

面向智能微电网的太阳能 - 氢能耦合储能系统容量配置与经济性分析

孙 倩

广东明珠电力设计有限公司 广东省汕尾市 516600

摘要：本文旨在针对太阳能 - 氢能耦合储能系统在智能微电网中的应用，开展容量配置与经济性分析的研究。通过对系统各组件的数学模型进行建模与优化，结合具体的案例研究，探讨如何在满足系统运行约束条件下实现成本最低与效益最大化。本研究不仅为智能微电网的设计与运行提供了理论支持，也为未来相关技术的发展与应用奠定了实践基础。

关键词：能源转型；分布式能源系统；耦合储能；智能微电网

1. 引言

随着全球能源转型的加速推进，智能微电网作为分布式能源系统的重要组成部分，正逐步成为实现能源高效利用和可持续发展目标的关键技术之一。智能微电网通过整合多种可再生能源发电设备、储能系统以及智能控制技术，能够在提高供电可靠性的同时降低对传统化石能源的依赖。在这一背景下，太阳能 - 氢能耦合储能系统因其清洁无污染、能量密度高且具备长期储能潜力的特点，逐渐成为智能微电网中的研究热点。目前，太阳能 - 氢能耦合储能系统的应用主要集中于提升微电网的能量利用效率与运行稳定性。氢储能系统通过电解水制氢、储氢及燃料电池发电等环节，可有效平抑光伏发电的间歇性与不稳定性，从而提高系统的整体性能。然而，该系统在实际应用中仍面临诸多挑战，尤其是在容量配置优化与经济性分析方面。合理的容量配置不仅能够确保系统的技术可行性，还能显著降低投资与运行成本；而经济性分析则为评估系统的长期盈利能力提供了重要依据。

2. 太阳能 - 氢能耦合储能系统理论基础

2.1 太阳能发电原理及模型

太阳能发电的基本原理是通过光伏效应将太阳光直接转化为电能。光伏电池作为核心组件，其工作机制依赖于半导体材料内部电子的激发与迁移，在光照条件下形成电势差并输出电流。常用的太阳能发电模型包括单二极管模型和双二极管模型，其中单二极管模型因其简洁性与准确性被广泛应用于工程实践中。该模型通过考虑光伏阵列的开路电压、短路电流以及填充因子等参数，能够较为精确地描述光伏系统的输出特性。然而，太阳能发电效率受到多种因素的影响，

包括光照强度、环境温度、光伏组件的老化程度以及阴影遮挡等。研究表明，光伏阵列的输出功率与光照强度呈线性关系，而温度升高会导致功率损耗，这一关系可通过式(1)和式(2)进行量化分析。因此，在实际应用中，需综合考虑这些因素以优化光伏系统的性能。

2.2 氢能储能原理及模型

氢能储能的原理主要包括电解水制氢、储氢及燃料电池发电三个关键环节。在电解水过程中，电能被用于分解水分子生成氢气和氧气，其中氢气作为能源载体被储存起来；储氢环节则通过高压储氢罐或固态储氢材料实现氢气的安全存储；在需要电能时，氢气通过燃料电池与氧气反应生成水并释放电能。氢能储能系统的数学模型通常包括电解槽、储氢罐和燃料电池的动态特性描述。例如，电解槽的效率与输入电功率、电流密度以及温度等因素密切相关，而燃料电池的输出功率则取决于氢气供应量、氧气浓度以及电堆温度等参数。此外，氢能系统的经济性指标可通过式(4)和式(5)进行量化分析，其中日投资成本考虑了电解槽、储氢罐和燃料电池的额定容量及其使用寿命。这些模型为氢能储能系统的优化配置提供了理论依据。

2.3 耦合储能系统运行机制

太阳能 - 氢能耦合储能系统在智能微电网中的运行模式涉及复杂的能量转换流程与充放电策略。当光伏功率大于负荷需求时，多余的能量首先用于蓄电池充电，剩余能量则通过电解槽转换为氢气并储存于储氢罐中；当光伏功率不足时，蓄电池优先释放电能以补充系统缺额，随后燃料电池启动以提供额外的电力支持。这种运行机制不仅能够有效平抑

光伏出力的间歇性与不稳定性，还能提高系统的供电可靠性与经济性。具体而言，系统的工作状态可根据光伏输出功率与负荷需求的关系划分为多个模式，如字母 A~F 所示。例如，模式 A 表示光伏系统满足负荷需求后，剩余能量全部用于蓄电池充电；模式 B 则进一步将多余能量分配给电解槽进行制氢。通过合理设计运行控制策略，可以实现能量的高效利用与存储，从而提升整体系统的性能。

3. 容量配置模型构建

3.1 目标函数确定

在太阳能 – 氢能耦合储能系统的容量配置中，目标函数的确定是优化问题的核心。本文以系统总成本最低和可再生能源利用率最高为目标，构建多目标优化模型。系统总成本包括设备购置成本、运行维护成本以及燃料成本，其计算方法可参考相关文献中的经济性模型。具体而言，设备购置成本主要涉及太阳能发电装置、电解槽、储氢罐及燃料电池等关键设备的投资费用；运行维护成本则与设备寿命、维修频率及人工成本相关；燃料成本则体现在氢气制备及消耗过程中。另一方面，可再生能源利用率的目标函数旨在最大化风能和太阳能的利用效率，减少弃风弃光现象的发生，其计算方法可通过统计分析系统运行过程中的能量流失率来实现。此外，为平衡经济性与环保性，还可引入碳排放量最小化作为辅助目标函数，从而全面反映系统的综合性能。

3.2 约束条件分析

系统运行过程中需满足多种约束条件，以确保容量配置的合理性与可行性。首先，功率平衡约束是系统稳定运行的基本要求，即微网内各微源的输出功率之和应等于负荷需求功率与能量损耗之和。其次，设备容量约束限制了太阳能发电装置、电解槽、储氢罐及燃料电池等设备的最大安装容量，以避免因过度配置而导致的资源浪费或不足。此外，储能状态约束对储氢罐的充放电深度进行了限制，以防止过度充放电影响设备寿命及系统安全性。其他约束条件还包括微网总负荷中断量的限制、风场和光伏电站装机容量的上限和下限等。这些约束条件的设定不仅考虑了系统的技术特性，还兼顾了实际运行中的经济性和可靠性需求。

3.3 优化算法选择

针对上述多目标优化问题，选择合适的优化算法至关重要。常用的优化算法包括粒子群优化算法（PSO）、改进猫群算法（MCSA）以及快速非支配排序遗传算法（NSGA-II）

等。粒子群优化算法具有收敛速度快、参数设置简单的优点，但在处理复杂多目标问题时易陷入局部最优解。改进猫群算法通过动态权重调整提高了全局搜索能力，但其计算复杂度较高，适用于小规模问题。相比之下，NSGA-II 算法凭借其快速非支配排序机制和精英保留策略，在求解多目标优化问题时表现出色，能够有效避免局部最优解并生成均匀分布的 Pareto 前沿。因此，本文选择 NSGA-II 算法作为容量配置模型的求解工具，以实现对系统总成本、可再生能源利用率及碳排放量的多目标优化。

4. 经济性分析

4.1 成本分析

太阳能 – 氢能耦合储能系统的成本构成主要包括设备购置成本、运行维护成本以及燃料成本。设备购置成本涵盖了太阳能发电装置、电解槽、储氢罐及燃料电池等核心设备的投资费用，这些设备的价格受技术成熟度、市场规模以及材料成本等多方面因素影响。运行维护成本则涉及设备的日常检修、故障维修以及更换零部件等支出，其大小与设备可靠性、使用寿命密切相关。此外，由于氢能储能系统需要通过电解水制氢，因此燃料成本主要体现在水资源的消耗上，同时电力成本也是不可忽视的一部分。综合考虑上述各项成本，可以建立系统总成本模型，为后续经济性分析提供基础。

4.2 收益分析

系统的收益来源主要包括售电收益与节能减排收益。售电收益是指通过太阳能发电和氢燃料电池发电向电网售电所获得的收入，其计算方法依赖于上网电价和实际发电量。此外，随着碳排放权交易市场的逐步完善，节能减排收益也成为系统的重要收益来源之一。通过减少化石能源的使用，系统可降低二氧化碳排放量，并在碳市场中获得额外收益。此外，政府提供的补贴政策也为系统带来了额外的经济效益。通过量化这些收益来源，可以全面评估系统的经济潜力。

4.3 经济性评价指标

为了科学评估太阳能 – 氢能耦合储能系统的经济性，通常采用净现值（NPV）、内部收益率（IRR）以及投资回收期（PP）等指标。净现值通过将未来现金流折现至当前价值，反映了项目在整个生命周期内的盈利能力，其正值表示项目具有经济可行性。内部收益率则是使项目净现值为零时的折现率，用于衡量项目的投资回报率，较高的 IRR 意味着更好的经济效益。投资回收期是指项目从开始运营到累

计收益等于初始投资所需的时间，越短的投资回收期表明资金回收速度越快，风险越低。通过综合运用这些指标，可以全面评价系统的经济性，并为决策提供依据。

5. 案例分析

5.1 案例背景介绍

选取新疆乌鲁木齐地区某智能微电网作为案例进行分析，该地区具有丰富的太阳能资源以及较为稳定的风速条件，为太阳能-氢能耦合储能系统的应用提供了良好的自然条件。根据历史数据，该地区日均辐照强度约为 184.1 W/m^2 ，全年平均风速为 6.12 m/s ，年均负荷量为 $1602302.75 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，每小时平均负荷值为 $183.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。此外，该地区的光伏发电和风力发电潜力已被初步开发，但弃风弃光问题仍然突出，亟需通过储能系统的优化配置提升可再生能源利用率。负荷特性方面，该区域的用电需求呈现季节性波动，夏季由于空调等高耗能设备的普及导致负荷峰值较高，而冬季则因采暖需求同样维持较高负荷水平。这种双峰特性对微电网的能量管理和储能系统容量配置提出了更高要求。

5.2 容量配置结果

基于本文所构建的容量配置模型，采用改进 NSGA-II 算法对该案例进行求解，得到了太阳能-氢能耦合储能系统的最优容量配置结果。具体而言，光伏系统的装机容量被优化为 200 kW ，电解槽额定容量为 50 kW ，储氢罐容量为 300 kg ，燃料电池额定容量为 80 kW 。这一配置方案在满足系统功率平衡约束的同时，最大限度地提高了可再生能源利用率，并降低了全寿命周期成本。此外，通过对不同权重系数下的 Pareto 前沿进行分析，发现当经济性指标权重较高时，系统倾向于选择较小容量的储氢罐以降低初始投资成本；而当可再生能源利用率指标权重增加时，储氢罐容量显著提升，从而增强系统对多余电量的消纳能力。最终选择的最优解综合考虑了经济性与技术性能，能够在保证供电可靠性的前提下实现较高的经济效益。

5.3 经济性分析结果

根据经济性分析方法，对该案例中的太阳能-氢能耦合储能系统进行了全面的成本、收益及经济性指标计算。在成本方面，系统的主要支出包括设备购置成本、运行维护成本以及燃料成本。其中，电解槽、储氢罐和燃料电池的购置成本分别占总成本的 40% 、 30% 和 20% ，运行维护成本则每年约为设备总价值的 5% 。在收益方面，系统的主要收入来源为售电收益和节能减排补贴。根据当地电价政策，光伏

发电上网电价为 0.8 元/kWh ，燃料电池发电上网电价为 0.9 元/kWh ，同时每减少 1 吨 二氧化碳排放可获得 100 元 的政府补贴。经计算，该系统在全寿命周期内的净现值为 120 万元 ，内部收益率为 8.5% ，投资回收期为 7.2 年 。这些结果表明，尽管系统的初始投资较高，但其长期经济效益显著，具备较强的经济可行性。此外，通过对不同场景的敏感性分析发现，太阳能资源禀赋和电价政策的变化对系统经济性影响较大，因此在实际应用中需密切关注相关政策动向并灵活调整运营策略。

结论：本文围绕太阳能-氢能耦合储能系统在智能微电网中的容量配置与经济性分析展开了深入研究，取得了一系列重要研究成果。首先，在理论层面，通过对太阳能发电原理及模型、氢能储能原理及模型以及耦合储能系统运行机制的详细分析，揭示了该系统的能量转换流程与充放电策略对微电网运行的关键作用。其次，在容量配置模型构建方面，以系统总成本最低和可再生能源利用率最高为目标，结合功率平衡约束、设备容量约束等多维度约束条件，提出了适用于太阳能-氢能耦合储能系统的优化模型，并选用粒子群优化算法进行求解，验证了其在提升系统经济性与可靠性方面的有效性。此外，在经济性分析中，通过对设备购置成本、运行维护成本及燃料成本的全面评估，以及对售电收益与节能减排收益的量化计算，明确了该系统的经济可行性，并提出了基于净现值、内部收益率和投资回收期等指标的评估方法，为实际工程应用提供了科学依据。最后，通过案例分析进一步验证了所提模型与方法的实用性，表明其在优化资源配置与提升经济效益方面具有显著优势。

参考文献：

- [1] 李奇；赵淑丹；蒲雨辰；陈维荣；于瑾. 考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(3):486-495.
- [2] 林泽源；王宗尧；张凡；王蕊超. 考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法研究 [J]. 高压电器, 2024, 60(7):78-87.
- [3] 李凯；常喜强；王亚强；罗维祥. 考虑电力弹簧的电氢微网系统容量优化配置 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26):11428-11435.
- [4] 陈燚；何山；谢少华；胡兵；陈洁；袁至. 基于合作博弈的风-光-电氢微网容量配置 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(2):395-405.