

引用格式: 周行, 王慧, 李昕芮, 等. 离网型新能源制氢系统中的储能配比 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(3): 154-162. ZHOU Hang, WANG Hui, LI Xinrui, et al. Energy storage ratio in off-grid renewable energy hydrogen production system [J]. Southern energy construction, 2025, 12(3): 154-162. DOI: [10.16516/j.cec.2024-432](https://doi.org/10.16516/j.cec.2024-432).

离网型新能源制氢系统中的储能配比

周行[✉], 王慧, 李昕芮, 李少华, 冯静, 汤晓舒, 周军

(中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要: [目的] 离网型新能源制氢项目不仅具有显著的减排效益, 还具备良好的产业示范与带动作用。然而, 离网电力系统及其在制氢领域的应用仍处于起步阶段。在项目设计阶段, 储能装置的容量配比将直接影响离网制氢系统的整体稳定性和制氢成本。目前, 尚无相关规范对储能容量配比作出明确规定。[方法] 文章在总结分析传统并网型电力系统特性的基础上, 提出了以新能源作为主要电源的离网型制氢系统的稳定条件。基于 ETAP 仿真平台, 建立了一套以电解槽为主要负载的离网制氢系统模型, 设置 3 种典型运行工况, 并分别模拟 10%、20%、30% 和 40% 共 4 种储能容量配比情形, 对系统的稳定性进行了对比分析。[结果] 仿真结果表明, 在构建的离网制氢系统中, 至少配置相当于新能源装机容量 20% 的储能组件, 才能有效平抑电源侧或负荷侧调节引起的波动, 并保障系统在运行过程中维持电压和频率的稳定。[结论] 储能容量配比超过 20% 时, 系统在调节或故障排除后, 其电压波动可控制在 3% 以内, 频率波动小于 ± 0.5 Hz。更高的储能配比有助于进一步降低电压或频率波动的峰值, 加快系统恢复稳定的速度。但目前尚无相关规范对储能配比上限作出限制, 实际配比仍需结合系统中其他设备的过载能力综合确定。

关键词: 新能源制氢; 离网电力系统; 离网制氢; 电化学储能; 制氢系统仿真

DOI: [10.16516/j.cec.2024-432](https://doi.org/10.16516/j.cec.2024-432)

文章编号: 2095-8676(2025)03-0154-09

CSTR: [32391.14.j.cec.2024-432](https://doi.org/10.16516/j.cec.2024-432)

中图分类号: TK91; TK01+9



论文二维码

Energy Storage Ratio in Off-Grid Renewable Energy Hydrogen Production System

ZHOU Hang[✉], WANG Hui, LI Xinrui, LI Shaohua, FENG Jing, TANG Xiaoshu, ZHOU Jun

(North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: [Objective] Off-grid new energy hydrogen production projects not only have significant emission reduction effects, but also serve as industrial demonstrations and driving forces. Off-grid power systems and their applications in the field of hydrogen production are still in their infancy. In the project design stage, the capacity ratio of energy storage devices will directly affect the overall stability and hydrogen production cost of off-grid hydrogen production systems. At present, there is no specification to clearly specify the energy storage ratio. [Method] Based on the summary and analysis of traditional grid-connected power systems, the stability conditions of off-grid hydrogen production systems primarily powered by new energy were proposed. In this study, an off-grid hydrogen production system with electrolyzer as the main load was established on the ETAP simulation platform. The simulation included three typical simulation conditions and energy storage ratios of 10%, 20%, 30% and 40%, and the system stability was compared and analyzed. [Results] The simulation results show that for the off-grid hydrogen production system constructed in this paper, it is necessary to configure energy storage components with at least 20% of the installed capacity of new energy to mitigate the fluctuations caused by the regulation of the system power supply or load end, and to ensure the stability of voltage and frequency in subsequent operation of the system. [Conclusion] More than 20% energy storage configuration can ensure that the system voltage fluctuation is less than 3% and the frequency fluctuation is within ± 0.5 Hz after system regulation or fault elimination. A higher energy storage ratio can effectively dampen the peak fluctuations in the system voltage or frequency, so that the system can recover faster, but there is no regulation to limit this, and

收稿日期: 2024-12-20 修回日期: 2025-03-11 网络首发日期: 2025-05-15

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司重大科技专项“离网型陆上风光制氢氨醇系统耦合与灵活性关键技术研究”(DG3-A02-2023)

it also depends on the overload multiples allowed by system components other than energy storage components.

Key words: renewable energy hydrogen production; off-grid power system; off-grid hydrogen production; electrochemical energy storage; hydrogen production system simulation

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

氢能作为一种清洁能源,具备多项显著优势,已成为二次能源领域的重要候选。氢气具有极高的燃烧热值,单位质量所释放的能量远超多数传统燃料,因此被视为高效的能源载体。其燃烧产物仅为水,不会排放二氧化碳等温室气体,环境友好性突出。氢能在应用领域表现出广泛的适应性,不仅可用于燃料电池汽车,还广泛应用于工业场景,如氨的合成、金属冶炼等。作为一种长期能源存储手段,氢能能够有效应对可再生能源出力不稳定的问题。通过“电-氢-电”路径,可在可再生能源富余时制取氢气,并在负荷高峰或电力短缺时释放能源,实现能量的跨时域调节与高效利用。在中国,氢能技术的发展正受到政府层面的高度重视与政策支持,相关规划和激励措施持续推动氢能在能源转型与碳减排进程中的应用拓展。未来,随着制氢、储氢与用氢等关键技术的不断进步,氢能有望在推动清洁能源体系构建与实现可持续发展目标中发挥更加重要的作用。

离网型风光制氢方案是指在氢气生产过程中不依赖传统电网,而是通过自建的风电与光伏发电系统,将风能和太阳能直接转化为氢能,生产绿色氢气(绿氢)。该方案的核心优势在于避免了对电网的负荷冲击,降低了可再生能源接入带来的电网波动性,有效减轻了电网调节压力。在内蒙古、宁夏等地政策支持下,离网型风光制氢有望成为绿氢产业的示范项目^[1]。政府的推动对新能源制氢技术的推广至关重要,有助于吸引投资、推动技术创新,并逐步形成可复制的商业模式。

目前,国内新能源制氢系统主要采用并网集中制氢方案,这是由于大电网提供了稳定的能源支持,且各类关键设备已较为成熟。相比之下,离网制氢系统无需接入电网,项目申报时可免于新能源并网审批,显著缩短建设周期,并在规模和容量设置上具备更大灵活性^[2]。特别是在电网未覆盖或覆盖薄弱的地区,离网制氢系统可通过多能互补,解决能源供

给难题。

关于离网型风光联合制氢系统的研究主要集中于系统结构与容量配置,相关探讨多基于能量平衡与经济性分析,涵盖仿真建模、控制策略和容量优化等方面。周行等^[3]提出了一种光伏耦合电解水制氢系统的建模方法,单独构建了电解槽模块。杨子龙等^[4]对离网式光伏电解制氢系统的供电单元进行了技术探讨,并分析了系统设计和控制中的重点问题。文献^[5]披露了宁波慈溪氢电耦合直流微网示范工程的部分配置情况,为本研究提供了重要参考。吴涛^[6]在深入分析风电制氢相关研究的基础上,提出了由风电机组、电解槽、蓄电池和功率变换器组成的创新离网系统结构。沈小军等^[7]探讨了电解槽在特定工况下的功率调节特性,提出了离网型风电制氢碱性电解槽阵列的轮值协调控制策略。刘斌和王炎^[8]提出了光伏直流离网制氢系统的优化方法,包括对发电系统、直流系统及制氢系统的整体优化。孔令国等^[9]构建了典型的离网电-氢耦合供能系统架构,其中的氢储能单元由碱性电解槽、储氢罐和质子交换膜燃料电池组成,并建立了系统的线性离散状态空间模型。何瑞东等^[10]考虑风、光、柴油机和储能的输出约束及启停成本,构建了离网微电网经济优化模型,并据此提出了优化策略。郝飞等^[11]研究了离网型微电网中“源-荷”匹配问题,在分析储能电池SOC变化趋势的基础上,提出了基于专家规则的控制方法,减少了对预测数据的依赖。王立娜等^[12]提出了一种组合蓄能的离网光伏发电系统及其优化配置与运行方法。郭旭东等^[13]研究了不平衡负载条件下离网双馈电机定/转子侧变换器的协调控制策略。文献^[14]提供了丹麦离网型风电制氢项目的部分配置信息。廖远旭等^[15]研究了绿氢综合能源管理平台,并对2021年内蒙古风光制氢示范项目进行了对比分析。孙翔等^[16]针对风光耦合制氢系统的典型设计方案进行了研究,提出了储能与发电容量的配置建议。张怀畅等^[17]对大规模光伏离网制氢系统的配置

进行了经济性分析,提出了优化方案。李琦等^[18]围绕离网风光制氢系统的运行效率和容量配置建立了系统模型,并提出优化措施。杨子龙等^[4]则系统阐述了光伏直流离网制氢的系统特性与设计要点。

上述文献多聚焦于新能源制氢系统整体结构设计与配置,特别是在电解槽、储氢设备及控制系统等方面展开了深入研究。然而,针对离网型制氢系统中的电气设备配置、供电平衡及储能系统优化的探讨仍较为有限。由于该类系统在国内尚处于起步阶段,实践案例和可借鉴的文献较为匮乏,导致在设计离网型新能源制氢系统时,缺乏成熟的设计原则和典型参考方案。

构网型储能组件是保障离网型新能源电力系统稳定运行的关键,其容量配置直接关系到电能质量、制氢效率及工艺系统的安全性,同时也显著影响制氢成本。本文以离网型新能源制氢系统为研究对象,在总结离网型与传统并网型电力系统特征的基础上,重点探讨离网制氢系统的稳定运行条件,并对不同储能容量配置方案下的系统运行性能进行分析比较。

1 离网型新能源制氢系统特点

1.1 离网型新能源制氢系统的基本结构

离网风光制氢系统,其结构如图1所示,所依赖的风能和太阳能资源都存在自然波动性,导致电源出力不稳定。制氢系统可以通过调节各电解槽运行负荷及投切可实现较好的灵活性。当风光发电功率波动时,电解槽随之调整负荷,尽量实现功率平衡。目前离网系统在运行时,一般由构网型储能电源担负组网电源,建立并维持系统的电压与频率。使用储能组件担任组网电源时,控制上更为灵活、便捷,通过灵活快速调整有功/无功功率,可以在一定程度上抑制新能源的波动性,从而提高整个系统的稳定性。

1.2 离网型新能源制氢系统的稳定条件

根据《电力系统安全稳定导则》(GB 38755—2019)^[19]以及《电力系统安全稳定计算规范》(GB/T 40581—2021)^[20],为保证电力系统运行的稳定性,维持电力系统频率、电压的正常水平,系统应有足够的静态稳定储备和有功功率、无功功率备用容量。根据电力系统失稳的物理特性、受扰动的大小以及研究稳定问题应考虑的设备、过程和时间框架,电力系统稳定可分为功角稳定、电压稳定和频率稳定3大

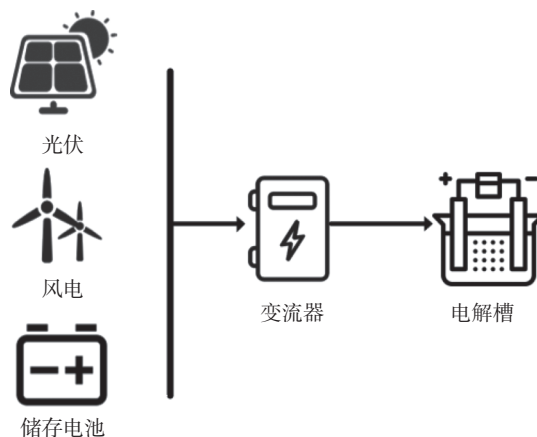


图1 离网型新能源制氢系统的基本结构

Fig. 1 The basic structure of off-grid new energy hydrogen production system

类以及若干子类。

在传统电力系统规范的基础上,离网型新能源电力系统的稳定条件基本遵循以下几点:

1)相比大电网,离网系统运行的主要风险来自于内部功率不平衡。如果系统内电源机组输出功率与负荷需求功率之间的不平衡较大,且超出机组的调节能力,离网系统将难以维持稳定运行。因此,在离网型项目的系统设计中,应合理配置电源与负荷,并在系统运行过程中尽量实现功率平衡或保持较小的不平衡量,以保障离网系统的稳定性。

2)根据国家标准《电能质量 电力系统频率偏差》(GB/T 15945),电力系统正常运行条件下,频率偏差限值为 ± 0.2 Hz。当系统容量较小时,频率偏差限值可放宽至 ± 0.5 Hz。考虑到国家标准主要针对大电网运行制定,对于特定的孤立电网,系统稳态运行对频率的要求,根据系统内电源和负荷长期稳定运行的需要来具体分析:首先,稳态运行频率需要满足系统内电源机组长期运行所允许的频率变动范围;其次,稳态运行频率需要保证系统内所有负荷可靠运行情况下对频率变动范围的要求。

3)离网系统运行的频率主要取决于电源有功功率,由于无功不平衡可以通过就地补偿解决,离网系统运行的频率和电压变化特性主要与有功功率不平衡有关。

4)离网型系统对紧急控制措施及暂态频率的要求:电力系统在实际可能的各种运行情况下,因故障突然发生有功缺额后,导致系统频率严重下降时,应

及时切除相应容量的部分负荷,使保留运行的负荷容量能与运行中的发电容量相适应,系统频率能够恢复到额定频率附近继续运行,不发生频率崩溃,也不使事件后的系统频率长期处于某一过高或过低数值。

5)为了维持离网系统电压水平,保持电压稳定,必须具备足够的无功容量。因此,应该对系统的无功补偿容量进行计算分析,判断是否能够满足无功平衡的需要。此外,由于电压稳定问题还和系统的运行方式及负荷的特性有关,对电压稳定的分析需要针对具体的情况进行研究。

1.3 构网型储能在离网型新能源制氢系统中的应用

新能源发电与同步发电机发电有着本质区别,现有的新能源基本不具备惯量支撑能力。风、光等新能源发电需要依靠变流器和逆变器并入电网,这些电力电子变流设备具有控制灵活、响应迅速等优点,但随着电力系统中电力电子设备的增多,这些装置本身低惯量、低阻尼、弱电压支撑的特点会对电力系统的稳定运行造成影响。

根据控制方式的不同,储能组件可以分为跟网型和构网型。目前大多数储能组件采用跟网型储能,与电网同步需要锁相环测量并网点的相位信息,在弱电网中存在稳定问题。在系统强度弱、物理惯性低的电网中,储能组件宜采用构网型储能。与跟网型储能相比,构网型储能具有可提供同步电压电流,为系统提供虚拟惯性等优势;在极端环境下,还可以提供故障穿越、黑启动及有功、无功稳定功能,保障系统稳定。

构网型储能可以让储能实现类似同步发电机的运行特性,在电力系统发生扰动的前、中、后各阶段,主动构建起系统稳定运行必需的电势。

构网型储能除考虑系统稳定性的安全方面外还需要考虑其经济性。离网型新能源制氢系统因为无大电网支持,且受限于储氢规模,很难做到长期能量平衡。如果完全依赖储能装置维持系统负荷稳定运行会导致储能容量过大以及降低经济性。所以在新能源发电端存在波动的情况下,需要负荷具备柔性调节的能力,比如通过荷随源动的控制方式对电解槽进行升降负荷的调节。

2 离网型新能源制氢系统电力系统稳定性仿真分析

2.1 ETAP 平台下的仿真建模

ETAP 是电力电气分析、电能管理的综合分析软件系统的简称。该软件较为全面,包含了发电和工业电力电气系统的规划、设计、分析、计算、运行、模拟等全面的模拟分析。本研究的仿真部分主要利用了软件中的暂态稳定模块,针对波动电源和暂态故障下的系统稳定性进行了仿真模拟。

本研究在 ETAP 仿真平台建立了一套离网型新能源制氢系统的仿真模型,模型参数见表 1。模型包括对风机、构网型储能模块、储能整流变压器、储能整流器、电解槽单元、动态无功补偿装置(SVG)的建模。为补偿设备带来的无功损耗,在 35 kV 母线段上加装了容量为 3.25 Mvar 的动态无功补偿装置。

表 1 ETAP 系统模型参数
Tab. 1 ETAP system model parameters

名称	数值
新能源装机容量/MW	25(4×6.25 MW风机)
制氢装机容量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	2×1 500
制氢装机容量/MW	7.4
制氢公辅用电/MW	1.48

如图 2 所示,新能源发电侧包含 4 台风机,4 台风机通过风机箱式变压器升压后连接 35 kV 母线。共 1 个储能电池模块,储能电池模块出口侧连接 PLC(双向逆变器)入口侧,PLC(双向逆变器)出口侧连接储能变压器低压侧,储能变压器高压侧连接 35 kV 母线。共 2 个电解槽模块,及 1 个公辅供电模块,电解槽和公辅模块连接 35 kV 母线,电解槽模块为包含整流器、整流变压器的交流负载模块。

2.2 系统稳定性仿真分析

系统稳定性分析主要包括系统静态功率波动工况下和暂态故障下系统的稳定性,主要目的是验证储能系统功率配置的合理性。本研究选取了 3 种典型仿真工况,对离网系统运行时可能发生的电源侧波动、负荷侧跌落等常见情况进行了仿真。仿真时长为 10 s。系统初始状态,风机运行在额定风速的 77%,单台输出功率约为 4 MW,电解槽及电解槽公辅用电处于满负荷,系统内有功功率和无功功率处

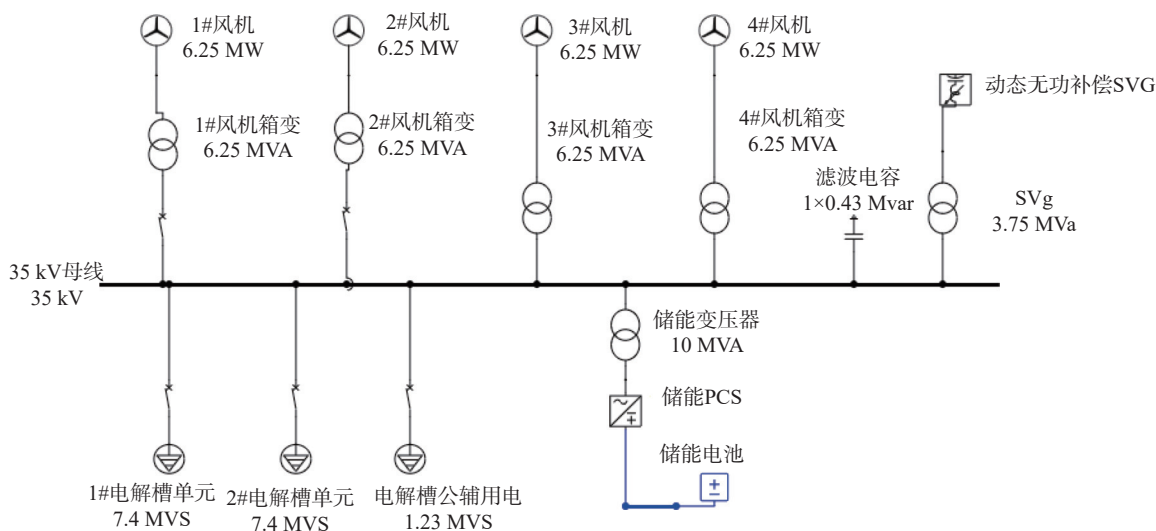


图2 ETAP 仿真模型图

Fig. 2 ETAP simulation model diagram

于平衡状态。系统正常工作频率为 50 Hz。

仿真工况(1)正常风电发电功率波动 25%, 制氢负载 3 s 后同步波动。

此工况中 1 号风机在仿真开始时处于停机状态, 1 号电解槽负荷率约为 40%, 仿真第 1 s 时风机上线。1 号电解槽在仿真第 4 s 时提升负荷率至 100%。需要说明的是, 本研究采用了荷随源动的控制策略, 但需要考虑控制系统信号传递所带来的延迟, 延迟时间设定为 3 s。本研究主要针对在工况下的离网制氢电力系统的稳定分析, 所以 3 s 的延迟时间不涵盖风机功率调节和电解槽功率调节所需要的时间。

仿真工况(2)电解槽符合率降低 50%, 风机功率 3 s 后同步变化。

此工况中 1 号电解槽在仿真开始的第 1 s 切除, 1 号风机和 2 号风机在第 4 s 时切除。

仿真工况(3)额定负荷情况下风机线路高压侧母线单相接地不对称故障。

此工况中 1 号风机箱变高压侧在仿真开始的第 1 s 设置了母线单相接地不对称故障, 并在 0.12 s 后清除了此故障。

仿真工况(1)

通过图 3 仿真结果可以发现, 需要配置至少 20% 储能才可以使电压在系统完成调节后趋于稳定。风机上线后产生了瞬间电压波动, 此时系统处于过载状态, 系统电压升高。在储能系统的作用下及电解槽符合率上升后, 系统电压趋于稳定。10% 储能

情况下的系统电压处于失稳状态。对比高比例储能的情况, 30% 储能或以上可更好平抑风机上线后产生的瞬间电压波动峰值, 以及在系统在完成调节后更快平稳电压。

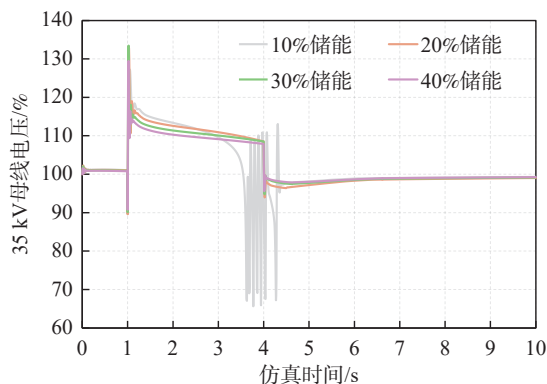


图3 仿真工况(1)35 kV 母线电压仿真结果

Fig. 3 Simulation condition (1) 35 kV bus voltage simulation result

图 4 为储能组件的无功功率输出仿真结果, 在产生波动时, 储能组件输出无功功率并提供惯量来平移电压波动。

图 5 表明, 20% 以上储能情况下, 系统频率波动不明显, 在系统完成调节后频率稳定, 变化范围 <1%。

储能组件的有功功率输出如图 6 所示, 更大的储能配比可提供更高的有功功率输出, 并可以有效减少频率的波动峰值。

仿真工况(2)

如图 7 所示, 与工况(1)情况近似, 当负荷端变

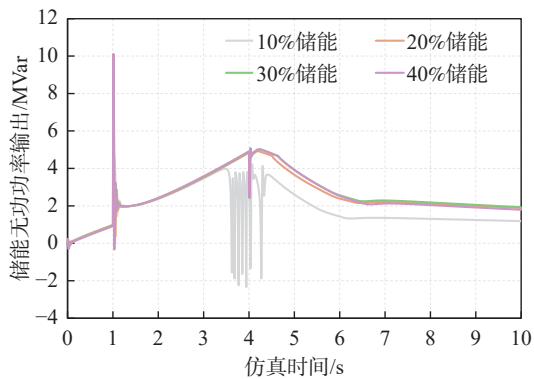


图4 仿真工况(1)储能组件无功功率输出

Fig. 4 Simulation condition (1) reactive power output of energy storage components

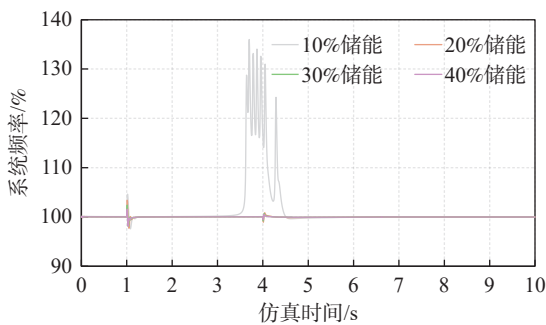


图5 仿真工况(1)系统频率仿真结果

Fig. 5 Simulation condition (1) system frequency simulation result

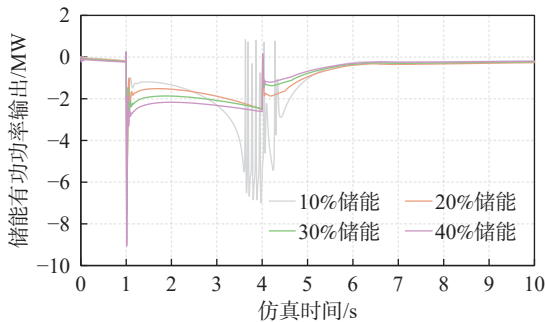


图6 仿真工况(1)储能组件有功功率输出

Fig. 6 Simulation condition (1) active power output of energy storage components

化时,系统电压发生短暂过载并在发电端调节后趋于稳定。除40%储能外,在发电端完成调节之前,电压过载率均高于20%。如图8所示,与工况(1)相比,储能无功输出更低。

图9~图10表明,当负荷端产生较大变化时,系统频率也会遭遇较大波动,在10%储能情况下,波动峰值为+3%, -1.5%。高比例储能可降低频率波动

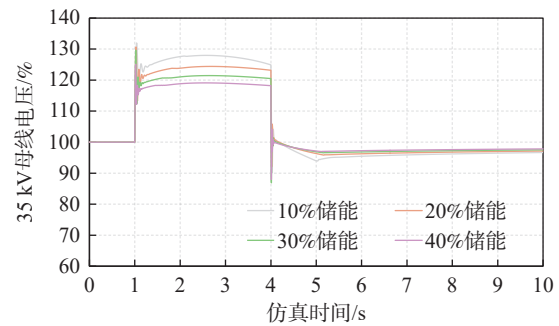


图7 仿真工况(2)35 kV 母线电压仿真结果

Fig. 7 Simulation condition (2) 35 kV bus voltage simulation result

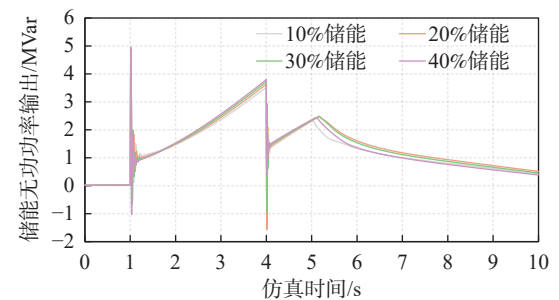


图8 仿真工况(2)储能组件无功功率输出

Fig. 8 Simulation condition (2) reactive power output of energy storage components

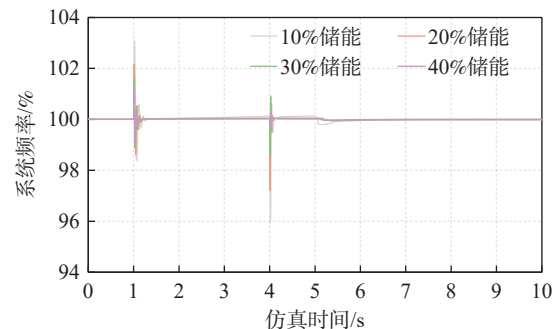


图9 仿真工况(2)系统频率仿真结果

Fig. 9 Simulation condition (2) system frequency simulation result

峰值。与工况(1)相比,储能系统需要在电解槽切除后吸收风机的有功功率输出,高比例的储能可吸收更多的多余有功功率,从而降低频率波动峰值。

仿真工况(3)

图11为仿真工况(3)35 kV 母线电压在不同储能配比情况下的仿真结果。风机高压侧母线单相故障在排除前带来了很大的电压波动,小于20%储能的情况下无法使得系统电压稳定,系统电压在故障排除后产生了震荡现象,储能组件无法通过无功功率调节平抑波动,见图12。20%及以上的储能配置

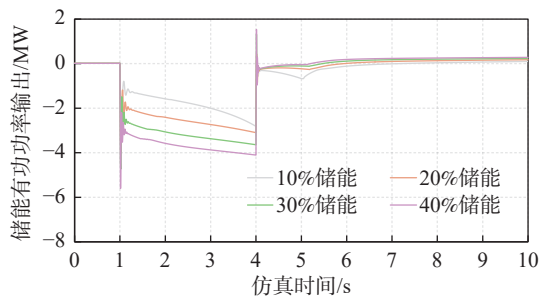


图 10 仿真工况(2)储能组件有功功率输出

Fig. 10 Simulation condition (2) active power output of energy storage components

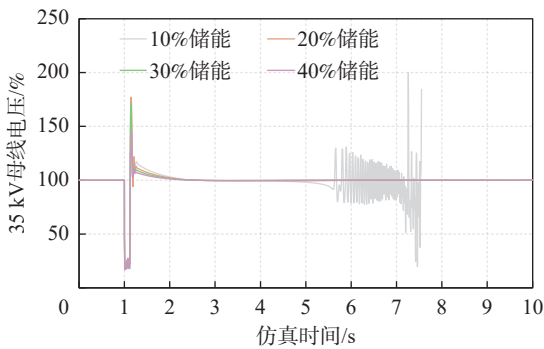


图 11 仿真工况(3)35 kV 母线电压仿真结果

Fig. 11 Simulation condition (3) 35 kV bus voltage simulation result

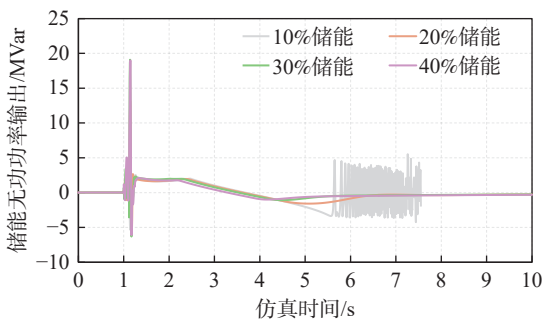


图 12 仿真工况(3)储能组件无功功率输出

Fig. 12 Simulation condition (3) reactive power output of energy storage components

可以平稳电压,区别在于在故障排除后导致的电压波动峰值。

如图 13,在较低储能配比的情况下,系统频率产生崩溃,并由于激增电流的原因产生较大波动。如图 14,储能组件需要发生波动时吸收多余的有功功率,储能组件允许短时间过载,以平抑频率的波动。

2.3 系统经济性分析

本文中所设计项目主要包含 2 台 1500 Nm³/h 的

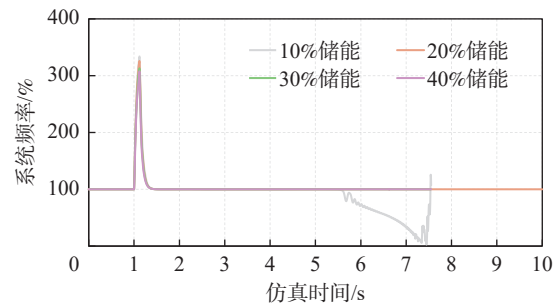


图 13 仿真工况(3)系统频率仿真结果

Fig. 13 Simulation condition (3) system frequency simulation result

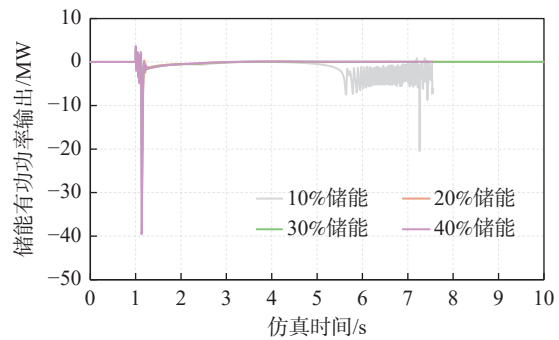


图 14 仿真工况(3)储能组件有功功率输出

Fig. 14 Simulation condition (3) active power output of energy storage components

碱性电解槽,制氢工程部分按 300 万元/MW 计算,制氢部分投资金额约 4500 万元。风电部分包含 4 台额定功率在 6.25 MW 的风机,投资金额约为 8500 万元。储能部分按 1 元/Wh 计算,投资估算见表 2,每增加 10% 储能对应增加投资占比约 1.6 个百分点。

表 2 储能部分投资估算

Tab. 2 Estimation of energy storage investment

储能比例/%	投资/万元	占项目总投资比例/%
40	1 000	7.1
30	750	5.5
20	500	3.7
10	250	1.9

3 结论

本文对离网型新能源制氢系统基本结构和特点进行了阐述。通过对离网型电力系统的稳定条件进行归纳和总结,得知系统稳定因素主要取决于系统电压和频率。本文还探讨了构网型储能能离网电力

系统中的作用,为探究不同储能比对离网型新能源制氢系统稳定性的影响,在 ETAP 仿真平台下建立了一套以电解槽为主要负载的离网制氢系统。仿真包含 3 种典型仿真工况及 10%、20%、30% 和 40% 储能配比,并对系统稳定性进行了对比分析。仿真采用荷随源动的控制策略,目的是保证系统功率平衡。仿真结果表明,对于本文中构建的离网制氢系统,需要配置至少 20% 新能源装机容量的储能组件才能平抑系统电源端或负荷端调节所带来的波动,并保证系统在后续运行中保持电压及频率的稳定。20% 以上的储能配置可保证在系统调节后或故障排除后系统电压波动 $<3\%$,频率波动小于 ± 0.5 Hz。通过仿真结果可得知,更高的储能配比可以有效平抑系统电压或频率产生波动时的峰值,使系统可以更快恢复平稳,从而增加系统的安全稳定性,但是会极大降低制氢的经济性。根据对文中提及的项目规划,每增加 10% 对应增加总投资的 1.6%。此外,储能的配比也取决于除储能组件外的系统组件所允许的过载倍数。如果系统内组件工作时允许一定范围内的电压及频率波动,那么降低储能的比率也将存在可能性,从而提高制氢经济性。其他因素如系统中存在线路阻抗、谐波、或系统组件损耗效率等问题,也会一定程度上影响储能配置的占比,此部分的工作将建立在未来更加完善的仿真模型上。

参考文献:

- [1] 于硕,郭琦,李强,等.基于电氢融合破解长周期电力电量平衡问题的构想[J].内蒙古电力技术,2025,43(1):24-31. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0005.
- YU S, GUO Q, LI Q, et al. Conception of resolving long-term electric power and energy balance problems based on electricity-hydrogen integration [J]. Inner Mongolia electric power, 2025, 43(1): 24-31. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0005.
- [2] 曹蕃,郭婷婷,陈坤洋,等.风电耦合制氢技术进展与发展前景[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2187-2200. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200452.
- CAO F, GUO T T, CHEN K Y, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2187-2200. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200452.
- [3] 周行,李少华,王慧,等.光伏耦合电解水制氢系统的建模与仿真[J].南方能源建设,2023,10(3):104-111. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011.
- ZHOU H, LI S H, WANG H, et al. Modelling and simulation of photovoltaic coupling water electrolysis hydrogen production system [J]. Southern energy construction, 2023, 10(3): 104-111. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011.
- [4] 杨子龙,赵勇,雷鸣宇,等.离网式光伏电解制氢系统供电单元设计技术探讨[J].供用电,2022,39(1):24-30. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.01.004.
- YANG Z L, ZHAO Y, LEI M Y, et al. Study on design technologies for power supply part in hydrogen production system powered by stand-alone PV [J]. Distribution & utilization, 2022, 39(1): 24-30. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.01.004.
- [5] 浙江仁欣环科院有限公司.宁波慈溪氢电耦合直流微网示范工程环境影响报告书[R].宁波:浙江仁欣环科院有限公司,2022.
- Zhejiang Renxin Environmental Science Institute Co., Ltd. Environmental impact report of Ningbo Cixi hydrogen-electricity coupled DC microgrid demonstration project [R]. Ningbo: Zhejiang Renxin Environmental Science Institute Co., Ltd., 2022.
- [6] 吴涛.离网型风电制氢系统功率变换及控制技术研究[D].北京:中国科学院大学,2018.
- WU T. Research on power conversion and control technology of off-grid wind power hydrogen production system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [7] 沈小军,聂聪颖,吕洪.计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略[J].电工技术学报,2021,36(3):463-472. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200283.
- SHEN X J, NIE C Y, LÜ H. Coordination control strategy of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer bank considering electrothermal characteristics [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(3): 463-472. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200283.
- [8] 刘斌,王炎.光伏直流离网制氢系统及其控制方法[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2021(12):3463-3464. DOI: 10.12277/j.issn.1673-7075.2021.12.1724.
- LIU B, WANG Y. Photovoltaic DC off-grid hydrogen production system and its control method [J]. Computer fan, 2021(12): 3463-3464. DOI: 10.12277/j.issn.1673-7075.2021.12.1724.
- [9] 孔令国,于家敏,蔡国伟,等.基于模型预测控制的离网电氢耦合系统功率调控[J].中国电机工程学报,2021,41(9):3139-3148. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200874.
- KONG L G, YU J M, CAI G W, et al. Power regulation of off-grid electro-hydrogen coupled system based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3139-3148. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200874.
- [10] 何瑞东,周文,路艳巧,等.离网型微电网优化运行策略研究[J].电气传动,2021,51(12):59-65,80. DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqed21309.
- HE R D, ZHOU W, LU Y Q, et al. Research on optimal operation strategy of islanded microgrid [J]. Electric drive, 2021, 51(12): 59-65, 80. DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqed21309.
- [11] 郝飞,袁贞,袁志彬,等.离网型微电网稳态功率控制策略研究

- 与实践 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 173-179. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202019.
- HAO F, YUAN Z, YUAN Z B, et al. Research and practice on off-grid microgrid steady power control strategy [J]. *Power system protection and control*, 2020, 48(22): 173-179. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202019.
- [12] 王立娜, 周克亮, 卢闻州, 等. 离网型组合蓄能光伏发电系统 [J]. *江苏电机工程*, 2009, 28(增刊1): 53-57. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0665.2009.z1.014.
- WANG L N, ZHOU K L, LU W Z, et al. Off-grid combined energy storage photovoltaic power generation system [J]. *Jiangsu electrical engineering*, 2009, 28(Suppl. 1): 53-57. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0665.2009.z1.014.
- [13] 郭旭东, 申群太, 韩华. 一种离网型风力发电系统的不平衡控制策略 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(8): 1886-1893. DOI: 10.3969/j.issn.0254-3087.2013.08.028.
- GUO X D, SHEN Q T, HAN H. Control scheme for stand-alone wind energy conversion system under unbalanced condition [J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 2013, 34(8): 1886-1893. DOI: 10.3969/j.issn.0254-3087.2013.08.028.
- [14] Erneuerbare Energien Schleswig-Holstein. Green hydrogen unlocked: the brande hydrogen project [R]. Berlin: Erneuerbare Energien Schleswig-Holstein, 2020.
- [15] 廖远旭, 董英瑞, 孙翔, 等. 可再生能源制氢综合能源管理平台研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 47-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.006.
- LIAO Y X, DONG Y R, SUN X, et al. Research on comprehensive energy management platform for hydrogen production from renewable energy [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 47-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.006.
- [16] 孙翔, 刘成良, 牛霞, 等. 风光耦合制氢系统典型设计方案研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(3): 112-119. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.012.
- SUN X, LIU C L, NIU X, et al. Research on typical design of wind-solar coupled hydrogen production system [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(3): 112-119. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.012.
- [17] 张怀畅, 徐斌. 大规模光伏离网制氢各要素配置策略优化研究——以宁夏太阳山开发区为例 [J]. *西北工程技术学报*, 2024, 23(4): 372-378. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7244.2024.04.012.
- ZHANG H C, XU B. Optimization of configuration strategies for large scale photovoltaic off-grid hydrogen production: Take Taiyangshan development area as an example [J]. *Journal of northwestern engineering technology*, 2024, 23(4): 372-378. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7244.2024.04.012.
- [18] 李琦, 韩运滨, 白章, 等. 离网型风光发电联合制氢系统的协调运行策略与容量配置优化 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(20): 8136-8145. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.231183.
- LI Q, HAN Y B, BAI Z, et al. Coordination operation strategy and capacity optimization of off-grid wind-solar hybrid hydrogen production system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(20): 8136-8145. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.231183.
- [19] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Code on security and stability for power system: GB 38755—2019 [S]. Beijing: China Standard Press, 2019.
- [20] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定计算规范: GB/T 40581—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Calculation specification for power system security and stability: GB/T 40581—2021 [S]. Beijing: China Standard Press, 2021.

作者简介:



周行

周行 (第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 工程师, 博士, 主要从事氢能、新能源研究工作 (email) zhouhang@ncpe.com.cn。

(编辑 徐嘉铖)