

基于阶梯绿证与源荷双重响应的HIES优化调度模型

徐慧慧¹, 柴宜¹, 赵宇洋¹, 田云飞¹, 卢佳富², 梁宁²

(1. 国网甘肃经济技术研究院, 甘肃兰州 730050; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南昆明 650500)

摘要: 含氢综合能源系统(HIES)是未来能源体系的重要发展方向。为进一步提升HIES的低碳性及经济性, 建立基于阶梯绿证与源荷双重响应的HIES优化调度模型。首先, 借鉴阶梯碳交易机制(CTM)的作用机理, 引入补偿因子和惩罚因子设计阶梯绿证交易机制; 其次, 在传统需求响应的基础上建立源荷双重响应模型, 实现供需两侧灵活响应; 最后, 以总成本最小为优化目标建立HIES优化调度模型。案例分析表明, 所提模型在提高HIES运行经济性的同时可降低碳排放。

关键词: 阶梯绿证交易机制; 源荷双重响应; HIES; 优化调度; CCS-P2G

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 2096-4145(2024)08-0057-07

Optimal Scheduling Model of Hydrogen-containing Integrated Energy System Based on Step Green Card & Source-load Dual Response

XU Huihui¹, CHAI Yi¹, ZHAO Yuyang¹, TIAN Yunfei¹, LU Jiafu², LIANG Ning²

(1. State Grid Gansu Electric Power Economic & Technology Research Institute, Lanzhou 730050, China; 2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Hydrogen-containing integrated energy system (HIES) is an important development direction of future energy system. In order to further improve the low carbon and economy of HIES, an optimal scheduling model of HIES based on step green card and source-load dual response is established. Firstly, based on the mechanism of the tiered carbon trading mechanism (CTM), the compensation factor and the penalty factor are introduced to design the tiered green certificate trading mechanism. Secondly, based on the traditional demand response, a source-load dual response model is established to achieve flexible response on both supply and demand sides. Finally, the HIES optimal scheduling model is established with the minimum total cost as the optimization objective. The case analysis shows that the proposed model can reduce carbon emissions while improving the economy of HIES operation.

Key words: stepped green certificate trading mechanism; source-load dual response; HIES; optimal scheduling; CCS-P2G

0 引言

面对化石燃料燃烧引发的碳排放超标和全球变暖问题, 人类社会亟需提高清洁能源的利用率, 以进行能源转型^[1-3]。为了促进绿色低碳经济的可持续发展, 依托可再生能源发电、热电联产(Combined Heat and Power, CHP)、电转气(Power to Gas, P2G)及储能等关键技术, 构建通过能源转换装

置实现多能互补的含氢综合能源系统(Hydrogen Integrated Energy System, HIES)将成为能源领域减碳增效的关键^[4-7]。

为进一步降低碳排放, 我国建立碳排放交易体系。HIES可通过碳交易机制(Carbon Trading Mechanism, CTM)开展碳排放权交易^[8-10]。在绿证交易(Green Certificate Trading, GCT)市场中HIES通过生产和使用绿色电力来获取绿色证书, 在达成政府规定的指标后可将多余的绿证出售, 从而获得额外经济回报。文献[11-12]构建综合考虑GCT与能源市场平衡的优化调度模型, 并通过案例分析验证该模型能有效提升新能源利用率。文献[13]构建计及绿证交易与碳交易交互机制的综合能源系统优化调度模型, 可减少碳排放及降低系统运行成本。文

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52167010); 国家电网有限公司科技项目(W24FZ2730049, 52273023010C)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52167010); State Grid Corporation Science and Technology Project (W24FZ2730049, 52273023010C)

献[11-13]仅考虑传统固定绿证价格的 GCT,对于绿证的具体交易收益研究不足。

碳捕集系统 (Carbon Capture System, CCS) 与 P2G 技术有助于解决新能源间歇性问题,同时促进碳循环利用和减少温室气体排放^[14-17]。文献[18]构建计及源荷不确定性的 CCS-P2G 优化调度模型,可改善多能系统的经济性和低碳性。文献[19]建立一种风-碳捕集-电转气联合的新型中长期调度模型,有针对性地实施节能减排措施。文献[18-19]研究了 CCS-P2G 技术的节能降碳机理,但未进一步探讨绿证交易、碳交易与 CCS-P2G 技术协同作用对 HIES 运行的影响。

目前,众多研究聚焦于考虑需求响应 (Demand Response, DR) 前后 HIES 灵活性的提升^[20-21]。对于负荷侧,文献[22-23]通过整合负荷侧需求响应增强了 HIES 接纳风电的能力。文献[24-25]考虑负荷的灵活性特性建立综合需求响应模型,构建适用于 HIES 的低碳经济优化调度模型。文献[22-25]虽考虑了负荷的转移特性,但未进一步探讨多元负荷间的灵活替代对 HIES 优化运行的影响。对于供应侧,文献[26]基于现有需求响应研究,建立供应侧灵活响应模型,改善 HIES 在高度灵活性机制下的低碳经济优化调度。文献[27-28]深入研究氢能融入综合能源系统的途径,通过构建考虑氢效应的气流稳态与动态模型,评估氢能对系统优化运行的影响。文献[26-28]研究氢能作为清洁能源在多能系统中减少碳排放的作用,但对于氢能在供应侧灵活响应中所发挥作用的研究仍有待深入。

综上所述,本文为进一步提升 HIES 的低碳性及经济性,建立基于阶梯绿证与源荷双重响应的 HIES 优化调度模型。研究的创新之处如下:(1)在传统绿证交易的基础上,将绿证交易分为多个子区间,并引入补偿因子与惩罚因子建立阶梯绿证交易,进一步提高绿证交易收益及绿证交易积极性;(2)考虑 P2G 与 CCS 的协同作用、氢燃料电池与燃气轮机联合的热电联产运行模式以及源荷双重响应策略对 HIES 实现低碳经济优化调度的综合影响,实现 HIES 优化运行。

1 计及阶梯绿证与源荷双重响应的 HIES 框架及优化调度模型

1.1 HIES 框架

本文构建的 HIES 框架如图 1 所示。

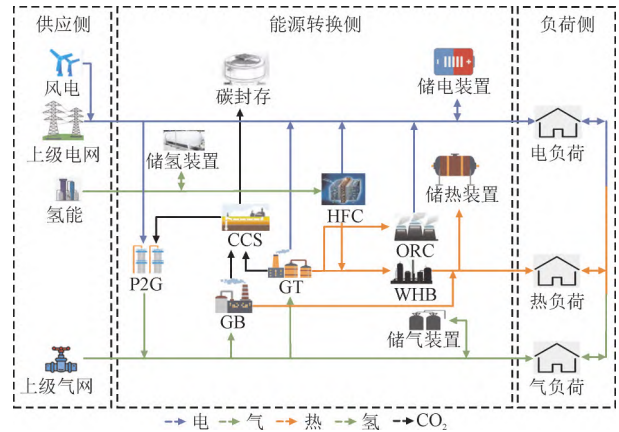


图 1 HIES 框架
Fig.1 HIES framework

由图 1 可知,供应侧主要设备包括风电、上级电网、氢能、上级气网;能源转换侧设备包含 P2G, CCS、燃气锅炉 (Gas Boiler, GB)、燃气轮机 (Gas Turbine, GT)、氢燃料电池 (Hydrogen Fuel Cell, HFC)、有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle, ORC)、余热锅炉 (Waste Heat Boiler, WHB) 以及电、热、气、氢储能装置;负荷侧包含多元负荷 (电、热、气负荷)。其中 P2G 消纳风电并结合 CCS 捕集的 CO₂ 转换为天然气存储,可在需要时供应给 HIES 内的耗气设备。在能源转换侧通过 HFC 和 GT 向 ORC 输送热能进行热电转换,提高热电供应灵活性;在负荷侧通过多元负荷的横向、纵向 DR 能力,实现负荷侧灵活响应。

1.2 CCS 与 P2G 模型

1) CCS 模型。CCS 包括碳捕集与碳封存 2 个步骤。捕获的 CO₂ 一部分经由管道输入 P2G 实现循环利用,剩余部分借助 CO₂ 压缩技术实施长期封存。CCS 模型为:

$$\begin{cases} P_{CCS,t}^{tot,pc} = P_{CCS,t}^{ope} + P_{CCS,t}^{fix} \\ P_{CCS,t}^{ope} = \delta_{unit}^{gat,CO_2} Q_t^{gat,CO_2} \\ Q_t^{gat,CO_2} = \mu_{CCS}^{gat,CO_2} a_{unit}^{tra,EU} P_t^{tra,EU} \\ P_{CCS,min}^{tot,pc} \leq P_{CCS,t}^{tot,pc} \leq P_{CCS,max}^{tot,pc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{CCS,t}^{tot,pc}$ 为 t 时刻 CCS 的总耗电功率; $P_{CCS,t}^{ope}$, $P_{CCS,t}^{fix}$ 分别为 t 时刻 CCS 的运行功率和固定功率; δ_{unit}^{gat,CO_2} 为捕集单位 CO₂ 消耗的电功率转换系数,本文取 0.296 kg/kW; μ_{CCS}^{gat,CO_2} 为 CCS 的捕集 CO₂ 的效率,本文取 55%; $a_{unit}^{tra,EU}$ 为传统能源机组的单位碳排因子; $P_t^{tra,EU}$ 为 t 时刻传统能源机组的产电功率; Q_t^{gat,CO_2} 为 t 时刻捕集的 CO₂ 量; $P_{CCS,max}^{tot,pc}$, $P_{CCS,min}^{tot,pc}$ 分别为 CCS 总耗电功率上、下限。

2) P2G 模型。P2G 包括电解水制氢和甲烷化 2 个过程,在甲烷化过程 P2G 生产天然气的体积和消耗 CO₂ 的体积相等。P2G 模型为:

$$\begin{cases} P_{P2G,t}^{pro,gas} = \mu_{P2G}^{pro,gas} P_{P2G,t}^{con,ele} \\ V_{P2G,t}^{abs,CO_2} = V_{P2G,t}^{gen,CH_4} = 3.6P_{P2G,t}^{pro,gas} / H_{CH_4} \\ Q_{P2G,t}^{con,CO_2} = \rho_{CO_2} V_{P2G,t}^{abs,CO_2} \\ P_{P2G,min}^{con,ele} \leq P_{P2G,t}^{con,ele} \leq P_{P2G,max}^{con,ele} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{P2G,t}^{pro,gas}$, $P_{P2G,t}^{con,ele}$ 分别为 P2G 在 t 时刻的产气功率和耗电功率; $\mu_{P2G}^{pro,gas}$ 为 P2G 产气效率,本文取 85%; $V_{P2G,t}^{abs,CO_2}$, $V_{P2G,t}^{gen,CH_4}$ 分别为 t 时刻 P2G 吸收 CO₂ 和生成天然气的体积; H_{CH_4} 为天然气低热值; $Q_{P2G,t}^{con,CO_2}$ 为 t 时刻 P2G 消耗的 CO₂ 量; ρ_{CO_2} 为 CO₂ 密度; $P_{P2G,max}^{con,ele}$, $P_{P2G,min}^{con,ele}$ 分别为 P2G 耗电功率上、下限。

1.3 阶梯碳交易机制

为进一步限制碳排放,本文采用阶梯碳交易机制。阶梯碳交易机制划分多个购买区间,随着需要购买的碳配额越多,相应区间购价越高。碳交易中阶梯碳交易成本 f_{CTM}^{stai} 为:

$$E_{tra} = Q_{CO_2}^{real} - E_{free} - \sum_{t=1}^T Q_{P2G,t}^{con,CO_2} - \sum_{t=1}^T Q_t^{gal,CO_2} \quad (3)$$

$$f_{CTM}^{stai} = \begin{cases} \lambda_{CTM} E_{tra}, E_{tra} \leq L_{CTM} \\ \lambda_{CTM}(1 + \tau)(E_{tra} - L_{CTM}) + \lambda_{CTM} L_{CTM}, L_{CTM} \leq E_{tra} \leq 2L_{CTM} \\ \lambda_{CTM}(1 + 2\tau)(E_{tra} - 2L_{CTM}) + \lambda_{CTM}(2 + \tau)L_{CTM}, 2L_{CTM} \leq E_{tra} \leq 3L_{CTM} \\ \lambda_{CTM}(1 + 3\tau)(E_{tra} - 3L_{CTM}) + \lambda_{CTM}(3 + 3\tau)L_{CTM}, 3L_{CTM} \leq E_{tra} \leq 4L_{CTM} \\ \lambda_{CTM}(1 + 4\tau)(E_{tra} - 4L_{CTM}) + \lambda_{CTM}(4 + 6\tau)L_{CTM}, E_{tra} \geq 4L_{CTM} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_{tra} 为参与交易的碳配额; $Q_{CO_2}^{real}$ 为实际排放的 CO₂ 量; E_{free} 为系统免费碳配额; T 为调度周期; λ_{CTM} 为碳交易市场基准交易价格; L_{CTM} 为碳交易区间长度; τ 为配额超标后价格增率。

1.4 阶梯绿证交易机制

为进一步提高绿证交易收益及积极性,本文提出阶梯绿证交易机制。该交易机制遵循阶梯碳交易的激励原则,将企业获得的监管核发的绿证和市场交易的绿证纳入交易体系。引入补偿因子和惩罚因子,将绿证交易机制划分为若干个子区间。企业在绿证交易中出售的证书越多,其绿证的售价越高;同时,购买绿证的需求增加也会导致价格上涨。绿证交易中阶梯绿证交易成本 f_{GCT}^{stai} 为:

$$f_{GCT}^{stai} = \begin{cases} \lambda_{GCT}(1 + 2\kappa)(N_{GCT}^{tra,stai} + L_{GCT}) - \lambda_{GCT}(2 + \kappa)L_{GCT}, -2L_{GCT} \geq N_{GCT}^{tra,stai} \\ \lambda_{GCT}(1 + \kappa)(N_{GCT}^{tra,stai} + L_{GCT}) - \lambda_{GCT}L_{GCT}, -2L_{GCT} \leq N_{GCT}^{tra,stai} \leq -L_{GCT} \\ \lambda_{GCT}N_{GCT}^{tra,stai}, -L_{GCT} \leq N_{GCT}^{tra,stai} \leq 0 \\ \lambda_{GCT}N_{GCT}^{tra,stai}, 0 \leq N_{GCT}^{tra,stai} \leq L_{GCT} \\ \lambda_{GCT}(1 + \alpha)(N_{GCT}^{tra,stai} - L_{GCT}) + \lambda_{GCT}L_{GCT}, L_{GCT} \leq N_{GCT}^{tra,stai} \leq 2L_{GCT} \\ \lambda_{GCT}(1 + 2\alpha)(N_{GCT}^{tra,stai} - 2L_{GCT}) + \lambda_{GCT}(2 + \alpha)L_{GCT}, 2L_{GCT} \leq N_{GCT}^{tra,stai} \end{cases} \quad (5)$$

$$N_{GCT}^{tra,stai} = N_{obt} - N_{nec} \quad (6)$$

式中: λ_{GCT} 为绿证基础交易价格; L_{GCT} 为阶梯绿证交易区间长度; α , κ 为超出或不足政府配额指标时的补偿因子和惩罚因子; $N_{GCT}^{tra,stai}$ 为参与到阶梯绿证交易的绿证数量; N_{nec} 为满足指标所需绿证数量; N_{obt} 为企业获得的绿证数量。

1.5 源荷两侧灵活性响应

1.5.1 源侧灵活响应特性

HFC, GT 燃烧燃料发电时产生大量余热, WHB 可收集余热产热,为此 HFC, GT, WHB 组合可实现热电联产,以提高能源利用率。然而当前“以电定热”的运行模式制约了 HFC 和 GT 在热电输出上的调节能力,通过引入 ORC 来回收并利用废弃热能进行发电,可以增强供能侧热输出的灵活性。HFC 联合 WHB 和 ORC 运行模型为:

$$\begin{cases} P_{HFC,t}^{pro,ele} = \mu_{HFC}^{pro,ele} P_{HFC,t}^{con,H_2} \\ P_{HFC-WHB,t}^{pro,hot} + P_{HFC-ORC,t}^{pro,hot} = \mu_{HFC}^{pro,hot} P_{HFC,t}^{con,H_2} \\ P_{HFC,min}^{con,H_2} \leq P_{HFC,t}^{con,H_2} \leq P_{HFC,max}^{con,H_2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{HFC,t}^{pro,ele}$, $P_{HFC-WHB,t}^{pro,hot}$, $P_{HFC-ORC,t}^{pro,hot}$ 分别为 t 时刻 HFC 产电功率、HFC 提供给 WHB 和 ORC 的产热功率; $\mu_{HFC}^{pro,hot}$, $\mu_{HFC}^{pro,ele}$ 分别为 HFC 的产热、产电效率; $P_{HFC,t}^{con,H_2}$ 为 t 时刻 HFC 消耗氢气的功率; $P_{HFC,max}^{con,H_2}$, $P_{HFC,min}^{con,H_2}$ 分别为 HFC 消耗氢气功率的上、下限。

GT 联合 WHB 和 ORC 运行模型为:

$$\begin{cases} P_{GT,t}^{pro,ele} = \mu_{GT}^{pro,ele} P_{GT,t}^{con,CH_4} \\ P_{GT-WHB,t}^{pro,hot} + P_{GT-ORC,t}^{pro,hot} = \mu_{GT}^{pro,hot} P_{GT,t}^{con,CH_4} \\ P_{GT,min}^{con,CH_4} \leq P_{GT,t}^{con,CH_4} \leq P_{GT,max}^{con,CH_4} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{GT,t}^{pro,ele}$, $P_{GT-WHB,t}^{pro,hot}$, $P_{GT-ORC,t}^{pro,hot}$ 分别为 t 时刻 GT 产电功率、GT 提供给 WHB 和 ORC 的产热功率; $P_{GT,t}^{con,CH_4}$ 为 t 时刻 GT 消耗天然气的功率; $\mu_{GT}^{pro,hot}$, $\mu_{GT}^{pro,ele}$ 分别为 GT 的产热、产电效率; $P_{GT,max}^{con,CH_4}$, $P_{GT,min}^{con,CH_4}$

分别为 GT 消耗天然气功率的上、下限。

HFC 和 GT 产生电能以满足电负荷需求,而产生的余热被双重利用:一部分直接供给 WHB 以满足热负荷,另一部分则输送到 ORC 进行余热回收发电,进一步增加电能供应。由 HFC,GT,WHB,ORC 组合成的综合供能系统提升了热电供应的灵活性。综合供能系统运行模型为:

$$\begin{cases} P_{WHB,t}^{in,hot} = P_{GT-WHB,t}^{pro,hot} + P_{HFC-WHB,t}^{pro,hot} \\ P_{ORC,t}^{in,hot} = P_{GT-ORC,t}^{pro,hot} + P_{HFC-ORC,t}^{pro,hot} \\ P_{WHB,t}^{out,hot} = \mu_{WHB}^{conv} P_{WHB,t}^{in,hot} \\ P_{ORC,t}^{out,ele} = \mu_{ORC}^{conv} P_{ORC,t}^{in,hot} \\ P_{WHB,min}^{in,hot} \leq P_{WHB,t}^{in,hot} \leq P_{WHB,max}^{in,hot} \\ P_{ORC,min}^{in,hot} \leq P_{ORC,t}^{in,hot} \leq P_{ORC,max}^{in,hot} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{CHP,t}^{out,ele} = P_{HFC,t}^{pro,ele} + P_{GT,t}^{pro,ele} + P_{ORC,t}^{out,ele} \\ P_{CHP,t}^{out,hot} = P_{WHB,t}^{out,hot} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{WHB,t}^{in,hot}$ 为 t 时刻 WHB 的输入热功率; $P_{ORC,t}^{in,hot}$ 为 t 时刻 ORC 的输入热功率; $P_{WHB,t}^{out,hot}$ 为 t 时刻 WHB 的输出热功率; $P_{ORC,t}^{out,ele}$ 为 t 时刻 ORC 的输出电功率; $P_{WHB,max}^{in,hot}$, $P_{WHB,min}^{in,hot}$ 分别为输入到 WHB 热功率的上、下限; $P_{ORC,max}^{in,hot}$, $P_{ORC,min}^{in,hot}$ 分别为输入到 ORC 热功率的上、下限; μ_{WHB}^{conv} , μ_{ORC}^{conv} 分别为 WHB 和 ORC 转化效率; $P_{CHP,t}^{out,ele}$, $P_{CHP,t}^{out,hot}$ 分别为 t 时刻 CHP 输出的电、热功率。

1.5.2 荷侧灵活响应特性

多元负荷在峰谷时刻间横向转移,称为横向 DR;在任一时刻内相互替代,称为纵向 DR。基于此,多元负荷被分为固定负荷、可转移负荷及可替代负荷。多元负荷横向、纵向 DR 模型为:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{cro,DR} = P_{i,t,0}^{cro,DR} + P_{i,t,par}^{cro,DR} \\ P_{i,t}^{len,DR} = P_{i,t,0}^{len,DR} + P_{i,t,par}^{len,DR} \\ P_{i,t,par}^{cro,DR} = \varphi_{P_{i,t}}^{cro,DR,in} P_{i,t}^{cro,DR,in}(\ell) - \varphi_{P_{i,t}}^{cro,DR,out} P_{i,t}^{cro,DR,out} \\ P_{i,t,par}^{len,DR} = \varphi_{P_{i,t}}^{len,DR,in} P_{i,t}^{len,DR,in}(\ell) - \varphi_{P_{i,t}}^{len,DR,out} P_{i,t}^{len,DR,out} \\ \sum_{t=1}^T P_{i,t,par}^{cro,DR} = 0, \\ \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^T P_{i,t,par}^{len,DR} = 0 \\ -\theta_{P_i}^{cro,DR} P_{i,t}^{cro,DR} \leq P_{i,t,par}^{cro,DR} \leq \theta_{P_i}^{cro,DR} P_{i,t}^{cro,DR} \\ -\theta_{P_i}^{len,DR} P_{i,t}^{len,DR} \leq P_{i,t,par}^{len,DR} \leq \theta_{P_i}^{len,DR} P_{i,t}^{len,DR} \\ P_{i,t} = P_{i,t}^{fix,0} + P_{i,t}^{cro,DR} + P_{i,t}^{len,DR} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{i,t}^{cro,DR}$, $P_{i,t,par}^{cro,DR}$ 分别为 t 时刻第 i 种负荷横向

DR 后负荷量与参与横向 DR 的负荷量; $P_{i,t,0}^{cro,DR}$, $P_{i,t,0}^{len,DR}$ 分别为 t 时刻第 i 种负荷横向 DR 与纵向 DR 初始量; $P_{i,t}^{len,DR}$, $P_{i,t,par}^{len,DR}$ 分别为 t 时刻第 i 种负荷纵向 DR 后负荷量与参与纵向 DR 的负荷量; $P_{i,t}^{cro,DR,in}$, $P_{i,t}^{cro,DR,out}$ 分别为 t 时刻第 i 种负荷横向 DR 输入和输出负荷量; $P_{i,t}^{len,DR,in}$, $P_{i,t}^{len,DR,out}$ 分别为 t 时刻第 i 种负荷纵向 DR 输入和输出负荷量; $\varphi_{P_{i,t}}^{cro,DR,in}$, $\varphi_{P_{i,t}}^{cro,DR,out}$ 分别为 t 时刻第 i 种负荷横向 DR 输入和输出的 0-1 变量; $\varphi_{P_{i,t}}^{len,DR,in}$, $\varphi_{P_{i,t}}^{len,DR,out}$ 分别为 t 时刻第 i 种负荷纵向 DR 输入和输出的 0-1 变量; $\theta_{P_i}^{cro,DR}$, $\theta_{P_i}^{len,DR}$ 分别为第 i 种负荷参与横向 DR 与纵向 DR 的最大负荷占比; $P_{i,t}^0$ 为 t 时刻第 i 种负荷初始值; $P_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 种负荷 DR 后负荷量; $P_{i,t}^{fix,0}$ 为第 i 种负荷在 t 时刻的固定负荷量。

1.6 HIES 优化调度模型

1.6.1 目标函数

以 HIES 购能成本 f_{buy} 、碳交易成本、绿证交易成本、需求响应成本 f_{DR} 及弃风成本 f_{cw} 之和 F 最小为优化目标进行优化调度。HIES 优化调度模型为:

$$F = \min(f_{buy} + f_{CTM}^{stai} + f_{GCT}^{stai} + f_{cw} + f_{DR}) \quad (13)$$

其中,碳交易成本、绿证交易成本见式(4)~(5), f_{buy} , f_{DR} , f_{cw} 分别为:

$$f_{buy} = \sum_{t=1}^T \lambda_{EC,buy}^{unit} P_{buy,t}^{ele} + \sum_{t=1}^T \lambda_{GC,buy}^{unit} P_{buy,t}^{gas} + \sum_{t=1}^T \lambda_{H_2,buy}^{unit} P_{buy,t}^{H_2} \quad (14)$$

$$f_{DR} = \sum_{t=1}^T \lambda_{com,P_i,unit}^{cro,DR} P_{i,t,par}^{cro,DR} + \sum_{t=1}^T \lambda_{com,P_i,unit}^{len,DR} P_{i,t,par}^{len,DR} \quad (15)$$

$$f_{cw} = \lambda_{cw}^{pun} \sum_{t=1}^T P_{cw,t} \quad (16)$$

式中: $\lambda_{EC,buy}^{unit}$ 为从电网购电单位价格; $\lambda_{GC,buy}^{unit}$ 为从气网购气单位价格; $\lambda_{H_2,buy}^{unit}$ 为购氢单位价格; $P_{buy,t}^{ele}$ 为 t 时刻系统的购电功率; $P_{buy,t}^{gas}$ 为 t 时刻系统的购气功率; $P_{buy,t}^{H_2}$ 为 t 时刻系统的购氢功率; $\lambda_{com,P_i,unit}^{cro,DR}$, $\lambda_{com,P_i,unit}^{len,DR}$ 分别为第 i 种负荷参与横向 DR 与纵向 DR 单位补偿价格; λ_{cw}^{pun} 为弃风惩罚价格; $P_{cw,t}$ 为 t 时刻弃风功率。

1.6.2 约束条件

HIES 优化调度模型的约束条件包含储能系统出力约束与 GB 运行约束以及系统供需能量平衡约束。该约束模型已被大量文献研究,本文在此不再赘述,具体模型可参考文献[9]及文献[16]。

2 案例分析

本文以某地区为例,设置 T 为 24 h,采用 MATLAB+YALMIP 调用 CPLEX 商业求解器进行求解,验证本文所提基于阶梯绿证与源荷双重响应的 HIES 优化调度模型的有效性。其中各设备容量及储能系统相关参数参考文献[9],初始负荷及风电出力参考文献[16],不同时段分时电价如表 1, λ_{CTM} 为 0.35 元/kg, L_{CTM} 为 2 t, τ 为 0.25, λ_{cw}^{pun} 为 0.1 元/kWh, λ_{GCT} 为 50 元/本, α 和 κ 均为 0.1, $\theta_{P_i}^{cro,DR}$ 和 $\theta_{P_i}^{len,DR}$ 分别为 10% 和 5%。

表 1 不同时段分时电价

Table 1 Time-of-use electricity price in different periods

时段	分时电价/[元·(kWh ⁻¹)]
01:00—07:00, 23:00—24:00	0.38
08:00—11:00, 15:00—18:00	0.68
12:00—14:00, 19:00—22:00	1.20

2.1 不同场景优化结果对比分析

为验证本文所提模型有效性,设置 4 种场景进行对比分析:(1)传统绿证交易、碳交易机制下,目标函数不考虑负荷侧灵活响应的优化调度;(2)传统绿证交易、碳交易机制下,目标函数在场景 1 的基础上考虑负荷侧灵活响应的优化调度;(3)阶梯绿证交易、碳交易机制下,不采用本文供应侧灵活响应模型,同时优化目标不考虑负荷侧需求响应成本的优化调度;(4)阶梯绿证交易、碳交易机制下,采用本文所提优化目标考虑购能成本、碳交易成本、绿证交易成本、需求响应补偿成本、弃风成本的优化调度。不同场景优化结果如表 2 所示。

表 2 不同场景优化结果

Table 2 Different scene optimization results

场景	碳交易成本/元	绿证交易收益/元	碳排放量/kg	总成本/元
1	1 061.5	598.7	34 103.7	14 389.5
2	1 040.6	590.7	33 251.6	12 992.8
3	881.9	643.4	33 674.2	14 385.6
4	716.4	643.4	32 868.7	12 684.0

由表 2 可知,对比场景 1 和场景 2,场景 1 未考虑需求侧灵活需求响应,无法通过灵活的负荷转移、替代,使系统运行综合成本下降;场景 2 中考虑 HIES 多能耦合带来的多元负荷灵活响应,降低了系统的运行成本。对比场景 2 与场景 4,场景 2 成本较场景 4 成本高出 308.8 元,这是由于场景 4 较场景 2 考虑阶梯绿证交易机制,提高了绿证交易的收

益;场景 2 的碳排放量亦较场景 4 高 328.9 kg,原因是场景 4 考虑阶梯碳交易与 CCS-P2G 的协同作用,对系统碳排放起到更好的约束作用。对比场景 3 和场景 4,场景 3 在碳交易成本、碳排放量、总成本方面均较场景 4 高,原因在于场景 4 较场景 3 的优化目标中考虑了源荷双重灵活需求响应,在降低系统碳排放量、购电成本以及天然气成本的同时提高了 HIES 在夜间消纳风电的能力。分析表明,本文所提模型在进一步降低 HIES 系统碳排放及运行成本的同时,可提高新能源的利用率,实现 HIES 低碳经济优化运行。

2.2 考虑阶梯绿证与源荷双重响应的 HIES 运行特性分析

HIES 在考虑阶梯绿证与横向、纵向 DR 后的电负荷供需平衡关系如图 2 所示。

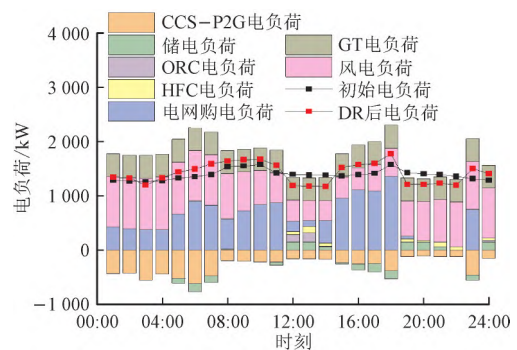


图 2 电负荷供需平衡关系

Fig.2 Electric load supply and demand balance relationship

由图 2 可知,12:00—14:00 和 19:00—22:00 处于电网电价峰时段,电价较高,在确保 HIES 系统正常运作的前提下实施 DR 策略,减少 CCS-P2G 的能量梯级损耗。00:00—07:00 处于电网电价谷时段,电价较低且风力负荷充沛,实行 DR 后该时段用电需求上升,CCS-P2G 电负荷增加,此时可提升天然气产量及风电消纳,以降低系统运行成本。分析表明,HIES 通过价格引导型与替代型需求响应手段,在改善运营成本的同时,使负荷曲线趋于平滑,缓解了因峰谷负荷差异过大给电网带来的压力。

热负荷供需平衡关系如图 3 所示。由图 3 可知,DR 后热负荷主要由 GB 及 GT 热负荷供给。同时由图 2 的 DR 后电负荷曲线可知,12:00—13:00、19:00—22:00 时段 HIES 电负荷较小,而 GT 运行在“以电定热”模式下,为此图 3 中 GT 热负荷较小,此时 HIES 系统可通过储热负荷及 HFC 运行产热平衡热负荷需求。15:00—18:00 时段热负荷较小,储热装置开始储热以待备用。

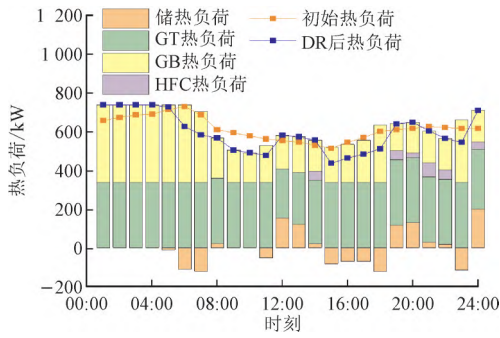


图3 热负荷供需平衡关系
Fig.3 Heat load supply and demand balance relationship

2.3 多元负荷灵活需求响应优化结果分析

本文所提模型多元负荷灵活需求响应优化结果如图4所示。其中,气负荷由天然气功率转化而来,为便于理解和使用,单位统一为 kW。

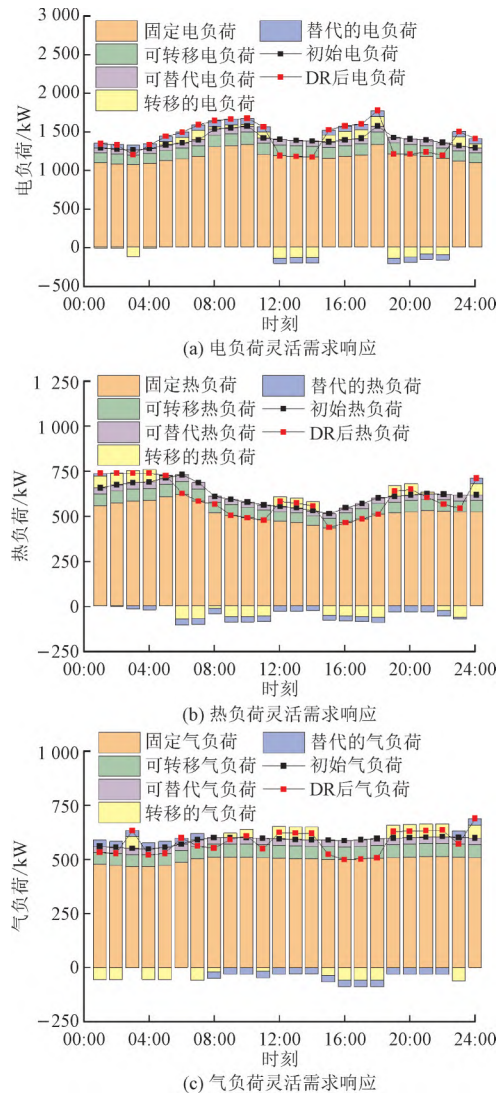


图4 多元负荷灵活需求响应优化结果
Fig.4 Multi-load flexible demand response optimization results

由图4(a)可知,考虑电负荷横向、纵向 DR 后, HIES 日间部分高峰电负荷被调整至夜间,同时替代夜间部分热、气负荷,减少 P2G 转化天然气的梯级能量损失,提高系统风电利用率。由图4(b)可知,夜间热负荷较大,伴随着较高的碳排放,考虑热负荷横向、纵向 DR 及碳排放成本控制后,部分夜间热负荷被转至白天,同时日间部分热负荷被气负荷替代。由图4(c)可知,考虑气负荷横向、纵向 DR 后,日间用电需求较大,夜间部分气负荷被转移至白天,同时日间部分热、气负荷被电负荷替代,缓解耗天然气设备高碳排的同时进一步提升风电利用率。分析表明, HIES 在考虑横向、纵向 DR 后,进一步增强了 HIES 的低碳经济效益。

2.4 阶梯绿证的未来场景分析

本文对 L_{GCT} 发生变化时的场景进行仿真分析,验证在绿证市场交易信息发生变化时阶梯绿证交易机制的适应能力。阶梯绿证未来场景分析如图5所示。

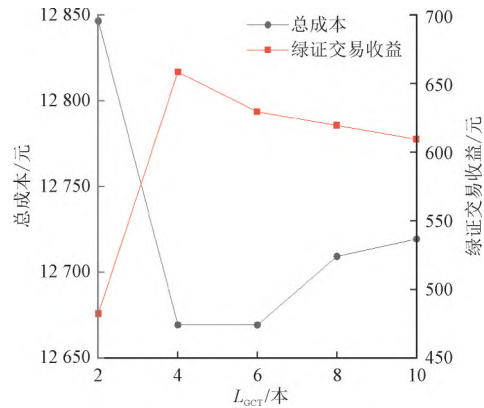


图5 阶梯绿证未来场景分析
Fig.5 Ladder green certificate future scene analysis

由图5可知,当 L_{GCT} 等于4本时总成本最低,绿证交易收益最高;当 L_{GCT} 大于6本时,总成本逐渐开始有所升高,绿证交易收益逐渐降低。分析表明,选取适合的 L_{GCT} 有助于提升系统经济性及绿证交易收益。

3 结论

为进一步提升 HIES 的低碳性及经济性,本文建立基于阶梯绿证与源荷双重响应的 HIES 优化调度模型,对阶梯绿证交易机制及源荷双重响应的低碳经济潜力进行研究,结论如下:

1)传统绿证交易机制对促进绿电的利用有限,采用本文所提阶梯绿证交易策略能在取得良好经济性的同时兼顾节能减排效果,推动绿证交易的发

展。在阶梯绿证的未来场景分析中,得出最佳绿证阶梯长度,进一步提升 HIES 经济性及绿证交易收益。

2)通过 CCS 与 P2G 的耦合运行,实现了 HIES 系统内部碳循环,通过绿证交易市场、碳交易市场与 CCS-P2G 协同作用,进一步提升了 HIES 运行的低碳性和经济性。

3)实施源荷两侧的灵活性响应策略后,HIES 在供应侧能够依据实时需求灵活调整热电输出,特别是在 HFC 的协同运作下,进一步增强了 HIES 的低碳经济效益。在负荷侧通过对多元负荷灵活管理,减少碳排放的同时降低系统运行总成本,促进了 HIES 的低碳经济优化运行。

参考文献

- [1] 童光毅.基于双碳目标的智慧能源体系构建[J].智慧电力,2021,49(5):1-6.
TONG Guangyi.Construction of smart energy system based on dual carbon target[J].Smart Power,2021,49(5):1-6.
- [2] 何玉朝,郭枫,钱辉敏,等.微电网源网荷储分布鲁棒优化调度方法研究[J].电子设计工程,2023,31(17):123-127.
HE Yuchao, GUO Feng, QIAN Huimin, et al. Research on robust optimal scheduling method for microgrid source-grid-load-storage distribution[J].Electronic Design Engineering, 2023, 31(17): 123-127.
- [3] 郑云平,亚夏尔·吐尔洪.基于VSG技术的风—光—储系统自适应调频控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):12-19.
ZHENG Yunping, YASHAR Turhong.Research on adaptive frequency modulation control strategy of wind-PV-storage system based on VSG technology[J].High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 12-19.
- [4] 高玉,王琦,陈严,等.考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(4):51-59.
GAO Yu, WANG Qi, CHEN Yan, et al.Optimal dispatch of integrated energy system with hydrogen considering demand response and cascade energy utilization[J].Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 51-59.
- [5] 周任军,吴燕榕,潘轩,等.考虑电热需求响应的区域综合能源系统储能容量优化配置[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):11-17.
ZHOU Renjun, WU Yanrong, PAN Xuan, et al. Optimal configuration of energy storage capacity of regional integrated energy system considering electrothermal demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 11-17.
- [6] 范宏,袁宏道.区域综合能源系统供需双侧多能博弈互动策略[J].电测与仪表,2023,60(12):20-26.
FAN Hong, YUAN Hongdao.Interactive strategy of bilateral multi-energy game between supply and demand of regional integrated energy system[J].Electric Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 20-26.
- [7] 郑云平,焦春雷,亚夏尔·吐尔洪,等.基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):65-74.
ZHENG Yunping, JIAO Chunlei, YASHAR Turhong, et al. Research on grid-structured coordinated energy storage control strategy based on new energy power generation[J].High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 65-74.
- [8] 樊伟杰,崔双喜,邱红桦.计及P2G-CCS和柔性负荷的综合能源系统低碳经济调度[J].现代电子技术,2023,46(5):132-138.
FAN Weijie, CUI Shuangxi, QIU Honghua. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering P2G-CCS and flexible load[J].Modern Electronic Technology, 2023, 46(5): 132-138.
- [9] 陈志,胡志坚,翁菡宏,等.基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J].电力自动化设备,2021,41(9):148-155.
CHEN Zhi, HU Zhijian, WENG Changhong, et al.Multi-stage planning of park-level integrated energy system based on ladder-type carbon trading mechanism[J].Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 148-155.
- [10] 王金锋,于广亮,姜炎君,等.基于阶梯碳交易的多微网电能合作运行优化策略[J].电网与清洁能源,2023,39(11):28-39.
WANG Jinfeng, YU Guangliang, JIANG Yanjun, et al. An optimization strategy for multi-microgrid power cooperative operation based on stepped carbon trading[J]. Power system and Clean Energy, 2023, 39(11): 28-39.
- [11] GUO H Y, CHEN Q X, XIA Q, et al.Modeling strategic behaviors of renewable energy with joint consideration on energy and tradable green certificate markets[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1898-1910.
- [12] 梁泽琪,周云,冯冬涵,等.考虑电碳绿证市场耦合的园区综合能源系统日前优化调度[J].电力建设,2023,44(12):43-53.
LIANG Zeqi, ZHOU Yun, FENG Donghan, et al.Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system in the park considering the coupling of electric carbon green certificate market [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 43-53.
- [13] 魏震波,杨超,李银江.参与多元耦合市场的电—气综合能源系统低碳经济调度[J].智慧电力,2023,51(5):8-14,22.
WEI Zhenbo, YANG Chao, LI Yinjiang. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas integrated energy system participating in multi-coupling market[J].Smart Power, 2023, 51(5): 8-14, 22.
- [14] WANG S, WANG S, ZHAO Q, et al.Optimal dispatch of integrated energy station considering carbon capture and hydrogen demand[J]. Energy, 2023, 269: 126981.
- [15] ZHANG X, BAI Y, ZHANG Y.Collaborative optimization for a multi-energy system considering carbon capture system and power to gas technology[J].Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 49: 101765.
- [16] 李欣,李涵文,陈德秋,等.储液式CCS耦合P2G的综合能源系统低碳经济调度[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(5):105-113.
LI Xin, LI Hanwen, CHEN Deqiu, et al.Low-carbon economic dispatch of integrated energy system based on liquid storage CCS coupled with P2G[J].Journal of Power System and Automation, 2024, 36(5): 105-113.
- [17] BAI Y, ZHANG Y, ZHANG X, et al.Business model and supporting policies for projects to implement carbon capture and power-to-gas technologies[J].Science of The Total Environment, 2023, 888: 164150.

(下转第136页)

on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3560–3566.

[17] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations—part I: theoretical foundation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 157–163.

[18] ZHENG J, HUANG H, PAN J. Detection of winding faults based on a characterization of the nonlinear dynamics of transformers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(1): 206–214.

[19] 曹辰, 徐博文, 李辉. 基于振动与电抗信息的变压器绕组形变状态综合监测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1518–1530.
CAO Chen, XU Bowen, LI Hui. Comprehensive monitoring method of transformer winding deformation state based on vibration and reactance information[J]. High Voltage Technology, 2022, 48(4): 1518–1530.

[20] 向志昊, 魏华. 基于声纹特征识别的电力变压器运维检测技术研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(20): 114–118.
XIANG Zhihao, WEI Hua. Research on power transformer operation and maintenance detection technology based on voiceprint feature recognition[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(20): 114–118.

[21] WU S, JI S, ZHANG Y, et al. A novel vibration frequency response

analysis method for mechanical condition detection of converter transformer windings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(7): 8176–8180.

[22] ZOLLANVARI A, KUNANBAYEV K M, BITAGHSIR S A, et al. Transformer fault prognosis using deep recurrent neural network over vibration signals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 2502011.

[23] HONG K, JIN M, HUANG H. Transformer winding fault diagnosis using vibration image and deep learning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 676–685.

[24] ZHOU H, HONG K, HUANG H, et al. Transformer winding fault detection by vibration analysis methods[J]. Applied Acoustics, 2016, 114: 136–146.

(责任编辑 杨海波)

收稿日期: 2023-12-14; 修改日期: 2024-07-11

作者简介: 钱国超(1981), 男, 云南曲靖人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事高电压试验技术、电气设备状态智能诊断与评估。

洪凯星(1985), 男, 通信作者, 浙江台州人, 博士, 副教授, 主要从事信号处理和自动化检测相关工作。

(上接第63页)

[18] 杨建宾, 谢丽蓉, 宋新甫, 等. 基于可再生能源的碳捕集-电转气协同运行方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(12): 70–78.
YANG Jianbin, XIE Lirong, SONG Xinfu, et al. Renewable energy based carbon capture-electricity-to-gas coordinated operation method[J]. Smart Power, 2022, 50(12): 70–78.

[19] 严中华, 王建功, 朱英刚, 等. 考虑碳排放流理论的风-碳捕集-电转气联合新型中长期调度方式[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 14–21.
YAN Zhonghua, WANG Jianguo, ZHU Yinggang, et al. Wind-carbon capture-electricity-to-gas joint new medium and long-term scheduling method considering carbon emission flow theory[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 14–21.

[20] HE L, LU Z, GENG L, et al. Environmental economic dispatch of integrated regional energy system considering integrated demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105525.

[21] ZHANG M L, WU Q W, WEN J Y, et al. Two-stage stochastic optimal operation of integrated electricity and heat system considering reserve of flexible devices and spatial-temporal correlation of wind power[J]. Applied Energy, 2020, 275: 115357.

[22] 蔡颖凯, 张冶, 曹世龙, 等. 面向综合需求响应的综合能源系统优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9): 65–72.
CAI Yingkai, ZHANG Ye, CAO Shilong, et al. Optimal scheduling of integrated energy systems for integrated demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 65–72.

[23] WEN Y, LUO Y, DONG X, et al. Thermal and electrical demand response based on robust optimization[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 225: 109883.

[24] LI K, YE N, LI S, et al. Distributed collaborative operation strategies in multiagent integrated energy system considering

integrated demand response based on game theory[J]. Energy, 2023, 273: 127137.

[25] 王仕炬, 刘天琪, 何川, 等. 基于舒适度的需求响应与碳交易的园区综合能源经济调度[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 1–7.
WANG Shiju, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Comprehensive energy economic dispatch of the park based on comfort demand response and carbon trading[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 1–7.

[26] 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): 3094–3106.
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): 3094–3106.

[27] LIN J, CAI R. Optimal planning for industrial park-integrated energy system with hydrogen energy industry chain[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(50): 19046–19059.

[28] 陈鸿琳, 刘新苗, 余浩, 等. 基于近似动态规划的海上风电制氢微网实时能量管理策略[J]. 电力建设, 2022, 43(12): 94–102.
CHEN Honglin, LIU Xinmiao, YU Hao, et al. Realtime energy management strategy for offshore wind power hydrogen production microgrid based on approximate dynamic programming[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(12): 94–102.

(责任编辑 李萌)

收稿日期: 2024-05-30; 修改日期: 2024-07-10

作者简介: 徐慧慧(1989), 女, 河南商丘人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行与低碳技术。

梁宁(1985), 男, 通信作者, 河南商丘人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统优化调度。