

西部地区矿井多能互补热电协同供能系统配置优化

王龙飞, 王 帅, 李 庆, 李瑞华, 武 进, 向 轶, 邴 喆

(中煤能源研究院有限责任公司 清洁利用研究所, 陕西 西安 710054)

摘 要:随着“双碳”目标的深入推进, 利用可再生能源资源降低煤炭开采过程的碳排放成为重要发展趋势, 而矿井供能采用可再生能源面临着资源禀赋条件复杂、可再生能源波动、能源利用技术多样、用能负荷需求多变等多重问题。为实现对煤矿不同供给需求边界条件下的定制化开发, 以西部地区年产 8 Mt 纳林河 2 号矿井热电供能系统为研究对象, 提出了结合可再生能源及煤矿伴生资源的矿井多能互补热电供能系统与配置优化方法。该系统利用光伏、风电、热泵、储能等能源生产转换储存设备在可行边界条件下实现能量生产转化与平移, 实现煤矿电能与热能互补互济与能源共享。通过分析矿井热电等能源需求及矿区太阳能、风能和伴生资源的源荷特征, 在气象条件、分时电价、设备容量等边界约束下, 采用供能总成本最低的方式满足矿井热能与电能的实时需求。基于负荷数据、设备模型、优化算法构建了多能互补热电协同供能模型, 并提出了基于经济性、能效性、环保性、安全可靠等多维度评价指标体系, 对该系统进行了研究分析与评价。结果表明: 多能互补热电协同供能系统能够实现矿井供能系统的清洁低碳热电协同供能, 有效降低对化石燃料的依赖, 以年产 8 Mt 纳林河 2 号矿井为例, 采用多能互补热电协同供能系统可大幅降低能源采购成本, 系统运行总费用可降低 50% 以上, 系统绿色能源占比可提高到 65% 以上, 实现 80% 以上可再生能源发电量自发自用, 每年可以减少二氧化碳排放 45% 以上。

关键词:碳中和; 煤矿; 多能互补; 余热利用; 规划配置; 低碳环保

中图分类号: TD82; TK019 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)05-2739-13

Optimization configuration of coal mine multi-energy complementary heat and power coordinated supply system in western China

WANG Longfei, WANG Shuai, LI Qing, LI Ruihua, WU Jin, XIANG Yi, BING Zhe

(Institute of Clean Utilization, China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: With the advancement of the “dual-carbon” goal, utilizing renewable energy resources to reduce carbon emissions in the coal mining process has become a significant development trend. However, the construction of mine multi-energy complementary systems faces multiple challenges, including complex resource endowment conditions, diverse energy utilization technologies, and variable energy demand loads. To achieve customized development under different supply demand boundaries for coal mines, this study focuses on the Nalinhe No. 2 coal mine in the western region, with an annual production of 8 Mt. It proposes a coal mine multi-energy complementary combined heat and power supply system, integrating renewable energy and associated coal mine resources, along with an optimization method for configuration. This system utilizes photovoltaic, wind power, heat pumps, and energy storage devices to achieve energy production, con-

收稿日期: 2024-04-25 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0460

基金项目: 中国中煤能源集团重点科技资助项目 (20221CY011); 中国中煤能源集团 D1 企业科技资助项目 (ZM-SXM*GS-25-01)

作者简介: 王龙飞 (1988—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 高级工程师, 硕士。E-mail: wanglongfei@chinacoal.com

引用格式: 王龙飞, 王帅, 李庆, 等. 西部地区矿井多能互补热电协同供能系统配置优化[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2739-2751.

WANG Longfei, WANG Shuai, LI Qing, et al. Optimization configuration of coal mine multi-energy complementary heat and power coordinated supply system in western China[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2739-2751.



移动阅读

version, and shifting within feasible boundary conditions, enabling complementary and synergistic use of electrical and thermal energy, and energy sharing. By analyzing the energy demands for heat and power in the mine and the characteristics of solar, wind, and associated resources in the mining area, and considering constraints such as meteorological conditions, time-of-use electricity prices, and equipment capacity, the system meets real-time heat and power demands with the lowest total energy supply cost. Based on load data, equipment models, and optimization algorithms, a multi-energy complementary combined heat and power supply model was constructed. A multi-dimensional evaluation index system based on economic efficiency, energy efficiency, environmental protection, and safety reliability was proposed to analyze and evaluate the system. The research results show that the multi-energy complementary combined heat and power supply system can achieve clean and low-carbon combined heat and power supply for the mine, significantly reducing dependence on fossil fuels. Taking the Nalinhe No. 2 coal mine as an example, the use of a multi-energy complementary combined heat and power supply system can significantly reduce energy procurement costs, with total system operating costs reduced by more than 50%, the proportion of green energy in the system can be increased to over 65%, achieving over 80% self-use of renewable energy generation, and annual carbon dioxide emissions can be reduced by over 45%.

Key words: carbon neutrality; coal mine; multi-energy complementary; waste heat utilization; planning and configuration; low-carbon environmental protection

0 引言

随着“双碳”目标的深入推进^[1],煤矿结合可再生能源降低煤炭开采过程的碳排放成为重要发展趋势,我国广袤的西部地区具有丰富的可再生能源资源与煤炭资源,当前煤炭企业正面临保障能源供应和减少碳排放的双重压力,将煤炭开采过程与地区可再生能源开发耦合协同,是降低煤炭行业的能耗与碳排放的重要路径^[2]。特别是在我国西部地区风光可再生能源资源丰富,近年来煤炭生产重心也加快向西部优势资源地区聚集^[3],可再生能源具有清洁、低碳、环保的天然特性,在西部煤矿能源资源开发中结合采煤沉陷区土地治理及可再生能源消纳优势,解决可再生能源开发土地资源紧张与消纳两大难题,实现新能源在煤矿矿区的大规模协同开发利用,具有广阔的技术应用前景^[4-6]。

目前,专家学者深入分析我国赋煤区与新能源的能源资源分布特点,针对矿区基于新能源的煤矿能源供给系统构建展开了前瞻研究。王双明等^[5]分析我国赋煤区新能源的分布特点,建立了煤炭与新能源优化组合的赋煤区新能源开发总体架,提出赋煤区多能互补综合能源系统是实现矿山绿色低碳开发与可持续发展的重要发展方向。王龙飞等^[4]结合煤矿伴生资源及西部地区可再生能源资源情况,提出了结合可再生能源的热电冷多能互补综合能源系统。梁睿等^[7]通过引入可再生能源电站与废弃矿井抽水蓄能,构建了全清洁能源下的高品质矿区能源系统及其配置优化方法,实现矿区生产供电系统的全清洁化。李瑞华等^[8]在煤矿矿区热负荷和热资源分析的基础上,通过引入

短期储热和可再生能源,提出了多能互补近零碳供热模式。李江成等^[9]构建计及不确定性的矿区综合能源两阶段鲁棒优化模型,采用列和约束生产算法对模型进行日前运行优化迭代求解。陆梦恬^[10]利用基于自适应粒子群优化算法对考虑伴生能源利用的多目标煤矿综合能源系统典型日分析优化求解。矿井具有高可靠供电、季节性供热、伴生资源多样、可再生能源丰富的特点,其供能系统容量配置的合理性将直接影响矿井能源系统的供能稳定性和经济成本,同时风、光等可再生能源资源的波动性是制约其成为主要能源限制性因素之一^[11]。在煤矿的供热方面具有强烈的季节波动性,供电方面具有较强日波动性,但现有研究尚未开展针对煤矿多能互补热电协同供能系统容量规划与矿区热电能源需求长期变化趋势相结合的综合评价分析。

笔者聚焦于“双碳”目标下矿井基于自身能源需求及矿井周边资源条件,提出将煤矿开采过程耗能及可再生能源供能相结合,建立以风、光及煤矿伴生资源为主体能源基础的多能互补热电供能系统,构建了煤矿多能互补热电协同供能系统优化模型,并结合经济性、能效性、环保性、安全可靠评价,对西部典型矿井进行模拟优化分析,为煤矿利用可再生能源解决自身生产用电、用热需求,实现煤矿低碳清洁转型发展提供规划设计参考。

1 设计参数及源荷特性分析

1.1 项目概况

研究对象为我国西部鄂尔多斯地区的纳林河2号矿井,矿井建设规模为8 Mt/a的井工矿,矿井开拓

方式为立井开拓,开采深度 600 m,矿井布置 1 个大采高综采工作面 and 1 个中厚煤层综采工作面,掘进使用 2 套连采机和 2 套掘锚机。矿井配套选煤厂 1 座,年入选能力 800 万 t。依据《暖通空调气象资料集》,该区域室外环境参数见表 1,全年气温变化趋势如图 1 所示。

表 1 室外环境参数

Table 1 Outdoor environmental parameters

室外环境参数	数值
冬季采暖室外计算温度/℃	-18
冬季通风室外计算温度/℃	-12
夏季通风室外计算温度/℃	28
极端最低温度平均值/℃	-25
累年最冷月平均温度/℃	-10.2
日平均温度 ≤ 5 ℃的时间/d	145
日平均温度 ≤ 5 ℃期间的平均温度/℃	-4.8
最大冻土深度/m	1.71
室外风速	冬季平均风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 2.6 冬季主导风向 NW
大气压力	冬季大气压力/kPa 90.2 夏季大气压力/kPa 88.96

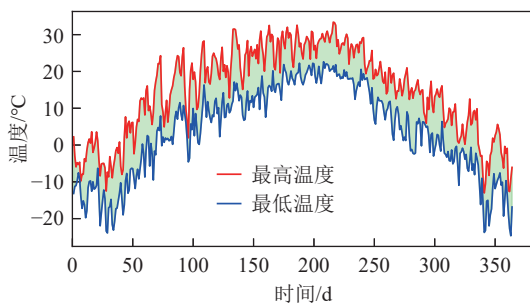


图 1 全年气温变化趋势

Fig.1 Annual temperature variation trend

1.2 负荷特性分析

矿井负荷呈现出“以电为主、冷热为辅、工业为主、生活为辅、需求多样、季节显著”的特点^[12],煤矿生产负荷占负荷总量的大部分比例,用能主要为电和热的形式。矿井的用能负荷特性分析是研究多能互补综合能源系统的重要步骤,为确定能源需求的模式和峰谷变化,需了解矿井源荷匹配特性,从而更好地设计和优化煤矿供能系统。

1.2.1 电负荷分布

在矿井电负荷中,矿井生产负荷占据主要地位,由于电功率的大小与煤矿开采深度、开采条件关系较大,不同矿井的用电负荷不尽相同,特别是由于煤矿

涌水量不同所产生的耗电量差异较大,对纳林河 2 号煤矿的开采电负荷数据主要包括矿井开采电负荷和选煤厂电负荷,其负荷数据如图 2 所示,全年耗电量为 20 271 万 kWh,折算吨煤综合电耗为 25.33 kWh/t。矿井在正常生产时实行“三班倒”生产工作制度,叠加办公、生活电负荷有较为明显的规律性波动,其波动规律与开采倒班时间重叠如图 3 所示。

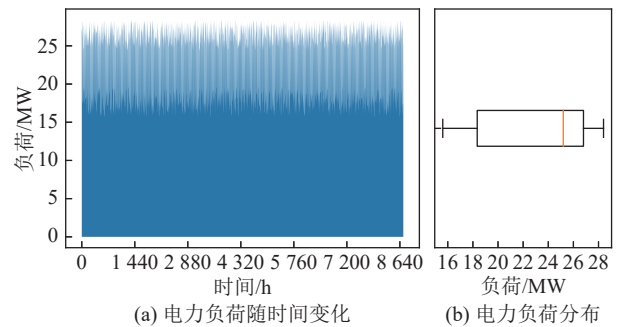


图 2 煤矿用电负荷数据

Fig.2 Coal mine electrical load data

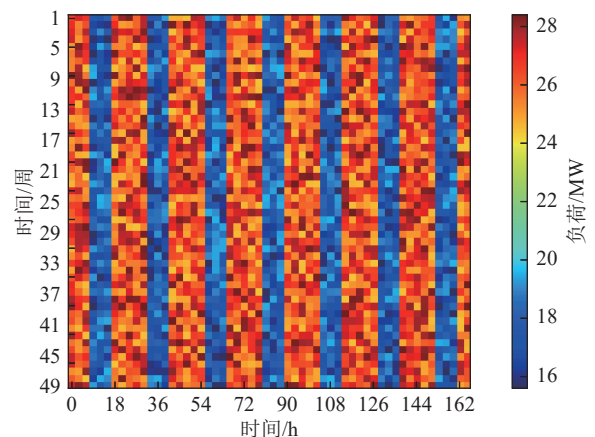


图 3 煤矿电力负荷分布

Fig.3 Coal mine electrical load distribution heatmap

1.2.2 热负荷分布

纳林河 2 号矿井的热负荷主要为矿井工业场地的采暖通风、热水制备及井筒防冻用热,由于缺失实际用热负荷数据,根据煤矿设计资料 and 当地气象数据,利用工业建筑、行政建筑以及井筒防冻需求等矿井热负荷计算模型,对该矿热负荷需求进行全年模拟,如图 4—图 5 所示,纳林河 2 号矿井的热负荷主要分布在冬季,且随温度有较强的周期性变化,冬季负荷较高,而夏季负荷较低,其尖峰负荷发生在气温较低的時刻,达到了 35 MW 左右。

1.3 资源特性分析

我国西部地区的太阳能、风能等清洁能源资源潜力巨大,同时在煤炭开采过程中也会产生一些排水、

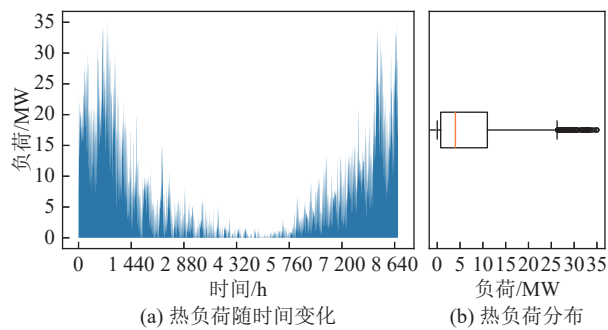


图4 煤矿用热负荷数据

Fig.4 Coal mine heat load data

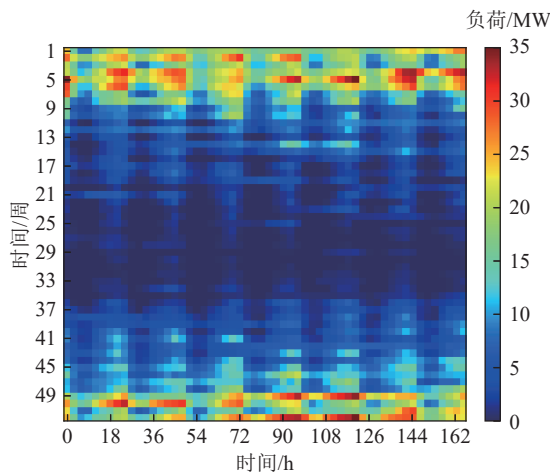


图5 煤矿热负荷分布

Fig.5 Coal mine heat load distribution heatmap

排风、余热、矿井瓦斯和伴生资源等。矿井附近能源资源条件对于规划和设计多能互补综合能源系统非常重要,因为其资源特征决定了系统的可靠性和稳定性。

1.3.1 太阳能资源

太阳能资源分析是矿井能源利用的重要组成部分,通过对该区域的太阳辐射量、日照时数、周期性和季节性变化条件等因素的分析,合理规划太阳能资源的利用方式^[13]。纳林河2号矿井太阳总辐射受纬度和季节影响较大,夏季辐射强度相对较高,冬季辐射较弱,如图6所示。受到气象条件和大气污染等因素

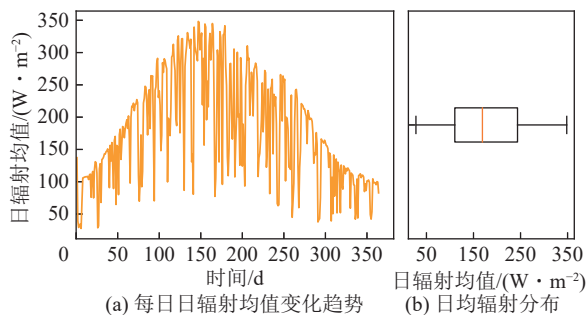


图6 全年日均辐射变化趋势

Fig.6 Annual average radiation variation trend

的影响,大气中的散射现象会随着气候和季节的变化而变动,如图7所示。

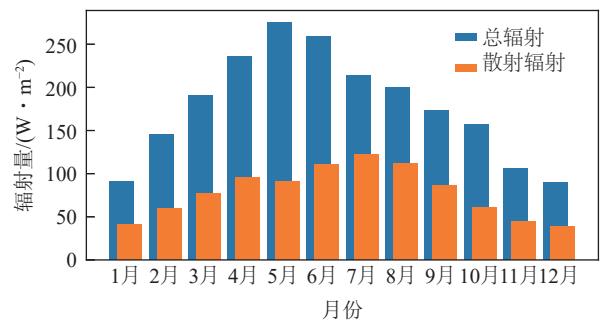


图7 全年月总辐射与散射辐射变化趋势

Fig.7 Annual variation trend of monthly total radiation and scattered radiation

1.3.2 风能资源分析

风能资源分析对于确定风能发电设施的位置以及进行风电场的规划和设计至关重要。通常涉及确定风速、风向和风能密度等参数,以便评估在该地区建立风能发电设施的可行性和效益^[14]。全年10 m风速数据可用于评估纳林河2号矿井区域风能资源的大致分布情况,如图8—图9所示,可以看出,该矿井风能全年风速分布较为均匀,但在实时波动性较大,其夜间出力可作为太阳能资源的重要补充。

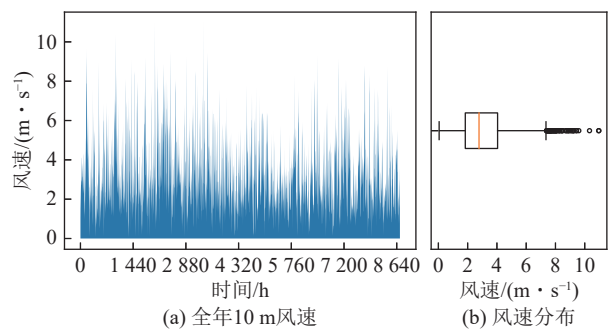


图8 全年10 m风速变化趋势

Fig.8 Annual variation trend of 10 m wind speed

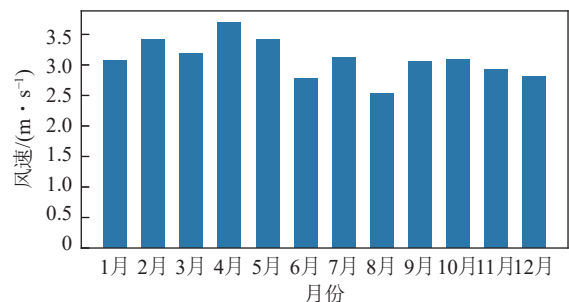


图9 全年月平均风速变化趋势

Fig.9 Annual variation trend of monthly average wind speed

1.3.3 矿井伴生资源

煤炭开采过程中也会产生一些排水、排风、余热、

矿井瓦斯等伴生资源^[4,15]。矿井水余热资源是重要的余热来源之一,这些水资源不仅可以通过处理后作为其他工业生产过程进行回用,同时由于在采矿过程中吸收了浅层的地热能蕴含了大量的低品位热能,可以通过热泵技术进行回收利用,为煤矿提供额外的能源支持。矿井回风中同样蕴藏着大量的低品位余热资源,通过热泵等换热设备进行有效回收,用于供暖或其他生产过程,实现能源的再利用。另外,抽采瓦斯资源也是一种潜在的能源来源,其热值可以作为能源的补充。此外,煤矿内部空压机运行产生的余热也是可利用的能源,这些余热可以通过适当的技术进行回收,为煤矿提供额外的能源支持。由表2可知,纳林河2号矿井排水余热资源量是伴生资源中最大的,目前该矿的矿井水余热资源为部分利用,装机容量为21.93 MW,矿井回风资源及空压机就余热资源暂未利用。

表2 纳林河2号矿井伴生资源利用情况

Table 2 Utilization of associated resources in the mine

类型	能量 品位	资源 量/kW	利用方式	是否 适用	备注
矿井排水余热	低	20 836	水源热泵机组	是	部分利用
矿井回风余热	低	9 000	水源热泵机组	是	暂未利用
空压机余热	高	240	换热器	是	暂未利用
瓦斯发电余热	—	0	—	否	低浓度瓦斯矿井

2 煤矿多能互补热电协同系统模型

2.1 系统工作原理

矿井多能互补综合能源系统构建,不同地区的资源禀赋条件及用能需求的不同,所构建的多能互补综合能源系统结构、容量所适应的范围均有所不同,能源利用技术多种多样,能源利用网络必将形态各异,若要实现高能量效率、高经济性,就需要对能量系统进行规划和优化,形成优化的多能互补综合能源利用网络^[16]。构建思路是利用光伏、风电、热泵、储能等能源生产转换储存设备在可行边界条件下实现能量生产转化与平移,通过分析矿区太阳能、风能和伴生资源以及矿井热电源需求,在气象条件、分时电价、设备容量等边界约束下,采用供能总成本最低的方式满足矿井热能与电能的实时需求,构建思路如图10所示。

结合矿区丰富的可再生能源、大量的沉陷区土地资源以及热电用能需求,综合考虑风光资源条件、热电用能需求以及热电储能等相关约束条件,提出适用于矿井的多能互补热电联供系统结构,如图11所示。

多能互补热电联供系统主要由以下3部分组成:①电力系统。主要由风电、光伏、大电网电源等发电设备组成,为系统提供电力。②热力系统。主要由水源热泵、空气源热泵、燃煤锅炉、电锅炉等设备组成,为系统提供热力。③储能系统。主要由电池、储热等设备组成,为系统提供储能。

2.2 设备模型

为详细分析多能互补热电联供系统特征,对煤矿多能互补热电协同系统中光伏发电、风力发电、热泵、燃煤锅炉以及储能设备进行数学建模。

2.2.1 光伏发电机组

光伏发电机组的发电量^[17]可表示为

$$P_{pv,e} = \eta_0 P_{pv} G / E_s \quad (1)$$

式中: $P_{pv,e}$ 为光伏发电机组光电转化的电能, kW; η_0 为光伏发电机组的转化效率, %; P_{pv} 为光伏发电机组的装机容量, kW; G 为表面太阳辐照度, kW/m^2 ; E_s 为标准条件下的辐照度, 1 kW/m^2 。

光伏系统的转化效率计算式为

$$\eta_0 = 1 - \gamma(t_{pv} - t_r) \quad (2)$$

式中: γ 为光伏温度变动因子; t_{pv} 为光伏发电机组的工作温度, $^{\circ}\text{C}$; t_r 为参考温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.2 风力发电机组

风力发电机组的出力由发电设备的额定装机容量和环境风速决定,其出力特性可描述^[18]为

$$P_{wind,e} = \begin{cases} 0, & v \in [0, v_{in}] \cup [v_{out}, +\infty) \\ \frac{v - v_{in}}{v_R - v_{in}} P_{wind}, & v \in [v_{in}, v_R] \\ P_{wind}, & v \in [v_R, v_{out}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: v, v_{in}, v_R, v_{out} 分别为风力发电机组的实际风速、切入风速、额定风速和切出风速, m/s ; $P_{wind,e}$ 为风力发电机组出力, kW; P_{wind} 为风力发电机组额定装机容量, kW。

由于一般气象数据只给出10 m高度风速,为了计算风力发电机组的出力,还应将10 m高度风速反推出该类型风力发电机组轮毂高度风速,其折算方法如式(4)所示:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^a \quad (4)$$

式中: v_1, v_2 分别为 z_1, z_2 高度的风速, m/s ; a 为风切变指数。

2.2.3 热泵供热机组

热泵通过消耗电力产生热量,对于煤矿来讲,主要是通过提升矿井水和回风空气中的热量品质实现

$$\min (C_{\text{inv}} + C_{\text{fix}} + C_{\text{fuel}} + C_{\text{env}}) \quad (10)$$

$$C_{\text{inv}} = \sum_{p \in P_{\text{exp}}} \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1} k_p^{\text{inv}} C_{\text{AP},p} \quad (11)$$

$$C_{\text{fix}} = \sum_{p \in P_{\text{exp}}} k_p^{\text{fix}} C_{\text{AP},p} \quad (12)$$

$$C_{\text{fuel}} = \sum_{t \in T_m, c \in C_{\text{st}}} k_c^{\text{fuel}} \rho_{ct} \quad (13)$$

$$C_{\text{env}} = \sum_{t \in T_m, c \in C_{\text{env}}} k_c^{\text{env}} \varphi_{ct} \quad (14)$$

式中: C_{inv} 为年化投资成本, 元; C_{fix} 为年度固定成本, 元; C_{fuel} 为年度燃料成本, 元; C_{env} 为年度环境排放成本, 元; i 为年化利率, %; $C_{\text{AP},p}$ 为系统各设备的装机容量, 元; k_p^{inv} 为单位容量投资, 元/kW; k_p^{fix} 为单位容量固定成本, 元/kW; k_c^{fuel} 为单位燃料成本, 元/t; k_c^{env} 为单位排放环境成本, 元/t; ρ_{ct} 为 t 时刻的燃料消耗, t; φ_{ct} 为 t 时刻污染物排放, 元/t; P_{exp} 为系统所包含的流程集合; T_m 为系统所包含的时间区间集合; C_{st} 为系统中所消耗的能源品种集合。

2.4 系统约束条件

2.4.1 能量平衡约束

对于纳林河 2 号煤矿, 多能互补热电协同系统的能量平衡约束主要为电平衡约束和热平衡约束, 可表示为以下公式:

$$D_e = P_{\text{grid}} + P_{\text{pv},e} + P_{\text{wind},e} + P_h \quad (15)$$

$$D_h = Q_h + Q_b \quad (16)$$

式中: D_e 为电力负荷需求, kW; D_h 为热负荷需求, kW; P_{grid} 为电网电力供应, kW。

2.4.2 设备容量约束

对于设备的容量约束可表示为

$$0 \leq P_{\text{grid}} \leq C_{\text{AP},\text{grid}} \quad (17)$$

$$0 \leq Q_h \leq C_{\text{AP},h} \quad (18)$$

$$0 \leq Q_b \leq C_{\text{AP},b} \quad (19)$$

式中: $C_{\text{AP},\text{grid}}$ 为变压器容量, kW; $C_{\text{AP},h}$ 为热泵容量, kW; $C_{\text{AP},b}$ 锅炉装机容量, kW。

2.5 评价指标

在对多能互补热电联供系统进行配置时, 从多个维度建立评价指标体系来分析多能互补系统^[20], 为实际需要提供不同角度的综合性参考。

2.5.1 经济性评价

经济性是影响系统规划与运行收益的关键指标, 是工程项目投资决策的基础, 贯穿项目实施的整个过

程。对矿井多能互补综合能源系统经济性评价不仅涉及系统设备初始投资、设备运行维护等费用, 还应包含可再生能源发电收益、自建供热系统减少外部集中供热费用所带来的收益^[21]。

$$C_{\text{total}} = C_{\text{gz}} + C_{\text{az}} + C_{\text{tj}} + C_{\text{qt}} + C_{\text{yb}} \quad (20)$$

$$C_{\text{ope}} = C_h + C_e + C_m + C_d \quad (21)$$

式中: C_{total} 为静态总投资费用, 元; C_{gz} 为设备购置费用, 元; C_{az} 为设备安装工程费用, 元; C_{tj} 为土建工程费用, 元; C_{qt} 为其他费用, 元; C_{yb} 为工程预备费用, 元; C_{ope} 为总运行费用, 元; C_h 为供热系统运行费用, 元; C_e 为供电系统运行费用, 元; C_m 为维修费用, 元; C_d 为折旧费用, 元。

2.5.2 能效性评价

综合能效是用能单位在统计报告期内实际产出的能源量除以实际消耗的各种能源量, 如式 (22) 所示:

$$\eta = \frac{\sum_i R_i}{\sum_j W_j} = \frac{R_h + R_e}{\sum_m W_{t,m} + \sum_n W_{r,n} + \sum W_{\text{grid}}} \quad (22)$$

$$R_h = \frac{Q_h}{29\,307} \quad (23)$$

$$R_e = \frac{3\,600E}{29\,307} \quad (24)$$

$$W_{t,m} = \frac{Q_{t,m}}{29\,307} \quad (25)$$

$$W_{r,n} = \frac{Q_{r,n}}{29\,307} \quad (26)$$

$$W_{\text{grid}} = \frac{3\,600E_{\text{grid}}}{29\,307} \quad (27)$$

式中: η 为综合效能, %; R_h 为用户端耗热量的标准煤当量折算值, t(以标煤计, 下同); R_e 为耗电量的标准煤当量折算值, t; Q_h 为用户端耗热量, MJ; E 为用户端耗电量, MWh; $W_{t,m}$ 为输入的第 m 种除可再生能源机组外的标准煤当量折算值; $W_{r,n}$ 为输入的第 n 种可再生能源机组的标准煤当量折算值; W_{grid} 为电网总输入耗电量的标准煤当量折算值, 0.122 9 kg/kWh; E_{grid} 为电网输入的总电能, MWh; $Q_{t,m}$ 为输入的第 m 种非可再生能源的热量, MJ; $Q_{r,n}$ 为输入的第 n 种可再生能源的热量, MJ。

2.5.3 环保性评价

对多能互补综合能源系统的减排量进行核算采用与燃煤机组对比的方式进行, 以生态环境部发布的《2021、2022 年度全国碳排放权交易配额总量设定与

分配实施方案》中关于各类别机组碳排放的基准值,中国电力企业联合会发布的《中国电力行业年度发展报告 2023》统计数据,2022 年单位火电发电量烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放量分别为 0.017、0.083、0.133 g/kWh。

多能互补系统的二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物和烟尘减排量计算方法如式 (28)~式 (30) 所示:

$$P_{\text{CO}_2} = G_e E_{\text{CO}_2,e} - P_{\text{CO}_2,\text{act}} \quad (28)$$

$$P_{\text{CO}_2,\text{act}} = P_{\text{CO}_2,o} + P_{\text{CO}_2,e} \quad (29)$$

$$P_{\text{SO}_2} = G_e E_{\text{SO}_2,e} \quad (30)$$

$$P_{\text{NO}_x} = G_e E_{\text{NO}_x,e} \quad (31)$$

$$P_{\text{dust}} = G_e E_{\text{dust},e} \quad (32)$$

式中: P_{CO_2} 为多能互补系统二氧化碳减排量, t; $P_{\text{CO}_2,\text{act}}$ 为系统二氧化碳实际排放量, t; $P_{\text{CO}_2,o}$ 为化石燃料燃烧直接排放二氧化碳, t; $P_{\text{CO}_2,e}$ 为电网购电折算二氧化碳排放, t; G_e 为多能互补系统发电量, kWh; $E_{\text{CO}_2,e}$ 为燃煤发电基准机组二氧化碳排放量, t/kWh; P_{SO_2} 为多能互补系统二氧化硫减排量, kg; $E_{\text{SO}_2,e}$ 为燃煤发电基准机组二氧化硫排放量, kg/kWh; P_{NO_x} 为多能互补系统氮氧化物减排量, kg; $E_{\text{NO}_x,e}$ 为燃煤发电基准机组氮氧化物排放量, kg/kWh; P_{dust} 为多能互补系统烟尘减排量, kg; $E_{\text{dust},e}$ 为燃煤发电基准机组烟尘排放量, kg/kWh。

2.5.4 安全可靠性评价

可靠性指标旨在评价煤矿多能互补热电协同供能系统的支撑能力,多能互补系统为以外部电网为备用电源,在评价系统供安全可靠性时考虑自身可再生能源系统供能的可靠性,供电可靠率为评价周期内系统实际不依靠电网供电的供能总小时数与计划供电总小时数的比值,能量缺供系数为系统在评价周期内依靠系统自身能量供给系统进行供给时,能量缺供总量与用户需求用能总量的比值。为了量化多能互补系统的可靠性表现,采用供电可靠率和能量缺供系数 2 个关键指标进行评估,如式 (33)~式 (34) 所示:

$$a_e = \frac{T_{e,\text{total}}}{N_{e,\text{total}}} \quad (33)$$

$$\sigma_{\text{lack}} = \frac{E_{\text{lack}}}{Q_{e,\text{need}} + Q_{h,\text{need}}} \quad (34)$$

式中: a_e 为供电可靠率, %; $T_{e,\text{total}}$ 为系统实际供能总小时数, h; $N_{e,\text{total}}$ 为系统计划供能总小时数, h; σ_{lack} 为能量缺供系数, %; E_{lack} 为系统在评价周期内能量缺供总量, kWh; $Q_{e,\text{need}}$ 为电负荷需求总能量, kWh; $Q_{h,\text{need}}$ 为热负荷需求总能量, kWh。

3 系统模拟分析

基于煤矿能源需求和可再生能源资源情况,对煤矿多能互补综合能源系统的选型定容,利用模型对各种能源系统进行模拟计算,并结合数据进行多方案比较,评估不同能源系统在满足煤矿需求、优化能源结构、提高可再生能源比例方面的效果。考虑到多能互补配置优化方法的可扩展性和易用性,采用基于 Pyomo 的开源优化建模工具包对系统进行优化建模,通过调用开源求解器 GLPK 对构建系统进行模拟计算。

3.1 系统模型参数

纳林河 2 号矿井多能互补热电协同供能系统模型参数按照市场数据进行设定,设备的经济指标见表 3。

表 3 设备的经济指标

Table 3 Equipment economic indicators

项目	单位成本	固定成本	燃料成本
光伏发电	3 800元/kW	40.8元/kW	—
风力发电	4 800元/kW	57.6元/kW	—
矿井水水源热泵	1 600元/kW	19.2元/kW	—
回风空气源热泵	2 250元/kW	27元/kW	—
燃煤锅炉	1 050元/kW	12.6元/kW	726元/t
储能电池	1 800元/kWh	21.6元/kWh	—
储能水罐	160元/kWh	1.9元/kWh	—

目前主要的电网的供电电价主要有现货电价、电量电价及峰谷电价等方式,选取峰谷电价时间价格及时间进行计算,见表 4。在环境成本方面,主要考虑二氧化碳排放成本,参考上海环境能源交易所的全国碳排放市场价格行情,模型中取 70.87 元/t 的二氧化碳进行排放成本计算。

表 4 峰谷电价

Table 4 Peak and valley electricity prices

时段	时刻	购电电价/ (元 · kWh ⁻¹)	售电电价/ (元 · kWh ⁻¹)
低谷	23:00~7:00	0.200 2	0.282 9
平段	7:00~8:00, 11:30~18:30	0.462 2	0.282 9
峰段	8:00~11:30, 18:30~23:00	0.724 2	0.282 9

3.2 方案对比

为了研究纳林河 2 号矿井供能系统不同设备配置方案的情况特性,模拟计算了 3 种方案条件下的运行情况,方案 1 为纳林河现有供能系统设备配置情况,方案 2 为多能互补方案,方案 3 为在方案 2 基础上调

表5 多能互补系统方案对比
Table 5 Multi-energy complementary system scheme comparison

类型	方案1	方案2	方案3
能源资源	网电、煤、余热	风光、网电、余热	风光、网电、余热
转化设备	燃煤锅炉、水源热泵	光伏、风电、热泵、储电、储热	光伏、风电、热泵、储电、储热
供能方式	热电分别供应	热电联供	热电联供, 需求侧响应
供能规模	电: 28 MW	电: 28 MW	电: 28 MW
	热: 35 MW	热: 35 MW	热: 35 MW
优点	投资成本低	能源利用效率高, 碳排放量低	能源利用效率高, 碳排放量低
缺点	能源利用效率低, 碳排放量高	投资成本高	投资成本高, 对用户用能行为有一定要求

整用电负荷方案, 将中班电力负荷平移至早班, 降低夜晚的热电负荷双峰叠加水平, 系统方案对比见表5。

对于矿井多能互补系统, 由于风电、光伏的收益较好, 在以最小年化投资成本优化时, 均能达到最大设备容量边界, 考虑到相关并网政策及矿井的地质条件, 取方案2和方案3的光伏装机容量为50 MW, 风电装机容量为25 MW。3种方案下系统的运行情况见表6。

表6 多能互补系统容量配置方案对比
Table 6 Multi-energy complementary system capacity configuration scheme comparison

类型	方案1	方案2	方案3
变电容量/MVA	34.57	56.96	36.25
光伏发电容量/MW	—	50	50
风力发电容量/MW	—	25	25
水源热泵容量/MW	21.93	28	28
空气源热泵容量/MW	—	1.050	0.775
燃煤锅炉容量/MW	14.21	—	—
储电设备容量/MWh	0	69.61	48.45
储电设备充放功率/W	0	23.92	15.66
储热设备容量/MWh	0	49.74	59.17
储热设备充放功率/W	0	11.83	18.14
购电占比/%	100	32.33	27.21
售电占比/%	—	22.87	14.34
年化成本/万元	175.56	3 072.98	2 814.32
运行成本/万元	29.94	524.09	479.98
燃料成本/万元	407.66	0	0
购电成本/万元	10 340.92	3 343.00	3 160.73
发电收益/万元	0	-856.50	-536.80
碳排放费用/万元	914.38	478.26	433.31
费用合计/万元	11 969.09	6 561.93	6 351.64

注: 发电收益为光伏风电的余电上网收益, 该收益用于抵消煤矿供能系统的用能成本。

3种方案条件下主要结论如下: ①3种情景条件下均能满足纳林河2号矿井的热电用能需求, 热电联

合供能条件下方案1的年化投资成本是最高的, 方案3的年化投资成本是最底的, 为6 351.64万元。②方案3由于平移了夜晚的热负荷至白天, 大大降低了热电双峰负荷叠加程度, 其变电容量大幅下降为36.25 MVA, 基本与方案1相当。③方案1由于未设置储能装置, 燃煤锅炉及水源热泵出力需大于热负荷需求的最大出力, 方案2与方案3通过储能降低了热泵配置容量。④在热能供应方面, 由于储能的参与, 水源热泵及空气源热泵的供热能力不需要达到供热的峰值出力即可实现全年供应, 提升了矿井水余热回收量和设备利用率。⑤在购电售电方面, 方案2与方案3从电网购电占总用电量的占比降低至30%左右, 方案2与方案3风光发电机组所发的电量大量自发自用, 售电占风光发电机组总发电量的比例在20%左右。

3.3 热电协同供能系统供需平衡情况

3.3.1 时序模拟

时序模拟是对系统运行情况进行时间上的模拟和分析, 以了解系统在不同时间段内的能源供需状况、能源转换效率、经济性等方面的表现^[22]。笔者模拟了全年不同季节、负荷情况下的热电能源供需, 如图12所示, 分别选取冬季与夏季典型运行工况, 如图13—图14所示, 可以看出全年总负荷的波动主要由热能负荷的季节性变化所导致, 全年最大负荷在61.19 MW, 热能负荷35 MW, 电负荷最大为28.399 MW。电负荷由外购电力、风力发电、光伏发电以及储能系统多种能源系统进行供给, 在峰谷电价机制的作用下, 储电系统在一天内通过“两充两放”实现对可再生能源的最大化利用, 系统在冬季用能高负荷时对外售电量较小。热负荷主要依靠矿井水源热泵进行满足, 在最高负荷的这段时间水源热泵在达到最大出力, 并通过储热系统将部分负荷进行储存, 在高负荷或高电价条件下进行释放以节省投资和供能成本。夏季热负荷较低, 电负荷相对较高, 需并网发电减少弃风弃光。

3.3.2 能流模拟

能流模拟可以用来展示太阳能、风能以及伴生余

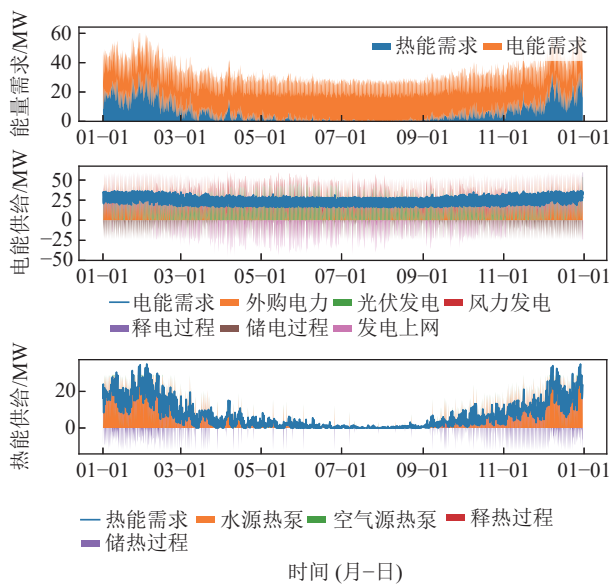


图 12 矿井多能互补热电协同供能全年平衡情况

Fig.12 Annual balance of multi-energy complementary heat and power coordinated supply in mine

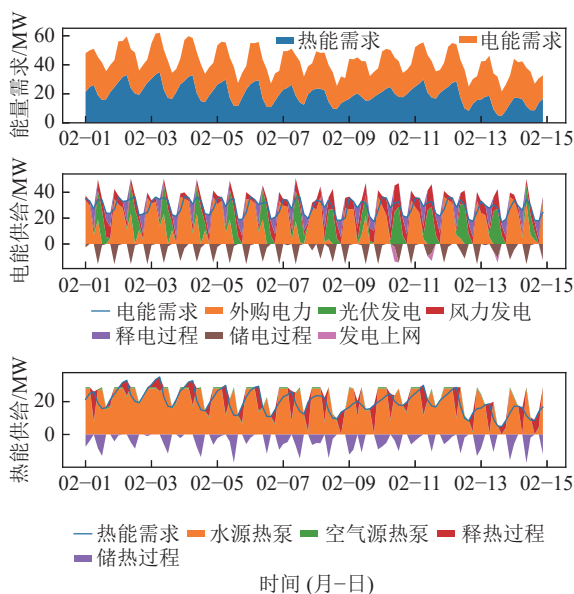


图 13 矿井多能互补供能系统冬季典型工况

Fig.13 Winter typical operation conditions of multi-energy complementary supply system in mine

热等各种能源的生产和消费情况,以及它们之间的转换过程,直观地了解各种能源之间的互补关系,以及系统中的能量损耗和转换效率^[23]。纳林河 2 号矿井多能互补热电协同供能系统冬季典型单日和夏季典型单日正午 12 时的能量流动如图 15—图 16 所示,可以看出电能主要由光伏发电和风力发电提供,这 2 种可再生能源产生的多余电能进行一定量储存,增加新能源电力的消纳,减少外购电力的需求。冬季热能主要来自水源热泵和空气源热泵,水源热泵在正午时运行在高负荷,在消纳大量的绿电的同时储存大量热能。

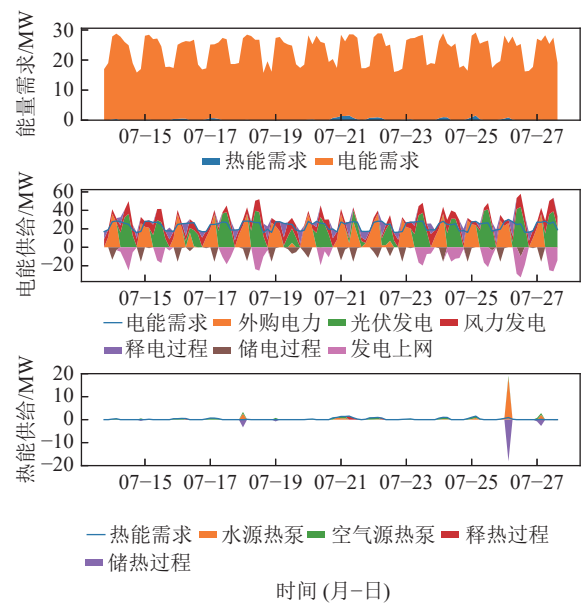


图 14 矿井多能互补供能系统夏季典型工况

Fig.14 Summer typical operation conditions of multi-energy complementary supply system in mine

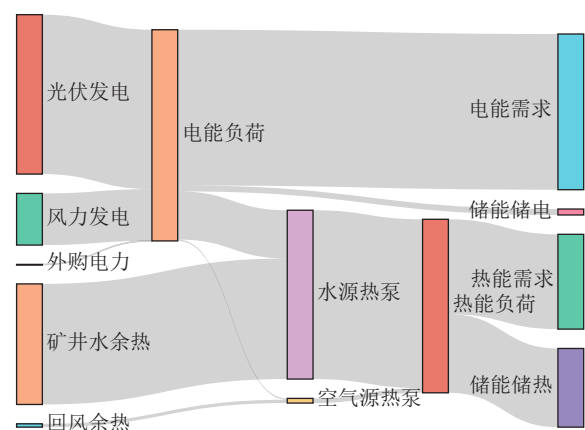


图 15 矿井多能互补供能系统冬季 2 月 1 日 12:00 能流

Fig.15 Energy flow diagram of multi-energy complementary supply system in mine at 12:00 on February 1 in winter

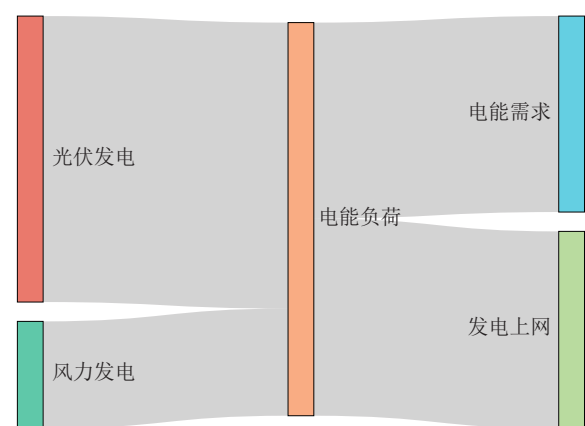


图 16 矿井多能互补供能系统夏季 7 月 14 日 12:00 能流

Fig.16 Energy flow diagram of multi-energy complementary supply system in mine at 12:00 on July 14 in summer

夏季由于热能需求大幅下降,光伏与风电的大量电能除满足自身需求外全部上网销售。

3.4 系统综合评价

3.4.1 经济性

在系统静态总投资方面,方案2和方案3远超过方案1,如图17所示,这是由于方案2和方案3增加了光伏和风力发电机组,其投资占比分别达到61.6%、66.9%,储能系统占比达到了28.3%和22.3%,虽然方案2和方案3的静态总投资较高,但其由于在后续运行过程中不需要燃用煤等化石燃料,多能互补热电协同供能系统在经济性上仍具有显著的优势,通过结合太阳能、风能、煤矿伴生可再生资源以及热能能量的互补互济,实现其运行费用大幅下降,如图18所示。

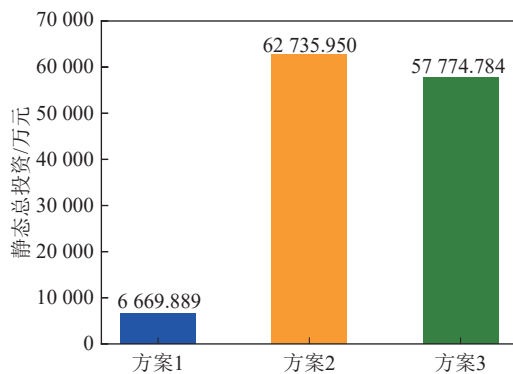


图17 纳林河2号矿井多能互补供能系统不同方案的静态总投资

Fig.17 Static total investment of different schemes for multi-energy complementary supply system in Nalinhe No.2 Mine

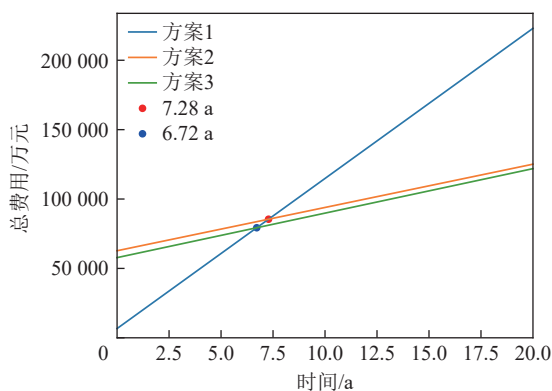


图18 纳林河2号矿井多能互补供能系统不同方案的运行总费用

Fig.18 Total operating costs of different schemes for multi-energy complementary supply system in Nalinhe No.2 Mine

3.4.2 综合能效

多能互补热电协同供能系统在系统的综合能效方面同样具有优势,方案1、方案2和方案3均配置了矿井水水源热泵,其综合能效均表现较好,见表7,

但由于方案2和方案3采用了储热措施,提高了热泵机组利用时长,进一步提升了系统综合能效,同时方案2和方案3进一步促进可再生能源的消纳,系统总供能量中可再生能源占比在65%以上。

表7 综合能效对比

Table 7 Comprehensive energy efficiency comparison

综合能效	方案1	方案2	方案3
电能产出/t(以标煤计)	24 855.02	28 571.33	27 190.42
热能产出/t(以标煤计)	7 551.31	7 549.38	7 549.38
电能输入/t(以标煤计)	25 865.77	14 792.27	13 401.93
光伏输入/t(以标煤计)	0	9 191.42	9 191.42
风电输入/t(以标煤计)	0	7 053.99	7 053.99
燃料输入/t(以标煤计)	4 362.72	0	0
绿能占比/%	23.72	67.77	69.63
综合能效/%	107.20	116.38	117.18

3.4.3 环保性

矿井多能互补热电协同供能系统通过整合可再生能源如太阳能和风能,系统可以减少对传统燃煤等高碳能源的依赖,从而降低二氧化碳等温室气体的排放,减排量见表8。方案1的二氧化碳排放主要为燃煤锅炉排放及购电排放,方案2和方案3主要为购电排放。从污染物排放的角度来看,方案3具有最好的减排效果,该方案每年可以减少CO₂排放量约144 357.07 t,减排SO₂约13 337.47 kg,减排NO_x约21 372.08 kg,减排粉尘约2 731.77 kg。

表8 环保减排量

Table 8 Environmental emission reduction

环保评价	方案1	方案2	方案3
购电CO ₂ 排放质量/t	117 923.92	67 439.01	61 100.39
燃煤锅炉CO ₂ 排放质量/t	11 010.51	0	0
CO ₂ 排放质量合计/t	128 934.43	67 439.01	61 100.39
燃料消耗/t(以标煤计)	4 362.72	0	0
排放SO ₂ 质量/kg	1 207.02	0	0
排放NO _x 质量/kg	1 934.14	0	0
排放粉尘质量/kg	247.22	0	0
减排CO ₂ 质量/t	60 982.40	147 211.23	144 357.07
减排CO ₂ 质量/kg	3 924.75	13 531.21	13 337.47
减排NO _x 质量/kg	6 289.05	21 682.53	21 372.08
减排粉尘质量/kg	803.86	2 771.45	2 731.77

3.4.4 安全可靠

从供能系统安全可靠性的角度来看,方案1供能完全依赖于外部系统,一旦供电系统发生故障,失去电

网外部电源, 就会造成供能系统完全丧失能源供给。方案 2 和方案 3 通过多种能源的相互配合, 可在一定程度上弥补风光等可再生能源的间歇性和不稳定性, 实现更高的供能可靠率, 减少对传统能源的依赖, 实现更好的电能与热能供应灵活性, 其供能安全可靠对比见表 9。

表 9 多能互补系统供能可靠性分析
Table 9 Multi-energy complementary system supply reliability analysis

环保评价	方案1	方案2	方案3
供能可靠率/%	0	45.44	39.82
能量缺供系数/%	100	59.51	53.90

4 结 论

- 1) 提出一种适用于煤矿用能特征及矿区资源条件的多能互补热电协同供能系统, 构建优化目标函数, 利用线性规划求解全年优化调度情况, 以年产 8 Mt 纳林河 2 号矿井为例, 优化后年化成本节约 53.06%, CO₂ 年减排 14.43 万 t, 绿能供能占比可提高至 69.63%。
- 2) 构建的多能互补热电系统供能系统在提升供能可靠性的同时, 降低系统对电网的依赖程度, 系统的电网输入电量仅占总电力负荷的 27.21%, 降低了对化石燃料的依赖程度, 可在无煤炭等化石燃料的条件下可靠运行。
- 3) 通过添加合适容量储电/储热设备调整供能曲线, 以及通过合理安排工作排班周期调整用能曲线, 降低了热电双峰负荷叠加程度, 实现系统性能提升。
- 4) 通过多能互补热电协同供能系统的时序模拟和能流模拟, 实现了全年在不同季节、不同天气条件下的运行状况模拟, 更加全面地评估了系统的稳定性和可靠性。

参考文献(References):

[1] 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-09-22)[2024-04-03]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
[2] 国家发展改革委, 国家能源局, 财政部, 等. “十四五”可再生能源发展规划[R/OL]. (2021-10-21)[2024-04-03]. http://www.nea.gov.cn/2022-06/01/c_1310611144.htm.
[3] 中华人民共和国自然资源部.《中国矿产资源报告(2023)》[R/OL]. (2023-10-26)[2024-04-03]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202310/t20231027_2804635.html.
[4] 王龙飞, 王帅, 李庆, 等. “双碳”目标下西部地区煤矿多能互补供能研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(10): 36-42.
WANG Longfei, WANG Shuai, LI Qing, et al. Research on multi-en-

ergy complementary energy supply in coal mines in western China under the goals of carbon peak and carbon neutrality[J]. China Coal, 2023, 49(10): 36-42.
[5] 王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发: 未来煤矿转型升级新路径[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 59-79.
WANG Shuangming, LIU Lang, ZHAO Yujiao, et al. New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: A new path for transformation and upgrading of coal mines in the future[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 59-79.
[6] 袁亮, 张通, 张庆贺, 等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2131-2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131-2139.
[7] 梁睿, 李嘉翔, 巩敦卫, 等. 全清洁能源下的高品质矿区能源系统配置优化方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1669-1679.
LIANG Rui, LI Jiaxiang, GONG Dunwei, et al. Optimal planning method for the high-quality coal mine energy system with complete clean energy supply[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1669-1679.
[8] 李瑞华, 武进. 矿区多能互补近零碳供热模式研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(10): 83-87.
LI Ruihua, WU Jin. Research on multi-energy complementary near-zero carbon heating mode in mining area[J]. China Coal, 2023, 49(10): 83-87.
[9] 李江成, 李嘉翔, 任浩栋. 考虑伴生能源的煤矿综合能源系统两阶段运行优化[J]. 电力大数据, 2022, 25(2): 27-36.
LI Jiangcheng, LI Jiaxiang, REN Haodong. Two-stage operation optimization of coal mining integrated energy system considering associated energy[J]. Power Systems and Big Data, 2022, 25(2): 27-36.
[10] 陆梦恬. 考虑伴生能源利用的多目标煤矿综合能源系统配置及运行优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
LU Mengtian. Configuration and operation utilization for coal mine integrated energy system considering associated energy [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
[11] 王振, 吴继宗, 郝杨, 等. 分布式光伏发电系统接入煤矿配电网设计与研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 53-56.
WANG Zhen, WU Jizong, HAO Yang, et al. Design principle of distributed photovoltaic power generation system connected to coal mine distribution network[J]. Coal Engineering, 2022, 54(11): 53-56.
[12] 任浩栋. 基于伴生能源利用的矿区综合能源系统建模与运行优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
REN Haodong. Modeling and operational optimization of comprehensive energy systems in mining areas based on companion energy utilization[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
[13] 孙丽平, 方敏, 宋子恒, 等. 我国太阳能资源分析及利用潜力研究[J]. 能源科技, 2022, 20(5): 9-14, 18.
SUN Liping, FANG Min, SONG Ziheng, et al. Analysis of solar energy resources and research on investment potential in China[J]. Energy Science and Technology, 2022, 20(5): 9-14, 18.

- [14] 刘贵. 风力发电机组影响下的煤矿首采区工作面优化设计研究[J]. *中国矿业*, 2020, 29(S1): 490–494.
LIU Gui. Study on the optimal design of the working face in the first mining area under the influence of wind turbine generator system[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(S1): 490–494.
- [15] 吕超贤, 孙文, 宋关羽, 等. 煤矿能源资源高效利用发展研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(5): 136–145.
LYU Chaoxian, SUN Wen, SONG Guanyu, et al. Efficient utilization of energy resources in ccoal mines[J]. *China Engineering Science*, 2023, 25(5): 136–145.
- [16] 穆云飞, 吴志军, 郭浩辰, 等. 煤矿区综合能源微网架构及低碳运行优化研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(5): 111–121.
MU Yunfei, WU Zhijun, GUO Haochen, et al. Integrated energy microgrids and low-carbon operation optimization of coal mining areas[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(5): 111–121.
- [17] 张晓烽, 战钰, 刘玉婷, 等. 考虑新能源汽车的住宅综合能源系统多目标优化配置研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(12): 38–48.
ZHANG Xiaofeng, ZHAN Yu, LIU Yuting, et al. Research on multi-objective optimization allocation of residential integrated energy system considering new energy vehicles[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(12): 38–48.
- [18] 杨正军, 梁士兴, 徐钢, 等. 风光互补电醇联产系统的容量优化配置[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(12): 71–78.
YANG Zhengjun, LIANG Shixing, XU Gang, et al. Capacity optimization configuration of wind-solar complementary electricity-alcohol cogeneration system[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(12): 71–78.
- [19] 张思亮, 祁麟童, 曲浩维, 等. 光伏发电辅助空气源热泵供暖系统研究[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(12): 10–19.
ZHANG Silian, QI Lintong, QU Haowei, et al. Research on solar assisted air source heat pump heating systems[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(12): 10–19.
- [20] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. *高电压技术*, 2022, 48(11): 4330–4342.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(11): 4330–4342.
- [21] 王庆刚, 杨谋存, 朱跃钊, 等. 可再生能源多能互补热电联产系统评价方法综述[J]. *电网技术*, 2021, 45(3): 937–950.
WANG Qinggang, YANG Mousun, ZHU Yueqiao, et al. Review on evaluation methods of combined heating, power and biogas system coupled with renewable energy[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(3): 937–950.
- [22] 李湃, 黄越辉, 张金平, 等. 多能互补发电系统电/热/氢储能容量协调优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(13): 5158–5169.
LI Pai, HUANG Yuehui, ZHANG Jinping, et al. Coordinated optimization configuration of electrical/thermal/hydrogen storage capacity in multi-energy complementary power generation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(13): 5158–5169.
- [23] 孙文文, 何国庆. 基于能流图和碳流图的我国能源结构转型分析及展望[J]. *分布式能源*, 2022, 7(4): 10–17.
SUN Wenwen, HE Guoqing. Analysis and prospect of China’s energy structure transformation based on energy flow chart and carbon flow chart[J]. *Distributed Energy*, 2022, 7(4): 10–17.