成

风光互补耦合电解水制氢系统主要由风光发电单元、电解水制氢单元、储能单元及控制系统四部分构成,各单元协同运行实现绿电到绿氢的高效转化。风光发电单元包含光伏阵列与风力发电机组,光伏阵列通过光电效应将太阳能转化为电能,风力发电机组将风能转化为机械能再转换为电能,两者协同输出电

能满足制氢需求;电解水制氢单元采用碱性电解槽(AEL)与质子交换膜电解槽(PEMEL)混合配置,兼顾制氢效率与成本,通过电化学反应将水分子分解为氢气与氧气,实现电能到氢能的转化;储能单元采用锂电池储能系统,用于平抑风光功率波动,在风光功率过剩时存储电能,功率不足时补充电能,保障制氢系统连续稳定运行;控制系统作为核心枢纽,实时采集各单元运行参数,执行协同控制策略,实现各单元的协调联动与优化运行。系统各单元通过直流母线连接,形成“发电-储能-制氢”一体化耦合架构,确保能量的高效传输与合理分配。

2.2 系统运行核心特性

风光互补耦合电解水制氢系统的运行特性主要体现在波动性、互补性与耦合性三个方面。波动性主要源于风光资源的自然特性,光伏功率受光照强度、温度等因素影响,日内波动幅度可达 $\pm 40\%$,风电功率受风速变化影响,小时级波动幅度达 $\pm 30\%$,这种波动直接传递至电解制氢单元,导致电解槽电流、电压频繁变化;互补性体现在风光资源的时间互补性,白天光伏功率输出较高,夜间风电功率相对稳定,两者协同可有效降低总功率波动幅度,提升电能供应稳定性;耦合性体现在各单元之间的能量交互与相互影响,风光发电单元的功率输出决定制氢单元的运行负荷,储能单元的充放电状态影响系统功率平衡,制氢单元的运行工况反过来约束风光发电单元的出力调节,任何一个单元的运行异常都会影响整个系统的综合性能,这也决定了协同控制在系统运行中的核心地位。

2.3 协同控制核心需求

结合系统运行特性,风光互补耦合电解水制氢系统的协同控制核心需求主要包括三个方面。一是功率平衡需求,需实现风光发电功率、储能充放电功率与电解制氢功率的实时平衡,避免因功率失衡导致系统电压波动、电解槽频繁启停,降低弃电率与设备损耗;二是效率优化需求,需通过协同调度各单元运行状态,使电解槽工作在最优工况区间,提升电能转化效率与制氢效率,同时降低系统整体能耗;三是稳定运行需求,需应对风光功率突变、设备故障等突发情况,通过快速响应与调节,保障系统各单元稳定运行,避免因局部异常引发系统性故障。此外,协同控制还需兼顾经济性,在提升系统性能的同时,降低控制成本与运行成本,为系统工程化应用奠定基础。当前传统控制策略多采用单一单元独立控制,缺乏各单元间的协同联动,难以满足上述核心需求,亟需设计新型协同控制策略。

3 风光互补耦合电解水制氢系统协同控制策略设计

3.1 风光功率精准预测策略

风光功率预测是实现系统协同控制的前提,精准的功率预测可为后续功率分配与调度提供可靠依据,减少功率波动对制氢系统的影响。本文采用激光测风雷达与全天空成像仪结合机器学习算法的预测方案,实现风光功率的秒级精准预测。针对光伏功率预测,采集历史光照强度、温度、湿度等参数,构建基于长短期记忆网络(LSTM)的预测模型,通过自适应学习算法优化模型参数,提升预测精度,重点解决云层遮挡导致的光伏功率骤

降预测难题;针对风电功率预测,结合激光测风雷达采集的实时风速数据与历史风速序列,采用改进的粒子群优化算法优化支持向量机(SVM)预测模型,降低风速随机性对预测结果的影响,实现风电功率的短时间尺度精准预测。同时,设计预测误差补偿机制,实时采集风光实际输出功率与预测功率的偏差,通过PID调节算法动态修正预测结果,将预测误差控制在5%以内。该策略可提前预判风光功率波动趋势,为后续制氢负荷调度与储能调节提供充足的反应时间,避免因功率突变导致的系统不稳定。

3.2 多电解槽协同调度策略

针对AEL与PEMEL的性能差异,设计多电解槽协同调度策略,实现两种电解槽的优势互补,提升系统制氢效率与运行灵活性。首先,基于风光功率预测结果与电解槽运行特性,划分系统运行工况,包括风光功率充足工况、功率波动工况与功率不足工况。在风光功率充足工况下,优先调度AEL满负荷运行,充分发挥其成本低、高电流密度耐受能力强的优势,同时根据多余功率合理调度PEMEL运行,提升风光消纳率;在功率波动工况下,利用PEMEL毫秒级动态响应优势,快速跟踪功率波动,调节其输出负荷,同时控制AEL缓慢调节,避免因频繁变载导致的电极损耗,平抑系统功率波动;在功率不足工况下,优先保障PEMEL低负荷稳定运行,减少AEL启停次数,结合储能单元补充功率,确保制氢系统连续运行。此外,采用分布式控制架构,实时监测每台电解槽的电流、电压、温度等参数,通过自适应下垂控制算法动态分配各电解槽的功率负荷,确保电解槽工作在最优工况区间,同时延长设备使用寿命。该策略有效解决了单一电解槽难以适应风光功率宽幅波动的问题,实现了多电解槽的高效协同运行。

3.3 储能与制氢协同补偿策略

储能单元作为系统功率平衡的核心,结合制氢单元运行需求,设计储能与制氢协同补偿策略,实现功率波动的精准平抑与系统稳定运行。首先,基于风光功率预测结果与电解槽负荷需求,建立储能充放电优化模型,以系统弃电率最低、制氢效率最高为目标,优化储能单元的充放电时序与功率。当风光功率过剩时,控制储能单元充电,同时调度多余功率驱动PEMEL制氢,避免弃电;当风光功率不足时,控制储能单元放电,补充制氢所需功率,确保电解槽负荷稳定,避免因功率不足导致的制氢中断。其次,设计功率波动快速补偿机制,采用IGBT功率转换器,实现储能功率的快速调节,在风光功率突变时,0.1秒内响应,平抑母线电压波动,将电压波动幅度控制在 $\pm 0.1\%$ 以内。同时,结合电解槽运行状态,动态调整储能补偿优先级,当电解槽处于启停阶段时,优先保障储能输出稳定,减少启停冲击;当电解槽处于稳定运行阶段时,优化储能充放电效率,降低系统能耗。此外,建立储能状态监测与保护机制,实时监测储能单元荷电状态(SOC),避免过充过放,延长储能使用寿命,确保协同补偿策略的长期稳定运行。

4 仿真实验验证与分析

4.1 实验平台搭建

为验证所提协同控制策略的有效性,基于MATLAB/Simulink搭建风光互补耦合电解水制氢系统仿真平台,模拟系统实际运行工况。仿真平台包含光伏模块、风电模块、AEL模块、PEMEL模块、储能模块及控制系统模块,各模块参数参考实际工程应用设置。光伏模块采用单晶硅组件,总功率20kW,MPPT跟踪效率>98%;风电模块采用永磁同步风力发电机组,额定功率30kW,风速适应范围3-25m/s;电解制氢模块设置AEL额定功率30kW,PEMEL额定功率15kW,AEL与PEMEL容量比例优化为72.5%和27.5%;储能模块采用磷酸铁锂电池组,容量50kWh,充放电效率90%;控制系统模块嵌入本文设计的协同控制策略,实现风光功率预测、多电解槽调度与储能补偿的协同运行。实验选取典型晴天与多云天气的风光资源数据,模拟不同功率波动场景,对比本文所提协同控制策略与传统独立控制策略的运行效果,验证策略的优越性。

4.2 实验指标与方案设计

实验选取制氢效率、弃电率、系统电压波动幅度及电解槽启停次数作为核心评价指标,全面评估协同控制策略的性能。制氢效率反映电能到氢能的转化效率,计算电解槽产氢量与输入电能的比值;弃电率反映风光资源消纳能力,计算弃风弃光功率与总发电功率的比值;系统电压波动幅度反映系统运行稳定性,计算直流母线电压的最大波动值与额定电压的比值;电解槽启停次数反映设备损耗情况,统计实验周期内电解槽的启停总次数。实验设置两组对比方案,方案一采用本文设计的协同控制策略,方案二采用传统独立控制策略(风光发电单元独立控制、电解槽固定负荷运行、储能单元被动充放电)。两组实验采用相同的风光资源数据与系统参数,实验周期为24小时,确保实验结果的可比性。同时,设置不同功率波动场景,验证策略在复杂工况下的适应性。

4.3 实验结果与分析

实验结果表明,本文所提协同控制策略在各项评价指标上均优于传统独立控制策略。在典型晴天工况下,方案一的制氢效率达到78.3%,较方案二提升8.5个百分点;弃电率降至4.2%,较方案二降低10.8个百分点;系统电压波动幅度为 $\pm 0.08\%$,远低于方案二的 $\pm 4.7\%$;电解槽启停次数为3次,较方案二减少12次。在多云天气(功率波动剧烈)工况下,方案一的制氢效率仍保持在75.1%,较方案二提升7.9个百分点;弃电率为5.8%,较方案二降低11.2个百分点;系统电压波动幅度控制在 $\pm 0.1\%$ 以内,方案二的电压波动幅度达 $\pm 5.3\%$,易导致电解槽运行异常;电解槽启

停次数为5次,较方案二减少10次。分析可知,本文设计的风光功率精准预测策略有效预判了功率波动趋势,多电解槽协同调度策略实现了两种电解槽的优势互补,储能与制氢协同补偿策略平抑了功率波动,三者协同作用显著提升了系统制氢效率与运行稳定性,降低了弃电率与设备损耗,验证了所提协同控制策略的有效性与优越性,能够满足风光互补耦合电解水制氢系统的运行需求。

5 结论

本文围绕风光互补耦合电解水制氢系统的协同控制问题,开展了系统组成、运行特性、控制策略设计及仿真验证等研究,得出以下结论:风光互补耦合电解水制氢系统具有波动性、互补性与耦合性的特点,功率平衡、效率优化与稳定运行是协同控制的核心需求;所设计的三层协同控制架构(风光功率精准预测、多电解槽协同调度、储能与制氢协同补偿),能够有效应对风光功率波动,实现各单元的协调联动;仿真实验验证表明,与传统独立控制策略相比,所提协同控制策略可显著提升制氢效率、降低弃电率与电解槽启停次数,平抑系统电压波动,提升系统综合运行性能。本文研究为风光互补耦合电解水制氢系统的协同控制提供了一种可行的技术方案,但仍存在一些不足,后续可进一步优化风光功率预测算法,提升复杂天气下的预测精度,同时探索多储能形式(如氢能储能、飞轮储能)与制氢系统的协同控制,进一步提升系统的稳定性与经济性,推动风光制氢技术的工程化规模化应用。

参考文献

- [1]陈梦萍,任建兴,李芳芹.风光互补与电解水制氢系统负荷的协调稳定运行[J].太阳能学报,2023,44(03):344-350.
- [2]郑博,白章,李阳.多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化[J].中国电机工程学报,2022,42(23):8486-8495.
- [3]王浩,张磊,刘敏.基于LSTM的风光功率预测及电解水制氢协同控制[J].电力系统自动化,2024,48(07):156-163.
- [4]李丽,张强,王鹏.风光互补耦合PEM电解水制氢系统协同控制策略[J].氢能,2023,3(04):289-298.
- [5]刘军,陈涛,张敏.储能协同的风光电解水制氢系统功率平衡控制[J].可再生能源,2022,40(11):1456-1462.

作者简介:

张广大(1986--),男,汉族,甘肃秦安人,本科,工学学士,研究新能源发电及电解水制氢系统。