含风电制氢及多储能的综合能源系统灵活调度与碳排放分析

穆 勇[1]，路 峰[1]，刘大鹏[1]，刘 勇[1]，云 飞[1]，袁天梦[1]，栾正义[2]
（1.国网冀北电力有限公司 唐山供电公司，河北 唐山 063000；2.华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071000）

摘 要：风能作为可再生能源备受关注，但弃风制约着风力发电的发展。综合能源系统中配置储氢能够有效解决弃风问题，实现风能的多途径与多时间的有效利用。文章提出含风电制氢及多类型储能的综合能源系统调度方法，计及风电出力不确定性对系统的影响，考虑电、热、冷、氢的联合优化调度与负荷需求响应策略，并对系统碳排放情况展开分析。研究结果表明，所建立的综合能源系统调度模型能够实现多类型能源的科学协同，提升综合能源系统的运行经济性。

关键词：弃风；风电制氢；储能；碳排放
中图分类号：TK81 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)11-1517-10

0 引言

综合能源系统的储能可以实现能量在时间与空间上的有效利用，实现能量的供需平衡，提高系统内能源的利用率，有利地支持了电网的调峰、调频，有效降低了系统碳排放量[1,2]。

学者对有储能的综合能源系统优化调度展开研究。文献[3]将压缩空气储能与蓄热装置引入综合能源系统，通过参数设计、容量配置以及优化调度最大限度地提高系统能源利用率与经济性。文献[4]在综合能源系统中引入燃料电池与热泵，通过优化调度改善系统内各能源的耦合关系，实现能源的有效调配。文献[5]提出了多能产出与多源消纳的区域综合能源系统，在系统内配置蓄热与电动汽车，实现了能源的梯级利用，提高了系统的环保性。文献[6]提出了氢储能与需求响应的协同运行理念，同时调度模型中考虑了安全约束，弃风问题得到了改善，系统经济性得以提升。文献[7]研究了氢储能与可再生能源的系统设计问题，解决了氢储能与可再生能源的协同系统在不确定性条件的运行问题。文献[8]提出了以燃料电池与电解水制氢为基础改善综合能源系统的弃风问题，实现了风能的有效利用。文献[9]进一步探究了风能制氢的可行性 以氢能汽车作为能源消耗载体可实现负荷平衡与系统经济。

目前，有关储能在综合能源系统的应用研究多局限于单类型储能或两种类型储能，对于氢、电、热、冷多种能源类型储能的协同配置与调度的研究较少，且缺乏需求侧响应策略对综合能源系统协同调度的同步分析，同时现有模型缺少对系统碳排放的分析。

1 综合能源系统结构与模型

1.1 综合能源系统模型

本文涉及的综合能源系统包含电、热、冷、氢多种能源形式，能量流程如图 1 所示[10-13]。

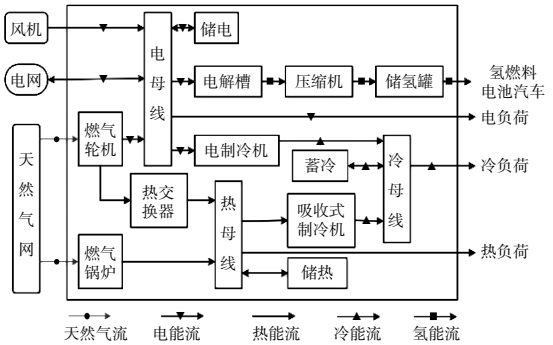


图 1 综合能源系统能量流程

Fig.1 Energy process of integrated energy system

1.2 能量存储

①热、冷、电储能模型

常见的储能设备包括储热罐、冰蓄冷以及蓄电池，三者的充放过程相似，可用储存容量、储放

收稿日期：2024-12-21。
基金项目：国家自然科学基金项目(62173165)。
作者简介：穆 勇(1977-)，硕士，高级工程师，主要从事新能源电力系统的优化与调度研究。E-mail：libin875976@163.com

能效率以及自损率表征其储能特性。

$$E_t^x=E_{t-1}^x(1-\upsilon_x)+\left(P_t^{x,c}\alpha_x-\frac{P_t^{x,d}}{\beta_x}\right)\Delta t \tag{1}$$

$$E_{x,\min}\leqslant E_t^x\leqslant E_{x,\max} \tag{2}$$

$$0\leqslant P_t^{x,c}\leqslant\delta_t^{x,c}\cdot P_{x.c.\max} \tag{3}$$

$$0\leqslant P_t^{x,d}\leqslant\delta_t^{x,d}\cdot P_{x.d.\max} \tag{4}$$

$$\delta_t^{x,c}+\delta_t^{x,d}\leqslant 1 \tag{5}$$

$$E_T^x=E_0^x \tag{6}$$

式中:x 为储能类型,包括热、冷、电;E_{t-1}^x,E_t^x 分别为充、放能前、后储能系统能量;υ_x 为能量损失率;$P_t^{x,c}$,$P_t^{x,d}$ 分别为充、放能功率;α_x,β_x 分别为充、放能效率;$\delta_t^{x,c}$,$\delta_t^{x,d}$ 均为 0,1 变量;式(1)为储能系统充放能前后能量的变化;式(2)为储能容量的上、下限约束;式(3),(4)分别为充、放能功率约束;式(5)为充放能过程不会同时发生;式(6)为一个调度周期前后储能能量不变。

②氢储能模型

当风能剩余时,利用风能进行电解水制氢,氢能储存后供给氢燃料电池汽车,其模型为

$$E_t^{H_2}=E_{t-1}^{H_2}+E_t^{CE}-E_t^{out} \tag{7}$$

$$E_{H_2,\min}\leqslant E_t^{H_2}\leqslant E_{H_2,\max} \tag{8}$$

$$0\leqslant E_t^{CE}\leqslant E_{CE,\max} \tag{9}$$

$$0\leqslant E_t^{out}\leqslant E_{out,\max} \tag{10}$$

$$E_T^{H_2}=E_0^{H_2} \tag{11}$$

式中:$E_{t-1}^{H_2}$,$E_t^{H_2}$ 分别为 t-1 时刻与 t 时刻储氢罐中剩余储氢量;E_t^{CE},E_t^{out} 分别为储氢罐氢气的输入、输出量;$E_{H_2,\max}$,$E_{H_2,\min}$ 分别为储氢罐容量的上限与下限;$E_{CE,\max}$,$E_{out,\max}$ 分别为储氢罐氢气的输入、输出量最大值;式(11)为调度周期开始储氢量 $E_0^{H_2}$ 与调度周期结束储氢量 $E_T^{H_2}$ 相等。

1.3 目标函数

含风电制氢、储能的能源系统运行优化目标为利润最大,整个系统获利方式为出售电、冷、热、氢等类型能源,其中售电包含向用户售电与向电网售电。

目标函数为

$$\max F_p=F_s-F_r \tag{12}$$

式中:F_p 为综合能源系统运行收益;F_s 为综合能源系统运行收益;F_r 为综合能源系统运行成本。

1.3.1 综合能源系统运行收益

综合能源系统运行收益主要包含以下 3 个方面[14-17]:向用户出售冷、热、电能的收益 F_u,售氢的收益 F_{H_2},以及向电网售电获得的收益 F_{sell}:

$$F_s=F_u+F_{H_2}+F_{sell} \tag{13}$$

①向用户直接出售冷、热、电能获得的收益

$$F_u=\sum_{t=1}^{T}\left(C_t^e\cdot L_t^e+C_t^h\cdot L_t^h+C_t^c\cdot L_t^c\right)\Delta t \tag{14}$$

式中:C_t^c,C_t^h,C_t^e 分别为向用户出售冷、热、电能的价格;L_t^c,L_t^h,L_t^e 分别为冷、热、电负荷大小,如系统处于负荷调节阶段,应选取负荷调节稳定后的电负荷值。

②售氢收益

$$F_{H_2}=\sum_{t=1}^{T}C_{H_2}\cdot E_t^{out} \tag{15}$$

式中:C_{H_2} 为综合能源系统向外售氢的价格;E_t^{out} 为综合能源系统总售氢量。

③向电网售电的收益

$$F_{sell}=\sum_{t=1}^{T}\left(C_t^{sell}\cdot\left|P_t^{sell}\right|\right)\Delta t \tag{16}$$

式中:C_t^{sell} 为综合能源与电网之间的出售电能价格;P_t^{sell} 为综合能源与电网直接出售的电能功率,综合能源系统向电网售电时为负,电网向综合能源系统售电时为正。

1.3.2 综合能源系统运行成本

综合能源系统运行成本考虑了 5 个方面[18-21],包含能源消耗、制氢 F_{EL}、可中断负荷补偿 F_{cut}、碳排放 F_c 以及弃风惩罚 F_w,其中能源消耗成本又分为外购电 F_{buy} 与购气两项成本 F_{gas}。

$$F_r=F_{buy}+F_{gas}+F_c+F_w+F_{EL}+F_{cut} \tag{17}$$

当综合能源系统运行调度时为考虑可中断负荷,则在运行成本中去除可中断负荷补偿项。

①外购电成本

$$F_{\text{buy}}=\sum_{t=1}^{T}\left(C_t^{\text{buy}}\cdot P_t^{\text{buy}}\right)\Delta t \tag{18}$$

式中:C_t^{buy} 为在 t 时刻下的购电电价;P_t^{buy} 为在 t 时刻下的购电功率,购电为正。

②购气成本

$$F_{\text{gas}}=\sum_{t=1}^{T}C_{\text{gas}}\cdot P_t^{\text{gas}}\cdot\Delta t \tag{19}$$

式中:C_{gas} 为单位的天然气价格,元/(kW·h);$P_{\text{t}}^{\text{gas}}$ 为购进的天然气功率。

③碳排放成本

本文研究涉及的综合能源系统碳排放源于两方面:电网购电等效排放量与天然气购置等效排放量。

$$F_{\text{c}}=\psi\sum_{t=1}^{T}\left(\alpha_{\text{e}}\cdot P_t^{\text{buy}}+\alpha_{\text{g}}\cdot P_t^{\text{gas}}\right)\Delta t \tag{20}$$

式中:ψ 为处理 CO_2 的费用,元/kg;α_{e} 为电网购电等效排放系数;α_{g} 为天然气购置等效排放系数。

④弃风惩罚成本

由于风力发电系统自身调节能力限制而导致的风能消纳受限的情况,称之为“弃风”。本文弃风成本如下:

$$F_{\text{w}}=\sum_{t=1}^{T}C_{\text{w}}\left(P_t^{\text{W.max}}-P_t^{\text{W}}\right)\Delta t \tag{21}$$

式中:$P_t^{\text{W.max}}$ 和 P_t^{W} 分别为风机的预测出力与实际出力;C_{w} 为弃风惩罚系数。

⑤制氢成本

在制氢过程中存在较大的能量损失,以单位制氢价格为制氢成本的衡量标准,表达式为

$$F_{\text{EL}}=\sum_{t=1}^{T}C_{\text{EL}}\cdot E_t^{\text{EL}} \tag{22}$$

式中:C_{EL} 为制备单位氢所需要的成本价;E_t^{EL} 为总制氢量。

1.4　约束条件

由于风电负荷预测存在误差,使得调度结果产生偏差。考虑其不确定性,须要对调度模型进行模糊处理,利用模糊机会约束代替传统的确定性约束,以提高调度模型的准确性与科学性。

①电功率平衡

$$P_t^{\text{buy}}+P_t^{\text{gas}}+\widetilde{P_t^{\text{W}}}+P_t^{\text{GT}}+P_t^{\text{SOC.d}}=P_t^{\text{SOC.c}}+P_t^{\text{EL}}+P_t^{\text{Ec.in}}+\widetilde{L_t^{\text{e}}}-P_t^{\text{cut}} \tag{23}$$

式中:$\widetilde{P_t^{\text{W}}}$ 为模糊变量,指风机功率;$\widetilde{L_t^{\text{e}}}$ 为模糊变量,指在进行电价需求响应后的电出力。

②热功率平衡

$$H_t^{\text{GB}}+H_t^{\text{HE}}+P_t^{\text{HS.d}}=P_t^{\text{HS.c}}+H_t^{\text{AC.in}}+\widetilde{L_t^{\text{h}}} \tag{24}$$

式中:$\widetilde{L_t^{\text{h}}}$ 为模糊变量,指热负荷功率。

③冷功率平衡

$$P_t^{\text{EC.out}}+H_t^{\text{AC.out}}+P_t^{\text{CS.d}}=P_t^{\text{CS.c}}+\widetilde{L_t^{\text{c}}} \tag{25}$$

式中:$\widetilde{L_t^{\text{c}}}$ 为模糊变量,指冷负荷功率。

2　负荷需求响应建模

需求侧管理能够有效节约电能、降低用电成本,是目前相关政策支持发展的一种能源服务与管理行为。负荷需求响应是需求侧管理在电力市场的特定发展形式,本质上是用户根据电网释放的价格信号或有利信号来改善用电行为,达到削峰填谷的目的。

根据不同的响应方式,电力市场将负荷需求响应分为价格型需求响应与激励型需求响应。

本文建立了基于实时电价的负荷响应模型与可中断负荷的需求响应模型。

2.1　实时电价负荷响应模型

在实时电价响应模型中,用户用电行为与电价相关联,因此用户用电量可表示为实时电价的函数。

$$d_i=d_i^0+\sum_{j=1}^{T}\left(\frac{E_{ij}^{\text{L}}\times d_i^0\left(\rho_j-\rho_j^0\right)}{\rho_j^0}\right) \tag{26}$$

式中:d_i^0 为施行实时电价负荷响应前的电负荷;d_i 为施行实时电价负荷响应后的电负荷;ρ_j^0 为施行实时电价负荷响应前的电价;ρ_j 为施行实时电价负荷响应后的电价;E_{ij}^{L} 为用电负荷弹性系数,表征电价变化所引起的用电需求变化比例,定义如下。

$$E_{ij}^{\text{L}}=\frac{d_i-d_i^0}{\rho_j-\rho_j^0}\times\frac{\rho_j^0}{d_i^0} \tag{27}$$

2.2 可中断负荷的需求响应模型

①可中断负荷补偿成本模型

可中断负荷是指电网与用户提前签订合同,在用电高峰期用户停止部分负荷的使用,从而获得一定的经济补偿,对于综合能源园区,可中断负荷成本 F_{cut} 为

$$F_{\mathrm{cut}}=\sum_{t=1}^{T} w_t^{\mathrm{cut}}\cdot P_t^{\mathrm{cut}}\cdot C_{\mathrm{cut}}\cdot \Delta t \tag{28}$$

式中:P_t^{cut} 为停止使用的部分负荷功率;C_{cut} 为单位负荷的补偿价格;w_t^{cut} 为负荷中断的状态变量,0 表示无负荷停用,1 表示部分负荷停电;Δt 为时间间隔。

②负荷削减容量范围

$$0\leqslant P_t^{\mathrm{cut}}\leqslant P_{\mathrm{cut,max}} \tag{29}$$

式中:$P_{\mathrm{cut,max}}$ 为负荷削减的容量上限。

③负荷削减次数

$$\sum_{t=1}^{T} w_t^{\mathrm{cut}}\leqslant N_{\max} \tag{30}$$

式中:$N_{\max}$ 为负荷消减的次数上限。

④负荷削减时间

$$\sum_{t=1}^{t+T_{\mathrm{cut,max}}}\left(1-w_t^{\mathrm{cut}}\right)\geqslant 1 \tag{31}$$

$$\sum_{t=1}^{t+T_{\mathrm{cut,max}}-1} w_t^{\mathrm{cut}}\geqslant T_{\mathrm{cut,min}}\left(w_t^{\mathrm{cut}}-w_{t-1}^{\mathrm{cut}}\right) \tag{32}$$

式中:$T_{\mathrm{cut,max}}$ 为负荷削减的最大连续时间;$T_{\mathrm{cut,min}}$ 为负荷削减的最小连续时间。

3 算法实例

3.1 模拟场景

①应用场景

综合能源系统具有不同的应用场景,本文选取 5 个典型场景对优化调度模型进行应用分析,如表 1 所示。其中,×表示设备停运,√表示设备运行。

表 1 应用场景

Table 1 Application scenarios

场景	CCHP	风机	电储能	热储能	储氢	蓄冷	负荷需求响应
1	√	√	×	×	×	×	无
2	√	√	√	√	×	√	无
3	√	√	√	√	√	√	无
4	√	√	√	√	√	√	实时电价
5	√	√	√	√	√	√	可中断负荷与实时电价

场景 1 包含冷热电联供,不进行储能与负荷需求响应活动。场景 2 在场景 1 的基础上增加了储能与蓄冷。场景 3 在场景 2 的基础上增加了储氢。场景 4 在场景 3 的基础上增加了实时负荷响应调度。场景 5 在场景 4 基础上增加了可中断负荷需求调度。

②基本参数设置

整个综合能源系统的调度时长为 24 h,调度的时间步长为 1 h。综合能源系统的风机出力与电、热、冷负荷预测如图 2 所示。整个综合能源系统与电网间购、售电为分时段计价,如表 2 所示。

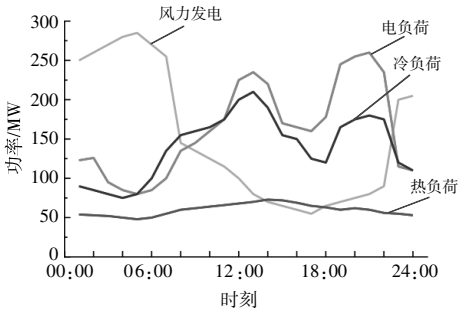


图 2 各负荷及风电出力预测

Fig.2 Prediction of various load and wind power output

表 2 交易价格

Table 2 Trading prices 元/(kW·h)

时段	购电	售电	天然气
谷时段:01:00–07:00,23:00–24:00	0.3	0.26	0.33
平时段:08:00–11:00,15:00–18:00	0.8	0.67	0.33
峰时段:12:00–14:00,19:00–22:00	1.2	0.90	0.33

由图 2 可知:在 01:00–07:00 与 23:00–24:00,风力发电出力较大但用户用电处于低谷,08:00–22:00,风力发电出力较小,但用户用电处于高峰,不利于调峰和消纳。本文的综合能源系统在电源侧利用电解槽制氢,负荷侧通过需求响应策略实现削峰填谷,能够有效解决风能利用的问题,提升综合能源系统运营经济性。

对于综合能源系统与用户间的售电价格,场景 1,2,3 由于没有实时电价响应,因此非储能型电负荷向用户出售的价格维持在 0.72 元/(kW·h);场景 4,5 对用户的售电则施行实时电价需求响应后的价格,如图 3 所示。图 4 为根据实时电价响应需求模型得出的电负荷曲线。由曲线结果分析可知,实时电价需求响应模型降低了用户在高峰

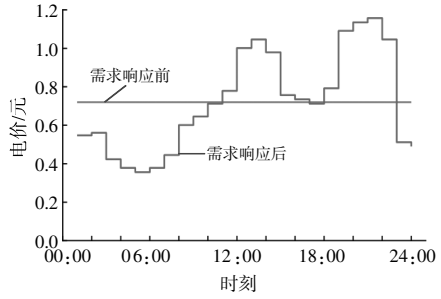


图 3　需求响应前、后售电电价

Fig.3 Sales electricity prices before and after demand response

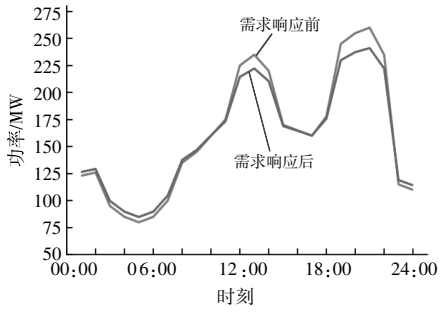


图 4　需求响应前、后电负荷

Fig.4 Electrical load before and after demand response

期的用电量降低，从而使系统达到了削峰填谷的作用。

本文的综合能源系统包含多种储能以及制氢设备，系统中各设备的参数分别如表 3,4 所示。制氢价格、碳排放系数等如表 5 所示。

表 3　电、热、冷储能设备参数

Table 3 Energy storage equipment parameters

储能类型	充能最大功率/MW	放能最大功率/MW	储能最小容量/MW·h	储能最大容量/MW·h	充能效率	放能效率	系统能量损失率
储电	50	80	40	120	0.90	0.90	0.01
储热	35	45	30	80	0.89	0.97	0.02
蓄冷	50	60	30	80	0.89	0.97	0.02

表 4　储能设备参数

Table 4 Energy Storage Equipment Parameters

参数	储氢罐氢气输入量最大值/kg	储氢容量下限/kg	储氢容量上限/kg	发电效率	存储效率
储电	2 000	0	2 500	0.76	0.86

表 5　系统其他参数

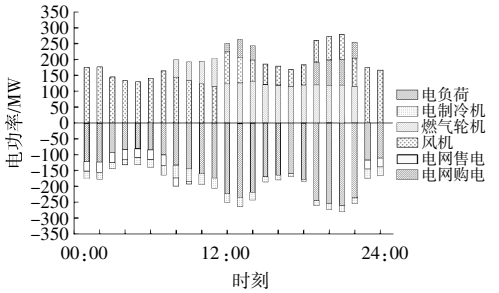
Table 5 Other system parameters

参数	数值
燃气轮机最大功率/MW	140
燃气轮机发电效率	0.35
燃气轮机产热效率	0.5
燃气锅炉最大输出功率/MW	80
燃气锅炉制热效率	0.85
热交换器热效率	0.85
CO_2 的处理费用/元·kg^{-1}	0.24
购电的等效排放系数/t·(MW·h)$^{-1}$	0.907
电制冷机最大输出功率/MW	150
电制冷机能效系数	4
吸收式制冷最大功率/MW	100
吸收式制冷机能效系数	1.2
电解槽制氢功率上限/MW	100
弃风惩罚系数/万元	10
削减负荷的单位补偿费用/万元·(MW·h)$^{-1}$	5
购气的等效排放系数/t·(MW·h)$^{-1}$	0.203
与电网交互最小功率/MW	−30
与电网交互最大功率/MW	100
天然气网最大输出功率/MW	470
制氢价格/元·kg^{-1}	30
售氢价格/元·kg^{-1}	60
系统销售给用户电价/元·(kW·h)$^{-1}$	0.72
系统销售给用户热价/元·(kW·h)$^{-1}$	0.22
系统销售给用户冷价/元·(kW·h)$^{-1}$	0.22

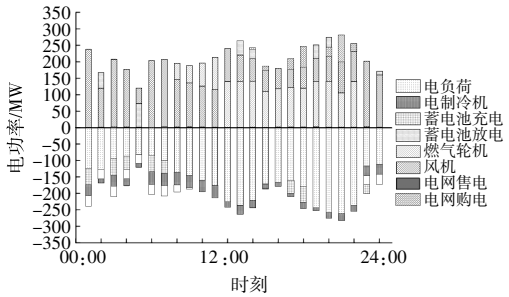
3.2　结果分析

①调度分析

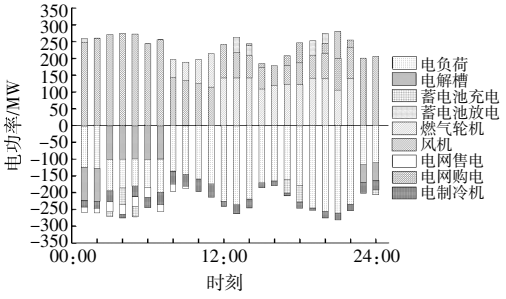
图 5~7 分别为综合能源系统电、热、冷功率



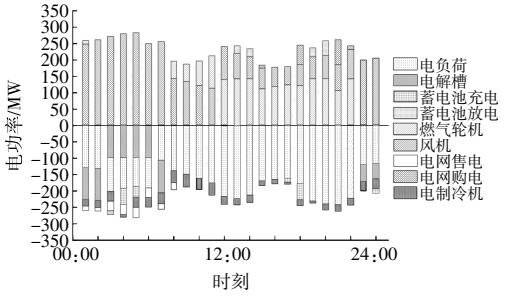
(a)场景 1



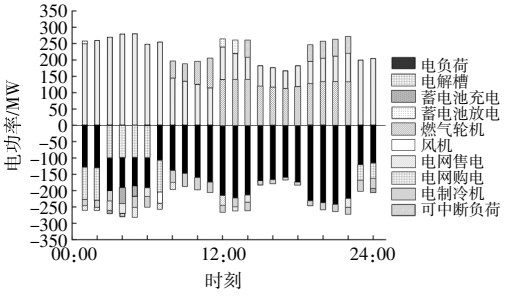
(b)场景 2



(c)场景 3



(d)场景 4

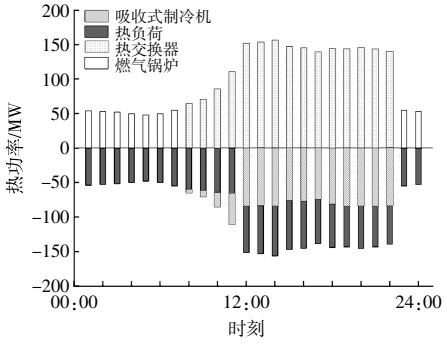


(e)场景 5

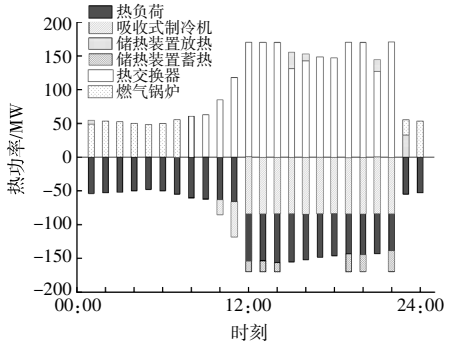
图 5　各场景电功率调度结果

Fig.5 Electric power dispatch results for each scenario

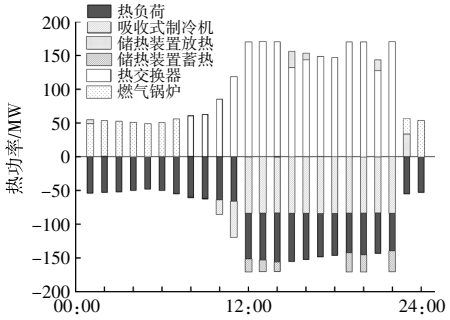
的优化调度结果，横轴以上部分表示各设备流入的能量情况，以下部分表示各设备流出的能量情况。



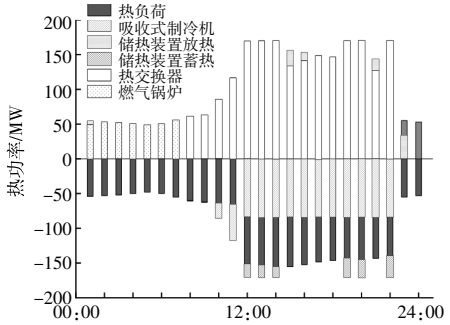
(a)场景 1



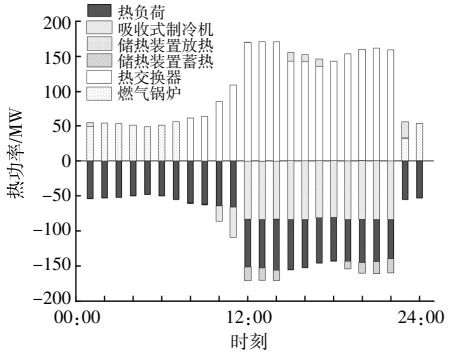
(b)场景 2



(c)场景 3



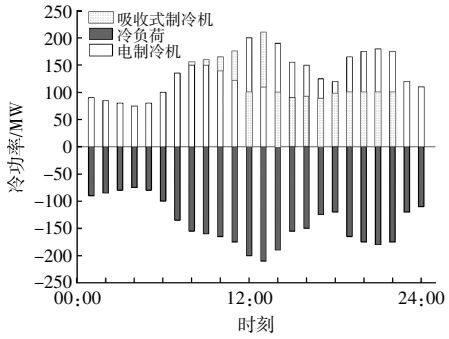
(d)场景 4



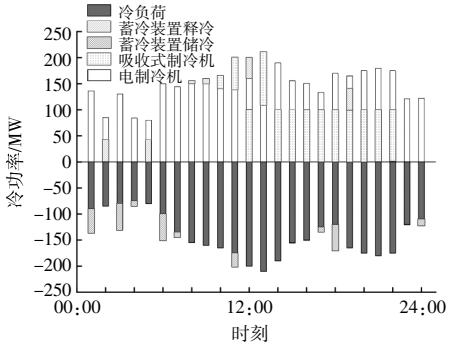
(e)场景 5

图 6　各场景热功率调度结果

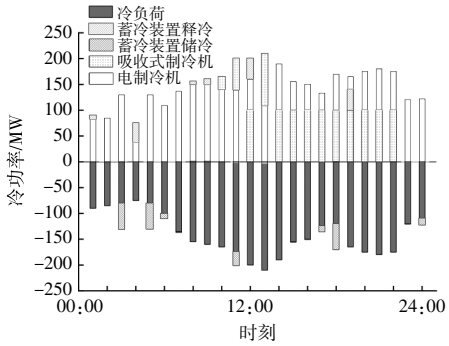
Fig.6 Thermal power scheduling results for each scenario



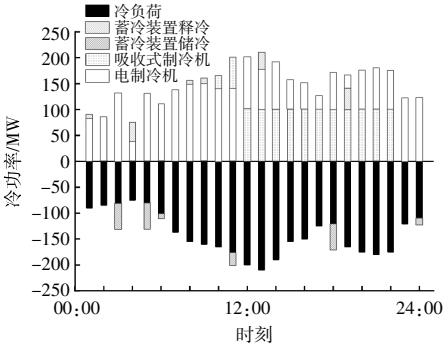
(a)场景 1



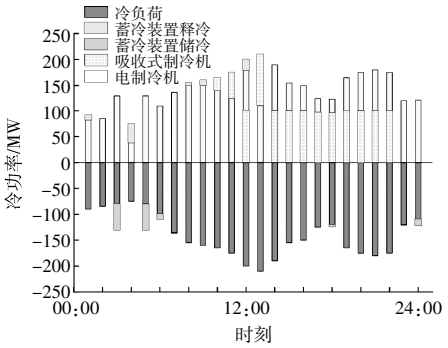
(b)场景 2



(c)场景 3



(d)场景 4



(e)场景 5

图 7　各场景冷功率调度结果

Fig.7 Cold power scheduling results for each scenario

系统存在能量平衡,因此同一时刻系统流入、流出能量关于横轴对称。不同场景的系统运行利润如表 6 所示。

②电功率调度结果分析

由图 5,表 6 分析可知,场景 1 在谷时段,风力发电机组用来满足电负荷需求与电制冷机功耗,如有余富则出售给电网。

表 6　各场景运行利润

Table 6 Operating profit of each scenario　　万元

场景	冷、热、电售能总收入	售氢收入	向电网售电收入	购电成本	购气成本	碳排放成本	弃风惩罚成本	制氢成本	可中断负荷补充成本	利润
1	385.4	0	9.2	49.0	163.5	34.4	86.7	0	0	60.9
2	385.4	0	8.4	26.5	170.2	31.9	71.8	0	0	93.4
3	385.4	78.4	5.8	26.5	170.2	31.9	4.6	46.1	0	190.3
4	411.9	77.6	5.2	15.4	170.1	29.4	2.7	45.6	0	231.5
5	411.9	77.6	14.1	0	168.7	25.7	2.7	45.6	12.5	248.4

在平时段,由于风力发电机组产出减少,且此刻购电价格高于天然气价格，因此采用燃气轮机发电。在峰时段,用电负荷需求大,风力发电机组与燃气轮机两者的产出不能满足负荷要求，需要从电网购电,总运行利润为 60.9 万元。场景 2 与场景 1 相比,购买天然气的成本增加了 6.7 万元,同时向电网售电的收入减少了 0.8 万元。系统在加入了储电设备后，燃气轮机发电的多余电量利用储电装置进行储能，以用于在峰时段放电满足电负荷需求，从而使系统的购电成本降低了 22.5 万元。储电装置的引入成功缓解了峰时段电负荷压力,降低了综合能源系统的运行成本。场景 3 在

系统加入了储氢装置后，谷时段余富的风力发电机组产出用于电解槽制氢，实现利润 78.4 万元。系统产生电能在满足电负荷、制冷以及储能后,优先用于制氢,如再有剩余则出售给电网。此时向电网售电放置于最后的优先级,因为谷时段电价低,制氢更加经济，此时段向电网售电减少了 2.6 万元。在 23:00–次日 00:00 时段,风电资源实现完全消纳,但电解槽容量还有剩余,此时不会采用燃气轮机发电或从电网购电，因为购电或购气会增加碳排放成本,该结果表明,相比于购电或购气制氢,利用风能类可再生资源制氢更加经济可行。在场景 3 加入了制氢后，整体运行利润提高了 97.0 万元。场景 4 实施负荷侧实时电价需求响应后,高峰期用电量减少，综合能源系统购电费用相比于场景 3 减少了 11.1 万元。同时场景 4 的售氢收入相比于场景 3 也减少了 0.8 万元，原因是在实施实时电价需求响应后,谷时段的电负荷增多,系统产出的电能优先满足电负荷,其次用于制氢。与场景 3 相比,经过实时负荷需求响应,系统的购气成本、弃风惩罚成本以及碳排放成本分别降低了 0.1 万元,1.9 万元,2.5 万元，而各类能源的出售收入增加了 26.4 万元，总运行利润增加了 41.2 万元,说明实时电价需求响应策略引导用户合理用电的举措能够给系统带来更佳的经济性。场景 5 引入可中断负荷需求响应后，综合能源系统在用户用电高峰期不需向电网购电。虽然与用户签订的可中断负荷需求响应协议使系统增加了 12.5 万元的补偿成本，但相比于场景 4，燃气轮机出力减少,向电网售电增加 8.9 万元、购气成本降低 1.4 万元,碳排放成本降低 3.7 万元,总运行利润增加了 16.9 万元,说明同用户签订可中断负荷需求响应协议有助于系统降低运行成本。

③冷、热功率调度

在场景 1 时,谷时段天然气价格高,因此产热方式不采用燃气轮机,而采用燃气锅炉供热、电制冷机来满足冷负荷。在峰时段与平时段,天然气价格低，此时供热由燃气轮机承担，燃气锅炉不运行,冷负荷由吸收式制冷机与电制冷机共同承担。对于场景 2 和场景 5，由于加入了蓄热与蓄冷装置,可以灵活地进行热量的存储与释放,热负荷由燃气轮机、燃气锅炉以及储热装置共同承担。在 10:00–22:00,冷负荷优先由吸收式制冷机承担,但受限于吸收式制冷机容量，如制冷不足需要蓄冷装置与电制冷机补充，蓄冷装置置于最后的优先级,在冷负荷高峰期使用。对于场景 5,电价高峰期时电负荷会降低，此时电制冷机承担更多的冷负荷,蓄冷装置减少产出。当系统加入了蓄热与蓄冷装置后,热电耦合效应减弱,极大地提高了系统运行的灵活性。

④系统碳排放

系统碳排放来自于电网购电以及购置天然气,不同场景的碳排放情况如表 7 所示。

表 7 各场景碳排放情况

Table 7 Carbon emissions of various scenarios t

场景	天然气等效碳排放量	电网购电等效碳排放量	系统碳排放量
1	397.2	1 037.4	1 434.6
2	249.4	1 079.6	1 329
3	249.4	1 079.6	1 329
4	147.1	1 078.9	1 226
5	0	1 070.0	1 067

对于场景 1,在 12:00–14:00,19:00–22:00,风力发电机组不能完全满足电负荷需求，需要燃气轮机发电与向电网购电共同来补充，此时碳排放量为 1 434.6 t。对于场景 2,在增加储电、蓄热、蓄冷装置后,虽蓄热没有进行,燃气锅炉的出力也较小,但燃气轮机出力增加并用于储电,储电装置在用电高峰期放电,减少了从电网购电量,因此购电等效碳排放量增加 42.2 t，系统碳排放量降低 105.6 t。对于场景 3,利用了风力资源来制氢,虽然其系统碳排放量与场景 2 相同，但所制氢被氢燃料电池汽车使用,减少了社会碳排放量。对于场景 4,在负荷侧实施实时电价需求响应后,峰时段用户用电量减少,天然气与电量购置数量减少,与场景 2,3 相比，系统天然气等效碳排放量降低 102.3 t,电网购电等效碳排放量降低 0.7 t,系统碳排放量降低 103 t。对于场景 5,在负荷侧实施了中断负荷需求响应后,用户用电量在峰时段减少,系统不需向电网购电,因天然气等效排放量为 0。同时，系统的天然气购置量也降低，相比于场景 4,等效天然气碳排放降低 147.1 t。

4 结论

本文针对含风电制氢以及电、冷、热多种能源类型以及存在两者需求响应的综合能源系统的运行特性与优化调度展开研究，在建立了模糊约束

以解决风电出力不确定的前提下，分析了模型对于系统调度、风电消纳、碳排放等方面的影响。研究表明，该模型能够实现能量在时空上的平衡与合理利用,减少了风能资源的弃用率与碳排放量,从而达到环境友好。电源侧计及制氢系统以及多种储能、负荷侧考虑负荷需求响应策略,加强源荷协同,将进一步促进未来我国多能协同领域的发展。

参考文献:

[1] 李红伟,周海林,韩璐,等.基于能量枢纽的区域电-热网优化运行研究[J].电力科学与工程,2020,36(10):29-35.

[2] 马腾飞. 多能互补微能源网综合需求响应研究[D].北京:北京交通大学,2019.

[3] 严毅,张承慧,李珂,等.含压缩空气储能的冷热电联供微网优化运行策略[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6924-6936,7126.

[4] 杨志鹏,张峰,梁军,等.含热泵和储能的冷热电联供型微网经济运行[J].电网技术,2018,42(6):1735-1743.

[5] Yang H,Xiong T,Qiu J,et al.Optimal operation of DES/CCHP based regional multi-energy prosumer with demand response [J].Applied Energy,2016,167:353-365.

[6] Mirzaei M A,Yazdankhah A S,Mohammadi-Ivatloo B. Integration of demand response and hydrogen storage system in security constrained unit commitment with high penetration of wind energy [A].Electrical Engineering (ICEE),Iranian Conference on[C].Mashhad:IEEE,2018.1203-1208.

[7] Giannakoudis G,Papadopoulos A I,Seferlis P,et al. Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage [J].International Journal of Hydrogen Energy,2010,35(3):872-891.

[8] Shujun M,You Z,Ye Y,et al.A curtailed wind power accommodation strategy based on wind-hydrogen-heat-storage integrated energy network [A].2017 Chinese Automation Congress (CAC) [C].Jinan:IEEE,2017.6146-6150.

[9] Taljan G,Fowler M,Canizares C,et al.Hydrogen storage for mixed wind-nuclear power plants in the context of a hydrogen economy [J].International Journal of Hydrogen Energy,2008,33(17):4463-4475.

[10] 谷守信,张建成.基于电价型需求响应的微电网两阶段随机调度方法[J].华北电力大学学报(自然科学版),2018,45(2):39-46.

[11] 别朝红,胡国伟,谢海鹏,等.考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度 [J]. 电力系统自动化,2014,38(13):115-120,159.

[12] 曾丹,姚建国,杨胜春,等.应对风电消纳中基于安全约束的价格型需求响应优化调度建模[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5571-5578.

[13] 杨楠,王波,刘涤尘,等.计及大规模风电和柔性负荷的电力系统供需侧联合随机调度方法[J].中国电机工程学报,2013,33(16):63-69.

[14] 王健,鲁宗相,乔颖,等.高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究 [J]. 电网技术,2017,41(7):2115-2124.

[15] 王卿然,谢国辉,张粒子.含风电系统的发用电一体化调度模型[J].电力系统自动化,2011,35(5):15-18,30.

[16] 鞠立伟,秦超,吴鸿亮,等.计及多类型需求响应的风电消纳随机优化调度模型[J].电网技术,2015,39(7):1839-1846.

[17] 包宇庆,王蓓蓓,李扬,等.考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J].中国电机工程学报,2016,36(17):4589-4600.

[18] 王蓓蓓,刘小聪,李扬.面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22):35-44.

[19] 邓婷婷,娄素华,田旭,等.计及需求响应与火电深度调峰的含风电系统优化调度 [J]. 电力系统自动化,2019,43(15):34-41.

[20] 田丰,贾燕冰,任海泉,等.考虑碳捕集系统的综合能源系统源-荷低碳经济调度 [J]. 电网技术,2020,44(9):3346-3355.

[21] 周喜超,李晓霞,李振,等.基于太阳能储/供热综合能源系统的运行策略[J].可再生能源,2024,42(1):71-78.

Flexible scheduling and carbon emission analysis of a comprehensive energy system containing wind power for hydrogen production and multiple energy storage

Mu Yong[1], Lu Feng[1], Liu Dapeng[1], Liu Yong[1], Yun Fei[1], Yuan Tianmeng[1], Luan Zhengyi[2]
(1.Tangshan Power Supply Company of State Grid Jibei Electric Power Co.,Ltd., Tangshan 063000, China; 2.School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: Under the dual carbon goal, wind energy as a green energy source has received much attention, but the issue of wind abandonment still restricts the development of wind power generation. The configuration of hydrogen storage in a comprehensive energy system can effectively solve the problem of wind abandonment and achieve the effective utilization of wind energy in multiple ways and times. This article proposes a comprehensive energy system scheduling method that includes wind power hydrogen production and multiple types of energy storage, taking into account the impact of wind power output uncertainty on the system, considering the joint optimization scheduling and load demand response strategy of electricity, heat,cold, and hydrogen,and analyzing the carbon emissions of the system. The research results indicate that the established comprehensive energy system scheduling model can achieve scientific collaboration of multiple types of energy and improve the operational economy of the comprehensive system.

Keywords: wind abandonment; wind power hydrogen production; energy storage; carbon emission