第 49 卷 第 1 期：138-149 高电压技术 Vol.49, No.1: 138-149
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220072

多区互联综合能源系统分散协调低碳经济调度

廖 扬[1]，蔡 帜[2]，邵佳扬[1]，胡林献[1]
（1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院，哈尔滨 150001；
2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100089）

摘 要：为研究多区域综合能源系统互联对碳排放量的影响，首先构建了通过柔性直流互联的相临区域综合能源系统分解策略，然后计及电转气(power to gas，P2G) 过程中的碳消耗，并引入阶梯式碳交易机制，基于目标级联法建立了以燃料成本、碳交易成本、联络线费用、弃风惩罚之和最小为目标函数的多区互联综合能源系统分散协调调度模型，最后通过算例仿真分析了区域互联、碳交易参数、区域特性、P2G 容量对系统碳排放量的影响。研究表明，多区域互联有利于提高能源利用率、降低碳排放量，合理选择碳交易参数、配置电转气设备以及选择与热电机组占比较低、负荷特性相差较大的区域互联能够更加有效地控制系统碳排放量，促进系统的风电消纳。
关键词：综合能源系统；多区互联；分散协调调度；低碳；电转气

Decentralized Coordinated Low-carbon Economic Dispatch Method for Multi-regional Interconnected Integrated Energy System

LIAO Yang[1], CAI Zhi[2], SHAO Jiayang[1], HU Linxian[1]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100089, China)

Abstract：This paper studies the impact of multi-regional integrated energy system interconnection on carbon emissions. First, the decomposition strategy of the integrated energy system in adjacent areas interconnected by flexible DC tie lines is constructed. Then, the carbon consumption in the process of power-to-gas (P2G) is taken into account, and a stepped carbon trading mechanism is introduced. A decentralized coordination scheduling model for a multi-region interconnected integrated energy system is established in which the minimum sum of fuel cost, carbon transaction cost, tie line cost, and wind curtailment penalty is taken as the objective function. The influences of regional interconnection,carbon trading parameters,regional characteristics, and P2G capacity on the system carbon emissions are analyzed by calculation simulation. Studies have shown that multi-regional interconnection is conducive to improving energy utilization and reducing carbon emissions. Reasonable selection of carbon trading parameters, configuration of power-to-gas equipment, and selection of regional interconnection with a low proportion of thermal power units and a large difference in load characteristics can be adopted to more effectively control the system carbon emissions, and promote the wind power consumption of the system.
Key words：integrated energy system; multi-regional interconnected; decentralized coordinated dispatch; low-carbon; power to gas

0 引言

能源是人类社会生存和发展的基础，传统化石能源的大量使用导致了严重的环境问题[1-2]。在“碳达峰、碳中和”的大背景下，电力行业作为碳排放最主要的来源，推进电力行业的低碳化，对实现“双碳”目标具有重要意义[3-5]。

推进电力行业的低碳化首先就需要实现电力系统的能源转型，大力发展可再生能源，替代传统燃煤机组供电[6]。风能作为一种新能源具有可再生、无污染且储量大的优点，近些年，风电在我国得到了大规模的发展[7]。截至 2020 年年底，我国风电累计装机容量达到 2.81 亿 kWh，占我国全部发电装机的 12.8%[8]。与此同时，专家学者们在提高风能利用率、扩大风电装机占比、促进电力系统低碳化等方面做出了大量的研究。文献[9]提出一种风能和氢能耦合实现碳中和的方案，能够提高燃气轮机效率，

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(5108−202155042A−0−0−00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5108–202155042A–0–0–00).

降低系统弃风率，具有显著的低碳效益。文献[10]提出在扩大风电规模的同时，还应对现有火电机组进行低碳化改造，并充分利用源荷可调节资源以提高系统的风电消纳能力，从而推进电力系统的低碳化。文献[11]将低碳技术与市场机制相结合，提出了一种基于碳交易机制的光热电站与风电系统调度策略，并通过仿真验证所提策略能够有效提高系统风电消纳率并降低系统的碳排放量。

发展综合能源系统(integrated energy system，IES)，促进多能源互补，提高能源利用率也是降低系统碳排放的重要手段。综合能源系统通过多种异质能源子系统之间的协调规划、优化运行，协同管理、交互响应和互补互济，在满足系统内多元化用能需求的同时，有效提升能源利用效率，降低系统碳排放和弃风率[12-16]。文献[14]建立了考虑蓄热罐备用效益的电热综合能源系统优化调度模型，并通过仿真说明了该模型能够有效降低系统煤耗，提高系统新能源消纳能力。文献[15]提出了一种兼顾综合能源系统的经济性和低碳性的优化调度模型，在调度模型中引入了阶梯式碳交易机制和供需灵活双响应机制，并通过算例仿真证明该模型具有良好的经济和环境效益。文献[16]提出了一种综合能源系统的低碳运行模式，该模式中通过碳捕集系统向电转气设备提供二氧化碳生产甲烷，并且利用天然气的气化冷能制备液态二氧化碳和干冰，在实现减排的同时提高了系统的经济性。

目前已经有一些通过发展新能源和综合能源系统实现电力系统低碳化的研究，但这些研究大多局限于单一区域内，而随着电网的不断互联，区域间电网联络也更加紧密，对单一区域的研究已经不满足未来电网的发展需求。文献[17]针对多区域互联电力系统提出了一种基于目标级联法的分散优化调度方法，相比于传统的集中调度方法，分散协调调度在优化过程中区域间仅需要交互少量的边界信息，能够最大程度保证区域信息私密性和调度独立性。文献[18]针对多区域电−气互联系统的优化调度问题，提出了考虑联络线、联络管道能量交互的分散调度方法，并通过算例仿真验证了多区互联能够更好地优化区域发电资源，提高风电上网率，降低系统成本。目前多区互联电力系统的相关研究已有部分成果，但是针对电、气、热多能源耦合的综合能源系统互联的研究还较少，并且现有多区域互联的研究没有考虑系统的低碳性。而多区域综合能源系统互联能够提供更多的调度资源，在促进能源的高效利用、降低碳排放量方面有巨大的潜力。

本文针对通过柔性直流互联的相临区域综合能源系统的碳减排潜力及消纳弃风策略等问题进行研究。首先建立了区域 IES 运行框架，提出了区域互联 IES 分解策略;然后在综合考虑 IES 的经济性、低碳性以及互联区域的信息保密性基础上，建立了以运行成本，碳交易成本，弃风成本、联络线费用之和最小为目标的临近区域互联综合能源系统分散协调调度模型；最后通过算例仿真，详细分析了碳交易机制，互联区域特性以及互联区域电转气设备(power to gas，P2G)容量对互联 IES 的影响。

1　互联 IES 分解方法

1.1　IES 结构

综合能源系统是指耦合电、气、热多种能源，对能源生产、传输、转换、存储、消费各环节进行有机协调与统筹调度的一体化系统，单区域 IES 的结构如图 1 所示。系统中主要的能源生产设备有：风电机组、纯凝火电机组(后文简称火电机组)、热电机组、燃气–蒸汽联合循环机组(后文简称燃气机组)；主要的能源转换设备是 P2G 设备和电锅炉设备。目前，相邻区域电力系统之间多采用直流背靠背互联，而柔性直流能够在保证 2 区域电力系统异步运行的同时，实现功率双向流动，是未来的发展趋势，因此本文假设相邻区域 IES 之间通过柔性直流背靠背互联。

1.2　互联 IES 分解策略

本文假设 IES 之间仅通过柔性直流联络线相关

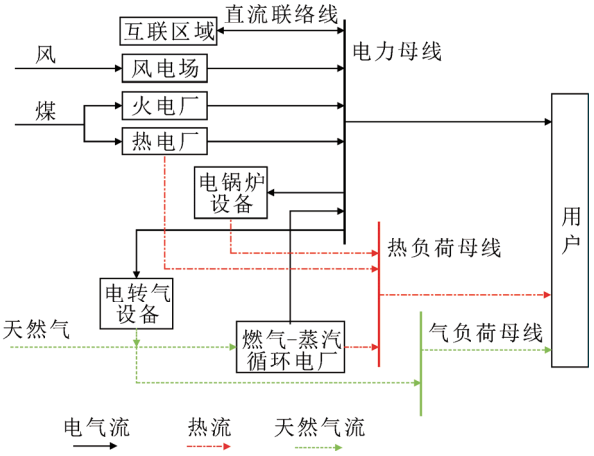


图 1　单区域 IES 结构图

Fig.1　Single region IES structure diagram

联，热力、天然气子系统则各区域相互独立。对此，针对互联的电力子系统利用线路撕裂法，将互联 IES 分解为独立的区域子系统进行优化调度。图 2 为将一个通过柔性直流联络线互联的 IES 分解为 2 个独立子系统，每个子系统都有自己的调度中心。直流联络线利用发电机等效，联络线功率为等效发电机的有功功率。

定义$-T_{x,t}$、$T_{y,t}$、$T_{xy,t}$分别为 t 时段等效发电机 x、y 以及联络线 xy 的有功功率，3 者要满足以下协调耦合约束

$$T_{x,t}=T_{y,t}=T_{xy,t} \tag{1}$$

互联区域分解完成后，可利用目标级联分析法(analytical target cascading，ATC)进行求解。ATC 将多区互联 IES 分散协调优化问题分解为上级优化主问题和下级优化子问题。上级主问题为各区域协调问题，在虚拟上级调度中心求解；下级子问题为子系统优化问题，由各区域子系统独自求解，上下级之间通过协调变量相关联。具体求解过程详见文献[19]。

2 多区互联 IES 分散协调调度模型

根据目标级联分析法，将多区互联 IES 分散协调调度模型分为上级主问题和下级子问题 2 个部分，上下级之间的协调变量为联络线功率。

2.1 下级优化子问题

假设多区互联 IES 由 K 个区域 IES 通过柔性直流输电线路相互联接而成，且子系统 k 通过 Z_k 条联络线与其他区域相连。假设子系统 k 中共有 H 台火电机组、M 座热电厂(每座热电厂中有 S 台热电机组)、N 座燃气–蒸汽联合循环电厂(每座燃气–蒸汽联合循环电厂中有 R 个燃气机组)。系统中热电厂和燃气–蒸汽联合循环电厂为供热电厂，每座供热电厂中设置 X 台电锅炉。子系统 k 中共设置 Y 台 P2G 设备。

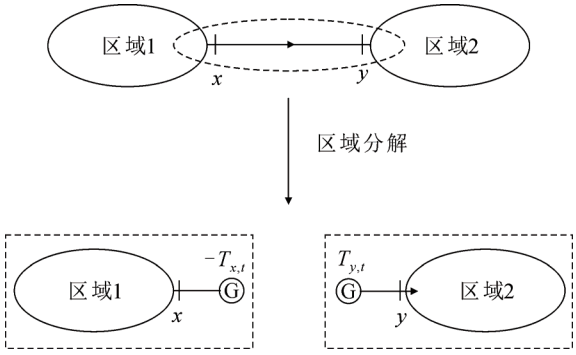


图 2 互联区域分解示意图

Fig.2 Schematic diagram of interconnected regional decomposition

2.1.1 目标函数

本文综合考虑 IES 的经济性和低碳性，目标函数由机组运行成本、碳交易费用、弃风惩罚成本、联络线电价以及偏差调整成本构成，如下：

$$\begin{aligned}\min\sum_{t=1}^{T}\Big(&\Big(\sum_{h=1}^{H}C_{t,k,h}^{\mathrm{CON}}+\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S}C_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}+C_t^{\mathrm{GAS}}\Big)+\\&C_k^{\mathrm{W}}(P_{t,k}^{\mathrm{WF}}-P_{t,k}^{\mathrm{W}})+f_{\mathrm{CO_2}}^{\mathrm{price}}+\sum_{z=1}^{Z_k}C^{\mathrm{T}}T_{t,k,z}+\\&\sum_{z=1}^{Z_k}(\alpha_{t,k,z}(T_{t,k,z}^{\mathrm{main}*}-T_{t,k,z})+(\beta_{t,k,m}(T_{t,k,z}^{\mathrm{main}*}-T_{t,k,z}))^2)\Big)\end{aligned} \tag{2}$$

$$C_t^{\mathrm{GAS}}=\lambda_2 V_{t,k}^{\mathrm{buy}} \tag{3}$$

式中：下标中的 t 代表时段，k 代表子系统，Z_k 代表子系统 k 的联络线数量，下文同理；$C_{t,k,h}^{\mathrm{CON}}$、$C_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}$分别为火电机组 h、第 m 座热电厂热电机组 s 的运行成本，机组耗量特性方程详见文献[20]；C_t^{GAS}为系统中 t 时段购买天然气的成本；$V_{t,k}^{\mathrm{buy}}$ 为系统购气量；λ_2 为天然气价格；$P_{t,k}^{\mathrm{WF}}$、$P_{t,k}^{\mathrm{W}}$ 分别为风电预测出力和风电实际出力；C_k^{W} 为弃风惩罚系数；$\alpha_{t,k,z}$、$\beta_{t,k,m}$ 分别为偏差项系数和偏差平方项系数；$T_{t,k,z}^{\mathrm{main}*}$、$T_{t,k,z}$ 分别为虚拟上级下发的第 z 联络线 t 段的协调变量值和联络线优化功率；C^{T} 为联络线单位功率电价；$f_{\mathrm{CO_2}}^{\mathrm{price}}$ 为 IES 碳交易费用，由碳交易定价机制和碳排放量决定。目前碳交易定价机制主要有传统碳交易机制和阶梯式碳交易机制 2 种，本文采用阶梯式碳交易机制，其中机组的碳排放权配额计算模型和碳排放量计算模型见文献[20]，阶梯式碳交易模型[21]为：

$$\begin{cases}E^{\mathrm{cIES}}=\sum_{h=1}^{H}E_h^{\mathrm{cCON}}+\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S}E_{m,s}^{\mathrm{cCHP}}+\\\qquad\sum_{n=1}^{N}\sum_{r=1}^{R}E_{n,r}^{\mathrm{cGAS}}-\sum_{y=1}^{Y}E^{\mathrm{cP2G}}\\E^{\mathrm{qIES}}=\sum_{h=1}^{H}E_h^{\mathrm{qCON}}+\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S}E_{m,s}^{\mathrm{qCHP}}+\sum_{n=1}^{N}\sum_{r=1}^{R}E_{n,r}^{\mathrm{qGAS}}\\E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}}=E^{\mathrm{cIES}}-E^{\mathrm{qIES}}\end{cases} \tag{4}$$

$$f_{\mathrm{CO_2}}^{\mathrm{price}}=\begin{cases}\lambda E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}},E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}}\le l\\\lambda(1+\eta)(E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}}-l)+\lambda l,l<E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}}\le 2l\\\lambda(1+2\eta)(E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}}-2l)+\lambda(2+\eta)l,\\\qquad 2l<E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}}\le 3l\\\lambda(1+3\eta)(E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}}-3l)+\lambda(3+3\eta)l,\\\qquad 3l<E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}}\le 4l\\\quad\vdots\end{cases} \tag{5}$$

$$E^{\mathrm{cP2G}}=\sigma^{\mathrm{P2G}}\sum_{t=1}^{T}V_t^{\mathrm{P2G}} \tag{6}$$

式中：$E_{\mathrm{trade}}^{\mathrm{IES}}$、$E^{\mathrm{cIES}}$、$E^{\mathrm{qIES}}$分别为 IES 系统的碳交易量、实际碳排放量和碳排放配额；E_h^{qCON}、$E_{m,s}^{\mathrm{qCHP}}$、$E_{n,r}^{\mathrm{qGAS}}$别为火电机组、热电机组、燃气机组的碳排放权配额；E_h^{cCON}、$E_{m,s}^{\mathrm{cCHP}}$、$E_{n,r}^{\mathrm{cGAS}}$分别为火电机组、热电机组、燃气机组 1 个调度周期内实际碳排放量；E^{cP2G}为 P2G 在 1 个调度周期内吸收二氧化碳量；σ^{P2G}为 P2G 生产单位体积天然气吸收二氧化碳量；$V_{\mathrm{t}}^{\mathrm{P2G}}$为 P2G 生产天然气量；$\lambda$为碳交易市场基价；$l$为碳排放量区间长度；$\eta$为价格增幅。

2.1.2　约束条件

子问题的约束条件包括：电、热、气平衡约束，机组约束，电锅炉、P2G 设备约束，联络线约束等。

1）电平衡约束

$$\begin{aligned}&\sum_{h=1}^{H}P_{t,k,h}^{\mathrm{CON}}+\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S}P_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}+\sum_{n=1}^{N}\sum_{r=1}^{R}P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}+P_{t,k}^{\mathrm{W}}+\\&\sum_{z=1}^{Z_k}T_{t,k,z}=P_{t,k}^{\mathrm{load}}+\sum_{i}^{M+N}\sum_{x=1}^{X}P_{t,k,i,x}^{\mathrm{eboiler}}+\sum_{y=1}^{Y}P_{t,k,y}^{\mathrm{P2G}}\end{aligned} \tag{7}$$

式中：$P_{t,k,h}^{\mathrm{CON}}$、$P_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}$、$P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}$分别为火电机组$h$、第$m$座热电厂热电机组$s$、第$n$座燃气电厂第$r$台燃气机组电出力；$P_{t,k}^{\mathrm{load}}$、$P_{t,k,i,x}^{\mathrm{eboiler}}$、$P_{t,k,y}^{\mathrm{P2G}}$分别为子系统的电负荷、第$i$座供热电厂第$x$台电锅炉的运行功率、第$y$台 P2G 设备运行功率。

2）热平衡约束

区域子系统内的热负荷按供热区域分区平衡，供热区域按热电厂划分。

$$\begin{cases}\sum_{m=1}^{M}(\sum_{s=1}^{S}Q_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}+\sum_{x=1}^{X}Q_{t,k,m,x}^{\mathrm{eboiler}})=Q_{t,k,m}^{\mathrm{load}}\\\sum_{n=1}^{N}(\sum_{r=1}^{R}Q_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}+\sum_{x=1}^{X}Q_{t,k,n,x}^{\mathrm{eboiler}})=Q_{t,k,n}^{\mathrm{load}}\end{cases} \tag{8}$$

式中：$Q_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}$为第$m$座热电厂内第$s$台热电机组热出力；$Q_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}$为第$n$座燃气电厂内第$r$台燃气机组热出力；$Q_{t,k,m,x}^{\mathrm{eboiler}}$为第$m$座供热电厂第$x$台电锅炉热出力；$Q_{t,k,m}^{\mathrm{load}}$为第$m$台座供热电厂所供热负荷。

机组热出力与供热抽气速率关系为

$$Q=\frac{D\Delta H}{1000} \tag{9}$$

式中：Q为机组热出力；D为供热抽气速率；ΔH为蒸汽焓降。

3）气平衡约束

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{r=1}^{R}V_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}-\sum_{y=1}^{Y}V_{t,k,y}^{\mathrm{P2G}}=V_{t,k}^{\mathrm{buy}}-V_{t,k}^{\mathrm{load}} \tag{10}$$

$$V_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}=b_1(P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS1}})^2+b_2P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}+b_3 \tag{11}$$

式中：$V_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}$、$P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}$分别为第$n$座燃气电厂内第$r$台燃气机组耗气量和有功出力；$b_1$、$b_2$、$b_3$为燃气机组耗量系数；$V_{t,k}^{\mathrm{load}}$为系统用户气负荷。

4）机组出力上下限约束

式(12)为火电机组和风电出力上下限约束，式(13)、式(14)分别为热电机组和燃气机组出力上、下限约束。

$$\begin{cases}\underline{P}_{k,h}^{\mathrm{CON}}\le P_{t,k,h}^{\mathrm{CON}}\le\overline{P}_{k,h}^{\mathrm{CON}}\\0\le P_{t,k}^{\mathrm{W}}\le P_{t,k}^{\mathrm{WF}}\end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases}\underline{P}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}\le P_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}\le\overline{P}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}\\\underline{D}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}\le D_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}\le\overline{D}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}\\\overline{P}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}=a_{\mathrm{H}}+b_{\mathrm{H}}D_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}\\\underline{P}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}=a_{\mathrm{L}}+b_{\mathrm{L}}D_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}\end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases}\underline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}\le P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}\le\overline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}\\\underline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}\le P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}\le\overline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}\\\underline{D}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS}}\le D_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}\le\overline{D}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS}}\\\overline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}=a_{\mathrm{H}}+b_{\mathrm{H}}D_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}\\\underline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}=a_{\mathrm{L}}+b_{\mathrm{L}}D_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}\end{cases} \tag{14}$$

式中：$\overline{P}_{k,h}^{\mathrm{CON}}$、$\underline{P}_{k,h}^{\mathrm{CON}}$分别为火电机组电出力上、下限。$a_{\mathrm{L}}$、$b_{\mathrm{L}}$、$a_{\mathrm{H}}$、$b_{\mathrm{H}}$分别为下、上限拟合系数；$\overline{P}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}$、$\underline{P}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}$分别为热电机组电出力上、下限；$\overline{D}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}$、$\underline{D}_{k,m,s}^{\mathrm{CHP}}$分别为热电机组供热抽汽速率上、下限；$\overline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}$、$\underline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}$分别为燃气机组燃气轮机电出力上、下限；$\overline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}$、$\underline{P}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}$分别为燃气机组蒸汽轮机电出力上、下限；$\overline{D}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS}}$、$\underline{D}_{k,n,r}^{\mathrm{GAS}}$分别为燃气机组供热抽气速率上、下限。

5）燃气机组内部等式约束[22]

$$\begin{cases}P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}=f_1P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}+f_2-P_{t,k,n,r}^{\mathrm{H}}\\P_{t,k,n,r}^{\mathrm{H}}=f_3Q_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}\\P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS}}=P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}+P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}\end{cases} \tag{15}$$

式中：f_1、f_2、f_3为燃气机组内部拟合系数；$P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}$为蒸汽轮机有功出力；$P_{t,k,n,r}^{\mathrm{H}}$为蒸汽轮机供热所耗电功率。

6）机组爬坡约束

$$\begin{cases}-\Delta P_{\mathrm{down}}^{\mathrm{CON}}\le P_{t,k,h}^{\mathrm{CON}}-P_{t-1,k,h}^{\mathrm{CON}}\le\Delta P_{\mathrm{up}}^{\mathrm{CON}}\\-\Delta P_{\mathrm{down}}^{\mathrm{CHP}}\le P_{t,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}-P_{t-1,k,m,s}^{\mathrm{CHP}}\le\Delta P_{\mathrm{up}}^{\mathrm{CHP}}\\-\Delta P_{\mathrm{down}}^{\mathrm{GAS}}\le P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS1}}-P_{t-1,n,r}^{\mathrm{GAS1}}\le\Delta P_{\mathrm{up}}^{\mathrm{GAS}}\\-\Delta P_{\mathrm{down}}^{\mathrm{GAS}}\le P_{t,k,n,r}^{\mathrm{GAS2}}-P_{t-1,n,r}^{\mathrm{GAS2}}\le\Delta P_{\mathrm{up}}^{\mathrm{GAS}}\end{cases} \tag{16}$$

式中：$\Delta P_{\mathrm{up}}^{\mathrm{CON}}$、$\Delta P_{\mathrm{down}}^{\mathrm{CON}}$分别为火电机组单位时间爬坡、滑坡功率；$\Delta P_{\mathrm{up}}^{\mathrm{CHP}}$、$\Delta P_{\mathrm{down}}^{\mathrm{CHP}}$分别为热电机组单位时间爬坡、滑坡功率；$\Delta P_{\mathrm{up}}^{\mathrm{GAS}}$、$\Delta P_{\mathrm{down}}^{\mathrm{GAS}}$分别为燃气机组单位时间爬坡、滑坡功率。

7）电锅炉和 P2G 设备约束

电锅炉和 P2G 设备根据弃风情况决定是否运行，当系统存在弃风时，设备开启，消纳更多风电。设备运行时需满足运行功率约束，即

$$\begin{cases} 0 \le P_{t,k,i,x}^{\mathrm{eboiler}} \le \overline{P}_{k,i,x}^{\mathrm{eboiler}} \\ 0 \le P_{t,k,y}^{\mathrm{P2G}} \le \overline{P}_{k,y}^{\mathrm{P2G}} \end{cases} \tag{17}$$

式中：$\overline{P}_{k,i,x}^{\mathrm{eboiler}}$、$\overline{P}_{k,y}^{\mathrm{P2G}}$分别为电锅炉和 P2G 设备运行功率上限。

电锅炉的电功率与热功率之间的转换关系为

$$Q_{t,k,i,x}^{\mathrm{eboiler}} = 3.6 P_{t,k,i,x}^{\mathrm{eboiler}} \mu_{\mathrm{e}} \tag{18}$$

式中，μ_{e}为电锅炉电热转换效率。

电转气设备输出天然气与输入电功率关系为

$$V_{t,k,y}^{\mathrm{P2G}} = \frac{P_{t,k,y}^{\mathrm{P2G}} \mu_{\mathrm{P2G}}}{H_{\mathrm{G}}} \tag{19}$$

式中：μ_{P2G}为 P2G 设备转换效率；H_{G}为天然气热值。

8）联络线约束

本文区域间联络线为柔性直流联络线，可以双向传输功率，且只需满足功率上限约束以及合同电量约束，如下：

$$\left| T_{t,k,z} \right| \le \overline{T}_{k,z} \tag{20}$$

$$\left| \sum_{t=1}^{T} \sum_{z=1}^{Z_k} T_{t,k,z} \right| \ge Q_k \tag{21}$$

式中：$\overline{T}_{k,z}$为联络线功率传输上限；Q_k为合同电量。

2.2 上级优化主问题

上级调度中心协调整个多区互联 IES，当各下级区域上传各自优化后的联络线功率后，上级调度中心以联络线功率偏差最小为目标，优化求解出新的联络线功率参考值，并下发给各下级区域。主问题目标函数为

$$\begin{aligned} \min \sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{K} \Big(\sum_{z=1}^{Z_k} \big(\alpha_{t,k,z} (T_{t,k,z}^{\mathrm{main}} - T_{t,k,z}^{*}) + \\ (\beta_{t,k,m} (T_{t,k,z}^{\mathrm{main}} - T_{t,k,z}^{*}))^2 \big) \Big) \end{aligned} \tag{22}$$

式中：$T_{t,k,z}^{*}$为下级上传的联络线功率；$T_{t,k,z}^{\mathrm{main}}$为新的联络线功率参考值。

假设 k_1、k_2是互联系统中任意 2 个通过联络线直接相连的子系统，子系统 k_1、k_2之间的联络线需要满足以下耦合约束

$$T_{t,k_1,z_1}^{\mathrm{main}} = T_{t,k_2,z_2}^{\mathrm{main}} \tag{23}$$

式中：$T_{t,k_1,z_1}^{\mathrm{main}}$为子系统 k_1、第 z_1 条联络线功率参考值；$T_{t,k_2,z_2}^{\mathrm{main}}$为子系统 k_2、第 z_2 条联络线功率参考值。

3 算例分析

算例系统为 2 个 IES 通过 1 条柔性直流联络线互联。IES A 中装设 5 台火电机组、1 座常规热电厂(装有 6 台热电机组)、1 座燃气−蒸汽联合循环电厂(4 台燃气机组)、1 座风电场，热电厂和燃气电厂分别有自己的供热区域，IES 中配置 2 台 P2G 设备，每座供热电厂中配置 1 台电锅炉设备。IES B 中装设 10 台火电机组、1 座常规热电厂(装有 2 台热电机组)、1 座燃气电厂(2 台燃气机组)、1 座风电场，IES 中配置 2 台 P2G 设备，每座供热电厂中配置 1 台电锅炉设备。各机组参数如附录 A 表 A1—表 A6 所示，仿真中涉及其余参数如表 A7—表 A9 所示。2 个 IES 的电负荷、热负荷、气负荷及风电预测出力如附录 A 图 A1—图 A4 所示。取一天 24 h 为 1 个周期进行优化调度，采用 Gurobi 9.0.3 求解器进行优化求解。

3.1 碳交易机制与区域互联对碳排放量的影响

为分析碳交易机制以及区域互联对多区互联综合能源系统碳排放量的影响，对以下 4 种仿真场景进行分析。

场景 1：计及机组燃料成本、弃风惩罚和联络线费用，不考虑碳交易费用。

场景 2：计及机组燃料成本、弃风惩罚、联络线费用和传统碳交易费用。

场景 3：计及机组燃料成本、弃风惩罚、联络线费用和阶梯式碳交易费用。

场景 4：2 个 IES 独立运行，不通过联络线互联，计及机组燃料成本、弃风惩罚和阶梯式碳交易费用。

4 种场景的仿真结果如表 1 所示。

通过表 1 可知，考虑碳交易成本后，系统的碳排放量都要小于不考虑碳交易成本的场景。对于整个互联系统，相比于场景 1，场景 2 的碳排放量减少了 1.01%，场景 3 的碳排放量减少了 5.33%；场景 3 较场景 2 减少碳排放多达 3229.22 t。这是由于碳排放成本增加后，系统增加了碳排放强度低的火电机组和燃气机组的出力，降低了碳排放强度较高的火电机组和热电机组的出力，从而降低了系统的

表 1　碳交易机制及区域互联对比

Table 1　Comparison of carbon trading mechanism and regional interconnection

仿真场景	区域	碳排放量/t	碳交易成本/万元	弃风量/MW	总成本/万元
场景 1	区域 A	31 542.53	0	291.64	1513.50
	区域 B	48 366.48	0	111.90	2282.78
场景 2	区域 A	31 221.21	49.90	298.19	1569.45
	区域 B	47 870.98	66.09	105.34	2348.14
场景 3	区域 A	30 308.73	115.74	298.19	1669.02
	区域 B	45 554.24	138.60	105.34	2481.64
场景 4	区域 A	30 516.06	123.00	931.93	1755.76
	区域 B	45 726.06	133.03	0	2472.04

碳排放量。可见，考虑碳交易费用能够降低系统的碳排放量，提高系统的低碳性，并且阶梯式碳交易机制相比于传统碳交易机制能够进一步降低系统的碳排放量。

对比前 3 种场景的运行成本，场景 2 相比于场景 1 增加的成本主要是碳交易成本，场景 3 相比于场景 1 增加的成本包括碳交易成本和系统机组的耗量成本。这是由于在场景 3 时，碳交易单价随着碳排放量的增加而不断增加，系统提高低碳高成本机组的出力来降低碳交易成本，这就导致系统机组耗量成本有所增加。考虑碳交易后虽然牺牲了系统部分经济性，但是大大提高了系统的低碳性，证明了阶梯式碳交易机制有助于 IES 低碳调度。

对比场景 3 和场景 4 可知，互联后全系统碳排放量降低了 379.16 t，可以看出区域互联有利于系统减排，还能降低整个系统的运行成本。这是因为一方面，区域互联能够将风电富裕区域的风电外送，实现风电的异地消纳，从而代替火电机组供能，而风电作为清洁能源不产生碳排放，因此能够降低系统的碳排放量；另一方面，区域互联能够将区域内低排放机组的电能外送，从而降低高排放机组的出力，实现全系统的减排。

3.2　碳交易价格影响分析

对于阶梯式碳交易机制，碳交易基价是影响碳排放量的重要参数，本节主要研究碳交易价格对系统成本和碳排放量的影响，其影响如图 3、图 4 所示。

由图 3、图 4 可知，随着碳交易基价不断增加，互联系统总成本也相应增加，系统的碳排放量不断减少。当碳交易基价小于 160 元/t 时，随着碳交易基价的增加，碳交易成本在目标函数中的占比也越

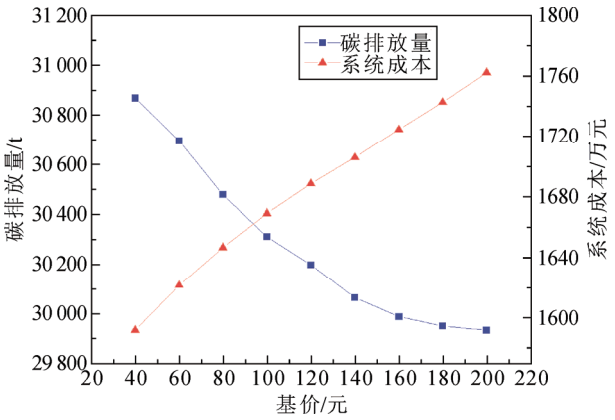


图 3　碳交易基价对区域 A 的影响

Fig.3　Effects of different base prices on region A

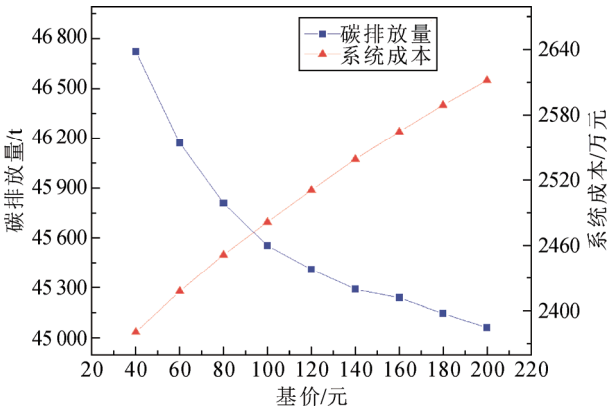


图 4　碳交易基价对区域 B 的影响

Fig.4　Effects of different base prices on region B

来越大，系统不得不降低碳排放量以减少碳交易成本，因此系统通过提高碳排放强度低的火电机组和燃气机组的出力，以替代碳排放强度高的火电机组和热电机组供能，从而降低了总碳排放量。而系统碳排放量下降的同时，减排空间也在减小。当碳交易基价大于 160 元/t 时，系统减排空间接近极限，各机组的出力也趋于稳定，系统碳排放量受碳交易基价的影响也较小。

分析阶梯式碳交易机制中碳交易基价对系统产生的影响可知，碳交易基价对系统的碳排放量和总成本有较大影响。因此，合理选择碳交易机制参数对综合考虑系统的低碳性和经济性具有重要意义。

3.3　受端 IES 特性的影响分析

本算例通过柔性直流联络线将风电富裕 IES 内电能外送，从而降低系统碳排放量和弃风率，本节以 3.1 节中场景 3 为基准分析了接受端 IES(IES B)特性对系统弃风率以及碳排放量的影响。

3.3.1 受端 IES 热电机组比重的影响

图 5 为送、受端 IES 弃风率以及全系统碳排放量与受端 IES 热电机组比重关系曲线，受端 IES 热电比重越小，IES 内“以热定电”的电量就少，而由于风电作为清洁能源，相比于热电在碳排放方面具有优势，因此会替代热电机组对负荷供能，从而降低了系统的碳排放量和送、受端 IES 的弃风率。

3.3.2 受端 IES 风电渗透率的影响

以受端 IES 初始风电装机容量为基准，每次同步变化 10%，送端 IES 弃风率以及全系统碳排放量变化情况如图 6 所示。随着受端 IES 风电渗透率的增大，全系统的碳排放量有所下降，这是由于风电不产生碳排放，而随着风电渗透率的增加，受端 IES 燃煤机组出力则会相应减小，因此系统碳排放量也随之减小。但当受端 IES 风电渗透率增加时，受端 IES 优先选择消纳本区域的风电，留给送端的风电消纳空间减小，不利于送端 IES 的风电异地消纳。

3.3.3 送、受端 IES 负荷特性相差影响

本文考虑 2 个临近区域 IES 通过柔性直流联络线互联的场景，由于区域间时区的差异，区域 IES 间的负荷特性也有所差异，图 7 为送、受端区域 IES 弃风率以及全系统碳排放量与区域 IES 间负荷特性相差的关系曲线。

由图 7 可知，区域间的时差导致了不同区域 IES 间负荷峰谷自然错开，从整体上起到了削峰填谷的作用，而由于风电的碳排放量比燃煤机组低，因此负荷谷值的升高为风电上网创造了更大的空间，从而降低了系统的碳排放量和弃风率。

3.4 受端 IES 电转气设备的影响分析

在 IES 中配置 P2G 设备能够有效地消纳弃风，除此之外，由于 P2G 设备在生产天然气过程中需要消耗 CO_2，因此配置 P2G 设备对系统碳排放量有一定影响。本节假设区域 IES A、B 均配置容量为 40 MW 的 P2G 设备，并针对以下 2 种场景进行仿真：

场景 1：不考虑 P2G 设备消耗 CO_2。

场景 2：考虑 P2G 设备消耗 CO_2。

调度结果如表 2 所示。通过表 2 可以看出，考虑 P2G 设备消耗二氧化碳后，全系统的碳排放量降低了约 70.9 t，2 个区域的碳交易成本分别降低了 0.9 万元和 3.68 万元。可见在 IES 中配置 P2G 设备、考虑 P2G 设备消耗二氧化碳的作用可以减少系统的碳排放量，降低系统成本。

若以受端 IES 配置 10 MW 的 P2G 设备为基准，则当 P2G 设备容量变化时，送端 IES 弃风率以及全系统的碳排放量与受端 IES 系统 P2G 设备容量关系如图 8 所示。

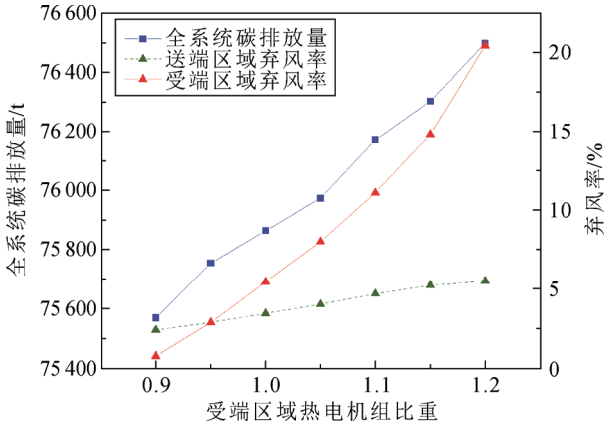


图 5 弃风率及碳排放量与热电机组比重关系曲线

Fig.5 Curve of relationship between abandoned wind rate, carbon emissions and the proportion of thermoelectric units

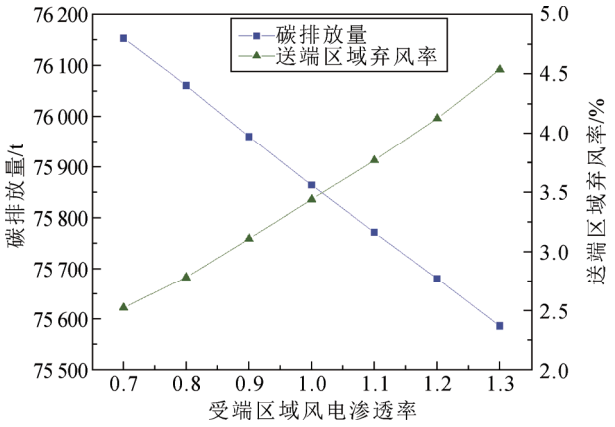


图 6 弃风率、碳排放量与风电渗透率关系曲线

Fig.6 Curve of relationship between abandoned wind rate, carbon emissions and wind power penetration

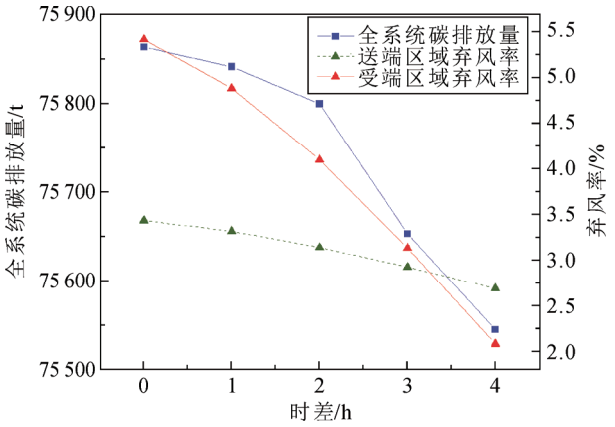


图 7 弃风率、碳排放量与负荷特性相差关系曲线

Fig.7 Curve of relationship between abandoned wind rate, carbon emissions and phase difference of load

表 2　P2G 设备消耗 CO_2 的调度结果对比

Table 2　Comparison of benefits before and after considering P2G consumes CO_2

仿真场景	区域	总成本/万元	碳交易成本/万元	全系统碳排放量/t
场景 1	区域 A	1514.37	118.00	75 608.03
	区域 B	2456.79	136.98	
场景 2	区域 A	1513.52	117.10	75 537.12
	区域 B	2454.48	133.30	

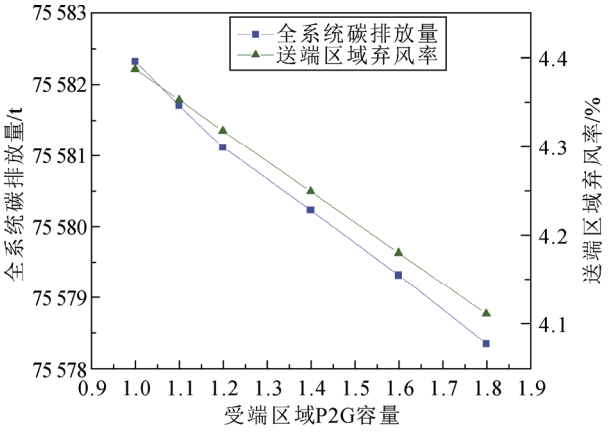


图 8　弃风率、碳排放量与 P2G 设备容量关系曲线

Fig.8　Curve of relationship between abandoned wind rate, carbon emissions and P2G capacity

由图 8 可知，受端 IES 的 P2G 容量可以影响送端区域 IES 的风电消纳和全系统的碳排放量。由于 P2G 设备可以消耗 CO_2 以及向气负荷供气，能够带来一定的经济效益，因此当 P2G 设备的经济收益高于联络线电价成本时，受端 IES 愿意用送端 IES 的电给 P2G 设备供电，从而促进了送端 IES 的风电消纳，并且受端 IES 配置 P2G 设备的容量越大，送端 IES 的弃风率就越低，全系统的碳排放量也越低。

4　结论

本文详细分析了区域综合能源系统互联对提高风电消纳能力、降低碳排放量的影响，得出了如下结论：

1）区域 IES 之间互联能够提高风电消纳能力、降低碳排放量，且 IES 的热电机组比重、风电渗透率、区域间的负荷特性差异以及 P2G 设备容量也会影响系统碳排放量。选择与热电机组占比较低、负荷特性相差较大的 IES 互联能够促进零排放的风电代替燃煤机组进行供能，从而降低系统的碳排放量。

2）调度模型中，计及电转气过程中的碳消耗有利于系统低碳化，且 P2G 容量越大，系统碳排放量越低。

3）考虑碳交易机制能够降低多区互联 IES 的碳排放量，且采用阶梯式碳交易机制、合理设置交易机制参数能够实现多区互联 IES 进一步低碳化。

本文研究成果可供系统规划、区域 IES 调度中心等部门参考借鉴。在未来的研究中，将进一步考虑更多区域 IES 互联、配置储能设备以及新能源、负荷的波动性的影响。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] BAGHERI M, DELBARI S H, PAKZADMANESH M, et al. City-integrated renewable energy design for low-carbon and climate-resilient communities[J]. Applied Energy, 2019, 239: 1212-1225.

[2] KIM H T, YOU H, CHOI K S, et al. A study on interconnecting to the power grid of new energy using the natural gas pressure[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(1): 307-314.

[3] 盛戈皞，钱　勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3072-3084.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lin'gen, et al. Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084.

[4] 李庆民，于万水，赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3047-3060.
LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao. Key technologies for the safe operation of wind and solar power generation equipment in support of the "peak CO_2 emissions and carbon neutrality" policy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3047-3060.

[5] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[6] 董海鹰，贠韫韵，马志程，等. 计及多能转换及光热电站参与的综合能源系统低碳优化运行[J]. 电网技术，2020，44(10)：3689-3699.
DONG Haiying, YUN Yunyun, MA Zhicheng, et al. Low-carbon optimal operation of integrated energy system considering multi-energy conversion and concentrating solar power plant participation[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3689-3699.

[7] 任大伟，侯金鸣，肖晋宇，等. 能源电力清洁化转型中的储能关键技术探讨[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2751-2759.
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Exploration of key technologies for energy storage in the cleansing transformation of energy and power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2751-2759.

[8] 孙荣富，张　涛，和　青，等. 风电功率预测关键技术及应用综述[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1129-1143.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, HE Qing, et al. Review on key technologies and applications in wind power forecasting[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1129-1143.

[9] 袁铁江，曹继雷. 计及风电−负荷不确定性的风氢低碳能源系统容

量优化配置[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2037-2044.
YUAN Tiejiang, CAO Jilei. Capacity optimization allocation of wind hydrogen low-carbon energy system considering wind power-load uncertainty[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2037-2044.

[10] 崔　杨，邓贵波，曾　鹏，等. 计及碳捕集电厂低碳特性的含风电电力系统源-荷多时间尺度调度方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：5869-5886.
CUI Yang, DENG Guibo, ZENG Peng, et al. Multi-time scale source-load dispatch method of power system with wind power considering low-carbon characteristics of carbon capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5869-5886.

[11] 崔　杨，邓贵波，王　铮，等. 计及碳交易的光热电站与风电系统低碳经济调度策略[J]. 电力自动化设备，2021，41(9)：232-239.
CUI Yang, DENG Guibo, WANG Zheng, et al. Low-carbon economic scheduling strategy for power system with concentrated solar power plant and wind power considering carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 232-239.

[12] 卢炳文，魏震波，魏平桉，等. 考虑消纳风电的区域综合能源系统电转气与储能设备优化配置[J]. 智慧电力，2021，49(5)：7-14，68.
LU Bingwen, WEI Zhenbo, WEI Ping'an, et al. Optimal configuration of PTG and energy storage equipment in regional integrated energy system considering wind power consumption[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 7-14, 68.

[13] XU X T, LYU X. Research status and prospects of key technologies for comprehensive evaluation of regional integrated energy systems[J]. International Core Journal of Engineering, 2021, 7(7): 347-355.

[14] 李　健，李雪峰，张　娜，等. 计及储热备用效益的电热综合能源系统优化调度模型[J]. 电网技术，2021，45(10)：3851-3859.
LI Jian, LI Xuefeng, ZHANG Na, et al. Optimal dispatch model of electricity-heat integrated energy system considering reserved benefits of heat storage[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3851-3859.

[15] 陈锦鹏，胡志坚，陈嘉滨，等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3094-3104.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3094-3104.

[16] 康丽虹，贾燕冰，田　丰，等. 含 LNG 冷能利用的综合能源系统低碳经济调度[J]. 高电压技术，2022，48(2)：575-583.
KANG Lihong, JIA Yanbing, TIAN Feng, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system containing LNG cold energy utilization[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 575-583.

[17] 夏云睿，朱建全. 基于目标级联分析法的多区域电力系统分散优化调度[J]. 电工电气，2020(11)：10-15.
XIA Yunrui, ZHU Jianquan. Decentralized optimal dispatch of multi-area power systems based on analytical target cascading[J]. Electrotechnics Electric, 2020(11): 10-15.

[18] 魏震波，魏平桉，郭　毅，等. 考虑跨区能流交互计划的多区域电−气综合能源系统分散调度方法[J]. 电力建设，2020，41(12)：68-81.
WEI Zhenbo, WEI Ping'an, GUO Yi, et al. Distributed dispatch method for multi-region electricity-gas integrated energy systems considering cross-region energy flow interaction plan[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 68-81.

[19] 周　明，翟俊义，任建文，等. 含风电并网的直流互联电网分散协调调度方法[J]. 电网技术，2017，41(5)：1428-1434.
ZHOU Ming, ZHAI Junyi, REN Jianwen, et al. A decentralized coordinated dispatch approach for interconnected power grid with wind power via HVDC tie-line[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1428-1434.

[20] 郎一凡. 低碳环境下的电热联合系统源荷协同消纳弃风调度策略[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
LANG Yifan. A scheduling strategy for wind power consumption considering source-charge coordination of combined heat and power system in low-carbon environment[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2020.

[21] 魏震波，魏平桉，郭　毅，等. 考虑需求侧管理和碳交易的电−气互联网络分散式低碳经济调度[J]. 高电压技术，2021，47(1)：33-44.
WEI Zhenbo, WEI Ping'an, GUO Yi, et al. Decentralized low-carbon economic dispatch of electricity-gas network in consideration of demand-side management and carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 33-44.

[22] 孟冰冰. 具有电转气功能的多能源系统调度方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2019.
MENG Bingbing. Research on multi-energy system scheduling method with the conversion function of power to gas[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2019.



廖　扬
1998—，男，硕士
主要研究方向为电力系统优化调度
E-mail: 704922914@qq.com
LIAO Yang



胡林献(通信作者)
1966—，男，博士，教授
主要研究方向为电力系统经济调度、区域综合能源系统
E-mail: linxian_hu@163.com
HU Linxian
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-01-15　在线出版日期　2022-04-26　　编辑　程子丰

附录 A

表 A1　区域 A 火电机组参数

Table A1　Thermal power unit parameters of region A

机组号	电功率范围/MW	a3	a2	a1	爬/滑坡速率	碳排放系数
#A1-1	[100,200]	5.9653	0.2608	0.0008	40	1.15
#A1-2	[100,200]	3.0000	0.3200	0.0004	40	1.20
#A1-3	[100,200]	4.9369	0.2762	0.0011	40	0.60
#A1-4	[100,200]	2.3298	0.3101	0.0015	40	0.60
#A1-5	[100,200]	5.9653	0.2501	0.0090	40	1.12

表 A2　区域 A 热电机组参数

Table A2　Thermoelectric unit parameters of region A

机组号	电功率范围/MW	抽气速率范围/(t·h^{-1})	c1	c2	c3	c4	c5	c6	爬/滑坡速率	碳排放系数
#A2-1	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	3.235	0.4032	0.112	0.0006	0.000 21	0.000 31	20	1.2
#A2-2	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	2.987	0.4125	0.12	0.0014	0.000 22	0.000 35	20	0.64
#A2-3	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	3.136	0.3833	0.136	0.0007	0.000 15	0.000 25	20	1.12
#A2-4	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	3.212	0.4176	0.119	0.0007	0.000 17	0.000 27	20	1.2
#A2-5	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	3.164	0.421	0.125	0.0008	0.000 16	0.000 33	20	1.2
#A2-6	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	3.000	0.4195	0.123	0.0015	0.000 17	0.000 29	20	0.64

表 A3　区域 A 燃气-蒸汽联合循环机组参数

Table A3　Gas-steam combined cycle unit parameters of region A

机组号	蒸汽轮机电功率范围/MW	燃气轮机功率范围/MW	抽气速率范围/(t·h^{-1})	b1	b2	b3	f1	f2	f3	爬/滑坡速率
#A3-1	[18+0.09D,36-0.01D]	[28,60]	[9,60]	0.010 76	146.41133	3.322 35	1.23001	−25.435 21	0.0722	30
#A3-2	[18+0.09D,36-0.02D]	[28,61]	[9,61]	0.011 31	147.62122	3.239 98	1.22244	−24.960 14	0.0747	30
#A3-3	[18+0.09D,36-0.03D]	[28,62]	[9,62]	0.011 24	146.63244	3.119 00	1.23001	−25.435 21	0.0722	30
#A3-4	[18+0.09D,36-0.04D]	[28,63]	[9,63]	0.010 53	148.72807	3.284 48	1.23215	−26.463 64	0.0714	30

表 A4　区域 B 火电机组参数

Table A4　Thermal power unit parameters of region B

机组号	电功率范围/MW	a3	a2	a1	爬/滑坡速率	碳排放系数
#B1-1	[100,200]	10.9301	0.3172	0.0005	40	0.66
#B1-2	[100,200]	10.8578	0.2867	0.0015	40	0.6
#B1-3	[100,200]	10.6627	0.3101	0.0009	40	0.65
#B1-4	[100,200]	10.8578	0.2867	0.0014	40	0.98
#B1-5	[100,200]	10.6627	0.3101	0.001	40	0.98
#B1-6	[100,200]	10.6627	0.3101	0.0012	40	0.7
#B1-7	[100,200]	10.8578	0.2867	0.0015	40	0.98
#B1-8	[100,200]	10.6627	0.3101	0.0007	40	1.05
#B1-9	[100,200]	10.6627	0.3101	0.0006	40	0.68
#B1-10	[100,200]	10.8578	0.2867	0.0015	40	1.1
#B1-11	[100,200]	10.6627	0.3101	0.001	40	0.66

表 A5　区域 B 热电机组参数

Table A5　Thermoelectric unit parameters of region B

机组号	电功率范围/MW	抽气速率范围/(t·h^{-1})	c1	c2	c3	c4	c5	c6	爬/滑坡速率	碳排放系数
#B2-1	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	5.3962	0.3656	0.1999	0.0015	0.0003	0.0005	20	0.68
#B2-2	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	5.3155	0.3525	0.21	0.0011	0.0003	0.0006	20	0.98
#B2-3	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	5.2685	0.3583	0.2285	0.0006	0.0003	0.0004	20	1.2
#B2-4	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	5.0182	0.3788	0.2016	0.0005	0.0003	0.0004	20	1.05
#B2-5	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	5.3962	0.3656	0.1999	0.0015	0.0003	0.0005	20	0.68
#B2-6	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	5.0182	0.3788	0.2016	0.0007	0.0003	0.0004	20	1.15
#B2-7	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	5.2685	0.3583	0.2285	0.0006	0.0003	0.0004	20	1.12
#B2-8	[50+0.18D,100-0.05D]	[30,120]	5.3155	0.3525	0.21	0.0009	0.0003	0.0006	20	1.12

表 A6　区域 B 燃气蒸汽－联合循环参数

Table A6　Gas-steam combined cycle unit parameters of region B

机组号	蒸汽轮机电功率范围/MW	燃气轮机功率范围/MW	抽气速率范围/(t·h^{-1})	b1	b2	b3	f1	f2	f3	爬/滑坡速率
#B3-1	[18+0.09D,36-0.01D]	[28,60]	[9,60]	0.011 31	146.600 32	3.311 41	1.239 75	−25.73601	0.074 05	30
#B3-2	[18+0.09D,36-0.01D]	[28,60]	[9,60]	0.012 23	145.893 41	3.218 97	1.233 46	−26.4296	0.072 35	30

表 A7　电转气设备参数

Table A7　P2G parameters

区域	编号	容量/MW
区域 A	1	15
	2	20
区域 B	1	5
	2	10

表 A8　电锅炉设备参数

Table A8　Electric boiler parameters

区域	编号	容量/MW
区域 A	1	20
	2	20
区域 B	1	5
	2	10

表 A9　其他参数

Table A9　Other parameters

参数	取值	参数	取值
蒸汽焓降/(kJ·kg^{-1})	2327.53	燃煤机组碳排放配额系数/(t·MWh^{-1})	0.789
煤价/(元·t^{-1})	800	燃气机组碳排放配额系数/(t·MWh^{-1})	0.385
天然气价/(元·m^{-3})	3	燃气机组碳排放系数/(t·(10^{3}m^3)$^{-1}$)	1.25
系统弃风惩罚因数/(元·MWh^{-1})	684	火电机组热电比	0.8
主问题协调变量初值/MW	0	电锅炉电热转换效率	0.9
偏差项平方项系数初值	0.5	P2G 设备转换效率	0.6
偏差项系数初值	0.5	误差 ε	10^{-5}
γ	1.3	P2G 设备吸收 CO_2 效率 σ^{P2G} /(t·(10^{3}m^3)$^{-1}$))	1.9647

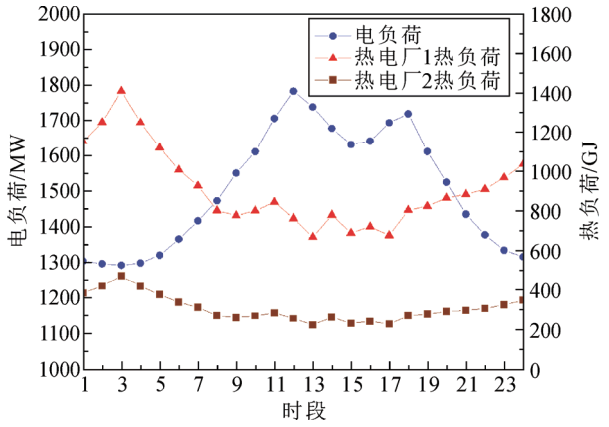


图 A1　区域 A 电负荷及热负荷

Fig.A1　Electric load and heat load of region A

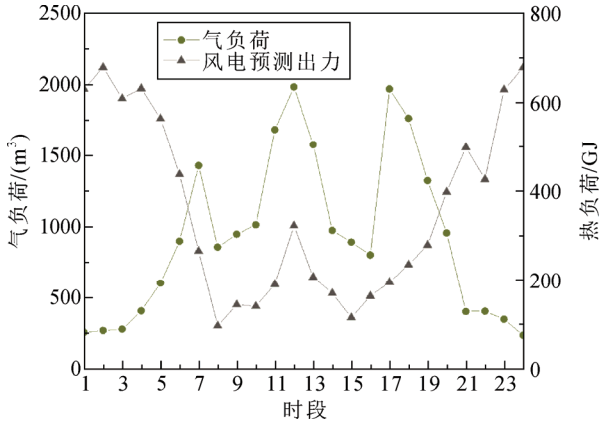


图 A2　区域 A 气负荷及风电预测出力

Fig.A2　Gas load and wind power forecast output of region A

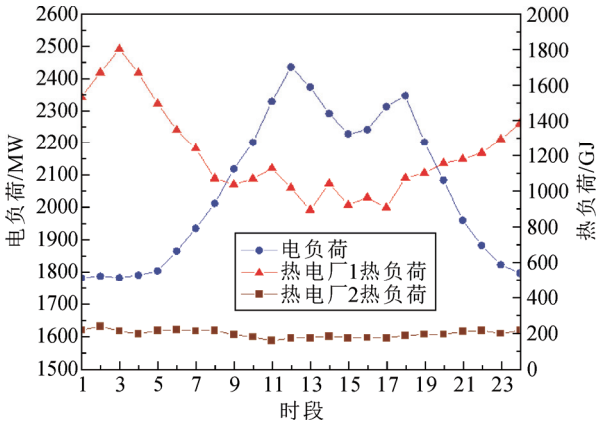


图 A3　区域 B 电负荷及热负荷

Fig.A3　Electric load and heat load of region B

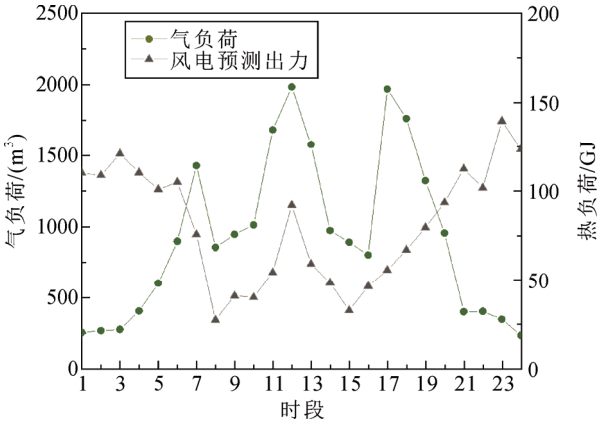


图 A4　区域 B 气负荷及风电预测出力

Fig.A4　Gas load and wind power forecast output of region B