

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.006

含水源热泵的区域综合能源系统低碳运行优化研究

Research on optimal operation of the regional integrated energy system with water-source heat pumps

徐恒志^{1,2}, 周博文^{1,2*}, 李广地^{1,2}, 华光辉³, 孔祥森⁴

XU Hengzhi^{1,2}, ZHOU Bowen^{1,2*}, LI Guangdi^{1,2}, HUA Guanghui³, KONG Xiangmiao⁴

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 辽宁省综合能源优化与安全运行重点实验室, 沈阳 110819; 3. 中国电力科学研究院有限公司 新能源与储能运行控制国家重点实验室, 南京 210003; 4. 沈阳航天新乐有限责任公司, 沈阳 110034)

(1.College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2.Key Laboratory of Integrated Energy Optimization and Secure Operation of Liaoning Province, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3.State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 4.Shenyang Aerospace Xinle Company Limited, Shenyang 110034, China)

摘要: 区域综合能源系统冬季供暖期通常受“以热定电”的运行模式制约,区域电网电能调峰能力低,可再生能源利用率低。提出在水源充沛地域引入水源热泵机组,实现热电解耦;同时,结合电制冷机、吸收制冷机、多元储能装置等能量转换设备,形成含水源热泵的区域综合能源系统。构建了各设备机组运行模型并耦合形成系统总体架构,为实现“双碳”目标,综合考虑系统运行经济成本与碳排放成本,建立了区域综合能源系统低碳运行优化模型并给出求解方法。对所提模型及方法进行仿真分析,探讨求解得到的最优运行策略对综合能源系统各方面运行成本的影响,验证了所提模型及运行策略的合理性及有效性。

关键词: 碳中和;区域综合能源系统;水源热泵;以热定电;热电解耦;电制冷机;吸收制冷机;多元储能装置;碳排放模型
中图分类号: TK 01:TM 732 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0706(2022)01-0039-10

Abstract: Regional integrated energy systems usually follow the "determining power by heating load" energy-supply principal in winter, resulting in the low load-regulation ability and low renewable energy consumption rate. Water source heat pump units are introduced into areas with abundant water sources to realize thermo-electric decoupling. Combining electric refrigeration devices, absorption refrigeration devices and multi-energy storage devices, a regional integrated energy system with water-source heat pumps is proposed. The overall architecture of this system is constructed by coupling the operation modes of different equipment. To achieve the goals of carbon peaking and carbon neutrality, a low-carbon optimized operation model is proposed on the premise of considering the operation costs and carbon emission costs. Through simulation, the effects of the optimal operation strategy on the operation costs of the integrated energy system at all aspects are studied, which verified the effectiveness of the proposed model and strategy.

Keywords: carbon neutrality; regional integrated energy system; water-source heat pump; determining power by heating load; thermoelectric decoupling; electric refrigeration device; absorption refrigeration device; multi-energy storage device; carbon emission model

0 引言

随着以化石能源为主的能源消费结构的转型升级^[1-2],多类能源耦合互联形成的综合能源系统应

运而生^[3-5]。在长江中下游等江河水系充沛地域,引入水源热泵机组,构建区域综合能源系统(Regional Integrated Energy System, RIES)并形成新型热电联产模式,不仅可实现冷/热/电/气等多种能源间的互补转化^[6-8],还可进一步提高系统清洁能源消纳率,充分显示了节能减排的特点^[9-11]。

当前,区域综合能源系统中的冷热电三联供

收稿日期:2021-07-12;修回日期:2021-10-28
基金项目:国家自然科学基金项目(61703081);中央高校基本科研业务费项目(N2004030)

(Combined Cold, Heat and Power, CCHP)大多以燃气机组作为核心机组,以天然气为燃料,兼具发电、供热等多种能源输出功能^[12-14],具有高效环保的供能优势,能源利用效率在70%以上,可以有效地实现能源的梯级利用^[15-17]。但在传统热电联产机组电-热深度耦合的情况下,当供暖期到来时,系统受“以热定电”的运行模式制约,电能产能过剩,降低了整个区域电网电能的调峰能力;同时,影响风光等可再生能源的并网运行,造成大量的弃风、弃光,使可再生能源利用率降低。针对此问题,文献[18]通过在综合能源系统内配置蓄热电锅炉来丰富能源利用结构,减轻“以热定电”约束的影响;文献[19]则主要利用储能设备,通过制定适当的调度策略来存储和释放能量,以减少弃风、弃光,从而提高清洁能源利用率,但此类方法电热转换方向单一,无法实现很好的电热解耦效果。

为了响应国家提出的“双碳”号召,进一步降低系统运行碳排放,需要有针对性地选择适用方法展开分析,以实现优化控制目标。目前,综合能源系统低碳化主要从2个方面展开。一方面是碳捕集技术的应用,文献[20]中指出在大型燃煤机组加装碳捕集设备可有效降低碳排放,但由于碳捕集设备对机组出力的约束以及安装成本高等原因,此技术的推广有一定的局限。另一方面是在综合能源系统引入碳交易^[21-23],确定相关优化目标,施行有效调度,此方法也是当前低碳调度的主要研究方向。文献[24]通过碳源分析和碳排放量核算方法,建立了碳交易模型和低碳优化目标;文献[25]针对参与用户少导致碳交易市场减排效果不好的问题,引入需求侧管理形成两阶段调度模型,有效调动了更多用户参与,提高了网络效率和经济效益;文献[26]考虑了由制造商和零售商组成的动态减排技术投资决策问题,构建了制造商与零售商成本分担协调下的投资博弈模型,以实现更好的减排效果;文献[27]在碳交易机制的基础上增添了生命周期分析,并基于此建立了低碳经济运行模型。但上述文献对系统内碳排放模型的建立并不充分,定量分析不够细致,对含水源热泵系统和清洁能源消纳场景的相关分析较少,因此,需要从多角度分析碳排放来源,在系统中更全面、更合理地建立碳排放模型,进一步降低系统运行的综合成本。

综上所述,本文针对区域综合能源系统“以热定电”问题及低碳运行进行探讨论证。在RIES中引入水源热泵机组,不仅可实现热电解耦,缓解供需两侧热电比差异;同时,水源热泵供能能效高的优势可进一步提高系统的能源利用率和可再生能源

渗透率。因此,首先构建包含水源热泵机组、燃气轮机、电冷机、吸收制冷机以及储能装置等能量转换设备的区域综合能源系统总体架构;在此基础上,建立各设备的碳排放交易模型,为后续低碳优化提供支撑;最后,综合考虑系统运行的经济性成本和碳排放成本,构建低碳经济运行优化模型,求解最优运行策略。

1 含水源热泵的区域综合能源系统

区域综合能源系统通过整合各类能源、丰富能量流结构来实现多能互补与梯级利用,满足多元负荷需求。针对系统中热电联产机组运行在“以热定电”约束下的问题,本文对传统综合能源系统进行结构优化,构建了含水源热泵的区域综合能源系统总体架构,如图1所示。此架构中,以冷热电三联供为核心,引入水源热泵机组和电热储能装置,配合燃气机组实现热电解耦,同时搭配电制冷机、吸收制冷机等能源转换装置协同运行,进一步提高系统的能源利用率。

RIES中天然气的主要来源是外部气网;电负荷需求主要由风力发电机组(Wind Turbine, WT)、燃气机组(Gas Unit, GU)、电储能设备(Energy Storage, ES)提供,也可在系统内电能供应不足时从外部电网进行购电;热负荷需求主要由燃气机组、水源热泵机组(Water Heat Pump, WHP)满足,同样可以根据系统内实时状态与储热设备(Thermal Storage, TS)进行双向交易;冷负荷可由吸收制冷机(Absorption Chiller, AC)、电制冷机(Electric Refrigerator, ER)、水源热泵机组提供,以满足用户日常需求。其中,燃气机组与水源热泵机组协同规划运行,是解决传统RIES中“以热定电”问题的新思路。

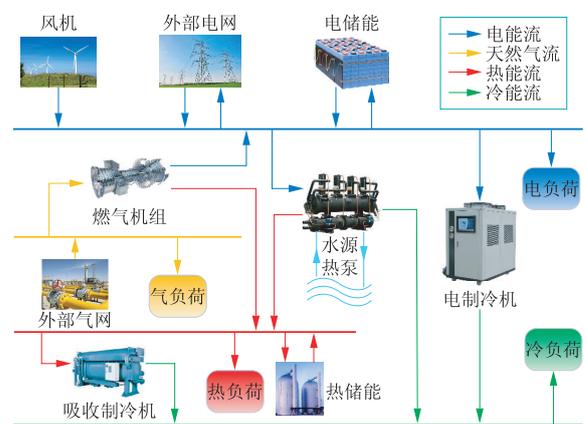


图1 含水源热泵的区域综合能源系统架构

Fig. 1 Architecture of the regional integrated energy system with water-source heat pump

1.1 水源热泵机组原理及模型

WHP利用水温水质稳定以及冬暖夏凉的特点,通过从水源中取热或向水源中释热来实现供热或制冷的功能。WHP一般由蒸发器、压缩机、冷凝器以及节流阀4个主要部分组成,其工作原理为:高温高压的制冷剂从压缩机排出后,进入冷凝器向高温热源释热,之后经节流阀膨胀为低温低压液体,然后进入蒸发器从低温热源中吸热形成低压气体,之后再进入压缩机完成一个供能循环^[28]。

最常用且最能体现WHP供热或制冷性能指标为机组性能系数(COP)。COP值的物理意义为单位耗能所产生的热量或冷量,其值可以从很大程度上反映机组的运行效率和节能性。而机组COP值取决于机组运行的多个参数,参数间相互影响相互关联。因本文在定流量工况下建立系统模型,影响机组性能系数的主要参数为冷凝温度(高温热源温度)和蒸发温度(低温热源温度)。理想情况下,经理论推导,供热性能系数 $C_{OP,H}$ 为

$$C_{OP,H} = \frac{T_H}{T_H - T_C}, \quad (1)$$

式中: $C_{OP,H}$ 为WHP供热性能系数; T_H 为高温热源温度; T_C 为低温热源温度。

在实际运行中,两侧热源温度的变化对机组性能系数的影响不同,影响因素更为复杂,相关文献在对实际运行的水源热泵机组进行多次试验与数据分析后,拟合构建了水源热泵机组性能系数表达式^[29]

$$C_{OP,H} = Ae^{BT_{CW} + CT_{HW}} + D \frac{T_{CW}}{T_{HW}} + E, \quad (2)$$

式中: T_{CW} 为蒸发器侧热源温度; T_{HW} 为冷凝器侧热源温度; A, B, C, D, E 为试验计算得到的拟合系数。

WHP供热和制冷性能系数关系为

$$C_{OP,H} = 1 + C_{OP,C}, \quad (3)$$

式中: $C_{OP,C}$ 为机组制冷性能系数。

WHP工作时,需要少量的电能输入,其能量转换关系为

$$Q_{H,t}^{WHP} = P_t^{WHP} \Delta t \alpha_{H,t} C_{OP,H}, \quad (4)$$

$$Q_{C,t}^{WHP} = P_t^{WHP} \Delta t \alpha_{C,t} C_{OP,C}, \quad (5)$$

式中: $Q_{H,t}^{WHP}, Q_{C,t}^{WHP}$ 分别为WHP在 t 时段所供给的热量 and 冷量; P_t^{WHP} 为 t 时段向WHP输入的电功率; $\alpha_{H,t}, \alpha_{C,t}$ 分别为 t 时段输入电能用于供热和制冷的调度系数。

1.2 燃气机组数学模型

GU的核心机组为燃气轮机,与燃气锅炉相比,二者能量转化效率相差不大,但从能量品质看,GU

有40%左右的高品位电能产出,具有热电联产的功能,因此其综合利用率更高。实际运行中热量无法被100%收集利用,存在少部分热量损失,从总体上看,燃气机组的能量转换方程可表示为

$$V_{CH_4,t}^{GU} L_{CH_4} / 3.6 = E_t^{GU} + Q_{HP,t}^{GU} + Q_{HL,t}^{GU}, \quad (6)$$

$$E_t^{GU} = P_t^{GU} \Delta t, \quad (7)$$

式中: $V_{CH_4,t}^{GU}$ 为GU在 t 时段消耗的天然气量; $Q_{HP,t}^{GU}$ 为GU在 t 时段的产热量; $Q_{HL,t}^{GU}$ 为GU在 t 时段损失的热量; P_t^{GU} 为GU在 t 时段的发电功率。

GU中天然气消耗量 $V_{CH_4,t}^{GU}$ 与发电量 E_t^{GU} 的关系为

$$V_{CH_4,t}^{GU} = \frac{aE_t^{GU} + bu_t^{GU}}{\eta_{ele}^{GU} L_{CH_4}}, \quad (8)$$

式中: a, b 为GU燃气发电的转换系数,在燃气机组的燃耗曲线中可以测得; η_{ele}^{GU} 为GU的发电效率; u_t^{GU} 表示GU的运行状态,0为停机,1为运行。

GU中产热量 $Q_{H,t}^{GU}$ 与发电量 E_t^{GU} 应满足的约束为

$$Q_{H,t}^{GU} = \frac{E_t^{GU} (1 - \eta_{ele}^{GU} - \eta_{hl}^{GU})}{\eta_{ele}^{GU}}, \quad (9)$$

式中: η_{hl}^{GU} 为GU中的热损失系数。

1.3 储能装置数学模型

ES在RIES中可以根据每个时段内电能供需量来调整运行状态,以平衡系统中的电能供需关系。此外,ES还可以和已制定分时电价的外部电网形成良好的互动,谷时向ES充电,峰时向RIES放电供给系统内电负荷,以进一步提高系统运行的经济性。ES中 $t+1$ 时段与 t 时段剩余电量的关系为

$$E_{t+1}^{ES} = E_t^{ES} (1 - \delta_{el}^{ES}) + P_{ch,t}^{ES} \Delta t \eta_{ch}^{ES} - \frac{P_{dis,t}^{ES} \Delta t}{\eta_{dis}^{ES}}, \quad (10)$$

式中: E_{t+1}^{ES}, E_t^{ES} 分别为 $t+1$ 时段和 t 时段ES的储电量; δ_{el}^{ES} 为ES的自然电损失系数; $P_{ch,t}^{ES}$ 为ES在 t 时段的充电功率; η_{ch}^{ES} 为ES的充电效率; $P_{dis,t}^{ES}$ 为ES在 t 时段的放电功率; η_{dis}^{ES} 为ES的放电效率。

TS为系统中的热网增添了蓄热功能,可大规模存储热量,充分发挥水源热泵机组的供能优势,同时可进一步实现电热解耦,较大程度上解决了“以热定电”问题。类比ES可得到TS中 $t+1$ 时段与 t 时段储热量的关系为

$$Q_{t+1}^{TS} = Q_t^{TS} (1 - \gamma_{hl}^{TS}) + P_{ch,t}^{TS} \Delta t \eta_{ch}^{TS} - \frac{P_{dis,t}^{TS} \Delta t}{\eta_{dis}^{TS}}, \quad (11)$$

式中: Q_{t+1}^{TS}, Q_t^{TS} 分别为 $t+1$ 时段和 t 时段TS的储热量; γ_{hl}^{TS} 为TS的自然热损失系数; $P_{ch,t}^{TS}$ 为 t 时段TS的储热功率; η_{ch}^{TS} 为TS的储热效率; $P_{dis,t}^{TS}$ 为TS在 t 时段的放热功率; η_{dis}^{TS} 为TS的放热效率。

1.4 风机数学模型

由于可以提供丰富、清洁的电能,WT在风力资源充足的地区已得到大规模应用。WT的实时出力因与实时风速有关而具有不确定性,为使仿真结果更加贴近实际,本文采用概率分布法处理该不确定性问题。选择威布尔风速分布模型来模拟实际风速,此模型风速概率密度函数为

$$f(v) = \frac{m}{v} \left(\frac{v}{s}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{v}{s}\right)^m}, \quad (12)$$

$$m = \frac{\bar{v}}{\sigma}, \quad (13)$$

$$s = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + 1/m)}, \quad (14)$$

式中: v 为风速; m 为形状参数; s 为尺度参数; \bar{v} 为平均风速; σ 为风速标准差; Γ 函数为伽玛(Gamma)函数。

在此基础上,给出WT中预测功率与实时风速间的关系

$$\begin{cases} P_{yc,t}^{WT} = 0 & v < v_i, v > v_o \\ P_{yc,t}^{WT} = \frac{v^3 - v_i^3}{v_e^3 - v_i^3} P_e^{WT} & v_i < v < v_e \\ P_{yc,t}^{WT} = P_e^{WT} & v_e < v < v_o \end{cases}, \quad (15)$$

式中: $P_{yc,t}^{WT}$ 为WT在 t 时段的预测出力; v_i 为切入风速; v_o 为切出风速; v_e 为额定风速; P_e^{WT} 为WT的额定功率。

风机实时出力需满足的约束条件为

$$0 \leq P_{yc,t}^{WT} \leq P_e^{WT}, \quad (16)$$

式中: $P_{yc,t}^{WT}$ 为WT的实时出力。

1.5 制冷设备数学模型

RIES中传统的电、气、热3类能源供应网络相对成熟,为了丰富冷负荷供应结构,本文在此基础上采用了吸收制冷设备与电制冷设备,二者数学模型如下。

AC能量转换关系为

$$Q_{C,t}^{AC} = P_{H,t}^{AC} \lambda_{H \rightarrow C}^{AC} \Delta t, \quad (17)$$

式中: $Q_{C,t}^{AC}$ 为 t 时段AC的制热量; $P_{H,t}^{AC}$ 为 t 时段AC的吸热功率; $\lambda_{H \rightarrow C}^{AC}$ 为AC的能量转化系数。

ER能量转换关系为

$$Q_{C,t}^{ER} = P_{E,t}^{ER} \lambda_{E \rightarrow C}^{ER} \Delta t, \quad (18)$$

式中: $Q_{C,t}^{ER}$ 为 t 时段ER的制热量; $P_{E,t}^{ER}$ 为 t 时段ER的输入电功率; $\lambda_{E \rightarrow C}^{ER}$ 为ER的能量转化系数。

2 RIES低碳优化运行模型

2.1 基于碳源分析的碳排放模型

2.1.1 耗电设备碳排放模型

RIES中耗电设备包括WHP和ER,根据GB/T

2589—2020《综合能耗计算通则》中注明的折算参考系数,将设备消耗的电能折算为标准煤消耗量,再结合标准煤的碳排放系数,可定量计算各设备的碳排放量。

WHP和ER在 t 时段碳排放量总和可表示为

$$L_t^{PE} = \mu_{ele} (P_t^{WHP} + P_t^{ER} - P_t^{WT}) \omega_t \Delta t, \quad (19)$$

式中: L_t^{PE} 为耗电设备碳排放总量; μ_{ele} 为电能到标准煤的折算系数; ω_t 为标准煤的碳排放系数; P_t^{WHP} , P_t^{ER} 分别为WHP,ER在 t 时段的用电功率。

2.1.2 燃气设备碳排放模型

RIES中燃气设备主要为GU,与耗电设备模型不同的是,除了消耗天然气的折算碳排放,燃气设备运行过程中还会产生温室气体,形成新的碳排放。

类比耗电设备,GU在 t 时段第1阶段的碳排放量总和可表示为

$$L_{t,1}^{GE} = \mu_{gas} P_t^{GU} \omega_t \Delta t, \quad (20)$$

式中: $L_{t,1}^{GE}$ 为第1阶段燃气设备的碳排放总量; μ_{gas} 为天然气到标准煤的折算系数; P_t^{GU} 为GU在 t 时段的燃气功率。

第2个阶段,通过一些减碳措施,如增添碳捕集设备等,可以实现一定的减碳效果,此类措施的施行效果在此阶段碳排放模型中得以体现,具体表达式为

$$L_{t,2}^{GE} = P_t^{GU} \varphi_t \Delta t, \quad (21)$$

式中: $L_{t,2}^{GE}$ 为第2阶段燃气设备的碳排放总量; φ_t 为单位燃气所产生的碳排放量。

2.2 低碳运行优化目标

在RIES运行过程中,首先要保证各类负荷供应充足,在此前提下的优化目标为系统运行综合成本最小。在本文所研究的优化模型中,综合成本主要包括经济成本和碳排放成本,由此,低碳优化运行目标可表达为

$$\min C = \sum_{t=1}^T (C_t^{GRID} + C_t^{GAS} + C_{t,1}^{CEM} + C_{t,2}^{CEM}), \quad (22)$$

式中: C_t^{GRID} 为RIES在 t 时段从外部电网购电成本; C_t^{GAS} 为RIES在 t 时段从外部气网购气成本; $C_{t,1}^{CEM}$, $C_{t,2}^{CEM}$ 为RIES在 t 时段运行时2阶段碳排放成本。

RIES在 t 时段的购电成本与实时电价有关,可表达为

$$C_t^{GRID} = P_{buy,t}^{GRID} s_{buy,t}^{GRID} \Delta t, \quad (23)$$

式中: $P_{buy,t}^{GRID}$ 为 t 时段外部电网输入功率; $s_{buy,t}^{GRID}$ 为 t 时段售电价格。

因RIES中采用阶梯式气价,在 t 时段的购气成本可表达为

$$C_t^{\text{GAS}} = \begin{cases} V_{\text{CH}_4,t} s_{\text{buy}_1}^{\text{GAS}} & V_{\text{CH}_4,t} \leq V_{\text{CH}_4-1} \\ V_{\text{CH}_4-1} s_{\text{buy}_1}^{\text{GAS}} + (V_{\text{CH}_4,t} - V_{\text{CH}_4-1}) s_{\text{buy}_2}^{\text{GAS}} & V_{\text{CH}_4-1} < V_{\text{CH}_4,t} \leq V_{\text{CH}_4-2}, (24) \\ V_{\text{CH}_4-1} s_{\text{buy}_1}^{\text{GAS}} + (V_{\text{CH}_4-2} - V_{\text{CH}_4-1}) s_{\text{buy}_2}^{\text{GAS}} + (V_{\text{CH}_4,t} - V_{\text{CH}_4-2}) s_{\text{buy}_3}^{\text{GAS}} & V_{\text{CH}_4,t} > V_{\text{CH}_4-2} \end{cases}$$

式中: $V_{\text{CH}_4,t}$ 为 t 时段气网输入气量; $V_{\text{CH}_4-1}, V_{\text{CH}_4-2}, V_{\text{CH}_4-3}$ 分别为第1,2,3阶段的购气量; $s_{\text{buy}_1}^{\text{GRID}}, s_{\text{buy}_2}^{\text{GRID}}, s_{\text{buy}_3}^{\text{GRID}}$ 分别为第1,2,3阶段的售气价格。

碳排放成本的计算可分2个部分,标准煤折算后碳排放成本可表达为

$$C_{t,1}^{\text{CEM}} = (L_t^{\text{PE}} + L_{t,1}^{\text{GE}}) s_c, (25)$$

式中: s_c 为标准煤折算后单位碳排放成本系数。

对于燃气设备运行碳排放部分,一般政策对此阶段的碳排放有规定的碳排放强度,超出则需要缴纳一定的惩罚费用,低于规定强度可给予一定补贴,由此碳排放成本可表达为

$$C_{t,2}^{\text{CEM}} = L_{t,2}^{\text{CE}} (I_{\text{act}} - I_{\text{str}}) s_{\text{pf}}, (26)$$

式中: $I_{\text{act}}, I_{\text{str}}$ 分别为实际碳排放强度和规定碳排放强度; s_{pf} 为燃气碳排放价格系数。

2.3 约束条件

(1) 电能平衡约束。

$$P_{\text{buy}_t}^{\text{GRID}} + P_t^{\text{WT}} = P_t^{\text{WHP}} + P_{\text{ch}_t}^{\text{ES}} - P_{\text{dis}_t}^{\text{ES}} + P_t^{\text{ER}} + P_{\text{ele}_t}^{\text{LOAD}}, (27)$$

式中: $P_{\text{ele}_t}^{\text{LOAD}}$ 为 t 时段系统内用户所需的电负荷功率。

(2) 热能平衡约束。

$$Q_{\text{H}_t}^{\text{GU}} + Q_{\text{H}_t}^{\text{WHP}} = (P_{\text{H}_t}^{\text{AC}} + P_{\text{ch}_t}^{\text{TS}} - P_{\text{dis}_t}^{\text{TS}} + P_{\text{H}_t}^{\text{LOAD}}) \Delta t, (28)$$

式中: $P_{\text{heat}_t}^{\text{LOAD}}$ 为 t 时段系统内用户所需的热负荷功率。

(3) 气量平衡约束。

$$V_{\text{CH}_4,t} = V_{\text{CH}_4,t}^{\text{GU}} + V_{\text{CH}_4,t}^{\text{LOAD}}, (29)$$

式中: $V_{\text{CH}_4,t}^{\text{LOAD}}$ 为 t 时段系统内用户所需的天然气总量。

(4) 冷能平衡约束。

$$Q_{\text{C}_t}^{\text{WHP}} + Q_{\text{C}_t}^{\text{AC}} + Q_{\text{C}_t}^{\text{ER}} = Q_{\text{C}_t}^{\text{LOAD}}, (30)$$

式中: $Q_{\text{C}_t}^{\text{LOAD}}$ 为 t 时段系统内用户所需的冷负荷总量。

(5) 储能约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{dis}_t}^{\text{ES}} \leq P_{\text{dis}_\text{max}}^{\text{ES}} \\ 0 \leq P_{\text{ch}_t}^{\text{ES}} \leq P_{\text{ch}_\text{max}}^{\text{ES}} \\ \beta_{\text{min}} E_{\text{max}}^{\text{ES}} \leq E_t^{\text{ES}} \leq \beta_{\text{max}} E_{\text{max}}^{\text{ES}} \end{cases}, (31)$$

式中: $P_{\text{dis}_\text{max}}^{\text{ES}}, P_{\text{ch}_\text{max}}^{\text{ES}}$ 分别为ES最大放电、充电功率; $E_{\text{max}}^{\text{ES}}$ 为ES最大储电量; $\beta_{\text{min}}, \beta_{\text{max}}$ 分别为ES电量的最小、最大剩余状态系数。

(6) GU运行约束。

GU运行时出力大小需满足

$$P_{\text{min}}^{\text{GU}} \leq P_t^{\text{GU}} \leq P_{\text{max}}^{\text{GU}}, (32)$$

式中: $P_{\text{min}}^{\text{GU}}, P_{\text{max}}^{\text{GU}}$ 分别为GU规定的最小、最大出力值。

GU运行需要满足的爬坡约束为

$$\begin{cases} P_t^{\text{GU}} - P_{t-1}^{\text{GU}} + U_t^{\text{GU}} (P_{\text{max}}^{\text{GU}} - P_{\text{min}}^{\text{GU}}) \leq U_{t-1}^{\text{GU}} \times (R_u^{\text{GU}} - P_{\text{min}}^{\text{GU}}) + P_{\text{max}}^{\text{GU}} \\ P_{t-1}^{\text{GU}} - P_t^{\text{GU}} + U_{t-1}^{\text{GU}} (P_{\text{max}}^{\text{GU}} - P_{\text{min}}^{\text{GU}}) \leq U_t^{\text{GU}} \times (R_u^{\text{GU}} - P_{\text{min}}^{\text{GU}}) + P_{\text{max}}^{\text{GU}} \end{cases}, (33)$$

式中: R_u^{GU} 为GU的爬坡率。

3 算例分析

本文以包含水源热泵机组、风力发电单元、CCHP机组、电储能设备、热储能设备以及终端电、气、冷、热负荷的某区域综合能源系统为研究对象,在Python3.8环境中搭建各设备模型,搭配Gurobi求解器求解,选取热负荷需求大的冬季典型场景对本文所提方法进行验证。

算例系统结构已在第1章中详细描述,其中,风速及风机有关参数见表1;水源热泵的制热性能系数取3.50;天然气燃烧低位热值取35.70 MJ/kW,燃气机组的转换系数 a, b 分别取2.5, 2.0;储能装置相关参数见表2;电制冷机制冷效率取0.8,最大制冷功率为150 kW;双效吸收制冷机制冷效率取1.1,最大制冷功率为200 kW;外部电网分时售电价格见表3;外部气网阶梯价格见表4。

表1 风速及风机相关参数

Table 1 Wind speed and parameter of wind turbines

项目	平均风速	风速标准差	风机额定功率	额定风速	切入风速	切出风速
参数	15.0 m/s	3.0 m/s	150 kW	15.0 m/s	4.5 m/s	25.0 m/s

表2 储能装置参数

Table 2 Parameters of energy-storage devices

储能装置	自然电/热损失系数	放电/热效率	充电/热效率
电储能	1/2	0.95	0.95
热储能	1/500	0.85	0.85

表3 分时售电价格

Table 3 Time-of-use electricity prices 元/(kW·h)

时段	售电价格
01:00—07:00	0.41
08:00—10:00, 23:00—00:00	0.74
11:00—22:00	1.10

表4 天然气阶梯价格

Table 4 Increasing-block prices of natural gas 元/m³

各时段购气量/m ³	售气价格
0~100	3.10
>100~160	3.65
>160	4.50

3.1 典型场景下系统运行模式设置

为研究引入水源热泵机组和计及碳排放成本对系统优化运行产生的影响,本文设置了2种运行

模式进行分析验证。

(1)模式 1。综合能源系统传统运行模式,此模式下,仍以燃气机组为热电联产机组的核心,系统运行受传统“以热定电”的约束,可利用风电等清洁能源。

(2)模式 2。在传统运行模式下引入水源热泵机组和电、热储能装置,极大限度实现了热电解耦,增强了系统对电、热能量利用的灵活性。

上述 2 种运行模式设定相同的低碳优化运行目标及约束,根据得到的各类能量日前优化调度计划进行对比分析。

3.2 仿真结果对比分析

3.2.1 风速及风机出力分析

建立威布尔风速分布模型,得到一天内风速的变化曲线,如图 2 所示。从图 2 可以看出,一天中各时段风速波动明显,若直接取平均风速代入求解则可能与实际运行产生较大偏差,采用模拟风速的方法较为合理。

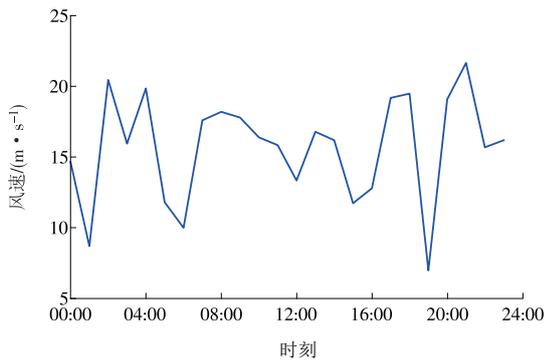


图 2 风速变化曲线

Fig. 2 Variation of wind speed

根据模拟风速,得到各时段风机最大出力曲线,如图 3 所示。由于各时段风速都介于切入和切出风速之间,因此,风机在全时段都有出力且大多数时段的最大发电量均为额定功率 150 kW。

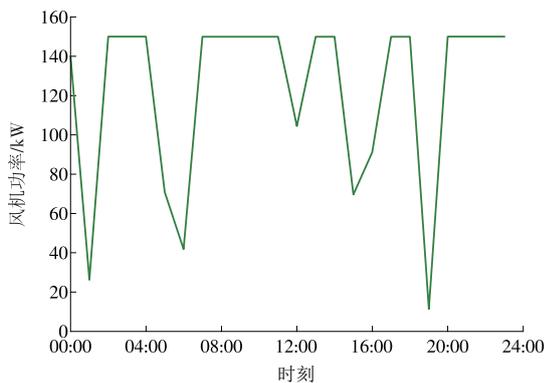


图 3 风机最大出力曲线

Fig. 3 Curve of wind turbine maximum output of WT

3.2.2 不同运行模式下能量供需分析

(1)模式 1 运行分析。传统运行模式下,以设定的低碳优化目标运行得到的各类能量供给与需求关系如图 4—7 所示。

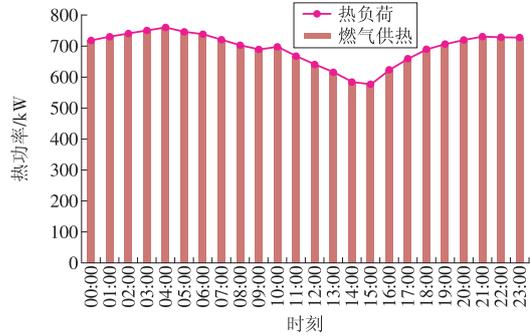


图 4 模式 1 热能调度计划

Fig. 4 Thermal energy dispatch plan of model 1



图 5 模式 1 冷能调度计划

Fig. 5 Cold energy dispatch plan of model 1

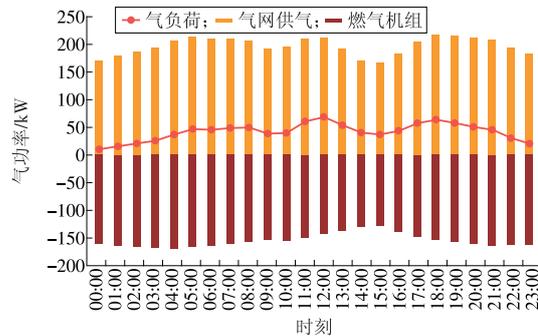


图 6 模式 1 天然气调度计划

Fig. 6 Natural gas dispatch plan of model 1

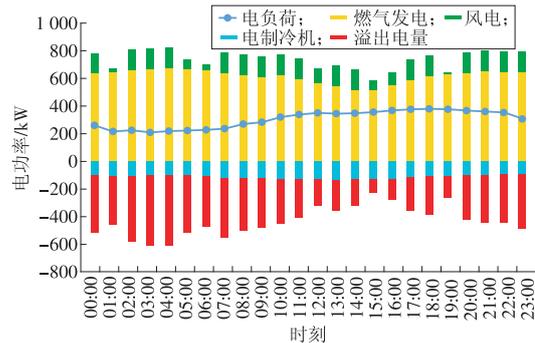


图 7 模式 1 电能调度计划

Fig. 7 Electricity dispatch plan of model 1

如图 4 所示,此冬季典型场景的主要特征是热负荷需求远大于其他各类负荷,传统运行模式下依靠热电联产机组供热,因此来源于气网的天然气除了少部分直接供给气负荷,大部分供给燃气机组,保证其产热量满足各时段热负荷需求。

此运行模式以燃气机组为热电联产核心,存在“以热定电”约束,各时段在产热的同时均会产生大量可用电能(如图 7 所示),尤其在凌晨寒冷时段,随着热需求的增大,电能产出也随之到达峰值,而此时段电负荷需求处于一天中的谷时。纵观全天,需求侧和供给侧的电热比相差极大,除电负荷外只有部分电能经由电制冷机供给冷负荷(如图 5 所示),但总体消耗电能远远小于产出,产生大规模弃风和电能溢出。由图 6 可知,此模式下各时段天然气消耗量较大,电能消耗较少,而天然气消耗存在 2 阶段碳排放,其折算系数相比于电能也更大,因而运行模式 1 的碳排放成本会更高。

为解决上述问题,某些地区引入大规模储能设备或将多余电能通过电网输送至别处利用,但储能设备投资与维护费用过大、分布式电能并网要求高以及输送损耗限制了以上措施的施行。因此,最佳解决思路是在系统中增添新型电热能量转换设备,搭配电、热储能实现电热解耦,从根本上解决“以热定电”的约束问题。

(2)模式 2 运行分析。在传统运行模式的基础上,引入水源热泵机组并在系统中加装一定容量的储电和储热装置,形成 RIES 新型运行模式,即模式 2。此模式下以给定的低碳优化目标运行,得到的各类能量供给与需求关系如图 8—11 所示。

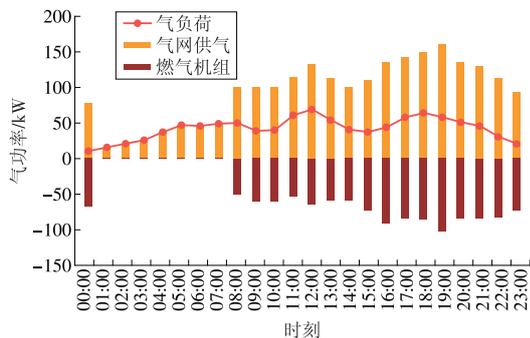


图 8 模式 2 天然气调度计划

Fig. 8 Natural gas dispatch plan of model 2

水源热泵机组只需消耗少量的电能就可产生大量热量,非常适用于此热负荷需求量大的典型场景。如图 9 所示,水源热泵机组与燃气机组协同运行,搭配热电储能装置,可极大限度实现电热解耦,相较于传统运行模式(如图 7 所示),该模式最明显的优势在于溢出电量几乎不存在,这意味着所有产

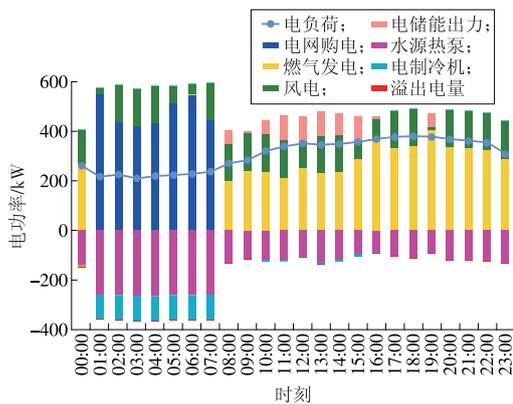


图 9 模式 2 电能调度计划

Fig. 9 Electricity dispatch plan of model 2

出电能均能实现就地消纳,“以热定电”的问题从根本上得到解决。传统运行模式下,供热结构较为单一,燃气机组热电产出比例相对固定,在满足热负荷供应的前提下产生大量溢出电能;水源热泵机组加入后,丰富了热电联产结构,系统电、热能量供给的灵活性大大提高。

由图 8 可见,02:00—07:00 时段从气网所购天然气全部用以供给用户所需气负荷,燃气机组在此时段停机。如图 10 所示,此时正处于电价谷时,供热性能优良的水源热泵机组可直接从电网购电并产热供给此时段热负荷所需,而用户电负荷所需也可直接由电网供给;同时,为进一步提高经济效益,电储能装置在此时段处于充电状态,储备电能以供给峰时所需。纵观全天的电能调度计划,风电全部利用,水源热泵机组各时段都投入运行且电价谷时出力最高,二者的大规模利用有效提高了系统清洁能源利用率,实现了绿色低碳运行。

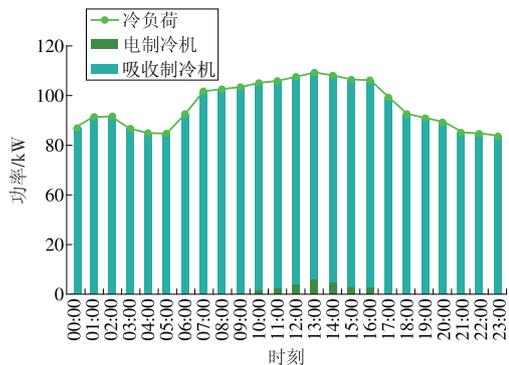


图 10 模式 2 冷能调度计划

Fig. 10 Cold energy dispatch plan of model 2

由图 11 可见,相较于模式 1,热能由燃气机组和水源热泵机组双重供给,除直接供给热负荷外,部分供给吸收制冷机组产出冷能供冷负荷所需。由于引入了碳排放优化目标,系统在满足能量供给的前提下,增大了水源热泵机组的出力,在经济成本

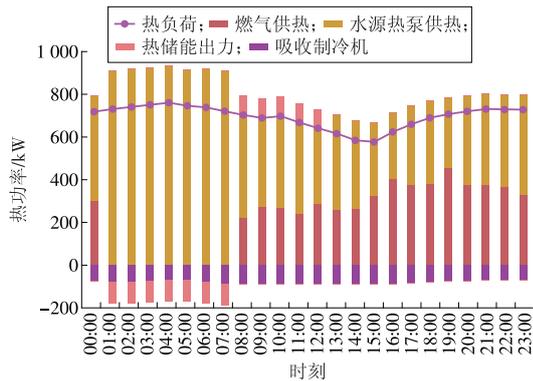


图 11 模式 2 热能调度计划

Fig. 11 Thermal energy dispatch plan of model 2

不显著增大的同时提高了清洁能源利用率,减少了一定的碳排放。凌晨时段热储能装置处于充热状态,原因是此时段水源热泵机组可利用谷时电能大规模制热,对一部分热能加以储存以供后续时段部分热负荷所需,可进一步提高系统运行的经济性。

由图 10 可以看出,模式 2 下系统大部分冷能由吸收制冷机提供,这与模式 1 大不相同,其原因是模式 2 不再产生大量多余电能,电、热能量实现充分解耦,电制冷和吸收制冷可选择性大大提高,案例中所选用的双效吸收制冷效率明显高于电制冷效率,因而制定如上的供能计划;同时,由于天然气售价为阶梯价格,对比图 6 和图 8 可以看出,热电解耦后各时段的天然气购买量大幅减少,基本维持在第 1、第 2 阶梯价格,由于第 3 阶梯气价较高,原消耗的第 3 阶梯天然气可由其他形式的能量代替,达到了更经济的运行效果。

(3) 运行成本分析。2 种模式优化运行的各项成本见表 5。

表 5 2 种运行模式成本对比

Table 5 Comparison of the costs under two operation models 元

运行模式	经济成本	碳排放成本	总成本
1	16 773.91	2 143.56	18 917.46
2	8 234.50	1 078.10	9 312.60

相较于模式 1,模式 2 运行的经济成本降低了约 50.9%,碳排放成本降低了约 49.7%,总体大幅降低,主要原因有以下几点。

1) 模式 2 引入水源热泵机组与电、热储能装置,与燃气机组协同运行形成新型热电联产模式,实现了热电解耦,模式 1 中的“以热定电”运行约束以及电能溢出问题得到根本解决。

2) 模式 2 中各时段购气量保持在价格较低的第 1—2 阶段,水源热泵机组日出力较大;同时,各时段风机发电量全部消纳,系统的可再生能源利用率显著提高。

3) 模式 2 中天然气消耗量降低,碳排放较低的清洁能源得到大规模利用,在满足系统各类能量供给的前提下,实现了碳排放成本显著降低的优化目标。

4 结论

本文对含水源热泵机组及多种能量耦合设备的 RIES 新型运行模式进行了深入研究,在构建 RIES 架构的基础上,建立了考虑与电网、气网的交互成本以及碳排放成本的优化模型,通过对运行策略的求解,实现了降低系统运行成本和提高系统清洁能源利用率的优化目标。最后,通过算例仿真验证了所提模型及策略的有效性和合理性。得到的主要结论如下。

(1) 引入水源热泵机组与电、热储能装置与燃气机组协同运行,有效解决了传统运行模式中的“以热定电”问题,大幅提高了系统整体运行的灵活性,能源利用效率显著增高。

(2) 算例分析表明:新型运行模式保证了各类能量供给充足;同时,相较于传统运行模式,经济成本降低约 50.91%,碳排放成本降低约 49.70%。

(3) 引入碳排放优化目标,有效减少了高碳排放能源的使用,在经济成本允许增高的范围内加大了清洁能源的使用,符合国家“双碳”行动的理念。

在“双碳”目标指引下,区域综合能源系统未来必将有更为广阔的发展前景,在后续的研究工作中,将进一步考虑更复杂多样的运行模式及供需侧互动关系,探讨 RIES 优化运行策略。

参考文献:

- [1] 刘斌,张玉琼,麻林巍,等.西北地区源端基地综合能源系统的技术方案设计及优化研究[J].中国电机工程学报,2021,41(2):568-581.
LIU Bin, ZHANG Yuqiong, MA Linwei, et al. Design and optimization of technical schemes of supply-side base integrated energy systems in Northwest China [J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(2):568-581.
- [2] LIU H, LI Z, CHENG Q, et al. Construction of the evaluation index system of the regional integrated energy system compatible with the hierarchical structure of the Energy Internet [C]// 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2020: 342-348.
- [3] 熊文,刘育权,苏万煌,等.考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J].电力自动化设备,2019,39(1):118-126.

- XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(1): 118-126.
- [4] 孙浩, 陈永华. 综合能源系统多能流联合仿真技术研究 [J]. *华电技术*, 2020, 42(5): 66-72.
- SUN Hao, CHEN Yonghua. Research on multiple energy flow co-simulation technology applied in integrated energy system [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(5): 66-72.
- [5] QIN Y, WU L, ZHENG J, et al. Optimal operation of integrated energy systems subject to coupled demand constraints of electricity and natural gas [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(2): 444-457.
- [6] LIU N, WANG J, WANG L. Hybrid energy sharing for multiple microgrids in an integrated heat-electricity energy system [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(3): 1139-1151.
- [7] 赵鑫, 郑文禹, 侯智华, 等. 基于粒子群优化算法的多能互补系统经济调度研究 [J]. *华电技术*, 2021, 43(4): 14-20.
- ZHAO Xin, ZHENG Wenyu, HOU Zhihua, et al. Research on economic dispatch of multi-energy complementary system based on Particle Swarm Optimization [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(4): 14-20.
- [8] 许周, 孙永辉, 谢东亮, 等. 计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 53-59.
- XU Zhou, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Optimal configuration of energy storage for integrated region energy system considering power/thermal flexible load [J]. *Automation of Electric Power System*, 2020, 44(2): 53-59.
- [9] GONG Y F, YANG X, XU J K, et al. Optimal operation of integrated energy system considering virtual heating energy storage [J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 419-425.
- [10] 刘文霞, 李征洲, 杨粤, 等. 计及需求响应不确定性的综合能源系统协同优化配置 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 41-49.
- LIU Wenxia, LI Zhengzhou, YANG Yue, et al. Collaborative optimal configuration for integrated energy system considering uncertainties of demand response [J]. *Automation of Electric Power System*, 2020, 44(10): 41-49.
- [11] TAO Y, QIU J, LAI S, et al. Integrated electricity and hydrogen energy sharing in coupled energy systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(2): 1149-1162.
- [12] LI Z, XU Y, FANG S, et al. Robust coordination of a hybrid AC/DC multi-energy ship microgrid with flexible voyage and thermal loads [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11: 2782-2793.
- [13] 朱海东, 郝浩, 郑剑, 等. 基于冷热电多能互补的园区综合能源系统设计 [J]. *华电技术*, 2021, 43(4): 34-38.
- ZHU Haidong, HAO Hao, ZHENG Jian, et al. Design of integrated energy system for parks based on complementation of cold, heat and electricity [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(4): 34-38.
- [14] MIAO B, LIN J, LI H, et al. Day-ahead energy trading strategy of regional integrated energy system considering energy cascade utilization [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 138021-138035.
- [15] WEGENER M, MALMQUIST A, ISALGUE A, et al. A techno-economic optimization model of a biomass-based CCHP/heat pump system under evolving climate conditions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 223(1): 113256.
- [16] 孙浩, 傅金洲, 鄢小虎, 等. 区域综合能源仿真优化系统的研制 [J]. *华电技术*, 2021, 43(4): 8-13.
- SUN Hao, FU Jinzhou, YAN Xiaohu, et al. Research and development of integrated community energy simulation-optimization system [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(4): 8-13.
- [17] SUN Y, ZHANG B, GE L, et al. Day-ahead optimization schedule for gas-electric integrated energy system based on second-order cone programming [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(1): 142-151.
- [18] LAZDINS R, MUTULE A. Operational algorithm for natural gas boiler and heat pump system optimization with PV panel [C]//2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). IEEE, 2020.
- [19] BARTNIK R, BURY N Z, HNYDIUK-STEFAN A. Thermodynamic and economic analysis of effect of heat accumulator volume on the specific cost of heat production in the gas-steam CHP plant [J]. *Energy*, 2021, 230: 120828.
- [20] 陈伯达, 林楷东, 张勇军, 等. 计及碳捕集和电转气协同的电气互联系统优化调度 [J]. *南方电网技术*, 2019, 13(11): 9-17.
- CHEN Boda, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. Optimal dispatching of integrated electricity and natural gas energy systems considering the coordination of carbon capture system and power-to-gas [J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13(11): 9-17.
- [21] ZHOU Y, YU H, LI Z, et al. Robust optimization of a distribution network location-routing problem under carbon trading policies [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 46288-46306.
- [22] 吉斌, 刘妍, 朱丽叶, 等. 基于联盟区块链的电力碳权交易机制设计 [J]. *华电技术*, 2020, 42(8): 32-40.
- JI Bin, LIU Yan, ZHU Liye, et al. Design of carbon

emission permit trading mechanism in power industry based on consortium blockchain[J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 32-40.

[23]HU Z, DU Y, RAO C, et al. Delegated proof of reputation consensus mechanism for blockchain-enabled distributed carbon emission trading system [J]. IEEE Access, 2020, 8:214932-214944.

[24]尹硕,郭兴五,燕景,等.考虑高渗透率和碳排放约束的园区综合能源系统优化运行研究[J].华电技术,2021, 43(4):1-7.
YIN Shuo, GUO Xingwu, YAN Jing, et al. Study on optimized operation on integrated energy system in parks with high permeability and carbon emission constraints [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4):1-7.

[25]WANG Y, QIU J, TAO Y, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4):3145-3157.

[26]HOU Q, GUAN Y, YU S. Stochastic differential game model analysis of emission-reduction technology under cost-sharing contracts in the carbon trading market [J]. IEEE Access, 2020, 8:167328-167340.

[27]王泽森,石岩,唐艳梅,等.考虑 LCA 能源链与碳交易机

制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J].中国电机工程学报,2019,39(6):1614-1626,1858.

WANG Zeyan, SHI Yan, TANG Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6):1614-1626, 1858.

[28]PAN J, LI S. Research of underground water temperature recovery characteristics on site after water-source heat pump heating : In Shenyang City as an example [C]//2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011:3591-3595.

[29]李帅.水源热泵系统运行调控与能耗优化[D].青岛:青岛大学,2018.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

徐恒志(1997),男,在读硕士研究生,从事综合能源系统优化配置与运行方面的研究,3291220239@qq.com;

周博文*(1987),男,副教授,博士,从事电力与能源系统优化运行、电动汽车与电网互动、需求响应与虚拟储能等方面的研究,zhoubowen@ise.neu.edu.cn.

*为通信作者。

广 告 索 引

郑州科润机电工程有限公司 (后插 1)

华电水务科技股份有限公司(跨版) (后插 2,3)

华电环保系统工程有限公司(跨版) (后插 4,5)

中国华电科工集团有限公司新能源
技术开发公司 (后插 6)

国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术
研发(实验)中心 (后插 7)

华电综合智慧能源科技有限公司 (后插 8)

华电通用轻型燃机设备有限公司 (后插 9)

郑州华电能源科技有限公司(跨版) (后插 10,11)

华电重工股份有限公司(跨版) (后插 12,13)

中国华电科工集团有限公司总承包
分公司(跨版) (后插 14,15)

华电科工安全环境质量科学研究所 (后插 16)

山东华电节能技术有限公司 (后插 17)

《华电技术》更名启事 (后插 18)

华电郑州机械设计研究院有限公司 (封三)

中国华电科工集团有限公司 (封底)