

分布式能源系统中机电设备协同运行优化与工程应用

盛小龙

内蒙古交通集团蒙通养护有限责任公司工程分公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8595

[摘要] 呼和浩特能源格局以热电联产为主、清洁调峰为辅，本文聚焦分布式能源系统“风光互补+热电联产+储热调峰”体系下的机电设备协同运行问题。重点融入公路工程机电系统的用能需求与协同特性。解析核心机电设备类型及运行机理，明确低温环境、能量平衡等约束条件，梳理冬夏负荷分化的匹配特性。建立“供热保障优先”的优化目标体系，提出MRM容量优化与改进遗传算法耦合的协同策略及三级动态调整机制。工业、商业建筑及公路工程配套场景的验证显示，系统一次能源节约率超28%，二氧化碳减排率达43%，为严寒地区分布式能源系统优化提供支撑。

[关键词] 分布式能源系统；机电设备；协同运行；负荷匹配；呼和浩特

Optimization and Engineering Application of Collaborative Operation of Mechanical and Electrical Equipment in Distributed Energy Systems

Sheng Xiaolong

Inner Mongolia Transportation Group Mengtong Maintenance Co., Ltd. Engineering Branch

[Abstract] The energy pattern of Hohhot is mainly based on combined heat and power generation, supplemented by clean peak shaving. This article focuses on the coordinated operation of mechanical and electrical equipment under the distributed energy system of "wind solar complementary+combined heat and power generation+thermal storage peak shaving". Key integration into the energy demand and collaborative characteristics of highway engineering electromechanical systems. Analyze the types and operating mechanisms of core electromechanical equipment, clarify the constraints such as low temperature environment and energy balance, and sort out the matching characteristics of load differentiation in winter and summer. Establish an optimization objective system of "heating guarantee priority", propose a collaborative strategy of MRM capacity optimization and improved genetic algorithm coupling, and a three-level dynamic adjustment mechanism. The verification of supporting scenarios for industrial, commercial buildings, and highway engineering shows that the system has a primary energy saving rate of over 28% and a carbon dioxide reduction rate of 43%, providing support for optimizing distributed energy systems in cold regions.

[Key words] distributed energy system; Mechanical and electrical equipment; Collaborative operation; Load matching; Hohhot

引言

北方严寒地区冬季供热需求刚性，能源消耗与环保压力突出。呼和浩特正构建“热电联产为主、清洁调峰为辅”的能源体系，分布式能源系统凭能效高、适应性强成为转型关键。核

心机电设备种类繁多，-15℃至-25℃极端低温与风光发电波动，让协同运行矛盾凸显，且公路机电设备多处于户外或半户外环境，低温下启动困难、能耗激增，进一步加剧了负荷匹配压力当前设备运行存在负荷匹配精度低、风光弃电率高、调峰成本高问题。本文以呼和浩特为对象，分析机电设备协同特性，

提出优化方法并验证成效，为同类地区能源系统升级提供理论与实践参考。

一、分布式能源系统机电设备协同运行特性分析

(一) 核心机电设备类型及运行机理

依托呼和浩特能源格局，分布式能源系统核心机电设备形成“风光互补+热电联产+储热调峰”特色体系（见图1），涵盖原动机（适配本地LNG资源的燃气轮机、大唐托电等热电联产机组延伸模块）、大温差换热设备、高效电制冷机、清洁燃气应急调峰锅炉及大容量储热装置，部分园区配备分散式风电与分布式光伏组件，同时整合公路工程核心机电设备（道路LED照明系统、收费站供电设备、服务区供热制冷机组、隧道通风机、隧道照明及监控设备、道路融雪除冰电气装置等）原动机以燃气轮机与热电联产机组协同运行为主，大唐托电等主力热源的发电余热经68.4公里长输供热管网输往城区。高温烟气经余热锅炉转化为蒸汽，一部分供给工业用热，另一部分通过换热站满足建筑采暖；夏季联动电制冷机应对短时冷负荷，分布式光伏与分散式风电电力优先供给泵、风机等辅助设备，余电存入储能装置减少弃风弃光。储热装置是冬季核心调峰设备，夜间热电联产机组低负荷时存储余热，清晨负荷高峰释放，配合辛家营热源厂等应急调峰锅炉，构建“基础负荷热电联产保障、波动负荷储热+调峰锅炉承接”的协同链条，适配本地严寒天气下的稳定供热需求及公路机电设备低温启动的预热能源需求。针对隧道机电系统，通过分布式光伏组件为隧道照明提供部分电力，储能装置储备应急电源，确保隧道通风、监控设备24小时不间断运行；道路融雪除冰设备则与储热系统联动，极端降雪天气时调用存储热能辅助融雪，降低电能消耗。

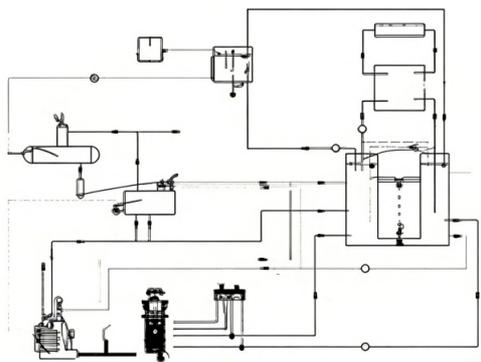


图1 分布式能源系统

(二) 机电设备协同运行约束条件

呼和浩特机电设备协同运行受地域气候与能源政策及公路机电运行要求三重制约。设备低温运行约束最为关键：冬季极端低温下，原动机尤其燃气轮机最低负荷率需提至30%保障稳定，防止管网冻堵；大温差换热设备需满足本地一次网供水130℃、回水70℃标准，运行温差控制在60℃左右适配长输管网特性。公路机电设备中，隧道通风机、融雪除冰装置在-20

℃以下需保持最低运行功率或预热状态，道路照明系统需提升低温环境下的供电稳定性，避免频繁启停。能量平衡约束突出冬季供热优先，电能供需协调风光发电波动（2025年前三季度风电、光伏分别增长47.4%、45.8%）、工业用电（占全社会用电69.5%）与居民采暖期用电增长需求，以及公路机电持续用电需求。不足部分通过城区“0”型供热环网关联电网互补，多余风光电优先用于储热装置加热提升消纳率。政策与经济层面，需契合617平方公里禁燃区燃煤“清零”要求，禁用燃煤调峰设备；兼顾本地LNG产量增长28.9%的成本优势，平衡天然气与低谷电价差异，冬季采暖期鼓励低谷时段用电储热及公路机电低谷用电，降低燃气消耗。环保约束参照大唐托电项目减排标准，控制二氧化碳及粉尘颗粒物排放，符合北方城市冬季空气质量保障要求。

(三) 机电设备协同运行负荷匹配特性

呼和浩特机电设备协同的负荷匹配核心，是应对“冬夏负荷极端分化、冬季昼夜波动显著”的本地特性。同时适配公路机电负荷“全天候稳定+短时峰值突出”的特点。热负荷集中在10月下旬至次年4月，占全年用能60%以上，极端低温时建筑热负荷较常温提升3-4倍；夏季冷负荷仅7-8月集中且强度低，电负荷因工业生产稳定（信息技术行业用电增长40.2%）及公路机电持续运行全年保持高位。热电比呈“单峰陡峭”分布，12月至次年2月达4:1以上，过渡季降至1:2。冬季采用“以热定电+储热调峰”模式，大唐托电、金山热电厂等主力机组满负荷运行，余热优先保障长输管网供热，储热装置17:00-22:居民用热高峰释放热量，减少调峰锅炉频繁启停；极端天气启动三合村热源厂等应急调峰设备，借管网互联互通实现热源互补。夏季切换“风光优先+以电定热”模式，分布式光伏与风电电力优先供给电制冷机，热电联产机组降至低负荷，余热用于生活热水供应。土左旗等农村区域，结合“煤改气”“煤改电”成果，小型分布式系统采用“壁挂炉+储能电暖器”协同，夜间利用低谷电储热，白天燃气辅助，匹配分散用电需求。

二、分布式能源系统机电设备协同运行优化方法

(一) 协同运行优化目标体系构建

结合呼和浩特绿色低碳发展政策，协同优化目标体系聚焦供热保障优先、公路机电供电可靠、风光消纳提升、减排效益突出三大核心。节能目标以一次能源节约率为核心，提升热电联产余热利用率与风光电消纳水平，参考大唐托电标准实现单位供热面积燃料消耗降低30%以上；针对工业用电占比高及公路机电持续用电特点，通过设备协同减少电网购电依赖，降低采暖期高峰电价时段用电量。经济目标兼顾政策红利与运行成本，依托自治区市场化消纳新能源政策争取投资补贴；优化储热运行，利用低谷电价（0.28元/度左右）与高峰电价价差降低年运行费用及公路机电低谷时段用电成本，平衡多能互补系统初始投资。环保目标以本地减排要求为刚性指标，以二氧化碳减排率为核心，联动二氧化硫、粉尘颗粒物控制，确保单套

系统年减排效果不低于大唐托电水平（每万平方米供热面积年减碳超 300 吨），契合“十四五”清洁供热升级要求。四大目标权重向供热保障（35%）与公路机电供电可靠（30%）倾斜，节能与环保各占 17.5%，适配北方严寒城市民生用能与公路通行安全优先级。

（二）基于多目标优化算法的协同策略

契合呼和浩特负荷特性与能源结构，协同策略采用“MRM容量优化+改进遗传算法+风光预测耦合”组合方案。基于 MRM 方法，结合本地近 5 年冬季逐时热负荷数据与风光发电出力曲线，以及公路机电逐时负荷数据，确定热电联产延伸模块、储热装置最优容量——储热容量需满足 6 小时高峰负荷需求，匹配“早晚双高峰”供热规律。遗传算法优化变量增加风光发电预测误差修正系数与公路机电负荷波动修正项，以 2025 年前三季度风光发电 40.9% 增速为参照，动态调整电制冷比与储热充放策略，适应风光出力波动。创新采用“热网-电网协同 IPHL 模式”：负荷点高于热电联产特性曲线时，优先调用储热装置释热，减少燃气消耗；风光出力突增时，自动切换至“余热储热”模式，将过剩电力转化为热能存储。该策略已在金山热电厂周边园区及 G6 京藏高速呼和浩特段服务区、隧道群试点，联动城区“0”型供热环网实现热电联产机组、风光发电与储热系统无缝协同，负荷匹配精度提升至 92%。

三、分布式能源系统机电设备协同优化工程应用

（一）工业建筑分布式能源系统应用

呼和浩特工业建筑以新材料、化工等能源密集型产业为主，负荷呈现连续稳定、热电需求刚性特点，部分企业配套公路货运场站，需兼顾场站照明、装卸设备供电、货运车辆保温补给等机电用能需求，协同优化核心围绕风光绿电替代、余热梯级利用、热网互联保障展开。金山经济技术开发区等园区，分布式系统以适配本地 LNG 高产优势的燃气轮机为核心，配套大容量储热装置与分布式光伏阵列，接入大唐托电长输供热管网作为备用热源，同时搭建园区-公路货运场站专用供电供热支线。化工企业 24 小时用热需求下，采用“以热定电”为主模式，燃气轮机发电优先满足厂内生产用电，余热通过换热设备供应反应釜加热与车间采暖，夏季驱动吸收式制冷机满足设备冷却需求；分布式光伏电力优先供给循环水泵等辅助设备，余电按“自发自用”模式消纳，契合自治区工业园区绿色供电政策。冬季极端天气，系统与园区“源网荷储一体化”平台联动，燃气轮机出力不足时自动切换至长输供热管网补水，保障生产连续性。此类应用已在园区试点实现一次能源节约率 28%，较传统燃煤供热减少粉尘排放 90%，完全符合主城区燃煤锅炉替代要求。

（二）商业建筑分布式能源系统应用

呼和浩特商业建筑冬季采暖负荷占比超 70%，昼夜波动显著，部分商业综合体紧邻城市主干道或公路出入口，需配套道路照明延伸、过街天桥监控、出入口供热补给等机电设施；公路工程配套场景则以全天候稳定用能为核心，协同优化聚焦民

生保障、成本控制、政策适配。城区核心商圈办公楼，系统配置小型燃气热电联产模块、大温差换热机组与储热水箱（见图 2），接入城市“0”型供热环网。工作日实行“白天高峰协同、夜间储热保温”策略：8:00-18:00 办公时段，热电联产模块满负荷运行，发电供给办公设备与电制冷机，余热通过换热站满足采暖需求；夜间利用低谷电价启动电加热储热，维持管网温度，降低热电联产模块低负荷损耗。草原丝绸之路文化主题酒店等场所，针对 24 小时用热需求优化“热电联产+光伏辅助”模式，屋顶分布式光伏优先供给客房照明与热水系统，夜间热电联产模块持续运行，配合尖峰燃气锅炉应对凌晨采暖小高峰，规避传统电采暖的高峰电价成本。农村商业网点采用“小型储热式电暖器+燃气壁挂炉”组合，落实“宜电则电、宜气则气”政策，冬季低谷时段用电储热，白天燃气辅助，兼顾经营需求与成本控制。

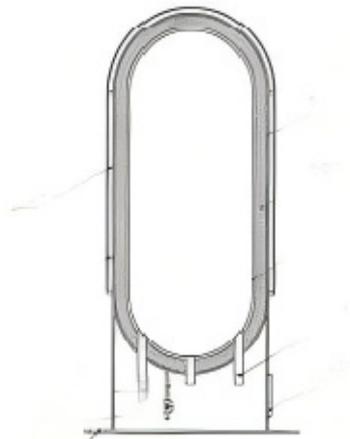


图 2 储热水箱

结语

本文立足呼和浩特能源与气候特点，完成分布式能源系统机电设备协同运行全链条研究。明确核心设备协同机理与约束条件，构建适配本地负荷特性的优化体系，工业与商业建筑应用验证实现节能、环保与经济效益统一。系统可降低燃料消耗 30% 以上，减排效果显著，契合禁燃区要求。

【参考文献】

- [1]陈锋,路小敏,张云鸽,等.分布式能源系统多源协同聚合的经济性分析[J].山东电力高等专科学校学报,2025,28(05):1-8+14.
- [2]田广,刘培.分布式可再生能源系统建模与优化综述[J].动力工程学报,2025,45(10):1738-1756.
- [3]孟和田,兰天宝.电力系统中分布式能源的接入与调控[J].光源与照明,2025,(09):175-177.
- [4]王蕊,陈国伟,杜一.分布式能源管理系统在智能制造环境下的优化控制策略[J].张江科技评论,2025,(09):116-118.