

# 压缩空气储能与可再生能源耦合机制及协同优化

刘 操<sup>1</sup>, 马千里<sup>1</sup>, 罗 健<sup>1</sup>, 李博伟<sup>1</sup>, 夏爱松<sup>2</sup>

(1. 沈鼓集团股份有限公司, 辽宁省沈阳市, 110869; 2. 沈鼓集团自控工程公司, 辽宁省沈阳市, 110869)

**摘要** 随着全球对清洁能源的需求日益增长, 可再生能源的大规模开发利用成为能源转型的关键。然而, 可再生能源的间歇性和波动性限制了其高效利用。压缩空气储能作为一种大规模储能技术, 与可再生能源的耦合具有重要意义。本文深入分析了压缩空气储能与可再生能源的耦合机制, 探讨了两者协同优化的策略与方法, 旨在为实现可再生能源的稳定消纳和高效利用提供理论支持与实践参考。

**关键词** 压缩空气储能; 可再生能源; 耦合机制; 协同优化; 电力系统

中图分类号: TU398 文献标识码: B

文章编号: 1008-0899(2026)10-0009-02

近年来, 太阳能、风能等可再生能源在全球能源结构中的占比不断提高。然而, 可再生能源发电的间歇性和波动性问题突出, 例如风力发电会因风速变化导致出力不稳定, 光伏发电受昼夜、阴晴等天气因素影响显著。这种不稳定性给电力系统的安全稳定运行和可再生能源的大规模消纳带来巨大挑战。压缩空气储能技术作为一种大规模物理储能方式, 具有储能容量大、使用寿命长、成本相对较低等优势, 能够有效解决可再生能源的间歇性问题<sup>[1]</sup>。将压缩空气储能与可再生能源进行耦合, 实现两者的协同运行和优化, 对于提高可再生能源利用效率、增强电力系统稳定性、推动能源绿色低碳转型具有重要的现实意义。

## 1 压缩空气储能与可再生能源耦合机制

### 1.1 能量转换与传递机制

耦合系统的能量转换过程包含电能-压力能-机械能-电能的多级转换。在储能阶段, 电动机驱动空气压缩机对空气进行绝热或等温压缩, 该过程存在摩擦损耗、散热损失等不可逆因素, 典型压缩机效率约为75%~85%。压缩后的高温高压空气通过冷却器降至常温, 储存于储气装置。释能阶段, 高压空气首先进入回热器回收膨胀机排气余热, 温度提升30~50℃, 随后进入透平膨胀机进行绝热膨

胀做功, 膨胀机效率通常在80%~88%。带动发电机发电过程中, 机械能-电能转换效率约为92%~95%。整个系统能量转换效率受压缩机、膨胀机性能、换热器效率、储气压力损失等因素影响, 当前先进系统综合效率可达40%~55%。能量传递环节依赖管道、阀门等流体输送设备实现高压空气的定向传输。

### 1.2 控制与协调机制

耦合系统的控制核心是基于多源信息的智能决策系统。该系统实时采集三类关键数据: ①可再生能源发电数据, 包括风电功率、光伏辐照度、预测发电量等; ②电网运行数据, 如实时负荷、频率偏差、电压水平; ③储能系统状态数据, 涵盖储能压力、温度、充放电功率、剩余容量等。通过数据融合算法对这些信息进行处理, 结合预设控制目标, 采用模型预测控制、分层分布式控制等策略生成控制指令。具体实施中, 底层控制器根据上层指令调节压缩机和膨胀机的运行参数。

## 2 压缩空气储能与可再生能源协同优化策略

### 2.1 系统配置优化

#### 2.1.1 容量配比优化

确定可再生能源发电设备与压缩空气储能系统的容量配比是一项系统性工程, 需要综合考虑技术可行性、经济合理性与运行稳定性, 构建多目标优化模型是实现这一目标的关键方法<sup>[2]</sup>。以风电-压缩空气储能耦合系统为例, 需要确定的核心变量包括风力发电机组的总装机容量、空气压缩机的额定功率、储气装置的总容积, 以及膨胀机的发电功

作者简介: 刘操(1982~), 男, 湖北武汉人, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源及储能技术。

率。这些参数的选择直接影响系统整体性能,需要通过科学的计算与分析来确定。

### 2.1.2 选址与布局优化

压缩空气储能系统选址需综合地质、电力、环境三类要素。地质条件方面,优先选择盐穴、硬岩矿洞等天然储气空间,要求岩石渗透率低于 $10^{-15}\text{m}^2$ ,抗压强度超过50MPa,以确保储气安全性。例如,我国金坛盐穴储气库孔隙率达28%~32%,可承受20MPa以上工作压力。电力条件需考虑与可再生能源电站的距离,根据经济电流密度将输电距离控制在30公里以内可有效降低线损。系统布局设计采用拓扑优化方法,通过建立管网流体力学模型,运用有限元分析软件模拟不同管道直径、连接方式下的压力损失。

## 2.2 运行策略优化

### 2.2.1 分时运行策略

基于可再生能源与负荷的日变化特性,制定四时段运行策略:第一时段,低谷储能时段(00:00~06:00),利用风电夜间出力高峰与负荷低谷的差值进行满功率储能;第二时段,平段调节时段(06:00~10:00,15:00~18:00),根据电网实时功率波动进行小功率充放电调节;第三时段,高峰释能时段(10:00~15:00,18:00~22:00),优先释放储能满足负荷需求;第四时段,备用时段(22:00~24:00),保持50%储能容量作为系统备用。

### 2.2.2 多时间尺度协调优化

构建包含超短期(0~4h)、短期(1~24h)、中长期(1~30d)的三级优化体系。超短期优化基于数值天气预报数据和实时量测信息,每15min滚动更新控制指令,通过快速调节储能功率平抑可再生能源的分钟级波动。短期优化以次日的可再生能源预测曲线和负荷预报为基础,采用混合整数线性规划方法制定充放电计划,优化目标为最小化购电成本。中长期优化则结合季节性能源特性,在风电大发的冬季增加储能容量配置,在光伏丰富的夏季调整充放电策略,实现资源的跨时段优化配置<sup>[3]</sup>。

## 2.3 经济性与环境效益协同优化

### 2.3.1 成本-效益分析

对压缩空气储能与可再生能源耦合系统进行经济评估时,需构建一套全面考量显性成本与隐性

收益的评价模型。显性成本主要包含三个核心部分:首先是设备购置费用,涵盖风力或光伏发电设备、空气压缩机、储气装置、膨胀发电设备等硬件设施的采购支出;其次是安装工程费,涉及设备运输、场地建设、管道铺设、电气连接等工程施工成本;最后是年运维成本,包括设备日常检修、零部件更换、人工管理、系统监测等持续性费用。隐性收益则来自多个方面:①可再生能源消纳补贴,政府为鼓励清洁能源利用,对储能系统消纳的风电、光电给予电价补贴;②辅助服务市场收益,储能系统通过参与电力系统的调峰、调频、备用等辅助服务获取报酬;③碳交易收入,系统减少的二氧化碳排放量可通过碳市场交易转化为经济收益。

### 2.3.2 环境影响评估与优化

采用生命周期评价方法量化系统环境影响,涵盖设备制造、施工建设、运行维护、退役处置全流程。主要评估指标包括温室气体排放、水资源消耗、固体废弃物产生量。通过技术改进实现环境效益优化:①在压缩机冷却环节采用余热回收技术,将冷却废热用于空气预热,可降低系统能耗8%~12%;②选用无油润滑压缩机,避免润滑油泄漏造成的土壤污染;③优化储气系统密封性,将气体泄漏率控制在0.3%以下。此外,建立环境效益与经济效益的协同优化模型,以单位发电量环境影响最小化和利润最大化为双目标,通过加权求和法求解帕累托最优解,实现生态与经济的协调发展。

## 3 结语

本文系统研究了压缩空气储能与可再生能源的耦合机制及协同优化策略。通过分析物理耦合方式、能量转换与传递机制以及控制与协调机制,明确了两者耦合的实现途径,并提出了协同优化策略。只有通过不断的技术创新和优化,压缩空气储能与可再生能源的耦合才能为全球能源转型和可持续发展做出更大的贡献。

## 参考文献

- [1] 武明皓,赵俊红,史志杰.压缩空气储能系统中的余热利用研究[J].暖通空调,2025,55(S1):39-42.
- [2] 马嘉悦,薛小军.压缩空气储能与联合循环系统耦合的设计[J].自动化应用,2025,66(9):123-126+130.
- [3] 韩越,李睿,孙世超,等.压缩空气储能的多能耦合技术研究进展[J].能源研究与利用,2022(3):25-29.