

考虑低碳资源灵活性的综合能源系统最优能量管理方法研究

电气2102班：罗盈盈 指导教师：杨一 论文类型：毕业论文

摘要：随着“双碳”目标推进，提高能源利用效率与降低碳排放成为能源领域重大任务。综合能源系统（Integrated Energy System, IES）通过电-热-气-氢等能源协同，为此提供了有效路径。本文提出一种考虑低碳资源灵活性的 IES 优运行模型，利用电解水制氢、电转气、碳捕集与封存等技术，将氢能与碳资源耦合于工业生产中，生产天然气、尿素、氨和甲醇等高附加值产品；其中，天然气可用于热电厂，实现能源循环与价值转化，储能系统则增强 IES 的灵活性与稳定性。上述低碳技术、氢-碳资源循环利用与储能共同构建了循环氢经济模式（Circular Hydrogen Economy Model, CHEM）。于此，针对可再生能源出力不确定性，本文提出基于确定性优化与模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）的能量管理方法，建立调度模型。仿真结果对比表明，MPC 方法在运行成本与调控能力上均优于确定性优化。进一步地，本文设置三种运行场景进行碳排放量与经济效益评估，结果表明所提出的 CHEM 及能量管理方法能够显著降碳增效，为“双碳”目标提供持续性的实现方案。

关键词：综合能源系统；低碳灵活性资源；氢能经济；优化调度；模型预测控制

1 低碳灵活运行的综合能源系统

本节提出的综合能源系统（Integrated Energy System, IES），如图 1.1 所示，IES 集成了电解水制氢、电转气技术（Power to Gas, P2G）、碳捕集与封存（Carbon Capture and Storage, CCS）等低碳技术，实现碳捕集利用、能源循环、氢气储能、电网互通等功能，显著提升 IES 的灵活性、经济性与可持续性，展现良好应用前景。

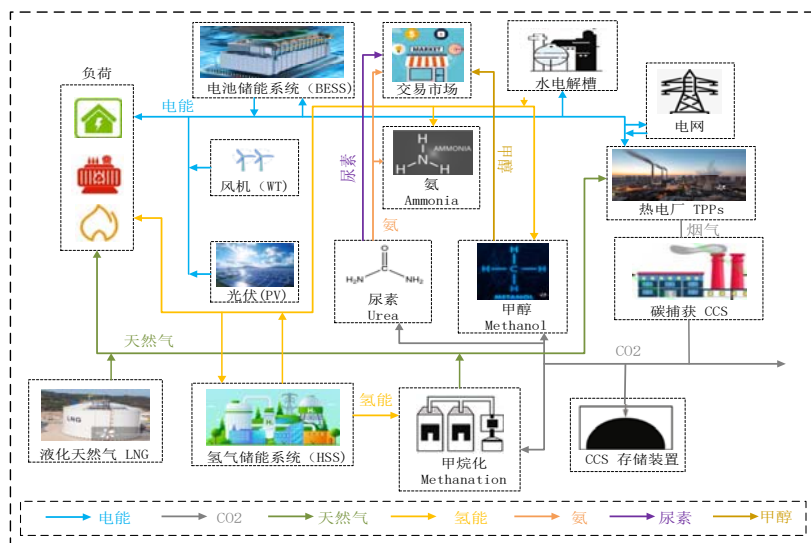


图 1.1 IES 结构

1.1 基于循环氢经济模型的综合能源系统结构

本文提出的低碳能源集成系统融合电力、氢气、天然气与 CCS 技术，形成多能协同的运行结构，系统通过 TPPs、风电、光伏等满足用户需求，利用电解水制氢与 CO₂合成多种化工产品，实现能源-工业耦合；同时配置 BESS 与 HSS 增强灵活性，并具备电网双向调节能力，共同构建起的循环氢经济模式（Circular Hydrogen Economy Model, CHEM）提升了系统的经济性与可持续性。

1.2 综合能源系统的灵活性资源建模

为准确展现基于 CHEM 的 IES 的低碳灵活运行特性，本节针对系统内各类关键设施构建起相应的数学模型，涵盖氢-电互联系统、CCS 技术、氢副产品合成过程以及 TPPs 与储能系统等模块。搭建的数学模型不仅体现出各类设施在能量转换与耦合过程中的物理约束与动态特性，也能为后续的系统优化调度与灵活性分析提供理论基础和建模支撑。

氢-电系统模型刻画了电解制氢、燃料电池运行及能流约束；CCS 模型包括 CO₂捕集、存储、利用与能耗建模；氨、尿素、甲醇及甲烷化过程通过产量、原料需求和能耗关系公式精确建模，体现出碳资源利用耦合路径。为保障电力系统的可靠运行，TPPs 需满足以下约束条件：功率输出上下限、基于热耗率函数的燃料需求，并采用分段线性函数进行近似、启停带来的成本、机组启停时间约束、爬坡与降坡速率限制及启停状态逻辑约束；此外，机组燃料消耗直接决定其燃料成本。储能系统模型涵盖 BESS 与 HSS 两种类型。储能系统分别对 BESS 与 HSS 的 SOC 约束、充放电/氢限制及折旧成本等运行特性进行了系统建模。

2 综合能源系统最优能量管理方法

本文提出的基于 CHEM 的 IES 具有多能强耦合与运行复杂的特点，涉及多种能源与元素间的转换与反应，且面临较高的不确定性与波动性。为此，构建了确定性优化模型与基于模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）的滚动优化模型进行对比，前者用于评估静态特性，后者可应对动态变化与外部扰动。本节将提出两类调度模型，补充必要约束并统一目标函数，为 CHEM 的优化运行与动态决策提供支撑。

2.1 确定性优化调度模型

为确保 CHEM 下 IES 运行的可行性与安全性，尽管其目标是实现能源闭环与独立运行，系统仍允许与外部电网进行电力交易，以增强调度灵活性。同时，本文围绕电力、氢气、天然气和氨等多种能源建立能量平衡约束与统一目标函数，并在理想数据环境下构建确定性优化调度模型，为系统提供理论最优的运行方案。

2.2 基于模型预测控制的优化调度模型

IES 运行受可再生能源波动和负荷变化影响较大，调度动态复杂。为提升系统适应性与稳健性，本文提出基于 MPC 的滚动优化调度模型，在保持与确定性模型一致的目标和约束下，实现对未来调度的动态预测与实时调整，主要为 MPC 根据当前状态与预测信息制定最优调度方案，仅执行首时段控制策略。随着状态更新，调度窗口滚动前移，系统重新优化并执行新策略，形成动态闭环控制。该方法可持续优化运行效果，增强系统对不确定扰动的灵活性和鲁棒性。

3 算例分析

为验证 CHEM 的可行性与有效性，本文基于图 1.1 所示的集成测试系统进行建模与仿真，结合前文提出的设备模型与 MPC 优化框架，在 Python 3.12 环境下搭建优化模型，并通过 Gurobi 12.0 高效求解。

3.1 仿真设置

本文 IES 中所包含的设备设施的输技术参数来自于文献，电力、天然气负荷需求曲线，电价实时数据以及太阳辐照度和风速预测数据来源于文献，氢气负荷以氢燃料汽车为代表。

3.2 两种优化模型结果对比分析

为验证优化方法有效性，本节在相同条件下对比求解确定性与 MPC 两类调度模型，并从运行成本、碳排放和可再生能源利用等方面分析其优化效果，对比结果显示，基于 MPC 的调度模型在经济性、环保性和可再生能源利用率上均优于确定性模型。MPC 提升系统利润约 3.7%，碳排放略增但可控，可再生能源占比提高至 39.7%。其动态滚动优化有效应对不确定性，增强系统灵活性和适应性，因而被选为后续 IES 调度方案。

3.3 基于模型预测控制的多种优化策略性能对比

为验证 MPC 模型的适应性与灵活性，设计三种典型优化策略并在统一框架下建模，策略一为未考虑 CCS 及氢副产品的产生与利用、策略二为考虑 CCS 但未考虑氢副产品的产生与利用、策略三为考虑 CCS 和氢副产品的产生和利用，比较不同目标函数与约束对系统性能的影响。

3.3.1 最优能量管理分配结果

本节对三种 IES 优化策略进行对比：策略一为传统模式，TPPs 稳定供电，风光出力有限，制氢集中于夜间，天然气完全依赖 LNG；策略二引入 CCS，在控碳基础上提升 TPPs 出力与绿氢产出；策略三进一步引入氢副产品利用，显著增强电-氢-气耦合，TPPs 成为主力能源，甲烷化过程提升氢气利用率并大幅减少 LNG 需求。

策略三在三种方案中表现最优，充分发挥了 CCS 与氢副产品的协同作用，实现了系统内部能源的闭环流动与优化利用，构建了一个更绿色、灵活与高效的一体化 IES 模型。

3.3.2 效益分析

不同策略下的运行结果表明，系统在碳排放与经济效益之间存在明显的权衡关系。策略二引入 CCS 后，碳排放显著减少，体现出良好的减排效果；但策略三在进一步引入氢副产品综合利用后，虽然碳排放略有上升，但系统利润明显提升。这表明，当系统以提升经济性为目标时，需更多调动 TPPs 出力，从而带来碳排放增加；而当优先考虑减排目标时，则可能牺牲部分经济收益。整体来看，随着调度策略的逐步优化，系统盈利能力持续增强，呈现出向更高效、经济化方向发展的趋势。

3.3.3 碳资源利用分析

为进一步评估碳资源在系统中的利用效果，本节分析了甲烷、尿素、甲醇等氢副产品的生产路径。结果显示，尿素在 CO₂资源利用率和经济效益方面表现最优，因其生产过程对氨的高度依赖，也带动了氨的产出与利用，体现出系统内部的资源耦合特性。甲烷化在碳利用中同样发挥关键作用。整体来看，CHEM 系统具备良好的碳资源整合能力，约可实现 10% 的 CO₂资源化利用，既促进了多元副产品的产出，又有助于降低碳排放、提升系统经济性与可持续性。

3.3.4 氢副产品效益分析

系统对氢副产品的产量分布分析表明，天然气是主要的碳氢利用形式，尤其在日间负荷高峰时，甲烷化反应成为 CO₂和 H₂的优先消纳路径。相比之下，尿素与氨产量虽低，但在资源利用中作用积极，其中氨主要用于合成尿素，提升产品附加值，展现出较高的氮元素转化效率。值得注意的是，尿素和氨的生成集中在夜间负荷低谷时段，体现出系统通过错峰调度，实现了 H₂和 CO₂的高效利用和价值最大化。

4 结论

本文面向低碳灵活性资源，构建了一种融合电解水制氢、P2G、CCS 等技术的综合能源系统（CHEM），形成“电-氢-气”深度耦合机制。系统通过氢气与 CO₂协同合成甲醇、尿素、氨及合成天然气，构建碳资源闭环利用路径，并引入 BESS 与 HSS 提升调度灵活性。为应对可再生能源波动，采用确定性优化和基于 MPC 滚动优化的能量管理方法，通过对比体现出 MPC 在成本控制与调节能力方面的优势。

仿真结果表明，在三种运行场景下，CCS 与氢副产品机制提升了系统经济性，HSS 优化了能量的时序分配，氢副产品中天然气与尿素最具经济价值；CO₂资源化利用增强了系统自给能力与可持续性。总体来看，基于 CHEM 的 IES 实现了多能协同与资源高效利用，具备良好的低碳性、经济性与现实应用前景，契合“双碳”目标要求。