

Adaptive Robust Control and Stability Research of Electrolysis Water Hydrogen Production System under Strong Stochastic Wind and Solar Disturbances

Xiong Liu¹ Dongdong Zhang² Xiang Guo¹ Hongkai Li¹ Zhenguo Liang¹

1. CGN Gansu New Energy Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730070, China

2. Gansu Xuanyue Ecological Technology Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730070, China

Abstract

To address the stability control challenges in electrolytic water hydrogen production systems under strong stochastic wind-solar disturbances, this study systematically investigates adaptive robust control and stability analysis. By analyzing the spatiotemporal characteristics of wind-solar power fluctuations, we establish a coupled dynamic model integrating electrolytic cell and auxiliary equipment across electrical, thermal, and mass time scales. The research elucidates uncertainty quantification mechanisms and propagation patterns under severe stochastic disturbances, while delineating stability boundaries and instability modes for coupled systems. An adaptive robust controller incorporating hybrid sensitivity analysis and real-time disturbance identification is designed to achieve coordinated suppression of multi-source disturbances and optimized power allocation. Based on robust stability criteria and transient stability analysis, the stability domain estimation for control strategies is completed. Simulation results demonstrate that the proposed approach exhibits superior dynamic response performance and robustness characteristics under typical disturbance scenarios.

Keywords

electrolysis of water for hydrogen production; wind-solar disturbances; adaptive robust control; multi-time scales; stability analysis

强随机风光扰动下电解水制氢系统自适应鲁棒控制与稳定性研究

刘雄¹ 张东东² 郭翔¹ 李洪凯¹ 梁振国¹

1. 中广核(甘肃)新能源有限公司, 中国·甘肃兰州 730000

2. 甘肃轩岳生态科技有限公司, 中国·甘肃兰州 730000

摘要

针对强随机风光扰动下电解水制氢系统的稳定控制难题, 本文系统开展自适应鲁棒控制与稳定性研究。通过解析风光功率扰动的时空特性, 构建涵盖电、热、质多时间尺度的电解堆-辅机耦合动态模型。深入揭示强随机扰动下不确定性量化与传播机制, 明确耦合系统的稳定性边界与失稳模式。设计融合混合灵敏度与扰动在线辨识的自适应鲁棒控制器, 实现多源扰动协同抑制与功率协调分配。基于鲁棒稳定性判据与暂态稳定性分析, 完成控制策略稳定域估计。仿真验证表明所提策略在典型扰动场景下具有优越的动态响应与鲁棒性能。

关键词

电解水制氢; 风光扰动; 自适应鲁棒控制; 多时间尺度; 稳定性分析

1 引言

高比例可再生能源电解水制氢属于达成绿氢制造的主要途径, 但是, 风光出力存在很强的随机性, 其频率范围较广, 这给制氢系统的安全稳定运行带来了很大的困难。电解

水制氢系统包含电解堆、气液分离、热经营以及电源等诸多辅助机子系统, 各个部分的动态时间尺度差别很大, 在遭遇强随机干扰的时候, 很容易产生电压不均衡、热失控之类的不稳定状况。当下的控制方法大多按照确定性模型来设计, 无法应对扰动特征所具有的时变性和不确定性。于是, 本文着重关注在强随机风光干扰情形下电解水制氢系统的自适应鲁棒控制问题, 从干扰特征的表述、系统建模、稳定性原理、控制策略规划以及性能评定等角度展开系统的探究, 希望给改善系统在复杂干扰环境下运行的稳定性赋予理论支

【作者简介】刘雄(1999-), 男, 中国甘肃临洮人, 本科, 助理工程师, 从事风光制氢(Power-to-Gas, PtG)系统的智能化与稳定控制研究。

持和技术路线。

2 系统扰动特性与建模

2.1 风光功率强随机扰动的时空特性与表征

风光功率的输出受到诸多因素的影响,气象条件、地理分布以及机组的运行状态等,其具有明显的时空耦合性和很强的随机波动性特点。从时间尺度来讲,扰动包含毫秒级的瞬时脉动、秒级的阵风波动以及分钟级以上趋势性的改变,这些共同形成了宽频域的扰动谱。就空间尺度而言,分散布局的风光机组的出力之间存在时空相关性,汇集点处的扰动会相互叠加或者抵消,从而导致注入到制氢系统的功率表现出非平稳、多模态这样复杂的特性^[1]。要想精准描绘这种扰动,就要运用随机过程理论和时频分析方法,构建起依靠概率分布、功率谱密度以及波动时程特征的统一表征模型,给后面的控制设计提供扰动输入的参照。

2.2 电解水制氢系统多时间尺度动态模型构建

电解水制氢系统包含电解堆、电源变换器、气液分离器、循环泵以及散热装置等部件,各个子系统存在不同的动态特性,其时间跨度从毫秒到分钟不等。电解堆的电气部分和电化学反应有着毫秒级的响应速度,热经营系统对于温度变化的惯性表现为秒到分钟级别,气液分离和压力调节属于中时延过程。要想精确描绘干扰传递和交互情况,就要构建起综合电、热、质过程的非线性状态空间模型,弄清楚各个子系统的输入输出联系以及时间常数分布状况。这个模型既要体现关键变量的动态变化规律,又要具有恰当的简化形式来满足控制器设计的要求。

3 不确定性分析与稳定性机理

3.1 强随机扰动下系统不确定性量化与传播机制

风光扰动具有很强的随机性,这给制氢系统带来很多不确定性,比如功率输入会波动,模型参数会发生改变,还有未建模的动态情况等。这些不确定性通过系统的耦合链传递出去,就有可能引发电解电压波动、氢氧相互渗透以及热应力逐步积累之类的连锁事件。利用区间分析法、概率盒法或者多项式混沌展开法之类的方法,可以比较精确地阐述不确定性在状态变量和输出响应之间如何定量传递。重点在于找出不确定传递途径中的关键点和敏感参数,展示出扰动能量在电-热-质子系统当中分配的规则,给控制器的稳健设计赋予不确定性的边界信息和量化依据。

3.2 电解堆-辅机耦合系统的稳定性边界与失稳模式

电解堆和辅机系统有着很强的耦合关系,电解堆的电压与电流发生改变时,会影响电源变换器的运行状态,热管理系统存在调节滞后的情况,并且会反过来影响电解堆的温度以及过电位分布情况。在遭遇强随机干扰的时候,这个耦合系统也许会远离预定的稳定点,从而导致出诸如电压振荡、热不均衡或者压力起伏之类的不稳定状况^[2]。通过建立耦合系统的非线性动力学模型,并利用分岔理论以及李雅普诺夫

方法,可以分析出系统稳定区域的界限,找出鞍结分岔、霍普夫分岔等常见的不稳定形式。知道了不同干扰程度以及系统参数之下临界稳定的状况,这就给控制策略的设计提供了稳定性的限制范围。

3.3 不确定性传播的定量评估与敏感性分析

构建依靠蒙特卡洛模拟和全局灵敏度分析的不确定性流传评价框架,衡量输入扰动随机性给关键输出变量统计特性造成影响的程度。通过计算各个不确定性源头的 Sobol 灵敏度指数,找出主要影响系统响应波动的关键参数及其耦合途径。把不确定性流传的结果映射到系统稳定域边界上,确定不同扰动强度下失稳风险的概率分布情况。这个评价方法会给控制策略设计赋予不确定性等级的排列顺序,引导控制器在资源有限的情况下着重压制对稳定性影响最大的扰动部分。

4 自适应鲁棒控制策略设计

4.1 基于混合灵敏度的鲁棒控制器结构设计

风光存在扰动现象,其具有宽频域特征,且模型存在不确定性,针对这种情况,利用混合灵敏度 H_∞ 控制框架来设计鲁棒控制器。通过加权函数对灵敏度函数以及补灵敏度函数执行整形处理,在扰动抑制能力和鲁棒稳定性之间达成兼顾效果。在控制结构当中,内环部分采用快速电流环以稳定电解堆的电气量,而外环则按照制氢需求并结合扰动状态来协调功率分配及热管理调节活动。此结构能够有效地阻隔高频扰动向电解堆的传递,还保留着对低频趋势性波动加以跟随的能力,为后续参数自适应提供稳定的基础控制回路。

4.2 扰动在线辨识与控制器参数自适应更新

强随机扰动具有时变特性,这要求控制器要有参数在线调整的能力。可以构建依靠递归最小二乘法或者卡尔曼滤波的扰动辨识器,该辨识器能够及时估算出扰动的幅值、频率分量以及统计特征,形成扰动状态的表现向量。按照辨识的结果,利用增益调度或者模型参考自适应机制来更新控制器的参数,使控制律一直符合当下扰动的特征以及系统的运行点^[3]。辨识和更新的过程要兼顾收敛的速度和计算的负担,防止因为参数突然变化而造成控制震荡。通过设计参数平滑过渡的机制,确保自适应过程在暂态的时候稳定,做到控制性能的动态优化。

4.3 多源扰动协同抑制与功率协调分配策略

风光扰动、负荷波动以及模型误差等多种源头的干扰同时影响到制氢系统,单个控制回路无法达成全面较好的压制效果。按照干扰解耦原理和多变量控制架构来创建协同压制方案,把处于不同频段、不同来源的干扰分别指派到相应的控制通道去处理。在执行功率协调分配的时候,遵照电解堆效率特点和辅机调节余地,在保证达到制氢速率需求的情况下改善功率分配情况,防止出现局部过载或者频繁调节的

现象。协同机制通过设置优先级和限制条件,使各个控制通道在干扰压制的时候能够相互协作而不是产生矛盾,从而加强系统的整体抗干扰性能。

5 控制系统稳定性分析

5.1 闭环系统鲁棒稳定性理论判据

所设计的自适应鲁棒控制系统要形成起严格的鲁棒稳定性判据,以此保障在参数摄动和未建模动态情况下的闭环稳定性。凭借小增益定理和结构奇异值理论,把系统不确定性转为成结构化摄动的形式,进而推导出确保系统鲁棒稳定的充要条件。通过计算系统传递函数矩阵的结构奇异值上界来考量不同不确定性相叠加时的稳定余量。这个判据既可用于验证名义系统的稳定性,又能给加权函数的选择以及控制参数的整定给予理论上的指导,从而保证控制器在预先设定好的不确定性范围内具有可靠的稳定表现。

5.2 参数自适应过程的暂态稳定性分析

自适应控制器执行参数在线更新时会产生时变特性,这也许会造成暂态失稳现象发生。利用平均法或者李雅普诺夫方法来分析自适应回路的暂态行为,构建起参数估计误差和状态偏差共同的动态方程,探究辨识器的收敛速度以及控制器参数调整速率对于暂态稳定性的影响力,并且推导出保障参数自适应过程稳定的限定条件、持续激发条件以及自适应增益界之类的。通过分析处于不同扰动情况之下参数轨迹的收敛特点,确定由于参数突然变化或者辨识暂态误差而致使系统失去稳定的关键条件,从而给自适应律的设计提供稳定性的界限依据。

5.3 多时间尺度下控制策略的稳定域估计

制氢系统的电、热、质动态存在时间尺度分离特性,这导致闭环系统表现出快慢变子系统耦合的奇异摄动形式。利用奇异摄动理论把系统分解成快变和慢变的降阶子系统,依次剖析各个子系统的稳定域,然后通过边界层方法来合成原来系统的整体稳定域估算^[4]。快变子系统包含电流环和电源变换器,而慢变子系统覆盖温度与压力的调节流程。估量各时间尺度下状态变量的吸引域和稳定裕度,从而展示出控制参数和系统惯性对稳定域的影响规律,给控制参数整定提供稳定域边界的限制。

6 控制性能验证与评估

6.1 典型强随机扰动场景下的动态响应特性

选取具备典型强随机特性的实测风光功率序列当作输入扰动,形成包含电解堆、变换器以及热守护系统的仿真验证平台,考察所提出的控制策略在不同波动强度和频谱分布情况下的动态响应性能。记录诸如电解电压、堆温、氢气产量等关键状态变量的变化轨迹,剖析扰动抑制能力和调节时间,比较自适应机制参与前后系统的响应差别,证实扰动识别和控制参数更新的有效性。通过对诸多典型场景实施仿真

检测,全方位评定控制策略在复杂扰动环境中的动态行为特点和适应能力。

6.2 关键控制参数对稳定性的影响规律

控制系统当中,加权函数参数、自适应增益、辨识器遗忘因子这些关键参数会给闭环稳定性带来很大改变。通过参数扫描和灵敏度分析,可以探究各个参数在扰动抑制能力和稳定性裕度之间相互权衡的关系,建立起参数与稳定域之间的对应关系,从而找出确保稳定的参数可接受范围以及改良空间^[5]。针对不同扰动强度时参数界限的变动情况实施分析,表现参数选择对于系统鲁棒性和动态响应快慢的总体影响。依照这种影响规律分析得到的结论制定出控制参数调整的指导方针,协调好控制效果和稳定余量两方面的需求。

6.3 所提策略与现有方法的对比评估

对比评价所提出的自适应鲁棒控制策略,把它同经典PID控制、定参数 H_∞ 控制以及传统自适应控制等方法放在一起考量。给定同样的强随机扰动输入条件,从电压波动幅值、温度偏差、能量效率以及调节能耗等诸多方面来量化控制性能。凭借均方根误差、最大超调量以及稳定时间等统计指标,客观体现不同策略在扰动抑制和稳态精度上的差别。对比结果表明所提策略在应对多时间尺度耦合、适应不确定性以及协同抑制多源扰动时具有优势,显示出它在实际制氢系统控制中有应用的可能性。

7 结语

本文就强随机风光扰动情形下电解水制氢系统的自适应鲁棒控制及其稳定性问题展开研究,在扰动特性展示、多时间尺度建模、不确定性量化、稳定性机理分析、自适应鲁棒控制策略规划以及闭环稳定性分析等方面取得系统性成果。所提出的战略融合了扰动抑制性能与鲁棒稳定性,依据扰动在线识别和参数自适应机制提升了控制器针对复杂扰动的适应能力,借助多源扰动协同抑制达成了控制资源的改良设置。该项研究给优化电解水制氢系统在强随机扰动环境中的运行稳定性提供了理论手段和技术支持,对于推进绿氢制备系统的智能控制具备一定的参考意义。

参考文献

- [1] 梅建春,钱君霞,赵盛杰,等.考虑电解水制氢消纳弃风电量的制氢容量规划[J].湖北电力,2022,46(02):9-14.
- [2] 徐明,邵明飞,刘清雅,等.电解水制氢耦合碳酸盐还原展望[J].化工进展,2022,41(03):1121-1124.
- [3] 尤石,郑艺,黄纯军.电解水制氢在丹麦能源系统中的发展与应用[J].供用电,2022,39(01):2-7.
- [4] 杨阳,张胜中,王红涛.碱性电解水制氢关键材料研究进展[J].现代化工,2021,41(05):78-82+87.
- [5] 杨勤,刘建国,张晨佳,等.高温固体氧化物电解水制氢系统效率分析[J].电力电子技术,2020,54(12):28-31+36.