

多能互补综合能源电力系统协同优化运行策略探究

高北, 牛凯

河南海马建设工程有限公司, 河南 安阳 455000

DOI:10.61369/ME.2024100005

摘要 : 随着能源结构转型与碳中和目标推进, 多能互补综合能源电力系统成为提升能源利用效率、保障电力供应稳定的重要发展方向。本文聚焦系统协同优化运行的关键问题, 从能源特性、负荷需求和技术条件等角度分析影响因素, 提出涵盖能源协调、储能管理与需求响应的运行策略框架, 并从能源配置优化、控制技术改进和数字技术应用三方面探讨优化路径, 为构建高效、灵活的能源电力系统提供理论参考。

关键词 : 多能互补系统; 协同优化; 能源协调; 储能技术; 数字孪生

Research on Collaborative Optimization Operation Strategy of Multi-energy Complementary Comprehensive Energy Power System

Gao Bei, Niu Kai

Henan Haima Construction Engineering Co., Ltd., Anyang, Henan 455000

Abstract : With the transformation of energy structure and the promotion of carbon neutrality, multi-energy complementary comprehensive energy power system has become an important development direction to improve energy utilization efficiency and ensure the stability of power supply. This paper focuses on the key issues of coordinated optimal operation of the system, analyzes the influencing factors from the perspectives of energy characteristics, load demand and technical conditions, puts forward an operation strategy framework covering energy coordination, energy storage management and demand response, and discusses the optimization path from three aspects: energy allocation optimization, control technology improvement and digital technology application, providing theoretical reference for building an efficient and flexible energy and power system.

Keywords : multi-energy complementary system; collaborative optimization; energy coordination; energy storage technology; digital twin

引言

在全球能源低碳化转型背景下, 多能互补综合能源电力系统通过整合风、光、储、气等多种能源形式, 实现能源梯级利用与灵活调度, 成为解决能源供需矛盾的重要途径。然而, 多能系统在运行中面临能源耦合复杂、动态响应滞后等挑战, 亟需系统性协同优化策略。本文从影响因素、运行策略及优化路径三方面展开探讨, 旨在为提升多能系统协同运行效率提供新思路。

一、影响多能互补综合能源电力系统协同优化运行的因素

(一) 能源特性差异

多能互补系统中异质能源的物理属性与动态特征差异构成协同优化的核心矛盾。可再生能源输出具有强随机性, 风电功率随风速变化呈现分钟级波动, 光伏出力受云层遮挡影响产生快速爬坡, 这与燃煤机组以小时为单位的调节惯性形成显著冲突。传统火电通过燃料输入实现功率可控调节, 但热力系统蓄热能力有限, 难以匹配风电秒级波动所需的快速响应需求^[1]。储能介质的时间尺度适配能力直接影响系统调节效能, 电化学储能可实现毫

秒级充放电切换, 而储热装置的热能释过程需遵循热力学扩散规律, 不同储能技术的响应延迟差异导致多时空尺度下的功率补偿难以同步。能源转换环节的效率级差进一步放大协同难度, 电能与化学能转换过程伴随较高能量损失, 热力系统能量传递则存在管网传输迟滞效应, 多重损耗路径叠加削弱多能流耦合的整体效率。

(二) 负荷需求变化

终端用能行为的时空异质性对多能系统协同提出多维挑战。电力负荷在日间呈现双峰特征, 与热力需求的单峰曲线形成时段错位, 冷能需求则随环境温度波动呈现季节敏感性。工业用户的高强度连续用能与商业建筑的间歇性需求叠加, 导致区域负荷曲

线兼具陡峭爬坡与持续震荡特性。多能负荷的空间分异特征尤为显著，工业园区对电能品质的严格要求与居民区对热能供给的稳定性需求，迫使系统必须同步优化不同能源网络的输送路径与转换节点^[2]。极端气候事件引发的负荷突变打破常态用能规律，寒潮期间供热负荷激增往往伴随风电出力骤降，高温天气下制冷需求陡增可能引发电网调峰容量不足，此类复合扰动考验着系统跨能源形式的应急调节能力。

（三）技术水平限制

现有技术体系对多能系统协同优化的支撑能力存在结构性缺陷。能源转换装置的物理极限制约运行灵活性，燃气轮机在低负荷工况下效率骤降，难以适应高比例可再生能源接入场景的深度调峰需求。储能技术的性能短板限制系统调节裕度，功率型储能难以满足长时能量缺口补偿，容量型储能则无法应对秒级功率波动，技术路线的功能割裂导致储能组合难以实现全时段覆盖^[3]。信息物理系统的协同控制面临实时性挑战，量测设备精度不足可能引发源荷状态感知偏差，通信网络时延导致优化指令与系统实际工况产生动态失配。多能流耦合建模的精度瓶颈同样突出，传统单能流分析工具无法刻画电-热-气网络间的非线性交互，简化模型忽略热力管网的热惯性效应与气体传输的压缩特性，使得离线优化策略在在线应用时出现控制失效。

二、多能互补综合能源电力系统运行策略

（一）能源协调运行策略

多能互补系统的核心在于建立异质能源的动态协同机制。系统调度中心需依据实时能源供需状态，动态调整电、热、气等能源的转换优先级与输送路径。当风电出力因天气突变骤降时，优先启动燃气轮机进行功率补偿，同时联动储热装置释放热能，通过热电联产机组提升电能输出能力^[4]。对于热力主导的负荷区域，可降低电制热设备的运行权重，转而利用工业余热或地源热泵维持管网温度稳定。跨能源网络的耦合节点控制尤为关键，电转气设备在风光过剩时段将电能转化为可存储的甲烷，而在负荷高峰时段反向供气发电，形成能源形态的时空平移。协调策略需突破传统单能流调度思维，构建电-热-气多能流的联合优化模型，通过边际成本迭代计算确定最优能源分配比例。

（二）储能系统运行策略

储能设备的运行逻辑需匹配多时间尺度的调节需求。功率型储能承担秒级波动平抑任务，在检测到频率偏差时立即注入或吸收功率，维持电网瞬时稳定；容量型储能则以小时为周期进行充放电规划，通过日前市场电价信号优化储能经济性运行区间。混合储能系统的协同控制策略要求精确划分功能边界，超级电容负责应对风光功率的分钟级波动，锂电池组处理半小时尺度的负荷偏移，而储热罐则按日周期调节热网能量平衡。针对跨季节储能需求，地下储氢设施在夏季风光充沛时存储过剩能量，冬季通过燃料电池转化为热电联供^[5]。储能策略需建立状态感知-功率分配-寿命评估的闭环控制链，实时监测荷电状态与健康度，动态调整储能单元参与系统调节的优先级。

（三）需求响应策略

负荷侧资源参与系统调节需构建双向互动机制。基于价格信号的动态电价策略引导用户转移可中断负荷，在风光出力低谷时段自动关闭非必要用电设备，通过预约定制负荷曲线实现供需双侧匹配。对于工业热用户，建立热能需求弹性模型，允许在电网调峰压力较大时适度降低供热温度，利用工艺环节的蓄热特性实现能量时移。虚拟电厂聚合分布式资源，将居民电动汽车、商用储能设备等分散单元转化为可调度资源池，通过区块链智能合约实现响应指令的自动执行^[6]。空调负荷的集群控制采用温度带调节技术，在不影响人体舒适度前提下，将建筑物群的整体制冷功率波动限制在预设阈值内。需求响应策略需解决用户参与度低与响应行为不确定性问题，通过信誉积分奖励机制提升负荷聚合商长期合作意愿。

三、多能互补综合能源电力系统协同优化运行的优化措施

（一）考虑综合因素，优化能源配置

多能互补系统的能源配置需建立动态适配机制，通过分析区域能源禀赋与负荷特性的匹配度，确定不同能源品种的优先级与耦合方式。在风光资源丰富的地区，将光伏与风电作为基础供能单元，配套建设电解水制氢设施，将日间过剩电能转化为氢能存储；对于供热需求集中的城市区域，采用燃气锅炉与电热泵协同运行模式，在电网负荷低谷期优先使用电热泵蓄热，降低燃气消耗峰值^[7]。跨能源网络的耦合节点需实施灵活调控，电转气设备应根据电价波动与气网压力动态调整运行功率，在电力过剩时段提高转换效率，气电紧张阶段切换为气转电模式。能源配置优化的关键在于构建多时间尺度的协调框架，日前阶段基于气象预测优化风光储容量分配，日内通过滚动修正调整整电机出力曲线，实时阶段利用储能快速响应平滑功率波动。

（二）改进控制技术，提高响应速度

提升多能系统动态响应能力的核心在于构建分层递阶控制架构。在设备层部署边缘计算模块，使燃气轮机、储能变流器等关键设备具备本地快速决策能力，在检测到频率突变时无需等待主站指令即可执行预设调节策略^[8]。网络层采用分布式模型预测控制技术，将区域能源网络划分为多个自治控制单元，各单元基于相邻节点信息交换自主优化运行状态，通过一致性算法实现全局最优。对于秒级波动平抑任务，设计基于能量变化率的前馈-反馈复合控制策略，前馈环节根据风光功率预测值提前调整储能出力基准，反馈环节通过实时功率偏差动态修正充放电指令^[9]。跨能源接口设备的协同控制需突破物理惯性限制，采用虚拟同步机技术赋予电力电子接口的热力设备惯量支撑能力，使热泵机组能够模拟同步发电机的一次调频特性。控制技术改进需同步升级量测体系，在关键节点部署多参量融合感知装置，实时采集电功率、热媒温度、气压等多维数据，为控制算法提供高精度输入。

（三）应用数字技术，加强能源预测

能源预测精度的提升依赖于多源信息融合与机器学习模型的

深度应用。建立风光功率预测的数字孪生系统，将气象卫星云图、地表辐射监测数据与风机运行状态同步映射至虚拟模型，通过卷积神经网络提取空间特征与时间序列的关联规律。对于多元负荷预测，采用联邦学习框架聚合不同用户的用能行为数据，在保护隐私前提下训练负荷模式识别模型，区分工业生产流程负荷、商业空调负荷与居民生活负荷的波动特性。预测结果的动态修正需构建误差反馈机制，利用实时监测数据与预测值的偏差调整模型权重参数，通过滚动更新降低天气突变带来的预测失准风险^[10]。在系统调度层面，将长短期预测结果嵌入随机优化模型，生成兼顾经济性与鲁棒性的运行方案，针对极端天气场景建立预案库，当预测不确定性超过阈值时自动切换应急调度模式。数字技术的深度整合需解决异构数据接入标准不统一问题，建立能源物联网设备的通信协议转换中间件，实现多源数据的低延迟交互与协同分析。

四、结语

综上所述，多能互补综合能源系统的协同优化本质在于破解异质能源时空错配与动态调节滞后的双重约束。通过能源协调、储能适配与需求响应的策略联动，可有效提升系统应对负荷波动与能源间歇性的能力。优化措施的落地实施需突破能源转换效率阈值、控制响应时延与预测精度边界等关键技术瓶颈。未来研究应深化多能流耦合的动态建模，探索边缘智能与物理系统深度融合的创新路径，推动能源电力系统向自主协同的智慧形态演进。

参考文献

- [1] 张海宁. 多能互补综合能源电力系统的建设模式研究 [J]. 装备维修技术, 2024, (04): 65-67+72.
- [2] 周孝信, 赵强, 张玉琼, 等. “双碳”目标下我国能源电力系统发展趋势分析: 绿电替代与绿氢替代 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6707-6721.
- [3] 谢小平. 略论境外多能互补综合能源电力系统的建设模式 [J]. 能源与节能, 2022, (02): 47-48+156.
- [4] 张笑薇. 探讨多能互补综合能源电力系统的建设模式 [J]. 科学技术创新, 2021, (32): 33-35.
- [5] 赵曰浩, 李知艺, 鞠平, 等. 低碳化转型下综合能源电力系统弹性: 综述与展望 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(09): 13-23+47.
- [6] 时盟, 庄镇宇, 姚晶. 多能互补综合能源电力系统的建设模式初探 [J]. 中国设备工程, 2021, (11): 192-193.
- [7] 李宇泽, 齐峰, 朱英伟, 等. 多能互补综合能源电力系统的建设模式初探 [J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(01): 3-10.
- [8] 周孝信. “双碳”目标下我国能源电力系统发展趋势研究——绿电替代+绿氢替代 [J]. 新经济导刊, 2023, (22): 32-37.
- [9] 陈正曦, 余轶, 梁才浩, 等. 全球能源互联网框架下的清洁能源多能互补协同开发 [J]. 全球能源互联网, 2023, 6(02): 126-138.
- [10] 刘瀚琛, 王冲, 鞠平. 双碳背景下综合能源电力系统弹性分析与提升研究综述 [J]. 电气工程学报, 2023, 18(02): 108-124.